nagra.

Technischer Bericht 10-01

Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2

Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen

Oktober 2010

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
CH-5430 Wettingen
Telefon 056-437 11 11

www.nagra.ch

nagra.

Technischer Bericht 10-01

Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2

Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen

Oktober 2010

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
CH-5430 Wettingen
Telefon 056-437 11 11

www.nagra.ch

Vorliegender Bericht wurde von einem Projektteam erarbeitet bestehend aus Thomas Fries, Andreas Gautschi, Peter Gribi, Gerhard Mayer, Johannes Holocher, Andreas Poller, Jürg Schneider, Michael Schnellmann, Daniel Traber und Piet Zuidema mit Beiträgen von zahlreichen weiteren Personen (insbesondere Wilfried Albert, Petra Blaser, Peter Blümling, Urs Fischer, Bruno Kunz, Herfried Madritsch, Jens Mibus, Herwig Müller, Henry Naef, Bernhard Schwyn und Tim Vietor). Die Projektleitung für diesen Bericht hatte Piet Zuidema.

Der Bericht und dazu verwendete Grundlagenberichte haben von zahlreichen Fachdiskussionen und Reviews durch eine Vielzahl von Personen profitiert; diesen Personen sei an dieser Stelle für ihre Arbeit gedankt.

Für die Erstellung der in diesem Bericht verwendeten Karten wurden die folgenden digitalen Datensätze der swisstopo verwendet: GG25, DHM25, Vector25, Vector200, GeoKarte 1:500'000, Geologischer Atlas 1:25'000.

ISSN 1015-2636

"Copyright © 2010 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten.
Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw."

Zusammenfassung

Das Vorgehen zur Auswahl von Standorten für geologische Tiefenlager für alle Abfallkategorien in der Schweiz ist im Konzeptteil des Sachplans geologische Tiefenlager (Abkürzung SGT, BFE 2008) definiert. Das Verfahren sieht vor, in drei Etappen zur Wahl von Standorten für die Realisierung der benötigten geologischen Tiefenlager zu kommen. Das Sachplanverfahren mündet in der dritten Etappe für jeden Lagertyp in ein Rahmenbewilligungsverfahren, in welchem der Standort sowie das Lager in seinen Grundzügen festgelegt werden. In Etappe 1 hat die Nagra basierend auf Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit geologische Standortgebiete vorgeschlagen. Diesen Vorschlägen haben die Bundesbehörden in ihren Gutachten und Stellungnahmen zugestimmt; darauf basierend wird der Bundesrat seinen 2011 erwarteten Entscheid abstützen. Nach Einreichen der Vorschläge für SGT Etappe 1 hat die Nagra mit den Vorbereitungen für Etappe 2 begonnen. Ziel von Etappe 2 ist es, in den vom Bundesrat (in seinem Entscheid zu Etappe 1) festgelegten geologischen Standortgebieten und Planungsperimetern im Rahmen der Partizipation zusammen mit den Standortregionen und den betroffenen Kantonen Vorschläge zur Anordnung der Oberflächeninfrastruktur zu erarbeiten und mögliche Standorte zu identifizieren. Weiter hat die Nagra eine provisorische Sicherheitsanalyse für jeden Standort und einen sicherheitstechnischen Vergleich zwischen den Standorten durchzuführen. Darauf basierend und unter Berücksichtigung der Ergebnisse der sozioökonomisch-ökologischen Wirkungsstudien hat die Nagra mindestens je zwei Standorte pro Lagertyp für die weitere Bearbeitung in Etappe 3 vorzuschlagen. In Etappe 3 sind dann die vorgeschlagenen Standorte vertieft zu untersuchen, sodass für die beiden Lagertypen eine gut begründete Wahl der Standorte für die Rahmenbewilligungsgesuche möglich ist.

Um die Ziele der anstehenden Etappe 2 zu erreichen, muss der Kenntnisstand über die geologischen Verhältnisse an den Standorten die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalysen erlauben. Deshalb wird gemäss Konzept Sachplan als Vorbereitung für die Etappe 2 verlangt, dass die Nagra frühzeitig mit dem ENSI die Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen klärt. Der vorliegende Bericht der Nagra dokumentiert die entsprechende technisch-wissenschaftliche Beurteilung des Kenntnisstands zur Prüfung durch das ENSI. Der Schwerpunkt der Abklärungen liegt auf der Beurteilung des geologischen Kenntnisstands; dieser wird anhand von Prozessen und Parametern evaluiert, die für die Sicherheit und technische Machbarkeit relevant sind.

Bei der Beurteilung des Kenntnisstands geht es darum, zu prüfen, ob zusätzliche Kenntnisse (z.B. durch zukünftige Untersuchungen) zu einer entscheidrelevanten Veränderung führen könnten bezüglich der Wahl der in SGT Etappe 3 weiter zu betrachtenden Standorte. Für die in SGT Etappe 2 vorzunehmende sicherheitstechnische Prioritätensetzung werden die durch Dosisberechnungen bestimmten charakteristischen Dosisintervalle, die Beurteilung der technischen Machbarkeit sowie die Resultate der qualitativen Bewertung herangezogen. Dementsprechend erfolgt die Beurteilung des Kenntnisstands anhand von Testrechnungen zur Ermittlung von Dosisintervallen, anhand der Beurteilung der technischen Machbarkeit und einer Evaluation der qualitativen Bewertung. Mit den Testrechnungen wird für die verschiedenen Lagertypen in den betrachteten geologischen Standortgebieten der Verlauf der Dosiskurven für ein breites Spektrum von Rechenfällen ermittelt, mit denen neben der erwarteten Entwicklung (Referenzfall) auch die vorhandenen Ungewissheiten in den relevanten Prozessen und Parametern abdeckend erfasst werden. Dies erlaubt es, pro Lagertyp für die verschiedenen Standortgebiete die gemäss SGT verlangten charakteristischen Dosisintervalle zu ermitteln und diese bezüglich ihrer Eindeutigkeit zu den gemäss SGT verlangten Aussagen der sicherheitstechnischen Eignung und der sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit der Standortgebiete zu beurteilen. Der Kenntnisstand wird bezüglich der Beurteilung der Sicherheit als genügend betrachtet, wenn

eindeutige Aussagen gemacht werden können trotz der zur Abdeckung der vorhandenen Ungewissheiten sehr grosszügig gewählten Parameterbandbreiten. Diese Aussagen dürfen sich auch dann nicht ändern, wenn sich die Ungewissheiten und zugehörigen Parameterbandbreiten durch zukünftige Untersuchungen reduzieren. Weiter wird geprüft, ob der Kenntnisstand für die Beurteilung der technischen Machbarkeit ausreicht. Auch hierzu wird die Bedeutung der Ungewissheiten der relevanten Prozesse und Parameter evaluiert. Die Analyse des Kenntnisstands zeigt, dass der vorhandene Kenntnisstand unter Berücksichtigung der von der Nagra seit 2008 systematisch durchgeführten Untersuchungen sowie der zusätzlich geplanten Arbeiten für die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich genügt. Die Abklärungen zeigen für alle Standortgebiete, dass trotz der zur Erfassung der Ungewissheiten bewusst sehr grosszügig gewählten Bandbreiten eindeutige Aussagen bezüglich der sicherheitstechnischen Eignung und der sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit gemacht werden können und dass die technische Machbarkeit gegeben ist. Dies heisst, dass zusätzlich zu den von der Nagra bereits durchgeführten bzw. noch vorgesehenen Arbeiten keine weiteren Untersuchungen notwendig sind im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2.

Im Bericht werden auch die von der Nagra für SGT Etappe 2 begonnenen bzw. geplanten Arbeiten beschrieben. Diese Arbeiten werden voraussichtlich dazu beitragen, die in diesem Bericht aufgeführten Ungewissheiten und damit die Bandbreiten zumindest teilweise zu reduzieren. Die Arbeiten betreffen die Geometrie (inklusive die Strukturen) der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche sowie Informationen zu Rohstoffvorkommen und Zustandsparametern in den verschiedenen Standortgebieten, die Eigenschaften der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (inkl. Messungen zur Sorption), die hydrogeologischen Verhältnisse sowie die Langzeitentwicklung. Die seit Einreichung der Unterlagen zu SGT Etappe 1 durchgeführten Arbeiten sowie die begonnenen und geplanten Untersuchungen umfassen ergänzende Felduntersuchungen (Beteiligung an Untersuchungen in neuen Bohrungen Dritter, Seismik, Kartierungen), Auswertungen, Laboruntersuchungen (inkl. Untersuchungen an Kernen aus neuen Bohrungen) und Studien. Zusätzlich zu diesen auf die Geologie orientierten Arbeiten werden zu einem breiten Spektrum von Themen Untersuchungen durchgeführt, welche in die provisorischen Sicherheitsanalysen, die Beurteilung der technischen Machbarkeit und den sicherheitstechnischen Vergleich einfliessen werden. Dazu gehören insbesondere auch Arbeiten zur Lagerauslegung sowie zur Gasbildung und Gasfreisetzung.

Der Kenntnisstand wird in Etappe 2 bei der Überprüfung der von der Nagra eingereichten provisorischen Sicherheitsanalysen und des sicherheitstechnischen Vergleichs durch die Behörden nochmals beurteilt. Die Überprüfung durch die Behörden wird zum Entscheid beitragen, für welche Standorte in SGT Etappe 3 mit Felduntersuchungen weitere Informationen im Hinblick auf die Wahl der Standorte für die Rahmenbewilligungsgesuche für das SMA- bzw. HAA-Lager erhoben werden sollen. Dabei können bei Bedarf in SGT Etappe 3 auch an mehr als zwei Standorten für jeden Lagertyp Feldarbeiten durchgeführt werden; dies ist kompatibel mit den Vorgaben im Sachplan-Konzept.

Résumé

La démarche menant à la sélection des sites de stockage géologiques pour toutes les catégories de déchets radioactifs en Suisse est définie dans la conception générale du plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes » (OFEN 2008). La procédure prévue aboutira, en trois étapes successives, au choix des sites où les dépôts géologiques nécessaires seront implantés. La troisième étape du plan sectoriel débouchera pour chacun des types de dépôts sur une procédure de demande d'autorisation générale. Dans l'autorisation générale seront définis le site et les caractéristiques générales du dépôt. Au cours de l'étape 1, la Nagra a proposé plusieurs régions d'implantation géologiques sur la base de critères relevant de la sûreté et de la faisabilité technique. Dans leurs différents avis et rapports d'expertise, les autorités fédérales ont approuvé ces propositions. C'est sur cette base que le Conseil fédéral prendra sa décision, attendue en 2011. Après avoir soumis les propositions de régions d'implantation, la Nagra a commencé à préparer l'étape 2 du plan sectoriel. L'objectif de cette étape est, à l'intérieur de chaque région d'implantation et périmètre de planification approuvé par le Conseil fédéral à l'issue de l'étape 1, d'élaborer des propositions pour la réalisation des infrastructures de surface et d'identifier des sites d'implantation potentiels. Ceci sera effectué dans le cadre d'un processus participatif, en collaboration avec les régions d'implantation et les cantons concernés. Par ailleurs, la Nagra doit réaliser pour chaque site une analyse préliminaire de sûreté, ainsi qu'une étude comparative de la sûreté des sites. Sur cette base et en tenant compte des résultats des analyses d'impact socio-économique et écologique, la Nagra devra proposer au moins deux sites pour chacun des types de dépôt. Au cours de l'étape 3, ces sites feront l'objet de recherches plus approfondies sur le terrain, afin que les demandes d'autorisation générales pour les deux types de sites reposent sur une base scientifique solide.

Pour atteindre les objectifs de l'étape 2, les connaissances disponibles sur la géologie de chaque site doivent permettre de procéder aux analyses préliminaires de sûreté. La conception générale du plan sectoriel stipule donc qu'en préparation de l'étape 2, la Nagra doit déterminer suffisamment tôt, avec l'IFSN, si des recherches complémentaires sont nécessaires en vue de la réalisation des analyses préliminaires de sûreté. C'est au regard de cette exigence que le présent rapport documente, à l'attention de l'IFSN, l'évaluation scientifique et technique de l'état des connaissances. L'évaluation est axée sur l'état des connaissances relatives à la géologie; elle a été réalisée sur la base de processus et de paramètres pertinents pour la sûreté et la faisabilité technique.

L'évaluation de l'état des connaissances a pour objectif de vérifier si des données supplémentaires (que l'on obtiendrait par exemple par le biais de nouvelles investigations) mèneraient à une décision différente concernant la sélection des sites à étudier de manière approfondie au cours de l'étape 3 du plan sectoriel. Afin d'obtenir, comme il est exigé à l'étape 2, un classement des sites basé sur des critères de sûreté, on fait intervenir d'une part les intervalles de doses caractéristiques déterminés par le biais de calculs de doses, d'autre part l'évaluation de la faisabilité technique, ainsi que les résultats de l'appréciation qualitative. Pour déterminer l'état des connaissances, on a par conséquent effectué des calculs numériques permettant d'obtenir les intervalles de doses, on a étudié la faisabilité technique et procédé à une évaluation de l'appréciation qualitative. Les calculs numériques permettent de déterminer, pour les différents types de sites dans les régions d'implantation géologiques envisagées, l'évolution des doses pour une large palette de situations, qui couvrent non seulement l'évolution prévue (situation de référence), mais aussi les incertitudes inhérentes aux différents processus et paramètres. Ceci permet d'obtenir, comme l'exige le plan sectoriel, les intervalles de doses caractéristiques pour chacun des types de dépôts dans les différentes régions d'implantation et d'estimer si ceux-ci permettent bien, comme l'exige le plan sectoriel, de déterminer d'une part si le site est apte à

accueillir un dépôt sur la base de critères de sûreté et d'autre part si les régions d'implantation sont comparables sur le plan de la sûreté. L'état des connaissances est jugé suffisant s'il est possible d'affirmer sans ambigüité la sûreté du site, ceci malgré l'amplitude très large des variations de paramètres – une mesure qui vise à prendre en compte les incertitudes – étant entendu que ces affirmations ne seront pas modifiées lorsque les incertitudes et l'amplitude des variations de paramètres seront plus faibles à l'issue des recherches effectuées à l'avenir. Ce rapport concerne également l'état des connaissances au regard de l'évaluation de la faisabilité technique. Ici aussi, on évalue l'importance des incertitudes dans les processus et paramètres concernés. L'analyse de l'état des connaissances montre que, si l'on tient compte des recherches en cours ou planifiées par la Nagra depuis 2008, l'état des connaissances est suffisant pour les analyses préliminaires de sûreté et l'étude comparative de la sûreté des sites. Les études réalisées montrent, pour toutes les régions d'implantation, qu'il est possible d'effectuer des affirmations claires et sans ambigüités concernant d'une part l'aptitude des sites à accueillir un dépôt du point de vue de la sûreté et d'autre part l'équivalence des sites sur le plan de la sûreté – ceci malgré l'amplitude des variations de paramètres qui permettent de prendre en compte les incertitudes. Les études indiquent également que la faisabilité technique est assurée. Cela signifie que des recherches supplémentaires, complétant celles qui ont déjà été prévues par la Nagra, ne sont pas nécessaires pour effectuer les analyses de sûreté prévues à l'étape 2 du plan sectoriel.

Ce rapport présente également les travaux en cours ou planifiés par la Nagra au cours de l'étape 2 du plan sectoriel. Ceux-ci vont vraisemblablement contribuer à réduire, du moins partiellement, les incertitudes évoquées dans le présent rapport, et par là l'amplitude des variations de paramètres. Ces travaux concernent la géométrie (y compris les structures) des roches d'accueil et de la zone de confinement géologique, ainsi que la compilation d'informations sur les gisements de matières premières et l'état géologique actuel dans les différentes régions d'implantation, les propriétés des roches d'accueil et de la zone de confinement géologique (y compris au regard de la sorption), les conditions hydrogéologiques ainsi que l'évolution à long terme. Les recherches menées depuis le dépôt des dossiers relatifs à l'étape 1 du plan sectoriel, de même que les investigations en cours ou planifiées, comprennent des campagnes de reconnaissance complémentaires (participation à de nouveaux forages effectués par d'autres organismes, sismique, cartographie), des analyses de données, des recherches en laboratoire (y compris l'examen des carottes provenant des nouveaux forages) et diverses études. En complément de ces travaux plus spécifiquement axés sur la géologie, la Nagra poursuit des recherches dans une gamme étendue de domaines, dont les résultats serviront aux analyses préliminaires de sûreté, à l'évaluation de la faisabilité technique et à l'étude comparative de la sûreté des sites. Parmi ces domaines de recherche, on peut citer en particulier l'architecture du stockage ainsi que les mécanismes de production et de relâchement des gaz.

L'état des connaissances sera de nouveau évalué par les autorités au cours de l'étape 2, lorsque la Nagra leur aura soumis les analyses préliminaires de sûreté et l'étude comparative de la sûreté des sites. L'examen des autorités contribuera au processus de sélection des sites sur lesquels, à l'étape 3 du plan sectoriel, on devra réaliser des campagnes de reconnaissance géologiques supplémentaires afin d'obtenir les informations détaillées qui permettront d'élaborer les demandes d'autorisations générales pour le site de DFMA et celui de DHA. Si cela s'avère nécessaire, il sera possible, à l'étape 3 du plan sectoriel, de mener des recherches sur le terrain sur plus de deux sites pour chaque type de dépôt. Ceci est compatible avec les exigences de la conception générale du plan sectoriel.

Abstract

The procedure for selecting repository sites for all categories of radioactive waste in Switzerland is defined in the conceptual part of the Sectoral Plan for Deep Geological Repositories (SFOE 2008). The Plan foresees a selection of sites in three stages, the third of which leads to a General Licence Application procedure that defines both the sites and the main features of the repositories. In Stage 1, Nagra proposed geological siting regions based on criteria relating to safety and engineering feasibility. These siting proposals were subsequently evaluated and approved by the responsible federal authorities in their statements. The Swiss Government (the Federal Council) is expected to decide on the siting proposals in 2011 based on these statements. After submittal of the siting proposals for Stage 1, Nagra has started preparations for Stage 2. Working together with the siting regions and the affected Cantons in the context of a participatory process, the objective of Stage 2 is to prepare proposals for the location of the surface facilities within the planning perimeters defined by the Federal Council in its decision on Stage 1 and to identify potential sites. Nagra also has to carry out a provisional safety analysis for each site and a safety-based comparison of the sites. Based on this, and taking into account the results of the socio-economic-ecological impact studies, Nagra then has to propose at least two sites for each repository type to be carried through to Stage 3. The proposed sites will then be investigated in more detail in Stage 3 to ensure that the selection of the sites for the General Licence Applications is well founded.

In order to realise the objectives of the upcoming Stage 2, the state of knowledge of the geological conditions at the sites has to be sufficient to perform the provisional safety analyses. Therefore, in preparation for Stage 2, the conceptual part of the Sectoral Plan requires Nagra to clarify with ENSI, at an early stage, the need for additional investigations aimed at providing input for the provisional safety analyses. The purpose of the present report is to document Nagra's technical-scientific assessment of this need so that ENSI can subsequently evaluate Nagra's assessment. The focus is on evaluating the geological information based on processes and parameters that are relevant for safety and engineering feasibility.

In evaluating the state of knowledge the key question is whether additional information (e.g. from future investigations) could lead to a different decision regarding the selection of the sites to be carried through to Stage 3. In order to set priorities based on safety, as required for Stage 2, it is necessary to use the characteristic dose intervals determined with the help of dose calculations, an evaluation of engineering feasibility and the results of a qualitative assessment. Accordingly, the state of knowledge is evaluated using test calculations to determine dose intervals, an assessment of the engineering feasibility and an evaluation of the qualitative assessment. The test calculations are used to derive dose curves for a wide spectrum of calculation cases for the different repository types in the geological siting regions under consideration. Besides the expected evolution (reference case), the calculations also cover existing uncertainties in the relevant processes and parameters. This allows the characteristic dose intervals required by the Sectoral Plan to be determined for the different siting regions for each repository type; these dose intervals are evaluated with respect to their unambiguousness concerning two aspects required by the Sectoral Plan: safety-related suitability and safety-related equivalence of the siting regions. For the purpose of evaluating safety, the state of knowledge is considered to be sufficient if clear, unambiguous statements can be made despite the fact that the parameter ranges are selected generously to allow for existing uncertainties and if these statements will not change if the uncertainties and associated parameter ranges are reduced through future investigations. Whether the information used to assess engineering feasibility is sufficient is also considered, along with an evaluation of the significance of uncertainties in the relevant processes and parameters. The analysis of the state of knowledge shows that, taking into account

the investigations performed by Nagra since 2008 and those planned for the near future, the available information is sufficient for the provisional safety analyses and the safety-based comparison of the siting regions. For all siting regions, concrete statements can be made regarding suitability and equivalence of sites from the point of view of safety despite the deliberate selection of wide parameter ranges to take into account uncertainties; engineering feasibility has also been demonstrated. This means that, besides the work already completed or planned by Nagra, no additional investigations will be necessary for the provisional safety analyses to be performed in Stage 2 of the Sectoral Plan.

The report also describes the work already initiated and planned by Nagra for Stage 2 of the Sectoral Plan. It is envisaged that this work will contribute to reducing the uncertainties mentioned in this report, thereby at least partially reducing the corresponding parameter bandwidths. This work relates to the geometry (including structures) of the host rocks and the effective containment zones and to information on deposits of raw materials and on state parameters in the different siting regions, the properties of the host rocks and the effective containment zones (including sorption measurements), hydrogeological conditions and long-term evolution. The work carried out since submission of the documentation for Stage 1 of the Sectoral Plan and the initiated and planned activities comprise supplementary field investigations (participation in investigations in new boreholes drilled by third parties, seismics, mapping), analyses, laboratory programmes (including investigations on cores from new boreholes) and other studies. In addition to these activities that are focused on geology, investigations will be carried out on a wide range of topics to provide input for the provisional safety analyses, the evaluation of engineering feasibility and the safety-based comparison. In particular, this includes studies on repository layout and gas formation and release.

The state of knowledge will be reviewed once again by the authorities in Stage 2 when Nagra submits the provisional safety analyses and the safety-based comparison of the sites. The review by the authorities will contribute to the decision on the sites for which field investigations will be conducted in Stage 3 with the aim of obtaining more detailed information for identifying the sites for the General Licence Applications for the L/ILW and HLW repositories. If necessary, field work can be carried out at more than two sites for each repository type in Stage 3; this is compatible with the requirements set out in the conceptual part of the Sectoral Plan.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung I
Résumé III
Abstract V
Inhaltsverzeichnis VII
Tabellenverzeichnis XI
Figurenverzeichnis XIV

1 Einleitung: Ziel und Vorgaben 1
1.1 Einleitung und Zielsetzung des Berichts 1
1.2 Aufbau des Berichts 3
1.3 Gesetzliche und behördliche Vorgaben 3
1.3.1 Vorgaben zur Abklärung der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen in Etappe 2 4
1.3.2 Übergeordnete Vorgaben zum Ziel und Umfang der provisorischen Sicherheitsanalysen und zum sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 5
1.3.3 Spezifische Vorgaben zum Vergleich der Standorte in Etappe 2 6

2 Vorgehen bei der Beurteilung der für die provisorischen Sicherheitsanalysen notwendigen Unterlagen 11
2.1 Unterlagen zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle 11
2.2 Unterlagen zur Beurteilung der technischen Machbarkeit 16
2.3 Unterlagen für die qualitative Bewertung 17

3 Rahmenbedingungen und Festlegungen 19
3.1 Wichtige Grundlagen und Konzepte 19
3.2 Festlegung der relevanten Prozesse und Parameter 23

4 Informationen und Kenntnisstand 43
4.1 Genereller Überblick 43
4.1.1 Ziel, Ausgangspunkt und Gliederung der Informationen im vorliegenden Kapitel 43
4.1.2 Genereller Überblick des Kenntnisstands 43
4.2 Geometrie und Strukturen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, Informationen zu Nutzungskonflikten und ausgewählten Zustandsparametern 52
4.2.1 Relevante Prozesse und Parameter 52
4.2.2 Evaluation der Information zu den Prozessen und Parametern sowie des entsprechenden Kenntnisstands 54
4.3 Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs 65
4.3.1 Relevante Prozesse und Parameter 65

4.3.2 Evaluation der Information zu den Prozessen und Parametern sowie des entsprechenden Kenntnisstands ... 68
4.4 Hydrogeologische Verhältnisse ... 85
4.4.1 Relevante Prozesse und Parameter ... 85
4.4.2 Evaluation der Information zu den Prozessen und Parametern sowie des entsprechenden Kenntnisstands ... 86
4.5 Geologische Langzeitentwicklung ... 97
4.5.1 Relevante Prozesse und Parameter ... 97
4.5.2 Evaluation der Information zu den Prozessen und Parametern sowie des entsprechenden Kenntnisstands ... 98
4.6 Eigenschaften der technischen Barrieren ... 101
4.6.1 Relevante Prozesse und Parameter ... 101
4.6.2 Evaluation der Information zu den Prozessen und Parametern sowie des entsprechenden Kenntnisstands ... 102
4.7 Biosphäre ... 109
4.7.1 Relevante Prozesse und Parameter ... 109
4.7.2 Evaluation der Information zu den Prozessen und Parametern sowie des entsprechenden Kenntnisstands ... 110

5 Beurteilung der technischen Machbarkeit des SMA- und HAA-Lagers ... 115
5.1 Einleitung ... 115
5.2 Beurteilung der technischen Machbarkeit bezüglich der Standsicherheit der Lagerkammern ... 117
5.2.1 Möglichkeiten zur Auslegung der Lagerkammern ... 117
5.2.2 Beurteilung der Standfestigkeit der Lagerkammern für die verschiedenen Standortgebiete ... 122
5.3 Beurteilung der technischen Machbarkeit bezüglich des Platzangebots ... 123
5.3.1 Möglichkeiten zur Anordnung der Lagerkammern ... 123
5.3.2 Beurteilung der technischen Machbarkeit bezüglich des Platzangebots ... 126
5.4 Beurteilung der technischen Machbarkeit bezüglich der untertägigen Erschliessung der Lagerfelder ... 129
5.4.1 Möglichkeiten der untertägigen Erschliessung der Lagerfelder ... 129
5.4.2 Beurteilung der technischen Machbarkeit bezüglich der untertägigen Erschliessung ... 130

6 Unterlagen zur Beurteilung der Sicherheit ... 133
6.1 Überblick ... 133
6.2 Verhalten des Barrierensystems bezüglich ausgewählter Aspekte (Systemanalysen) ... 134
6.2.1 Überblick ... 134
6.2.2 Ableitung von Parameterwerten für die Sicherheitsanalyse ... 138
6.2.3 Evaluation der lagerbedingten Einflüsse ... 142
6.2.4 Evaluation der Einflüsse von bautechnischen Auslegungsvarianten ... 146
6.2.5 Evaluation der geologischen Langzeitentwicklung ... 151
6.2.6 Evaluation des Langzeitverhaltens des Nahfelds ... 154

6.2.7 Mögliche Auswirkungen von Nutzungskonflikten auf die Langzeitsicherheit ... 160
6.3 Rechenfälle für die Testrechnungen ... 161
6.4 Annahmen und Unterlagen für die Testrechnungen ... 166
6.4.1 Einleitung ... 166
6.4.2 Nahfeld ... 166
6.4.3 Geosphäre ... 168
6.4.4 Biosphäre ... 171
6.5 Resultate der Testrechnungen als Input zur Ermittlung der Dosisintervalle ... 173
6.5.1 HAA-Lager ... 173
6.5.2 SMA-Lager ... 174
6.5.3 Kombilager ... 176

7 Evaluation des Kenntnisstands bezüglich Sicherheit und technischer Machbarkeit ... 177
7.1 Evaluation des Kenntnisstands im Hinblick auf die Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle zur Beurteilung der Sicherheit (Resultate der Testrechnungen) ... 177
7.2 Evaluation des Kenntnisstands im Hinblick auf die Beurteilung der technischen Machbarkeit ... 189
7.3 Evaluation des Kenntnisstands im Hinblick auf die qualitative Bewertung ... 190

8 Arbeiten für SGT Etappe 2 zur Überprüfung, Vertiefung und Ergänzung der Informationen für die provisorischen Sicherheitsanalysen, für die Beurteilung der technischen Machbarkeit und den sicherheitstechnischen Vergleich ... 191
8.1 Überblick ... 191
8.2 Geometrie und Strukturen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, Informationen zu Nutzungskonflikten und ausgewählten Zustandsparametern ... 192
8.3 Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ... 195
8.4 Hydrogeologische Verhältnisse ... 199
8.5 Geologische Langzeitentwicklung ... 201
8.6 Arbeiten zur Anlagenplanung ... 204

9 Schlussfolgerungen ... 205

10 Referenzverzeichnis ... 209

Anhang A1: Sicherheitsfunktionen und Prinzipien ... A-1

Anhang A2: Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter und Gegenüberstellung mit den bei der Auswahl von geologischen Standortgebieten verwendeten Indikatoren ... A-3

Anhang A3: Grundlagen Geologie: Übersichten, wirtgesteins- und standortspezifische Zusammenstellungen A-25
A3.1 Übersicht der Datenquellen: Seismiklinien, Bohrungen, Tunnels, geologische Karten A-25
A3.2 Unterlagen zur Beurteilung potenzieller Nutzungskonflikte A-26
A3.3 Geologische Modelle der Wirtgesteine in der Nordschweiz und zugrundeliegende Datenquellen A-29
A3.4 Ergebnisse von hydraulischen Tests in den Wirtgesteinen der Nordschweiz, in ihren Rahmengesteinen und in den umgebenden regionalen Tiefenaquiferen sowie vorgeschlagene Werte für die geologischen Standortgebiete A-32
A3.5 Geologische Grundlagen der Standortgebiete A-45
A3.5.1 Geologische Grundlagen des Standortgebiets Südranden A-45
A3.5.2 Geologische Grundlagen des Standortgebiets Zürich Nord-Ost A-51
A3.5.3 Geologische Grundlagen des Standortgebiets Nördlich Lägeren A-60
A3.5.4 Geologische Grundlagen des Standortgebiets Bözberg A-69
A3.5.5 Geologische Grundlagen des Standortgebiets Jura-Südfuss A-74
A3.5.6 Geologische Grundlagen des Standortgebiets Wellenberg A-82

Anhang A4: Rechenfälle für die Testrechnungen A-85

Anhang A5: Modellkonzepte für die Transportpfade und Erläuterungen zur Berücksichtigung der Ungewissheiten in den Rechenfällen A-126
A5.1 Geologisches Standortgebiet Südranden A-128
A5.2 Geologisches Standortgebiet Zürich Nord-Ost A-130
A5.3 Geologisches Standortgebiet Nördlich Lägeren A-134
A5.4 Geologisches Standortgebiet Bözberg A-136
A5.5 Geologisches Standortgebiet Jura-Südfuss A-138
A5.6 Geologisches Standortgebiet Wellenberg A-142

Anhang A6: Wichtige Inputdaten für die Testrechnungen A-145
A6.1 Inventar A-145
A6.2 Nahfelddaten A-156
A6.2.1 SMA und LMA A-156
A6.2.2 HAA A-158
A6.3 Geosphärendaten A-160
A6.4 Biosphärendaten A-165

Anhang A7: Resultate der Testrechnungen A-169

Anhang A8: Liste der verwendeten Abkürzungen A-182

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.3-1: Vorgaben des ENSI bezüglich der Abklärung der Notwendigkeit von ergänzenden Untersuchungen in SGT Etappe 2. 5

Tab. 1.3-2: Vorgaben des ENSI bezüglich des Vergleichs von Standorten in SGT Etappe 2..... 7

Tab. 1.3-3: Vorgaben des ENSI bezüglich des quantitativen Parametervariationsverfahrens für den Vergleich von Standorten in SGT Etappe 2..... 8

Tab. 3.1-1: Von der Nagra in SGT Etappe 1 vorgeschlagene geologische Standortgebiete mit ihren Wirtgesteinen und Rahmengesteinen. 21

Tab. 3.2-1: Strukturierte Liste der relevanten Prozesse und Parameter mit Hinweisen auf die Kapitel, in denen der zugehörige Kenntnisstand dargelegt und im Hinblick auf die Testrechnungen und die Abklärungen der technischen Machbarkeit beurteilt wird und in denen die Eindeutigkeit der Aussagen zur Sicherheit ("sicherheitstechnische Eignung" bzw. "sicherheitstechnische Gleichwertigkeit") und zur technischen Machbarkeit evaluiert werden..... 30

Tab. 4.2-1: Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zur Geometrie der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (inkl. vorhandene geologische Strukturen) sowie zu Nutzungskonflikten und zu ausgewählten Zustandsparametern. 53

Tab. 4.2-2: Wirtgesteinstemperaturen aus Bohrungsuntersuchungen. 62

Tab. 4.3-1: Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zu den Eigenschaften der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche. 67

Tab. 4.3-2: Hydraulische Durchlässigkeiten der verschiedenen Wirtgesteine. 70

Tab. 4.3-3: Transmissivitäten von Störungszonen (inkl. Kluftzonen) in den verschiedenen Wirtgesteinen. 76

Tab. 4.4-1: Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zu den hydrogeologischen Verhältnissen in den geologischen Standortgebieten. 85

Tab. 4.5-1: Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zur regionalen und lokalen Langzeitentwicklung in den geologischen Standortgebieten..... 97

Tab. 4.6-1: Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zu den technischen Barrieren. 102

Tab. 4.7-1: Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zur Biosphäre. 110

Tab. 4.7-2: Referenz- und alternative Exfiltrationsorte für die verschiedenen geologischen Standortgebiete (heutige Situation). 111

Tab. 5.1-1: Die für die Beurteilung der technischen Machbarkeit relevanten geologischen Prozesse und Parameter mit Bezug auf die Standorteigenschaften..... 116

Tab. 5.2-1: Die in der Planung verwendeten Querschnitte der Lagerkavernen des SMA-Lagers, die von einer Belegung der Lagerkammern mit standardisierten Lagercontainern LC1 ausgehen..... 118

Tab. 5.2-2: Provisorische Planungsannahmen der SMA-Lagerkavernen mit Kavernen-Querschnitten in Abhängigkeit der Gebirgseigenschaften und der Überlagerung bzw. der erwarteten Gebirgsspannungen. 119

Tab. 6.2-1: Die für die Systemanalysen relevanten Prozesse und Parameter..... 135

Tab. 6.2-2: Berücksichtigung der relevanten geologischen Prozesse und Parameter bei der Festlegungung wichtiger Geosphärenparameter für die Testrechnungen..... 139

Tab. 6.2-3: Berücksichtigung der relevanten geologischen Prozesse und Parameter bei der Evaluation der Langzeitentwicklung bezüglich Hebung/Erosion. 152

Tab. 6.2-4: Berücksichtigung der relevanten geologischen Prozesse und Parameter bei der Festlegung wichtiger Nahfeldparameter. 155

Tab. 6.2-5: Zeitliche Entwicklung der Eigenschaften des zementierten Nahfelds im SMA- bzw. LMA-Lager und der sorbierenden Minerale in Abhängigkeit des Wasserflusses. 157

Tab. 6.3-1: Übersicht über die in den Testrechnungen für die verschiedenen Standortgebiete berücksichtigten Kategorien von Rechenfällen. 165

Tab. A2-1: Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter aus den Sicherheitsfunktionen und aus den übergeordneten Prinzipien. A-4

Tab. A3-1: Ergebnisse von hydraulischen Tests in den Wirtgesteinen der Nordschweiz, in ihren Rahmengesteinen und in den umgebenden Tiefenaquiferen. A-32

Tab. A3-2: Vorgeschlagene standortspezifische Werte für die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit der Wirt- und oberen Rahmengesteine, für die Transmissivität der kleinräumigen transmissiven Elemente und für die Transmissivität von grösseren Störungszonen im Bereich der Wirt- und oberen Rahmengesteine. A-39

Tab. A3-3: Tiefenlage des Wirtgesteins im Standortgebiet Südranden. A-48

Tab. A3-4: Mächtigkeit der Wirtgesteine, der Oberen und Unteren Rahmengesteine im Standortgebiet Südranden. A-49

Tab. A3-5: Tiefenlage der Wirtgesteine im Standortgebiet Zürich Nord-Ost..... A-56

Tab. A3-6: Mächtigkeit der Wirtgesteine, der Oberen und Unteren Rahmengesteine im Standortgebiet Zürich Nord-Ost. A-57

Tab. A3-7: Tiefenlage der Wirtgesteine im Standortgebiet Nördlich Lägeren. A-65

Tab. A3-8: Mächtigkeit der Wirtgesteine, der Oberen und Unteren Rahmengesteine im Standortgebiet Nördlich Lägeren. A-66

Tab. A3-9: Tiefenlage der Wirtgesteine im Standortgebiet Bözberg. A-72

Tab. A3-10: Mächtigkeit der Wirtgesteine, der Oberen und Unteren Rahmengesteine im Standortgebiet Bözberg. A-72

Tab. A3-11: Tiefenlage der Wirtgesteine im Standortgebiet Jura-Südfuss..... A-79

Tab. A3-12: Mächtigkeit der Wirtgesteine, der Oberen und Unteren Rahmengesteine im Standortgebiet Jura-Südfuss. A-79

Tab. A4-1: Liste der Prozesse und Parameter, für welche die Eindeutigkeit der Aussagen ("sicherheitstechnische Eignung" bzw. "sicherheitstechnische Gleichwertigkeit") anhand von spezifischen Rechenfällen zur Erfassung der Bandbreiten evaluiert wird (vgl. Tab. 3.2-1). A-86

Tab. A4-2: Liste der ENSI-Rechenfälle, der damit berücksichtigten Prozesse und Parameter aus Tab. 3.2-1 und Hinweise auf die dabei verwendeten Daten. A-91

Tab. A4-3: Liste der Geosphären-basierten Rechenfälle, der damit berücksichtigten geologischen Prozesse und Parameter und Angabe der wichtigsten dabei verwendeten Parameter. A-92

Tab. A4-4: Zuweisung von Transportparametern für vertikale Transportpfade mit standortspezifischer Aufteilung in Abschnitte mit höherem und niedrigerem Tonmineralgehalt (vgl. Tab. A4-3). A-125

Tab. A6-1: MIRAM Abfallsorten. A-145

Tab. A6-2a: Zuteilung der SMA-Abfallsorten auf zwei Lagerebenen: Abfallsorten in Lagerkammern in der unteren Lagerebene (SMA-u) ausgehend von Tab. A6-1. ..... A-151

Tab. A6-2b: Zuteilung der SMA-Abfallsorten auf zwei Lagerebenen: Abfallsorten in Lagerkammern in der oberen Lagerebene (SMA-o), ausgehend von Tab. A6-1. ..... A-152

Tab. A6-3: Fraktionale Auflösungsraten für UO_2/MOX (Brennstoff)-Matrizen und für die Brennelementhüllrohre (Referenzwerte). A-155

Tab. A6-4: Löslichkeitslimiten für das Zementnahfeld LMA A-156

Tab. A6-5: Sorptionskoeffizienten für das Zementnahfeld SMA und LMA. A-157

Tab. A6-6: Löslichkeitslimiten für das BE/HAA-Nahfeld A-158

Tab. A6-7: Sorptions- und Diffusionskoeffizienten, sowie zugängliche Porositäten für das BE/HAA-Nahfeld A-159

Tab. A6-8: Tongehalte und Kationenaustauschkapazitäten (CEC) der Wirtgesteine A-160

Tab. A6-9: Sorptionskoeffizienten der Wirtgesteine A-161

Tab. A6-10: Totale Porositäten der Wirtgesteine mit Ungewissheiten. A-163

Tab. A6-11: Effektive Diffusionskoeffizienten der Wirtgesteine. A-164

Tab. A6-12: Biosphären-Transferkoeffizienten (BTK) für den Biosphären-Referenzfall. ... A-166

Tab. A6-13: Biosphären-Transferkoeffizienten (BTK) für den ENSI-Fall mit einem wärmeren und trockeneren Klima. A-167

Tab. A6-14: Biosphären-Transferkoeffizienten (BTK) für den ENSI-Fall mit einem eiszeitlichen Klima. A-168

Figurenverzeichnis

Fig. 1.3-1: Vorgaben des ENSI bzgl. der Bestimmung des charakteristischen Dosisintervalls mit Hilfe des standardisierten Parametervariationsverfahren. 9

Fig. 2.1-1: Schematische Illustration der Auswirkung verschiedener Bandbreiten auf die ermittelten Dosisintervalle für verschiedene Standortgebiete (in Farben blau, gelb und grün) und daraus abgeleitete Aussagen bezüglich der "sicherheits-technischen Eignung" bzw. "sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit" der Standortgebiete. 12

Fig. 3.1-1: Klassifizierung von geologischen Elementen im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Hinblick auf die Anordnung der Lagerkammern. 22

Fig. 3.2-1: Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter aus den Sicherheits-funktionen und den übergeordneten Prinzipien und ihre Verwendung in der provisorischen Sicherheitsanalyse und im sicherheitstechnischen Vergleich. 25

Fig. 4.1-1: Überblick der geologischen Standortgebiete und der Datenlage (Seismiklinien, Bohrungen, Tunnels, geologische Karten). 45

Fig. 5.2-1 Prinzipiell mögliche Varianten des Ausbaus für die BE/HAA-Lagerstollen. 121

Fig. 5.2-2: Konzept für den Ausbau der BE/HAA-Lagerstollen für das Referenzkonzept in grossen Lagertiefen oder bei ungünstigen geomechanischen Bedingungen..... 122

Fig. 5.3-1 Grundsätzliche Anordnung eines SMA-Lagers mit zwei Lagerebenen. 124

Fig. 5.3-2: Schematische Darstellung der Anordnung der Lagerkammern für das HAA-Lager (a) und das SMA-Lager (b) unter Annahme äusserst ungünstiger räumlicher Randbedingungen (drei Familien von anordnungsbestimmenden Störungszonen). 125

Fig. 5.4-1 Prinzipielle Möglichkeiten der Auslegung der Zugangsbauwerke zur Erschliessung der Lagerfelder. 129

Fig. 6.1-1: Informationsfluss bei der Erarbeitung der Grundlagen für die Dosisrechnungen. 134

Fig. 6.2-1: Schematische Darstellung der zeitabhängigen Degradation der Bentonit-Verfüllung im Bereich der Zementverkleidung zu einem Zeitpunkt lange nach Verfüllung/Verschluss der BE/HAA-Lagerstollen. 148

Fig. 6.2-2: Berechnete Dosen für den BE-Teil des HAA-Lagers mit und ohne Spritzbetonausbau ('Liner'). 149

Fig. 6.2-3: Berechnete Dosen für das HAA-Lager für den Fall einer hypothetisch hohen hydraulischen Durchlässigkeit der Auflockerungszone von 10^{-8} m/s. 150

Fig. 7.1-1: Übersicht der Dosiskurven gemäss den Vorgaben des ENSI für die verschiedenen geologischen Standortgebiete sowie resultierende charakteristische Dosisintervalle. 178

Fig. 7.1-2: Zusammenfassende Darstellung der charakteristischen Dosisintervalle gemäss den Vorgaben des ENSI für die verschiedenen geologischen Standortgebiete (aus Fig. 7.1-1)..... 180

Fig. 7.1-3: Übersicht der Dosiskurven für die verschiedenen geologischen Standortgebiete sowie resultierende "What if?"-Dosisintervalle (ENSI-Fälle, weitere alternative Fälle und "What if?"-Fälle; Dosismaxima innerhalb des Betrachtungszeitraums). 182

Fig. 7.1-4: Übersicht der Dosiskurven für die verschiedenen geologischen Standortgebiete sowie resultierende Dosisintervalle ohne Berücksichtigung der Betrachtungszeiträume (ENSI-Rechenfälle; mit Berücksichtigung der Dosismaxima auch ausserhalb des Betrachtungszeitraums). 184

Fig. 7.1-5: Übersicht der Dosiskurven für die verschiedenen geologischen Standortgebiete sowie resultierende "What if?"-Dosisintervalle ohne Berücksichtigung der Betrachtungszeiträume (ENSI-Fälle, weitere alternative Fälle und "What if?"-Fälle; mit Berücksichtigung der Dosismaxima auch ausserhalb des Betrachtungszeitraums). 186

Fig. 7.1-6: Gegenüberstellung der verschiedenen Typen von Dosisintervallen für die verschiedenen geologischen Standortgebiete und Lagertypen. 188

Fig. A3-1: Übersichtskarte der Datenquellen in und im Umfeld der geologischen Standortgebiete (Seismiklinien, Bohrungen, Tunnels, geologische Karten). A-25

Fig. A3-2: Kohlenwasserstoffressourcen und Salzvorkommen. A-26

Fig. A3-3: Karte der normierten geothermischen Produktivität. A-27

Fig. A3-4: Karte mit Mineral- und Thermalwasservorkommen im Abstand von 10 km zu den Entwürfen der Planungsperimeter gemäss ARE (2009). A-28

Fig. A3-5: Opalinuston: Geologisches Modell (Tiefenlage und regionale Strukturen Basis Opalinuston) und zugrundliegende Datenquellen (Bohrungen, Aufschluss- und Sammelprofile, Seismik). A-29

Fig. A3-6: 'Brauner Dogger': Geologisches Modell (Tiefenlage Top Opalinuston, regionale Strukturen Basis Malm, Faziesgrenzen) und zugrundliegende Datenquellen (Bohrungen, Aufschluss- und Sammelprofile, Seismik). A-30

Fig. A3-7: Effinger Schichten: Geologisches Modell (Tiefenlage und regionale Strukturen Basis Malm) und zugrundliegende Datenquellen (Bohrungen, Aufschluss- und Sammelprofile, Seismik). A-31

Fig. A3-8: Schematisches stratigraphisch-hydrogeologisches Sammelprofil für das Standortgebiet Südranden (SMA). A-45

Fig. A3-9: Übersichtskarte 1:100'000 mit der Datengrundlage für das Standortgebiet Südranden (und Zürich Nord-Ost). A-46

Fig. A3-10: Tiefenlage Opalinuston unter Terrain (Mitte Opalinuston) im Standortgebiet Südranden im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit. A-47

Fig. A3-11: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage Mitte Opalinuston unter Top Fels im Standortgebiet Südranden. A-50

Fig. A3-12: Schematisches stratigraphisch-hydrogeologisches Sammelprofil für das Standortgebiet Zürich Nord-Ost (HAA und SMA). A-51

Fig. A3-13: Vereinfachte schematische Darstellung der sedimentären Architekturelemente der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' der Bohrung Benken als Grundlage für die Konzeptualisierung in der Sicherheitsanalyse. A-52

Fig. A3-14: Übersichtskarte 1:100'000 mit der Datengrundlage für das Standortgebiet Zürich Nord-Ost (und Südranden). A-53

Fig. A3-15: Tiefenlage Opalinuston unter Terrain (Mitte Opalinuston) im Standortgebiet Zürich Nord-Ost im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit bezüglich HAA und SMA. A-54

Fig. A3-16: Tiefenlage 'Brauner Dogger' unter Terrain (Top Opalinuston minus 10 m) im Standortgebiet Zürich Nord-Ost im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit. A-55

Fig. A3-17: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage Mitte Opalinuston unter Top Fels im Standortgebiet Zürich Nord-Ost. A-58

Fig. A3-18: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage 'Brauner Dogger' (Top Opalinuston minus 10 m) unter Top Fels im Standortgebiet Zürich Nord-Ost. A-59

Fig. A3-19: Schematisches stratigraphisch-hydrogeologisches Sammelprofil für das Standortgebiet Nördlich Lägeren (HAA und SMA). A-60

Fig. A3-20: Vereinfachte schematische Darstellung der sedimentären Architekturelemente der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' der Bohrung Weiach als Grundlage für die Konzeptualisierung in der Sicherheitsanalyse. A-61

Fig. A3-21: Übersichtskarte 1:100'000 mit der Datengrundlage für das Standortgebiet Nördlich Lägeren. A-62

Fig. A3-22: Tiefenlage Opalinuston unter Terrain (Mitte Opalinuston) im Standortgebiet Nördlich Lägeren im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit bezüglich HAA und SMA. A-63

Fig. A3-23: Tiefenlage 'Brauner Dogger' unter Terrain (Top Opalinuston minus 10 m) im Standortgebiet Nördlich Lägeren im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit. A-64

Fig. A3-24: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage Mitte Opalinuston unter Top Fels im Standortgebiet Nördlich Lägeren. A-67

Fig. A3-25: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage 'Brauner Dogger' (Top Opalinuston minus 10 m) unter Top Fels im Standortgebiet Nördlich Lägeren. A-68

Fig. A3-26: Schematisches stratigraphisch-hydrogeologisches Sammelprofil für das Standortgebiet Bözberg (HAA und SMA) A-69

Fig. A3-27: Übersichtskarte 1:100'000 mit der Datengrundlage für das Standortgebiet Bözberg. A-70

Fig. A3-28: Tiefenlage Opalinuston unter Terrain (Mitte Opalinuston) im Standortgebiet Bözberg im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit bezüglich HAA und SMA. A-71

Fig. A3-29: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage Mitte Opalinuston unter Top Fels im Standortgebiet Bözberg. A-73

Fig. A3-30: Schematisches stratigraphisch-hydrogeologisches Sammelprofil für das Standortgebiet Jura-Südfuss (SMA). A-74

Fig. A3-31: Vereinfachte schematische Darstellung der sedimentären Architekturelemente der Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss als Grundlage für die Konzeptualisierung in der Sicherheitsanalyse. A-75

Fig. A3-32: Übersichtskarte 1:100'000 mit der Datengrundlage für das Standortgebiet Jura-Südfuss. ... A-76

Fig. A3-33: Tiefenlage Opalinuston unter Terrain (Mitte Opalinuston) im Standortgebiet Jura-Südfuss im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit. ... A-77

Fig. A3-34: Tiefenlage Effinger Schichten unter Terrain (Mitte EFF) im Standortgebiet Jura-Südfuss im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit. ... A-78

Fig. A3-35: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage Mitte Opalinuston unter Top Fels im Standortgebiet Jura-Südfuss. ... A-80

Fig. A3-36: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage Effinger Schichten (Mitte Wildegg-Formation) unter Top Fels im Standortgebiet Jura-Südfuss. ... A-81

Fig. A3-37: Profil (oben) und Übersichtskarte (unten) für das Standortgebiet Wellenberg (aus Nagra 2008b, c) (SMA). ... A-82

Fig. A3-38: Übersichtskarte 1:100'000 der Datengrundlage für das Standortgebiet Wellenberg mit seismischen Linien, Tiefbohrungen (≥ 200 m Endtiefe), geologischem Kartenmaterial, Tunnelstrecken. ... A-83

Fig. A3-39: Geologisches 3D-Modell des Standortgebiets Wellenberg – 3D-Ansicht der geologischen Profile in Richtung Norden (aus Kuhn 2009). ... A-84

Fig. A5-1: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Südranden (Opalinuston). ... A-129

Fig. A5-2a: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Zürich Nord-Ost für die obere Lagerebene ('Brauner Dogger'), Variante 1: Lagerkammern im 'Braunen Dogger' im unteren Abschnitt des 'Braunen Doggers'. ... A-131

Fig. A5-2b: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Zürich Nord-Ost für die untere Lagerebene (Opalinuston), Variante 1. ... A-131

Fig. A5-2c: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Zürich Nord-Ost für die obere Lagerebene ('Brauner Dogger'), Variante 2: Lagerkammern im 'Braunen Dogger' in Württembergica-Parkinsoni-Schichten. ... A-133

Fig. A5-2d: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Zürich Nord-Ost für die untere Lagerebene (Opalinuston), Variante 2. ... A-133

Fig. A5-3a: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägeren für die obere Lagerebene ('Brauner Dogger'). ... A-135

Fig. A5-3b: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägeren für die untere Lagerebene (Opalinuston). ... A-135

Fig. A5-4: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Bözberg (Opalinuston). ... A-137

Fig. A5-5a: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss für die untere Lagerebene (Opalinuston). ... A-139

Fig. A5-5b: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss für die obere Lagerebene (Effinger Schichten), Variante 1: Obere Lagerkammern mittig zwischen Gerstenhübel-Schichten und Top EFF A-141

Fig. A5-5c: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss für die obere Lagerebene (Effinger Schichten), Variante 2: Lagerkammern in Effinger Schichten mittig in Kalkmergelabfolge A-141

Fig. A5-6: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Wellenberg für die obere und untere Lagerebene (Mergel-Formationen des Helvetikums) A-143

Fig. A7-1: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Südranden (SH) für das SMA-Lager. A-170

Fig. A7-2: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Zürich Nord-Ost (ZH, TG) für das SMA-Lager. A-171

Fig. A7-3: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Nördlich Lägeren (ZH, AG) für das SMA-Lager. A-172

Fig. A7-4: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Bözberg (AG) für das SMA-Lager. A-173

Fig. A7-5: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Jura-Südfuss (SO, AG) für das SMA-Lager. A-174

Fig. A7-6: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Wellenberg (NW, OW) für das SMA-Lager. A-175

Fig. A7-7: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Zürich Nord-Ost (ZH, TG) für das HAA-Lager. A-176

Fig. A7-8: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Nördlich Lägeren (ZH, AG) für das HAA-Lager. A-177

Fig. A7-9: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Bözberg (AG) für das HAA-Lager. A-178

Fig. A7-10: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Zürich Nord-Ost (ZH, TG) für das Kombilager. A-179

Fig. A7-11: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Nördlich Lägeren (ZH, AG) für das Kombilager. A-180

Fig. A7-12: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Bözberg (AG) für das Kombilager. A-181

1 Einleitung: Ziel und Vorgaben

1.1 Einleitung und Zielsetzung des Berichts

Die Vorgaben für das Verfahren und die Kriterien für die Auswahl von Standorten für geologische Tiefenlager für alle Abfallkategorien in der Schweiz sind im Konzeptteil des Sachplans geologische Tiefenlager (Abkürzung SGT, BFE 2008) definiert. Das Verfahren sieht vor, in drei Etappen zur Wahl von Standorten für die Realisierung der benötigten geologischen Tiefenlager SMA und HAA zu kommen. Das Sachplanverfahren mündet in der dritten Etappe für jedes der Lager in ein Rahmenbewilligungsverfahren, in welchem der Standort sowie das Lager in seinen Grundzügen festgelegt werden. Nachdem die Nagra in Etappe 1 basierend auf Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit geologische Standortgebiete vorgeschlagen hat, und diesen von den Bundesbehörden in ihren Gutachten und Stellungnahmen zugestimmt wurde, hat die Nagra mit den Vorbereitungen für Etappe 2 begonnen. Ziel von Etappe 2 ist es, in den vom Bundesrat in seinem Entscheid zu Etappe 1 festgelegten geologischen Standortgebieten und Planungsperimetern Vorschläge zur Anordnung der Oberflächeninfrastruktur in Zusammenarbeit mit den Standortregionen (auch Partizipation genannt) und mit den betroffenen Kantonen zu erarbeiten und mögliche Standorte zu identifizieren. Für jeden Standort ist eine provisorische Sicherheitsanalyse[1] zu erstellen, und es ist ein sicherheitstechnischer Vergleich zwischen den Standorten durchzuführen. Basierend auf den Resultaten der provisorischen Sicherheitsanalysen und dem sicherheitstechnischen Vergleich und unter Berücksichtigung der Ergebnisse der sozio-ökonomisch-ökologischen Wirkungsstudien für die einzelnen Standorte hat die Nagra mindestens je zwei Standorte pro Lagertyp für die weitere Bearbeitung in Etappe 3 vorzuschlagen. Gemäss SGT (BFE 2008) sind dann in Etappe 3 die vorgeschlagenen Standorte vertieft zu untersuchen und die standortspezifischen geologischen Kenntnisse falls nötig mittels erdwissenschaftlicher Untersuchungen (Seismik, Bohrungen) auf einen Stand zu bringen, sodass für die beiden Lagertypen eine gut begründete Wahl der Standorte für die Rahmenbewilligungsgesuche möglich ist. Im SGT (BFE 2008) sind die Anforderungen an die in Etappe 2 zu erstellenden provisorischen Sicherheitsanalysen und an den sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte formuliert. Diese Anforderungen sind vom ENSI präzisiert worden (ENSI 2010a).

Auch wenn der SGT vom Grundsatz her erst in Etappe 3 Feldarbeiten vorsieht (vgl. z.B. die Übersicht über das Standortauswahlverfahren in Kapitel 3 in BFE 2008), wird im SGT (vgl. Kapitel 5.1.1 in BFE 2008) verlangt, dass die Nagra für Etappe 2 die Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen zur Verbesserung des Kenntnisstands für die provisorischen Sicherheitsanalysen frühzeitig mit dem ENSI abklärt. Diese Forderung ergibt sich aus der Tatsache, dass die Kenntnisse zur Geologie in der Schweiz unterschiedlich sind, und sich der Kenntnisstand in den verschiedenen vorgeschlagenen geologischen Standortgebieten unterscheidet[2]. Die vorhandenen Kenntnisse über die Standorte müssen genügend aussagekräftige und zuverlässige provisorische Sicherheitsanalysen erlauben. Weiter sollen gemäss SGT die in den provisorischen Sicherheitsanalysen verwendeten geologischen Daten die aktuelle Situation in den Standortgebieten adäquat wiedergeben und die vorhandenen Ungewissheiten berücksichtigen. Dazu muss in allen Standortgebieten ein genügender Kenntnisstand vorliegen. Bei einem ungenügenden Kenntnisstand ist die Informationsbasis durch gezielte Untersuchungen zu ergänzen. Dabei ist zu beachten, dass dies nicht bedeutet, dass die Informationsbasis in allen Standortgebieten

---

[1] Innerhalb eines jeden der vom Bundesrat genehmigten geologischen Standortgebiete bzw. Planungsperimeter wird in einem schrittweisen Prozess mindestens ein Standort ausgewählt, für welchen diese Sicherheitsanalysen durchgeführt werden.

[2] Weiter war bei der Erstellung des Konzepts SGT noch nicht absehbar, zu welchen Wirtgesteinen und geologischen Standortgebieten der Einengungsprozess in SGT Etappe 1 führt, und ein genügender Kenntnisstand konnte nicht vorausgesetzt werden.

gleich sein muss. In diesem Zusammenhang ist insbesondere zu beachten, dass die Informationsbasis in den geologischen Standortgebieten Wellenberg und Zürich Nord-Ost wegen der Erfordernisse früherer Programm-Meilensteine (Rahmenbewilligungsgesuch bzw. Entsorgungsnachweis) deutlich über das hinaus geht, was für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 notwendig ist. Damit ein möglicherweise geeignetes Standortgebiet nicht aufgrund einer allenfalls noch ungenügenden Datengrundlage frühzeitig aus dem Verfahren ausscheidet, sieht der Konzeptteil SGT mit der Ermittlung von charakteristischen Dosisintervallen ein Verfahren vor, mit welchem Standortgebiete mit ungleichen Datengrundlagen belastbar verglichen werden können (BFE 2008).

Der vorliegende Bericht hat zum Ziel, die Notwendigkeit von ergänzenden Untersuchungen und deren Umfang als Grundlage für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 abzuklären. Dazu werden die behördlichen Vorgaben analysiert und das Vorgehen zur Abklärung der Notwendigkeit von zusätzlichen Untersuchungen festgelegt. Der Schwerpunkt liegt auf der Beurteilung der geologischen Kenntnisse; zusätzlich wird auch der Kenntnisstand für diejenigen Aspekte zum Verhalten der technischen Barrieren evaluiert, die entsprechend den Vorgaben des ENSI (2010a) in den provisorischen Sicherheitsanalysen mit einzubeziehen sind. Der Kenntnisstand wird anhand von Prozessen und Parametern, welche für die Sicherheit und technische Machbarkeit relevant sind, evaluiert. Dieser Kenntnisstand bildet die Basis für standortspezifische Testrechnungen zur Ermittlung von charakteristischen Dosisintervallen gemäss den Vorgaben des ENSI (2010a), für Überlegungen zur Beurteilung der technischen Machbarkeit sowie für Überlegungen zur Bewertung der geologischen Standortgebiete. Die Testrechnungen dienen auch dazu, die Sensitivität des Systemverhaltens bezüglich der verschiedenen Prozesse und Parameter zu ermitteln und damit die Bedeutung der vorhandenen Ungewissheiten zu bewerten. Die Befunde aus den Testrechnungen und den Überlegungen zur Machbarkeit und die Erfahrungen mit der qualitativen Bewertung dienen als Basis für die Beurteilung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen. Weiter werden auch die von der Nagra im Hinblick auf Etappe 2 bereits abgeschlossenen sowie die begonnenen bzw. geplanten Untersuchungen zur Überprüfung bzw. zur Vertiefung des Kenntnisstands aufgezeigt.

Die im SGT-Konzept verlangte Abklärung der Notwendigkeit von ergänzenden Untersuchungen mit dem ENSI ist ein Prozess, der zu vorliegendem Bericht in seiner endgültigen Form geführt hat. In einer frühen Phase der Abklärungen hat die Nagra dem ENSI und weiteren Behörden des Bundes und der Kantone das Vorgehen und provisorische Resultate an einer Sitzung vorgestellt und diskutiert. Weiter hat das ENSI einen Entwurf des vorliegenden Berichts einer Grobprüfung unterzogen, bei welcher geprüft wurde, ob der Inhalt des Berichts den im Sachplan (BFE 2008) und in ENSI (2010a) festgehaltenen Anforderungen in formaler Hinsicht entspricht. Hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit der Aussagen prüfte das ENSI zudem, ob der Bericht bzw. die zitierten Referenzberichte der Nagra den behördlichen Anforderungen genügen. Die Resultate der Grobprüfung wurden bei der Fertigstellung des Berichts berücksichtigt. Der jetzt vorliegende Bericht bildet eine umfassende Informationsbasis zur Beurteilung, ob zusätzlich über die von der Nagra im Hinblick auf Etappe 2 bereits abgeschlossenen bzw. begonnenen und geplanten Untersuchungen hinaus weitere Untersuchungen notwendig sind.

1.2 Aufbau des Berichts

Der Bericht ist wie folgt aufgebaut: In Kap. 1.3 werden die Vorgaben gemäss SGT (BFE 2008) und ENSI (2010a) bezüglich der Abklärung des notwendigen Umfangs an ergänzenden Untersuchungen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 zusammengefasst. Dazu werden auch die Vorgaben zu den provisorischen Sicherheitsanalysen und zum sicherheitstechnischen Vergleich diskutiert. Das detaillierte Vorgehen bei der Beurteilung der vorhandenen Kenntnisse wird in Kap. 2 erläutert. Danach werden in Kap. 3 die wichtigsten Grundlagen und Konzepte sowie die für die Sicherheit und technische Machbarkeit relevanten Prozesse und Parameter identifiziert. Kap. 4 enthält eine Zusammenfassung der heute verfügbaren Informationen für die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalysen und für die Beurteilung der technischen Machbarkeit. Zunächst wird der geologische Kenntnisstand einschliesslich der bestehenden Ungewissheiten in den verschiedenen Themenbereichen beschrieben. Danach werden die Informationen und der Kenntnisstand über die transportrelevanten Eigenschaften des Nahfelds und die Annahmen zur Biosphäre diskutiert. In diesem Kapitel wird auch beurteilt, ob die Informationen ausreichend sind für die für diesen Bericht durchzuführenden Testrechnungen in Bezug auf Identifikation der Rechenfälle, Konzeptualisierung des Barrierensystems (insbesondere der Geologie) und zu deren Parametrisierung. Weiter wird beurteilt, ob die Information für in diesem Bericht vorzunehmende Beurteilung der technischen Machbarkeit vorhanden ist.

In Kap. 5 wird geprüft, ob die Informationen und der Kenntnisstand für die Beurteilung der technischen Machbarkeit ausreichend sind und ob die technische Machbarkeit gewährleistet ist. In Kap. 6 werden die für die Durchführung der Testrechnungen notwendigen Systemanalysen sowie die in den Testrechnungen verwendeten Rechenfälle, Modellkonzepte, Rechencodes, Daten und die Resultate der Testrechnungen dokumentiert. Kap. 7 enthält die Evaluation des Kenntnisstands im Hinblick auf die Beurteilung der Sicherheit, der technischen Machbarkeit und eine Beurteilung der Grundlagen zur qualitativen Bewertung; dabei wird insbesondere die Eindeutigkeit der Aussagen bzgl. der in ENSI (2010a) definierten "sicherheitstechnischen Eignung" und "sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit" evaluiert. Die Resultate und Befunde in Kap. 7 bilden die Basis zur Beurteilung des vorhandenen Kenntnisstands. In Kap. 8 werden die bereits begonnenen bzw. die geplanten Arbeiten für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 aufgezeigt und diskutiert. Kap. 9 enthält die Schlussfolgerungen.

1.3 Gesetzliche und behördliche Vorgaben

In diesem Kapitel werden die Vorgaben gemäss SGT (BFE 2008) und ENSI (2010a) bezüglich der Abklärung des notwendigen Umfangs an ergänzenden Untersuchungen für die provisorischen Sicherheitsanalysen und für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 zusammengefasst. Weil diese Abklärungen auf einer Analyse der Aussagekraft der später durchzuführenden provisorischen Sicherheitsanalysen basieren, werden auch die wichtigsten Vorgaben des BFE und des ENSI zu Ziel und Umfang der provisorischen Sicherheitsanalysen sowie zum sicherheitstechnischen Vergleich von Standorten in Etappe 2 aufgeführt.

1.3.1 Vorgaben zur Abklärung der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen in Etappe 2

Gemäss SGT (BFE 2008) führen die Entsorgungspflichtigen in Etappe 2 für die durch sie bezeichneten Standorte provisorische Sicherheitsanalysen durch. Die Kenntnisse über diese Standorte müssen die Durchführung einer solchen Sicherheitsanalyse erlauben, d.h. sie müssen die aktuelle Situation an den Standorten adäquat wiedergeben (Tab. 1.3-1)[3]. Adäquat bedeutet gemäss ENSI (2010a), *"dass der von den Entsorgungspflichtigen dokumentierte Kenntnisstand ausreicht, um zu zeigen, dass die Aussagen zur Langzeitsicherheit des Tiefenlagers belastbar sind"*. Für SGT Etappe 2 bedeutet "belastbar", dass die Aussage, dass sich ein Standort gemäss dem im SGT (BFE 2008) bzw. in ENSI (2010a) beschriebenen standardisierten Vorgehen als sicherheitstechnisch geeignet und im Vergleich zu den anderen Standorten als sicherheitstechnisch gleichwertig qualifiziert (oder das Gegenteil dieser Aussage), trotz der vorhandenen Ungewissheiten mit grosser Zuverlässigkeit gemacht werden kann.

In einem ersten Schritt haben die Entsorgungspflichtigen abzuklären, welche Prozesse und Parameter für die Sicherheit und technische Machbarkeit relevant sind. Dann ist zu prüfen, ob der Kenntnisstand für die relevanten Prozesse und Parameter im Hinblick auf die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalysen und auf den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 genügt. Diese Abklärungen und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen bezüglich des notwendigen Umfangs an Untersuchungen in SGT Etappe 2 sind im vorliegenden Bericht zuhanden des ENSI dokumentiert. Nach Prüfung des Berichts hält das ENSI in einer Stellungnahme zuhanden der Entsorgungspflichtigen fest, ob in Etappe 2 zusätzlich zu den von den Entsorgungspflichtigen vorgeschlagenen Untersuchungen noch weitere Untersuchungen durchzuführen sind.

---

[3] In ENSI (2010a) wird vermerkt, dass die Abklärung der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen für die vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete zu erfolgen hat; Standorte sind zum Zeitpunkt der vorliegenden Abklärung noch keine vorgeschlagen. Dementsprechend werden alle Vorgaben für die Standorte sinngemäss auf die geologischen Standortgebiete angewendet. Bei der Diskussion der Vorgaben und deren Umsetzung wird in der Regel über Standorte gesprochen; die Aussagen gelten in diesem Bericht auch für geologische Standortgebiete.

Dieses Vorgehen ist sinnvoll und gerechtfertigt, weil sich die Bezeichnung von Standorten in SGT Etappe 2 in erster Linie auf die Standorte der Empfangsanlage und deren Erschliessung bezieht; die Anordnung der untertägigen Teile des Lagers beschränkt sich auf die Bezeichnung eines oder mehrerer alternativer Lagerperimeter, die in ihrer Gesamtheit das ganze geologische Standortgebiet umfassen können. Eine frühzeitige weitere Eingrenzung der Anordnung der untertägigen Anlagen würde es verhindern, die Erkenntnisse aus den Untersuchungen in späteren Phasen (Exploration von der Oberfläche in Etappe 3 (insbesondere Seismik) bzw. später von Untertag, inkl. Felslabor) für die Optimierung des Lagers zu nutzen (vgl. dazu auch die Aussagen im Entsorgungsprogramm; Nagra 2008a). Dies ist in Übereinstimmung mit ENSI (2010a), wo bezüglich Anordnung der Zugangsbauwerke und Lagerperimeter festgehalten wird, dass für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 Ausschluss- und Eignungskriterien zu definieren sind. Die Bezeichnung eines bzw. mehrerer Lagerperimeter muss es jedoch erlauben, die Informationen zur Erschliessung der untertägigen Lagerteile abzuleiten, soweit diese für die Anordnung der Empfangsanlage notwendig sind.

Tab. 1.3-1: Vorgaben des ENSI bezüglich der Abklärung der Notwendigkeit von ergänzenden Untersuchungen in SGT Etappe 2.

Zitat aus Kapitel 2.3 in ENSI (2010a).

Für die provisorischen Sicherheitsanalysen müssen die Entsorgungspflichtigen die Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen frühzeitig mit dem ENSI abklären. Die Kenntnisse über die Standorte müssen die Durchführung einer provisorischen Sicherheitsanalyse und den sicherheitstechnischen Vergleich erlauben; gegebenenfalls sind sie durch Untersuchungen zu ergänzen. Die verwendeten geologischen Daten müssen die aktuelle Situation am Standort für die provisorische Sicherheitsanalyse adäquat[1] wiedergeben und die vorhandenen relevanten Ungewissheiten berücksichtigen (SGT, S. 45).

Um die Frage zusätzlicher Untersuchungen (beispielsweise Sondierbohrungen in den Standortregionen) transparent zu klären, erstellen die Entsorgungspflichtigen nach Abschluss der behördlichen sicherheitstechnischen Überprüfungen in Etappe 1 einen Bericht, in dem sie für jedes Standortgebiet darlegen, ob der aktuelle Wissensstand für die Durchführung der erforderlichen provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 ausreichend ist. In diesem Bericht soll gezeigt werden, welche Prozesse und Parameter für die provisorische Sicherheitsanalyse in Etappe 2 Relevanz haben. Zudem soll der Bericht aufzeigen, was der jeweilige Kenntnisstand der Prozesse und Parameter ist. Im Bericht sollen die unterschiedlichen Annahmen, die wegen des unterschiedlichen Kenntnisstandes angewendet werden müssen, ausgewiesen und beim Entscheid über die Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen berücksichtigt werden.

Sollte der Wissensstand den Anforderungen nicht genügen, schlagen die Entsorgungspflichtigen die erforderlichen ergänzenden Untersuchungen vor.

Das ENSI prüft diesen Bericht und hält in einer Stellungnahme zuhanden der Entsorgungspflichtigen fest, ob in Etappe 2 zusätzlich zu den von den Entsorgungspflichtigen vorgeschlagenen Untersuchungen noch weitere Untersuchungen durchzuführen sind.

[1] *Adäquat bedeutet, dass der von den Entsorgungspflichtigen dokumentierte Kenntnisstand ausreicht, um zu zeigen, dass die Aussagen zur Langzeitsicherheit des Tiefenlagers belastbar sind.*

1.3.2 Übergeordnete Vorgaben zum Ziel und Umfang der provisorischen Sicherheitsanalysen und zum sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2

Das Ziel der provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 besteht primär darin, die verschiedenen in Etappe 2 bearbeiteten Standorte bezüglich ihrer Sicherheit zu beurteilen (Einhaltung des Dosis-Schutzkriteriums gemäss Richtlinie ENSI-G03, siehe ENSI 2009) und unter Verwendung des charakteristischen Dosisintervalls auf ihre sicherheitstechnische Gleichwertigkeit zu prüfen. Diejenigen Standorte, die eine ungenügende Sicherheit aufweisen oder sicherheitstechnisch nicht vergleichbar (d.h. deutlich schlechter) sind, scheiden aus. Die verbleibenden Standorte werden im Rahmen der provisorischen Sicherheitsanalysen bezüglich der Kriterien gemäss Tabelle 1 des Konzepts SGT (BFE 2008) qualitativ bewertet, wobei als Resultat des Vergleichs der qualitativen Bewertung ein Standort bei eindeutigen Nachteilen gegenüber den anderen Standorten ausscheiden kann (BFE 2008).

Schliesslich sollen die Ergebnisse der provisorischen Sicherheitsanalysen auch Hinweise auf den Umfang der notwendigen weiteren Untersuchungen in Etappe 3 liefern, um eine ausreichende Datengrundlage für ein Rahmenbewilligungsgesuch zu erreichen.

In Kap. 1.3.3 werden die spezifischen Vorgaben zum Vergleich der Standorte in Etappe 2 vertieft diskutiert.

1.3.3 Spezifische Vorgaben zum Vergleich der Standorte in Etappe 2

Gemäss BFE (2008) und ENSI (2010a) hat der sicherheitstechnische Vergleich der Standorte in Etappe 2 anhand eines standardisierten Vorgehens zu erfolgen. Dieses Vorgehen wurde in ENSI (2010a), Kap. 5 präzisiert; es enthält einen quantitativen und einen qualitativen Teil (Tab. 1.3-2).

Der quantitative Teil erfolgt anhand der Resultate von Modellrechnungen für die realistischerweise zu erwartende Entwicklung des Tiefenlagers (Referenzszenarium mit zugehörigem Referenzfall; Punkt A in Tab. 1.3-2) sowie aus den Resultaten von Parametervariationen, welche der Quantifizierung der Auswirkungen der bestehenden Ungewissheiten auf die Dosisberechnungen dienen (Punkt B in Tab. 1.3-2). Die gemäss ENSI mindestens durchzuführenden Rechenfälle des Parametervariationsverfahrens sind in Tab. 1.3-3 aufgeführt. Damit lässt sich für jeden Standort ein charakteristisches Dosisintervall bestimmen (vgl. Fig. 1.3-1), welches die Auswirkungen der bestehenden Ungewissheiten auf die Dosis quantifiziert. Für die Dosisberechnungen sind die Ungewissheiten durch Eckwerte von Parameterbandbreiten zu erfassen. Standorte, deren oberer Rand des Dosisintervalls über dem Dosis-Schutzkriterium (0.1 mSv/a) liegt, scheiden aus. Ebenso werden Standorte ausgeschlossen, deren oberer Rand des Dosisintervalls über der Schwelle zur Optimierung gemäss Strahlenschutzverordnung (0.01 mSv/a) liegt[4] und deren Dosisintervall nicht mit dem niedrigsten Dosisintervall überlappt (detailliertes Vorgehen vgl. ENSI 2010a).

Für die verbleibenden Standorte wird anschliessend eine qualitative Bewertung (Punkt C in Tab. 1.3-2) der in SGT Tabelle 1 definierten Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit durchgeführt. Die Bewertung umfasst neben den Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der Langzeitstabilität auch Aspekte der Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen und der bautechnischen Eignung. Die Bewertung der Kriterien erfolgt anhand der Skala "sehr günstig", "günstig", "bedingt günstig" und "ungünstig".

Für den sicherheitstechnischen Vergleich haben die Entsorgungspflichtigen schliesslich eine zusammenfassende Gesamtbewertung der Standorte bezüglich der in den Punkten A, B und C aus Tab. 1.3-2 erarbeiteten Befunde vorzulegen. In die Gesamtbewertung und in den sicherheitstechnischen Vergleich fliessen auch die Ergebnisse von Modellrechnungen ein, welche insbesondere Aussagen zum Rückhaltevermögen des Gesamtsystems, zum Beitrag der geologischen Barriere zur Langzeitsicherheit und zum Langzeitverhalten der technischen Barrieren erlauben. Ein Standort kann ausscheiden, falls er bei der Gesamtbewertung eindeutige Nachteile gegenüber den anderen Standorten aufweist (vgl. BFE 2008, S. 71).

---

[4] Gemäss Art. 6, Abs. 3 der StSV (StSV 1994) gilt: *"Der Grundsatz der Optimierung gilt als erfüllt bei Tätigkeiten, welche in keinem Fall zu einer effektiven Dosis ... von mehr als 10 µSv pro Jahr für nichtberuflich strahlenexponierte Personen führen."*

Tab. 1.3-2: Vorgaben des ENSI bezüglich des Vergleichs von Standorten in SGT Etappe 2.
Zitat aus Kapitel 5 in ENSI (2010a).

Der SGT fordert für den sicherheitstechnischen Vergleich von potenziellen Standorten ein standardisiertes Vorgehen, das die quantitativen Ergebnisse der einzelnen provisorischen Sicherheitsanalysen berücksichtigt, aber auch den qualitativen Aspekten der Betrachtungen zu Sicherheit und technischer Machbarkeit Rechnung trägt (...).

Der Vergleich enthält folgende Elemente (...):

A) Darlegung der quantitativen Ergebnisse der Freisetzungsberechnungen für die realistischerweise zu erwartende Entwicklung des Tiefenlagers (Referenzszenarium, zeitlicher Verlauf der Personendosiskurve)(...).

B) Diskussion der Robustheit des Tiefenlagersystems, Angaben zum Variationsbereich und Aufzeigen der Ungewissheiten in den bei der Modellierung verwendeten Parametern und deren Einfluss auf die Personendosiskurve unter Berücksichtigung der Vorgaben zu den durchzuführenden Rechenfällen.

C) Qualitative Bewertung der Kriterien gemäss Tabelle 1 (z.B. Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen, mögliche Beeinträchtigung des Tiefenlagerstandorts durch Erosion) (...)

Tab. 1.3-3: Vorgaben des ENSI bezüglich des quantitativen Parametervariationsverfahrens für den Vergleich von Standorten in SGT Etappe 2.

Zitat aus Kapitel 5.1 in ENSI (2010a).

Für das standardisierte Parametervariationsverfahren sollen (…) ausgehend vom Referenzfall mindestens folgende Fälle berechnet werden (…):

a) Berechnungen mit einem gegenüber dem Referenzfall erhöhten Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich (oberer Eckwert).

b) Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall ungünstigen nuklidspezifischen Diffusionskoeffizienten (obere Eckwerte für homogen-poröse Wirtgesteine, untere Eckwerte für geklüftete Wirtgesteine) in der Geosphäre.

c) Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall erhöhten nuklidspezifischen Löslichkeitslimiten (obere Eckwerte) im Nahfeld.

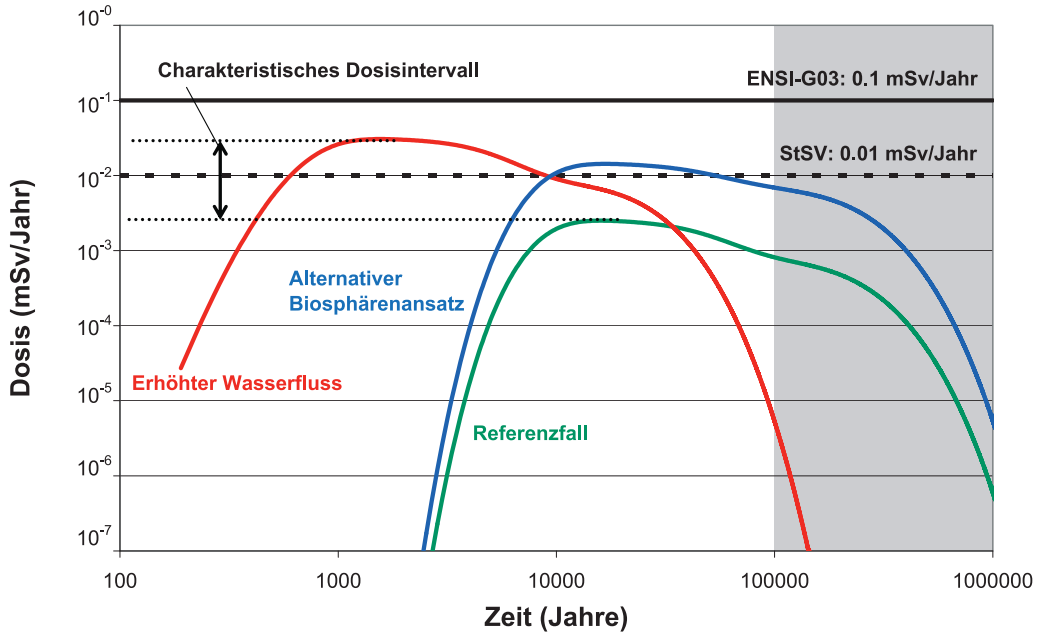
d) Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall verringerten Sorptionskoeffizienten (untere Eckwerte für K_d) im Nah- und Fernfeld. Falls der K_d-Referenzwert eines Nuklids weniger als 0.001 m^3/kg beträgt, ist in den Berechnungen ein K_d-Wert von 0 m^3/kg zu verwenden.

e) Ausgehend vom Referenzfall ist der Einfluss von möglichen alternativen Klimavarianten (…) im Betrachtungszeitraum für das SMA- resp. HAA-Lager aufzuzeigen.

Wegen der gegenüber dem SMA-Lager erhöhten Radiotoxizität ist für das HAA-Lager zusätzlich die Robustheit gegenüber alternativen Annahmen zum Verhalten der technischen Barrieren zu untersuchen (…):

f) Berechnungen mit einer gegenüber dem Referenzfall hundertfach erhöhten Auflösungsrate der einzulagernden abgebrannten Brennelemente (Brennstoffmatrix und Brennelementhüllen).

g) Berechnungen mit Annahme einer auf 1000 Jahre begrenzten Behälterlebensdauer (…).



Figur 3: *Beispielhafte Dosisberechnungen des ENSI zur Illustration der standardisierten Parametervariationsverfahren für ein generisches SMA-Lager. Zur Verbesserung der Anschaulichkeit wurden nur folgende Fälle betrachtet: der Referenzfall (grüne Kurve), eine Variation mit erhöhtem Wasserfluss (rote Kurve) und eine Variation mit einem alternativen Biosphären-Ansatz (blaue Kurve). Die behördlichen Vergleichskriterien, das Schutzkriterium der Richtlinie ENSI-G03 von 0.1 mSv/Jahr (schwarze Linie), der aus der StSV abgeleitete Wert von 0.01 mSv/Jahr (schwarz gestrichelte Linie), der Betrachtungszeitraum (weisse Fläche) und das charakteristische Dosisintervall (Doppelpfeil, Bereich zwischen den punktierten schwarzen Linien) sind eingezeichnet. Innerhalb der grauen Fläche sind die für die Darstellung des Systemverhaltens berechneten Dosen für Zeiten nach dem Betrachtungszeitraum dargestellt.*

Fig. 1.3-1: Vorgaben des ENSI bzgl. der Bestimmung des charakteristischen Dosisintervalls mit Hilfe des standardisierten Parametervariationsverfahren.

Kopie der Figur 3 inkl. des zugehörigen Figurentitels aus ENSI (2010a).

2 Vorgehen bei der Beurteilung der für die provisorischen Sicherheitsanalysen notwendigen Unterlagen

In diesem Kapitel wird das Vorgehen bei der Beurteilung der Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 erläutert. Dazu sind Abklärungen im Hinblick auf die Dosisberechnungen (standardisiertes Parametervariationsverfahren zur *Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls*) erforderlich, die auch Bestandteil der später durchzuführenden provisorischen Sicherheitsanalysen sind. Weiter werden die für die *Beurteilung der technischen Machbarkeit* erforderlichen Unterlagen diskutiert, und es wird auf die für die *qualitative Bewertung* benötigte Information hingewiesen. Für die Abklärungen werden die für SGT Etappe 1 dokumentierten Unterlagen über die geologischen und bautechnischen Verhältnisse in den geologischen Standortgebieten beigezogen (Nagra 2008b, c, d) und die für SGT Etappe 2 bereits abgeschlossenen sowie die begonnenen und geplanten Arbeiten berücksichtigt.

2.1 Unterlagen zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle

Zur Beurteilung der Unterlagen für die Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle werden Testrechnungen durchgeführt. Für diese Testrechnungen werden in einem ersten Schritt die vorhandenen Unterlagen zu den geologischen Standortgebieten aus SGT Etappe 1 analysiert. Dort, wo die Bandbreiten für die Sicherheitsanalyse noch nicht quantifiziert wurden oder als eher eng beurteilt werden, werden die Bandbreiten angegeben bzw. erweitert. Dazu wird in drei Schritten vorgegangen (mit Angabe der Kapitel in Klammern, in welchen die detaillierten Ausführungen zu den einzelnen Schritten zu finden sind):

1. Identifikation der Prozesse und Parameter, die für die Sicherheit und technische Machbarkeit relevant sind (Kap. 3) und für welche der Kenntnisstand evaluiert wird.

2. Aufzeigen des Kenntnisstands über die relevanten Prozesse und Parameter ausgehend von den von der Nagra für SGT Etappe 1 eingereichten Unterlagen unter Berücksichtigung der begonnenen Arbeiten für SGT Etappe 2 (Kap. 4). Das Hauptaugenmerk liegt auf der Informationsbasis für die Ableitung der für die Testrechnungen benötigten Grundlagen. Dazu gehören die Festlegung der Rechenfälle, die Konzeptualisierung des Barrierensystems (insbesondere der einschlusswirksame Gebirgsbereich) und die Festlegung von Referenzwerten (realistische Beurteilung der geologischen Standortgebiete) und Bandbreiten (Erfassung der vorhandenen Ungewissheiten) für die relevanten Parameter[5]. In den entsprechenden Teil-Kapiteln wird auch beurteilt, ob der Kenntnisstand ausreicht, um die Grundlagen für die Testrechnungen und für die Beurteilung der technischen Machbarkeit abzuleiten.

   Der Ausgangspunkt der Beurteilung wird gebildet durch eine realistische Einschätzung der Variabilität und der Ungewissheiten für die relevanten Prozesse und Parameter sowie durch die vom ENSI (2010a) verlangten Parametervariationen (Teilfigur a) in Fig. 2.1-1). Wo notwendig, werden die Bandbreiten der relevanten Prozesse und Parameter für die Testrechnungen und die Beurteilung der technischen Machbarkeit erweitert (Teilfigur b) in Fig. 2.1-1), um die Belastbarkeit bzw. Robustheit der Aussagen zur Sicherheit und technischen Machbarkeit zu erhöhen. Die Bandbreiten sollen alle realistischerweise denkbaren Ungewissheiten abdecken. Zur Illustration der Robustheit des Lagersystems bzw. der Aussagen können auch "What if?"-Konzepte bzw. -Werte in die Bandbreiten mit

[5] Die Parameterwerte werden entweder in den entsprechenden Kapiteln (Kap. 4.2 bis 4.7 bzw. Kap. 6.2) selbst oder aber in den zugehörigen Anhängen aufgeführt.

einbezogen werden[6, 7]. Durch genügend gross gewählte Bandbreiten soll vermieden werden, dass die in den vorliegenden Dosisberechnungen verwendeten Bandbreiten sich im Verlauf der zukünftigen Untersuchungen als zu wenig breit bzw. als falsch erweisen und korrigiert werden müssen, sei es durch erweiterte oder neue konzeptuelle Modelle und/oder durch eine Vergrösserung der Bandbreiten der verwendeten Parameterwerte.

Für gewisse Prozesse bzw. Parameter ist es möglich, dass die Bandbreiten auf der Grundlage der begonnenen bzw. geplanten ergänzenden Untersuchungen für SGT Etappe 2 reduziert werden können. Für viele der anderen Prozesse und Parameter tragen die ergänzenden Untersuchungen zu einer höheren Belastbarkeit der Datensätze bei.

Fig. 2.1-1: Schematische Illustration der Auswirkung verschiedener Bandbreiten auf die ermittelten Dosisintervalle für verschiedene Standortgebiete (in Farben blau, gelb und grün) und daraus abgeleitete Aussagen bezüglich der "sicherheitstechnischen Eignung" bzw. "sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit" der Standortgebiete.

Ausgangspunkt bildet die Ableitung von Bandbreiten ausgehend von den Unterlagen aus SGT Etappe 1 (Fig. a). Für die Testrechnungen werden – wie für Sicherheitsanalysen generell – die Bandbreiten teilweise vergrössert, um die Belastbarkeit der Aussagen zu erhöhen. Die Bandbreiten sind so weit zu vergrössern, dass sie mögliche Resultate zukünftiger Untersuchungen abdeckend erfassen (vgl. Fig. b). Falls die mit den vergrösserten Bandbreiten ermittelten Aussagen bezüglich der "sicherheitstechnischen Eignung" bzw. "sicherheitstechnische Gleichwertigkeit" nicht eindeutig sind, ist der Einfluss möglicher Resultate von Untersuchungen (Reduktion der Bandbreiten) auf die Aussagen zu prüfen (vgl. Fig. c).

Die roten horizontalen Linien in den Figuren stellen für die verschiedenen Schritte (Fig. a) bis c)) die für die Beurteilung kritischen Grenzen dar, vgl. Diskussion im Text.

Vgl. gegenüberliegende Seite:

a) Dosisintervalle bei realistischer Wahl der Parameterbandbreiten

b) Dosisintervalle bei abdeckender Wahl der Parameterbandbreiten (Vergrösserung der Bandbreiten (Pfeile in rötlichen Farbtönen)) und bei adäquater Berücksichtigung der Auswirkungen der Ungewissheiten bei der Festlegung des Referenzfalls (Pfeile blassrot).

c) Dosisintervalle unter Berücksichtigung des Einflusses möglicher Entwicklungen des Kenntnisstands auf die Parameterbandbreiten (mögliche Reduktion der Bandbreiten durch Untersuchungen (Pfeile in orangen Farbtönen)) und entsprechender möglicher Entwicklung des Referenzfalls (Pfeile blassorange).

Gemäss ENSI sind Standorte sicherheitstechnisch geeignet, falls deren Dosisintervall vollständig unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/a (rot gestrichelte Linie) liegt. Standorte gelten ausserdem als sicherheitstechnisch gleichwertig, wenn deren Dosisintervall vollständig unter dem Schwellenwert von 0.01 mSv/a (blau gestrichelte Linie) liegt. Ein Standort wird in den weiteren Verfahrensschritten auch betrachtet, wenn sein Dosisintervall über dem Schwellenwert von 0.01 mSv/a, aber unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/a liegt und mit dem niedrigsten Dosisintervall überlappt (vgl. Text).

---

[6] Mit "What if?" werden im vorliegenden Bericht konzeptuelle Modellannahmen und/oder Parameterwerte bezeichnet, die zwar physikalisch grundsätzlich möglich sind, aber ausserhalb der durch Messungen oder Modellvorstellungen gestützten Bandbreiten liegen.

[7] Die Dosisintervalle, die aus Dosiskurven mit "What if?"-Fällen resultieren, werden wegen ihres anderen Charakters als "What if?"-Dosisintervalle bezeichnet. Im Text wird vereinfachend auch der Begriff "Dosisintervall" verwendet, welcher die charakteristischen Dosisintervalle gemäss Regeln des ENSI (2010a) aber auch "What if?"-Dosisintervalle sowie Dosisintervalle unter Berücksichtigung der Dosismaxima ausserhalb des Betrachtungszeitraums umfasst.

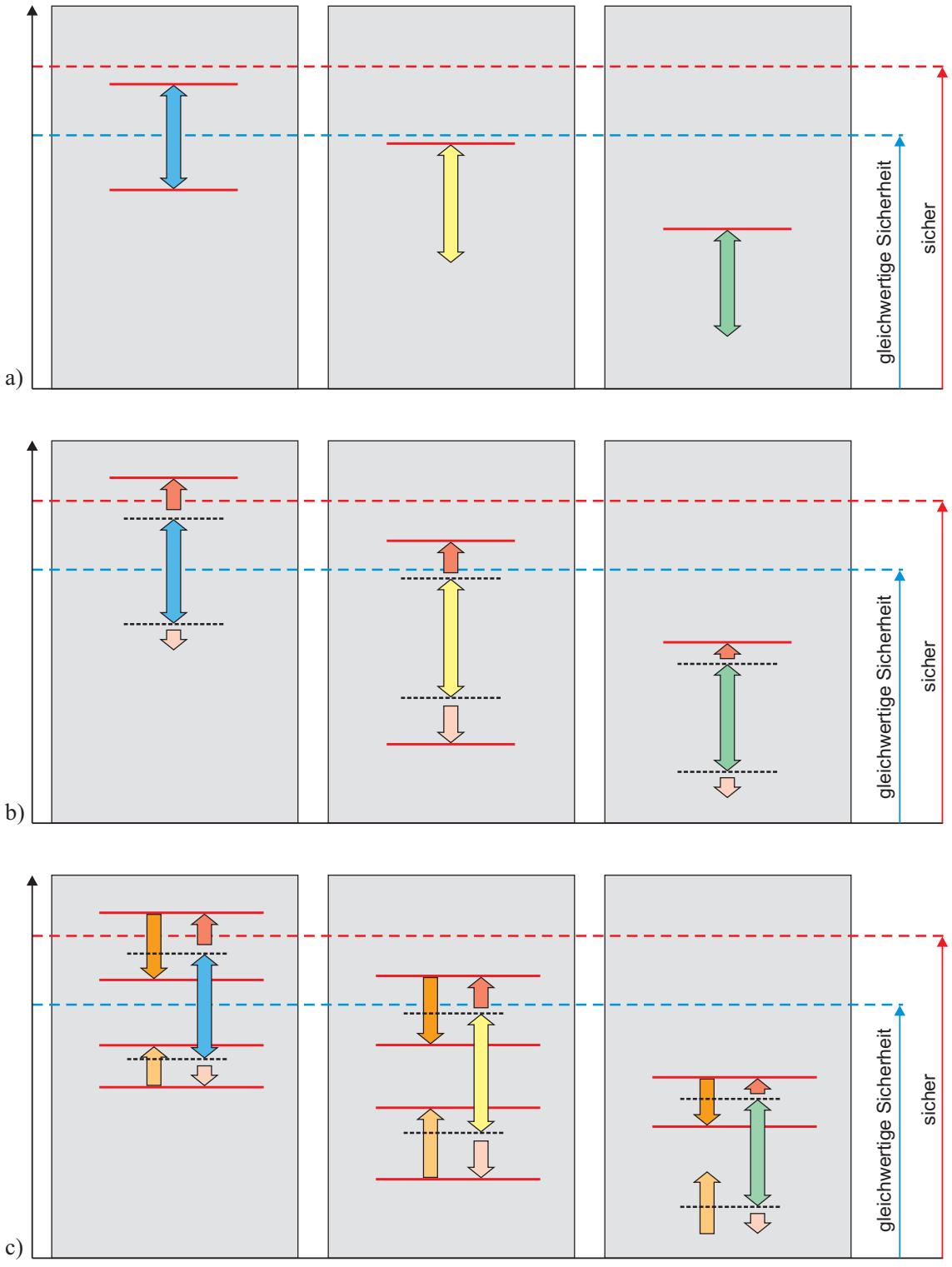


Fig. 2.1-1: Schematische Illustration der Auswirkung verschiedener Bandbreiten auf die ermittelten Dosisintervalle für verschiedene Standortgebiete (in Farben blau, gelb und grün) und daraus abgeleitete Aussagen bezüglich der "sicherheitstechnischen Eignung" bzw. "sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit" der Standortgebiete.

Vergleiche Text auf gegenüberliegender Seite.

3. Durchführung der Testrechnungen zum Dosisverlauf mit den gewählten Referenzwerten und Bandbreiten sowie Ermittlung der Dosisintervalle (Kap. 6). Die Dosisintervalle werden bezüglich ihrer Eindeutigkeit in Bezug auf die "sicherheitstechnische Eignung" bzw. die "sicherheitstechnische Gleichwertigkeit" der evaluierten Standortgebiete beurteilt (Kap. 7). Bei den verwendeten Bandbreiten ist die Frage zu beachten, ob eine durch weitere Untersuchungen denkbare Änderung der Bandbreiten zu anderen Schlussfolgerungen bezüglich der Eignung und Gleichwertigkeit der Standorte aus Sicht der Sicherheit führen würde (Teilfigur c) in Fig. 2.1-1).

Im Hinblick auf die mögliche Entwicklung des Kenntnisstands und der zugehörigen Bandbreiten durch zukünftige Untersuchungen (Punkt 2 in der obigen Auflistung) ist also durch die Wahl genügend gross gewählter Bandbreiten sicherzustellen, dass durch zukünftige Untersuchungen entweder der jetzige Informationsstand (Referenzwerte, Bandbreiten) bestätigt wird (die Belastbarkeit des Datensatzes wird durch die zusätzlichen Informationen und Evidenzen erhöht) oder dass der Informationsstand (Referenzwerte, Bandbreiten) genauer wird, und die zusätzlichen Informationen eine Eingrenzung bezüglich alternativer konzeptueller Modelle und/oder eine Verringerung der Parameterbandbreiten erlauben. Es ist zu vermeiden, dass durch eine ungeeignete Wahl der Bandbreiten diese später vergrössert werden müssen und sich die Schlussfolgerungen bezüglich der "sicherheitstechnischen Eignung" bzw. "sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit" als falsch herausstellen.

Von zentraler Bedeutung für die Entscheide in SGT Etappe 2 ist also nicht die Frage, wie sich der Kenntnisstand im Detail entwickelt, sondern nur, ob genauere Kenntnisse (z.B. durch zukünftige Untersuchungen) zu einer entscheidrelevanten Veränderung der in SGT Etappe 2 vorzunehmenden sicherheitstechnischen Prioritätensetzung für die Festlegung der Vorschläge durch die Nagra für die in SGT Etappe 3 weiter zu betrachtenden geologischen Standorte führen könnte (Punkt 3 in der obigen Auflistung). Für diese Prioritätensetzung werden die durch Dosisberechnungen (Testrechnungen) bestimmten charakteristischen Dosisintervalle herangezogen (vgl. Kap. 1.3.3). Das gewählte Vorgehen ist in Fig. 2.1-1 illustriert. Ausgangslage sind die Dosisintervalle, die sich aus einer realistischen Wahl der Parameterbandbreiten ergeben (Teilfigur a) in Fig. 2.1-1). Davon ausgehend werden die Bandbreiten für die Testrechnungen und die Beurteilung der technischen Machbarkeit durch eine vorsichtige Wahl der Modellkonzepte und Parameterwerte bei Bedarf vergrössert (Teilfigur b) in Fig. 2.1-1), um die Robustheit der Aussagen[8] zu erhöhen. Dies führt auch dazu, dass eine zukünftige Kenntniszunahme im Rahmen von detaillierten Standortuntersuchungen aller Wahrscheinlichkeit nach zu keiner Vergrösserung der Bandbreiten und damit der Dosisintervalle führt. Falls für die gross gewählten Bandbreiten die mit den Testrechnungen ermittelten Dosisintervalle keine eindeutige Aussage bzgl. "sicherheitstechnischer Eignung" bzw. "sicherheitstechnischer Gleichwertigkeit" erlauben, werden mögliche Änderungen der Dosisintervalle, die sich aus einer möglichen Reduktion der Bandbreiten infolge künftiger Untersuchungen ergeben könnten, antizipiert und auf ihre entscheidrelevanten Auswirkungen hin analysiert (Teilfigur c) in Fig. 2.1-1). Mit diesem Vorgehen wird ersichtlich, ob der Kenntnisstand ausreicht, um eindeutige Aussagen bezüglich der sicherheitstechnischen Eignung bzw. der sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit der geologischen Standortgebiete als belastbare Entscheidungsgrundlagen für die Auswahl von Standorten in SGT Etappe 2 zu erhalten, auch unter Berücksichtigung der bestehenden Ungewissheiten.

[8] Dies entspricht dem üblichen Vorgehen bei der Erarbeitung von belastbaren Entscheidungsgrundlagen im Rahmen einer Sicherheitsanalyse.

Gemäss BFE (2008) und ENSI (2010a) sind Standorte sicherheitstechnisch geeignet, falls ihr Dosisintervall vollständig unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/a liegt. Standorte gelten als sicherheitstechnisch gleichwertig, wenn ihre Dosisintervalle vollständig unter dem Schwellenwert von 0.01 mSv/a liegen; diese Standorte werden weiter evaluiert. Ein Standort, bei dem ein Teil des Dosisintervalls zwischen 0.01 und 0.1 mSv/a liegt, verbleibt ebenfalls in der Evaluation, falls sein Dosisintervall mit dem Dosisintervall des Standorts mit dem kleinsten Dosismaximum im Referenzfall (im Folgenden als "niedrigstes Dosisintervall" bezeichnet) überlappt. Somit ergeben sich die folgenden Situationen bezüglich der sicherheitstechnischen Beurteilung von Standortgebieten und der Entscheidrelevanz von ergänzenden Untersuchungen (vgl. Fig. 2.1-1):

- Eine klare Situation ergibt sich, wenn das gesamte Dosisintervall unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/a liegt (Teilfigur a) in Fig. 2.1-1): Standort "grün" und "gelb"; Teilfiguren b) und c) in Fig. 2.1-1: jeweils Standort "grün"): Solche Standorte sind gemäss den Vorgaben des BFE und des ENSI sicherheitstechnisch geeignet und als gleichwertig zu betrachten. Unter der Voraussetzung, dass die Bandbreiten genügend breit gewählt wurden, liefern ergänzende Untersuchungen in diesem Fall mit grosser Wahrscheinlichkeit keinen entscheidrelevanten Kenntniszuwachs und sind deshalb für die betreffenden Standortgebiete nicht notwendig.

- Liegt das gesamte Dosisintervall zwar unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/a, ein Teil aber oberhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/a (Teilfigur a) in Fig. 2.1-1: Standort "blau"; Teilfigur b) in Fig. 2.1-1: Standort "gelb"; Teilfigur c) in Fig. 2.1-1: möglicherweise Standort "gelb" und Standort "blau"), so wird der betreffende Standort gemäss Vorgabe des BFE bzw. des ENSI nur dann weiter evaluiert, falls sein Dosisintervall mit dem niedrigsten Dosisintervall überlappt. Deshalb sind hier zwei Fälle zu unterscheiden:

  a) Überlappt das Dosisintervall mit dem niedrigsten Dosisintervall, so wird der betreffende Standort gemäss Vorgabe des ENSI weiter evaluiert, falls für den betreffenden Standort die Untergrenze des Dosisintervalls (Referenzfall) genügend vorsichtig (pessimistisch) gewählt wurde, und falls für das niedrigste Dosisintervall nicht eine zu vorsichtige (zu pessimistische) Obergrenze des Dosisintervalls gewählt wurde.

     Für diesen Fall könnte es angebracht sein, Modellrechnungen mit einem etwas pessimistischeren Referenzfall durchzuführen, und für das niedrigste Dosisintervall können für die Obergrenze Modellrechnungen mit weniger pessimistischen Annahmen notwendig sein.

     Ergeben die Überprüfung der Bandbreiten bzw. die Berechnungen mit angepassten Bandbreiten immer noch eine Überlappung, so wird mit grosser Wahrscheinlichkeit durch zusätzliche Untersuchungen kein entscheidrelevanter Kenntniszuwachs herbeigeführt, und es kann auf zusätzliche Untersuchungen verzichtet werden. Andernfalls würden sich zusätzliche Untersuchungen aufdrängen.

  b) Gibt es keine Überlappung mit dem niedrigsten Dosisintervall, so würde der Standort ausscheiden. In diesem Fall muss abgeklärt werden, ob ergänzende Untersuchungen das Potenzial haben, eine Überlappung mit dem niedrigsten Dosisintervall herzustellen, oder aber die Obergrenze des Dosisintervalls unter den Schwellenwert von 0.01 mSv/a zu senken.

     Es könnte angebracht sein, Rechnungen mit einem detaillierteren, noch näher an der Realität liegenden Referenzfall durchzuführen und für das niedrigste Dosisintervall könnten für die Obergrenze Modellrechnungen mit weniger optimistischen Annahmen notwendig sein. Weiter wäre evtl. auch für die Obergrenze die Möglichkeit von angepassten Annahmen zu prüfen.

Ergeben die Berechnungen mit angepassten Bandbreiten jetzt eine Überlappung, so muss die Belastbarkeit der alternativen Annahmen geprüft werden; je nach deren Ausgang würden sich zusätzliche Untersuchungen aufdrängen.

- Eine klare Situation liegt auch vor, wenn der obere Rand des Dosisintervalls über dem Schutzkriterium von 0.1 mSv/a gemäss ENSI-G03 liegt; der Standort scheidet aus (Teilfigur b) in Fig. 2.1-1): Standort "blau"). Unter der Voraussetzung, dass die obere Bandbreite nicht zu ungünstig gewählt wurde, liefern ergänzende Untersuchungen in diesem Fall mit grosser Wahrscheinlichkeit keinen entscheidrelevanten Kenntniszuwachs und sind deshalb für das entsprechende Standortgebiet nicht notwendig.

  Liegt also der obere Rand des Dosisintervalls über dem Schutzkriterium von 0.1 mSv/a, wird die obere Bandbreite speziell geprüft bezüglich der pessimistischen/konservativen Annahmen; Rechnungen mit weniger pessimistischen Annahmen können angebracht sein.

  Kann mit den Berechnungen mit angepassten Bandbreiten jetzt das Schutzziel eingehalten werden, so muss die Belastbarkeit der alternativen Annahmen beurteilt werden. Weiter ist zu prüfen, ob eine Überlappung mit dem tiefsten Dosisintervall vorliegt. Je nach Ausgang der Beurteilung bzw. Prüfung würden sich zusätzliche Untersuchungen aufdrängen.

Diese Überlegungen zeigen, dass bezüglich der Ermittlung der Dosisintervalle und der diesbezüglichen Entscheide weitergehende Untersuchungen[9] nur dann entscheidrelevant und erforderlich sind, wenn die Testrechnungen zeigen, dass die Möglichkeit besteht, dass entweder ein möglicherweise geeigneter Standort ungerechtfertigt ausscheidet, oder aber dass ein Standort ungerechtfertigt im Standortwahlverfahren verbleibt und sich später als sicherheitstechnisch ungeeignet erweist.

2.2 Unterlagen zur Beurteilung der technischen Machbarkeit

Für die Beurteilung der technischen Machbarkeit wird geprüft, welche verschiedenen Arten/ Varianten der bautechnischen Auslegung vorgesehen werden müssen, damit die bautechnische Machbarkeit in den verschiedenen geologischen Standortgebieten gewährleistet werden kann (Kap. 5). Dies umfasst die Auslegung der Lagerkammern, die verschiedenen Möglichkeiten zur Anordnung der untertägigen Lagerbauten zur optimalen Nutzung des untertägigen Platzangebots[10] und die verschiedenen Möglichkeiten zur Erschliessung der untertägigen Lagerbauten mit Schacht und/oder Rampe. Anschliessend wird analysiert, welche sicherheitstechnischen Auswirkungen die verschiedenen bautechnischen Auslegungsvarianten haben und ob diese aus Sicht der Langzeitsicherheit grundsätzlich akzeptabel sind (Kap. 6.2.4). Schliesslich ist zu beurteilen, ob der heutige Kenntnisstand ausreicht, um für die verschiedenen Standortgebiete Varianten zur Auslegung der Anlagen vorzuschlagen und die Möglichkeit für deren zuverlässige Erstellung belastbar aufzuzeigen sowie die Auswirkungen der verschiedenen Auslegungsvarianten auf die Sicherheit standortspezifisch zu beurteilen (Kap. 7). Falls dies mit dem heutigen Kenntnisstand unter Berücksichtigung der erwarteten Neuerkenntnisse aus den Untersuchungen für Etappe 2 möglich ist, sind für Etappe 2 keine über die von der Nagra geplanten Arbeiten hinausgehende Untersuchungen notwendig.

---

[9] Mit "weitergehenden Untersuchungen" sind hier und im Folgenden Untersuchungen gemeint, die über das hinaus gehen, was die Nagra nach Einreichung der Unterlagen für Etappe 1 im Hinblick auf Etappe 2 bereits abgeschlossen, begonnen bzw. geplant hat (vgl. Kap. 8).

[10] Für die effektive Anordnung der untertägigen Lagerbauten und die abschliessende Beurteilung des Platzangebots sind die für Etappe 3 geplanten Felduntersuchungen von der Oberfläche (insbesondere Seismik) und evtl. in der Phase nach Erteilung der Rahmenbewilligung auch die Exploration von Untertag notwendig.

2.3 Unterlagen für die qualitative Bewertung

Die in SGT Etappe 2 erforderliche qualitative Bewertung der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit gemäss SGT Tabelle 1 (BFE 2008) orientiert sich am Vorgehen bei der Bewertung der bevorzugten Bereiche bzw. der geologischen Standortgebiete in SGT Etappe 1. Neben den Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs werden dabei auch Aspekte der Langzeitstabilität, der Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen und der bautechnischen Eignung berücksichtigt. Für die qualitative Bewertung wird auf die in SGT Etappe 1 verwendeten Indikatoren abgestützt. Grundsätzlich werden die zugehörigen, in Nagra (2008b, d) beschriebenen Bewertungsskalen verwendet; diese werden aber punktuell entsprechend den Hinweisen in den Behördengutachten zu SGT Etappe 1 angepasst. Wie in Kap. 3 aufgezeigt wird, werden die für die Analyse der Sicherheit und der Beurteilung der technischen Machbarkeit relevanten Prozesse und Parameter den im SGT (BFE 2008) vorgegebenen Kriterien zugeordnet. Dies erlaubt es, bei ausgewählten Kriterien (bzw. den zugehörigen Indikatoren) auch Resultate und Auswertungen der quantitativen Analysen zur Sicherheit und zur Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit in die qualitative Gesamtbewertung und den Vergleich der Standorte einfliessen zu lassen.

Der Kenntnisstand für die qualitative Bewertung muss ausreichen, um einerseits die Indikatoren zu bewerten, so wie dies in SGT Etappe 1 erfolgt ist, und um andererseits die Bewertung mit zusätzlichen Argumenten basierend auf den quantitativen Analysen zur Sicherheit (Analyse des Systemverhaltens, Auswertung der Dosisberechnungen) und technischen Machbarkeit zu ergänzen. Für die Beurteilung des Kenntnisstands kann bezüglich der Bewertung der Indikatoren anhand der Bewertungsskalen auf die Erfahrungen in SGT Etappe 1 abgestützt werden, für die Ergänzung der qualitativen Bewertung basierend auf den quantitativen Analysen zur Sicherheit und technischen Machbarkeit auf die diesbezüglichen Abklärungen im vorliegenden Bericht. Werden die Erfahrungen bezüglich des Kenntnisstands für die qualitative Bewertung als geeignet beurteilt und genügt der Kenntnisstand unter Berücksichtigung der erwarteten Neuerkenntnisse in Etappe 2, um die quantitativen Analysen zur Sicherheit und technischen Machbarkeit durchzuführen und für die Gesamtbewertung zu nutzen, dann sind in Etappe 2 keine über die von der Nagra geplanten Arbeiten hinausgehende Untersuchungen notwendig.

3 Rahmenbedingungen und Festlegungen

3.1 Wichtige Grundlagen und Konzepte

Wichtige Grundlagen und Konzepte für die Testrechnungen zur Ermittlung der Dosisintervalle und für die Beurteilung der technischen Machbarkeit sowie für die qualitative Bewertung betreffen das Abfallinventar (Abfallzuteilung) und den zugehörigen Betrachtungszeitraum, das Lager-, Barrieren- und Sicherheitskonzept sowie die vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete:

- In Übereinstimmung mit den Abklärungen zum Platzbedarf in SGT Etappe 1 basieren die vorliegenden Abklärungen auf dem sogenannten "Umhüllenden Inventar" für die einzulagernden radioaktiven Abfälle gemäss MIRAM 08 (vgl. Nagra 2008e). Dieses unterstellt einen 60-jährigen Betrieb der bestehenden KKW, eine zusätzliche Stromproduktion (Gesamtleistung 5 GWe pro Jahr) durch neue KKW mit einer Betriebsdauer von 60 Jahren und eine erweiterte Sammelperiode für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung bis 2120.
- Es wird das in SGT Etappe 1 beschriebene Entsorgungskonzept mit einem HAA-Lager und einem SMA-Lager verwendet (Nagra 2008b, d). Dieses Konzept erlaubt es, neben den ATA[11] auch die dosisdominierenden SMA-Abfallsorten im LMA-Teil des HAA-Lagers zu entsorgen. Die in SGT Etappe 1 definierten Abfallzuteilungen zu den Lagern SMA und HAA (Referenzzuteilung, alternative Zuteilung) werden beibehalten, wobei für die Testrechnungen zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle die Referenzzuteilung verwendet wird[12]. Das SMA- und das HAA-Lager können an zwei verschiedenen Standorten, bei einer entsprechenden geologischen Situation aber auch am gleichen Standort (mit den Lagerkammern für beide Lager räumlich getrennt entweder in der gleichen oder aber in unterschiedlichen geologischen Schichten) erstellt werden ('Kombilager').
- Für das SMA-Lager wird dort, wo es die geologischen Verhältnisse zulassen und dies als sinnvoll erachtet wird, ein Lager auf zwei Lagerebenen im gleichen oder in verschiedenen Wirtgesteinen zur optimalen Nutzung der geologischen Gegebenheiten in den entsprechenden Standortgebieten vorgesehen. Konkret bedeutet dies, dass für die geologischen Standortgebiete Zürich Nord-Ost, Nördlich Lägeren und Jura-Südfuss, in denen zwei bevorzugte Wirtgesteine vorkommen, sowie für das geologische Standortgebiet Wellenberg, wo die Mergel-Formationen des Helvetikums eine grosse Mächtigkeit aufweisen, das dem SMA-Lager zugeteilte Abfallinventar auf zwei Lagerebenen aufgeteilt wird. Dabei ist vorgesehen, den zwei Lagerebenen je etwa die Hälfte des gesamten SMA-Abfallvolumens zuzuteilen. Dies gilt auch für das Kombilager, wo in den Standortgebieten Zürich Nord-Ost und Nördlich Lägeren die SMA-Abfälle etwa hälftig auf die beiden Wirtgesteine Opalinuston und 'Brauner Dogger' aufgeteilt werden. Zusätzlich wird für das SMA-Lager zur Illustration mit ausgewählten Rechnungen auch aufgezeigt, was die Lagerung des gesamten SMA-Inventars nur in einem Wirtgestein bedeutet.
- Die Barrieren- und Sicherheitskonzepte für das SMA- und das HAA-Lager entsprechen den in Nagra (2008b, d) für SGT Etappe 1 definierten Konzepten. Die Lagerkonzepte umfassen die obertägige Infrastruktur, den Zugang zu den untertägigen Lageranlagen (Rampe und/ oder Schacht), die untertägige Erschliessung der Lagerkammern und der Infrastrukturanlagen sowie die Testbereiche, das Pilot- und das Hauptlager mit den Lagerkammern. Für eine Beschreibung der Barrieren und ihrer Funktionen wird auf Nagra (2008b, d) verwiesen.

---

[11] ATA: alphatoxische Abfälle gemäss KEV (2004), Art. 51.

[12] Es bleibt vorbehalten, in SGT Etappe 2 oder später eine andere Abfallzuteilung zu verwenden.

- In Übereinstimmung mit der bisherigen Praxis (Nagra 1994, 2002c, Nagra 2008b, d) ist weiterhin vorgesehen, diejenigen Abfallsorten, die Stoffe enthalten, welche die Mobilität der Radionuklide im Zementnahfeld erhöhen könnten, entsprechend dem Gehalt an solchen Stoffen in zwei Abfallgruppen einzuteilen. Dabei werden der Gruppe 1 solche Abfälle zugeteilt, die im Hinblick auf eine mögliche Beeinträchtigung der geochemischen Rückhaltemechanismen nur geringe Konzentrationen an Störstoffen enthalten, der Gruppe 2 alle übrigen Abfälle. Sowohl im SMA-Lager als auch im LMA-Teil des HAA-Lagers ist vorgesehen, die beiden Gruppen in räumlich getrennten Lagerkammern (Kavernen resp. Tunnels) einzulagern, um den Einfluss von Störstoffen auf die Radionuklidmobilität möglichst gering zu halten.
- Für die optimale Nutzung des geologischen Untergrunds (Berücksichtigung von Lage und Häufigkeit von gebietsbegrenzenden und anordnungsbestimmenden geologischen Elementen) wird ein Lagerkonzept verwendet, welches die Verwendung verschiedener räumlich getrennter Lagerfelder erlaubt, und wo es möglich ist, innerhalb der Lagerfelder Lagerkammern von unterschiedlicher Länge zu verwenden. Dies erlaubt es, neben den regionalen, die geologischen Standortgebiete begrenzenden Elementen (vgl. SGT Etappe 1) auch die weiteren, eher kleinräumigen geologischen Elemente bei der Anordnung der Lagerkammern zu berücksichtigen (Fig. 3.1-1). Solchen Elementen (die so genannten anordnungsbestimmenden geologischen Elemente) wird bei der Anordnung der Lagerkammern ausgewichen, unter Einhaltung eines adäquaten Sicherheitsabstands.
- Der Betrachtungszeitraum definiert den Zeitraum, innerhalb welchem mit den provisorischen Sicherheitsanalysen die Einhaltung der Schutzkriterien quantitativ aufzuzeigen ist (ENSI 2010a) und legt damit fest, wie lange die Barrieren der geologischen Tiefenlager ihre Funktion zu erfüllen haben. Nach Ablauf des Betrachtungszeitraums sind gemäss ENSI-G03 (ENSI 2009) die möglichen regionalen radiologischen Auswirkungen zu ermitteln, welche nicht wesentlich höher sein dürfen als die natürliche radiologische Belastung. Der Betrachtungszeitraum wurde im Rahmen der sicherheitstechnischen Arbeiten für SGT Etappe 1 abgeleitet und berücksichtigt die Vorgaben in ENSI-G03 (ENSI 2009). Er beträgt – unter Berücksichtigung der Radiotoxizität des zugeteilten Abfallinventars und ihrer zeitlichen Entwicklung (radioaktiver Zerfall) – 100'000 Jahre für das SMA-Lager und eine Million Jahre für das HAA-Lager. Das ENSI hat die für SGT Etappe 1 von den Entsorgungspflichtigen hergeleiteten Betrachtungszeiträume als nachvollziehbar beurteilt (ENSI 2010a und b); diese werden deshalb weiterhin verwendet.

  Bei der Bestimmung der Dosisintervalle für das Kombilager wird in vorliegendem Bericht für den BE/HAA/LMA-Teil und den SMA-Teil von einem Betrachtungszeitraum von einer Million Jahren ausgegangen. Obschon für den SMA-Teil die Dosisberechnungen nur bis 100'000 Jahre durchgeführt werden müssen, werden die Dosisberechnungen auch für den SMA-Teil bis zu einer Million Jahre weitergeführt, um mit den Dosiskurven den gleichen Zeitraum wie für BE/HAA/LMA abzudecken. Für den SMA-Teil werden dabei die gleichen Parameterwerte wie am Ende des Betrachtungszeitraums für SMA (100'000 Jahre) verwendet[13]. Für SGT Etappe 2 bleibt ein anderes Vorgehen vorbehalten.

[13] Damit ist sichergestellt, dass sowohl beim SMA-Lager als auch beim SMA-Teil des Kombilagers der Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren für die Beurteilung des Langzeitverhaltens des Barrierensystems verwendet wird und damit diesbezüglich gleiche Anforderungen gelten.

Zur Verbesserung des Verständnisses zum Verhalten des Barrierensystems werden sowohl für das HAA-Lager als auch das SMA-Lager die Dosisberechnungen über den Betrachtungszeitraum hinaus weiter geführt bis 10 Millionen Jahre mit den gleichen Parameterwerten wie am Ende des Betrachtungszeitraums.

- Die von der Nagra für SGT Etappe 1 vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete sind mit Angabe der Wirtgesteine und Rahmengesteine in Tab. 3.1-1 aufgelistet. Nachdem die Sicherheitsbehörden diesen Vorschlägen zugestimmt haben, bilden diese die Ausgangslage für die in diesem Bericht dokumentierten Abklärungen.

Tab. 3.1-1: Von der Nagra in SGT Etappe 1 vorgeschlagene geologische Standortgebiete mit ihren Wirtgesteinen und Rahmengesteinen.

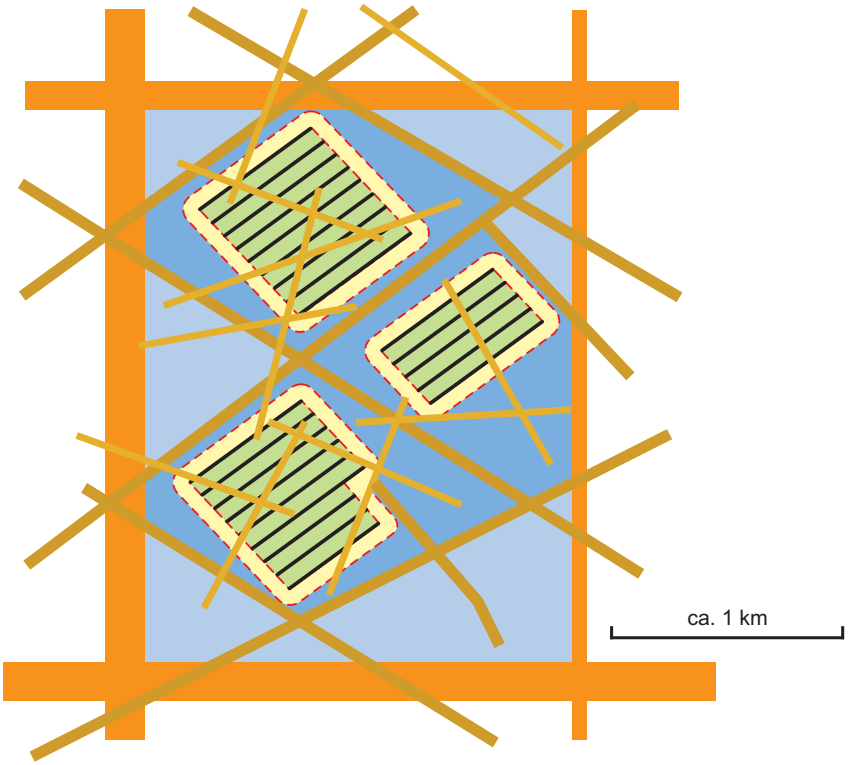
Das Wirtgestein und seine Rahmengesteine werden zusammen als einschlusswirksamer Gebirgsbereich bezeichnet.

Lager-typ	**Geologisches Standortgebiet**	**Wirtgestein**	**Obere Rahmengesteine**	**Untere Rahmengesteine**
HAA	Zürich Nord-Ost	Opalinuston	Effinger Schichten, 'Brauner Dogger'	Oberer Lias [2)]
	Nördlich Lägeren	Opalinuston	Effinger Schichten, 'Brauner Dogger'	Oberer Lias [2)]
	Bözberg	Opalinuston	Basis Hauptrogenstein bis Top Opalinuston	Oberer Lias [2)]
SMA	Südranden	Opalinuston	Effinger Schichten, 'Brauner Dogger'	Oberer Lias [2)]
	Zürich Nord-Ost [1), 3)]	'Brauner Dogger'	Effinger Schichten	Opalinuston, Oberer Lias [2)]
		Opalinuston	Effinger Schichten, 'Brauner Dogger'	Oberer Lias [2)]
	Nördlich Lägeren [1), 3)]	'Brauner Dogger'	Effinger Schichten	Opalinuston, Oberer Lias [2)]
		Opalinuston	Effinger Schichten, 'Brauner Dogger'	Oberer Lias [2)]
	Bözberg	Opalinuston	Basis Hauptrogenstein bis Top Opalinuston	Oberer Lias [2)]
	Jura-Südfuss [1), 3)]	Effinger Schichten	-	-
		Opalinuston	Top Opalinuston bis Basis Hauptrogenstein	Oberer Lias [2)]
	Wellenberg [1)]	Mergel-Formationen des Helvetikums	-	-
Kombi-lager	Zürich Nord-Ost	'Brauner Dogger' (SMA) [1), 3)]	Effinger Schichten	Opalinuston, Oberer Lias [2)]
		Opalinuston (SMA [1), 3)] /HAA)	Effinger Schichten, 'Brauner Dogger'	Oberer Lias [2)]
	Nördlich Lägeren	'Brauner Dogger' (SMA) [1), 3)]	Effinger Schichten	Opalinuston, Oberer Lias [2)]
		Opalinuston (SMA [1), 3)] /HAA)	Effinger Schichten, 'Brauner Dogger'	Oberer Lias [2)]
	Bözberg	Opalinuston (SMA/HAA)	Basis Hauptrogenstein bis Top Opalinuston	Oberer Lias [2)]

1) SMA-Lager mit zwei Lagerebenen (Referenzfall).

2) Zusätzlich weitere geringdurchlässige Formationen bis Top Muschelkalk.

3) Annahme für die Testrechnungen; für SGT Etappe 2 bzw. die spätere Realisierung bleibt eine Platzierung des ganzen SMA-Lagers im Opalinuston bzw. im 'Braunen Dogger' oder in den Effinger Schichten grundsätzlich vorbehalten (vgl. dazu auch die illustrativen Resultate für den Referenzfall in Anhang A7 und für die ENSI-Rechenfälle in Nagra 2010b).



Signatur	Beschreibung	Bedeutung
	gebietsbegrenzende geologische Elemente	gebietsbegrenzend
	anordnungsbestimmende geologische Elemente	bestimmt Anordnung der Lagerkammern
	kleinere wasserführende Störungszonen	sicherheitsbestimmend
	Lagerkammern	–
	Lagerkammerbereich	–
	Lagerfeld	–
	nutzbare Lagerzone	–
	nicht nutzbare Lagerzone	–

Fig. 3.1-1: Klassifizierung von geologischen Elementen im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Hinblick auf die Anordnung der Lagerkammern.

Es wird unterschieden zwischen gebietsbegrenzenden geologischen Elementen und anordnungsbestimmenden geologischen Elementen (bestimmen Anordnung der Lagerkammern; werden teilweise erst bei der untertägigen Exploration des entsprechenden Bereichs lokalisiert). Weiter können geologische Elemente (Störungszonen) vorhanden sein, denen wegen ihrer Häufigkeit und/oder Explorierbarkeit mit den Lagerkammern nicht ausgewichen werden kann und die deshalb die Barrierenwirkung des Wirtgesteins direkt beeinflussen; sie sind deshalb sicherheitsbestimmend. Der Bereich, in dem alle Lagerkammern angeordnet sind, wird als Lagerperimeter bezeichnet.

3.2 Festlegung der relevanten Prozesse und Parameter

Im vorliegenden Kapitel wird abgeleitet, welche Prozesse und Parameter für die Sicherheit und technische Machbarkeit relevant sind. Dazu kann auf die in SGT Etappe 1 in Zusammenhang mit der Ableitung der Anforderungen an die Geologie gemachten Arbeiten zurückgegriffen werden, insbesondere die generelle Beschreibung des Barrieren- und Sicherheitskonzepts und die für die Gewährleistung der Sicherheit und technischen Machbarkeit relevanten Sicherheitsfunktionen und übergeordneten Prinzipien (Nagra 2008d). Diese bildeten in SGT Etappe 1 den Ausgangspunkt für die Ableitung der den verschiedenen Kriterien zugeordneten Indikatoren, die bei der schrittweisen Festlegung und Bewertung der geologischen Standortgebiete verwendet wurden. Die Ableitung erfolgte über verschiedene Schritte; die dabei erarbeiteten Zwischenresultate (insbesondere Tabelle 5.3-1 in Nagra 2008d) sowie die Beschreibung des Barrieren- und Sicherheitskonzepts bilden auch eine geeignete Basis für die Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter im vorliegenden Bericht.

Die relevanten Prozesse und Parameter werden anhand des folgenden Vorgehens identifiziert (Fig. 3.2-1, vgl. dazu auch Kapitel 5 in Nagra 2008d):

- **Sicherheitsfunktionen und Prinzipien –** Den Ausgangspunkt bilden die Sicherheitsfunktionen und Prinzipien (vgl. Anhang A1). Dabei gilt, dass ein geologisches Tiefenlager (SMA- bzw. HAA-Lager) eine genügende Sicherheit bietet, falls diese Sicherheitsfunktionen wirksam sind und die Prinzipien eingehalten werden.
- **Relevante Elemente des Barrierensystems –** Die Sicherheitsfunktionen werden gewährleistet durch die Elemente des Barrierensystems (Barrieren- und Sicherheitskonzept, siehe Kapitel 4.3 in Nagra 2008d), wobei meistens mehrere Elemente des Barrierensystems zu einer bestimmten Sicherheitsfunktion beitragen. Mit der Wahl geeigneter Elemente des Barrierensystems wird auch sichergestellt, dass die oben erwähnten Prinzipien erfüllt sind.
- **Sicherheitsrelevante Eigenschaften –** Damit die Elemente des Barrierensystems die Sicherheitsfunktionen im Betrachtungszeitraum gewährleisten können, müssen sie die entsprechenden sicherheitsrelevanten Eigenschaften besitzen (siehe Beschreibung der Sicherheitsfunktionen in Anhang 1 bzw. in Kapitel 4.4 in Nagra 2008d).
- **Relevante Prozesse und Parameter –** Die Wirkung der sicherheitsrelevanten Eigenschaften wird durch verschiedene Prozesse und Parameter bestimmt. Somit lassen sich die relevanten Prozesse und Parameter direkt aus den sicherheitsrelevanten Eigenschaften der entsprechenden Elemente des Barrierensystems ableiten. Entsprechend der Zielsetzung des vorliegenden Berichts liegt der Schwerpunkt bei der Ableitung bei denjenigen Prozessen und Parametern, die entweder geologische Merkmale repräsentieren oder durch solche beeinflusst werden.[14] Dabei werden insbesondere die standortspezifischen geologischen Aspekte betrachtet, weil vor allem diese für die provisorische Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich im Hinblick auf die Prioritätensetzung für die Festlegung von Vorschlägen durch die Nagra in Etappe 2 von Bedeutung sind. Daneben werden auch diejenigen Aspekte zum Verhalten der technischen Barrieren untersucht, die entsprechend den Vorgaben des ENSI (2010a) in den provisorischen Sicherheitsanalysen mit einzubeziehen sind. Weiter werden bei der Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter auch Erfahrungen aus Sensitivitätsstudien, aus früheren Sicherheitsanalysen sowie aus der Entwicklung von Anlagenkonzepten berücksichtigt.

---

[14] Aus diesem Grund werden verschiedene Prozesse und Parameter, die zwar sicherheitsrelevant sind, aber nicht durch geologische Prozesse und Parameter beeinflusst werden, bei der Ableitung nicht berücksichtigt. In diesem Sinne bezieht sich 'relevant' auf die sicherheitsbezogene Prioritätensetzung bezüglich der in Etappe 3 weiter zu betrachtenden Standorte.

Ein Teil dieser Prozesse und Parameter fliesst direkt in die sicherheitstechnischen Modellrechnungen ein oder wird in der standortspezifischen Anlagenplanung berücksichtigt. Die anderen Prozesse und Parameter werden für die qualitative Bewertung der Standortgebiete verwendet (vgl. unten).

- **Indikatoren –** Wie in Etappe 1 bildet die Analyse der sicherheitsrelevanten Eigenschaften auch die Basis zur Festlegung der den verschiedenen Kriterien zugeordneten Indikatoren. Da für die Ableitung der Indikatoren und der relevanten Prozesse und Parameter von den gleichen sicherheitsrelevanten Eigenschaften ausgegangen wird, ergibt sich eine "Verknüpfung" zwischen Kriterien bzw. Indikatoren und zugehörigen relevanten Prozessen und Parametern. Damit ist auch aufgezeigt, wie die Prozesse und Parameter in die Bewertung der Indikatoren einfliessen. Die Kriterien bzw. Indikatoren bzw. die zugehörigen relevanten Prozesse und Parameter werden für die qualitative Bewertung der Standorte und ihren Vergleich verwendet.

Tab. A2-1 fasst die so identifizierten relevanten Prozesse und Parameter zusammen. Diese Tabelle zeigt auch, welche der Prozesse und Parameter direkt für die quantitative Analyse der Sicherheit verwendet und/oder in der Anlagenplanung zur Berücksichtigung standortspezifischer Aspekte berücksichtigt werden. Bei der Analyse der Sicherheit werden die Prozesse und Parameter entweder in den begleitenden Systemanalysen[15] verwendet, oder sie fliessen direkt in die sicherheitstechnischen Modellrechnungen (Testrechnungen) zur Ermittlung der Dosisintervalle ein. Solche Modellrechnungen werden auch in Etappe 2 verwendet für Aussagen zum Rückhaltevermögen des Gesamtsystems, zum Beitrag der geologischen Barriere zur Langzeitsicherheit und zum Langzeitverhalten der technischen Barrieren als Teil der Gesamtbewertung der Standorte und den sicherheitstechnischen Vergleich. In Tab. A2-1 wird ferner aufgezeigt, welche Prozesse und Parameter in die qualitative Bewertung der Kriterien gemäss SGT Tabelle 1 (BFE 2008) einfliessen.

[15] Hier und im Folgenden werden die Analysen zum Verhalten des Barrierensystems mit dem Begriff 'Systemanalysen' abgekürzt (vgl. Kap. 6.2). Die Systemanalysen haben den Zweck, für die Sicherheitsanalysen wichtige Voraussetzungen und Annahmen durch entsprechende Rechnungen zu prüfen bzw. zu bestätigen, und sie dienen auch dazu, gewisse Inputparameter für die Sicherheitsanalysen abzuleiten. Ferner liefern sie Vorgaben und Hinweise für die detaillierte Auslegung des Lagers (Abfallzuteilung zum SMA- bzw. HAA-Lager, Abfallaufteilung auf die verschiedenen Lagerebenen bzw. Abfallgruppen, Identifikation von Vorgaben an einzelne Systemkomponenten etc.).

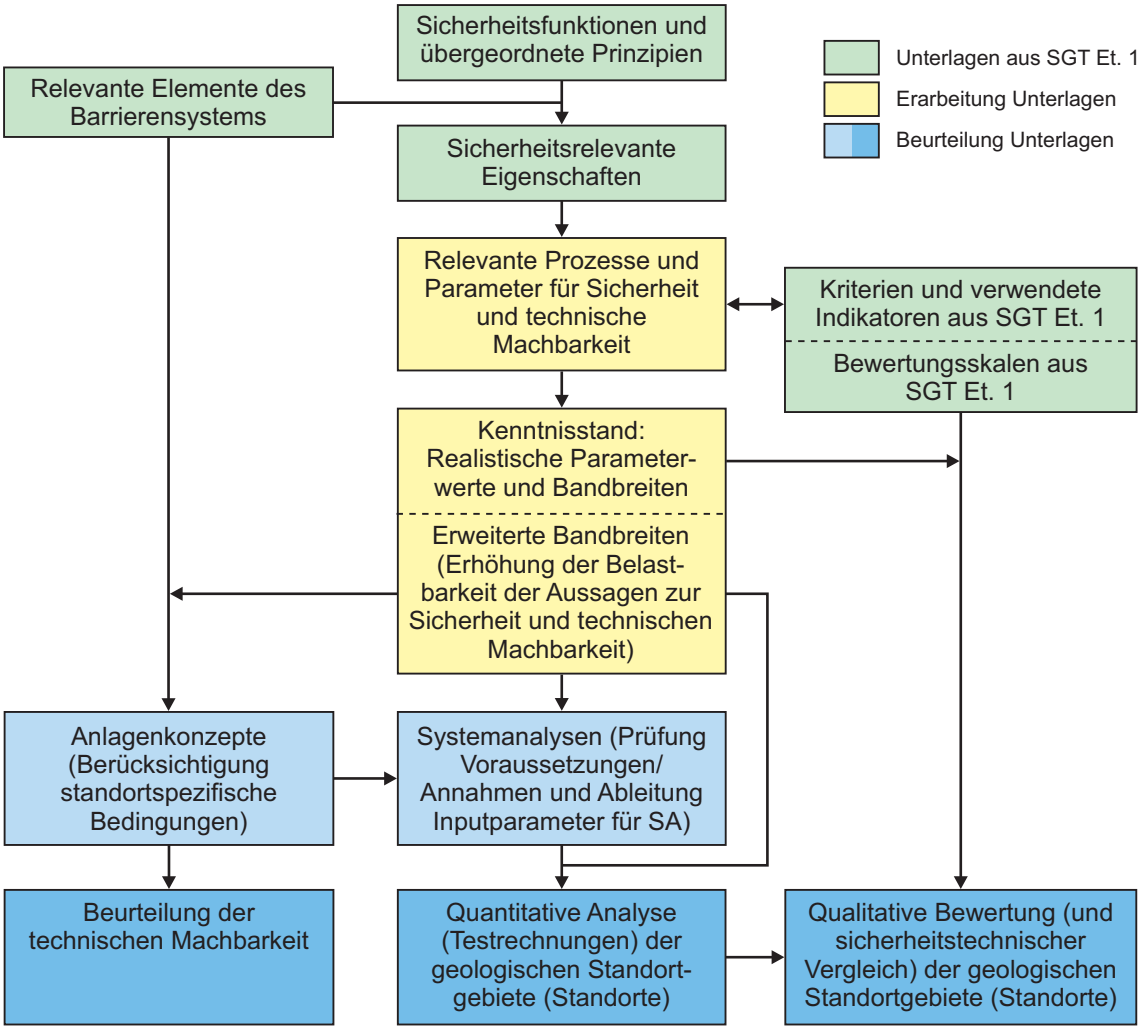


Fig. 3.2-1: Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter aus den Sicherheitsfunktionen und den übergeordneten Prinzipien und ihre Verwendung in der provisorischen Sicherheitsanalyse und im sicherheitstechnischen Vergleich.

Die in Tab. A2-1 identifizierten relevanten Prozesse und Parameter werden in Tab. 3.2-1 zusammengefasst und nach ihrer Rolle im vorliegenden Bericht wie folgt gegliedert:

- Prozesse und Parameter, welche direkt als Parameterwerte in den Systemanalysen bzw. in den Dosisberechnungen (Testrechnungen) verwendet werden, mit Bezug zu den technischen Barrieren (PT) bzw. geologischen Barrieren (PG).
- Prozesse und Parameter, welche über Parameterwerte für die Beurteilung der technischen Machbarkeit verwendet bzw. in der standortspezifischen Anlagenplanung berücksichtigt werden (PB).
- Prozesse und Parameter, die ausschliesslich in die qualitative Bewertung einfliessen (PI) und dort bei der Evaluation der zugehörigen Kriterien bzw. Indikatoren verwendet werden.

In Tab. 3.2-1 wird auch aufgezeigt, wie die Prozesse und Parameter bezüglich Geologie und weiterer Aspekte einzuordnen sind (Geometrie und Strukturen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, hydrogeologische Verhältnisse, Langzeitentwicklung, Eigenschaften der technischen Barrieren, Biosphäre). Die Informationen für diese Prozesse und Parameter werden in den entsprechenden Abschnitten von Kap. 4 diskutiert. Dort wird auch beurteilt, ob die Unterlagen geeignet sind für die Ableitung der Grundlagen für die Testrechnungen (Festlegung der Rechenfälle, Konzeptualisierung des Barrierensystems (insbesondere der einschlusswirksame Gebirgsbereich) für die Rechenfälle und deren Parametrisierung). Ebenso wird dort diskutiert, ob die Unterlagen geeignet sind für die in diesem Bericht vorzunehmende Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit.

In Tab. 3.2-1 wird auch aufgezeigt, wo in vorliegendem Bericht die Informationen in die gesamtheitlichen Analysen einfliessen und der Kenntnisstand im Hinblick auf die Eindeutigkeit der Aussagen bzgl. "sicherheitstechnischer Eignung" bzw. "sicherheitstechnischer Gleichwertigkeit" beurteilt wird.

Bei der Evaluation des Kenntnisstands wird zwischen folgenden Verwendungsbereichen der Information unterschieden:

- Beurteilung der technischen Machbarkeit mit folgenden Themen: Auslegung der Lagerkammern (inkl. Beurteilung der Standsicherheit), Anordnung der Lagerkammern (Anordnung des Lagers auf mehreren Ebenen, Platzierung der Lagerfelder und Lagerkammern, Beurteilung des Platzangebots), untertägige Erschliessung, jeweils unter Berücksichtigung der relevanten geologischen Prozesse und Parameter.
- Systemanalysen, welche die folgenden Themen betreffen:
  - Ableitung von Parameterwerten für die Sicherheitsanalyse (z.B. Ableitung Sorptionskoeffizienten) unter Berücksichtigung der relevanten geologischen Prozesse und Parameter (z.B. für Sorptionskoeffizienten: Mineralogie, pH, Redox-Bedingungen, Salinität) und Evaluation des Kenntnisstands dieser geologischen Prozesse und Parameter
  - Evaluation der Bedeutung lagerbedingter Einflüsse (d.h. Einfluss von pH-Fahne, Gas, Temperatur, Auflockerungszone auf das Systemverhalten) unter Berücksichtigung der relevanten geologischen Prozesse und Parameter sowie der bautechnischen Einflüsse. Weiter wird festgelegt, wie diese Einflüsse in den Testrechnungen zu berücksichtigen sind, und der Kenntnisstand der dazu relevanten geologischen Prozesse und Parameter wird evaluiert
  - Evaluation der sicherheitstechnischen Einflüsse von bautechnischen Auslegungsvarianten (BE/HAA-Lagerstollen mit einem flächendeckenden Spritzbetonausbau und Zwischensiegel, Querschnitte der SMA-Lagerkavernen) und Evaluation des Kenntnisstands der dazu relevanten Prozesse und Parameter
  - Evaluation der Bedeutung der geologischen Langzeitentwicklung im Betrachtungszeitraum unter Berücksichtigung der relevanten geologischen Prozesse und Parameter (langfristige Hebung/Erosion in Zusammenhang mit der Tiefenlage) und Beurteilung, ob und wie die geologische Langzeitentwicklung in den Testrechnungen zu berücksichtigen ist, sowie Evaluation des Kenntnisstands der dazu relevanten geologischen Prozesse und Parameter
  - Evaluation des Einflusses geologischer Prozesse und Parameter auf wichtige Nahfeldeigenschaften (z.B. Lebensdauer BE/HAA-Behälter, Sorption und Löslichkeit im Nahfeld) und Evaluation des Kenntnisstands dieser geologischen Prozesse und Parameter

  - Evaluation der Bedeutung von Nutzungskonflikten in Zusammenhang mit Rohstoffvorkommen unterhalb, im bzw. oberhalb des Wirtgesteins und in Zusammenhang mit Geothermie sowie Evaluation des diesbezüglichen Kenntnisstands

- Dosisberechnungen zur Ermittlung der Dosisintervalle (Referenzfall und alternative Fälle gemäss Vorgabe des ENSI, vgl. auch letzte Spalte in Tab. 3.2-1; zusätzlich nach Bedarf weitere alternative Rechenfälle und "What if?"-Fälle) basierend auf den Parameterwerten zur Geologie und auf den im Rahmen der Systemanalyse getroffenen Festlegungen; im vorliegenden Bericht werden dazu ausgewählte Testrechnungen durchgeführt.
- Qualitative Bewertung der geologischen Standortgebiete bzw. Standorte.

Um ihre Bedeutung klarer darzustellen, werden im Folgenden die Prozesse und Parameter aus Tab. 3.2-1 bezüglich ihrer funktionalen Rolle für die Sicherheit und technische Machbarkeit kurz beschrieben (nachfolgend jeweils in Klammern aufgeführt).

Das geologische Tiefenlager muss mit seinen geologischen und technischen Barrieren für den ganzen Betrachtungszeitraum eine genügende Rückhaltung der Radionuklide und eine hohe Sicherheit gewährleisten. Dazu sind die folgenden Aspekte sowie die zugehörigen Prozesse und Parameter von zentraler Bedeutung:

- **Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs** – Das Wirtgestein und seine Rahmengesteine gewährleisten eine gute Barrierenwirkung für Radionuklide und bilden ein geeignetes Umfeld für die technischen Barrieren (Beitrag zur guten Barrierenwirkung der technischen Barrieren, Gewährleistung der Langzeitstabilität der technischen Barrieren). Wichtige diesbezügliche Merkmale sind:
  - Wasserfluss durch die Lagerkammern (PG-6 / Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit, PG-8 / Hydraulischer Gradient) unter Berücksichtigung der sedimentären/ strukturellen Architekturelemente (s. unten)
  - Art und Häufigkeit von sedimentären/strukturellen Architekturelementen (PG-9 / Art der Transportpfade, PG-11 / Sedimentäre Architekturelemente, PG-12 / Lage und Beschaffenheit von verkarstungsfähigen Gesteinen innerhalb des Wirtgesteins, PG-14 / Transmissivität Störungszonen)
  - Advektion/Diffusion entlang der verschiedenen Transportpfade (PG-6 / Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit, PG-11 / Sedimentäre Architekturelemente, PG-14 / Transmissivität Störungszonen, PG-8 / Hydraulischer Gradient, PG-22 / Diffusionskoeffizienten für WG/EG, PG-10 / Porosität, PI-6 / Selbstabdichtungsvermögen)
  - Transportpfadlänge (PG-5 / Mächtigkeit, PG-13 / Länge der Transportpfade) unter Berücksichtigung der sedimentären/strukturellen Architekturelemente
  - Geochemische Rückhaltung und geochemische In-situ-Bedingungen (PG-21 / Sorptionskoeffizienten für WG/EG, sowie Einflussfaktoren zur Geochemie: PG-15 / Mineralogie, PG-16 / pH, PG-17 / Redox-Bedingungen, PG-18 / Salinität) sowie der mögliche Einfluss von Kolloiden (PG-20 / Kolloidfiltration) und Mikroorganismen (PG-19 / Mikrobielle Prozesse) in den verschiedenen Transportpfaden

- **Geologische Langzeitentwicklung** – Damit die Radionuklidrückhaltung innerhalb des Betrachtungszeitraums nicht durch die geologische Langzeitentwicklung (z.B. langfristige Hebung/Erosion) unzulässig beeinträchtigt wird, und das Lager nicht innerhalb des Betrachtungszeitraums freigelegt wird, muss das Lager in geeigneter Situation (z.B. in genügender Tiefe abgestimmt auf die erwartete Erosion im Betrachtungszeitraum) liegen. Dazu sind zu beachten:
  - Gesteins-Dekompaktion infolge abnehmender Überdeckung (PG-3 / Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion, PG-7 / Einfluss Dekompaktion auf hydraulische Durchlässigkeit) unter Berücksichtigung der Erosion
  - Zeitpunkt erosive Freilegung (PG-1 / Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung) unter Berücksichtigung der Erosion
  - Erosion im Betrachtungszeitraum (PG-4 / Zeitliche Entwicklung regionale Erosionsbasis, PG-28 / Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung, PG-30 / Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung)
  - Einfluss der glazialen Tiefenerosion (PG-2 / Glazial übertiefte Felsrinnen)
  - Neotektonische Prozesse mit dem Potenzial zur Schädigung des Barrierensystems (PI-2 / Geodynamische und neotektonische Aktivität, PI-3 / Vulkanische Aktivität)
- **Technische Barrieren** – Die Radionuklide werden innerhalb der technischen Barrieren wirkungsvoll zurückgehalten. Wichtige diesbezügliche Merkmale sind:
  - Vollständiger Einschluss in den Endlagerbehältern für eine begrenzte Zeit (PT-1 / Behälterlebensdauer BE/HAA)
  - Rückhaltung der Radionuklide, die in korrosionsresistenten Materialien eingebunden sind (PT-2 / Auflösungsrate für Brennstoffmatrix und Hüllrohre BE)
  - Schlechte Löslichkeit bzw. gute Sorption vieler Radionuklide im Nahfeld (PT-3 / Löslichkeitslimiten im Nahfeld BE/HAA/LMA, PT-4 / Sorptionskoeffizienten im Nahfeld)
  - Langsamer Transport der im Porenwasser befindlichen Radionuklide (PT-5 / Advektion bzw. Diffusion im Nahfeld)
  - Geeignete bautechnische Auslegung der Lagerkammern zur Vermeidung einer unverhältnismässigen Schädigung der umgebenden Geologie und zur Vermeidung von ungewollten Umläufigkeiten (PT-6 / Transportrelevante Eigenschaften Interface BE/HAA-Lagerstollen/Wirtgestein, PT-7 / Auslegung der Lagerkammern)
- **Lagerbedingte Einflüsse** – Die lagerbedingten Einflüsse (unter Berücksichtigung der Lagerkonzepte bzw. Lagerauslegung und der Abfallzuteilung) müssen mit den Eigenschaften des Wirtgesteins verträglich sein, damit sie dessen Rückhaltevermögen nicht unzulässig beeinträchtigen (PG-23 / Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagbauten, PT-6 / Transportrelevante Eigenschaften Interface BE/HAA-Lagerstollen/Wirtgestein, PG-24 / Auswirkungen pH-Fahne auf Wirtgestein, PG-25 / Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas, PG-26 / Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur, PB-5 / In-situ-Temperatur).
- **Nutzungskonflikte** – Nutzungskonflikte können zum unbeabsichtigten menschlichen Eindringen in das geologische Tiefenlager führen (z.B. Anbohren des Lagers bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) mit entsprechender Schädigung des Barrierensystems. Weiter kann auch die Nutzung von Ressourcen oberhalb des Wirtgesteins zu einer Beeinträchtigung des Barrierensystems führen. Deshalb werden nach Möglichkeit Nutzungs-

konflikte gemieden (PG-32 / Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins, PG-33 / Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins, PG-34 / Nutzungskonflikte hinsichtlich Geothermie, PB-10 / Nutzungskonflikte hinsichtlich Mineralquellen und Thermen, PI-1 / Nutzung der Gesteine als Rohstoff).

- **Biosphäre** – Die am Ort und zur Zeit der Radionuklidfreisetzung vorherrschenden Bedingungen in der Biosphäre bilden eine wichtige Randbedingung für die Berechnung der Dosen (PG-27 / Relevante Exfiltrationspfade, PG-29 / Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf Biosphärenmodellierung, PG-31 / Klimaentwicklung im Hinblick auf Abschätzung der Wasserflüsse bei der Biosphärenmodellierung).

Das geologische Tiefenlager muss zuverlässig und sicher erstellt, betrieben und verschlossen werden können. Für die technische Machbarkeit sind folgende Aspekte und zugehörige Prozesse und Parameter wichtig:

- **Geotechnische Eigenschaften des Wirtgesteins** – Für die Erstellung der untertägigen Bauten des Tiefenlagers ist eine auf die Auslegung der Untertagebauten abgestimmte, Standfestigkeit und ein Verformungsverhalten des Gebirges notwendig, welche sicherstellen, dass eine allfällige Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Gebirges in der Umgebung der Lagerkammern bzw. der Versiegelungsstrecken auf ein zulässiges Mass beschränkt bleibt[16] (PB-7 / Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein, PT-7 / Auslegung der Lagerkammern).
- **Gebirgsspannungen** – Für die Erstellung der untertägigen Bauten sind auch die Gebirgsspannungen sehr wichtig (PB-6 / In-situ-Gebirgsspannungen), die in erster Näherung von der Tiefenlage der Bauten unter Terrain abgeleitet werden können (PB-1 / Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit).
- **Geometrische Bedingungen im Wirtgestein** – Damit die untertägigen Bauten vernünftig angeordnet werden können (Anzahl und Grösse der Lagerfelder), muss das Wirtgestein eine genügende Ausdehnung haben; das Platzangebot muss es erlauben, anordnungsbestimmenden geologischen Elementen – welche sich ungünstig auf die Sicherheit des Lagers auswirken könnten – auszuweichen (PB-2 / Gebietsbegrenzende geologische Elemente, PB-3 / Anordnungsbestimmende geologische Elemente, PB-4 / Platzangebot untertags).
- **Erschliessung des Tiefenlagers** – Die untertägigen Bauten müssen mit vernünftigem Aufwand und umweltverträglich erschlossen werden können (PB-8 / Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen, PB-9 / Natürliche Gasführung des Wirtgesteins, PB-10 / Nutzungskonflikte hinsichtlich Mineralquellen und Thermen, PB-11 / Oberflächensituation).

Für den Nachweis der Langzeitsicherheit des Tiefenlagers müssen belastbare Aussagen zu den Eigenschaften der Gesteine, zu den räumlichen Verhältnissen und zu den möglichen Langzeitveränderungen gemacht werden können. Für die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen sind die folgenden Aspekte und zugehörigen Prozesse und Parameter wichtig:

- **Charakterisierbarkeit der Gesteine** – Die Gesteinseigenschaften müssen zuverlässig charakterisierbar sein (PI-5 / Variabilität der Gesteinseigenschaften, PI-7 / Erfahrungen).
- **Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse** – Die räumlichen Verhältnisse müssen zuverlässig und mit vertretbarem Aufwand exploriert werden können (PI-8 / Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund, PI-9 / Explorationsbedingungen an Oberfläche).

---

[16] Unter Berücksichtigung des Selbstabdichtungsvermögens des Wirtgesteins (PI-6).

- **Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen** – Die relevanten langfristigen Veränderungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich müssen mit genügender Zuverlässigkeit abgeschätzt bzw. eingegabelt werden können (PI-2 / Geodynamische und neotektonische Aktivität, PI-4 / Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation).

Diese Zusammenstellung der für die Sicherheit und technische Machbarkeit wichtigsten Prozesse und Parameter steht auch im Einklang mit den bisher gemachten Erfahrungen aus Sicherheitsanalysen (Entsorgungsnachweis, SMA/Wellenberg, Kristallin-I) und Sensitivitätsstudien. Dies zeigt, dass die identifizierten relevanten Prozesse und Parameter für die Evaluation der Sicherheit und Machbarkeit geeignet sind.

Tab. 3.2-1: Strukturierte Liste der relevanten Prozesse und Parameter mit Hinweisen auf die Kapitel, in denen der zugehörige Kenntnisstand dargelegt und im Hinblick auf die Testrechnungen und die Abklärungen der technischen Machbarkeit beurteilt wird und in denen die Eindeutigkeit der Aussagen zur Sicherheit ("sicherheitstechnische Eignung" bzw. "sicherheitstechnische Gleichwertigkeit") und zur technischen Machbarkeit evaluiert werden.

×	Detaillierte Darlegung des Kenntnisstands
[×]	Diskussion des Kenntnisstands beschränkt auf Einflüsse von geologisch relevanten Prozessen und Parametern (PG)
(×)	Mit Hilfe von Systemanalysen abgeleiteter Inputparameter für die Testrechnungen
+	In Dosisberechnungen direkt berücksichtigt
*	In Dosisberechnungen indirekt berücksichtigt (d.h. in der Form von abgeleiteten Inputparametern oder konzeptuellen Annahmen in der Evaluation berücksichtigt)
Grün markierte Felder	Schwerpunkt der Evaluation bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen zur Sicherheit und technischen Machbarkeit. Dabei ist zu beachten, dass die übergeordnete Evaluation der Aussagen zur Sicherheit und technischen Machbarkeit in Kap. 7 erfolgt.
ENSI-Fall	Vom ENSI festgelegte Fälle für das standardisierte Parametervariationsverfahren (vgl. Tab. 1.3-3).

Tab. 3.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Zugehörige Indikatoren für qualitative Bewertung	Kapitel, in denen der Kenntnisstand dargelegt und dessen Eignung für die Testrechnungen und Abklärungen zur technischen Machbarkeit beurteilt wird								Kapitel, in denen der Kenntnisstand bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen evaluiert wird			ENSI-Fall	Qualitative Bewertung
			Geometrie / Strukturen (Kap. 4.2)	Eigenschaften WG/EG (Kap. 4.3)	Hydrogeol. Verhältnisse (Kap. 4.4)	Langzeitentwicklung (Kap. 4.5)	Eigenschaften techn. Barrieren (Kap. 4.6)	Biosphäre (Kap. 4.7)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Technische Machbarkeit (Kap. 5)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Dosisberechnungen (Kap. 6.3*ff*)			
1. Relevante Prozesse und Parameter für die technischen Barrieren (PT)															
PT-1	Behälterlebensdauer BE/HAA						×		[×]			+		g	
PT-2	Auflösungsrate für Brennstoffmatrix und Hüllrohre BE						×		[×]			+		f	
PT-3	Löslichkeitslimiten im Nahfeld BE/HAA/LMA						×		[×]			+		c	
PT-4	Sorptionskoeffizienten im Nahfeld						×		[×]			+		d	
PT-5	Advektion bzw. Diffusion im Nahfeld						×		[×]			+		a	
PT-6	Transportrelevante Eigenschaften Interface BE/HAA-Lagerstollen/ Wirtgestein										×	*			
PT-7	Auslegung der Lagerkammern									×	×	*			

Tab. 3.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Zugehörige Indikatoren für qualitative Bewertung	Kapitel, in denen der Kenntnisstand dargelegt und dessen Eignung für die Testrechnungen und Abklärungen zur technischen Machbarkeit beurteilt wird								Kapitel, in denen der Kenntnisstand bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen evaluiert wird			ENSI-Fall	Qualitative Bewertung
			Geometrie / Strukturen (Kap. 4.2)	Eigenschaften WG/EG (Kap. 4.3)	Hydrogeol. Verhältnisse (Kap. 4.4)	Langzeitentwicklung (Kap. 4.5)	Eigenschaften techn. Barrieren (Kap. 4.6)	Biosphäre (Kap. 4.7)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Technische Machbarkeit (Kap. 5)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Dosisberechnungen (Kap. 6.3*ff*)			
2. Relevante Prozesse und Parameter für die geologischen Barrieren (PG)															
PG-1	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung	Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'	×						×			*			×
PG-2	Glazial übertiefte Felsrinnen	Indikator 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'	×			×				×					×
PG-3	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'	×						×			*			×
PG-4	Zeitliche Entwicklung regionale Erosionsbasis	Indikator 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum'				×			×			*			×
PG-5	Mächtigkeit	Indikator 'Mächtigkeit'	×						×			*			×
PG-6	Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit	Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Tongehalt', 'Selbstabdichtungsvermögen' und 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation'		×					×			+		a	×

Tab. 3.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Zugehörige Indikatoren für qualitative Bewertung	Kapitel, in denen der Kenntnisstand dargelegt und dessen Eignung für die Testrechnungen und Abklärungen zur technischen Machbarkeit beurteilt wird								Kapitel, in denen der Kenntnisstand bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen evaluiert wird			ENSI-Fall	Qualitative Bewertung
			Geometrie / Strukturen (Kap. 4.2)	Eigenschaften WG/EG (Kap. 4.3)	Hydrogeol. Verhältnisse (Kap. 4.4)	Langzeitentwicklung (Kap. 4.5)	Eigenschaften techn. Barrieren (Kap. 4.6)	Biosphäre (Kap. 4.7)	Systemanalysen (Kap. 6.2)		Technische Machbarkeit (Kap. 5)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Dosisberechnungen (Kap. 6.3*ff*)		
2. Relevante Prozesse und Parameter für die geologischen Barrieren (PG)															
PG-7	Einfluss Dekompaktion auf hydraulische Durchlässigkeit	Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'		×					×				+		×
PG-8	Hydraulischer Gradient	Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade'			×								+		×
PG-9	Art der Transportpfade	Indikator 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums'		×									+	a	×
PG-10	Porosität [1)]	Indikator 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums'		×					×				+		×
PG-11	Sedimentäre Architekturelemente	Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus'		×					×				+		×

[1)] Über Eckwerte für effektive Diffusionskoeffizienten und direkt als Inputparameter berücksichtigt.

Tab. 3.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Zugehörige Indikatoren für qualitative Bewertung	Kapitel, in denen der Kenntnisstand dargelegt und dessen Eignung für die Testrechnungen und Abklärungen zur technischen Machbarkeit beurteilt wird								Kapitel, in denen der Kenntnisstand bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen evaluiert wird			ENSI-Fall	Qualitative Bewertung
			Geometrie / Strukturen (Kap. 4.2)	Eigenschaften WG/EG (Kap. 4.3)	Hydrogeol. Verhältnisse (Kap. 4.4)	Langzeitentwicklung (Kap. 4.5)	Eigenschaften techn. Barrieren (Kap. 4.6)	Biosphäre (Kap. 4.7)	Systemanalysen (Kap. 6.2)		Technische Machbarkeit (Kap. 5)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Dosisberechnungen (Kap. 6.3*ff*)		
2. Relevante Prozesse und Parameter für die geologischen Barrieren (PG)															
PG-12	Lage und Beschaffenheit von verkarstungsfähigen Gesteinen innerhalb des Wirtgesteins [2)]	Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)'		×					×				+		×
PG-13	Länge der Transportpfade	Indikator 'Länge der Freisetzungspfade'							(×)				+		×
PG-14	Transmissivität Störungszonen	Indikatoren 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade', 'Tongehalt', 'Selbstabdichtungsvermögen' und 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation'		×					×				+		×
PG-15	Mineralogie	Indikator 'Mineralogie'		×					×				*		×
PG-16	pH	Indikator 'pH'		×					×				*		×
PG-17	Redox-Bedingungen	Indikator 'Redox-Bedingungen'		×					×				*		×
PG-18	Salinität	Indikator 'Salinität'		×					×				+		×
PG-19	Mikrobielle Prozesse	Indikator 'Mikrobielle Prozesse'		×					×				*		×
PG-20	Kolloidfiltration	Indikator 'Kolloide'		×					×				+		×

[2)] Über "What if?"-Fälle mit reduzierter Transportpfadlänge im Wirtgestein abgedeckt.

Tab. 3.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Zugehörige Indikatoren für qualitative Bewertung	Kapitel, in denen der Kenntnisstand dargelegt und dessen Eignung für die Testrechnungen und Abklärungen zur technischen Machbarkeit beurteilt wird								Kapitel, in denen der Kenntnisstand bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen evaluiert wird			ENSI-Fall	Qualitative Bewertung
			Geometrie / Strukturen (Kap. 4.2)	Eigenschaften WG/EG (Kap. 4.3)	Hydrogeol. Verhältnisse (Kap. 4.4)	Langzeitentwicklung (Kap. 4.5)	Eigenschaften techn. Barrieren (Kap. 4.6)	Biosphäre (Kap. 4.7)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Technische Machbarkeit (Kap. 5)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Dosisberechnungen (Kap. 6.3*ff*)			
2. Relevante Prozesse und Parameter für die geologischen Barrieren (PG)															
PG-21	Sorptionskoeffizienten für WG/EG	Indikatoren 'Mineralogie', 'pH', 'Redox-Bedingungen', 'Salinität', 'Mikrobielle Prozesse' und 'Kolloide'							(×)			+		d	×
PG-22	Diffusionskoeffizienten für WG/EG	Indikator 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums'		×					(×)			+		b	×
PG-23	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	Indikator 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten'							×		×				×
PG-24	Auswirkungen pH-Fahne auf Wirtgestein	Indikator 'Chemische Wechselwirkungen'							×			+			×
PG-25	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas	Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas'							×		×				×
PG-26	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur	Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur'							×		×				×
PG-27	Relevante Exfiltrationspfade				×			×				*			

Tab. 3.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Zugehörige Indikatoren für qualitative Bewertung	Kapitel, in denen der Kenntnisstand dargelegt und dessen Eignung für die Testrechnungen und Abklärungen zur technischen Machbarkeit beurteilt wird								Kapitel, in denen der Kenntnisstand bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen evaluiert wird			ENSI-Fall	Qualitative Bewertung
			Geometrie / Strukturen (Kap. 4.2)	Eigenschaften WG/EG (Kap. 4.3)	Hydrogeol. Verhältnisse (Kap. 4.4)	Langzeitentwicklung (Kap. 4.5)	Eigenschaften techn. Barrieren (Kap. 4.6)	Biosphäre (Kap. 4.7)	Systemanalysen (Kap. 6.2)		Technische Machbarkeit (Kap. 5)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Dosisberechnungen (Kap. 6.3*ff*)		
2. Relevante Prozesse und Parameter für die geologischen Barrieren (PG)															
PG-28	Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung	Indikatoren 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' und 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'				×			×				*		×
PG-29	Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf Biosphärenmodellierung							×					*		
PG-30	Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung	Indikatoren 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' und 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'				×			×				*		×

Tab. 3.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Zugehörige Indikatoren für qualitative Bewertung	Kapitel, in denen der Kenntnisstand dargelegt und dessen Eignung für die Testrechnungen und Abklärungen zur technischen Machbarkeit beurteilt wird								Kapitel, in denen der Kenntnisstand bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen evaluiert wird			ENSI-Fall	Qualitative Bewertung
			Geometrie / Strukturen (Kap. 4.2)	Eigenschaften WG/EG (Kap. 4.3)	Hydrogeol. Verhältnisse (Kap. 4.4)	Langzeitentwicklung (Kap. 4.5)	Eigenschaften techn. Barrieren (Kap. 4.6)	Biosphäre (Kap. 4.7)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Technische Machbarkeit (Kap. 5)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Dosisberechnungen (Kap. 6.3*ff*)			
2. Relevante Prozesse und Parameter für die geologischen Barrieren (PG)															
PG-31	Klimaentwicklung im Hinblick auf Abschätzung der Wasserflüsse bei der Biosphärenmodellierung							×				+		e	
PG-32	Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins'	×								×				×
PG-33	Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins	Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins'	×								×				×
PG-34	Nutzungskonflikte hinsichtlich Geothermie	Indikator 'Geothermie'	×								×				×

Tab. 3.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Zugehörige Indikatoren für qualitative Bewertung	Kapitel, in denen der Kenntnisstand dargelegt und dessen Eignung für die Testrechnungen und Abklärungen zur technischen Machbarkeit beurteilt wird								Kapitel, in denen der Kenntnisstand bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen evaluiert wird			ENSI-Fall	Qualitative Bewertung
			Geometrie / Strukturen (Kap. 4.2)	Eigenschaften WG/EG (Kap. 4.3)	Hydrogeol. Verhältnisse (Kap. 4.4)	Langzeitentwicklung (Kap. 4.5)	Eigenschaften techn. Barrieren (Kap. 4.6)	Biosphäre (Kap. 4.7)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Technische Machbarkeit (Kap. 5)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Dosisberechnungen (Kap. 6.3*ff*)			
3. Relevante Prozesse und Parameter für die technische Machbarkeit (PB)															
PB-1	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit	Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit'	×							×					×
PB-2	Gebietsbegrenzende geologische Elemente	Indikatoren 'Abstand zu regionalen Störungszonen', 'Diffus gestörte Zonen', 'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit', 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion', 'Laterale Ausdehnung', 'Mächtigkeit'	×							×					×
PB-3	Anordnungsbestimmende geologische Elemente	Indikator 'Platzangebot untertags'	×							×					×
PB-4	Platzangebot untertags	Indikator 'Platzangebot untertags'	×							×					×

Tab. 3.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Zugehörige Indikatoren für qualitative Bewertung	Kapitel, in denen der Kenntnisstand dargelegt und dessen Eignung für die Testrechnungen und Abklärungen zur technischen Machbarkeit beurteilt wird								Kapitel, in denen der Kenntnisstand bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen evaluiert wird			ENSI-Fall	Qualitative Bewertung
			Geometrie / Strukturen (Kap. 4.2)	Eigenschaften WG/EG (Kap. 4.3)	Hydrogeol. Verhältnisse (Kap. 4.4)	Langzeitentwicklung (Kap. 4.5)	Eigenschaften techn. Barrieren (Kap. 4.6)	Biosphäre (Kap. 4.7)	Systemanalysen (Kap. 6.2)		Technische Machbarkeit (Kap. 5)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Dosisberechnungen (Kap. 6.3*ff*)		
3. Relevante Prozesse und Parameter für die technische Machbarkeit (PB)															
PB-5	In-situ-Temperatur	Indikatoren 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur' und 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit'	×									×			×
PB-6	In-situ-Gebirgsspannungen	Indikatoren 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' und 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit'	×								×				×
PB-7	Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein	Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'		×							×				×
PB-8	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen'			×						×				×
PB-9	Natürliche Gasführung des Wirtgesteins	Indikator 'Natürliche Gasführung (des Wirtgesteins)'		×							×				×

Tab. 3.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Zugehörige Indikatoren für qualitative Bewertung	Kapitel, in denen der Kenntnisstand dargelegt und dessen Eignung für die Testrechnungen und Abklärungen zur technischen Machbarkeit beurteilt wird								Kapitel, in denen der Kenntnisstand bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen evaluiert wird			ENSI-Fall	Qualitative Bewertung
			Geometrie / Strukturen (Kap. 4.2)	Eigenschaften WG/EG (Kap. 4.3)	Hydrogeol. Verhältnisse (Kap. 4.4)	Langzeitentwicklung (Kap. 4.5)	Eigenschaften techn. Barrieren (Kap. 4.6)	Biosphäre (Kap. 4.7)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Technische Machbarkeit (Kap. 5)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Dosisberechnungen (Kap. 6.3*ff*)			
3. Relevante Prozesse und Parameter für die technische Machbarkeit (PB)															
PB-10	Nutzungskonflikte hinsichtlich Mineralquellen und Thermen	Indikator 'Mineralquellen und Thermen'			×					×					×
PB-11	Oberflächensituation				×					×					
4. Relevante Prozesse und Parameter, die in SGT Etappe 2 ausschliesslich in die qualitative Bewertung einfliessen (PI)															
PI-1	Nutzung der Gesteine als Rohstoff	Indikator 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins'		×											×
PI-2	Geodynamische und neotektonische Aktivität	Indikatoren 'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik' und 'Seismizität'	×			×									×
PI-3	Vulkanische Aktivität	Indikator 'Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)'				×									×
PI-4	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	Indikatoren 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' und 'Grundwasserstockwerke'		×		×									×
PI-5	Variabilität der Gesteinseigenschaften	Indikator 'Variabilität der Gesteinseigenschaften'		×											×

Tab. 3.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Zugehörige Indikatoren für qualitative Bewertung	Kapitel, in denen der Kenntnisstand dargelegt und dessen Eignung für die Testrechnungen und Abklärungen zur technischen Machbarkeit beurteilt wird								Kapitel, in denen der Kenntnisstand bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen evaluiert wird			ENSI-Fall	Qualitative Bewertung
			Geometrie / Strukturen (Kap. 4.2)	Eigenschaften WG/EG (Kap. 4.3)	Hydrogeol. Verhältnisse (Kap. 4.4)	Langzeitentwicklung (Kap. 4.5)	Eigenschaften techn. Barrieren (Kap. 4.6)	Biosphäre (Kap. 4.7)	Systemanalysen (Kap. 6.2)		Technische Machbarkeit (Kap. 5)	Systemanalysen (Kap. 6.2)	Dosisberechnungen (Kap. 6.3*ff*)		
4. Relevante Prozesse und Parameter, die in SGT Etappe 2 ausschliesslich in die qualitative Bewertung einfliessen (PI)															
PI-6	Selbstabdichtungsvermögen	Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen'		×											×
PI-7	Erfahrungen	Indikator 'Erfahrungen'		×											×
PI-8	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	Indikatoren 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund', 'Kontinuität der interessierenden Schichten' und 'Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse'	×												×
PI-9	Explorationsbedingungen an Oberfläche	Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche'	×												×

4 Informationen und Kenntnisstand

4.1 Genereller Überblick

4.1.1 Ziel, Ausgangspunkt und Gliederung der Informationen im vorliegenden Kapitel

Das Kap. 4 hat zum Ziel, die heute verfügbaren Informationen im Hinblick auf die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalysen, die Beurteilung der technischen Machbarkeit sowie den sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte in SGT Etappe 2 aufzuzeigen. Der Zielsetzung des vorliegenden Berichts entsprechend liegt der Schwerpunkt auf den geologischen Informationen. Die Darlegung des Kenntnisstands ist gegliedert nach den in Kap. 3.2 identifizierten relevanten Prozessen und Parametern. Für diese werden jeweils die Referenzwerte und – entsprechend den vorhandenen Ungewissheiten – adäquate Bandbreiten angegeben. Während die Referenzwerte einer realistischen Einschätzung der geologischen Verhältnisse in den geologischen Standortgebieten und in den bevorzugten Wirtgesteinen entsprechen, dienen die Bandbreiten dem Zweck, die vorhandenen Ungewissheiten abzudecken; mit entsprechend gewählten Bandbreiten wird zusätzlich auch die Belastbarkeit der Aussagen zur Sicherheit und technischen Machbarkeit erhöht. Für einen Teil der relevanten Prozesse und Parameter gelten die gemachten Aussagen örtlich uneingeschränkt, d.h. ohne Vorbedingungen bezüglich der Anordnung der Lagerkammern innerhalb der geologischen Standortgebiete und Wirtgesteine. Für andere relevante Prozesse und Parameter müssen gewisse standortspezifische Voraussetzungen erfüllt werden, d.h. die Aussagen gelten nur bei adäquater Anordnung der Lagerkammern.

Das Kapitel ist wie folgt aufgebaut: Zunächst wird ein genereller Überblick über den geologischen Kenntnisstand und die vorhandenen Informationsquellen vermittelt (Kap. 4.1), danach wird der geologische Kenntnisstand einschliesslich der bestehenden Ungewissheiten für die einzelnen Prozesse und Parameter dargelegt. Die geologischen Informationen werden dabei nach den folgenden Themenbereichen gegliedert: Geometrie und Strukturen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowie Informationen zu Nutzungskonflikten und ausgewählten Zustandsparametern für die Standortgebiete (Kap. 4.2), Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Kap. 4.3), hydrogeologische Verhältnisse insbesondere für die Standortgebiete (Kap. 4.4) und geologische Langzeitentwicklung (Kap. 4.5). Danach werden die Informationen über die transportrelevanten Eigenschaften der technischen Barrieren zusammengefasst (Kap. 4.6) und die Annahmen zu spezifischen Aspekten der Biosphäre (Kap. 4.7) dargelegt.

4.1.2 Genereller Überblick des Kenntnisstands

Geometrie und Strukturen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowie Informationen zu Nutzungskonflikten und ausgewählten Zustandsparametern

Folgende Informationen[17] zu Geometrie und Strukturen sowie Informationen zu Nutzungskonflikten und ausgewählten Zustandsparametern sind besonders relevant (Fig. 4.1-1):

- Geologische Karten
- Seismische Daten

[17] Anhang A3 enthält eine Zusammenstellung zu relevanten Informationen bzgl. Geometrie und Strukturen für die Nordschweiz und für die verschiedenen geologischen Standortgebiete.

- Bohrungen und Tunnels
- Publizierte und unpublizierte Fachliteratur

Für alle Standortgebiete existieren geologische Karten (meist im Massstab 1:25'000). Sie geben einerseits Hinweise auf tektonische Störungen, und andererseits lassen sich ausgehend vom Ort des Ausstreichens einzelner Schichtgrenzen Angaben zur Tiefenlage dieser und von darunterliegenden Schichten ableiten. Besonders aussagekräftig sind die geologischen Karten in Bereichen, in denen mesozoische oder frühtertiäre Schichten an der Oberfläche aufgeschlossen sind (Standortgebiete Wellenberg, Bözberg und Südranden, sowie Teile des Standortgebiets Jura-Südfuss). Im Bereich der Molasse und dort, wo an der Oberfläche quartäre Schichten anstehen (Standortgebiete Zürich Nord-Ost und Nördlich Lägeren) ergeben sich aus den Kartenwerken hingegen kaum Informationen zur Geometrie der mesozoischen oder frühtertiären Schichten.

Alle Standortgebiete in der Nordschweiz werden durch ein Netz von seismischen 2D-Linien durchzogen. In oder in unmittelbarer Nähe aller Standortgebiete gibt es Tiefbohrungen, an welchen die Tiefenlage der seismischen Reflektoren kalibriert wurde. Neben Angaben zur Tiefenlage ermöglichen die seismischen Daten das Kartieren von grösseren Störungen, und sie geben auch Hinweise auf die Lagerungsverhältnisse. Im Standortgebiet Zürich Nord-Ost existiert zusätzlich eine hochauflösende 3D-Seismik. Diese erlaubt eine genauere Kartierung der Schichtgrenzen und Störungen und macht eine Detektion von Störungen mit kleinen Versätzen möglich. Im Standortgebiet Wellenberg liefern die vorhandenen Seismikdaten kaum Informationen. Hier basiert das Wissen im Wesentlichen auf der Oberflächengeologie sowie auf den Ergebnissen mehrerer vertikaler und geneigter Tiefbohrungen.

Daneben enthält auch die Fachliteratur viele nützliche Hinweise betreffend Geometrie und Tektonik (Daten und Interpretation mit Hilfe von geologischen Konzepten), welche bereits in Etappe 1 des SGT diskutiert wurden (Nagra 2008c) und auch in Zukunft beigezogen werden (unter Berücksichtigung neuerer Arbeiten und Konzepte).

Für SGT Etappe 2 wird in allen Standortgebieten die Tiefenlage sowie Lage, Orientierung, Frequenz und Kinematik von Störungen durch verschiedene Methoden überprüft (vgl. Kap. 8.2). Die ergänzenden Untersuchungen umfassen insbesondere die Reprozessierung der Reflexionsseismik, die Ergänzung und Neuauswertung der Gravimetriedaten, die Auswertung von Fernerkundungsdaten, kinematische Bilanzierungen sowie strukturgeologische Feldbegehungen. Weiter ist geplant, für die HAA-Gebiete in der Region Bözberg – Nördlich Lägeren für Etappe 2 ein Netz von zusätzlichen 2D-Seismiklinien zu messen. Die Messungen dienen dazu, für das HAA-Lager die regionale tektonische Situation detaillierter zu erfassen im Hinblick auf die Bewertung der Langzeitentwicklung über den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren. Die Messungen werden auch dazu beitragen, die Strukturen detaillierter zu erfassen im Hinblick auf die Bewertung geometrischer Aspekte für die Anordnung der HAA-Lagerstollen. Weiter werden die Messungen verwendet zur Planung und Fokussierung der geplanten 3D-Seismik.

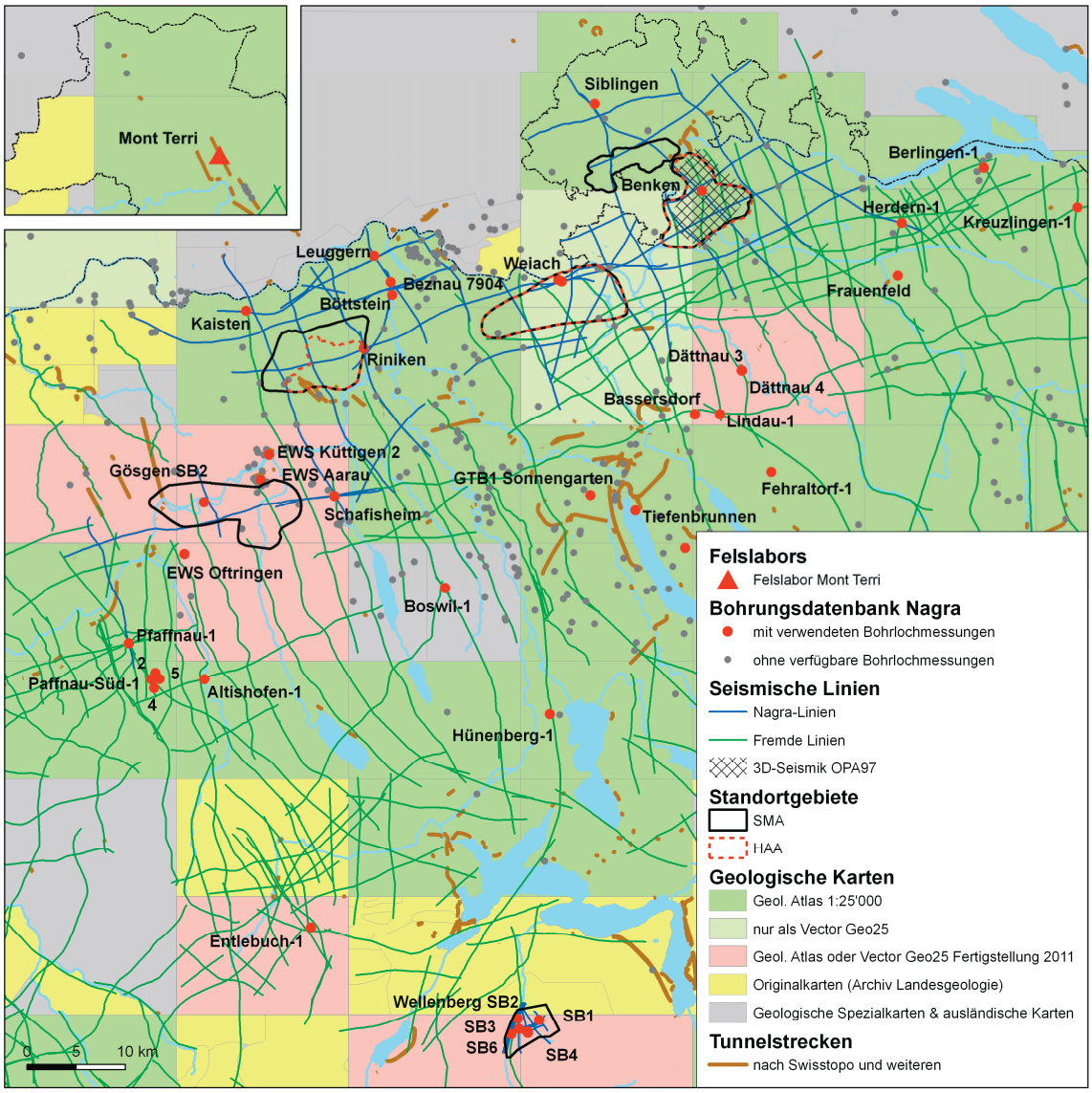


Fig. 4.1-1: Überblick der geologischen Standortgebiete und der Datenlage (Seismiklinien, Bohrungen, Tunnels, geologische Karten).

Detailliertere Angaben finden sich in Anhang A3.

Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Die Vorschläge der geologischen Standortgebiete von Etappe 1 betreffen vier bevorzugte Wirtgesteine bzw. einschlusswirksame Gebirgsbereiche:

- den Opalinuston und seine Rahmengesteine,
- die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' (kurz 'Brauner Dogger') und ihre Rahmengesteine,
- die Effinger Schichten und
- die Mergel-Formationen des Helvetikums.

Die Datengrundlagen für den Opalinuston und die Mergel-Formationen des Helvetikums sind aufgrund früherer gezielter Untersuchungsprogramme (Entsorgungsnachweis, Projekt Wellenberg) umfassender als bei den anderen beiden Wirtgesteinen; es liegen aber von allen Wirtgesteinen quantitative und qualitative Daten von gekernten Tiefbohrungen aus den relevanten Tiefenbereichen (SMA 200 – 800 m u. T., HAA 400 – 900 m u.T.) vor. Letzteres hängt damit zusammen, dass im Rahmen des Untersuchungsprogramms Nordschweiz der Nagra (1982 – 1994), welches auf das kristalline Grundgebirge ausgerichtet war, auch grosse Bereiche des sedimentären Deckgebirges gekernt sowie hydraulisch getestet und bohrlochgeophysikalisch vermessen wurden und auch Ergebnisse neuerer Bohrungen, v.a. aus Geothermie-Projekten, vorliegen (siehe unten)[18]. Diese Bohrungen liegen in oder in unmittelbarer Nähe der Standortgebiete; die bis Redaktionsschluss der Berichte zu SGT Etappe 1 vorliegenden Daten sind in Nagra (2008c) umfassend dargestellt und diskutiert. Schliesslich tragen auch die bohrlochgeophysikalischen Logs und hydraulischen Tests aus Erdölbohrungen, Beobachtungen in Tunnels sowie zahlreiche wissenschaftliche Publikationen und Dissertationen mit Aufschlussbeobachtungen und Laboranalysen zur Kenntnis der Wirtgesteine bei. Für grossräumige Fazieskorrelationen werden neben Informationen aus Tiefbohrungen auch solche aus untiefen Bohrungen und Aufschlüssen verwendet (Beilagen 5.2-1 und 5.2-2 in Nagra 2008c; neue Untersuchungen für Etappe 2, siehe Kap. 8.3). Schliesslich werden auch die Erfahrungen in anderen Entsorgungsprogrammen und der Erdöl- und Erdgasindustrie genutzt.

Für die provisorische Sicherheitsanalyse in Etappe 2 sind weitere vertiefende Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus den Tiefbohrungen der Nordschweiz (z.B. Chlorid-Profile) sowie Untersuchungen an Oberflächenaufschlüssen sowie in Bohrungen von Geothermie-Projekten vorgesehen (vgl. Kap. 8.2 und 8.3). Weiter werden nach Möglichkeit auch Bohrungen Dritter zum Erhalt zusätzlicher Informationen genutzt.

Bezüglich der Wirt- und Rahmengesteine gibt es gewisse Überlappungen (siehe Tab. 3.1-1); zwecks Vermeidung von Wiederholungen wird in den nachfolgenden Erläuterungen jeweils schwergewichtsmässig auf die betreffenden Wirtgesteine eingegangen.

Opalinuston (Standortgebiete Südranden, Zürich Nord-Ost, Nördlich Lägeren, Bözberg und Jura-Südfuss)

Der Kenntnisstand über die Eigenschaften des Opalinustons und seiner Rahmengesteine ist aufgrund einer langjährigen intensiven Forschungstätigkeit im Nagra-Programm hoch. Neben den Untersuchungen in den Tiefbohrungen und den seismischen Untersuchungen in der Nordschweiz (2D- und 3D-Seismik) wird im Rahmen des Internationalen Mont Terri-Projekts seit 1996 ein breit angelegtes Untersuchungsprogramm untertage durchgeführt (Thury & Bossart 1999, Bossart & Thury 2008). Spezielle Fragen wurden im Rahmen von Dissertationen (z.B. Nüesch 1991, Hekel 1994, Allia 1996) bearbeitet. Es existieren zahlreiche weitere regionale Studien, u.a. in Eisenbahn- und Strassentunnels (Gautschi 2001) sowie viele Laboruntersuchungen. Weiter können auch die Erfahrungen mit Tongesteinen im Ausland verwendet werden, insbesondere die Arbeiten in Frankreich an den Tongesteinen des Callovo-Oxfordien, welche dem Opalinuston ähnlich sind. Im Rahmen des Mont Terri-Projekts werden kontinuierlich neue Erkenntnisse betreffend Gastransport, Selbstabdichtung, Porenwasserchemie, Diffusionsprozesse, Bautechnik und technische Barrieren gewonnen. Die Ergebnisse dieser Experimente werden laufend in technischen Berichten des Mont Terri-Projekts und in Fachzeitschriften publiziert; die noch nicht veröffentlichten Ergebnisse sind in internen Berichten des Mont Terri-Projekts dokumentiert, welche der Aufsichtsbehörde zugänglich sind.

[18] Anhang A3 enthält eine Zusammenstellung zu relevanten Informationen bzgl. der Eigenschaften der verschiedenen Wirtgesteine bzw. Rahmengesteine.

Der Kenntnisstand betreffend Rahmengesteine des Opalinustons beruht im Wesentlichen auf den Untersuchungen in den Tiefbohrungen der Nordschweiz (Benken, Weiach, Riniken, Schafisheim) sowie einer Erdölbohrung (Herdern-1).

'Brauner Dogger' (Standortgebiete Zürich Nord-Ost und *Nördlich Lägeren)*

Die Informationen zur lithologisch-faziellen Ausbildung des 'Braunen Doggers' basieren auf drei gut untersuchten Tiefbohrungen in der Nordschweiz (Weiach, Benken, Herdern-1) innerhalb bzw. in der direkten Umgebung der geologischen Standortgebiete sowie auf Informationen aus untiefen Bohrungen und Aufschlüssen nordwestlich der Standortgebiete (Beilagen 5.2-1 und 5.2-2 in Nagra 2008c sowie Naef 2008). Weitere untiefe Bohrungen und die Bohrung Riniken liegen im Übergangsbereich zur westlich angrenzenden Hauptrogenstein-Fazies, welche den Westrand des Verbreitungsgebiets des 'Braunen Doggers' bildet.

Es bestehen Ungewissheiten betreffend Mächtigkeit, Ausbildung und lateraler Ausdehnung von sandigen und kalkigen, z.T. auch eisenoolithischen Einschaltungen (Sandkalkabfolgen[19]), welche als potenziell wasserführend betrachtet werden, wenn auch in sehr beschränktem Masse (Nagra 2008c und dort zitierte Arbeiten). Die quantitativen hydrogeologischen Informationen stammen aus den drei oben genannten Bohrungen, wobei nur in einer (Benken) die ganze Abfolge getestet wurde. Es gibt keine Untertagebauten, in welchen der 'Braune Dogger' in relevanter Fazies ausgebildet ist.

Der Kenntnisstand der Rahmengesteine des 'Braunen Doggers' ergibt sich aus den Ausführungen zum Opalinuston und zu den Effinger Schichten.

Für die provisorische Sicherheitsanalyse in SGT Etappe 2 sind weitere Untersuchungen zur Klärung der Rolle der potenziell wasserführenden sedimentären Architekturelemente vorgesehen (Untersuchungen an Oberflächenaufschlüssen in Süddeutschland, Chloridprofile an Bohrkernen, siehe Kap. 8.3). So weit erhältlich, werden auch Informationen aus Bohrungen Dritter (z.B. EWS-Bohrungen) zur Verbesserung der Datenbasis zur Fazieskorrelation genutzt. In der tiefen Geothermiebohrung Schlattingen/TG ist geplant, den 'Braunen Dogger' und seine unteren Rahmengesteine bzw. den Opalinuston zu kernen und detailliert zu untersuchen (Bohrlochtests, Bohrkernanalysen).

Effinger Schichten (Standortgebiet Jura-Südfuss)

Die Effinger Schichten wurden durch die Nagra erstmals im Rahmen der Sedimentstudie (Nagra 1988a) als potenzielles Wirtgestein für hochaktive Abfälle evaluiert. Damals lagen mit wenigen Ausnahmen (Bohrung Weiach) quantitative hydrogeologische Daten nur aus oberflächennahen Bohrungen vor, und die Formation wurde für das HAA-Lager aufgrund der potenziell wasserführenden Kalkbankabfolgen zu Gunsten des Opalinustons zurückgestellt.

Seither wurden die Kenntnisse über die Eigenschaften der Effinger Schichten signifikant verbessert. Neben Forschungsarbeiten zur Stratigraphie der Effinger Schichten (z.B. Gygi 2000a und b, Allenbach 2000 und 2001) erfolgte eine hydrogeologische Charakterisierung der Effinger Schichten in Untertagebauten aufgrund von Wasserzuflussbeschreibungen (Traber 2004) sowie aufgrund hydraulischer Tests bzw. Fluid-Logging in zwei EWS-Bohrungen in Küttigen (Klump et al. 2008) und in der EWS-Bohrung Oftringen (Fisch et al. 2008, Albert et al. 2008). Der

[19] Diese potenziell wasserführenden Einschaltungen im 'Braunen Dogger' sind tendenziell sandiger als die Kalkbankabfolgen der Effinger Schichten. Sie werden deshalb unter dem Begriff 'Sandkalkabfolgen' zusammengefasst.

wichtigste Datensatz stammt aus der Bohrung Oftringen, in welcher die Effinger Schichten in einem relevanten Tiefenbereich (420 – 642 m) sowohl in ungestörter Lagerung wie auch von einigen kleinen Störungszonen durchsetzt hydraulisch getestet wurden. Zudem lieferten Untersuchungen an Porenwässern wertvolle Erkenntnisse zur Zirkulation der Grund- und Porenwässer (Waber 2008). Eine integrale Darstellung der Geologie und Hydrogeologie der Effinger Schichten – ohne Berücksichtigung der neuesten Daten aus den EWS-Bohrungen Küttigen und Oftringen – ist im Bericht von Laws & Deplazes (2007) zu finden, in welchem auch verschiedene bisher nicht veröffentlichte Daten aus oberflächennahen Bohrungen und Untertagebauten enthalten sind. Die Verteilung und laterale Korrelation der potenziell wasserführenden Kalkbankabfolgen in den Bohrungen der Nordschweiz ist in Albert (2008) aufgrund bohrlochgeophysikalischer Logs dokumentiert. Neue stratigraphische, hydrogeologische und hydrochemische Daten, welche erst nach Abschluss der Berichte zu SGT Etappe 1 vorlagen, stammen aus einer Kernbohrung bei Gösgen und einer EWS-Bohrung in Aarau (vgl. Kap. 8.3).

Für SGT Etappe 2 sind weitere Untersuchungen geplant (Kap. 8.3), welche insbesondere die laterale Korrelation von Kalkbankabfolgen betreffen, denen bei der Platzierung der Lagerkammern ausgewichen werden soll.

Mergel-Formationen des Helvetikums (Standortgebiet Wellenberg)

Die Mergel-Formationen des Helvetikums (insbesondere Palfris-Formation, Vitznau-Mergel und Amden-Formation) wurden bereits in einer frühen Phase der SMA-Standortevaluation als mögliche Wirtgesteine betrachtet (Nagra 1981) und auch im Rahmen von Dissertationen untersucht (z.B. Ischi 1978, Burger 1985). Detaillierte hydrogeologische und bautechnische Daten lagen erstmals vom Bau des Seelisbergtunnels vor (Schneider 1984). Gezielte geowissenschaftliche Untersuchungen im Hinblick auf die Eignung der Gesteine für ein SMA-Tiefenlager begannen 1987 mit mehreren Bohrungen in den Annexbauwerken des Seelisbergtunnels (potenzieller Standort Oberbauenstock; Nagra 1988b). Ein umfangreiches Untersuchungsprogramm von der Oberfläche aus erfolgte anschliessend im potenziellen Standortgebiet Wellenberg. Es umfasst 7 Tiefbohrungen, mehrere reflexions- und refraktionsseismische Messkampagnen, Piezometer- und flache Aufschlussbohrungen sowie eine Reihe geologischer und hydrogeologischer Feldstudien. Die Ergebnisse sind in einem Synthesebericht zusammengestellt (Nagra 1997), und es existieren zahlreiche detaillierte geowissenschaftliche Referenzberichte, in welchen die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen umfassend dargestellt und diskutiert sind. Zudem wurde eine umfassende Sicherheitsanalyse durchgeführt (Nagra 1994). Nach Abschluss dieser Arbeiten wurden nachträglich noch Forschungsarbeiten publiziert, in welchen einzelne Aspekte vertieft analysiert wurden (Mazurek et al. 1998a, Mazurek 1999: Herkunft Erdgas; Mazurek et al. 1998b: Radionuklidtransport; Diamond 1998 und Vinard 1998: Unterdrücke).

Ergebnisse von hydrogeologischen Untersuchungen in neuen Untertagebauten (zusammenfassender Überblick in Nagra 2008c) haben die Ergebnisse der Standortuntersuchungen am Wellenberg im Wesentlichen bestätigt.

Weil die bestehenden Untersuchungen am Wellenberg sehr umfassend sind, sind für Etappe 2 nur noch Untersuchungen in geringerem Umfang vorgesehen (Auswertung neuer Daten von Untertagebauten, Überprüfung und gegebenenfalls Neuinterpretation der bestehenden tektonischen Profile, siehe Kap. 8.2).

Hydrogeologische Verhältnisse

Die Hydrogeologie der Tiefenaquifere der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland (inkl. genutzte Mineralquellen und Thermen) wurde bereits in zahlreichen früheren Arbeiten von der Nagra und von Dritten dargestellt (siehe unten). Dabei lag der Fokus projektspezifisch auf unterschiedlichen Gebieten. Die Arbeiten umfassen auch hydrochemisch-isotopenhydrologische Studien und hydrodynamische Modelle. Im Folgenden werden insbesondere Syntheseарbeiten aufgeführt, in diesen sind Referenzen auf weitere Publikationen zu finden.

Wichtige Grundlagen im gebietsübergreifenden Massstab bilden die geologischen Karten (z.B. geologische Karte der zentralen Nordschweiz 1:100'000; Isler et al. 1984) und die hydrogeologischen Karten der Schweiz[20] (Blatt Bözberg – Beromünster: Jäckli & Kempf 1972; Blatt Bodensee: Kempf 1980, Jäckli & Kempf 1980). Für die oberflächennahen Aquifere bestehen insbesondere kantonale Kartenwerke (Grundwasserkarten, Grundwasserschutzzonenkarten, Online-Karten im Internet). Diese spielen für die Planung der Oberflächenanlagen eine wichtige Rolle (raumplanerischer Aspekt).

Eine Synthese der Hydrogeologie der sedimentären Tiefenaquifere der Nordschweiz erfolgte im Rahmen der Sedimentstudie (Nagra 1988a). Die Kenntnisse wurden in späteren Berichten basierend auf neuen Daten vertieft, der Fokus lag auf der Region Lägeren – Zürcher Weinland (Ehrminger et al. 1995, Klemenz et al. 2000, Nagra 2002a).

Die Hydrochemie der Tiefengrundwässer der Nordschweiz und angrenzender Gebiete in Süddeutschland wurde von Schmassmann et al. (1984) dargestellt. Basierend auf einem erweiterten Datensatz erfolgten vertiefte Auswertungen spezifisch für die einzelnen Tiefenaquifere (Schmassmann 1990; Schmassmann et al. 1992, Biehler et al. 1993). Diese umfassen auch hydrogeologische Beschreibungen von Thermalwassersystemen und Proben aus Untertagebauten. Basierend auf isotopenhydrologischen Methoden interpretierten Pearson et al. (1991) die Fliesssysteme der Tiefenaquifere der Nordschweiz. Unter Einbezug von neuen hydrochemischen und isotopenhydrologischen Daten erfolgte eine aktualisierte regionale Auswertung im Rahmen der Geosynthese Zürcher Weinland (Nagra 2002a, Traber et al. 2002).

Ein grossräumiges hydrodynamisches Modell wurde von Kimmeier et al. (1985) zur Beschreibung der Fliesssysteme in den Tiefenaquiferen der Nordschweiz und der angrenzenden Gebiete verwendet. Dieses wurde später weiter entwickelt (Nagra 1988a; Bouzelboudjen et al. 1997). Das Modell 'Opa 1988' beschreibt die Fliesssysteme im Oberen Malm und im Oberen Muschelkalk der Region Lägeren – Zürich Nord-Ost bis ins Hegau-Gebiet (Nagra 1988a; Voborny et al. 1993). Das Modell 'USM 1988' beschreibt die Fliesssysteme im Oberen Malm und der Oberen Meeresmolasse der Nordostschweiz (Nagra 1988a, Voborny et al. 1993).

Neue Arbeiten zur Hydrogeologie der Tiefenaquifere im angrenzenden Süddeutschland umfassen insbesondere das LGRB-Projekt 'Hydrogeologische und geothermische Grundlagen zur Nutzung der tiefen Geothermie/Hydrogeothermie in der Region Bodensee-Oberschwaben' (online zugänglich unter www.lgrb.uni-freiburg.de) und die Darstellung der hydrogeologischen Einheiten in Baden-Württemberg (LGRB 2008). Eine hydrogeologische Analyse der Tiefenaquifere im Oberen Malm und in der Molasse inklusive einer Diskussion der Grundwasserneubildung findet sich in Bertleff & Watzel (2002).

Die Informationen zu den hydrogeologischen Verhältnissen sind zurzeit in einem unterschiedlichen Grad aufbereitet. Dank früherer Untersuchungsprogramme liegen für die Standortgebiete Wellenberg und Zürich Nord-Ost umfassende Synthesen der hydrogeologischen Verhältnisse

[20] Inklusive Erläuterungen.

vor. Im letzteren Fall umfassen die regionalen Betrachtungen auch die heutigen Standortgebiete Südranden und Nördlich Lägeren. Für Etappe 2 werden auch die Standortgebiete Bözberg und Jura-Südfuss in die hydrogeologischen Synthesearbeiten mit einbezogen (Kap. 8.4); die verfügbaren Informationen sind unten aufgeführt.

Für das Standortgebiet *Südranden* sind die hydrogeologischen Einheiten dank den Sondierbohrungen Benken (Nagra 2001) und Siblingen (Nagra 1992b), der Grundwasserbohrung Trasadingen (Bühl & Bollinger 1999) und den Aufschlussverhältnissen am Südranden (Jäckli & Kempf 1972) gut bekannt. Die regionalen Tiefenaquifere sowie die Hydrochemie und Isotopenhydrologie sind in Nagra (2002a) detailliert dargestellt. Eine Darstellung der hydraulischen Potenziale im Oberen Malm des Standortgebiets Südranden findet sich in Interreg IIIA (2008). Eine allgemeine hydrogeologische Beschreibung des Gebiets findet sich in Jäckli & Kempf (1972).

Für das Standortgebiet *Zürich Nord-Ost* sind die hydrogeologischen Einheiten, die regionalen Fliesssysteme sowie die Hydrochemie und Isotopenhydrologie dank der Tiefbohrung Benken und weiteren Untersuchungen in der Region gut bekannt und in Nagra (2002a) detailliert dargestellt. Zudem existiert ein lokales hydrodynamisches Modell. Die Hydrogeologie des Oberen Malms im Raum Hegau – Schaffhausen wurde im Rahmen von Interreg IIIA (2008) detailliert untersucht.

Für das Standortgebiet *Nördlich Lägeren* sind die hydrogeologischen Einheiten aus der Bohrung Weiach (Nagra 1989) gut bekannt. Die regionalen Fliesssysteme sowie die Hydrochemie und Isotopenhydrologie wurden im Rahmen von Nagra (2002a) detailliert dargestellt. Weitere Grundlagen zur Hydrogeologie des Oberen Malms wurden im Rahmen der Untersuchung der Grundwasserleiter und Böden im Hochrheintal (Interreg II 2001) und im Rahmen von Interreg IIIA (2008) erarbeitet.

Für das Standortgebiet *Bözberg* sind die hydrogeologischen Einheiten aus der Bohrung Riniken (Nagra 1990) und dank der guten Aufschlussverhältnisse gut bekannt (siehe Schmassmann in Jäckli & Kempf 1972). Bezüglich Oberem und Mittlerem Dogger ist zu beachten, dass Riniken noch im Bereich des Fazieswechsels Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' – Hauptrogenstein-Aquifer liegt (Nagra 2008c: Figur 5.2-1 und Beilage 5.2-2). Hydrochemische Daten inklusive Beschreibung des Thermalwassers Schinznach Bad finden sich in Biehler et al. (1993) und teilweise auch in Nagra (2002a). Zusätzliche hydrogeologische Beobachtungen stammen aus dem Eisenbahntunnel (Biehler et al. 1993) und Autobahntunnel am Bözberg (Wegmüller 2001).

Für das Standortgebiet *Jura-Südfuss* sind die hydrogeologischen Einheiten aus der rund 4 km im Osten liegenden Bohrung Schafisheim (Nagra 1992a), den Untersuchungen in der EWS-Bohrungen Oftringen (Albert et al. 2008, Fisch et al. 2008, Waber 2008) und Küttigen (Klump et al. 2008) sowie Beobachtungen an Aufschlüssen im angrenzenden Faltenjura (z.B. Jäckli & Kempf 1972) bekannt. Hydrochemische Daten inklusive Beschreibungen der Thermalquelle Lostorf und der im Hauensteinbasistunnel angetroffenen Grundwässer finden sich in Biehler et al. (1993).

Die hydrogeologischen Verhältnisse im Standortgebiet *Wellenberg* basieren auf mehreren Tiefbohrungen und sind in der Geosynthese Wellenberg (Nagra 1997) detailliert dargestellt. Die Situation wurde im Rahmen eines hydrodynamischen Modells vertieft ausgewertet. Für Etappe 2 werden auch die Erkenntnisse aus dem Bau des Bahntunnels Engelberg evaluiert.

Geologische Langzeitentwicklung

Die wichtigsten Grundlagendaten zur geologischen Langzeitentwicklung betreffen die Themenkomplexe Neotektonik und Erosion.

Betreffend Neotektonik sind, neben der damit verbundenen Hebung und Erosion (vgl. unten), vor allem potenzielle differenzielle Bewegungen im Lagerbereich relevant (im Hinblick auf die Schädigung der technischen Barrieren und die potenzielle Entstehung neuer Wasserwegsamkeiten). Da sich gemäss den anerkannten konzeptuellen Modellvorstellungen grössere Bewegungen im Betrachtungszeitraum bevorzugt an bestehenden grösseren Störungen abspielen, ist dabei in erster Linie deren Verteilung wichtig.

Die Datenlage zur Geometrie von Störungszonen und ihrer hydrogeologischen Eigenschaften in den verschiedenen Wirtgesteinen wurde weiter vorne in diesem Kapitel beschrieben. Neben den allgemeinen geometrischen und tektonischen Arbeiten tragen u.a. folgende Arbeiten zum heutigen neotektonischen Verständnis bei: die Auswertung der registrierten Erdbeben (z.B. Deichmann & Renggli 1984, Deichmann 1987, Deichmann 1990, Deichmann et al. 2000, Deichmann & Rinderknecht 2005, Kastrup et al. 2007, Jahresberichte des Schweizerischen Erdbebendiensts: SED 2008), geodätische Messungen (z.B. Schlatter 2007, Zippelt & Dierks 2007, Wiget et al. 2007), Spannungsmessungen (z.B. Becker 2000, Becker et al. 1986, Müller et al. 2002, Heidbach et al. 2008, Reinecker et al. 2010), geomorphologische Studien (z.B. Haldimann et al. 1984, Klemenz 1993, Fraefel 2008, Kock 2008, Madritsch et al. 2009), paläoseismologische Studien (z.B. Ferry et al. 2005, Strasser et al. 2006) und Beckenmodellierungen (Mazurek et al. 2006). Eine Zusammenfassung der neotektonischen Situation in der Schweiz unter Berücksichtigung der oben genannten Datensätze findet sich in Nagra (2008c, Kapitel 2.7), eine Zusammenfassung mit Fokus auf die Nordschweiz geben Müller et al. (2002). Die Daten erlauben eine Differenzierung der neotektonischen Situation zwischen den verschiedenen geologischen Grossräumen bzw. tektonischen Regimes und lassen u.a. auf eine im Allgemeinen höhere neotektonische Aktivität und höhere Erosionsraten entlang der Alpenfront (Standortgebiet Wellenberg) im Vergleich zu den Standortgebieten in der Nordschweiz schliessen (vgl. Kap. 4.5).

Die Landschaftsentwicklung in der Nordschweiz, die darauf basierende Ableitung von langfristigen Erosionsraten sowie zukünftigen Erosionsszenarien werden für die Nordostschweiz in Müller et al. (2002) diskutiert, für das Standortgebiet Wellenberg liegt eine detaillierte Studie von Klemenz (1993) vor. Die wichtigsten Grundlagendaten dazu stellen alte Aufschotterungsflächen dar, in welche sich die Täler sukzessive eingetieft haben (z.B. Graf 1993, 2009 und 2010). Weitere wichtige Hinweise für Abschätzungen von langfristigen Erosionsraten sind Untersuchungen der Versenkungsgeschichte anhand von Apatit-Spaltspurdaten, Vitrinitreflexionsmessungen und Biomarker-Analysen (Mazurek et al. 2006). Diese Daten können mit rezent gemessenen Hebungsraten anhand von Präzisionsnivellements (Zippelt & Dierks 2007, Schlatter 2007) verglichen werden.

Betreffend glaziale Tiefenerosion sind die Verteilung, die Tiefe und das Alter der vorhandenen übertieften Felsrinnen wichtig. Eine generelle Übersicht über solche Felsrinnen in und um die Alpen findet sich in Preusser et al. (2010). Eine Karte der Basis der Lockergesteine in der Nordschweiz und im angrenzenden Molassebecken wurde im Rahmen von SGT Etappe 1 kompiliert (Jordan 2008; Beilage 5.2-28 in Nagra 2008c). Detaillierte Isohypsenkarten und Profile durch übertiefte Täler mit relativen Altersangaben finden sich in Graf (2010). Die ältere Vergletscherungsgeschichte (Zeit der höheren und tieferen Deckenschotter) wird in Graf (1993) und Graf (2009) diskutiert. Die jüngere Entwicklung (Zeit der Ablagerung der Hoch- und Niederterrassen) wird in Graf (2010) detailliert abgehandelt. In der neuen Karte 'Die Schweiz während des letzteiszeitlichen Maximums (LGM)' 1:500'000 von Schlüchter et al. (2009) sind

Informationen aus zahlreichen quartärgeologischen Forschungsarbeiten zu einem Gesamtbild der Eisverbreitung zur Zeit des Maximalstands der letzteiszeitlichen Vergletscherung kompiliert.

Für Etappe 2 sind standortübergreifende Untersuchungen geplant (Kap. 8.5), u.a. betreffend Verbreitung, Morphologie und Alter von glazialen Talfüllungen und quartären Terrassen sowie Spuren von neotektonischer Aktivität. Im Standortgebiet Bözberg wird zusätzlich das Erosionspotenzial in Zusammenhang mit der lokalen Topographie ('Einebnung') untersucht.

4.2 Geometrie und Strukturen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, Informationen zu Nutzungskonflikten und ausgewählten Zustandsparametern

4.2.1 Relevante Prozesse und Parameter

Die für die Sicherheit bzw. technische Machbarkeit relevanten Prozesse und Parameter mit Bezug zur Geometrie der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (einschliesslich der vorhandenen geologischen Strukturen) sowie zu Nutzungskonflikten und zu ausgewählten Zustandsparametern aus Tab. 3.2-1 sind in Tab. 4.2-1 zusammengefasst. Ein Teil der relevanten Prozesse und Parameter wird direkt für die quantitative Beurteilung der Sicherheit (in Tab. 4.2-1 mit PG für geologische Merkmale gekennzeichnet) oder für die Beurteilung der technischen Machbarkeit (gekennzeichnet mit PB) verwendet. Diese Prozesse und Parameter fliessen teilweise auch in die qualitative Bewertung ein, zusammen mit weiteren Prozessen und Parametern (in Tab. 4.2-1 mit PI gekennzeichnet), die ausschliesslich für die qualitative Bewertung verwendet werden.

Zu den für die Sicherheit wichtigen Prozessen und Parametern bezüglich der Geometrie gehören die Tiefenlage des Wirtgesteins bzw. des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Hinblick auf die Erosion und auf die Gesteins-Dekompaktion, die Mächtigkeit der Wirtgesteine und Rahmengesteine sowie die Geometrie der glazial übertieften Felsrinnen[21]. Die Tiefenlagen werden im Kontext der geologischen Langzeitentwicklung (vgl. Kap. 4.5) darauf hin untersucht, ob die erosiven Prozesse innerhalb des Betrachtungszeitraums zu einer Gesteins-Dekompaktion bzw. zu einer Lagerfreilegung führen können (vgl. Kap. 6.2). Von Bedeutung für die Sicherheit sind auch Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen und Geothermie.

Aus Sicht der technischen Machbarkeit ist die Tiefenlage der Lagerebene (meist in der Mitte des Wirtgesteins angenommen) wichtig zur Festlegung der Querschnitte der untertägigen Bauten bzw. des notwendigen Ausbaus und – gekoppelt mit der Tiefenlage – die In-situ-Gebirgsspannungen. Für die Beurteilung des Platzangebots untertags sind zudem die Lage und Häufigkeit von gebietsbegrenzenden und anordnungsbestimmenden geologischen Elementen ausschlaggebend. Die gebietsbegrenzenden regionalen Elemente wurden in SGT Etappe 1 verwendet, um die geologischen Standortgebiete abzugrenzen. Innerhalb der geologischen Standortgebiete können weitere geologische Elemente vorkommen, denen mit den Lagerkammern ausgewichen werden muss (sogenannte anordnungsbestimmende geologische Elemente, vgl. Fig. 3.1-1). Zur Beurteilung ausgewählter Aspekte der lagerbedingten Einflüsse (Einfluss erhöhter Temperaturen) ist die In-situ-Temperatur von Bedeutung.

Die Diskussion des Kenntnisstands bezüglich dieser Prozesse und Parameter ist in Kap. 4.2.2 zu finden.

---

[21] Falls die glazial übertieften Felsrinnen wegen ihrer Geometrie die Sicherheit eines Lagers gefährden können, wird ihnen mit den Lagerkammern mit einem ensprechenden Abstand ausgewichen.

Tab. 4.2-1: Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zur Geometrie der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (inkl. vorhandene geologische Strukturen) sowie zu Nutzungskonflikten und zu ausgewählten Zustandsparametern.

Die relevanten Prozesse und Parameter für die Sicherheit (PG – geologische Merkmale) und technische Machbarkeit (PB – geologische Merkmale) fliessen in die quantitative Analyse der Sicherheit und in die standortspezifische Lagerauslegung ein und werden teilweise auch für die qualitative Bewertung verwendet, während die weiteren relevanten Prozesse und Parameter (PI) ausschliesslich in die qualitative Bewertung einfliessen.

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Präzisierung
i) Relevante Prozesse und Parameter für die Sicherheit (PG – geologische Merkmale)		
PG-1	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung	Tiefenlage der Lagerebene
PG-2	Glazial übertiefte Felsrinnen	Geometrie (Lage, Tiefe, Breite)
PG-3	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	Tiefenlage der Oberkante der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche
PG-5	Mächtigkeit	Mächtigkeit der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche
PG-32	Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	Qualitative Beurteilung (v.a. Kohle, Kohlenwasserstoffe, Salz)
PG-33	Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins	Qualitative Beurteilung (v.a. Kohle, Kohlenwasserstoffe, Salz, Rohstoffe für Baustoffindustrie)
PG-34	Nutzungskonflikte hinsichtlich Geothermie	Qualitative Beurteilung
ii) Relevante Prozesse und Parameter für die techn. Machbarkeit (PB – geologische Merkmale)		
PB-1	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit	zur Berücksichtigung der Gebirgsspannungen
PB-2	Gebietsbegrenzende geologische Elemente	Tiefenlagen (vgl. oben), regionale Störungszonen, diffus gestörte Zonen; im Standortgebiet Wellenberg auch Nebengesteine
PB-3	Anordnungsbestimmende geologische Elemente	Anordnungsbestimmende Störungszonen, Architekturelemente und Fremdgesteins-einschlüsse
PB-4	Platzangebot untertags[22]	
PB-5	In-situ-Temperatur	auf Lagerebene
PB-6	In-situ-Gebirgsspannungen	auf Lagerebene und im Bereich der Zugangsbauwerke

[22] Abgeleitete Grösse (hier keine Beschreibung notwendig).

Tab. 4.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Präzisierung
iii) Weitere relevante Prozesse und Parameter (PI – ausschliesslich qualitative Bewertung)		
PI-2	Geodynamische und neotektonische Aktivität[23]	unter Berücksichtigung von Häufigkeit und Beschaffenheit von reaktivierbaren Störungszonen sowie Verlängerung von Störungszonen in lateraler und vertikaler Richtung
PI-8	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	
PI-9	Explorationsbedingungen an Oberfläche	unter Berücksichtigung der Topographie, Bebauung, Tiefenlage der seismischen Marker, Oberflächennutzung, Ankopplungsbedingungen

4.2.2 Evaluation der Information zu den Prozessen und Parametern sowie des entsprechenden Kenntnisstands

Für die meisten der Prozesse und Parameter können die Informationen aus SGT Etappe 1 direkt verwendet werden. In gewissen Fällen ist zur Gewährleistung der Sicherheit bzw. technischen Machbarkeit eine günstige Anordnung der Lagerkammern erforderlich. Im Folgenden werden diese Prozesse und Parameter gesondert diskutiert.

PG-1, PG-3, PB-1 / Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung, Gesteins-Dekompaktion und bautechnische Machbarkeit

Basierend auf den in Kap. 4.1 aufgeführten Informationsquellen wurden in SGT Etappe 1 Tiefenkarten der Wirtgesteine erstellt (Kapitel 5.2.2 in Nagra 2008c). Bei der Abgrenzung der Standortgebiete wurden auch die Ungewissheiten bezüglich der Tiefenlage berücksichtigt, d.h. es wurde darauf geachtet, dass die Flexibilität bezüglich der Tiefenlage innerhalb der Standortgebiete so gross ist, dass Abweichungen in der Tiefenlage gemäss den erwarteten Ungewissheiten berücksichtigt werden können. Dabei wurde auch berücksichtigt, dass die Ungewissheit im Allgemeinen mit zunehmender Überlagerung, grösserer tektonischer Komplexität sowie abnehmender Qualität der Grundlagendaten zunimmt. Die Bandbreiten zur Tiefenlage, welche die Variabilität und die Ungewissheiten innerhalb der verschiedenen Standortgebiete abbilden, sind in Anhang A3 aufgeführt.

Der heutige Kenntnisstand zur Tiefenlage unter Terrain wird als geeignet beurteilt, um für die Testrechnungen die Bedeutung der erosiven Freilegung und der Gesteins-Dekompaktion unter Berücksichtigung der Information zur geologischen Langzeitentwicklung (Kap. 4.5) zu analysieren (vgl. Kap. 6.2.5) sowie Teilaspekte der bautechnischen Machbarkeit abzuklären (Beurteilung der Standsicherheit der Lagerkammern, vgl. Kap. 5.2). Mit den für SGT Etappe 2 begonnenen bzw. geplanten Arbeiten (z.B. Reprozessierung der Seismik, siehe Kap. 8.2) werden die Informationen zur Tiefenlage überprüft und konsolidiert.

[23] Die Beschreibung der geodynamischen und neotektonischen Aktivität erfolgt im Kontext der geologischen Langzeitentwicklung (Kap. 4.5).

PG-2 / Glazial übertiefte Felsrinnen

Auskunft über die Geometrie, die geographische Lage und die Tiefe von übertieften Felsrinnen geben Isohypsenkarten der Felsoberfläche. Solche Karten werden basierend auf Bohrungen, geophysikalischen Untersuchungen (u.a. Reflexionsseismik, Gravimetrie), geologischen Karten (Aufschlussinformationen) und geologischen Modellvorstellungen erstellt. Die vorhandenen Isohypsenkarten der Felsoberfläche der Nordschweiz wurden im Rahmen von Etappe 1 kompiliert und anhand einer umfassenden Bohrungsdatenbank überprüft und wo nötig modifiziert (Kapitel 5.2.4 in Nagra 2008c).

Die Existenz und Lage der grösseren Rinnen ist durch die vorhandenen Daten relativ gut belegt. Ungewissheiten bestehen insbesondere bezüglich der genaueren Morphologien einzelner Rinnen. Dort, wo tiefere Rinnen existieren, gibt es oft wenige Bohrungen, welche die Basis erreichen; der exakte Tiefgang ist hier also vergleichsweise ungewiss. Aus diesem Grund wurde in SGT Etappe 1 dort, wo tiefe Felsrinnen (Quartärmächtigkeit > 100 m) ausgewiesen sind, zusätzliche Anforderungen an die minimale Festgesteinsüberdeckung bei der Abgrenzung der Standortgebiete gestellt. In Anhang A3 ist für die Standortgebiete mit tiefen Felsrinnen (mehr als 100 m Quartärfüllung) die Information bzgl. der Tiefenlage (Karten mit Abstand zwischen Top Fels und Lagerebene Wirtgestein) aufgezeigt.

Diese Karten zeigen, dass in den meisten geologischen Standortgebieten tiefe Felsrinnen entweder am Rand oder ausserhalb liegen. Dort, wo solche Felsrinnen innerhalb von geologischen Standortgebieten vorkommen (Teile von Nördlich Lägeren und Zürich Nord-Ost) beträgt der vertikale Abstand zwischen Basis Felsrinne und Lagerebene mehr als 500 m.

Der heute vorhandene Kenntnisstand wird als geeignet beurteilt, um die Bedeutung der glazial übertieften Felsrinnen für die Testrechnungen bzw. die bautechnische Machbarkeit (Anordnung der Lagerkammern) aufzuzeigen. Für SGT Etappe 2 ist eine Überarbeitung des Felsmodells unter Berücksichtigung von zusätzlichen Daten (Erweiterung Bohrungsdatenbank, Gravimetrie, Auswertung Seismik) geplant. Diese Resultate fliessen in die Konsolidierung der Karten der glazial übertieften Felsrinnen ein (vgl. Kap. 8.2).

PG-5 / Mächtigkeit

Die Mächtigkeiten der Wirtgesteine wurden in Kapitel 5.2.2.2 in Nagra (2008c) diskutiert, die Mächtigkeits- und Lithofaziesverhältnisse der Rahmengesteine sind in Kapitel 5.2.1 desselben Berichts sowie in Naef (2008) aufgezeigt. Ausgehend von diesen Informationen sind in Anhang A3 die Mächtigkeiten der Wirtgesteine und Rahmengesteine für die verschiedenen geologischen Standortgebiete unter Berücksichtigung der Variabilität und Ungewissheiten aufgeführt. Diese Informationen zeigen, dass die Mächtigkeit des Opalinustons in der Nordschweiz ungefähr zwischen 75 m und 130 m variiert. Die vorhandenen Tiefbohrungen in den HAA-Standortgebieten zeigen Mächtigkeiten des Opalinustons (inkl. Murchisonae-Schichten in Opalinustonfazies) von > 110 m. Am Jura-Südfuss (u.a. Bohrung Schafisheim) und im westlichen Kanton Schaffhausen (v.a. Aufschlussinformationen) wurden Werte von weniger als 100 m gemessen; es sind dort allerdings geringdurchlässige Rahmengesteine vorhanden. Die Rahmengesteine sind östlich des Aaretals (Standortgebiete Südranden, Zürich Nord-Ost, Nördlich Lägeren) deutlich mächtiger und toniger als westlich davon (Standortgebiete Bözberg und Jura-Südfuss).

Als Basis für die Testrechnungen wurden aufgrund der Nagra-Bohrungsdatenbank, der vorhandenen Aufschluss- und Sammelprofile (Naef 2008) sowie konzeptionellen Überlegungen Referenzwerte und Bandbreiten (inkl. Variabilität und Ungewissheiten) geschätzt. Diese in

Anhang A3 aufgeführte Information wird als geeignet beurteilt, um unter Berücksichtigung der allenfalls vorhandenen höher durchlässigen sedimentären Architekturelemente (vgl. Kap. 4.3) die Länge der Transportpfade für die Testrechnungen abzuschätzen (vgl. Kap. 6.2.2 bzw. Tab. A3-4, A3-6, A3-8, A3-10, A3-12). Mit den für SGT Etappe 2 begonnenen bzw. geplanten Arbeiten (vgl. Kap. 8.2 und 8.3) werden die Informationen zur Mächtigkeit überprüft und konsolidiert.

PB-2 / Gebietsbegrenzende geologische Elemente

Die gebietsbegrenzenden geologischen Elemente (minimale/maximale Tiefenlage, regionale Störungszonen, diffus gestörte Zonen, teilweise übertiefte Felsrinnen) wurden in SGT Etappe 1 verwendet, um die bevorzugten Bereiche und geologischen Standortgebiete abzugrenzen.

Als gebietsbegrenzende geologische Elemente sind in der Nordschweiz neben der Tiefenlage und den glazial übertiefen Felsrinnen (PG-1, PG-2, PG-3, PB-1; siehe oben) regionale Störungszonen und Zonen mit Anzeichen für erhöhte tektonische Zergliederung (diffus gestörte Zonen) wichtig. In der Regel sind diese Elemente relativ gut definiert. Die regionalen Störungszonen sowie die Zonen mit Anzeichen für erhöhte tektonische Gliederung wurden in der Nordschweiz mit Hilfe der in Kap. 4.1.2 bzw. in Kap. 5.2.3 in Nagra (2008c) aufgezeigten Daten (geologische Karten, Reflexionsseismik etc.) abgegrenzt. Die Ungewissheiten wurden bei der Abgrenzung der Standortgebiete durch die Forderung nach einem Platzangebot mit Reserven zur Abdeckung der Ungewissheiten in diesen Grenzen berücksichtigt. Im Fall des Standortgebiets Wellenberg wird die laterale Gebietsabgrenzung im Norden und Süden durch die angrenzenden durchlässigeren geologisch-tektonischen Einheiten definiert.

Der heute vorhandene Kenntnisstand wird als geeignet beurteilt, um die Bedeutung der gebietsbegrenzenden geologischen Elemente für die Testrechnungen bzw. die bautechnische Machbarkeit (Anordnung der Lagerkammern und untertägiges Platzangebot, vgl. Kap. 5.3) zu analysieren. Mit den für SGT Etappe 2 begonnenen bzw. geplanten Arbeiten (vgl. Kap. 8.2) werden die Informationen zu den gebietsbegrenzenden geologischen Elementen überprüft und konsolidiert.

PB-3 / Anordnungsbestimmende geologische Elemente und PB-4 / Platzangebot untertags

Neben den gebietsbegrenzenden geologischen Elementen sind innerhalb der verschiedenen geologischen Standortgebiete weitere geologische Elemente (Störungszonen, sedimentäre Architekturelemente, Fremdgesteinseinschlüsse[24]) zu erwarten, die bei der Anordnung der Lagerkammern berücksichtigt werden müssen. Die Relevanz dieser verschiedenen geologischen Elemente für die Sicherheit bzw. technische Machbarkeit, d.h. ob eine Störung anordnungsbestimmend ist, hängt von den Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und den lithofaziellen Variabilitäten (sedimentäre Architekturelemente) ab, welche in Kap. 4.3.2 diskutiert werden. In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über die typischen Richtungen und die Häufigkeit von bedeutenden lokalen Störungszonen in der Nordschweiz gegeben; als bedeutend werden Störungszonen bezeichnet, falls sie einen strati-

[24] Störungszonen können die Geometrie der Lagerebenen (horizontale Dimension), sedimentäre Architekturelemente können die Lagerebene bestimmen (vertikale Dimension); Fremdgesteinseinschlüsse spielen nur im Standortgebiet Wellenberg eine Rolle.

graphischen Versatz von mehr als 20 m aufweisen[25]. Angaben zu Richtung und Häufigkeit solcher Störungszonen können aufgrund der vorhandenen Daten (SGT Etappe 1 und laufende Arbeiten; vgl. Kap. 8.2) und konzeptionellen Überlegungen gemacht werden.

Anordnungsbestimmende Störungen mit stratigraphischen Versätzen von > 20 m werden in allen Standortgebieten erwartet. In Gebieten der Nordschweiz mit aufgeschlossenen mesozoischen Schichten (ohne Quartärbedeckung) sind derartige Störungen kartierbar. Die wichtigsten Richtungen solcher Störungen, welche sich aus den geologischen Karten der Nordschweiz sowie aus Hinweisen aus Fernerkundungsdaten und Aufschlussbeobachtungen ableiten lassen, verlaufen in der Nordschweiz im Allgemeinen NNE-SSW, NW-SE bis WNW-ESE und W-E bis WSW-ENE.

Aus sehr gut aufgeschlossenen Regionen weltweit ist bekannt, dass die Dichte und damit die Häufigkeit von Störungen bei gleichbleibender Geologie mit der Deformationsintensität (Betrag der tektonischen Dehnung oder Einengung) korreliert sind (Gupta & Scholz 2000, Spyropoulos et al. 1999). Eine stärkere Deformationsintensität bedingt eine höhere Störungsdichte (d.h. Störungslänge pro Fläche).

Basierend auf bestehenden geologischen Karten können für das Gebiet der Nordschweiz Störungsdichten ermittelt werden. Auf dem Blatt 1049/1069 Frick / Laufenburg der geologischen Karte der Schweiz 1:25'000 (Diebold et al. 2006) wurden Störungslinien mit einer Gesamtlänge von 211 km auf einer Fläche von 250 km^2 kartiert; dies ergibt eine Störungsdichte von rund 0.8 km/km^2. Da das Gebiet teilweise mit Quartär bedeckt ist, ist es wahrscheinlich, dass bei der Kartierung nicht alle Störungen erfasst wurden. Aus diesem Grund wurden in einem zweiten Schritt nur die am besten aufgeschlossenen Bereiche im Bereich der Jura Hauptüberschiebung im Süden des Kartenblatts betrachtet. Hier sind Störungen von einer Gesamtlänge von 108 km auf einer Fläche von 48 km^2 kartiert worden, was einer Störungsdichte von 2.3 km/km^2 entspricht. Da dieses Gebiet erheblich stärker deformiert ist als die Standortgebiete, ist dieser Wert als konservativ anzusehen. Hinzu kommt, dass bei dieser Berechnung alle kartierten Störungen und nicht nur jene mit einem stratigraphischen Versatz von > 20 m berücksichtigt werden. Dabei ist von Bedeutung, dass geologische Störungen charakteristische Verhältnisse von Versatzbetrag und Ausstrichlänge aufweisen. Diese Verhältnisse sind weltweit ähnlich (Scholz 2001, Schlische et al. 1996). Auch für Überschiebungssysteme, die mit dem Faltenjura vergleichbar sind, wurden solche Relationen ermittelt. In gut aufgeschlossenen Überschiebungsgürteln wurden Ausstrichlängen beobachtet, die etwa 100 mal grösser sind als die Versatzbeträge (Davis et al. 2005a). Für die Nordschweiz ist demnach damit zu rechnen, dass die anordnungsbestimmenden Störungen mit stratigraphischen Versätzen > 20 m Längserstreckungen von ca. 2 km und mehr aufweisen und deshalb durch Beobachtungen erfasst werden.

Für die am stärksten deformierten Regionen der Nordschweiz (Faltenjura), die Störungsdichten von ca. 2.3 km/km^2 aufweisen, kann daher gefolgert werden, dass anordnungsbestimmende Störungen mit stratigraphischen Versätzen von > 20 m und somit einer Länge von ca. 2 km unabhängig von ihrer Orientierung einen mittleren Abstand von knapp 0.5 km aufweisen. Dieser Wert kann aus nachfolgend beschriebenen Gründen für die geologischen Standortgebiete

[25] Für das Wirtgestein Opalinuston kann von günstigen Bedingungen bzgl. Selbstabdichtung ausgegangen werden und ähnliches gilt auch für die tonigen Teile des 'Braunen Doggers' (vgl. Kap. 4.3). Für diese Wirtgesteine sind es insbesondere geometrische Überlegungen, welche eine Störungszone mit einem stratigraphischen Versatz von mehr als 20 m zu einem anordnungsbestimmenden geologischen Element machen. Für die Effinger Schichten könnten evtl. schon kleinere Versätze kritisch sein; weil aber im Standortgebiet Jura-Südfuss auch Opalinuston als Wirtgestein betrachtet wird, wird auch dort ein Versatz von 20 m als Kriterium verwendet. Für das Standortgebiet Wellenberg gelten die in der Geosynthese (Nagra 1997) gemachten Angaben.

als untere Grenze für den Abstand von Störungszonen mit Versätzen > 20 m betrachtet werden. Wird berücksichtigt, dass die Störungsdichte durch Familien von Störungen mit unterschiedlicher Orientierung verursacht wird, so ergibt sich ein grösserer mittlerer Abstand zwischen den Störungen jeder Familie (bei 2 bzw. 3 Familien in der Grössenordnung von etwas unter 1 km bzw. unter 1.5 km). Für die wesentlich schwächer deformierten Bereiche, in welchen die geologischen Standortgebiete liegen, ergeben sich aufgrund oben ausgeführter empirischer Erkenntnisse grössere Abstände.

Weiter kann festgehalten werden, dass wegen der von West nach Ost abnehmenden Einengung des Alpenvorlands in den östlich gelegenen Standortgebieten generell eher mit einer insgesamt geringeren Störungsdichten und grösseren mittleren Störungsabständen zu rechnen ist als in den weiter westlich gelegenen Standortgebieten.

Diese aus Erfahrungswerten und theoretischen Überlegungen abgeleiteten typischen Abstände wurden auch mit typischen mittleren Abständen verglichen, wie sie sich aus den geologischen Karten, Fernerkundungsdaten, reflexionsseismischen Profilen und Beobachtungen im Feld ergeben. Auch basierend auf diesen Informationsquellen werden die typischen Abstände grösserer Störungen im Allgemeinen auf mindestens 0.5 km bis wenige Kilometer geschätzt: Auf den qualitativ guten reflexionsseismischen Linien sind Störungen mit einem stratigraphischen Versatz von 20 m und mehr in der Regel erkennbar. Die Auswertung der vorhandenen seismischen Linien in den flachliegenden Teilen der Nordschweiz zeigt Störungsabstände von einigen Kilometern. Weiter sind aus geologischen Aufnahmen von Steinbrüchen in der Nordschweiz über Aufschlusslängen von einigen hundert Metern häufig keine Störungen mit einem Versatz von mehr als 2 m zu beobachten (Laws & Deplazes 2007).

Die Abstände von grösseren Störungszonen werden nachfolgend anhand der pro Standortgebiet vorhandenen Informationen diskutiert.

Aufgrund obiger Überlegungen und aufgrund von Beobachtungen ist in den Standortgebieten *Zürich Nord-Ost* und *Südranden* die zu erwartende Frequenz von tektonisch bedeutenden lokalen Störungen am geringsten. Insbesondere die 3D-Seismik im Standortgebiet Zürich Nord-Ost erlaubt hier gut belegte Aussagen bezüglich solcher Strukturelemente, da vertikale Versätze von > 20 m mit der 3D-Seismik praktisch flächendeckend auflösbar sind. Die grösste Störungszone im Standortgebiet ist die E-W streichende Wildensbuch-Flexur, welche über ca. 4 km verfolgt werden kann und aus einzelnen Segmenten mit maximalen vertikalen Versätzen von etwas weniger als 20 m besteht. Daneben gibt es auf der 3D-Seismik Hinweise auf Flexuren und Strukturen (v.a. NNE-SSW, E-W und NW-SE streichend) mit deutlich kleineren Vertikal-Versätzen und/oder Längserstreckungen. Die typischen mittleren Abstände solcher Strukturen sind > 1.5 km.

Im Standortgebiet *Nördlich Lägeren* werden aufgrund des tektonischen Regimes zum Teil Störungen mit bedeutenden Vertikalversätzen (> 20 m) erwartet, obwohl auf den vorhandenen Seismikdaten nur sehr vereinzelt Hinweise auf solche Störungen zu erkennen sind – diese liegen vor allem im Randbereich des Standortgebiets. Die typischen Streichrichtungen von Störungen in diesem Gebiet, die sich aus derzeit laufenden Auswertungen von Fernerkundungsdaten und geologischen Feldaufnahmen ableiten lassen (vgl. Kap. 8.2), sind NNE-SSW und NW-SE bis WNW-ESE. Im gesamten Bereich des Standortgebiets, vor allem aber in seinem nördlichen und südlichen Randbereich, ist ausserdem mit ENE-WSW streichenden Strukturelementen (z.B. flach einfallende Überschiebungen) zu rechnen. Mindestabstände von anordnungsbestimmenden Störungen (Vertikalversätze > 20 m) können entlang des Westabschnitts der Lägeren-Antiklinale ermittelt werden. Dieser Bereich befindet sich zwar ausserhalb des Standortgebiets, ist aber relativ gut aufgeschlossen und auf dem Blatt Baden des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000 hochauflösend kartiert (Bitterli-Dreher et al. 2007). Innerhalb einer Fläche von 32 km^2

wurde eine Gesamtstörungslänge von 63 km kartiert. Dies ergibt eine Störungsdichte von ca. 2 km/km^2. Gemäss obigen Überlegungen ergibt sich daraus für anordnungsbestimmende Störungen ein mittlerer Abstand von rund 0.5 km. Da es sich bei dem untersuchten Kartenabschnitt um ein sehr stark deformiertes Gebiet handelt, kann davon ausgegangen werden, dass die mittleren Abstände von anordnungsbestimmenden Störungen im Bereich des tektonisch wesentlich geringer beanspruchten Standortgebiets grösser sind. Ausserdem muss berücksichtigt werden, dass der mittlere Abstand zwischen anordnungsbestimmenden Störungen der gleichen Familie beim Auftreten mehrerer verschieden orientierter Störungsfamilien deutlich grösser ist.

Im *Standortgebiet Bözberg* gibt es insbesondere in den vorhandenen Seismikdaten wenige konkrete Hinweise auf das Auftreten von anordnungsbestimmenden Störungen mit stratigraphischen Versätzen > 20 m. Derartige Strukturen werden deshalb nur vereinzelt erwartet, u.a. in den südlichen und nördlichen Randbereichen nahe des Faltenjuras und der Mandach-Überschiebung. Hinweise ergeben sich vor allem aus Beobachtungen in den nördlichen, südlichen und westlichen Randzonen des Standortgebiets, wo teilweise N-S bis NNE-SSW streichende Störungen auftreten. Nicht ausgeschlossen werden können ferner NW-SE streichende Störungen. Insbesondere im südlichen und nördlichen Randbereich des Standortgebiets sind auch flach einfallende ENE-WSE streichende Störungen nicht auszuschliessen. In den sehr stark deformierten Gebieten ausserhalb des Standortgebiets weisen Störungen typische mittlere Abstände von mindestens 0.5 km auf. Dieser Mindestwert wurde aus dem Blatt Frick des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000 (Diebold et al. 2006) abgeleitet (vgl. obige Diskussion). Für den zentralen Bereich des Standortgebiets selbst werden aber aufgrund seiner allgemein geringeren tektonischen Beanspruchung grössere typische Abstände erwartet.

Im Standortgebiet *Jura-Südfuss* gibt es auf den vorhandenen Seismiklinien nur vereinzelt deutliche Hinweise auf Störungen mit erkennbaren Versätzen. Aus dem Faltenjura nördlich des Standortgebiets gibt es Hinweise auf NNE-SSW streichende Störungen, welche zum Teil im Bereich von Klusen aufgeschlossen sind und sich mit grosser Wahrscheinlichkeit Richtung Süden fortsetzen. Ein konjugiert dazu verlaufendes System (NW-SE) ist ausserhalb des Standortgebiets bei Olten kartiert; ähnlich orientierte Systeme, dürften auch im Standortgebiet auftreten. Aus Oberflächengeologie, Bohrungen und Reflexionsseismik gibt es zudem Hinweise auf eine ENE-WSW streichende Struktur zwischen Suhr und Niedergösgen (Eppenberg-Flexur). In Zusammenhang mit dieser Flexur können grössere Vertikalversätze nicht ausgeschlossen werden. Hier und auch an anderen Stellen, zum Beispiel im Bereich nördlich der Born-Engelberg-Antiklinale, sind flache Überschiebungen möglich. Im Randbereich der Born-Engelberg Antiklinale, insbesondere im Bereich des Ostendes, ist aus kinematischen Gründen eine erhöhte Dichte von Strukturen mit grösseren Versätzen (Aufschiebungen, Transferstörungen im Deckgebirge) zu vermuten. Allgemein muss im Standortgebiet Jura-Südfuss aufgrund des tektonischen Regimes und strukturgeologisch-kinematischer Überlegungen mit einem vergleichsweise höheren Anteil von Zonen mit erhöhter Störungsdichte gerechnet werden. Dies gilt insbesondere für das Ostende der Born-Engelberg-Antiklinale. Da im Bereich des eigentlichen Standortgebiets aktuell keine publizierten hochauflösenden geologischen Landeskarten zur Verfügung stehen, wird für die Abschätzung der mittleren Abstände von anordnungsbestimmenden Störungen das benachbarte Blatt Frick (Diebold et al. 2006) herangezogen. Wie oben ausgeführt, ergeben sich daraus für tektonisch sehr stark beanspruchte Bereiche (Faltenjura) mittlere Abstände anordnungsbestimmender Störungen von rund 0.5 km. Im deutlich weniger stark tektonisch beanspruchten Bereich des Standortgebiets werden grössere Abstände erwartet. Zwischen anordnungsbestimmenden Störungen werden Abschnitte von geringerer tektonischer Beanspruchung erwartet, was durch Beobachtungen im Steinbruch Jakobsberg bestätigt wird (Laws & Deplazes 2007).

Beim *Standortgebiet Wellenberg* handelt es sich um eine tektonische Wirtgesteins-Akkumulation. Folglich besteht hier eine im Vergleich zur Nordschweiz ungleich höhere Störungsdichte. Es bestehen Ungewissheiten bezüglich der Lage und Häufigkeit von anordnungsbestimmenden geologischen Elementen (tektonisch eingeschuppte, höher durchlässige Fremdgesteinseinschlüsse und höher durchlässige Störungszonen, wobei solche in den bisherigen Standortuntersuchungen nicht nachgewiesen wurden). Im Mergel vorhandene Kalkbankabfolgen, welche aufgrund der Zerscherung und Verfaltung nicht über längere Strecken verbunden sind, werden nicht als anordnungsbestimmende geologische Elemente betrachtet. Anordnungsbestimmenden geologischen Elementen kann aufgrund des grossen Volumens der Wirtgesteins-Akkumulation räumlich in allen drei Raumrichtungen ausgewichen werden, was eine hohe Flexibilität bei der Anordnung der einzelnen Lagerkavernen gewährleistet. Zur optimalen Nutzung des Raumangebots ist vorgesehen, das SMA-Lager auch im geologischen Standortgebiet Wellenberg auf zwei oder mehr Stockwerken anzulegen, was die Flexibilität weiter erhöht.

Die Informationen für die verschiedenen geologischen Standortgebiete werden als genügend beurteilt, um die Auswirkungen anordnungsbestimmender geologischer Elemente auf die bautechnische Machbarkeit (Anordnung der Lagerkammern und untertägiges Platzangebot, vgl. Kap. 5.3) zu analysieren. Dazu werden für alle Standortgebiete (Ausnahme: Standortgebiet Wellenberg) drei Familien von anordnungsbestimmenden Störungen (> 20 m Versatz) angenommen. Daraus resultiert ein mittlerer Abstand zwischen den einzelnen Störungen pro Familie von 1.5 km. Dies ergibt sich aus den oben ausgeführten Überlegungen für hochdeformierte Bereiche. Da die Standortgebiete in vergleichsweise schwach deformierten Bereichen liegen, kann diese Abschätzung als vorsichtig erachtet werden. Tatsächlich dürften die mittleren Abstände insbesondere in den östlichen Gebieten (*Zürich Nord-Ost, Südranden*) grösser sein. Im Standortgebiet *Zürich Nord-Ost* wurde mit der Wildensbuch-Flexur lediglich ein einziges grösseres geologisches Element mit vertikalem Versatz von knapp 20 m aufgrund der 3D-Seismik identifiziert.

Die Angaben zu Frequenzen und Richtungen lokaler Störungen werden durch die laufenden und für Etappe 2 geplanten Arbeiten ergänzt (vgl. Kap. 8.2). Dazu ist auch geplant, für die HAA-Gebiete in der Region Bözberg – Nördlich Lägeren für Etappe 2 ein Netz von zusätzlichen 2D-Seismiklinien zu messen. Die Messungen dienen dazu, für das HAA-Lager die regionale tektonische Situation detaillierter zu erfassen im Hinblick auf die Bewertung der Langzeitentwicklung über den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren. Die Messungen werden dazu beitragen, die Strukturen detaillierter zu erfassen im Hinblick auf die Bewertung geometrischer Aspekte für die Anordnung der HAA-Lagerstollen. Weiter werden die Messungen auch verwendet zur Planung und Fokussierung der geplanten 3D-Seismik. Die effektive Anordnung der Lagerkammern unter Berücksichtigung der anordnungsbestimmenden geologischen Elemente erfolgt im Rahmen der Standortuntersuchungen für Etappe 3 (insbesondere Seismik) bzw. in späteren Phasen der Lagerrealisierung. Die Beurteilung der Explorierbarkeit solcher anordnungsbestimmenden Elemente wird Teil der qualitativen Bewertung in SGT Etappe 2 sein und in den sicherheitstechnischen Vergleich einfliessen.

PG-32, PG-33, PG-34 / Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen unterhalb bzw. oberhalb des Wirtgesteins sowie Nutzungskonflikte hinsichtlich Geothermie

Die Grundlagen für die Beurteilung potenzieller Nutzungskonflikte unterhalb bzw. oberhalb der Wirtgesteine[26] wurden im Rahmen der Arbeiten zu Etappe 1 flächendeckend erarbeitet (Kohlenwasserstoffe: Leu 2008 und Nagra 2008c) oder sind in neuen Veröffentlichungen allgemein zugänglich (Geothermie: Signorelli & Kohl 2007 und Nagra 2008c).

Ein weiterer in SGT Etappe 2 zu beachtender potenzieller Nutzungskonflikt könnte entstehen, wenn über einem Tiefenlager ein grossflächiger, tiefreichender Gesteinsabbau stattfinden würde, weil dann im Extremfall eine Dekompaktion des Wirtgesteins erfolgen könnte, welche eine Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit zur Folge hätte. Ein geplantes Projekt mit möglicherweise grösserem Gesteinsabbau ist aus dem Standortgebiet Bözberg bekannt.

Der heutige Kenntnisstand erlaubt es, die Bedeutung von Kohlenwasserstoff- und Salzvorkommen, von Geothermie sowie von Gesteinsvorkommen zu deren Nutzung als Baurohstoff für die Realisierung geologischer Tiefenlager zu diskutieren (vgl. Kap. 6.2.7). Die begonnenen bzw. geplanten Arbeiten für SGT Etappe 2 werden genutzt, um die vorhandenen Informationen zu Rohstoffen zu überprüfen und zu konsolidieren (Kap. 8.2).

PB-5 / In-situ-Temperatur

Aussagen über die in den Standortgebieten auf der Lagerebene zu erwartenden Temperaturen können aus den Temperaturmessungen in Tiefbohrungen der Nordschweiz abgeleitet werden. In sedimentären Becken zeigen die Temperaturprofile einer Region in der Regel eine relativ gute Übereinstimmung. Die Zusammenstellung der Temperaturgradienten im Tiefenintervall von 400 bis 900 m von Schärli & Rybach (2002) macht deutlich, dass dies – abgesehen von Anomalien durch zirkulierende Thermalwässer – auch im Bereich der Standortgebiete in der Nordschweiz gilt. Die Temperaturverhältnisse in den Standortgebieten können daher aus den Temperaturmessungen in nahegelegenen Bohrungen abgeleitet werden. Die regionale Zusammenstellung von Schärli & Rybach (2002) stützt sich zum Teil auf Bohrungsuntersuchungen mit ungesicherter Qualität bzw. überholter Messmethodik. Gut gesicherte Daten für die Temperaturanstiege mit der Tiefe in den Sedimentgesteinen der Nordschweiz liegen aus den Sondierbohrungen Schafisheim, Weiach, Riniken, Benken und der EWS-Bohrung Oftringen vor (Weber et al. 1986, Nagra 1989, 1990, 1992a, Müller et al. 2002, Nagra 2002a, Albert et al. 2008).

Die Temperaturverhältnisse im Standortgebiet Wellenberg sind aufgrund der Temperaturmessungen in den 7 Tiefbohrungen (Packertests, Multipackersysteme, Fluid-Logging und bohrlochgeophysikalische Logs) gut bekannt.

Der heutige Kenntnisstand zur In-situ-Temperatur wird als geeignet beurteilt, um deren Bedeutung für die lagerbedingten Einflüsse zu analysieren (Kap. 6.2.3).

---

[26] Potenzielle Nutzungskonflikte in Zusammenhang mit Rohstoffvorkommen innerhalb der Wirtgesteine werden in Kap. 4.3 diskutiert (vgl. PI-1 / Nutzung der Gesteine als Rohstoff).

Tab. 4.2-2: Wirtgesteinstemperaturen aus Bohrungsuntersuchungen.

Bohrung	**Wirtgestein**	**Tiefen-intervall**	**Temperaturen Oberkante / Basis**	**Referenz**	**Geother-mischer Gradient ***
		[m u. GOK]	[°C]		[°C/km]
SB Riniken	Opalinuston	331 – 451	27 / 35	Nagra (1990)	55
SB Weiach	'Brauner Dogger'	478 – 555	27 / 32	Nagra (1989)	44
	Opalinuston	555 – 666	32 / 39		
SB Benken	'Brauner Dogger'	450 – 538	26 / 30	Nagra (2002a)	43
	Opalinuston	538 – 652	30 / 38		
SB Schafisheim	Effinger Schichten	610 – 827	31 / 40	Nagra (1992a)	43
	Opalinuston	1'000 – 1'080	48 / 53		
EWS Oftringen	Effinger Schichten	420 – 641	31 / 46	Albert et al. (2008)	56
Wellenberg SB3	Mergel-Formationen des Helvetikums	199 – 1'245	13 / 47 **	Ostrowski et al. (1992)	33

* zwischen Oberfläche (10°C Mitteltemperatur) und Basis des tiefsten in der Tabelle angegebenen Wirtgestein.

** Temperaturen an den Wirtgesteinsgrenzen extrapoliert aus Messungen während Hydrotests.

Für SGT Etappe 2 ist geplant, den Datensatz von Schärli & Rybach (2002) mit den seither erhobenen Temperaturdaten zu ergänzen und zu konsolidieren (vgl. Kap. 8.2). Die geothermischen Gradienten in den in Tab. 4.2-2 aufgeführten Bohrungen werden – zusammen mit den übrigen Temperaturmessungen – verwendet, um die zu erwartenden Temperaturen in den Wirtgesteinen der Standortgebiete in der Nordschweiz abzuleiten.

PB-6 / In-situ-Gebirgsspannungen

Das Spannungsfeld in der Nordschweiz ist in zahlreichen Studien untersucht worden. Diese Arbeiten stützen sich auf Auswertungen von Bohrlochrandausbrüchen, Herdflächenlösungen von Erdbeben und direkten Messungen von Spannungen in Bohrungen verschiedener Tiefen. Diese Daten werden regelmässig vom 'World Stress Map Project' kompiliert und bewertet (Zoback 1992, Heidbach et al. 2008). Zusätzlich existieren regionale Interpretationen, die die Standortgebiete ganz oder teilweise mit einschliessen und eine oder mehrere der oben genannten Informationsquellen verwenden (Roth & Evans 1997, Kastrup et al. 2004, Delacou et al. 2004). Auch GPS Daten können unter gewissen Annahmen zur Ableitung von Spannungsrichtungen beigezogen werden. Allerdings sind die Deformationsraten regional so gering, dass die Verschiebungen aus Kampagnenmessungen vielfach auch nach mehr als 20 Jahren immer noch im Bereich des Fehlerintervalls liegen (beeinflusst durch Messgenauigkeit, Stabilität des Untergrunds etc.). Der Stationsabstand der heute schon verfügbaren Permanentstationen ist so gross, dass nur grossräumige Effekte (100 km) erfasst werden können (Delacou et al. 2008, Serpelloni et al. 2005, Tesauro et al. 2006).

Die regionalen Datensätze, die sich meist auf Spannungen im Grundgebirge beziehen, zeigen im Vorland der Alpen einheitliche Spannungsorientierungen und Spannungsregimes. Die maximale horizontale Hauptspannung ist im Nordosten N- oder NNW-, weiter im Westen dagegen NW-gerichtet und senkrecht zur Alpenfront. Das Spannungsregime ist gemäss den regionalen Daten überwiegend extensional (Ost-West-Dehnung) oder seitenverschiebend, es existieren allerdings lokal einige Ausnahmen.

Für das Deckgebirge der Nordschweiz liegen wegen fehlender Seismizität keine Herdflächenlösungen vor. Die Spannungsrichtungen aus Bohrlochrandausbrüchen und Spannungsmessungen zeigen oft eine gute Übereinstimmung mit den Daten aus dem Grundgebirge (Reinecker et al. 2010). Eine deutliche Abweichung wurde allerdings in der Bohrung Schafisheim im Bereich oberhalb des Abscherungshorizonts beobachtet (Becker et al. 1986).

Die zur Verfügung stehenden Messungen von Spannungsmagnituden in der Nordschweiz beschränken sich auf das Bohrloch Benken (Nagra 2001). Hier zeigt sich, dass die Spannungen von den Eigenschaften der Gesteine kontrolliert werden, wobei die Spannungsdifferenzen in den tonreichen Formationen geringer sind als in den kompetenteren Einheiten (Wileveau et al. 2007). Die maximale Horizontalspannung beträgt hier etwa das 1.3-fache der Auflast (Nagra 2001), die minimale Hauptspannung beträgt das ca. 0.9-fache der Auflast. Damit ergibt sich ein seitenverschiebender Spannungszustand.

Die Orientierung der horizontalen Hauptspannungsrichtung ist für die Standortgebiete Südranden und Zürich Nord-Ost mit NNW bis N und für die Standortgebiete Nördlich Lägeren, Bözberg und Jura-Südfuss mit NNW bis NW als relativ gut gesichert anzunehmen. Das Spannungsregime sowie die Spannungsmagnituden sind aufgrund fehlender Seismizität im Deckgebirge und nur weniger Spannungsmessungen weniger gut einzuschätzen. Aufgrund der Ähnlichkeit der Spannungsorientierung in Deckgebirge und Grundgebirge dürften aber auch die Spannungsregimes ähnlich sein. Allerdings ist aus den Daten anderer Untersuchungen bekannt, dass in Oberflächennähe und in Gebieten mit starkem Relief die topographischen Effekte gegenüber dem tektonischen Fernfeld an Einfluss gewinnen. Daher ist bei geringeren Tiefen mit einer erhöhten Variabilität des Spannungsregimes zu rechnen. Dies wird durch numerische Berechnungen bestätigt; für das Standortgebiet Wellenberg existieren Spannungsmessungen aus Bohrungen und ein numerisches Modell zur Simulation der topographischen, tektonischen und durch die Variabilität des E-Moduls der unterschiedlichen Gesteine bedingten Effekte (Nagra 1997). Solche Modelle werden bei Bedarf in späteren Phasen auch für die anderen Standorte erstellt. Die relativen Magnituden der Spannungen in den Standortgebieten werden unter der Annahme ähnlicher Wirtgesteinseigenschaften voraussichtlich mit den Verhältnissen in Benken vergleichbar sein.

Der heutige Kenntnisstand zu den In-situ-Gebirgsspannungen wird als geeignet beurteilt, um ihre Bedeutung für die technische Machbarkeit (Kap. 5.2) zu analysieren. Die begonnenen bzw. geplanten Arbeiten für SGT Etappe 2 werden genutzt, um die vorhandenen Informationen zu überprüfen und zu konsolidieren (Kap. 8.2).

PI-8 / Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund

Die Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund wurden für die Erarbeitung der Standortvorschläge für SGT Etappe 1 bewertet (Nagra 2008b), wobei die vom Wirtgestein und/oder Standort abhängigen Aspekte 'Kontinuität der interessierenden Schichten' sowie 'regionale geologisch-tektonische Situation' (v.a. Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse) berücksichtigt wurden.

In SGT Etappe 2 werden unter Einbezug der in Kap. 8 aufgeführten begonnenen und geplanten Arbeiten pro Standortgebiet Explorationskonzepte erarbeitet, welche als Basis für eine verfeinerte Beurteilung der Explorationsverhältnisse im Untergrund dienen.

PI-9 / Explorationsbedingungen an Oberfläche

Die Explorationsverhältnisse an der Oberfläche wurden für die Erarbeitung der Standortvorschläge für SGT Etappe 1 bewertet (Nagra 2008b), wobei die topographische Situation, die Tiefenlage und Ausbildung der seismischen Marker, die Oberflächennutzung und die Ankopplungsbedingungen berücksichtigt wurden.

In SGT Etappe 2 werden pro Standortgebiet Explorationskonzepte erarbeitet, welche als Basis für eine verfeinerte Beurteilung der Explorationsverhältnisse an der Oberfläche dienen.

Beurteilung des Kenntnisstands bezüglich der Geometrie und Strukturen der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche, der Vorkommen von Ressourcen und ausgewählter Zustandsparameter (Fazit)

Der in vorliegendem Kapitel diskutierte Kenntnisstand bezüglich der Geometrie und Strukturen der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche, der Vorkommen von Ressourcen und ausgewählter Zustandsparameter für die verschiedenen Standortgebiete ist ausreichend, um für die relevanten Prozesse und Parameter die erforderlichen konzeptuellen Modelle abzuleiten, deren relevante Eigenschaften über Parameterbandbreiten zu erfassen und darauf basierend abdeckende Rechenfälle für die Testrechnungen festzulegen bzw. die für diesen Bericht notwendigen Abklärungen für die bautechnische Machbarkeit vorzunehmen.

Die Informationen und Datensätze werden – teilweise basierend auf ergänzenden Untersuchungen – für SGT Etappe 2 überprüft. Teilweise werden die Unterlagen vertieft (PG-1/ PG-3 / PG-5 / PB-1 / Tiefenlage und Mächtigkeit der Wirt- und Rahmengesteine, PG-32, 33, 34 / Informationen zu Nutzungskonflikten, PB-5 / In-situ-Temperatur, PB-6 / In-situ-Gebirgsspannungen, PI-8 / Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund und PI-9 / Explorationsbedingungen an Oberfläche) bzw. ergänzt (PB-3 / Anordnungsbestimmende geologische Elemente, PB-4 / Platzangebot untertags, PG-2 / Glazial übertiefte Felsrinnen), vgl. die Zusammenstellung der bereits begonnenen bzw. geplanten Arbeiten für SGT Etappe 2 in Kap. 8.1 und 8.2.

Im Rahmen der provisorischen Sicherheitsanalysen und für den sicherheitstechnischen Vergleich in SGT Etappe 2 werden die für Etappe 2 neu erarbeiteten Informationen berücksichtigt.

4.3 Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Das Wirtgestein bildet zusammen mit den Rahmengesteinen den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Die Wirtgesteine in der Nordschweiz (Opalinuston, 'Brauner Dogger', Effinger Schichten) haben in mehreren Standortgebieten auch die Funktion von Rahmengesteinen (Tab. 3.1-1). Aus diesem Grund stellt die Charakterisierung dieser Wirtgesteine gleichzeitig auch eine Charakterisierung der entsprechenden Rahmengesteine dar. Die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss und die Mergel-Formationen des Helvetikums am Wellenberg haben keine Rahmengesteine.

Westlich der Aare haben die Äquivalente der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' (Basis Hauptrogenstein bis Top Opalinuston) aufgrund ihrer insgesamt tonärmeren Ausbildung keine Wirtgesteinsfunktion. Die Eigenschaften der oberen Rahmengesteine können dort nicht direkt mit denjenigen des 'Braunen Doggers' verglichen werden. Für die Testrechnungen wird dort die reduzierte Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine durch einen geringeren Anteil der tonigen Partien berücksichtigt (vgl. Kap. 6.4); bezüglich der hydraulischen Eigenschaften werden die Werte des 'Braunen Doggers' mit folgender Begründung übernommen: Zwei hydraulische Tests in Teilbereichen der Abfolge ergaben in den Bohrungen Schafisheim und Riniken eine sehr geringe Durchlässigkeit. Zudem zeigen neue Auswertungen der bohrlochgeophysikalischen Logs, dass einzelne Lagen der Abfolge Tonmineralgehalte von mehr als 40 % erreichen. Die Gesteine weisen auch eine ähnliche Versenkungsgeschichte wie diejenige des 'Braunen Doggers' auf.

In den Testrechungen wird die Radionuklidfreisetzung aus dem Opalinuston nur via obere Rahmengesteine betrachtet, weil dieser Fall zu vergleichbaren oder eher ungünstigeren Ergebnissen führt (z.B. im Fall von einer erhöhten Durchlässigkeit der unmittelbar über dem Opalinuston liegenden Murchisonae-Schichten). Die lithologisch-hydrogeologischen Eigenschaften der unteren Rahmengesteine (Basis Opalinuston bis Top Muschelkalk) sind regional variabel; in jedem Fall wird aber die Bedeutung der Rahmengesteine durch den in den Testrechnungen berücksichtigten "What if?"-Fall ohne Rahmengesteine abgedeckt.

Der Kenntnisstand betreffend potenziell wasserführende sedimentäre Architekturelemente in den Wirt- bzw. Rahmengesteinen sowie der relevanten Tiefenaquifere und betreffend dem Stockwerkbau wird in Kap. 4.4 im Rahmen der Darstellung der hydrogeologischen Verhältnisse (PG-3 / relevante Exfiltrationspfade) standortspezifisch dargelegt (siehe auch Anhang A3) und ergänzt dementsprechend die Angaben in diesem Kapitel.

Die geotechnischen Verhältnisse in den Gesteinsabfolgen im Hangenden der Wirtgesteine werden in Kap. 4.4 aufgezeigt und im Rahmen der Beurteilung der technischen Machbarkeit der untertägigen Erschliessung (Kap. 5.4.2) behandelt.

4.3.1 Relevante Prozesse und Parameter

Die für die Sicherheit bzw. technische Machbarkeit relevanten Prozesse und Parameter mit Bezug zu den Eigenschaften der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche aus Tab. 3.2-1 sind in Tab. 4.3-1 zusammengefasst. Der grösste Teil der Prozesse und Parameter wird direkt für die quantitative Beurteilung der Sicherheit (in Tab. 4.3-1 mit PG für geologische Merkmale bezeichnet) bzw. für die Beurteilung der technischen Machbarkeit (mit PB bezeichnet) verwendet. Diese Prozesse und Parameter fliessen auch in die qualitative Bewertung ein, zusammen mit weiteren Prozessen und Parametern (in Tab. 4.3-1 mit PI gekennzeichnet), die ausschliesslich für die qualitative Bewertung verwendet werden.

Zu den für die Sicherheit wichtigen Prozessen und Parametern bezüglich der Eigenschaften des Wirtgesteins gehören die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit (welche den Wasserfluss in bzw. um die Lagerkammern und in der Geosphäre bestimmt), die sedimentären Architekturelemente, die Art der Transportpfade, die Transmissivität von Störungszonen, die Diffusionskoeffizienten (welche durch die Porosität im Wirtgestein bestimmt werden) sowie die geochemischen Bedingungen (Mineralogie, Porenwasserzusammensetzung). Aus Sicht der technischen Machbarkeit sind vor allem die Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften des Wirtgesteins und die natürliche Gasführung des Wirtgesteins wichtig.

Die Diskussion des Kenntnisstands sowie die Festlegung und Begründung der quantitativen Informationen (Referenzwerte und Bandbreiten) bezüglich dieser Prozesse und Parameter sind in Kap. 4.3.2 zu finden. Für die Charakterisierung der Eigenschaften der Wirtgesteine ist es sinnvoll, nicht nur Daten aus Bohrungen aus dem jeweiligen Standortgebiet selbst oder aus dessen näherer Umgebung zu berücksichtigen, sondern den gesamten Datensatz der betreffenden Gesteinsformation. Ein Grund dafür ist, dass die Wirtgesteine wegen ihrer Schichtneigung in allen Standortgebieten in unterschiedlicher Tiefenlage vorkommen und tektonische Strukturen nicht in jedem Gebiet erbohrt wurden. Die Betrachtung der Gesamtheit der Daten ist deshalb repräsentativer für die Erfassung der Bandbreiten und für die Festlegung der Referenzwerte. Damit wird auch berücksichtigt, dass die hydraulischen Daten aus neueren Bohrungen (Bsp. Opalinuston Benken, Effinger Schichten Bohrung Oftringen) mit neueren Methoden und kleineren Testintervallen ermittelt wurden, was zu präziseren Ergebnissen geführt hat als die Tests aus dem Anfang der 80er Jahre. In Anhang A3 sind jeweils die kompletten Datensätze aufgeführt oder zitiert.

Der unterschiedliche lithologische Aufbau der vier vorgeschlagenen Wirtgesteine wird bei der Anordnung der Lagerkammern berücksichtigt. Die Beschreibung der Wirtgesteine geht von folgenden Voraussetzungen aus: Während beim relativ einheitlich (homogen) aufgebauten Opalinuston die in Kap. 4.3.2 gemachten Aussagen in der Regel uneingeschränkt gelten, wird bei den heterogen aufgebauten Wirtgesteinen (Effinger Schichten, 'Brauner Dogger') in der Regel eine Anordnung der Lagerkammern in den tonreicheren Bereichen des Wirtgesteins angenommen. In den Mergel-Formationen des Helvetikums ist die Anordnung der Lagerkammern unabhängig von der Lage der sedimentären und strukturellen Diskontinuitäten (ausgenommen anordnungsbestimmende Elemente), weil diese keine kontinuierlichen Transportpfade mit unzulässig hohen Transmissivitäten bilden.

Tab. 4.3-1: Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zu den Eigenschaften der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche.

Die relevanten Prozesse und Parameter für die Sicherheit (PG – geologische Merkmale) und technische Machbarkeit (PB – geologische Merkmale) fliessen in die quantitative Analyse der Sicherheit und in die standortspezifische Lagerauslegung ein und werden teilweise auch für die qualitative Bewertung verwendet, während die weiteren relevanten Prozesse und Parameter (PI) ausschliesslich in die qualitative Bewertung einfliessen.

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Präzisierung
i) Relevante Prozesse und Parameter für die Sicherheit (PG – geologische Merkmale)		
PG-6	Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit	grossräumige hydraulische Durchlässigkeit des WG/EG (poröses oder geklüftetes Medium), inkl. potenziell wasserführende sedimentäre Architekturelemente, ohne strukturelle präferenzielle Freisetzungspfade (siehe PG-14)
PG-7	Einfluss Dekompaktion auf hydraulische Durchlässigkeit	Tiefenabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit
PG-9	Art der Transportpfade	äquivalent-poröses Medium vs. Kluftnetzwerk, Channeling, Matrixdiffusion
PG-10	Porosität [1)]	Fliessporosität, diffusionszugängliche Porositäten
PG-11	Sedimentäre Architekturelemente	Vorkommen von sedimentären Architekturelementen mit potenziell ungünstigeren Barriereneigenschaften
PG-12	Lage und Beschaffenheit von verkarstungsfähigen Gesteinen innerhalb des Wirtgesteins	Einschaltungen von evaporitischen und karbonatreichen Abfolgen
PG-14	Transmissivität Störungszonen	Transmissivität von grösserräumigen, diskreten Störungszonen
PG-15	Mineralogie [1)]	Einfluss auf Selbstabdichtungsvermögen (Tonmineralgehalt) Einfluss auf Sorptionskoeffizienten
PG-16	pH [1)]	Einfluss auf Sorptionskoeffizienten
PG-17	Redox-Bedingungen [1)]	Einfluss auf Sorptionskoeffizienten
PG-18	Salinität [1)]	Einfluss auf Sorptionskoeffizienten und Radionuklidlöslichkeitslimiten
PG-19	Mikrobielle Prozesse [1)]	v.a. Beeinflussung der Reaktionsraten
PG-20	Kolloidfiltration [1)]	Nahfeld- und Geosphärenkolloide
PG-22	Diffusionskoeffizienten für WG/EG [1)]	vgl. PG-9 und PG-10
ii) Relevante Prozesse und Parameter für die technische Machbarkeit (PB – geologische Merkmale)		
PB-7	Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein	
PB-9	Natürliche Gasführung des Wirtgesteins	

Tab. 4.3-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Präzisierung
iii) Weitere relevante Prozesse und Parameter (PI – ausschliesslich qualitative Bewertung)		
PI-1	Nutzung der Gesteine als Rohstoff	Inkl. Kohlenwasserstoffe und Erze
PI-4	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	Informationen unabhängig von hydraulischen Tests (natürliche Tracer in Porenwässern, Grundwasser-Stockwerkbau, hydraulische Drücke)
PI-5	Variabilität der Gesteins-eigenschaften	insbesondere das Vorhandensein schwer prognostizierbarer höher durchlässiger präferen-zielle Freisetzungspfade (geklüftete sedimentäre Architekturelemente, Störungszonen, Kombinationen von beiden)
PI-6	Selbstabdichtungsvermögen	Betrifft natürliche Klüfte und Störungszonen wie auch lagerinduzierte Diskontinuitäten (z.B. Auflockerungszone, vgl. Kap. 6.2.3)
PI-7	Erfahrungen	

[1)] Im vorliegenden Kapitel werden die Grundlagen für die Ableitung der Sorptionskoeffizienten und der Diffusionskoeffizienten erarbeitet; die darauf basierende radionuklidspezifische Festlegung der Sorptionskoeffizienten und der Diffusionskoeffizienten erfolgt in Kap. 6.2.2.

4.3.2 Evaluation der Information zu den Prozessen und Parametern sowie des entsprechenden Kenntnisstands

Für viele der Prozesse und Parameter können die Informationen aus SGT Etappe 1 direkt verwendet werden. Bei der Festlegung der konzeptuellen Modelle und Parameterwerte wird in einzelnen Fällen auf die Anordnung der Lagerkammern eingegangen. Dies betrifft sowohl die Anordnung der Lagerkammern innerhalb des Wirtgesteins (Anordnung der Lagerkammern ausserhalb potenziell durchlässiger sedimentärer Architekturelemente bzw. ausserhalb von sicherheits- und bautechnisch kritischen Störungszonen) wie auch die Anordnung der Lager-kammern innerhalb des geologischen Standortgebiets (z.B. Anordnung in einem Bereich mit grosser Überdeckung zur Vermeidung zukünftiger Durchlässigkeitserhöhung durch Dekompak-tionseffekte).

Für eine Anzahl von Prozessen und Parametern wurden in SGT Etappe 1 nur für die Referenz-konzepte und -parameter quantitative Angaben geliefert, und die Ungewissheiten wurden nur verbal beschrieben (Nagra 2008b). Für die Testrechnungen und für die Beurteilung der technischen Machbarkeit werden die Modellkonzepte und/oder Parameterwerte ausgehend von den Unterlagen für Etappe 1 erweitert, um alle vernünftig denkbaren Ungewissheiten abzu-decken. Bei einigen Prozessen und Parametern bestehen enge gegenseitige Beziehungen, wie beispielsweise die Abhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit vom Tonmineralgehalt resp. dem Selbstabdichtungsvermögen. Die unabhängigen Evidenzen (z.B. Porenwasserzusammen-setzung) untermauern die Plausibilität der vorgeschlagenen K-Werte.

Im Folgenden werden die einzelnen wirtgesteinsbezogenen Prozesse und Parameter diskutiert.

PG-6 / Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit und PG-11/ Sedimentäre Architekturelemente

Zur grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit der verschiedenen Wirtgesteine liegen von allen Wirtgesteinen quantitative Daten aus dem relevanten Tiefenbereich vor, wenn auch die Anzahl der hydraulischen Tests in den verschiedenen Wirtgesteinen unterschiedlich ist (die Eigenschaften der strukturellen präferenziellen Fliesspfade werden unter PG-9/14 behandelt). In einem lithologisch relativ homogen aufgebauten Wirtgestein wie dem Opalinuston sind die Bandbreiten der Ungewissheiten relativ gering, bei den lithologisch inhomogenen (und insbesondere bei den potenziell geklüfteten) Gesteinsabfolgen sind sie bedeutend grösser. Weil die horizontalen kalkigen sedimentären Architekturelemente ein Potenzial für erhöhte Durchlässigkeit haben, wird diesen bei der Anordnung der Lagerkammern ausgewichen[27] (ausser in den Mergel-Formationen des Helvetikums, wo die stark tektonisierten Kalkbankabfolgen aufgrund der Zerscherung keine kontinuierlichen Transportpfade bilden, und ihre möglicherweise lokal erhöhte Durchlässigkeit deshalb nicht zum Tragen kommt). In Etappe 1 wurden mit wenigen Ausnahmen nur die gemessenen Durchlässigkeiten quantitativ dokumentiert, die Ungewissheiten aber verbal beschrieben (Nagra 2008c). Für die Testrechnungen werden Bandbreiten verwendet, die sehr breit, aber noch plausibel sind und häufig ausserhalb der aus Messungen bestimmten Bandbreiten liegen. Diese werden ergänzt durch "What if?"-Fälle, die zwar physikalisch grundsätzlich möglich sind, aber nicht durch Beobachtungen getragen werden. Die konzeptuellen Modelle und Parameterwerte und die zugehörigen Bandbreiten und Alternativen berücksichtigen die unterschiedlichen Lithologien (vgl. Tab. 4.3-2 und Tab. A3-2).

Die Parameterwerte (inkl. Bandbreiten) für die hydraulische Durchlässigkeit der Wirtgesteine berücksichtigen die lithologische Ausbildung der Wirtgesteine (Tonmineralgehalt) und sind breiter gewählt, als die gemessenen Werte aus Tiefbohrungen. Die in den Tiefbohrungen bisher gemessenen Werte sind konsistent mit unabhängigen Evidenzen (natürliche Tracerprofile, vgl. PI-4). Der heutige Kenntnisstand wird als geeignet beurteilt, um für die Testrechnungen die notwendigen Rechenfälle festzulegen und diese zu parametrisieren. Für SGT Etappe 2 werden ergänzende Untersuchungen durchgeführt, welche zur Konsolidierung der Datenbasis für Etappe 2 verwendet werden (vgl. Kap. 8.3).

[27] Falls der Abstand der Kalkbankabfolgen bzw. der Sandkalkabfolgen dies nicht zulässt, werden die Lagerkammern so angeordnet, dass sie nur weniger kalkig ausgebildete Abfolgen schneiden.

Tab. 4.3-2: Hydraulische Durchlässigkeiten der verschiedenen Wirtgesteine.

Referenzwerte Etappe 1 (Nagra 2008c) und erweiterte Bandbreiten für die Testrechnungen (Kap. 6). Eine standortspezifische Zusammenstellung der Werte findet sich in Tab. A3-2.

Die horizontale bzw. vertikale hydraulische Durchlässigkeit (Kh bzw. K_v) ist synonym zur Durchlässigkeit parallel bzw. senkrecht zur Schichtung (wichtig im Fall von geneigten Schichten, z.B. Felslabor Mont Terri).

Opalinuston

Für die Bewertung der Wirtgesteine in Etappe 1 verwendete Werte

$K_h \leq 10^{-13}$ m/s, $K_v \leq 2 \times 10^{-14}$ m/s

Referenzwerte im Entsorgungsnachweis, basierend auf der Bohrung Benken. Einzelne Tests im Felslabor Mont Terri zeigen K_h -Werte bis 6×10^{-12} m/s, für die effektive grossräumige Durchlässigkeit werden deutlich kleinere Werte erwartet.

Für die Testrechnungen vorgeschlagene Referenzwerte und ungünstige Eckwerte

Referenzwerte für Standortgebiete, bei welchen die Überdeckung (bezüglich Top Opalinuston) im grössten Teil des Gebiets mehr als 400 m beträgt: $K_h = 10^{-13}$ m/s, $K_v = 2 \times 10^{-14}$ m/s, konzeptualisiert als homogen-poröses Medium. Dies betrifft alle HAA-Standortgebiete und die SMA-Standortgebiete Zürich Nord-Ost und Nördlich Lägeren. Die K_h-Werte entsprechen Messungen in der Sondierbohrung Benken, mit einer Überdeckung von Top Opalinuston von rund 540 m (Nagra 2002a). Die K_v-Werte basieren auf dem aus Bohrkernversuchen abgeleiteten Anisotropiekoeffizienten $K_h/K_v \approx 5$ (Nagra 2002a)[28]. Dieser Anisotropiekoeffizient gilt für alle alternativen Fälle inkl. "What if?"-Fälle.

Referenzwerte für Standortgebiete, bei welchen die Überdeckung (bezüglich Top Opalinuston) im grössten Teil des Gebiets weniger als 400 m beträgt (SMA-Standortgebiete Südranden, Bözberg und Jura-Südfuss): $K_h = 5 \times 10^{-13}$ m/s, $K_v = 10^{-13}$ m/s, konzeptualisiert als homogen-poröses Medium. Die Referenzwerte für diese Standortgebiete werden einen Faktor 5 höher gewählt, weil der Top Opalinuston in einem signifikanten Teil des Gebiets eine Überdeckung von weniger als 400 m hat. Die Werte sind konsistent mit Durchschnittswerten aus dem Felslabor Mont Terri (Bandbreite K_h: $2 \times 10^{-14} – 10^{-12}$ m/s, bester Schätzwert K_h: 2×10^{-13} m/s, Tab. 8.2 in Bossart & Thury 2008), welches eine Gesteinsüberdeckung von 250 – 300 m hat.

Obere Eckwerte: $K_h = 5 \times 10^{-13}$ m/s, $K_v = 10^{-13}$ m/s für die Standortgebiete mit einer Überdeckung von mehr als 400 m und $K_h = 1.5 \times 10^{-12}$ m/s, $K_v = 3 \times 10^{-13}$ m/s für die Standortgebiete mit einer Überdeckung von weniger als 400 m, konzeptualisiert als homogen-poröses Medium. Der obere Eckwert für K_h für Standortgebiete mit einer Überdeckung von mehr als 400 m deckt die besten Schätzwerte sämtlicher gültiger Tests im Opalinuston der Nordschweiz ab (Tab. A3-1), der Wert für Standortgebiete mit einer Überdeckung von weniger als 400 m entspricht dem oberen Eckwert der Bandbreite Mont Terri (Tab. 8.2 in Bossart & Thury 2008).

Es werden auch "What if?"-Fälle mit einer grossräumigen Durchlässigkeit von $K_h = 5 \times 10^{-12}$ m/ bzw. $K_v = 10^{-12}$ m/s betrachtet. Mit diesen Werten werden sämtliche Maximalwerte der Bandbreiten der gültigen Tests in der Nordschweiz (Tab. A3-1) abgedeckt. Eine noch weiter gehende lokale Erhöhung wird mit einem "What if?"-Fall einer Störung mit erhöhter Transmissivität abgedeckt (vgl. PG-14).

Diese Bandbreiten sind so gross, dass sie sowohl die unterschiedliche Tiefenlage und den unterschiedlichen Deformationsgrad innerhalb eines Standortgebiets wie auch mögliche Unterschiede zwischen einzelnen Standortgebieten abdecken. Es gibt jedoch keine Hinweise, dass der Deformationsgrad (tektonische Überprägung) einen Einfluss auf die hydraulische Durchlässigkeit des Opalinustons hat (vgl. Tab. 4.3-3).

Die Eigenschaften des gesamten einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sind wie folgt: Obere Rahmengesteine ('Brauner Dogger' und Effinger Schichten) siehe unten; Untere Rahmengesteine (Oberer Teil des Lias bis Top Arietenkalk) wie Opalinuston (vgl. Hydrotest L1 Benken, Nagra 2002a). Die darunterliegenden Einheiten werden im Sinne eines pessimistischen (vorsichtigen) Ansatzes für die Radionuklidrückhaltung nicht berücksichtigt.

[28] Ein Anisotropiekoeffizient von 5 wurde auch für die Diffusionskoeffizienten aus zahlreichen Messungen abgeleitet (Nagra 2002a).

Tab. 4.3-2: (Fortsetzung)

'Brauner Dogger'
Für die Bewertung der Wirtgesteine in Etappe 1 verwendete Werte
$K_h \leq 10^{-11}$ m/s abgeleitet aus Tests in den Bohrungen Benken und Herdern-1. Höchster gemessener Wert in sandreicher Abfolge (Bohrung Herdern-1): $K_h = 3 \times 10^{-11}$ m/s (min./max. 5×10^{-12} / 1×10^{-10} m/s) $K_v \leq 10^{-12}$ m/s Annahme wegen sehr tonreicher Einheiten innerhalb der Abfolge.
Für die Testrechnungen vorgeschlagene Referenzwerte und ungünstige Eckwerte
Für die Testrechnungen wird die Anordnung der Lagerkammern explizit berücksichtigt und dementsprechend eine differenziertere Betrachtung der Durchlässigkeitswerte als in Etappe 1 vorgenommen. Im Referenzfall wird davon ausgegangen, dass die Sandkalkabfolgen[29] keine grossräumig wirksame erhöhte Durchlässigkeit haben. Für den Fall, dass die Sandkalkabfolgen in horizontaler Richtung eine gegenüber den tonreichen Abfolgen erhöhte grossräumige Durchlässigkeit haben, werden zwei alternative Varianten analysiert: (1) den Sandkalkabfolgen wird bei der Platzierung der Lagerkammern ausgewichen, (2) es gibt Sandkalkabfolgen, welche von den Lagerkammern angeschnitten werden. Die grossräumige vertikale Durchlässigkeit der gesamten Schichtabfolge des 'Braunen Doggers' wird durch eine erhöhte Durchlässigkeit der Sandkalkabfolgen kaum beeinflusst. Referenzwerte für tonreiche Abfolgen innerhalb des 'Braunen Doggers' (im Referenzfall auch die Sandkalkabfolgen): $K_h = 5 \times 10^{-13}$ m/s, $K_v = 10^{-13}$ m/s, konzeptualisiert als homogen-poröses Medium. Die Lithologie der bis 30 m mächtigen Württembergica-Parkinsoni-Schichten ist dem Opalinuston so ähnlich, dass eine vergleichbare hydraulische Durchlässigkeit erwartet wird. Im Referenzfall werden die Sandkalkabfolgen als hydraulisch geringdurchlässig betrachtet. Die Werte entsprechen den Referenzwerten des Opalinustons bei einer Überdeckung von weniger als 400 m (siehe oben). Obere Eckwerte der tonreichen Abfolgen: $K_h = 5 \times 10^{-12}$ m/s, $K_v = 10^{-12}$ m/s. Diese Werte entsprechen dem "What if?"-Fall des Opalinustons (siehe oben). Eine noch weiter gehende lokale Erhöhung wird mit einem "What if?"-Fall einer Störung mit erhöhter Transmissivität abgedeckt (vgl. PG-14). Für den alternativen Fall, dass die horizontalen Sandkalkabfolgen höher durchlässig sind, werden für die Modellrechnungen folgende Durchlässigkeiten verwendet: 2 bis 5 m mächtige Sandkalkabfolgen mit $K_h = 10^{-10}$ m/s, konzeptualisiert als geklüftetes Medium mit planaren Elementen mit einem Kluftabstand von 1 m, d.h. die Klüfte besitzen eine (horizontale, über grössere Distanz wirksame) Transmissivität von $T = 10^{-10}$ m^2/s. Dieser Wert deckt die Ergebnisse aller Tests im 'Braunen Dogger' ab und entspricht dem Maximalwert des Tests mit der höchsten Durchlässigkeit in den Dogger-β Sandsteinen der Bohrung Herdern-1 (Tab. A3-1)[30]. Noch höhere Transmissivitäten werden abdeckend mit einem "What if?"-Fall berücksichtigt, indem die Radionuklidrückhaltung in den Sandkalkabfolgen vernachlässigt wird.

[29] Unter diesem Begriff werden alle potenziell wasserführenden horizontalen sedimentären Architekturelemente (Sandkalke, Kalke, Spatkalke, Eisenoolithe) zusammengefasst.

[30] Bei der grossräumigen horizontalen Durchlässigkeit der Sandkalkabfolgen ist zudem zu beachten, dass infolge tektonischer Überprägung zwar die Klüftung und damit die (lokale) Durchlässigkeit zunimmt, andererseits aber durch Versätze die Kontinuität solcher Fliesspfade unterbrochen wird. Dies ist insbesondere für das Standortgebiet Nördlich Lägeren zu beachten.

Tab. 4.3-2: (Fortsetzung)

Effinger Schichten
Für die Bewertung der Wirtgesteine in Etappe 1 verwendete Werte
$K_h \leq 10^{-11}$ m/s Basierend auf Tests in den EWS-Bohrungen Oftringen und Küttigen sowie in den Sondierbohrungen Benken und Weiach. Es ist durchaus möglich, dass Kalkbankabfolgen lokal erhöhte Werte haben $K_v \leq 10^{-12}$ m/s (Annahme wegen ausgeprägter Anisotropie) Es wurde von höheren Werten als im Opalinuston ausgegangen, weil die Effinger Schichten einen geringeren Tonmineralgehalt haben (trotz Hinweisen zur Durchlässigkeit aus der Geochemie der Porenwässer, die mit der des Opalinustons vergleichbar ist).
Für die Testrechnungen vorgeschlagene Referenzwerte und ungünstige Eckwerte
Wie bereits in SGT Etappe 1 festgehalten, werden die Lagerkammern falls möglich in den Kalkmergeln, d.h. ausserhalb der Kalkbankabfolgen angeordnet; dazu wurde als verschärfte Anforderung eine Mächtigkeit von mindestens 200 m verwendet. Falls der Abstand der Kalkbankabfolgen dies nicht zulässt, werden die Lagerkammern so angeordnet, dass sie nur weniger kalkig ausgebildete Abfolgen schneiden. Für die Testrechnungen wird zur Berücksichtigung der Lithologie eine differenziertere Betrachtung der Durchlässigkeitswerte als in Etappe 1 vorgenommen. Im Referenzfall werden entsprechend den Erfahrungen im relevanten Tiefenbereich die meisten Kalkbankabfolgen als hydraulisch geringdurchlässig betrachtet. Weil eine erhebliche Wahrscheinlichkeit besteht, dass die Durchlässigkeit von sehr kalkig ausgebildeten Abfolgen erhöht sein kann, insbesondere diejenige der Gerstenhübel-Schichten, wird bereits im Referenzfall von einer (reduzierten) maximalen Transportlänge von 50 m in einem geringdurchlässigen Abschnitt der Effinger Schichten ausgegangen. Referenzwert der Kalkmergelabfolgen, resp. der gesamten Effinger Schichten $K_h = 10^{-11}$ m/s, $K_v = 10^{-12}$ m/s, konzeptualisiert als homogen-poröses Medium. Weil die Wechsellagerung in den Effinger Schichten viel ausgeprägter ist als im Opalinuston, wird für die Effinger Schichten ein grösserer Anisotropiekoeffizient (10 statt 5) angenommen, Der Referenzwert K_h deckt die Ergebnisse von 18 Tests in den Bohrungen Oftringen, Küttigen und Gösgen ab (inkl. Maximalwert eines Tests in einer klüftigen Kalkbank in der Bohrung Oftringen), mit Ausnahme eines Tests in den Gerstenhübel-Schichten der Bohrung Küttigen, in welchem auch ein kleine Störungszone in nur 165 m Tiefe getestet wurde (vgl. Tab. A3-1). Obere Eckwerte $K_h = 10^{-10}$ m/s, $K_v = 10^{-11}$ m/s, konzeptualisiert als geklüftetes Medium mit planaren Elementen, Kluftabstand 1 m mit einer Klufttransmissivität $T_h = 10^{-10}$ m^2/s, $T_v = 10^{-11}$ m^2/s. Diese Werte und das alternative Konzept mit Klüftung beruht auf rein lithologischen Überlegungen und ist deutlich ungünstiger als die bisherigen Messwerte aus dem relevanten Tiefenbereich (ausgenommen Gerstenhübel-Schichten). Für den alternativen Fall, dass die horizontalen Kalkbankabfolgen höher durchlässig sind, werden für die Modellrechnungen folgende Annahmen getroffen: 5 m mächtige Kalkbankabfolgen mit $K_h = 10^{-9}$ m/s, konzeptualisiert als geklüftetes Medium mit planaren Elementen mit einem Kluftabstand von 1 m, d.h. die Klüfte besitzen eine Transmissivität von $T = 10^{-9}$ m^2/s. Dieser Wert übersteigt die in Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten im relevanten Tiefenbereich gemessenen Werte (die in der EWS-Bohrung Küttigen gemessene Transmissivität von $T \approx 10^{-8}$ m^2/s stammt von einer Störungszone in den Gerstenhübel-Schichten in nur 165 m Tiefe). Noch höhere Transmissivitäten werden abdeckend mit einem "What if?"-Fall berücksichtigt, indem die Radionuklidrückhaltung in den Kalkbankabfolgen vernachlässigt wird.[31]

[31] Die grossräumige vertikale Durchlässigkeit der gesamten Schichtabfolge der Effinger Schichten wird durch eine erhöhte Durchlässigkeit der Kalkbankabfolgen kaum beeinflusst.

Tab. 4.3-2: (Fortsetzung)

Mergel-Formationen des Helvetikums
Für die Bewertung der Wirtgesteine in Etappe 1 verwendete Werte
$K_h = K_v \leq 10^{-11}$ m/s Referenzwert Sicherheitsanalyse Wellenberg für ein Lager auf Kote Talebene (Nagra 1994).
Für die Testrechnungen vorgeschlagene Referenzwerte und ungünstige Eckwerte
Für die Testrechnungen wird eine differenziertere Betrachtung der hydraulischen Durchlässigkeit als in Etappe 1 gemacht, in dem ein oberer, etwas höher durchlässiger Bereich etwa auf Kote Talebene, der noch von Dekompaktionseffekten beeinflusst ist, und ein tieferer geringer durchlässiger Bereich verwendet wird (Aufteilung des Lagers auf 2 Ebenen). Referenzwert oberer Bereich $K_h = K_v = 10^{-11}$ m/s, konzeptualisiert als kleinräumige transmissive Elemente (Klüfte), Frequenz 1 / m, mit $T = 10^{-11}$ m^2/s (Referenzwert Sicherheitsanalyse Wellenberg, Nagra 1994). Referenzwert unterer Bereich $K_h = K_v = 3 \times 10^{-13}$ m/s, ebenfalls konzeptualisiert als kleinräumige planare transmissive Elemente (Scherzonen, Klüfte), Frequenz 1 / m, mit $T = 3 \times 10^{-13}$ m^2/s (entspricht den Werten des Blockmodells im Tiefenbereich unterhalb der Sohle des Engelbergertals, vgl. Nagra 1997). Alternative Konzeptualisierung (bei gleichen grossräumigen K-Werten): Frequenz der kleinräumigen planaren transmissiven Elemente (Scherzonen) 1 / 10 m, aber mit 10-fach höherer Transmissivität als im Referenzfall. Obere Eckwerte der hydraulischen Durchlässigkeit: $K_h = K_v = 3 \times 10^{-11}$ m/s für den oberen Bereich (um Faktor 3 erhöhter Referenzwert, in welchem die beschränkte Vernetzung der transmissiven Elemente berücksichtigt ist), $K_h = K_v = 10^{-12}$ m/s für den unteren Bereich (entspricht dem oberen Bereich der Bandbreite der K-Werte ('best estimates') der hydraulischen Tests in Bohrtiefen > 600 m, vgl. (Figur 7.4-3 in Nagra 1997). Die Transmissivitäten der kleinräumigen planaren transmissiven Elemente sind entsprechend erhöht. Noch höhere Durchlässigkeiten werden in Zusammenhang mit Störungszonen berücksichtigt (siehe PG-9/ PG-14).

PG-7 / Einfluss Dekompaktion auf hydraulische Durchlässigkeit

Die Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit aufgrund von Dekompaktionseffekten (Entlastung von überkonsolidierten Gesteinen in Oberflächennähe) ist durch zahlreiche Bohrungen belegt, hängt von verschiedenen Faktoren ab und ist in den verschiedenen Wirtgesteinen unterschiedlich ausgebildet (Nagra 2008c). Die Beobachtungen sind auch konsistent mit unabhängigen hydrochemischen Evidenzen. Am geringsten wirken sich Entlastungseffekte im Opalinuston aus (signifikant bis in Tiefen von einigen Dekametern, geringfügig bis max. 200 m), am stärksten in den Mergel-Formationen des Helvetikums (je nach Topographie bzw. Erosionsgeschichte bis 600 m [32]).

In den Effinger Schichten wurden bisher hydraulische Entlastungseffekte bis in Tiefen von 200 m nachgewiesen, auch ausserhalb von Kalkbankabfolgen. Weil die Untergrenze mit Ungewissheiten behaftet ist, wurden für die Abgrenzung der Standortgebiete in SGT Etappe 1 verschärfte Anforderungen (Obergrenze Wirtgestein > 300 m) angewendet. Dass diese Massnahme gerechtfertigt ist, zeigen neue Erfahrungen in Erdwärmesondenbohrungen, in welchen auch Wasserzutritte in einer kalkigen Lage mit Calcitadern bis 244 m Tiefe beobachtet wurden

[32] Im seinem Gutachten stellt das ENSI fest, dass die Dekompaktionszone im Falle der Mergel-Formationen des Helvetikums bis in eine Tiefe von rund 530 m u.T. reicht (ENSI 2010b); das ENSI verlangt deshalb eine Überdeckung von mindestens 500 m u.T. (in SGT Etappe 1 wurde eine verschärfte Anforderung von 400 m u.T. verwendet).

(Eberhard & Partner AG 2010). Die Zutritte unterhalb 200 m liegen im Bereich von Kalkbankabfolgen oder im Übergangsbereich Geissberg-Schichten – Effinger Schichten. In geringeren Tiefen gab es vereinzelt auch Zutritte in Kalkmergelabfolgen[33], wahrscheinlich entlang kleinerer Störungszonen. Es können jedoch auch im Bereich der Dekompaktionszone grössere geringdurchlässige Blöcke mit salinen Porenwässern vorkommen, d.h. ab einer gewissen Tiefe sind nur noch bereits existierende Störungs- oder Kluftzonen von der Dekompaktion betroffen.

Für den 'Braunen Dogger' fehlen direkte Beobachtungen bezüglich Dekompaktionseffekte. Aufgrund der lithologischen Ähnlichkeit (Einschaltungen von kalkigen sedimentären Architekturelementen) wurden und werden weiterhin analoge verschärfte Anforderungen wie für die Effinger Schichten verwendet, was tendenziell als eher pessimistisch bewertet wird, weil der 'Braune Dogger' insgesamt toniger ist als die Effinger Schichten.

Die vorhandenen Durchlässigkeits-/Tiefenprofile werden für die Beurteilung der erwarteten Dekompaktionseffekte als genügend beurteilt, um für die Testrechnungen die Bedeutung der Dekompaktion zu analysieren.

PG-9 / Art der Transportpfade

Zur Ausbildung potenzieller Transportpfade im Opalinuston (in diesem Fall wird ein Transport in einer Störung nur als "What if?"-Fall betrachtet) und in den Mergel-Formationen des Helvetikums liegen detaillierte Beschreibungen und daraus abgeleitete konzeptuelle Modelle vor (Nagra 2002a, Nagra 1997). Für die Effinger Schichten und den 'Braunen Dogger' werden für die Testrechnungen konzeptuelle Modelle verwendet, welche auf vorläufigen Feldbeobachtungen basieren. Diese gehen davon aus, dass die Effinger Schichten und der 'Braune Dogger' im Referenzfall als homogen-poröses Medium konzeptualisiert werden können. Zusätzlich werden alternative resp. "What if?"-Fälle mit Klüften bzw. mit transmissiven Störungen betrachtet, welche auch die tonreicheren Abfolgen durchschlagen. Die kalkig-sandigen sedimentären Architekturelemente sind als geklüftete Medien konzeptualisiert.

Die vorhandenen Unterlagen werden als geeignete Grundlage beurteilt für die Testrechnungen. Für die Effinger Schichten und den 'Braunen Dogger' werden für SGT Etappe 2 im Rahmen von Studien an Aufschlüssen und Vergleichen mit Bohrkernen die konzeptuellen Modelle verfeinert (vgl. Kap. 8.3); diese werden in den provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 verwendet.

PG-10 / Porosität

Von allen Wirtgesteinen liegen umfangreiche Porositätsmessungen vor, wobei die Daten aus älteren Tiefbohrungen der Nordschweiz mit etwas grösseren Ungewissheiten behaftet sind, als diejenigen seit dem Jahr 2000; diese Ungewissheiten werden in den Testrechnungen durch grössere Bandbreiten berücksichtigt. Eine vollständige Kompilation der Porositätsmessungen in den verschiedenen Wirtgesteinen wird demnächst in einem Arbeitsbericht (Mazurek 2010) dokumentiert. In den letzten Jahren wurde auch ein vertieftes Verständnis hinsichtlich diffusionszugänglicher Porosität bzw. Fliessporosität für verschiedene gelöste Stoffe entwickelt (vgl. Diskussion in Kap. 6.2.2).

[33] Weil Erdwärmesondenbohrungen in der Regel destruktiv gebohrt werden (Aufnahme von Cuttings-Proben), sind Angaben zum internen Aufbau der Effinger Schichten mit grösseren Ungewissheiten behaftet (Nachfall, Aufstiegszeit Luft/Wasser etc.).

Die vorhandenen Unterlagen werden als genügend beurteilt, um den Geosphärentransport in den Testrechnungen zu konzeptualisieren und zu parametrisieren. Für Etappe 2 werden ergänzende Porositätsmessungen an Bohrkernen des 'Braunen Doggers' durchgeführt (Kap. 8.3), welche in die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 einfliessen.

PG-14 / Transmissivität Störungszonen

Maximale Transmissivitäten von Störungszonen ergeben sich, wenn der Transmissivitätswert eines hydraulischen Tests vollumfänglich einem einzigen transmissiven Element (Störungszone, Kluft) innerhalb des Testintervalls zugeordnet wird. Dies ist gerechtfertigt, wenn im betreffenden Testintervall beispielsweise aufgrund von Kernbeobachtungen oder eines Fluid-Loggings nur ein einziges potenziell transmissives Element in Frage kommt. Andernfalls führt die Zuordnung nur zu einem einzigen Element zu einer Überschätzung der Transmissivität, welche im Extremfall, insbesondere bei längeren Testintervallen, mehr als eine Grössenordnung betragen kann.

Weiter ist zu beachten, dass die Reichweite eines hydraulischen Tests bei einer Testdauer von wenigen Tagen bei Transmissivitäten im Bereich von 10^{-8} m^2/s maximal einige Dekameter, bei 10^{-9} m^2/s maximal einige m und bei 10^{-10} m^2/s weniger als 1 m beträgt (K homogen, radiale Fliessgeometrie; De Marsily 1986). Falls die getesteten transmissiven Elemente ausserhalb der Testreichweite nicht vollständig mit Elementen gleicher oder höherer Transmissivität vernetzt sind, man aber trotzdem dem gesamten Transportpfad die gemessene Transmissivität zuordnet, werden die effektiven Transmissivitäten tendenziell überschätzt.

Für den Opalinuston und die Mergel-Formationen des Helvetikums gibt es relativ viele Testergebnisse aus Bereichen mit Störungszonen. Im 'Braunen Dogger' wurden in den Tiefbohrungen bisher keine Störungszonen erbohrt, aufgrund der lithologischen Ähnlichkeit der tonreichen Abfolgen mit dem Opalinuston sind die Opalinuston-Ergebnisse aber auf die entsprechenden Bereiche im 'Braunen Dogger' übertragbar. Für beide Wirtgesteine wird als "What if?"-Fall eine vertikale Störungszone mit einer erhöhten Transmissivität verwendet. In den Effinger Schichten wurden bisher nur kleine Störungen erbohrt und getestet. Wegen des verglichen mit dem Opalinuston geringeren Tonmineralgehalts bzw. geringeren Selbstabdichtungsvermögens werden in den Testrechnungen für vertikale Störungen in den Effinger Schichten, denen bei der Platzierung der Lagerkammern nicht ausgewichen werden kann, signifikant höhere Transmissivitätswerte als für den Opalinuston angenommen (vgl. Tab. 4.3-3).

Die vorhandenen Unterlagen werden als genügend beurteilt, um in den Testrechnungen den Einfluss von Störungszonen auf die Sicherheit zu analysieren. Für SGT Etappe 2 werden die Transmissivitätswerte von Störungen in den verschiedenen Wirtgesteinen konsolidiert.

Tab. 4.3-3: Transmissivitäten von Störungszonen (inkl. Kluftzonen) in den verschiedenen Wirtgesteinen.

Referenzwerte Etappe 1 und erweiterte Bandbreiten für die Testrechnungen (Kap. 6). Eine standortspezifische Zusammenstellung der Werte findet sich in Tab. A3-2.

Opalinuston
Für die Bewertung der Wirtgesteine in Etappe 1 verwendete Werte
$T \leq 10^{-12}$ m^2/s Realistischer Schätzwert aufgrund der Hydrotests in Tiefbohrungen.
Für die Testrechnungen vorgeschlagene Referenzwerte und ungünstige Eckwerte
Aufgrund der zahlreichen Evidenzen (Nagra 2002a) werden für den Referenzfall Störungszonen als hydraulisch nicht wirksam betrachtet. Als "What if?"-Fall wird für eine steile Störungszone eine Transmissivität von $T = 10^{-10}$ m^2/s verwendet, konzeptualisiert als planares Element (Störungen mit solchen Transmissivitäten würden in ventilierten Untertagebauten anhand von Feuchtstellen erkennbar sein, vgl. Titelbild Cabrera et al. 2001). Höhere Transmissivitäten von Störungen in Tongesteinen mit einem Tonmineralgehalt von mehr als 40 % sind nicht zu erwarten (vgl. Bock et al. 2010). Fast alle Transmissivitätswerte der hydraulischen Tests im Felslabor Mont Terri liegen im Bereich $T \leq 10^{-12}$ m^2/s; der höchste lokal gemessene T-Wert beträgt 10^{-11} m^2/s (Enachescu et al. 2010a). Grösserräumige effektive Werte, welche für den gesamten Transportpfad repräsentativ sind, werden aufgrund fehlender Vernetzung einzelner Strukturelemente als bedeutend kleiner geschätzt. Testintervalle mit erhöhter Frequenz von Scherzonen/Störungen zeigen keine erhöhte Transmissivitäten (Kap. 8 in Bossart & Thury 2008). In den Tiefbohrungen der Nordschweiz wurden insgesamt 4 Störungszonen getestet: Bohrung Schafisheim: Kleine Scherzone mit Calcitader bei 1056 m, Störungszone bei 1078 m (vgl. Fig. 4.3-in Nagra 2008c); Bohrung Riniken: Störungszone bei 429 m (vgl. Fig. 3 in Gautschi 2001); Bohrung Benken: Kleine Störungszone bei 602 m (vgl. Figur 5.5-1 in Nagra 2002a). Verglichen mit Tests ohne Störungen sind keine signifikanten Unterschiede in den Transmissivitäten gemessen worden (max. Faktor 3 höher im Fall Schafisheim, vgl. Klemenz et al. 2000). Die höchste Transmissivität wurde im betreffenden Test in der Bohrung Schafisheim gemessen ($T = 10^{-11}$ m^2/s, Testintervall 28 m, daraus abgeleiteter K-Wert: 4×10^{-13} m/s). Wenn man annimmt, dass das Testergebnis allein durch die Störung bestimmt wird, d.h. dass das umgebende Gestein absolut undurchlässig wäre, wäre die Transmissivität der Störung immer noch eine Grössenordnung kleiner als der "What if?"-Fall. Für den "What if?"-Fall wird angenommen (siehe Tab. A3-2), dass. im SMA-Lager jede Lagerkaverne und im HAA-Lager je ein Behälter pro Lagerstollen bzw. jede LMA-Lagerkammer von einer solchen Störung betroffen sind[34].

[34] Grundsätzlich ist zu beachten, dass allfällig vorhandenen wasserführenden Störungszonen mit den SMA-Lagerkavernen und den LMA-Lagertunnels ausgewichen würde, und dass in den BE/HAA-Lagerstollen im Bereich von wasserführenden Störungszonen keine Behälter eingelagert würden. In diesem Sinne stellt der hier postulierte "What if?"-Fall z.B. eine Störungszone dar, die nach dem Verschluss des Lagers reaktiviert wurde und für die eine erhöhte Wasserführung angenommen wird.

Tab. 4.3-3: (Fortsetzung)

'Brauner Dogger'
Für die Bewertung der Wirtgesteine in Etappe 1 verwendete Werte
$T \leq 10^{-10}$ m^2/s Keine Störungen getestet, Annahme aus lithologischen Überlegungen: Faktor 100 grösser als Opalinuston (steile Störung, Transport nach oben).
Für die Testrechnungen vorgeschlagene Referenzwerte und ungünstige Eckwerte
Die Einschätzung aus Etappe 1 wird aus heutiger Sicht als zu vorsichtig beurteilt. Weil im 'Braunen Dogger' mächtigere Abfolgen von Tongesteinen mit sehr ähnlicher Lithologie wie der Opalinuston vorkommen, werden steile Störungszonen für den Referenzfall wie beim Opalinuston als hydraulisch nicht wirksam betrachtet. Der alternative Fall, wo die Sandkalkabfolgen geklüftet oder von einer Störung geschnitten werden und einen kontinuierlichen horizontalen Transportpfad bilden, wird durch eine Erhöhung der grossräumigen horizontalen hydraulischen Durchlässigkeit dieser sedimentären Architekturelemente berücksichtigt (vgl. Tab. 4.3-2). Analog zum Opalinuston wird auch für den 'Braunen Dogger' ein "What if?"-Fall einer steilen Störungszone mit einer Transmissivität von $T = 10^{-10}$ m^2/s angenommen, konzeptualisiert als planares Element (Frequenz analog Opalinuston).

Tab. 4.3-3: (Fortsetzung)

Effinger Schichten
Für die Bewertung der Wirtgesteine in Etappe 1 verwendete Werte
$T \leq 10^{-10}$ m^2/s Höchster Wert einer offenen Scherzone in einer Kalkbank in der Bohrung Oftringen. In vertikaler Richtung wird die Transmissivität von Störungen vermutlich sehr gering sein, da sie über weite Strecken in Kalkmergeln verlaufen. In Kalkbankabfolgen können die Werte erhöht sein. Es wurde von höheren Werten als im Opalinuston ausgegangen, weil die Effinger Schichten einen geringeren Tonmineralgehalt haben (trotz Hinweisen zur Durchlässigkeit aus der Geochemie der Porenwässer, die mit der des Opalinustons vergleichbar ist).
Für die Testrechnungen vorgeschlagene Referenzwerte und ungünstige Eckwerte
Wie bereits in Etappe 1 festgehalten, werden die Lagerkavernen in den Kalkmergeln platziert. Falls der Abstand der Kalkbankabfolgen dies nicht zulässt, werden die Lagerkavernen so angeordnet, dass sie nur weniger kalkig ausgebildete Abfolgen schneiden Im Referenzfall wird aufgrund der Beobachtungen in der EWS-Bohrung Oftringen angenommen, dass Störungszonen in den Kalkmergeln im relevanten Tiefenbereich hydraulisch nicht wirksam sind. Als alternativer Fall wird angenommen, dass die Lagerkavernen von mehreren kleinen Störungszonen geschnitten werden (konzeptualisiert als planare Elemente), die seismisch nicht erkennbar sind und denen man nicht ausweichen kann (Frequenz 3 / 100 m gemäss Beobachtungen im Steinbruch Jakobsberg, Auenstein). Neue Untersuchungen zeigen, dass ungestörte und gestörte Gesteine mit Tonmineralgehalten von mehr als 25 % K-Werte $\leq 10^{-9}$ m/s (resp. k $\leq 10^{-16}$ m^2) zeigen (Bock et al. 2010 und dort zitierte Arbeiten). Die Kalkmergelabfolgen der Effinger Schichten haben durchschnittliche Tonmineralgehalte von rund 30 % (Mazurek 2010), d.h. dass die Annahme eines maximalen K-Werts von 10^{-9} m/s eher vorsichtig ist. Bei einer Mächtigkeit von gestörtem Gesteinsmaterial von einem Meter mit K $\leq 10^{-9}$ m/s in sehr geringdurchlässigem ungestörtem Gestein ergibt sich eine maximale Transmissivität der Störung von 10^{-9} m^2/s, bei 10 cm eine solche von 10^{-10} m^2/s. Berücksichtigt man, dass in den Effinger Schichten lokal Calcitader-Systeme vorkommen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Transmissivität einzelner Störungen zum Teil höher sein könnte. Aus diesem Grund werden in der provisorischen Sicherheitsanalyse noch höhere Transmissivitäten berücksichtig, wobei der Wert von T = 10^{-8} m^2/s (Annahme: Frequenz 1 / 300 m) als "What if?"-Fall eingestuft wird. Der Radionuklidtransport in den Kalkbankabfolgen wird als Erhöhung der grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit dieser sedimentären Architekturelemente berücksichtigt, konzeptualisiert als geklüftetes Medium (vgl. Tab. 4.3-2).

Tab. 4.3-3: (Fortsetzung)

Mergel-Formationen des Helvetikums
Für die Bewertung der Wirtgesteine in Etappe 1 verwendete Werte
$T \leq 10^{-9}$ m^2/s Referenzwert Sicherheitsanalyse Wellenberg (Nagra 1994)
Für die Testrechnungen vorgeschlagene Referenzwerte und ungünstige Eckwerte
Die Transmissivitäten der hydraulischen Tests in den Tiefbohrungen am Wellenberg haben unterhalb der Dekompaktionszone mit wenigen Ausnahmen Transmissivitäten $\leq 10^{-10}$ m^2/s geliefert, die wenigen Tests mit höheren Werten stammen aus dem untersten Bereich der Bohrung SB2 und haben relativ grosse Ungewissheiten sowie aus einem Test in der Bohrung SB1 mit einem sehr grossen Testintervall von 100 m, in welchem möglicherweise mehrere Störungszonen zusammen erfasst wurden. Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass die transmissiven Elemente im Wirtgestein unterhalb der Dekompaktionszone nur unvollständig vernetzt sind, d.h. dass die effektiven Transmissivitäten der wasserführenden Systeme wahrscheinlich bedeutend geringer sind als in einzelnen Tests. Eine unabhängige Evidenz dafür sind, neben hydrochemischen Aspekten, die gemessenen Porenwasserunterdrücke (Nagra 1997). In den Testrechnungen wird unter Berücksichtigung der oben erläuterten Datenlage der alternative Fall untersucht, dass neben den kleinräumigen Scherzonen und Klüften (vgl. Tab. 4.3-2) pro Kaverne eine grössere Störungszone mit erhöhter Transmissivität vorkommt (Frequenz 1 / 300 m), konzeptualisiert als planares Element. Für den oberen Bereich wird – unter Berücksichtigung einer unvollständigen Vernetzung – eine Transmissivität von $T = 10^{-9}$ m^2/s, für den unteren Bereich von $T = 10^{-10}$ m^2/s angenommen. Für Fälle, in welchen ein Teil des Transportpfads in Kalkbankabfolgen mit schlechteren Radionuklidrückhaltungseigenschaften erfolgt, wird in der Sicherheitsanalyse für diesen Teil des Fliesspfads der Sorptionsdatensatz 'Calcit' verwendet. Als "What if?"-Fall werden auch noch 10-fach höhere Transmissivitäten betrachtet ($T = 10^{-8}$ m^2/s für den oberen Bereich und $T = 10^{-9}$ m^2/s für den unteren Bereich).

PG-15 / Mineralogie

Von allen Wirtgesteinen liegen umfangreiche mineralogische Analysen vor, einschliesslich tonmineralogischer Detailanalysen. Eine vollständige Kompilation dieser Daten wird demnächst in einem Arbeitsbericht (Mazurek 2010) dokumentiert.

Die vorhandenen Unterlagen sind geeignet, um damit für die Testrechnungen die Sorptionswerte abzuleiten. Für SGT Etappe 2 werden noch ergänzende Analysen an Bohrkernen des 'Braunen Doggers' durchgeführt (Kap. 8.3). Diese werden in die konsolidierte Datenbasis für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 einfliessen.

PG-16, PG-17, PG-18 / pH, Redox-Bedingungen, Salinität

Die geochemischen Referenzbedingungen (Hauptelemente bzw. Salinität, pH, Redox-Bedingungen) in den vier Wirtgesteinen wurden nach der Einreichung der Unterlagen für Etappe 1 aufgrund neuester Erkenntnisse in der geochemischen Modellierung re-evaluiert (Opalinuston, Mergel-Formationen des Helvetikums) bzw. neu definiert (Effinger Schichten, 'Brauner Dogger') (Mäder 2009a, b; Mäder 2010). Die meisten Parameter werden durch das Gestein selbst gepuffert, ausgenommen die Salinität. Wegen der unterschiedlichen Tiefenlage der Wirtgesteine innerhalb der Standortgebiete und wegen regionaler Variationen musste eine relativ

grosse Bandbreite der Salinität berücksichtigt werden. Weil die Maximalwerte auch im ungünstigsten Fall die 2-fache Meerwassersalinität nicht übersteigen, ist der Einfluss dieses Parameters auf die Radionuklidsorption und -löslichkeit relativ gering.

Durch die neuen Modellrechnungen konnten die Ungewissheiten der Referenzbedingungen im Opalinuston und in den Mergeln des Helvetikums reduziert werden. Eine weitere Einengung der Bandbreiten ist nicht erforderlich, weil die Auswirkungen auf die Sorptionseigenschaften (obere/untere Eckwerte) gering sind.

Die vorhandene Information zu den geochemischen In-situ-Bedingungen ist genügend für die Ableitung der Parameter für die Testrechnungen.

PG-19 / Mikrobielle Prozesse

Die Nagra ist seit 2003 am "Microbial activity"-Experiment (MA) im Felslabor Mont Terri beteiligt. Dabei wurde der ungestörte Opalinuston auf Mikroorganismen untersucht (Stroes-Gascoyne et al. 2007) und bei Experimenten auftretende Mikroorganismen wurden charakterisiert (Stroes-Gascoyne et al. 2010). In Tiefbohrungen lassen sich ungestörte mikrobielle Verhältnisse wegen zahlreicher Kontaminationsquellen praktisch nicht untersuchen.

Eine allgemeine sicherheitstechnische Beurteilung der mikrobiellen Prozesse in einem Tiefenlager erfolgt im Rahmen der Systemanalyse in Kap. 6.

PG-20 / Kolloidfiltration

Aufgrund der geringen Porengrössen der tonigen Gesteine ist die Filtration von Kolloiden sehr effizient (vgl. Voegelin & Kretschmar 2002). Angaben zur Porengrössenverteilung liegen aus allen Wirtgesteinen vor, resp. werden im Rahmen von Bohrkernuntersuchungen in Etappe 2 noch ergänzt (Kap. 8.3). Für die Wirtgesteine, welche geklüftete sedimentäre Architekturelemente enthalten, in welchen die Kolloidfiltration möglicherweise geringer ist, werden in der Sicherheitsanalyse entsprechende alternative Fälle untersucht. Aus Tiefbohrungen können keine Angaben zur Kolloidfiltration in Klüften gewonnen werden.

Mit den vorhandenen Informationen kann die Bedeutung der Kolloide mit den Testrechnungen analysiert werden.

PG-22 / Diffusionskoeffizienten für WG/EG

Die Diffusionsprozesse im Opalinuston wurden für den Entsorgungsnachweis gut untersucht (Van Loon & Soler 2003), die Untersuchungen wurden in weiteren Labor- und Feldversuchen (Mont Terri) fortgeführt und die Resultate bestätigt (Wersin et al. 2010). Für andere Wirtgesteine wird ein empirischer Zusammenhang (eine Weiterentwicklung des Archie-Gesetzes, van Loon et al. 2003) genutzt, der die Abhängigkeit des effektiven Diffusionskoeffizienten von der zugänglichen Porosität beschreibt. Auch in anderen nationalen Programmen untersuchte tonige Wirtgesteine folgen diesem Gesetz (Mazurek et al. 2009). Die Anisotropie der Mikrostruktur der Wirtgesteine äussert sich in unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten senkrecht und parallel zur Schichtung. Erstere – mit kleineren Werten – werden bei der Modellierung der Radionuklidfreisetzung im homogen-porösen Medium verwendet, letztere beim Transport in Klüften und Störungen zur Quantifizierung der Matrixdiffusion. Eine mögliche lokale Erhöhung der Diffusionskoeffizienten in tektonisierten Zonen ist mit den gewählten oberen Eckwerten abgedeckt.

Die Porositäten der Wirtgesteine einschliesslich Ungewissheiten konnten aus vorhandenen Daten gewonnen werden (Nagra 1997, Nagra 2002a, Nagra 2010a). Die vorhandenen Informationen sind geeignet, um für die Testrechnungen die Diffusion zu quantifizieren. Die resultierenden Referenzwerte sowie untere und obere Eckwerte sind in Nagra (2010a) erläutert. Für SGT Etappe 2 werden Messungen zur Überprüfung der Diffusionskonstanten durchgeführt (vgl. Kap. 8.3). Diese Informationen werden in die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 einfliessen.

PG-12 / Lage und Beschaffenheit von verkarstungsfähigen Gesteinen innerhalb des Wirtgesteins

Im Rahmen der Arbeiten zu SGT Etappe 1 wurde die Frage der Verkarstungsfähigkeit einzelner sedimentärer Architekturelemente in den Wirtgesteinen bewertet. Im Opalinuston sind keine verkarstungsfähigen Architekturelemente vorhanden, in den Mergel-Formationen des Helvetikums sind zwar Kalkbankabfolgen vorhanden, diese sind jedoch so stark zerschert und boudiniert, dass sich mangels Kontinuität der Fliesswege keine Karstsysteme entwickeln können. Auch aus den zahlreichen Untertagebauten und Bohrungen wurden in den Mergel-Formationen nirgends Verkarstungsphänomene beobachtet.

Die Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten sind grundsätzlich verkarstungsfähig, und es gibt diesbezüglich eindeutige Hinweise aus dem Faltenjura (Fig. 4.2-3 und Kap. 4.3.3.2 in Nagra 2008c). In Gebieten mit flacher Lagerung wurden im relevanten Tiefenbereich noch nie Verkarstungsphänomene (weder Paläo- noch rezenter Karst) innerhalb der Effinger Schichten beobachtet, trotz sorgfältiger Bohrkerninspektion (Nagra 2008c), und auch die hydrochemischen Daten geben keine Hinweise in diese Richtung. Trotzdem kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass im Standortgebiet Jura-Südfuss in Bereichen mit erhöhten hydraulischen Gradienten (z.B. Umfeld des Engelbergs (Born-Engelberg-Antiklinale) oder im Umfeld der Südflanke des Faltenjuras) eine Verkarstung der Kalkbankabfolgen erfolgt sein oder zukünftig erfolgen könnte. Aus diesem Grund wird in den Testrechnungen eine Verkarstung von Kalkbankabfolgen im Sinne eines "What if?"-Falls berücksichtigt.

Aus dem 'Braunen Dogger' liegen keine Hinweise auf Verkarstungen vor (lokale Phänomene an der Geländeoberfläche ausgenommen). Da die Sandkalkabfolgen sand- und tonreicher sind als die Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten, wird für den 'Braunen Dogger' kein "What if?"-Fall mit Verkarstung angenommen.

Die vorhandenen Informationen erlauben es, die Bedeutung von verkarstungsfähigen Gesteinen für die Langzeitsicherheit zu analysieren.

PB-7 / Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein

Von den Wirtgesteinen Opalinuston und Mergel-Formationen des Helvetikums liegen umfangreiche, für die Effinger Schichten ausreichende Datensätze vor betreffend Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften (Druck- und Zugfestigkeit, E-Modul, Poissonzahl, Reibungswinkel, Quelldruck und -hebung etc.; Opalinuston: Nagra 2002a, Effinger Schichten: Jahns 2008, Mergel-Formationen des Helvetikums: Nagra 1997). Die Datenlage wird – insbesondere unter der Annahme, dass ein geeigneter Tunnelausbau verwendet werden kann – als genügend betrachtet für die in diesem Bericht vorzunehmende Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit (Beurteilung der Standsicherheit der Lagerkammern, Kap. 5.2).

Vom 'Braunen Dogger' fehlen entsprechende Datensätze. Aufgrund der lithologischen Ähnlichkeit mit dem Opalinuston und der vergleichbaren Versenkungsgeschichte lassen sich für die tonigsten Abfolgen im 'Braunen Dogger' vergleichbare Parameter ableiten; wegen der tendenziell karbonat- und sandreicheren Fazies ist lokal mit leicht höheren Gesteinsfestigkeiten zu rechnen. Für die kalkig-sandigen Abfolgen können die felsmechanischen Parameter abgeschätzt werden. Es wird mit einer grösseren Variabilität der Parameter als im Opalinuston gerechnet.

Die vorhandenen Unterlagen werden als genügend beurteilt, um die für diesen Bericht notwendige Analyse der bautechnischen Machbarkeit durchzuführen. Mit der Geothermiebohrung Schlattingen ist vorgesehen, für SGT Etappe 2 den Datensatz durch Laboruntersuchungen an frischen Bohrkernen zu ergänzen (vgl. Kap. 8.3). Für die vergleichende Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit in Etappe 2 wird der Datensatz dank der Ähnlichkeit der bautechnisch kritischen Formationen mit dem Opalinuston auch ohne die ergänzenden felsmechanischen Untersuchungen an Bohrkernen als genügend erachtet.

PB-9 / Natürliche Gasführung des Wirtgesteins

Aus dem Gebiet der Nordschweiz und aus dem Felslabor Mont Terri sind keine Anzeichen einer signifikanten natürlichen Gasführung des Opalinustons bekannt, im Gegensatz zu einigen Tiefbohrungen im süddeutschen Molassebecken, wo das organische Material im Opalinuston und in den Erdölmuttergesteinen im Liegenden wegen der grösseren Versenkung eine höhere Maturität erreicht hat. In den Sondierbohrungen der Nordschweiz war die Gasführung der Bohrspülung beim Durchbohren des Opalinustons sehr gering (Hinze et al. 1989, Jäggi & Steffen 1999).

Aus den Tiefbohrungen der Nagra in der Nordschweiz sind auch keine signifikanten Gaszutritte aus dem 'Braunen Dogger' und den Effinger Schichten bekannt; nur in der Bohrung Herdern-1 war die Gasführung der Bohrspülung beim Durchbohren des 'Braunen Doggers' etwas erhöht (unpubl. Angaben der SEAG).

In den Mergel-Formationen des Helvetikums ist hingegen mit einer erheblichen Methangasführung zu rechnen (Schneider 1984, Nagra 1997). Beim Bau und Betrieb eines Lagers sind daher entsprechende Überwachungsmassnahmen während der Bau- und Betriebsphase erforderlich und die Lüftung ist entsprechend auszulegen.

PI-1 / Nutzung der Gesteine als Rohstoff

Der Opalinuston wurde und wird als Ziegelei-Rohstoff in mehreren Tongruben abgebaut, die Effinger Schichten und einzelne Mergel-Formationen des Helvetikums werden lokal als Rohstoff für die Zementherstellung ebenfalls im Tagbau abgebaut. Aus wirtschaftlichen Gründen wird die Nutzung dieser Gesteine auch in Zukunft auf die Oberfläche beschränkt sein.

PI-4 / Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation

Als unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation werden natürliche Tracerprofile durch die Wirtgesteine und die umgebenden Gesteinsabfolgen, Hinweise auf Grundwasser-Stockwerkbau (d.h. eigenständige Ausbildung der Grundwassersysteme ober- und unterhalb von Grundwasserstauern) sowie anomale hydraulische Drücke betrachtet.

Natürliche Tracerprofile liegen aus allen Wirtgesteinen vor (Nagra 2008c). Diese sind konsistent mit den sehr geringen Durchlässigkeiten, welche zur Auswahl dieser Wirtgesteine geführt haben und sind ebenfalls konsistent mit der dekompaktionsbedingten Durchlässigkeitserhöhung

im oberflächennahen Bereich. Für Etappe 2 wird die Datenbasis noch erweitert, indem an älterem Kernmaterial aus Zeiten vor der Entwicklung dieser Methode Chloridprofile gemessen werden (Kap. 8.3).

In der Nordschweiz und am Wellenberg ist ein grossräumig ausgebildeter Stockwerkbau nachgewiesen (Nagra 2002a, Nagra 1997). Eindeutige Hinweise auf *'cross-formational flow'* existieren nur aus Gebieten, welche tektonisch sehr stark gestört sind, wie die Jura-Hauptaufschiebung (Thermalwässer Baden) und aus dem Einflussbereich des Oberrheingrabens (Bohrungen Pratteln und Riehen). Dort weisen übermoderne ^{39}Ar-Werte im Muschelkalkaquifer auf Beimischungen aus dem prämesozoischen Sockel hin. Hinweise auf möglichen 'cross-formational flow' durch eines der Wirtgesteine sind nur aus einem Gebiet im Süddeutschen Molassebecken bekannt, wo Hinweise auf gasförmigen CO_2-Transport durch den Opalinuston existieren (Schloz 2006), allerdings in einem geringen Tiefenbereich von 0 – 200 m, der möglicherweise noch von Dekompaktionseffekten beeinflusst ist. Für SGT Etappe 2 werden die seit der letzten hydrogeologischen Synthese (Nagra 2002a) in Fremdbohrungen erhobenen hydrogeologischen und hydrochemischen Daten in den bestehenden Datensatz integriert und ausgewertet (Kap. 8.4).

Die Messung hydraulischer Drücke ist in sehr geringdurchlässigen Gesteinen messbedingt mit grösseren Ungewissheiten behaftet. Es liegen aus allen Wirtgesteinen Messungen aus Tiefbohrungen vor. Diese werden für SGT Etappe 2 gesamthaft ausgewertet und bewertet (Kap. 8.4).

PI-5 / Variabilität der Gesteinseigenschaften

Die Variabilität der Eigenschaften der verschiedenen Wirtgesteine steht in direktem Zusammenhang mit ihrem lithologischen Aufbau. Dieser bestimmt auch, ob ein Wirtgestein ganz oder teilweise als homogen-poröses oder als geklüftetes Medium ausgebildet ist.

Den grössten Einfluss auf die provisorische Sicherheitsanalyse haben die Variabilität der hydraulischen Durchlässigkeit und die Variabilität der Transmissivität von Störungszonen/ Klüften, wobei auch das Channeling von Bedeutung ist. Die Variabilität der Gesteinseigenschaften ist in geklüfteten Medien naturgemäss viel grösser als in homogen-porösen Medien. Geklüftete Medien haben inhärente Ungewissheiten, die auch durch weitergehende Untersuchungen nur beschränkt reduziert werden können und deshalb in der Sicherheitsanalyse durch entsprechende Bandbreiten berücksichtigt werden müssen.

Aus allen Wirtgesteinen liegen genügend quantitative und qualitative Daten vor, um eine qualitative Bewertung dieses Aspekts vorzunehmen.

PI-6 / Selbstabdichtungsvermögen

Das Selbstabdichtungsvermögen ist von erheblicher Bedeutung für die Beurteilung der Langzeitsicherheit geologischer Tiefenlager. Es wird vielfach als eines der entscheidenden Argumente für die Bevorzugung von Tongesteinen bei der Standortwahl angeführt. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Aktivitäten des OECD/NEA Clay Clubs ein 'State-of-the-Art' Bericht erstellt, der die bisherigen Erfahrungen in den verschiedenen nationalen Tiefenlager-Programmen sowie publizierte Informationen aus dem Bereich der Kohlenwasserstoffindustrie berücksichtigt (Bock et al. 2010). Es besteht Konsens darüber, dass die Selbstabdichtung von Tongesteinen auf verschiedenartige physikalische und chemische Prozesse und Mechanismen zurückzuführen ist. Welche dieser Prozesse und Mechanismen im Einzelfall massgebend sind,

war und ist Gegenstand technisch-wissenschaftlicher Untersuchungen. Die Zeitdauer, die für eine Selbstabdichtung von Tongesteinen üblicherweise benötigt wird, hängt u.a. von der Mineralogie der Tongesteine (Anteil und Art der Tonminerale im Gestein) sowie von der geologischen Vorgeschichte der in Betracht gezogenen Tongesteinsformation ab. In plastischen Tonen erfolgt eine Selbstabdichtung vergleichsweise schnell, typischerweise innerhalb einer Zeitspanne von wenigen Monaten, wohingegen sie in mehr konsolidierten Tongesteinen wesentlich langsamer erfolgt, typischerweise innerhalb von Jahren (Bock et al. 2010).

Die vier Wirtgesteine weisen einen unterschiedlichen Grad des Selbstabdichtungsvermögens auf, welcher auf den unterschiedlichen Tongehalt[35] und die unterschiedliche Versenkungsgeschichte zurückzuführen ist. Der Opalinuston hat das grösste Selbstabdichtungsvermögen, gefolgt von den tonigen Abfolgen im 'Braunen Dogger', den Kalkmergeln der Effinger Schichten und den Mergel-Formationen des Helvetikums. Das Selbstabdichtungsvermögen der kalkreichen sedimentären Architekturelemente im 'Braunen Dogger' und in den Effinger Schichten ist sehr beschränkt. Für SGT Etappe 2 wird das Verständnis der Selbstabdichtung in den vier Wirtgesteinen weiter konsolidiert (Kap. 8.3).

PI-7 / Erfahrungen

Im Rahmen der Berichterstattung der Etappe 1 wurden sowohl die nationalen wie auch die Erfahrungen im Ausland, welche auf die vorgeschlagenen Wirtgesteine übertragbar sind, berücksichtigt (siehe entsprechende Kapitel und Referenzen in Nagra 2008c). Dieses technische Monitoring wird laufend weitergeführt, und zweckdienliche Informationen bzw. Fortschritte in Forschung und Technik werden in die Berichterstattung zu Etappe 2 einfliessen.

Beurteilung des Kenntnisstands bezüglich der Eigenschaften der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (Fazit)

Der in vorliegendem Kapitel diskutierte Kenntnisstand bezüglich der Eigenschaften der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche ist geeignet, um für die Testrechnungen abdeckende Rechenfälle festzulegen und dazu die erforderlichen konzeptuellen Modelle abzuleiten sowie deren Eigenschaften zu parametrisieren. Der Kenntnisstand ist auch ausreichend für die in diesem Bericht vorzunehmenden Abklärungen zur bautechnischen Machbarkeit.

Für SGT Etappe 2 werden die Unterlagen zu den Eigenschaften der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche überprüft und konsolidiert. Für ausgewählte Aspekte (PG-9 / Art der Transportpfade, PG-11 / Sedimentäre Architekturelemente, PG-15 / Mineralogie, PI-4 / Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation (natürliche Tracerprofile), PI-6 / Selbstabdichtungsvermögen; bei Möglichkeit auch PB-7 / Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein) werden ergänzende Untersuchungen bzw. Studien durchgeführt, vgl. Kap. 8.3. Die für Etappe 2 durchgeführten Arbeiten werden in den provisorischen Sicherheitsanalysen und für den sicherheitstechnischen Vergleich in SGT Etappe 2 berücksichtigt.

[35] In vorliegendem Bericht wird in Übereinstimmung mit der Berichterstattung zu SGT Etappe 1 für den Tonmineralgehalt häufig vereinfacht der Begriff *Tongehalt* verwendet.

4.4 Hydrogeologische Verhältnisse

4.4.1 Relevante Prozesse und Parameter

Die für die Sicherheit bzw. technische Machbarkeit relevanten Prozesse und Parameter mit Bezug zu den hydrogeologischen Verhältnissen in den geologischen Standortgebieten aus Tab. 3.2-1 sind in Tab. 4.4-1 zusammengefasst. Die relevanten Prozesse und Parameter werden direkt für die quantitative Beurteilung der Sicherheit (in Tab. 4.4-1 mit PG für geologische Merkmale gekennzeichnet) bzw. für die Beurteilung der technischen Machbarkeit (mit PB gekennzeichnet) verwendet. Diese Prozesse und Parameter fliessen teilweise auch in die qualitative Bewertung ein.

Tab. 4.4-1: Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zu den hydrogeologischen Verhältnissen in den geologischen Standortgebieten.

Die relevanten Prozesse und Parameter für die Sicherheit (PG – geologische Merkmale) und technische Machbarkeit (PB – geologische Merkmale) fliessen in die quantitative Analyse der Sicherheit und in die standortspezifische Lagerauslegung ein und werden teilweise auch für die qualitative Bewertung verwendet

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Präzisierung
i) Relevante Prozesse und Parameter für die Sicherheit (PG – geologische Merkmale)		
PG-8	Hydraulischer Gradient	In Kombination mit der hydraulischen Durchlässigkeit und der Transmissivität von Störungen (vgl. PG-6, PG-14) zu betrachten
PG-27	Relevante Exfiltrationspfade	Definiert Exfiltrationsort der regionalen Tiefenaquifere bzw. der Exfiltrationspfade in den Rahmengesteinen, unter Berücksichtigung geologischer Langzeitveränderungen
ii) Relevante Prozesse und Parameter für die techn. Machbarkeit (PB – geologische Merkmale)		
PB-8	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	Formationen, welche von Zugangsbauwerken (Rampe, Schacht) durchfahren werden
PB-10	Nutzungskonflikte hinsichtlich Mineralquellen und Thermen	Beeinflussung durch Bau der Zugangsbauwerke, in erster Linie Drainage-Effekte, sekundär Kontamination durch Zementinjektionen
PB-11	Oberflächensituation	Nutzbare Grundwasservorkommen, Grundwasserschutzzonen

Zu den für die Sicherheit wichtigen Prozessen und Parametern bezüglich der hydrogeologischen Verhältnisse im geologischen Standortgebiet gehören der hydraulische Gradient, welcher den Wasserfluss im Tiefenlagerbereich mitbestimmt sowie die Exfiltrationspfade bis hin zu den potenziellen Exfiltrationsorten. Aus Sicht der bautechnischen Machbarkeit sind ferner die geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse in den zu durchfahrenden Gesteinsformationen, allenfalls vorhandene hydraulische Verbindungen zu Mineralquellen und Thermen und die Oberflächensituation (insbesondere Grundwasserschutzzonen) wichtig.

Die Diskussion des Kenntnisstands sowie die Festlegung und Begründung der quantitativen Informationen bezüglich dieser Prozesse und Parameter in den geologischen Standortgebieten ist im Kap. 4.4.2 zu finden. Im Rahmen einer standortspezifischen Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse (inkl. Stockwerkbau) werden auch die potenziellen Exfiltrationspfade (siehe PG-27 / Relevante Exfiltrationspfade) in den oberen und unteren Rahmengesteinen der Wirtgesteine Opalinuston und 'Brauner Dogger' diskutiert. Diese Information stellt eine Ergänzung der entsprechenden Angaben in Kap. 4.3 dar.

4.4.2 Evaluation der Information zu den Prozessen und Parametern sowie des entsprechenden Kenntnisstands

PG-8 / Hydraulischer Gradient

Zu den für die Sicherheit wichtigen Prozessen und Parametern gehört der Wasserfluss durch das Tiefenlager und den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Die Grössenordnung des Wasserflusses wird primär durch die hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins bzw. die Transmissivität von Störungszonen bestimmt (Kap. 4.3) und bei Berücksichtigung der Ungewissheiten spielt der hydraulische Gradient eher eine untergeordnete Rolle.

Die Messung der hydraulischen Potenziale in den geringdurchlässigen Gesteinen der Nordschweiz ist mit bedeutenden Ungewissheiten verbunden (z.B. Bohrung Benken: Figur 4.6-1 in Nagra 2002a; Bohrung Oftringen: Fisch et al. 2008, Figur 19.3) und folglich auch die Berechnung der hydraulischen Gradienten. Die Abschätzung eines Gradienten basierend auf den Potenzialen in den angrenzenden Aquiferen liefert beispielsweise für Benken (Sandsteinkeuper – Oberer Malm) einen Wert von rund 0.2 (Nagra 2002a, Fig. 4.6-1). Dies ist jedoch mit den beobachteten Überdrücken nicht kompatibel. Allgemein sind die Gradienten in geringdurchlässigen Gesteinen hoch, in durchlässigen Gesteinen in Gebieten mit relativ flacher Topographie wie die Nordschweiz eher gering. Aus diesem Grund werden für die Testrechnungen der Sicherheitsanalyse (Kap. 6) die Gradienten in den geringdurchlässigen Einheiten der Nordschweiz gleich 1 gesetzt und für sedimentäre Architekturelemente mit erhöhter Durchlässigkeit bzw. Transmissivität (z.B. Kalkbankabfolgen) gleich 0.1. Weil in einer Sicherheitsanalyse nicht die heute vorherrschenden hydraulischen Gradienten, sondern diejenigen zur Zeit der Radionuklid-Freisetzung massgebend sind, haben die gegenwärtigen Gradienten nur eine richtungsweisende Rolle (Ungewissheiten wegen zukünftiger Veränderung der heutigen Gradienten aufgrund von Erosion und Verlegung der Vorflutsysteme).

Am Wellenberg zeigen die Packertests in den Bohrungen und das Langzeitbeobachtungssystem ein konsistentes Bild mit einer Unterdruckzone im Wirtgestein und artesischen Verhältnissen in der Wissberg-Scholle (Nagra 1997, Figur 7.2-5). Im oberen Teil des Tiefenlagerbereichs ergibt sich ein Gradient von rund 0.4 (siehe auch Nagra 1994, Tabelle 4.2-1). Für den unteren Teil des Tiefenlagerbereichs berechnet sich für die Zeit nach dem Abbau der Unterdruckzone ein nach oben gerichteter Gradient von rund 0.2. Für die Testrechnungen wird für den Tiefenlagerbereich ein einheitlicher Gradient von 0.4 verwendet. Dieser entspricht auch dem im Rahmen des Rahmenbewilligungsgesuchs verwendeten Wert (Nagra 1994).

Der heutige Kenntnisstand wird als genügend beurteilt, um für die Testrechnungen für die verschiedenen Standortgebiete hydraulische Gradienten zur Berechnung der Wasserflüsse durch das Tiefenlager bzw. durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich festzulegen.

Die für SGT Etappe 2 vorgesehenen hydrogeologischen Modelle werden unter anderem zur Evaluation der hydraulischen Gradienten im Tiefenlager verwendet werden (Kap. 8.4); die Resultate aus diesen Arbeiten werden in die provisorischen Sicherheitsanalysen für Etappe 2 einfliessen.

PG-27 / Relevante Exfiltrationspfade

Die Freisetzung von Radionukliden, welche nach dem Transport durch das Wirtgestein noch nicht zerfallen sind, wird durch allfällig vorhandene, geringdurchlässige Rahmengesteine zusätzlich reduziert. Die potenzielle Freisetzung in die Biosphäre erfolgt (nach der Barriere Wirtgestein) über wasserführende Schichten in den Rahmengesteinen oder über die regionalen Tiefenaquifere. Dabei werden beide Möglichkeiten – die Freisetzung über wasserführende Schichten in den überliegenden und unterliegenden Rahmengesteinen bzw. über die regionalen Tiefenaquifere beschrieben.

Die hydrogeologischen Einheiten (inklusive regionale Tiefenaquifere) und die potenziell wasserführenden Schichten in den Rahmengesteinen in den Standortgebieten sind aus den Untersuchungen im Rahmen von SGT Etappe 1 und früheren Untersuchungen (z.B. Nagra 2008c, Nagra 2002a, Nagra 1997) gut bekannt.

Die Bedeutung der regionalen Tiefenaquifere und der potenziell wasserführenden Schichten in den Rahmengesteinen als Exfiltrationspfade sowie die möglichen Exfiltrationsorte und deren Entwicklung innerhalb des Betrachtungszeitraums werden nachfolgend für die verschiedenen Standortgebiete diskutiert. Die standortspezifischen Beschreibungen charakterisieren die heutigen Verhältnisse. Für die Langzeitsicherheit müssen aber auch die potenziellen Veränderungen während den relevanten Betrachtungszeiträumen (SMA oder HAA) berücksichtigt werden. Typischerweise zu erwarten sind höhere hydraulische Durchlässigkeiten der Tiefenaquifere in Oberflächennähe (durch Druckentlastung, allenfalls Verkarstung) und eine gewisse Verlagerung der Exfiltrationsgebiete auf Grund der Tieferlegung der regionalen Vorflut und durch die Verschiebung von Flusssystemen. Es sind aber keine grundlegenden Veränderungen der Exfiltrationspfade zu erwarten und zumindest im Betrachtungszeitraum für das SMA-Lager auch keine bedeutenden Veränderungen der Morphologie.

Zudem ist vorgesehen, den Kenntnisstand für SGT Etappe 2 durch die Kompilation und Analyse von Daten sowie durch hydrogeologische Modelle zu vertiefen (Kap. 8.4).

Südranden

Der verkarstete und geklüftete Obere Malm bildet den nächstgelegenen Aquifer über dem Wirtgestein (Opalinuston), er ist insbesondere im westlichen Standortgebiet aufgeschlossen. Auf der Hochfläche des Südrandens wird er meist von geringdurchlässigen Bolustonen (Karstverfüllung) und teilweise auch von gering mächtigem Tertiär überlagert. Im östlichen Standortgebiet gewinnt zusätzlich die Überlagerung mit Quartär an Bedeutung. Durch die mittleren Malmmergel (Schwarzbach-Formation) ist der Aquifer des Oberen Malms in zwei Stockwerke unterteilt. Im regionalen Massstab bildet der Südranden ein Infiltrationsgebiet für den Malm-Aquifer (Nagra 2002a; Interreg IIIA 2008). Das Rheinfallbecken bildet die tiefstgelegene Vorflut für das zentrale und östliche Standortgebiet (siehe Interreg IIIA 2008); dort steht der Obere Malm mit dem Grundwasserstrom in den Schottern des Rheintals in Kontakt; das Rheinfallbecken ist der Haupt-Exfiltrationsort. Allenfalls hat das regionale Exfiltrationsgebiet im Raum Mellikon – Kaiserstuhl (Kontakt mit quartären Lockergesteinsaquiferen resp. dem Hochrhein) eine gewisse Bedeutung für das untere Stockwerk des Oberen Malms. Die Klettgaurinne reicht in ihrem östlichsten Teil bis in die Malmkalke (Profile in Hofmann 1981), stellt aber auf Grund der höheren Lage als das Rheinfallbecken nach heutiger Kenntnis kein Exfiltrationsgebiet dar (siehe Potenziale in Interreg IIIA 2008). Die in den Karten verzeichneten Quellen im Raum Neuhausen dürften zu lokalen Fliesssystemen im oberen Aquiferstockwerk gehören (Profile in Hofmann 1981) und sind damit nicht relevant als Exfiltrationspfad. Aufgrund des allgemeinen Schichteinfallens Richtung Südosten und der bis in den Dogger

reichenden Taleinschnitte im Südwesten (insbesondere Wangental) erfolgt für den Oberen Malm des westlichen Standortgebiets eine zumindest teilweise Exfiltration in diese Täler. Für den nördlichsten Streifen des Standortgebiets erfolgt vermutlich eine Entwässerung gegen den Klettgau.

Zwischen dem Tiefenaquifer des Oberen Malms und dem Opalinuston liegen allgemein geringdurchlässige Gesteine: Diese umfassen die Effinger Schichten (Impressa-Mergel) und die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'. Diese Gesteine wurden in der Bohrung Benken mit drei Packertests untersucht, es ergaben sich geringe hydraulische Durchlässigkeiten (Bestwerte $\leq 2.1 \times 10^{-12}$ m/s; Nagra 2002a). Dabei ist zu beachten, dass diese Gesteine am Südranden weniger tief liegen und teilweise noch von Dekompaktionseffekten betroffen sein können. Im Rahmen der Geosynthese Zürcher Weinland wurde eine sandig-kalkige Einschaltung in der Wedelsandstein-Formation als hypothetischer Freisetzungspfad in der Sicherheitsanalyse berücksichtigt (Nagra 2002a, c), trotz der beobachteten geringen hydraulischen Durchlässigkeit. Auf Grund der nach heutiger Kenntnis geringen lateralen Kontinuität dieser Einschaltungen (laufendes Projekt für SGT Etappe 2) stellen diese keine relevanten Exfiltrationspfade dar.

Zwischen Basis Opalinuston und dem regionalen Tiefenaquifer Oberer Muschelkalk liegen allgemein geringdurchlässige Gesteine. Auf Grund ihrer Lithologie stellen der Arietenkalk und verschiedene Untereinheiten des Sandsteinkeupers[36] potenzielle Grundwasserleiter dar:

- Der Arietenkalk zeigte in der Bohrung Benken (Nagra 2002a), im Einklang mit Untersuchungen in anderen Tiefbohrungen der Nordschweiz, nur sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten (Lias $< 10^{-13}$ m/s; Nagra 2002a). Die in Siblingen im Arietenkalk angetroffenen höheren Durchlässigkeiten (Spülungsverlust) werden auf die geringe Überlagerung und die durch ein lokales Störungssystem bedingte stärkere Klüftung zurück geführt (Klemenz et al. 2000). Der Arietenkalk wird nicht als relevanter Exfiltrationspfad betrachtet. Mit dieser Beurteilung im Einklang stehen die natürlichen Tracerprofile in Benken (Nagra 2002a).
- Die Stubensandstein-Formation bildet, in Analogie zum Standortgebiet Zürich Nord-Ost (Nagra 2002a), einen potenziellen Exfiltrationspfad: In der Bohrung Siblingen liegt sie als sandiger Dolomitmergel bis sandiger Dolomit vor und ist mit 4.9 m geringer mächtig als in Benken (11.5 m). Die Schilfsandstein-Formation ist in Siblingen allgemein tonreich ausgebildet. Das Exfiltrationsgebiet für den Sandsteinkeuper liegt in der Klettgaurinne zwischen Neunkirch und Trasadingen; dort steht sie in Kontakt mit dem Quartär-Aquifer (Nagra 2002a und darin zitierte Literatur).
- Der geklüftete und in Oberflächenähe teilweise verkarstete Obere Muschelkalk bildet den nächstgelegenen regionalen Tiefenaquifer unter dem Wirtgestein. Das Exfiltrationsgebiet für den Muschelkalk-Aquifer liegt im Raum Koblenz – unteres Wutachtal, wo der Muschelkalk in Kontakt mit dem Quartär-Aquifer steht (Nagra 2002a). Eine Exfiltration über den Muschelkalk wird aufgrund der in Benken beobachteten Hydrogeologie des Sandsteinkeupers (Durchlässigkeit, Hydrochemie) als wenig wahrscheinlich eingestuft.

Im Rahmen des Betrachtungszeitraums für SMA sind insbesondere eine Tieferlegung der regionalen Vorflut und eine Weiterentwicklung der Verkarstung des Oberen Malms zu erwarten. Die relevanten Exfiltrationsgebiete werden sich nur unwesentlich verlagern, und es ist auch keine grosse Veränderung der Morphologie zu erwarten: Eine grössere Vergletscherung wird erst gegen Ende des Betrachtungszeitraums erwartet (Kap. 4.5).

---

[36] Der Mittlere Keuper wird aufgrund seiner sandigen Einschaltungen im oberen Teil auch als Sandsteinkeuper bezeichnet. Der Sandsteinkeuper umfasst folgende potenziell durchlässige Einheiten, welche lokal sehr unterschiedlich ausgebildet sein können: Stubensandstein-Formation, Gansinger Dolomit, Kieselsandstein und Schilfsandstein-Formation (vgl. Kapitel 3.2.2 in Nagra 2002a).

Für SGT Etappe 2 wird für dieses Gebiet eine vertiefte hydrogeologische Auswertung stattfinden, insbesondere bezüglich des Exfiltrationspfads Oberer Malm.

Zürich Nord-Ost

Der Obere Malm bildet den regionalen Tiefenaquifer über den Wirtgesteinen Opalinuston und 'Brauner Dogger'. Das nächstgelegene Exfiltrationsgebiet liegt im Rheinfallbecken bei Neuhausen (Nagra 2002a, Figur 3.6-5; Interreg IIIA 2008). Dort steht der Obere Malm in Kontakt mit quartären Lockergesteinsaquiferen.

Zwischen dem regionalen Tiefenaquifer Oberer Malm und Top Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' liegen die Effinger Schichten (inkl. Glaukonit-Sandmergel). Ein Packertest in der Bohrung Benken zeigte sehr geringe Durchlässigkeiten (Intervall Wohlgeschichtete Kalke bis in den obersten Dogger: Bestwert 5.8×10^{-14} m/s).

Im Rahmen der Geosynthese Zürcher Weinland wurde auch eine sandig-kalkige Einschaltung der Wedelsandstein-Formation als hypothetischer Freisetzungspfad in der Sicherheitsanalyse berücksichtigt (Nagra 2002a, c), trotz der in der Bohrung Benken beobachteten geringen Durchlässigkeit. Auch auf Grund der nach heutiger Kenntnis geringen lateralen Kontinuität dieser Einschaltungen (laufendes Projekt für SGT Etappe 2) stellen diese keinen Exfiltrationspfad dar.

Unter dem Opalinuston folgen mit dem Lias und dem Keuper allgemein geringdurchlässige Gesteine. Auf Grund ihrer Lithologie stellen der Arietenkalk und der Sandsteinkeuper potenzielle Grundwasserleiter dar:

Der Arietenkalk zeigte in der Bohrung Benken (Nagra 2002a), im Einklang mit Untersuchungen in anderen Tiefbohrungen der Nordschweiz, nur sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten (Lias $\leq 10^{-13}$ m/s; Nagra 2002a). Der Arietenkalk bildet keinen relevanten Exfiltrationspfad. Mit dieser Beurteilung im Einklang stehen die natürlichen Tracerprofile in Benken (Nagra 2002a).

Der Sandsteinkeuper bildet einen potenziellen Exfiltrationspfad im Liegenden des Opalinustons (Nagra 2002a). In der Bohrung Benken wurden erhöhte Durchlässigkeiten in der Stubensandstein-Formation festgestellt, und auch die Analysen des geförderten Grundwassers legen nahe, dass es sich um ein Tiefengrundwasserfliesssystem von zumindest lokaler Dimension handelt. Die Klettgaurinne ist das nächste potenzielle Exfiltrationsgebiet für den Sandsteinkeuper im Standortgebiet Zürich Nord-Ost (Nagra 2002a).

Der Obere Muschelkalk bildet den regionalen Tiefenaquifer im Liegenden der Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und Opalinuston. Die Wasserwegsamkeit beruht auf der Klüftung in Verbindung mit einer hohen Gesteinsporosität. In oberflächennaher Lagerung kann es zu Verkarstung kommen. Die Druckhöhenverteilung im Muschelkalk (Figur 3.6-7 in Nagra 2002a) deutet an, dass die Region Zürich Nord-Ost im Bereich einer Grundwasserscheide liegt. Basierend auf den verfügbaren Potenzialdaten kann nicht eindeutig beurteilt werden, ob die Exfiltration gegen Westen (Rhein; Region Koblenz) oder gegen Nordosten (Neckar) erfolgt. Aufgrund der Aquifereigenschaften der Stubensandstein-Formation und dem zwischen Opalinuston und Oberem Muschelkalk liegenden geringdurchlässigen Gipskeuper scheint eine Freisetzung über den Muschelkalk wenig plausibel.

Bezüglich der Langzeitentwicklung wird es zu einer Tieferlegung der regionalen Vorflut kommen, und einer geringfügigen Verschiebung der Exfiltrationsgebiete. Wahrscheinlich bleibt der Malm in einem Grossteil des Gebiets unter der regionalen Vorflut und wird deshalb keine bedeutende (erneute) Verkarstung erfahren.

Nördlich Lägeren

Der Obere Malm bildet den regionalen Tiefenaquifer über den Wirtgesteinen Opalinuston und 'Brauner Dogger'. Das regionale Fliesssystem für den Malm ist in Nagra (2002a, Figur 3.6-5) dargestellt. Das nächstgelegene Exfiltrationsgebiet liegt entlang des Hochrheins im Raum Mellikon – Kaiserstuhl (Kontakt mit quartären Lockergesteinsaquiferen resp. dem Hochrhein). Zudem bildet der Malm im westlichen Rafzerfeld teilweise die Basis des Lockergesteinsaquifers (Interreg II 2001).

Unter dem regionalen Tiefenaquifer Oberer Malm folgen die Effinger Schichten und die in Weiach als Sandmergel ausgebildeten Birmenstorfer Schichten. In der Bohrung Weiach wurden die vergleichsweise tonreich ausgebildeten Effinger Schichten nicht detailliert getestet. Ein 'Drill-Stem-Test' von den untersten Effinger Schichten bis in die Varians-Schichten lieferte kein quantifizierbares Ergebnis, wies aber auf sehr geringe Durchlässigkeiten hin (Nagra 1989). Zu beachten ist, dass die Mächtigkeit der Effinger Schichten nach Westen im Standortgebiet zunimmt, und dass der Ostrand der Gerstenhübel-Schichten nicht genau bekannt ist. Auch die Birmenstorfer Schichten werden gegen Westen mächtiger und karbonatreicher (Profile in Naef 2008) [37].

In der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' der Bohrung Weiach ist die Wedelsandstein-Formation nicht ausgebildet. Oben und unten im 'Braunen Dogger' finden sich wenige Meter mächtige Einschaltungen von kalkigen Eisenoolithen und Kalksteinen (Anhang A3). Die in Weiach teilweise in kalkiger Fazies ausgebildeten Murchisonae-Concava-Schichten zeigten in der Bohrung eine sehr geringe hydraulischen Durchlässigkeit (rund 10^{-13} m/s; Klemenz et al. 2000). Auch auf Grund der nach heutiger Kenntnis meist geringen lateralen Kontinuität dieser Einschaltungen (laufendes Projekt SGT Etappe 2) stellen diese keinen relevanten Exfiltrationspfad dar. Zu beachten ist, dass die Ostgrenze des Auftretens des Spatkalks (Klingnau-Formation) nicht genau bekannt ist und bis ins westliche Standortgebiet reichen könnte. Dieser war in der Bohrung Riniken 3 m mächtig und erwies sich ebenfalls als geringdurchlässig ($\leq 10^{-12}$ m/s; Nagra 1990).

Unter dem Opalinuston folgen Lias und Keuper, die sich in der Bohrung Weiach als gering–durchlässig erwiesen:

Der Arietenkalk ist als geringdurchlässiger (3×10^{-12} m/s[38]), rund 3 m mächtiger, biodetritischer Kalk mit Mergelhorizonten ausgebildet (Nagra 1989, Klemenz et al. 2000). Diese geringe Durchlässigkeit steht im Einklang mit den Testdaten der Bohrungen Benken, Riniken und Schafisheim. Der Arietenkalk bildet keinen relevanten Exfiltrationspfad.

Auch der Sandsteinkeuper zeigt vergleichsweise geringe Durchlässigkeiten: Der Schilfsandstein ist in Weiach rund 12 m mächtig und tonreich, der Stubensandstein als Dolomitmergel ausgebildet und lediglich 0.4 m mächtig. Ein Packertest, welcher in einem 24 m langen Intervall Schilf- und Stubensandstein sowie den Gansinger Dolomit umfasste, ergab eine mittlere hydraulische Durchlässigkeit von rund 10^{-10} m/s (Klemenz et al. 2000). Der Sandsteinkeuper in Weiach ist damit deutlich weniger durchlässig als in den Bohrungen Benken und Riniken. Auf Grund seiner potenziell sandigen Lithologie kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass er in einem Teil des Gebiets einen Exfiltrationspfad bildet. Der nächstgelegene potenzielle Exfiltrationsort ist das Rheintal im Raum Zurzach.

---

[37] In der Bohrung Riniken 4 m mächtige Kalkbank, in der Bohrung Reckingen ebenfalls 4 m mächtig.

[38] Intervall-Länge 14 m, reicht bis in den Keuper.

Der Obere Muschelkalk bildet den regionalen Tiefenaquifer im Liegenden der Wirtgesteine. Das regionale Fliessfeld ist in Nagra (2002a, Figur 3.6-7) dargestellt. Das nächstgelegene Exfiltrationsgebiet liegt im Raum Koblenz – unteres Wutachtal, wo der Muschelkalk in Kontakt mit dem quartären Lockergesteinsaquifer steht.

Bezüglich der Langzeitentwicklung wird es zu einer Tieferlegung der regionalen Vorflut kommen, und einer geringfügigen Verschiebung der Exfiltrationsgebiete. Wahrscheinlich bleibt der Malm in einem Grossteil des Gebiets unter der regionalen Vorflut und wird deshalb keine bedeutende (erneute) Verkarstung erfahren.

Bözberg

Der Obere Malm ist nur im südöstlichen Standortgebiet anzutreffen. Er wird durch die Effinger Schichten vom potenziellen Tiefenaquifer Hauptrogenstein (dem untersten Aquifer im Hangenden des Opalinustons) abgeschirmt und wird deshalb nicht als Exfiltrationspfad erachtet.

Der Hauptrogenstein bildet einen potenziellen Exfiltrationspfad im Hangenden des Opalinustons (Kluft- und evtl. Karstaquifer). Nach Schmassmann (in Jäckli & Kempf 1972) ist die Durchlässigkeit des Hauptrogensteins im Gebiet östlich der Sissle mittelgross bis gering. Dies dürfte auf die mergeligen Einschaltungen im Bereich des Fazieswechsels zurück zu führen sein (siehe Nagra 2008c, Beilage 5.2-2). Basierend auf strukturellen Überlegungen ist eine Exfiltration über den Hauptrogenstein ins untere Aaretal (Raum Böttstein) oder ins Tal der Sissle (Raum Hornussen – Bözen) denkbar. Das Exfiltrationsgebiet in die Schotter des unteren Aaretals liegt tiefer als die Aufschlüsse im Tal der Sissle, gegen Osten wird der Dogger jedoch auch mergeliger und damit weniger durchlässig. Es sind keine Hinweise auf exfiltrierende Tiefengrundwässer des Hauptrogensteins bekannt.

Die Abfolge der Gesteine zwischen Hauptrogenstein und Opalinuston ist durch kleinräumige Fazieswechsel charakterisiert (Bereich des Fazieswechsels: Fig. 5.2-1 in Nagra 2008c; Profile in Naef 2008). Die Gesteine sind oft mergelig oder tonig ausgebildet, umfassen aber auch Sandkalke oder wenige Meter mächtige Eisenoolithe. Über die Hydrogeologie dieser Gesteine ist wenig bekannt. Nach Schmassmann (in Jäckli & Kempf 1972) ist die Durchlässigkeit mittelgross bis gering[39]. In der Bohrung Schafisheim erwies sich der unterste Abschnitt der Passwang-Formation als sehr geringdurchlässig ($\leq 5 \times 10^{-13}$ m/s; Klemenz et al. 2000). Im Hauenstein-Basistunnel waren die Abschnitte in diesen Gesteinen trocken resp. es sind keine nennenswerten Wasserzutritte aufgetreten (Schmassmann in Jäckli & Kempf 1972)[40]. Diese Beobachtungen legen nahe, dass diese Gesteine keine grossräumigen Wasserwegsamkeiten bilden, ein kleinräumiger Transport bis zu einer transmissiven Störungszone kann nicht ausgeschlossen werden.

Unter dem Opalinuston folgen mit Lias und Keuper mehrheitlich geringdurchlässige Gesteine:

Der Arietenkalk des untersten Lias kann in oberflächennaher Lage einen geringmächtigen Kluftaquifer bilden (Schmassmann in Jäckli & Kempf 1972). In der Bohrung Riniken zeigt sich der Lias, im Einklang mit Befunden der Bohrungen Benken, Weiach und Schafisheim, jedoch als sehr geringdurchlässig (1×10^{-13} m/s; Klemenz et al. 2000). Der Arietenkalk bildet keinen relevanten Exfiltrationspfad.

---

[39] Vergleiche Jäckli & Kempf 1972, S. 17: *„…In solchen wechsellagernden Schichtkomplexen treten häufig kleinere Schicht- und Kluftquellen auf, ohne dass sie aber von grösser Bedeutung wären…“*. Anmerkung: Der Fokus der Arbeit von Jäckli & Kempf ist die oberflächennahe Hydrogeologie.

[40] Für SGT Etappe 2 erfolgt eine vertiefte Auswertung basierend auf den Originaldokumenten.

Der Sandsteinkeuper bildet einen Exfiltrationspfad im Liegenden des Opalinustons, die potenziellen Grundwasserleiter sind der Gansinger Dolomit und die Schilfsandstein-Formation (vgl. Nagra 2008c, Beilage 5.2-2). In der Bohrung Riniken ergab ein Einfachpacker-Test in einem Intervall mit Gansinger Dolomit und Schilfsandstein einen K-Wert von rund 5×10^{-9} m/s, und es konnte eine Grundwasserprobe gefördert werden (Pearson et al. 1991; Biehler et al. 1993, Traber et al. 2002). Auch in der Bohrung Beznau konnte aus dem Gansinger Dolomit eine Wasserprobe gefördert werden. Daten zu rezenten Keuper-Grundwässern finden sich in Biehler et al. (1993) und in Traber et al. (2002), beispielsweise aus dem Bözberg-Eisenbahntunnel. Das untere Aaretal bildet das tiefstgelegene potenzielle Exfiltrationsgebiet für den Sandsteinkeuper.

Der Obere Muschelkalk bildet einen weiteren potenziellen Exfiltrationspfad im Liegenden des Opalinustons, das potenzielle Exfiltrationsgebiet liegt im Rheintal.

Bezüglich der Langzeitentwicklung wird es zu einer allgemeinen Tieferlegung der regionalen Vorflut kommen, durch flächenhafte Erosion wird der Hauptrogenstein zunehmend an der Oberfläche aufgeschlossen sein. Ob sich daraus eine bedeutende Verkarstung ergibt, ist aufgrund der lithologischen Ausbildung fraglich.

Jura-Südfuss

Der Obere Malm (Villigen-Formation) bildet den potenziellen Exfiltrationspfad über dem einen Wirtgestein, den Effinger Schichten. Das potenzielle Exfiltrationsgebiet liegt im Raum Aarau – Olten, wo der Obere Malm mit dem Lockergesteinsgrundwasserleiter des Aaretals in Kontakt steht (z.B. Abbildung 6 in Jäckli & Kempf 1972). In der EWS-Bohrung Oftringen ist der Obere Malm hydraulisch getestet worden und es konnte eine Wasserprobe entnommen werden (Fisch et al. 2008, Waber 2008). Das geförderte Grundwasser enthielt rund 11.8 g/l Chlorid und deutlich positivere δ^{18}O-Werte als in rezenten Wässern und legt damit einen Zufluss in den Malmkalken aus südlicher Richtung nahe.

Unter den Effinger Schichten folgen Birmenstorfer Schichten, Spatkalk und Hauptrogenstein. Diese bilden, allenfalls abgetrennt durch Mergellagen, einen potenziellen Exfiltrationspfad, bzw. mehrere Exfiltrationspfade im Liegenden der Effinger Schichten resp. im Hangenden des anderen Wirtgesteins, dem Opalinuston. Der Hauptrogenstein bildet im Jura einen Kluft- und untergeordnet Karstaquifer; über seine Bedeutung als regionaler Tiefenaquifer ist wenig bekannt. Hydraulische Tests liegen aus den Bohrungen Gösgen SB2 (Enachescu et al. 2010b) und Oftringen (Fisch et al. 2008) vor[41]. Während die hydraulischen Durchlässigkeiten in Oftringen gering waren (7×10^{-12} m/s), ergab der Test in Gösgen 5×10^{-10} m/s und es war möglich eine Wasserprobe zu fördern. Das geförderte Grundwasser enthielt rund 5.6 g/l Chlorid und deutlich positivere δ^{18}O-Werte als in rezenten Wässern. Potenzielle Exfiltrationsorte für den Hauptrogenstein-Aquifer befinden sich nördlich von Aarburg, wo er mit der Aare in Kontakt steht (Klemenz et al. 2000), und beim Aare-Durchbruch durch die Gisliflue – Chestenberg-Antiklinale.

Die Abfolge der Gesteine zwischen Hauptrogenstein und Opalinuston ist durch kleinräumige Fazieswechsel charakterisiert. Es finden sich dort die kalkoolithischen Mergel der unteren Accuminata-Schichten (Hauptrogenstein-Formation) und die Passwang-Formation. Die Passwang-Formation ist allgemein mergelig ausgebildet, es finden sich aber auch Sandkalke, Spatkalke und Eisenoolithe (Profile in Naef 2008, Beilage 5). In der Bohrung Schafisheim, wo die Abfolge vergleichsweise tonreich ausgebildet ist, sind 40 m der Rahmengesteine direkt über

[41] Intervalle jeweils von den Birmenstorfer Schichten bis in die Hauptrogenstein-Formation.

dem Opalinuston (untere 2/3 der Passwang-Formation) mit zwei Packertests untersucht worden, die sehr geringe Durchlässigkeiten ergaben ($\leq 5 \times 10^{-13}$ m/s; Klemenz et al. 2000). Im Hauenstein-Basistunnel waren die Abschnitte in diesen Gesteinen weitgehend trocken resp. es sind offensichtlich keine nennenswerten Wasserzutritte aufgetreten (Schmassmann in Jäckli & Kempf 1972)[42]. Diese Beobachtungen zeigen, dass diese Gesteine keine grossräumigen Wasserwegsamkeiten bilden, ein kleinräumiger Transport bis zu einer transmissiven Störungszone kann nicht ausgeschlossen werden.

Zwischen Opalinuston und dem regionalen Tiefenaquifer Oberer Muschelkalk liegen Lias und Keuper:

Der Lias ist meist mergelig und tonig ausgebildet, lokal finden sich aber auch sandige Kalke. Von hydrogeologischer Bedeutung ist der Arietenkalk, der gegen Westen mächtiger wird (siehe Naef 2008, Beilage 5), von rund 2 m im Profil Schafisheim bis zu 11 m im Sammelprofil Zeglingen – Rohr. Es ist damit fraglich, inwieweit die Beobachtungen in der Bohrung Schafisheim für den Arietenkalk des gesamten Gebiets repräsentativ sind. In der Bohrung Schafisheim zeigt der Lias, obwohl im Arietenkalk (s.l.) mehrere offene Klüfte beobachtet wurden, eine Durchlässigkeit $\leq 3 \times 10^{-13}$ m/s (Nagra 1992a). Im Alten Hauensteintunnel und im Hauenstein-Basistunnel sind im Lias nur geringe Wasserzuflüsse aufgetreten (Schmassmann in Jäckli & Kempf 1972). Diese Beobachtungen legen nahe, dass der Arietenkalk kein bedeutender Exfiltrationspfad ist, allenfalls bildet er eine potenzielle Wegsamkeit zu einer in der Nähe gelegenen transmissiven Störungszone.

Der Keuper ist in der Bohrung Schafisheim geringdurchlässig (Bestwert 2×10^{-11} m/s; Klemenz et al. 2000). Im Gebiet des Baselbieter und Solothurner Faltenjuras bildet der Gansinger Dolomit einen nur untergeordneten, geringmächtigen Aquifer. Im Hauensteinbasistunnel trat beim Bau aus dem Gansinger Dolomit etwas Wasser aus (Schmassmann in Jäckli & Kempf 1972).

Der Obere Muschelkalk bildet einen regionalen Tiefenaquifer im Liegenden des Opalinustons. Hydrogeologische Beschreibungen des Oberen Muschelkalks finden sich in Jäckli & Kempf (1972) und in Klemenz et al. (2000). In Lostorf, am Nordrand des Standortgebiets, wurde Muschelkalkwasser für balneologische Zwecke mit mehreren Bohrungen gefasst (derzeit nicht genutzt). Die älteste, untiefe Bohrung fasst das entlang einer Querstörung aufsteigende Muschelkalkwasser (Biehler et al. 1993). Das Wasser im Muschelkalk über der Hauptüberschiebung strömt aus südöstlicher Richtung zu (Schmassmann in Högl 1980). Auch im Hauensteinbasistunnel konnten im Oberen Muschelkalk Grundwasserproben entnommen werden (Biehler et al. 1993). Das regionale Exfiltrationsgebiet liegt beim Durchbruch der Aare durch die Jura-Hauptüberschiebung (Raum Schinznach).

Im Rahmen des Betrachtungszeitraums für SMA ist eine eher geringfügige Tieferlegung der regionalen Vorflut zu erwarten und allenfalls eine verstärkte Verkarstung im Oberen Malm.

[42] Im Rahmen von Etappe 2 soll eine vertiefte Auswertung basierend auf den Originaldokumenten erfolgen.

Wellenberg

Die hydrogeologische Situation im Standortgebiet Wellenberg ist aufgrund der existierenden detaillierten Untersuchungen inklusive Modellierungen gut bekannt. Sie wurde im Rahmen der Geosynthese Wellenberg (Nagra 1997) detailliert dargestellt. Es ist zu beachten, dass nach heutiger Planung die Platzierung des Lagers tiefer zu liegen käme als damals geplant.

Die grossräumige Grundwasserzirkulation (inkl. Langzeitentwicklung der Unterdruckzone) wurde anhand eines Regionalmodells untersucht (Nagra 1997). Die Modellierungen zeigen einen möglichen Abbau der Unterdruckzone bis in rund 30'000 Jahren (Bereich 20'000 bis 43'000 Jahre). Vorher sind die hydraulischen Gradienten gegen die Unterdruckzone gerichtet. Die potenziellen Exfiltrationspfade für die Zeit danach wurden unter der Annahme heutiger topographischer Verhältnisse und Durchlässigkeiten modelliert: Der Hauptanteil exfiltriert über die Kalke der Drusberg-Decke (nördliche Begrenzung des Wirtgesteins) ins Tal der Engelberger Aa (Hauptanteil), ein Teil exfiltriert direkt (resp. durch die Rutschmasse) ins Tal der Engelberger Aa. Das Modell zeigt auch, dass der Zeitpunkt der Exfiltration aus einem beliebigen Punkt des Lagers wesentlich von der Distanz zur Unterdruckzone abhängt (Nagra 1997, S. 447). Wird das Lager nun tiefer platziert, ist davon auszugehen, dass es erst später in das sich aufbauende, von der Topographie gesteuerte Fliesssystem gelangt und damit die Fliesszeiten zum Exfiltrationsgebiet verlängert werden (zusätzlich zum Trend geringerer Durchlässigkeiten mit grösserer Tiefe).

Der heutige Kenntnisstand wird als geeignet beurteilt, um für die Testrechnungen die relevanten Exfiltrationspfade zu identifizieren. Diese werden benutzt, um typische Exfiltrationsorte festzulegen (vgl. Kap. 4.7).

Die für SGT Etappe 2 vorgesehenen hydrogeologischen Modelle werden unter anderem zur Überprüfung der Exfiltrationspfade verwendet (Kap. 8.4); die Resultate aus diesen Arbeiten werden in die provisorischen Sicherheitsanalysen für Etappe 2 einfliessen. Weiter sind für SGT Etappe 2 Modellierstudien zur Langzeitentwicklung vorgesehen (Kap. 8.4), deren Erkenntnisse auch in die Beurteilung der relevanten Exfiltrationspfade einfliessen.[43]

PB-8 / Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen

Der Zugang zu den Tiefenlagern erfolgt im Allgemeinen über die überlagernden Gesteinsformationen. Im Fall des Standortgebiets Bözberg sind auch Zugänge denkbar, welche Gesteine im Liegenden des Opalinustons durchfahren (z.B. im Bereich der Jura-Hauptüberschiebung).

Der Bau der Zugangsbauwerke stellt verschiedene geotechnische und hydrogeologische Herausforderungen, die nachfolgend besprochen werden.

Wassereinbrüche (> 100 l/s) sind insbesondere beim Durchfahren von verkarstetem Oberen Malm möglich. Die zu erwartenden Wasserdrücke lassen sich aus der Tiefenlage resp. den Potenzialverteilungen abschätzen. Eine bedeutende rezente Verkarstung im Oberen Malm ist insbesondere am Südranden zu erwarten. Der Paläokarst unter grösserer Überlagerung (unter der regionalen Vorflut) ist meist mit eozänen Bolustonen verfüllt, so dass die hydraulische Durchlässigkeit im Vergleich mit rezent verkarstetem Oberem Malm deutlich herabgesetzt ist. Bedeutende Wassereinbrüche können aber trotzdem nicht ausgeschlossen werden. Karstwasser-

[43] Für das Standortgebiet Wellenberg werden die Unterlagen aus der Geosynthese (Nagra 1997) generell als genügend beurteilt für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2. Die Arbeiten für Wellenberg werden sich auf eine Überprüfung der Unterlagen beschränken.

einbrüche können auch in anderen Karbonatgesteinen, insbesondere in oberflächennaher Lage erfolgen (z.B. Hauptrogenstein, Muschelkalk). Diese sind insbesondere in Zusammenhang mit tektonischen Trennflächen möglich, welche Wasserwegsamkeiten bilden. Die Lage der quartären Felsrinnen ist mittlerweile gut bekannt (Nagra 2008c, Beilage 5.2-28) und der Kenntnisstand wird weiter verbessert, so dass ihnen bei der Festlegung der Linienführung einer Rampe ausgewichen werden kann.

Das Quellen von Mergeln und Tonsteinen betrifft insbesondere die Wirt- und Rahmengesteine, aber auch tonreiche Lithologien der Molasse. Grundlagen für die Beurteilung liefern die verfügbaren mineralogischen Daten bzw. die existierenden Quellversuche.

Bei Tunnels im Gipskeuper kann es zur Umwandlung von Anhydrit zu Gips kommen. Dies ist mit einer bedeutenden Volumenzunahme verbunden und kann grosse bautechnische Schwierigkeiten verursachen. Bekannt in diesem Zusammenhang ist beispielsweise der Autobahntunnel Belchen, wo bedeutende Sanierungsmassnahmen notwendig wurden (Hauber et al. 2005). In oberflächennaher Lagerung kann auch Gipskarst auftreten.

Mit dem Auftreten von Gas (insbesondere CH_4, H_2S, CO_2) ist in verschiedenen Formationen zu rechnen (Arbeitsgruppe Gasführung im Untergrund 2002; Nagra 2008c, Kapitel 5.2.6). Gaszutritte wurden beispielsweise in der Molasse, den Malmkalken, der Palfris-Formation und dem Muschelkalk angetroffen. In den meisten Fällen werden nur kurzzeitige Gasbläser erwartet, länger andauernde Entgasungen können aber nicht vollständig ausgeschlossen werden (Bsp. Seelisberg, Schneider 1984, Kellerhals & Haefeli AG 2010a und b).

Bautechnische Schwierigkeiten aufgrund von Störungszonen, ungünstiger Gesteinslagerung und Gesteinstyp sind basierend auf den geologischen Kenntnissen im Allgemeinen prognostizierbar und können bei der Festlegung der Linienführung der untertägigen Erschliessung berücksichtigt werden.

Auftreten von aggressivem Bergwasser, beispielsweise bekannt vom Autobahntunnel Bözberg (Wegmüller 2001), kann aufgrund der regionalen hydrogeologischen und hydrochemischen Kenntnisse gut abgeschätzt und durch eine geeignete Auslegung der Bauwerke berücksichtigt werden.

Die Bedeutung der einzelnen Punkte hängt stark von der gewählten Linienführung ab.

Die vorhandenen Unterlagen zu den geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnissen in den überlagernden Gesteinen werden als genügend beurteilt, um die für diesen Bericht notwendige Analyse der bautechnischen Machbarkeit (Erschliessung der Lagerfelder, Kap. 5.4) durchzuführen.

Für SGT Etappe 2 werden die geologisch-geotechnischen Kenntnisse und die Erfahrungen aus den Tunnelbauwerken der Schweiz (insbesondere Tunnels im Jura) erfasst (vgl. Kap. 8.4), mit dem Ziel, fundiert zwischen bautechnisch günstigen und ungünstigen Linienführungen unterscheiden zu können (Kellerhals & Haefeli AG 2010a und b), was dann bei der detaillierten Planung der Zugangsbauwerke (z.B. Linienwahl, Vortriebsart, Art der Erschliessung, Vorauserkundung) berücksichtigt wird. Falls notwendig, werden die Ergebnisse auch die Festlegung des Standorts der Empfangsanlage (Zugang Untertag) mit beeinflussen. Weiter werden die geotechnisch-hydrogeologischen Verhältnisse entlang der vorgeschlagenen Linienführungen für die Zugangsbauwerke beschrieben.

PB-10 / Nutzungskonflikte hinsichtlich Mineralquellen und Thermen

Die Hydrogeologie und Hydrochemie der Mineralquellen und Thermen der Nordschweiz wurden bereits in früheren Berichten und Publikationen dargestellt (z.B. Nagra 2002a, Pearson et al. 1991, Schmassmann 1990, Biehler et al. 1993, Schmassmann et al. 1984). Im Rahmen von Etappe 1 erfolgte eine erste Beurteilung von potenziellen Nutzungskonflikten (Nagra 2008c).

Dem potenziellen Konflikt zwischen der Nutzung von Mineralquellen und Thermen und dem Bau der Zugangsbauwerke soll auf verschiedene Art begegnet werden:

- Durch eine geeignete Auswahl der Oberflächenstandorte (Einbezug in die raumplanerischen Kriterien, Interessensabwägung)
- Durch eine angepasste Wahl der Linienführung der Zugangsbauwerke (Rampe, Schacht)
- Durch technische Massnahmen (Abdichtungen)

Durch eine geeignete Kombination dieser Massnahmen können nachteilige Auswirkungen auf Mineralquellen und Thermen vermieden werden. Für SGT Etappe 2 werden Konzepte für den Schutz von Mineralquellen und Thermen erarbeitet. Das Thema der Nutzungskonflikte hinsichtlich Mineralquellen und Thermen ist auch ein Kriterium der Raumplanung und wird in Etappe 2 explizit berücksichtigt.

PB-11 / Oberflächensituation

Die Wahl der Standorte für die Oberflächenanlagen erfolgt unter anderem nach raumplanerischen Kriterien. Weiter muss der Bau der Zugangsbauwerke durch die oberflächennahen Aquifere unter Berücksichtigung der Auflagen des Gewässerschutzes (kantonale Gewässerschutzkarten, GSchG, GSchV) und weiterer Einschränkungen (z.B. Altlasten, bestehende Nutzungen) möglich sein. Die Vorgehensweise für die Umsetzung des Grundwasserschutzes bei Untertagebauwerken ist in BUWAL (1998) dargelegt (Szenarienanalyse).

Zentral ist insbesondere der Grundwasserschutz in Zusammenhang mit dem Durchfahren von Lockergesteinsaquiferen. Hier existieren im Allgemeinen gute Planungsgrundlagen, insbesondere hydrogeologische Karten mit Schutzzonen und den Grundwasserständen.

Beurteilung des Kenntnisstands bezüglich der hydrogeologischen Verhältnisse (Fazit)

Der in vorliegendem Kapitel diskutierte Kenntnisstand bezüglich der hydrogeologischen Verhältnisse in den geologischen Standortgebieten ist geeignet, um die für die Testrechnungen benötigen Grundlagen abzuleiten und ausgewählte Aspekte der bautechnischen Machbarkeit abzuklären (Erschliessung der untertägigen Lagerfelder, Kap. 5.4).

Für SGT Etappe 2 werden die Unterlagen zu den hydrogeologischen Verhältnissen in den geologischen Standortgebieten überprüft und konsolidiert (vgl. Kap. 8.4). Die für Etappe 2 durchgeführten Arbeiten werden in den provisorischen Sicherheitsanalysen und für den sicherheitstechnischen Vergleich (inkl. bautechnische Machbarkeit) in SGT Etappe 2 berücksichtigt.

4.5 Geologische Langzeitentwicklung

4.5.1 Relevante Prozesse und Parameter

Die für die Sicherheit relevanten Prozesse und Parameter mit Bezug zur geologischen Langzeitentwicklung in den geologischen Standortgebieten aus Tab. 3.2-1 sind in Tab. 4.5-1 zusammengefasst. Ein Teil der relevanten Prozesse und Parameter wird direkt für die quantitative Beurteilung der Sicherheit (in Tab. 4.5-1 mit PG für geologische Merkmale gekennzeichnet) verwendet. Diese Prozesse und Parameter fliessen teilweise auch in die qualitative Bewertung ein, zusammen mit weiteren Prozessen und Parametern (in Tab. 4.5-1 mit PI gekennzeichnet), die ausschliesslich für die qualitative Bewertung verwendet werden.

Tab. 4.5-1: Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zur regionalen und lokalen Langzeitentwicklung in den geologischen Standortgebieten.

Die relevanten Prozesse und Parameter für die Sicherheit (PG – geologische Merkmale) fliessen in die quantitative Analyse der Sicherheit und in die standortspezifische Lagerauslegung ein und werden teilweise auch für die qualitative Bewertung verwendet, während die weiteren relevanten Prozesse und Parameter (PI) ausschliesslich in die qualitative Bewertung einfliessen.

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	Präzisierung
i) Relevante Prozesse und Parameter für die Sicherheit (PG – geologische Merkmale)		
PG-2	Glazial übertiefte Felsrinnen	
PG-4	Zeitliche Entwicklung regionale Erosionsbasis	
PG-28	Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung	
PG-30	Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung	
ii) Weitere relevante Prozesse und Parameter (PI – ausschliesslich qualitative Bewertung)		
PI-2	Geodynamische und neotektonische Aktivität	unter Berücksichtigung der Häufigkeit und Beschaffenheit von reaktivierbaren Störungszonen, der Verlängerung von Störungszonen in lateraler und vertikaler Richtung und der Seismizität
PI-3	Vulkanische Aktivität	Wahrscheinlichkeit zukünftiger Aktivität (im Betrachtungszeitraum)
PI-4	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation [1)]	siehe Tab. 4.3-1

[1)] Die unabhängigen Evidenzen werden insbesondere in Zusammenhang mit den Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs diskutiert; für SGT Etappe 2 wird geprüft, inwieweit auch unabhängige Evidenzen zur Langzeitentwicklung explizit in die Argumentation einzubeziehen sind.

Zu den für die Sicherheit wichtigen Prozessen und Parametern bezüglich der geologischen Langzeitentwicklung gehören die zeitliche Entwicklung der regionalen Erosionsbasis, glazial übertiefte Felsrinnen und die zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie und des Klimas. Diese Prozesse und Parameter bestimmen das Ausmass der regionalen und lokalen Erosion in den verschiedenen geologischen Standortgebieten. Die für weitere Aspekte der Neotektonik relevanten Prozesse und Parameter werden in Kap. 4.2 diskutiert; dies betrifft die Möglichkeit von differenziellen Bewegungen an bestehenden Störungszonen, denen mit den Lagerkammern ausgewichen wird.

Die Diskussion des Kenntnisstands sowie die Festlegung und Begründung der quantitativen Informationen bezüglich dieser Prozesse und Parameter in den geologischen Standortgebieten ist im Kap. 4.5.2 zu finden.

4.5.2 Evaluation der Information zu den Prozessen und Parametern sowie des entsprechenden Kenntnisstands

PG-4, PG-28 / Zeitliche Entwicklung der regionalen Erosionsbasis und der lokalen Topographie im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung, PG-2 / Glazial übertiefte Felsrinnen

Für die Erosion ist einerseits die Tiefenlage bzw. Überlagerung eines geologischen Tiefenlagers relevant (vgl. Kap. 4.2), andererseits ist wichtig, wie weit diese Überlagerung innerhalb des Betrachtungszeitraums abgetragen wird. Diesbezüglich wird als erstes die Entwicklung der regionalen Erosionsbasis betrachtet. Speziell dort, wo die Überlagerung eher gering ist, sind aber auch die lokal bestehende Topographie und das Potenzial zu deren Abtragung ('Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung') wichtig und werden spezifisch betrachtet. Generell wird zwischen Erosion über dem regionalen Vorflutniveau und glazialer Tiefenerosion, welche unter das Vorflutniveau greifen kann, unterschieden.

In der Nordschweiz sind verschiedene Relikte alter Aufschotterungsniveaus erhalten, welche gut untersucht sind und Reste früherer Talniveaus darstellen (z.B. Graf 1993, 2009, 2010, Müller et al. 2002). Das älteste dieser Niveaus (höhere Deckenschotter) konnte am Irchel beim Zusammenfluss von Töss und Rhein datiert werden (Bolliger 1996) und dokumentiert ein Einschneiden von ungefähr 300 m über einen Zeitraum von ca. 2 Millionen Jahren. Daraus lässt sich für diese Region bezüglich der Veränderung der regionalen Erosionsbasis ein Durchschnittswert von ca. 100 – 150 m pro Million Jahre ableiten. Die Rekonstruktion der Versenkungsgeschichte basierend auf Daten aus den Nordschweizer Bohrungen (Benken, Herdern-1, Weiach; Mazurek et al. 2006) ergibt eine Erosion von 1050 m über die letzten 5 bis 10 Millionen Jahre, was einer durchschnittlichen Erosionsrate von ca. 100 – 200 m pro Million Jahre entspricht. Diese Raten widerspiegeln eine relative Absenkung des regionalen Vorflutniveaus.

Die Entwicklung der regionalen linearen Eintiefung ist einerseits gesteuert durch die regionale Hebung, andererseits ist die Reife[44] eines Flusssystems wichtig. Ist ein Flusssystem unreif (sichtbar z.B. durch Knickpunkte im Längsprofil), so kann die regionale lineare Eintiefung die regionale Hebung übersteigen. Ein Ungleichgewicht im Flussprofil kann unter anderem dann entstehen, wenn der Weg zur Erosionsbasis durch eine Migration der Wasserscheide (z.B. bedingt durch tektonische Bewegungen oder Aufschotterung) plötzlich markant kürzer und

[44] Längsprofil des Flusslaufs entspricht einem idealen Flussprofil.

dadurch der durchschnittliche Gradient erhöht wird. Dies ist z.B. vor ca. 4 – 5 Millionen Jahren geschehen, als die Ur-Aare von der Donau in den Ur-Doubs in Richtung Bresse-Graben umgeleitet wurde (Ziegler & Fraefel 2009). Solche grossräumigen Umlenkungen mit einer massiven Verkürzung der Fliesswege sind in der Nordschweiz auch im Betrachtungszeitraum für das HAA-Lager nicht zu erwarten. Die grossen Flusssysteme sind aber noch nicht vollständig im Gleichgewicht (z.B. Rückerosion beim Rheinfall), so dass zusätzlich zur Einschneidung aufgrund der regionalen Hebung mit einer gewissen Rückerosion gerechnet werden muss. Für das Standortgebiet Zürich Nord-Ost wurde diese von Müller et al. (2002) aufgrund des Rheinprofils auf maximal 100 m geschätzt.

Während für die Entwicklung der regionalen Erosionsbasis für alle Standortgebiete in der Nordschweiz von ähnlichen Werten ausgegangen werden kann, variieren die Tiefenlage der Lagerebene und das Potenzial für lokale Einebnung deutlich. In den HAA-Standortgebieten Zürich Nord-Ost und Nördlich Lägeren ist die Überdeckung von Top Wirtgestein in grossen Teilen 500 – 900 m, während sie am Bözberg meist zwischen 400 und 550 m beträgt. Am Bözberg besteht ausserdem aufgrund der bestehenden Topographie (ca. 150 – 300 m Höhendifferenz zwischen Bözbergplateau und der Aare bei Villigen) ein vergleichsweise hohes Potenzial zur Abtragung der lokalen Topographie. Aus diesem Grund sind für SGT Etappe 2 Modellierungsstudien zur Erosion für das Standortgebiet Bözberg geplant (vgl. Kap. 8.5). Innerhalb des Standortgebiets besteht die Möglichkeit, das Lager im Süden zu platzieren, wo die Tiefenlage vergleichsweise am höchsten ist. Für das Standortgebiet Wellenberg kann auf die vorhandenen Unterlagen abgestützt (Geosynthese, Nagra 1997) und insbesondere die spezifisch für den Wellenberg durchgeführte Erosionsstudie (Klemenz 1993) verwendet werden.

Betreffend glaziale Tiefenerosion sind die heutige Morphologie und die geographische Verteilung der übertieften Rinnen zu berücksichtigen. Wie bereits in Kap. 4.2 diskutiert, wurden die wichtigsten Rinnen identifiziert, wenn auch betreffend genauer Morphologie und Tiefgang Ungewissheiten bestehen. Die Beilage 5.2-28 in Nagra (2008c) zeigt, dass die meisten markanten Übertiefungen im externen Alpenvorland im Bereich der Molasse, d.h. südlich des Ausbisses der Malmkalke auftreten, bis zu einige 100 m tief sein können und oft, aber nicht immer unter den heutigen morphologischen Tälern liegen. Die Malmkalke werden im Ausbissbereich an verschiedenen Orten durch relativ schmale Kluse gequert. Nördlich des Ausbisses der Malmkalke finden sich nur noch vergleichsweise wenige und flachere Übertiefungen, namentlich im unteren Aaretal zwischen Windisch und Böttstein. Im Klettgau findet sich zwar eine Quartärbedeckung von stellenweise mehr als 100 m, der Top der Felsoberfläche fällt aber entlang der Talachse stets Richtung W bis SW ab, d.h. das Tal ist nicht glazial übertieft. Graf & Hofmann (2000) postulieren zudem am Ostrand des Standortgebiets Südranden eine quer zum Klettgautal verlaufende Rinne unbekannter Tiefe, deren Existenz aber durch Bohrungen nicht belegt ist.

Generell ist eine hohe Überdeckung in Bezug auf glaziale Tiefenerosion von Vorteil. In den Standortgebieten Nördlich Lägeren und Zürich Nord-Ost ist die Überdeckung gross (Lagerebene in 550 – 950 m unter Top Fels). Zudem besteht die Möglichkeit, den bestehenden tieferen Felsrinnen mit dem Lager auszuweichen. In beiden Standortgebieten befinden sich oberhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mächtige kompetente Kalke. Im Standortgebiet Bözberg ist die Überdeckung geringer. Es liegt aber ausserhalb der Haupttäler und nördlich des Ausbisses des Faltenjura, und es dürfte auch in Zukunft von deutlich weniger Gletschervorstössen betroffen sein als die Standortgebiete Zürich Nord-Ost und Nördlich Lägeren.

Für SMA ist die glaziale Tiefenerosion in der Nordschweiz aufgrund des Betrachtungszeitraums weniger relevant. Eine grössere Vergletscherung im Alpenvorland wird erst gegen Ende des Betrachtungszeitraums erwartet und dürfte in groben Zügen der heutigen Topographie folgen. Diejenigen SMA-Standortgebiete, in welchen die Überdeckung vergleichsweise gering ist

(Südranden, Bözberg, Teile von Jura-Südfuss) liegen ausserhalb des Maximalstands der letzten Vergletscherung; die Gebiete werden also nur von sehr grossen Vorlandvereisungen und zu einem relativ späten Zeitpunkt innerhalb einer Kaltzeit erreicht. Im Fall des Standortgebiets Wellenberg ist einerseits die bestehende Topographie so stark, dass Eisfluss und Erosion auf die bestehenden Täler fokussiert werden (vgl. Klemenz 1993). Andererseits besteht bei der Wahl der Lagerebene grosse Flexibilität bezüglich der Tiefenlage.

Die vorhandenen Informationen zur zeitlichen Entwicklung der regionalen Erosionsbasis und der lokalen Topographie sowie die Information zu glazial übertieften Felsrinnen wird als genügend beurteilt, um ihre Bedeutung für die Testrechnungen (Kap. 6.2.5) bzw. für die Anordnung der Lagerkammern (Kap. 5.3) zu analysieren.

Die Nagra sieht vor, die Kenntnisse über die regionale und lokale Erosion generell und insbesondere im HAA-Standortgebiet Bözberg anhand von Erosionsmodellen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 zu vertiefen. Bezüglich der glazialen Tiefenerosion sind eine Überarbeitung der Karte der Felsoberfläche sowie Datierungen von Talfüllungen und Arbeiten zur Verbesserung des Prozessverständnisses geplant (Kap. 8.5).

PG-30 / Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung

Zur Beschreibung der klimatischen Verhältnisse im Hinblick auf die geologische Langzeitentwicklung wird von einem anhaltenden Eishausklima ausgegangen[45]. Dabei werden die folgenden zeitlichen Phasen unterschieden:

- Heute bis ca. 60'000 Jahre (Phase 1, relevant für SMA- und HAA-Lager): Zwischeneiszeitliche klimatische Bedingungen, die den heutigen Bedingungen ähnlich sind (begrenzte Schwankungen bezüglich Temperatur und Niederschlag).
- Ca. 60'000 Jahre bis ca. 100'000 Jahre (Phase 2, relevant für SMA- und HAA-Lager): Wechselnde klimatische Bedingungen mit moderaten kurzen Kaltzeiten, in denen aber keine grossräumigen Gletschervorstösse bis ins externste Alpenvorland zu erwarten sind, und kürzere Warmzeiten, die den heutigen zwischeneiszeitlichen Bedingungen ähnlich sind (begrenzte Schwankungen bezüglich Temperatur und Niederschlag).
- Ca. 100'000 Jahre bis 1 Million Jahre (Phase 3, nur für HAA-Lager relevant): Nach ca. 100'000 Jahren ist eine ausgeprägte Kaltzeit mit Gletschervorstössen bis ins Alpenvorland zu erwarten. Danach Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten im Rhythmus von ca. 100'000 Jahren (entsprechend den Milankovich-Zyklen), mit kleineren und grösseren Gletschervorstössen ins Mittelland.

Es ist geplant, für SGT Etappe 2 das Spektrum der plausiblen Klimaszenarien im Hinblick auf die geologische Langzeitentwicklung vertieft zu untersuchen und zu bewerten (vgl. Kap. 8.5).

PI-2 / Geodynamische und neotektonische Aktivität

Im Rahmen der SGT Etappe 1 wurde der Stand des Wissens bezüglich der geodynamischen und neotektonischen Aktivität aufgrund einer umfassenden Literaturstudie dargelegt (Kapitel 2 in Nagra 2008c). Im Hinblick auf spätere Etappen der Lagerrealisierung werden die geodätischen und seismischen Messnetze zurzeit verdichtet (Kap. 8.5). Relevante Ergebnisse werden auf-

[45] Als Alternative zum Eishausklima kann nicht ausgeschlossen werden, dass der durch menschliche Tätigkeiten verursachte Treibhaus-Effekt eine künstliche Warmzeit erzeugt, die über längere Zeiträume (bis mehrere Hunderttausend Jahre) anhalten könnte (Archer & Ganopolski 2005).

grund der sehr geringen Bewegungsraten und der geringen Frequenz seismischer Ereignisse frühestens nach einigen Jahren erwartet. Im Rahmen der Etappe 2 werden die neuen Erkenntnisse aus seismologischen und geodätischen Messungen berücksichtigt und zudem geomorphologische Studien zur Neotektonik durchgeführt (insbesondere Auswertung von hochauflösenden Geländemodellen).

PI-3 / Vulkanische Aktivität

Die letzte vulkanische Aktivität, welche auch Auswirkungen auf die geologischen Verhältnisse der Schweiz hatte, erfolgte vor 15.5 – 7 Ma im Gebiet Hegau (siehe Nagra 2008c und darin zitierte Referenzen). Eine Wiederauflebung der Aktivität der seit 7 Ma erloschenen Vulkane des Hegaus innerhalb der nächsten Million Jahre kann nach einer Expertenumfrage, welche in Zusammenhang mit der Erarbeitung eines Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte in Deutschland durchgeführt wurde, ausgeschlossen werden (Jentzsch 2001, AkEnd 2002). Hinsichtlich vulkanischer Aktivität sind deshalb keine weiteren Arbeiten vorgesehen.

Beurteilung des Kenntnisstands bezüglich der geologischen Langzeitentwicklung (Fazit)

Der in vorliegendem Kapitel diskutierte Kenntnisstand bezüglich der geologischen Langzeitentwicklung ist ausreichend, um für die relevanten Prozesse und Parameter die erforderlichen konzeptuellen Modelle und Parameterwerte abzuleiten und darauf basierend abdeckende Rechenfälle für die Testrechnungen festzulegen.

Die Informationen und Datensätze werden – teilweise basierend auf ergänzenden Untersuchungen und Studien – in SGT Etappe 2 überprüft. Teilweise werden die Unterlagen in ausgewählten Standortgebieten vertieft (PG-4 / PG-28 / PG-30 / Zeitliche Entwicklung der regionalen Erosionsbasis, der lokalen Topographie und des Klimas im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung) bzw. ergänzt (PG-2 / Glazial übertiefte Felsrinnen), vgl. dazu die Zusammenstellung der bereits begonnenen bzw. geplanten Arbeiten für SGT Etappe 2 in Kap. 8.5.

Im Rahmen der provisorischen Sicherheitsanalysen und für den sicherheitstechnischen Vergleich in SGT Etappe 2 werden die für Etappe 2 neu erarbeiteten Informationen berücksichtigt.

4.6 Eigenschaften der technischen Barrieren

4.6.1 Relevante Prozesse und Parameter

Die für die Sicherheit relevanten Prozesse und Parameter mit Bezug zu den Eigenschaften der technischen Barrieren aus Tab. 3.2-1 sind in Tab. 4.6-1 zusammengefasst. Diese Prozesse und Parameter fliessen direkt in die Testrechnungen zur Ermittlung der Dosisintervalle ein. Parameterwerte bzw. Modell-Konzepte für Prozesse und Parameter, welche durch die geologischen Randbedingungen, durch lagerbedingte Einflüsse oder wegen des Langzeitverhaltens der technischen Barrieren verändert werden können, werden in Kap. 6.2.2, 6.2.3 und 6.2.6 behandelt. Die transportrelevanten Eigenschaften des Interface BE/HAA-Lagerstollen/Wirtgestein (PT-6, vgl. Tab. 3.2-1) werden im Kontext des gesamten Barrierensystems evaluiert und werden in Kap. 6.2.4 diskutiert.

Zu den für die Sicherheit wichtigen Prozessen und Parametern bezüglich der technischen Barrieren gehören die Behälterlebensdauer, die Auflösungsraten der Brennstoffmatrix und der BE-Hüllrohre, die geochemischen Transportparameter, welche für die Radionuklidrückhaltung

in den technischen Barrieren wichtig sind (Löslichkeitslimiten, Sorptionskoeffizienten) sowie die vorherrschenden Transportprozesse im Nahfeld (Advektion, Diffusion) und ihre Parametrisierung.

Die Diskussion des Kenntnisstands sowie die Festlegung und Begründung der quantitativen Informationen (Referenzwerte und Bandbreiten) bezüglich dieser Prozesse und Parameter ist im Kap. 4.6.2 bzw. in den zugehörigen Anhängen zu finden.

Tab. 4.6-1: Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zu den technischen Barrieren.

Die relevanten Prozesse und Parameter für die technischen Barrieren (PT) fliessen direkt in die quantitative Analyse der Sicherheit ein.

Nr.	**Relevante Prozesse und Parameter für die technischen Barrieren (PT)**	**Präzisierung**
PT-1	Behälterlebensdauer BE/HAA	-
PT-2	Auflösungsrate für Brennstoffmatrix und Hüllrohre BE	-
PT-3	Löslichkeitslimiten im Nahfeld BE/HAA/LMA	-
PT-4	Sorptionskoeffizienten im Nahfeld	Unter Berücksichtigung einer grundsätzlich möglichen Degradation der Verfüllung (zementhaltige Verfüllung)
PT-5	Advektion bzw. Diffusion im Nahfeld	Dominierende Transportprozesse im Nahfeld (Zement, Bentonit)

4.6.2 Evaluation der Information zu den Prozessen und Parametern sowie des entsprechenden Kenntnisstands

SMA- und LMA-Lager

Für die generelle Beschreibung des SMA/LMA-Nahfelds wird auf Kapitel 2.5.3.1 in Nagra (2008d) verwiesen. Im Folgenden wird auf die relevanten Prozesse und Parameter gemäss Tab. 4.6-1 für das SMA/LMA-Nahfeld eingegangen.

PT-3 / Löslichkeitslimiten im Nahfeld LMA

Die elementspezifischen Löslichkeitslimiten sind in Anbetracht der geringen Radionuklidkonzentrationen in einem SMA-Lager nur von untergeordneter Bedeutung und werden in den Modellrechnungen konservativ nicht berücksichtigt.

Im Zementnahfeld eines LMA-Lagers trägt neben der Sorption auch die beschränkte Löslichkeit zur chemischen Rückhaltung der Radionuklide bei. Deren Konzentrationen im Porenwasser werden durch die entsprechenden elementspezifischen Löslichkeitslimiten begrenzt, d.h. die Gesamtmenge eines Elements (Summe aller Isotope) wird bei konstanter Konzentration durch Ausfällung und Auflösung einer Festphase geregelt. Löslichkeitslimiten werden für die Modellrechnungen meist für reine Phasen quantifiziert, die unter den durch Zement gepufferten

chemischen Bedingungen gebildet werden können (Berner 2003). Die Bildung von Mischphasen, d.h. der Einbau von Radionukliden in Zementminerale und Sekundärphasen wird in der Regel konservativ nicht berücksichtigt, obwohl solche Prozesse zur Rückhaltung in Zement beitragen.

Basierend auf einem breiten Kenntnisstand am PSI werden Löslichkeitslimiten mit geochemischer Modellierung hergeleitet, welche sich auf eine vom PSI kompilierte thermodynamische Datenbank (Hummel et al. 2002) abstützen. Die errechneten Werte werden mit langjährigem Fachwissen auf ihre Konsistenz geprüft und Lücken werden unter Zuhilfenahme von Analogien geschlossen. Die zugrunde liegende thermodynamische Datenbank wird für SGT Etappe 2 aufdatiert.

Bei der Herleitung der Löslichkeitslimiten wird neben den erwarteten Werten (Referenzwerten) auch der Bereich der Ungewissheiten mit unteren (optimistischen) und oberen (pessimistischen) Eckwerten angegeben (siehe Tab. A6-4). Diese Werte sind dem Bericht Nagra (2008i) entnommen. Sie wurden im Wesentlichen, unter Berücksichtigung der entsprechenden HSK-Kommentare (HSK 2005), vom Entsorgungsnachweis übernommen und sind in Berner (2003) erläutert. Damit werden ein Referenzfall (mit Referenzwerten) und gemäss Vorgabe des ENSI auch ein abdeckender Fall mit erhöhten elementspezifischen Löslichkeitslimiten (obere Eckwerte) analysiert.

Störstoffe im Abfall und deren Abbauprodukte können zum Beispiel durch Komplexierung der Radionuklide deren Löslichkeit erhöhen (Nagra 2008i). Abfälle, welche Störstoffe in relevanter Konzentration enthalten, werden darum separat in räumlich getrennten Lagerkammern eingelagert und für die Testrechnungen wird ein auf die vorherrschenden Bedingungen angepasster Datensatz der Löslichkeitslimiten verwendet.

PT-4 / Sorptionskoeffizienten im Nahfeld

Durch Sorption werden viele Radionuklide im Nahfeld der SMA- und LMA-Lager chemisch sehr effizient zurückgehalten. Diese Rückhaltung wurde am PSI durch jahrelange Forschung quantifiziert. Diese beinhaltet Sorptionsmessungen an Zement und dessen Mineralen. In erster Priorität wurden sicherheitsrelevante Radioelemente gemessen (siehe z.B. Tits et al. 2003; Wieland et al. 2008), welche auch als Vertreter für wichtige Gruppen von chemischen Elementen verwendet werden können; noch bestehende Lücken werden fortlaufend geschlossen. Die Sorptionsmessungen werden durch spektroskopische Untersuchungen ergänzt, um die Sorption der Radionuklide an den Zementmineralen oder den Einbau in diese Minerale mechanistisch zu verstehen (siehe z.B. Vespa et al. 2006).

Die oben beschriebenen Untersuchungen, ergänzt durch Messwerte aus der Literatur, bilden die Grundlage für die Erstellung der Sorptionsdatenbanken. Es wird vereinfachend angenommen, dass der Zementstein (bzw. die verschiedenen Zementphasen) in der Abfallmatrix, in der Verfüllung, in den Wänden der Endlagerbehälter und in der Zementverfüllung zwischen den Endlagerbehältern die sorbierende Festphase ist; die Sorption auf den Aggregaten und weiteren Festphasen wird vernachlässigt. In den von der Nagra in SGT Etappe 1 vorgeschlagenen, wenig durchlässigen Wirtgesteinen degradiert der Zement wenig und bleibt während der betrachteten Zeiträume für die Sorption erhalten (vgl. Diskussion in Kap. 6.2.6).

In der Sicherheitsanalyse wird die Sorption durch die Verteilungskoeffizienten Zementphasen – Porenwasser (Sorptionskoeffizienten resp. K_d-Werte in m^3/kg) quantifiziert. In den Testrechnungen werden die Werte aus Nagra (2008i) verwendet; diese werden für die provisorischen Sicherheitsanalysen der Etappe 2 aufdatiert. Bei der Herleitung der Sorptionskoeffizienten wird neben den erwarteten Werten (Referenzwerten) auch der Bereich der Ungewissheiten mit

oberen (optimistischen) und unteren (pessimistischen) Eckwerten angegeben (siehe Tab. A6-5). Diese Werte (Nagra 2008i) wurden im Wesentlichen, unter Berücksichtigung der entsprechenden HSK-Kommentare (HSK 2005), vom Entsorgungsnachweis übernommen und sind in Wieland & van Loon (2002) erläutert. Damit werden ein Referenzfall (mit Referenzwerten) und gemäss Vorgabe des ENSI auch ein abdeckender Fall mit tieferen elementspezifischen Sorptionskoeffizienten (untere Eckwerte) analysiert.

Störstoffe im Abfall und deren Abbauprodukte können durch Zementdegradation (CO_2-Entwicklung) oder Komplexierung der Radionuklide deren Sorption vermindern (Nagra 2008i). Abfälle, welche Störstoffe in relevanter Konzentration enthalten, werden darum separat in räumlich getrennten Lagerkammern eingelagert und für die Testrechnungen wird ein den vorherrschenden Bedingungen angepasster Datensatz der Sorptionskoeffizienten verwendet.

PT-5 / Advektion bzw. Diffusion im Nahfeld

Um eine gute Gasdurchlässigkeit und -speicherung zu gewährleisten, wird für die Verfüllung in und um die Endlagerbehälter ein poröser Zementmörtel verwendet, welcher eine relativ hohe Durchlässigkeit aufweist. Die räumliche Inhomogenität im SMA-Lager wird als gemittelt betrachtet, indem bei den Testrechnungen für die Abfallmatrix, für die oben erwähnten Verfüllungen und die Wände der Endlagerbehälter eine einheitliche, zeitlich konstante hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-6} m/s verwendet wird (Nagra 2008d). Ergebnisse der Sicherheitsanalysen sind gegenüber diesem Parameter nicht empfindlich, weil der Wasserfluss hauptsächlich durch das umgebende, wenig durchlässige Wirtgestein bestimmt wird. Die hydraulische Durchlässigkeit des Nahfeldmaterials wird deshalb in den Rechnungen nicht variiert.

Bei der Modellierung der Radionuklidfreisetzung aus dem LMA-Lager findet die hydraulische Durchlässigkeit keine Berücksichtigung, da angenommen wird, dass die Radionuklide zu jedem Zeitpunkt im Inneren der Lagertunnels homogen verteilt sind und ausschliesslich diffusiv aus den Lagertunnels freigesetzt werden. Dies ist aufgrund der sehr kleinen Durchlässigkeit des Opalinustons gerechtfertigt.

Auch bezüglich der Diffusion wird für das Nahfeld eines SMA-Lagers, bestehend aus Abfallmatrix, Verfüllung und Wänden der Endlagerbehälter und Zementverfüllung zwischen den Endlagerbehältern, vereinfachend ein räumlich homogener, zeitlich konstanter effektiver Diffusionskoeffizient von 2×10^{-10} m^2/s verwendet bei einer durchschnittlichen Porosität von 0.2 (Nagra 2008d); Ergebnisse der Sicherheitsanalysen sind auch gegenüber diesen Parametern wenig empfindlich; letztere werden darum nicht variiert.

Bei der Modellierung der Radionuklidfreisetzung aus dem LMA-Lager findet dieser Parameter keine Berücksichtigung, da konservativ angenommen wird, dass die Radionuklide, aufgrund ihrer im Zementnahfeld gegenüber dem umgebenden Opalinuston hohen Diffusion, zu jedem Zeitpunkt im Inneren der Lagertunnels homogen verteilt sind.

Im SMA- und LMA-Lager kann der Austausch von Porenwasser an der Grenzfläche des zementhaltigen Nahfelds zum Wirtgestein zu Auflösung und Ausfällung von Mineralen und folglich zu inhomogener Porosität führen. Daraus resultierende Versiegelungseffekte werden in den Testrechnungen sowohl für die hydraulische Durchlässigkeit als auch für die Diffusion konservativ vernachlässigt. Solche pH-Fahnen-Effekte beschränken sich auf wassergesättigte Bereiche des SMA/LMA-Nahfelds, sodass das Abführen von sich im Abfall bildendem Gas mindestens in den ungesättigten Bereichen wenig beeinflusst wird (Nagra 2008f).

Beurteilung des Kenntnisstands bezüglich der Eigenschaften der technischen Barrieren im SMA- und LMA-Lager (Fazit)

Viele Radionuklide, insbesondere Aktinide, werden im Zementnahfeld des SMA/LMA-Lagers wegen der günstigen geochemischen Bedingungen durch Sorption und im LMA-Lager auch durch eine limitierte Löslichkeit wirkungsvoll zurückgehalten. Mobile Radionuklide, wie ^{129}I, ^{79}Se, $^{14}C_{org}$ und ^{36}Cl sorbieren im Zementnahfeld nur schwach oder gar nicht und sind auch nicht löslichkeitslimitiert. Weil sie auch in der Geosphäre nicht oder nur sehr schwach sorbieren, dominieren sie trotz ihres kleinen Anteils am gesamten radioaktiven Inventar bzw. an der gesamten Radiotoxizität, oft die berechneten Dosen. Die geochemischen Bedingungen haben auf die Rückhaltung dieser Radioelemente nur einen geringen Einfluss.

Der Kenntnisstand bezüglich der geochemischen Eigenschaften und der hydraulischen Durchlässigkeit im Nahfeld des SMA/LMA-Lagers ist, abgestützt auf ein umfangreiches Forschungsprogramm, sehr hoch; die zuverlässige Ableitung der Rückhalte- und Transportparameter für die Testrechnungen ist gewährleistet. Die geochemischen Eigenschaften sind wegen der guten Pufferung durch den Zement wenig empfindlich gegenüber dem Einfluss des umgebenden Wirtgesteins (vgl. Kap. 6.2.6). Die benötigten Datensätze für die in Etappe 2 durchzuführenden provisorischen Sicherheitsanalysen werden nochmals aufdatiert.

BE/HAA-Lager

Für die generelle Beschreibung des BE/HAA-Nahfelds wird auf Kapitel 2.5.3.2 in Nagra (2008d) verwiesen. Im Folgenden wird auf die relevanten Prozesse und Parameter gemäss Tab. 4.6-1 für das BE/HAA-Nahfeld eingegangen.

PT-1 / Behälterlebensdauer BE/HAA

Untersuchungen zum Langzeitverhalten des Endlagerbehälters für BE/HAA zeigen, dass die Behälterlebensdauer mit grosser Wahrscheinlichkeit 10'000 Jahre übersteigt. Die Abnahme der ursprünglich 15 cm dicken Behälterwände infolge Lochfrass und flächenhafter Korrosion beträgt ca. 2 cm in 10'000 Jahren (Johnson & King 2003, King 2008). Die Wahrscheinlichkeit einer lokalen Rissbildung im Bereich der Schweissnähte (z.B. infolge Spannungsrisskorrosion oder durch Wasserstoff-induzierte Rissbildung) wird unter der Voraussetzung geeigneter Massnahmen zur Optimierung des Behälterverschlusses durch Schweissen und zur Reduktion der verbleibenden Spannungen im Bereich der Schweissnähte als sehr gering eingestuft (Turnbull 2009, Johnson & King 2003). Untersuchungen zeigen, dass für das alternative Behälterkonzept mit einer Kupferhülle und einem Innenbehälter aus Stahl eine Behälterlebensdauer im Opalinuston von über 100'000 Jahren zu erwarten ist (Johnson & King 2003).

In den Testrechnungen wird für die Behälterlebensdauer für BE/HAA ein Referenzwert von 10'000 Jahren verwendet. Gemäss Vorgabe des ENSI wird ferner ein abdeckender Rechenfall mit einer verkürzten hypothetischen Behälterlebensdauer für BE/HAA von 1'000 Jahren analysiert, was aufgrund der vorliegenden experimentellen Befunde als sehr konservativ eingestuft wird.

PT-2 / Auflösungsrate für Brennstoffmatrix und Hüllrohre BE

Im vergangenen Jahrzehnt wurde eine grosse Zahl von Untersuchungen zur Auflösung von abgebranntem Brennstoff unter Bedingungen durchgeführt, die mit den im Tiefenlager nach Behälterversagen vorherrschenden Bedingungen vergleichbar sind (vollständig sauerstofffreie

Verhältnisse und signifikante Wasserstoff-Überdrücke). Diese Experimente liefern klare Hinweise auf eine stark reduzierte Brennstoffauflösungsrate im Vergleich zu wassergesättigten Bedingungen mit und ohne Sauerstoffzufuhr (Carbol et al. 2009). Ferner zeigen Analysen der solchen Bedingungen ausgesetzten Brennstoffoberflächen, dass keine Oxidation stattfindet; dies deutet darauf hin, dass die Brennstoffoberflächen stabilisiert sind. Unter diesen Bedingungen ist eine direkte experimentelle Bestimmung der Auflösungsrate schwierig, und es könnte vielmehr eine löslichkeitslimitierte Brennstoffauflösung stattfinden.

Untersuchungen zur Auflösung von alpha-dotiertem UO_2 wurden von Ollila (2008) and Ollila & Oversby (2005, 2006) unter reduzierenden Bedingungen (im Beisein von anaerob korrodierendem Eisen) und bei sehr geringen Wasserstoffkonzentrationen durchgeführt. Die untersuchten Proben wiesen eine vergleichbare Alpha-Aktivität auf wie abgebrannter Brennstoff nach ca. 10'000 Jahren Zerfallszeit. Die Resultate zeigen keinen Hinweis auf eine erhöhte Auflösungsrate für alpha-dotiertes UO_2 gegenüber normalem UO_2. Die fraktionale Auflösungsrate liegt im Bereich von 10^{-7} pro Jahr, trotz der begrenzten Menge an vorhandenem Wasserstoff.

In den Testrechnungen wird angenommen, dass die Freisetzung eines gewissen Aktivitätsanteils ('Instant Release Fraction', IRF) sofort nach dem Versagen des Endlagerbehälters erfolgt (konservative Vernachlässigung des Einschlusses der Brennstofftabletten in den Hüllrohren), während die übrigen Anteile kongruent mit der sich auflösenden Brennstoffmatrix freigesetzt werden. Für das Isotop ^{14}C aus dem Brennstoff (inklusive IRF) wird eine anorganische Verbindungsform angenommen, während für ^{14}C aus den Zirkaloy-Hüllrohren (inklusive IRF aus den Hüllrohren) eine organische Form unterstellt wird. Damit enthält die IRF sowohl eine organische als auch eine anorganische Komponente für ^{14}C.

Für die Zirkaloy-Hüllrohre wird eine 20-prozentige IRF von ^{14}C angenommen (Nagra 2002c). Die übrigen Radionuklide aus den Hüllrohren werden kongruent mit der Hüllrohrkorrosion freigesetzt, wobei eine konstante Korrosionsrate von 3×10^{-5} a^{-1} unterstellt wird (Nagra 2002c).

Die im Referenzfall verwendeten fraktionalen Auflösungsraten für abgebrannte Brennelemente sind in Tab. A6-3 aufgeführt. Gemäss Vorgabe des ENSI wird ein abdeckender Rechenfall für abgebrannte Brennelemente mit einer gegenüber dem Referenzfall hundertfach erhöhten Auflösungsrate (Brennstoffmatrix und Brennelementhüllrohre) analysiert, was aufgrund der vorliegenden experimentellen Befunde als sehr pessimistisch eingestuft wird.

PT-3 / Löslichkeitslimiten im Nahfeld BE/HAA

Im Bentonit-Nahfeld des BE/HAA-Lagers trägt die beschränkte Löslichkeit neben der Sorption wesentlich zur chemischen Rückhaltung der Radionuklide bei. Deren Konzentrationen im Porenwasser werden durch die entsprechenden elementspezifischen Löslichkeitslimiten begrenzt, d.h. die Gesamtmenge eines Elements (Summe aller Isotope) wird bei konstanter Konzentration durch Ausfällung und Auflösung einer Festphase geregelt. Löslichkeitslimiten werden für die Modellrechnungen meist für reine Phasen quantifiziert, die unter den chemischen Bedingungen des Bentonitporenwassers gebildet werden können (Berner 2002). Ausser bei Radium, dessen Konzentrationslimite im Porenwasser sich auf den Einbau in Sulfate abstützt, wird die Bildung von Mischphasen, d.h. der Einbau von Radionukliden in Minerale inkl. Sekundärphasen, konservativ nicht berücksichtigt, obwohl solche Prozesse bei der Rückhaltung sicher eine Rolle spielen.

Basierend auf den breiten Kenntnissen am PSI werden Löslichkeitslimiten mit geochemischer Modellierung hergeleitet, welche sich auf die vom PSI kompilierte thermodynamische Datenbank (Hummel et al. 2002) abstützen. Für einen pH-Wert im neutralen Bereich, wie er im Bentonitporenwasser vorherrscht, sind die thermodynamischen Eigenschaften inkl. Löslichkeit

gut bekannt, insbesondere wegen des internationalen NEA-TDB-Projekts, welches solche Daten für wichtige Radioelemente sammelt, rezensiert und publiziert (siehe z.B. OECD Nuclear Energy Agency 2008). Die Nagra und das PSI sind an diesem Projekt beteiligt. Die errechneten Werte werden mit langjährigem Fachwissen auf ihre Konsistenz geprüft und Lücken werden unter Zuhilfenahme von Analogien geschlossen. Die zugrunde liegende thermodynamische Datenbank (Hummel et al. 2002) wird für SGT Etappe 2 aufdatiert, und die neuen Ergebnisse des oben genannten NEA-Projekts werden berücksichtigt.

Bei der Herleitung der Löslichkeitslimiten wird neben den erwarteten Werten (Referenzwerten) auch der Bereich der Ungewissheiten mit unteren (optimistischen) und oberen (pessimistischen) Eckwerten angegeben (siehe Tab. A6-6). Diese Werte sind dem Bericht Nagra (2008i) entnommen. Sie wurden im Wesentlichen, unter Berücksichtigung der entsprechenden HSK-Kommentare (HSK 2005), vom Entsorgungsnachweis übernommen und sind in Berner (2002) erläutert. Damit werden ein Referenzfall (mit Referenzwerten) und gemäss Vorgabe des ENSI auch ein abdeckender Fall mit erhöhten nuklidspezifischen Löslichkeitslimiten (obere Eckwerte) analysiert.

PT-4 / Sorptionskoeffizienten im Nahfeld

Ein wichtiger Rückhalte-Mechanismus der Verfüllung basiert auf der chemischen Wechselwirkung (Sorption) der Radionuklide mit den Mineraloberflächen des Bentonits. Das Hauptmineral im Bentonit ist Montmorillonit, welches auch dessen Sorptionseigenschaften dominiert.

Die Interaktion der Radionuklide mit den Mineraloberflächen des Bentonits wurde am PSI für die wichtigen und repräsentativen Radioelemente untersucht. Weil eine direkte Bestimmung in kompaktiertem Bentonit schwierig oder sogar unmöglich ist, wurde die Sorption in verdünnten Systemen (Batch-Messungen an aufgeschlämmten Bentonit- und Montmorillonitproben) gemessen (Bradbury & Baeyens 2003). Basierend auf solchen Messresultaten wurden thermodynamische Sorptionsmodelle entwickelt, welche die Sorption eines Elements über relevante Bereiche von chemischen Bedingungen (insbesondere auch pH-Wert und Salinität) quantifizieren können (Bradbury & Baeyens 2005). Die Forschungsgruppe am PSI ist an einem entsprechenden NEA-Sorptionsprojekt (OECD Nuclear Energy Agency 2001, Davis et al. 2005b), welches zum Ziel hat, solche Modelle zu standardisieren, massgeblich beteiligt.

Um Sorptionswerte, welche in verdünnten Systemen gemessen wurden, auf den kompaktierten Bentonit des Nahfelds übertragen zu können, wurden die gemessenen Werte mit Diffusionsmessungen an kompaktierten Bentonitproben (siehe PT-5, unten) abgeglichen.

Die oben beschriebenen Untersuchungen, ergänzt mit aus linearer Korrelation abgeleiteten Werten (Bradbury & Baeyens 2005) und Messwerten aus der Literatur, bilden die Grundlage für die Erstellung der Sorptionsdatenbanken (Bradbury & Baeyens 2010). In der Sicherheitsanalyse wird die Sorption durch die Verteilungskoeffizienten Bentonitminerale – Porenwasser (Sorptionskoeffizienten resp. K_d-Werte in m^3/kg) quantifiziert. Die von Bradbury & Baeyens (2003) hergeleiteten Werte – welche die Basis für die in den Testrechnungen verwendeten Parameterwerte sind – werden für die provisorischen Sicherheitsanalysen der Etappe 2 aufdatiert. Bei der Herleitung der Sorptionskoeffizienten wird neben den erwarteten Werten (Referenzwerten) auch der Bereich der Ungewissheiten mit oberen (optimistischen) und unteren (pessimistischen) Eckwerten angegeben (siehe Tab. A6-7, übernommen aus Nagra 2008i). Diese Werte wurden im Wesentlichen, unter Berücksichtigung der entsprechenden HSK-Kommentare (HSK 2005), vom Entsorgungsnachweis übernommen und sind in Bradbury & Baeyens (2003) erläutert. Damit werden ein Referenzfall (mit Referenzwerten) und gemäss Vorgabe des ENSI auch ein abdeckender Fall mit tieferen nuklidspezifischen Sorptionskoeffizienten (untere Eckwerte) analysiert.

Der Wärmeeintrag der verglasten hochaktiven Abfälle und in vermehrtem Masse der abgebrannten Brennelemente und die Korrosionsprodukte der Behälter können die Eigenschaften des Bentonits verändern (siehe Fig. 6.2-1). Die entstehenden Produkte weisen zwar ähnliche Sorptionseigenschaften wie Bentonit, aber ein reduziertes Quellvermögen auf.

Bei Verwendung eines flächendeckenden Ausbaus mit "Niedrig-pH"-Spritzbeton kann sich an der Aussenseite der Bentonit-Verfüllung eine durch eine pH-Fahne veränderte Zone bilden. Für diese wird ein gegenüber unverändertem Bentonit reduziertes Rückhaltevermögen angenommen (vgl. Diskussion in Kap. 6.2.4). Zwischen diesen beiden Zonen bleiben die vorteilhaften Eigenschaften der Bentonit-Verfüllung, insbesondere auch die Sorption, praktisch unverändert.

PT-5 / Advektion bzw. Diffusion im Nahfeld

Die Radionuklidfreisetzung in der kompaktierten Bentonit-Verfüllung erfolgt ausschliesslich diffusiv; eine Advektion ist wegen der verschwindend kleinen hydraulischen Durchlässigkeit des Bentonits innerhalb der kurzen Distanzen des Nahfelds vernachlässigbar und findet in den Transportberechnungen keine Berücksichtigung.

Der Transport der Radionuklide durch die kompaktierte Bentonit-Verfüllung wird mit effektiven Diffusionskoeffizienten beschrieben, welche die Rückhaltung der Radionuklide durch die Tortuosität und Konstriktivität des Bentonit-Porenraums berücksichtigen. Zur Quantifizierung der Diffusionskoeffizienten wird am PSI ein Untersuchungsprogramm durchgeführt. In Labormessungen wird an kompaktierten Proben die Diffusion von nicht sorbierenden Radioelementen bestimmt. Um eine Verbindung zwischen Transport und Sorption herstellen zu können (siehe PT-4, oben), wird auch die Diffusion von schwach und stark sorbierenden Radioelementen gemessen. Durch diese Untersuchungen ist heute der Mechanismus der Sorption in kompaktiertem Bentonit sehr gut verstanden (siehe z.B. Glaus et al. 2007; Van Loon et al. 2007; Van Loon & Glaus 2008): Die Zwischenschichten des Montmorillonits, dem Haupttonmineral des Bentonits, sind negativ geladen und deshalb für Anionen beschränkt zugänglich (Anionenausschluss); neutrale Spezies und Kationen können sich im gesamten Porenraum ausserhalb der Tonteilchen und in den Zwischenschichten aufhalten.

Der in den Testrechnungen verwendete Diffusionskoeffizient für Anionen in kompaktiertem Bentonit beträgt 3×10^{-12} m^2/s bei einer zugänglichen Porosität von 0.05 (vgl. Tab. A6-7). Für Nicht-Anionen beträgt der Diffusionskoeffizient 2×10^{-10} m^2/s bei einer zugänglichen Porosität von 0.36.

Die möglichen Auswirkungen des Wärmeeintrags der verglasten hochaktiven Abfälle und in vermehrtem Masse der abgebrannten Brennelemente auf die Transporteigenschaften wurde im Entsorgungsnachweis untersucht mit dem Resultat, dass der Einfluss auf die Langzeitsicherheit vernachlässigbar ist (Nagra 2002c).

Bei Verwendung einer Zementverkleidung aus "Niedrig-pH"-Spritzbeton zur mechanischen Stabilisierung der Lagerstollen im Opalinuston für grosse Lagertiefen kann sich an der Aussenseite der Bentonit-Verfüllung eine durch eine pH-Fahne veränderte Zone bilden. Für diese Zone werden pessimistische Annahmen bzgl. der Porosität (bei unveränderten Porendiffusionskoeffizienten) getroffen. Die Auswirkungen dieser abdeckenden Annahme werden in Kap. 6.2.4 analysiert.

Zwischen der oben beschriebenen Zone nahe der Behälteroberfläche und der durch eine pH-Fahne veränderten Zone bleiben die vorteilhaften Eigenschaften der Bentonit-Verfüllung, insbesondere auch die ausschliesslich diffusive Radionuklidfreisetzung, praktisch unverändert.

Es ist vorgesehen, die mit Spritzbeton stabilisierten Tunnelabschnitte durch Zwischensiegel ohne Spritzbeton zu unterbrechen (vgl. Fig. 5.2-2). In diesen Zwischensiegeln bleiben die vorteilhaften Eigenschaften der Bentonit-Verfüllung unverändert, sodass keine Advektion entlang der Spritzbetonverkleidung der Lagertunnels auftreten kann (vgl. Diskussion in Kap. 6.2.4).

Beurteilung des Kenntnisstands bezüglich der Eigenschaften der technischen Barrieren im BE/HAA-Lager (Fazit)

Viele Radionuklide, insbesondere Aktinide, werden im Nahfeld des HAA-Lagers wegen des Einschlusses in den Lagerbehältern, wegen der kleinen Korrosionsraten der Abfallmatrix (Glas bzw. UO_2/MOX, unter Berücksichtigung der IRF) und wegen den günstigen geochemischen Bedingungen durch eine limitierte Löslichkeit und gute Sorption sehr wirkungsvoll zurückgehalten und zerfallen dort weitestgehend. Mobile Radionuklide, wie ^{129}I, ^{79}Se, $^{14}C_{org}$ und ^{36}Cl, deren Inventar in den Brennelementen wegen ihrer 'Instant Release Fraction' (IRF) teilweise sofort aus der Abfallmatrix freigesetzt werden, sorbieren im Bentonit-Nahfeld nicht und sind auch nicht löslichkeitslimitiert. Ihre Mobilität im Bentonit wird alleine durch die Diffusion bestimmt. Weil sie auch in der Geosphäre nicht oder nur sehr schwach sorbieren, dominieren sie trotz ihrem kleinen Anteil am gesamten radioaktiven Inventar bzw. an der gesamten Radiotoxizität oft die Dosis. Die geochemischen Bedingungen haben auf die Rückhaltung dieser Radioelemente nur einen geringen Einfluss.

Der Kenntnisstand bezüglich der Behälterlebensdauer, der Auflösungsraten für die Abfallmatrix und die Hüllrohre der abgebrannten Brennelemente und der geochemischen Eigenschaften ist sehr gut und auch der Mechanismus der Diffusion im Nahfeld des HAA-Lagers ist, abgestützt auf ein umfangreiches Forschungsprogramm, gut verstanden. Die Rückhalte- und Transportparameter für die Testrechnungen sind also zuverlässig quantifizierbar. Durch die gute chemische Pufferung ist das Bentonit-Nahfeld gegenüber den Einflüssen des umgebenden Wirtgesteins relativ robust (vgl. Kap. 6.2.6). Durch eine geeignete bauliche Auslegung kann auch ein advektiver Transport entlang der Lagerstollen vermieden werden. Die in Etappe 2 benötigten Datensätze für die durchzuführenden provisorischen Sicherheitsanalysen werden nochmals aufdatiert.

4.7 Biosphäre

4.7.1 Relevante Prozesse und Parameter

Die für die Sicherheit relevanten Prozesse und Parameter mit Bezug zur Biosphäre aus Tab. 3.2-1 sind in Tab. 4.7-1 zusammengefasst. Diese Prozesse und Parameter fliessen direkt in die quantitative Beurteilung der Sicherheit anhand von Dosisberechnungen ein.

Zu den für die Sicherheit relevanten Prozessen und Parametern bezüglich der Biosphäre gehören die relevanten Exfiltrationspfade – welche den Exfiltrationsort bestimmen – und die zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie und des Klimas am Ort und zur Zeit einer allfälligen Freisetzung der Radionuklide.

Die Annahmen zu spezifischen Aspekten der Biosphärenmodellierung sowie die Festlegung und Begründung der quantitativen Informationen (Referenzwerte und Bandbreiten) bezüglich dieser Prozesse und Parameter ist im Kap. 4.7.2 zu finden.

Gemäss ENSI (2010a) ist die im Entsorgungsnachweis verwendete Biosphärenmodellierung (Nagra 2002d) konzeptuell für die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalyse (und damit auch für die Testrechnungen) ausreichend.

Tab. 4.7-1: Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zur Biosphäre.

Die relevanten Prozesse und Parameter mit Bezug zur Biosphäre fliessen direkt in die quantitative Analyse der Sicherheit ein.

Nr.	**Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zur Biosphäre**	**Präzisierung**
PG-27	Relevante Exfiltrationspfade	Definieren die möglichen Exfiltrationsorte
PG-29	Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf Biosphärenmodellierung	Geomorphologie-Typen an den möglichen Exfiltrationsorten
PG-31	Klimaentwicklung im Hinblick auf Abschätzung der Wasserflüsse bei der Biosphärenmodellierung	Verschiedene Klimavarianten, insbesondere wärmeres trockeneres Klima und eiszeitliches Klima

4.7.2 Evaluation der Information zu den Prozessen und Parametern sowie des entsprechenden Kenntnisstands

Für die generelle Beschreibung der Biosphäre wird auf Kapitel 8 in Nagra (2002d) verwiesen. Bei der Beschreibung der Verhältnisse in der Biosphäre wird von den heutigen geomorphologischen, klimatischen und hydrologischen Bedingungen in den geologischen Standortgebieten bzw. an den möglichen Exfiltrationsorten ausgegangen. Diese Verhältnisse dienen als Grundlage für die Konzeptualisierung der Biosphäre im Referenzfall (vgl. Kap. 6.4). Die Annahmen über die zukünftige Entwicklung der Biosphäreneigenschaften (Geomorphologie, Klima) wirken sich auf die Verteilung der Radionuklide im Biosphärensystem und somit auf die Dosis für die Bewohner des Gebiets aus. Zur Illustration dieser Auswirkungen sind gemäss ENSI in den provisorischen Sicherheitsanalysen auch alternative Biosphärenszenarien zu untersuchen, insbesondere unter Verwendung von plausiblen Annahmen zu möglichen Klimaentwicklungen. Annahmen (bzw. Spekulationen) über mögliche Änderungen der menschlichen Lebensgewohnheiten in der fernen Zukunft sind gemäss ENSI (2009) nicht zu betrachten.

Im Folgenden wird auf die relevanten Prozesse und Parameter gemäss Tab. 4.7-1 eingegangen. Die darauf basierende Festlegung der Modellkonzepte und Daten für die Biosphärenmodellierung erfolgt in Kap. 6.4.

PG-27 / Relevante Exfiltrationspfade

Der Kenntnisstand über die regionalen hydrogeologischen Verhältnisse sowie über die relevanten Exfiltrationspfade und möglichen Exfiltrationsorte werden im Kap. 4.4 diskutiert; die möglichen Exfiltrationsorte (heutige Situation) sind in Tab. 4.7-2 für die verschiedenen geologischen Standortgebiete aufgelistet. Die potenzielle Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre erfolgt (nach der Barriere Wirtgestein) über wasserführende Schichten in den Rahmengesteinen und/oder über die regionalen Tiefenaquifere. Dabei wird angenommen, dass die Radionuklidfreisetzung an den Exfiltrationsorten (d.h. dort, wo die wasserführenden Schichten bzw. die regionalen Tiefenaquifere ausbeissen) mit dem Tiefengrundwasser am tiefsten Ort (Talsohlen) in quartäre Grundwasserleiter erfolgt (vgl. Diskussion zu PG-29 / Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf Biosphärenmodellierung).

Tab. 4.7-2: Referenz- und alternative Exfiltrationsorte für die verschiedenen geologischen Standortgebiete (heutige Situation).

Geologisches Standortgebiet	**Wirtgestein**	**Exfiltrationsort im Referenzfall** ***Alternative Exfiltrationsorte***
Südranden (nur SMA)	Opalinuston	Rheinfallbecken (Exfiltration via Malmkalke) *Klettgaurinne (Sandsteinkeuper und Wedelsandstein); Wangental (Malmkalke); Rheintal/Wutachtal im Raum Koblenz (Muschelkalk)*
Zürich Nord-Ost (SMA und HAA)	'Brauner Dogger' (nur SMA), Opalinuston	Rheinfallbecken (Exfiltration via Malmkalke) *Klettgaurinne (Sandsteinkeuper); Rheintal im Raum Koblenz und Neckar (Muschelkalk)*
Nördlich Lägeren (SMA und HAA)	'Brauner Dogger' (nur SMA), Opalinuston	Rheintal im Raum Mellikon – Kaiserstuhl (Exfiltration via Malmkalke) *Rheintal im Raum Koblenz (Muschelkalk), Rheintal im Raum Zurzach (Sandsteinkeuper)*
Bözberg (SMA und HAA)	Opalinuston	Unteres Aaretal (oberer Mittelkeuper) *Unteres Aaretal (Hauptrogenstein), Tal der Sissle (Hauptrogenstein), Rheintal im Raum Laufenburg (via Muschelkalk)*
Jura-Südfuss (nur SMA)	Effinger Schichten	Aaretal (Exfiltration via Malmkalke *oder Hauptrogenstein/Birmenstorfer Schichten*)
	Opalinuston	Aaretal (Exfiltration via Hauptrogenstein/Birmenstorfer Schichten) *Aaretal (via Muschelkalk*)
Wellenberg (nur SMA)	Mergel-Formationen des Helvetikums	Engelbergertal (Exfiltration via Kalke der Drusberg-Decke) *Engelbergertal (via Rutschmasse; nur für obere Lagerebene relevant)*

PG-29 / Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf Biosphären-modellierung

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Flussnetze und Landschaftsbilder in allen zukünftigen Zeitphasen innerhalb des Betrachtungszeitraums, in denen eine Subsistenz-Landwirtschaft in der Schweiz möglich ist (d.h. ausserhalb der eiszeitlichen bzw. der unmittelbar danach folgenden nacheiszeitlichen Phasen, vgl. Diskussion zu PG-31 / Klimaentwicklung im Hinblick auf Abschätzung der Wasserflüsse bei der Biosphärenmodellierung), grundsätzlich etwa vergleichbar sind mit den heutigen geomorphologischen Verhältnissen (typische Haupt- und Seitentäler).

Für zwischeneiszeitliche Bedingungen wird angenommen, dass eine zukünftige Radionuklid-Exfiltration an den tiefsten Punkten der Kontaktzone zwischen Biosphären-Aquifer und demjenigen regionalen Tiefenaquifer stattfindet, in welchem die Radionuklide nach ihrer Freisetzung aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch die Geosphäre bis in die Biosphäre transportiert werden. Die tiefsten Punkte befinden sich meist in Talsohlen von Haupt- und grösseren Seitentälern innerhalb des betreffenden Exfiltrationsgebiets.

Einer der für die Dosisberechnungen wichtigen Biosphären-Parameter ist der Wasserfluss im Biosphären-Aquifer, in welchem die Radionuklide exfiltrieren und welcher die Verdünnung der Radionuklide in diesem Aquifer bestimmt. Eine breite Evaluation der Daten zu den Grundwasserströmen in Talsohlen von typischen Haupt- und Seitentälern (Nagra 2010d) zeigt, dass diese in der Grössenordnung von 10^6 m^3/a liegen[46]; dies ist auch vergleichbar mit den für die Biosphärenmodellierung Wellenberg (Nagra 1994) und im Entsorgungsnachweis (Nagra 2002d) verwendeten Werten.

PG-31 / Klimaentwicklung im Hinblick auf Abschätzung der Wasserflüsse bei der Biosphärenmodellierung

Für die Abschätzung der Wasserflüsse bei der Biosphärenmodellierung werden die verschiedenen Phasen der Klimaentwicklung (PG-30 / Klimaentwicklung im Hinblick auf die geologische Langzeitentwicklung, vgl. Kap. 5.4.2) in vereinfachter Form berücksichtigt. In den Testrechnungen werden stilisierte, zeitlich konstante klimatische Verhältnisse angenommen, die für verschiedene Phasen der Klimaentwicklung typisch sind.

Im Einklang mit den Vorgaben des ENSI (ENSI 2010a) werden neben den heutigen klimatischen Bedingungen (Referenzfall) auch Rechenfälle mit einem wärmeren und trockeneren Klima und einem eiszeitlichen Klima untersucht. Im Folgenden werden die wichtigsten Charakteristika dieser Klimata in Anlehnung an die Klassifikation nach Köppen-Geiger (Kottek et al. 2006) zusammengefasst.

Heutiges Klima

Das heutige Klima ist warmgemässigt und ist typisch für zwischeneiszeitliche Bedingungen. Auf der Alpennordseite variiert die jährliche Niederschlagsrate zwischen 0.8 m/a und 1.2 m/a und die jährliche Evapotranspirationsrate beträgt ca. 0.5 m/a bis 0.6 m/a, was nahe am Mittelwert der jährlichen potenziellen Evapotranspirationsrate in der Schweiz von 0.6 m/a liegt.

Wärmeres und trockeneres Klima

Dieses Klima ist typisch für zwischeneiszeitliche Bedingungen mit erhöhten Temperaturen und geringeren Niederschlägen; es entspricht den Typen Csa und Csb nach Köppen-Geiger[47] (typisch mediterrane Klimata).

In Anlehnung an die Klimatypen Csa und Csb wird angenommen, dass die typischen Niederschlags- und Evapotranspirationsraten räumlich und zeitlich stark variieren (Annahme: jährliche Niederschlagsrate zwischen 0.3 m/a bis teilweise deutlich über 1 m/a) und die jährliche Evapo-

[46] In grossen Biosphären-Aquiferen fallen die Grundwasserströme teilweise auch bedeutend grösser aus.

[47] Warmgemässigtes Klima (Typ C). Warmes sommertrockenes Klima (Typ s: mittlerer Niederschlag des trockensten Sommermonats beträgt weniger als 40 mm und höchstens ein Drittel des mittleren Niederschlags des feuchtesten Wintermonats). Heisse Sommer (Typ a: mittlere Temperatur des wärmsten Monats liegt über 22°C; in mindestens vier Monaten liegt die mittlere Temperatur über 10°C) bzw. warme Sommer (Typ b: mittlere Temperatur des wärmsten Monats liegt zwischen 10 und 22°C; in mindestens vier Monaten liegt die mittlere Temperatur über 10°C).

transpirationsrate zwischen 0.3 m/a, entsprechend der minimalen Niederschlagsrate, bis deutlich über 1 m/a[48] liegen.

Eiszeitliches Klima

Dieses Klima ist repräsentativ für eiszeitliche Bedingungen mit niedrigen Temperaturen und Gletschervorstössen bis ins Mittelland; es entspricht dem Typ ET ('polar tundra') bzw. EF ('polar frost') nach Köppen-Geiger.

Die ET-Klimata sind typisch für die heutigen Tundren (nördliches Kanada, Grönlands Küstengebiete, Island, Spitzbergen etc.), während die EF-Klimata typisch für das Landesinnere von Grönland und für die Antarktis sind. Für eine Diskussion dieses Klimatyps wird auf das Biosphären-Szenarium "Periglaziales Klima" in Nagra (2002d) verwiesen, das für die Testrechnungen unverändert übernommen wird.

Beurteilung der Unterlagen für die Biosphäre (Fazit)

Für alle geologischen Standortgebiete wird in den Testrechnungen angenommen, dass die Radionuklidfreisetzung in einen quartären Aquifer in der Talsohle eines Haupt- oder Seitentals erfolgt. In den Testrechnungen wird eine Anzahl an stilisierten Biosphären-Situationen mit zeitlich konstanten Bedingungen (Klima, Geomorphologie, Wasserflüsse etc.) angenommen, die für verschiedene Phasen der Klimaentwicklung typisch sind. Damit werden inhärente (nicht reduzierbare) Ungewissheiten bezüglich Klima berücksichtigt. Es wird ferner davon ausgegangen, dass die auf zukünftige Erosionsprozesse zurückzuführenden, langfristigen Ungewissheiten über die geomorphologischen Verhältnisse innerhalb der geologischen Standortgebiete grösser sind als die zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erwartenden Unterschiede zwischen den verschiedenen Standortgebieten. Überdies weisen typische Haupt- und Seitentäler zum heutigen Zeitpunkt Grundwasserströme in der Grössenordnung von 10^6 m^3/a auf. Aus diesen Gründen werden für die Testrechnungen für alle geologischen Standortgebiete dieselben Annahmen bezüglich der geomorphologischen Bedingungen und der Wasserflüsse in der Biosphäre getroffen[49].

Entsprechend den Hinweisen in ENSI (2010a) erfolgen die Dosisberechnungen im Referenzfall für heutige (warm-gemässigte) Klimaverhältnisse. Zusätzlich werden alternative Fälle für ein wärmeres und trockeneres Klima (Typ mediterranes Klima) sowie für ein eiszeitliches Klima untersucht.

---

[48] Eine jährliche Evapotranspirationsrate von 1 m/a kann nur bei einer grossen Wasserverfügbarkeit aufrechterhalten werden, etwa über Seen, bei häufigen Niederschlägen oder durch intensive Bewässerung. Allerdings ist zukünftig von einer zunehmenden Wasserknappheit bzw. Wasserkonkurrenzsituation auszugehen, die durch den Klimawandel möglicherweise noch verschärft wird, sodass die Menge an verfügbarem Bewässerungswasser begrenzt sein dürfte. Es wird deshalb erwartet, dass die effektive jährliche Evapotranspirationsrate infolge ausgetrockneter Böden teilweise deutlich unter die potenzielle jährliche Evapotranspirationsrate sinken wird (Fuhrer & Jasper 2009).

[49] Damit wird auch sichergestellt, dass die mit den Testrechnungen aufgezeigten Unterschiede in den Rückhalteeigenschaften in den Barrierensystemen in den verschiedenen Standortgebieten nicht durch unterschiedliche Annahmen bzgl. Biosphäre überdeckt werden.

Für SGT Etappe 2 bleibt vorbehalten, für Dosisberechnungen vor allem im Zeitraum bis zu einigen zehntausend Jahren, wo sich die Ungewissheiten bzgl. Langzeitentwicklung noch nicht so stark bemerkbar machen, die standortspezifischen Bedingungen realistischer abzubilden. Entsprechende Rechnungen wurden zur Illustration durchgeführt (vgl. Nagra 2010b).

5 Beurteilung der technischen Machbarkeit des SMA- und HAA-Lagers

5.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden verschiedene technische Auslegungsvarianten aufgezeigt, die es erlauben, für ein breites Spektrum an geologischen Bedingungen die technische Machbarkeit sicherzustellen. Anschliessend wird für SMA und HAA für die einzelnen geologischen Standortgebiete anhand der relevanten geologischen Prozesse und Parameter geprüft, ob die technische Machbarkeit für die vorgeschlagenen Auslegungsvarianten gegeben ist.

In diesem Bericht wird bezüglich der Lagerauslegung vom bisherigen Lagerkonzept der Nagra ausgegangen, wie es z.B. im Entsorgungsprogramm (Nagra 2008a) oder in Zusammenhang mit den Vorschlägen der geologischen Standortgebiete (Nagra 2008b, d) beschrieben wurde. Für Etappe 2 werden zusätzlich die Resultate des ENSI-Projekts zur Lagerauslegung (AGNEB 2009) berücksichtigt, in welches auch die Hinweise der KNS in ihrer Stellungnahme zum ENSI-Gutachten zu SGT Etappe 1 einfliessen werden (KNS 2010).

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Lagerauslegung an die standortspezifischen bautechnischen Bedingungen anzupassen. Die wichtigsten technischen Aspekte werden im Folgenden vorgestellt. Die technische Machbarkeit ist gewährleistet, wenn folgende Bedingungen erfüllt werden können:

- Die Standsicherheit der Lagerkammern und der erforderlichen Erschliessungs- und Hilfsanlagen ist unter Nutzung zulässiger Stütz- und Ausbaumassnahmen während des Baus, Betriebs und Verschlusses gewährleistet, und die gewählten Querschnitte der Bauten erlauben den zuverlässigen Bau, Betrieb und Verschluss der Anlage. Weiter ist sicherzustellen, dass die baulichen Massnahmen die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers nicht beeinträchtigen;
- Das Platzangebot im Wirtgestein ist ausreichend, um die Lagerkammern entsprechend den Vorgaben der Langzeitsicherheit anzuordnen (d.h. Lagerkammern in genügendem Abstand von den gebietsbegrenzenden geologischen Elementen (PB-2) und den anordnungsbestimmenden geologischen Elementen (PB-3));
- Die Zugänge zu den Lagerfeldern von der Oberfläche her können zuverlässig realisiert werden.

Für die Beurteilung der technischen Machbarkeit in den verschiedenen geologischen Standortgebieten wird auf die entsprechenden relevanten geologischen Prozesse und Parameter aus Tab. 3.2-1 zurückgegriffen. Diese sind in Tab. 5.1-1 aufgeführt, wo auch aufgezeigt wird, in welchen Kapiteln die entsprechenden Informationen diskutiert werden. Mit einer Ausnahme werden alle diese Prozesse und Parameter im vorliegenden Kapitel abschliessend behandelt. Dies bedeutet, dass die Evaluation bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen zur technischen Machbarkeit für diese Prozesse und Parameter im vorliegenden Kap. 5 vorgenommen wird; die entsprechenden Informationen fliessen aber teilweise indirekt, d.h. über eine geeignete Auslegung und Anordnung der Lagerkammern in die Systemanalyse und quantitative Analyse der Sicherheit in Kap. 6 ein. Der mögliche Einfluss der Auslegung der Lagerkammern (PT-7) auf die Langzeitsicherheit wird im Rahmen der Systemanalysen explizit evaluiert und dort abschliessend beurteilt (vgl. Kap. 6.2.4).

Tab. 5.1-1: Die für die Beurteilung der technischen Machbarkeit relevanten geologischen Prozesse und Parameter mit Bezug auf die Standorteigenschaften.

Die Tabelle enthält Hinweise auf die Kapitel, in denen die zugehörigen Informationen diskutiert werden. Mit einer Ausnahme (PT-7) werden alle aufgeführten Prozesse und Parameter im vorliegenden Kapitel abschliessend behandelt (grün markiert).

Nr.	**Relevante geologische Prozesse und Parameter für die technische Machbarkeit**	**Präzisierung**	**Hinweis auf Kapitel, in denen die zugehörigen Informationen dokumentiert und diskutiert werden**		
			Standsicherheit der Lager-kammern (Kap. 5.2)	Platzangebot (Kap. 5.3)	Untertägige Erschliessung (Kap. 5.4)
1. Relevante Prozesse und Parameter für die technischen Barrieren (PT)					
PT-7	Auslegung der Lagerkammern		×		
2. Relevante Prozesse und Parameter für die geologischen Barrieren (PG)					
PG-2	Glazial übertiefte Felsrinnen			×	
3. Relevante Prozesse und Parameter für die technische Machbarkeit (PB)					
PB-1	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit	Unter Berück-sichtigung Gebirgs-spannungen und Porenwasserdruck	×	×	
PB-2	Gebietsbegrenzende geologische Elemente	Regionale Störungszonen, Tiefenlage (inkl. glazial übertiefte Felsrinnen), Mächtigkeit WG, diffus gestörte Zonen, tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)		×	
PB-3	Anordnungsbestimmende geologische Elemente	Berücksichtigung von anordnungsbestimmenden Störungszonen, Architekturelementen und Fremdgesteinseinschlüssen		×	
PB-4	Platzangebot untertags			×	
PB-6	In-situ-Gebirgsspannungen	auf Lagerebene	×		
PB-7	Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein		×		

Tab. 5.1-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante geologische Prozesse und Parameter für die technische Machbarkeit	Präzisierung	Hinweis auf Kapitel, in denen die zugehörigen Informationen dokumentiert und diskutiert werden		
			Standsicherheit der Lager-kammern (Kap. 5.2)	Platzangebot (Kap. 5.3)	Untertägige Erschliessung (Kap. 5.4)
3. Relevante Prozesse und Parameter für die technische Machbarkeit (PB)					
PB-8	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen				×
PB-9	Natürliche Gasführung des Wirtgesteins		×		
PB-10	Nutzungskonflikte hinsichtlich Mineralquellen und Thermen				×
PB-11	Oberflächensituation	Nutzbare Grund-wasservorkommen, Grundwasser-schutzzonen			×

5.2 Beurteilung der technischen Machbarkeit bezüglich der Standsicherheit der Lagerkammern

5.2.1 Möglichkeiten zur Auslegung der Lagerkammern

PT-7 / Auslegung der Lagerkammern für SMA (und LMA), unter Berücksichtigung von PB-1 / Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit, PB-7 / Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein und PB-6 / In-situ-Gebirgsspannungen

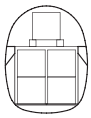
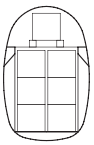
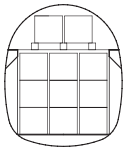
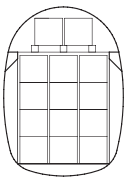
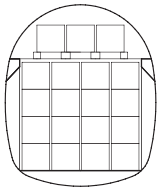
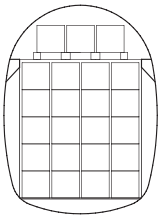
Die Lagerkammern des SMA-Lagers (SMA-Lagerkavernen) müssen eine genügende geomechanische Stabilität für den zuverlässigen Bau und Betrieb (inkl. Verfüllung) sowie für den Verschluss aufweisen. Weiter ist eine geringe Beeinträchtigung des umgebenden Wirtgesteins anzustreben. Dies verlangt beschränkte Deformationen während Bau, Betrieb und auch nach dem Verschluss zur Vermeidung einer grossräumigen[50] Auflockerung des Wirtgesteins. Weiter müssen die Lagerkammern geeignete Rahmenbedingungen für die Einlagerung der Endlagerbehälter (Einbringen, Verfüllen) und für eine allfällige Rückholung der Endlagerbehälter bieten. Zudem sind die Lagerkammern so auszulegen, dass eine geeignete Versiegelung der Zugänge möglich ist.

[50] Grossräumig heisst hier, dass ein signifikanter Teil der Transportbarriere beeinträchtigt würde.

Tab. 5.2-1 zeigt mögliche Querschnitte von SMA-Lagerkavernen, wie sie auch in der Planung in SGT Etappe 1 verwendet wurden. Die Grösse und Form der Kavernen und deren Gewölbeausbau bzw. Ausbruchssicherung werden den geomechanischen Randbedingungen des Wirtgesteins angepasst.

Tab. 5.2-1: Die in der Planung verwendeten Querschnitte der Lagerkavernen des SMA-Lagers, die von einer Belegung der Lagerkammern mit standardisierten Lagercontainern LC1 ausgehen.

Legende: LRF: Lichtraumfläche; LH: lichte Höhe; LB: lichte Breite

K04	K06	K09	K12	K16	K20
					
LRF: 58 m^2 LH: 9.5 m LB: 7.3 m	LRF: 77 m^2 LH: 11.9 m LB: 7.6 m	LRF: 110 m^2 LH: 12.6 m LB: 10.4 m	LRF: 136 m^2 LH: 15.0 m LB: 10.6 m	LRF: 182 m^2 LH: 16.1 m LB: 13.4 m	LRF: 215 m^2 LH: 18.5 m LB: 13.6 m

Die bautechnische Machbarkeit der SMA-Lagerkavernen wurde für unterschiedliche Rahmenbedingungen (Tiefenlage, Wirtgestein, Hauptspannungsrichtung) in diversen orientierenden felsmechanischen Berechnungen untersucht (Nagra 2002b, EWI 2004, Te Kamp 2008, Pöyry 2010a). Die Berechnungen enthalten auch Fälle mit für die verschiedenen Standortgebiete abdeckenden Annahmen bezüglich der Gebirgseigenschaften (PB-7 / Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein) und der In-situ-Bedingungen (PB-1 / Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit bzw. PB-6 / In-situ-Gebirgsspannungen). Um den Einfluss der mutmasslichen standortabhängigen felsmechanischen Bedingungen auf die Auslegung der Lagerkavernen zu berücksichtigen, wurden die Kavernen-Querschnitte in Abhängigkeit der felsmechanischen Randbedingungen gemäss Tab. 5.2-2 verwendet. Die Berechnungen zeigen, dass für das Spektrum der erwarteten geomechanischen Bedingungen die Machbarkeit gegeben ist. Dies wird auch bestätigt durch die grossen Erfahrungen aus dem Verkehrstunnelbau, Wasserkraftbau und Bergbau (Kellerhals & Haefeli 2010b, Schubert et al. 2010) mit vergleichbaren Querschnittsgrössen, Tiefenlagen und geologischen Bedingungen[51].

In Bezug auf den für die Lagerkavernen zu verwendenden Querschnitt besteht eine grosse Flexibilität zur Berücksichtigung der tatsächlichen standortbezogenen felsmechanischen Bedingungen (Lithologie, Trennflächengefüge, In-situ-Gebirgsspannungen bzw. Tiefenlage und Orientierung der Kavernenachse in Bezug auf horizontale Hauptspannungen, Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs). Der Einfluss des Querschnitts der Lagerkammern auf die Langzeitsicherheit wird in Kap. 6.2.4 (vgl. PT-7 / Auslegung der Lagerkammern) analysiert.

[51] Zum Vergleich: K04 entspricht typischen Fluchtstollen in Verkehrstunnels und Stollen in Felslabors, K06 entspricht einem Einspur-Eisenbahntunnel, K09 einem 2-Spur-Strassentunnel, K12 einem 3-Spur-Strassentunnel, K16 und K20 können mit Lüftungskavernen in Strassentunnels oder mit Kraftwerkskavernen verglichen werden.

Als Baumethode ist im Referenzkonzept ein Teilausbruch (Ausbruch in Etappen) mit einer Teilschnittmaschine vorgesehen. Je nach geomechanischen Bedingungen kann ein rascher Ringschluss vorgesehen werden, um den Ausbauwiderstand frühzeitig zu erhöhen und die Deformationen zu beschränken. Nach jeder Ausbruchsetappe werden Felssicherungsmassnahmen vorgenommen. Als temporäre Felssicherungsmassnahmen sind Anker (punktuell oder systematische Ankerung) vorgesehen. Als definitive Gewölbesicherung wird von einer einschaligen Spritzbetonschale ausgegangen. Je nach geomechanischen Bedingungen sind zusätzlich Stahl- oder Gitterbögen erforderlich. Bei Bedarf kann der Ausbau noch weiter verstärkt werden (z.B. Innengewölbe aus Beton). Für die LMA-Lagertunnels gelten grundsätzlich die gleichen bautechnischen Überlegungen wie für die SMA-Lagerkavernen.

Tab. 5.2-2: Provisorische Planungsannahmen der SMA-Lagerkavernen mit Kavernen-Querschnitten in Abhängigkeit der Gebirgseigenschaften und der Überlagerung bzw. der erwarteten Gebirgsspannungen.

Felsmechanische Bedingungen: Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften, Überlagerung bzw. Tiefenlage unter Terrain.

		Zunehmend ungünstige Gesteinsfestigkeiten / Verformungseigenschaften				
	Wirtgesteinstyp	**Mergel-Formationen des Helvetikums**	**Effinger Schichten**	**Opalinuston, 'Brauner Dogger'**		
	Tekt. Regime / Überlagerung	Voralpen	Subjurassische Zone	Tafeljura	Vorfaltenzone	Subjurassische Zone
Zunahme der In-situ-Gebirgsspannungen	200 – 300 m.u.T.	K20	K16	K12	K09	K09
	300 – 400 m.u.T.	K16	K16	K12	K09	K09
	400 – 500 m.u.T.	K16	K12	K09	K06	K06
	500 – 700 m.u.T.	K12	K09	K06	K06	K04
	700 – 800 m.u.T	K09	K06	K04	K04	-

PT-7 / Auslegung der Lagerkammern für BE/HAA, unter Berücksichtigung von PB-1 / Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit, PB-7 / Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein und PB-6 / In-situ-Gebirgsspannungen

Das Referenzkonzept sieht vor, die BE/HAA-Endlagerbehälter auf einem Sockel aus kompaktierten Bentonitblöcken zu platzieren (Fig. 5.2-2). Der Raum zwischen dem Endlagerbehälter / Bentonitsockel und dem Wirtgestein wird mit Bentonitgranulat verfüllt. Der durch Wiederaufsättigung des Bentonits entstehende Quelldruck wirkt der potenziellen Kriechbewegung des Opalinustons bis zum Erreichen eines Gleichgewichts mit den anliegenden Gebirgsspannungen entgegen.

Die Lagerstollen sind so auszulegen, dass sie günstige Rahmenbedingungen für die zuverlässige Einlagerung der BE/HAA-Behälter bieten und das zuverlässige Einbringen des Bentonits ermöglichen. Weiter sind auch die Anforderungen an den Arbeits- und Gesundheitsschutz und die Sicherheit für den Bau (Standsicherheit) zu berücksichtigen. Diese Anforderungen werden durch die Wahl eines ausreichenden Lichtraumprofils (Mindestinnendurchmesser) der Lagerstollen erfüllt. Die Lagerstollen sind des Weiteren so auszulegen, dass die Auflockerung des Gebirges und deren Ausdehnung beschränkt bleiben. Dies wird erreicht durch eine Beschränkung der Hohlraumgrösse (maximaler Ausbruchsdurchmesser), eine deformationsarme und schonende Bau- bzw. Ausbruchsmethode (insbesondere durch eine rasch wirkende und genügend wirksame Ausbruchssicherung), durch Ausrichten der Lagerstollen in Richtung felsmechanisch günstige Raumlage und dadurch, dass die Hohlräume nach dem Ausbruch relativ rasch mit einem quellfähigen Verfüllmaterial verfüllt werden (in wenigen Jahren).

Zur Berücksichtigung der tatsächlichen, standortspezifischen felsmechanischen Bedingungen[52] in den verschiedenen Standortgebieten kann der Ausbauwiderstand angepasst werden, um die Standsicherheit der Lagerstollen bis zur Verfüllung gewährleisten zu können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Standsicherheit vor allem durch das Verhältnis In-situ-Gebirgsspannung zu Gebirgsfestigkeit und in der Regel nur in zweiter Linie durch die Hohlraumgrösse bestimmt wird[53]. Prinzipielle Möglichkeiten zur Erhöhung des Ausbauwiderstands sind in Fig. 5.2-1 aufgezeigt (vgl. Nagra 2009c).

Die Wirkung und Wirksamkeit verschiedener Ausbaukonzepte (ohne Ausbau, Systemankerung, vollflächiger Ausbau) wurde für unterschiedliche Rahmenbedingungen untersucht (Konietzky et al. 2003; Konietzky & Te Kamp 2009; Pöyry 2010b, c). Die Untersuchungen enthalten orientierende Modellrechnungen mit für die verschiedenen Standortgebiete abdeckenden Annahmen bezüglich der Gebirgseigenschaften (PB-7 / Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein) und der In-situ-Bedingungen (PB-1 / Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit bzw. PB-6 / In-situ-Gebirgsspannungen). Diese Untersuchungen werden für SGT Etappe 2 weitergeführt und vertieft. Die Untersuchungen zeigen, dass eine Auflockerung in allen Situationen erwartet wird. Die Grösse der Auflockerungszone kann mit der Wahl des Ausbruchsdurchmessers und in engen Grenzen mit der Wahl des Ausbaus beeinflusst werden, doch ist aufgrund verschiedener Anforderungen (Endlagerbehältergrösse, Mächtigkeit der Bentonit-Verfüllung, Baumethode, Einlagerungsvorgang etc.) für das hier betrachtete Referenzkonzept ein Mindestdurchmesser von rund 2.5 m erforderlich. Ab einer gewissen Grösse der Auflockerungszone ist zur Gewährleistung der Standsicherheit und des Arbeitsschutzes eine vollflächige Ausbruchssicherung[54] erforderlich, welche während der Spannungsumlagerungen infolge des Vortriebs Niederbrüche verhindern und einen ausreichenden Ausbauwiderstand gewährleisten kann. Die Auflockerungszone kann aber durch den Ausbau nur bedingt beeinflusst werden. Bei der Festlegung der Stollenquerschnitte und des Ausbaus ist das Gesamtsystem zu berücksichtigen, bestehend aus dem Innendurchmesser des Stollens, der Vortriebsmethode, dem Ausbruchssicherungs- bzw. Ausbaukonzept, der Vortriebsgeschwindigkeit und dem Zeitpunkt des Einbaus der Sicherung. Mögliche Vortriebssysteme sind in Nagra (2009c) diskutiert. Im Vordergrund stehen ein mechanischer Vortrieb mit Teilschnittmaschinen (TSM) oder Tunnelvortriebsmaschinen (TVM).

---

[52] Diesbezüglich sind vor allem die Überlagerung (In-situ-Gebirgsspannungen) und die Gebirgsfestigkeiten massgebend. Letztere werden durch die lithologischen Eigenschaften (Gesteinsfestigkeit, Anisotropie) und das Trennflächengefüge beeinflusst.

[53] Die Standsicherheit wird verbessert, wenn durch Anpassung der Hohlraumgrösse ungünstigen Trennflächen (z.B. Klüften) ausgewichen werden kann.

[54] Unter vollflächiger Ausbruchssicherung werden gebirgsstützende Massnahmen verstanden, welche im gesamten Lagerstollenumfang einen Ausbauwiderstand erzeugen können. Eine klassische Stützung mit Stahlbögen im gesamten Profilumfang wird somit auch als vollflächig betrachtet.

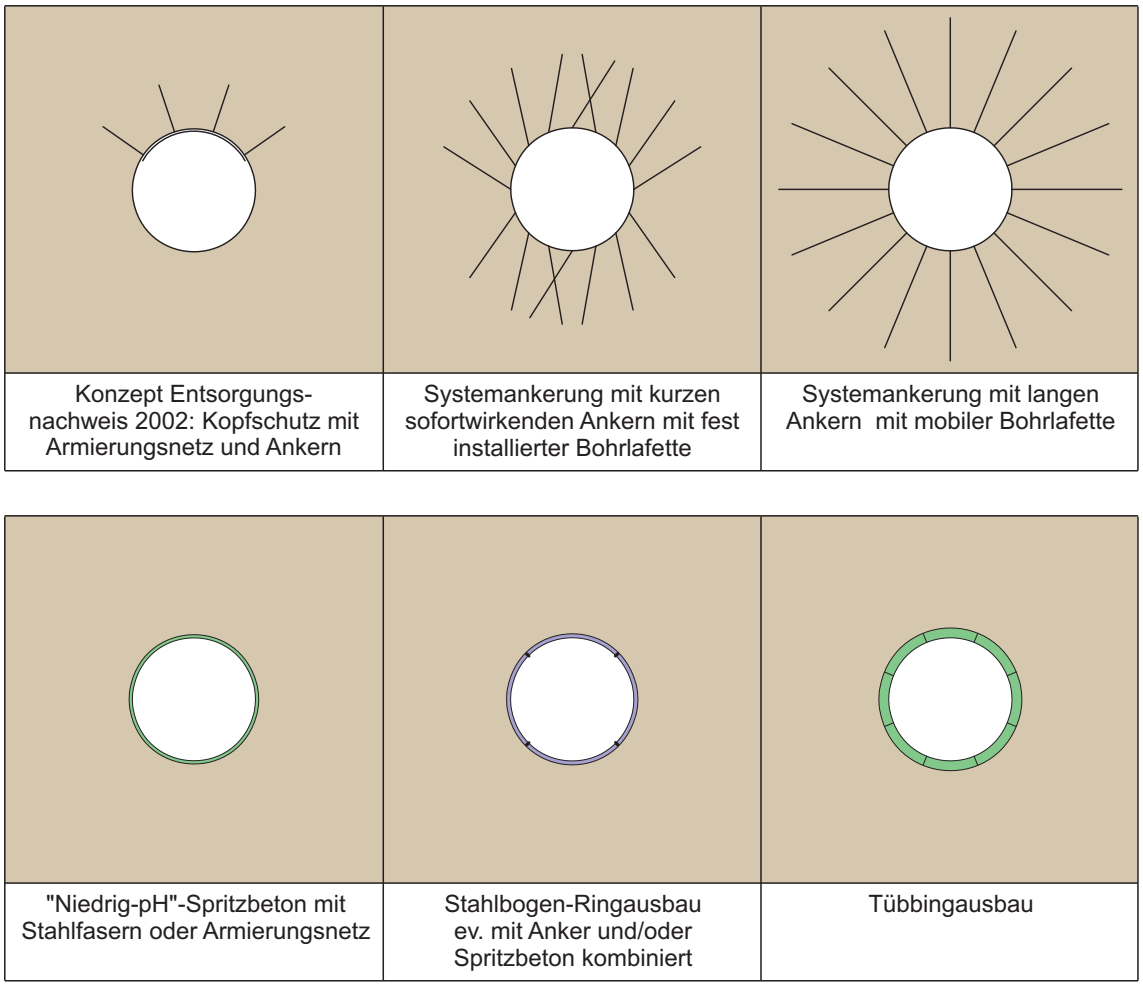


Fig. 5.2-1 Prinzipiell mögliche Varianten des Ausbaus für die BE/HAA-Lagerstollen.

Gemäss Nagra (2009c). Der Ausbauwiderstand nimmt von oben nach unten und von links nach rechts zu.

Für anspruchsvolle geomechanische Standortbedingungen ist ein Konzept mit einem konventionellen Ausbau vorgesehen, bestehend aus einer flächendeckenden bewehrten Spritzbetonverkleidung aus "Niedrig-pH"-Zementen. Diese Zementverkleidung wird nach jeweils ca. 10 Endlagerbehältern mit einem "Zwischensiegel" unterbrochen, um einen ungehinderten Wasserfluss in der (degradierten) Spritzbetonverkleidung entlang der Stollen zu verhindern. In den Abschnitten dieser Zwischenversiegelung werden anstelle der vollflächigen Spritzbetonverkleidung z.B. Stahlbögen mit vergleichbarem Ausbauwiderstand verwendet, so dass die Bentonit-Verfüllung zwischen den Stahlbögen direkt an den Opalinuston anliegt[55].

[55] Der Ausbauwiderstand der vorgeschlagenen Sicherungsmassnahmen kann durch die Wahl der Spritzbetonstärke, des Stahlbogenabstands oder der Stahlprofilgrösse den Erfordernissen angepasst werden. Zusätzlich können Felsanker den Ausbauwiderstand erhöhen. Bei grossen Deformationen und grossen Gebirgsdrücken ist auch der Einbau von duktilen Elementen oder das Ergreifen anderer Massnahmen, wie sie im Untertagebau im druckhaften Gebirge seit langem angewendet werden, möglich.

Die Sicherung der Lagerstollen (Netze, Anker, Spritzbeton oder Stahlbögen) hat eine beschränkte Lebensdauer und dient der Gewährleistung der Betriebssicherheit während der Einlagerung der BE/HAA und der Verfüllung der Hohlräume mit Bentonit. Anschliessend werden das Kompaktionsverhalten des trockenen Bentonitgranulats und später der durch Wiederaufsättigung des Bentonits entstehende Quelldruck massgebend für das Hohlraumverhalten. Dieser Quelldruck hat auch einen grossen Einfluss auf die langfristige Entwicklung der Auflockerungszone. Der Quelldruck und das gute Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons werden dazu führen, dass sich bis zum Zeitpunkt der Radionuklidfreisetzung in die Geologie (nach deutlich mehr als 1'000 Jahren) die anfänglich stark erhöhte hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone wieder auf Werte nahe der Durchlässigkeit für das ungestörte Gestein zurückbildet.

Die Auswirkungen dieses Ausbausystems auf die Langzeitsicherheit werden in Kap. 6.2.4 (vgl. PT-6 / Transportrelevante Eigenschaften Interface BE/HAA-Lagerstollen/Wirtgestein) analysiert.

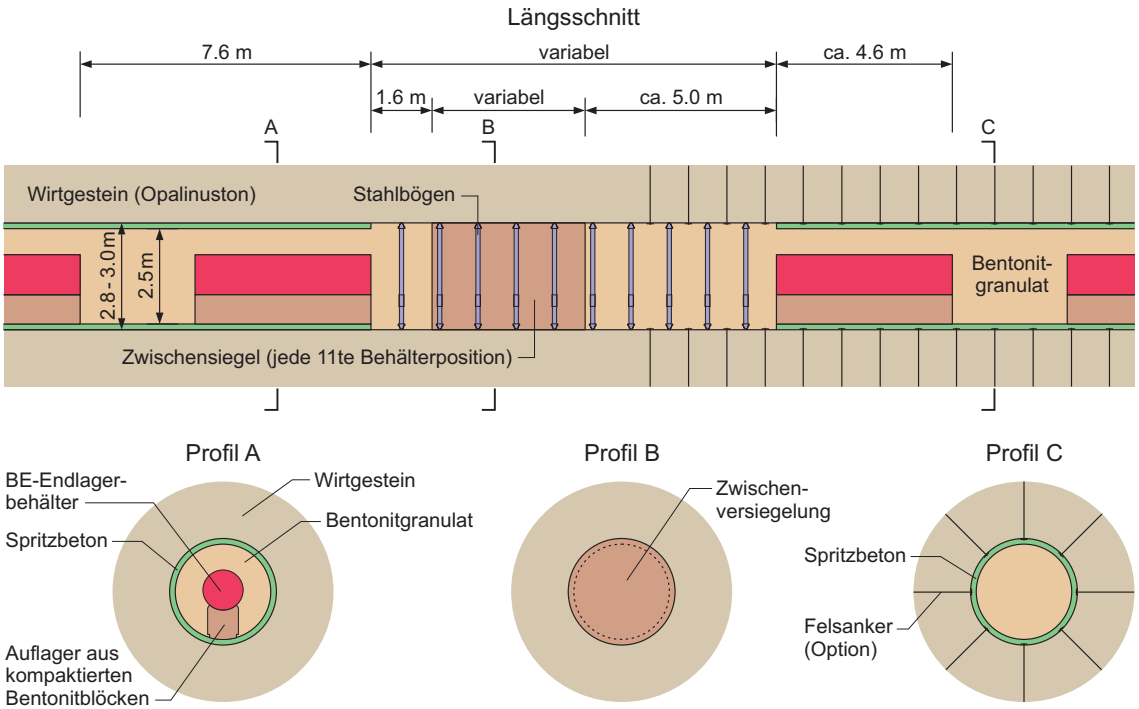


Fig. 5.2-2: Konzept für den Ausbau der BE/HAA-Lagerstollen für das Referenzkonzept in grossen Lagertiefen oder bei ungünstigen geomechanischen Bedingungen.

Normalprofile durch die BE/HAA-Lagerstollen an drei verschiedenen Positionen.

5.2.2 Beurteilung der Standfestigkeit der Lagerkammern für die verschiedenen Standortgebiete

Die technische Machbarkeit der Lagerkammern wird primär durch die Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit (PB-1) bzw. die In-situ-Gebirgsspannungen (PB-6) und die Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein (PB-7) bestimmt. Für die Beurteilung der Machbarkeit wird das Referenzkonzept der BE/HAA-Lagerstollen des HAA-Lagers verwendet, bei welchem bei günstigen geotechnischen Bedingungen

ein Ausbau nur für den Arbeitsschutz (Kopfschutz mit Netz und Ankern) vorgesehen ist, während für grössere Tiefenlagen und/oder bei gestörten Gebirgsverhältnissen vollflächige Stützmittel (Ausbau) zur Anwendung kommen. Der vollflächige Ausbau betrifft voraussichtlich grössere Teile des Standortgebiets Nördlich Lägeren, evtl. jedoch auch Teile der Standortgebiete Bözberg und Zürich Nord-Ost[56].

Für die SMA-Lagerkavernen wird in der Planung eine Anpassung des Lagerkavernen-Querschnitts an die standortspezifischen Bedingungen gemäss den in Tab. 5.2-2 gemachten Angaben vorgenommen. Für LMA-Lagerstollen wird unabhängig von den standortspezifischen Randbedingungen grundsätzlich von einem Lagertunnel Typ K06 oder kleiner ausgegangen.

Eine mögliche natürliche Gasführung des Wirtgesteins (PB-9) muss nur für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg betrachtet werden. Durch geeignete bauliche und betriebliche Massnahmen kann sichergestellt werden, dass die Natürliche Gasführung des Wirtgesteins (PB-9) die zuverlässige Erstellung und den Betrieb des Tiefenlagers nicht in Frage stellen. Zu diesen Massnahmen gehören im Wesentlichen organisatorische und technische Massnahmen, insbesondere eine ausreichende künstliche Belüftung der zugänglichen Bereiche in der Betriebsphase basierend auf gesetzlichen und behördlichen Vorschriften (Suva 2002).

Beurteilung der Standfestigkeit der Lagerkammern des SMA- und HAA-Lagers (Fazit)

Die in den Standortgebieten erwarteten geomechanischen Bedingungen können basierend auf den Informationen gemäss Kap. 4 abgeleitet, und die vorhandenen Ungewissheiten in den Angaben zur Geomechanik diskutiert werden. Die unter Berücksichtigung dieser Daten durchgeführten orientierenden Berechnungen zeigen, dass mit den vorhandenen Konzepten zur Auslegung die Lagerkammern für das SMA- und das HAA-Lager in allen Standortgebieten trotz der vorhandenen Ungewissheiten als bautechnisch machbar eingestuft werden können. Die vorgeschlagenen Auslegungskonzepte stützen sich auf erprobte Baumethoden und Technologien aus dem Untertagbau und nutzen bei Bedarf die Möglichkeit von vollflächigen Stützmitteln, deren Ausbauwiderstand an die vorhandenen Bedingungen angepasst werden kann[57]. Weiter ist zu berücksichtigen, dass in jedem der Standortgebiete eine gewisse Flexibilität bei der Wahl der Lagertiefe besteht (Abwägung bautechnischer Aspekte im Vergleich zu anderen Aspekten). Unter Berücksichtigung der für Etappe 2 bereits begonnenen Arbeiten ist der vorhandene Kenntnisstand zur Geotechnik (Tiefenlage unter Terrain, In-situ-Gebirgsspannungen, geomechanische Eigenschaften Wirtgestein, vgl. Kap. 4) zusammen mit den bestehenden Konzepten zur Auslegung der Lagerkammern genügend für die Beurteilung der technischen Machbarkeit im Rahmen dieses Berichtes. Die für Etappe 2 weiter laufenden Arbeiten werden dazu beitragen, die Beurteilung der technischen Machbarkeit in Etappe 2 weiter zu konsolidieren.

5.3 Beurteilung der technischen Machbarkeit bezüglich des Platzangebots

5.3.1 Möglichkeiten zur Anordnung der Lagerkammern

Zur optimalen Nutzung des Platzangebots untertags (PB-4) in den geologischen Standortgebieten bestehen sowohl für das SMA- als auch das HAA-Lager verschiedene Möglichkeiten, die Lagerauslegung an die standortspezifischen Bedingungen anzupassen.

---

[56] In den Testrechnungen wird für das Standortgebiet Nördlich Lägeren von einem vollflächigen Ausbau ausgegangen, für die Standortgebiete Zürich Nord-Ost und Bözberg jedoch nicht. Der Einfluss des Ausbaus auf die Langzeitsicherheit ist jedoch vernachlässigbar (vgl. Kap. 6.2.4).

[57] Vergrösserung Spritzbetonstärke, Erhöhung Anzahl und Länge der Anker etc.

Beim SMA-Lager können in den Standortgebieten mit zwei Wirtgesteinen die Abfälle auf zwei Lagerebenen in den verschiedenen Wirtgesteinen angeordnet werden. Das Gleiche gilt für das Standortgebiet Wellenberg, wo das Lager in den Mergel-Formationen des Helvetikums auf zwei (oder mehr) Lagerebenen aufgeteilt werden kann. Für den vorliegenden Bericht wird angenommen, in den entsprechenden Standortgebieten die Abfälle etwa je hälftig auf zwei Lagerebenen aufzuteilen. Der Zugang zu den Lagerebenen erfolgt über separate Zugangstunnels und Schächte, welche oberhalb der oberen Lagerebene zusammengeführt werden können, so dass der Zugang über ein gemeinsames Portal an der Oberfläche möglich ist (vgl. Fig. 5.3-1).

Weiter besteht die Möglichkeit, die Lagerkammern (in den Lagerebenen) auf mehrere Lagerfelder aufzuteilen. Die Form der Lagerfelder und damit die Länge und Orientierung der Lagerkammern können den spezifischen Gegebenheiten angepasst werden, falls anordnungsbestimmenden geologischen Elementen (Störungszonen, Architekturelemente, Fremdgesteinseinschlüsse) ausgewichen werden muss oder dadurch eine optimalere Ausnutzung der räumlichen Randbedingungen des Wirtgesteins bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in Bezug auf Berandung, Mächtigkeit, Neigung und Welligkeit möglich ist.

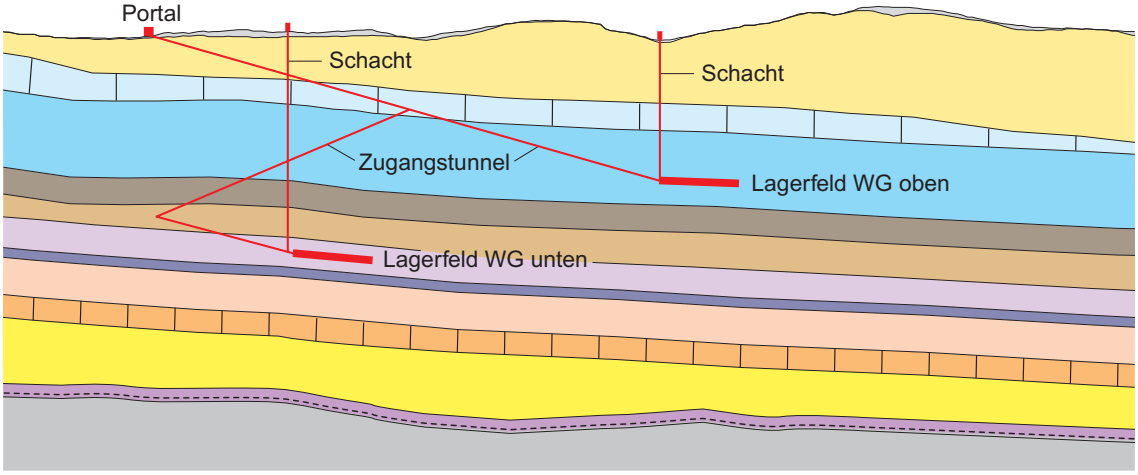
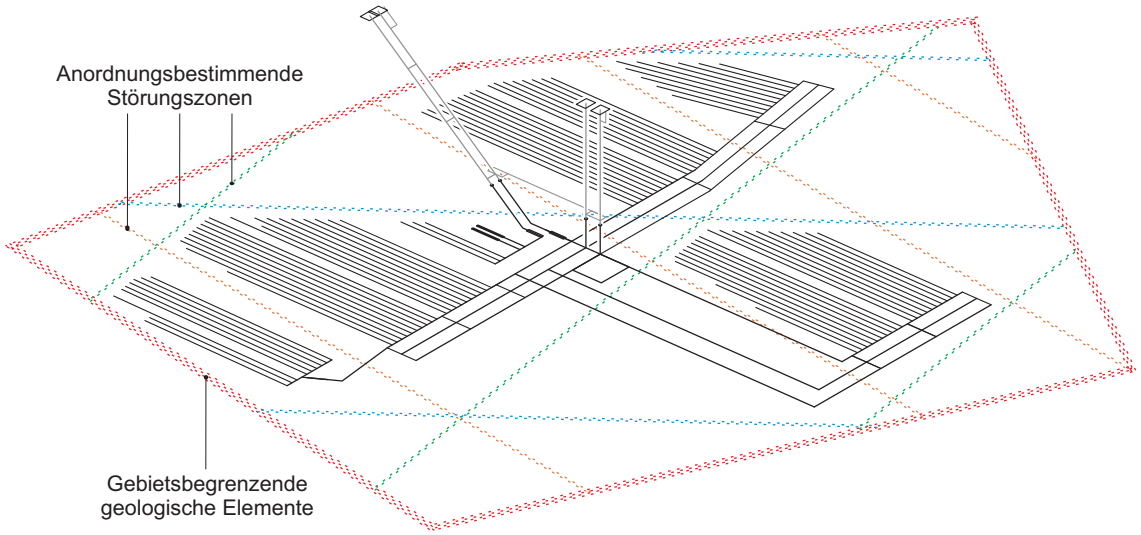


Fig. 5.3-1 Grundsätzliche Anordnung eines SMA-Lagers mit zwei Lagerebenen.

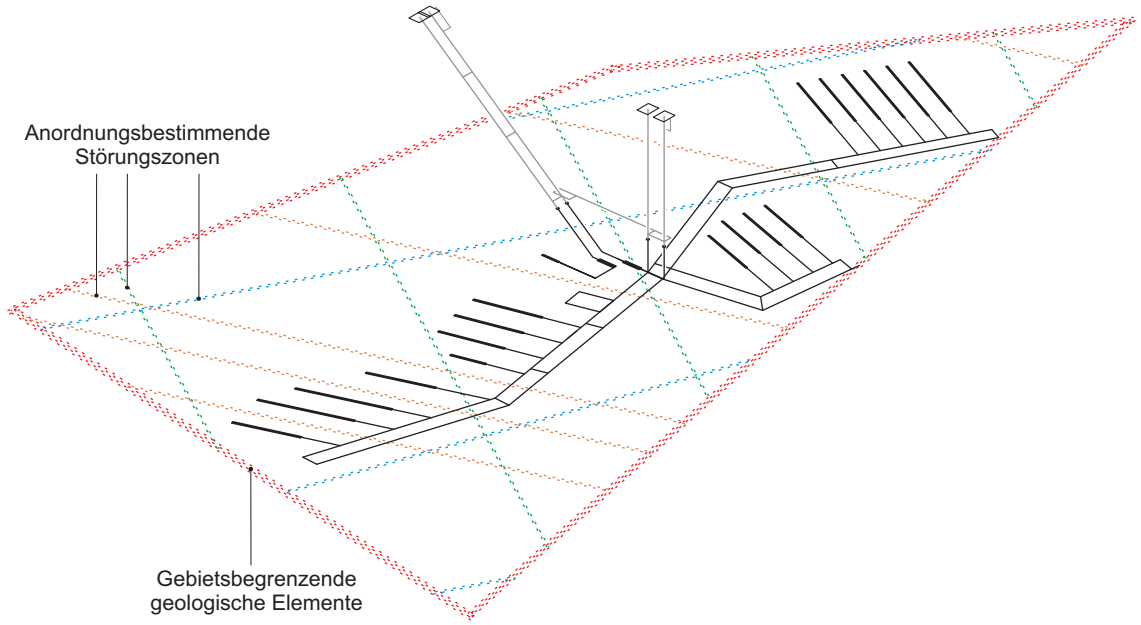
Beim verwendeten Lagerkonzept besteht bei Bedarf die Möglichkeit, die Lagerkammern und Lagerfelder[58] als Blindstollenkonfiguration auszulegen (Zugang von einer Seite). Damit kann das Platzangebot besser ausgenutzt werden, weil die Länge und die Linienführung jeder Lagerkammer den tatsächlichen räumlichen Verhältnissen optimal angepasst werden kann.

In Fig. 5.3-2a und b ist für beide Lagertypen schematisch dargestellt, wie eine optimale Ausnutzung des Platzangebots unter Berücksichtigung der vorgängig genannten konzeptuellen Ansätze unter Annahme sehr ungünstiger räumlicher Bedingungen geschehen könnte.

[58] Lagerfelder umfassen einen Bereich im Wirtgestein (Fläche) bestehend aus einer Gruppe von Lagerkammern inklusive einer Fläche mit horizontalem Mindestabstand um die Lagerkammern.



(a)



(b)

Fig. 5.3-2: Schematische Darstellung der Anordnung der Lagerkammern für das HAA-Lager (a) und das SMA-Lager (b) unter Annahme äusserst ungünstiger räumlicher Randbedingungen (drei Familien von anordnungsbestimmenden Störungszonen).

Bei der hier aufgezeigten doppelröhrigen Anordnung der Zugangs- und Erschliessungsbauwerke kann der Perimeter der nutzbaren Lagerzone signifikant erhöht werden, ohne dass zusätzliche Zugänge (Zugangstunnels, Schächte) erforderlich werden.

Unter der ungünstigen Annahme von drei verschiedenen Richtungen der anordnungsbestimmenden geologischen Elemente in Form von steilstehenden tektonisch bedeutenden Störungen können Mindestabstände zwischen denselben abgeleitet werden, welche noch vernünftig nutzbare Lagerfelder für Lagerkammern ergeben. Für ein SMA-Lager beträgt dieser Mindestabstand

zwischen den anordnungsbestimmenden Störungen etwa gleicher Richtung unter Annahme einer mindestens 100 m langen SMA-Lagerkaverne ca. 0.4 km, für ein HAA-Lager unter Annahme eines mindestens 300 m langen Lagerstollens ca. 0.6 km. Bei grösseren Abständen von Störungen etwa gleicher Richtung (für SMA-Lager ca. > 0.8 km, für HAA-Lager ca. > 1.2 km) können bereits in Bezug auf den Gesamtplatzbedarf optimale Lagerkonfigurationen gefunden werden. Kann davon ausgegangen werden, dass nur eine oder zwei Richtungen von Störungen anordnungsbestimmend sind, so können auch Felder mit Mindestabständen von ca. 0.4 km für SMA bzw. ca. 0.5 km für HAA noch genutzt werden. Bei grösseren Abständen (für SMA-Lager ca. > 0.6 km, für HAA-Lager ca. > 0.9 km) können in diesem Fall optimale Lagerkonfigurationen gefunden werden.

5.3.2 Beurteilung der technischen Machbarkeit bezüglich des Platzangebots

Das in den verschiedenen Standortgebieten vorhandene Platzangebot untertags (PB-4) wird durch eine integrale Betrachtung aller geometrie- bzw. raumwirksamen Elemente bestimmt. Das geologische Standortgebiet wird durch die Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (PB-1) und die weiteren gebietsbegrenzenden geologischen Elemente[59] (PB-2) abgegrenzt. Das effektiv nutzbare Platzangebot wird weiter eingeschränkt durch die anordnungsbestimmenden geologischen Elemente (PB-3); im Rahmen der Optimierung werden in späteren Phasen auch Mächtigkeit, Neigung und Welligkeit des Wirtgesteins berücksichtigt.

Die Orientierung und Hinweise zur Häufigkeit der anordnungsbestimmenden geologischen Elemente ergeben sich aus den diesbezüglichen Informationen in Kap. 4.2.2 zu den erwarteten typischen Richtungen und Häufigkeiten von tektonisch bedeutenden lokalen Störungen, denen mit den Lagerkammern ausgewichen werden soll.

In den Standortgebieten *Zürich Nord-Ost* und *Südranden* ist eine optimale Nutzung sowohl für das HAA- als auch für das SMA-Lager möglich, denn Störungszonen mit grösseren Versätzen, die in dieser Region in den drei für die Nordschweiz typischen Richtungen auftreten, haben typische Abstände von grösser als rund 1.5 km, sodass ihnen einfach ausgewichen werden kann. Weiter wurde in SGT Etappe 1 erhebliche Reserven in Bezug auf das Platzangebot auch unter Berücksichtigung von Ungewissheiten aufgezeigt[60], sodass ein Ausweichen einfach möglich ist. Aufgrund der vorliegenden Daten ist somit von geeigneten Platzverhältnissen für günstige Lageranordnungen für beide Lagertypen sowohl im Standortgebiet *Zürich Nord-Ost* als auch im Standortgebiet *Südranden* auszugehen.

Im Standortgebiet *Nördlich Lägeren* kann bezüglich der anordnungsbestimmenden Störungen mit grösseren Versätzen von drei Systemen von unterschiedlicher Richtung mit typischen Abständen von > 1 km ausgegangen werden. Zwei dieser Systeme dürften steilstehend sein und eines davon (ENE-WSW) könnte – vor allem in den Randzonen – auch flachere Überschiebungen beinhalten. Störungssystemen mit typischen Abständen der Störungen von rund 1.0 km könnte mit mehr oder weniger optimalen Lagerkonfigurationen sowohl für das SMA- als auch

---

[59] Dazu gehörden auch glazial übertiefte Felsrinnen (PG-2), denen mit den Lagerkammern ausgewichen werden muss, falls diese die Langzeitsicherheit gefährden könnten.

[60] Gemäss SGT Etappe 1 entspricht das potenzielle Platzangebot im Standortgebiet Südranden für das SMA-Lager ungefähr dem 8-fachen des umhüllenden Abfallinventars, im Standortgebiet Zürich Nord-Ost ungefähr dem 14-fachen für das SMA- und dem 4-fachen für das HAA-Lager; das robuste Platzangebot beträgt im Standortgebiet Südranden für das SMA-Lager ungefähr das 5.5-fache des umhüllenden Abfallinventars, im Standortgebiet Zürich Nord-Ost ungefähr das 10-fache für das SMA-Lager und das 2.3-fache für das HAA-Lager. 'Robustes Platzangebot' bedeutet hier (und in den nachfolgenden Fussnoten), dass die Ungewissheiten bzgl. Gebietsbegrenzender geologischer Elemente (inkl. Zonen mit tektonischer Überprägung und Tiefenlage der Lagerebene unter Terrain) bei der Evaluation des Platzangebots mit konservativen Annahmen berücksichtigt werden.

für das HAA-Lager ohne erheblichen Platzmehrbedarf ausgewichen werden. Zonen mit kleineren typischen Abständen können unter Inkaufnahme ungünstiger Anordnungen teilweise (wo Abstände > 0.5 km) ebenfalls für die Platzierung von Lagerkammern genutzt werden. Es besteht ein genügendes Platzangebot, um gewisse Zonen auch als Ganzes zu meiden; in SGT Etappe 1 wurden die Reserven in Bezug auf das Platzangebot auch unter Berücksichtigung von Ungewissheiten aufgezeigt[61]. Aufgrund der vorliegenden Daten ist somit für beide Lagertypen unter Ausnützung der möglichen Anordnungsspielräume von ausreichenden Platzverhältnissen auch unter ungünstigen Annahmen auszugehen.

Im Standortgebiet *Bözberg* werden für die grösseren, anordnungsbestimmenden Störungen drei Systeme unterschiedlicher Richtung mit typischen Abständen von rund 1 km angenommen. Zwei dieser Systeme dürften steilstehend sein und eines davon (ENE-WSW) könnte – vor allem in den Randzonen – auch flachere Überschiebungen beinhalten. Störungssystemen mit typischen Abständen von rund 1 km könnte mit mehr oder weniger optimalen Lagerkonfigurationen sowohl für SMA- als auch für HAA-Lager ohne erheblichen Platzmehrbedarf ausgewichen werden. Zonen mit kleineren typischen Abständen können unter Inkaufnahme ungünstiger Anordnungen teilweise (wo Abstände > 0.5 km) ebenfalls für die Platzierung von Lagerkammern genutzt werden. Es besteht ein genügendes Platzangebot, um gewisse Zonen auch als Ganzes zu meiden; in SGT Etappe 1 wurden die Reserven in Bezug auf das Platzangebot auch unter Berücksichtigung von Ungewissheiten aufgezeigt[62]. Aufgrund der vorliegenden Daten ist unter Ausnützung der möglichen Anordnungsspielräume somit von ausreichenden Platzverhältnissen für beide Lagertypen auszugehen.

Im Standortgebiet *Jura-Südfuss* deuten sich drei Systeme von bedeutenden lokalen Störungen an. Zwei dieser Systeme dürften mehrheitlich steilstehend sein und eines davon (ENE-WSW) könnte auch flachere Überschiebungen beinhalten. Auch in diesem Standortgebiet wird ausserhalb der tektonisch stärker beanspruchten Teilgebiete (u.a. Bereich Ostende der Born-Engelberg-Antiklinale, Eppenberg-Flexur) von typischen Abständen von Störungen etwa gleicher Richtung von rund 1 km ausgegangen. Solchen Störungen kann mit optimalen Lagerkonfigurationen für ein SMA-Lager ohne erheblichen Platzmehrbedarf ausgewichen werden. Zonen mit kleineren typischen Abständen können unter Inkaufnahme ungünstiger Anordnungen teilweise (wo Abstände > 0.5 km) ebenfalls für die Platzierung von Lagerkammern genutzt werden. Es besteht ein genügendes Platzangebot, um gewisse tektonisch komplexere Zonen (u.a. Ostende der Born-Engelberg-Antiklinale, Eppenberg-Flexur) auch als Ganzes zu meiden; in SGT Etappe 1 wurden die Reserven in Bezug auf das Platzangebot auch unter Berücksichtigung von Ungewissheiten aufgezeigt[63]. Aufgrund der vorliegenden Daten ist unter Ausnützung der möglichen Anordnungsspielräume somit von ausreichenden Platzverhältnissen auszugehen.

Im Standortgebiet *Wellenberg* muss von einer viel höheren Störungsdichte als in den Standortgebieten der Nordschweiz ausgegangen werden, wobei in den bisherigen Sondierbohrungen in den relevanten Tiefen bisher keine Störungen mit erhöhter Wasserführung angebohrt wurden.

---

[61] Gemäss SGT Etappe 1 entspricht das potenzielle Platzangebot im Standortgebiet Nördlich Lägeren für das SMA-Lager ungefähr dem 7-fachen des umhüllenden Abfallinventars, für das HAA-Lager ungefähr dem 4-fachen; das robuste Platzangebot für dieses Standortgebiet beträgt für das SMA-Lager ungefähr das 3.5-fache des umhüllenden Abfallinventars, für das HAA-Lager ungefähr das 1.4-fache.

[62] Gemäss SGT Etappe 1 entspricht das potenzielle Platzangebot im Standortgebiet Bözberg für das SMA-Lager ungefähr dem 16-fachen des umhüllenden Abfallinventars, für das HAA-Lager ungefähr dem 2½-fachen, das robuste Platzangebot in diesem Standortgebiet beträgt für das SMA-Lager ungefähr das 7.5-fache des umhüllenden Abfallinventars, für das HAA-Lager ungefähr das 1.3-fache.

[63] Gemäss SGT Etappe 1 entspricht das potenzielle Platzangebot im Standortgebiet Jura-Südfuss für das SMA-Lager ungefähr dem 6-fachen des umhüllenden Abfallinventars, das robuste Platzangebot in diesem Standortgebiet beträgt für das SMA-Lager ungefähr das 2.5-fache des umhüllenden Abfallinventars.

Weiter besteht in Bezug auf die Lageranordnung ein grösserer Spielraum, einerseits aufgrund des grossen Volumens der Wirtgesteins-Akkumulation, welche räumlich in alle drei Raumrichtungen ausgenützt werden kann, andererseits aufgrund der felsmechanisch günstigeren Bedingungen, welche unter Inkaufnahme eines erhöhten bautechnischen Aufwands grössere Lagerkavernen zulassen (vgl. Tab. 5.2-2), was wiederum den Platzbedarf reduziert. In SGT Etappe 1 wurden die Reserven in Bezug auf das robuste Platzangebot auch unter Berücksichtigung von Ungewissheiten aufgezeigt[64]. Aufgrund der vorliegenden Daten ist unter Ausnützung der möglichen Anordnungs- bzw. Auslegungsspielräume somit von ausreichenden Platzverhältnissen auszugehen.

Beurteilung der technischen Machbarkeit des SMA- und HAA-Lagers bezüglich des Platzangebots (Fazit)

Die für das SMA- und HAA-Lager vorhandenen Konzepte zur Anordnung der untertägigen Bauwerke (Anordnung des SMA-Lagers auf zwei Lagerebenen (ausgenommen Südranden und Bözberg), Aufteilung des Lagers in Lagerfelder von geeigneter Geometrie mit der Möglichkeit von Blindstollen für die Lagerkammern) erlauben es, die räumlichen Gegebenheiten in den verschiedenen Standortgebieten optimal zu nutzen. Für die in Kap. 4 für die verschiedenen Standortgebiete diskutierten geometrischen und geologischen Bedingungen (inkl. bestehender Ungewissheiten) ist es möglich, die Lagerfelder auch zwischen näher beieinander liegenden anordnungsbestimmenden Störungszonen zu nutzen. Unter Berücksichtigung der Platzreserven kann in allen Standortgebieten auch für die in Kap. 4.2 aufgeführten Annahmen bezüglich der anordnungsbestimmenden geologischen Elemente von einem ausreichenden Platzangebot ausgegangen werden. Für die effektive Anordnung der untertägigen Lagerbauten und die genaue Quantifizierung des resultierenden Platzangebots sind die für Etappe 3 erforderlichen Felduntersuchungen von der Oberfläche (insbesondere Seismik[65]) und evtl. in der Phase nach Erteilung der Rahmenbewilligung auch die Exploration von Untertag notwendig. Die für SGT Etappe 2 begonnenen Arbeiten zur Geometrie der geologischen Strukturen (Kap. 8.2) und zur Vertiefung der Anlagenauslegung (Kap. 8.6) werden benutzt, um die Beurteilung der Machbarkeit bezüglich des Platzangebots in Etappe 2 zu konsolidieren. Dabei wird auch die Explorierbarkeit der verschiedenen anordnungsbestimmenden geologischen Elemente in den verschiedenen Standortgebieten berücksichtigt, welche Bestandteil der qualitativen Bewertung in SGT Etappe 2 ist.

---

64 Gemäss SGT Etappe 1 entspricht das potenzielle Platzangebot im Standortgebiet Wellenberg für das SMA-Lager ungefähr dem 5-fachen des umhüllenden Abfallinventars, das robuste Platzangebot in diesem Standortgebiet beträgt für das SMA-Lager ungefähr das 2.5-fache des umhüllenden Abfallinventars.

65 Für Etappe 2 ist geplant, für die HAA-Gebiete in der Region Bözberg – Nördlich Lägeren ein Netz von zusätzlichen 2D-Seismiklinien zu messen. Die Messungen dienen dazu, für das HAA-Lager die regionale tektonische Situation detaillierter zu erfassen im Hinblick auf die Bewertung der Langzeitentwicklung über den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren. Die Messungen werden auch dazu beitragen, die Strukturen detaillierter zu erfassen im Hinblick auf die Bewertung geometrischer Aspekte für die Anordnung der HAA-Lagerstollen. Weiter werden die Messungen verwendet zur Planung und Fokussierung der geplanten 3D-Seismik.

5.4 Beurteilung der technischen Machbarkeit bezüglich der untertägigen Erschliessung der Lagerfelder

5.4.1 Möglichkeiten der untertägigen Erschliessung der Lagerfelder

In allen Phasen der Realisierung des geologischen Tiefenlagers sind Zugänge von der Oberfläche zu den Lagerfeldern notwendig. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, Tiefenlager über Rampen (Wendelrampen, gerade Rampen, gekrümmte Rampen) oder Schächte (Vertikalschacht, Schrägschacht, Blindschacht mit horizontalem Zugangstunnel) zu erschliessen[66] (vgl. Fig. 5.4-1).

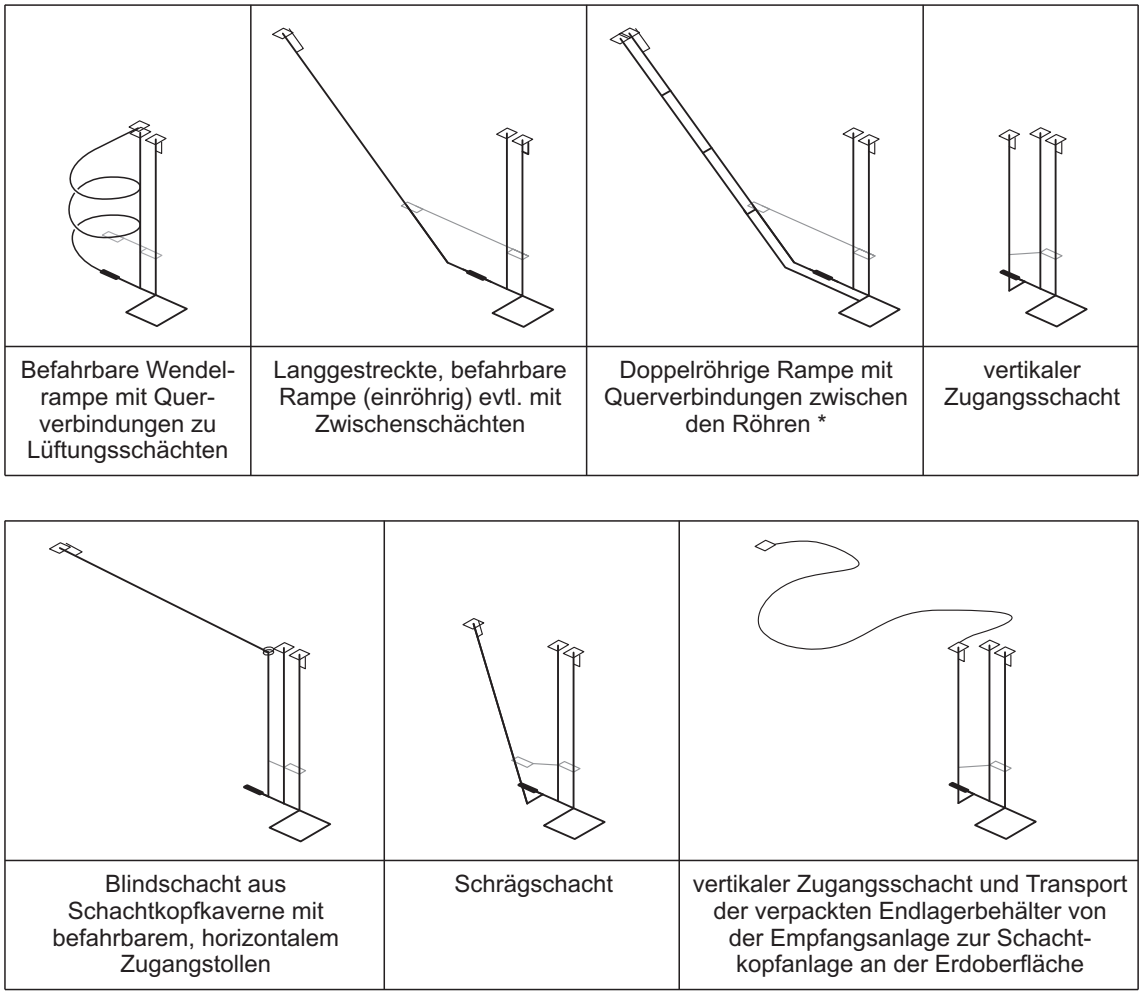


Fig. 5.4-1 Prinzipielle Möglichkeiten der Auslegung der Zugangsbauwerke zur Erschliessung der Lagerfelder.

Neben dem Hauptzugangsbauwerk, über welches die Einlagerung der Abfälle erfolgt, sind Schächte für Lüftung und Bau etc. erforderlich.

* Eine doppelröhrige Auslegung der Zugangsbauwerke kann erhebliche betriebliche Vorteile bieten.

---

[66] Sowohl Schächte als auch Rampen sind in den verschiedenen Konzepten für geologische Tiefenlager im Ausland vorgesehen. Des Weiteren sind sowohl Schächte als auch Rampen im Bergbau oder als Zugänge zu anderen ebenfalls untertägigen Anlagen (Wasserkraftanlagen, Zwischenangriffe für Verkehrstunnels, militärische Anlagen etc.) weit verbreitet.

Bezüglich der geologischen Herausforderungen sind die Zugangsbauwerke mit anderen konventionellen untertägigen Anlagen wie Bergwerke, Wasserkraftanlagen oder Verkehrstunnels vergleichbar. Neben den geologischen Aspekten sind bei der Auslegung auch die Anforderungen aus der nuklearen Sicherheit, dem Gesundheits- und Arbeitsschutz[67] (z.B. Lüftung) und der Umweltverträglichkeit (inkl. Grundwasserschutz) zu berücksichtigen.

Die lange Betriebsdauer der Gesamtanlage unter Berücksichtigung der etappenweisen Realisierung bis zum endgültigen Verschluss erfordert redundante Systeme und Anlagen, welche bei Bedarf die Erneuerung oder den Ersatz ganzer Anlagenelemente unter Betrieb erlauben müssen.

Durch eine geeignete Linienführung, vortriebsbegleitende Vorauserkundung und die Wahl einer auf die erwarteten geologischen Bedingungen abgestimmte Baumethode können die zu erwartenden geotechnischen Herausforderungen bewältigt werden, was auch die zahlreichen Tunnelbauwerke in der Schweiz und im Ausland mit vergleichbaren Randbedingungen dokumentieren (Kellerhals & Haefeli 2010b, Schubert et al. 2010). Vor allem bei der Rampe kann die Linienführung im Zuge der weiteren Planung einfach an die örtlichen geologischen Bedingungen angepasst werden. Auch erst beim Bauvorgang entdeckten, lokal allenfalls sehr ungünstigen geologischen Verhältnissen (z.B. extreme Wasserzutritte infolge Verkarstung) kann ausgewichen werden, indem die Linienführung noch während des Baus angepasst wird. Voraussetzung dafür sind entsprechende Baumethoden, d.h. prinzipiell fallende Vortriebe für die Rampe und eine dafür ausgelegte, vortriebsbegleitende Vorauserkundung. Auch die Schachtachse kann nach der Vorauserkundung noch angepasst werden. Ausgehend von der heutigen Praxis des Untertagebaus bietet eine auf die lokale Geologie abgestimmte Vorauserkundung und bei Bedarf Vorausbehandlung des Gebirges (z.B. Gebirgsinjektionen) Gewähr, die bautechnischen Risiken auf ein vernünftiges Mass beschränken zu können (vgl. Lötschberg-Basistunnel, Ziegler 2006; Schachtabteufung Sedrun, Kovári & Descoeudres 2001; 18 km lange Zugangsrampe Mine Selby, Reuther 1989).

5.4.2 Beurteilung der technischen Machbarkeit bezüglich der untertägigen Erschliessung

Bei der Beurteilung der technischen Machbarkeit der Zugangsbauwerke sind vor allem die erwarteten geotechnischen Bedingungen zu berücksichtigen (siehe Kap. 4.4, PB-8 / Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen). Von zentraler Bedeutung sind die folgenden Punkte:

Wegen der häufig damit verbundenen bautechnischen Erschwernisse ist vor allem die Möglichkeit von *Karstwassereinbrüchen* von grosser Bedeutung[68], insbesondere in Zusammenhang mit hohem Wasserdruck. Dabei wird grundsätzlich angestrebt, durch die Wahl der Linienführung und die Vorauserkundung das Anfahren von Karst zu vermeiden. Falls verkarstete Schichten durchquert werden müssen, besteht grundsätzlich die Möglichkeit, entweder das Karstwasser zu fassen und um den Tunnel herum wieder ins Karstsystem zu leiten oder den Karst vorgängig, d.h. vor dem Ausbruch, abzudichten. In jedem Fall sind systematische, vortriebsbegleitende

---

[67] Dazu gehören insbesondere die Einhaltung zulässiger klimatischer Bedingungen, die Störfallvorsorge mit entsprechenden Flucht- und Interventionsmöglichkeiten sowie die Verhütung von Bränden und Explosionen als Folge von Erdgas.

[68] Grössere, nicht wasserführende Karsthohlräume in Tunnelnähe können auch die Stabilität des Tunnelgewölbes beeinträchtigen. Dies ist aber bautechnisch einfacher zu beherrschen (Vorauserkundung, Füllinjektionen, Gewölbeverstärkung etc.).

Vorauserkundungen[69] Voraussetzung, um dem Karst auszuweichen oder aber den Karst vor dem Anfahren abzudichten[70]. Dabei ist zu beachten, dass die Lage von Karstsystemen in der Regel schlecht prognostizierbar ist und deshalb der Aufwand für die Vorauserkundung entsprechend aufwändig ist. Durch eine geeignete Linienwahl kann vermieden werden, dass bedeutende Störungszonen auf dem Niveau von potenziell verkarsteten Gesteinen (insbesondere Oberer Malm) durchfahren werden müssen, denn Verkarstung in Kombination mit Störungszonen stellen speziell hohe Herausforderungen dar.

Bei der Mehrzahl der Zugangsvarianten sind quellfähige Gesteine zu durchqueren. Die durch *quellendes Gebirge* erwarteten Schwierigkeiten sind aber beschränkt, da Abschnitte mit quellfähigen Gesteinen relativ gut prognostizierbar und mit technischen Massnahmen[71] gut beherrschbar sind. Besonders anspruchsvoll ist das Durchfahren von Anhydrit-haltigen Gesteinen[72]. Hier können Bauwerke insbesondere auf längere Sicht aufwändige Sanierungsmassnahmen erfordern, wie dies Beispiele von Tunnels im Jura zeigen. Durch eine geeignete Auslegung (z.B. doppelröhriger Zugangstunnel) kann beispielsweise der dann zu erwartenden Sanierung Rechnung getragen werden.

Störungszonen können im Allgemeinen bautechnisch gut bewältigt werden, unter der Bedingung, dass sie in einem günstigen, grossen Winkel angefahren werden und kein oder wenig Wasser führen. Ungünstig sind in spitzem Winkel zu querende Störungszonen und solche mit starkem Wasserandrang, besonders in Zusammenhang mit Karst. Da Störungszonen im Vergleich zu Karst relativ gut prognostizierbar sind (Erkundungsmassnahmen bzw. geophysikalische Vorfelderkundung beim Tunnelbau), kann diese Schwierigkeit durch geeignete Variantenwahl und angepasste Linienführung begrenzt werden. Geotechnische Schwierigkeiten treten häufig aufgrund der Überbeanspruchung des Gebirges und tiefgreifenden Spannungsumlagerungen sowie grossen Verschiebungen infolge Entfestigung des Gebirges auf (sogenannt "druckhaftes Gebirge"). Dies ist vor allem der Fall bei grosser Überlagerung und geringen Gebirgsfestigkeiten. Diese Situationen sind mit den heute zur Verfügung stehenden Baumethoden aber beherrschbar.

Gaszutritte sind in verschiedenen Formationen zu erwarten (Kap. 4.4, PB-8). Aus dem Fels austretendes Gas kann zusammen mit Luft eine explosionsfähige Atmosphäre bilden. Es bestehen für Untertagebauten in der Schweiz gesetzliche und behördliche Vorschriften (Suva 2002), welche Massnahmen in den verschiedenen Phasen der Erstellung bzw. des Betriebs des Bauwerks vorzukehren sind, um die Sicherheit und den Schutz der Gesundheit der Arbeitnehmer zu gewährleisten. Zu den Massnahmen gehören vor allem Konzentrationsüberwachungen und auf Gasvorkommen ausgelegte Lüftungskonzepte. Unter Berücksichtigung dieser Vorkehrungen ist die bautechnische Machbarkeit auch bei Gasvorkommen gewährleistet.

Bei Untertagebauten in *Lockergestein* besteht bis zu einer Überlagerung von mehreren Dutzend Metern grosse Erfahrung, Lockergesteine werden deshalb als bautechnisch unproblematisch eingeschätzt. Die Lage der quartären Felsrinnen ist mittlerweile gut bekannt (Nagra 2008c, Beilage 5.2-28) und der Kenntnisstand wird weiter verbessert, so dass ihnen bei der Festlegung der Linienführung der Zugangsbauwerke ausgewichen werden kann. Lockergesteine enthalten

---

[69] Zum Beispiel Kernbohrungen mit Preventer, Bohrlochscanneraufnahmen und geophysikalischen Messungen (z.B. Georadar).

[70] Ein Beispiel für die Vorauserkundung und Abdichtung im Karst ist die Tunnelstrecke in der Doldenhorn-Decke des Lötschberg-Basistunnels (Ziegler 2006).

[71] Fernhalten von Wasser, Einbau Sohlgewölbe, evtl. Verstärkung mit Innengewölbe, Erhaltungskonzept mit der Berücksichtigung von Sanierungsarbeiten unter Betrieb.

[72] Gesteine im Liegenden des Opalinustons werden unter Umständen im Standortgebiet Bözberg durchfahren werden.

oft bedeutende, genutzte Grundwasservorkommen. Die Auflagen des Grundwasserschutzes (PB-11 / Oberflächensituation) bilden deshalb eine zentrale Randbedingung für die Planung der Linienführung und die Wahl der Oberflächenstandorte.

In gewissen Abschnitten und Formationen ist mit dem Auftreten von *aggressivem Bergwasser* zu rechnen, welche zu Schäden an den Untertagebauten (Betonverkleidung, Entwässerungssystem etc.) führen können (vgl. beispielsweise Bau des Bözberg-Autobahntunnel, Wegmüller 2001) und vor allem die Dauerhaftigkeit der Bauwerke beeinträchtigen können. Diese Problematik ist bekannt, und Vorkehrungen können bereits in der Planung getroffen werden, um die Dauerhaftigkeit zu gewährleisten (Wahl der Baustoffe, Abdichtungen, Auslegung der Entwässerung, Erhaltungskonzept etc.). Unter Berücksichtigung solcher Vorkehrungen ist die bautechnische Machbarkeit auch bei aggressivem Bergwasser gewährleistet.

Durch geeignete Linienwahl und – wo notwendig – durch Reduktion der Wasserzusickerung in die Zugangsbauwerke (Abdichtungen, Gebirgsinjektionen) wird verhindert, dass *Mineralquellen und Thermen* einerseits (PB-10) und generell die Tiefengrundwässer andererseits beeinträchtigt werden. Die innerhalb bzw. im Umkreis von 10 km der provisorischen Planungsperimeter vorhandenen Mineral- und Thermalwasservorkommen sind in Fig. A3-4 aufgeführt.

Die Bedeutung der einzelnen Punkte hängt stark vom geologischen Standortgebiet, der Wahl des Standorts für die Oberflächenanlagen und der gewählten Linienführung der Zugangsbauwerke ab. Die massgebenden geotechnischen Informationen für potenzielle Linienführungen wurden beschrieben (Kellerhals & Haefeli 2010b) und bilden eine wichtige Grundlage für die weitere Planung, unter anderem auch für die Auswahl von geeigneten Standorten für die Oberflächenanlagen und die Überprüfung der Eignung von Zugangskorridoren in die Wirtgesteinsbereiche.

Beurteilung der technischen Machbarkeit des SMA- und HAA-Lagers bezüglich der untertägigen Erschliessung (Fazit)

Die für die verschiedenen Standortgebiete vorhandenen, in Kap. 4.4 diskutierten Unterlagen zu den geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnissen in den für die Erschliessung der Lagerebenen zu durchfahrenden Gesteinsformationen sind auch unter Berücksichtigung der Ungewissheiten genügend, um die technische Machbarkeit der untertägigen Erschliessung zu beurteilen. Auch wenn die geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse in den verschiedenen Standortgebieten anspruchsvoll sein können, wird mit den vorhandenen Baumethoden (inkl. Vorauserkundung) und der vorhandenen Flexibilität zur Festlegung der detaillierten Linienführung der untertägigen Erschliessung die technische Machbarkeit positiv beurteilt. Mit den für Etappe 2 begonnenen Arbeiten wird es möglich sein, diese Beurteilung weiter zu konsolidieren. Weiter kann davon ausgegangen werden, dass die Unterlagen es auch erlauben werden, die in Etappe 2 bezüglich der Hydrogeologie notwendigen Abwägungen in Zusammenhang mit der Anordnung der Oberflächeninfrastruktur durchzuführen.

6 Unterlagen zur Beurteilung der Sicherheit

6.1 Überblick

Die sicherheitstechnische Bewertung der geologischen Standorte in Etappe 2 erfolgt anhand von quantitativen Modellrechnungen zur Radionuklidausbreitung (standardisiertes Parametervariationsverfahren zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle) und mittels einer qualitativen Bewertung, in welche auch die Resultate von Modellrechnungen zum Verhalten des Gesamtsystems einfliessen. Im vorliegenden Kapitel werden die Grundlagen für die Testrechnungen zur Ermittlung der Dosisintervalle dokumentiert sowie die Resultate der Testrechnungen diskutiert. Modellrechnungen in dieser Art werden auch für die Analyse des Verhaltens des Gesamtsystems verwendet. Das Vorgehen bei der Ableitung der für die Dosisberechnungen benötigten Informationen und Festlegungen ist in Fig. 6.1-1 schematisch dargestellt und wird im Folgenden kurz erläutert.

Eine zentrale Rolle spielen die konzeptuellen Modelle und Datensätze für die Dosisberechnungen. Der Datensatz zum Inventar der radioaktiven Abfälle ("IDS-SA") enthält Angaben zu Mengen und Art der Abfälle sowie Nuklid- und Materialinventare (vgl. Nagra 2008e bzw. Anhang A6). Der Datensatz zur Anlagenauslegung ("ADS-SA") enthält die Informationen zur Lagerauslegung, welche für die Konzeptualisierung und Parametrisierung der Rechenfälle benötigt werden[73]. Der Datensatz zur Geologie ("GDS-SA") umfasst sämtliche in der Sicherheitsanalyse benötigten Informationen zur Geologie; d.h. sowohl Informationen, welche für die Konzeptualisierung der Rechenfälle benötigt werden, als auch Informationen für die Ableitung der Parameterwerte, vgl. dazu die Informationen in Kap. 4 sowie in Anhang A3. Eine spezielle Rolle spielen die Systemanalysen. Einerseits werden sie benutzt, um gewisse Inputdatensätze zu generieren (z.B. Sorptionsdaten); andererseits liefern sie die Begründung dafür, wieso gewisse Prozesse in der Sicherheitsanalyse nicht explizit berücksichtigt werden. Die Systemanalysen liefern auch Informationen für die detaillierte Auslegung des Lagers (Abfallzuteilung, Abfallaufteilung, Vorgaben an einzelne Systemkomponenten, vgl. Pfeile zur Rückkopplung der Systemanalysen an IDS-SA, ADS-SA und GDS-SA in Fig. 6.1-1).

Das vorliegende Kapitel ist wie folgt strukturiert: Zuerst werden die Systemanalysen diskutiert (Kap. 6.2). Danach werden die Grundlagen für die Dosisberechnungen aufgezeigt. Dies umfasst eine Beschreibung und Begründung der Rechenfälle (Kap. 6.3) sowie wichtige Unterlagen für die Testrechnungen (Modellkonzepte, verwendete Rechencodes sowie Verweise auf die Inputdaten für die Dosisberechnungen für Nahfeld, Geosphäre und Biosphäre) in Kap. 6.4. Kap. 6.5 enthält die Resultate der Testrechnungen (berechnete Dosiskurven), die in Kap. 7 als Grundlage für die Evaluation des Kenntnisstands hinsichtlich der Eindeutigkeit der Aussagen bezüglich der "sicherheitstechnischen Eignung" bzw. "sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit" der Standortgebiete verwendet werden.

---

[73] Dazu gehören typische Querschnitte, Ausbau und mögliche Längen der Lagerkammern und die generelle Lagerarchitektur, wie sie in Kap. 5 dargestellt sind. Weiter sind Angaben zu den verwendeten Materialien erforderlich.

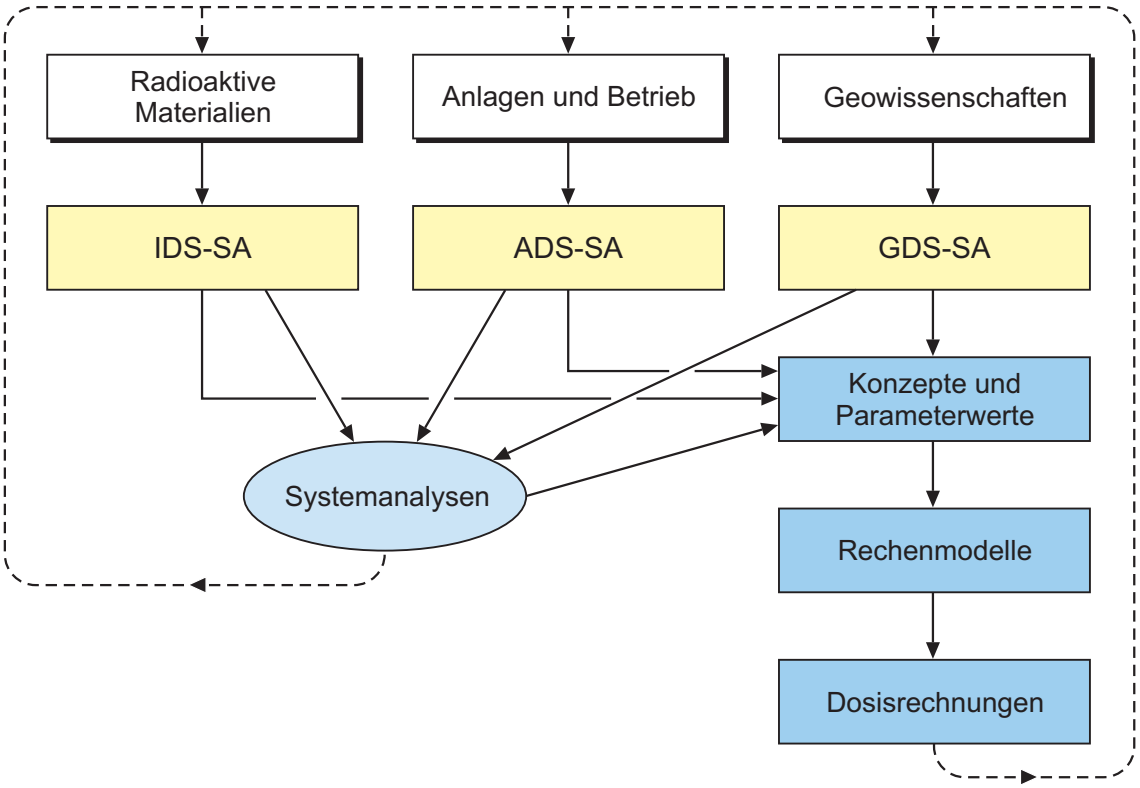


Fig. 6.1-1: Informationsfluss bei der Erarbeitung der Grundlagen für die Dosisrechnungen.

Die Farben entsprechen denjenigen in Fig. 3.2-1: Erarbeitung Unterlagen (gelb; IDS: Datensatz zum Inventar der radioaktiven Abfälle; ADS: Datensatz zur Anlagenauslegung; GDS: Datensatz zur Geologie) und Beurteilung Unterlagen (blau). Gestrichelt eingezeichnet ist die Berücksichtigung der Resultate der Systemanalysen sowie der Dosisrechnungen für die Erarbeitung von Vorgaben für die Lagerauslegung (inkl. Abfallzuteilung), für die Verfeinerungen bezüglich der Anforderungen an die Geologie (z.B. Regeln für die Anordnung der Lagerkammern) und bezüglich der Charakterisierung der radioaktiven Materialien.

6.2 Verhalten des Barrierensystems bezüglich ausgewählter Aspekte (Systemanalysen)

6.2.1 Überblick

Wie in Kap. 6.1 erwähnt, werden Systemanalysen einerseits benutzt, um gewisse Inputdatensätze zu generieren; andererseits liefern sie die Begründung dafür, wieso gewisse Prozesse in der Sicherheitsanalyse nicht explizit berücksichtigt werden. Diese Aspekte werden im Folgenden diskutiert. Dazu sind die in Tab. 6.2-1 aufgeführten relevanten Prozesse und Parameter von Bedeutung. In dieser Tabelle wird auch aufgeführt, in welchem Kapitel die entsprechenden Informationen diskutiert werden. Einige dieser Prozesse und Parameter werden im vorliegenden Kapitel abschliessend behandelt (in Tab. 6.2-1 grün markiert). Dies bedeutet, dass die Evaluation bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen zur Sicherheit für diese Prozesse und Parameter schwerpunktmässig im vorliegenden Kap. 6.2 vorgenommen wird; die entsprechenden Informationen fliessen aber teilweise indirekt, d.h. in der Form von abgeleiteten Parameterwerten oder konzeptuellen Annahmen, in die Dosisberechnungen ein. Für alle anderen der in Tab. 6.2-1 aufgeführten Prozesse und Parameter findet die abschliessende Evaluation bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen zur Sicherheit anhand der Dosisberechnungen in Kap. 6.3*ff* statt.

Tab. 6.2-1: Die für die Systemanalysen relevanten Prozesse und Parameter.

Die Tabelle enthält Hinweise auf die Kapitel, in denen die zugehörigen Informationen dokumentiert bzw. diskutiert werden.

× detaillierte Darlegung des Kenntnisstands

[×] Diskussion des Kenntnisstands beschränkt auf Einflüsse von geologisch relevanten Prozessen und Parametern (PG)

(×) mit Hilfe von Systemanalysen abgeleiteter Inputparameter für die Testrechnungen

Grün markierte Felder: Schwerpunkt der Evaluation bzgl. Eindeutigkeit der Aussagen zur Sicherheit in Kap. 6.2.

Nr.	**Relevante Prozesse und Parameter für die Systemanalysen**	**Präzisierung**	**Hinweis auf Kapitel, in denen die zugehörigen Informationen dokumentiert und diskutiert werden**					
			Ableitung Parameterwerte (Kap. 6.2.2)	Lagerbedingte Einflüsse (Kap. 6.2.3)	Einflüsse bautechnische Auslegungsvarianten (Kap. 6.2.4)	Geologische Langzeitentwicklung (Kap 6.2.5)	Langzeitverhalten des Nahfelds (Kap. 6.2.6)	Nutzungskonflikte (Kap. 6.2.7)
1. Relevante Prozesse und Parameter für die technischen Barrieren (PT)								
PT-1	Behälterlebensdauer BE/HAA						[×]	
PT-2	Auflösungsrate für Brennstoffmatrix und Hüllrohre BE						[×]	
PT-3	Löslichkeitslimiten im Nahfeld BE/HAA/LMA						[×]	
PT-4	Sorptionskoeffizienten im Nahfeld						[×]	
PT-5	Advektion bzw. Diffusion im Nahfeld	Dominierende Transportprozesse im Nahfeld (Zement, Bentonit)					[×]	
PT-6	Transportrelevante Eigenschaften Interface BE/HAA-Lagerstollen/ Wirtgestein	Hydraulische Durchlässigkeit, Sorptions- und Diffusionskoeffizienten			×			
PT-7	Auslegung der Lagerkammern	Querschnitte der SMA-Lagerkavernen			×			

Tab. 6.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter für die Systemanalysen	Präzisierung	Hinweis auf Kapitel, in denen die zugehörigen Informationen dokumentiert sind					
			Ableitung Parameterwerte (Kap. 6.2.2)	Lagerbedingte Einflüsse (Kap. 6.2.3)	Einflüsse bautechnische Auslegungsvarianten (Kap. 6.2.4)	Geologische Langzeitentwicklung (Kap. 6.2.5)	Langzeitverhalten des Nahfelds (Kap. 6.2.6)	Nutzungskonflikte (Kap. 6.2.7)
2. Relevante Prozesse und Parameter für die geologischen Barrieren (PG)								
PG-1	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung					×		
PG-3	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion					×		
PG-4	Zeitliche Entwicklung regionale Erosionsbasis	unter Berücksichtigung der lokalen Erosion				×		
PG-5	Mächtigkeit	Fliesst in PG-13 ein	×					
PG-6	Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit						×	
PG-7	Einfluss Dekompaktion auf hydraulische Durchlässigkeit					×		
PG-10	Porosität	Fliesst auch in PG-22 ein	×					
PG-11	Sedimentäre Architekturelemente		×					
PG-12	Lage und Beschaffenheit von verkarstungsfähigen Gesteinen innerhalb des Wirtgesteins		×					
PG-13	Länge der Transportpfade	inkl. laterale Transportpfadanteile innerhalb des WG/EG bis zu regionalen Störungszonen bzw. Exfiltrationsorten	(×)					
PG-14	Transmissivität Störungszonen						×	

Tab. 6.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter für die Systemanalysen	Präzisierung	Hinweis auf Kapitel, in denen die zugehörigen Informationen dokumentiert sind					
			Ableitung Parameterwerte (Kap. 6.2.2)	Lagerbedingte Einflüsse (Kap. 6.2.3)	Einflüsse bautechnische Auslegungsvarianten (Kap. 6.2.4)	Geologische Langzeitentwicklung (Kap. 6.2.5)	Langzeitverhalten des Nahfelds (Kap. 6.2.6)	Nutzungskonflikte (Kap. 6.2.7)
2. Relevante Prozesse und Parameter für die geologischen Barrieren (PG)								
PG-15	Mineralogie	Fliessen in PG-21 und teilweise in PG-22 ein	×					
PG-16	pH		×				×	
PG-17	Redox-Bedingungen		×				×	
PG-18	Salinität		×	×			×	
PG-19	Mikrobielle Prozesse		×					
PG-20	Kolloidfiltration		×					
PG-21	Sorptionskoeffizienten für WG/EG	Unter Berücksichtigung von PG-15 bis PG-20	(×)					
PG-22	Diffusionskoeffizienten für WG/EG	Unter Berücksichtigung von PG-10	(×)					
PG-23	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	unter Berücksichtigung des Selbstabdichtungsvermögens		×				
PG-24	Auswirkungen pH-Fahne auf Wirtgestein	Fliesst in PG-21 und PG-22 ein	×	×				
PG-25	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas	unter Berücksichtigung des Selbstabdichtungsvermögens		×				
PG-26	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur	unter Berücksichtigung des Selbstabdichtungsvermögens		×				

Tab. 6.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter für die Systemanalysen	Präzisierung	Hinweis auf Kapitel, in denen die zugehörigen Informationen dokumentiert sind					
			Ableitung Parameterwerte (Kap. 6.2.2)	Lagerbedingte Einflüsse (Kap. 6.2.3)	Einflüsse bautechnische Auslegunsvarianten (Kap. 6.2.4)	Geologische Langzeitentwicklung (Kap. 6.2.5)	Langzeitverhalten des Nahfelds (Kap. 6.2.6)	Nutzungskonflikte (Kap. 6.2.7)
2. Relevante Prozesse und Parameter für die geologischen Barrieren (PG)								
PG-28	Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung					×		
PG-30	Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung					×		
PG-32	Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins							×
PG-33	Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins							×
PG-34	Nutzungskonflikte hinsichtlich Geothermie							×
3. Relevante Prozesse und Parameter für die technische Machbarkeit (PB)								
PB-5	In-situ-Temperatur			×				

6.2.2 Ableitung von Parameterwerten für die Sicherheitsanalyse

Tab. 6.2-2 zeigt, welche der relevanten geologischen Prozesse und Parameter bei der Festlegung der verschiedenen wichtigen Parameter[74] für die Geosphären-Modellierung berücksichtigt werden. Bei den wichtigen Parametern für die Geosphären-Modellierung handelt es sich um die Länge der Transportpfade (PG-13), die Sorptionskoeffizienten (PG-21) und die Diffusionskoeffizienten für das Wirtgestein bzw. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (PG-22).

[74] Neben den geologischen Parametern, die direkt in die Dosisberechnungen einfliessen, werden die in diesem Abschnitt diskutierten Parameterwerte unter Berücksichtigung von verschiedenen geologischen Prozessen und Parametern abgeleitet.

Tab. 6.2-2: Berücksichtigung der relevanten geologischen Prozesse und Parameter bei der Festlegungung wichtiger Geosphärenparameter für die Testrechnungen.

Legende: × = relevant und quantitativ berücksichtigt, (×) = bedingt quantitativ oder durch qualitative Argumente berücksichtigt.

Nr.	Relevante geologische Prozesse und Parameter	Länge der Transportpfade (PG-13)	Sorptions-koeffizienten für WG/EG (PG-21)	Diffusions-koeffizienten für WG/EG (PG-22)
PG-5	Mächtigkeit	×		
PG-10	Porosität			×
PG-11	Sedimentäre Architektur-elemente	×		
PG-12	Lage und Beschaffenheit von verkarstungsfähigen Gesteinen innerhalb des Wirtgesteins	×		
PG-15	Mineralogie		×	
PG-16	pH		×	
PG-17	Redox-Bedingungen		×	×
PG-18	Salinität		×	(×)
PG-19	Mikrobielle Prozesse		(×)	
PG-20	Kolloidfiltration		(×)	
PG-24	Auswirkungen pH-Fahne auf Wirtgestein		×	(×)

PG-13 / Länge der Transportpfade, basierend auf PG-5 / Mächtigkeit, PG-11 / sedimentären Architekturelementen sowie auf PG-12 / Lage und Beschaffenheit von verkarstungsfähigen Gesteinen innerhalb des Wirtgesteins

Die Länge der Transportpfade wird aus der Mächtigkeit der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (PG-5) und aus dem Abstand der Lagerkammern zu horizontalen sedimentären Architekturelementen (PG-11) (inkl. verkarstungsfähige Gesteine (PG-12)) abgeleitet. Dabei wird vereinfacht von einer vertikalen Ausdehnung der Lagerkammern (inkl. Zuschlag zur Berücksichtigung der Auflockerungszone[75]) von 20 m für SMA/LMA und 5 m für BE/HAA ausgegangen, in Übereinstimmung mit dem Vorgehen in Nagra (2008d). Die verwendeten Werte sind in Tab. A4-3 für die verschiedenen geologischen Standortgebiete zusammengestellt (vgl. auch Schemata in Anhang A5). Die verwendeten Werte zur Länge der Transportpfade sind

[75] Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Wasserfluss in vertikaler Richtung durch eine erhöhte Durchlässigkeit der Auflockerungszone nur wenig beeinflusst wird, unter der Voraussetzung, dass eine genügend mächtige, wenig durchlässige Wirtgesteinsschicht erhalten bleibt. Deshalb müssen die Abzüge in der Länge der Freisetzungpfade zur Berücksichtigung der Auflockerungszone deren Ausdehnung nicht zwingend in voller Grösse abdecken.

Es ist zu beachten, dass für die Ableitung der Länge der Transportpfade die in den Nahfeldrechnungen verwendeten leicht unterschiedlichen Kavernengrössen für SMA (Querschnitt K09) und für LMA (Querschnitt K06) nicht berücksichtigt wurden; bei gleicher Lagerebene wird für LMA und SMA die gleiche Transportpfadlänge verwendet.

abdeckend für die in den verschiedenen Standortgebieten erwarteten Bedingungen und enthalten auch sehr ungünstige "What if?"-Annahmen zur Illustration der Robustheit der Lagersysteme bzgl. dieser geometrischen Informationen. Die horizontalen Transportpfadanteile beziehen sich auf allenfalls vorhandene sedimentäre Architekturelemente mit erhöhter Transmissivität und umfassen die Distanz bis zur nächsten grösseren Störungszone. Für diesen Pfad wird von einer Transportpfadlänge von 200 m ausgegangen.

PG-21 /Sorptionskoeffizienten für WG/EG, unter Berücksichtigung von PG-15 / Mineralogie, PG-16 / pH, PG-17 / Redox-Bedingungen, PG-18 / Salinität, PG-19 / Mikrobielle Prozesse, PG-20 / Kolloidfiltration und PG-24 / Auswirkungen pH-Fahne auf Wirtgestein

Die Sorptionskoeffizienten (K_d-Werte in m^3/kg) quantifizieren die Rückhaltung der Radionuklide im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich als Folge der geochemischen Wechselwirkung der Radionuklide mit dem Gestein. Einen Überblick über die für die Ableitung der Sorptionskoeffizienten relevanten geologischen Prozesse und Parameter gibt Tab. 6.2-2.

Die Sorption hängt signifikant von der Mineralogie des Gesteins (PG-15) ab. Der pH-Wert (PG-16) hat einen grossen Einfluss auf die Sorption, wenn ihr Mechanismus auf Oberflächenkomplexierung beruht. Die Salinität (PG-18) beeinflusst die Sorption dann, wenn ihr Mechanismus auf Kationenaustausch beruht. Das Redoxpotenzial (PG-17) beeinflusst die Speziation einiger Radionuklide und damit deren Sorption (redoxsensitive Radionuklide).

Mikrobielle Aktivität (PG-19) ist in Tongesteinen wegen zu kleiner Poren und zu tiefer Wasseraktivität meist sehr niedrig. Auch wenn grössere Poren und Klüfte vorhanden sind, ist die Aktivität wegen der bezüglich der Nährstoffe kargen Umgebung meist sehr klein. Die Porenwasserzusammensetzung ist allerdings durch die mikrobielle Katalyse chemischer, insbesondere Redox-Reaktionen beeinflusst, welche zumindest vor der hohen Kompaktion (Genese) der Tongesteine wirksam war. Mikroorganismen können die Sorption zwar grundsätzlich beeinflussen, wegen der oben erwähnten geringen Aktivität ist dieser Einfluss aber minimal und deshalb für die Quantifizierung der Sorption nicht relevant.

Die Kolloidfiltration (PG-20) ist in Tongesteinen sehr effizient. Kolloide können nur in advektiv dominierten Systemen als Träger von Radionukliden deren Ausbreitung in der Geosphäre beeinflussen. Eventuell vorhandene Kolloide aus dem zementierten Nahfeld sind in der Geosphäre wegen des chemischen Gradienten nicht stabil. Die möglichen Auswirkungen von Kolloiden in einem geklüfteten Medium werden im Rahmen von alternativen Rechenfällen mit der abdeckenden Annahme untersucht, dass die Radionuklide irreversibel an Kolloiden sorbieren und ohne Rückhaltung (d.h. ohne Matrixdiffusion/Sorption) durch das Wirtgestein und die Rahmengesteine transportiert werden.

In ungeklüfteten Tongesteinen ist eine pH-Fahne (PG-24) auf die nächste Umgebung des Zementnahfelds beschränkt. Nur in eventuell vorhandenen Klüften kann die advektive Ausbreitung der pH-Fahne über signifikante Entfernungen nicht ausgeschlossen werden (vgl. Diskussion in Kap. 6.2.3). Eine Beeinflussung der Sorption in diesen Bereichen ist damit möglich und wird in den Testrechnungen durch abdeckende Rechenfälle berücksichtigt (vgl. folgende Diskussion).

Die Erstellung der Datensätze erfolgt in zwei Phasen. Für die in diesem Bericht durchgeführten Testrechnungen werden Datensätze verwendet, welche mit der für SGT Etappe 1 verwendeten Methodik hergeleitet wurden. Für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 werden die Datensätze mit einer weiterentwickelten Methodik abgeleitet.

Für die *Testrechnungen* wird von dem in SGT Etappe 1 erstellten Datensatz von K_d-Werten für Opalinuston ausgegangen. Bradbury et al. (2008) entwickelten eine Methodik, um ausgehend von diesem Datensatz, K_d-Werte für andere tonige Wirtgesteine in der Schweiz abzuleiten. Diese Methodik wird übernommen. Die dazu benötigte Mineralzusammensetzung der Gesteine (PG-15), speziell der Gesamttonanteil inkl. Variabilität wurde an Bohrkernen bestimmt (siehe Tab. A6-8). Analog zur Etappe 1 (Bradbury et al. 2008) wird die Porenwasserzusammensetzung des Opalinustons vereinfachend auch zur Ableitung der K_d-Werte für die anderen Wirtgesteine verwendet. Die wegen der chemischen Ähnlichkeit begrenzten Abweichungen in den Parametern pH-Wert (PG-16), Redoxpotenzial (PG-17) und Salinität (PG-18) gegenüber dem Opalinuston werden durch die verwendeten Bandbreiten der K_d-Werte berücksichtigt. Eine höhere Ungewissheit besteht lediglich bei der Variante der Effinger Schichten, die eine höhere Salinität aufweisen könnten. Durch einen Rechenfall, bei dem angenommen wird, dass alle Radionuklide in diesem Wirtgestein nicht sorbieren, wird diese Ungewissheit konservativ abgedeckt. Die Ableitung der wirtgesteinsspezifischen Sorptionsdatensätze (inklusive untere und obere Eckwerte) für die Testrechnungen ist in Nagra (2010a) beschrieben; die in den Testrechnungen verwendeten Parameterwerte finden sich in Tab. A6-9. Der Einfluss einer pH-Fahne in eventuell vorhandenen Klüften (PG-24) auf die Sorption wird durch Rechenfälle berücksichtigt, in denen für die Sorption in der an die Klüfte angrenzenden Matrix der in SGT Etappe 1 abgeleitete, pessimistische Sorptionsdatensatz "Calcit" verwendet wird.

Für die *provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2* wird eine weiterentwickelte Methodik verwendet, die in Bradbury et al. (2010) beschrieben ist. Der generische Basisdatensatz bezieht sich nunmehr auf die in den Wirtgesteinen am häufigsten vorkommenden und die Sorption dominierenden Tonminerale Illit, Smektit und deren Wechsellagerungen. Die spezifische Mineralzusammensetzung der einzelnen Wirtgesteine (PG-15) wird entsprechend durch die Gehalte dieser Tonminerale repräsentiert. Auch die Zusammensetzung der Porenwässer (PG-16, 17, 18) wird wirtgesteinsspezifisch eingegrenzt (Mäder 2009a, b und 2010) und für die Ableitung der Sorptionsdatensätze genutzt. Die Methodik wird verwendet, um für die Wirtgesteine und die Rahmengesteine gesteinsspezifische Sorptionsdatensätze für die provisorische Sicherheitsanalyse zu erstellen. Für eine noch zu treffende Auswahl an Porenwasser- und Mineralogievarianten, die in ihrer Kombination den pessimistischen Fall am treffendsten charakterisieren, wird die gleiche Methodik angewandt, um die Ungewissheiten zu quantifizieren. Für ausgewählte Radionuklide (bzw. deren entsprechende Elemente) werden die so erarbeiteten K_d-Werte durch Experimente an repräsentativem und gut charakterisiertem Bohrkernmaterial überprüft (vgl. Kap. 8.3). Zur Berücksichtigung des Einflusses einer pH-Fahne in eventuell vorhandenen Klüften (PG-24) auf die Sorption wird ein entsprechender Sorptionsdatensatz erstellt.

PG-22 / Diffusionskoeffizienten für WG/EG, basierend auf PG-10 / Porosität, PG-17 / Redox-Bedingungen, PG-18 / Salinität und PG-24 / Auswirkungen pH-Fahne auf Wirtgestein

Die effektiven Diffusionskoeffizienten (vgl. PG-22 in Kap. 4.3.2) dienen der Parametrisierung des diffusiven Transports in homogen-porösen tonigen Wirtgesteinen sowie der Matrixdiffusion in geklüfteten tonigen Wirtgesteinen. Einen Überblick über die bei der Ableitung der Diffusionskoeffizienten relevanten geologischen Prozesse und Parameter gibt Tab. 6.2-2.

Die Porosität (PG-10) eines Tongesteins hat einen wesentlichen Einfluss auf die Diffusion resp. die effektiven Diffusionskoeffizienten der Radionuklide. Da die Ladung der redoxsensitiven Radionuklide von deren Oxidationszustand abhängt, beeinflussen die Redox-Bedingungen (PG-17) auch die Diffusion (Anion, Nicht-Anion). Die Salinität (PG-18) kann wegen ihrer Wirkung auf die elektrischen Doppelschichten und somit auf die zugängliche Porosität einen leichten Einfluss auf die Diffusion haben. Dies wird in den verwendeten Bandbreiten der effektiven Diffusionskoeffizienten berücksichtigt. Die in den Testrechnungen verwendeten Werte zur Diffusion (inklusive untere und obere Eckwerte) sind in Tab. A6-11 aufgeführt und in Nagra (2010a) erläutert. Ein durch die pH-Fahne (PG-24) bewirktes allfälliges Verstopfen der Poren in den Kluftwänden wird bei geklüfteten Medien durch abdeckende Rechenfälle ohne Matrixdiffusion berücksichtigt (siehe auch Kap. 6.2.3). Neben den in Tab. 6.2-2 gezeigten Einflüssen hängt die Diffusion auch von der Temperatur ab. Diese Abhängigkeit wurde am Beispiel Opalinuston für tonige Gesteine quantifiziert und hat einen begrenzten Einfluss (Van Loon et al. 2005).

Beurteilung des Kenntnisstands bezüglich der Ableitung von Parameterwerten für die Sicherheitsanalyse (Fazit)

Der heutige Kenntnisstand bezüglich der geochemischen Eigenschaften der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche wird als genügend beurteilt, um die wirtgesteinsspezifischen Sorptionsdatensätze und die effektiven Diffusionskoeffizienten abzuleiten. Ebenso genügen die Kenntnisse zu den Mächtigkeiten der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche, um die Längen der Transportpfade in den Standortgebieten[76] für die Testrechnungen festzulegen. Mit den für SGT Etappe 2 vorgesehenen Arbeiten werden die abgeleiteten Sorptionsdaten und Diffusionskoeffizienten verfeinert und die Länge der Transportpfade überprüft (vgl. Kap. 8.3 bzw. 8.2). Diese aktualisierten Informationen werden in der provisorischen Sicherheitsanalyse und beim sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 berücksichtigt.

6.2.3 Evaluation der lagerbedingten Einflüsse

Die relevanten lagerbedingten Einflüsse umfassen die Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten (PG-23), die Auswirkungen einer pH-Fahne auf das Wirtgestein (PG-24), das Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas (PG-25) und das Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur (PG-26), vgl. Tab. 6.2-1. Die folgende Evaluation zeigt, dass bei geeigneter Lagerauslegung keiner dieser lagerbedingten Einflüsse die Sicherheit des HAA- oder SMA-Lagers massgeblich beeinträchtigt.

[76] Bei der Ableitung der Länge der Transportpfade werden auch die sedimentären Architekturelemente (PG-11) berücksichtigt, falls diese eine erhöhte Wasserführung in horizontaler Richtung bewirken, vgl. Anhang 3.

PG-23 / Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten

Je nach Grösse und Auslegung der Untertagebauten und abhängig von den felsmechanischen Eigenschaften, dem Spannungsfeld und vom Selbstabdichtungsvermögen des Wirtgesteins ist die hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten (EDZ, englische Abkürzung für 'excavation-damaged zone') nach Verschluss des Lagers unterschiedlich stark erhöht[77].

Im Falle der BE/HAA-Lagerstollen ist die hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone nach Verschluss und Aufsättigung dank der kombinierten Wirkung des Selbstabdichtungsvermögens des Opalinustons[78] und des Quellvermögens der Bentonit-Verfüllung relativ gering. Die Kenntnisse über die Auflockerungszone und deren zeitliche Entwicklung (Selbstabdichtung) sind im Opalinuston wegen der umfangreichen Untersuchungen vor allem im Felslabor Mont Terri gut belegt. Die vorhandenen Untersuchungen stützen die Annahme, dass die Radionuklidfreisetzung hauptsächlich diffusiv und senkrecht zur Achse der BE/HAA-Lagerstollen erfolgt; die horizontalen Radionuklidtransportraten entlang der Achse der BE/HAA-Lagerstollen fallen aufgrund der geringen horizontalen hydraulischen Gradienten und Durchlässigkeiten sowie aufgrund der langen Transportwege verschwindend klein aus. Wie in Kap. 6.2.4 aufgezeigt wird, gilt dies auch für den Fall eines flächendeckenden Ausbaus der BE/HAA-Lagerstollen ('Liner') mit Zwischensiegeln. Für die Festlegung der Länge der Transportpfade wird zur Berücksichtigung der Auflockerungszone ein Abzug gemacht (vgl. Diskussion in Kap. 6.2.2), obschon die Auswirkung der Auflockerungszone auf den vertikalen Wasserfluss als vernachlässigbar und auf die Transporteigenschaften als klein eingeschätzt wird.

Im Falle des LMA- bzw. SMA-Lagers spielt die hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone im Nahbereich der Lagerkammern wegen der hochporösen durchlässigen Zementverfüllung für alle betrachteten Wirtgesteine keine Rolle und wird nicht weiter diskutiert. Für die Festlegung der Länge der Transportpfade wird zur Berücksichtigung der Auflockerungszone ein Abzug gemacht (vgl. Diskussion in Kap. 6.2.2), obschon die Auswirkung der Auflockerungszone auf den vertikalen Wasserfluss auch für das LMA- bzw. SMA-Lager als klein eingeschätzt wird, unter der Voraussetzung, dass trotz Auflockerungszone eine genügend mächtige Schicht an wenig durchlässigem Wirtgestein erhalten bleibt. Für das SMA-Lager kann es bei den Wirtgesteinen 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten bei kleinem vertikalem Abstand zwischen Lagerebene und dem nächsten durchlässigen sedimentären Architekturelement notwendig sein, die Kavernengrösse zu reduzieren.

Für die hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone im Bereich der Versiegelungszonen des HAA- bzw. SMA-Lagers gelten für Opalinuston sinngemäss die für die HAA-Lagerstollen aufgeführten Argumente zum Selbstabdichtungsvermögen. Die anderen bevorzugten Wirtgesteine ('Brauner Dogger', Effinger Schichten, Mergel-Formationen des Helvetikums) haben im Vergleich zum Opalinuston ein eher geringeres Selbstabdichtungsvermögen. In solchen Fällen ist geplant, die hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone durch bautechnische Massnahmen zu reduzieren (z.B. Ausräumen/Unterbruch der EDZ). Weiter zeigen Modellrechnungen zur Radionuklidfreisetzung durch die Versiegelungszonen des SMA- bzw. HAA-Lagers, dass der Einfluss der Auflockerungszone klein ist (Nagra 1994, Nagra 2002c, Nagra 2010c) und deshalb die Sicherheit nicht wesentlich beeinflusst.

---

77 Die Durchlässigkeit der Auflockerungszone ist erst zum Zeitpunkt der Nuklidfreisetzung für die Sicherheit von Relevanz. Bis zu diesem Zeitpunkt ist die Aufsättigung des Nahfelds schon weit fortgeschritten und der Quelldruck des Versiegelungsmaterials aufgebaut (bei den Versiegelungsstrecken bzw. in den BE/HAA-Lagerstollen), sodass die Selbstabdichtung zum Tragen kommt. Damit ergeben sich andere Verhältnisse in der Auflockerungszone als direkt nach dem Ausbruch der Untertagebauten.

78 Die Modellierung der langfristigen Spannungsentwicklung unter Berücksichtigung des Quelldrucks des Bentonits zeigt, dass für die Selbstabdichtung günstige Bedingungen vorliegen.

PG-24 / Auswirkungen pH-Fahne auf Wirtgestein

Für ein SMA- bzw. LMA-Lager in einem homogen-porösen Gestein mit diffusionsdominiertem Transport wie dem Opalinuston verlaufen die Zementdegradation und die Entwicklung einer pH-Fahne wegen des geringen Wasseraustauschs zwischen dem Gestein und dem zementhaltigen Nahfeld sehr langsam über Millionen von Jahren ab. Eine pH-Fahne ist örtlich beschränkt und würde sich weniger als 10 Meter in das Gestein ausdehnen, selbst wenn sämtlicher Zementstein in den Lagerkammern degradiert würde (Nagra 2002c). Aus diesen Gründen wird die pH-Fahne in einem homogen-porösen Gestein mit diffusionsdominiertem Transport nicht explizit in den Dosisberechnungen abgebildet.

Die Ungewissheit über die Folgen einer pH-Fahne für geklüftete Gesteine ist grösser (Nagra 1994, Bradbury & Baeyens 1997). Aber auch hier kann davon ausgegangen werden, dass die Transmissivität der präferenziellen Freisetzungspfade unter dem Einfluss einer pH-Fahne wegen Mineralumwandlungen mit der Zeit tendenziell abnimmt. Im pessimistischen Randbereich der oben erwähnten Ungewissheit steht das Szenarium, bei welchem die Fliesswege sich nicht vollständig verschliessen, die Fliessgeschwindigkeit tendenziell zunimmt und die Porosität wegen Mineralumwandlungen in der an die Fliesswege angrenzenden Matrix verringert wird, was ihre Rückhaltefähigkeit für Radionuklide beeinträchtigen würde. Bei den geringen Transmissivitäten der wasserführenden Systeme in Lagertiefe wird dies aber als wenig bedeutend beurteilt. Dennoch werden im vorliegenden Bericht entsprechende Rechenfälle betrachtet, um diese Einflüsse zu quantifizieren (Kap. 6.3). In den Testrechnungen wird dies durch einen pessimistischen Sorptionsdatensatz "Calcit" berücksichtigt, vgl. Tab. A6-9. Zusätzlich wird auch das Verstopfen der Poren *(pore clogging)* als Folge der pH-Fahne durch abdeckende Rechenfälle für geklüftete Medien ohne Matrixdiffusion/Sorption berücksichtigt.

PG-25 / Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas

In Zusammenhang mit der Gasbildung in einem geologischen Tiefenlager[79] sind im Hinblick auf die Langzeitsicherheit folgende Aspekte zu beachten (vgl. auch Diskussion in Nagra 2008d): (i) Einfluss auf die Radionuklidrückhaltung im Wirtgestein (graduelle temporäre Veränderung der Rückhaltewirkung); (ii) Verdrängen von Porenwasser mit Radionukliden aus dem Nahfeld und (iii) Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase.

Die Gasbildung und deren Auswirkung auf die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers für BE, HAA und LMA im Opalinuston wurde im Rahmen des Projekts Entsorgungsnachweis detailliert untersucht (Nagra 2002a, Nagra 2002c, Nagra 2004a). Dazu konnte neben einem Gastest in der Bohrung Benken vor allem auf Untersuchungen im Felslabor Mont Terri abgestützt werden (Marschall et al. 2005, Croisé et al. 2006). Diese Untersuchungen sowie Laborarbeiten und Studien zum Gastransport im Opalinuston wurden weiter geführt (vgl. z.B. Marschall et al. 2008). Es wurde aufgezeigt, durch welche Prozesse das Gas durch das Wirtgestein transportiert wird und dass diese Prozesse die Langzeit-Barrierenwirkung des Wirtgesteins nicht signifikant beeinträchtigen (Nagra 2002a, Nagra 2002c, Nagra 2004a). Für realistische Gasbildungsraten wird erwartet, dass die Gasfreisetzung über klassischen Zweiphasenfluss (vernachlässigbare Deformation des Porenraums) erfolgt; eine allfällige dilatanzkontrollierte Gasausbreitung (pathway dilation: Zweiphasenfluss mit mikroskopischer Deformation des Porenraums) bleibt räumlich beschränkt. Die Bildung von Gasfracs kann bei den betrachteten Gasbildungsraten ausgeschlossen werden. Es wurde auch gezeigt, dass das Verdrängen von

[79] Für kleine bis moderate Salinitäten des Wirtgesteinsporenwassers haben die geochemischen Bedingungen in der Geosphäre keinen Einfluss auf die Gasbildungsraten. Nur für die Effinger Schichten könnte es im Falle einer deutlich erhöhten Salinität zu einer leicht erhöhten Gasbildungsrate kommen. Neuere Resultate aus laufenden Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Salinität auch in den Effinger Schichten nicht kritisch ist.

Porenwasser mit Radionukliden als Folge der Gasbildung die Langzeitsicherheit nicht signifikant beeinflusst. Auch der Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase stellt die Langzeitsicherheit nicht in Frage (Nagra 2002c, Nagra 2004a).

Da von allen in der Etappe 1 vorgeschlagenen Wirtgesteinen der Opalinuston die geringste Gasdurchlässigkeit aufweist, und der Opalinuston damit das "kritische" Wirtgestein bezüglich Gastransport ist, wurde die Gasbildung und deren Auswirkung auf die Langzeitsicherheit eines SMA-Lagers im Opalinuston für SGT Etappe 1 detailliert untersucht (Nagra 2008f). Die Berechnungen zeigen, dass die Möglichkeit besteht, durch entsprechende Wahl der Verfüll- und Versiegelungsmaterialien neben der Freisetzung von Gas mittels Zweiphasenfluss über das Wirtgestein auch einen Teil des Gases über den verfüllten und versiegelten Zugangstunnel in die über dem Opalinuston liegenden höher durchlässigen Gesteinsschichten zu transportieren. Damit kann erreicht werden, dass die maximalen Drücke in den SMA-Kavernen sogar unterhalb des Schwellendrucks für dilatanzkontrollierte Gasausbreitung bleiben. Im Fall einer Kombination von erhöhten Gasbildungsraten, sehr gering gasdurchlässigem Wirtgestein und Verfüllungen und Versiegelungen des Zugangstunnels mit ebenfalls sehr geringer Gasdurchlässigkeit könnten in den Kavernen Drücke erreicht werden, die den Schwellendruck für dilatanzkontrollierte Gasausbreitung erreichen. In diesem Fall würde durch die Bildung von dilatanten Gaspfaden insbesondere in der Auflockerungszone um die Zugangsbauwerke eine zusätzliche Gastransportkapazität bereitgestellt, welche sicherstellt, dass die Drücke in den Kavernen begrenzt bleiben; die Bildung eines Gasfracs kann deshalb in jedem Fall ausgeschlossen werden. Unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung von Opalinuston, welche im Felslabor Mont Terri untersucht wurde (Marschall et al. 2008, Marschall et al. 2005), hat die Bildung von dilatanten Gaspfaden keine signifikante Bedeutung für den Radionuklidtransport.

Weiter zeigen Berechnungen, dass die durch die Gasbildung entstehenden Wasserflüsse in der Geosphäre bzw. entlang der Zugangsbauwerke in einem Bereich liegen, welcher zu berechneten Dosen führt, die weit unterhalb des ENSI-Schutzkriteriums 1 von 0.1 mSv/a liegen und die Langzeitsicherheit nicht signifikant beeinflussen (Nagra 2010c).

Die vorhandenen Berechnungen zeigen, dass die Auswirkungen der Gasbildung (keine signifikante Änderung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins, geringe Dosen als Folge der Verdrängung von Nahfeldporenwässern bzw. durch Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase) klein sind und in den Testrechnungen nicht explizit zu berücksichtigen sind.

Schliesslich ist zu beachten, dass es im Falle des HAA-Lagers die Option gibt, BE/HAA-Behälter mit einem alternativen Behältermaterial mit einer im Vergleich zu Stahl deutlich reduzierten Gasbildungsrate zu verwenden (z.B. Cu/Stahl-Behälter wie im schwedischen und im finnischen Programm). Im Hinblick auf die Gasbildung im SMA-Lager bzw. im LMA-(Teil-)Lager hat die Nagra Arbeiten zur Abklärung der Möglichkeiten zur Reduktion der Gasbildung aufgenommen. Eine allfällige Reduktion der Gasbildungsraten der Abfälle verleiht den oben präsentierten Argumenten zusätzliche Robustheit.

PG-26 / Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur; PB-5 / In-situ-Temperatur

Berechnungen zeigen, dass nur BE bzw. HAA zu einer bedeutenden Temperaturerhöhung in direkter Umgebung der Lagerkammern führen können. Deshalb wurde die Temperaturentwicklung für das HAA-Lager im Rahmen des Entsorgungsnachweises im Detail diskutiert (Johnson et al. 2002, Nagra 2002c). Temperaturen deutlich über 100°C können zu einer Umwandlung von Tonmineralien führen, was für Bentonit und Tongesteine relevant sein

kann[80]. Wegen seiner geringen Distanz zu den BE/HAA-Behältern ist das Thema der Temperaturen insbesondere für die Bentonit-Verfüllung der Lagerstollen relevant. Um die Möglichkeit einer signifikanten Einbusse der Funktionalität der Bentonit-Verfüllung zu vermeiden, wird die Wärmeleistung der eingelagerten Behälter so weit beschränkt, dass auch bei eher konservativ gewählten Wärmeausbreitungsparametern für Bentonit etwa die Hälfte des Bentonits keine Temperatur deutlich über 100°C erreicht; für realistische Annahmen bezüglich der Wärmeausbreitungsparameter des Bentonits bleiben die Temperaturen auch im Bentonit jederzeit im Bereich oder unterhalb von 100°C. Mit einer entsprechenden Behälterbeladung wird sichergestellt, dass die Temperaturen im Opalinuston auch bei grösseren Lagertiefen unter 100°C bleiben und damit die Mineralumwandlung im Opalinuston keine Bedeutung hat.

Neben der Frage der Mineralumwandlung wurden für den Entsorgungsnachweis und nachfolgend ebenfalls thermohydromechanisch (THM) gekoppelte Prozesse für die Geosphäre untersucht (Nagra 2002a); bei geeigneter Lagerauslegung und adäquater Behälterbeladung werden signifikante Beeinträchtigungen der geologischen Barrieren durch THM-Prozesse vermieden.

Aus den dargelegten Gründen werden weder für das HAA-Lager noch für das SMA-Lager die Auswirkungen von erhöhten Temperaturen im Tiefenlagerbereich als signifikant beurteilt; sie werden deshalb in den Testrechnungen nicht explizit berücksichtigt.

Beurteilung des Kenntnisstands bezüglich der lagerbedingten Einflüsse (Fazit)

Für die Testrechnungen ist der heutige Kenntnisstand genügend, um die möglichen Auswirkungen der lagerbedingten Einflüsse auf die Sicherheitsbarrieren zu analysieren. Die Analysen zeigen, dass durch eine geeignete Lagerauslegung praktisch alle lagerbedingten Einflüsse klein gehalten werden können; ihr Einfluss auf die Langzeitsicherheit ist deshalb sehr beschränkt. Einzig die pH-Fahne kann im Falle von geklüfteten Medien die geochemischen Bedingungen im Wirtgestein so stark verändern, dass dies in den Sicherheitsanalysen zu berücksichtigen ist (vgl. Kap. 6.3). Obschon die Gasbildung durch entsprechende Massnahmen in der Lagerauslegung berücksichtigt und deren Auswirkungen klein gehalten werden können, führt die Nagra ihre Arbeiten weiter im Hinblick auf eine mögliche Reduktion der Gasbildungsraten und zur Verbesserung des Verständnisses zur Gasfreisetzung. Für Etappe 2 werden die lagerbedingten Einflüsse erneut evaluiert, und allfällige neue Erkenntnisse werden in den provisorischen Sicherheitsanalysen und beim sicherheitstechnischen Vergleich in SGT Etappe 2 berücksichtigt.

6.2.4 Evaluation der Einflüsse von bautechnischen Auslegungsvarianten

Wie in Kap. 5 diskutiert, gibt es verschiedene bautechnische Auslegungsvarianten, um das Lager optimal an die an einem bestimmten geologischen Standort vorherrschenden geotechnischen Bedingungen anzupassen. Dazu gehören bezüglich Standfestigkeit die BE/HAA-Lagerstollen mit einem flächendeckenden Spritzbetonausbau ('Liner') und Zwischensiegel und die SMA-Lagerkavernen mit unterschiedlichen auf die spezifischen Standortbedingungen ausgelegten Querschnitten. Die Auswirkungen dieser Auslegungsvarianten auf die Sicherheit werden im Folgenden diskutiert.

---

[80] Gemäss Wersin et al. (2007) finden signifikante Mineralumwandlungen in Bentonit durch Zementation und Illitisierung erst bei Temperaturen ab ca. 120°C statt. Die verfügbaren Daten aus Experimenten und Analogstudien deuten darauf hin, dass unterhalb von 110°C keine nennenswerten bzw. unterhalb von 130°C nur geringfügige Änderungen des Quelldrucks und der hydraulischen Duchlässigkeit von Bentonit zu erwarten sind.

PT-6 / Transportrelevante Eigenschaften Interface BE/HAA-Lagerstollen/Wirtgestein (mit flächendeckendem Spritzbetonausbau und Zwischensiegel)

Auch im Falle eines flächendeckenden Spritzbetonausbaus ('Liner') ist bei einer erheblichen Überlagerung mit einer grösseren Auflockerung im Umfeld der BE/HAA-Lagerstollen zu rechnen. Für diese Auflockerung ist jedoch nach Verschluss des Lagers auch als Folge des Quellens des Bentonits und des Kriechens des Opalinustons im Laufe der Zeit mit einer Selbstabdichtung insbesondere auch im Bereich der Zwischensiegel zu rechnen. Dies wird auch durch experimentelle Befunde aus dem Felslabor Mont Terri bestätigt, wo bei einem entsprechenden Spannungsfeld schon nach relativ kurzer Zeit eine grosse Reduktion der hydraulischen Durchlässigkeiten erfolgt. Orientierende gebirgsmechanische Rechnungen zeigen, dass schon lange vor Verlust der absoluten Dichtheit der BE/HAA-Endlagerbehälter[81] die Spannungsverhältnisse sich so entwickelt haben, dass gute Bedingungen für die Selbstabdichtung bestehen (Konietzky et al. 2003). Bis zum Zeitpunkt der Radionuklidfreisetzung in das Wirtgestein wird sich die anfänglich erhöhte hydraulische Durchlässigkeit dank der Selbstabdichtung wieder auf Werte nahe der Durchlässigkeit für das ungestörte Wirtgestein zurückbilden.

Da die Porenwässer des zementhaltigen Spritzbetonausbaus trotz Verwendung einer "Niedrig–pH"-Rezeptur [82] (vgl. Nagra 2007) nicht im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Bentonit-Verfüllung und dem Wirtgestein Opalinuston sind, wird dieses Porenwasser zu einer lokal begrenzten Veränderung der angrenzenden Bentonit-Verfüllung und des Opalinustons im direkten Umfeld der BE/HAA-Lagerstollen führen (pH-Fahne). Die Wechselwirkungsprozesse zwischen Zement und Bentonit bzw. Opalinuston werden in Savage et al. (2010) im Detail diskutiert. Die sicherheitsrelevanten Auswirkungen lassen sich wie folgt zusammenfassen (vgl. Fig. 6.2-1):

- Die hydraulische Durchlässigkeit des zementhaltigen Spritzbetonausbaus wird im Vergleich zum Opalinuston bzw. der Bentonit-Verfüllung erhöht sein (Rissbildung, Degradation, Erhöhung der Porosität).
- Die an den zementhaltigen Spritzbetonausbau angrenzende Bentonit-Verfüllung wird durch die pH-Fahne langsam und lokal degradiert. Die Mächtigkeit dieser Zone mit stark degradiertem Bentonit ist gering (Zentimeterbereich), insbesondere auch weil der Einsatz von "Niedrig-pH"-Zement vorgesehen ist. Das Quellvermögen wird in dieser Zone aber lokal stark reduziert, und es wird konservativ angenommen, dass auch das Radionuklid-Rückhaltevermögen (Sorption) in dieser Zone gegenüber dem ursprünglichen Bentonit reduziert ist. In grösserem Abstand zum Spritzbetonausbau findet nur eine Umwandlung von Na- zu Ca-Bentonit statt, was zwar das Quellvermögen der Verfüllung etwas reduziert, aber keine Auswirkungen auf das Radionuklid-Rückhaltevermögen hat. Für den Opalinuston gelten sinngemässe Aussagen, allerdings sind die sicherheitstechnischen Auswirkungen aufgrund der weit grösseren Mächtigkeit der geologischen Barriere nicht von Belang (vgl. Kap. 6.2.3).
- Zwischen der durch die pH-Fahne degradierten bzw. veränderten Zone und der thermisch/chemisch veränderten Zone in der Umgebung der BE/HAA-Behälter bleiben die vorteilhaften Eigenschaften der Bentonit-Verfüllung für längere Zeit praktisch unverändert.

---

[81] Die Dichtheit der BE/HAA-Endlagerbehälter ist deutlich länger als die behördlich geforderte Mindestdauer von 1'000 Jahren und beträgt voraussichtlich 10'000 Jahre oder mehr.

[82] D.h. pH-Wert im Bereich von 10 bis 11 anstatt 12.5 bis 13.5 wie für konventionelle Rezeptur.

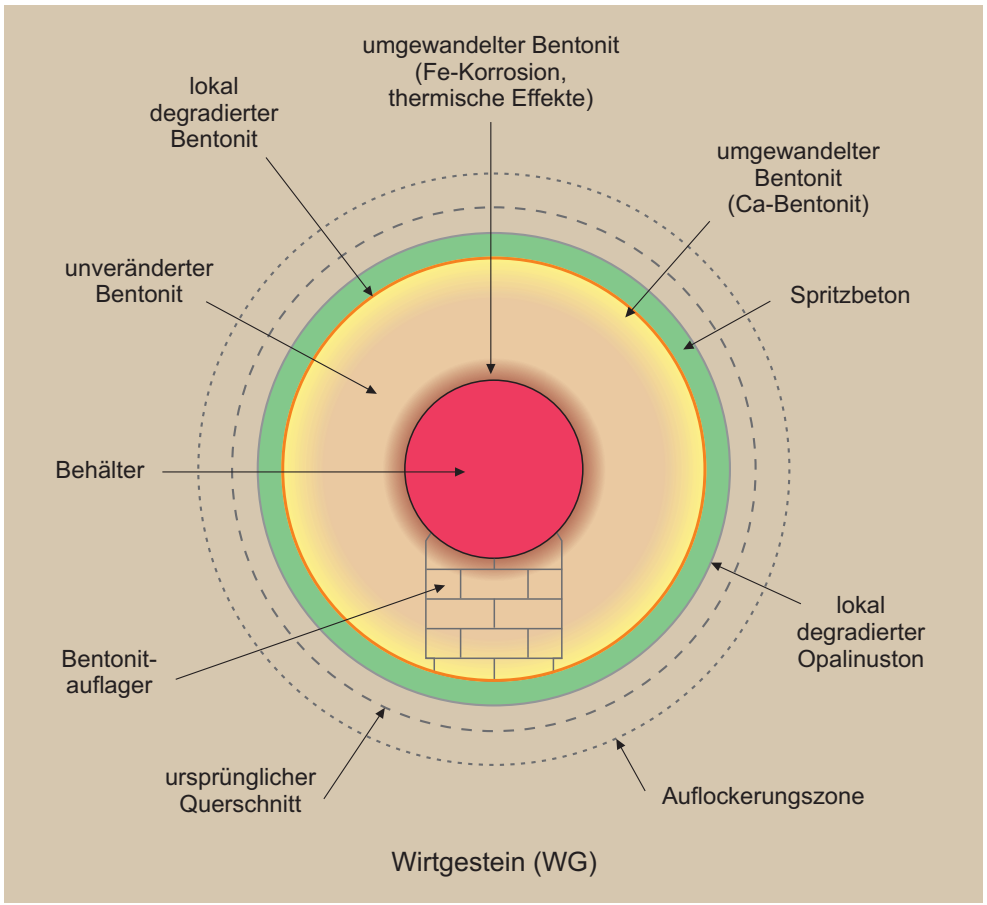


Fig. 6.2-1: Schematische Darstellung der zeitabhängigen Degradation der Bentonit-Verfüllung im Bereich der Zementverkleidung zu einem Zeitpunkt lange nach Verfüllung/-Verschluss der BE/HAA-Lagerstollen.

Die an die Behälter-Oberfläche angrenzende Bentonit-Verfüllung wird durch thermische Einwirkung (abklingende Zerfallswärme) und langsam ablaufende chemische Prozesse (Eisen-Bentonit-Wechselwirkung) langfristig verändert; die Prozesse führen zwar zu einer Reduktion des Quellvermögens der Bentonit-Verfüllung, aber zu keiner Reduktion des Radionuklid-Rückhaltevermögens. Die veränderte Zone wird zwischen den einzelnen Behältern und insbesondere im Bereich der Zwischensiegel durch eine Zone unbeeinflussten Bentonits unterbrochen.

Hinsichtlich des Radionuklid-Transportverhaltens des Nahfelds sind zwei Fälle zu untersuchen: (a) Auswirkungen auf den Radionuklid-Transport in radialer Richtung; (b) Auswirkungen eines allfälligen Wasserflusses entlang dem Interface Zementverkleidung/Opalinuston.

Bezüglich des Transports in radialer Richtung wurden Rechnungen durchgeführt, welche die potenziell degradierten Anteile der Transportbarriere in radialer Richtung berücksichtigen. Neben dem Fall 'ohne Liner' wurden auch zwei Fälle 'mit Liner' betrachtet. Während im Basisfall 'mit Liner' nur der äussere Teil der Bentonit-Verfüllung als degradiert angenommen wird, wird im abdeckenden Fall hypothetisch angenommen, dass die gesamte Bentonit-Verfüllung

degradiert ist[83]. Der Vergleich mit Rechnungen 'ohne Liner' (d.h. ohne Degradation) zeigt, dass die Barrierenwirkung des Nahfelds nur geringfügig beeinträchtigt wird und die Auswirkungen auf die berechneten Freisetzungsraten aus der Geosphäre vernachlässigbar sind (Fig. 6.2-2).

Bezüglich des Transports längs der BE/HAA-Lagerstollen kann festgehalten werden, dass allfällige axiale Wasserflüsse entlang des Interfaces Lagerstollen/Wirtgestein durch die Zwischensiegel praktisch unterbunden werden (vgl. Fig. 5.2-2), da diese Zwischensiegel optimal ausgestaltet werden können (kein "Liner", bei Bedarf Verwendung von kompaktierten Bentonitblöcken für einen grossen Teil des Querschnitts) und optimale Bedingungen für die Selbstabdichtung der Auflockerungszone bestehen. Wird trotzdem ein lateraler Transport entlang der BE/HAA-Lagerstollen unterstellt, so zeigen die Freisetzungsrechnungen, dass selbst im Fall einer hypothetisch hohen hydraulischen Durchlässigkeit des Interfaces bzw. der Auflockerungszone von 10^{-8} m/s die Änderung der berechneten Dosen vernachlässigbar sind (vgl. Dosen in Fig. 6.2-3).

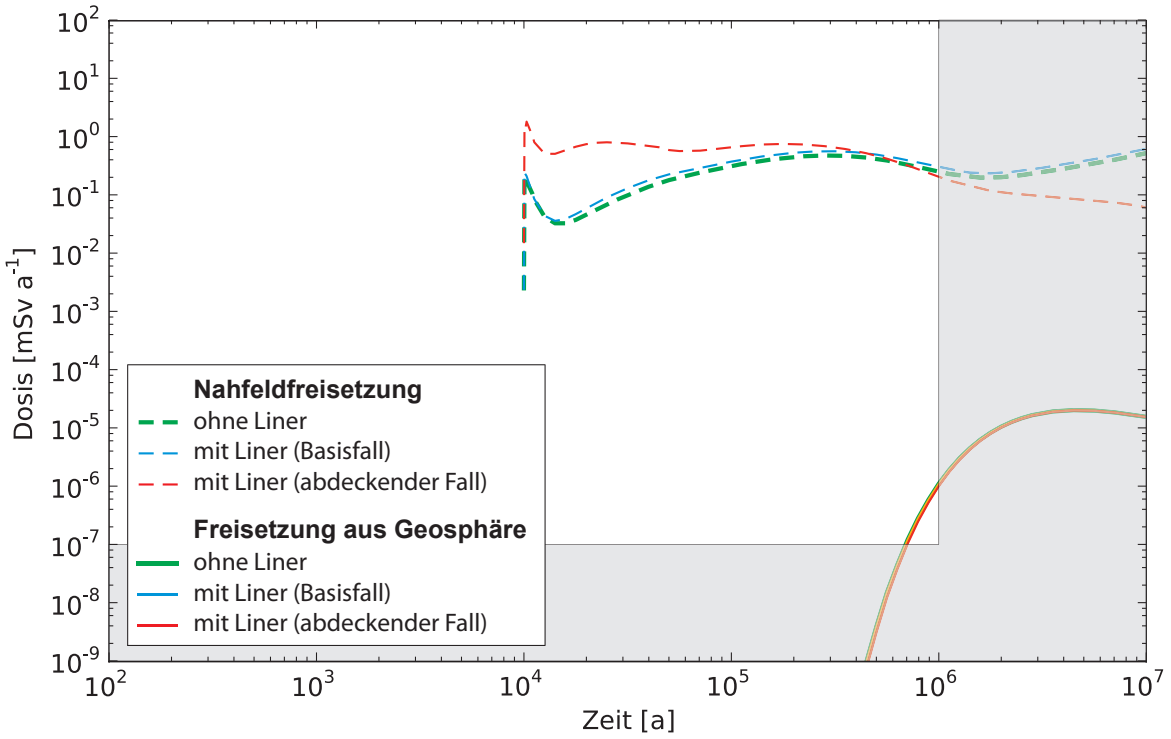


Fig. 6.2-2: Berechnete Dosen für den BE-Teil des HAA-Lagers mit und ohne Spritzbetonausbau ('Liner').

Ausgezogene Kurven: Freisetzung aus der Geosphären-Barriere; gestrichelte Kurven: Freisetzung aus den technischen Barrieren.

Dargestellt sind jeweils Dosiskurven für die Fälle 'ohne Liner' (grün), 'mit Liner (Basisfall)' (blau) und 'mit Liner (abdeckender Fall)' (rot).

[83] Für die degradierte Zone des Bentonits werden sehr ungünstige Annahmen bzgl. Porosität, Sorption, Diffusionskoeffizienten und Löslichkeit getroffen: Sorption um Faktor 10 reduziert, keine Löslichkeitslimitierung, Porosität für Anionen wird mit Porosität für Nicht-Anionen gleichgesetzt, Diffusionskoeffizienten für Anionen werden mit Diffusionskoeffizienten für Nicht-Anionen gleichgesetzt.

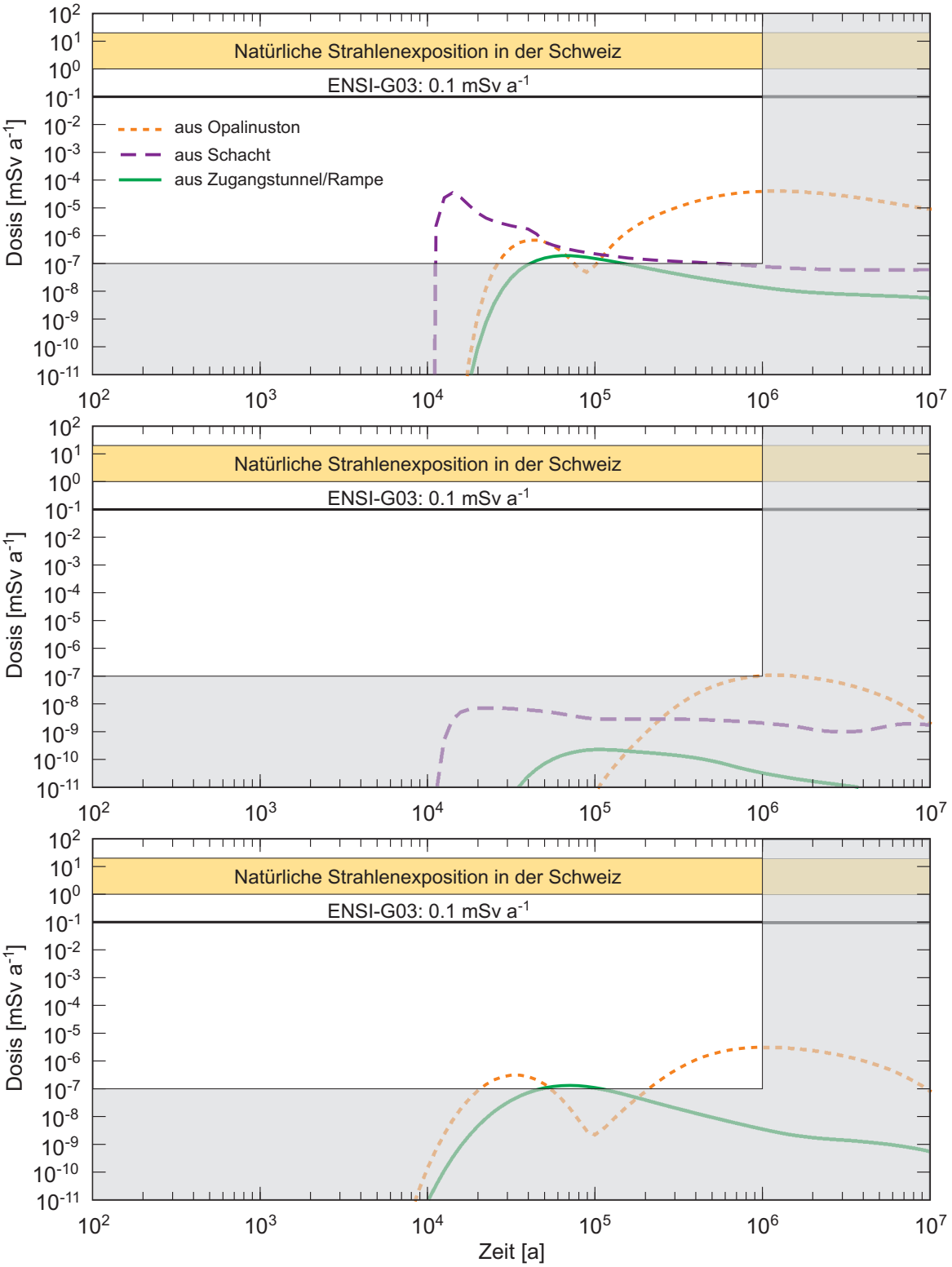


Fig. 6.2-3: Berechnete Dosen für das HAA-Lager für den Fall einer hypothetisch hohen hydraulischen Durchlässigkeit der Auflockerungszone von 10^{-8} m/s.

Obere Figur: BE; mittlere Figur: verglaste HAA; untere Figur: LMA. Nach Smith et al. (2004).

PT-7 / Auslegung der Lagerkammern

Modellrechnungen zeigen, dass das Profil der SMA-Kavernen einen geringen Einfluss auf die Radionuklidfreisetzung hat. Die Freisetzungsraten skalieren in guter Näherung mit der spezifischen Oberfläche der Kavernen; sie fallen umso höher aus, je grösser die spezifische Oberfläche, d.h. je kleiner der Kavernendurchmesser ist. Der Unterschied in den Freisetzungsraten für den Fall mit kleinster bzw. grösster Querschnittsfläche (K04 bzw. K20) beträgt weniger als einen Faktor zwei. Für die Testrechnungen wird deshalb für das SMA-Lager für alle geologischen Standortgebiete ein einheitlicher, mittlerer Kavernenquerschnitt angenommen (Typ K09).

Beurteilung des Kenntnisstands bezüglich der Einflüsse von bautechnischen Auslegungsvarianten (Fazit)

Der heutige Kenntnisstand bezüglich des Einflusses der verschiedenen Auslegungsvarianten (BE/HAA-Lagerstollen mit bzw. ohne einem flächendeckenden Spritzbetonausbau und Zwischensiegel, Querschnitte der SMA-Lagerkavernen) auf den Nuklidtransport wird als genügend beurteilt für die Testrechnungen. In den Testrechnungen wird für alle Standortgebiete von der gleichen Auslegung der Lagerkammern ausgegangen, weil die Unterschiede zwischen den verschiedenen Auslegungsvarianten vernachlässigbar sind, und der flächendeckende Ausbau die Langzeitsicherheit nicht tangiert. Für Etappe 2 wird der Einfluss der baulichen Auslegung auf die Langzeitsicherheit erneut beurteilt, und die entsprechenden Resultate werden in den provisorischen Sicherheitsanalysen und beim sicherheitstechnischen Vergleich in SGT Etappe 2 berücksichtigt.

6.2.5 Evaluation der geologischen Langzeitentwicklung

Tab. 6.2-3 zeigt, welche der relevanten geologischen Prozesse und Parameter bei der Evaluation der geologischen Langzeitentwicklung bezüglich Hebung/Erosion berücksichtigt werden. Bezüglich der Langzeitentwicklung wird geprüft, ob es infolge einer langfristigen Abnahme der Gesteinsüberdeckung durch Gesteins-Dekompaktion zu einer Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit kommen könnte. Weiter wird die Grundvoraussetzung überprüft, dass es innerhalb des Betrachtungszeitraums in keinem der geologischen Standortgebiete zu einer erosiven Lagerfreilegung kommt. Die dazu durchgeführten stark vereinfachten, pessimistischen Abschätzungen für das SMA- und HAA-Lager basieren auf den folgenden Daten und Annahmen für die Testrechnungen (vgl. auch Kap. 4.2, 4.3 und 4.5):

- Tiefenlage der Lagerfelder unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung (PG-1) und Tiefenlage des Wirtgesteins bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion (PG-3) gemäss Unterlagen in Anhang A3.
- In Bezug auf die zeitliche Entwicklung der regionalen Erosionsbasis (PG-4) wird angenommen, dass ein langfristiges Gleichgewicht zwischen Erosion und Hebung besteht, und für HAA wird in der Nordschweiz ein zusätzlicher Erosionsbeitrag von 100 m zur Berücksichtigung einer allfällig fortschreitenden Reifung der Flussprofile der Hauptflüsse (Rhein, Aare) dazugeschlagen.
- Für das HAA-Lager wird aufgrund des Betrachtungszeitraums von 1 Million Jahren im Sinne einer abdeckenden, extrem ungünstigen Annahme von einer praktisch vollständigen Einebnung der lokalen Topographie (PG-28) ausgegangen; für das SMA-Lager mit einem Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren ist dies nicht notwendig.

Für das Standortgebiet Wellenberg wurde eine standortspezifische Erosionsstudie durchgeführt (Klemenz 1993).

Tab. 6.2-3: Berücksichtigung der relevanten geologischen Prozesse und Parameter bei der Evaluation der Langzeitentwicklung bezüglich Hebung/Erosion.

Legende: × = relevant.

Nr.	Relevante geologische Prozesse und Parameter	Erhöhte hydraulische Durchlässigkeit des WG/EG infolge langfristiger Gesteins-Dekompaktion	Erosive Freilegung des Tiefenlagers
PG-1	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung		×
PG-3	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	×	
PG-4	Zeitliche Entwicklung regionale Erosionsbasis	×	×
PG-7	Einfluss Dekompaktion auf hydraulische Durchlässigkeit	×	
PG-28	Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung	×	×
PG-30	Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung	×	×

Erhöhte hydraulische Durchlässigkeit des WG/EG infolge langfristiger Gesteins-Dekompaktion, unter Berücksichtigung von PG-3 / Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion, PG-7 / Einfluss Dekompaktion auf hydraulische Durchlässigkeit sowie der für die Erosion relevanten Prozesse (PG-4, PG-28, PG-30)

Die Unterlagen zur Tiefenlage der Obergrenze des Wirtgesteins (PG-3) für die verschiedenen geologischen Standortgebiete (inkl. Angaben von Ungewissheiten) finden sich in Anhang A3. Ein Einfluss der Dekompaktion auf die hydraulische Durchlässigkeit (PG-7) wird beim Opalinuston ab einer Gesteinsüberdeckung von weniger als ca. 200 m angenommen, beim 'Braunen Dogger' und bei den Effinger Schichten ab weniger als ca. 300 m und bei den Mergel-Formationen des Helvetikums je nach Topographie ab weniger als ca. 600 m (vgl. Kap. 4.3).

Innerhalb des für ein SMA-Lager relevanten Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren und für die erwarteten Erosionsverhältnisse (PG-4, PG-28, PG-30; vgl. Kap. 4.5) wird die zukünftige Erosion in der Nordschweiz im Dekameterbereich liegen, im Alpenraum (Standortgebiet Wellenberg) maximal im Hektometerbereich. Dies bedeutet, dass die Überdeckung des Wirtgesteins am Ende des Betrachtungszeitraums in den Standortgebieten praktisch überall ausreichend ist, um eine relevante Gesteins-Dekompaktion ausschliessen zu können. Ausgenommen sind gewisse Randgebiete der folgenden SMA-Standortgebiete: Südranden (Opalinuston), Zürich Nord-Ost (betrifft nur den 'Braunen Dogger'), Bözberg (Opalinuston), Jura-Südfuss (betrifft nur die Effinger Schichten), Wellenberg (nur bei Platzierung der Lagerkammern auf

Niveau Talsohle des Engelbergertals). Diesen Randgebieten kann mit einer geeigneten Platzierung der Lagerkammern innerhalb der Standortgebiete ausgewichen werden, sodass der Einfluss der Gesteins-Dekompaktion auf die hydraulische Durchlässigkeit für alle SMA-Standortgebiete vernachlässigbar ist und deshalb in den Testrechnungen für das SMA-Lager nicht berücksichtigt wird.

Innerhalb des für das HAA-Lager relevanten Betrachtungszeitraums von 1 Million Jahren und für die erwarteten grossräumigen Hebungsraten (PG-4; vgl. Kap. 4.5) wird die Vertiefung der regionalen Erosionsbasis in der Nordschweiz maximal im tiefen Hektometerbereich (ca. 100 bis 200 m) liegen. Unter Berücksichtigung eines zusätzlichen Erosionsbeitrags von 100 m zur Berücksichtigung einer allfällig fortschreitenden Reifung der Flussprofile der Hauptflüsse (Rhein, Aare) und unter der Annahme einer praktisch vollständigen Einebnung der lokalen Topographie (PG-28, PG-30, vgl. Kap. 4.5) bedeutet dies für die HAA-Standortgebiete Nördlich Lägeren und Zürich Nord-Ost, dass die Überdeckung des Wirtgesteins am Ende des Betrachtungszeitraums im grössten Teil des Gebiets noch ausreichend ist, um eine Gesteins-Dekompaktion ausschliessen zu können; ausgenommen davon sind die nördlichsten Teile dieser beiden HAA-Standortgebiete. Diesen Gebietsteilen kann aber mit einer geeigneten Platzierung der Lagerkammern innerhalb der Standortgebiete ausgewichen werden. Deshalb wird der Einfluss der Gesteins-Dekompaktion auf die hydraulische Durchlässigkeit in den Testrechnungen für die HAA-Standortgebiete Nördlich Lägeren und Zürich Nord-Ost nicht berücksichtigt.

Beim HAA-Standortgebiet Bözberg ist die Gesteinsüberdeckung am Ende des Betrachtungszeitraums bei der extrem ungünstigen Annahme einer praktisch vollständigen Einebnung signifikant reduziert. Zur Erfassung der Konsequenzen einer reduzierten Gesteinsüberdeckung wird deshalb für das HAA-Standortgebiet Bözberg in den Testrechnungen eine zeitabhängige Dekompaktion des Opalinustons – und damit verbunden eine Erhöhung der Durchlässigkeit im Opalinuston – bei gleichzeitiger Vernachlässigung der Radionuklidrückhaltung in den oberen Rahmengesteinen mit einem entsprechend definierten alternativen Rechenfall explizit evaluiert. Die Resultate dieser Testrechnungen werden bei der Ableitung des charakteristischen Dosisintervalls für das HAA-Lager im Standortgebiet Bözberg berücksichtigt.

Evaluation der Möglichkeit einer erosiven Freilegung des Tiefenlagers innerhalb des Betrachtungszeitraums, unter Berücksichtigung von PG-1 / Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung sowie der für die Erosion relevanten Prozesse (PG-4, PG-28, PG-30)

Aufgrund der oben diskutierten Abschätzungen ist auch eine flächenhafte Freilegung der SMA- und HAA-Lagerkammern infolge langfristiger Hebung/Erosion innerhalb des Betrachtungszeitraums bei geeigneter Platzierung der Lagerkammern in keinem der Standortgebiete zu erwarten. Selbst für kumulierte, sehr ungünstige Annahmen zur langfristigen Entwicklung der Erosionsbasis und zur Einebnung der lokalen Topographie kann bei geeigneter Lageranordnung die Möglichkeit einer flächenhaften Lagerfreilegung vor Ablauf des Betrachtungszeitraums ausgeschlossen werden.

Beurteilung des Kenntnisstands bezüglich der geologischen Langzeitentwicklung (Fazit)

Der heutige Kenntnisstand bezüglich des Einflusses der geologischen Langzeitentwicklung auf den Radionuklidtransport (Gesteins-Dekompaktion infolge langfristiger Hebung/Erosion, Möglichkeit einer Lagerfreilegung innerhalb des Betrachtungszeitraums) wird als genügend beurteilt für die Testrechnungen. Die vereinfachten konservativen Abschätzungen zeigen, dass nur für das HAA-Lager im Standortgebiet Bözberg die vorhandenen Ungewissheiten für die Testrechnungen relevant sind. In den Testrechnungen werden für dieses Standortgebiet die vorhandenen Ungewissheiten durch einen spezifischen Rechenfall erfasst. Die für SGT Etappe 2 begonnenen bzw. geplanten Arbeiten (vgl. Kap. 4.5 bzw. 8.5) werden in den provisorischen Sicherheitsanalysen und beim sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 berücksichtigt.

6.2.6 Evaluation des Langzeitverhaltens des Nahfelds

Tab. 6.2-4 zeigt, welche der relevanten geologischen Prozesse und Parameter bei der Evaluation des Langzeitverhaltens des Nahfelds und bei der Festlegung wichtiger Parameter für die Nahfeld-Modellierung berücksichtigt werden. Bei den wichtigen Parametern für die Nahfeld-Modellierung handelt es sich um die Behälterlebensdauer für BE/HAA (PT-1), die Auflösungsrate für die Brennstoffmatrix und Hüllrohre BE (PT-2), die Sorptionskoeffizienten im Nahfeld (PT-4), die Löslichkeitslimiten im Nahfeld BE/HAA/LMA (PT-3) sowie die Raten zur Advektion bzw. Diffusion im Nahfeld (insbesondere Diffusionskoeffizienten, PT-5).

Alle diese Prozesse und Parameter wurden schon in Kap. 4.6 diskutiert. In vorliegendem Kapitel wird der Einfluss der relevanten geologischen Prozesse und Parameter auf die Langzeitentwicklung dieser Prozesse und Parameter evaluiert und der entsprechende Kenntnisstand beurteilt.

Tab. 6.2-4: Berücksichtigung der relevanten geologischen Prozesse und Parameter bei der Festlegung wichtiger Nahfeldparameter.

Legende: × = relevant und quantitativ berücksichtigt, (×) = bedingt quantitativ oder durch qualitative Argumente berücksichtigt, - = nicht relevant.

Nr.	**Relevante geologische Prozesse und Parameter**	**Behälter-lebensdauer BE/HAA (PT-1)**	**Auflösungs-rate für Brennstoff-matrix und Hüllrohre BE (PT-2)**	**Löslichkeitslimiten im Nahfeld BE/HAA/-LMA (PT-3)**		**Sorptionskoeffizienten im Nahfeld (PT-4)**		**Advektion bzw. Diffusion im Nahfeld (PT-5)**	
				Zement	Bentonit	Zement	Bentonit	Zement	Bentonit
PG-16	pH	(×)	(×)	(×)	(×)	(×)	(×)	-	(×)
PG-17	Redox-Bedingungen	×	×	(×)	(×)	(×)	(×)	-	(×)
PG-18	Salinität	×	-	×	×	×	×	-	×
PG-6	Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit	-	-	-	-	×	-	×	(×)
PG-14	Transmissivität Störungszonen	-	-	-	-	×	-	×	(×)

Behälter BE/HAA

PT-1 / Behälterlebensdauer BE/HAA

Für die Stahlbehälter für die abgebrannten Brennelemente und verglasten hochaktiven Abfälle wird eine Lebensdauer von 10'000 Jahren oder mehr erwartet (vgl. Kap. 4.6). Diese Lebensdauer hängt von der Korrosionsrate ab und diese wiederum auch von den chemischen Bedingungen im Bentonit-Nahfeld.

Ein Einfluss des pH-Werts (PG-16) im Porenwasser des Wirtgesteins auf die Korrosionsrate kann in dem im Opalinuston erwarteten Wertebereich vernachlässigt werden, da das Bentonit-Porenwasser den pH-Wert in einem sehr ähnlichen Wertebereich sehr gut puffert.

In der aeroben Phase während der Betriebsphase und der ersten Zeit nach dem Verschluss des Lagers ist die Korrosionsrate erhöht. Geht die Korrosion in die anaerobe Phase über, sinkt die Korrosionsrate und unter Wasserstoffentwicklung stellt sich ein sehr tiefes Redoxpotenzial ein. Auch nach dem Verzehr des metallischen Eisens werden die Korrosionsprodukte über sehr lange Zeiträume die Redox-Bedingungen bestimmen. Auch hat der Bentonit eine gewisse Pufferkapazität. Ein Einfluss der Redox-Bedingungen (PG-17) im Porenwasser des Opalinustons auf die Stahlkorrosion kann mit den im Opalinuston nachgewiesenen reduzierenden Bedingungen ausgeschlossen werden.

Chlorid kann die Korrosionsrate für Stahl erhöhen. Die Salinität (PG-18) im Porenwasser des Wirtgesteins wird aber in dem im Opalinuston erwarteten Wertebereich zu keiner wesentlichen Beeinflussung der Stahlkorrosionsrate führen, da das Porenwasser des Bentonits eine ähnliche Salinität aufweist.

Für das alternative Behälterkonzept mit einer Kupferhülle und einem Innenbehälter aus Stahl wird eine Behälterlebensdauer von über 100'000 Jahre erwartet (vgl. Kap. 4.6.2). Bzgl. der Einflüsse des pH-Werts (PG-16), der Redox-Bedingungen (PG-17) und der Salinität (PG-18) gelten ähnliche Schlussfolgerungen wie für den Stahlbehälter, d.h. die erwartete Lebensdauer des Kupfer-Behälters im Opalinuston wird durch diese Faktoren nicht signifikant verändert.

Abfallmatrix

PT-2 / Auflösungsrate für Brennstoffmatrix und Hüllrohre BE

Die Brennstoffmatrix ist eine wichtige Barriere, da die Auflösung sehr langsam verläuft und eine sehr wirkungsvolle Radionuklidrückhaltung bewirkt, vgl. Kap. 4.6.

Ein Einfluss des pH-Werts (PG-16) und der Salinität (PG-18) im Porenwasser des Wirtgesteins auf die Auflösungsrate kann in den im Opalinuston erwarteten Wertebereichen vernachlässigt werden, da das Bentonit-Porenwasser bezüglich pH-Wert in einem sehr ähnlichen Bereich sehr gut gepuffert ist und auch eine ähnliche Salinität wie Opalinuston hat.

Die Auflösungsrate der Brennelemente (UO_2) hängt stark von den Redox-Bedingungen ab. Diese werden vom hohen H_2-Druck (als Folge der Stahlkorrosion beim Behälter) im Nahfeld dominiert. Erst nach dem Ende der Wasserstoffbildung spielen die gut gepufferten Redox-Bedingungen des Bentonit-Porenwassers eine Rolle. Wegen der chemischen Ähnlichkeit zum Wirtgestein dürfte diese Pufferung über sehr lange Zeiträume anhalten, sodass ein Einfluss der Redox-Bedingungen (PG-17) im Opalinuston auch wegen den dort nachgewiesenen günstigen Redox-Bedingungen vernachlässigt werden kann.

Verfüllung und Versiegelung

PT-4 / Sorptionskoeffizienten im Nahfeld

Zementnahfeld des SMA- resp. LMA-Lagers

Die chemische Rückhaltung der Radionuklide im Zementnahfeld wird durch die Verteilungskoeffizienten Zementphasen – Porenwasser (K_d-Werte in m^3/kg) quantifiziert (vgl. Kap. 4.6 und Tab. A6-5). Neben der Menge an Zementphasen ist die Sorption auch von der Porenwasserzusammensetzung abhängig. Letztere ist durch die Zementphasen gepuffert, sodass die Porenwasserzusammensetzung des Wirtgesteins nur einen geringen Einfluss hat. Ein erhöhter Wasserfluss durch das Nahfeld (PG-6, PG-14) würde die sorbierenden Zementphasen auflösen, und auch die oben erwähnte Pufferung würde sich damit nach einer gewissen Zeit erschöpfen.

Die Zementphasen sind im Kontakt mit dem Porenwasser des Wirtgesteins nicht stabil und degradieren langsam, wobei die Sorption an den sich neu bildenden Phasen (z.B. Calcit) für die meisten Radionuklide schwächer ist als an den Zementphasen. Abhängig vom Wasserdurchfluss verschlechtert sich deshalb das Rückhaltevermögen des Zementnahfelds für viele Radionuklide im Laufe der Zeit. Für die geringen Wasserflüsse (PG-6, PG-14) in den in Frage kommenden Wirtgesteinen ist die Zementdegradation innerhalb des Betrachtungszeitraums zu gering, um die Zementsorption merklich zu beeinflussen. Dies gilt sowohl für das SMA- als auch für das LMA-(Teil-)Lager und wird in Tab. 6.2-5 illustriert, welche die für SGT Etappe 1 abgeschätzten drei Degradationszeiträume (inkl. der Beschreibung der Sorption) auflistet. Die Dauer der Zeiträume ist umgekehrt proportional zum Wasserfluss.

Im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 wird die Zementdegradation mit einem aufdatierten Modell überprüft.

Tab. 6.2-5: Zeitliche Entwicklung der Eigenschaften des zementierten Nahfelds im SMA- bzw. LMA-Lager und der sorbierenden Minerale in Abhängigkeit des Wasserflusses.

Wasserfluss [m/s]	**Zeitraum** [Jahre]		
10^{-12}	$< 0.6 \times 10^7$	$(0.6 – 1.8) \times 10^7$	$> 1.8 \times 10^7$
10^{-11}	$< 0.6 \times 10^6$	$(0.6 – 1.8) \times 10^6$	$> 1.8 \times 10^6$
10^{-10}	$< 0.6 \times 10^5$	$(0.6 – 1.8) \times 10^5$	$> 1.8 \times 10^5$
Eigenschaften des Nahfelds, sorbierende Minerale	Degradationsphasen 1&2: Nicht degradiertes Nahfeld Pufferung durch Portlandit ($Ca(OH)_2$) Sorption an konstanter Menge CSH-Phasen	Degradationsphase 3: Sorbierende CSH-Phasen lösen sich langsam auf Gleichzeitige Bildung von sorbierendem Calcit	Degradationsphase 4: CSH-Phasen weitgehend aufgelöst Sorption an konstanter Menge Calcit

Der pH-Wert im Porenwasser des Wirtgesteins (PG-16) und das damit verknüpfte Karbonatsystem haben wegen der hohen Pufferung durch das Zementsystem im Nahfeld auf die Sorption im Nahfeld keinen Einfluss. Hohe Bikarbonatgehalte können die oben beschriebene Zementdegradation grundsätzlich leicht beschleunigen, sind aber im Gesamtbild nicht relevant.

Die Redox-Bedingungen im Porenwasser des Wirtgesteins (PG-17) haben auf die Sorption im Nahfeld keinen Einfluss, weil das Redoxpotenzial im Nahfeld durch Metallkorrosion und deren Produkte, aber auch durch die Degradation von Organika dominiert wird. Erst nach einer im Betrachtungszeitraum nicht zu erwartenden Erschöpfung dieser Pufferung kann das Porenwasser des Wirtgesteins einen Einfluss haben; dieser wäre aber wegen der Redox-Bedingungen in den verschiedenen Wirtgesteinen nicht nachteilig.

Das Porenwasser im Gleichgewicht mit den Zementphasen hat schon selbst eine relativ hohe Ionenstärke; der Einfluss einer höheren Salinität im Porenwasser des Wirtgesteins (PG-18) auf die Sorption im Nahfeld beschränkt sich auf Radionuklide, deren Sorption durch hohe Salzgehalte konkurrenziert wird, z.B. ^{36}Cl, ^{79}Se, ^{129}I und ^{137}Cs. Dies wird im Datensatz für SGT Etappe 2 berücksichtigt, hat aber auf das Verhalten dieser Radionuklide im gesamten Barrierensystem einen beschränkten Einfluss und wird durch die unteren Eckwerte für K_d gemäss ENSI-Fall d (siehe Tab. A6-5) in den Testrechnungen abgedeckt.

Sehr hohe Salzgehalte, welche zu einer Instabilität der Zementphasen führen könnten, kommen im Porenwasser der betrachteten Wirtgesteine nicht vor. Dies gilt auch für die Porenwasservariante der Effinger Schichten mit allenfalls erhöhter Salinität (bis zu doppelte Meerwasserkonzentration[84]), auch wenn bei letzterer mit einer leichten Änderung der Zusammensetzung der Zementphasen zu rechnen ist.

Bentonit-Nahfeld des HAA-Lagers

Die Sorption, ein neben der Limitierung der Löslichkeit wichtiger chemischer Rückhaltemechanismus für die Radionuklide, wird durch die Verteilungskoeffizienten Bentonitminerale – Porenwasser (K_d-Werte in m^3/kg) quantifiziert (vgl. Kap. 4.6). Das Porenwasser ist durch das Nahfeld bezüglich pH-Wert und Redox-Bedingungen gut gepuffert. Wegen der chemischen Ähnlichkeit zum Opalinuston ist diese Pufferung gesichert. Sowohl der pH-Wert (PG-16) als auch die Redox-Bedingungen (PG-17) im Porenwasser des Opalinustons haben daher keinen signifikanten Einfluss auf die Sorption im Bentonit-Nahfeld.

Ein Einfluss einer höheren Salinität im Porenwasser des Wirtgesteins (PG-18) auf die Sorption im Bentonit, dessen Porenwasser selbst eine relativ hohe Ionenstärke hat, beschränkt sich auf Radionuklide, deren Sorptionsmechanismus auf Kationenaustausch beruht. Dies wird im Datensatz für SGT Etappe 2 berücksichtigt, hat aber bei der erwarteten Bandbreite der Ionenstärken keinen grossen Einfluss.

PT-3 / Löslichkeitslimiten im Nahfeld BE/HAA/LMA

Zementnahfeld des LMA-Lagers

Neben der Sorption wird die chemische Rückhaltung einiger Radionuklide im Zementnahfeld eines LMA-Lagers auch durch deren beschränkte Löslichkeit quantifiziert (vgl. Kap. 4.6). Löslichkeitslimiten sind von der Porenwasserzusammensetzung abhängig. Letztere ist durch die Zementphasen gepuffert, sodass die Porenwasserzusammensetzung des Opalinustons nur einen geringen Einfluss hat. Eine signifikante Zementdegradation kann wegen des geringen Wasserflusses im Opalinustons ausgeschlossen werden.

---

[84] Neue Resultate aus laufenden Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Salinität in den Effinger Schichten vergleichbar ist mit derjenigen im Opalinuston.

Der pH-Wert im Porenwasser des Opalinustons (PG-16) und das damit verknüpfte Karbonatsystem haben wegen der hohen Pufferung durch das Zementsystem im Nahfeld auf die Löslichkeit im Nahfeld keinen Einfluss.

Die Redox-Bedingungen im Porenwasser des Opalinustons (PG-17) haben auf die Sorption im Nahfeld keinen Einfluss, weil das Redoxpotenzial im Nahfeld durch Metallkorrosion und deren Produkte, aber auch durch die Degradation von Organika dominiert wird. Erst nach einer innerhalb des Betrachtungszeitraums nicht zu erwartenden Erschöpfung dieser Pufferung kann das Porenwasser des Opalinustons einen Einfluss haben; dieser wäre aber wegen der nachgewiesenen günstigen Redox-Bedingungen im Opalinuston nicht nachteilig.

Der Einfluss der Salinität auf die Löslichkeit der Radionuklide ist gering und beruht in den erwarteten Bandbreiten hauptsächlich auf dem Einfluss auf die Speziation. Die Salinität (PG-18) im Porenwasser des Opalinustons mit den erwarteten Salinitäten beeinflusst die Radionuklidlöslichkeit kaum.

Bentonit-Nahfeld des HAA-Lagers

Neben der Sorption wird die chemische Rückhaltung der Radionuklide im Bentonit-Nahfeld eines HAA-Lagers auch durch deren beschränkte Löslichkeit quantifiziert (vgl. Kap. 4.6). Löslichkeitslimiten sind von der Porenwasserzusammensetzung abhängig. Das Porenwasser ist bezüglich pH-Wert und Redox-Bedingungen gut gepuffert. Wegen der chemischen Ähnlichkeit zum Opalinuston ist diese Pufferung über lange Zeiträume gesichert. Sowohl der pH-Wert (PG-16) als auch die Redox-Bedingungen (PG-17) im Porenwasser des Opalinustons haben daher kaum einen Einfluss auf die Löslichkeit der Radionuklide im Bentonit-Nahfeld.

Der Einfluss der Salinität auf die Löslichkeit der Radionuklide ist gering und beruht in den zu betrachtenden Bandbreiten hauptsächlich auf dem Einfluss auf die Speziation. Die Salinität (PG-18) im Porenwasser des Opalinustons mit den erwarteten Salinitäten beeinflusst die Radionuklidlöslichkeit kaum.

PT-5 / Advektion bzw. Diffusion im Nahfeld

Zementnahfeld des SMA- resp. LMA-Lagers

Die Interaktion des Porenwassers mit der Festphase kann an der Grenzfläche Zement – Wirtgestein zu Versiegelungseffekten führen (vgl. Kap. 4.6). Die Advektions- resp. Diffusionseigenschaften des gesamten Zementnahfelds ändern sich mit der Zementdegradation. Die Zementdegradation ist, wie oben (Abschnitt über die Sorption im Zementnahfeld) diskutiert, in den betrachteten Zeiträumen wegen der kleinen Wasserflüsse gering.

Bentonit-Nahfeld des HAA-Lagers

Von den Porenwasserparametern im Opalinuston kann der Einfluss des pH-Wert (PG-16) und der Redox-Bedingungen (PG-17) auf die Advektion und Diffusion vernachlässigt werden.

Eine Ionenstärke (PG-18) von über 0.7 Mol/L ist im Opalinuston nicht zu erwarten. Eine Beeinträchtigung der Quellfähigkeit des Bentonits und eine Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit, wie sie für sehr hohe Ionenstärken möglich ist (Dixon 2000), kann deshalb ausgeschlossen werden. Zudem werden auch bei hohen Ionenstärken solche Effekte für Trockendichten des Bentonits über 0.9 Mg/m^3, wie sie im Lagerkonzept vorgesehen sind, nicht beobachtet.

Ein Einfluss des Wasserflusses (PG-6) und (PG-14) auf die Bentoniteigenschaften kann im Opalinuston mit seiner geringen Wasserführung vernachlässigt werden.

Beurteilung des Kenntnisstands bezüglich der Langzeitentwicklung des Nahfelds (Fazit)

Der heutige Kenntnisstand bezüglich der geochemischen Eigenschaften und der Durchlässigkeit bzw. Transmissivität der Wirtgesteine wird als genügend beurteilt, um den Einfluss der Langzeitentwicklung auf die Transportparameter des Nahfelds sowohl für das SMA-Lager als auch für das HAA-Lager zu beurteilen und in den Testrechnungen adäquat zu berücksichtigen. In der Regel ist der Einfluss der entsprechenden relevanten geologischen Prozesse und Parameter auf das Nahfeldverhalten für die erwarteten geologischen Bedingungen klein. Für die für die Testrechnungen vom ENSI (2010a) verlangten Rechenfälle zum Nahfeld sind die hier aufgeführten ungünstigen Annahmen zur Brennstoffauflösung, zur Sorption im Nahfeld und zu den Löslichkeitslimiten im Nahfeld abdeckend[85] für alle hier diskutierten Ungewissheiten. Für Etappe 2 wird die Langzeitentwicklung des Nahfelds erneut evaluiert und allfällige neue Erkenntnisse werden in den provisorischen Sicherheitsanalysen und beim sicherheitstechnischen Vergleich in SGT Etappe 2 berücksichtigt.

6.2.7 Mögliche Auswirkungen von Nutzungskonflikten auf die Langzeitsicherheit

PG-32,PG-33 / Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen unterhalb bzw. oberhalb des Wirtgesteins und PG-34 / Nutzungskonflikte hinsichtlich Geothermie

Mit den vorhandenen Unterlagen zu den (vermuteten) Kohlenwasserstoffvorkommen (vgl. Kap. 4.2 bzw. Fig. A3-2) können die geologischen Standortgebiete bezeichnet werden, welche bezüglich der möglichen Nutzungskonflikte zu betrachten sind. Diese Standortgebiete waren zum Teil schon Ziel von bisher erfolglosen Explorationsarbeiten (Nördlich Lägeren) und haben ein Potenzial für nutzbare Kohlenwasserstoffvorkommen unterhalb der Wirtgesteine. Ob sich diese aufgrund der geologischen Situation postulierten Vorkommen in Zukunft als nutzungswürdig erweisen werden, ist offen. Bei allen übrigen Standortgebieten wird ein zukünftiger Nutzungskonflikt bezüglich Kohlenwasserstoffvorkommen als unwahrscheinlich betrachtet.

Auch bezüglich der geothermischen Nutzung des Untergrunds lassen sich aus den vorhandenen Unterlagen (vgl. Kap. 4.2 bzw. Fig. A3-3) die geologischen Standortgebiete bezüglich der von Signorelli & Kohl (2007) abgeschätzten geothermischen Produktivität einordnen. Unabhängig von der abgeschätzten geothermischen Produktivität muss in allen Standortgebieten mit potenziellen Nutzungskonflikten gerechnet werden, da aufgrund der technischen und wirtschaftlichen Fortschritte in der Bohrtechnik mit Erdwärmesonden immer grössere Tiefen erreicht werden, welche die Mindesttiefe für geologische Tiefenlager übersteigen können.

Für die Beurteilung möglicher Nutzungskonflikte sind zwei verschiedene Phasen zu betrachten. In einer ersten Phase, welche die Planung, den Bau, den Betrieb und die Phase nach Verschluss des Lagers – so lange das Lager als solches noch bekannt ist – umfasst, kann das Lager die Nutzung von Ressourcen einschränken (Nutzungsbeschränkungen). Während der Planungsphase der geologischen Tiefenlager geht es um eine Abwägung der Nutzung des Untergrunds, anschliessend – falls dem geologischen Tiefenlager zugestimmt wird – um eine Beschränkung der Nutzung des Untergrunds. Während der Planung sieht der Bund eine Beurteilung und möglicherweise eine Beschränkung derjenigen Aktivitäten im Untergrund vor, welche die Lager-

[85] Für einen Teil der Rechenfälle gibt das ENSI (2010a) für das Nahfeld die ungünstigen Werte für die Parametervariationen vor.

möglichkeiten betreffen könnten (vgl. BFE 2010). Die Erteilung der Rahmenbewilligung für ein Lager führt gemäss KEG (2003) zu einem vorläufigen Schutzbereich über dem Lagerbereich, innerhalb welchem bestimmte Tätigkeiten eingeschränkt werden können, falls diese zu einer Beeinträchtigung des Lagers führen könnten. Dieser Schutzbereich wird mit Erteilung der Betriebsbewilligung für das Lager definitiv.

Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass zu viel späteren Zeiten (> 1'000 Jahre), wenn solche Nutzungsbeschränkungen in Vergessenheit geraten könnten, Bohrungen bis in das Rahmengestein, in das Wirtgestein oder unter die Lagerebene abgeteuft und ein Tiefenlager angebohrt werden könnte. Ein solches unabsichtliches Anbohren eines Tiefenlagers wurde weltweit schon in verschiedenen Sicherheitsanalysen untersucht, u.a. auch im Rahmen des Entsorgungsnachweises für ein HAA-Lager in der Schweiz (Nagra 2002c) und für ein SMA-Lager für das Rahmenbewilligungsgesuch Wellenberg (Nagra 1994). Die Analysen zeigen, dass dadurch keine schwerwiegende, unzulässige Beeinträchtigung der Sicherheit eines Tiefenlagers entsteht, weil nur verfestigte Abfälle eingelagert werden und weil Radionuklide im Porenwasser der Lagerkammern wegen geringer Korrosionsraten der Abfallmatrix (BE/HAA), Sorption und kleiner Löslichkeit nur in kleiner Konzentration vorkommen und im Untergrund nur eine sehr beschränkte Mobilität haben. Schliesslich trägt auch die langzeitliche Entwicklung von Bohrungen in den betrachteten Sedimentgesteinen zur langfristigen Sicherheit bei ('Selbstverschluss' der Bohrung, vgl. Diskussion in Kap. 7.6.2 in Nagra 2002c).

Beurteilung des Kenntnisstands bezüglich der Nutzungskonflikte (Fazit)

Der heutige Kenntnisstand bzgl. natürlicher Ressourcen im Untergrund ist genügend, um deren Bedeutung zu analysieren. In den Testrechnungen wird der Einfluss von möglichen Nutzungskonflikten für die Langzeitsicherheit (unbeabsichtigtes Anbohren) entsprechend den Vorgaben des ENSI (ENSI 2010a) nicht explizit analysiert. Für SGT Etappe 2 werden die vorhandenen Unterlagen zu potenziellen Nutzungskonflikten überprüft und konsolidiert, um in Etappe 2 allfällige Interessenskonflikte aufzuzeigen und bei Bedarf abzuwägen. Die Tiefenlager sind so ausgelegt, dass sie sicher sind, auch wenn es in ferner Zukunft durch menschliche Aktivitäten zu einer unbeabsichtigten Verletzung der Barrieren kommen würde.

6.3 Rechenfälle für die Testrechnungen

Die Evaluation der Notwendigkeit von ergänzenden geologischen Untersuchungen im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 stützt sich unter anderem auf die Ergebnisse der standortspezifischen Testrechnungen zur Ermittlung der Dosisintervalle. Im vorliegenden Kapitel wird aufgezeigt, wie die Rechenfälle für die Testrechnungen identifiziert, konzeptualisiert und parametrisiert werden. Gemäss BFE (2008) und ENSI (2010a) ergeben sich die folgenden Anforderungen an die konzeptuellen Modelle und gewählten Parameterwerte für die Testrechnungen: i) die Referenz-Modellansätze und Referenz-Parameterwerte müssen die standortspezifische Situation des gesamten einschlusswirksamen Bereichs (inklusive Rahmengesteine) realistisch abbilden, und ii) alternative Modellansätze und Bandbreiten der Parameterwerte müssen die bestehenden Ungewissheiten in den relevanten Prozessen und Parametern für die verschiedenen Standorte adäquat erfassen.

Gemäss Vorgabe in ENSI (2010a) sind Szenarien zur Freilegung des Tiefenlagers nach Ablauf des Betrachtungszeitraums oder zum menschlichen Eindringen in das Tiefenlager in der provisorischen Sicherheitsanalyse und beim sicherheitstechnischen Vergleich in SGT Etappe 2 nicht zu betrachten.

Ausgangspunkt im standardisierten Parametervariationsverfahren ist der Referenzfall. Die Wahl der Referenzkonzepte und -parameter für die geologische Barriere beruht auf den Informationen in Kap. 4.2 bis 4.5 sowie in Anhang A3 (standortspezifische geologische Datensätze), für die technischen Barrieren auf den Informationen in Kap. 4.6 und 6.2 und zugehörigen Anhängen sowie für die Biosphäre auf den Informationen in Kap. 4.7.

Der Einfluss von bestehenden Ungewissheiten bezüglich der in Kap. 3 aufgeführten relevanten Prozesse und Parameter wird durch alternative Konzeptualisierungen und / oder Parametervariationen quantifiziert und fliesst in die berechneten Dosisintervalle ein. Die dazu verwendeten Konzepte und Parameter basieren wiederum auf Informationen in den oben genannten Kapiteln.

Variationsrechnungen sind einerseits Parametervariationen zum Referenzfall, in welchen jeweils für einen einzelnen Parameter ein pessimistischer Wert verwendet wird. Es sind dies die ungünstigen Eckwerte der für die Parameter gewählten Bandbreiten. Andererseits basieren Variationsrechnungen auf alternativen Modellkonzepten mit dazugehörigen realistischen bis pessimistischen Parameterwerten.

Gemäss ENSI (2010a) sind ausgehend vom Referenzfall mindestens folgende Fälle zu berechnen (vgl. auch Tab. 1.3-3):

a) Berechnungen mit einem gegenüber dem Referenzfall erhöhten Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich (oberer Eckwert).
b) Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall ungünstigen nuklidspezifischen Diffusionskoeffizienten (obere Eckwerte für homogen-poröse Wirtgesteine, untere Eckwerte für geklüftete Wirtgesteine) in der Geosphäre.
c) Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall erhöhten nuklidspezifischen Löslichkeitslimiten (obere Eckwerte) im Nahfeld.
d) Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall verringerten Sorptionskoeffizienten (untere Eckwerte für K_d) im Nah- und Fernfeld. Falls der K_d-Referenzwert eines Nuklids weniger als 0.001 m^3/kg beträgt, ist in den Berechnungen ein K_d-Wert von 0 m^3/kg zu verwenden.
e) Ausgehend vom Referenzfall ist der Einfluss von möglichen alternativen Klimavarianten (eiszeitliches Klima, wärmeres und trockeneres Klima) im Betrachtungszeitraum für das SMA- resp. HAA-Lager aufzuzeigen.

Wegen der gegenüber dem SMA-Lager erhöhten Radiotoxizität ist gemäss ENSI für das HAA-Lager zusätzlich die Robustheit gegenüber alternativen Annahmen zum Verhalten der technischen Barrieren zu untersuchen. Dazu sind für abgebrannte Brennelemente eine erhöhte Freisetzung von Radionukliden (Variation f) und für abgebrannte Brennelemente sowie für verglaste Abfälle eine frühzeitige Freisetzung von Radionukliden (Variation g) zu betrachten:

f) Berechnungen mit einer gegenüber dem Referenzfall hundertfach erhöhten Auflösungsrate der einzulagernden abgebrannten Brennelemente (Brennstoffmatrix und Brennelementhüllrohre).
g) Berechnungen mit Annahme einer auf 1'000 Jahre begrenzten Behälterlebensdauer.

Zusätzlich werden noch weitere, standortspezifische Variationsrechnungen erarbeitet, um alle Ungewissheiten bezüglich der Wirksamkeit der technischen und natürlichen Barrieren abdeckend zu erfassen. Diese Rechenfälle werden als "Alternative Fälle" bezeichnet.

Zur Illustration der Robustheit des Lagersystems werden zusätzlich auch sogenannte "What if?"-Fälle definiert und analysiert. Diese basieren auf konzeptuellen Modellen und/oder Parameterwerten, die zwar physikalisch grundsätzlich möglich sind, aber deutlich ausserhalb der durch Messungen oder Modellvorstellungen gestützten Konzepte und Parameterbandbreiten liegen.

Wie erwähnt, bildet der Referenzfall den Ausgangspunkt für alle weiteren Rechenfälle. Der Referenzfall bildet die geologische Situation in den essenziellen Elementen realistisch ab; entsprechend der Natur von Sicherheitsanalysen enthalten die dabei verwendeten Modelle jedoch Vereinfachungen, die teilweise mit pessimistischen bzw. konservativen Annahmen verbunden sind. Mit den weiteren Rechenfällen werden die Auswirkungen der relevanten Ungewissheiten erfasst. Entsprechend der Vorgaben in ENSI (2010a) wird in den Rechenfällen für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls grundsätzlich jeweils nur eine Änderung aufs Mal (alternative Konzeptualisierung, alternativer Parameterwert) vorgenommen[86].

Die Identifizierung der Rechenfälle bzw. die Wahl der zu analysierenden Varianten basiert auf einer Evaluation der noch nicht in den vorangehenden Schritten (technische Machbarkeit, Kap. 5, bzw. Systemanalysen, Kap. 6.2) abgehandelten relevanten Prozesse und Parameter. Die relevanten Prozesse und Parameter wurden in Kap. 3.2 identifiziert, und in Tab. 3.2-1 wurde aufgezeigt, welche dieser Prozesse und Parameter direkt in die quantitativen Dosisberechnungen einfliessen oder wie sie sonst bezüglich ihres Einflusses auf die Eindeutigkeit der Aussagen zur "sicherheitstechnischen Eignung" bzw. "sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit" evaluiert werden. In Tab. A4-1 wird gezeigt, mit welchen Rechenfällen die Ungewissheiten in den verschiedenen Prozesse und Parameter in den Dosisberechnungen untersucht werden; in Tab. A4-2 und A4-3 sind für die verschiedenen Rechenfälle die jeweils wichtigsten Parameter aufgeführt. Die aus dieser Evaluation resultierenden Rechenfälle wurden verglichen mit den Rechenfällen in Sicherheitsanalysen, in denen die Rechenfälle im Rahmen von Szenarienanalysen abgeleitet wurden. Der Vergleich zeigt, dass die über die Evaluation der Prozesse und Parameter abgeleiteten Rechenfälle für die vorgegebenen Rahmenbedingungen adäquat sind[87].

Die Konzeptualisierung der Rechenfälle ist in Anhang A5 dargestellt. Sie basiert auf den Informationen in Kap. 4 sowie auf den standortspezifischen geologischen Informationen in Anhang A3. Die wichtigsten Input-Parameter finden sich in Anhang A6; die übrigen Input-Parameter sind im elektronischen Daten- und Resultateordner dokumentiert (Nagra 2010b).

Die zusätzlich zu den gemäss ENSI durchzuführenden Rechnungen umfassen folgende Kategorien (vgl. Tab. 6.3-1):

- Erhöhter Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich (zusätzliche Fälle neben dem ENSI-Fall a)
- Alternative Konzeptualisierung des Radionuklidtransports im Wirtgestein (wo angebracht, Transport in geklüftetem Medium bzw. in kleineren wasserführenden Störungszonen)
- Veränderte Geochemie im Wirtgestein (wo angebracht, Auswirkungen pH-Fahne auf Wirtgestein, Auswirkungen einer reduzierten Kolloidfiltration in der Geosphäre, Auswirkungen einer erhöhten Salinität im Wirtgestein)
- Anwesenheit von sedimentären Architekturelementen im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (z.B. Sandkalkabfolgen, Kalkbankabfolgen)

---

[86] Eine Ausnahme bilden die "What if?"-Fälle, wo auch mehrere ungünstige Annahmen gleichzeitig getroffen werden können.

[87] Im vorliegenden Bericht steht die Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 im Vordergrund. Dementsprechend umfasst die Liste der Rechenfälle zur Evaluation des Einflusses von Ungewissheiten in Zusammenhang mit dem Nahfeld nur solche, die explizit in ENSI (2010a) verlangt werden. Aus demselben Grund fehlen Rechenfälle zur Bewertung von Szenarien mit menschlichem Eindringen ins Tiefenlager, in Übereinstimmung mit den Vorgaben in ENSI (2010a).

- Anwesenheit von strukturellen Architekturelementen (wenig häufige, d.h. mit typischen Abständen im Hektometerbereich auftretende steilstehende wasserführende Störungszonen, welche die Lagerkammern schneiden[88])
- Ungewissheiten bezüglich der Länge der Transportpfade abgeleitet aus der Wirtgesteinsmächtigkeit und in Zusammenhang mit der Platzierung der Lagerkammern im Wirtgestein
- Ungewissheiten bezüglich Gesteinsdekompaktion als Folge der Erosion (wo angebracht, zeitabhängige Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtgesteins)

Es ist zu beachten, dass in gewissen Fällen ein Rechenfall, welcher einer Rechenfall-Kategorie zugeordnet wird, auch eine andere Rechenfall-Kategorie abdeckt (z.B. Rechenfälle, welche der Kategorie 5 "Alternative Konzepte für Transportpfade WG" zugeordnet werden, decken auch die Kategorie 4 "Wasserfluss" teilweise ab), vgl. Tab. A4-3.

Eine detailliertere Zusammenstellung aller Rechenfälle und der damit berücksichtigten Prozesse und Parameter findet sich in Anhang A4. Mit diesen Rechnungen werden die Ungewissheiten für alle für die Dosisberechnungen relevanten Prozesse und Parameter abdeckend erfasst. Dies betrifft insbesondere:

- den Wasserfluss in der Geosphäre (PG-6 / Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit, PG-8 / Hydraulischer Gradient)
- die Ausbildung der wasserführenden Systeme (PG-9 / Art der Transportpfade, PG-10 / Porosität, PG-11 / Sedimentäre Architekturelemente, PG-12 / Lage und Beschaffenheit von verkarstungsfähigen Gesteinen innerhalb des Wirtgesteins, PG-14 / Transmissivität Störungszonen, PG-22 / Diffusionskoeffizienten für WG/EG)
- die Länge der Transportpfade (PG-5 / Mächtigkeit, PG-13 / Länge der Transportpfade)
- die geochemischen Rückhaltebedingungen (PG-21 / Sorptionskoeffizienten für WG/EG unter Berücksichtigung folgender Einflussfaktoren: PG-15 / Mineralogie, PG-16 / pH, PG-17 / Redox-Bedingungen, PG-18 / Salinität, PG-19 / Mikrobielle Prozesse, PG-20 / Kolloidfiltration, PG-24 / Auswirkungen pH-Fahne auf Wirtgestein)
- die geologische Langzeitstabilität (PG-1 / Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung, PG-3 Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion, PG-4 / Zeitliche Entwicklung regionale Erosionsbasis, PG-7 / Einfluss Dekompaktion auf hydraulische Durchlässigkeit, PG-28 / Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung, PG-30 / Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung)
- kritische Aspekte der Radionuklidrückhaltung in den technischen Barrieren, so weit sie vom ENSI (2010a) über die durchzuführenden Rechenfälle vorgegeben wurden (PT-1 / Behälterlebensdauer BE/HAA, PT-2 / Auflösungsrate für Brennstoffmatrix und Hüllrohre BE, PT-3 / Löslichkeitslimiten im Nahfeld BE/HAA/LMA, PT-4 / Sorptionskoeffizienten im Nahfeld, PT-5 /Advektion bzw. Diffusion im Nahfeld)
- spezifische Aspekte für die Modellierung der Biosphäre (PG-27 / Relevante Exfiltrationspfade, PG-29 / Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf Biosphärenmodellierung, PG-31 / Klimaentwicklung im Hinblick auf Abschätzung der Wasserflüsse in der Biosphärenmodellierung)

---

[88] Diese Rechenfälle liefern auch Input zur Definition der anordnungsbestimmenden geologischen Elemente (vgl. Kap. 3.1 bzw. Fig. 3.1-1).

Tab. 6.3-1: Übersicht über die in den Testrechnungen für die verschiedenen Standortgebiete berücksichtigten Kategorien von Rechenfällen.

Die Rechenfälle für ein Kombilager werden aus den Rechenfällen für das HAA-Lager und SMA-Lager abgeleitet.

Abkürzungen: ZNO – Zürich Nord-Ost, NL – Nördlich Lägeren, BB – Bözberg, SR – Südranden, JSF – Jura-Südfuss, WLB – Wellenberg; o/u –obere/untere Lagerebene des SMA-Lagers.

Rechenfall-Kategorie		HAA ZNO	HAA NL	HAA BB	SMA SR	SMA ZNO		SMA NL		SMA BB	SMA JSF		SMA WLB	
		OPA	OPA	OPA	OPA	OPA	BD	OPA	BD	OPA	OPA	EFF	MGL	MGL
		-	-	-	-	u	o	u	o	-	u	o	u	o
1	Referenzfall	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2	ENSI-Fälle a), b), d), e) (HAA- und SMA-Lager)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
3	ENSI-Fälle c), f), g) (HAA-Lager)	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Wasserfluss	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
5	Alternative Konzepte für Transportpfade WG	-	-	-	-	-	×	-	×	-	-	×	×	×
6	Veränderte Geochemie WG	-	-	-	-	-	×	-	×	-	-	×	×	×
7	Sedimentäre Architektur-elemente in WG / EG	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
8	Strukturelle Architektur-elemente (Störungszonen)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
9	Reduzierte Transportpfad-länge (Platzierung LK)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
10	Langzeitentwicklung (Erosion / Dekompaktion)	-	-	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

6.4 Annahmen und Unterlagen für die Testrechnungen

6.4.1 Einleitung

Im vorliegenden Kapitel werden die Annahmen und Unterlagen für die Testrechnungen diskutiert. In einem ersten Schritt wurde die sicherheitstechnische Bedeutung verschiedener Phänomene im Hinblick auf die Testrechnungen beurteilt, vgl. dazu auch die in Kap. 6.2.3 durchgeführte Evaluation der lagerbedingten Einflüsse (PG-23 / Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten, PG-24 / Auswirkungen einer pH-Fahne auf das Wirtgestein, PG-25 / Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas und PG-26 / Verhaltens des Wirtgesteins bezüglich Temperatur) und die in Kap. 6.2.4 durchgeführte Analyse der Einflüsse von bautechnischen Auslegungsvarianten. Dort wurde aufgezeigt, dass bei geeigneter Lagerauslegung diese lagerbedingten Einflüsse und die Einflüsse von bautechnischen Auslegungsvarianten die Sicherheit des HAA- oder SMA-Lagers entweder nicht massgeblich beeinflussen oder dass sie durch eine geeignete Parametrisierung der Rechenfälle abdeckend erfasst werden[89]. Deshalb werden sie in den Testrechnungen im vorliegenden Bericht nicht explizit berücksichtigt[90]. Im Rahmen der provisorischen Sicherheitsanalysen für SGT Etappe 2 werden die lagerbedingten Einflüsse und die Einflüsse von bautechnischen Auslegungsvarianten aber nochmals neu bewertet.

Nachfolgend werden die für die Testrechnungen benötigten Modellkonzepte, Inputdaten und Rechencodes für die Nahfeld-, die Geosphären- und die Biosphärenmodellierung vorgestellt.

6.4.2 Nahfeld

Modellkonzepte und Inputdaten für das Nahfeld

Die Konzeptualisierung der Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld entspricht grundsätzlich jener aus SGT Etappe 1 (Nagra 2008d). Die wichtigsten konzeptuellen Annahmen zum Radionuklidtransport im Nahfeld werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

i) Schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA):

- die Radionuklide liegen von Beginn an in vollständig mobilisierter Form vor[91], unter Berücksichtigung der Sorption; eine Ausnahme bildet das in ausgewählten metallischen Komponenten vorhandene C-14, das mit einer konstanten Rate entsprechend der Korrosion aus der Abfallmatrix freigesetzt wird
- der Radionuklidtransport im Nahfeld erfolgt advektiv/dispersiv und diffusiv, unter Berücksichtigung der Sorption, des radioaktiven Zerfalls und der durch die standortspezifischen im Wirtgestein bestehenden Bedingungen (homogen-poröses Medium, Störungszonen, sedimentäre Architekturelemente mit erhöhter Durchlässigkeit)

---

89 Zum Beispiel wird eine gasinduzierte Erhöhung des Wasserflusses abgedeckt durch die "What if?"-Rechenfälle mit erhöhtem Wasserfluss.

90 Eine Ausnahme bilden die als geklüftet konzeptualisierten Wirtgesteine, wo der Einfluss einer pH-Fahne auf das Wirtgestein und der Einfluss der Mobilität von Kolloiden explizit analysiert werden.

91 Zur Berücksichtigung der Zeitdauer für die Aufsättigung des Nahfelds und der Mobilisierung der Radionuklide wird von einer Einschlusszeit von 100 Jahren ausgegangen.

ii) Hochaktive Abfälle (BE/HAA):

- die Freisetzung der Radionuklide aus der Abfallmatrix[92] ins Bentonit-Porenwasser beginnt nach dem Zeitpunkt des Behälterversagens und erfolgt unter Berücksichtigung der langsamen Matrixauflösung und der beschränkten elementspezifischen Löslichkeiten
- der Radionuklidtransport in der Bentonit-Verfüllung erfolgt diffusiv, unter Berücksichtigung der Sorption, der Löslichkeitslimiten und des radioaktiven Zerfalls
- in den Dosisberechnungen für das geologische Standortgebiet Nördlich Lägeren wird ein vollflächiger Ausbau angenommen und dessen Auswirkungen auf die Transporteigenschaften des Nahfelds gemäss Fig. 6.2-2 berücksichtigt (Basisfall)

iii) Langlebige mittelaktive Abfälle (LMA):

- die Radionuklide liegen von Beginn an in vollständig mobilisierter Form vor[91], unter Berücksichtigung der beschränkten elementspezifischen Löslichkeit und der Sorption; eine Ausnahme bildet das in ausgewählten metallischen Komponenten vorhandene C-14, das mit einer konstanten Rate entsprechend der Korrosion aus der Abfallmatrix freigesetzt wird
- die Radionuklidfreisetzung aus den technischen Barrieren erfolgt wegen der kleinen Wasserfliessgeschwindigkeit als Folge der sehr kleinen Durchlässigkeit des Wirtgesteins Opalinuston diffusiv[93], unter Berücksichtigung der Sorption und des radioaktiven Zerfalls

Die verwendeten Inputdaten entsprechen grundsätzlich denjenigen aus SGT Etappe 1 (Nagra 2008d). Dies gilt auch für die Auswahl von sicherheitsrelevanten Radionukliden. Im Folgenden wird deshalb nur auf die wichtigsten Unterschiede hingewiesen:

- Inventar: Im vorliegenden Bericht wird das so genannte "umhüllende Inventar" (d.h. das Inventar aus dem Betrieb der bestehenden und allfälliger zusätzlicher KKW sowie eine bis 2120 dauernde Sammelperiode für Abfälle aus dem Bereich Medizin, Industrie und Forschung (inkl. Reservevolumen)) verwendet (siehe Anhang A6, Tab. A6-1).
- Das SMA-Inventar wird an den dafür geeigneten Standorten auf zwei Lagerebenen aufgeteilt (siehe Kap. 3.1). Die gewählte Zuteilung der Abfallsorten auf die Lagerebenen ist in Tab. A6-2 dokumentiert.

Eine vollständige Zusammenstellung der verwendeten Daten findet sich im elektronischen Daten- und Resultateordner zum vorliegenden Bericht (Nagra 2010b); die wichtigsten Inputdaten sind zudem in Tab. A6-1 bis A6-7 dokumentiert.

Rechencodes für das Nahfeld

Für die Radionuklid-Freisetzungsrechnungen aus dem Nahfeld des SMA- und HAA-Lagers werden die gleichen Rechencodes (VPAC, STMAN) wie in SGT Etappe 1 verwendet.

SMA-Lager

Das für die Berechnungen verwendete Programm VPAC 1.0 berechnet den zwei- bzw. dreidimensionalen Grundwasserfluss und Radionuklidtransport in homogenen oder heterogenen (geklüfteten) gesättigten Medien, welche das System der technischen Barrieren eines SMA-Lagers und die umgebenden Gesteine abbilden. Das Programm berücksichtigt ein element-

---

92 Bei den abgebrannten Brennelementen wird zusätzlich auch die 'Instant Release Fraction' (IRF) berücksichtigt.

93 Für den "What if?"-Fall mit einer wasserführenden Störungszone wird ein advektiver Fluss in der Störungszone unterstellt.

spezifisches lineares Sorptionsgleichgewicht zwischen Lösung und Festphase, den radioaktiven Zerfall sowie den radioaktiven Aufbau im Fall von Zerfallsketten. Die Berücksichtigung einer limitierten elementspezifischen Löslichkeit von Radionukliden ist in VPAC möglich, kommt aber in den vorliegenden Dosisberechnungen für das SMA-Lager wegen der kleinen Nuklidkonzentrationen nicht zur Anwendung.

VPAC benützt eine (gemischte Hybrid-) Finite-Elemente-Methode für die numerische Lösung der entsprechenden Transportgleichungen. Dieser Ansatz ermöglicht die Berechnung exakter Flussraten an beliebigen Grenzflächen innerhalb des Modellgebiets. Ferner kann die Zeitabhängigkeit von Modellparametern bezüglich Hydraulik (hydraulische Durchlässigkeit) und Sorption berücksichtigt werden.

Bei der Anwendung von VPAC für das SMA-Nahfeld umfasst das Modellgebiet stets einen genügend grossen Bereich der angrenzenden Geosphäre zum Zwecke einer möglichst korrekten Abbildung der Schnittstelle Nahfeld – Geosphäre. Aus modelltechnischen Gründen werden die Radionuklidfreisetzungsraten aus dem Nahfeld in die Geosphäre in 1 m Entfernung von der Lagerkammer abgegriffen.

Eine vollständige Beschreibung des Programms VPAC 1.0, einschliesslich der zu Grunde liegenden Modellannahmen, der Beschreibung der Parameter und der Resultate der Programmverifikation ist in Nagra (2008g) gegeben.

HAA-Lager

Das Nahfeldmodell für das HAA-Lager mit abgebrannten Brennelementen, verglasten hochaktiven Abfällen bzw. langlebigen mittelaktiven Abfällen ist im Programm STMAN 5.7 codiert. Das Programm berechnet die Radionuklidfreisetzungsraten aus dem Nahfeld und berücksichtigt elementspezifische Löslichkeitslimiten, ein elementspezifisches lineares Sorptionsgleichgewicht zwischen Lösung und Festphase, den diffusiven Radionuklidtransport, den radioaktiven Zerfall sowie den radioaktiven Aufbau im Fall von Zerfallsketten.

Als äussere Randbedingung an der Schnittstelle Nahfeld – Geosphäre wird jeweils die Option "diffusive host rock" verwendet, wodurch gegenüber einer $C = 0$-Randbedingung deutlich realistischere Freisetzungsraten aus dem Nahfeld in die Geosphäre resultieren[94]. Als Quellterm für die Geosphären-Transportrechnung werden die Radionuklidfreisetzungsraten aus dem BE/HAA-Nahfeld unmittelbar an der Schnittstelle zur Geosphäre, aus dem LMA-Nahfeld in 1 m Abstand zur Lagerkammer abgegriffen.

Eine vollständige Beschreibung von STMAN, inklusive der zu Grunde liegenden Modellannahmen, der Beschreibung der Parameter und der Resultate der Programmverifikation ist in Nagra (2002d) gegeben. Die verwendete Programmversion 5.7 ist in Nagra (2008k) beschrieben.

6.4.3 Geosphäre

Modellkonzepte und Inputdaten für die Geosphäre

Für die Testrechnungen wurden Konzepte zur Modellierung des Radionuklidtransports in der Geosphäre für jedes der in SGT Etappe 1 vorgeschlagenen Standortgebiete ausgearbeitet. Diese umfassen Referenz-Modellansätze und Referenzwerte, alternative Modellansätze und Para-

[94] Für die Rechenfälle mit wasserführenden Störungszonen, welche die Lagerkammern schneiden, wird im Einflussbereich der Störungszone eine Mischtank-Randbedingung angesetzt.

meterbandbreiten sowie "What if?"-Fälle. Die wichtigsten konzeptuellen Annahmen zum Radionuklidtransport in der Geosphäre werden im Folgenden kurz zusammengefasst:

- Das Modellkonzept für die Geosphäre umfasst das Wirtgestein und das obere Rahmengestein; dabei wird vereinfachend angenommen, dass der Radionuklidtransport hauptsächlich in eine vorgegebene Richtung (meist von unten nach oben) erfolgt[95].
- Der Radionuklidtransport in der Geosphäre erfolgt advektiv/dispersiv und diffusiv, unter Berücksichtigung der Sorption, des radioaktiven Zerfalls und Aufbaus sowie der standortspezifischen Architekturelemente im Wirtgestein und in den Rahmengesteinen. Dabei wird die unterschiedliche Radionuklid-Rückhaltung im Wirtgestein, in den Rahmengesteinen, in den z.T. darin eingebetteten sedimentären Architekturelementen (z.B. Sandkalkabfolgen im 'Braunen Dogger'; Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten) sowie z.T. in den verschiedenen im Wirtgestein bzw. in den Rahmengesteinen bestehenden Fazies mit unterschiedlichem Tongehalt in den Testrechnungen durch Verwendung von gesteinsspezifischen Sorptionsdaten explizit berücksichtigt[96].
- Wirtgesteine und Rahmengesteine, die keine wasserführende Klüftung aufweisen, werden als homogen-poröses Medium (HPM) abgebildet; engständig geklüftete Wirtgesteine und Rahmengesteine werden mittels eines "PICNIC-Legs" für eine Kluft (hydraulisch charakterisiert durch die Transmissivität bzw. den Wasserfluss[97]) modelliert; die Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld wird dabei in das entsprechende "PICNIC-Leg" im Wirtgestein eingespeist.
- Im Fall von steil stehenden grossräumigen Störungszonen, welche eine oder mehrere Lagerkammern schneiden, wird die Nahfeldfreisetzung in zwei separate "PICNIC-Legs" (einerseits Störungszonen, hydraulisch charakterisiert durch die Transmissivität bzw. den Wasserfluss[97], und andererseits das Wirtgestein zwischen Störungszonen, hydraulisch charakterisiert durch die hydraulische Durchlässigkeit bzw. den Wasserfluss) eingespeist, analog dem

---

[95] Im Referenzfall wird in allen Standortgebieten der Nordschweiz angenommen, dass die sedimentären Architekturelemente in den Wirtgesteinen und Rahmengesteinen keine erhöhte Durchlässigkeit haben, d.h. der ganze einschlusswirksame Gebirgsbereich ist für die Rückhaltung der Radionuklide wirksam, und die Radionuklide werden über die regionalen Aquifere (Malmkalke bzw. Hauptrogenstein, Muschelkalk) in die Biosphäre freigesetzt. In alternativen Fällen wird berücksichtigt, dass die horizontalen sedimentären Architekturelemente eine erhöhte Durchlässigkeit haben können und als Transportpfade wirksam sein können.

Weil die Transportwege durch die oberen Rahmengesteine in der Regel kürzer sind als durch die unteren Rahmengesteine (insbesondere auch im Fall einer erhöhten Durchlässigkeit der horizontalen Architekturelemente), wird angenommen, dass der Radionuklidtransport vom Wirtgestein durch die oberen Rahmengesteine (d.h. von unten nach oben) erfolgt. Auch im Standortgebiet Wellenberg wird ein Radionuklidtransport nur in eine Transportrichtung betrachtet. Dieser Ansatz führt zu einer Überschätzung der Freisetzungsraten aus der Geosphäre, falls die tatsächliche Radionuklidfreisetzung in verschiedene Hauptrichtungen (z.B. bei diffusionsdominiertem Transport gleichzeitig nach oben und nach unten) erfolgt. Der Grund liegt darin, dass sich für die verschiedenen Transportpfade in der Regel unterschiedliche Transportzeiten ergeben und die Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten stattfindet. Ungewissheiten bzgl. der vertikalen Transportpfadlänge in den oberen, aber (implizit) auch in den unteren Rahmengesteinen infolge allenfalls vorhandener, wasserführender sedimentärer Architekturelemente werden durch alternative Rechenfälle bzw. abdeckende "What if?"-Rechenfälle erfasst.

[96] Im Falle der Gesteine mit sedimentären Architekturelementen ('Brauner Dogger', Effinger Schichten) bedeutet dies, dass der vertikale Transportpfad standortspezifisch aufgeteilt wird in einen Anteil in Schichten mit einem höheren Tongehalt (50 % in den Standortgebieten Bözberg und Jura-Südfuss, 80 % in den übrigen Standortgebieten) und einen Anteil in Sandkalkabfolgen (SKA) bzw. Kalkbankabfolgen (KBA) mit niedrigerem Tongehalt, unter Verwendung der entsprechenden Sorptionsdatensätze (vgl. Tab. A6-9).

[97] In den Modellrechnungen werden Klüfte und Störungszonen als planare, homogene Diskontinuitäten abgebildet und hydraulisch durch die in Tab. 4.3-3 bzw. Tab. A3-2 aufgeführten jeweiligen Transmissivitäten charakterisiert. Ein möglicherweise kanalisierter Wasserfluss innerhalb der Diskontinuitäten ('Channeling') bleibt damit unberücksichtigt. Dieses Vorgehen führt zu einer Überschätzung der Wasserflüsse durch die Lagerkammern und damit zu einer Überschätzung der Radionuklidfreisetzungsraten aus den Lagerkammern.

Vorgehen in SGT Etappe 1 (Nagra 2008d); das Wirtgestein zwischen Störungszonen wird hierbei entweder durch ein homogen-poröses Medium ohne Klüftung repräsentiert oder aber durch eine engständige Klüftung, wie oben beschrieben. Die Störungszone wird vereinfacht als offene Kluft innerhalb eines diffusionszugänglichen Gesteinsbereichs modelliert; die Radionuklidrückhaltung im Füllmaterial der Störungszone wird dadurch konservativ vernachlässigt. Eine weitere vereinfachende pessimistische Annahme ist die Verwendung von konstanten hydraulischen Gradienten, unabhängig von der angenommenen Transmissivität der Störungszonen. In Wirklichkeit nehmen die hydraulischen Gradienten mit steigender Transmissivität ab.

- Sedimentäre Architekturelemente im Wirtgestein oder in den Rahmengesteinen, die in spezifischen Situationen einen horizontalen Transportpfad bilden können, werden ebenfalls mittels separater "PICNIC-Legs" modelliert (hydraulisch charakterisiert durch die Transmissivität von Klüften bzw. den Wasserfluss innerhalb des sedimentären Architekturelements); steht ein sedimentäres Architekturelement in direkter Verbindung mit einer Lagerkammer, so wird der entsprechende Anteil der Nahfeldfreisetzung in ein entsprechendes "PICNIC-Leg" für das sedimentäre Architekturelement eingespeist.

Als Basis zur Erarbeitung der Modellkonzepte zum Geosphärentransport werden die entsprechenden Informationen aus Kap. 4 bzw. Anhang A3 (standortspezifische geologische Datensätze) verwendet. Die Modellkonzepte für die Geosphäre sind in Anhang A5 dokumentiert, die wichtigsten Inputdaten, einschliesslich der wirtgesteinsspezifischen Sorptions- und Diffusionsdaten, in Tab. A6-8 bis A6-11. Eine vollständige Zusammenstellung der verwendeten Daten findet sich im elektronischen Daten- und Resultateordner zum vorliegenden Bericht (Nagra 2010b).

Rechencode für die Geosphäre

Für die Radionuklid-Transportrechnungen in der Geosphäre des SMA- und HAA-Lagers wird der gleiche Rechencode (PICNIC) wie in SGT Etappe 1 verwendet. Das Programm PICNIC (Version 2.4) berechnet den Transport gelöster Radionuklide in der Geosphäre (Wirtgestein und Rahmengesteine, unter Berücksichtigung von sedimentären Architekturelementen), die zu diesem Zweck als Netzwerk von eindimensionalen Transportpfaden (sogenannten "PICNIC-Legs") mit konsistenten Wasserflussraten abgebildet wird. Die "PICNIC-Legs" repräsentieren äquivalent-poröse Transportpfade oder diskrete wasserführende Strukturen wie Klüfte, Störungszonen, Kanäle oder sedimentäre Architekturelemente, mit der Möglichkeit einer Diffusion der Radionuklide in das stagnierende Porenwasser der angrenzenden (homogenen oder heterogenen) Gesteinsmatrix. Das Programm berücksichtigt eine lineare Sorption der Radionuklide auf den beteiligten Festphasen sowie den radioaktiven Zerfall und Aufbau.

Eine vollständige Beschreibung von PICNIC, inklusive der zu Grunde liegenden Modellannahmen, der Beschreibung der Parameter sowie der Resultate der Programmverifikation ist in Appendix A1.6 in Nagra (2002d) gegeben. Die verwendete Programmversion 2.4 ist in Nagra (2004b) dokumentiert.

Für den Rechenfall, welcher die möglichen Auswirkungen der Dekompaktion auf die Radionuklidfreisetzung im HAA-Standortgebiet Bözberg mittels zeitlich variabler Durchlässigkeit bzw. Wasserflüsse im WG/EG beschreibt, wird wie in SGT Etappe 1 der Rechencode PICNIC TD verwendet. Im Unterschied zu PICNIC verwendet PICNIC TD eine räumliche Diskretisierung innerhalb der einzelnen Legs, wodurch die Modellierung von transienten hydraulischen Bedingungen ermöglicht wird. Eine ausführliche Beschreibung des Programms PICNIC TD enthält Robinson & Suckling (2009).

6.4.4 Biosphäre

Modellkonzepte und Inputdaten für die Biosphäre

In den Testrechnungen wird eine Anzahl an stilisierten Biosphären-Situationen mit zeitlich konstanten Bedingungen (Klima, Geomorphologie, Wasserflüsse etc.) angenommen, die für die verschiedenen Phasen der Klimaentwicklung typisch sind. Damit werden die längerfristigen inhärenten (nicht reduzierbaren) Ungewissheiten bezüglich Klima berücksichtigt. Neben dem Biosphären-Referenzfall, der sich an den heutigen geomorphologischen und klimatischen Verhältnissen in den geologischen Standortgebieten orientiert, werden im Einklang mit den Vorgaben des ENSI auch alternative Fälle zur Klimaentwicklung untersucht (wärmeres und trockeneres Klima, eiszeitliches Klima, vgl. Kap. 4.7, Kap. 6.3). Die Biosphären-Modellierung stützt sich weitgehend auf die Modellkonzepte und Daten ab, die bereits im Projekt Entsorgungsnachweis (Nagra 2002d) verwendet wurden.

Für alle geologischen Standortgebiete wird in den Testrechnungen angenommen, dass die Radionuklidexfiltration an den tiefsten Punkten der Kontaktzone zwischen Biosphären-Aquifer und regionalen Tiefenaquiferen erfolgt, also in den Talsohlen von Haupt- und grösseren Seitentälern. Es wird ferner davon ausgegangen, dass die langfristigen Ungewissheiten über die geomorphologischen Verhältnisse innerhalb der geologischen Standortgebiete grösser sind als die heutigen Unterschiede zwischen den verschiedenen Standortgebieten. Deshalb werden für alle geologischen Standortgebiete dieselben Annahmen bezüglich der geomorphologischen Bedingungen und Wasserflüsse in der Biosphäre getroffen[98].

Einer der für die Dosisberechnungen wichtigen Biosphärenparameter ist der Wasserfluss im Biosphären-Aquifer, in welchem die Radionuklide exfiltrieren und welcher die Verdünnung der Radionuklide in diesem Aquifer bestimmt. Eine breite Evaluation der Daten zu den Grundwasserströmen in Haupt- und Seitentälern der Schweiz zeigt, dass typische Wasserflüsse im Biosphären-Aquifer in der Grössenordnung von 10^6 m^3/a liegen, wobei in vielen Situationen deutlich höhere Grundwasserströme und in einigen wenigen Fällen auch tiefere Werte vorliegen (Nagra 2010d). Die Evaluation zeigt ferner, dass die Haupttäler meist grosse Aquifere und kleine hydraulische Gradienten (Promille-Bereich) aufweisen, während in den betrachteten Seitentälern in der Regel kleinere Aquifere und grössere hydraulische Gradienten (Prozent-Bereich) vorliegen. In den Testrechnungen wird deshalb für den Wasserfluss im Biosphären-Aquifer ein Referenzwert von ca. 10^6 m^3/a verwendet[99].

---

[98] Mit diesem Vorgehen wird auch sichergestellt, dass Unterschiede bzgl. der Barrierenwirkung des WG/EG in den verschiedenen geologischen Standortgebieten nicht durch unterschiedliche Annahmen bzgl. der Biosphäreneigenschaften in den geologischen Standortgebieten maskiert werden.

Für SGT Etappe 2 bleibt vorbehalten, für Dosisberechnungen vor allem im Zeitraum bis zu einigen zehntausend Jahren, wo sich die Ungewissheiten bzgl. Langzeitentwicklung noch nicht so stark bemerkbar machen, die standortspezifischen Bedingungen realistischer abzubilden.

Für die Standortgebiete Jura-Südfuss und Wellenberg wurden zur Illustration Rechnungen mit den standortspezifischen Biosphärenbedingungen durchgeführt für diejenigen Rechenfälle, bei denen das Dosismaximum vor ca. 10'000 Jahren auftritt (vgl. Nagra 2010b).

[99] Darauf abgestützt wird in den Testrechnungen für den entsprechenden TAME-Parameter F_UL ein Referenzwert von 1.5×10^6 m^3/a eingesetzt. Dieser Wert wird einheitlich für alle geologischen Standortgebiete verwendet; er ist identisch mit dem im Referenzfall-Biosphärenmodell in SGT Etappe 1 (Nagra 2008d) und im Projekt Entsorgungsnachweis (Nagra 2002d) verwendeten Wert, und er ist kleiner als derjenige, der im Referenzfall-Biosphärenmodell im Projekt Wellenberg eingesetzt wurde (für den entsprechenden TAME-Parameter F_UL wurde ein Wert von 3.2×10^6 m^3/a verwendet, vgl. Nagra 1994). In grossen Biosphären-Aquiferen fallen die Grundwasserströme teilweise auch signifikant höher aus (z.B. Aaretal im Bereich des Standortgebiets Jura-Südfuss mit ca. 10^7 m^3/a).

Die sicherheitstechnischen Auswirkungen der Ungewissheiten bezüglich des Wasserflusses im Biosphären-Aquifer und anderer Faktoren (z.B. Bewässerung) wurden für das Referenzklima anhand von separaten Biosphären-Modellrechnungen quantifiziert. Die Berechnungen zeigen, dass die sicherheitstechnischen Auswirkungen der Ungewissheiten durch die Wahl des Referenzfalls genügend vorsichtig berücksichtigt werden (Nagra 2010d).

Das Modellkonzept und die Inputdaten für den Referenzfall entsprechen denjenigen aus SGT Etappe 1 (Nagra 2008d), mit Ausnahme einer Bewässerungsrate von 0.3 m/a aus dem lokalen Biosphären-Aquifer, die im Hinblick auf eine realistischere Abbildung der Landwirtschaftsformen gegenüber dem in SGT Etappe 1 verwendeten Wert von 0.5 m/a leicht reduziert wurde[100], und der damit verbundenen Änderungen der Wasser- und Feststoffflüsse in den verschiedenen Kompartimenten der Biosphäre.

Auch für den Rechenfall mit einem wärmeren und trockeneren Klima werden weitgehend dieselben konzeptuellen Annahmen und Inputdaten wie in SGT Etappe 1 (Nagra 2008d) verwendet, mit Ausnahme einer gegenüber dem Referenzfall erhöhten Bewässerungsrate von 0.6 m/a aus dem lokalen Biosphären-Aquifer und einer Evapotranspirationsrate von 0.6 m/a, und der damit verbundenen Änderungen der Wasser- und Feststoffflüsse in den verschiedenen Kompartimenten der Biosphäre.

Für den Rechenfall mit einem eiszeitlichen Klima wird auf das im Entsorgungsnachweis verwendete Modellkonzept zurückgegriffen[101]. Eine Beschreibung dieses Modellkonzepts findet sich in Anhang A7 in Nagra (2002d). Wie dort festgehalten wurde, sind für das eiszeitliche Szenarium Dosen im Bereich von 1 – 80 % der für den Biosphären-Referenzfall berechneten Dosen zu erwarten. Um die volle Bandbreite in den Dosis-Intervallen sichtbar zu machen, wird im vorliegenden Bericht der untere Eckwert von 1 % verwendet, d.h. die Dosen für das eiszeitliche Klima ergeben sich rechnerisch durch eine Skalierung der Dosen für den Biosphären-Referenzfall mit dem Faktor 0.01.

Eine vollständige Zusammenstellung der Daten findet sich in Nagra (2010d).

Rechencode für die Biosphäre

Für die Umrechnung der Radionuklid-Freisetzung aus der geologischen Barriere in eine Dosis werden wie schon in SGT Etappe 1 Biosphären-Transferkoeffizienten verwendet, die mit dem Rechencode TAME berechnet wurden. Die verwendete Programmversion 3c ist in Nagra (2002d) dokumentiert. TAME berücksichtigt explizit die Zeitskalen der verschiedenen Phänomene, die den Radionuklidaustausch zwischen den Kompartimenten verursachen. Nimmt man an, dass diese Zeitskalen kurz sind im Vergleich zu den Zeitskalen der Radionuklidfreisetzungen (für gewisse Radionuklide eine konservative Annahme), so kann das Konzept der

[100] Basierend auf einer Erhebung des Bundes werden in der Schweiz aktuell ca. 43'000 Hektar Landwirtschaftsfläche regelmässig und weitere 12'000 Hektar in Trockenjahren bewässert (BLW 2008). In Trockenjahren beträgt der gesamte Wasserbedarf für die Bewässerung ca. 144 – 170 Millionen m^3, was einer mittleren jährlichen Bewässerungsrate von ca. 0.26 – 0.31 m/a entspricht. Ein Grossteil der Bewässerung erfolgt allerdings im Alpenraum; im Schweizerischen Mittelland spielt nur die Bewässerung im Gemüseanbau eine wichtige Rolle, Ackerkulturen und Grasland werden hingegen weit weniger bewässert. Der Bewässerungsbedarf in der Schweiz nimmt aufgrund der Intensivierung der Landwirtschaft (Gemüseanbau etc.) und der tendenziell zunehmenden Temperaturen zu (Fuhrer & Jasper 2009).

[101] Im Projekt Entsorgungsnachweis wurde für dieses Biosphären-Szenarium die englische Bezeichnung 'Periglacial Climate' verwendet.

Biosphären-Transferkoeffizienten (BTKs) verwendet werden[102] (siehe Nagra 2008d). Alle Dosisrechnungen im vorliegenden Bericht wurden mit Hilfe von BTKs durchgeführt, welche mit TAME berechnet wurden (Anhang A6).

6.5 Resultate der Testrechnungen als Input zur Ermittlung der Dosisintervalle

Eine Übersicht über die im vorliegenden Bericht verwendeten Rechenfälle für die Testrechnungen und deren Zuordnung zu den relevanten Prozessen und Parametern geben Kap. 6.3 und Anhang A4. Die verwendeten Modellkonzepte für die Transportpfade sind in Anhang A5 schematisch dargestellt, die entsprechenden detaillierten Resultate pro Lagertyp und Standortgebiet sind in Anhang A7 dokumentiert. Die Dosiskurven in Anhang A7 bilden die Grundlage zur Ermittlung der Dosisintervalle für das HAA-, SMA- bzw. Kombilager für die Beurteilung der Sicherheit und den quantitativen sicherheitstechnischen Vergleich der Standortgebiete gemäss dem standardisierten Parametervariationsverfahren (ENSI 2010a). Eine zusammenfassende Übersicht über die Resultate der Dosisberechnungen findet sich in Kap. 7; Details können Nagra (2010b) entnommen werden. Die resultierenden Dosisintervalle für die geologischen Standortgebiete finden sich ebenfalls in Kap. 7. Anhang A7 dokumentiert die Resultate der Testrechnungen in Form von standortspezifischen Dosiskurven für jeden Lagertyp.

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse aus den Resultaten aus übergeordneter Sicht zusammengefasst.

6.5.1 HAA-Lager

Das wichtigste Charakteristikum der drei in SGT Etappe 1 vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete für das HAA-Lager ist das sehr geringdurchlässige Wirtgestein Opalinuston, welches den Hauptbeitrag dafür liefert, dass sowohl die Referenzfälle als auch die alternativen Fälle (inkl. "What if?"-Fälle) Dosismaxima aufweisen, welche deutlich unterhalb des ENSI-Schutzkriteriums 1 von 0.1 mSv/a liegen[103].

Beim Vergleich der drei Standortgebiete fällt auf, dass sich die Werte der berechneten Dosismaxima im Referenzfall zwar nur unwesentlich unterscheiden, sie aber zu unterschiedlichen Zeiten auftreten. Dies lässt sich auf unterschiedliche Mächtigkeiten der oberen Rahmengesteine bzw. den daraus resultierenden unterschiedlichen Transportpfadlängen zurückführen. Das (relativ) höchste berechnete Dosismaximum zum (relativ) frühesten Zeitpunkt zeigt das Standortgebiet Bözberg mit der geringsten Transportpfadlänge, das (relativ) niedrigste Dosismaximum zum (relativ) spätesten Zeitpunkt zeigt das Standortgebiet Nördlich Lägeren mit der grössten Transportpfadlänge.

Der Beitrag der oberen Rahmengesteine zur Rückhaltewirkung lässt sich gut anhand jener alternativen Fälle abschätzen, für welche angenommen wird, dass ein lateraler Transport in einem geklüfteten sedimentären Architekturelementen (Sandkalkabfolge) an der Basis der oberen Rahmengesteine stattfindet.

---

[102] Diese Annahme ist nicht für alle Situationen und Nuklide realistisch, aber immer pessimistisch (siehe Diskussion in Nagra 2008h).

[103] In diesem Kapitel wird nur die Einhaltung des Schutzkriteriums 1 gemäss ENSI G03 (ENSI 2009) diskutiert; die Diskussion der Dosisintervalle und der Vergleich ihres oberen Rands mit dem Wert von 0.01 mSv/a gemäss StSV (1994), unterhalb welchem die Standortgebiete gemäss SGT (BFE 2008) bzw. ENSI (2010a) als sicherheitstechnisch gleichwertig gelten, erfolgt in Kap. 7.

Für alle drei Standortgebiete hat der Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich (hydraulische Durchlässigkeit, als "What if?"-Fall auch die Anwesenheit von wasserführenden Störungszonen) einen deutlichen Einfluss auf den Wert des berechneten Dosismaximums.

Die Ungewissheiten, die mit den ENSI-Fällen f (Hundertfach erhöhte Auflösungsrate der abgebrannten Brennelemente), e1 (Alternative Klimavariante Wärmeres trockeneres Klima) und b (Ungünstige Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre) untersucht werden, haben einen beschränkten Einfluss auf den Wert des berechneten Dosismaximums.

Die Ungewissheiten, die mit den ENSI-Fällen c (Erhöhte Löslichkeitslimiten im Nahfeld), d (Verringerte Sorptionskoeffizienten im Nahfeld und in der Geosphäre) und g (Begrenzte Lebensdauer der BE- und HAA-Behälter von 1'000 a) untersucht werden, haben einen geringen Einfluss auf den Wert des berechneten Dosismaximums. Bei den Rechenfällen mit verringerter Sorption liegt der Grund darin, dass generell die langlebigen, nicht-sorbierenden Radionuklide die Dosis dominieren.

Der Einfluss der unterschiedlichen Überdeckung in den drei Standortgebieten im Hinblick auf Erosion und der damit einhergehenden Möglichkeit der Dekompaktion bzw. Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtgesteins wird – wo nötig[104] – durch einen entsprechenden alternativen Fall berücksichtigt. Hier ist der Einfluss auf die berechnete Dosis klar sichtbar; aber auch hier liegt der Wert des Maximums liegt aber ebenfalls deutlich unterhalb des ENSI-Schutzkriteriums 1 von 0.1 mSv/a.

6.5.2 SMA-Lager

Beim SMA-Lager mit vier verschiedenen Wirtgesteinen in sechs geologischen Standortgebieten (davon vier geeignet für eine Anordnung der Lagerkammern auf zwei verschiedenen Lagerebenen[105]) ist die Situation etwas komplexer als beim HAA-Lager. Im Folgenden werden die Resultate für das SMA-Lager, geordnet nach Wirtgestein, grob zusammengefasst.

Opalinuston

Die Aussagen für das HAA-Lager (Kap. 6.5.1) gelten generell auch für ein SMA-Lager (bzw. Teillager) im Opalinuston; d.h. das wichtigste Charakteristikum eines SMA-(Teil-)Lagers im Opalinuston ist das sehr geringdurchlässige Wirtgestein, welches den Hauptbeitrag dafür liefert, dass sowohl die Referenzfälle als auch die alternativen Fälle (inkl. "What if?"-Fälle) Dosismaxima aufweisen, welche deutlich unterhalb des ENSI-Schutzkriteriums 1 von 0.1 mSv/a liegen.

---

[104] Der Entscheid, ob und auf welche Weise eine Dekompaktion des Wirtgesteins infolge Erosion an einem bestimmten Standort berücksichtigt wird, hängt davon ab, ob innerhalb des Betrachtungszeitraums für das HAA-Lager (1 Million Jahre) bei der gegebenen heutigen Überdeckung und mit den in Kap. 4 aufgeführten konzeptuellen Modellen und Parameterwerten mit einer signifikanten Dekompaktion gerechnet werden muss (vgl. Kap. 6.2.5).

[105] Die in Anhang A7 hierzu gezeigten Dosiskurven entsprechen der Summe der Beiträge der Lagerkammern der beiden Lagerebenen.

In den Standortgebieten Zürich Nord-Ost, Nördlich Lägeren und Jura-Südfuss besteht grundsätzlich auch die Möglichkeit, das gesamte Inventar des SMA-Lagers im Opalinuston bzw. im 'Braunen Dogger' oder in den Effinger Schichten zu lagern. Die entsprechenden Dosiskurven wurden zur Illustration für die ENSI-Rechenfälle ermittelt (vgl. Nagra 2010b).

Der Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich (hydraulische Durchlässigkeit, als "What if?"-Fall auch die Anwesenheit von wasserführenden Störungszonen) hat einen deutlichen Einfluss auf den Wert des berechneten Dosismaximums.

Die Ungewissheiten, die mit den übrigen ENSI-Fällen und den alternativen Fällen mit lateralem Transport in sedimentären Architekturelementen (Sandkalkabfolgen) an der Basis der oberen Rahmengesteine untersucht werden, haben einen geringen Einfluss auf den Wert des berechneten Dosismaximums.

'Brauner Dogger'

Der 'Braune Dogger' hat generell ähnlich günstige Radionuklid-Rückhalteeigenschaften wie der Opalinuston (vgl. Kap. 4); deshalb gelten generell die Aussagen für Opalinuston auch für den 'Braunen Dogger'. Ein wesentlicher Unterschied zum Opalinuston besteht aber in den vorhandenen Ungewissheiten bezüglich der Anwesenheit, Lage und Eigenschaften von horizontalen sedimentären Architekturelementen (Sandkalkabfolgen).

Die Auswirkungen der entsprechenden Ungewissheiten werden mit alternativen Fällen untersucht, in denen der laterale Radionuklidtransport in solchen Architekturelementen explizit berücksichtigt wird. Dabei werden auch Fälle betrachtet, in denen angenommen wird, dass eine wasserführende horizontale Sandkalkabfolge die Lagerkammern schneidet. Bei allen Fällen mit lateralem Transport in Sandkalkabfolgen wird pessimistisch angenommen, dass die Radionuklide nach einer lateralen Transportdistanz von nur 200 m auf eine grosse vertikale wasserführende Störungszone treffen, welche einen "Kurzschluss" zur Biosphäre darstellt. Selbst solche pessimistischen Fälle weisen ein Dosismaximum auf, das noch weit unterhalb des ENSI-Schutzkriteriums 1 von 0.1 mSv/a liegt.

Effinger Schichten

Falls die Effinger Schichten wie erwartet bzw. gemessen (siehe Kap. 4) eine zwar im Vergleich mit dem Opalinuston etwas erhöhte, aber absolut gesehen immer noch sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit aufweisen, ist die Radionuklid-Rückhaltewirkung auch in diesem Wirtgestein gut; entsprechend niedrig ist der berechnete Wert des Dosismaximums im Referenzfall. Die Möglichkeit einer erhöhten Durchlässigkeit infolge von Klüften bzw. Störungszonen kann aber nicht ausgeschlossen werden; ebenso wenig die Anwesenheit von horizontalen Kalkbankabfolgen mit einer erhöhten lateralen Transmissivität über grössere Distanzen. Auch gibt es Ungewissheiten bezüglich der Lage und Eigenschaften solcher Kalkbankabfolgen (z.B. Möglichkeit der Verkarstung). Die Auswirkungen dieser Ungewissheiten werden mit einer Anzahl von entsprechend definierten Rechenfällen bewertet; im Extremfall mit einem Rechenfall, in dem pessimistisch angenommen wird, dass die Radionuklide nach einer vertikalen Transportdistanz in einer Kalkmergelabfolge von nur 10 m in eine stark wasserführende Kalkbankabfolge gelangen, welche einen "Kurzschluss" zur Biosphäre darstellt. Falls Kalkbankabfolgen vertikal nicht ausgewichen werden kann, würde man die Lagerkammern so anordnen, dass sie nur weniger kalkig ausgebildete Abfolgen schneiden. Dazu werden Rechenfälle untersucht, in denen die Radionuklidfreisetzung zusätzlich über eine wasserführende Kalkbankabfolge erfolgt, welche die Lagerkammern schneidet. Selbst bei solch pessimistischen Rechenfällen liegen die Dosismaxima noch deutlich unter dem ENSI-Schutzkriterium 1 von 0.1 mSv/a.

Mergel-Formationen des Helvetikums

Die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg zeichnen sich durch eine relativ grosse Mächtigkeit und eine gemessene geringe hydraulische Durchlässigkeit aus, welche mit zunehmender Überlagerung abnimmt (Kap. 4). Im Sinne einer optimalen Ausnutzung der Platzverhältnisse wird deshalb auch an diesem Standort von einer Anordnung der Lagerkammern auf zwei verschiedenen Lagerebenen ausgegangen. Unter Annahme von Referenzbedingungen ist die Radionuklid-Rückhaltewirkung in diesem Wirtgestein gut; entsprechend niedrig ist der berechnete Wert des Dosismaximums im Referenzfall. Auch hier zeigt sich klar, dass der Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich (Klufttransmissivität, Anwesenheit und Transmissivität von wasserführenden kataklastischen Scherzonen bzw. wasserführenden Störungszonen[106]) den grössten Einfluss auf den Wert des berechneten Dosismaximums hat; es folgen die ENSI-Fälle e1 (Alternative Klimavariante: Wärmeres trockeneres Klima), d (Verringerte Sorptionskoeffizienten im Nahfeld und in der Geosphäre) und b (Ungünstige Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre).

Da die Mergel-Formationen des Helvetikums im Referenzfall als geklüftetes Medium konzeptualisiert werden, werden hier auch die Auswirkungen einer pH-Fahne auf das Wirtgestein sowie die Ungewissheiten bezüglich Kolloidfiltration in der Geosphäre mit entsprechend definierten Rechenfällen untersucht. Die berechneten Dosismaxima werden dadurch nur sehr geringfügig erhöht, liegen aber noch deutlich unter dem ENSI-Schutzkriterium 1 von 0.1 mSv/a.

6.5.3 Kombilager

Die Resultate für das Kombilager zeigen wegen der gleichen Eigenschaften der (Teil-)Lager ein qualitativ und quantitativ ähnliches Verhalten wie diejenigen für das HAA-Lager bzw. das SMA-(Teil-)Lager im Opalinuston bzw. im 'Braunen Dogger'. Insbesondere liegen auch hier die Werte der berechneten Dosismaxima für alle betrachteten Fälle deutlich unterhalb des ENSI-Schutzkriteriums 1 von 0.1 mSv/a, auch für Rechenfälle mit sehr ungünstigen Annahmen.

[106] Beim Radionuklidtransport in den Störungszonen wird auch der Fall bewertet, in dem ein Anteil des Transportpfads innerhalb von Kalkbankabfolgen verläuft, für welche in den Testrechnungen der pessimistische Sorptionsdatensatz 'Calcit' verwendet wird.

7 Evaluation des Kenntnisstands bezüglich Sicherheit und technischer Machbarkeit

7.1 Evaluation des Kenntnisstands im Hinblick auf die Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle zur Beurteilung der Sicherheit (Resultate der Testrechnungen)

Für die verschiedenen von der Nagra für SGT Etappe 1 vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager (mit der Möglichkeit eines Kombilagers in drei Standortgebieten) wurden Testrechnungen zum Dosisverlauf durchgeführt (vgl. Kap. 6.5), entsprechend der Liste der identifizierten Rechenfälle (vgl. Kap. 6.3). Die Testrechnungen wurden zur Illustration des Systemverhaltens über den Betrachtungszeitraum hinaus durchgeführt bis 10 Millionen Jahre sowohl für das HAA- als auch für das SMA-Lager[107], mit den gleichen Parameterwerten wie im bzw. am Ende des Betrachtungszeitraums (vgl. Figuren in Anhang A7). Eine zusammenfassende Figur mit den Dosiskurven für das SMA-, HAA- und Kombilager findet sich in Fig. 7.1-1, wo auch die charakteristischen Dosisintervalle abgebildet sind, welche das Dosismaximum nur innerhalb des Betrachtungszeitraums berücksichtigen, so wie es in ENSI (2010a) vorgegeben ist. Basierend auf den Dosiskurven aus Fig. 7.1-1 ergibt sich die zusammenfassende Darstellung der charakteristischen Dosisintervalle in Fig. 7.1-2, die gemäss den Vorgaben des ENSI (2010a) bestimmt wurden. Neben den Testrechnungen für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls gemäss den Vorgaben des ENSI (2010a) wurden zum Aufzeigen der Robustheit der Lagersysteme auch Testrechnungen für zusätzliche alternative Fälle und für "What if?"-Fälle durchgeführt; die entsprechende Figur mit den Dosiskurven und den resultierenden Dosisintervallen[108] findet sich in Fig. 7.1-3. Die Analyse der Dosiskurven in Fig. 7.1-1 und 7.1-3 zeigt, dass für den Referenzfall in allen Standortgebieten (ausgenommen Wellenberg) die Dosiskurve innerhalb des Betrachtungszeitraums (SMA: 100'000 Jahre; HAA: 1 Million Jahre) ihr Maximum noch nicht erreicht hat; dies hat zur Folge, dass die Dosisintervalle für einen Teil dieser Standortgebiete einen sehr tiefen unteren Rand aufweisen. Um dieser Tatsache beim Vergleich der Dosisintervalle zwischen den Standortgebieten Rechnung zu tragen, wurden in Fig. 7.1-4 (nur ENSI-Fälle[109]) und Fig. 7.1-5 (inkl. zusätzliche alternative Fälle und "What if?"-Fälle) die Dosismaxima auch dann berücksichtigt, wenn sie ausserhalb des Betrachtungszeitraums liegen[110] (d.h. die Resultate der Dosisberechnungen werden für die Ermittlung des Dosisintervalls über den Betrachtungszeitraum hinaus berücksichtigt). Basierend auf den Dosiskurven und Dosisintervallen gemäss Fig. 7.1-1, 7.1-3, 7.1-4 und 7.1-5 werden die zusammenfassenden Darstellungen der Dosisintervalle zu Vergleichszwecken nebeneinander in Fig. 7.1-6 abgebildet. Der Vergleich der verschiedenen Abbildungen in Fig. 7.1-6 zeigt, dass die zusätzlich zu den ENSI-Fällen berücksichtigten alternativen Fälle und "What if?"-Fälle je nach Standortgebiet zu einer mehr oder weniger starken Erhöhung des oberen Rands der Dosisintervalle führt, welche sich einerseits aus einer effektiv erhöhten Dosis (Annahme einer deutlich ungünstigeren Barrierenwirkung des Lagersystems) und andererseits aus einer Verschiebung der Dosiskurven (höhere Dosis innerhalb des Betrachtungszeitraums wegen früherem Anstieg der Dosiskurve) ergibt. Einen qualitativ grösseren Einfluss auf den oberen

---

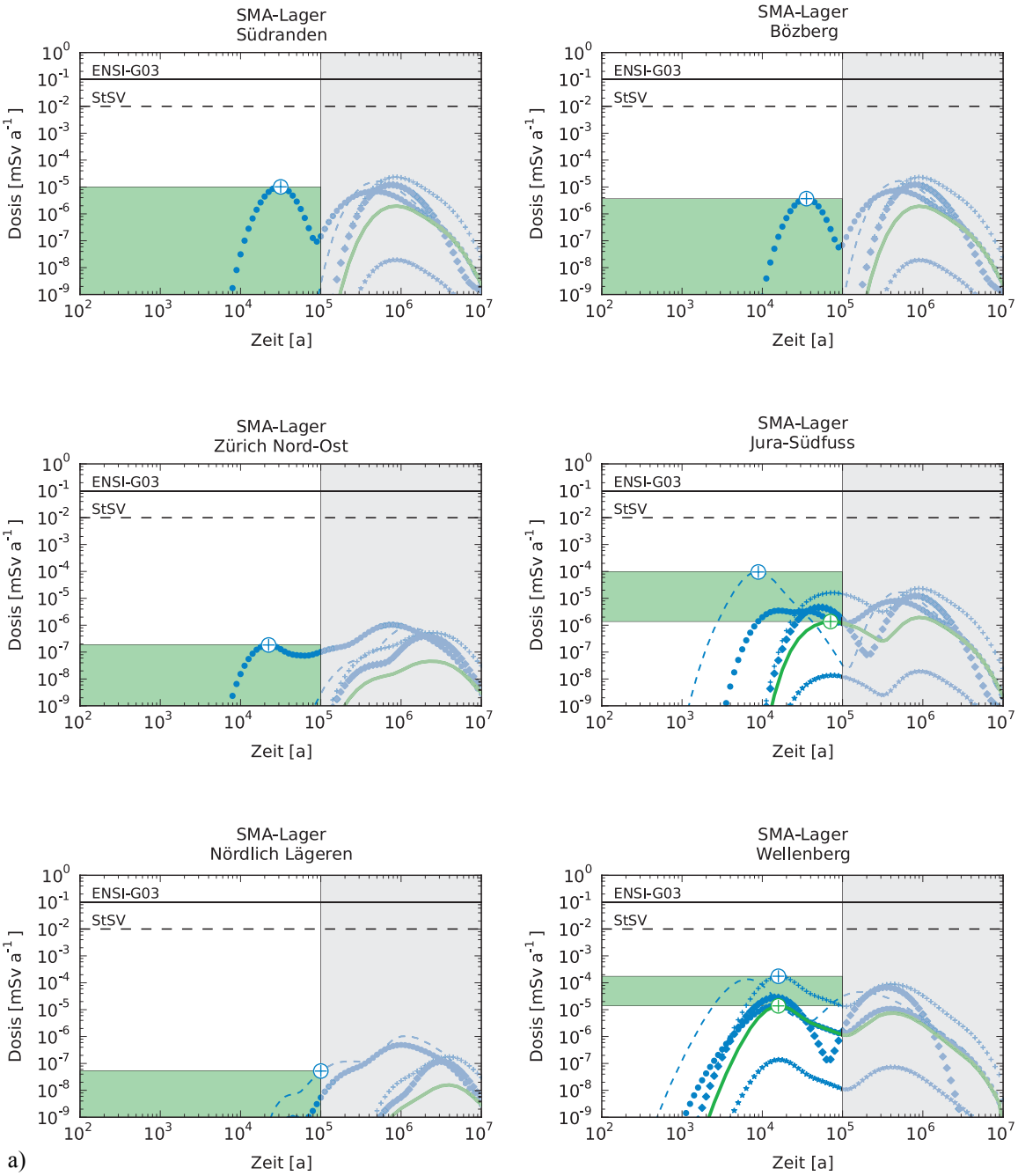
[107] Für HAA entspricht dies den Vorgaben in ENSI (2010a); in Zusammenhang mit der Ermittlung der Dosisintervalle und im Einklang mit ENSI-G03 werden die Testrechnungen für SMA auch bis 10 Mio. Jahre weitergeführt, da die Dosiskurven wegen der sehr guten Barrierenwirkung gewisser Wirtgesteine bis 1 Mio. Jahre teilweise das Maximum noch nicht erreicht haben.

[108] Wegen ihres anderen Charakters werden diese Dosisintervalle als *"What if?"-Dosisintervalle* bezeichnet.

[109] Als "ENSI-Fälle" werden die in ENSI (2010a) für das standardisierte Parametervariationsverfahren definierten Rechenfälle bezeichnet.

[110] Die resultierenden Dosisintervalle werden wegen ihres abweichenden Charakters als *Dosisintervalle ohne Berücksichtigung der Betrachtungszeiträume* bezeichnet.

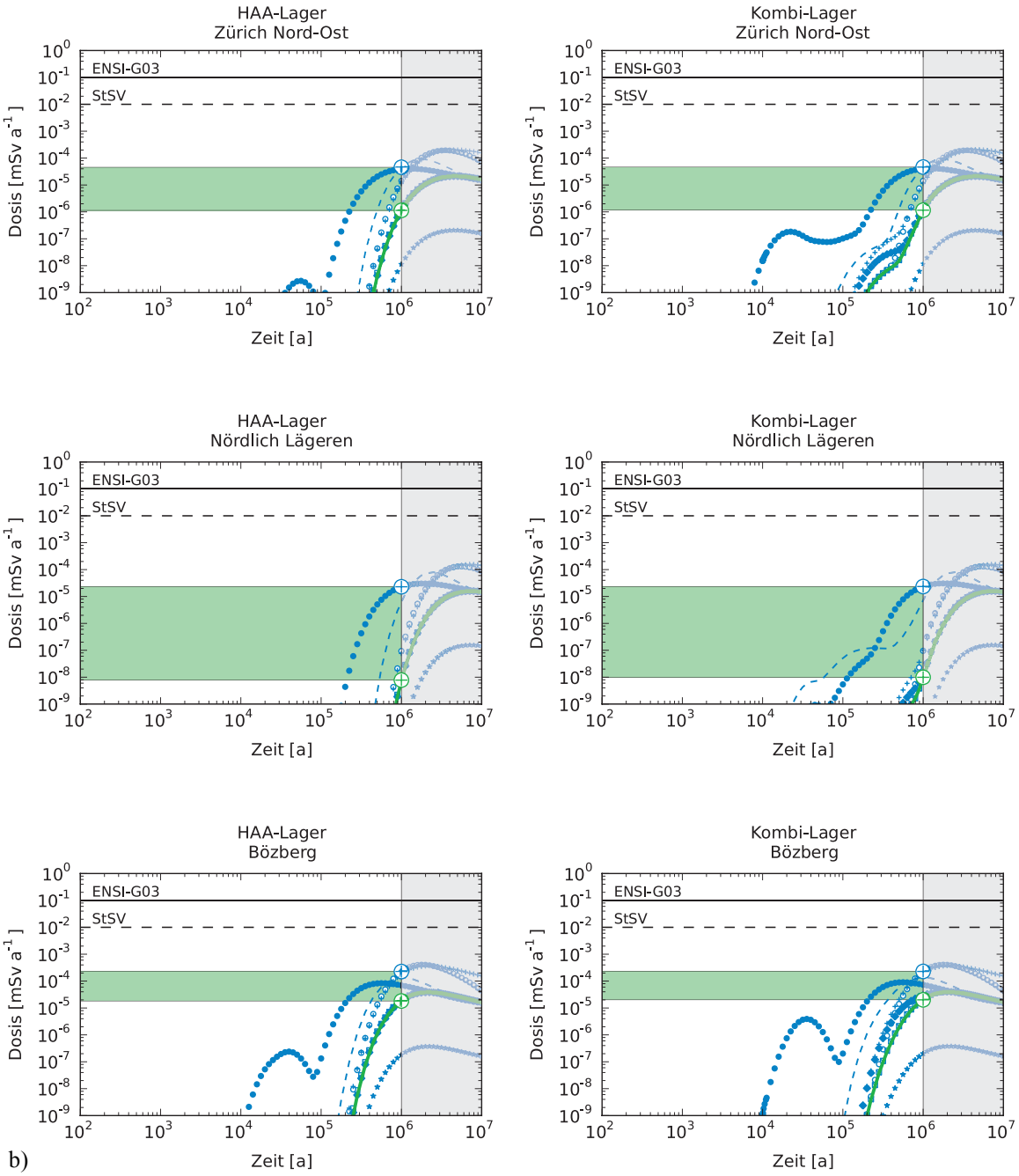
und unteren Rand der Dosisintervalle einiger Standortgebiete hat ein Vorgehen, bei dem die maximalen Dosen auch ausserhalb des Betrachtungszeitraums mit einbezogen werden. Dies liegt daran, dass innerhalb des Betrachtungszeitraums in verschiedenen Fällen das Dosismaximum noch nicht erreicht wird.



a)

Fig. 7.1-1: Übersicht der Dosiskurven gemäss den Vorgaben des ENSI für die verschiedenen geologischen Standortgebiete sowie resultierende charakteristische Dosisintervalle.

a) SMA-Lager, b) HAA-Lager und Kombilager. Darstellung der Dosiskurven für die Referenzfälle (grün) und die ENSI-Fälle (blau) pro Standortgebiet gemäss den Vorgaben des ENSI (2010a). Als "ENSI-Fälle" werden die in ENSI (2010a) für das standardisierte Parametervariationsverfahren definierten Rechenfälle bezeichnet. Die resultierenden charakteristischen Dosisintervalle sind als horizontale grüne Balken dargestellt. Der grau markierte Bereich kennzeichnet den Zeitraum nach Ablauf des Betrachtungszeitraums.



b)

Fig. 7.1-1: (Fortsetzung)

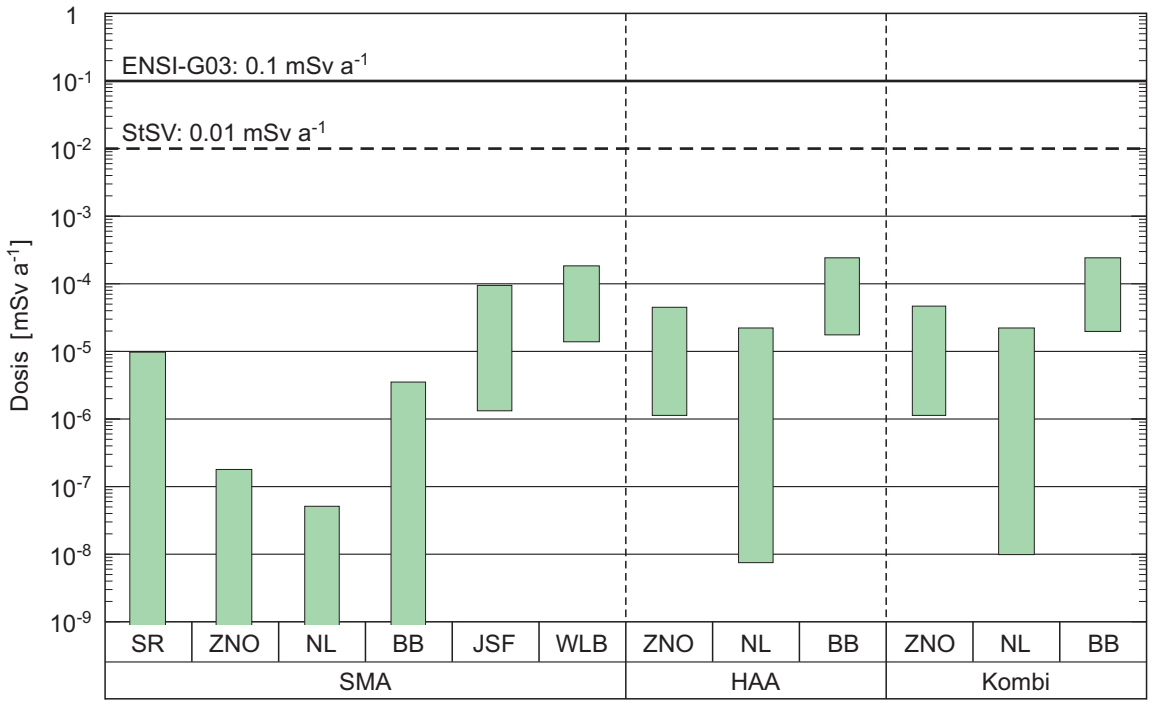
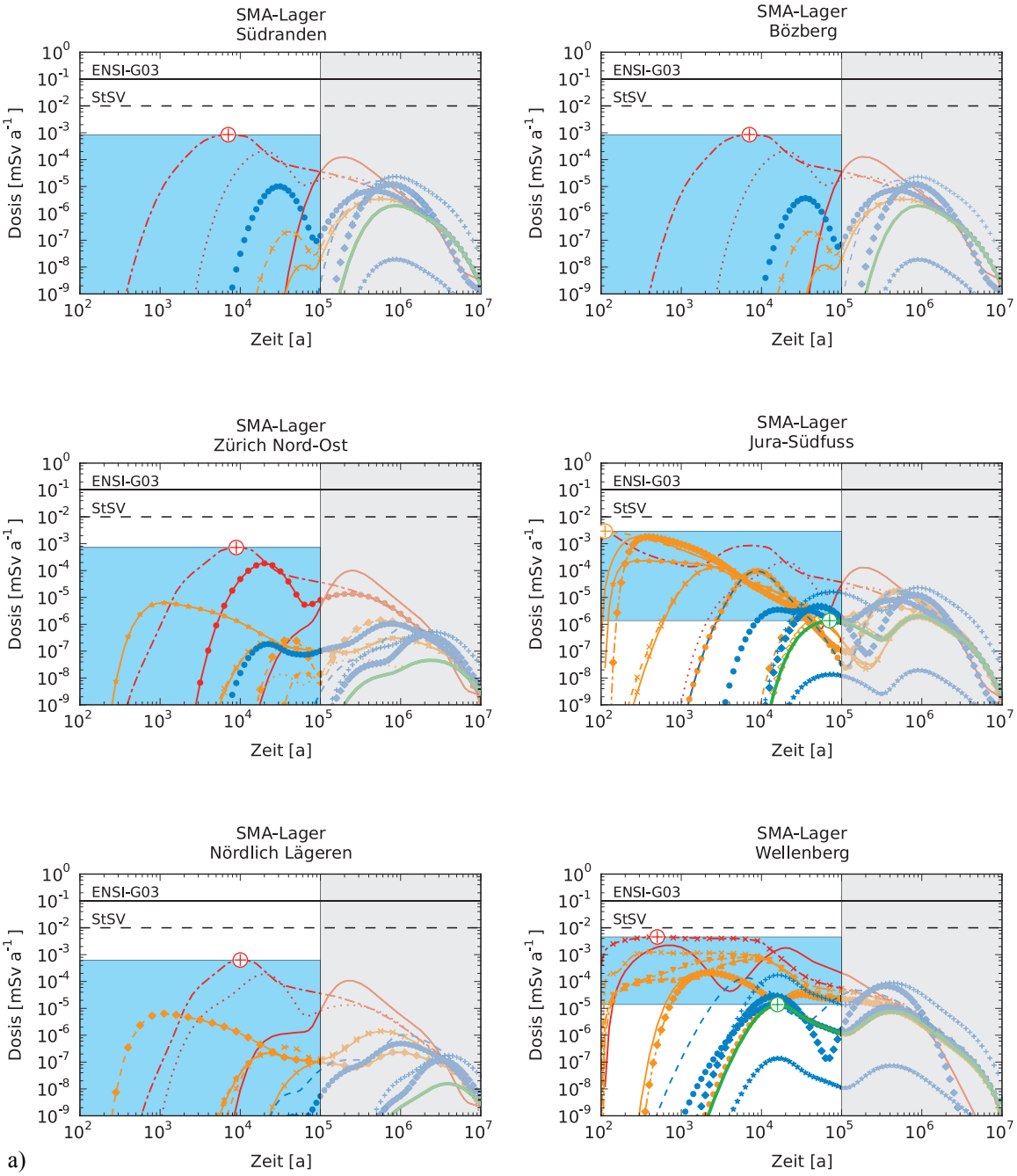


Fig. 7.1-2: Zusammenfassende Darstellung der charakteristischen Dosisintervalle gemäss den Vorgaben des ENSI für die verschiedenen geologischen Standortgebiete (aus Fig. 7.1-1).

Eingezeichnet sind die charakteristischen Dosisintervalle, die sich aus den Dosismaxima innerhalb des Betrachtungszeitraums ergeben. Für eine Beurteilung der Barrierenwirkung der Lagersysteme in den verschiedenen Standortgebieten ist zu beachten, dass die charakteristischen Dosisintervalle durch Berücksichtigung der Dosismaxima nur innerhalb des Betrachtungszeitraums teilweise stark beeinflusst werden. Für ein vertieftes Verständnis der Barrierenwirkung ist Fig. 7.1-4 (bzw. Teilfigur (b) in Fig. 7.1-6) zu beachten, wo die Dosismaxima auch dann berücksichtigt werden, wenn sie ausserhalb des Betrachtungszeitraums liegen.

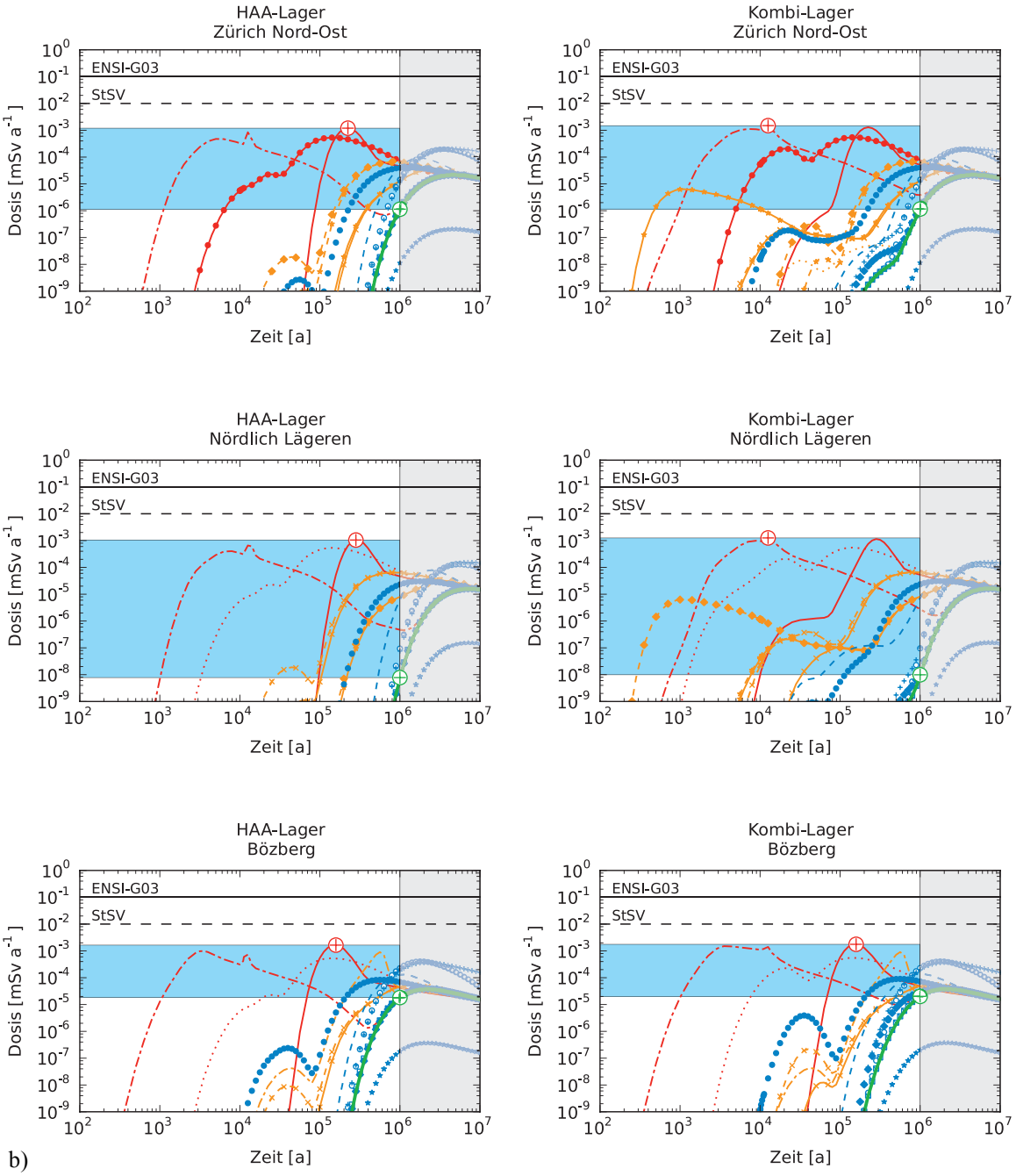
Insgesamt ergibt sich folgendes Bild: Für die Dosisberechnungen gemäss ENSI liegen die oberen Ränder der charakteristischen Dosisintervalle für alle geologischen Standortgebiete unterhalb der Grenze von 0.01 mSv/a, unterhalb welcher gemäss Strahlenschutzverordnung keine Optimierung mehr notwendig ist; sie liegen damit auch unterhalb dem weniger strengen Dosis-Schutzkriterium von 0.1 mSv/a der ENSI/G-03. Dies bedeutet gemäss SGT (BFE 2008) und Vorgaben in ENSI (2010a), dass alle Standortgebiete gemäss der quantitativen Analysen sicher und auch bezüglich ihrer Sicherheit gleichwertig sind. Dies gilt auch, wenn für die Ermittlung des Dosisintervalls zusätzliche alternative Fälle und "What if?"-Rechenfälle mit einbezogen werden und wenn die Resultate über den Betrachtungszeitraum hinaus berücksichtigt werden. Da die für die oberen Ränder der Dosisintervalle verwendeten Konzeptualisierungen und Parameterwerte sehr vorsichtig bzw. konservativ gewählt wurden, heisst dies, dass mit diesen Rechnungen der obere Rand der Dosisintervalle zuverlässig eingegrenzt wurde; die Aussage, dass die oberen Ränder der Dosisintervalle unterhalb 0.01 mSv/a liegt, ist für alle geologischen Standortgebiete belastbar. Dies heisst, dass mit dem vorhandenen Kenntnisstand bezüglich Sicherheit und sicherheitstechnischer Gleichwertigkeit eindeutige und belastbare Aussagen gemacht werden können und dass für den quantitativen sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte in SGT Etappe 2 keine Reduktion der Parameterbandbreiten bzw. der Bandbreiten der Konzeptualisierungen notwendig sind. Die von der Nagra für SGT Etappe 2 begonnenen bzw. geplanten Arbeiten dienen dazu, die Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen zu überprüfen und wo möglich die Ungewissheiten weiter zu reduzieren. Die Resultate dieser Arbeiten werden in die in Etappe 2 durchzuführenden provisorischen Sicherheitsanalysen sowie in den sicherheitstechnischen Vergleich und damit in die in Etappe 2 durchzuführende Prioritätensetzung zur Festlegung der Vorschläge für die in SGT Etappe 3 weiter zu untersuchenden Standorte einfliessen.



a)

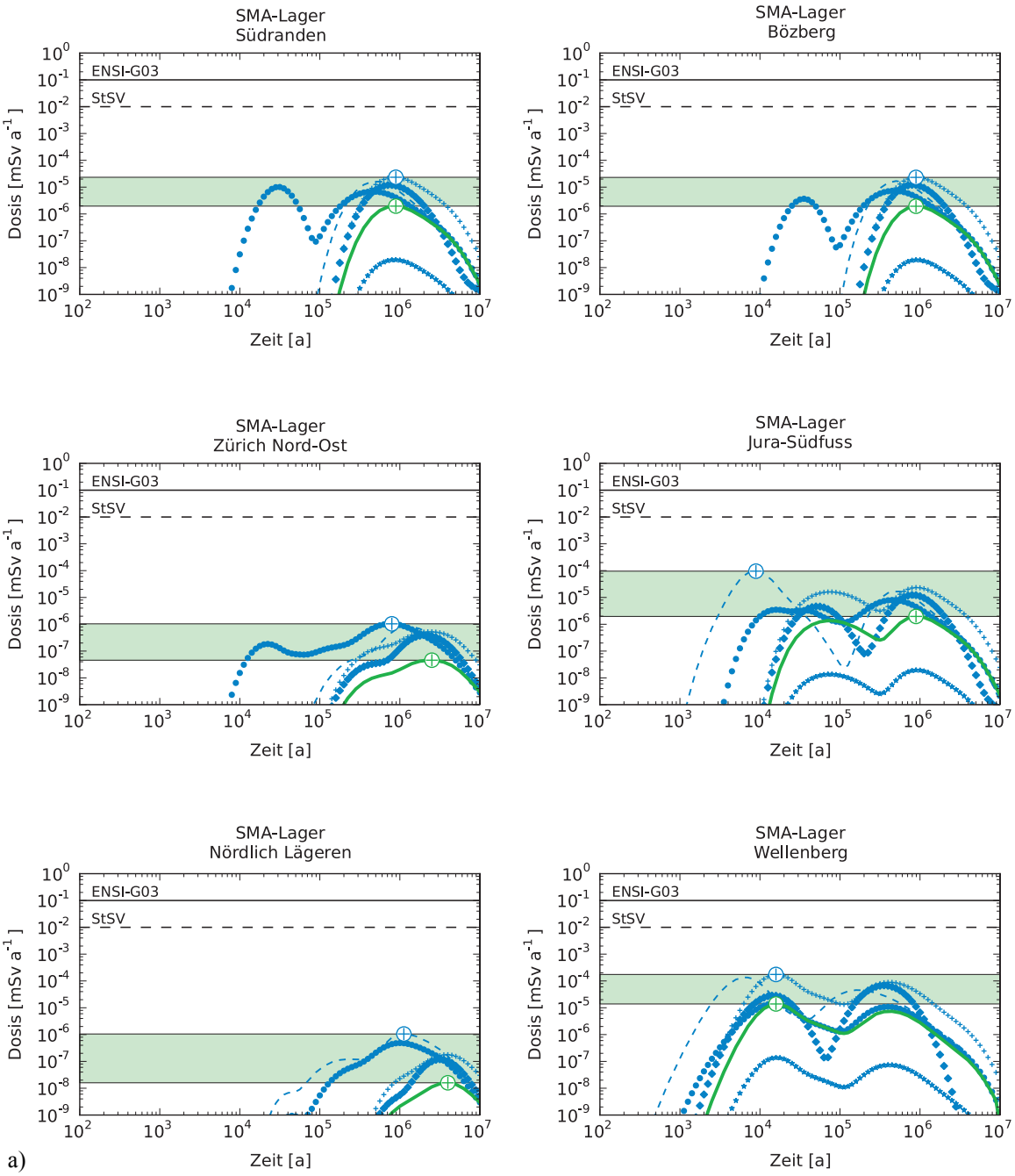
Fig. 7.1-3: Übersicht der Dosiskurven für die verschiedenen geologischen Standortgebiete sowie resultierende "What if?"-Dosisintervalle (ENSI-Fälle, weitere alternative Fälle und "What if?"-Fälle; Dosismaxima innerhalb des Betrachtungszeitraums).

a) SMA-Lager, b) HAA-Lager und Kombilager. Darstellung der Dosiskurven: Referenzfälle (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), "What if?"-Fälle (rot). Die resultierenden "What if?"-Dosisintervalle sind als horizontale blaue Balken dargestellt. Der grau markierte Bereich kennzeichnet den Zeitraum nach Ablauf des Betrachtungszeitraums.



b)

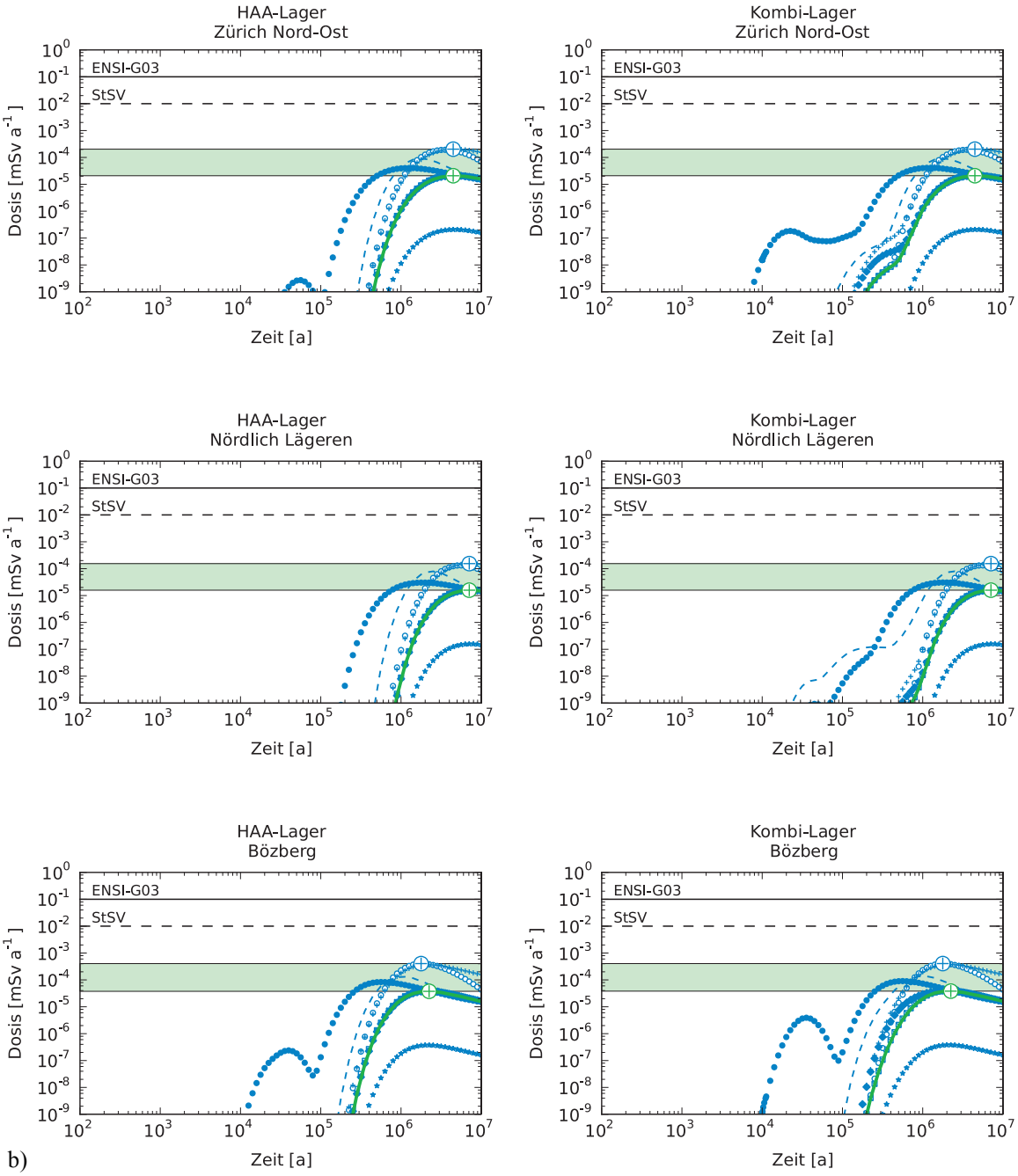
Fig. 7.1-3: (Fortsetzung)



a)

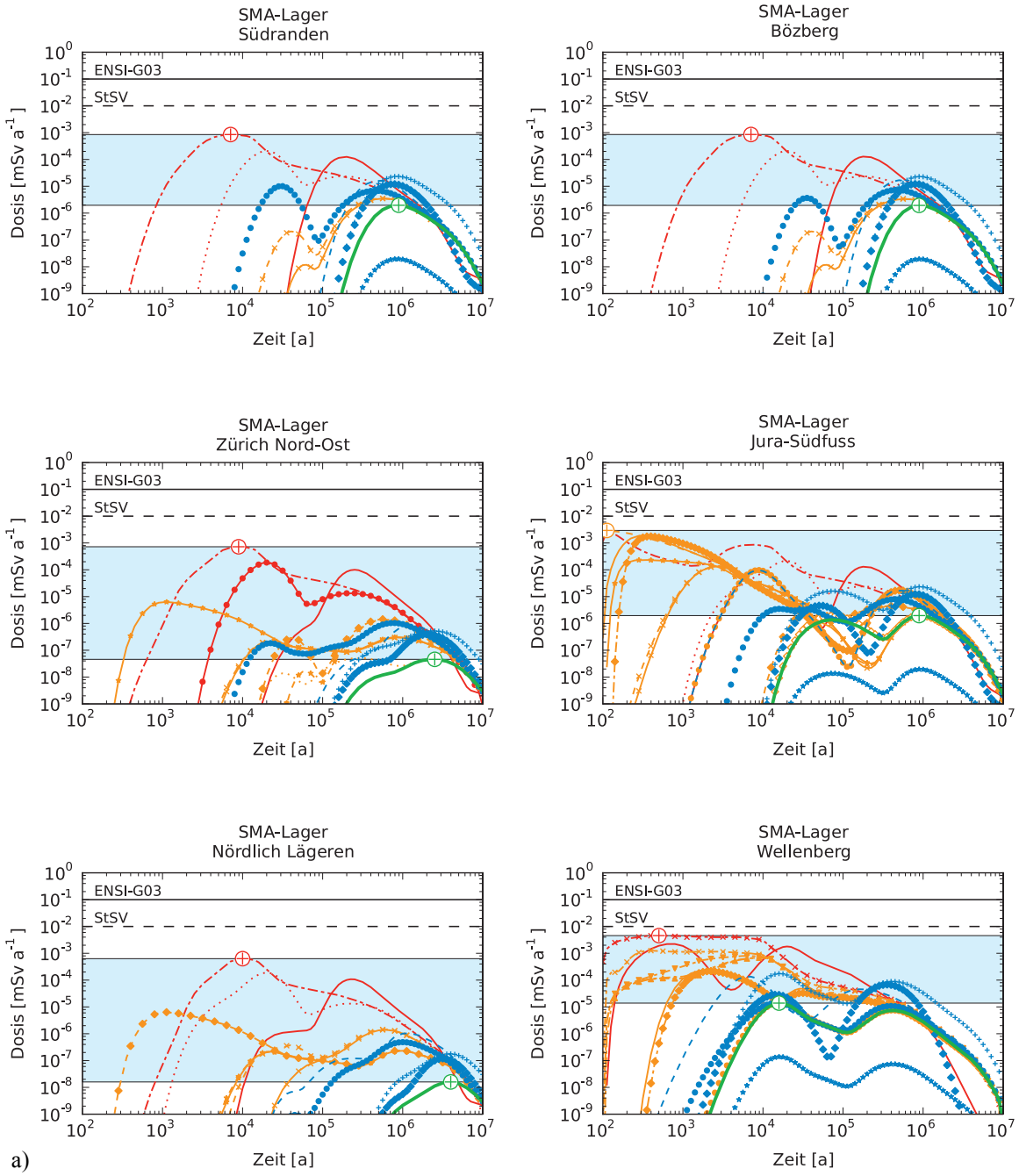
Fig. 7.1-4: Übersicht der Dosiskurven für die verschiedenen geologischen Standortgebiete sowie resultierende Dosisintervalle ohne Berücksichtigung der Betrachtungszeiträume (ENSI-Rechenfälle; mit Berücksichtigung der Dosismaxima auch ausserhalb des Betrachtungszeitraums).

a) SMA-Lager, b) HAA-Lager und Kombilager. Dosiskurven für die Referenzfälle (grün) und die alternativen Fälle (blau). Die resultierenden Dosisintervalle ohne Berücksichtigung der Betrachtungszeiträume sind als horizontale hellgrüne Balken dargestellt.



b)

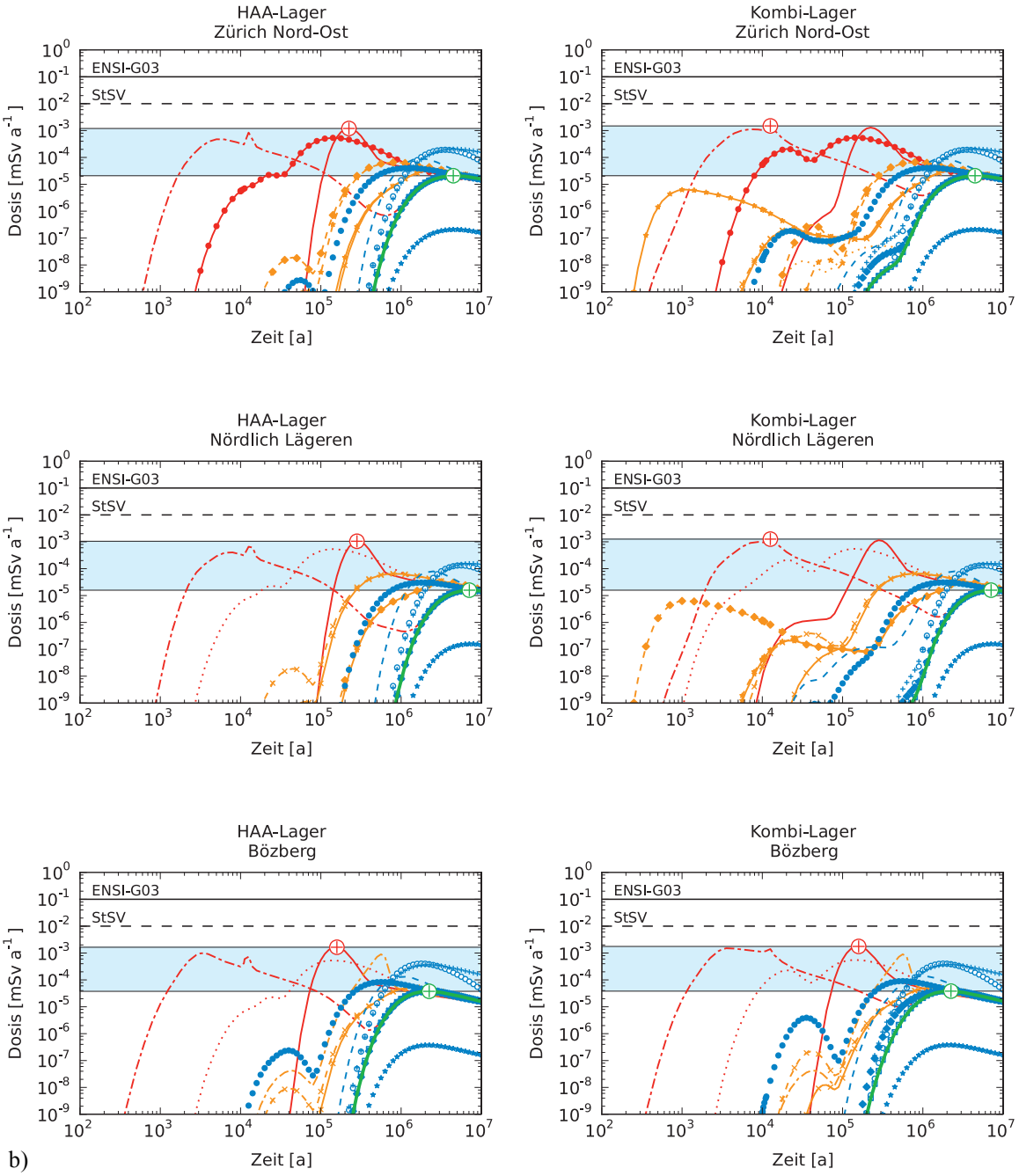
Fig. 7.1-4: (Fortsetzung)



a)

Fig. 7.1-5: Übersicht der Dosiskurven für die verschiedenen geologischen Standortgebiete sowie resultierende "What if?"-Dosisintervalle ohne Berücksichtigung der Betrachtungszeiträume (ENSI-Fälle, weitere alternative Fälle und "What if?"-Fälle; mit Berücksichtigung der Dosismaxima auch ausserhalb des Betrachtungszeitraums).

a) SMA-Lager, b) HAA-Lager und Kombilager. Dosiskurven für die Referenzfälle (grün), die alternativen Fälle (blau) sowie zusätzliche alternative Fälle (orange) und "What if?"-Fälle (rot). Die resultierenden "What if?"-Dosisintervalle ohne Berücksichtigung der Betrachtungszeiträume sind als horizontale hellblaue Balken dargestellt.



b)

Fig. 7.1-5: (Fortsetzung)

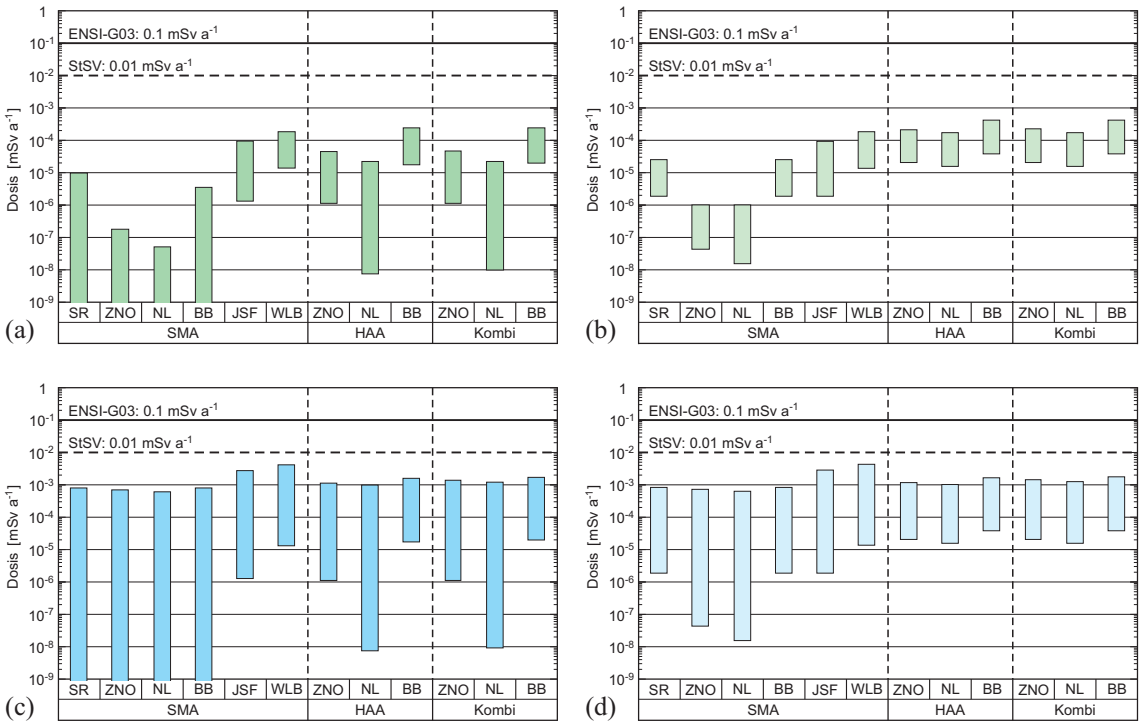


Fig. 7.1-6: Gegenüberstellung der verschiedenen Typen von Dosisintervallen für die verschiedenen geologischen Standortgebiete und Lagertypen.

(a) Charakteristische Dosisintervalle (ENSI-Fälle, Dosismaxima bestimmt aus Rechnungen innerhalb des Betrachtungszeitraums (aus Fig. 7.1-1))

(b) Dosisintervalle ohne Berücksichtigung der Betrachtungszeiträume (ENSI-Fälle, mit Berücksichtigung der Dosismaxima auch ausserhalb des Betrachtungszeitraums (aus Fig. 7.1-4))

(c) "What if?"-Dosisintervalle (ENSI-Fälle und weitere alternative Fälle sowie "What-if?"-Fälle, Dosismaxima bestimmt aus Rechnungen innerhalb des Betrachtungszeitraums (aus Fig. 7.1-3))

(d) "What if?"- Dosisintervalle ohne Berücksichtigung der Betrachtungszeiträume (ENSI-Fälle und weitere alternative Fälle sowie "What-if?"-Fälle, mit Berücksichtigung der Dosismaxima auch ausserhalb des Betrachtungszeitraums (aus Fig. 7.1-5)).

7.2 Evaluation des Kenntnisstands im Hinblick auf die Beurteilung der technischen Machbarkeit

Für die in Kap. 4 diskutierten geologischen Bedingungen und Parameter sowie die in Kap. 5.2 aufgezeigten Varianten für die Auslegung der Lagerkammern zeigen felsmechanische Rechnungen auch mit abdeckend gewählten Parameterwerten, dass die Lagerkammern zuverlässig erstellt werden können. Für die SMA-Kavernen können auf die geomechanischen Bedingungen abgestimmte Kavernenquerschnitte gewählt werden, vgl. die in Tab. 5.2-1 dargestellte Palette an verschiedenen Querschnitten. Mit diesen Querschnitten[111] können die Lagerkammern in den verschiedenen Wirtgesteinen für alle in Betracht kommenden Lagertiefen zuverlässig erstellt werden. Für die BE/HAA-Lagerstollen wird für die Beurteilung der technischen Machbarkeit in den verschiedenen Standortgebieten ein vollflächiger stützender Ausbau vorgesehen, auch wenn ein solcher Ausbau evtl. in Teilen der Standortgebiete nicht notwendig ist. Die durchgeführten felsmechanischen Berechnungen zeigen, dass die Machbarkeit unter Berücksichtigung der verschiedenen Ausbauvarianten in allen Standortgebieten für alle in Betracht kommenden Lagertiefen gegeben ist.

Die Auswirkungen der verschiedenen Auslegungsvarianten der Lagerkammern auf die Langzeitsicherheit wurden untersucht (vgl. Kap. 6.2). Für das SMA-Lager zeigt sich, dass die Unterschiede in den Radionuklidfreisetzungen für die verschiedenen Querschnitte der Lagerkavernen klein (ca. Faktor 2) und für die Aussagen zur Langzeitsicherheit nicht relevant sind. Für die BE/HAA-Lagerstollen zeigen die Abklärungen, dass auch ein vollflächiger Ausbau mit "Niedrig-pH"-Spritzbeton keine signifikanten Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit hat, auch dann nicht, wenn extrem ungünstige Parameterwerte verwendet werden.

Für die optimale Nutzung der Platzverhältnisse können verschiedene Anordnungsvarianten der Lagerkammern verwendet werden. Damit ist es möglich, auch Gebiete zu nutzen, welche eine erhöhte Dichte an anordnungsbestimmenden geologischen Elementen aufweisen. Da alle in Etappe 1 abgegrenzten Standortgebiete erhebliche Platzreserven aufweisen, steht gemäss heutigem Kenntnisstand in allen Standortgebieten genügend Raum zur Verfügung, um diesen geologischen Elementen auszuweichen. Für die effektive Anordnung der untertägigen Lagerbauten und die genaue Quantifizierung des resultierenden Platzangebots sind die für SGT Etappe 3 erforderlichen Felduntersuchungen (insbesondere Seismik[112]) und evtl. auch die Exploration von Untertag in der Phase nach Erteilung der Rahmenbewilligung notwendig. Die Explorierbarkeit der anordnungsbestimmenden geologischen Elemente in den verschiedenen Standortgebieten wird Bestandteil der qualitativen Bewertung in SGT Etappe 2 sein.

Für die Erschliessung der untertägigen Lagerbauten (Lagerfelder mit den Lagerkammern) können Schacht und Rampe verwendet werden. Vor allem bei der Rampe kann die Linienführung einfach an die örtlichen geologischen Bedingungen angepasst werden. Im Extremfall kann auch erst beim Bauvorgang entdeckten, lokal allenfalls sehr ungünstigen geologischen Verhältnissen (z.B. extreme Wasserzutritte infolge Verkarstung) ausgewichen werden, indem die Linienführung noch während des Baus angepasst wird. Auch die Schachtachse kann in einem gewissen Bereich angepasst werden. Selbst bei ungünstigen Annahmen für die in den

---

[111] Die Querschnitte werden in den zukünftigen Phasen der Lagerprojektierung bei Bedarf noch weiter optimiert.

[112] Für Etappe 2 ist geplant, für die HAA-Gebiete in der Region Bözberg – Nördlich Lägeren ein Netz von zusätzlichen 2D-Seismiklinien zu messen. Die Messungen dienen dazu, für das HAA-Lager die regionale tektonische Situation detaillierter zu erfassen im Hinblick auf die Bewertung der Langzeitentwicklung über den Betrachtungszeitraum von 1 Mio. Jahren. Die Messungen werden auch dazu beitragen, die Strukturen detaillierter zu erfassen im Hinblick auf die Bewertung geometrischer Aspekte für die Anordnung der HAA-Lagerstollen. Weiter werden die Messungen verwendet zur Planung und Fokussierung der geplanten 3D-Seismik.

Standortgebieten zu durchfahrenden geologischen Schichten (vgl. Kap. 5.4) ist die Machbarkeit der untertägigen Erschliessung gegeben, auch wenn sich unter extremen Bedingungen ein signifikant höherer Aufwand (Zeit, Kosten) ergeben kann.

Die verschiedenen Auslegungsvarianten berücksichtigen ein sehr breites Spektrum an geologischen Bedingungen und decken die in den verschiedenen Standortgebieten vorkommenden Bedingungen auch für sehr vorsichtig gewählte Annahmen ab. Die Auslegungsvarianten können zuverlässig erstellt werden und stellen die Langzeitsicherheit nicht in Frage. Damit ergeben sich eindeutige, positive Aussagen zur bautechnischen Machbarkeit für alle geologischen Annahmen, auch für Situationen, die ausgehend vom heutigen Kenntnisstand sehr ungünstig gewählt wurden. Dies heisst, dass mit dem vorhandenen Kenntnisstand belastbare Aussagen bezüglich der bautechnischen Machbarkeit gemacht werden können und keine Untersuchungen zur Reduktion der Parameterbandbreiten bzw. der Bandbreiten der Konzeptualisierungen im Hinblick auf SGT Etappe 2 notwendig sind. Die von der Nagra für SGT Etappe 2 begonnenen bzw. geplanten Arbeiten dienen dazu, die Unterlagen für die Beurteilung der technischen Machbarkeit zu überprüfen und wo möglich die Ungewissheiten weiter zu reduzieren. Die Resultate werden in die in Etappe 2 durchzuführende Beurteilung der technischen Machbarkeit einfliessen.

7.3 Evaluation des Kenntnisstands im Hinblick auf die qualitative Bewertung

Gemäss SGT (BFE 2008) sind in SGT Etappe 2 für die qualitative Bewertung die gleichen Kriterien zu berücksichtigen, wie sie schon in SGT Etappe 1 verwendet wurden (vgl. Tab. 1 in BFE 2008). Auch für SGT Etappe 2 wird wie in SGT Etappe 1 für die Bewertung der Kriterien auf eine Bewertung der zugeordneten Indikatoren abgestützt. Wie die Erfahrungen in SGT Etappe 1 gezeigt haben und dies durch die behördliche Überprüfung bestätigt wurde, kann mit dem durch die laufenden und geplanten Untersuchungen ergänzten Kenntnisstand eine belastbare vergleichende qualitative Bewertung durchgeführt werden, d.h. die vorhandenen Unterschiede[113] zwischen den Standortgebieten können qualitativ argumentativ aufgezeigt werden und ein belastbarer Vergleich der Standorte bezüglich der relevanten Merkmale ist möglich. Wie in Kap. 2.3 erwähnt, fliessen ausgewählte Resultate und Auswertungen der Dosisberechnungen und die Beurteilung der technischen Machbarkeit in die Gesamtbewertung und den qualitativen Vergleich der Standorte in SGT Etappe 2 ein. Bezüglich der Dosisberechnungen sind dies insbesondere auch Analysen zum Beitrag der verschiedenen Barrieren zur Sicherheit. Wie in Kap. 7.1 und 7.2 diskutiert, erlaubt der heutige Kenntnisstand auch unter Berücksichtigung der Ungewissheiten belastbare Dosisberechnungen und eine belastbare Beurteilung der technischen Machbarkeit. Der heutige Kenntnisstand ist unter Berücksichtigung der für SGT Etappe 2 laufenden bzw. geplanten Arbeiten ausreichend für die in SGT Etappe 2 durchzuführende qualitative Bewertung der Standortgebiete und für den sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte. Die von der Nagra für SGT Etappe 2 begonnenen bzw. geplanten Arbeiten dienen dazu, die Unterlagen für die qualitative Bewertung zu überprüfen und wo möglich die Ungewissheiten weiter zu reduzieren. Die Resultate dieser Arbeiten werden in die in Etappe 2 durchzuführenden Bewertungen und den sicherheitstechnischen Vergleich und damit in die in Etappe 2 durchzuführende Prioritätensetzung zur Festlegung der Vorschläge für die weiter zu verfolgenden Standorte einfliessen.

---

[113] Diese Unterschiede werden in den gemäss den Vorschriften des ENSI (2010a) durchgeführten Dosisberechnungen und in den ermittelten charakteristischen Dosisintervallen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 nicht immer sichtbar.

8 Arbeiten für SGT Etappe 2 zur Überprüfung, Vertiefung und Ergänzung der Informationen für die provisorischen Sicherheitsanalysen, für die Beurteilung der technischen Machbarkeit und den sicherheitstechnischen Vergleich

8.1 Überblick

Dieses Kapitel enthält eine Zusammenstellung der Arbeiten für SGT Etappe 2 zur Überprüfung, Vertiefung und Ergänzung der Informationen für die provisorischen Sicherheitsanalysen und für die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit sowie für den sicherheitstechnischen Vergleich. Dabei handelt es sich einerseits um Arbeiten, die nach Einreichung der Vorschläge für geologische Standortgebiete für SGT Etappe 1 durch die Nagra bereits begonnen wurden sowie andererseits um weitere geplante Arbeiten. Dazu werden auch die in den Gutachten und Stellungnahmen der Behörden und Kommissionen und in den zugehörigen Expertenberichten zu SGT Etappe 1 aufgeführten Hinweise berücksichtigt (ENSI 2010b, KNE 2010, swisstopo 2010, KNS 2010, AG Sika/KES 2010).

Der Zielsetzung des vorliegenden Berichts entsprechend liegt der Schwerpunkt der Zusammenstellung auf Abklärungen und Untersuchungen zur Vertiefung von geologischen Unterlagen vor allem für die verschiedenen Wirtgesteine und die vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete. Die Arbeiten werden wie in Kap. 4 nach den folgenden Themenbereichen gegliedert: Abklärungen und Untersuchungen zur Geometrie und zu den Strukturen der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche sowie Informationen zu Nutzungskonflikten und zu ausgewählten Zustandsparametern in den verschiedenen geologischen Standortgebieten (Kap. 8.2), Abklärungen und Untersuchungen zu den Eigenschaften der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (Kap. 8.3), zu den hydrogeologischen Verhältnissen (Kap. 8.4) und zur geologischen Langzeitentwicklung (Kap. 8.5).

Zusätzlich zu diesen auf die einzelnen Themenbereiche bezogenen Arbeiten werden für alle Standortgebiete Explorationskonzepte ausgearbeitet. Die Explorationsziele umfassen die Erhebung von Informationen zur Geometrie (Tiefenlage, Mächtigkeit, gebietsbegrenzende und anordnungsbestimmende geologische Elemente), den Gesteinseigenschaften und Zustandsparameter. Die Explorationskonzepte bilden die Basis für die Erarbeitung von Sondiergesuchen für die in SGT Etappe 2 für die weiteren Untersuchungen vorgeschlagenen Standorte.

Neben den erdwissenschaftlichen Abklärungen und Untersuchungen sind auch weitere Untersuchungen in Arbeit bzw. geplant, die eine Vertiefung der Unterlagen zu verschiedenen technischen Aspekten zum Ziel haben. Dazu gehören insbesondere Abklärungen und Untersuchungen zum Inventar der radioaktiven Abfälle und Materialien (insbesondere Präzisierung der Inventare spezifischer MIF-Abfälle und neuer Kernkraftwerke, Möglichkeiten zur Reduktion der gasbildenden Materialien (Organika, Metalle)), zu den Eigenschaften der radioaktiven Abfälle (Konditionierungs-/Verpackungsmaterialien, Auflösungsraten, Gasbildungsraten), zu geochemischen Prozessen und Parametern (insbesondere Löslichkeitslimitierung, Sorption, Diffusion), zu Aspekten der Anlagenplanung (Lagerkonzept, Auslegung der Lagerkammern und Zugangsbauwerke), zu lagerbedingten Einflüssen (Gas, Auflockerungszone, pH-Fahne, Temperatur) und zur Biosphäre (Spektrum der Klima- und Geomorphologie-Typen). Dabei wird insbesondere den Aspekten bezüglich Gas spezielle Aufmerksamkeit geschenkt: Neben der Prüfung der Möglichkeiten zur Reduktion der Gasbildung werden auch spezifische Aspekte der Lagerauslegung geprüft. Dazu gehört auch ein grossskaliger Versiegelungsversuch im Felslabor Grimsel zur Überprüfung der Gasfreisetzung über die Versiegelungsbauwerke ('Gas permeable seal test', GAST).

Die neben den erdwissenschaftlichen Abklärungen durchgeführten Untersuchungen sind Bestandteil des laufenden Forschungs- und Entwicklungsprogramms der Nagra im Hinblick auf die weiteren Schritte bei der Lagerimplementierung (Nagra 2009b, 2008j). Für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 werden die Erkenntnisse aus diesen Forschungsarbeiten berücksichtigt. Diese Arbeiten werden mit Ausnahme der Arbeiten zur Anlagenplanung (Kap. 8.6) im vorliegenden Kapitel nicht weiter diskutiert, da sie für die Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen nur indirekt relevant sind.

Mit den in diesem Kapitel aufgeführten Arbeiten werden die für SGT Etappe 2 relevanten Gebiete abgedeckt, wo durch diese Arbeiten eine Überprüfung der bestehenden Informationsbasis erfolgt und/oder die Informationsbasis konsolidiert, verfeinert oder erweitert werden soll. Aus Sicht der Nagra wird damit ein Kenntnisstand erreicht, welcher in Etappe 2 für alle Standortgebiete die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalysen und eine Beurteilung der technischen Machbarkeit erlaubt und der für den sicherheitstechnischen Vergleich geeignet ist.

8.2 Geometrie und Strukturen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, Informationen zu Nutzungskonflikten und ausgewählten Zustandsparametern

Mit den für SGT Etappe 2 begonnenen bzw. geplanten Arbeiten werden im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen, die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit und den sicherheitstechnischen Vergleich folgende Themen vertieft bearbeitet:

- Tiefenlage und Mächtigkeit der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (PG-1, PG-3, PG-5, PB-1)
- Erwartete Frequenz und typische Streichrichtungen von anordnungsbestimmenden Störungszonen (PB-2, PB-3, PB-4)
- Verteilung und Geometrie von glazial übertieften Felsrinnen (PG-2)
- Informationen zu Nutzungskonflikten (PG-32, PG-33, PG-34)
- Informationen bezüglich Temperatur- und Gebirgsspannungsverhältnissen (PB-5 und PB-6)

Im Folgenden werden die bereits begonnenen bzw. die geplanten Arbeiten für SGT Etappe 2 aufgelistet und kurz beschrieben in Bezug auf die oben aufgeführten Themenkomplexe.

Tiefenlage und Mächtigkeit der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche

Die geologischen Schichtmodelle werden überprüft und nach Bedarf überarbeitet, wobei einerseits zusätzliche Bohrungsdaten (v.a. neue EWS-Bohrungen, zusätzliche Bohrungs- und Aufschlussinformationen aus dem süddeutschen Raum, sowie weitere Bohrungen Dritter) und ein vollständig neu reprozessierter Seismikdatensatz verwendet werden. Die Modellierung der Schichtgrenzen erfolgt neu unter Einbezug einer 3D-Modellierungssoftware, wobei auch die kinematische Plausibilität überprüft wird.

Die teils im Auftrag der Nagra, teils im Auftrag der Erdölindustrie durch verschiedene Firmen mit unterschiedlichen Parametern und Methoden aufgenommenen und prozessierten Seismikdaten der Nordschweiz werden als Ganzes reprozessiert, wodurch ein deutlich homogenerer Datensatz entsteht. Vor allem bei den Daten aus den 70er und 80er Jahren kann durch heutige Prozessierungsmethoden und Computerleistungen die Abbildbarkeit des Untergrunds verbessert

werden, insbesondere werden die verzerrenden Effekte aufgrund der niedrigen Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten in den oberflächennahen Lockergesteinen stark vermindert. Zudem können durch den einheitlichen Ansatz Ungewissheiten am Übergang zwischen Seismik-Kampagnen verschiedenen Alters reduziert werden. Daneben wird mit einem verfeinerten Geschwindigkeitsmodell gearbeitet, welches neben den Bohrungsinformationen über tomographische Methoden auch Geschwindigkeitsinformationen aus den seismischen Daten selbst berücksichtigt. Weiter ist geplant, für die HAA-Gebiete in der Region Bözberg – Nördlich Lägeren für Etappe 2 ein Netz von zusätzlichen 2D-Seismiklinien zu messen. Die Messungen dienen dazu, für das HAA-Lager die regionale tektonische Situation detaillierter zu erfassen im Hinblick auf die Bewertung der Langzeitentwicklung über den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren. Die Messungen werden dazu beitragen, die Strukturen detaillierter zu erfassen im Hinblick auf die Bewertung geometrischer Aspekte für die Anordnung der HAA-Lagerstollen. Weiter werden die Messungen auch verwendet zur Planung und Fokussierung der geplanten 3D-Seismik.

Es wird demzufolge erwartet, dass die Ungewissheiten betreffend Tiefenlage und Mächtigkeit der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche in der Nordschweiz reduziert werden können.

Im Standortgebiet Wellenberg sind seit der Konstruktion der geologischen Profilserie (Nagra 1997) weitere Forschungsarbeiten zur Tektonik des Helvetikums durchgeführt worden, welche demnächst in Form einer Tektonischen Karte im Massstab 1:100'000 mit Erläuterungen und Profilschnitten von der Landesgeologie veröffentlicht werden (Pfiffner et al. 2010). Es ist geplant, die Profilserie aus Nagra (1997) zu überarbeiten, sodass sie mit den neuesten Erkenntnissen konsistent ist. Anschliessend wird auch das geologische 3D-Modell des Wellenbergs überarbeitet, welches im Rahmen von Etappe 1 des SGT erstellt wurde (Kuhn 2009). Weil die bestehenden Profile auf Ergebnissen von 7 Sondierbohrungen und detaillierten Aufschlusskartierungen beruhen, wird erwartet, dass die neu konstruierten Profile keinen signifikanten Einfluss auf das Wirtgesteinsvolumen im Tiefenbereich haben, der für die Platzierung eines Lagers in Frage kommt.

Erwartete Frequenz und typische Streichrichtungen von anordnungsbestimmenden Störungszonen

Es wird eine Lineamentauswertung und strukturgeologische Beurteilung verschiedenster Fernerkundungsdaten (von Helikoptern, Flugzeugen oder Satelliten aufgenommene optische Daten, Radar- und Laserdaten sowie daraus resultierende hochauflösende digitale Höhenmodelle) durchgeführt. Durch eine Analyse eines weit über die Standortgebiete hinausreichenden Gebiets sollen typische Frequenzen und Richtungen von Störungszonen und deren regionale Unterschiede erfasst werden (u.a. Input für Modelle der Verbreitung von anordnungsbestimmenden Störungszonen). In der Umgebung der Standortgebiete sollen die Ausdehnung von kartierten regionalen Störungszonen überprüft und Hinweise auf anordnungsbestimmende Störungszonen gesammelt werden.

Die Interpretation der reprozessierten seismischen Daten (Kartierung von Störungen und Markerhorizonten) wird erlauben, die Ausdehnung und interne Struktur von grösseren Störungszonen besser zu beurteilen, die vor allem für die Beurteilung der Anordnung der BE/HAA-Lagerstollen von Bedeutung sind. Dazu wird auch die geplante 2D-Seismik in der Region Bözberg – Nördlich Lägeren beitragen. Ausgehend von der Interpretation der relevanten seismischen Linien werden systematische kinematische Bilanzierungen durchgeführt. Durch Retrodeformation von Profilschnitten (2D) und geologischen Modellen (3D) können diese auf ihre kinematische Plausibilität geprüft werden. Dies erlaubt ein besseres Verständnis der dreidimen-

sionalen Geometrie einzelner Strukturen bzw. eines ganzen Gebiets. In einem ersten Schritt wird eine Retrodeformation der geologischen Profile im Fernschubbereich (Faltenjura, Subjurassische Zone, Vorfaltenzone) durchgeführt. Dies soll zu einem besseren Verständnis der regionalen Störungszonen und ihrer Geometrie führen. Zusätzlich können so auch Hinweise auf Deformation und entsprechende Störungen zwischen zwei vorhandenen Seismikprofilen gewonnen werden (z.B. wenn die strukturelle Situation oder die Verkürzung zwischen zwei Profilen auf relativ kurzer Distanz ändern). Im Anschluss an die Bilanzierung einer Serie von 2D-Schnitten wird eine 3D-Retrodeformaton in Betracht gezogen. Dies hilft, komplexere Strukturen mit Bewegungen besser zu verstehen, welche nicht strikt parallel zu Profilrichtungen laufen.

Schliesslich werden Aufschlüsse in und um die Standortgebiete systematisch begangen, strukturgeologisch aufgenommen und systematisch dokumentiert (Orientierung von Schichten und Störungsflächen sowie Bewegungsindikatoren, wie Striemungen und Harnische). Durch die Integration der obgenannten Arbeiten wird einerseits eine Verbesserung des Verständnisses der Deformationsgeschichte der Nordschweiz erwartet. Andererseits werden die Daten verbesserte Unterlagen bzgl. der erwartenden Frequenzen, Richtungen und z.T. die ungefähre Lage von anordnungsbestimmenden Störungszonen liefern.

Verteilung und Geometrie von glazial übertieften Felsrinnen

Basis für die geplante Überarbeitung des Höhenmodells der Felsoberfläche sind die ergänzte Bohrungsdatenbank (vgl. oben), die reprozessierten und die neu erhobenen Seismikdaten sowie ein ergänzter und neu reprozessierter Gravimetriedatensatz für die Nordschweiz und Süddeutschland.

Mit der Anwendung der neuen Seismik-Prozessierungsmethoden wurde eine deutliche Verbesserung in der Abbildung von Felsrinnen mit Lockergesteinsfüllungen erzielt. Deshalb wird auf der reprozessierten 3D-Seismik des Standortgebiets Zürich Nord-Ost die Felsoberfläche direkt kartiert, wodurch ein höher auflösendes Modell der Felsoberfläche erzeugt werden kann.

Gravimetriedaten geben einen Einblick über die Dichteverteilung der Gesteine im Untergrund. Vom Vorland in Richtung Alpen herrscht ein genereller Trend mit zunehmend geringeren Schwerewerten vor (aufgrund der tiefreichenden Gebirgskruste unter den Alpen, welche im Vergleich zum Erdmantel eine geringere Dichte aufweist). Ein Abweichen von diesem generellen Trend kann auf Dichteanomalien im untiefen Erduntergrund hinweisen. Da die Quartärtäler mit vergleichsweise weniger dichtem Material aufgefüllt sind als das Umgebungsgestein, kommen diese in den Gravimetriedaten deutlich zum Ausdruck. Bereits durchgeführt ist die Vereinheitlichung der Messpunktdichte in der Nordschweiz und in Süddeutschland sowie die Neuprozessierung der Daten. Dieser Datensatz wird nun zusammen mit den anderen Datensätzen zur Überarbeitung des Modells der Felsoberfläche verwendet. Durch eine weitere lokale Verdichtung des Messnetzes (Mikrogravimetrie) lassen sich bei Bedarf mittelfristig (SGT Etappe 3) – vor allem in Kombination mit einer hochauflösenden Seismik – noch präzisere Informationen zur Lage der übertieften Felsrinnen gewinnen.

Zusätzlich sollen nach Möglichkeit verschiedene Felsrinnen erbohrt und die Talfüllungen charakterisiert und datiert werden (vgl. dazu Kap. 8.5). Diese Arbeiten werden nach Möglichkeit in SGT Etappe 2 gestartet und in Etappe 3 weitergeführt.

Überprüfung der Informationen zu Nutzungskonflikten

Im Hinblick auf zukünftige Nutzungskonflikte wird im Rahmen einer integrierten Interpretation der Gravimetriedaten (vgl. oben) und der reprozessierten Seismikdaten (vgl. oben) die bestehende Karte der Verteilung der Permokarbontröge überprüft und gegebenenfalls überarbeitet. Die Verteilung der Tröge und ihrer Randzonen ist im Hinblick auf das Potenzial bezüglich Geothermie- und Kohlenwasserstoffressourcen relevant und fliesst in die entsprechenden qualitativen Bewertungen ein.

Weiter wird evaluiert, welche Auswirkungen allfällige Steinbrüche auf das Wirtgestein bzw. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich haben können (z.B. Kalkmergel-Abbau (Effinger Schichten) im Standortgebiet Bözberg).

Verfeinerung der Kenntnisse bezüglich Temperatur- und Gebirgsspannungsverhältnisse

Bezüglich Gebirgsspannungsverhältnisse in der Nordschweiz werden für SGT Etappe 2 die verfügbaren Daten neu kompiliert, wobei bis jetzt nicht berücksichtigte und neue Daten integriert werden. Wo dies noch nicht geschehen ist oder wo Verbesserungspotenzial besteht, werden die Bohrlochrandausbrüche neu ausgewertet. Die revidierte und ergänzte Datenbasis wird in die existierende Datenbank der World Stress Map integriert und zusammen mit den Daten aus der Seismologie (Herdflächenlösungen) und Geodäsie (GPS-Messungen) diskutiert. Diese Resultate werden einerseits zur Beurteilung der Gebirgsspannungsverhältnisse in den potenziellen Lagerperimetern und anderseits zur Beurteilung der neotektonischen Situation benutzt. Mittelfristig (d.h. für Etappe 3 des SGT) ist geplant, basierend auf der überprüften und erweiterten Datenbasis bezüglich Gebirgsspannungen und den geologischen 3D-Modellen regionale Spannungsmodellierungen durchzuführen.

Bezüglich der Temperaturverhältnisse wird der Datensatz von Schärli & Rybach (2002) mit den seither erhobenen Temperaturdaten ergänzt. Die geothermischen Gradienten in den in Tab. 4.2-2 aufgeführten Bohrungen werden zusammen mit den übrigen Temperaturmessungen verwendet, um die zu erwartenden Temperaturen in den Wirtgesteinen der Standortgebiete in der Nordschweiz abzuleiten. Zudem fliessen die Resultate in die qualitative Bewertung des Potenzials bezüglich der geothermischen Ressourcen ein.

8.3 Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Mit den für SGT Etappe 2 begonnenen bzw. geplanten Arbeiten werden im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen, die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit und den sicherheitstechnischen Vergleich folgende Themen vertieft bearbeitet:

- Lithofazies der Wirtgesteine und der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (Häufigkeit und Korrelierbarkeit von Kalkbank- und Sandkalkabfolgen) (PG-11)
- Art und Ausbildung der Transportpfade in den Wirtgesteinen (konzeptuelle Modelle der wasserführenden Systeme) (PG-9)
- Mineralogie und Porosimetrie der Wirtgesteine (inkl. sedimentäre Architekturelemente) (PG-10, PG-15)
- Porenwässer der Wirtgesteine (Definition von Referenzporenwässern) (PG-15, PG-16, PG-17, PG-18)

- Transportparameter der Wirtgesteine (Hydraulische Durchlässigkeit, Transmissivität von Störungen, Selbstabdichtung, Diffusion, Sorption) (PG-6, PG-7, PG-11, PG-12, PG-14, PG-15, PG-16, PG-17, PG-18, PG-19, PG-20, PG-21, PG-22, PI-4, PI-5, PI-6)
- Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation (Profile natürlicher Tracer) (PI-4)
- Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften (PB-7)

Zur Vertiefung des Kenntnisstands erfolgen für SGT Etappe 2 Laboruntersuchungen an existierenden Bohrkernen, Analysen von existierenden Datensätzen, Felduntersuchungen an Aufschlüssen und geochemische Modellierungen. Durch eine Beteiligung an Bohrungen Dritter werden auch geologische, mineralogische, geochemische und felsmechanische Untersuchungen an neuen Bohrkernen sowie hydraulische Tests und bohrlochgeophysikalisches Logging durchgeführt. Die Schwerpunkte der Arbeiten liegen bei den im Rahmen von SGT Etappe 1 neu vorgeschlagenen Wirtgesteinen 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten. Was den Opalinuston betrifft, soll die Datenlage bezüglich der geologischen Standortgebiete Nördlich Lägeren, Bözberg und Jura-Südfuss durch ergänzende Untersuchungen an verfügbaren Bohrkernen verbessert werden; aufgrund der langjährigen Forschungstätigkeit (insbesondere auch im Felslabor Mont Terri) und in Anbetracht der geringen lateralen Variation von Fazies und Lithologie (Nagra 2008c) ist der Kenntnisstand jedoch schon heute gut. Die Mergel-Formationen des Helvetikums wurden im Standortgebiet Wellenberg bereits in den neunziger Jahren intensiv untersucht, so dass hier der Kenntnisstand nur noch geringfügig verbessert werden muss (siehe unten).

Lithofazies der Wirtgesteine und der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (Häufigkeit und Korrelierbarkeit von Kalkbank- und/oder Sandkalkabfolgen)

Dort, wo durch Bohrungen Dritter potenzielle Wirt- und/oder Rahmengesteine angefahren werden, soll nach Möglichkeit eine detaillierte Aufnahme der Daten (Cuttings) unterstützt und je nach Relevanz und Möglichkeiten auch Zusatzuntersuchungen durchgeführt werden, insbesondere bohrlochgeophysikalische Messungen. Diese Daten erlauben, Kalkbank- und Sandkalkabfolgen innerhalb der Wirt- bzw. Rahmengesteine zuverlässiger zu erkennen, deren Durchgängigkeit zwischen verschiedenen Bohrungen zu prüfen und allfällige laterale Fazies- und Mächtigkeitsänderungen besser zu charakterisieren und einzugrenzen. Die Fernerkundungsdaten (insbesondere von hochauflösenden Höhenmodellen) werden im Hinblick auf herauswitternde kompetente Lagen (insbesondere Kalkbank- oder Sandkalkabfolgen) und deren laterale Kontinuität analysiert. Schliesslich werden die reprozessierten seismischen Daten (vgl. oben) im Hinblick auf auffällige Wechsel der seismischen Fazies untersucht und zusammen mit den Fernerkundungsdaten und den geophysikalischen Bohrlochmessungen im Hinblick auf laterale Änderungen der Lithofazies analysiert.

Art und Ausbildung der Transportpfade in den Wirtgesteinen

Die Art und Ausbildung der Transportpfade im 'Braunen Dogger' und in den Effinger Schichten wird durch lithologisch-strukturelle Detailkartierungen von Aufschlüssen sowie Laboranalysen von Handstücken aus diesen Aufschlüssen studiert. Im 'Braunen Dogger' liegen die besten Aufschlüsse in Süddeutschland, bei den Effinger Schichten sind es Steinbrüche der Zementindustrie im Gebiet Jura-Südfuss und im Tafeljura (s.l.). Für die Entwicklung der konzeptuellen Modelle der wasserführenden Systeme, insbesondere auch für die grossräumige Korrelation der sedimentären Architekturelemente werden auch Informationen aus den Tiefbohrungen in der Nordschweiz, aus Bohrungen Dritter (bisherige EWS-Bohrungen Oftringen und Küttigen, neue Sondierbohrung Gösgen, neue EWS-Bohrungen wie z.B. in Aarau, neue Geothermiebohrung Schlattingen), aus der Fernerkundung (siehe oben) sowie aus stratigraphisch-sedimentologisch ausgerichteten Publikationen mit einbezogen.

Die Charakterisierung der Transportpfade im Opalinuston basiert im Wesentlichen auf den Arbeiten zum Entsorgungsnachweis (Nagra 2002a). Für die konzeptuellen Modelle werden aber zusätzlich noch ergänzende Informationen aus Aufschlussbeobachtungen sowie neue Erkenntnisse aus dem Mont Terri-Projekt berücksichtigt. Die Charakterisierung der wasserführenden Systeme in den Mergel-Formationen des Helvetikums am Wellenberg ist so detailliert, dass keine weiteren Arbeiten notwendig sind.

Mineralogie und Porosimetrie der Wirtgesteine (inkl. sedimentäre Architekturelemente)

Mineralogie: Mit den verfügbaren Bohrkernen aus früheren Nagra-Bohrungen wird der mineralogische Datensatz der Wirtgesteine 'Brauner Dogger' (Bohrungen Weiach und Benken), Opalinuston (Riniken, Schafisheim, Weiach) und Effinger Schichten (Weiach) verbessert. Bezüglich der Effinger Schichten ermöglicht der Zugang zu Bohrkernen einer Bohrung bei Gösgen, welche aus dem geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss selbst stammen, den Datensatz zu ergänzen. Aus der neuen Geothermiebohrung Schlattingen werden Bohrkerne der Abfolge 'Brauner Dogger' – Opalinuston für Laboruntersuchungen zur Verfügung stehen.

Porosimetrie: In tonreichen Gesteinen werden verschiedene Arten von Porositäten unterschieden, typischerweise werden für die Quantifizierung frische, konditionierte Proben benötigt. Als Grundlage für die Berechnung der physikalischen Porosität dienen Korn- und Gesteinsdichten, sie werden versuchsweise in den Proben der oben erwähnten Bohrungen analysiert und zur Prüfung der Plausibilität mit früheren Analysen verglichen. Zwei konditionierte Kerne der Effinger Schichten (Bohrung Gösgen) dienen zudem der Bestimmung der Porosität über den Wasserverlust und mittels der Methode des diffusiven Austauschs. In Tongesteinen ist nicht der gesamte Porenraum für Anionen zugänglich, im Opalinuston ist wegen den negativ geladenen Oberflächen der Tonminerale nur rund die Hälfte zugänglich. Bei den Effinger Schichten liegt erst ein überraschend tiefer Wert einer kalkreichen Probe der Bohrung Oftringen vor. Mittels eines Kerninfiltrationsexperiments einer Probe aus Gösgen soll nun Porenwasser beprobt werden und darauf basierend die Anionen-zugängliche Porosität berechnet werden.

Die mikroskopische Beschreibung der Porosität des Opalinustons (insbesondere die räumliche Verteilung und Verbundenheit der Poren) und allenfalls weiterer potenzieller Wirtgesteine erfolgt im Rahmen von zwei mehrjährigen Forschungsprojekten (RWTH Aachen und EMPA). Diese Arbeiten, welche Porenräume von der µm- bis zur nm-Skala analysieren, sollen das Verständnis von Transportprozessen für Wasser und Gas verbessern. Für SGT Etappe 2 werden allerdings nur erste Ergebnisse der laufenden Arbeiten berücksichtigt werden können.

Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation (Profile natürlicher Tracer)

Verschiedene Labormethoden werden eingesetzt, um die Zusammensetzung des Porenwassers einzugrenzen. Die Gehalte an Chlorid und Bromid im Gestein werden durch Austrocknung und Oxidation nicht verändert und können deshalb auch an den alten Bohrkernen der Bohrungen Weiach, Benken, Schafisheim und Riniken bestimmt werden. Inwieweit belastbare Porositäten als Grundlage für die Umrechnung in Porenwasserkonzentrationen bestimmt werden können, ist in Abklärung (siehe oben). Bezüglich des Porenwassers der Effinger Schichten sind neben der Bestimmung der Chloridgehalte umfassendere Untersuchungen an zwei konditionierten Kernen der Bohrung Gösgen möglich: Hier werden die stabilen Isotope von Wasser, die Hauptelemente in den wässerigen Auszügen und die Kationenaustauschkapazität bestimmt. Zusätzlich wird der Porenwasserchemismus im Rahmen eines Kerninfiltrationsexperiments bestimmt. Betreffend Wellenberg ist ein Bericht über natürliche Tracerprofile (Chlorid) in Vorbereitung.

Referenzporenwässer der Wirtgesteine

Im Rahmen der laufenden geochemischen Forschungsarbeiten, insbesondere im Felslabor Mont Terri und im Felslabor Meuse / Haute Marne der Andra, wurden der methodische Ansatz zur Modellierung und auch der Kenntnisstand des Porenwassers in Tongesteinen in den vergangenen Jahren weiter entwickelt. Im Auftrag der Nagra wird zudem ein 'State-of-the-Art' Bericht zur geochemischen Modellierung von Porenwasser in Tongesteinen erstellt. Weil die Zusammensetzung der Referenzporenwässer als Grundlage für Diffusions- und Sorptionsexperimente und für die Erstellung der Sorptionsdatenbasis benötigt wird, mussten diese Arbeiten vorgezogen werden. Basierend auf den erwähnten neuen Ansätzen wurden für alle Wirtgesteine Referenzporenwässer mittels geochemischer Gleichgewichtsmodelle unter Einbezug der experimentellen Daten hergeleitet (Mäder 2009a, b und 2010). Zur Abdeckung der Ungewissheiten werden jeweils verschiedene Szenarien modelliert, beispielsweise sollen bezüglich des Opalinustons auch hohe Salinitäten berücksichtigt werden, wie sie im Mont Russelin-Tunnel angetroffen wurden und in den tieferen Bereichen der Standortgebiete erwartet werden.

Transportparameter der Wirtgesteine (Hydraulische Durchlässigkeit, Transmissivität von Störungen, Selbstabdichtung, Diffusion, Sorption)

Hydraulische Durchlässigkeit, Transmissivität von Störungen, Selbstabdichtung: Der existierende Datensatz zur grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit und der Transmissivität von Störungen wurde für die Testrechnungen neu evaluiert (Kap. 4.3.2). Zur Berücksichtigung möglicher Ungewissheiten wurde nicht nur auf gemessene Werte zurückgegriffen, sondern die Bandbreiten wurden in Abhängigkeit des lithologischen Aufbaus erweitert. Dasselbe Verfahren wird für die provisorischen Sicherheitsanalysen der Etappe 2 angewendet. Es wird angestrebt, weitere Messwerte aus Bohrungen Dritter sowie semi-quantitative Angaben über Wasserzuflüsse in EWS-Bohrungen zu gewinnen; zudem werden betreffend Mergel-Formationen des Helvetikums neue Berichte von Untertagebauten im Hinblick auf eventuelle Abweichungen analysiert (Bahntunnel Engelberg, Lötschberg-Basistunnel). Es wird aber nicht erwartet, dass dadurch die relativ gross gewählten Bandbreiten signifikant verändert werden. Am wahrscheinlichsten wird eine bessere Abstützung der Referenzwerte erreicht. Zudem soll das Verständnis des Selbstabdichtungsvermögens von tonreichen Gesteinen durch einen Bericht, in welchem die Erfahrungen der Kohlenwasserstoffindustrie dargestellt sind, weiter konsolidiert werden.

Weiterentwicklung der Sorptionsdatenbasen: Im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 wird insbesondere das Sorptionsmodell gezielt weiterentwickelt. Nach Spezifizierung der Porenwässer der Wirtgesteine wird der Einfluss der Speziation und der geochemischen Bedingungen in die Berechnung der Sorptionskoeffizienten einfliessen. Das Sorptionsmodell wird künftig auf den in den Wirtgesteinen der Schweiz die Sorption dominierenden Tonmineralen Illit und Montmorillonit basieren. Damit kann spezifischer auf die Zusammensetzung und das Sorptionsvermögen der einzelnen Wirtgesteine eingegangen werden. Um die möglicherweise höheren Ionenstärken der Porenwässer in den Effinger Schichten modellieren zu können, werden SIT-Parameter entsprechend der 'specific interaction theory' (Grenthe et al. 1997) zusammengestellt. Die berechneten Daten werden für alle Wirtgesteine durch Experimente an repräsentativem und gut charakterisiertem Bohrkernmaterial überprüft.

Weiterentwicklung der Diffusionsdatenbasis: Das empirische Diffusionsmodell wird hinsichtlich des Verhaltens bei sehr niedrigen Porositäten durch weitere Messdaten überprüft. Auch hier erfolgt eine Überprüfung der berechneten Werte durch gezielte Experimente an Bohrkernproben aller Wirtgesteine, wobei bei heterogen aufgebauten Wirtgesteinen repräsentative Proben der tonigen und der kalkigen Gesteinsabfolgen verwendet werden. Dabei wird in Abstimmung mit den Sorptionsmessungen das gleiche oder vergleichbares Probenmaterial verwendet.

Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften

Für Etappe 2 ist insbesondere eine Ergänzung des Datensatzes zum 'Braunen Dogger' geplant (vgl. Kap. 4.3.2). Mit der neuen Geothermiebohrung Schlattingen ist vorgesehen, den Datensatz durch Laboruntersuchungen an frischen Bohrkernen zu ergänzen.

8.4 Hydrogeologische Verhältnisse

Mit den für SGT Etappe 2 begonnenen bzw. geplanten Arbeiten werden im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen, die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit und den sicherheitstechnischen Vergleich folgende Themen vertieft bearbeitet:

- Ergänzung der hydrogeologischen Datensätze: Hydrogeologische Einheiten, hydraulische Durchlässigkeiten, hydraulische Potenziale, hydrochemische Datensätze (inkl. Isotope) (PG-8, PG-27, unter Berücksichtigung der in Kap. 8.3 behandelten Aspekte: PG-6, PG-9, PG-10, PG-11, PG-14)
- Hydrogeologische Modelle, mögliche Exfiltrationsorte (PG-8, PG-27, PB-8, PB-10)
- Öl- und Gasmigration in der östlichen Subjurassischen Zone (PB-8)
- Geotechnisch-hydrogeologische Verhältnisse in den zu durchfahrenden Gesteinsformationen (PB-8, PB-10, PB-11)

Für den Themenbereich 'hydrogeologische Verhältnisse' werden für SGT Etappe 2 nur Arbeiten im Gebiet der Nordschweiz durchgeführt; für das Standortgebiet Wellenberg existieren hydrogeologische bzw. hydrodynamische Modelle auf verschiedenen Skalen (Regionalmodell bzw. Lokalmodell[114], Endlagermodell, Kavernenumfeldmodell, vgl. Figur 7.7.2 in Nagra 1997), welche auf einem umfangreichen hydrogeologischen Datensatz basieren und für Etappe 2 ausreichend sind. Somit erübrigen sich dort weitere Arbeiten.

Im Folgenden werden die geplanten Arbeiten in der Nordschweiz beschrieben, gegliedert nach den oben aufgeführten Themenkomplexen.

Hydrogeologische Datensätze: Hydrogeologische Einheiten, hydraulische Durchlässigkeiten, hydraulische Potenziale, hydrochemische Datensätze (inkl. Isotope)

Die Tiefenaquifere in der Nordostschweiz und angrenzenden süddeutschen Gebieten wurden bereits in zahlreichen früheren Arbeiten der Nagra basierend auf hydrogeologischen und hydrochemischen Daten beschrieben (Kap. 4.4.2). Für SGT Etappe 2 wird der Datensatz mit allenfalls neu verfügbaren Messungen und Analysen ergänzt. Zudem werden die Synthesearbeiten und -darstellungen in Richtung Westen auf die Standortgebiete Bözberg und Jura-Südfuss ausgedehnt. Für das Standortgebiet Wellenberg liegen umfassende hydrogeologische und hydrochemische Synthesearbeiten vor. Die hydrochemischen und isotopenhydrogeologischen Daten dienen der Plausibilitätsprüfung der in den hydrogeologischen Modellen dargestellten grossräumigen Grundwasserströmungsverhältnisse (siehe unten).

Für die Situation in Süddeutschland ist ein Datenaustausch und eine Abstimmung mit den geologischen und hydrogeologischen Daten des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB) im Gang (siehe unten).

---

[114] Das sogenannte 'Regionalmodell' des Wellenbergs (Nagra 1997) hat eine Ausdehnung, die ungefähr derjenigen eines Lokalmodells in der Nordschweiz entspricht. Das geplante hydrogeologische Regionalmodell der Nordschweiz wird eine bedeutend grössere Ausdehnung haben.

Hydrogeologische Modelle, Exfiltrationsorte

Zur Beschreibung des Grundwasserflusses im tiefen Untergrund werden konzeptuelle[115] und numerische hydrogeologische Modelle in verschiedenen Massstäben erstellt. Diese Arbeiten werden in SGT Etappe 2 begonnen und in Etappe 3 weitergeführt und verfeinert. Für SGT Etappe 2 werden erst einzelne Aspekte mit numerischen Methoden analysiert. Das Schwergewicht liegt auf den Arbeiten, welche zur Eingrenzung der Parameterbandbreiten für die provisorischen Sicherheitsanalysen beitragen.

Zur Beschreibung der grossräumigen Grundwasserströmung in den relevanten Tiefenaquiferen wird ein hydrogeologisches Regionalmodell erstellt, dessen Geometrie auf dem geologischen Modell der Nagra, ergänzt mit Daten des LGRB basieren wird. Dieses Modell wird die folgenden Produkte liefern:

- Visualisierung der Fliesspfade
- Grobe Beschreibung der Freisetzungspfade
- Hydraulische Gradienten (Potenzialkarten)
- Eingrenzung der hydrogeologischen Bedeutung von regionalen Störungszonen mittels Betrachtung verschiedener Szenarien
- Konsistenzprüfung mit den verfügbaren hydrochemischen und hydrogeologischen Daten
- Randbedingungen für lokale Modelle

Für höher auflösende Darstellungen des Grundwasserflusses werden zusätzlich lokale hydrogeologische Modelle erstellt (mit Ausnahme des Wellenbergs, wo solche bereits existieren), und es werden Studien in noch kleinerem Massstab durchgeführt (Lagerumfeldmodelle, Wirtgesteinsmodelle). Die hydrogeologischen Einheiten jedes Standortgebiets werden basierend auf den geologischen Referenzprofilen und hydrogeologischen Kenntnissen definiert. Die relevanten Exfiltrationspfade werden basierend auf den verfügbaren Unterlagen (Karten, Berichte, Daten) charakterisiert.

Öl- und Gasmigration in der östlichen Subjurassischen Zone

In der östlichen Subjurassischen Zone sind aus der Literatur und seit einigen Jahren auch aus zahlreichen Erdwärmesondenbohrungen Öl- und Gasanzeichen bekannt. Weil die Maturität der potenziellen Muttergesteine in diesem Gebiet noch unterhalb des Ölfensters liegt (Greber et al. 2004), ist eine Migration der Kohlenwasserstoffe aus dem Molassebecken wahrscheinlich. Für SGT Etappe 2 ist vorgesehen, die Daten zu kompilieren, Ölproben nach modernsten Methoden (Biomarker) zu analysieren und allenfalls vorhandene Beziehungen zu den tektonischen Gegebenheiten aufzuzeigen (Hinweise auf mögliche Transportwege der Kohlenwasserstoffe).

Geotechnisch-hydrogeologische Verhältnisse in den zu durchfahrenden Gesteinsformationen

Basierend auf den Erfahrungen in Untertagebauwerken der Nordschweiz und den hydrogeologischen Kenntnissen erfolgt eine geotechnische Beschreibung der für die Zugangsbauwerke relevanten Lithologien.

---

[115] Graphische Darstellungen des Grundwasserflusses anhand von Isopotenziallinien bzw. Fliessrichtungen.

Nutzungskonflikte mit bestehenden Mineral- und Thermalwässer werden identifiziert und geeignete, robuste Konzepte für deren Schutz erarbeitet. Diese umfassen angepasste Linienführungen und allenfalls eine Beschreibung von möglichen technischen Massnahmen.

8.5 Geologische Langzeitentwicklung

Mit den für SGT Etappe 2 begonnenen bzw. geplanten Arbeiten werden im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen, die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit und den sicherheitstechnischen Vergleich folgende Themen vertieft bearbeitet.

- Zeitliche Entwicklung der regionalen Erosionsbasis und der lokalen Topographie (PG-4, PG-28)
- Glazial übertiefte Felsrinnen (PG-2)
- Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung (PG-30)
- Geodynamische und neotektonische Aktivität (PI-2)

Dabei geht es um die Erhebung bzw. Ergänzung von Grundlagendaten, die Verbesserung des Prozessverständnisses (z.B. durch Prozess-Modellierungen) und schliesslich die Erarbeitung von standortspezifischen Szenarien, welche in die Sicherheitsanalyse einfliessen und einen Einfluss auf die Anordnung der Lagerkammern haben können. Einige der Arbeiten sind als mehrjährige Forschungsprojekte konzipiert mit Zielhorizont SGT Etappe 3 (Erarbeitung Rahmenbewilligungsgesuche). Für SGT Etappe 2 werden jedoch die Zwischenergebnisse aus diesen Studien berücksichtigt.

Im Folgenden werden die bereits begonnenen bzw. die geplanten Arbeiten aufgelistet, kurz beschrieben und ein Bezug zu den oben aufgeführten Themenkomplexen gegeben.

Zeitliche Entwicklung der regionalen Erosionsbasis und der lokalen Topographie

Die Deckenschotter der Nordschweiz bzw. deren Verteilung, Höhenlage und Alter sind ein zentraler Datensatz, um die Entwicklung der Erosionsbasis während der letzten ca. 2 Millionen Jahre zu bestimmen und Szenarien für die Zukunft abzuleiten. Für SGT Etappe 2 werden die vorhandenen Informationen zur Verteilung und Höhenlage der Deckenschotter neu in einem geographischen Informationssystem kompiliert und bezüglich ihrer Höhenlage ausgewertet. Arbeiten zur verfeinerten Datierung dieser Einheiten mit verschiedenen Methoden sollen verfolgt und unterstützt werden. In diesem Zusammenhang wird auch das Potenzial von speleologischen Untersuchungen (z.B. Datierung von Höhlenablagerungen) im Hinblick auf die Rekonstruktion der Taleintiefungsgeschichte der Nordschweiz geprüft.

Das Wissen der Versenkungs- und Erosionsgeschichte über die letzten 5 – 10 Millionen Jahre und die Zeit davor, soll, falls sich die Möglichkeit ergibt, durch Probennahme aus Drittbohrungen überprüft und konsolidiert werden.

Geodätische Messungen werden seit längerem für die Beurteilung der rezenten Krustenbewegungen mit einbezogen. Die Präzisionsnivellement-Daten werden für SGT Etappe 2 konsolidiert, wobei die seit der letzten Auswertung erfolgten Messkampagnen berücksichtigt werden. Mittelfristig (voraussichtlich erst nach Abschluss von Etappe 2) können die Nivellement-Daten mit einem unabhängigen geodätischen Datensatz, demjenigen des permanenten GPS-Netzes der Nordschweiz, verglichen werden (vgl. Abschnitt 'Geodynamische und neotektonische Aktivität').

Das HAA-Standortgebiet mit der geringsten Gesteinsüberdeckung der potenziellen Lagerperimeter im Untergrund und dem grössten Potenzial für den Abtrag der bestehenden lokalen Topographie ist der Bözberg. Aus diesem Grund hat die Nagra eine spezielle Studie im Hinblick auf die Abschätzung des Einflusses der lokalen Erosion in diesem Gebiet geplant. In einem ersten Schritt wurde eine Review der vorhandenen Modellvorstellungen und Modellierungsansätze durchgeführt (Becker 2010). Es ist geplant, mit numerischen Modellen die Landschaftsentwicklung im Standortgebiet Bözberg zu untersuchen, um verbesserte Szenarien zur langfristigen Erosion zu erhalten.

Weil die Erosionsraten in den Alpen bedeutend höher sind als in der Nordschweiz, wurde für das SMA-Standortgebiet Wellenberg bereits früher eine umfangreiche Erosionsstudie durchgeführt (Klemenz 1993). In dieser Studie ist ein sehr breites Spektrum von klimatischen Veränderungen berücksichtigt; für Etappe 2 sind deshalb diesbezüglich keine weiteren Arbeiten vorgesehen.

Glazial übertiefte Felsrinnen

Zur Verbesserung des Prozessverständnisses der glazialen Tiefenerosion, insbesondere der Entstehung glazial übertiefter Felsrinnen, sind breit angelegte, mehrjährige Forschungsarbeiten initiiert und unterstützt worden, die zeitlich über die SGT Etappe 2 hinausreichen. Insbesondere werden Forschungsarbeiten zur Verbesserung des Verständnisses der Vergletscherungsgeschichte und der Entwicklung der Topographie von der Nagra durchgeführt oder unterstützt. Diese Arbeiten und weitere Arbeiten der Nagra betreffen:

- Datierungen von quartären Ablagerungen
- Nachführen der Top-Fels-Karte durch Berücksichtigung zusätzlicher Daten (Bohrungen, Seismik-Reprozessierung, Gravimetrie, vgl. Kap. 8.2)
- Forschungsbohrung in einer übertieften Felsrinne
- Verbesserung des Prozessverständnisses

Weltweit gibt es verschiedene Modellansätze für die Modellierung glazialer Erosionsprozesse, und es finden laufend Neuentwicklungen statt. Durch enge Kontakte mit den spezialisierten Forschungsgruppen wird sichergestellt, dass diese Aspekte – sei es qualitativ oder quantitativ – bei der Beurteilung der glazialen Tiefenerosion berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wurde im April 2010 in der Schweiz ein internationaler Workshop mit eingeladenen Spezialisten durchgeführt. Die wissenschaftliche Dokumentation dieser Veranstaltung ist in Vorbereitung. Darauf basierend ist geplant, in Bezug auf ein verbessertes Prozessverständnis längerfristige Forschungsprojekte zu initiieren bzw. zu unterstützen.

Nach Möglichkeit beteiligt sich die Nagra für SGT Etappe 2 an weiteren Forschungsbohrungen in übertiefte Felsrinnen mit dem primären Ziel, das Alter und die Genese der Talfüllungen und somit auch Hinweise über die Entstehungsgeschichte der Felsrinnen zu gewinnen.

Für SGT Etappe 2 werden Zwischenergebnisse aus dem oben umrissenen Forschungsprogramm präsentiert. Zudem wird pro Standortgebiet eine Beurteilung möglicher Effekte der glazialen Tiefenerosion durchgeführt und Inputparameter für die Sicherheitsanalyse und/oder Konsequenzen für die Anordnung der Lagerkammern abgeleitet.

Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung bzw. im Hinblick auf die Abschätzung der Wasserflüsse bei der Biosphärenmodellierung

Bei der Beurteilung der Entwicklung der regionalen Erosionsbasis, der Entwicklung der lokalen Topographie und der übertieften Felsrinnen müssen auch mögliche zukünftige Klimaentwicklungen innerhalb der Betrachtungszeiträume berücksichtigt werden. Aus diesem Grund ist für SGT Etappe 2 geplant, den diesbezüglichen Stand des Wissens in einem Bericht zu dokumentieren, unter Berücksichtigung der paläoklimatischen Veränderungen im Alpenvorland. Derzeit wird der Bedarf für detaillierte Klimamodellierungen analysiert, wo auch die Bedürfnisse der Biosphärenmodellierung erfasst werden. Falls sich im Rahmen dieser Analyse bzw. im Laufe der Erosionsmodellierungen Bedarf nach weiterführenden Klimamodellierungen ergibt, werden entsprechende Arbeiten initiiert. Die Resultate solcher Studien werden auch bei der Biosphärenmodellierung berücksichtigt.

Geodynamische und neotektonische Aktivität

Die Fernerkundungsdaten (vgl. Kap. 8.2) werden im Hinblick auf Versätze, Verkippungen oder Verfaltungen von jungen Ablagerungen analysiert, wobei das Schwergewicht auf der Auswertung des hochauflösenden digitalen Geländemodells liegt. Bei relevanten Hinweisen sind Feldbegehungen und weiterführende Untersuchungen vorgesehen. Im gleichen Sinn sollen auch das Flussnetz und die Morphologie der Nordschweiz auf Anomalien untersucht werden, welche auf junge tektonische Aktivität hindeuten könnten.

In Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Erdbebendienst (SED) und den Kernkraftwerksprojektanten bzw. -betreibern wird gegenwärtig das Schwachbebennetz in der Nordschweiz verdichtet. Dies wird in Zukunft eine genauere Lokalisierung der Erdbebenherde und eine zuverlässigere Bestimmung von Herdflächenlösungen erlauben. Herdflächenlösungen liefern Hinweise auf das rezente Spannungsfeld und dessen laterale und eventuell auch vertikale Änderungen. Der SED wertet die seismischen Daten periodisch aus und interpretiert sie aus seismotektonischer Sicht (vgl. Referenzen in Kap. 4.1.2). Für SGT Etappe 2 wird ein Statusbericht erstellt, welcher die Erdbebentätigkeit in der Nordschweiz zusammenfasst, analysiert und diskutiert. Zudem wird die Lage von relativ untiefen Erdbeben im Hinblick auf einen Bezug zu von der Oberfläche oder aus der Seismik bekannten Störungen geprüft werden.

GNSS[116]-Messungen erlauben eine Analyse der rezenten Bewegungsraten (horizontal und vertikal) im Hinblick auf neotektonische Bewegungen. Das schweizerische GNSS-System besteht aus einer Kombination von periodischen Einzelmessungen und einigen Permanent-Messstationen. Letztere sind signifikant teurer, liefern aber genauere, belastbarere Daten. Aus diesem Grund hat die Nagra mit dem Bau zusätzlicher GNSS-Permanent-Messstationen in der Nordschweiz begonnen. Dieses Netz soll nach ca. 5 Betriebsjahren die bisherige Datenbasis verbessern und erste Aussagen hinsichtlich rezenter geologischer Deformations- und Hebungsraten in der Nordschweiz bzw. in den vorgeschlagenen Standortgebieten (insbesondere für HAA-Lager) ermöglichen. Für SGT Etappe 2 ist eine Auswertung der Einzelmessungen unter Berücksichtigung der Messkampagne 2010 der swisstopo vorgesehen. Die Ergebnisse werden mit neotektonischen Daten aus anderen Quellen verglichen und im Hinblick auf neotektonische Bewegungen bewertet und analysiert.

[116] Global Navigation Satellite System.

Für SGT Etappe 2 ist eine Neuauswertung der Präzisionsnivellement-Daten unter Einbezug von in den letzten Jahren gemessenen Daten geplant (vgl. oben). Die Ergebnisse werden mit neotektonischen Daten aus anderen Quellen verglichen und im Hinblick auf rezente Krustenbewegungen interpretiert.

Daneben ist mittelfristig geplant, Forschungsprojekte zu initiieren und/oder zu unterstützen, welche die regionalen geodynamischen Aspekte vertieft untersuchen (z.B. Hegau – Bodensee-Graben). Resultate werden im Laufe von SGT Etappe 3 erwartet.

8.6 Arbeiten zur Anlagenplanung

Die für Etappe 2 SGT begonnenen bzw. geplanten Arbeiten zur Anlagenplanung umfassen neben den Arbeiten zur Anordnung der Anlagen an der Oberfläche und deren Ausgestaltung auch Arbeiten zum Lagerkonzept (inkl. Möglichkeiten zur Anordnung der verschiedenen untertägigen Anlagenteile zur optimalen Nutzung der standortspezifischen Bedingungen), zur Auslegung der Anlagenmodule Untertag (insbesondere die Lagerkammern) und zur Erschliessung der untertägigen Lagerfelder. Die Überprüfung des Lagerkonzepts berücksichtigt die Resultate des entsprechenden ENSI-Projekts (vgl. AGNEB 2009), in welches auch die verschiedenen Kommentare der Behörden aus ihren Gutachten zum Entsorgungsnachweis (HSK 2005, KSA 2005) und zu SGT Etappe 1 (KNS 2010) einfliessen. Für die Auslegung der BE/HAA-Lagerkammern werden die Ausbaukonzepte und der Bauvorgang überprüft und konsolidiert. Dabei wird auch der Einfluss der verschiedenen Varianten des Ausbaus auf die Langzeitsicherheit geprüft. Die Erschliessung der Lagerfelder Untertag wird bezüglich der Durchfahrung der oberflächennahen Gesteinsschichten im Rahmen der Anordnung der Empfangsanlagen bearbeitet; für die tieferen Schichten wird die Auslegung und der Bauvorgang bearbeitet, wo insbesondere die Frage von Wasserzutritten / Wassereinbrüchen z.B. bei Karst (inkl. Vorauserkundung) und die möglichen Massnahmen zum Schutz von Mineralquellen und Thermen bearbeitet werden.

9 Schlussfolgerungen

Das Konzept SGT (BFE 2008) definiert die Ziele für Etappe 2 im Gesamtverfahren SGT und enthält die übergeordneten Vorgaben für die Durchführung der dazu notwendigen Arbeiten. Diese Ziele umfassen die Konkretisierung der Projekte bezüglich der Oberflächeninfrastruktur in Zusammenarbeit mit den Standortregionen sowie die sicherheitstechnische Bewertung der Standorte und den sicherheitstechnischen Vergleich. Mit diesem Input sowie den Ergebnissen der sozio-ökonomisch-ökologischen Wirkungsstudien wird die Nagra ihre Vorschläge festlegen bezüglich der in SGT Etappe 3 weiter zu untersuchenden Standorte, für welche dann nochmals weitere Felduntersuchungen durchgeführt werden. Um die Ziele für SGT Etappe 2 zu erreichen, muss der Kenntnisstand über die geologischen Verhältnisse an den Standorten die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalysen erlauben. Deshalb wird als Vorbereitung für die Etappe 2 von den Entsorgungspflichtigen verlangt, dass sie die Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen frühzeitig mit dem ENSI klären. Der vorliegende Bericht der Nagra dokumentiert die entsprechende technisch-wissenschaftliche Beurteilung des Kenntnisstands zur Prüfung durch das ENSI. Das Vorgehen zur Abklärung der Notwendigkeit wurde von der Nagra anhand der behördlichen Vorgaben abgeleitet und anschliessend systematisch umgesetzt. Die wichtigsten Elemente sind:

Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter: Die relevanten Prozesse und Parameter mit Schwerpunkt auf den für die Geologie relevanten Aspekten wurden durch eine Analyse der Sicherheits- und Barrierenkonzepte des HAA- und SMA-Lagers und der diesbezüglich wichtigsten Vorgaben (die sogenannten Sicherheitsfunktionen und Prinzipien) systematisch abgeleitet. Dazu wurden auch die umfangreichen Erfahrungen mit Sicherheitsanalysen in der Schweiz und – so weit relevant – im Ausland berücksichtigt. Die Ableitung nimmt Bezug auf die in SGT Etappe 1 verwendeten Kriterien und Indikatoren. Die identifizierten relevanten Prozesse und Parameter (vgl. Tab. 3.2-1, 34 mit Bezug zur Geologie und Sicherheit, 11 mit Bezug zur Geologie und technischen Machbarkeit, 7 mit Bezug zu den technischen Barrieren bzw. zur Sicherheitsanalyse, 9 für die ausschliessliche Verwendung in der qualitativen Bewertung) decken alle für die Evaluation der Standorte relevanten geologischen Aspekte ab.

Evaluation des Kenntnisstands für die relevanten Prozesse und Parameter: Der Kenntnisstand und die daraus abgeleiteten konzeptuellen Modelle und Parameterwerte (dargestellt als Referenzfall für die erwarteten Bedingungen und Bandbreiten zur Berücksichtigung der Ungewissheiten sowie zur Analyse der Robustheit des Systems) für die Beurteilung der Sicherheit und der technischen Machbarkeit basieren auf einer sorgfältigen Kompilation der vorhandenen Unterlagen zu den in SGT Etappe 1 vorgeschlagenen geologischen Standortgebieten und Wirtgesteinen und zu den für die Beurteilung der Sicherheit relevanten regionalen geologischen Aspekten. Bezüglich Geometrie und Strukturen gibt es für jedes der Standortgebiete umfangreiche Informationen, die in erster Linie aus seismischen Untersuchungen und teilweise auch aus weiteren geophysikalischen Untersuchungen, aus Bohrungen (innerhalb und in der näheren Umgebung der Standortgebiete) und aus der geologischen Kartierung stammen. Für jedes der Wirtgesteine gibt es breite Informationen aus Bohrungen, aus Oberflächenaufschlüssen, teilweise aus Tunnels und für den Opalinuston auch aus einem Felslabor. Weiter können Informationen über ähnliche Gesteine beigezogen werden. Neben den direkt für die Konzeptualisierung bzw. Parametrisierung verwendeten Informationen gibt es für alle Wirtgesteine unabhängige Evidenzen, welche die Qualität der Barrierenwirkung der Wirtgesteine bestätigen. Die für die geologischen Tiefenlager relevanten regionalen hydrogeologischen Verhältnisse, die vor allem durch die regionalen Tiefenaquifere bestimmt werden, sind aus der Literatur und den langjährigen Programmen der Nagra generell gut bekannt. Auch zur Beurteilung der Langzeitentwicklung (Hebung und Erosion, weitere neotektonische Aspekte) liegen aus der Wissenschaft, einschliesslich der entsprechenden Programme der Nagra, breit abgestützte Informationen vor.

Die vorhandenen Unterlagen für die einzelnen Wirtgesteine und geologischen Standortgebiete sind zwar von unterschiedlichem Umfang und Tiefgang, reichen aber für alle Wirtgesteine und in allen Standortgebieten aus, um für die Beurteilung der Sicherheit und der technischen Machbarkeit zuverlässig eine abdeckende Konzeptualisierung und Parametrisierung vorzunehmen. In den Standortgebieten Zürich Nord-Ost und Wellenberg ist die Informationsbasis aufgrund der Erfordernisse früherer Projektmeilensteine (Entsorgungsnachweis bzw. Rahmenbewilligungsgesuch) deutlich breiter als dies für SGT Etappe 2 erforderlich ist. Auch die regionalen Unterlagen zu den hydrogeologischen Verhältnissen und zur Beurteilung der Langzeitentwicklung sind geeignet für die Beurteilung der Sicherheit.

Beurteilung der technischen Machbarkeit: Der Schwerpunkt der Beurteilung der technischen Machbarkeit liegt auf der Beurteilung der Standfestigkeit der Lagerkammern unter Berücksichtigung der gebirgsmechanischen Bedingungen im Wirtgestein, der Beurteilung des Platzangebots innerhalb der verschiedenen Standortgebiete und der Beurteilung der Erschliessung der untertägigen Bauten mit Schacht und/oder Rampe. Dazu wurde ein breites Spektrum von Auslegungsvarianten entwickelt, welches die zuverlässige Erstellung sowie den sicheren Betrieb und Verschluss der Anlage gewährleistet und welches die verschiedenen geologischen Bedingungen in den Standortgebieten abdeckend berücksichtigt. Die Verwendung dieser Auslegungsvarianten für die verschiedenen Standortgebiete zeigt, dass die bautechnische Machbarkeit gegeben ist. Die im Rahmen der Systemanalyse durchgeführten Abklärungen und Berechnungen zeigen, dass die verwendeten Auslegungsvarianten (inkl. Verwendung eines flächendeckenden Ausbaukonzepts bei den BE/HAA-Lagerstollen) auch bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Sicherheit geeignet sind.

Analyse des Systemverhaltens und Testrechnungen: Für die Bewertung der geologischen Informationen zu den relevanten Prozessen und Parametern (dargestellt als Referenzfall für die erwarteten Bedingungen und Bandbreiten zur Berücksichtigung der Ungewissheiten sowie zur Analyse der Robustheit des Systems) wurden Berechnungen zum Systemverhalten und Testrechnungen zum Dosisverlauf durchgeführt. Entsprechend der Breite der Informationen ergibt sich eine grössere Anzahl von Rechenfällen. Die Resultate der Testrechnungen – die auch sehr pessimistische Varianten sowie "What if?"-Fälle umfassen – zeigen, dass anhand der Dosisintervalle trotz der vorhandenen Ungewissheiten eindeutige und belastbare Aussagen zur sicherheitstechnischen Eignung und zur sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit der geologischen Standortgebiete gemäss Methodik des SGT gemacht werden können.

Untersuchungen für SGT Etappe 2: Im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen, die Beurteilung der technischen Machbarkeit und den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 ist ein breites Spektrum an Untersuchungen in Arbeit bzw. geplant. Diese Untersuchungen werden voraussichtlich dazu beitragen, die in diesem Bericht aufgeführten Ungewissheiten und damit die Bandbreiten zumindest teilweise zu reduzieren. Die Arbeiten betreffen die Geometrie (inklusive die Strukturen) der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche sowie Informationen zu Rohstoffvorkommen und Zustandsparametern in den verschiedenen Standortgebieten, die Eigenschaften der Wirtgesteine bzw. der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (inkl. Messungen zur Sorption), die hydrogeologischen Verhältnisse sowie die Langzeitentwicklung. Die seit Einreichung der Unterlagen zu SGT Etappe 1 durchgeführten Arbeiten sowie die geplanten Untersuchungen umfassen ergänzende Felduntersuchungen (Beteiligung an Untersuchungen in neuen Bohrungen Dritter, Seismik, Kartierungen), Auswertungen, Laboruntersuchungen (inkl. Untersuchungen an Kernen aus neuen Bohrungen) und Studien. Zusätzlich zu diesen auf die Geologie orientierten Arbeiten werden zu einem breiten Spektrum von Themen Untersuchungen durchgeführt, welche in die provisorischen Sicherheitsanalysen, die Beurteilung der technischen Machbarkeit und den sicherheitstechnischen Vergleich einfliessen werden. Dazu gehören insbesondere auch die Arbeiten zur Lagerauslegung sowie zur Gasbildung und Gasfreisetzung.

Beurteilung der Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich: Die Analyse des Kenntnisstands bezüglich der relevanten Prozesse und Parameter für die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich zeigt, dass der Kenntnisstand für die Ableitung der notwendigen Unterlagen genügt. Die Abklärungen zur bautechnischen Machbarkeit und die Testrechnungen zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle zeigen für alle Standortgebiete, dass trotz der zur Erfassung der Ungewissheiten bewusst sehr grosszügig gewählten Bandbreiten eindeutige Aussagen gemacht werden können, die sich auch bei einer Reduktion der Bandbreiten nicht ändern. Dies heisst, dass auch verfeinerte Informationen die quantitative sicherheitstechnische Beurteilung der Standortgebiete und die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit nicht ändern. Deshalb sind im Hinblick auf die Prioritätensetzung in SGT Etappe 2 für die Festlegung der in SGT Etappe 3 weiter zu betrachtenden Standorte zusätzlich zu den von der Nagra vorgesehenen Arbeiten keine weiteren Untersuchungen notwendig.

Es ist jedoch zu beachten, dass der in Etappe 2 erreichte Kenntnisstand bei der Überprüfung der von der Nagra eingereichten provisorischen Sicherheitsanalysen und des sicherheitstechnischen Vergleichs durch die Behörden nochmals beurteilt wird. Die Überprüfung durch die Behörden wird zum Entscheid beitragen, für welche Standorte und in welchem Umfang in SGT Etappe 3 weitere Felduntersuchungen durchgeführt werden sollen im Hinblick auf die Wahl der Standorte für die Rahmenbewilligungsgesuche für das SMA- bzw. HAA-Lager. Dabei können bei Bedarf in SGT Etappe 3 auch an mehr als zwei Standorten für jeden Lagertyp Feldarbeiten durchgeführt werden; dies ist kompatibel mit den Vorgaben im Sachplan-Konzept.

10 Referenzverzeichnis

AG SiKa/KES (2010): Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 1: Fachbericht der AG SiKa/KES. Arbeitsgruppe Sicherheit Kantone (AG SiKa) und Kantonale Expertengruppe Sicherheit (KES). Anhang I zur Stellungnahme des Ausschusses der Kantone zu Etappe 1.

AGNEB (2009): Forschungsprogramm radioaktive Abfälle. Arbeitsgruppe Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK.

AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Deutschland.

Albert, W. (2008): Analyse des Tongehaltes in den Effinger Schichten anhand von Bohrlochmessungen. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-09.

Albert, W., Bläsi, H.-R., Croisé, J., Koroleva, M., Schwarz, R., Steffen, P. & Zerbe, U. (2008): NOK EWS-Bohrung Oftringen: Geologische, mineralogische und bohrlochgeophysikalische Untersuchungen (Rohdatenbericht). Nagra Arbeitsbericht NAB 08-02.

Allenbach, R. (2000): Synsedimentary tectonics during the Oxfordian of northern Switzerland. PhD Thesis, Geol.-Paläontol. Inst., Univ. Basel, Nr. 20.

Allenbach, R. (2001): Synsedimentary tectonics in an epicontinental sea: A new interpretation of the Oxfordian basins of northern Switzerland. Eclogae geol. Helv. 94/3, 265-287.

Allia, V. (1996): Sedimentologie und Ablagerungsgeschichte des Opalinustons in der Nordschweiz. Diss. Univ. Basel.

Arbeitsgruppe Gasführung im Untergrund (2002): Grundlagen zur Charakterisierung der Erdgasgefährdung bei Untertagebauten. Bull. Angew. Geol. 7/1, 45-65.

Archer, D. & Ganopolski, A. (2005): A movable trigger: Fossil fuel CO_2 and the onset of the next glaciation. Geochem. Geophys. Geosyst. 6, Q05003, doi:10.1029/2004GC000891.

ARE (2009): Bericht zu den Entwürfen der Planungsperimeter – Vorgehen der Arbeitsgruppe Raumplanung / Methode und Ergebnisse. Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Sektion Planung. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK.

Becker, A. (2000): Der Faltenjura: Geologischer Rahmen, Bau und Entwicklung seit dem Miozän. Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver. 82, 317-336.

Becker, J.K. (2010): Numerical modelling of landscape evolution. Nagra Arbeitsbericht NAB 10-20.

Becker, A., Blümling, P. & Müller, W.H. (1986): Rezentes Spannungsfeld in der zentralen Nordschweiz. Nagra Tech. Ber. NTB 84-37.

Berner, U. (2002): Project Opalinus Clay: Radionuclide concentration limits in the near field of a repository for spent fuel and vitrified high-level waste. Nagra Tech. Ber. NTB 02-10.

Berner, U. (2003): Project Opalinus Clay: Radionuclide concentration limits in the near-field of an ILW repository. Nagra Tech. Ber. NTB 02-22.

Bertleff, B. & Watzel, R. (2002): Tiefe Aquifersysteme im südwestdeutschen Molassebecken. Eine umfassende hydrogeologische Analyse als Grundlage eines zukünftigen Quantitäts – und Qualitätsmanagements. Abhandl. des LGRB BW 15, 75 – 90, Abb. 16; Freiburg.

BFE (2008): Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. Bundesamt für Energie BFE, Bern.

BFE (2010): Sachplan geologische Tiefenlager: Etappe 1. Ergebnisbericht: Festlegungen und Objektblätter (Version 20. August 2010). Bundesamt für Energie BFE, Abteilung Recht und Sicherheit. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK.

Biehler, D., Schmassmann, H., Schneemann, K. & Sillanpää, J. (1993): Hydrochemische Synthese Nordschweiz – Dogger-, Lias-, Keuper und Muschelkalk-Aquifere. Nagra Tech. Ber. NTB 92-08.

Bitterli-Dreher, P., Graf, H.R., Naef, H., Diebold, P., Matousek, F., Burger, H. & Pauli-Gabi, T. (2007): Geologischer Atlas der Schweiz 1070 Baden. Erläuterungen. Bundesamt für Landestopografie, swisstopo.

BLW (2008): Themenpapier 6 – Wasser. Aktenzeichen: 2008-03-28/230. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern, Schweiz.

Bock, H., Dehandschutter, B., Martin, C.D., Mazurek, M., de Haller, A., Skoczylas, F. & Davy, C. (2010): Self-sealing of fractures in argillaceous formations in the context of geological disposal of radioactive waste – review and synthesis. OECD/NEA 6184, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France, 310 pp.

Bolliger, Th. (1996): Vorläufige Mitteilung über Funde von pliozänen Kleinsäugern aus den Höheren Deckenschottern des Irchels (Kt. Zürich). Eclogae geol. Helv. 89/3, 1043-1048.

Bossart, P. & Thury, M. (Eds.) (2008): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. Swisstopo Rep. 2008-01. Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Bern.

Bouzelboudjen, M., Király, L., Kimmeier, F. & Zwahlen, F. (1997): Représentation schématique des écoulements souterrains en Suisse. Profils hydrogéologiques issus de modèles mathématiques 3-D à éléments finis. Planche 8.3 de l'Atlas Hydrologique de la Suisse. Institut de Géographie de l'Université de Berne, Office Fédéral de la Topographie et service Hydrologique et Géologique National, Berne, Suisse.

Bradbury, M.H. & Baeyens, B. (1997): Far-field sorption data bases for performance assessment of a L/ILW repository in an undisturbed Palfris Marl host rock. Nagra Tech. Ber. NTB 96-05.

Bradbury, M.H. & Baeyens, B. (2003): Near-field sorption data bases for compacted MX-80 bentonite for performance assessment of a high level radioactive waste repository in Opalinus Clay host rock. Nagra Tech. Ber. NTB 02-18.

Bradbury, M.H. & Baeyens, B. (2005): Modelling the sorption of Mn(II), Co(II), Ni(II), Zn(II), Cd(II), Eu(III), Am(III), Sn(IV), Th(IV), Np(V) and U(VI) on montmorillonite: Linear free energy relationships and estimates of surface binding constants for some selected heavy metals and actinides. Geochim. Cosmochim. Acta 69/4, 875-892.

Bradbury, M.H. & Baeyens, B. (2010): Comparison of the reference Opalinus Clay and MX-80 bentonite sorption data bases used in the Entsorgungsnachweis with sorption data bases predicted from sorption measurements on illite and montmorillonite. Nagra Tech. Ber. NTB 09-07.

Bradbury, M.H., Baeyens, B. & Thoenen, T. (2008): Sorption data bases for generic Swiss argillaceous, crystalline and calcareous rock systems. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-50.

Bradbury, M.H., Baeyens, B. & Thoenen, T. (2010): Sorption data bases for generic Swiss argillaceous rock systems. Nagra Tech. Ber. NTB 09-03.

Bühl, H. & Bollinger, N. (1999): Die Grundwasserbohrung Trasadingen. Mitt. Naturforsch. Ges. Schaffhausen 44, 51-64.

Burger, H. (1985): Palfris-Formation, Öhrli-Formation und Vitznau-Mergel (Basale Kreide des Helvetikums) zwischen Reuss und Rhein − Stratigraphische, fazielle, mineralogische und paläogeographische Untersuchungen. Diss. Univ. Zürich.

BUWAL (1998): Vollzug Umwelt – Wegleitung zur Umsetzung des Grundwasserschutzes bei Untertagebauten. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL.

Cabrera, J., Beaucaire, C., Bruno, G., de Windt, L., Genty, A., Ramambasoa, N., Rejeb, A., Savoye, S. & Volant, P. (2001): Projet Tournemire: Synthèse des programmes de recherche 1995 – 1999. Rapport DPRE/SERGD 01-19, pp. 202, Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Paris.

Carbol, P., Fors, P., Gouder, T. & Spahiu, K. (2009): Hydrogen suppresses UO_2 corrosion, Geochimica et Cosmochimica Acta, 73, 4366-4375.

Croisé, J., Enachescu, C., Lavanchy, J.M., Schmid, A. & Wozniewicz, J. (1999a): Sondierbohrung Benken: Hydraulic Testing Interval report / 197.50 – 394.80 m bGL, Tests M1, M2 and M3. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Croisé, J., Enachescu, C., Lavanchy, J.M. & Wozniewicz, J. (1999b): Sondierbohrung Benken: Hydraulic Testing Interval report / 403.27 – 564.50 m bGL, Tests M4 and MD1. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Croisé, J., Enachescu, C., Lavanchy, J.M. & Wozniewicz, J. (1999c): Sondierbohrung Benken: Hydraulic Testing Interval report / 493.77 – 564.50 m bGL, Tests D1, D2, O1, O2 and O3. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Croisé, J., Enachescu, C., Lavanchy, J.M., Schwarz, R. & Wozniewicz, J. (1999d): Sondierbohrung Benken: Hydraulic Testing Interval report / 566.45 – 603.45 m bGL, Tests O4 and O5. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Croisé, J., Enachescu, C., Lavanchy, J.M., Schmid, A., Schwarz, R. & Wozniewicz, J. (1999e): Sondierbohrung Benken: Hydraulic Testing Interval report / 605.13 – 698.00 m bGL, Tests O6, O7 and L1. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Croisé, J., Enachescu, C., Lavanchy, J.M., Schmid, A., Schwarz, R. & Wozniewicz, J. (1999f): Sondierbohrung Benken: Hydraulic Testing Interval report / 698.00 – 983.03 m bGL, Tests K1, K2, MK1, MK2 and B1. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Croisé, J., Mayer, G., Marschall, P., Matray, J.-M., Tanaka, T. & Vogel, P. (2006): Gas threshold pressure test performed at the Mont Terri Rock Laboratory (Switzerland): Experimental data and data analysis. Revue de l'Institut Français du Pétrole, 61/5.

Davis, K., Burbank, D.W., Fisher, D., Wallace, S. & Nobes, D. (2005a): Thrust-fault growth and segment linkage in the active Ostler fault zone. Journal of Structural Geology 27, 1528-1546.

Davis, J.A., Ochs, M., Olin, M., Payne, T.E. & Tweed, C.J. (2005b): NEA sorption project phase II: Interpretation and prediction of radionuclide sorption onto substrates relevant for radioactive waste disposal using thermodynamic sorption models. OECD/NEA, Paris.

De Marsily, G. (1986): Quantitative hydrogeology. Academic Press, New York.

Deichmann, N. (1987): Seismizität der Nordschweiz (1983 – 1987). Nagra Tech. Ber. NTB 87-05.

Deichmann, N. (1990): Seismizität der Nordschweiz 1987 – 1989, und Auswertung der Erdbebenserien von Günsberg, Läufelfingen und Zeglingen. Nagra Tech. Ber. NTB 90-46.

Deichmann, N. & Renggli, K. (1984): Mikrobeben-Untersuchung Nordschweiz. Teil 2: Seismizität (Jan. 1983 – Sept. 1984). Nagra Tech. Ber. NTB 84-12.

Deichmann, N. & Rinderknecht, B. (2005): Das neue seismische Messnetz der Nordschweiz und die Seismizität der Nordschweiz, 2000 – 2004. Nagra Arbeitsbericht NAB 05-12.

Deichmann, N., Ballarin, D. & Kastrup, U. (2000): Seismizität der Nord- und Zentralschweiz. Nagra Tech. Ber. NTB 00-05.

Delacou, B., Sue, C., Champagnac, J. & Burkhard, M. (2004): Present-day geodynamics in the bend of the Western and Central Alps as constrained by earthquake analysis. Geophys. J. Int. 158, 753-774.

Delacou, B., Sue, C., Nocquet, J.M., Champagnac, C.A. & Burkhard, M. (2008): Quantification of strain rate in the Western Alps using geodesy: comparisons with seismotectonics. Swiss Journal of Geosciences 101/2, 377-385.

Diamond, L.W: (1998): Underpressured paleofluids in a planned radwaste host rock. Proc. 9th Int. Symp. Water-Rock Interaction, Taupo, New Zealand, 669-772.

Diebold, P.; Bitterli-Brunner, P. & Naef, H. (2006): Geologischer Atlas der Schweiz Blatt 1069 / 1049 Frick-Laufenburg. Erläuterungen. Bundesamt für Wasser und Geologie, Wabern.

Dixon, D.A. (2000): Porewater salinity and the development of swelling pressure in bentonite-based buffer and backfill materials. Posiva Report 2000-04. Posiva Oy, Helsinki.

Eberhard & Partner AG (2010): Bohrungen in die Effinger Schichten im Raum Aarau und Umgebung. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Ehrminger, B., Johns, R.T. & Voborny, O. (1995): Hydrogeology of the Lägern-Weinland region of Northern Switzerland. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Enachescu, C., Rohs, S. & Böhner, J. (2008): Küttigen Borehole 2: Hydraulic Packer Testing. Nagra Arbeitsbericht NAB 07-18.

Enachescu, C., Rohs, S. & van der Wall, R. (2010a): WS-H (Wet Spot Investigation) Experiment: Borehole Mt. Terri BWS-H11 and BWS-H2 hydraulic testing in multipacker installations. Mont Terri Project, Technical Note TN 2010-3. Federal Office of Water and Geology, Swiss Geol. Surv., Bern.

Enachescu, C., Rohs, S. & Böhner, J. (2010b): Borehole Gösgen SB 2 – Hydraulic Packer Testing. Unpubl. Nagra Project Report.

ENSI (2009): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis – Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G03. April 2009. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg, Schweiz.

ENSI (2010a): Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2. ENSI 33/075 (April 2010). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg, Schweiz.

ENSI (2010b): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1. ENSI 33/070 (Januar 2010). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg, Schweiz.

EWI (2004): Unterlagen zur Beurteilung der Standortoptionen SMA aus baulicher und wirtschaftlicher Sicht – Felsmechanische Berechnung Kavernenquerschnitte. Nagra Arbeitsbericht NAB 04-11.

Ferry, M., Meghraoui, M., Delouis, B. & Giardini, D. (2005): Evidence for Holocene palaeoseismicity along the Basel–Reinach active normal fault (Switzerland): a seismic source for the 1356 earthquake in the Upper Rhine Graben. Geophys. J. Int. 160, 554-572.

Fisch, H.R., Rösli, U., Reinhardt, S., Yeatman, B., Senger, R. & Dale, T. (2008): Oftringen Borehole – Hydraulic Packer Testing. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-15.

Fraefel, M. (2008): Geomorphic response to neotectonic activity in the Jura Mountains and the southern Upper Rhine Graben. Diss. Univ. Basel.

Fuhrer, J. & Jasper, K. (2009): Bewässerungsbedürftigkeit von Acker- und Grasland im heutigen Klima. Agrar-Forschung 16/10, 396-401.

Gautschi, A. (2001): Hydrogeology of a fractured shale (Opalinus Clay): Implications for the deep disposal of radioactive wastes. J. Hydrogeol. 9, 97-107.

Glaus, M.A., Baeyens, B., Bradbury, M.H., Jakob, A., Van Loon, L.R. & Yaroshchuk, A. (2007): Diffusion of $^{22}Na^{+}$ and $^{85}Sr^{+}$ in montmorillonite: Evidence of interlayer diffusion being the dominant pathway at high compaction. Environ. Sci. Technol. 41/2, 478-485.

Graf, H.R. (1993): Die Deckenschotter der zentralen Nordschweiz. Diss. ETH Zürich.

Graf, H.R. (2009): Stratigraphie und Morphogenese von frühpleistozänen Ablagerungen zwischen Bodensee und Klettgau. Eiszeitalter und Gegenwart / Quaternary Science Journal 58/1, 12-53.

Graf, H.R. (2010): Stratigraphie von Mittel- und Spätpleistozän in der Nordschweiz. Beitr. Geol. Karte Schweiz 168.

Graf, H.R. & Hofmann, F. (2000): Zur Eiszeitgeologie des oberen Klettgau (Kanton Schaffhausen, Schweiz. Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver. N.F. 82, 279-315.

Greber, E., Leu, W. & Schegg, R. (2004): Hydrocarbon Habitat and Potential of Switzerland – An evaluation of the oil and gas potential of Switzerland based on public well data, seismic lines and basin modelling results. Unpubl. Int. Rep., Geoform Ltd., Minusio.

Grenthe, I., Plyasunov, A.V. & Spahiu, K. (1997): Estimations of medium effects on thermodynamic data. *In*: Grenthe, I. & Puigdomenech, I. (eds.): Modelling in Aquatic Chemistry 325, OECD-NEA, Paris.

Gupta, A. & Scholz, C.H. (2000): A model of normal fault interaction based on observations and theory. J. Struct. Geol. 22, 865-879.

Gygi, R.A. (2000a): Annotated index of lithostratigraphic units currently used in the Upper Jurassic of northern Switzerland. Eclogae geol. Helv. 93/3, 125-146.

Gygi, R.A. (2000b): Integrated stratigraphy of the Oxfordian and Kimmeridgian (Late Jurassic) in Northern Switzerland and adjacent Southern Germany. Denkschr. Schweiz. Akad. Natw. Vol. 104.

Haldimann, P., Naef, H. & Schmassmann, H. (1984): Fluviatile Erosions- und Akkumulationsformen als Indizien jungpleistozäner und holozäner Bewegungen in der Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. Nagra Tech. Ber. NTB 84-16.

Hauber, L., Jordan, P., Madsen, F., Nüesch, R. & Vögtli, B. (2005): Tonminerale und Sulfate als Ursache für druckhaftes Verhalten von Gesteinen. Ursachen und Wirkung des Quellvorganges. Bundesamt f. Strassenbau ASTRA, Forschungsauftrag 55/92 und 52/96 (82 p.).

Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Krufess, D. & Müller, B. (2008): The 2008 release of the World Stress Map (available online at www.world-stress-map.org).

Hekel, U. (1994): Hydrogeologische Erkundung am Beispiel des Opalinustons (Unteres Aalenium). Tübinger geowiss. Arb. C18, Univ. Tübingen, Deutschland.

Hinze, W., Jäggi, K. & Schenker, F. (1989): Sondierbohrungen Böttstein, Weiach, Riniken, Schafisheim, Kaisten, Leuggern: Gasmessungen. Nagra Tech. Ber. NTB 86-11.

Högl, O. (1980): Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz. Haupt Verlag, Bern, Stuttgart.

Hofmann, F. (1981): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt 1031 Neunkirch, Schweiz. Geol. Komm.

HSK (2005): Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston). HSK 35/99, August 2005. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen.

Hummel, W., Berner, U., Curti, E., Pearson, F.J. & Thoenen, T. (2002): Nagra/PSI Chemical Thermodynamic Data Base 01/01. Nagra Tech. Ber. NTB 02-16.

Interreg II (2001): Erkundung der Grundwasserleiter und der Böden im Hochrheintal zwischen Schaffhausen und Basel. Abschlussbericht zum INTERREG II-Projekt. Landratsamt Waldshut.

Interreg IIIA (2008): Grenzüberschreitende Bewirtschaftung des Grundwassers im Raum Hegau – Schaffhausen. Gefördert im INTERREG IIIA-Programm (2003 – 2007) der EU und Schweiz. Eidgenossenschaft.

Ischi, H. (1978): Das Berriasien-Valanginien in der Wildhorn-Drusberg-Decke zwischen Thuner- und Vierwaldstättersee. Diss. Univ. Bern.

Isler, A., Pasquier, F. & Huber, M. (1984): Geologische Karte der zentralen Nordschweiz 1:100'000. Herausgegeben von der Nagra und der Schweiz. Geol. Komm.

Jäckli, H. & Kempf, Th. (1972): Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100'000. Blatt 1 Bözberg Beromünster – Erläuterungen. Schweiz. Geotechn. Komm.

Jäckli, H. & Kempf, Th. (1980): Hydrogeologische Karte der Schweiz :100'000. Blatt 2 Bodensee – Erläuterungen. Schweiz. Geotechn. Komm.

Jäggi, K. & Steffen, P. (1999): Sondierbohrung Benken: Geologisches Sampling, Bohrgas-messungen, Sampler Logs 1:200. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Jahns, E. (2008): EWS Oftringen – Felsmechanische Tests. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-25.

Jentzsch, G. (2001): Vulkanische Gefährdung in Deutschland. Entwicklung eines Kriteriums zum Ausschluss von Gebieten für die weitere Untersuchung hinsichtlich der Eignung als Standort eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Bericht z.H. des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Deutschland.

Johnson, L.H. & King, F. (2003): Canister options for the disposal of spent fuel. Nagra Tech. Ber. NTB 02-11.

Johnson, L.H., Niemeyer, M., Klubertanz, G., Siegel, P. & Gribi, P. (2002): Calculations of the temperature evolution of a repository for spent fuel, vitrified high-level waste and intermediate level waste in Opalinus Clay. Nagra Tech. Ber. NTB 01-04.

Jordan, P. (2008): Geologische Grundlagen für die Beurteilung von Standortmöglichkeiten für ein SMA-Tiefenlager in Ton- und Mergel-Formationen im Faltenjura und angrenzenden Gebieten. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-43.

Kastrup, U., Zoback, M.-L., Deichmann, N., Evans, K., Giardini, D. & Michael, A.J. (2004): Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions. J. Geophys. Res. 109, B01402, doi: 10.1029/ 2003JB002550.

Kastrup, U., Deichmann, N., Fröhlich, A. & Giardini, D. (2007): Evidence for an active fault below the northwestern Alpine foreland of Switzerland. Geophys. J. Int. (2007) 169, 1273-1288. doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03413.x.

KEG (2003): Kernenergiegesetz vom 21.03.2003 (KEG). Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.

Kellerhals + Haefeli (2010a): Bautechnische Beschreibung des mit Zugangsbauwerken zu geologischen Tiefenlagern zu durchfahrenden Gebirges in der Nordschweiz. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Kellerhals + Haefeli (2010b): Zusammenstellung von geotechnischen Problemen bei Tunnel- und Schachtbauwerken in der Schweiz. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Kempf, Th. (1980): Hydrogeologische Karte der Schweiz :100'000. Blatt 2 Bodensee. Schweiz. Geotechn. Komm.

KEV (2004): Kernenergieverordnung vom 10.12.2004 (KEV). Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.

Kimmeier, F., Perrochet, P., Andrews, R. & Király, L. (1985): Simulation par modèle mathématique des écoulements souterrains entre les Alpes et le Forêt Noire. Partie A: Modèle régional. Partie B: Modèle local (Nord de la Suisse). Nagra Tech. Ber. NTB 84-50.

King, F. (2008): Corrosion of carbon steel under anaerobic conditions in a repository for SF and HLW in Opalinus Clay. Nagra Tech. Ber. NTB 08-12.

Klemenz, W. (1993): Erosionsszenarien Wellenberg. Nagra Tech. Ber. NTB 93-34.

Klemenz, W., Blaser, P. & Küpfer, T. (2000): Hydrogeologie des Gebietes Lägern – Zürcher Weinland. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Klump, S., Waber, H.N., Koroleva, M., Eichinger, L., Lorenz, G., Albert, W., Frieg, B. & Gautschi, A. (2008): Synthese der Untersuchungen EWS-Bohrungen Küttigen. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-12.

KNE (2010): Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 1 – Stellungnahme der KNE zur Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit der vorgeschlagenen Standortgebiete. Kommission Nukleare Entsorgung KNE, 23. Februar 2010. Eidgenössisches Departement für Verkehr, Umwelt und Kommunikation UVEK.

KNS (2010): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 1 – Stellungnahme zum sicherheitstechnischen Gutachten des ENSI zum Vorschlag geologischer Standortgebiete. KNS 23/219, April 2010. Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit.

Kock, S. (2008): Pleistocene terraces in the Hochrhein area – formation, age constraints and neotectonic implications. PhD Thesis Univ. Basel.

Konietzky, H. & Te Kamp, L. (2009): Felsmechanische Modellierungen OPA im Rahmen EP-05. Nagra Arbeitsbericht NAB 05-15.

Konietzky, H., Blümling, P, & Te Kamp, L. (2003): Opalinuston – Felsmechanische Untersuchungen. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. & Rubel, F. (2006): World map of Köppen-Geiger climate classification. Meteorl. Z. 15, 259-263.

Kovári, K. & Descoeudres, F. (Eds.) (2001): Tunnelling Switzerland: Gotthard-Basistunnel Schacht- und Schachtfusskavernen Sedrun. Swiss Tunnelling Society, Bertelsmann, 62-67.

KSA (2005): Stellungnahme zum Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston). KSA 23/170, August 2005. Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen.

Kuhn, P. (2009): Geologisches 3D-Modell Wellenberg. Nagra Arbeitsbericht NAB 09-31.

Laws, S. & Deplazes, G. (2007): Geologie und Hydrogeologie der Effinger Schichten im Tafeljura und am Jurasüdfuss. Zusammenfassung des Wissensstandes vor den Untersuchungen in den EWS-Bohrungen Küttigen 1, Küttigen 2 und Oftringen. Nagra Arbeitsbericht NAB 07-28.

Leu, W. (2008): Potential der Kohlenwasserstoffressourcen – Schweizer Mittelland und subalpiner Bereich. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-35.

LGRB (2008): Hydrogeologische Einheiten in Baden-Württemberg. Bearbeiter: Plum, H., Ondreka, J. & Armbruster, V. LGRB-Informationen 20/08, Freiburg i.Br., 106 pp.

Madritsch, H., Fabbri, O., Hagedorn, E.-M., Preusser, F., Schmid, S.M. & Ziegler, P.A. (2009): Feedback between erosion and active deformation: geomorphic constraints from the frontal Jura fold-and-thrust belt (eastern France). Int. J. Earth Sci. (Geologische Rundschau) DOI 10.1007/s00531-009-0468-7.

Mäder, U. (2009a): Reference pore water for the Effingen Member (Standortregion Südjura) for the provisional safety-analysis in the framework of the sectoral plan – interim results (Interim report for SGT Phase 2). Nagra Arbeitsbericht NAB 09-13.

Mäder, U. (2009b): Reference pore water for the Opalinus Clay and "Brown Dogger" for the provisional safety-analysis in the framework of the sectoral plan – interim results (Interim report for SGT Phase 2). Nagra Arbeitsbericht NAB 09-14.

Mäder, U. (2010): Reference pore water for the Helvetic marls for the provisional safety analysis in the framework of sectoral plan – interim results (Interim report for SGT Phase 2). Nagra Arbeitsbericht NAB 09-15.

Marschall, P., Horseman, S. & Gimmi, T. (2005): Characterisation of gas transport properties of the Opalinus Clay, a potential host rock formation for radioactive waste disposal. Revue de l'Institut Français du Pétrole, 60/1&2.

Marschall, P., Delay, J., Mayor, J.C., Shao, H., Wiezorek, K., Zhang, C.-L. (2008): Gas Migration Experiments. *In*: Mont Terri Rock Laboratory – Project, Programme 1996 to 2007 and Results. P. Bossart and M. Thury (eds). Reports of the Swiss Geological Survey No. 3, Wabern, Switzerland.

Mazurek, M. (1999): Evolution of gas and aqueous fluid in low-permeability shales during uplift and exhumation of the central Swiss Alps. Applied Geochemistry 15, 223-246.

Mazurek, M. (2010): Kompilation von Gesteinsparametern für die Wirtgesteine Opalinuston, 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums. Nagra Arbeitsbericht NAB 10-19.

Mazurek, M., Waber, H.N. & Gautschi, A. (1998a): Hydrocarbon gases and fluid evolution in very low-grade metamorphic terranes: A case study from the Central Swiss Alps. Proc. 9th Int. Symp. Water-Rock Interaction, Taupo, New Zealand, 417-420.

Mazurek, M., Lanyon, G.W., Vomvoris, S. & Gautschi, A. (1998b): Derivation and application of a geologic dataset for flow modelling by discrete fracture networks in low permeability argillaceous rocks. J. Contaminant Hydrol. 35, 1-17.

Mazurek, M., Hurford, A.J. & Leu, W. (2006): Unravelling the multi-stage burial history of the Swiss Molasse Basin: Integration of apatite fission track, vitrinite reflectance and bio-marker isomerisation analysis. Basin Research 18, 27-50.

Mazurek, M., Alt-Epping, P., Bath, A., Gimmi, T. & Waber, H. N. (2009). Natural tracer profiles across argillaceous formations: The CLAYTRAC project. OECD/NEA 6253, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France, 358 pp.

Müller, W.H., Naef, H. & Graf, H.R. (2002): Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien im Zürcher Weinland. Nagra Tech. Ber. NTB 99-08.

Naef, H. (2008): Stratigrafie, Mächtigkeit und Lithofazies der mesozoischen Formationen in der Nordschweiz. Eine Kompilation von Bohrungen, Übersichts- und Aufschlussprofilen. Nagra Arbeitsbericht NAB 06-26.

Nagra (1981): Die Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle in der Schweiz: Potentielle Standortgebiete für ein Endlager Typ B. Nagra Tech. Ber. NTB 81-04.

Nagra (1985): Sondierbohrung Böttstein – Untersuchungsbericht. Nagra Tech. Ber. NTB 85-01.

Nagra (1988a): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988: Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz (Textband). Nagra Tech. Ber. NTB 88-25.

Nagra (1988b): Untersuchungen zur Standorteignung im Hinblick auf die Endlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle: Berichterstattung über die Untersuchungen der Phase I am potentiellen Standort Oberbauenstock (Gemeinde Bauen, UR). Nagra Tech. Ber. NTB 88-18.

Nagra (1989): Sondierbohrung Weiach – Untersuchungsbericht. Nagra Tech. Ber. NTB 88-08.

Nagra (1990): Sondierbohrung Riniken – Untersuchungsbericht. Nagra Tech. Ber. NTB 88-09.

Nagra (1991): Sondierbohrung Leuggern – Untersuchungsbericht. Nagra Tech. Ber. NTB 88-10.

Nagra (1992a): Sondierbohrung Schafisheim – Untersuchungsbericht. Nagra Tech. Ber. NTB 88-11.

Nagra (1992b): Sondierbohrung Siblingen – Untersuchungsbericht. Nagra Tech. Ber. NTB 90-34.

Nagra (1994): Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg. Nagra Tech. Ber. NTB 94-06.

Nagra (1997): Geosynthese Wellenberg 1996 – Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II. Nagra Tech. Ber. NTB 96-01.

Nagra (2001): Sondierbohrung Benken – Untersuchungsbericht. Nagra Tech. Ber. NTB 00-01.

Nagra (2002a): Projekt Opalinuston – Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Tech. Ber. NTB 02-03.

Nagra (2002b): Projekt Opalinuston – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Tech. Ber. NTB 02-02.

Nagra (2002c): Project Opalinus Clay: Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Tech. Ber. NTB 02-05.

Nagra (2002d): Project Opalinus Clay: Models, codes and data for safety assessment. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Tech. Ber. NTB 02-06.

Nagra (2004a): Effects of post-disposal gas generation in a repository for spent fuel, high-level waste and long-lived intermediate level waste sited in Opalinus clay. Nagra Tech. Ber. NTB 04-06.

Nagra (2004b): PICNIC User Guide for Version 2.4. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Nagra (2007): ESDRED: Low pH Shotcrete for rock support: Spraying tests at the Test Gallery Hagerbach. Nagra Arbeitsbericht NAB 07-02.

Nagra (2008a): Entsorgungsprogramm. Nagra Tech. Ber. NTB 08-01.

Nagra (2008b): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse (Hauptbericht). Nagra Tech. Ber. NTB 08-03.

Nagra (2008c): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Geologische Grundlagen. Nagra Tech. Ber. NTB 08-04.

Nagra (2008d): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie. Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit. Nagra Tech. Ber. NTB 08-05.

Nagra (2008e): Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien MIRAM 2008. Nagra Tech. Ber. NTB 08-06.

Nagra (2008f): Effects of post-disposal gas generation in a repository for low- and intermediate-level waste sited in the Opalinus Clay of Northern Switzerland. Nagra Tech. Ber. NTB 08-07.

Nagra (2008g): VPAC – A numerical model for groundwater flow and radionuclide transport. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-05.

Nagra (2008h): Biosphärenmodellierung in den sicherheitstechnischen Betrachtungen für die Vororientierung zum Sachplan geologische Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-01.

Nagra (2008i): Geochemische Nahfeld-Daten für die sicherheitstechnischen Betrachtungen zum Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-51.

Nagra (2008j): Bericht zum Umgang mit den Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis. Nagra Tech. Ber. NTB 08-02.

Nagra (2008k): STMAN 5.7. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-46.

Nagra (2009a): Umhüllendes Abfallinventar für bestehende und künftige KKW sowie MIF-Anlagen (MIRAM 09). Unpubl. Nagra Interner Ber.

Nagra (2009b): The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland. Nagra Tech. Ber. NTB 09-06.

Nagra (2009c): Standortunabhängige Grundlagen Anlagen und Betrieb – Alternatives Ausbaukonzept ("Liner concept") für BE/HAA-Lagerstollen. Nagra Arbeitsbericht NAB 09-07.

Nagra (2010a): Ableitung der Diffusions- und Sorptionsdatenbasis der Wirtgesteine für Testrechnungen zur provisorischen Sicherheitsanalyse. Nagra Interner Ber.

Nagra (2010b): Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2: Elektronischer Daten- und Resultateordner (EDR) zu den Testrechnungen zur Ermittlung der Dosisintervalle. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Nagra (2010c): Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Fragen des ENSI und seiner Experten und zuhörige Antworten der Nagra. Nagra Arbeitsbericht NAB 09-29.

Nagra (2010d): Grundlagen und Ergebnisse der Biosphärenmodellierung für die Testrechnungen. Nagra Arbeitsbericht NAB 10-15.

Nüesch, R. (1991): Das mechanische Verhalten von Opalinuston. Diss. Nr. 9349, ETH Zürich.

OECD Nuclear Energy Agency (2001): Radioactive waste management: Using thermodynamic sorption models for guiding radioelement distribution coefficient (K_d) investigations: A status report. OECD/NEA, Paris.

OECD Nuclear Energy Agency (2008): Chemical thermodynamics of Thorium (NEA TDB Chemical Thermodynamics 11). OECD/NEA, Paris.

OFEN (2008): Plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes». Conception générale. Office fédéral de l'énergie OFEN, Berne, Suisse.

Ollila, K. (2008): Dissolution of unirradiated UO_2 and UO_2 doped with ^{233}U in low and high-ionic-strength NaCl under anoxic and reducing conditions. POSIVA Report 2008-50. Olkiluoto, Finland: Posiva Oy.

Ollila, K. & Oversby, V.M. (2005): Dissolution of unirradiated UO_2 and UO_2 doped with ^{233}U under reducing conditions. SKB-TR-05-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ollila, K. & Oversby, V. (2006): Testing of uranium dioxide enriched with ^{233}U under reducing conditions. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 932, 167-173.

Ostrowski, L., Enachescu, C., Harborth, B. & Kloska, M. (1992): Hydrological investigations at Wellenberg – Hydraulic packer testing in boreholes SB3, SB4 and SB6: methods and field results. Nagra Tech. Ber. NTB 93-05.

Pearson, F.J., Balderer, W., Loosli, H.H., Lehmann, B.E., Matter, A., Peters, T., Schmassmann, H. & Gautschi, A. (1991): Applied isotope hydrogeology. A case study in northern Switzerland. Elsevier, Amsterdam, Netherlands (und Nagra Tech. Ber. NTB 88-01).

Pfiffner, O.A., Burkhard, M., Hänni, R., Kammer, A., Kligfield, R., Mancktelow, N.S., Menkveld, J.W., Ramsay, J.G., Schmid, S.M. & Zurbriggen, R. (2010): Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps, including Vorarlberg (Austria) and Haute Savoie (France). 7 sheets, Landesgeologie, Wabern, Bern (Karte gedruckt, Erläuterungen in Vorb.).

Pöyry (2010a): Orientierende felsmechanische Berechnungen und Vordimensionierung für SMA-Lagerkavernen in 300 bis 800 m Tiefe im intakten und gestörten Opalinuston, in Palfris-Formation und Effinger Schichten für Kavernentypen K06, K09, K12 und K16. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Pöyry (2010b): Orientierende felsmechanische Berechnungen für BE/HAA-Lagerstollen in 400 m, 650 m und 900 m im intakten und gestörten Opalinuston. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Pöyry (2010c): Orientierende Vordimensionierung für BE/HAA-Lagerstollen in 900 m Tiefe im intakten und gestörten Opalinuston für verschiedene Ausbaukonzepte. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Preusser, F., Reitner, J.M. & Schlüchter, C. (2010): Distribution, geometry, age and origin of overdeepened valleys and basins in the Alps and their foreland. Swiss Journal of Geosciences 103 (im Druck).

Reinecker, J., Tingay, M., Müller, B. & Heidbach, O. (2010): Present-day stress orientation in the Molasse Basin. Tectonophysics 482, 129-138.

Reuther, E.-U. (1989): Lehrbuch der Bergbaukunde. Verlag Glückauf GmbH, Essen, 17-18.

Robinson, R. & Suckling, P. (2009): PICNIC TD User Guide for Version 1.2. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Roth, Ph. & Evans, K. (1997): The state of stress in northern Switzerland inferred from earthquake seismological data and in-situ stress measurements. Unpubl. Report Proseis AG, Zürich, Switzerland.

Savage, D., Walker, C. & Benbow, S. (2010): An analysis of potential changes to barrier components due to interaction with a concrete liner in a repository for SF/HLW in Opalinus Clay. Nagra Arbeitsbericht NAB 10-17.

Schärli, U. & Rybach, L. (2002): Erstellung einer aktuellen Karte der Temperaturgradienten und des Wärmeflusses der Nordschweiz. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Schlatter, A. (2007): Neotektonische Untersuchungen in der Nordschweiz und Süddeutschland. Kinematische Ausgleichung der Landesnivellementlinien CH/D. Nagra Arbeitsbericht NAB 07-13.

Schlische, R.W., Young, S.S., Ackermann, R.V. & Gupta, A. (1996): Geometry and scaling relations of a population of very small riftrelated normal faults. Geology 24, 683-686.

Schloz, W. (2006): Kohlenstoffdioxid-Aufstiege durch die Opalinuston-Formation (al1) in Baden-Württemberg (Kohlenstoffdioxid-führende Quellen und Grundwässer im Mitteljura des oberen Filstals, Landkreis Göppingen. Fachbericht des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Freiburg i. Br.

Schlüchter, C. (Ed.), Bini A., Buoncristiani J.-F., Couterrand S., Ellwanger D., Felber M., Florineth D., Graf H.R., Keller O., Kelly M. & Schoeneich P. (2009): Die Schweiz während des letzteiszeitlichen Maximums (LGM) 1:500'000. Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Wabern.

Schmassmann, H. (1990): Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Tertiär- und Malm-Aquifere. Nagra Tech. Ber. NTB 88-07.

Schmassmann, H., Balderer, W., Kanz, W. & Pekdeger, A. (1984): Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. Nagra Tech. Ber. NTB 84-21.

Schmassmann, H., Kullin, M. & Schneemann, K. (1992): Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Buntsandstein-, Perm- und Kristallin-Aquifere. Nagra Tech. Ber. NTB 91-30.

Schneider, T.R. (1984): Geologischer Schlussbericht Seelisbergtunnel. Zusammenfassung. Beitr. geol. Schweiz, geotech. Ser., Liefg. 65. Schweiz. Geotech. Komm.

Scholz, C.H. (2001): The mechanics of earthquakes and faulting. Second edition, Cambridge Univ. Press, 471p.

Schubert, W., Steidl, A. & Otto, R. (2010): Geotechnische Probleme und deren Lösungen im österreichischen Tunnelbau – Erfahrungen aus Tunnel-, Stollen- und Schachtbauwerken in Österreich. Unpubl. Nagra Interner Bericht.

SED (2008): Jahresberichte des SED seit 1996. http://histserver.ethz.ch/seismotectonics/reports.php.

Serpelloni, E., Anzidei, M., Baldi, P., Casula, G. & Galcani, A. (2005): Crustal velocity and strain-rate fields in Italy and surrounding regions: new results from the analysis of permanent and non-permanent GPS networks. Geophys. J. Int. 161, 861-880.

SFOE (2008): Sectoral Plan for Deep Geological Repositories. Conceptual Part. Swiss Federal Office of Energy SFOE, Bern, Switzerland.

Signorelli, S. & Kohl, T. (2007): Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz – Gebiet des Nördlichen Schweizer Mittellandes. Beitr. Geol. Schweiz 39, Schweiz. Geophys. Komm.

Smith, P., Gribi, P., Mayer, G. & Schneider, J. (2004): Project Opalinus Clay (Entsorgungsnachweis): Supplementary calculations to illustrate the influence of EDZ hydraulic conductivity on radionuclide transport. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Spyropoulos, C., Griffith, W.J., Scholz, C.H. & Shaw, B.E. (1999): Experimental evidence for different strain regimes of crack populations in a clay model. Gephys. Res. Lett. 26, 1081-1084.

Strasser, M., Anselmetti, F.S., Fäh, D., Giardini, D. & Schnellmann, M. (2006): Magnitudes and source areas of large prehistoric northern Alpine earthquakes revealed by slope failures in lakes. Geology 34, 1005-1008.

Stroes-Gascoyne, S., Schippers, A., Schwyn, B., Poulain, S., Sergeant, C., Simonoff, M., Le Marrec, C., Altmann, S., Nagaoka, T., Mauclaire, L., McKenzie, J., Daumas, S., Vinsot, A., Beaucaire, C. & Matray, J.-M. (2007): Microbial Community Analysis of Opalinus Clay Drill Core Samples from the Mont Terri Underground Research Laboratory, Switzerland. Geomicrobiology Journal 24, 1-17.

Stroes-Gascoyne, S., Sergeant, C., Schippers, A., Hamon, C.J., Nèble, S., Vesvres, M.-H., Barsotti, V., Poulain, S. & Le Marrec, C. (2010): Biogeochemical processes in a clay formation in-situ experiment: Part D – Microbial analyses – synthesis of results. Appl. Geochem. (submitted).

StSV (1994): Strahlenschutzverordnung vom 22.6.1994 (Stand 4.4.2000), StSV, SR 814.501, Schweiz.

Suva (2002): Verhütung von Unfällen durch Brände und Explosionen bei der Erstellung von Untertagbauten in Erdgas führenden Gesteinsschichten. Technisches Merkblatt, SUVA.

swisstopo (2010): Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 1: Beurteilung der Sammelprofile und der hergeleiteten Wirtgesteine sowie der verwendeten Grundlagen für die Herleitung von Standortgebieten. Expertenbericht von swisstopo, Landesgeologie z.Hd. des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorates ENSI, 1. Februar 2010. Bundesamt für Landestopografie swisstopo.

Te Kamp, L. (2008): Comparative rock-mechanical modelling of L/ILW caverns in different host rocks. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-45.

Tesauro, M., Hollenstein, C., Egli, R., Geiger, A. & Kahle, H.-G. (2006): Analysis of central western Europe deformation using GPS and seismic data. Journal of Geodynamics 42, 194-209.

Thury, M. & Bossart, P. (Eds.) (1999): Mont Terri Rock Laboratory: Results of the hydrogeological, geochemical, and geotectonical experiments performed in 1996 and 1997. Landeshydrologie und -geologie, Geol. Ber. Nr. 23. Bern, Switzerland.

Tits, J., Stumpf, T., Rabung, T., Wieland, E. & Fanghänel, T. (2003): Uptake of trivalent actinides (Cm(III)) and lanthanides (Eu(III)) by calcium silicate hydrates: A wet chemistry and time-resolved laser fluorescence spectroscopy (TRLFS) study. Environ. Sci. Technol. 37, 3568-3573.

Traber, D. (2004): Hydrogeologie des unteren Malm (Oxfordian): Renggeri-Ton, Terrain à Chailles und Effinger Schichten. Nagra Arbeitsbericht NAB 04-07.

Traber, D., Waber, H.N., Eichinger, L. & Heidinger, M. (2002): Hydrochemie und Isotopenhydrologie von Tiefengrundwässern in der Region Lägern – Zürcher Weinland – Hegau. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Turnbull, A. (2009): A review of the possible effects of hydrogen on lifetime of carbon steel nuclear waste containers. Nagra Tech. Ber. NTB 09-04.

Van Loon, L.R. & Glaus, M.A. (2008): Mechanical compaction of smectite clays increases ion exchange selectivity for cesium. Environ. Sci. Technol. 42 / 5, 1600-1604.

Van Loon, L.R. & Soler, J.M. (2003): Diffusion of HTO, $^{36}Cl^-$, $^{125}I^-$ and $^{22}Na^+$ in Opalinus Clay: Effect of confining pressure, sample orientation, sample depth and temperature. Nagra Tech. Ber. NTB 03-07.

Van Loon, L.R., Soler, J.M., Jakob, A. & Bradbury, M.H. (2003): Effect of confining pressure on the diffusion of HTO, $^{36}Cl^-$ and $^{125}I^-$ in a layered argillaceous rock (Opalinus Clay): diffusion perpendicular to the fabric. Appl. Geochem. 18, 1653-1662.

Van Loon L.R., Müller W. & Iijima K. (2005): Activation energies of the self-diffusion of HTO, $^{22}Na^+$ and $^{36}Cl^-$ in a highly compacted argillaceous rock (Opalinus Clay). Appl. Geochem. 20 / 5, 961-972.

Van Loon, L.R., Glaus, M.A. & Müller, W. (2007): Anion exclusion effects in compacted bentonites: towards a better understanding of anion diffusion. Appl. Geochem. 22, 2536-2552.

Vespa, M., Dähn, R., Grolimund, D., Wieland, E. & Scheidegger, A.M. (2006) Spectroscopic investigation of Ni speciation in hardened cement paste. Environ. Sci. Technol. 40, 2275-2282.

Vinard, P. (1998): Generation and evolution of hydraulic underpressures in a marl-shale aquitard at Wellenberg, Central Switzerland. PhD Thesis Univ. Neuchâtel.

Voborny, O., Adank, P., Hürlimann, W. & Thompson, B.M. (1993): Hydrogeologische Modellierung im Opalinus-Ton und in der Unteren Süsswassermolasse der Nordschweiz. Nagra Tech. Ber. NTB 90-14.

Voegelin, A. & Kretzschmar, R. (2002): Stability and mobility of colloids in Opalinus Clay. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Waber, H.N. (Ed.) (2008): Borehole Oftringen: Geochemistry, Mineralogy, Porosimetry, Pore Water Chemistry. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-18.

Weber, H.P., Sattel, G. & Sprecher, C. (1986): Sondierbohrungen Weiach, Riniken, Schafisheim, Kaisten, Leuggern – Geophysikalische Daten. Nagra Tech. Ber. NTB 85-50. Textband und Beilagenband.

Wegmüller, M.C. (2001): Einflüsse des Bergwassers auf Tiefbau / Tunnelbau. ISBN 3 7266 0052 3.

Wersin, P., Johnson, L.H. & McKinley I. (2007): Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100°C: a critical review. Phys. Chem. Earth 32, 780-788.

Wersin, P., Appelo, C.A.J. Baeyens, B., Dewonck, S., Eikenberg, J., Fierz, T., Fisch, H.R., Gimmi, T., Grolimund, D., Leupin, O.X., Möri, A., Soler, J.M., van Dorp, F. & Van Loon, L. (2010): Long-term Diffusion Experiment (DI-A). DI-A2: Diffusion of HTO, Br^-, I^-, Cs^+, $^{85}Sr^{2+}$ and $^{60}Co^{2+}$: Field activities, data and modelling. Mont Terri Project, Technical Report 2009-04. Federal Office of Water and Geology, Swiss Geol. Surv., Bern.

Wieland, E. & van Loon, L. (2002): Cementitious near-field sorption data base for performance assessment of an ILW repository in Opalinus Clay. Nagra Tech. Ber. NTB 02-20.

Wieland, E., Tits, J., Kunz, D. &. Dähn, R. (2008): Strontium uptake by cementitious materials: A combined wet chemistry and EXAFS study. Environ. Sci. Technol. 42, 403-409.

Wiget, A., Schlatter, A., Brockmann, E., Ineichen, D., Marti, U. & Egli, R. (2007): GPS-Netz NEOTEKTONIK Nordschweiz 2004: Messkampagne im Auftrag der Nagra und Deformationsanalyse 1988-1995-2004. Nagra. Arbeitsbericht NAB 06-04 (Revision August 2007).

Wileveau, Y., Cornet, F.H., Desroches, J. & Blümling, P. (2007): Complete in situ stress in an argillite sedimentary formation. Phys. Chem. Earth 32, 866-878.

Ziegler, H.-J. (2006): Vorauserkundung im Karst der Doldenhorn-Decke, Geologie und Geotechnik der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg. Löw, Hochschulverlag ISBN 978 3 7281 3082 2.

Ziegler, P.A. & Fraefel, M. (2009): Response of drainage systems to Neogene evolution of the Jura fold-thrust belt and Upper Rhine Graben. Swiss Journal of Geosciences 102, 57-75.

Zippelt, K. & Dierks, O. (2007): Auswertung von wiederholten Präzisionsnivellements im südlichen Schwarzwald, Bodenseeraum sowie in angrenzenden schweizerischen Landesteilen. Nagra Arbeitsbericht NAB 07-27.

Zoback, M.L. (1992): First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the World Stress Map project. J. Geophys. Res. 97, 11703-11728.

Anhang A1: Sicherheitsfunktionen und Prinzipien

Die Elemente des Barrierensystems müssen eine Reihe von *Sicherheitsfunktionen* gewährleisten, welche einen unerwünschten direkten Kontakt des Menschen mit den radioaktiven Abfällen verhindern, die Freisetzung von Radionukliden aus dem geologischen Tiefenlager klein halten und damit die radiologische Langzeitsicherheit des Tiefenlagers und den Schutz des spaltbaren Materials vor unerwünschtem menschlichen Zugriff gewährleisten. Die Sicherheitsfunktionen umfassen:

- *Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum und Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität des Barrierensystems* – Die Sicherheit der Abfälle, inkl. Schutz des spaltbaren Materials vor unerwünschtem menschlichen Zugriff (Non-Proliferation, Schutz bei Krisen) und der Schutz vor unbeabsichtigtem menschlichen Eindringen wird sichergestellt durch die Anordnung der Lagerkammern tief im Untergrund, wobei alle Zugangswege verfüllt und versiegelt werden. Dies schützt das Lager auch vor Prozessen und Ereignissen an der Erdoberfläche, welche die Sicherheit eines Lagers an der Oberfläche gefährden könnten (z.B. Krieg, Unruhen, zukünftige Vergletscherungen, Erosion etc.). Durch die Vermeidung von absehbaren Nutzungskonflikten wird zudem die Wahrscheinlichkeit eines Anbohrens des Tiefenlagers (z.B. in Zusammenhang mit dem Abbau von Rohstoffvorkommen) klein gehalten.
- *Einschluss der Radionuklide* – Ein grosser Teil der bei der Einlagerung vorhandenen Radionuklide zerfällt in stabile Nuklide im Zeitintervall, währenddessen diese vollständig in den Abfallgebinden eingeschlossen sind. Dies gilt speziell für BE und HAA, welche in massiven Endlagerbehältern platziert werden, die dank günstiger geochemischer und felsmechanischer Bedingungen während mehrerer tausend Jahre einen vollständigen Einschluss bieten. Auch nachdem die Behälter undicht geworden sind, stellen sie weiterhin eine Barriere für den Radionuklidtransport dar aufgrund des begrenzten Wasserzutritts zur Abfallmatrix und aufgrund der für viele Radionuklide günstigen Retentionseigenschaften der Behälterkorrosionsprodukte.
- *Verzögerte Freisetzung der Radionuklide* – Auch nachdem die Abfallgebinde undicht geworden sind, ist die Rate, mit der die Radionuklide aus der Abfallmatrix freigesetzt werden, dank günstiger geochemischer Bedingungen (insbesondere durch die vorherrschenden reduzierenden Bedingungen) sehr niedrig. Dies gilt speziell für BE (stabile UO_2- bzw. MOX-Matrix) und HAA (stabile Glasmatrix), aber auch für diejenigen LMA und SMA, bei denen ein Grossteil der Radionuklide in langsam korrodierendem Stahl eingebettet ist.
- *Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre* – Nachdem Radionuklide aus der Abfallmatrix freigesetzt worden sind, werden sie dank vielfältiger günstiger Eigenschaften der technischen und natürlichen Barrieren (günstige geochemische Bedingungen im Nahfeld und in der Geosphäre, geringe Wasserführung im Wirtgestein und allenfalls vorhandenen Rahmengesteinen sowie günstige Ausbildung ihrer Porenräume etc.) nur sehr langsam durch die Nahfeldbarrieren (Verfüllung / Versiegelung) und das Wirtgestein sowie allenfalls vorhandene Rahmengesteine transportiert. Dabei findet radioaktiver Zerfall statt, was die Freisetzung von Radionukliden aus dem geologischen Tiefenlager in den menschlichen Lebensraum weiter reduziert.

- *Kleine Freisetzungsraten* – Eine Vielzahl von zusätzlichen Prozessen, die während des Transports der Radionuklide in Richtung menschlicher Lebensraum wirksam sind, trägt dazu bei, dass die Radionuklidkonzentration in diesem Lebensraum sehr klein bleibt. Dazu gehören der radioaktive Zerfall während des Transports sowie die zeitliche und räumliche Verteilung der Radionuklide durch Sorption, Diffusion, hydrodynamische Dispersion und Verdünnung.

Neben den Sicherheitsfunktionen sind bei der Festlegung des Barrierensystems auch folgende Prinzipien zu berücksichtigen:

- *Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager* – Mit diesem Prinzip soll sichergestellt werden, dass die Lager entsprechend den Vorgaben der Sicherheit zuverlässig gebaut, betrieben und verschlossen werden können.
- *Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen* – Mit diesem Prinzip soll sichergestellt werden, dass für die gewählten Standorte die notwendigen geologischen Informationen in einer Zuverlässigkeit und Genauigkeit erhoben werden können, wie sie für die Analyse der Sicherheit erforderlich sind. Dazu sind insbesondere die Charakterisierbarkeit der Eigenschaften der Wirtgesteine, die Explorierbarkeit der geometrischen Verhältnisse inkl. Erfassung der Zustandsparameter, von Bedeutung.
- *Begrenzung des Einflusses ungünstiger Phänomene, inkl. lagerbedingter Einflüsse* – Mit diesem Prinzip soll sichergestellt werden, dass der Einfluss ungünstiger Phänomene auf die Langzeitsicherheit begrenzt bleibt. Dazu gehören auch lagerbedingte Einflüsse wie z.B. die Bildung einer Auflockerungszone um die Lagerkammern, die Auswirkungen einer pH-Fahne auf die technischen und natürlichen Barrieren, die Auswirkungen der Gasbildung und die Auswirkungen einer erhöhten Temperatur auf die technischen und natürlichen Barrieren.

Anhang A2: Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter und Gegenüberstellung mit den bei der Auswahl von geologischen Standortgebieten verwendeten Indikatoren

Tab. A2-1: Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter aus den Sicherheitsfunktionen und aus den übergeordneten Prinzipien.

Vergleiche gegenüberliegende Seite und folgende.

Die Tabelle stützt sich ab auf Tab. 5.3-1 in Nagra (2008d), zusätzlich enthält sie die Spalte 'Relevante Prozesse und Parameter': **Fett markierte Prozesse und Parameter** fliessen direkt in die quantitative Analyse der Sicherheit (Systemanalysen bzw. Berechnung der Dosiskurven) ein und/oder werden bei der Anlagenplanung zur Berücksichtigung standortspezifischer Aspekte verwendet (Prozesse/Parameter für die Anlagenauslegung / Anordnung der Lagerkammern (PB), Prozesse / Parameter für die Sicherheit mit Bezug zu den technischen Barrieren (PT) bzw. den geologischen Barrieren (PG)). *Kursiv markierte Prozesse und Parameter* fliessen in die qualitative Bewertung ein (Kombination ***fett/kursiv*** möglich; mit PI bezeichnete Prozesse/Parameter fliessen ausschliesslich in die qualitative Bewertung ein). Wie in Tabelle 5.3-1 in Nagra (2008d) werden in der vorliegenden Tabelle nur die wichtigsten Zusammenhänge aufgezeigt.

Die Nummerierung der Sicherheitsfunktionen, Prinzipien, Elemente des Barrierensystems und sicherheitsrelevanten Eigenschaften wurde aus Tabelle 5.3-1 in Nagra (2008d) übernommen. Die relevanten Prozesse und Parameter werden insbesondere dort aufgeführt, wo sie einen bedeutenden Einfluss haben; Hinweise auf Zusammenhänge von untergeordneter Bedeutung werden der Übersichtlichkeit halber weggelassen. Die identifizierten Prozesse und Parameter aus Tab. A2-1 werden in Tab. 3.2-1 zusammengefasst und dort aufsteigend nummeriert.

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
I S1 Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum ("Isolation") S2 Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität des Barrierensystems	B1 Anordnung der Lagerkammern tief im Untergrund	E1 Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum E2 Schutz des Lagers vor Prozessen und Ereignissen an der Erdoberfläche im Betrachtungszeitraum (z.B. Erosion)	Hebung, grossräumige Erosion und glaziale Tiefenerosion (Abnahme der Gesteinsüberdeckung, aber keine Freilegung der Lagerkammern innerhalb des Betrachtungszeitraums [1]): ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung*** (PG-1) ***Glazial übertiefte Felsrinnen*** (PG-2) ***Zeitl. Entwicklung regionale Erosionsbasis*** (PG-4) Klimaentwicklung und langfristige geomorphologische Veränderungen der Erdoberfläche: ***Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung*** (PG-28, Einebnung) ***Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung*** (PG-30, verschiedene Phasen der Klimaentwicklung)	'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum'	2.2 Erosion

[1] Der Betrachtungszeitraum wurde im Rahmen der sicherheitstechnischen Arbeiten in SGT Etappe 1 festgelegt. Er beträgt 100'000 Jahre für das SMA-Lager und 1 Million Jahre für das HAA-Lager. Die Ableitung der Betrachtungszeiträume wurde vom ENSI (2010b) als nachvollziehbar beurteilt.

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
I S1 Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum ("Isolation") S2 Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität des Barrierensystems	B2 Geologische Situation	E3 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften E4 Schutz vor unzulässiger Erosion	Neotektonische Aktivität und Gesteinsverhalten über lange Zeiträume; differenzielle Bewegungen des Gesteinsverbandes (Zerscherung, Reaktivierung von Brüchen und Störungszonen), seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus, Bruchbildung infolge grosser Erdbeben etc.), Selbstabdichtung, Bildung neuer Wasserwegsamkeiten durch Verkarstung: *Geodynamische und neotektonische Aktivität* (PI-2, Häufigkeit und Beschaffenheit von reaktivierbaren Störungszonen, Verlängerung von Störungszonen in lateraler und vertikaler Richtung, Seismizität) *Vulkanische Aktivität* (PI-3) *Selbstabdichtungsvermögen* (PI-6) ***Lage und Beschaffenheit von verkarstungsfähigen Gesteinen innerhalb des Wirtgesteins*** (PG-12)	'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik' 'Seismizität' 'Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)' 'Selbstabdichtungsvermögen' 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)'	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
I S1 Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum ("Isolation") S2 Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität des Barrierensystems	B2 Geologische Situation	E3 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften E4 Schutz vor unzulässiger Erosion	Hebung, grossräumige Erosion und glaziale Tiefenerosion (Abnahme der Gesteinsüberdeckung, aber keine Freilegung der Lagerkammern innerhalb des Betrachtungszeitraums): ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung*** (PG-1) ***Glazial übertiefte Felsrinnen*** (PG-2) ***Zeitl. Entwicklung regionale Erosionsbasis*** (PG-4) Klimaentwicklung und langfristige geomorphologische Veränderungen der Erdoberfläche: ***Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung*** (PG-28, Einebnung) ***Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung*** (PG-30, verschiedene Phasen der Klimaentwicklung)	'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum'	2.2 Erosion

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
I S1 Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum ("Isolation") S2 Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität des Barrierensystems	B2 Geologische Situation	E5 Geringe Wahrscheinlichkeit von menschlichem Eindringen dank Abwesenheit von absehbaren Nutzungskonflikten	Nutzungskonflikte; Beeinträchtigung des Barrierensystems (Schichtverletzungen, Anbohren Lagerkammer [2]): *Nutzung der Gesteine als Rohstoff* (PI-1) *Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins* (PG-32) *Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins* [3] (PG-33) ***Nutzungskonflikte hinsichtlich Mineralquellen und Thermen*** (PB-10) *Nutzungskonflikte hinsichtlich Geothermie* (PG-34)	'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' 'Mineralquellen und Thermen' 'Geothermie'	2.4 Nutzungskonflikte
II S3 Einschluss der Radionuklide ("Einschluss")	B3 Endlagerbehälter B4 Weitere technische Barrieren	E6 Korrosionsbeständigkeit	Korrosion der Endlagerbehälter (Stahl, alternative Materialien): ***pH*** (PG-16) ***Redox-Bedingungen*** (PG-17) ***Salinität*** (PG-18) **Behälterlebensdauer BE/HAA** (PT-1)	'Redox-Bedingungen' 'Salinität' 'pH'	1.3 Geochemische Bedingungen

[2] Gemäss Vorgabe des ENSI ist das menschliche Eindringen in ein geologisches Tiefenlager von einer Betrachtung in der quantitativen Sicherheitsanalyse in Etappe 2 ausgeschlossen. Hingegen sind Nutzungskonflikte in der qualitativen Bewertung der Standorte zu berücksichtigen, und eine Betrachtung des menschlichen Eindringens in ein geologisches Tiefenlager in späteren Analysen bleibt vorbehalten.

[3] Der mögliche Abbau von Gesteinen kann zu einer Änderung der Überlagerung und des Spannungsfelds und im Extremfall zu einer Gesteinsdekompaktion führen, dies wurde im Rahmen der Testrechnungen nicht berücksichtigt.

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
II S3 Einschluss der Radionuklide ("Einschluss")	B3 Endlagerbehälter B4 Weitere technische Barrieren	E7 Geometrische Bedingungen (laterale Ausdehnung und Mächtigkeit bzw. Platzangebot unter Berücksichtigung der Tiefenlage und bereichsbegrenzender geologischer Elemente) E8 Geomechanische Bedingungen	Räumliche Ausdehnung des Wirtgesteinskörpers: ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit*** (PB-1) ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung*** (PG-1) ***Glazial übertiefte Felsrinnen*** (PG-2) ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion*** (PG-3) ***Mächtigkeit*** (PG-5) ***Gebietsbegrenzende geologische Elemente*** (PB-2) ***Anordnungsbestimmende geologische Elemente*** (PB-3) ***Platzangebot untertags*** (PB-4) Geomechanische Beanspruchung der Endlagerbehälter durch Gebirgsspannungen und neotektonische Aktivität / differenzielle Bewegungen im Tiefenlagerbereich (Auswirkungen minimiert durch Vermeidung von gebietsbegrenzenden geologischen Elementen): ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit*** (PB-1) ***In-situ-Gebirgsspannungen*** (PB-6) **Behälterlebensdauer BE/HAA** (PT-1)	'Mächtigkeit' 'Platzangebot untertags' 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit' 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'	1.1 Räumliche Ausdehnung

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
II S3 Einschluss der Radionuklide ("Einschluss")	B3 Endlagerbehälter B4 Weitere technische Barrieren	E7 Geometrische Bedingungen (laterale Ausdehnung und Mächtigkeit bzw. Platzangebot unter Berücksichtigung der Tiefenlage und bereichsbegrenzender geologischer Elemente) E8 Geomechanische Bedingungen	Beschleunigte Degradation der technischen Barrieren infolge Hebung/Erosion (Gesteins-Dekompaktion, aber keine Freilegung der Lagerkammern innerhalb des Betrachtungszeitraums): ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung*** (PG-1) ***Glazial übertiefte Felsrinnen*** (PG-2) ***Zeitl. Entwicklung regionale Erosionsbasis*** (PG-4) ***Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung*** (PG-28, Einebnung) ***Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung*** (PG-30, verschiedene Phasen der Klimaentwicklung) **Behälterlebensdauer BE/HAA** (PT-1)	'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum'	2.2 Erosion
			Nutzungskonflikte; Beeinträchtigung des Barrierensystems (Schichtverletzungen, Anbohren Lagerkammer [2)]): *Nutzung der Gesteine als Rohstoff* (PI-1) *Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins* (PG-32) *Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins* (PG-33) ***Nutzungskonflikte hinsichtlich Mineralquellen und Thermen*** (PB-10) *Nutzungskonflikte hinsichtlich Geothermie* (PG-34)	'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' 'Mineralquellen und Thermen' 'Geothermie'	2.4 Nutzungskonflikte

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
II S3 Einschluss der Radionuklide ("Einschluss")	B3 Endlagerbehälter B4 Weitere technische Barrieren	E7 Geometrische Bedingungen (laterale Ausdehnung und Mächtigkeit bzw. Platzangebot unter Berücksichtigung der Tiefenlage und bereichsbegrenzender geologischer Elemente) E8 Geomechanische Bedingungen	Technische Machbarkeit (Bau, Betrieb, Überwachung, Verschluss, Rückholung der Abfälle): ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit*** (PB-1) ***Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein*** (PB-7) ***In-situ-Gebirgsspannungen*** (PB-6)	'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit' 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen
III S4 Verzögerte Freisetzung der Radionuklide ("verzögerte Freisetzung")	B5 Abfallmatrix	E9 Korrosionsbeständigkeit (Eh, pH), speziell nach Behälterversagen	Korrosion der Abfallmatrix und Hüllrohre (Korrosionsraten): ***pH*** (PG-16) ***Redox-Bedingungen*** (PG-17) ***Salinität*** (PG-18) **Auflösungsrate für Brennstoffmatrix und Hüllrohre BE** (PT-2)	'Redox-Bedingungen' 'Salinität' 'pH'	1.3 Geochemische Bedingungen
		E10 Stabilität der Abfallmatrix dank geringem Wasserfluss	Korrosion der Abfallmatrix und Hüllrohre (Korrosionsraten): ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion*** (PG-3) ***Grossräumige hydraul. Durchlässigkeit*** (PG-6) ***Einfluss Dekompaktion auf hydraulische Durchlässigkeit*** (PG-7) ***Hydraulischer Gradient*** (PG-8)	'Hydraulische Durchlässigkeit' 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'	1.2 Hydraulische Barrierenwirkung

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
IV S5 Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung") S6 Kleine Freisetzungsraten	B3 Endlagerbehälter	E11 Rückhaltung durch degradierten Behälter (Korrosionsprodukte)	Radionuklidsorption an Behälterkorrosionsprodukten (Sorptionskoeffizient): ***pH*** (PG-16) ***Redox-Bedingungen*** (PG-17) ***Salinität*** (PG-18) **Sorptionskoeffizienten im Nahfeld** (PT-4)	'Redox-Bedingungen' 'Salinität' 'pH'	1.3 Geochemische Bedingungen
	B6 Verfüllung B7 Verfüllung & Versiegelung	E12 Stabilität der Verfüll- und Versiegelungsmaterialien (geringe Wasserführung im Wirtgestein, geochemische Bedingungen) E13 Rückhaltung dank günstiger Transporteigenschaften (geringe Wasserführung im Wirtgestein, Löslichkeitslimitierung, Sorption, Diffusion, Kolloidfilter)	Zeitliche Entwicklung der Verfüll- und Versiegelungsmaterialien (insbesondere chemische Degradation durch Mineralauflösung/-umwandlung/-ausfällung): **Transportrelevante Eigenschaften Interface BE/HAA-Lagerstollen/Wirtgestein** (PT-6, hydraulische Durchlässigkeit, Sorptions- und Diffusionskoeffizienten) ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion*** (PG-3) **Advektion bzw. Diffusion im Nahfeld** (PT-5) ***Grossräumige hydraul. Durchlässigkeit*** (PG-6) ***Einfluss Dekompaktion auf hydraulische Durchlässigkeit*** (PG-7) ***Hydraulischer Gradient*** (PG-8)	'Hydraulische Durchlässigkeit' 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'	1.2 Hydraulische Barrierenwirkung

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
IV S5 Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung") S6 Kleine Freisetzungsraten	B6 Verfüllung B7 Verfüllung & Versiegelung	E12 Stabilität der Verfüll- und Versiegelungsmaterialien (geringe Wasserführung im Wirtgestein, geochemische Bedingungen) E13 Rückhaltung dank günstiger Transporteigenschaften (geringe Wasserführung im Wirtgestein, Löslichkeitslimitierung, Sorption, Diffusion, Kolloidfilter)	Radionuklidrückhaltung in Verfüll- und Versiegelungsmaterialien durch Löslichkeitslimitierung, Sorption, diffusionsdominierten Transport und Kolloidfiltration: ***pH*** (PG-16) ***Redox-Bedingungen*** (PG-17) ***Salinität*** (PG-18) **Löslichkeitslimiten im Nahfeld BE/HAA/LMA** (PT-3) **Sorptionskoeffizienten im Nahfeld** (PT-4, unter Berücksichtigung der Degradation) **Advektion bzw. Diffusion im Nahfeld** (PT-5)	'Redox-Bedingungen' 'Salinität' 'pH'	1.3 Geochemische Bedingungen

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
IV S5 Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung") S6 Kleine Freisetzungsraten	B8 Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich	E14 Rückhaltung (Sorption, beeinflusst durch Mineralogie, Eh, pH, Salinität, mikrobielle Prozesse; Einfluss Kolloide)	Radionuklidrückhaltung im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch Sorption und Kolloidfiltration: ***Mineralogie*** (PG-15) ***pH*** (PG-16) ***Redox-Bedingungen*** (PG-17) ***Salinität*** (PG-18) ***Mikrobielle Prozesse*** (PG-19) ***Kolloidfiltration*** (PG-20) ***Sorptionskoeffizienten für WG/EG*** (PG-21, unter Berücksichtigung der geochemischen Bedingungen)	'Mineralogie' 'pH' 'Redox-Bedingungen' 'Salinität' 'Mikrobielle Prozesse' 'Kolloide'	1.3 Geochemische Bedingungen

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
IV S5 Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung") S6 Kleine Freisetzungsraten	B8 Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich	E15 Transporteigenschaften (geringe Wasserführung, vorherrschende Transportprozesse (Advektion, Diffusion), Art und Länge der Freisetzungspfade)	Radionuklidtransport durch Advektion/Diffusion im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich: ***Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit*** (PG-6) ***Einfluss Dekompaktion auf hydraulische Durchlässigkeit*** (PG-7) ***Tiefenlage im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion*** (PG-3) ***Hydraulischer Gradient*** (PG-8) ***Porosität*** (PG-10) ***Diffusionskoeffizienten für WG/EG*** (PG-22, unter Berücksichtigung der zugänglichen Porosität) *Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation* (PI-4)	'Hydraulische Durchlässigkeit' 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' 'Grundwasserstockwerke' 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation'	1.2 Hydraulische Barrierenwirkung

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
IV S5 Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung") S6 Kleine Freisetzungsraten	B8 Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich	E15 Transporteigenschaften (geringe Wasserführung, vorherrschende Transportprozesse (Advektion, Diffusion), Art und Länge der Freisetzungspfade)	Radionuklidtransport durch Advektion/Diffusion in präferenziellen Freisetzungspfaden und Matrixdiffusion in die angrenzende Gesteinsmatrix: ***Art der Transportpfade*** (PG-9, äquivalent-poröses Medium vs. Kluftnetzwerk, Channeling, Matrixdiffusion) ***Porosität*** (PG-10) ***Sedimentäre Architekturelemente*** (PG-11) ***Länge der Transportpfade*** (PG-13, inkl. laterale Transportpfadanteile) ***Transmissivität Störungszonen*** (PG-14, unter Berücksichtigung des Tongehalts bzw. des Selbstabdichtungsvermögens) *Selbstabdichtungsvermögen* (PI-6)	'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' 'Länge der Freisetzungspfade' 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade' 'Selbstabdichtungsvermögen'	1.4 Freisetzungspfade

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
IV S5 Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung") S6 Kleine Freisetzungsraten	B8 Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich	E16 Räumliche Ausdehnung Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Technische Machbarkeit, beeinflusst durch die laterale Ausdehnung, die Mächtigkeit und durch das Platzangebot untertags (unter Berücksichtigung der Tiefenlage und der gebietsbegrenzenden geologischen Elemente): ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit*** (PB-1) ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung*** (PG-1) ***Glazial übertiefte Felsrinnen*** (PG-2) ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion*** (PG-3) ***Mächtigkeit*** (PG-5) ***Gebietsbegrenzende geologische Elemente*** (PB-2) ***Anordnungsbestimmende geologische Elemente*** (PB-3) ***Platzangebot untertags*** (PB-4)	'Mächtigkeit' 'Platzangebot untertags' 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit' 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'	1.1 Räumliche Ausdehnung

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
IV S5 Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung") S6 Kleine Freisetzungsraten	B8 Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich	E17 Geringe lagerbedingte Einflüsse (keine Kurzschlüsse, geringe Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs)	Lagerbedingte Einflüsse auf Radionuklidtransport: Bildung einer Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten, chemische Wechselwirkungen (insbesondere pH-Fahne), Gasbildung/-transport und gasinduzierter Radionuklidtransport, thermische Prozesse (jeweils unter Berücksichtigung des Selbstabdichtungsvermögens): ***Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten*** (PG-23) ***Auswirkungen pH-Fahne auf Wirtgestein*** (PG-24) ***Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas*** (PG-25) ***Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur*** (PG-26) ***In-situ-Temperatur*** (PB-5) *Selbstabdichtungsvermögen* (PI-6)	'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten' 'Chemische Wechselwirkungen' 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas' 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur' 'Selbstabdichtungsvermögen'	2.3 Lagerbedingte Einflüsse

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
V P1 Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager: Zuverlässigkeit der Implementierung Zuverlässigkeit des Lagerverschlusses Sicherheit während des Betriebs	B8 Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich	E18 Flexibilität / Reserven (räumliche Ausdehnung unter Berücksichtigung der Ungewissheiten in den bereichsbegrenzenden geologischen Elementen und den anordnungsbestimmenden Störungszonen)	Technische Machbarkeit, beeinflusst durch die laterale Ausdehnung, die Mächtigkeit und durch das Platzangebot untertags (unter Berücksichtigung der Tiefenlage und der gebietsbegrenzenden geologischen Elemente): ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit*** (PB-1) ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung*** (PG-1) ***Glazial übertiefte Felsrinnen*** (PG-2) ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion*** (PG-3) ***Mächtigkeit*** (PG-5) ***Gebietsbegrenzende geologische Elemente*** (PB-2) ***Anordnungsbestimmende geologische Elemente*** (PB-3) ***Platzangebot untertags*** (PB-4) **Auslegung der Lagerkammern** (PT-7)	'Mächtigkeit' 'Platzangebot untertags' 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit' 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'	1.1 Räumliche Ausdehnung

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
V P1 Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager: Zuverlässigkeit der Implementierung Zuverlässigkeit des Lagerverschlusses Sicherheit während des Betriebs	B8 Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich B7 Verfüllung & Versiegelung	E19 Geotechnische Eigenschaften	Technische Machbarkeit des geologischen Tiefenlagers (Bau, Betrieb, Überwachung, Verschluss, Rückholung der Abfälle): ***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit*** (PB-1) ***Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein*** (PB-7) ***In-situ-Gebirgsspannungen*** (PB-6) **Auslegung der Lagerkammern** (PT-7)	'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit' 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen
	B2 Geologische Situation	E20 Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse	Technische Machbarkeit der untertägigen Erschliessung (Bau, Betrieb, Überwachung, Verschluss, Rückholung der Abfälle): ***Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen*** (PB-8) ***Natürliche Gasführung des Wirtgesteisn*** (PB-9) **Oberflächensituation** (PB-11)	'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' 'Natürliche Gasführung (des Wirtgesteins)'	4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
VI P2 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen: Charakterisierbarkeit Explorierbarkeit Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	B8 Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich	E21 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Gesteinseigenschaften)	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen zu den Gesteinseigenschaften: *Variabilität der Gesteinseigenschaften* (PI-5, insbesondere höher durchlässige präferenzielle Freisetzungspfade) *Erfahrungen* (mit vergleichbaren Gesteinen, PI-7) ***Gebietsbegrenzende geologische Elemente*** (PB-2) ***Anordnungsbestimmende geologische Elemente*** (PB-3)	'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' 'Erfahrungen'	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine
	B2 Geologische Situation	E22 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (räumliche Aspekte)	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen zu räumlichen Aspekten: Regionales Störungsmuster/Lagerungsverhältnisse/ kleinräumige Zergliederung *Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund* (PI-8) *Explorationsbedingungen an Oberfläche* (PI-9, Topographie, Tiefenlage der seismischen Marker, Oberflächennutzung, Ankopplungsbedingungen) **Relevante Exfiltrationspfade** (PG-27)	'Kontinuität der interessierenden Schichten' 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' 'Explorationsbedingungen an Oberfläche'	3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
VI P2 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen: Charakterisierbarkeit Explorierbarkeit Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	B2 Geologische Situation B8 Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich	E23 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (zeitliche Aspekte)	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen zu Langzeitveränderungen (inklusive Biosphäre): ***Zeitliche Entwicklung regionale Erosionsbasis*** (PG-4) *Geodynamische und neotektonische Aktivität* (PI-2, Häufigkeit und Beschaffenheit von reaktivierbaren Störungszonen, Verlängerung von Störungszonen in lateraler und vertikaler Richtung, Seismizität) *Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation* (PI-4, Einschluss alter Porenwässer, Verweilzeiten der Tiefenwässer, Existenz von Tracerprofilen) ***Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung*** (PG-30, verschiedene Phasen der Klimaentwicklung) **Relevante Exfiltrationspfade** (PG-27) **Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf Biosphärenmodellierung** (PG-29, Geomorphologie-Typen) **Klimaentwicklung im Hinblick auf Abschätzung der Wasserflüsse bei der Biosphärenmodellierung** (PG-31, verschiedene Klimavarianten, insbesondere wärmeres trockeneres Klima und eiszeitliches Klima)	'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik' 'Seismizität' 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation'	3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen

Tab. A2-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Relevante Prozesse und Parameter** im Kontext sowie Erläuterungen	**Indikatoren für die qualitative Bewertung**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**
VII P3 Lagerbedingte Einflüsse werden mit baulichen und/oder betrieblichen Mitteln so weit reduziert, wie dies als sinnvoll erachtet wird und mit vertretbarem Aufwand möglich ist. [4)]	B2 Geologische Situation B8 Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich	E17 Geringe lagerbedingte Einflüsse (keine Kurzschlüsse, geringe Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs)	Lagerbedingte Einflüsse auf Radionuklidtransport: Bildung einer Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten, chemische Wechselwirkungen (insbesondere pH-Fahne), Gasbildung/-transport und gasinduzierter Radionuklidtransport, thermische Prozesse (jeweils unter Berücksichtigung des Selbstabdichtungsvermögens): ***Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten*** (PG-23) ***Auswirkungen pH-Fahne auf Wirtgestein*** (PG-24) ***Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas*** (PG-25) ***Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur*** (PG-26) ***In-situ-Temperatur*** (PB-5) *Selbstabdichtungsvermögen* (PI-6)	'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten' 'Chemische Wechselwirkungen' 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas' 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur' 'Selbstabdichtungsvermögen'	2.3 Lagerbedingte Einflüsse

[4)] Dieses Prinzip wurde in Tabelle 5.3-1 in Nagra (2008d) im Kontext des Kriteriums 2.3 'Lagerbedingte Einflüsse' festgehalten, aber nicht als eigenständiges Prinzip aufgeführt.

Anhang A3: Grundlagen Geologie: Übersichten, wirtgesteins- und standortspezifische Zusammenstellungen

A3.1 Übersicht der Datenquellen: Seismiklinien, Bohrungen, Tunnels, geologische Karten

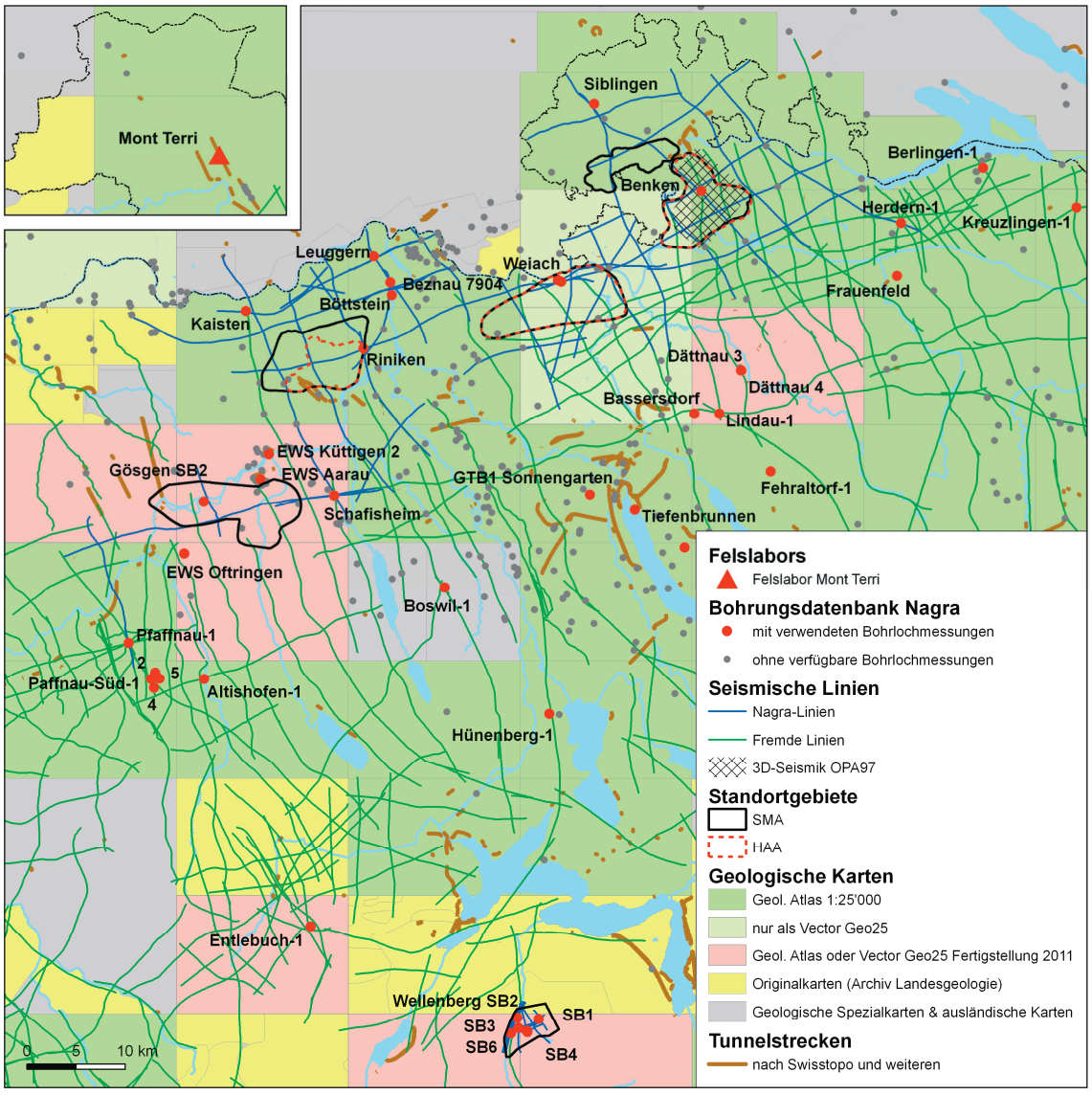


Fig. A3-1: Übersichtskarte der Datenquellen in und im Umfeld der geologischen Standortgebiete (Seismiklinien, Bohrungen, Tunnels, geologische Karten).

A3.2 Unterlagen zur Beurteilung potenzieller Nutzungskonflikte

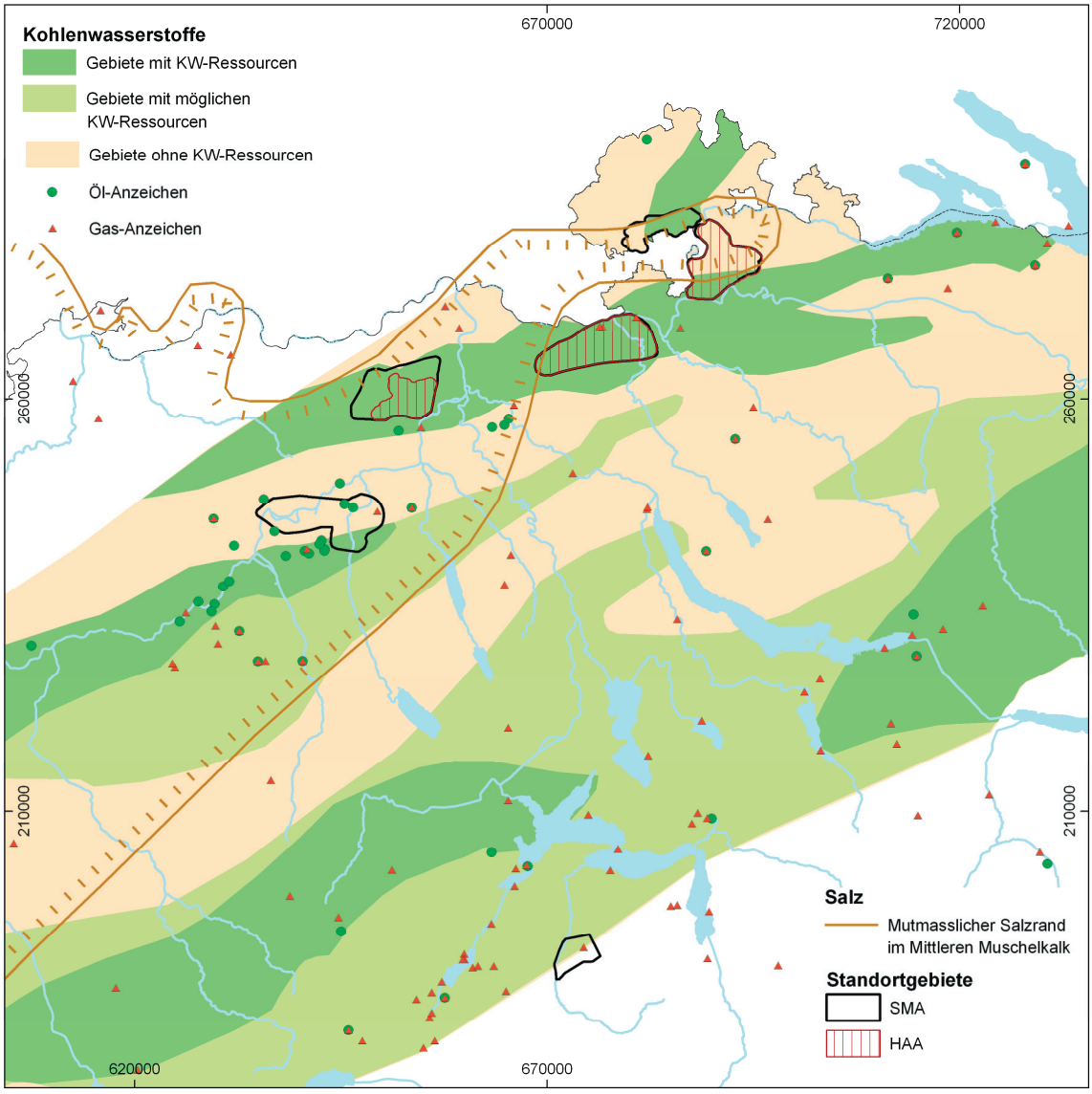


Fig. A3-2: Kohlenwasserstoffressourcen und Salzvorkommen.

Erläuterungen zur Erstellung dieser Karte in Nagra (2008c), Kapitel 5.2.6.1 und 5.2.6.2.

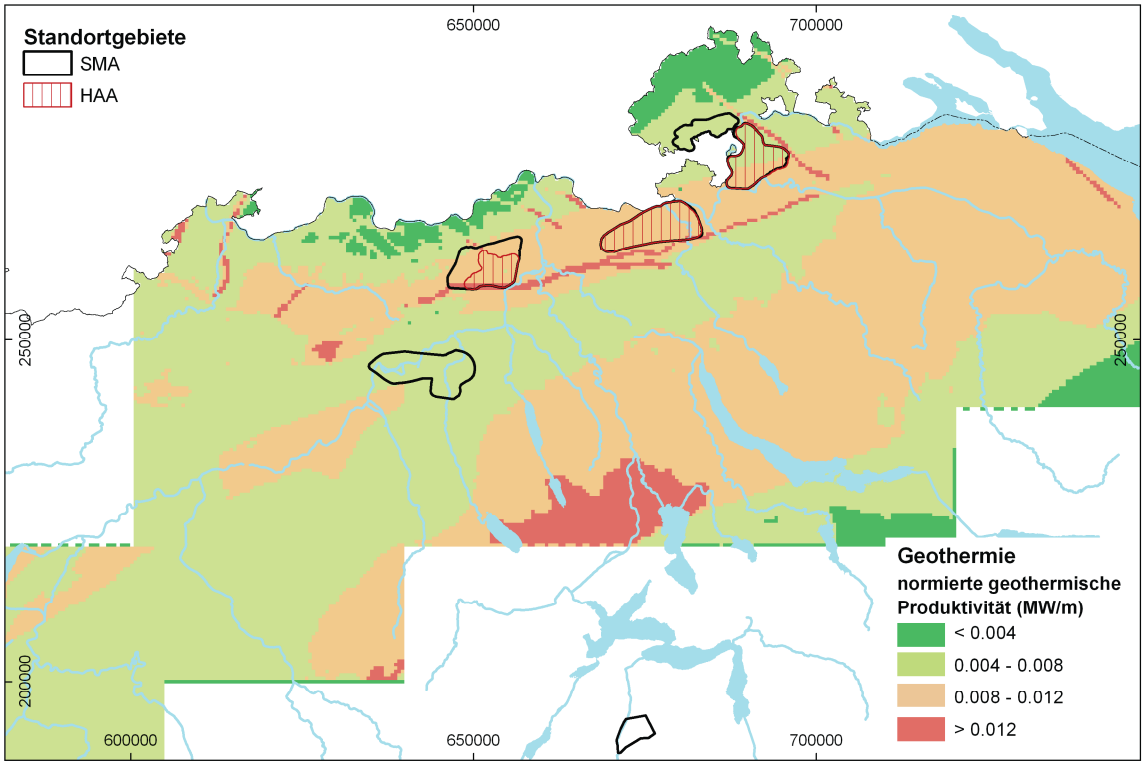


Fig. A3-3: Karte der normierten geothermischen Produktivität.

Erläuterungen zur Erstellung dieser Karte in Nagra (2008c), Kapitel 5.2.6.3. Die geothermische Produktivität im Standortgebiet Wellenberg wird als gering beurteilt (Nagra 2008b).

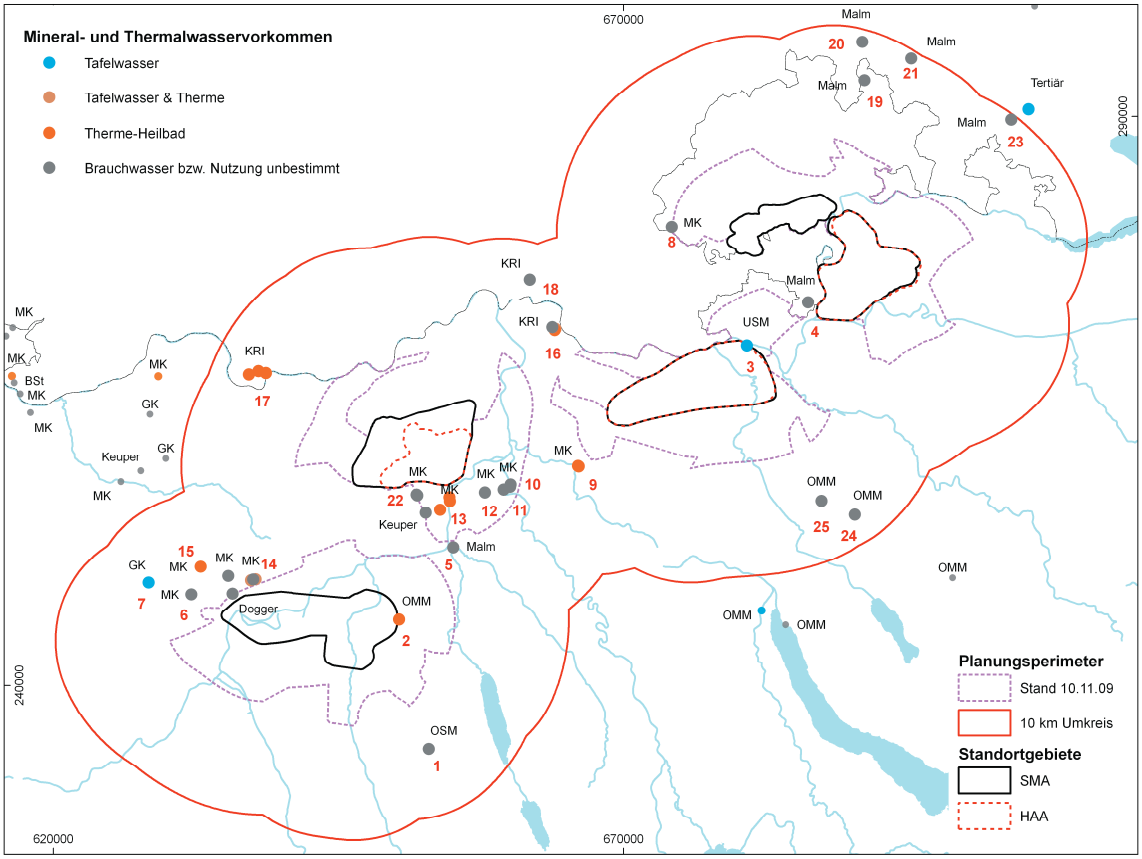


Fig. A3-4: Karte mit Mineral- und Thermalwasservorkommen im Abstand von 10 km zu den Entwürfen der Planungsperimeter gemäss ARE (2009).

Im und im näheren Umfeld des Standortgebiets Wellenberg sind keine Mineralquellen und Thermen vorhanden (Nagra 2008b).

Erläuterung der Abkürzungen:

KRI: kristallines Grundgebirge; BSt: Buntsandstein; MK: Muschelkalk; GK: Gipskeuper; USM: Untere Süsswassermolasse; OMM: Obere Meeresmolasse; OSM: Obere Süsswassermolasse.

1: Schwarzenberg, 2: Badquelle Gränichen, 3: Eglisau, 4: Lottstetten-Nack, 5: Wildegg (Jodquelle Möriken-Wildegg), 6: Alter Hauensteintunnel und Hauensteinbasistunnel, 7: Eptingen, 8: Trasadingen, 9: Baden und Ennetbaden, 10: Birmenstorf, 11: Mülligen, 12: Hausen-Habsburg, 13: Schinznach, 14: Lostorf, 15: Ramsach, 16: Zurzach, 17: Säckingen, 18: Tiengen-Waldshut, 19: Altdorf SH, 20: Tengen-Litzental, 21: Beuren-Ried, 22: Bözbergtunnel SBB, 23: Singen TB-1, 24: Bassersdorf, 25: Kloten.

A3.3 Geologische Modelle der Wirtgesteine in der Nordschweiz und zugrundeliegende Datenquellen

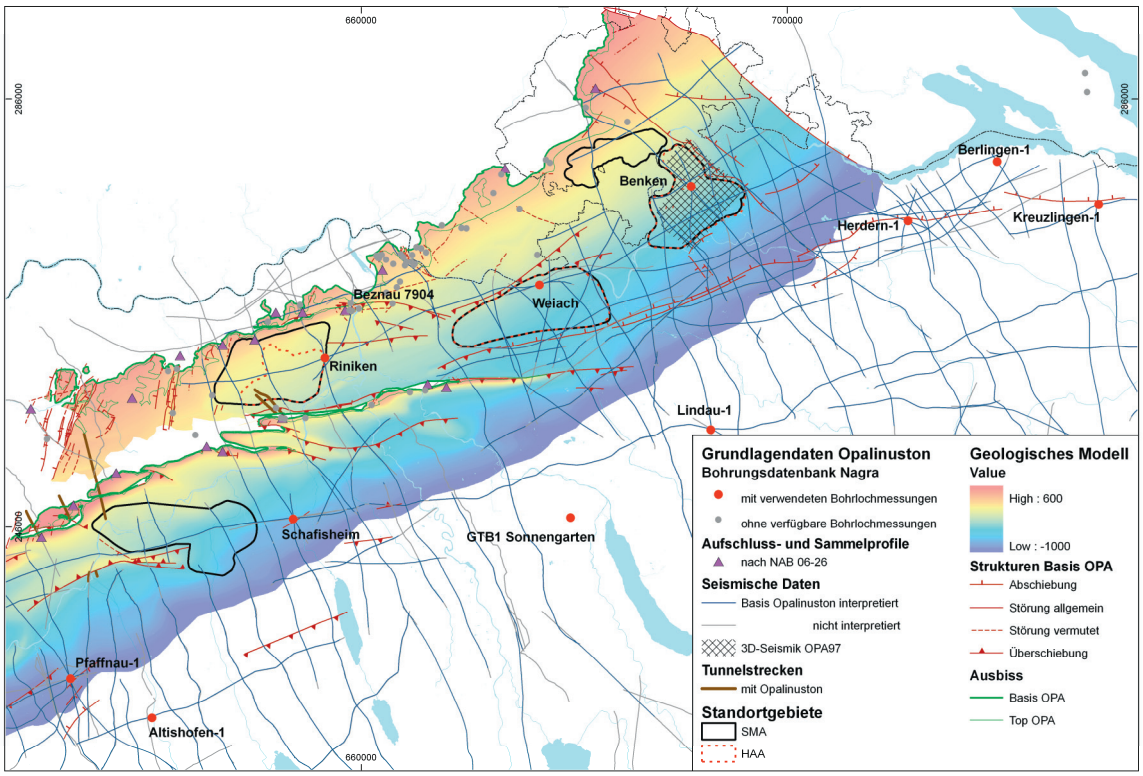


Fig. A3-5: Opalinuston: Geologisches Modell (Tiefenlage und regionale Strukturen Basis Opalinuston) und zugrundeliegende Datenquellen (Bohrungen, Aufschluss- und Sammelprofile, Seismik).

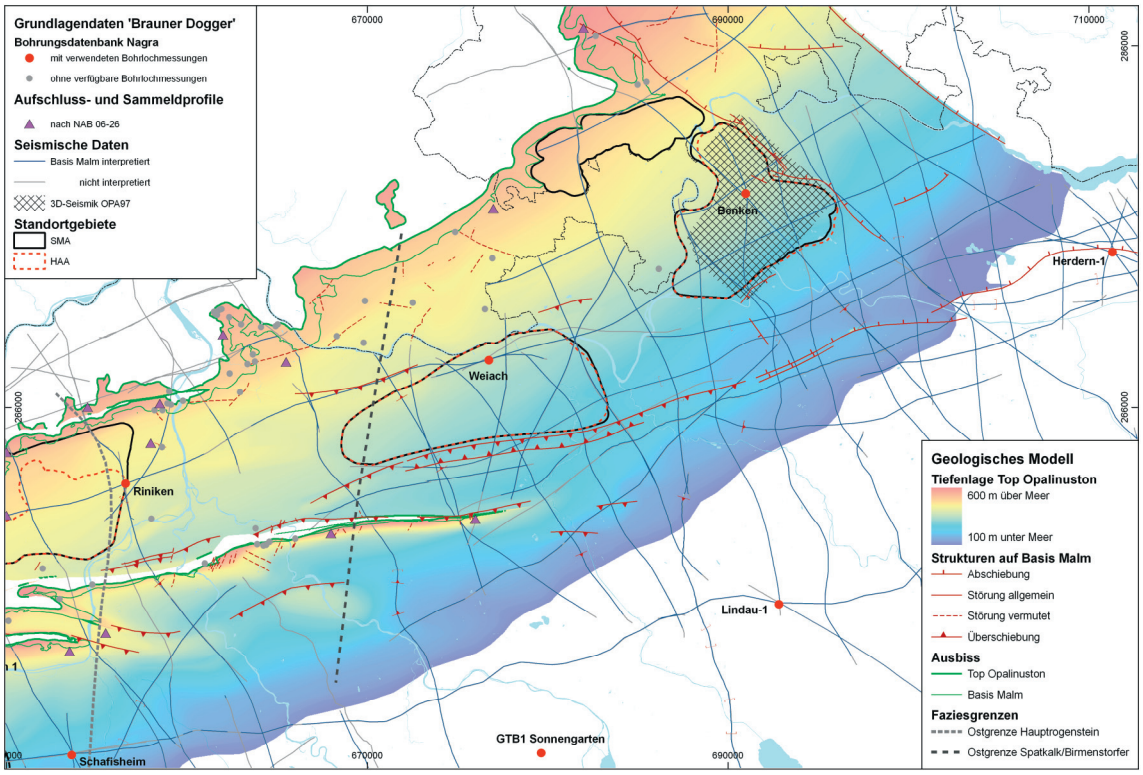


Fig. A3-6: 'Brauner Dogger': Geologisches Modell (Tiefenlage Top Opalinuston, regionale Strukturen Basis Malm, ungefährer Verlauf der Faziesgrenzen (vgl. Nagra 2008c)) und zugrundeliegende Datenquellen (Bohrungen, Aufschluss- und Sammelprofile, Seismik).

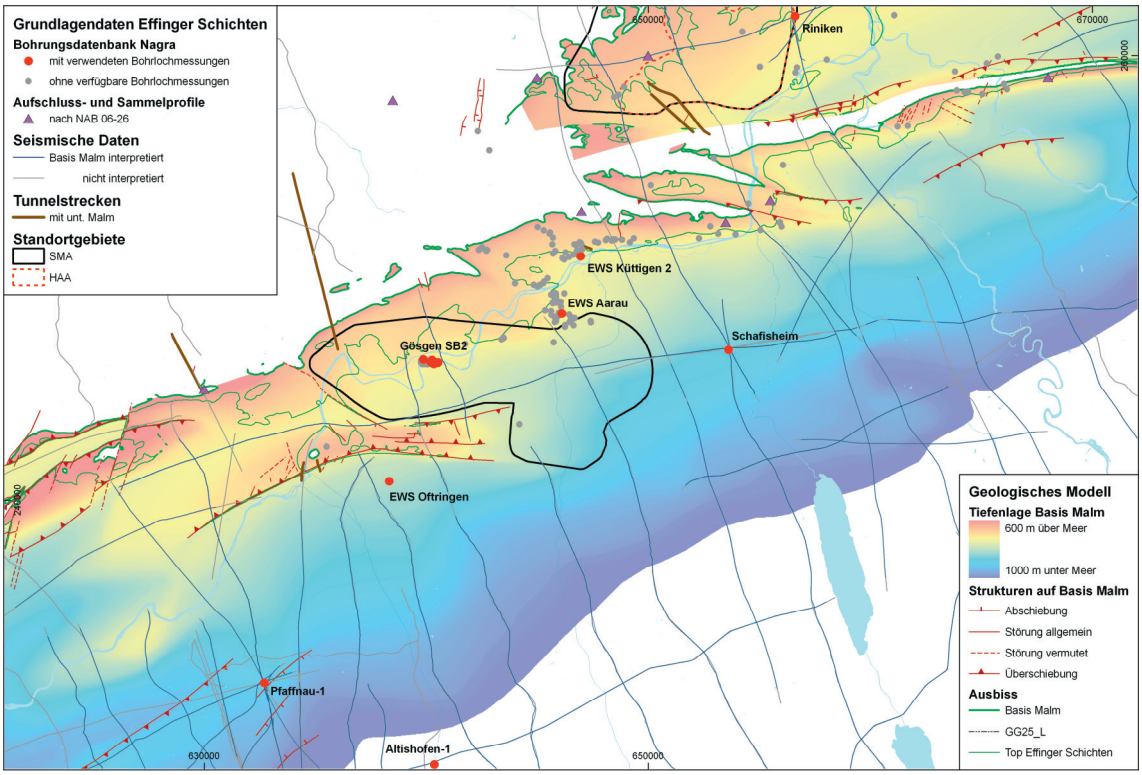


Fig. A3-7: Effinger Schichten: Geologisches Modell (Tiefenlage und regionale Strukturen Basis Malm) und zugrundeliegende Datenquellen (Bohrungen, Aufschluss- und Sammelprofile, Seismik).

A3.4 Ergebnisse von hydraulischen Tests in den Wirtgesteinen der Nordschweiz, in ihren Rahmengesteinen und in den umgebenden regionalen Tiefenaquiferen sowie vorgeschlagene Werte für die geologischen Standortgebiete

Tab. A3-1: Ergebnisse von hydraulischen Tests in den Wirtgesteinen der Nordschweiz, in ihren Rahmengesteinen und in den umgebenden Tiefenaquiferen.

Es sind nur Tests im Tiefenbereich > 100 m dargestellt. Die Ergebnisse der zahlreichen hydraulischen Tests in den Mergel-Formationen des Helvetikums in Nagra 1988b (Oberbauenstock) und 1997 (Wellenberg) dokumentiert.

Bohrung – Testbezeichnung, Intervall [m]	**Referenz**	**Lithologie**	**Länge Intervall L** [m]	**Hydr. Durchlässigkeit K** [m/s]		
				Min.	**Bester Schätzwert**	**Max.**
Wirtgestein Opalinuston						
Felslabor Mont Terri (mehr als 80 Tests)	Bossart & Thury 2008 (Tab. 8.2)	Opalinuston	Meter bis Dekameter	2E-14	2E-13	1E-12
Benken, O4/581.48, 566.45-596.50 [1)]	Croisé et al. 1999d	Dogger (Aalenian): Opalinuston	30.05	1.0E-14	6.7E-14	6.7E-13
Benken, O5/601.76, 600.07-603.45 [1)]		Dogger (Aalenian): Opalinuston	3.38	3.0E-15	2.7E-14	1.8E-13
Benken, O6/614.37, 605.13-623.60 [1)]	Croisé et al. 1999e	Dogger (Aalenian): Opalinuston	18.47	2.7E-14	1.6E-13	1.1E-12
Benken, O7/639.71, 623.72-655.70 [1)]		Dogger (Aalenian)-Lias (Toarc.): Opalinuston bis Jurensis-Mergel	31.98	2.5E-14	1.3E-13	1.3E-12
Riniken – 368.2S, 338.65-397.70	Ehrminger et al. 1995	Opalinuston	59.05	2E-14	1E-13	3E-13
Riniken – 413.9S, 397.70-430.10		Opalinuston	32.40	2E-14	8E-14	3E-13
Schafisheim – 1003.2D, 989.30-1017.16		Dogger / Opalinuston	27.86	1E-13		5E-13
Schafisheim – 1015.2D, 1001.30-1029.16		Opalinuston	27.86	1E-13	2E-13	5E-13
Schafisheim – 1042.8D, 1028.88-1056.74		Opalinuston	27.86	8E-14	-	2E-13
Schafisheim – 1065.6D, 1051.70-1079.56		Opalinuston	27.86	2E-13	4E-13	1E-12
[1)] Re-Analyse: neue Ergebnisse aller 4 Tests (O4 – O7): 1 – 6E-14 (NTB 02-03, Tab. 5.8-3)						
Wirtgestein Opalinuston (nicht verwendete Testergebnisse aufgrund von Problemen beim Testablauf, vgl. NTB 02-03, Kap. 5.8)						
Benken, D2-P1/556.64, 548.77-564.50	Croisé et al. 1999c	Dogger (Aalenian): Murchisonae-Sch. bis Opalinuston	15.73	1.3E-13	6.4E-13	3.2E-12
Benken, O1/551.28, 538.05-564.50		Dogger (Aalenian): Wedelsandstein-Murchisonae-Sch. bis Opalinuston	26.45			1.5E-11
Benken, O2/555.96, 547.42-564.50		Dogger (Aalenian): Murchisonae-Sch. bis Opalinuston	17.08			2.9E-11
Benken, O3/554.55, 544.60-564.50		Dogger (Aalenian): Murchisonae-Sch. bis Opalinuston	19.90	5.0E-14	2.5E-13	2.5E-12

Tab. A3-1: (Fortsetzung)

Bohrung – Testbezeichnung, Intervall [m]	**Referenz**	**Lithologie**	**Länge Intervall L** [m]	**Hydr. Durchlässigkeit K** [m/s]		
				Min.	**Bester Schätzwert**	**Max.**
Wirtgestein 'Brauner Dogger'						
Benken, MD1-P1/ 531.64, 498.77-564.50	Croisé et al. 1999b	Dogger (Bajoc.-Aal.): Subfurcaten-Sch. bis Opalinuston (Wedelsdst.)	65.73	7.6E-14	4.6E-13	3.0E-12
Benken, D1/516.94, 493.77-540.10	Croisé et al. 1999c	Dogger (Bath.-Aal.): Parkinsoni-Württ.-Sch. bis Murchisonae-Sch. (Wedelsdst.)	46.33			2.2E-12
Benken, D2/521.92, 496.27-547.57		Dogger (Bajoc.-Aal.): Subfurcaten-Ool. bis Murchisonae-Sch. (Wedelsdst.)	51.30	9.7E-13	1.9E-12	5.8E-12
Weiach – 479.6D, 472.0-487.2	Nagra 1989	Oberer Dogger, unterster Malm	15.2	sehr geringdurchlässig		
Weiach – 550.0D, 542.90-556.90	Ehrminger et al. 1995	Dogger / Opalinuston	14.00		3E-13	
Herdern 1 – 1715, 1706.5-1723.0 (Cas.)	Ehrminger et al. 1995	Dogger (Dogger-β-Sandstein)	16.50	5E-12	3E-11	1E-10

Tab. A3-1: (Fortsetzung)

Bohrung – Testbezeichnung, Intervall [m]	**Referenz**	**Lithologie**	**Länge Intervall L** [m]	**Hydr. Durchlässigkeit K** [m/s]		
				Min.	**Bester Schätzwert**	**Max.**
Wirtgestein Effinger Schichten						
Oftringen – Oftr-i2/615.02, 590.0-640.04	Fisch et al. 2008	Effinger Sch.: Kalkmergel + 4 KBA	50.04	3.6E-13	4.7E-13	5.6E-12
Oftringen – Oftr-i3/575.02, 550.0-600.04		Effinger Sch.: Kalkmergel + KBA	50.04	8.0E-13	2.0E-12	4.0E-12
Oftringen – Oftr-i4/525.02, 500.0-550.04		Effinger Sch.: Kalkmergel + 2 KBA	50.04	1.8E-14	4.1E-14	2.2E-13
Oftringen – Oftr-i5/474.87, 449.85-499.89		Effinger Sch.: Kalkmergel + 1 KBA	50.04	1.9E-14	3.0E-14	3.8E-14
Oftringen – Oftr-i7/637.05, 632.50-641.59		Effinger Sch.: Kalkmergel, Mergel + 1 KBA	9.09	3.3E-14	6.2E-14	8.0E-14
Oftringen – Oftr-i8c/626.05, 621.50-630.59		Effinger Sch.: Kalkmergel + 1 KBA	9.09	3.7E-14	6.3E-14	1.4E-13
Oftringen – Oftr-i9/587.55, 583.0-592.09		Effinger Sch.: Kalkmergel + KBA	9.09	7.8E-12	1.3E-11	1.3E-11
Küttigen-2 – Test 1/229.9, 209.8-250	Enachescu et al. 2008	Effinger Sch.: Tonmergel, Kalkmergel + 3KBA	41.2	5.0E-14	7.3E-13	1.0E-11
Küttigen-2 – Test 2/182.08, 162.00-202.15		Effinger Sch. (mit Gerstenhübel-Sch.): Tonmergel, KBA	40.15	1.5E-10	6.7E-10	1.7E-09
Küttigen-2 – Test 3/142.01, 121.93-162.08		Effinger Sch.: Tonmergel, Kalkmergel mit tonigen Kalkbänken	40.15	1.0E-13	1.8E-12	5.0E-11
Küttigen-2 – Test 4/82.08, 62.00-102.15		Effinger Sch.: Tonmergel, Kalkmergel mit tonigen Kalkbänken und 2 KBA	40.15	7.5E-16	1.2E-15	1.0E-14
Küttigen-2 – Test 5/57.08, 37.00-77.15		Effinger Sch.: Mergel, Tonmergel, Kalkmergel mit tonigen Kalkbänken und 1 KBA	40.15	1.2E-15	5.0E-15	7.5E-14
Küttigen-2 – Test 6/166.06, 163.00-169.12		Effinger Sch. (mit Teil Gerstenhübel-Sch.): Tonmergel, KBA	6.12	4.9E-10	1.3E-09	8.2E-09
Gösgen SB2– Test 2/285.25, 253.89-316.61	Enachescu et al. 2010b	Birmenstorf- – Effinger Sch.: Mergel, Kalkmergel + KBAs	62.72	4.8E-15	1.5E-14	6.4e-14
Gösgen SB2 – Test 3/222.53, 191.17-253.89		Effinger Sch.: Kalkmergel, Kalklagen + 1 KBA	62.72	4.8E-15	1.4E-13	3.2E-13
Gösgen SB2 – Test 4/160.34, 128.98-191.69		Effinger Sch.: Kalkmergel, Kalklagen, Mergel + 2 KBA	62.71	4.8E-15	2.1E-14	8.0E-14
Gösgen SB2 – Test 5/107.15, 75.79-138.50		Effinger Sch.: Kalkmergel, Kalklagen, Mergel + 2 KBA	62.71	1.6E-14	1.9E-13	8.0E-13
Gösgen SB2 – Test 6/221.15, 212.32-229.98		Effinger Sch.: Kalkmergel, Kalklagen, Kalkbank	17.66	2.8E-13	4.8E-13	1.7E-12

Tab. A3-1: (Fortsetzung)

Bohrung – Testbezeichnung, Intervall [m]	**Referenz**	**Lithologie**	**Länge Intervall L** [m]	**Hydr. Durchlässigkeit K** [m/s]		
				Min.	**Bester Schätzwert**	**Max.**
Rahmengesteine						
Benken, L1/677.39, 656.78-698.00	Croisé et al. 1999e	Lias-Keuper: Jurensis-Mergel bis Knollenmergel	41.22	9.7E-15	4.9E-14	7.3E-13
Benken, K1/718.61, 698.00-739.22	Croisé et al. 1999f	Keuper: Knollenmergel bis Gipskeuper (Stubensandstein)	41.22	1.5E-07	7E-07	1.3E-06
Benken, K2/778.65, 769.69-787.60		Keuper: Gipskeuper	17.91	1.1E-14	1.1E-13	2.2E-13
Weiach – 479.6D, 472.0-487.2	Nagra 1989	Oberer Dogger, unterster Malm	15.2	sehr geringdurchlässig		
Weiach – 699.0D, 692.00-706.00	Ehrminger et al. 1995	Lias / Oberer Keuper	14.00	1E-12	3E-12	7E-12
Weiach – 728.0D, 715.90-740.00		Mittlerer Keuper	24.10	7E-11	1E-10	4E-10
Riniken – 234.0D, 217.11-250.89		Dogger (Spatkalk)	33.78			1E-12
Riniken – 325.4D, 313.41-337.28		Dogger (Murchisonae-Schichten)	23.87		5E-14	
Riniken – 461.8S, 433.42-490.20		Opalinuston / Lias / Oberer Keuper	56.78	6E-14	1E-13	6E-13
Riniken – 513.0D, 500.30-525.78 (Cas.)		Mittlerer Keuper	25.48		1.4E-09	
Riniken – 515.7S, 500.99-530.50		Mittlerer Keuper	29.51		5E-09	
Schafisheim – 974.5S, 961.37-987.70		Dogger	26.33	1E-15		1E-14
Schafisheim – 1094.4D, 1080.50-1108.36		Lias / Oberer Keuper	27.86	9E-14		3E-13
Schafisheim – 1126.1D, 1112.20-1140.06		Mittlerer Keuper	27.86	1E-11	2E-11	1E-10
Herdern 1 – 1880, 1876.2-1884.0 (Cas.)		Lias / Oberer Keuper (Ann.: Stubensdst.)	7.80	1E-10	3E-10	1E-09
Herdern 1 – 1918, 1913.0-1922.0 (Cas.)		Mittlerer Keuper	9.00	7E-10	2E-09	1E-08
Berlingen 1 – 2073, 2065.10-2081.00		Oberer Keuper (Annahme: Stubensdst.)	15.90	1E-09	4E-09	1E-08
Kreuzlingen 1 – 2295, 2291.5-2298.75 (Casing)		Lias	7.25	1E-08	3E-08	7E-08
Kreuzlingen 1 – 2312, 2311.0-2312.75 (Casing)		Oberer Keuper (Kieselsandstein)	1.75	3E-11	-	8E-10

Tab. A3-1: (Fortsetzung)

Bohrung – Testbezeichnung, Intervall [m]	**Referenz**	**Lithologie**	**Länge Intervall L** [m]	**Hydr. Durchlässigkeit K** [m/s]		
				Min.	**Bester Schätzwert**	**Max.**
Malm-Aquifer						
Benken, M1/201.60, 197.50-205.70	Croisé et al. 1999a	Malm (Portl.): Plattenkalke	8.20	1.2E-12	1.2E-11	7.3E-11
Benken, M2/387.39, 379.98-394.80		Malm (Oxf.): Wohlgeschichtete Kalke	14.82	3.4E-10	6.7E-10	3.4E-09
Benken, M3/300.04, 205.28-394.80		Malm (Portl.-Kimm.-Oxf.): Plattenkalke-Quader-/Massenkalk-Wohlgesch. Kalke	189.52	4.7E-09	1.1E-08	2.1E-08
Weiach – 195.0D, 188.00-202.00	Ehrminger et al. 1995	Oberer Malm	14.00	1E-07	2E-07	5E-07
Weiach – 255.0D, 242.90-267.00		Oberer Malm	24.10		7E-07	
Berlingen 1 – 1491, 1472.20-1509.30		Oberer Malm	37.10	4E-09	1E-08	4E-08
Oftringen – Oftr-i6d/413.05, 408.50-417.59	Fisch et al. 2008	Geissberg-Sch.: Zufluss bei 409 m, mikritische Kalksteine + etwas Mergel	9.09	2.4E-08	4.0E-08	2.0E-06
Oftringen – Oftr-i10/413.05, 408.50-417.59		Geissberg-Sch.: Zufluss bei 409 m, mikritische Kalksteine + etwas Mergel	9.09	7.4E-07	2.5E-06	4.9E-06

Tab. A3-1: (Fortsetzung)

Bohrung – Testbezeichnung, Intervall [m]	**Referenz**	**Lithologie**	**Länge Intervall L** [m]	**Hydr. Durchlässigkeit K** [m/s]		
				Min.	**Bester Schätzwert**	**Max.**
Muschelkalk-Aquifer						
Siblingen, MKK1/183.85 S, 171.1-196.0	Nagra 1992b	Keuper (Lettenkohle) bis Oberer Muschelkalk (Trigonodus-Dolomit)	24.10		2.1E-06	
Siblingen, MKK2/210.85 S, 171.1-249.8		Gesamter Muschelkalk-Aquifer: Lettenkohle bis Dolomit der Anhydritgruppe	77.90		1.5E-06	
Benken, MK1/845.10, 813.00-877.20	Croisé et al. 1999f	Ob. u. Mittl. Muschelkalk: Trigonodus-Dolomit bis Dolomit der Anhydritgr.	64.20	4.7E-08	9.3E-08	6.2E-07
Benken, MK2/819.51, 813.00-826.01		Ob. Muschelkalk: Trigonodus-Dolomit	13.01	4.6E-08	4.6E-07	2.3E-06
Weiach – 859.1S (I,II), 821.70-895.80	Ehrminger et al. 1995	Oberer Muschelkalk	74.10	3E-07	-	3E-06
Riniken – 654.4P, 617.30-696.00		Oberer Muschelkalk	78.70		2E-06	
Leuggern, 74.9 PV, 87.87-100.39	Nagra 1991 (Kap. 8.5.1)	Muschelkalk	12.52		3.5E-06	
Böttstein – DST1, 123.2-202.3	Nagra 1985	Trigonodus-Dolomit, Hauptmuschelkalk, Dolomit der Anhydritgruppe = Gesamter Muschelkalk-Aquifer ohne Lettenkohle	79.1		3E-06	
Böttstein – PV, 123.2-203.3			80.1	2.4E-6	3.0E-06	3.5E-06
Schafisheim – 1249.0D, 1238.56-1259.47 (Cas.)	Ehrminger et al. 1995	Oberer Muschelkalk	20.91		6E-08	
Schafisheim – 1260.4P, 1227.80-1293.00		Oberer Muschelkalk	65.20		3E-07	
Trasadingen – PV 92-160	Bühl & Bollinger 1999	Unterer Keuper (Grenzdolomit), Oberer Muschelkalk (Trigonodus-Dolomit, Hauptmuschelkalk, Top der Sulfatschichten) = Muschelkalk-Aquifer	68	3E-07		6.5E-07
Trasadingen – PV 117-160		Oberer Muschelkalk: Hauptmuschelkalk	43	5E-07		7E-07
Herdern 1 – 2001, 1988.80-2014.00	Ehrminger et al. 1995	Unterer Keuper / Oberer Muschelkalk	25.20	3E-09	1E-08	3E-08
Berlingen 1 – 2182, 2174.61-2189.70		Unterer Keuper / Oberer Muschelkalk	15.09	8E-08	2E-07	7E-07

Tab. A3-1: (Fortsetzung)

Bohrung – Testbezeichnung, Intervall [m]	**Referenz**	**Lithologie**	**Länge Inter-vall L** [m]	**Hydr. Durchlässigkeit K** [m/s]		
				Min.	**Bester Schätz-wert**	**Max.**
Übersichtstests						
Benken, M4/428.92, 403.27-454.57	Croisé et al. 1999b	Malm (Oxf.) bis Dogger: Wohl-geschichtete Kalke – Hornbuck-Schichten – Effinger Schichten bis Dogger (bis Varians-Schichten)	51.30	1.2E-14	5.8E-14	7.8E-13
Benken, MD1/471.92, 446.27-497.57		Malm (Oxf.) bis Dogger (Bath.): Effinger Sch. bis Subfurcaten-Oolith	51.30	1.9E-14	1.6E-13	3.9E-13
Oftringen–Oftr-i1/675.02, 650.0-700.04	Fisch et al. 2008	oberer Dogger (Hauptrogenst., Varians-Sch., Herznach-Fm.) – Birmenstorf-Member: v.a. (oolith.) Kalkst. + Mergel	50.04	3.3E-12	7E-12	1.4E-11
Gösgen SB2–Test 1/331.95, 316.9-347.0	Enachescu et al. 2010b	ob. Dogger (Hauptrogenst., Varians-Sch. + Spatkalk): oolith. & biodetrit. Kalke	30.1	3.3E-10	5.3E-10	1.7E-09

Tab. A3-2: Vorgeschlagene standortspezifische Werte für die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit der Wirt- und oberen Rahmengesteine, für die Transmissivität der kleinräumigen transmissiven Elemente und für die Transmissivität von grösseren Störungszonen im Bereich der Wirt- und oberen Rahmengesteine.

Geologische Einheit	**Vorgeschlagene Werte (gemäss Tab. 4.3-2 und 4.3-3)**	**Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit**				**Gemittelte Transmissivität**	
		K_h [m/s]	**K_v** [m/s]	**Kleinräumige transmissive Elemente (Klüfte)**		**Grössere vertikale Störungszonen**	
				T [m^2/s]	**Frequenz**	**T** [m^2/s]	**Frequenz**
Südranden, SMA (Werte für Überdeckung < 400 m)							
Opalinuston	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	1.5E-12	3E-13				
	- "What if?"-Wert	5E-12	E-12				
'Brauner Dogger'	*Tonreiche Abfolgen*						
	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	5E-12	E-12				
	Sandkalkabfolgen						
	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	E-10	E-10	E-10	1 / m		
	- "What if?"-Wert	∞	∞	∞	1 / m		
Effinger Schichten	- Referenzwert		E-12				
	- Oberer Eckwert		E-11	E-11	1 / m		
Störungszone durch Wirt- und Rahmengesteine	- "What if?"-Wert Im Referenzfall keine erhöhte Transmissivität					E-10	1 Störungszone pro Lagerkammer

Tab. A3-2: (Fortsetzung)

Geologische Einheit	**Vorgeschlagene Werte (gemäss Tab. 4.3-2 und 4.3-3)**	**Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit**				**Gemittelte Transmissivität**	
		K_h [m/s]	**K_v** [m/s]	**Kleinräumige transmissive Elemente (Klüfte)**		**Grössere vertikale Störungszonen**	
				T [m^2/s]	**Frequenz**	**T** [m^2/s]	**Frequenz**
Zürich Nord-Ost, SMA und HAA (Werte für Überdeckung > 400 m)							
Opalinuston	- Referenzwert	E-13	2E-14				
	- Oberer Eckwert	5E-13	E-13				
	- "What if?"-Wert	5E-12	E-12				
'Brauner Dogger'	*Tonreiche Abfolgen*						
	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	5E-12	E-12				
	Sandkalkabfolgen						
	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	E-10	E-10	E-10	1 / m		
	- "What if?"-Wert	∞	∞	∞	1 / m		
Effinger Schichten	- Referenzwert		E-12				
	- Oberer Eckwert		E-11	E-11	1 / m		
Störungszone durch Wirt- und Rahmengesteine	- "What if?"-Wert Im Referenzfall keine erhöhte Transmissivität					E-10	1 Störungszone pro Lagerkammer

Tab. A3-2: (Fortsetzung)

Geologische Einheit	**Vorgeschlagene Werte (gemäss Tab. 4.3-2 und 4.3-3)**	**Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit**				**Gemittelte Transmissivität**	
		K_h [m/s]	**K_v** [m/s]	**Kleinräumige transmissive Elemente (Klüfte)**		**Grössere vertikale Störungszonen**	
				T [m^2/s]	**Frequenz**	**T** [m^2/s]	**Frequenz**
Nördlich Lägeren, SMA und HAA (Werte für Überdeckung > 400 m)							
Opalinuston	- Referenzwert	E-13	2E-14				
	- Oberer Eckwert	5E-13	E-13				
	- "What if?"-Wert	5E-12	E-12				
'Brauner Dogger'	*Tonreiche Abfolgen*						
	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	5E-12	E-12				
	Sandkalkabfolgen						
	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	E-10	E-10	E-10	1 / m		
	- "What if?"-Wert	∞	∞	∞	1/m		
Effinger Schichten	- Referenzwert		E-12				
	- Oberer Eckwert		E-11	E-11	1 / m		
Störungszone durch Wirt- und Rahmengesteine	- "What if?"-Wert Im Referenzfall keine erhöhte Transmissivität					E-10	1 Störungszone pro Lagerkammer

Tab. A3-2: (Fortsetzung)

Geologische Einheit	**Vorgeschlagene Werte (gemäss Tab. 4.3-2 und 4.3-3)**	**Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit**				**Gemittelte Transmissivität**	
		K_h [m/s]	**K_v** [m/s]	**Kleinräumige transmissive Elemente (Klüfte)**		**Grössere vertikale Störungszonen**	
				T [m^2/s]	**Frequenz**	**T** [m^2/s]	**Frequenz**
Bözberg, HAA (Werte für Überdeckung > 400 m)							
Opalinuston	- Referenzwert	E-13	2E-14				
	- Oberer Eckwert	5E-13	E-13				
	- "What if?"-Wert	5E-12	E-12				
Obere Rahmengesteine (Top Opalinuston – Top untere Accuminata-Schichten)	*Tonreiche Abfolgen*						
	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	5E-12	E-12				
	Sandkalkabfolgen						
	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	E-10	E-10	E-10	1 / m		
	- "What if?"-Wert	∞	∞	∞	1 / m		
Störungszone durch Wirt- und Rahmengesteine	- "What if?"-Wert Im Referenzfall keine erhöhte Transmissivität					E-10	1 Störungszone pro Lagerkammer
Bözberg, SMA (Werte für Überdeckung < 400 m)							
Opalinuston	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	1.5E-12	3E-13				
	- "What if?"-Wert	5E-12	E-12				
Obere Rahmengesteine (Top Opalinuston – Top untere Accuminata-Schichten)	*Tonreiche Abfolgen*						
	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	5E-12	E-12				
	Sandkalkabfolgen						
	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	E-10	E-10	E-10	1 / m		
	- "What if?"-Wert	∞	∞	∞	1 / m		
Störungszone durch Wirt- und Rahmengesteine	- "What if?"-Wert Im Referenzfall keine erhöhte Transmissivität					E-10	1 Störungszone pro Lagerkammer

Tab. A3-2: (Fortsetzung)

Geologische Einheit	**Vorgeschlagene Werte (gemäss Tab. 4.3-2 und 4.3-3)**	**Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit**				**Gemittelte Transmissivität**	
		K_h [m/s]	**K_v** [m/s]	**Kleinräumige transmissive Elemente (Klüfte)**		**Grössere vertikale Störungszonen**	
				T [m^2/s]	**Frequenz**	**T** [m^2/s]	**Frequenz**
Jura-Südfuss, SMA (Werte für Überdeckung < 400 m)							
Opalinuston	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	1.5E-12	3E-13				
	- "What if?"-Wert	5E-12	E-12				
Obere Rahmengesteine (Top Opalinuston – Top untere Accuminata-Schichten)	*Tonreiche Abfolgen*						
	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	5E-12	E-12				
	Sandkalkabfolgen						
	- Referenzwert	5E-13	E-13				
	- Oberer Eckwert	E-10	E-10	E-10	1 / m		
	- "What if?"-Wert	∞	∞	∞	1 / m		
Effinger Schichten	*Kalkmergelabfolgen*						
	- Referenzwert	E-11	E-12				
	- Oberer Eckwert	E-10		E-10	1 / m		
	(T auch anisotrop)		E-11	E-11	1 / m		
	Kalkbankabfolgen						
	- Referenzwert	E-11	E-12				
	- Oberer Eckwert	E-9	E-9	E-9	1 / m		
	- "What if?"-Wert	∞	∞	∞	1 / m		
Störungszonen durch Opalinuston und Rahmen-gesteine	Im Referenzfall keine erhöhte Transmissivität						
	- "What if?"-Wert					E-10	1 Störungs-zone pro Lagerkammer
Störungszonen durch Effinger Schichten	Im Referenzfall keine erhöhte Transmissivität						
	- Oberer Eckwert					E-9	3 / 100 m
	- "What if?"-Wert					E-8	1 / 300 m

Tab. A3-2: (Fortsetzung)

Geologische Einheit	**Vorgeschlagene Werte (gemäss Tab. 4.3-2 und 4.3-3)**	**Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit**			**Gemittelte Transmissivität**	
		K [m/s]	**Kleinräumige transmissive Elemente (Scherzonen, Klüfte)**		**Grössere vertikale Störungszonen**	
			T [m^2/s]	**Frequenz**	**T** [m^2/s]	**Frequenz**
Wellenberg, SMA (Oberes Stockwerk)						
Mergel-Formationen des Helvetikums	- Referenzwert					
	Konzept 'Klüfte'	E-11	E-11	1 / m		
	Konzept 'Scherzonen'	E-11	E-10	1 / 10 m		
	- Oberer Eckwert					
	Konzept 'Klüfte'	3E-11	3E-11	1 / m		
	Konzept 'Scherzonen'	3E-11	3E-10	1 / 10 m		
Störungszonen durch Wirtgestein	Im Referenzfall keine erhöhte Transmissivität					
	- Oberer Eckwert				E-9	1 / 300 m
	- "What if?"-Wert				E-8	1 / 300 m
Wellenberg, SMA (Unteres Stockwerk)						
Mergel-Formationen des Helvetikums	- Referenzwert					
	Konzept 'Klüfte'	3E-13	3E-13	1 / m		
	Konzept 'Scherzonen'	3E-13	3E-12	1 / 10 m		
	- Oberer Eckwert					
	Konzept 'Klüfte'	E-12	E-12	1 / m		
	Konzept 'Scherzonen'	E-12	E-11	1 / 10 m		
Störungszonen durch Wirtgestein	Im Referenzfall keine erhöhte Transmissivität					
	- Oberer Eckwert				E-10	1 / 300 m
	- "What if?"-Wert				E-9	1 / 300 m

A3.5 Geologische Grundlagen der Standortgebiete

A3.5.1 Geologische Grundlagen des Standortgebiets Südranden

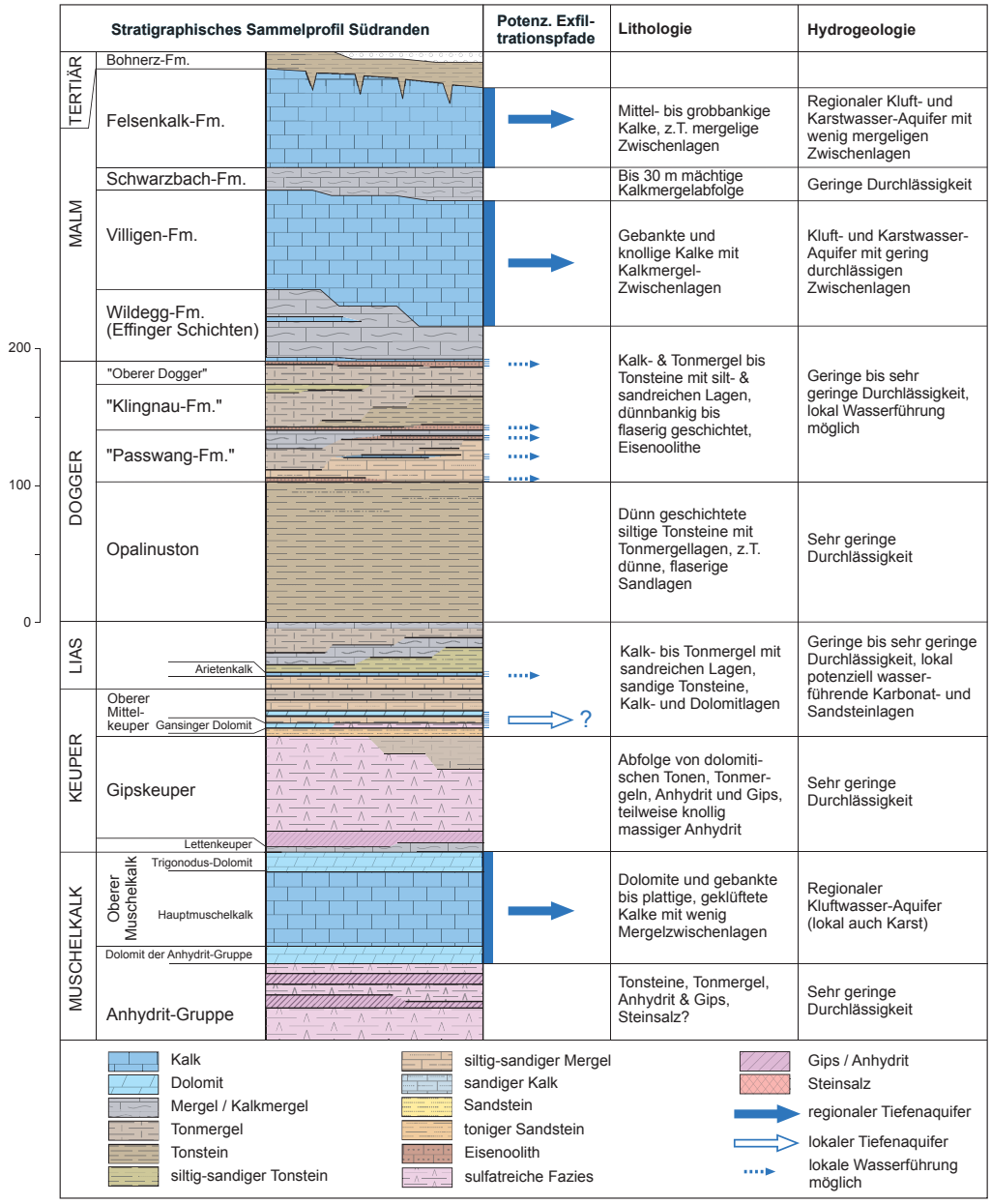


Fig. A3-8: Schematisches stratigraphisch-hydrogeologisches Sammelprofil für das Standortgebiet Südranden (SMA).

Die stratigraphischen Verhältnisse basieren auf Angaben aus Bohrungen im näheren Umfeld des Standortgebiets (vgl. Beilage 5.2-1 und 5.2-2 in Nagra 2008c). Die potenzielle Wasserführung einzelner sandig-kalkiger Abfolgen in den oberen und unteren Rahmengesteinen des Opalinustons (gestrichelte blaue Pfeile) und ihre laterale Kontinuität ist schematisch dargestellt. In der südlich des Standortgebiets gelegenen Bohrung Benken ist nur die als Dolomitbrekzie ausgebildete Stubensandstein-Formation im Oberen Mittelkeuper signifikant wasserführend. In der Sicherheitsanalyse wird die ganze Bandbreite von möglichen Fliesspfaden analysiert (vgl. Anhang 5). Der Übergang Opalinuston – Passwang-Formation könnte möglicherweise auch ähnlich wie im Standortgebiet Zürich Nord-Ost ausgebildet sein (vgl. Fig. A3-12).

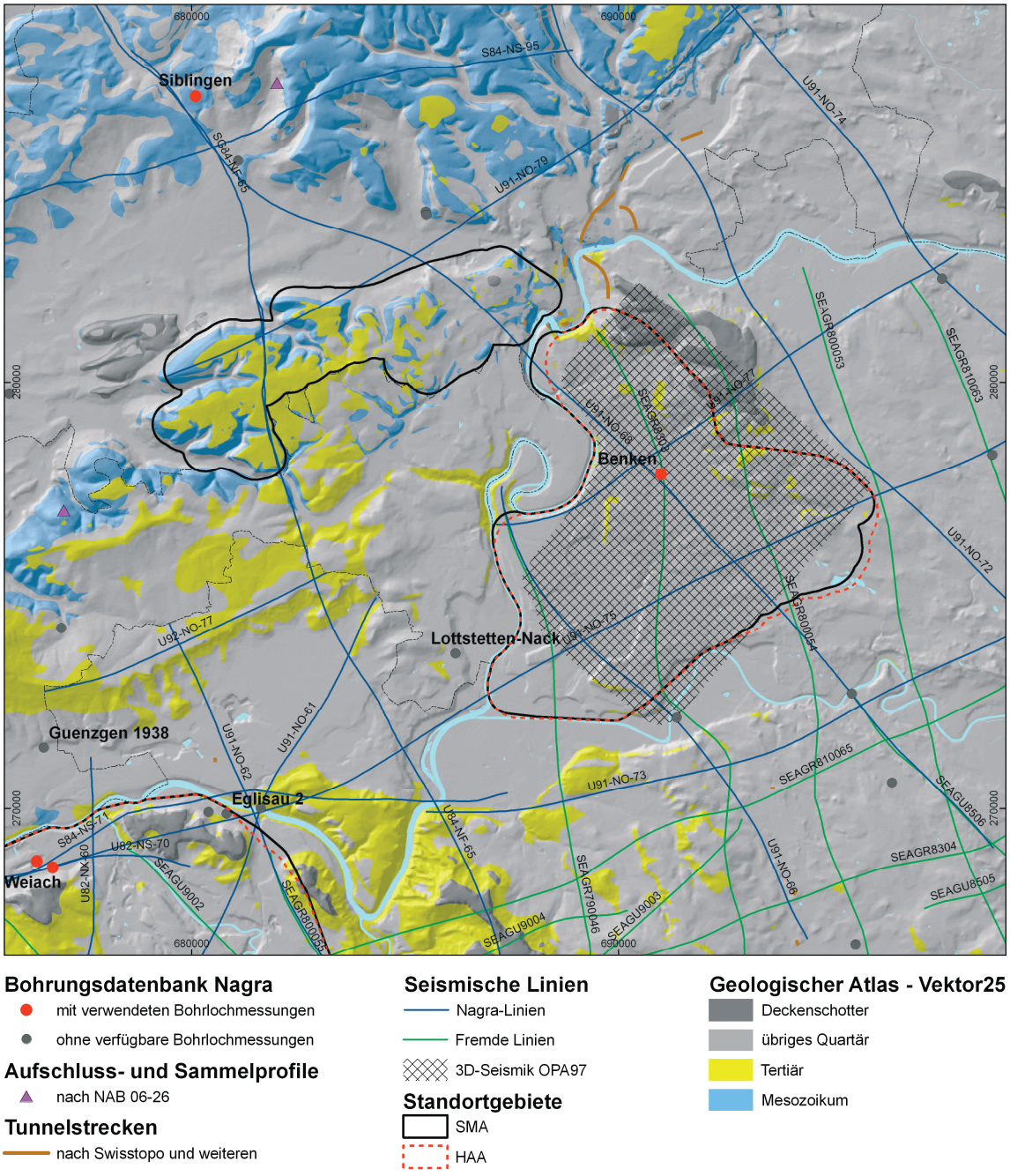


Fig. A3-9: Übersichtskarte 1:100'000 mit der Datengrundlage für das Standortgebiet Südranden (und Zürich Nord-Ost).

Lokalisation von seismischen Linien, Tiefbohrungen (≥ 200 m Endtiefe), Tunnelstrecken und Aufschluss- und Sammelprofilen sowie Angaben zur Geologie.

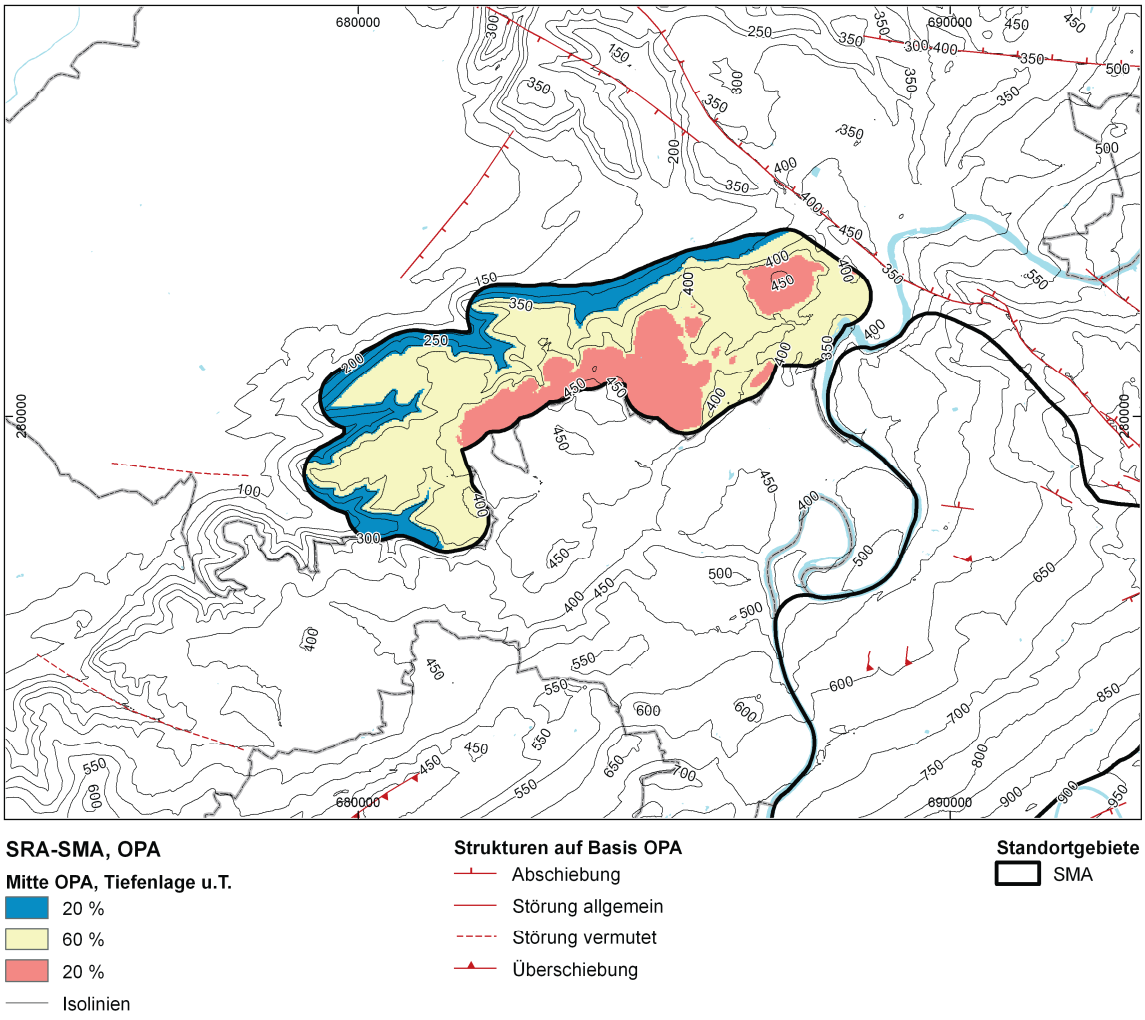


Fig. A3-10: Tiefenlage Opalinuston unter Terrain (Mitte Opalinuston) im Standortgebiet Südranden im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit.

Vergleiche Tab. A3-3.

Tab. A3-3: Tiefenlage des Wirtgesteins im Standortgebiet Südranden.

WG	**Typ**	**Wirtgestein**	**Tiefenlage Lagerebene im Standortgebiet (vgl. Fig. A3-10)** [1]						
			Median	Min.	Min. inkl. Ung.	Max.	Max. inkl. Ung.	Bandbreite für zentrale 60 %	Bandbreite für zentrale 60 % inkl. Ungewissheiten
OPA	SMA	Opalinuston [2]	380	180	130	480	540	310 – 410	250 – 470

[1] Alle Werte gerundet auf 10 m.

[2] Annahme für Lagerebene: Mitte Opalinuston.

Tab. A3-4: Mächtigkeit der Wirtgesteine, der Oberen und Unteren Rahmengesteine im Standortgebiet Südranden.

Gerundete Werte.

WG	**Typ**	**Geologische Einheit**	**Mächtigkeit ohne Berücksichtigung der Dekompaktion** [m]		**Flächenanteil mit reduzierter Mächtigkeit durch Dekompaktion** [1] [%]	
			Referenz wert	Band-breite [3]	ganz reduziert	teilweise reduziert
Wirtgesteine						
OPA	SMA	Opalinuston	100	70 – 130	0	5
Mächtigkeit der Oberen Rahmengesteine						
OPA	SMA	'Brauner Dogger' [4]	90 [5]	60 – 130	35	65
		Effinger Schichten [2]	15 [6]	5 – 50	100	0
Mächtigkeit der Unteren Rahmengesteine für das Wirtgestein Opalinuston						
OPA	SMA	Toniger Lias bis Arietenkalk	30	25 – 40	-	-
		Lias & Keuper bis Top Stubensdst./Gansinger Dol.	60	50 – 70	-	-
		Lias & Keuper (vollständig)	160	140 – 180	-	-

[1] Für die Wirtgesteine und die oberen Rahmengesteine werden nur die Mächtigkeitsanteile berücksichtigt, welche Überdeckungen von > 200 m (Opalinuston) bzw. > 300 m (Brauner Dogger, Effinger Schichten) aufweisen.

[2] Betrachtet wird die ganze Wildegg-Formation, d.h. die Effinger Schichten und die geringmächtigen Birmenstorfer Schichten.

[3] Unter Berücksichtigung der erwarteten Variabilität und Ungewissheiten.

[4] 'Brauner Dogger' = Passwang-Formation, Klingnau-Formation und oberer Dogger.

[5] In den Testrechnungen wird zur Berücksichtigung der flächendeckenden teilweisen Dekompaktion eine für die Radionuklidrückhaltung wirksame Mächtigkeit von nur 50 m angenommen.

[6] In den Testrechnungen wird zur Berücksichtigung der flächendeckenden vollständigen Dekompaktion keine Radionuklidrückhaltung angenommen (wirksame Mächtigkeit: 0 m).

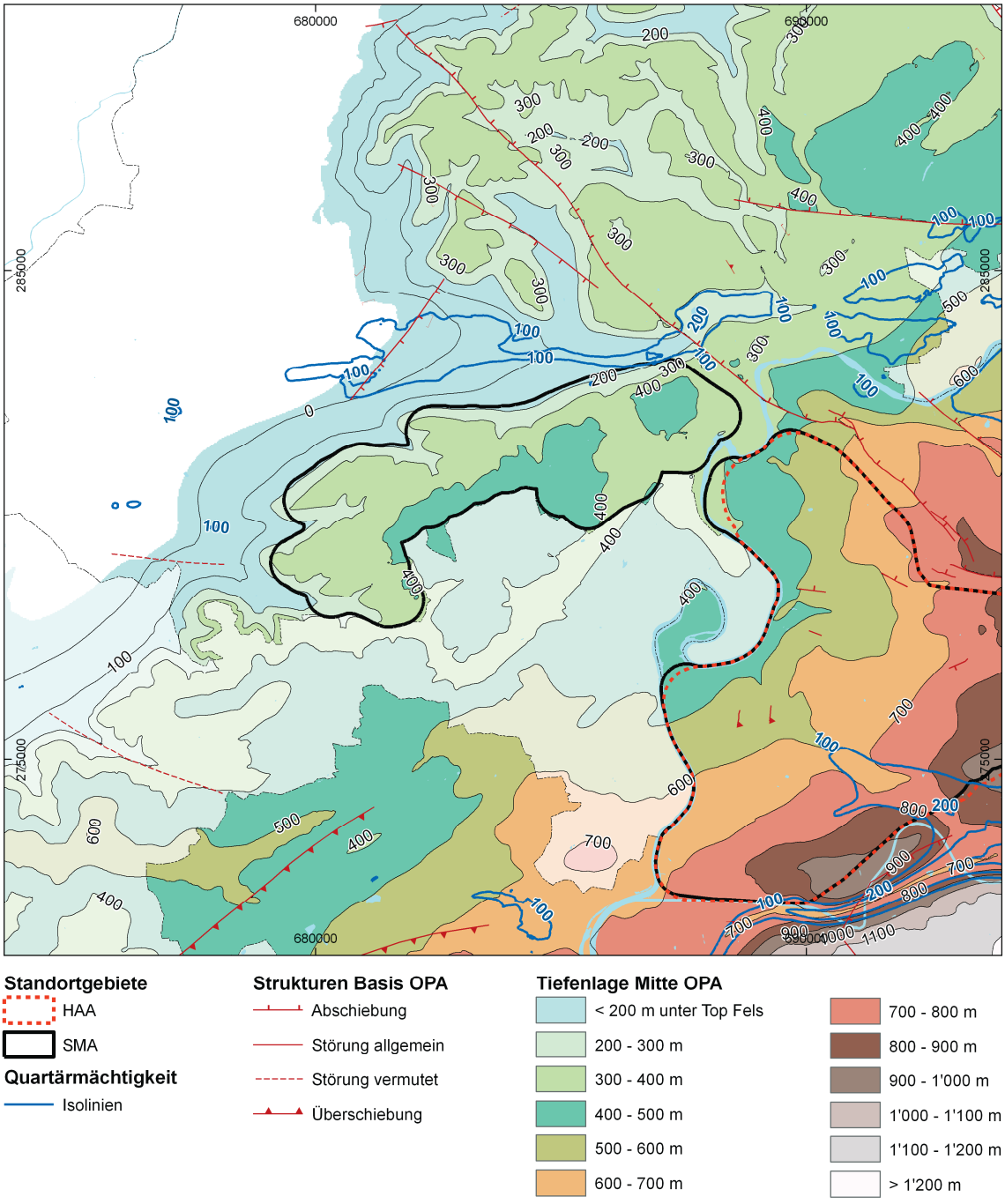


Fig. A3-11: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage Mitte Opalinuston unter Top Fels im Standortgebiet Südranden.

A3.5.2 Geologische Grundlagen des Standortgebiets Zürich Nord-Ost

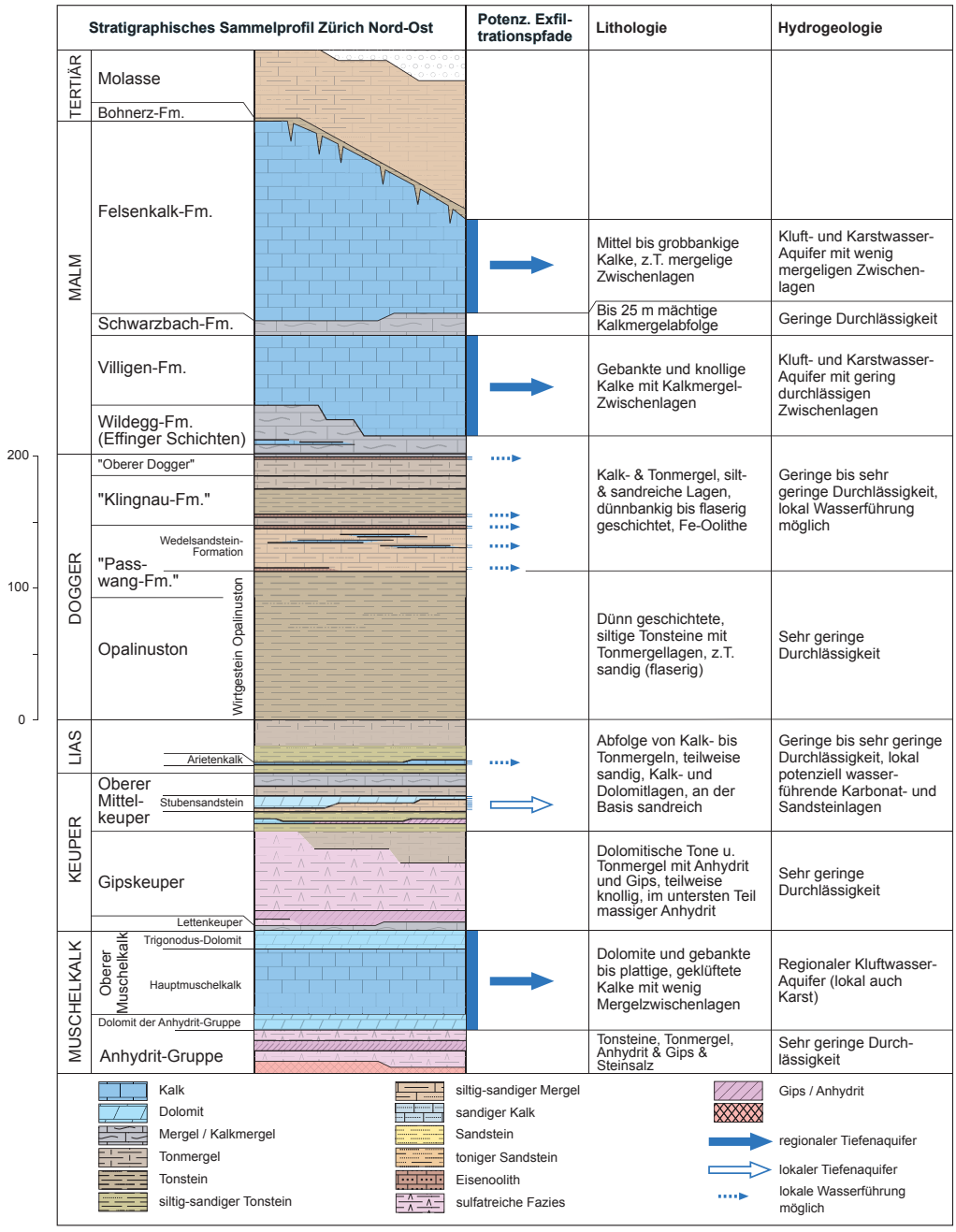


Fig. A3-12: Schematisches stratigraphisch-hydrogeologisches Sammelprofil für das Standortgebiet Zürich Nord-Ost (HAA und SMA).

Die stratigraphischen Verhältnisse basieren auf Angaben aus Bohrungen im Standortgebiet (Benken) und im näheren Umfeld (vgl. Beilage 5.2-1 und 5.2-2 in Nagra 2008c). Die potenzielle Wasserführung einzelner sandig-kalkiger Abfolgen im 'Braunen Dogger', bzw. in den oberen und unteren Rahmengesteinen des Opalinustons (gestrichelte blaue Pfeile) und ihre laterale Kontinuität ist schematisch dargestellt. In der Bohrung Benken ist nur die als Dolomitbrekzie ausgebildete Stubensandstein-Formation im Oberen Mittelkeuper signifikant wasserführend. In der Sicherheitsanalyse wird die ganze Bandbreite von möglichen Fliesspfaden analysiert (vgl. Anhang 5). In der Bohrung Weiach wurden beispielsweise unmittelbar über dem Opalinuston Murchisonae-Schichten in kalkiger Fazies angetroffen. In der Bohrung Benken ist diese Einheit aber tonig ausgebildet. Weil nicht bekannt ist, ob sich die kalkige Fazies bis ins Gebiet Zürich Nord-Ost fortsetzt und ob ihre Durchlässigkeit lokal erhöht ist, wurde dieser Fliessweg auch in der Sicherheitsanalyse für das Standortgebiet Zürich Nord-Ost analysiert.

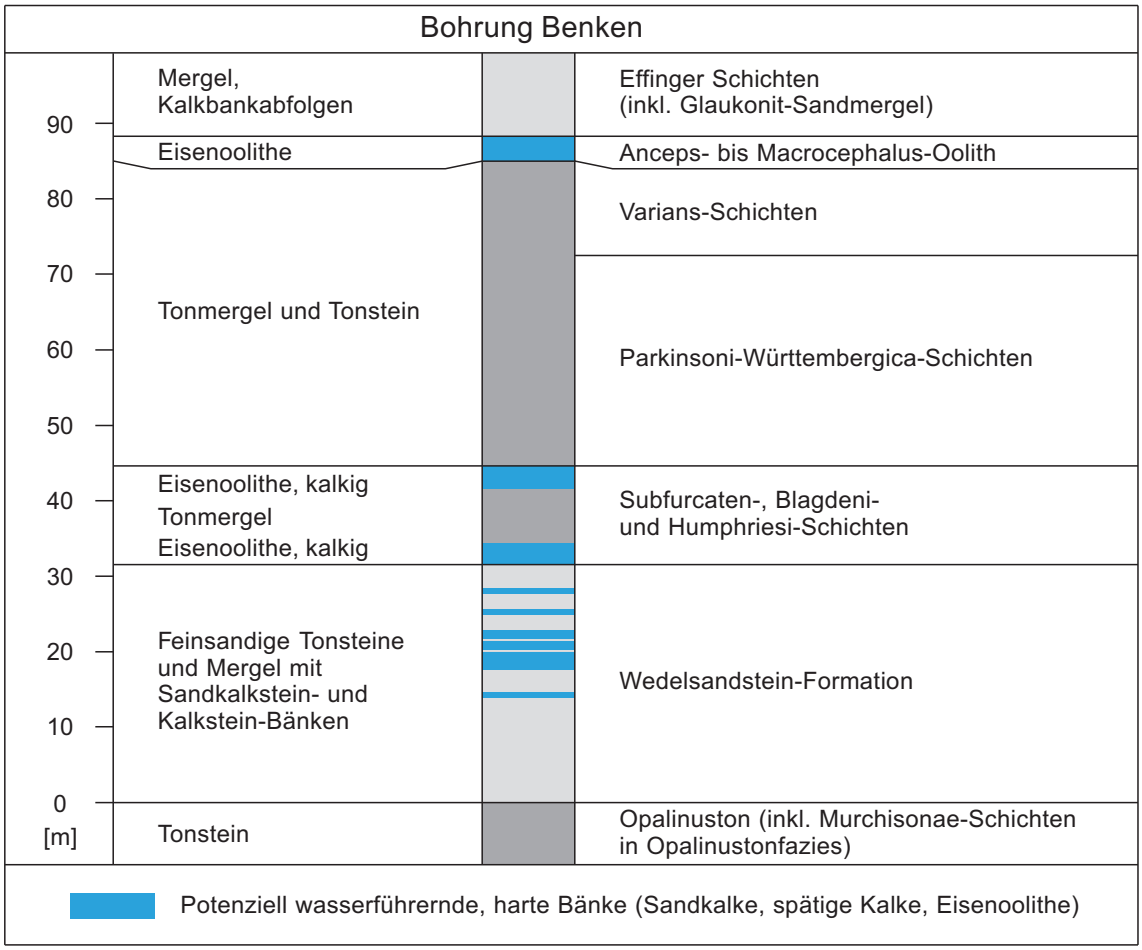
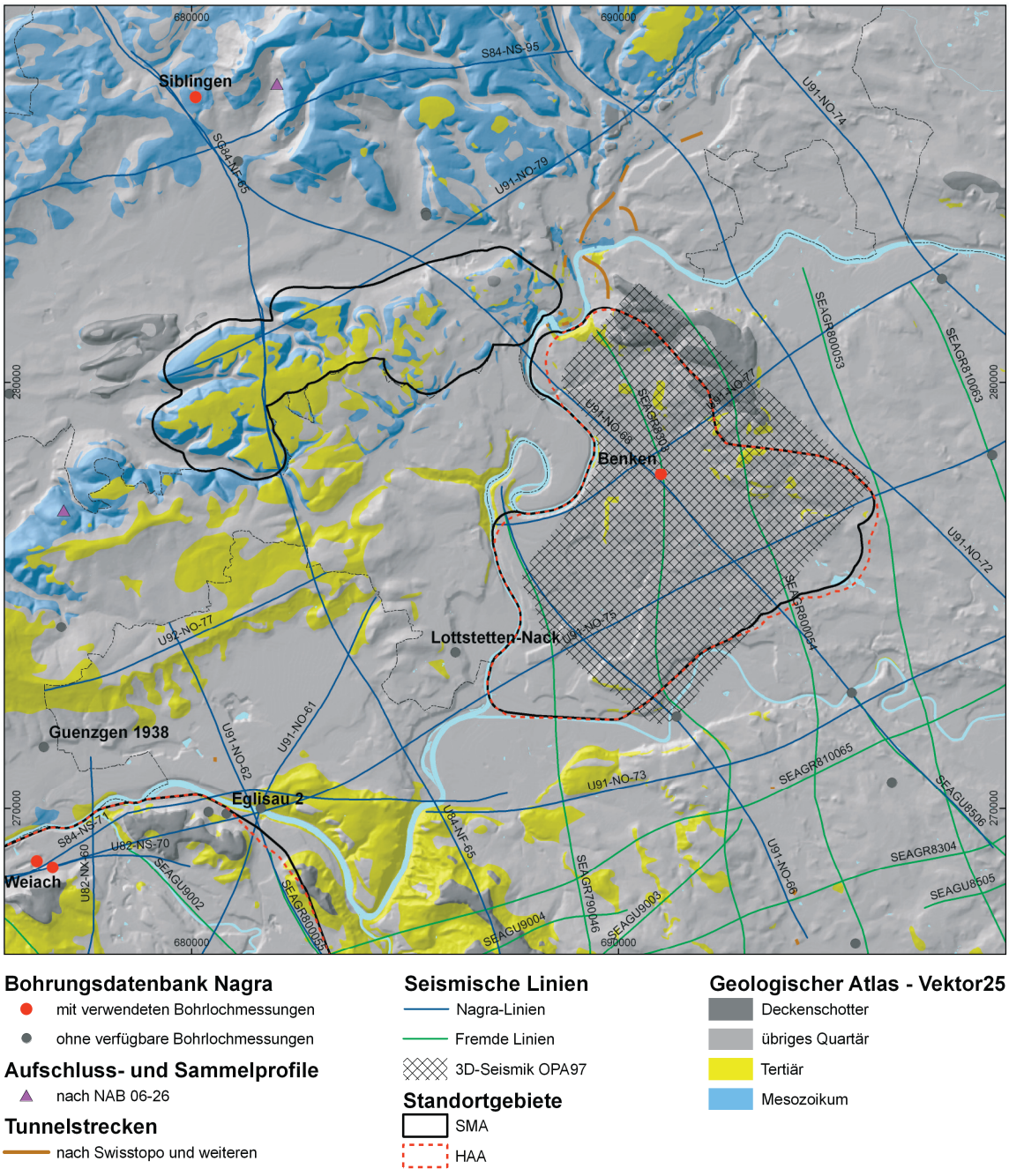


Fig. A3-13: Vereinfachte schematische Darstellung der sedimentären Architekturelemente der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' der Bohrung Benken als Grundlage für die Konzeptualisierung in der Sicherheitsanalyse.

Die sedimentären Architekturelemente der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' sind Gegenstand eines Projekts im Rahmen von SGT Etappe 2 (Kap. 8.3). Von Interesse ist insbesondere deren laterale Kontinuität; diese ist in Fig. A3-12 schematisch dargestellt.

Für die Testrechnungen gibt obige Figur eine vereinfachte schematische Darstellung der potenziell wasserführenden harten Bänke gemäss Befund in der Bohrung Benken. Aufgrund der erwarteten lateralen Variabilität und der zum Teil beschränkten Kontinuität einzelner Elemente muss die Sicherheitsanalyse auch Geometrien abdecken können, wie sie aus der Bohrung Weiach bekannt sind (siehe Fig. A3-18), beispielsweise eine harte Bank an der Basis des 'Braunen Doggers'. Die Kontinuität der Parkinsoni-Württembergica-Schichten ist vermutlich grossräumig vorhanden (vgl. Beilage 5.2-2 in Nagra 2008c sowie Naef 2008).



Bohrungsdatenbank Nagra
- mit verwendeten Bohrlochmessungen
- ohne verfügbare Bohrlochmessungen

Aufschluss- und Sammelprofile
- nach NAB 06-26

Tunnelstrecken
- nach Swisstopo und weiteren

Seismische Linien
- Nagra-Linien
- Fremde Linien
- 3D-Seismik OPA97

Standortgebiete
- SMA
- HAA

Geologischer Atlas - Vektor25
- Deckenschotter
- übriges Quartär
- Tertiär
- Mesozoikum

Fig. A3-14: Übersichtskarte 1:100'000 mit der Datengrundlage für das Standortgebiet Zürich Nord-Ost (und Südranden).

Lokalisation von seismischen Linien, Tiefbohrungen (≥ 200 m Endtiefe), Tunnelstrecken und Aufschluss- und Sammelprofilen sowie Angaben zur Geologie.

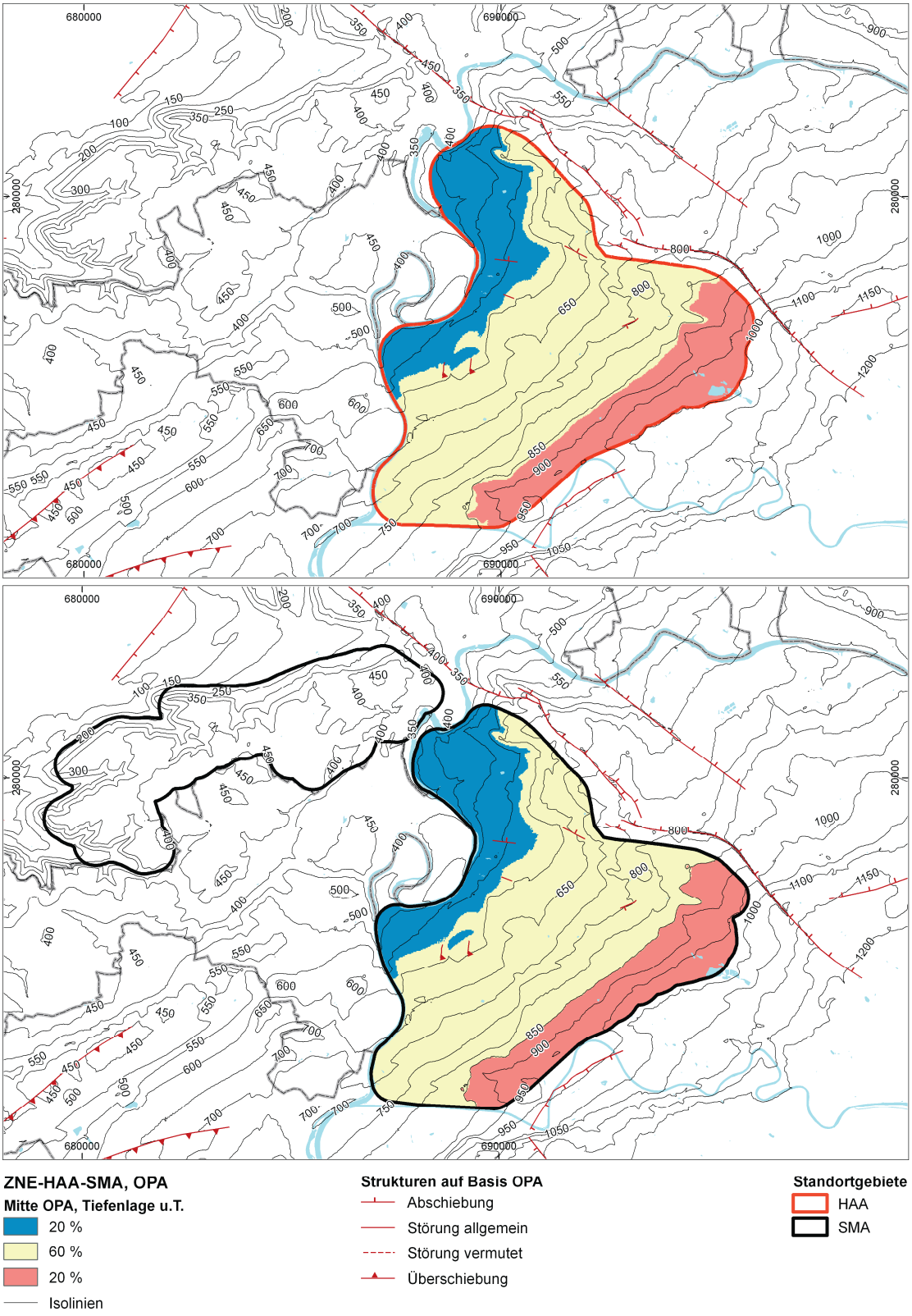


Fig. A3-15: Tiefenlage Opalinuston unter Terrain (Mitte Opalinuston) im Standortgebiet Zürich Nord-Ost im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit bezüglich HAA (oben) und SMA (unten).

Vergleiche Tab. A3-5.

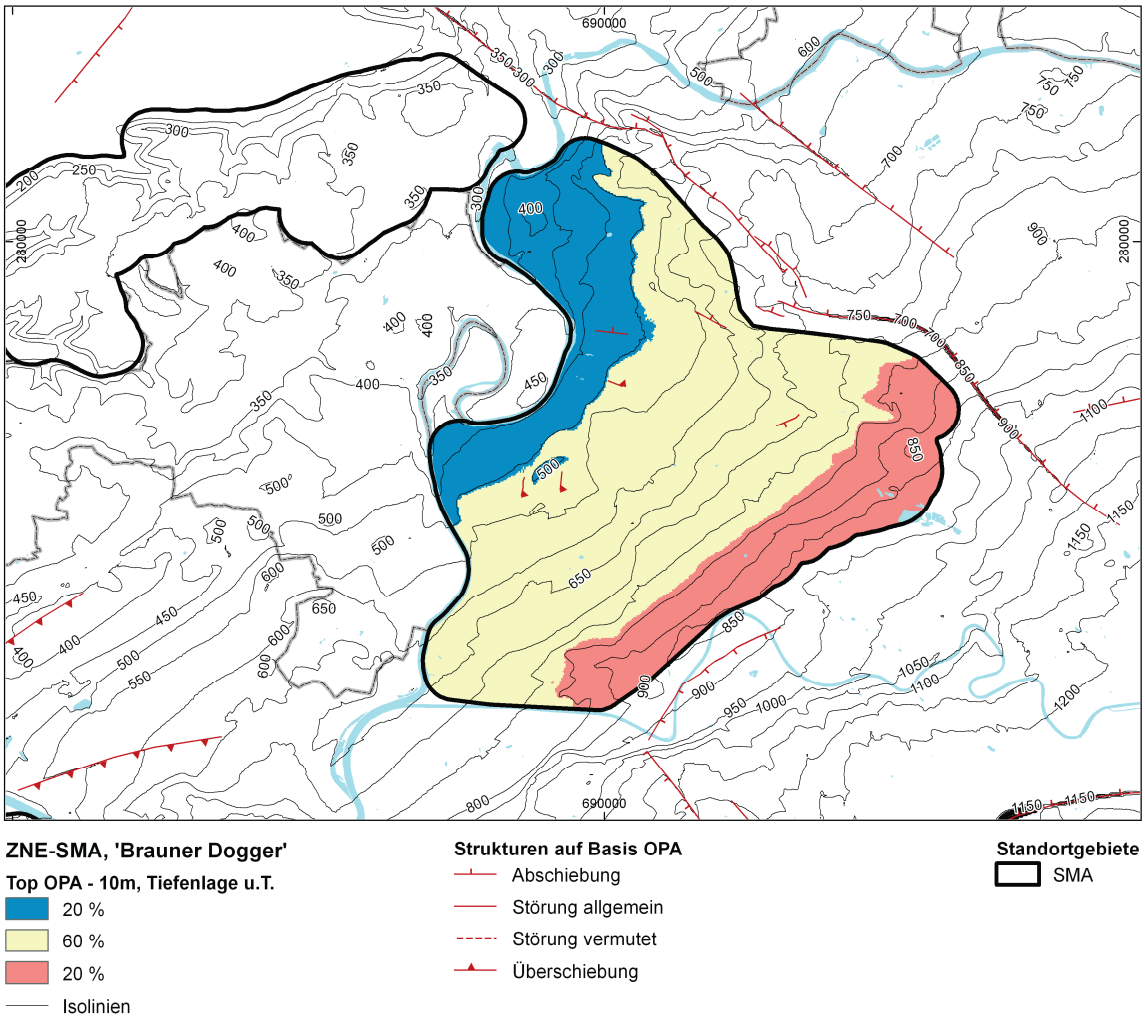


Fig. A3-16: Tiefenlage 'Brauner Dogger' unter Terrain (Top Opalinuston minus 10 m) im Standortgebiet Zürich Nord-Ost im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit.

Vergleiche Tab. A3-5.

Tab. A3-5: Tiefenlage der Wirtgesteine im Standortgebiet Zürich Nord-Ost.

WG	**Typ**	**Wirtgestein**	**Tiefenlage Lagerebene im Standortgebiet (vgl. Fig. A3-15 und A3-16)** [1]						
			Median	Min.	Min. inkl. Un-gew.	Max.	Max inkl. Un-gew.	Bandbreite für zentrale 60 %	Bandbreite für zentrale 60 % inkl. Ungewissheiten
OPA	HAA	Opalinuston [2]	710	390	330	1'000	1'090	580 – 860	510 – 950
OPA	SMA	Opalinuston [2]	700	370	310	990	1'080	570 – 850	500 – 940
BD	SMA	'Brauner Dogger' [3]	630	310	250	930	1'010	500 – 790	440 – 870

[1] Alle Werte gerundet auf 10 m.

[2] Annahme für Lagerebene: Mitte Opalinuston.

[3] Annahme für Lagerebene: 10 m über Top Opalinuston (Top Opalinuston minus 10 m).

Tab. A3-6: Mächtigkeit der Wirtgesteine, der Oberen und Unteren Rahmengesteine im Standortgebiet Zürich Nord-Ost.

Werte gerundet.

WG	**Typ**	**Geologische Einheit**	**Mächtigkeit ohne Berücksichtigung der Dekompaktion** [m]		**Flächenanteil mit reduzierter Mächtigkeit durch Dekompaktion** [1] [%]	
			Referenz wert	Band-breite [4]	ganz reduziert	teilweise reduziert
Wirtgesteine						
OPA	HAA & SMA	Opalinuston [2]	110	90 – 130	0	0
BD	SMA	'Brauner Dogger' [2, 5]	90	60 – 130	0	< 5
Mächtigkeit der Oberen Rahmengesteine						
OPA	HAA	'Brauner Dogger' [2, 5]	90	60 – 130	0	< 5
	SMA	'Brauner Dogger' [2, 5]	90	60 – 130	0	< 5
	HAA	Effinger Schichten [3]	15	5 – 40	< 5	< 5
	SMA	Effinger Schichten [3]	15	5 – 40	< 5	< 5
BD	SMA	Effinger Schichten [3]	15	5 – 40	< 5	< 5
Mächtigkeit der Unteren Rahmengesteine für das Wirtgestein Opalinuston						
OPA	SMA & HAA	Toniger Lias bis Arietenkalk	30	25 – 40	-	-
		Lias & Keuper bis Top Stubensdst./Gansinger Dol.	60	50 – 70	-	-
		Lias & Keuper (vollständig)	160	140 – 180	-	-
BD	SMA	Opalinuston [2]	110	90 – 130	-	-
		Opalinuston bis Arietenkalk	140	115 – 170	-	-
		Opalinuston bis Top Stubensdst./Gansinger Dol.	170	140 – 200	-	-
		Opalinuston, Lias & Keuper (vollständig)	270	230 – 310		

[1] Für die Wirtgesteine und die oberen Rahmengesteine werden nur die Mächtigkeitsanteile berücksichtigt, welche Überdeckungen von > 200 m (Opalinuston) bzw. > 300 m ('Brauner Dogger', Effinger Schichten) aufweisen.

[2] Murchisonae-Schichten werden in Benken zum Opalinuston gerechnet, da sie in Opalinustonfazies vorliegen (vgl. Nagra 2002a).

[3] Betrachtet wird die ganze Wildegg-Formation, d.h. die Effinger Schichten und die geringmächtigen Birmenstorfer Schichten.

[4] Unter Berücksichtigung der erwarteten Variabilität und Ungewissheiten.

[5] 'Brauner Dogger' = Passwang-Formation, Klingnau-Formation und oberer Dogger.

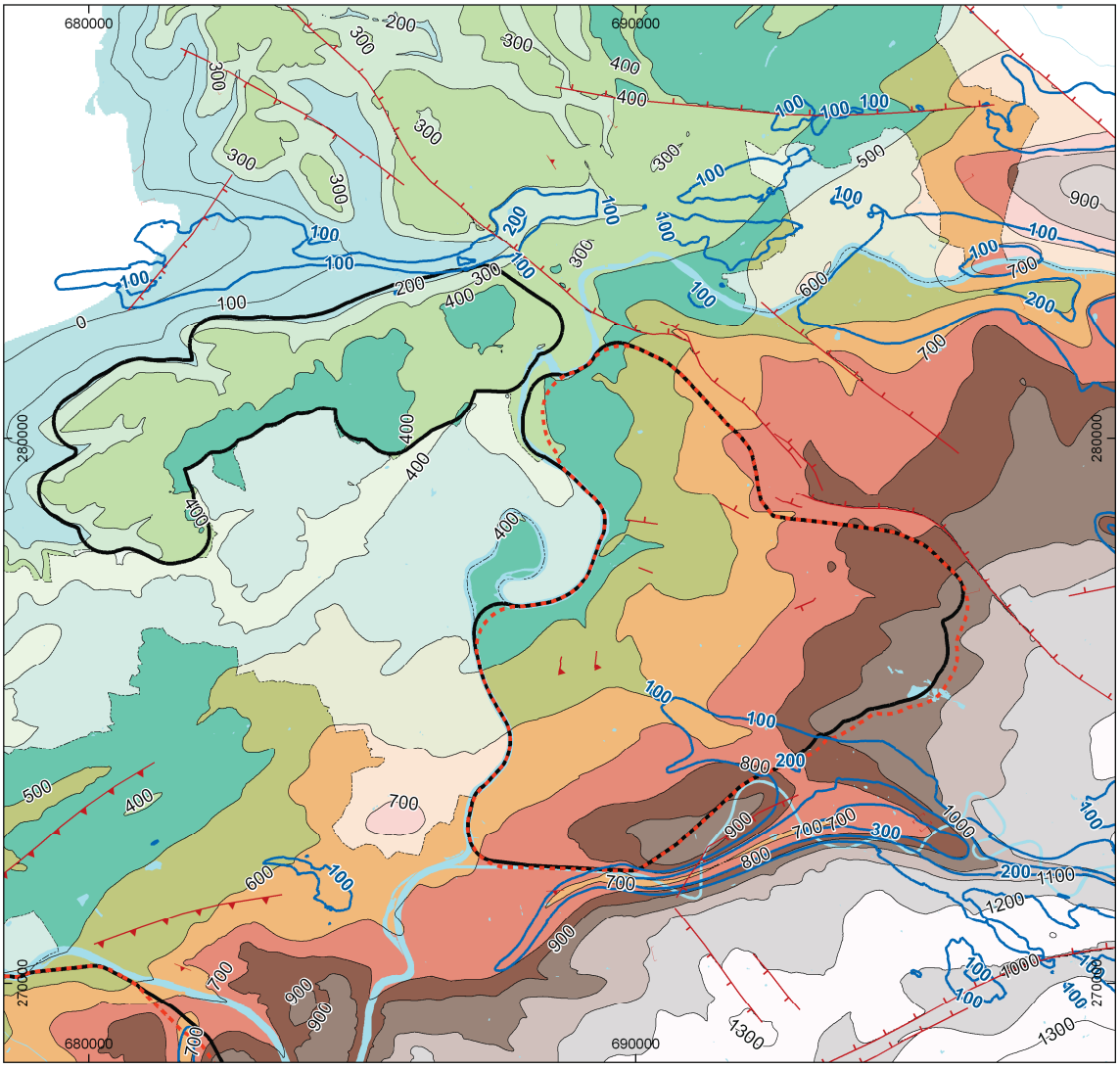


Fig. A3-17: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage Mitte Opalinuston unter Top Fels im Standortgebiet Zürich Nord-Ost.

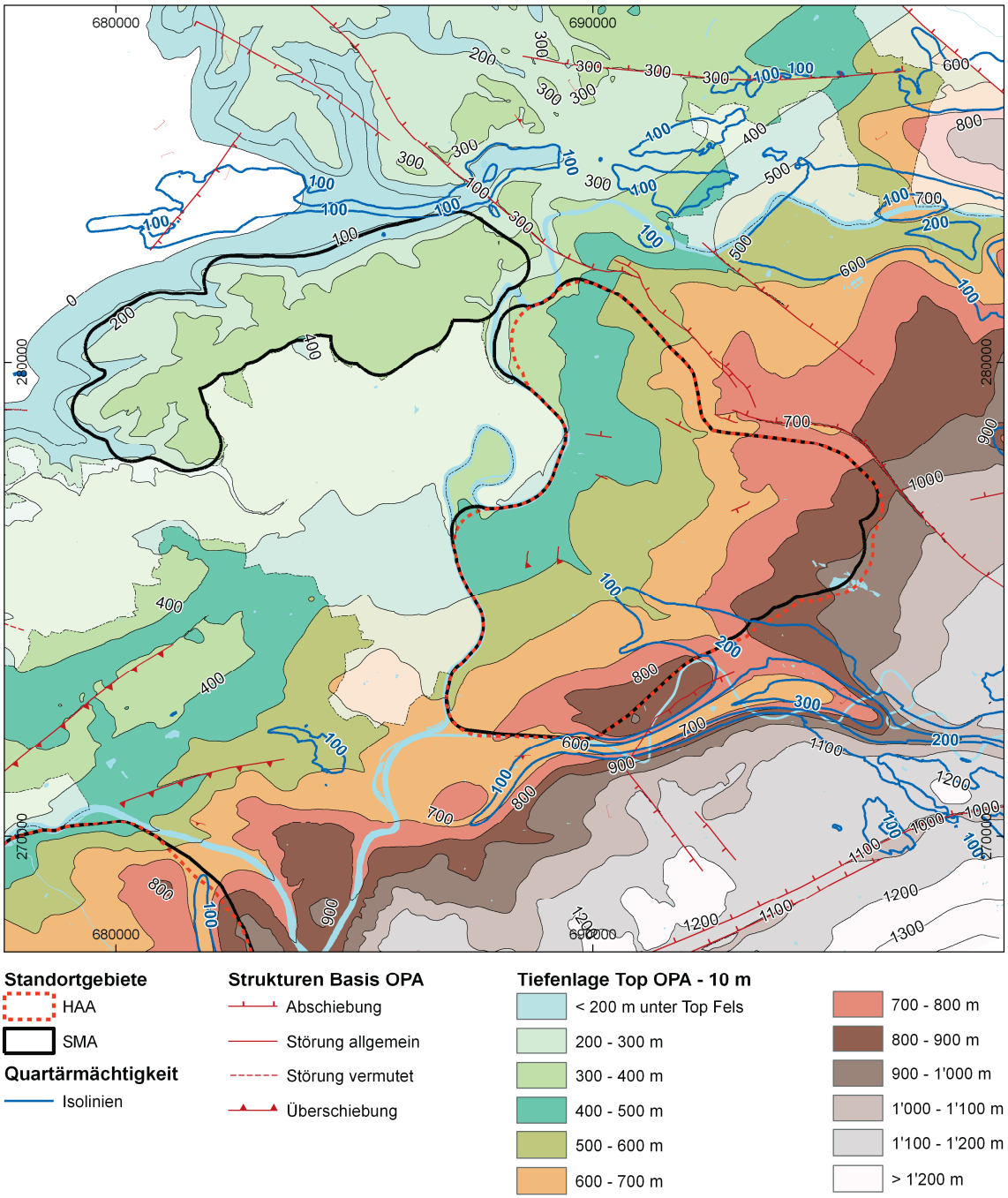


Fig. A3-18: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage 'Brauner Dogger' (Top Opalinuston minus 10 m) unter Top Fels im Standortgebiet Zürich Nord-Ost.

A3.5.3 Geologische Grundlagen des Standortgebiets Nördlich Lägeren

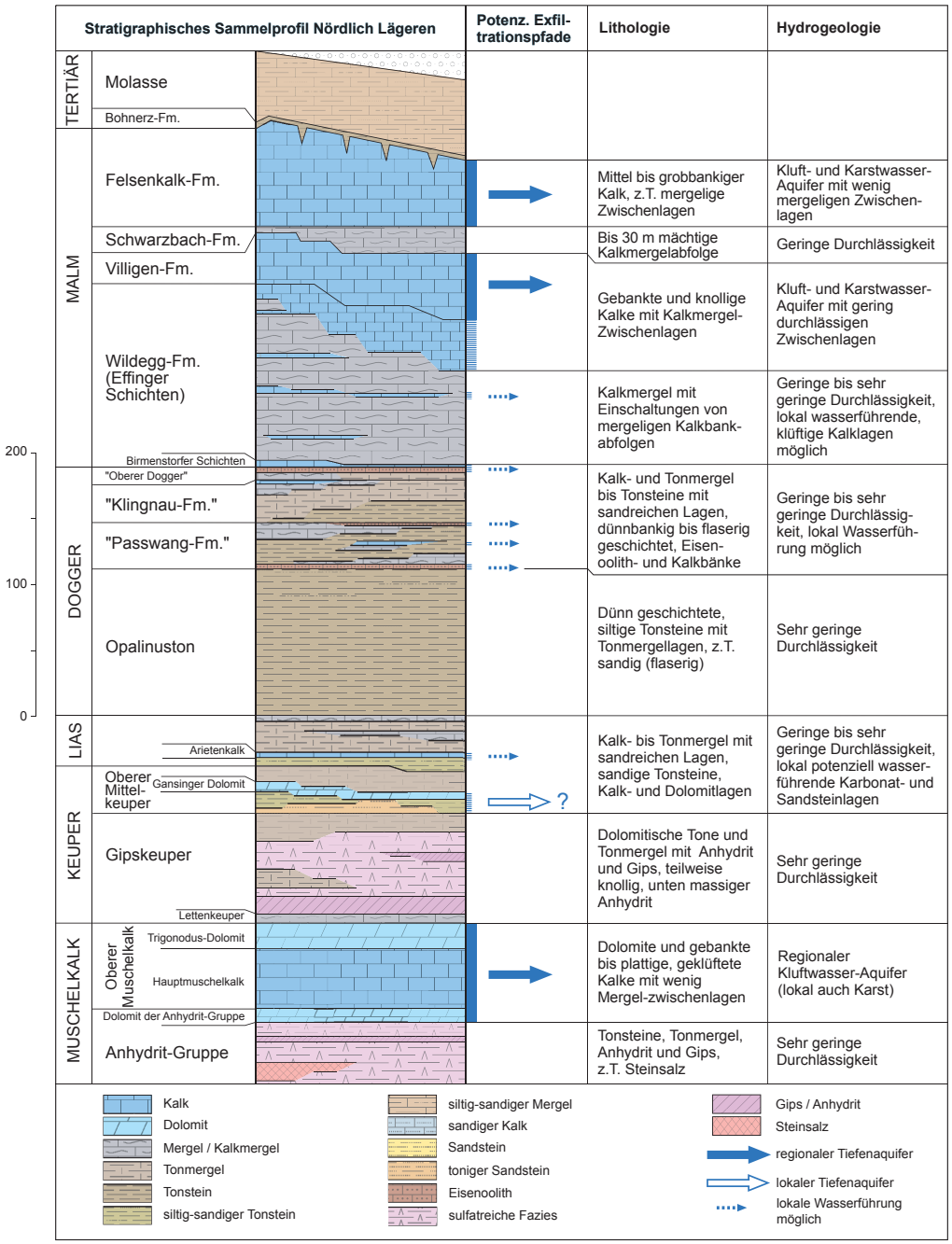


Fig. A3-19: Schematisches stratigraphisch-hydrogeologisches Sammelprofil für das Standortgebiet Nördlich Lägeren (HAA und SMA).

Die stratigraphischen Verhältnisse basieren auf Angaben aus Bohrungen im Standortgebiet (Weiach) und im näheren Umfeld (vgl. Beilage 5.2-1 und 5.2-2 in Nagra 2008c). Die potenzielle Wasserführung einzelner sandig-kalkiger Abfolgen im 'Braunen Dogger' bzw. in den oberen und unteren Rahmengesteinen des Opalinustons (gestrichelte blaue Pfeile) und ihre laterale Kontinuität ist schematisch dargestellt. In der Bohrung Weiach sind fast alle sandig-kalkigen Abfolgen geringdurchlässig; nur die weit unter dem Opalinuton liegende Abfolge Schilfsandstein-Gansinger Dolomit zeigte eine leicht erhöhte Durchlässigkeit. In der Sicherheitsanalyse wird trotzdem die ganze Bandbreite von möglichen Fliesspfaden analysiert (vgl. Anhang 5).

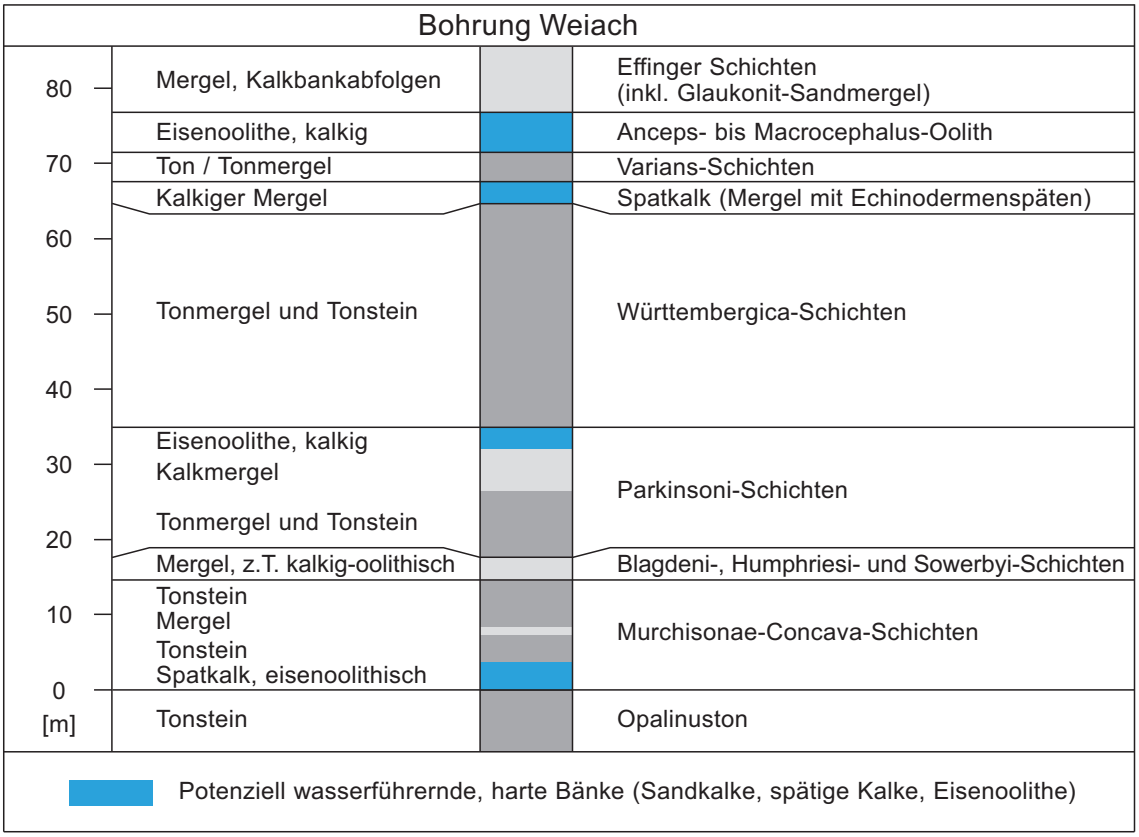


Fig. A3-20: Vereinfachte schematische Darstellung der sedimentären Architekturelemente der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' der Bohrung Weiach als Grundlage für die Konzeptualisierung in der Sicherheitsanalyse.

Die sedimentären Architekturelemente der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' sind Gegenstand eines Projekts im Rahmen von SGT Etappe 2. Von Interesse ist insbesondere deren laterale Kontinuität, diese ist in Fig. A3-19 schematisch dargestellt.

Für die Testrechnungen gibt obige Figur eine vereinfachte schematische Darstellung der potenziell wasserführenden harten Bänke gemäss Befund in der Bohrung Weiach. Aufgrund der erwarteten lateralen Variabilität und der zum Teil beschränkten Kontinuität der einzelnen Elemente muss die Sicherheitsanalyse auch Geometrien abdecken können, wie sie aus der Bohrung Benken bekannt sind (siehe Fig. A3-12). Die Kontinuität der Parkinsoni-Württembergica-Schichten ist vermutlich grossräumig vorhanden (vgl. Beilage 5.2-2 in Nagra 2008c sowie Naef 2008).

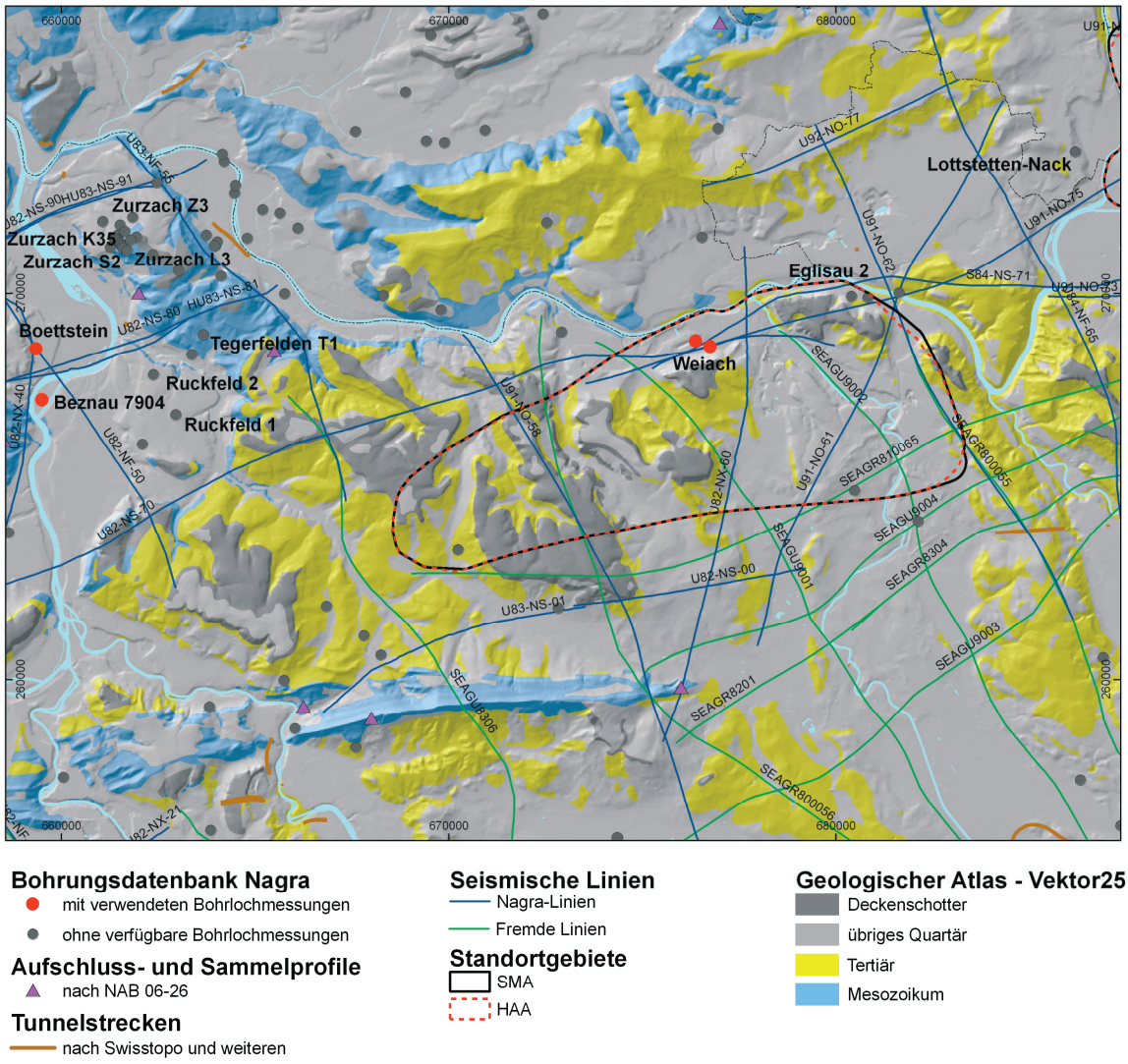


Fig. A3-21: Übersichtskarte 1:100'000 mit der Datengrundlage für das Standortgebiet Nördlich Lägeren.

Lokalisation von seismischen Linien, Tiefbohrungen (≥ 200 m Endtiefe), Tunnelstrecken und Aufschluss- und Sammelprofilen sowie Angaben zur Geologie.

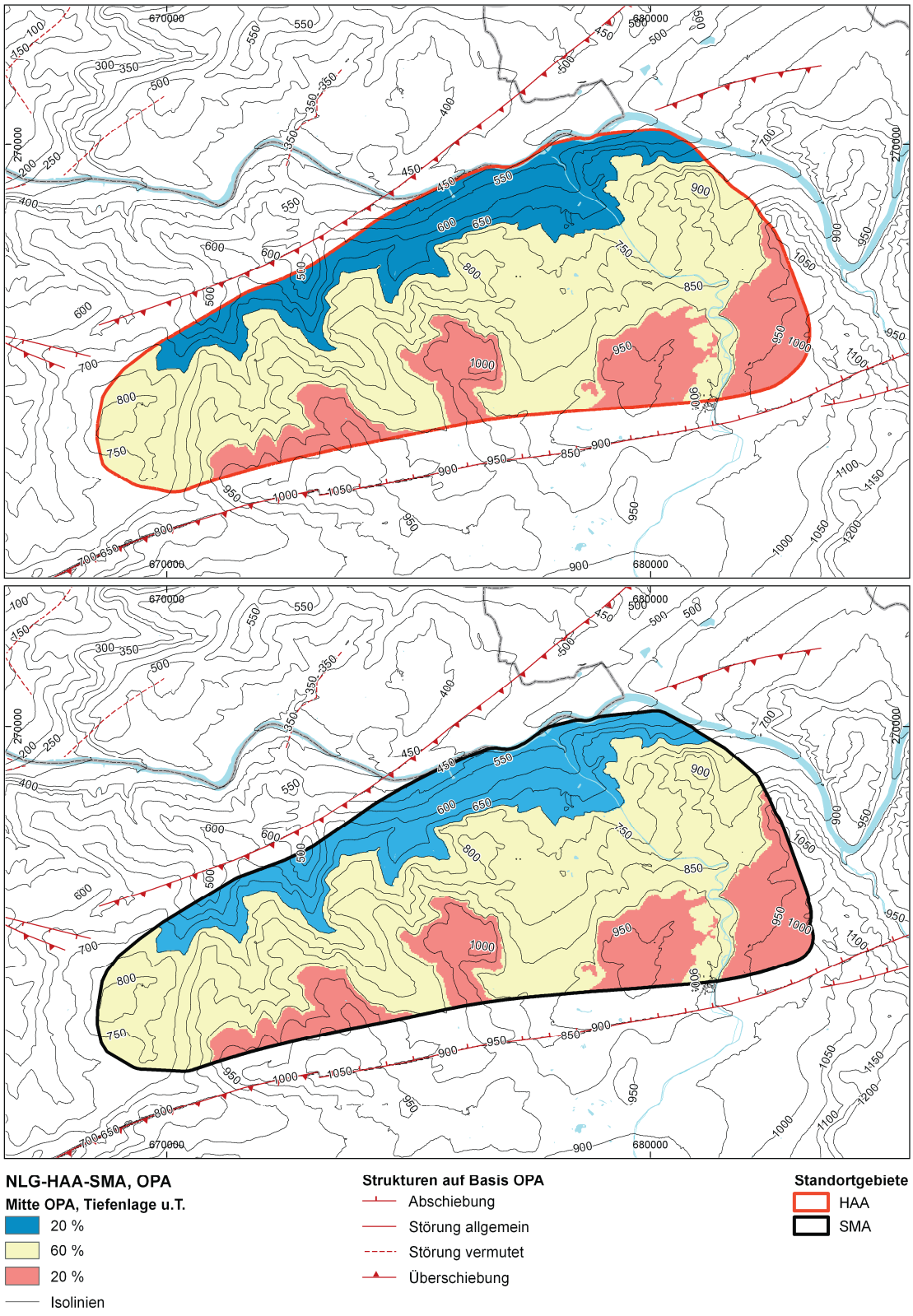


Fig. A3-22: Tiefenlage Opalinuston unter Terrain (Mitte Opalinuston) im Standortgebiet Nördlich Lägeren im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit bezüglich HAA (oben) und SMA (unten).

Vergleiche Tab. A3-7.

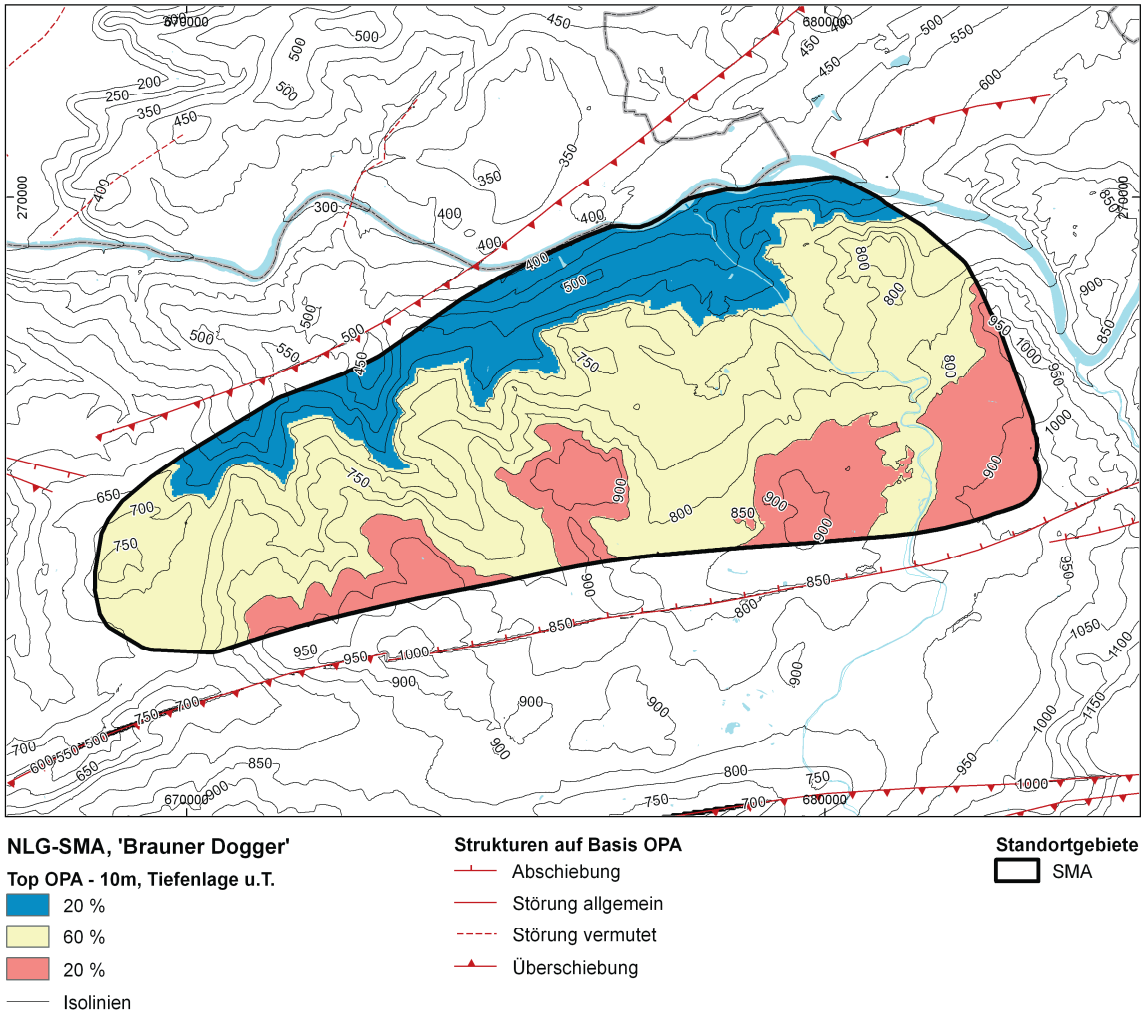


Fig. A3-23: Tiefenlage 'Brauner Dogger' unter Terrain (Top Opalinuston minus 10 m) im Standortgebiet Nördlich Lägeren im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit.

Vergleiche Tab. A3-7.

Tab. A3-7: Tiefenlage der Wirtgesteine im Standortgebiet Nördlich Lägeren.

WG	**Typ**	**Wirtgestein**	**Tiefenlage Lagerebene im Standortgebiet (vgl. Fig. A3-21 und A3-22) [1)]**						
			Median	Min.	Min. inkl. Ung.	Max.	Max inkl. Ung.	Bandbreite für zentrale 60 %	Bandbreite für zentrale 60 % inkl. Ungewissheiten
OPA	HAA	Opalinuston	810	440	360	1010	1120	700 – 910	610 – 1020
OPA	SMA	Opalinuston	810	440	360	1020	1130	700 – 910	610 – 1020
BD	SMA	'Brauner Dogger'	750	380	300	960	1060	640 – 850	550 – 950

1) Alle Werte gerundet auf 10 m.

2) Annahme für Lagerebene: Mitte Opalinuston.

3) Annahme für Lagerebene: 10 m über Top Opalinuston (Top Opalinuston minus 10 m).

Tab. A3-8: Mächtigkeit der Wirtgesteine, der Oberen und Unteren Rahmengesteine im Standortgebiet Nördlich Lägeren.

Gerundete Werte.

WG	**Typ**	**Geologische Einheit**	**Mächtigkeit ohne Berücksichtigung der Dekompaktion** [m]		**Flächenanteil mit reduzierter Mächtigkeit durch Dekompaktion** [1] [%]	
			Referenzwert	Bandbreite [3]	ganz reduziert	teilweise reduziert
Wirtgesteine						
OPA	HAA & SMA	Opalinuston	110	90 – 130	0	0
BD	SMA	'Brauner Dogger' [4]	75	60 – 130	0	0
Mächtigkeit der Oberen Rahmengesteine						
OPA	HAA & SMA	'Brauner Dogger' [4]	75	60 – 130	0	0
		Effinger Schichten [2]	90	40 – 180	0	< 5
BD	SMA	Effinger Schichten [2]	90	40 – 180	0	< 5
Mächtigkeit der Unteren Rahmengesteine für das Wirtgestein Opalinuston						
OPA	SMA & HAA	Toniger Lias bis Arietenkalk	30	20 – 35	-	-
		Lias & Keuper bis Top Stubensdst./Gansinger Dol.	50	40 – 60	-	-
		Lias & Keuper (vollständig)	160	130 – 180	-	-
BD	SMA	Opalinuston [2]	110	90 – 130	-	-
		Toniger Lias bis Arietenkalk	135	110 – 165	-	-
		Lias & Keuper bis Top Stubensdst./Gansinger Dol.	160	130 – 190	-	-
		Lias & Keuper (vollständig)	265	220 – 310		

[1] Für die Wirtgesteine und die oberen Rahmengesteine werden nur die Mächtigkeitsanteile berücksichtigt, welche Überdeckungen von > 200 m (Opalinuston) bzw. > 300 m (Brauner Dogger, Effinger Schichten) aufweisen.

[2] Betrachtet wird die ganze Wildegg-Formation, d.h. die Effinger Schichten und die geringmächtigen Birmenstorfer Schichten.

[3] Unter Berücksichtigung der erwarteten Variabilität und Ungewissheiten.

[4] 'Brauner Dogger' = Passwang-Formation, Klingnau-Formation und oberer Dogger.

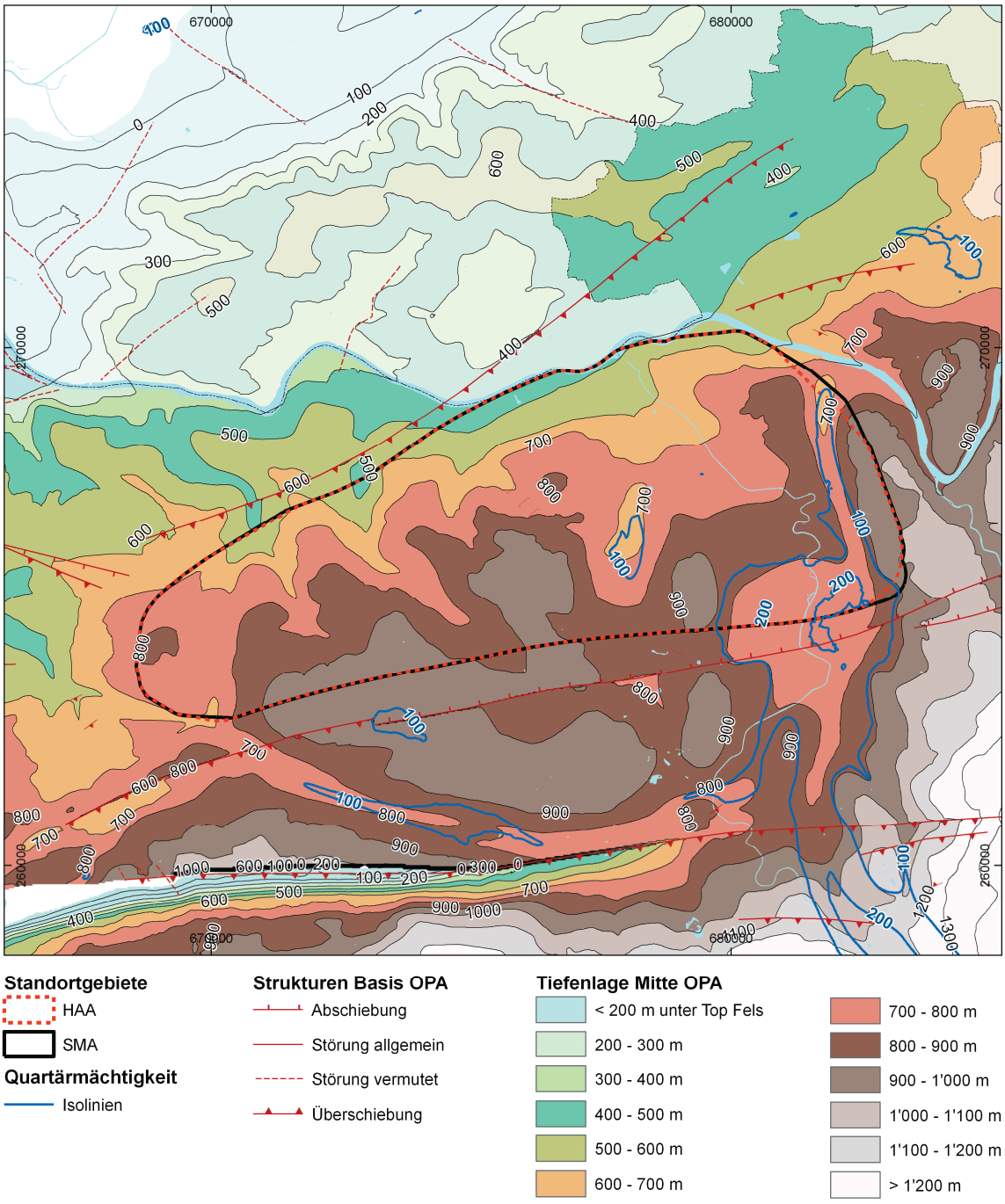


Fig. A3-24: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage Mitte Opalinuston unter Top Fels im Standortgebiet Nördlich Lägeren.

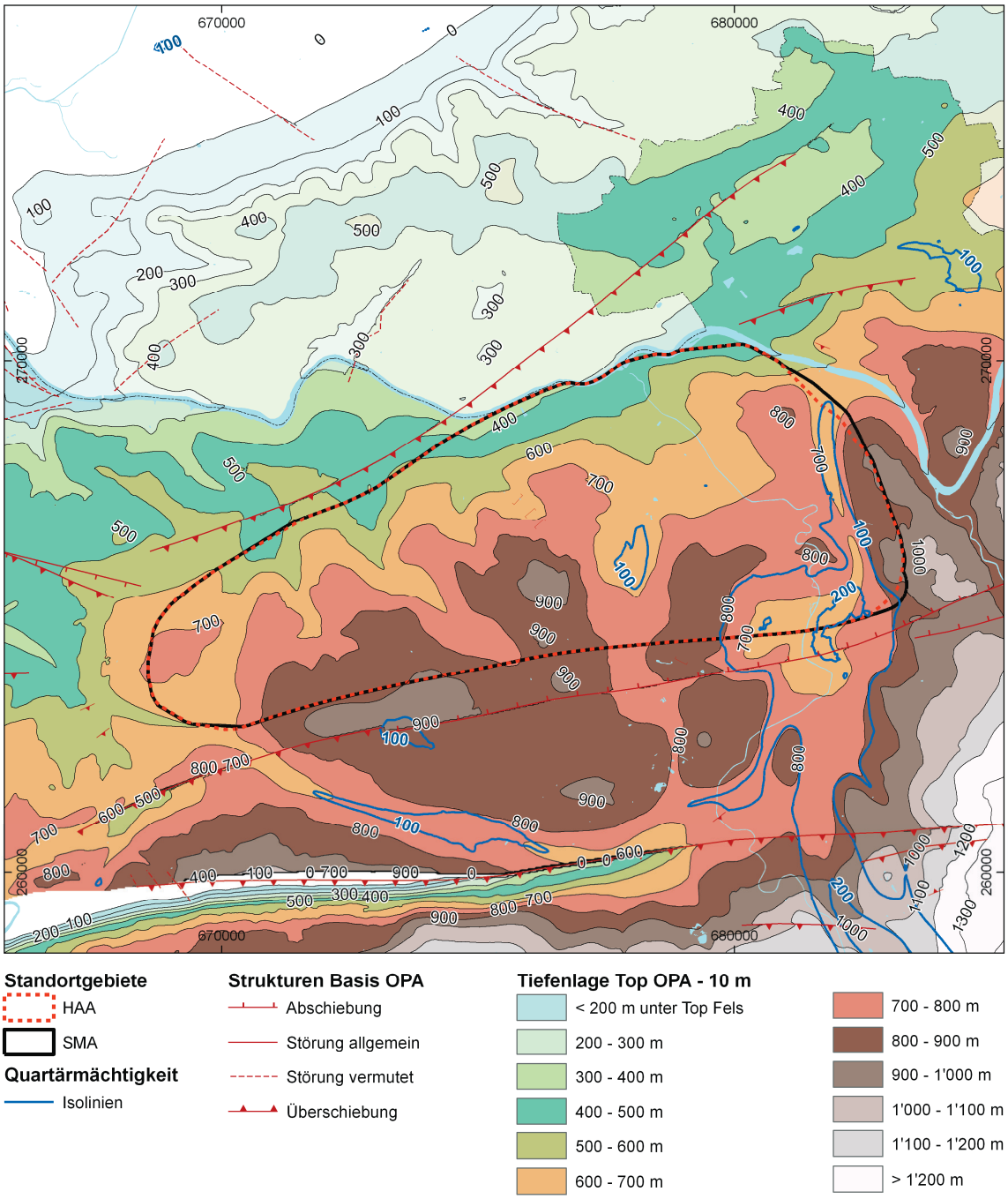


Fig. A3-25: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage 'Brauner Dogger' (Top Opalinuston minus 10 m) unter Top Fels im Standortgebiet Nördlich Lägeren.

A3.5.4 Geologische Grundlagen des Standortgebiets Bözberg

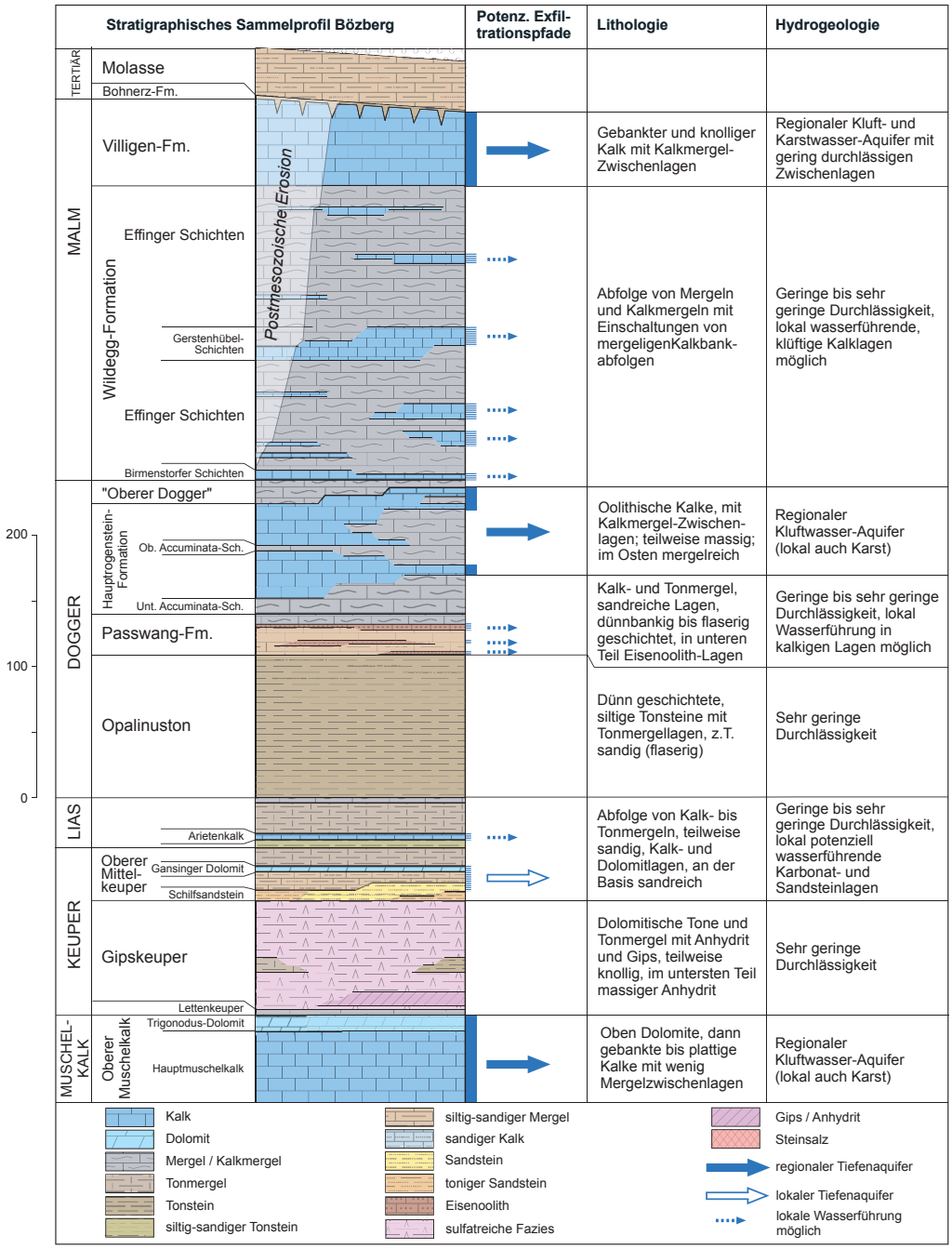


Fig. A3-26: Schematisches stratigraphisch-hydrogeologisches Sammelprofil für das Standortgebiet Bözberg (HAA und SMA).

Die stratigraphischen Verhältnisse basieren auf Angaben aus Bohrungen im näheren Umfeld des Standortgebiets, insbesondere aus der Bohrung Riniken (vgl. Beilage 5.2-1 und 5.2-2 in Nagra 2008c). Die potenzielle Wasserführung einzelner sandig-kalkiger Abfolgen in den oberen und unteren Rahmengesteinen des Opalinustons (gestrichelte blaue Pfeile) und ihre laterale Kontinuität ist schematisch dargestellt. In der Bohrung Riniken ist nur die weit unter dem Opalinuston liegende Abfolge Schilfsandstein – Gansinger Dolomit wasserführend. In der Sicherheitsanalyse wird trotzdem die ganze Bandbreite von möglichen Fliesspfaden analysiert (vgl. Anhang 5).

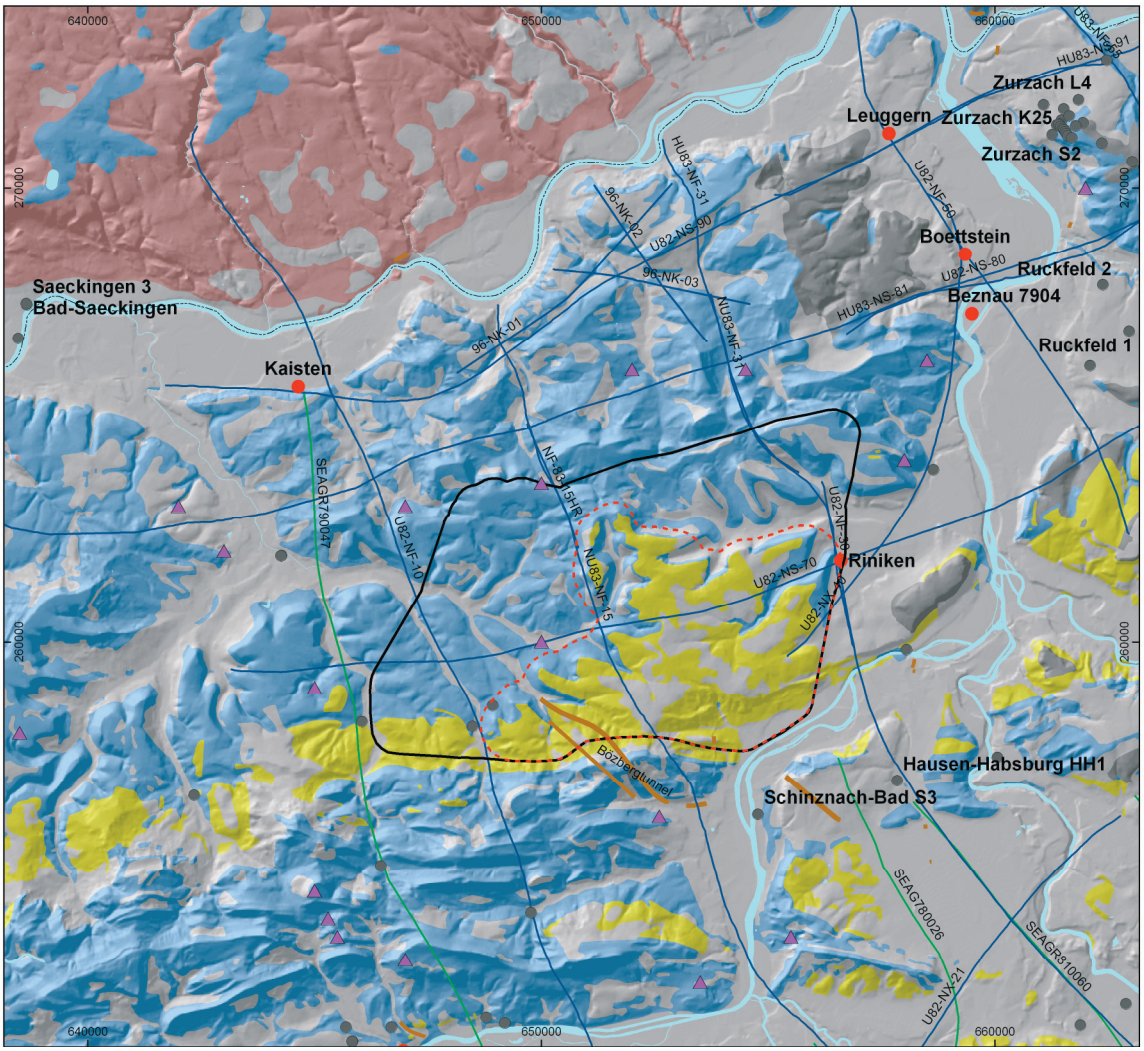


Fig. A3-27: Übersichtskarte 1:100'000 mit der Datengrundlage für das Standortgebiet Bözberg.

Lokalisation von seismischen Linien, Tiefbohrungen (≥ 200 m Endtiefe), Tunnelstrecken und Aufschluss- und Sammelprofilen sowie Angaben zur Geologie.

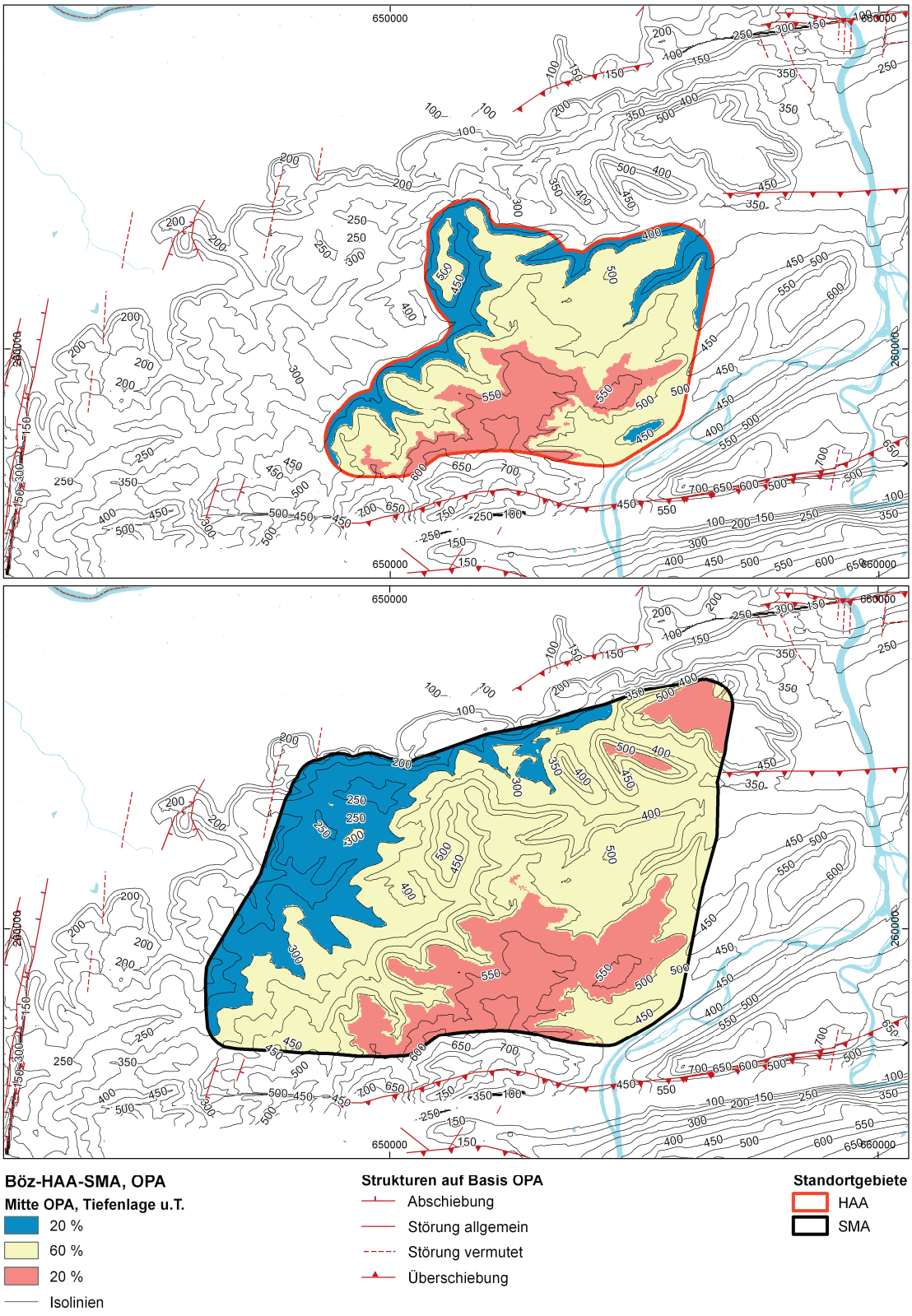


Fig. A3-28: Tiefenlage Opalinuston unter Terrain (Mitte Opalinuston) im Standortgebiet Bözberg im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit bezüglich HAA (oben) und SMA (unten).

Vergleiche Tab. A3-9.

Tab. A3-9: Tiefenlage der Wirtgesteine im Standortgebiet Bözberg.

WG	Typ	Wirtgestein	Tiefenlage Lagerebene im Standortgebiet (vgl. Fig. A3-26) [1]						
			Median	Min.	Min. inkl. Ung.	Max.	Max inkl. Ung.	Bandbreite für zentrale 60 %	Bandbreite für zentrale 60 % inkl. Ungewissheiten
OPA	HAA	Opalinuston	490	340	270	630	720	450 – 550	360 – 620
OPA	SMA	Opalinuston	410	150	90	630	720	300 – 510	220 – 600

[1] Alle Werte gerundet auf 10 m.

[2] Annahme für Lagerebene: Mitte Opalinuston.

Tab. A3-10: Mächtigkeit der Wirtgesteine, der Oberen und Unteren Rahmengesteine im Standortgebiet Bözberg.

Gerundete Werte.

WG	Typ	Geologische Einheit	Mächtigkeit ohne Berücksichtigung der Dekompaktion [m]		Flächenanteil mit reduzierter Mächtigkeit durch Dekompaktion [1] [%]	
			Referenzwert	Bandbreite [2]	ganz reduziert	teilweise reduziert
Wirtgesteine						
OPA	HAA	Opalinuston	105	85 – 130	0	0
	SMA	Opalinuston	105	85 – 130	0	5
Mächtigkeit der Oberen Rahmengesteine						
OPA	HAA	Top Opalinuston bis Top untere Accuminata-Schichten	60	40 – 80	0	10
	SMA	Top Opalinuston bis Top untere Accuminata-Schichten	60	40 – 80	35	20
Mächtigkeit der Unteren Rahmengesteine für das Wirtgestein Opalinuston						
OPA	SMA & HAA	Toniger Lias bis Arietenkalk	30	20 – 40	-	-
		Lias & Keuper bis Top Stubensdst./Gansinger Dol.	50	35 – 65	-	-
		Lias & Keuper (vollständig)	160	140 – 180	-	-

[1] Für die Wirtgesteine und die oberen Rahmengesteine werden nur die Mächtigkeitsanteile berücksichtigt, welche Überdeckungen von > 200 m (Opalinuston) bzw. > 300 m (obere Rahmengesteine) aufweisen.

[2] Unter Berücksichtigung der erwarteten Variabilität und Ungewissheiten.

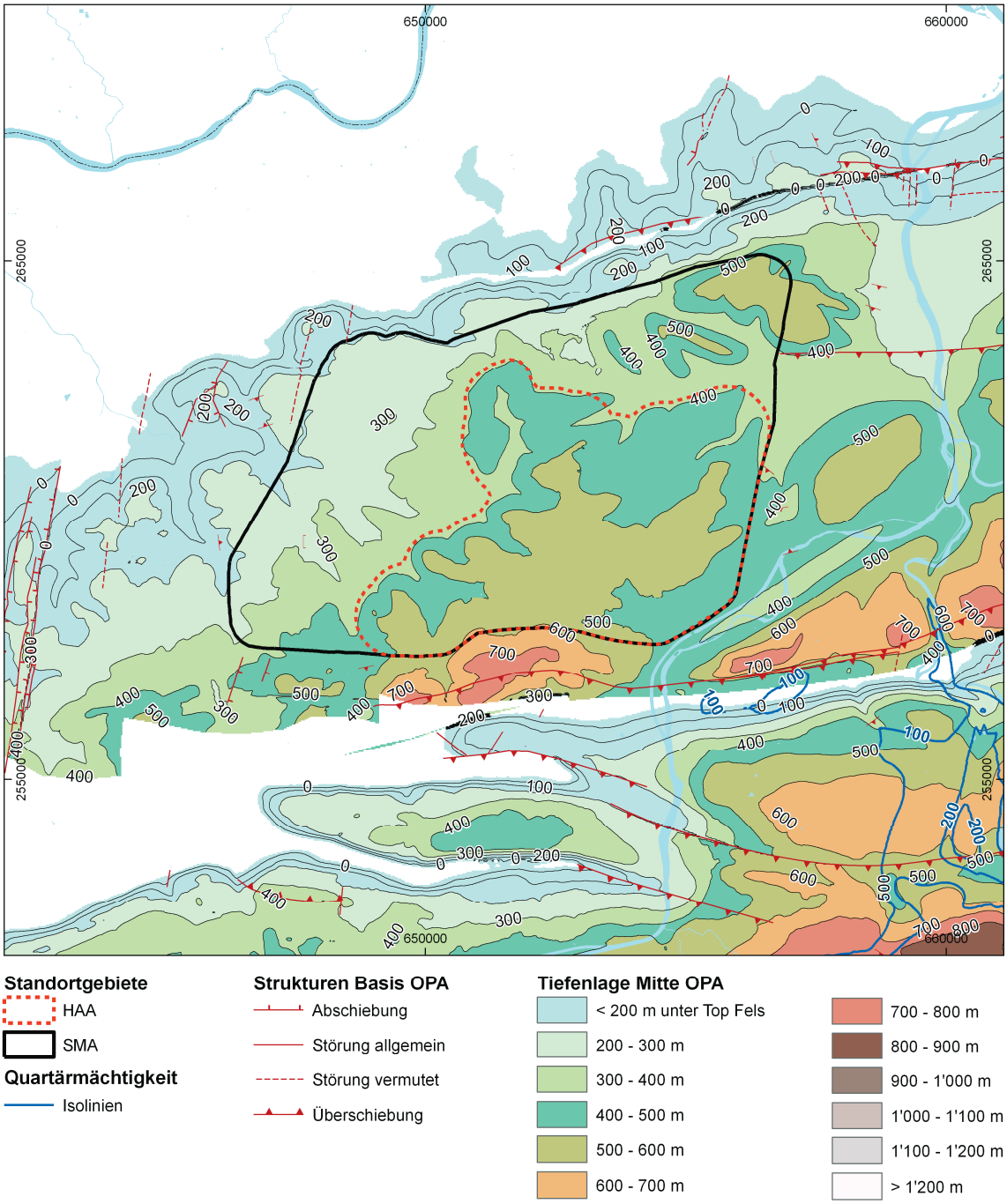


Fig. A3-29: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage Mitte Opalinuston unter Top Fels im Standortgebiet Bözberg.

A3.5.5 Geologische Grundlagen des Standortgebiets Jura-Südfuss

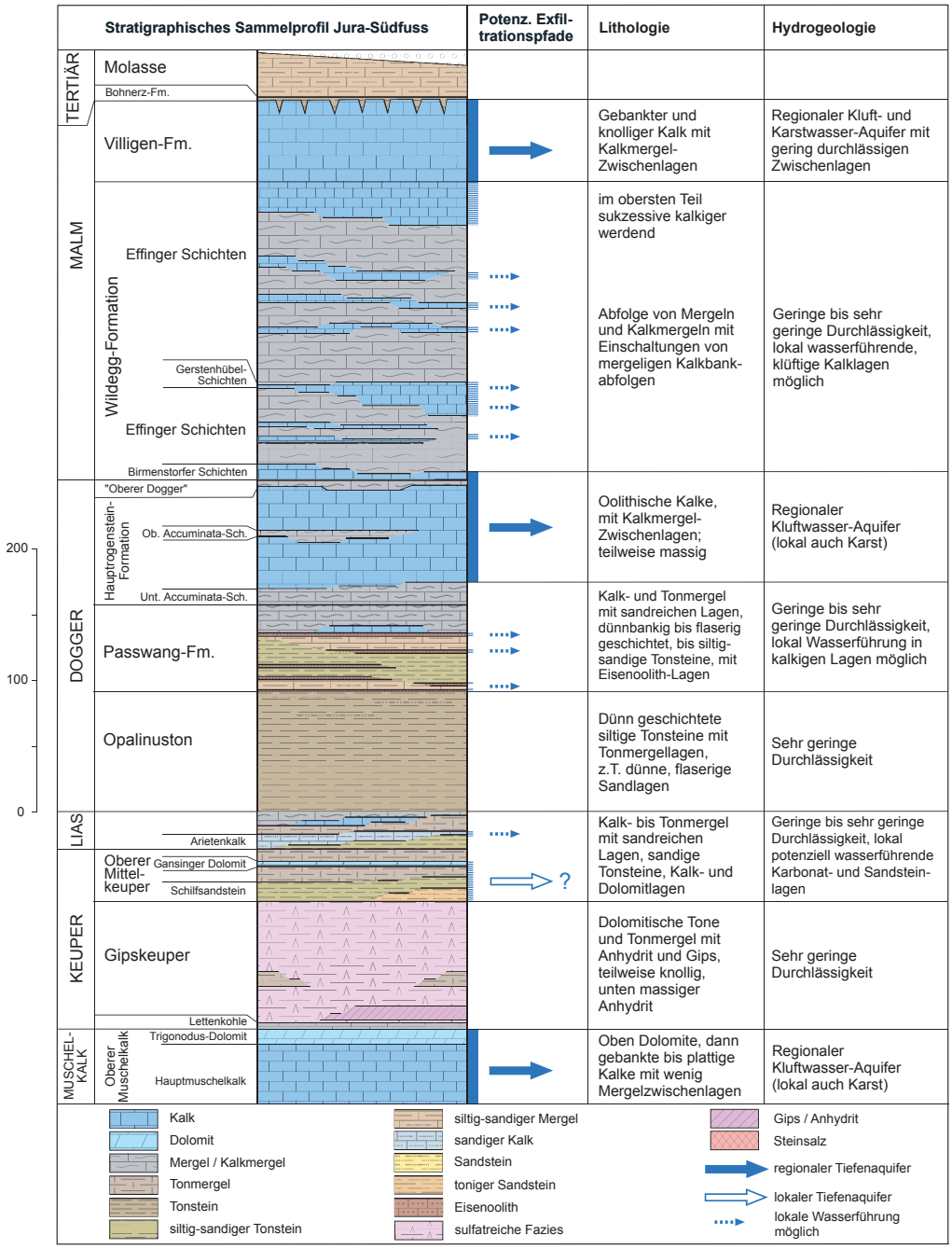


Fig. A3-30: Schematisches stratigraphisch-hydrogeologisches Sammelprofil für das Standortgebiet Jura-Südfuss (SMA).

Die stratigraphischen Verhältnisse basieren auf Angaben aus Bohrungen im näheren Umfeld des Standortgebiets (vgl. Beilage 5.2-1 und 5.2-2 in Nagra 2008c). Die potenzielle Wasserführung einzelner sandig-kalkiger Abfolgen in den oberen und unteren Rahmengesteinen des Opalinustons sowie in den Effinger Schichten (gestrichelte blaue Pfeile) und ihre laterale Kontinuität ist schematisch dargestellt. Aus der Bohrung Schafisheim gibt es keine Hinweise auf eine signifikante Wasserführung einer der sandig-kalkigen Abfolgen. In der Sicherheitsanalyse wird trotzdem die ganze Bandbreite von möglichen Fliesspfaden analysiert (vgl. Anhang 5). In den Effinger Schichten haben die Gerstenhübel-Schichten aufgrund ihrer Mächtigkeit das grösste Potenzial für eine signifikante Wasserführung. Dies wurde in der Sicherheitsanalyse berücksichtigt.

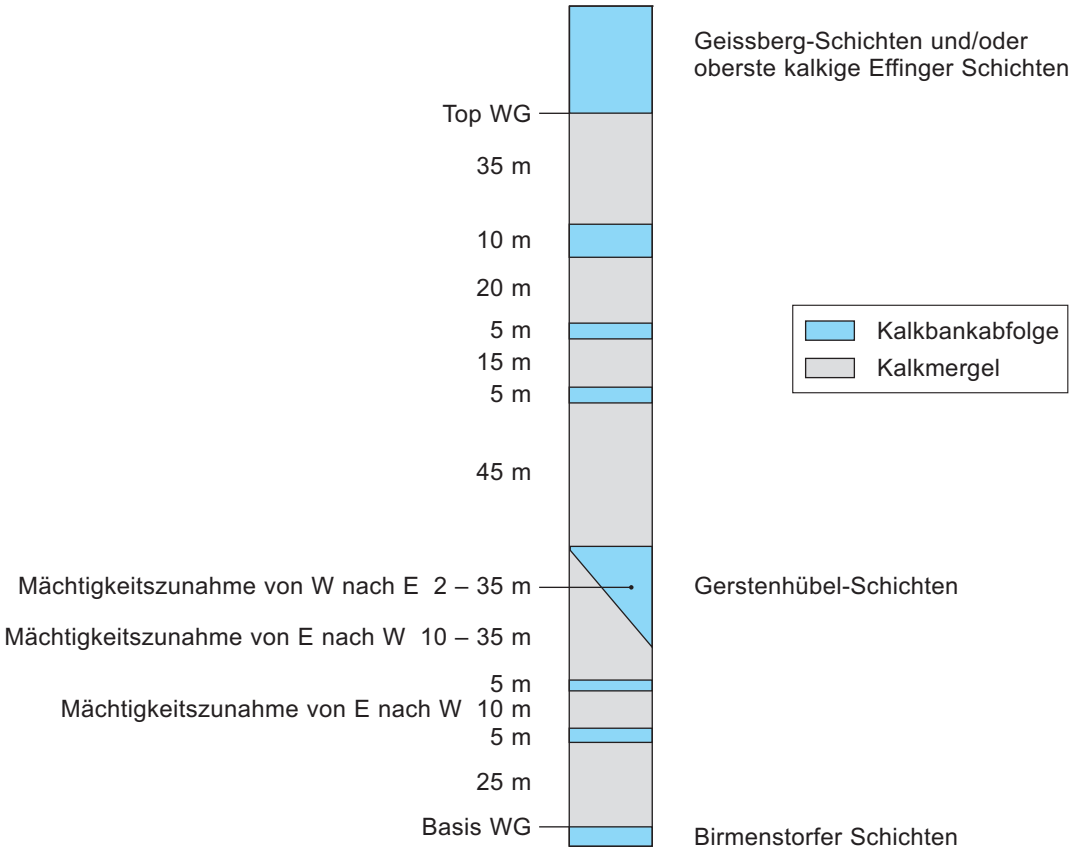


Fig. A3-31: Vereinfachte schematische Darstellung der sedimentären Architekturelemente der Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss als Grundlage für die Konzeptualisierung in der Sicherheitsanalyse.

Die sedimentären Architekturelemente der Effinger Schichten sind Gegenstand eines Projekts im Rahmen von SGT Etappe 2. Von Interesse ist insbesondere deren laterale Kontinuität, diese ist in Fig. A3-30 schematisch dargestellt.

Für die Testrechnungen gibt obige Figur eine vereinfachte schematische Darstellung der potenziell wasserführenden Kalkbankabfolgen gemäss Befund in den Bohrungen EWS Küttigen, Gösgen SB2 und Aarau Fliederweg (neue EWS-Bohrung), zwischen denen sich die Kalkbankabfolgen gut korrelieren lassen.

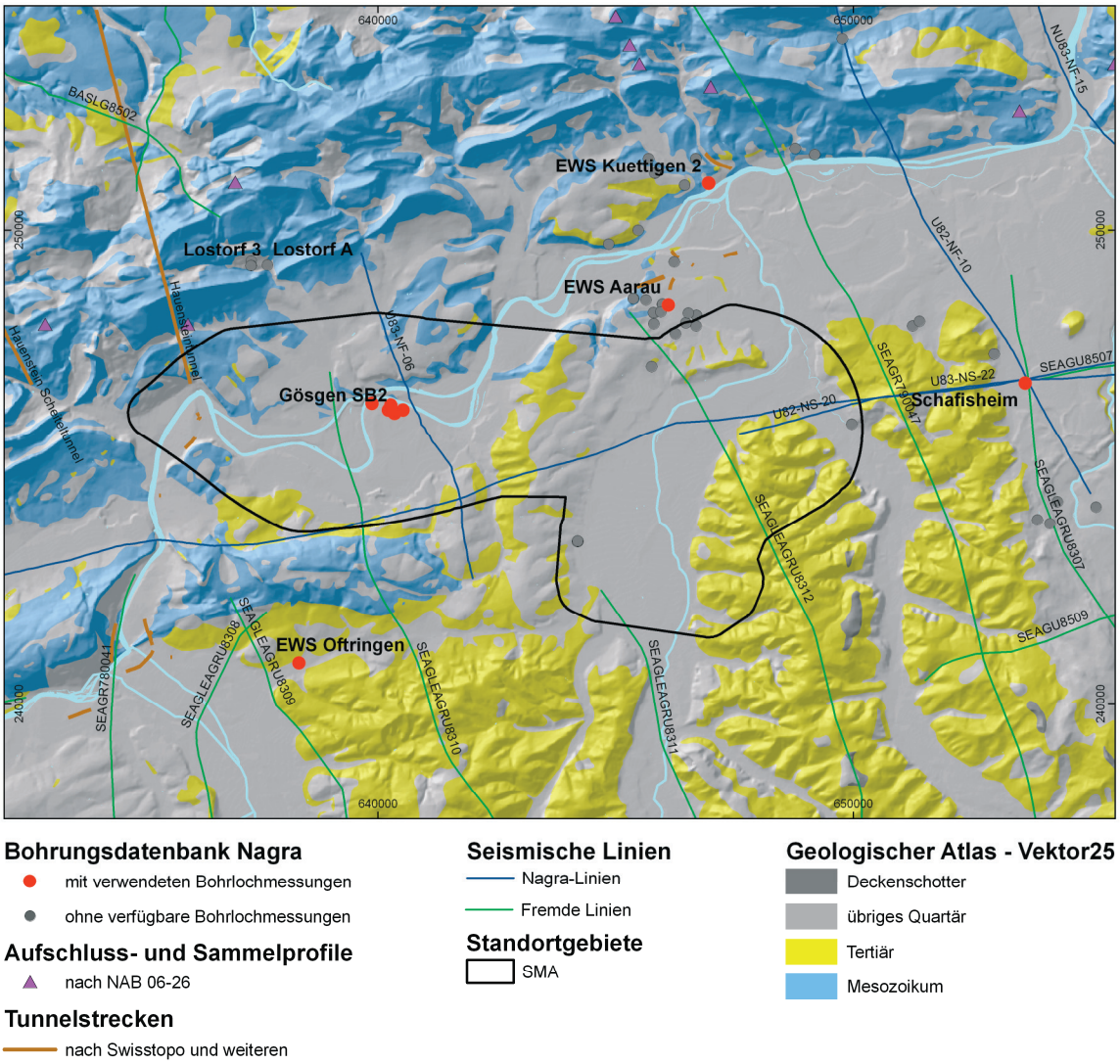


Fig. A3-32: Übersichtskarte 1:100'000 mit der Datengrundlage für das Standortgebiet Jura-Südfuss.

Lokalisation von seismischen Linien, Tiefbohrungen (≥ 200 m Endtiefe), Tunnelstrecken und Aufschluss- und Sammelprofilen sowie Angaben zur Geologie.

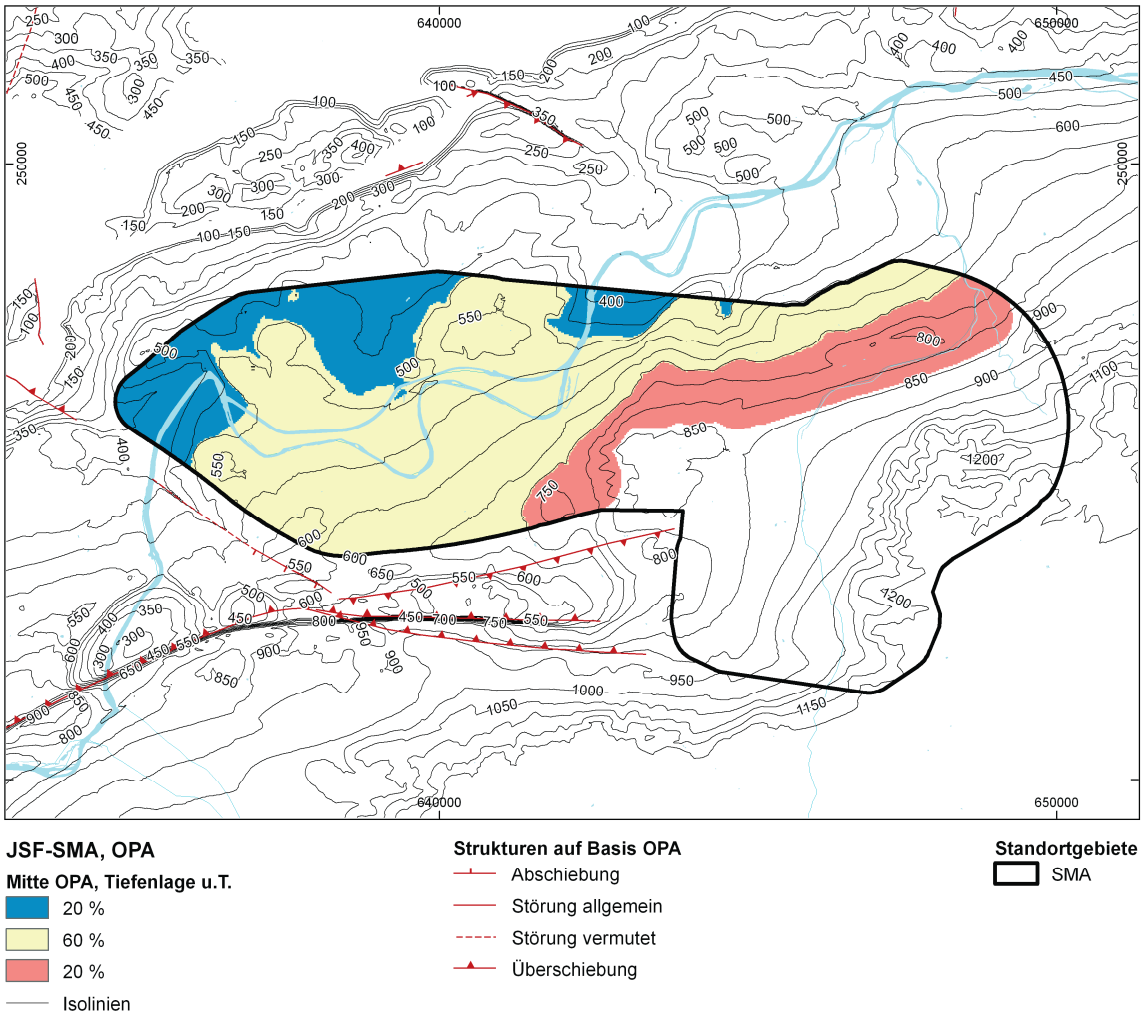


Fig. A3-33: Tiefenlage Opalinuston unter Terrain (Mitte Opalinuston) im Standortgebiet Jura-Südfuss im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit.

Vergleiche Tab. A3-11.

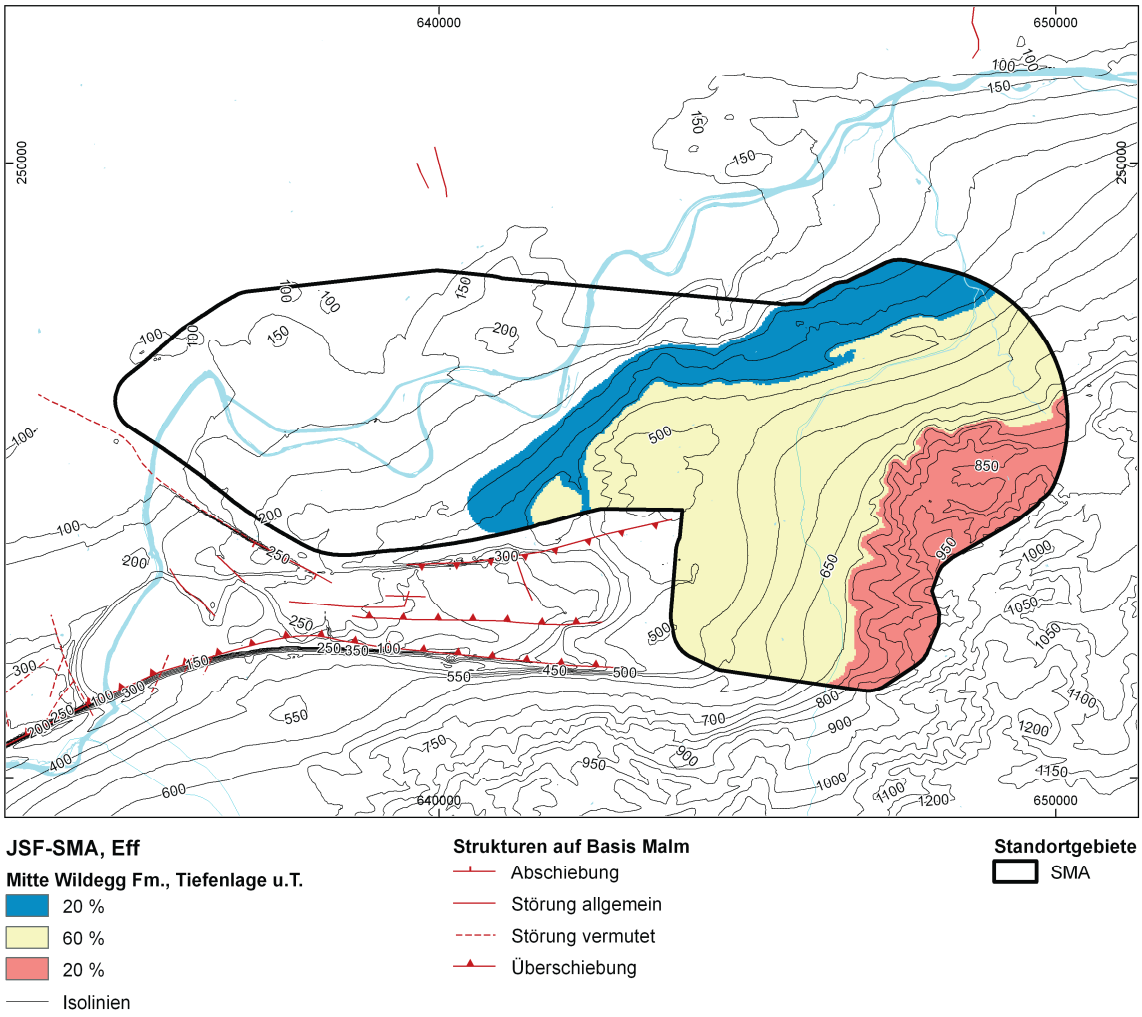


Fig. A3-34: Tiefenlage Effinger Schichten unter Terrain (Mitte EFF) im Standortgebiet Jura-Südfuss im Hinblick auf erosive Freilegung und Gesteinsdekompaktion sowie bautechnische Machbarkeit.

Vergleiche Tab. A3-11.

Tab. A3-11: Tiefenlage der Wirtgesteine im Standortgebiet Jura-Südfuss.

WG	Typ	Wirtgestein	Tiefenlage Lagerebene im Standortgebiet (vgl. Fig. A3-31 und A3-32) [1]						
			Median	Min.	Min. inkl. Ung.	Max.	Max inkl. Ung.	Bandbreite für zentrale 60 %	Bandbreite für zentrale 60 % inkl. Ungewissheiten
OPA	SMA	Opalinuston	560	330	230	840	960	490 – 700	380 – 820
EFF	SMA	Effinger Schichten	530	260	140	980	1140	410 – 720	280 – 870

[1] Alle Werte gerundet auf 10 m.

Tab. A3-12: Mächtigkeit der Wirtgesteine, der Oberen und Unteren Rahmengesteine im Standortgebiet Jura-Südfuss.

WG	Typ	Geologische Einheit	Mächtigkeit ohne Berücksichtigung der Dekompaktion [m]		Flächenanteil mit reduzierter Mächtigkeit durch Dekompaktion [1] [%]	
			Referenz wert	Band-breite [3]	ganz reduziert	teilweise reduziert
Wirtgesteine						
OPA	SMA	Opalinuston	85	65 – 105	0	0
EFF	SMA	Effinger Schichten [2]	220	170 – 260	0	20
Mächtigkeit der Oberen Rahmengesteine						
OPA	SMA	Top Opalinuston bis Top untere Accuminata-Schichten	75	50 – 100	0	5
Mächtigkeit der Unteren Rahmengesteine für das Wirtgestein Opalinuston						
OPA	SMA & HAA	Toniger Lias bis Arietenkalk [4]	15	0 – 20	-	-
		Lias & Keuper bis Top Stubensdst./Gansinger Dol.	35	30 – 50	-	-
		Lias & Keuper (vollständig)	160	140 – 180	-	-

[1] Für die Wirtgesteine und die oberen Rahmengesteine werden nur die Mächtigkeitsanteile berücksichtigt, welche Überdeckungen von > 200 m (Opalinuston) bzw. > 300 m (Effinger Schichten, obere Rahmengesteine) aufweisen.

[2] Betrachtet wird die ganze Wildegg-Formation, d.h. die Effinger Schichten und die geringmächtigen Birmenstorfer Schichten.

[3] Unter Berücksichtigung der erwarteten Variabilität und Ungewissheiten.

[4] Lias in Pfaffnau nicht tonig.

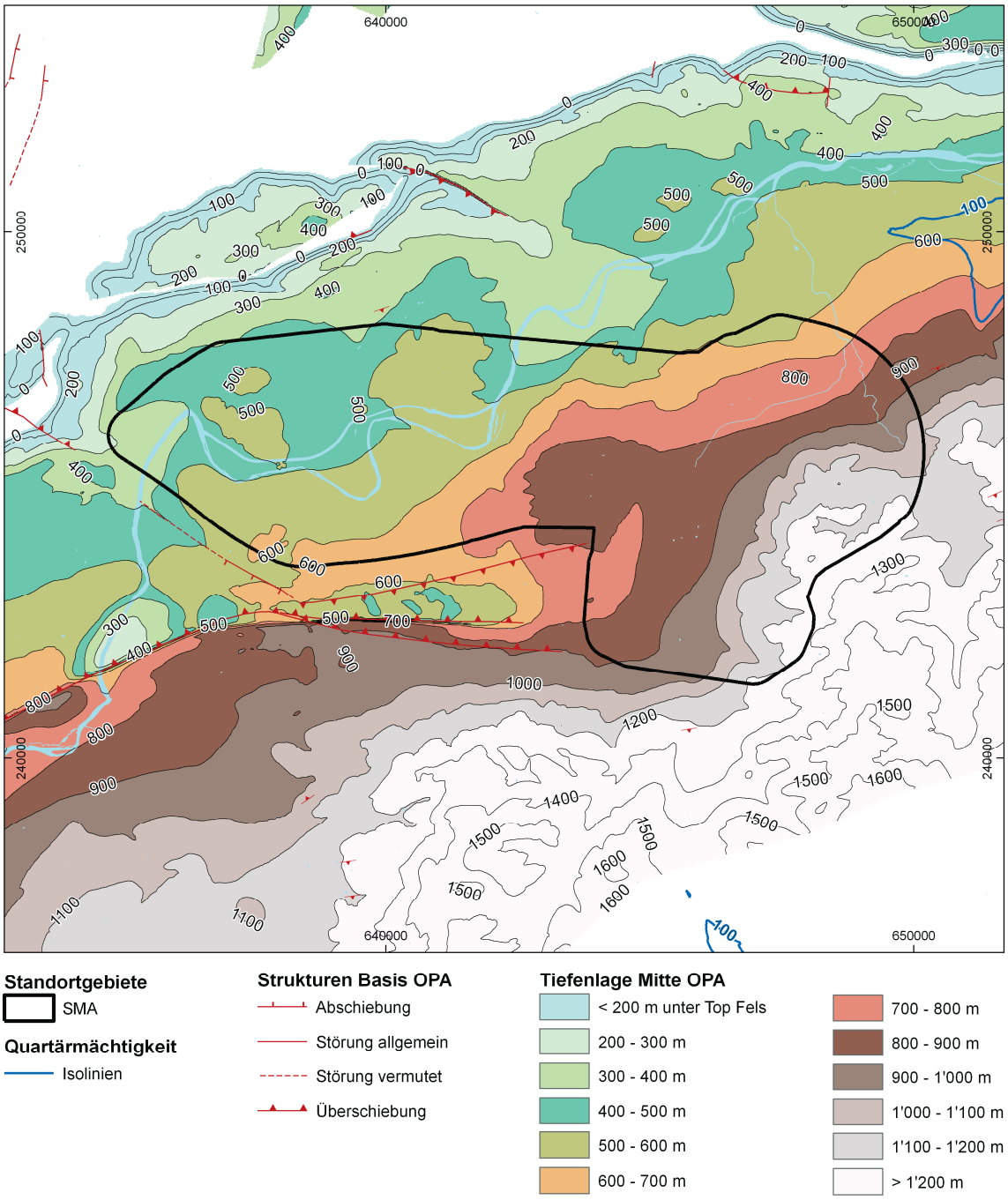


Fig. A3-35: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage Mitte Opalinuston unter Top Fels im Standortgebiet Jura-Südfuss.

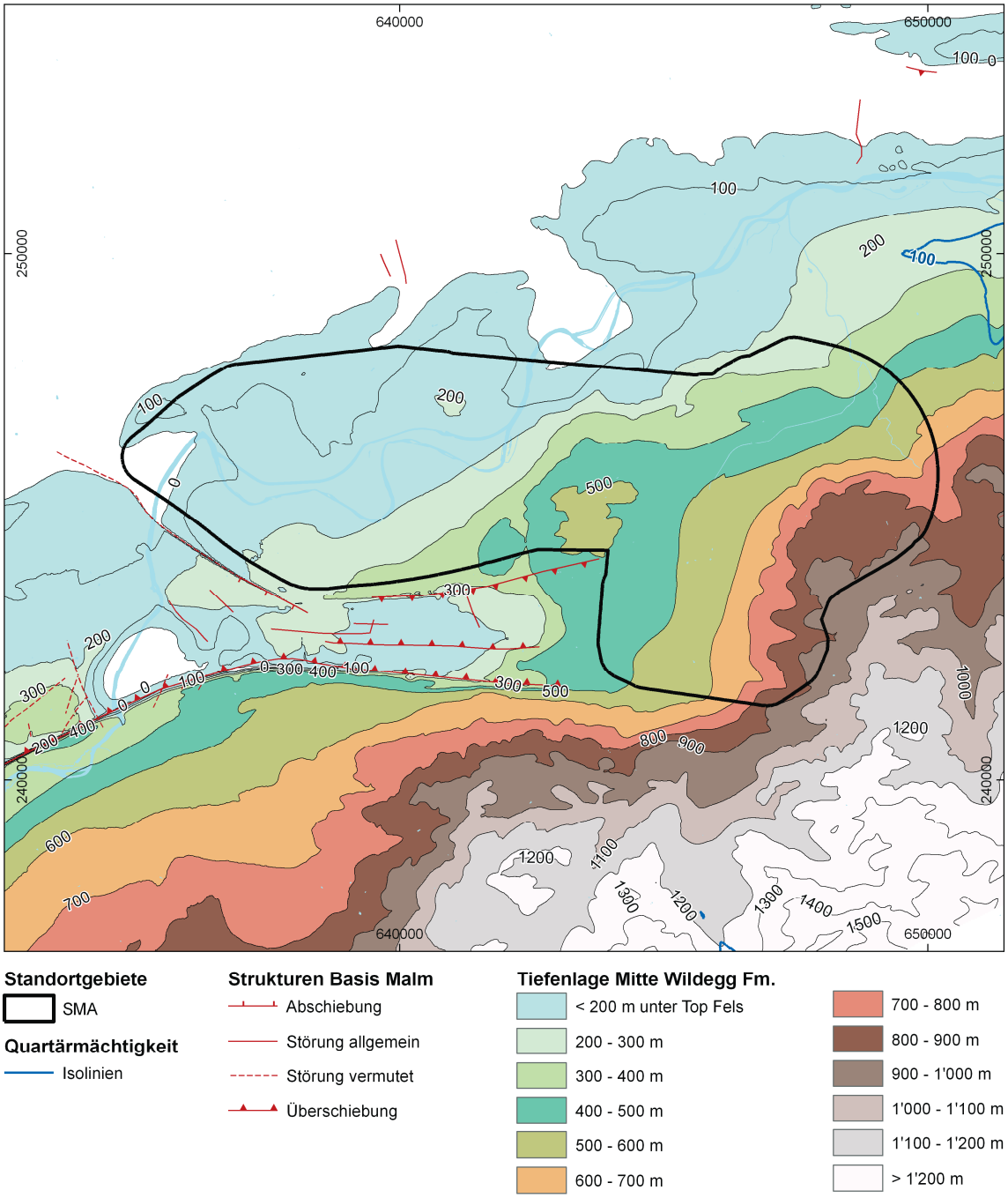


Fig. A3-36: Tiefe Felsrinnen und Tiefenlage Effinger Schichten (Mitte Wildegg-Formation) unter Top Fels im Standortgebiet Jura-Südfuss.

A3.5.6 Geologische Grundlagen des Standortgebiets Wellenberg

Die geologischen Grundlagen des Standortgebiets Wellenberg sind in der Geosynthese (Nagra 1997) dokumentiert.

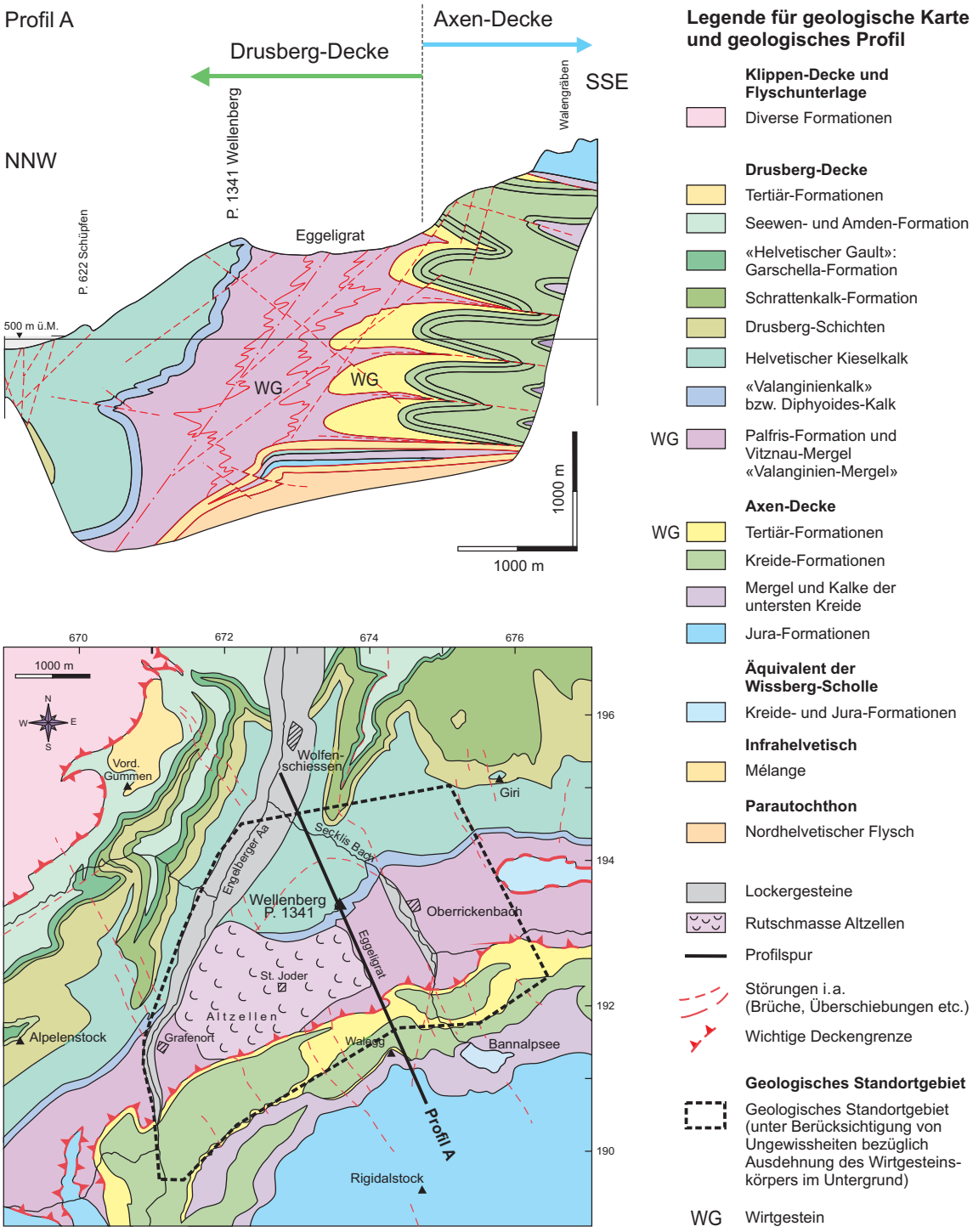


Fig. A3-37: Profil (oben) und Übersichtskarte (unten) für das Standortgebiet Wellenberg (aus Nagra 2008b, c) (SMA).

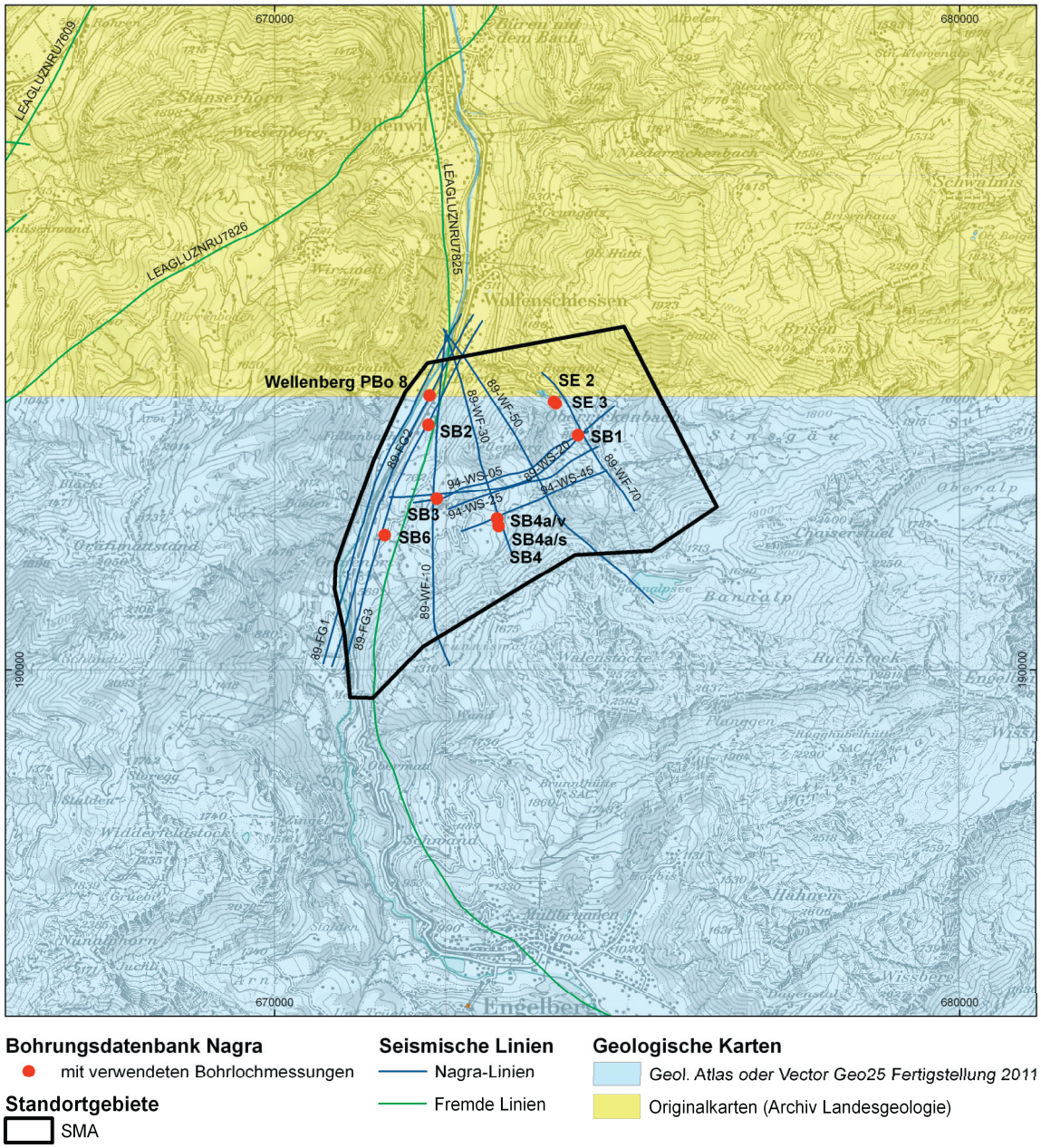


Fig. A3-38: Übersichtskarte 1:100'000 der Datengrundlage für das Standortgebiet Wellenberg mit seismischen Linien, Tiefbohrungen (≥ 200 m Endtiefe), geologischem Kartenmaterial, Tunnelstrecken.

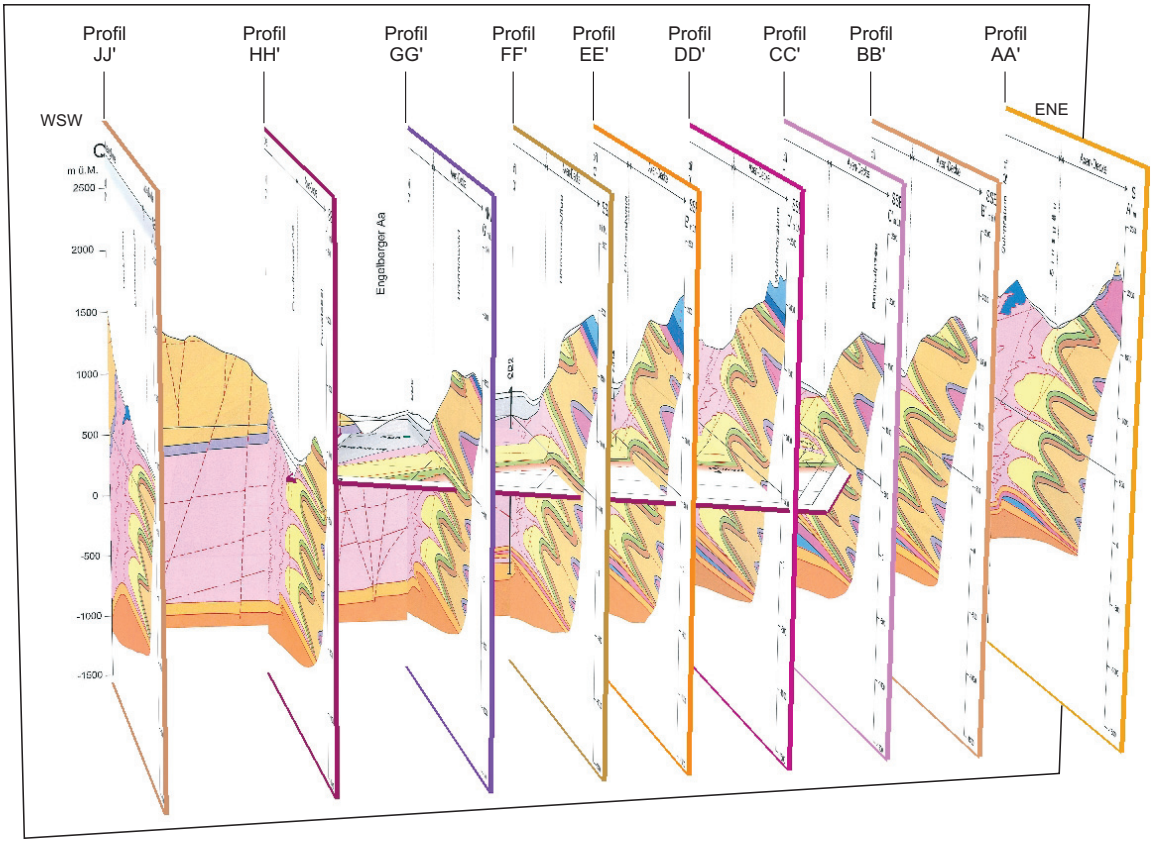


Fig. A3-39: Geologisches 3D-Modell des Standortgebiets Wellenberg – 3D-Ansicht der geologischen Profile in Richtung Norden (aus Kuhn 2009).

Das Platzangebot für Lagerzonen ist in Kuhn (2009) in den einzelnen Profilen und zusätzlich in mehreren Horizontalschnitten auf verschiedenen Koten (m ü.M.) abgebildet.

Anhang A4: Rechenfälle für die Testrechnungen

Die Evaluation des Kenntnisstands über die für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 relevanten Prozesse und Parameter erfolgt bezüglich der technischen Machbarkeit und bezüglich der Sicherheit anhand von Systemanalysen sowie anhand von Testrechnungen (Dosiskurven). Die relevanten Prozesse und Parameter werden in Kap. 3.2 identifiziert und in Tab. 3.2-1 wird aufgezeigt, welche dieser Prozesse und Parameter direkt in die Testrechnungen (Dosiskurven) einfliessen. Kap. 6.3 enthält eine Übersicht über die Rechenfälle für die Testrechnungen, Kap. 6.4 eine Übersicht über die verwendeten Modellkonzepte und Inputdaten und in Kap. 6.5 werden die Resultate der Testrechnungen diskutiert; Anhang 7 enthält alle Dosiskurven. Die Evaluation des Kenntnisstands erfolgt in Kap. 7.

Im vorliegenden Anhang A4 wird detailliert aufgezeigt, wie die relevanten Prozesse und Parameter in den Testrechnungen für die verschiedenen geologischen Standortgebiete berücksichtigt werden (vgl. Überblick in Tab. A4-1). Tab. A4-2 enthält die Liste der ENSI-Rechenfälle (ENSI 2010a), einschliesslich der damit berücksichtigten Prozesse und Parameter sowie Hinweise auf die dabei verwendeten Daten. Tab. A4-3 enthält die Liste der Rechenfälle bezüglich Geologie, die damit berücksichtigten geologischen Prozesse und Parameter, eine Erläuterung der Systematik der verwendeten Rechenfallbezeichnungen sowie Angaben zu den wichtigsten dabei verwendeten Parametern (effektive hydraulische Durchlässigkeit; Transmissivitäten, Frequenzen und vertikale Transportpfadlängen für vertikale Klüfte und Störungszonen; Transmissivitäten, Frequenzen und horizontale Transportpfadlängen für Klüfte in sedimentären Architekturelementen). Tab. A4-4 enthält die Zuweisung von Transportparametern für vertikale Transportpfade mit standortspezifischer Aufteilung in Abschnitte mit höherem und niedrigerem Tongehalt.

Die Modellkonzepte für die Transportpfade im Wirtgestein und in den oberen Rahmengesteinen in den verschiedenen geologischen Standortgebieten werden in Anhang A5 anhand von Schemata und Kurzbeschreibungen dargelegt. Anhang A6 enthält tabellarisch alle wichtigen Inputdaten für die Testrechnungen. In Anhang A7 werden die Resultate der Testrechnungen (Dosiskurven) präsentiert, unter Verwendung der in vorliegendem Anhang A4 erläuterten Rechenfallbezeichnungen.

Tab. A4-1: Liste der Prozesse und Parameter, für welche die Eindeutigkeit der Aussagen ("sicherheitstechnische Eignung" bzw. "sicherheitstechnische Gleichwertigkeit") anhand von spezifischen Rechenfällen zur Erfassung der Bandbreiten evaluiert wird (vgl. Tab. 3.2-1).

Buchstabe, Farbcode: ENSI-Fälle (a – g), Alternative Fälle (A), "What if?"-Fälle (W)
Nummerierung: Erste Ziffer: Rechenfall-Kategorie gemäss Tab. 6.3-1
Zweite Ziffer: Laufnummer pro Rechenfall-Kategorie (gemeinsame Laufnummer für alternative und "What if?"-Fälle)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	HAA ZNO	HAA NL	HAA BB	SMA SR	SMA ZNO	SMA NL	SMA BB	SMA JSF	SMA WLB	Kombi ZNO	Kombi NL	Kombi BB
		OPA	OPA	OPA	OPA	BD OPA	BD OPA	OPA	EFF OPA	MGL MGL	BD OPA	BD OPA	OPA
1. Relevante Prozesse und Parameter für die technischen Barrieren (PT)													
PT-1	Behälterlebensdauer BE/HAA	g	g	g							g	g	g
PT-2	Auflösungsrate für Brennstoffmatrix und Hüllrohre BE	f	f	f							f	f	f
PT-3	Löslichkeitslimiten im Nahfeld BE/HAA/LMA	c	c	c							c	c	c
PT-4	Sorptionskoeffizienten im Nahfeld	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d
PT-5	Advektion bzw. Diffusion im Nahfeld	a W4.1 W8.1	a W4.1 W8.1	a A10.1 W4.1 W8.1	a W4.1 W8.1	a A7.1 A7.2 A7.3 W4.1 W8.1	a A7.3 A7.4 A7.5 W4.1 W8.1	a W4.1 W8.1	a A5.1 A5.2 A6.1 A6.2 A7.1 A7.2 A7.3 W4.1 W8.1	a A8.1 A8.2 A8.3 A8.4 W4.1 W8.5	a A7.1 A7.2 A7.3 W4.1 W8.1	a A7.3 A7.4 A7.5 W4.1 W8.1	a A10.1 W4.1 W8.1

Tab. A4-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	HAA ZNO	HAA NL	HAA BB	SMA SR	SMA ZNO	SMA NL	SMA BB	SMA JSF	SMA WLB	Kombi ZNO	Kombi NL	Kombi BB
		OPA	OPA	OPA	OPA	BD OPA	BD OPA	OPA	EFF OPA	MGL MGL	BD OPA	BD OPA	OPA
2. Relevante Prozesse und Parameter für die geologischen Barrieren (PG)													
PG-6	Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit	a W4.1	a W4.1	a W4.1	a W4.1	a A7.1 A7.2 A7.3 A7.4 A7.5 W4.1	a A7.1 A7.2 A7.3 A7.4 A7.5 W4.1	a W4.1	a A5.1 A5.2 A6.1 A6.2 A7.1 A7.2 A7.3 W4.1 W9.1	a W4.1	a A7.1 A7.2 A7.3 A7.4 A7.5 W4.1	a A7.1 A7.2 A7.3 A7.4 A7.5 W4.1	a W4.1
PG-7	Einfluss Dekompaktion auf hydraulische Durchlässigkeit			A10.1									A10.1
PG-8	Hydraulischer Gradient [1)]												
PG-9	Art der Transportpfade	a A7.1 A7.3 A7.4 A7.5 W4.1	a A7.1 A7.2 A7.3 A7.5 W4.1	A7.1 A7.2	A7.1 A7.2	a A7.1 A7.2 A7.3 A7.4 A7.5 W4.1	a A7.1 A7.2 A7.3 A7.4 A7.5 W4.1	A7.1 A7.2	a A5.1 A5.2 A6.1 A6.2 A7.1 A7.2 A7.3 A7.4 A7.5 W4.1	A5.1	a A7.1 A7.2 A7.3 A7.4 A7.5 W4.1	a A7.1 A7.2 A7.3 A7.4 A7.5 W4.1	A7.1 A7.2

[1)] In allen Rechenfällen wird derselbe hydraulische Gradient i angenommen (vertikal: i_v = 1 m/m; horizontal: i_h = 0.1 m/m; WLB: i = 0.4 m/m). Die Ungewissheit bezüglich des hydraulischen Gradienten wird abgedeckt durch die breiten Parametervariationen der grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit bzw. der Transmissivität der Störungszonen/Klüfte.

Tab. A4-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	HAA ZNO	HAA NL	HAA BB	SMA SR	SMA ZNO	SMA NL	SMA BB	SMA JSF	SMA WLB	Kombi ZNO	Kombi NL	Kombi BB
		OPA	OPA	OPA	OPA	BD OPA	BD OPA	OPA	EFF OPA	MGL MGL	BD OPA	BD OPA	OPA
2. Relevante Prozesse und Parameter für die geologischen Barrieren (PG)													
PG-10	Porosität [2)]												
PG-11	Sedimentäre Architekturelemente	A7.1 A7.3 A7.4 A7.5 W9.2	A7.1 A7.2 A7.3 A7.5 W9.1	A7.1 A7.2 W9.1	A7.1 A7.2 W9.1	A7.1 A7.2 A7.3 A7.4 A7.5 W9.2	A7.1 A7.2 A7.3 A7.4 A7.5 W9.1	A7.1 A7.2 W9.1	A7.1 A7.2 A7.3 A7.4 A7.5 W9.1		A7.1 A7.2 A7.3 A7.4 A7.5 W9.2	A7.1 A7.2 A7.3 A7.4 A7.5 W9.1	A7.1 A7.2 W9.1
PG-12	Lage und Beschaffenheit von verkarstungsfähigen Gesteinen innerhalb des Wirtgesteins [3)]								W9.1				
PG-13	Länge der Transportpfade	W9.2	W9.1	A10.1 W9.1	W9.1	A9.1 W9.2	W9.1	W9.1	W9.1		A9.1 W9.2	W9.1	A10.1 W9.1
PG-14	Transmissivität Störungszonen	W8.1	W8.1	W8.1	W8.1	W8.1	W8.1	W8.1	A5.1 A5.2 W8.1	A8.1 A8.2 A8.3 A8.4 W8.5	W8.1	W8.1	W8.1
PG-18	Salinität								A6.3				

[2)] Über Eckwerte für effektive Diffusionskoeffizienten und direkt als Inputparameter berücksichtigt.

[3)] Über "What if?"-Fälle mit reduzierter Transportpfadlänge im Wirtgestein abgedeckt.

Tab. A4-1: (Fortsetzung)

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter	HAA ZNO	HAA NL	HAA BB	SMA SR	SMA ZNO	SMA NL	SMA BB	SMA JSF	SMA WLB	Kombi ZNO	Kombi NL	Kombi BB
		OPA	OPA	OPA	OPA	BD OPA	BD OPA	OPA	EFF OPA	MGL MGL	BD OPA	BD OPA	OPA
2. Relevante Prozesse und Parameter für die geologischen Barrieren (PG)													
PG-20	Kolloidfiltration	A7.3 A7.5	A7.2 A7.5	A7.2	A7.2	A7.3 A7.5	A7.2 A7.5	A7.2	A5.2 A6.2 A7.3 A7.5	A6.2 A8.4	A7.3 A7.5	A7.2 A7.5	A7.2
PG-21	Sorptionskoeffizienten für WG/EG	d	d	d	d	d	d	d	d A6.3	d A8.2	d	d	d
PG-22	Diffusionskoeffizienten für WG/EG	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
PG-24	Auswirkungen pH-Fahne auf Wirtgestein					A7.2	A7.4		A6.1 A7.2	A6.1 A8.3	A7.2	A7.4	
PG-31	Klimaentwicklung im Hinblick auf Abschätzung der Wasserflüsse bei der Biosphärenmodellierung	e1 e2	e1 e2	e1 e2	e1 e2	e1 e2	e1 e2	e1 e2	e1 e2	e1 e2	e1 e2	e1 e2	e1 e2

Tab. A4-2: Liste der ENSI-Rechenfälle, der damit berücksichtigten Prozesse und Parameter aus Tab. 3.2-1 und Hinweise auf die dabei verwendeten Daten.

Die Konzeptualisierung der Transportpfade in der Geosphäre für die ENSI-Fälle b bis g entspricht jener des Referenzfalls.

In den Dosiskurven im Anhang A7 sind die ENSI-Rechenfälle mit den entsprechenden Kleinbuchstaben und Kurzbeschreibungen gekennzeichnet.

ENSI-Fall	**Beschreibung**	**Kurz-beschreibung**	**Berücksich-tigte Prozesse und Parameter**	**Hinweis auf verwendete Daten**
a	Berechnungen mit einem gegenüber dem Referenzfall erhöhten Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich (oberer Eckwert)	Erhöhter Wasserfluss	PG-6, PG-9, PT-5	Tab. A4-3
b	Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall ungünstigen nuklidspezi-fischen Diffusionskoeffizienten (obere Eckwerte für homogen-poröse Wirt-gesteine, untere Eckwerte für geklüf-tete Wirtgesteine) in der Geosphäre	Ungünstige Diffusions-koeffizienten in der Geosphäre	PG-22	Tab. A6-11
c	Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall erhöhten nuklidspezi-fischen Löslichkeitslimiten (obere Eckwerte) im Nahfeld	Erhöhte Löslich-keitslimiten im Nahfeld	PT-3	Tab. A6-4, Tab. A6-6
d	Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall verringerten Sorptions-koeffizienten (untere Eckwerte für K_d) im Nah- und Fernfeld. Falls der K_d-Referenzwert eines Nuklids weniger als 0.001 m^3/kg beträgt, ist in den Berechnungen ein K_d-Wert von 0 m^3/kg zu verwenden.	Verringerte Sorptionskoeffi-zienten im Nah-feld und in der Geosphäre	PT-4, PG-21	Tab. A6-5, Tab. A6-7, Tab. A6-9
e1	Mögliche alternative Klimavariante: Wärmeres und trockeneres Klima	Alternative Klimavariante: Wärmeres trocke-neres Klima	PG-31	Kap. 6.4, Anhang A6.4
e2	Mögliche alternative Klimavariante: Eiszeitliches Klima	Alternative Klimavariante: Eiszeitliches Klima	PG-31	Kap. 6.4, Anhang A6.4
f	Berechnungen mit einer gegenüber dem Referenzfall hundertfach erhöhten Auf-lösungsrate der einzulagernden abge-brannten Brennelemente (Brennstoff-matrix und Brennelementhüllrohre)	Hundertfach erhöhte Auf-lösungsrate der Brennelemente	PT-2	Referenz-werte: Tab. A6-3
g	Berechnungen mit Annahme einer auf 1'000 Jahre begrenzten Behälterlebensdauer	Begrenzte Lebensdauer der BE- und HAA-Behälter von 1'000 a	PT-1	Referenz-wert: 10'000 Jahre

Tab. A4-3: Liste der Geosphären-basierten Rechenfälle, der damit berücksichtigten geologischen Prozesse und Parameter und Angabe der wichtigsten dabei verwendeten Parameter.

Die ENSI-Fälle b bis g sind hier nicht aufgeführt. Für alle SMA-Lager mit zwei Lagerebenen werden, ausgehend vom Referenzfall, zusätzliche Rechenfälle gerechnet, in welchen das gesamte SMA-Lager-Inventar vollständig in der oberen Lagerebene (R_o) bzw. in der unteren Lagerebene (R_u) eingelagert wird. Zusätzliche, hier nicht aufgeführte Rechenfälle sind im EDR dokumentiert (Nagra 2010b).

Legende:

Rechenfallkürzel	R	Referenzfall
	a	ENSI-Fall a (erhöhter Wasserfluss)
	A	Alternativer Fall
	W	"What if?"-Fall
Kat.	Rechenfall-Kategorie gemäss Definition in Tab. 6.3-1	
PG	Relevante Prozesse & Parameter mit Bezug zu den geologischen Barrieren (Tab. A2-1 und A4-1)	
Lager	SMA	SMA-Lager bzw. SMA-Teillager (Kombi-BB) auf einer Lagerebene
	SMA_o	obere SMA-Lagerebene bzw. -Teillagerebene (Kombi-ZNO/NL)
	SMA_u	untere SMA-Lagerebene bzw. -Teillagerebene (Kombi-ZNO/NL)
	HAA	HAA-Lager bzw. HAA-Teillager (Kombi)
Gestein	Betrachtete Gesteine. Das Wirtgestein ist mit fetter Schrift dargestellt.	

Geologische Standortgebiete in der Nordschweiz

K_v Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit der betrachteten Gesteine in vertikaler Richtung (falls diese als homogen-poröses Medium konzeptualisiert sind). Für diejenigen Rechenfälle **ohne** Wasserfluss in horizontalen sedimentären Architekturelementen innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (EG) bestimmt das Gestein mit der geringsten hydraulischen Durchlässigkeit in der betrachteten Gesteinsabfolge den vertikalen Wasserfluss (dargestellt in fetter Schrift). Falls diesem Gestein keine Transportpfadlänge zugeordnet ist, heisst dies, dass es zwar nicht Teil des Transportpfads ist, dass es aber den Wasserfluss in der betrachteten Gesteinsabfolge bestimmt.
Für diejenigen Rechenfälle **mit** Wasserfluss in sedimentären Architekturelementen innerhalb des EG wird diese Regel auf die Gesteinsabfolgen oberhalb und unterhalb des wasserführenden sedimentären Architekturelements separat angewendet, da in diesem Fall seitliche Zu- bzw. Abflüsse oberhalb bzw. unterhalb der betrachteten Gesteinsabfolge möglich sind. Für die hydraulischen Gradienten werden folgende Annahmen getroffen: Vertikaler Gradient $i_v = 1$ (Richtung: generell aufwärts; Ausnahmen sind in der Kolonne L_v mit einem abwärts gerichteten Pfeil angezeigt); Gradient entlang von horizontalen sedimentären Architekturelementen $i_h = 0.1$.
Für die betrachtete grossräumige hydraulische Durchlässigkeit in horizontaler Richtung K_h wird für die Effinger Schichten ein 10-fach höherer Wert, für alle anderen Gesteine ein 5-fach höherer Wert als in vertikaler Richtung angenommen (vgl. Tab. A3-2).

$T_{Kl/StZ}$ Transmissivität von Klüften bzw. Störungszonen (StZ) (falls WG/EG konzeptualisiert als geklüftetes Medium bzw. Medium mit kleinen wasserführenden Störungszonen); Werte in Klammern: Anzahl Klüfte/Störungszonen pro Meter.

L_v Transportpfadlänge (für das HAA-Lager und das Kombilager gilt der erste Längenwert des vertikalen Transportpfads im OPA für BE- und HAA-Lagerkammern; für die grösseren LMA- und SMA-Lagerkammern ist die Transportpfadlänge etwas kürzer (zweiter Längenwert), wobei zwischen SMA-Lagerkammern (Querschnitt K09) und LMA-Lagerkammern (Querschnitt K06) nicht weiter differenziert wird). *: Die angegebene Transportpfadlänge wird standortspezifisch aufgeteilt in einen Anteil r_t in Schichten mit einem höheren Tonmineralgehalt und einen Anteil r_k in Sandkalkabfolgen (SKA) bzw. Kalkbankabfolgen (KBA) mit niedrigerem Tonmineralgehalt, wobei immer gilt: $r_t + r_k = 100$ % (siehe Tab. A4-4). Falls die angenommene Richtung des Transports nicht nach oben ist, wird dies mit einem abwärts gerichteten Pfeil angezeigt. V: Verzweigung am Ende des Transportpfads.

T_h Transmissivität von Kluft in horizontalen sedimentären Architekturelementen (1 Kluft pro Meter).

L_h Transportpfadlänge in horizontalen sedimentären Architekturelementen.

T_{gStZ} Transmissivität in vertikalen strukturellen Architekturelementen (grössere wasserführende Störungszonen, 1 Störungszone pro Lagerkammer).

Geologisches Standortgebiet Wellenberg

$T_{Kl/SchZ}$ Transmissivität von Klüften bzw. kataklastischen Scherzonen (SchZ); Werte in Klammern: Anzahl Klüfte/ Scherzonen pro Meter. Gradient $i = 0.4$ (Richtung: aufwärts).

L Transportpfadlänge.

T_{gStZ} Transmissivität in strukturellen Architekturelementen (grössere wasserführende Störungszonen, 1 Störungszone pro Lagerkammer).

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
HAA-Lager, Standortgebiet ZNO, Wirtgestein OPA (Fig. A5-2b und Fig. A5-2d)											
HAA-ZNO-R	1	-	Referenzfall	HAA	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	90*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
HAA-ZNO-a	2	6	Erhöhter Wasserfluss	HAA	EFF	-	10^{-11} (1/m)	15*	-	-	-
		9			BD	10^{-12}	-	90*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	50/45	-	-	
HAA-ZNO-A7.1	7	9	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD [Mächtigkeit: 2 m]	HAA	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
		11			BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	65*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	25*; V	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
HAA-ZNO-A7.3	7	9	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	HAA	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
		11			BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	65*	10^{-10}	200	
		20			BD	10^{-13}	-	25*; V	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
HAA-ZNO-A7.4	7	9	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD [Mächtigkeit: 2 m]	HAA	EFF	-	-	-	-	-	-
		11			BD	-	-	-	10^{-10}	200	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
HAA-Lager, Standortgebiet ZNO, Wirtgestein OPA (Fig. A5-2b und Fig. A5-2d)											
HAA-ZNO-A7.5	7	9 11 20	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	HAA	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	10^{-10}	200	
					OPA	**2×10^{-14}**	-	50/45	-	-	
HAA-ZNO-W4.1	4	6 9	Erhöhter Wasserfluss ("What if?")	HAA	EFF	-	10^{-11} (1/m)	15*	-	-	-
					BD	**10^{-12}**	-	90*	-	-	
					OPA	**10^{-12}**	-	50/45	-	-	
HAA-ZNO-W8.1	8	14	Eine wasserführende vertikale Störungszone schneidet alle Lagerkammern ("What if?")	HAA	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	10^{-10}
					BD	10^{-13}	-	90*	-	-	
					OPA	**2×10^{-14}**	-	50/45	-	-	
HAA-ZNO-W9.2	9	11 13	Reduzierte Transportpfadlänge im WG, stark wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD ("What if?")	HAA	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	-	-	
					OPA	**2×10^{-14}**	-	20	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
HAA-Lager, Standortgebiet NL, Wirtgestein OPA (Fig. A5-3b)											
HAA-NL-R	1	-	Referenzfall	HAA	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	75*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
HAA-NL-a	2	6	Erhöhter Wasserfluss	HAA	EFF	-	10^{-11} (1/m)	90*	-	-	-
		9			BD	10^{-12}	-	75*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	50/45	-	-	
HAA-NL-A7.1	7	9	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD [Mächtigkeit: 2 m]	HAA	EFF	-	-	-	-	-	-
		11			BD	-	-	-	10^{-10}	200	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
HAA-NL-A7.2	7	9	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	HAA	EFF	-	-	-	-	-	-
		11			BD	-	-	-	10^{-10}	200	
		20			**OPA**	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
HAA-NL-A7.3	7	9	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD [Mächtigkeit: 2 m]	HAA	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
		11			BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	30*, V	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
HAA-Lager, Standortgebiet NL, Wirtgestein OPA (Fig. A5-3b)											
HAA-NL-A7.5	7	9 11 20	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	HAA	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	**10^{-13}**	-	45*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	30*, V	-	-	
					OPA	**2×10^{-14}**	-	50/45	-	-	
HAA-NL-W4.1	4	6 9	Erhöhter Wasserfluss ("What if?")	HAA	EFF	-	10^{-11} (1/m)	90*	-	-	-
					BD	**10^{-12}**	-	75*	-	-	
					OPA	**10^{-12}**	-	50/45	-	-	
HAA-NL-W8.1	8	14	Eine wasserführende vertikale Störungszone schneidet alle Lagerkammern ("What if?")	HAA	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	10^{-10}
					BD	10^{-13}	-	75*	-	-	
					OPA	**2×10^{-14}**	-	50/45	-	-	
HAA-NL-W9.1	9	11 13	Reduzierte Transportpfadlänge im WG, stark wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD ("What if?")	HAA	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	-	-	
					OPA	**2×10^{-14}**	-	20	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
HAA-Lager, Standortgebiet BB, Wirtgestein OPA (Fig. A5-4)											
HAA-BB-R	1	-	Referenzfall	HAA	oRG	10^{-13}	-	60*	-	-	-
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
HAA-BB-a	2	6	Erhöhter Wasserfluss	HAA	oRG	10^{-12}	-	60*	-	-	-
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	50/45	-	-	
HAA-BB-A7.1	7	9 11	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis oRG [Mächtigkeit: 2 m]	HAA	oRG	$\mathbf{10^{-13}}$	-	60*	10^{-10}	200	-
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45; V	-	-	
HAA-BB-A7.2	7	9 11 20	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis oRG, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	HAA	oRG	$\mathbf{10^{-13}}$	-	60*	10^{-10}	200	-
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45; V	-	-	
HAA-BB-A10.1	10	7 13	Zeitabhängige Zunahme der hydraulischen Durchlässigkeit wegen Dekompaktion [$t \leq 10^5$ a: $K_v = 2 \times 10^{-14}$ m/s; $t = 10^6$ a: $K_v = 10^{-11}$ m/s]	HAA	oRG	-	-	-	-	-	-
					OPA	f(t)	-	50/45	-	-	
HAA-BB-W4.1	4	6	Erhöhter Wasserfluss ("What if?")	HAA	oRG	$\mathbf{10^{-12}}$	-	60*	-	-	-
					OPA	$\mathbf{10^{-12}}$	-	50/45	-	-	
HAA-BB-W8.1	8	14	Eine wasserführende vertikale Störungszone schneidet alle Lagerkammern ("What if?")	HAA	oRG	10^{-13}	-	60*	-	-	10^{-10}
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
HAA-BB-W9.1	9	11 13	Reduzierte Transportpfadlänge im WG, stark wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis oRG ("What if?")	HAA	oRG	-	-	-	-	-	-
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	20	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet SR, Wirtgestein OPA (Fig. A5-1)											
SMA-SR-R	1	-	Referenzfall	SMA	EFF	10^{-12}	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	50*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45	-	-	
SMA-SR-a	2	6	Erhöhter Wasserfluss	SMA	EFF	-	10^{-11} (1/m)	-	-	-	-
					BD	10^{-12}	-	50*	-	-	
					OPA	$\mathbf{3 \times 10^{-13}}$	-	45	-	-	
SMA-SR-A7.1	7	9 11	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD [Mächtigkeit: 2 m]	SMA	EFF	10^{-12}	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	50*	10^{-10}	200	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45; V	-	-	
SMA-SR-A7.2	7	9 11 20	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA	EFF	10^{-12}	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	50*	10^{-10}	200	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45; V	-	-	
SMA-SR-W4.1	4	6	Erhöhter Wasserfluss ("What if?")	SMA	EFF	-	10^{-11} (1/m)	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-12}}$	-	50*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-12}}$	-	45	-	-	
SMA-SR-W8.1	8	14	Eine wasserführende vertikale Störungszone schneidet alle Lagerkammern ("What if?")	SMA	EFF	10^{-12}	-	-	-	-	10^{-10}
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	50*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45	-	-	
SMA-SR-W9.1	9	11 13	Reduzierte Transportpfadlänge im WG, stark wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD ("What if?")	SMA	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	20	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet ZNO, Wirtgesteine OPA/BD, Variante 1 (OPA: Fig. A5-2b, BD: Fig. A5-2a)											
SMA-ZNO-R	1	-	Referenzfall	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	55*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	90*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	
SMA-ZNO-R_o	1	-	Gesamtinventar in oberer Lagerebene	SMA	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	55*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	-	-	-	
SMA-ZNO-R_u	1	-	Gesamtinventar in unterer Lagerebene	SMA	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	90*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	
SMA-ZNO-a	2	6 9	Erhöhter Wasserfluss	SMA_o	EFF	-	10^{-11} (1/m)	15*	-	-	-
					BD	10^{-12}	-	55*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	-	10^{-11} (1/m)	15*	-	-	-
					BD	10^{-12}	-	90*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet ZNO, Wirtgesteine OPA/BD, Variante 1 (OPA: Fig. A5-2b, BD: Fig. A5-2a)											
SMA-ZNO-A7.1	7	6 9 11	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet [Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	55*	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	65*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	25*; V	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	
SMA-ZNO-A7.2	7	6 9 11 24	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet, inkl. Auswirkungen pH-Fahne [Sorptionsdatensatz 'Calcit' im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	55*	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	65*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	25*; V	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet ZNO, Wirtgesteine OPA/BD, Variante 1 (OPA: Fig. A5-2b, BD: Fig. A5-2a)											
SMA-ZNO-A7.3	7	6 9 11 20	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	**10^{-13}**	-	55*	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	**10^{-13}**	-	65*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	25*; V	-	-	
					OPA	**2×10^{-14}**	-	45	-	-	
SMA-ZNO-W4.1	4	6 9	Erhöhter Wasserfluss ("What if?")	SMA_o	EFF	-	10^{-11} (1/m)	15*	-	-	-
					BD	**10^{-12}**	-	55*	-	-	
					OPA	**10^{-12}**	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	-	10^{-11} (1/m)	15*	-	-	-
					BD	**10^{-12}**	-	90*	-	-	
					OPA	**10^{-12}**	-	45	-	-	
SMA-ZNO-W8.1	8	14	Eine wasserführende vertikale Störungszone schneidet alle Lagerkammern ("What if?")	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	10^{-10}
					BD	10^{-13}	-	55*	-	-	
					OPA	**2×10^{-14}**	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	10^{-10}
					BD	10^{-13}	-	90*	-	-	
					OPA	**2×10^{-14}**	-	45	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet ZNO, Wirtgesteine OPA/BD, Variante 2: Lagerkammern im BD in Württembergica-Parkinsoni-Schichten (OPA: Fig. A5-2d, BD: Fig. A5-2c)											
SMA-ZNO-A7.4	7	6 9 11	Lagerkammern im BD in Württembergica-Parkinsoni-Schichten; wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD [Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	50* ↓	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	10^{-10}	200	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	
SMA-ZNO-A7.5	7	6 9 11 20	Lagerkammern im BD in Württembergica-Parkinsoni-Schichten; wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	50* ↓	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	10^{-10}	200	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	
SMA-ZNO-A9.1	9	13	Lagerkammern im BD in Württembergica-Parkinsoni-Schichten	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	20*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	
					BD	10^{-13}	-	90*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	
SMA-ZNO-W9.2	9	11 13	Lagerkammern im BD in Württembergica-Parkinsoni-Schichten; reduzierte Transportpfadlänge im WG, stark wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD ("What if?")	SMA_o	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	20* ↓	-	-	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	20	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet NL, Wirtgesteine OPA/BD (OPA: Fig. A5-3b, BD: Fig. A5-3a)											
SMA-NL-R	1	-	Referenzfall	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	30*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	75*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	
SMA-NL-R_o	1	-	Gesamtinventar in oberer Lagerebene	SMA	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	30*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	-	-	-	
SMA-NL-R_u	1	-	Gesamtinventar in unterer Lagerebene	SMA	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	75*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	
SMA-NL-a	2	6 9	Erhöhter Wasserfluss	SMA_o	EFF	-	10^{-11} (1/m)	90*	-	-	-
					BD	10^{-12}	-	30*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	-	10^{-11} (1/m)	90*	-	-	-
					BD	10^{-12}	-	75*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet NL, Wirtgesteine OPA/BD (OPA: Fig. A5-3b, BD: Fig. A5-3a)											
SMA-NL-A7.1	7	6 9 11	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD [Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	25* ↓	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	10^{-10}	200	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	
SMA-NL-A7.2	7	6 9 11 20	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloid-filtration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	25* ↓	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	10^{-10}	200	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	
SMA-NL-A7.3	7	6 9 11	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet [Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	30*	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	30*, V	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet NL, Wirtgesteine OPA/BD (OPA: Fig. A5-3b, BD: Fig. A5-3a)											
SMA-NL-A7.4	7	6 9 11 24	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet, inkl. Auswirkungen pH-Fahne [Sorptionsdatensatz 'Calcit' im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	30*	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	30*, V	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	
SMA-NL-A7.5	7	6 9 11 20	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	30*	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	30*, V	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	
SMA-NL-W4.1	4	6 9	Erhöhter Wasserfluss ("What if?")	SMA_o	EFF	-	10^{-11} (1/m)	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-12}}$	-	30*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-12}}$	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	-	10^{-11} (1/m)	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-12}}$	-	75*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-12}}$	-	45	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet NL, Wirtgesteine OPA/BD (OPA: Fig. A5-3b, BD: Fig. A5-3a)											
SMA-NL-W8.1	8	14	Eine wasserführende vertikale Störungszone schneidet alle Lagerkammern ("What if?")	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	10^{-10}
					BD	10^{-13}	-	30*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	10^{-10}
					BD	10^{-13}	-	75*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	45	-	-	
SMA-NL-W9.1	9	11 13	Reduzierte Transportpfadlänge im WG; stark wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD ("What if?")	SMA_o	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	10* ↓	-	-	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	20	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet BB, Wirtgestein OPA (Fig. A5-4)											
SMA-BB-R	1	-	Referenzfall	SMA	oRG	$\mathbf{10^{-13}}$	-	60*	-	-	-
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45	-	-	
SMA-BB-a	2	6	Erhöhter Wasserfluss	SMA	oRG	10^{-12}	-	60*	-	-	-
					OPA	$\mathbf{3 \times 10^{-13}}$	-	45	-	-	
SMA-BB-A7.1	7	9 11	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis oRG [Mächtigkeit: 2 m]	SMA	oRG	$\mathbf{10^{-13}}$	-	60*	10^{-10}	200	-
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45; V	-	-	
SMA-BB-A7.2	7	9 11 20	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis oRG, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA	oRG	$\mathbf{10^{-13}}$	-	60*	10^{-10}	200	-
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45; V	-	-	
SMA-BB-W4.1	4	6	Erhöhter Wasserfluss ("What if?")	SMA	oRG	$\mathbf{10^{-12}}$	-	60*	-	-	-
					OPA	$\mathbf{10^{-12}}$	-	45	-	-	
SMA-BB-W8.1	8	14	Eine wasserführende vertikale Störungszone schneidet alle Lagerkammern ("What if?")	SMA	oRG	$\mathbf{10^{-13}}$	-	60*	-	-	10^{-10}
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45	-	-	
SMA-BB-W9.1	9	11 13	Reduzierte Transportpfadlänge im WG; stark wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis oRG ("What if?")	SMA	oRG	-	-	-	-	-	-
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	20	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet JSF, Wirtgesteine OPA/EFF, Variante 1: Lagerkammern in EFF mittig zw. Gerstenhübel-Schichten und Top EFF (OPA: Fig. A5-5a, EFF: Fig. A5-5b)											
SMA-JSF-R	1	-	Referenzfall	SMA_o	**EFF**	$\mathbf{10^{-12}}$	-	50*	-	-	-
				SMA_u	oRG	$\mathbf{10^{-13}}$	-	75*	-	-	-
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	35	-	-	
SMA-JSF-R_o	1	-	Gesamtinventar in oberer Lagerebene	SMA	**EFF**	$\mathbf{10^{-12}}$	-	50*	-	-	-
SMA-JSF-R_u	1	-	Gesamtinventar in unterer Lagerebene	SMA	oRG	$\mathbf{10^{-13}}$	-	75*	-	-	-
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	35	-	-	
SMA-JSF-a	2	6 9	Erhöhter Wasserfluss durch engständige Klüftung in EFF / Erhöhter Wasserfluss durch erhöhte Durchlässigkeit OPA und oRG	SMA_o	**EFF**	-	$\mathbf{10^{-11}}$ **(1/m)**	50*	-	-	-
				SMA_u	oRG	10^{-12}	-	75*	-	-	-
					OPA	$\mathbf{3 \times 10^{-13}}$	-	35	-	-	
SMA-JSF-A5.1	5	6 9 14	Erhöhter Wasserfluss durch zusätzliche kleine vertikale Störungszonen in EFF, die alle Lagerkammern in EFF schneiden / Erhöhter Wasserfluss durch erhöhte Durchlässigkeit OPA und oRG	SMA_o	**EFF**	$\mathbf{10^{-12}}$	$\mathbf{10^{-9}}$ **(3 / 100 m)**	50*	-	-	-
				SMA_u	oRG	10^{-12}	-	75*	-	-	-
					OPA	$\mathbf{3 \times 10^{-13}}$	-	35	-	-	
SMA-JSF-A5.2	5	6 9 14 20	Erhöhter Wasserfluss durch zusätzliche kleine vertikale Störungszonen in EFF, die alle Lagerkammern in EFF schneiden, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion in vertikalen Störungszonen] / Erhöhter Wasserfluss durch erhöhte Durchlässigkeit OPA und oRG	SMA_o	**EFF**	$\mathbf{10^{-12}}$	$\mathbf{10^{-9}}$ **(3 / 100 m)**	50*	-	-	-
				SMA_u	oRG	10^{-12}	-	75*	-	-	-
					OPA	$\mathbf{3 \times 10^{-13}}$	-	35	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/Stz}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStz} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet JSF, Wirtgesteine OPA/EFF, Variante 1: Lagerkammern in EFF mittig zw. Gerstenhübel-Schichten und Top EFF (OPA: Fig. A5-5a, EFF: Fig. A5-5b)											
SMA-JSF-A6.1	6	6 9 24	Erhöhter Wasserfluss durch engständige Klüftung in EFF, inkl. Auswirkungen pH-Fahne in EFF [Sorptionsdatensatz 'Calcit'] / Erhöhter Wasserfluss durch erhöhte Durchlässigkeit OPA und oRG	SMA_o	**EFF**	-	**10^{-11} (1/m)**	50*	-	-	-
				SMA_u	oRG	10^{-12}	-	75*	-	-	-
					OPA	**3×10^{-13}**	-	35	-	-	
SMA-JSF-A6.2	6	6 9 20	Erhöhter Wasserfluss durch engständige Klüftung in EFF, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion] / Erhöhter Wasserfluss durch erhöhte Durchlässigkeit OPA und oRG	SMA_o	**EFF**	-	**10^{-11} (1/m)**	50*	-	-	-
				SMA_u	oRG	10^{-12}	-	75*	-	-	-
					OPA	**3×10^{-13}**	-	35	-	-	
SMA-JSF-A6.3	6	18 21	Erhöhte Salinität des Porenwassers in EFF [keine Sorption in EFF]	SMA_o	**EFF**	**10^{-12}**	-	50*	-	-	-
				SMA_u	oRG	**10^{-13}**	-	75*	-	-	-
					OPA	**10^{-13}**	-	35	-	-	
SMA-JSF-A7.1	7	6 9 11	Eine wasserführende KBA schneidet alle Lagerkammern in EFF [Eine weitere wasserführende KBA im Abstand von 10 m oberhalb Lagerkammern, Mächtigkeiten: 5 m]	SMA_o	**EFF**	**10^{-12}**	-	10*; V; 35*	10^{-9}	200	-
				SMA_u	oRG	**10^{-13}**	-	75*	-	-	-
					OPA	**10^{-13}**	-	35	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet JSF, Wirtgesteine OPA/EFF, Variante 1: Lagerkammern in EFF mittig zw. Gerstenhübel-Schichten und Top EFF (OPA: Fig. A5-5a, EFF: Fig. A5-5b)											
SMA-JSF-A7.2	7	6 9 11 24	Eine wasserführende KBA schneidet alle Lagerkammern in EFF, inkl. Auswirkungen pH-Fahne in KBA durch Lagerkammern in EFF [Sorptionsdatensatz 'Calcit' in KBA durch Lagerkammern, eine weitere wasserführende KBA im Abstand von 10 m oberhalb Lagerkammern, Mächtigkeiten: 5 m]	SMA_o	**EFF**	10^{-12}	-	10*; V; 35*	10^{-9}	200	-
				SMA_u	oRG	10^{-13}	-	75*	-	-	-
					OPA	10^{-13}	-	35	-	-	
SMA-JSF-A7.3	7	6 9 11 20	Eine wasserführende KBA schneidet alle Lagerkammern in EFF, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloid-filtration in allen wasserführenden KBA in EFF [eine weitere wasserführende KBA im Abstand von 10 m oberhalb Lager-kammern, keine Matrixdiffusion in allen wasserführenden KBA in EFF, Mächtigkeiten: 5 m]	SMA_o	**EFF**	10^{-12}	-	10*; V; 35*	10^{-9}	200	-
				SMA_u	oRG	10^{-13}	-	75*	-	-	-
					OPA	10^{-13}	-	35	-	-	
SMA-JSF-A7.4	7	9 11	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis oRG [Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	**EFF**	10^{-12}	-	50*	-	-	-
				SMA_u	oRG	10^{-13}	-	75*	10^{-10}	200	-
					OPA	10^{-13}	-	35; V	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet JSF, Wirtgesteine OPA/EFF, Variante 1: Lagerkammern in EFF mittig zw. Gerstenhübel-Schichten und Top EFF (OPA: Fig. A5-5a, EFF: Fig. A5-5b)											
SMA-JSF-A7.5	7	9 11 20	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis oRG, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	**EFF**	$\mathbf{10^{-12}}$	-	50*	-	-	-
				SMA_u	oRG	$\mathbf{10^{-13}}$	-	75*	10^{-10}	200	-
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	35; V	-	-	
SMA-JSF-W4.1	4	6 9	Erhöhter Wasserfluss durch engständige Klüftung in EFF / Erhöhter Wasserfluss durch erhöhte Durchlässigkeit OPA und oRG ("What if?")	SMA_o	**EFF**	-	$\mathbf{10^{-11}}$ **(1/m)**	50*	-	-	-
				SMA_u	oRG	$\mathbf{10^{-12}}$	-	75*	-	-	-
					OPA	$\mathbf{10^{-12}}$	-	35	-	-	
SMA-JSF-W8.1	8	14	Eine wasserführende vertikale Störungszone schneidet alle Lagerkammern ("What if?")	SMA_o	**EFF**	$\mathbf{10^{-12}}$	-	50*	-	-	10^{-8}
				SMA_u	oRG	$\mathbf{10^{-13}}$	-	75*	-	-	10^{-10}
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	35	-	-	
SMA-Lager, Standortgebiet JSF, Wirtgesteine OPA/EFF, Variante 2: Lagerkammern in EFF mittig in Kalkmergelabfolge (OPA: Fig. A5-5a, EFF: Fig. A5-5c)											
SMA-JSF-W9.1	9	6 11 12 13	Reduzierte Transportpfadlänge im WG; stark wasserführende KBA in EFF / Stark wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis oRG ("What if?")	SMA_o	**EFF**	$\mathbf{10^{-12}}$	-	10	-	-	-
				SMA_u	oRG	$\mathbf{10^{-13}}$	-	-	-	-	-
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	20	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	$T_{Kl/SchZ}$ [m^2/s]	L [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet WLB, Wirtgestein MGL (Fig. A5-6)								
SMA-WLB-R	1	-	Referenzfall	SMA_o	**MGL**	10^{-11} (1/m)	200	-
				SMA_u	**MGL**	3×10^{-13} (1/m)	200	-
SMA-WLB-R_o	1	-	Gesamtinventar in oberer Lagerebene	SMA	**MGL**	10^{-11} (1/m)	200	-
SMA-WLB-R_u	1	-	Gesamtinventar in unterer Lagerebene	SMA	**MGL**	3×10^{-13} (1/m)	200	-
SMA-WLB-a	2	6	Erhöhter Wasserfluss	SMA_o	**MGL**	3×10^{-11} (1/m)	wie R	-
				SMA_u	**MGL**	10^{-12} (1/m)	wie R	-
SMA-WLB-A5.1	5	9	Transport ausschliesslich in kataklastischen Scherzonen	SMA_o	**MGL**	10^{-10} (1 / 10 m)	wie R	-
				SMA_u	**MGL**	3×10^{-12} (1 / 10 m)	wie R	-
SMA-WLB-A6.1	6	24	Auswirkungen pH-Fahne in geklüftetem WG [Sorptionsdatensatz 'Calcit']	SMA_o	**MGL**	wie R	wie R	-
				SMA_u	**MGL**	wie R	wie R	-
SMA-WLB-A6.2	6	20	Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration in geklüftetem WG [keine Matrixdiffusion]	SMA_o	**MGL**	wie R	wie R	-
				SMA_u	**MGL**	wie R	wie R	-
SMA-WLB-A8.1	8	14	Zusätzlicher Transport in einer wasserführenden grösseren Störungszone pro Lagerkammer	SMA_o	**MGL**	wie R	wie R	10^{-9}
				SMA_u	**MGL**	wie R	wie R	10^{-10}
SMA-WLB-A8.2	8	14 21	Zusätzlicher Transport in einer wasser-führenden grösseren Störungszone pro Lagerkammer mit Anteil Transportpfad in Kalkbankabfolge [Sorptionsdatensatz 'Calcit' für Matrix in KBA]	SMA_o	KBA	wie R	100	10^{-9}
					MGL	wie R	100	
				SMA_u	KBA	wie R	100	10^{-10}
					MGL	wie R	100	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	$T_{Kl/SchZ}$ [m^2/s]	L [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
SMA-Lager, Standortgebiet WLB, Wirtgestein MGL (Fig. A5-6)								
SMA-WLB-A8.3	8	14 24	Zusätzlicher Transport in einer wasserführenden grösseren Störungszone pro Lagerkammer inkl. Auswirkungen pH-Fahne in WG [Sorptionsdatensatz 'Calcit' für Matrix der Klüfte und der Störungszone]	SMA_o	**MGL**	wie R	wie R	10^{-9}
				SMA_u	**MGL**	wie R	wie R	10^{-10}
SMA-WLB-A8.4	8	14 20	Zusätzlicher Transport in einer wasserführenden grösseren Störungszone pro Lagerkammer inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloid-filtration [keine Matrixdiffusion in Störungszone und geklüftetem WG]	SMA_o	**MGL**	wie R	wie R	10^{-9}
				SMA_u	**MGL**	wie R	wie R	10^{-10}
SMA-WLB-W4.1	4	6	Erhöhter Wasserfluss ("What if?")	SMA_o	**MGL**	3×10^{-10} (1/m)	wie R	-
				SMA_u	**MGL**	10^{-11} (1/m)	wie R	-
SMA-WLB-W8.5	8	14	Zusätzlicher Transport in einer wasserführenden grösseren Störungszone pro Lagerkammer ("What if?")	SMA_o	**MGL**	wie R	wie R	10^{-8}
				SMA_u	**MGL**	wie R	wie R	10^{-9}

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
Kombi-Lager, Standortgebiet ZNO, Wirtgesteine OPA/BD, Variante 1: Lagerkammern im BD im unteren Abschnitt des BD (OPA: Fig. A5-2b, BD: Fig. A5-2a)											
Kombi-ZNO-R	1	-	Referenzfall	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	55*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	90*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
Kombi-ZNO-a	2	6 9	Erhöhter Wasserfluss	SMA_o	EFF	-	10^{-11} (1/m)	15*	-	-	-
					BD	10^{-12}	-	55*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	-	10^{-11} (1/m)	15*	-	-	-
					BD	10^{-12}	-	90*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	50/45	-	-	
Kombi-ZNO-A7.1	7	6 9 11	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet [Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	55*	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	65*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	25*; V	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m²/s]	L_v [m]	T_h [m²/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m²/s]
Kombi-Lager, Standortgebiet ZNO, Wirtgesteine OPA/BD, Variante 1, Lagerkammern im BD im unteren Abschnitt des BD (OPA: Fig. A5-2b, BD: Fig. A5-2a)											
Kombi-ZNO-A7.2	7	6 9 11 24	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet, inkl. Auswirkungen pH-Fahne [Sorptionsdatensatz 'Calcit' im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	55*	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	65*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	25*; V	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
Kombi-ZNO-A7.3	7	6 9 11 20	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	55*	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	65*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	25*; V	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{KJ/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
Kombi-Lager, Standortgebiet ZNO, Wirtgesteine OPA/BD, Variante 1, Lagerkammern im BD im unteren Abschnitt des BD (OPA: Fig. A5-2b, BD: Fig. A5-2a)											
Kombi-ZNO-W4.1	4	6 9	Erhöhter Wasserfluss ("What if?")	SMA_o	EFF	-	10^{-11} (1/m)	15*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-12}}$	-	55*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-12}}$	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	-	10^{-11} (1/m)	15*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-12}}$	-	90*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-12}}$	-	50/45	-	-	
Kombi-ZNO-W8.1	8	14	Eine wasserführende vertikale Störungszone schneidet alle Lagerkammern ("What if?")	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	10^{-10}
					BD	10^{-13}	-	55*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	10^{-10}
					BD	10^{-13}	-	90*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
Kombi-Lager, Standortgebiet ZNO, Wirtgesteine OPA/BD, Variante 2: Lagerkammern im BD in Württembergica-Parkinsoni-Schichten (OPA: Fig. A5-2d, BD: Fig. A5-2c)											
Kombi-ZNO-A7.4	7	6 9 11	Lagerkammern im BD in Württembergica-Parkinsoni-Schichten; wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD [Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	50* ↓	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	10^{-10}	200	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m^2/s]	L_v [m]	T_h [m^2/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m^2/s]
Kombi-Lager, Standortgebiet ZNO, Wirtgesteine OPA/BD, Variante 2: Lagerkammern im BD in Württembergica-Parkinsoni-Schichten (OPA: Fig. A5-2d, BD: Fig. A5-2c)											
Kombi-ZNO-A7.5	7	6 9 11 20	Lagerkammern im BD in Württembergica-Parkinsoni-Schichten; wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloid-filtration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	50* ↓	10^{-10}	200	-
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	10^{-10}	200	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
Kombi-ZNO-A9.1	9	13	Lagerkammern im BD in Württembergica-Parkinsoni-Schichten	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	20*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	10^{-12}	-	15*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	90*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
Kombi-ZNO-W9.2	9	11 13	Lagerkammern im BD in Württembergica-Parkinsoni-Schichten; reduzierte Transportpfadlänge im WG, stark wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD ("What if?")	SMA_o	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	20* ↓	-	-	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	20	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m²/s]	L_v [m]	T_h [m²/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m²/s]
Kombi-Lager, Standortgebiet NL, Wirtgesteine OPA/BD (OPA: Fig. A5-3b, BD: Fig. A5-3a)											
Kombi-NL-R	1	-	Referenzfall	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	30*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	10^{-13}	-	75*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
Kombi-NL-a	2	6 9	Erhöhter Wasserfluss	SMA_o	EFF	-	10^{-11} (1/m)	90*	-	-	-
					BD	10^{-12}	-	30*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	-	10^{-11} (1/m)	90*	-	-	-
					BD	10^{-12}	-	75*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-13}}$	-	50/45	-	-	
Kombi-NL-A7.1	7	6 9 11	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD [Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	25* ↓	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	10^{-10}	200	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m²/s]	L_v [m]	T_h [m²/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m²/s]
Kombi-Lager, Standortgebiet NL, Wirtgesteine OPA/BD (OPA: Fig. A5-3b, BD: Fig. A5-3a)											
Kombi-NL-A7.2	7	6 9 11 20	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	25* ↓	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	10^{-10}	200	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
Kombi-NL-A7.3	7	6 9 11	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet [Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	30*	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	30*, V	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
Kombi-NL-A7.4	7	6 9 11 24	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet, inkl. Auswirkungen pH-Fahne [Sorptionsdatensatz 'Calcit' im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	30*	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	30*, V	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m²/s]	L_v [m]	T_h [m²/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m²/s]
Kombi-Lager, Standortgebiet NL, Wirtgesteine OPA/BD (OPA: Fig. A5-3b, BD: Fig. A5-3a)											
Kombi-NL-A7.5	7	6 9 11 20	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	30*	10^{-10}	200	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	45*	10^{-10}	200	
					BD	10^{-13}	-	30*, V	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
Kombi-NL-W4.1	4	6 9	Erhöhter Wasserfluss ("What if?")	SMA_o	EFF	-	10^{-11} (1/m)	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-12}}$	-	30*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-12}}$	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	-	10^{-11} (1/m)	90*	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-12}}$	-	75*	-	-	
					OPA	$\mathbf{10^{-12}}$	-	50/45	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m²/s]	L_v [m]	T_h [m²/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m²/s]
Kombi-Lager, Standortgebiet NL, Wirtgesteine OPA/BD (OPA: Fig. A5-3b, BD: Fig. A5-3a)											
Kombi-NL-W8.1	8	14	Eine wasserführende vertikale Störungszone schneidet alle Lagerkammern ("What if?")	SMA_o	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	10^{-10}
					BD	10^{-13}	-	30*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	10^{-12}	-	90*	-	-	10^{-10}
					BD	10^{-13}	-	75*	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	50/45	-	-	
Kombi-NL-W9.1	9	11 13	Reduzierte Transportpfadlänge im WG, stark wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD ("What if?")	SMA_o	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	$\mathbf{10^{-13}}$	-	10* ↓	-	-	
					OPA	-	-	-	-	-	
				SMA_u HAA	EFF	-	-	-	-	-	-
					BD	-	-	-	-	-	
					OPA	$\mathbf{2 \times 10^{-14}}$	-	20	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{Kl/StZ}$ [m²/s]	L_v [m]	T_h [m²/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m²/s]
Kombi-Lager, Standortgebiet BB, Wirtgestein OPA (Fig. A5-4)											
Kombi-BB-R	1	-	Referenzfall	SMA	oRG	**10^{-13}**	-	60*	-	-	-
					OPA	**10^{-13}**	-	45	-	-	
				HAA	oRG	10^{-13}	-	60*	-	-	-
					OPA	**2×10^{-14}**	-	50/45	-	-	
Kombi-BB-a	2	6	Erhöhter Wasserfluss	SMA	oRG	10^{-12}	-	60*	-	-	-
					OPA	**3×10^{-13}**	-	45	-	-	
				HAA	oRG	10^{-12}	-	60*	-	-	-
					OPA	**10^{-13}**	-	50/45	-	-	
Kombi-BB-A7.1	7	9 11	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis oRG [Mächtigkeit: 2 m]	SMA	oRG	**10^{-13}**	-	60*	10^{-10}	200	-
					OPA	**10^{-13}**	-	45; V	-	-	
				HAA	oRG	**10^{-13}**	-	60*	10^{-10}	200	-
					OPA	**2×10^{-14}**	-	50/45; V	-	-	
Kombi-BB-A7.2	7	9 11 20	Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis oRG, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloid-filtration [keine Matrixdiffusion im sedimentären Architekturelement, Mächtigkeit: 2 m]	SMA	oRG	**10^{-13}**	-	60*	10^{-10}	200	-
					OPA	**10^{-13}**	-	45; V	-	-	
				HAA	oRG	**10^{-13}**	-	60*	10^{-10}	200	-
					OPA	**2×10^{-14}**	-	50/45; V	-	-	

Tab. A4-3: (Fortsetzung)

Rechen-fallkürzel	Kat.	PG	Rechenfall-Kurzbeschreibung	Lager	Gestein	K_v [m/s]	$T_{KI/StZ}$ [m²/s]	L_v [m]	T_h [m²/s]	L_h [m]	T_{gStZ} [m²/s]
Kombi-Lager, Standortgebiet BB, Wirtgestein OPA (Fig. A5-4)											
Kombi-BB-A10.1	10	7 13	Zeitabhängige Zunahme der hydraulischen Durchlässigkeit wegen Dekompaktion [$t \leq 10^5$ a: $K_v = 2 \times 10^{-14}$ m/s; $t = 10^6$ a: $K_v = 10^{-11}$ m/s]	SMA	oRG	**10^{-13}**	-	60*	-	-	-
					OPA	**10^{-13}**	-	45	-	-	
				HAA	oRG	-	-	-	-	-	-
					OPA	f(t)	-	50/45	-	-	
Kombi-BB-W4.1	4	6	Erhöhter Wasserfluss ("What if?")	SMA	oRG	**10^{-12}**	-	60*	-	-	-
					OPA	**10^{-12}**	-	45	-	-	
				HAA	oRG	**10^{-12}**	-	60*	-	-	-
					OPA	**10^{-12}**	-	50/45	-	-	
Kombi-BB-W8.1	8	14	Eine wasserführende vertikale Störungszone schneidet alle Lagerkammern ("What if?")	SMA	oRG	**10^{-13}**	-	60*	-	-	10^{-10}
					OPA	**10^{-13}**	-	45	-	-	
				HAA	oRG	10^{-13}	-	60*	-	-	10^{-10}
					OPA	**2×10^{-14}**	-	50/45	-	-	
Kombi-BB-W9.1	9	11 13	Reduzierte Transportpfadlänge im WG, stark wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis oRG ("What if?")	SMA	oRG	-	-	-	-	-	-
					OPA	**10^{-13}**	-	20	-	-	
				HAA	oRG	-	-	-	-	-	-
					OPA	**2×10^{-14}**	-	20	-	-	

Tab. A4-4: Zuweisung von Transportparametern für vertikale Transportpfade mit standortspezifischer Aufteilung in Abschnitte mit höherem und niedrigerem Tonmineralgehalt (vgl. Tab. A4-3).

Geologisches Standortgebiet	**Vertikale Transportpfad-Abschnitte in WG/EG**	**Verwendete Sorptions-koeffizienten, Porositäten und Diffusionskoeffizienten**[117]
Südranden	EFF	EFF (80 %) EFF-KBA (20 %)
	BD	BD (80 %) BD-SKA (20 %)
	OPA	OPA (100 %)
Zürich Nord-Ost	EFF	EFF (80 %) EFF-KBA (20 %)
	BD	BD (80 %) BD-SKA (20 %)
	OPA	OPA (100 %)
Nördlich Lägeren	EFF	EFF (80 %) EFF-KBA (20 %)
	BD	BD (80 %) BD-SKA (20 %)
	OPA	OPA (100 %)
Bözberg	oRG	BD (50 %) BD-SKA (50 %)
	OPA	OPA (100 %)
Jura-Südfuss	EFF	EFF (80 %) EFF-KBA (20 %)
	oRG (bzgl. OPA)	BD (50 %) BD-SKA (50 %)
	OPA	OPA (100 %)

[117] Aufteilung der Transportpfad-Abschnitte aus Kolonne 2 in zwei serielle Abschnitte mit unterschiedlichen Transportparametern (Sorptionskoeffizienten, Porositäten, Diffusionskoeffizienten). Die Kürzel beziehen sich auf die Kolonnen-Überschriften für die Transportparameter in Tab. A6-9 bis A6-11. Werte in Klammern: Länge (in %) der seriellen Abschnitte mit den entsprechenden Transportparametern, bezogen auf die Gesamtlänge im betrachteten WG/EG aus Kolonne 2.

Anhang A5: Modellkonzepte für die Transportpfade und Erläuterungen zur Berücksichtigung der Ungewissheiten in den Rechenfällen

Im vorliegenden Anhang A5 werden die in den Rechenfällen der Testrechnungen in Anhang A4 verwendeten Modellkonzepte für die Transportpfade im Wirtgestein und in den oberen Rahmengesteinen in den verschiedenen geologischen Standortgebieten dargestellt, und es wird erläutert, wie die Ungewissheiten bezüglich verschiedener geologischer Aspekte in den Rechenfällen berücksichtigt werden[118]. Für jedes geologische Standortgebiet wird anhand von Schemata und Kurzbeschreibungen der betrachteten Rechenfalltypen (Referenzfall, ausgewählte alternative Fälle und "What if?"-Fälle) aufgezeigt, wie die Radionuklidfreisetzung durch das Wirtgestein bzw. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich konzeptualisiert wird. Für geologische Standortgebiete mit mehreren Lagertypen werden die möglichen Transportpfade jeweils in den gleichen Schemata dargestellt[119]. Im Falle der geologischen Standortgebiete Zürich Nord-Ost und Jura-Südfuss sind für verschiedene Varianten der Lagerkammeranordnung in der oberen Lagerebene spezifische Schemata für die Transportpfade aufgeführt. In Standortgebieten mit einer oberen und einer unteren Lagerebene ist die obere Lagerebene ausschliesslich für SMA-Lagerkammern vorgesehen

Die möglichen Auswirkungen eines wasserführenden sedimentären Architekturelements im Wirtgestein oder in den Rahmengesteinen auf die Radionuklidfreisetzung werden jeweils mit einem Set von alternativen Fällen untersucht. Die potentiellen Auswirkungen von stark wasserführenden[120] sedimentären Architekturelementen im Wirtgestein bzw. in den Rahmengesteinen (angedeutet durch exemplarische gestrichelte Transportpfade in den Fig. A5-1 bis A5-6) werden jeweils durch einen "What if?"-Fall mit verkürzter Transportpfadlänge im Wirtgestein bei gleichzeitiger Vernachlässigung der Radionuklidrückhaltung in den Rahmengesteinen abdeckend erfasst.

Für alternative Rechenfälle mit Radionuklidfreisetzung entlang transmissiver geklüfteter sedimentärer Architekturelemente, kleinräumiger vertikaler Klüfte und Störungszonen wird jeweils zusätzlich auch ein Fall mit reduzierter Kolloidfiltration bei Transport in diesem Architekturelementen betrachtet. Schneiden diese Architekturelemente eine Lagerkammer, werden die Auswirkungen einer pH-Fahne auf die Sorption in diesem Architekturelement mit einem alternativen Rechenfall analysiert.

Die ENSI-Fälle c sowie e bis g sind in den verschiedenen Figuren dieses Anhangs nicht dargestellt; die Transportpfade dieser Fälle entsprechen denjenigen des Referenzfalls.

---

[118] Dabei wird auch aufgezeigt, welche geologischen Prozesse und Parameter in den verschiedenen Rechenfällen berücksichtigt werden. Neben der bereits in Anhang A4 aufgezeigten Berücksichtigung der geologischen Prozesse und Parameter in den verschiedenen Rechenfällen wird im vorliegenden Anhang A5 auch auf weitere Zusammenhänge hingewiesen.

[119] Wegen der unterschiedlichen Grösse der Lagerkammern ist die Transportpfadlänge im Wirtgestein nicht einheitlich für alle Lagertypen eines Standortgebiets (s. Tab. A4-3).

[120] 'Stark wasserführend' bedeutet, dass für den Transport in diesem Element (sedimentäre Architekturelemente, vertikale Störungszonen) keine Radionuklidrückhaltung angenommen wird.

Dieser Anhang enthält folgende Schemata und Kurzbeschreibungen:

- Südranden: Lagerebene für SMA im Opalinuston (Fig. A5-1)
- Zürich Nord-Ost: Variante 1: Untere Lagerebene für SMA und HAA im Opalinuston (Fig. A5-2b), obere Lagerebene für SMA im unteren Abschnitt des 'Braunen Doggers'[121] (Fig. A5-2a); Variante 2: Untere Lagerebene für SMA und HAA im Opalinuston (Fig. A5-2d), obere Lagerebene für SMA in Württembergica-Parkinsoni-Schichten des 'Braunen Doggers' (Fig. A5-2c)
- Nördlich Lägeren: Untere Lagerebene für SMA und HAA im Opalinuston (Fig. A5-3b), obere Lagerebene für SMA im 'Braunen Dogger' (Fig. A5-3a)
- Bözberg: Lagerebene SMA und HAA im Opalinuston (Fig. A5-4)
- Jura-Südfuss: Untere Lagerebene für SMA im Opalinuston (Fig. A5-5a), obere Lagerebene für SMA in Effinger Schichten (Variante 1: 50 m vertikaler Abstand zu Malmkalken oder wasserführender Kalkbankabfolge, Fig. A5-5b; Variante 2: 10 m vertikaler Abstand zu wasserführender Kalkbankabfolge, Fig. A5-5c)
- Wellenberg: Obere Lagerebene für SMA unterhalb Niveau Talsohle des Engelbergertals, untere Lagerebene für SMA noch deutlich tiefer (Fig. A5-6)

[121] Im geologischen Standortgebiet ZNO ist wegen der vergleichsweise geringen Mächtigkeit der Effinger Schichten eine Anordnung der Lagerkammern der oberen Lagerebene im unteren Abschnitt des 'Braunen Doggers' vorgesehen.

A5.1 Geologisches Standortgebiet Südranden

Lagertyp: SMA; Wirtgestein: Opalinuston (OPA)
Referenzfall (R): Vertikaler Radionuklidtransport im Opalinuston (OPA) und im 'Braunen Dogger' (BD), beide konzeptualisiert als homogen-poröses Medium

Aspekt	PG	Ungewissheit in Aspekt berücksichtigt durch
1. Geometrie		
Mächtigkeit	13	Rechenfall mit reduzierter Transportpfadlänge im WG und stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (W9.1)
Lage von sedimentären Architekturelementen in RG (nur relevant wenn wasserführend)	11	Rechenfälle mit wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (A7.1, A7.2) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (W9.1)
Lage von grösseren Störungszonen (nur relevant wenn wasserführend)	14	Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD bis zur nächsten stark wasserführenden vertikalen Störungszone im Abstand von 200 m (A7.1, A7.2); Rechenfall mit wasserführender vertikaler Störungszone, die alle Lagerkammern schneidet (W8.1)
Lage Lagerebene innerhalb WG (Welligkeit WG, Versätze)	13	Rechenfall mit reduzierter Transportpfadlänge im WG (W9.1)
2. Eigenschaften WG/RG		
Wasserfluss	6	Rechenfälle mit erhöhtem Wasserfluss in WG/RG (a, W4.1)
Horizontale Durchlässigkeit von sedimentären Architekturelementen	11	Rechenfälle mit wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (A7.1, A7.2) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (W9.1)
Transmissivität von grösseren Störungszonen	14	Rechenfall mit wasserführender vertikaler Störungszone, die alle Lagerkammern schneidet (W8.1)
Art der Transportpfade (Konzeptualisierung als homogen-poröses Medium oder als geklüftetes Medium)	9	Rechenfälle mit alternativer Konzeptualisierung der sedimentären Architekturelemente an Basis BD (A7.1, A7.2)
Diffusion	22	Rechenfall mit ungünstigen Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre (b)
Geochemisches Rückhaltevermögen	20 21	Rechenfall mit verringerten Sorptionskoeffizienten im Nahfeld und in der Geosphäre (d) ; Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD unter Berücksichtigung von Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration (A7.2)
3. Transportpfade		
Geometrie der Transportpfade	11 13	Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD bis zur nächsten stark wasserführenden vertikalen Störungszone im Abstand von 200 m (A7.1, A7.2) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (W9.1)
4. Geologische Langzeitentwicklung		
Gesteins-Dekompaktion infolge langfristiger Hebung/Erosion	7 13	Keine Berücksichtigung notwendig

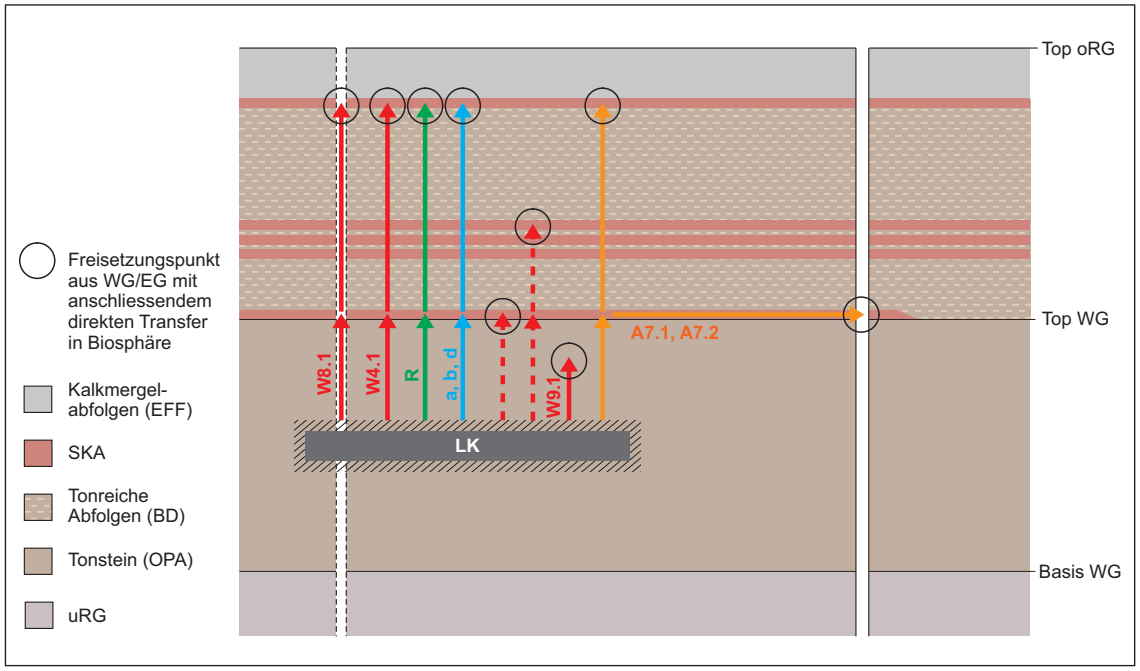


Fig. A5-1: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Südranden (Opalinuston).

Für die Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich geologischer Aspekte in den Rechenfällen siehe nebenstehende Tabelle. Für Details zur Charakterisierung der Rechenfälle siehe Tab. A4-3.

A5.2 Geologisches Standortgebiet Zürich Nord-Ost

Lagertypen: SMA, HAA, Kombi; Wirtgesteine: Opalinuston (OPA, untere Lagerebene), 'Brauner Dogger' (BD, obere Lagerebene)
Referenzfall (R): Vertikaler Radionuklidtransport im Opalinuston (OPA), im 'Braunen Dogger' (BD) und in den Effinger Schichten (EFF), alle konzeptualisiert als homogen-poröses Medium

Variante 1: Lagerkammern im 'Braunen Dogger' im unteren Abschnitt des 'Braunen Doggers'

Aspekt	PG	Ungewissheit in Aspekt berücksichtigt durch
1. Geometrie		
Mächtigkeit	13	siehe Variante 2
Lage von sedimentären Architekturelementen in RG (nur relevant wenn wasserführend)	11	Rechenfälle mit wasserführendem sedimentärem Architekturelement im BD (A7.1 bis A7.3)
Lage von grösseren Störungszonen (nur relevant wenn wasserführend)	14	Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement im BD bis zur nächsten stark wasserführenden vertikalen Störungszone im Abstand von 200 m (A7.1 bis A7.3); Rechenfall mit wasserführender vertikaler Störungszone, die alle Lagerkammern schneidet (W8.1)
Lage Lagerebene innerhalb WG (Welligkeit WG, Versätze)	13	siehe Variante 2
2. Eigenschaften WG/RG		
Wasserfluss	6	Rechenfälle mit erhöhtem Wasserfluss in WG/RG (a, W4.1)
Horizontale Durchlässigkeit von sedimentären Architekturelementen	11	Rechenfälle mit wasserführendem sedimentärem Architekturelement im BD (A7.1 bis A7.3)
Transmissivität von grösseren Störungszonen	14	Rechenfall mit wasserführender vertikaler Störungszone, die alle Lagerkammern schneidet (W8.1)
Art der Transportpfade (Konzeptualisierung als homogen-poröses Medium oder als geklüftetes Medium)	9	Rechenfälle mit erhöhtem Wasserfluss im WG/RG, in denen EFF als geklüftetes Medium konzeptualisiert ist (a, W4.1); Rechenfälle mit alternativer Konzeptualisierung der sedimentären Architekturelemente im BD (A7.1 bis A7.3)
Diffusion	22	Rechenfall mit ungünstigen Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre (b)
Geochemisches Rückhaltevermögen	20 21 24	Rechenfall mit verringerten Sorptionskoeffizienten im Nahfeld und in der Geosphäre (d); Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement im BD unter Berücksichtigung von Auswirkungen pH-Fahne (A7.2) und reduzierter Kolloidfiltration (A7.3)
3. Transportpfade		
Geometrie der Transportpfade	11	Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement im BD bis zur nächsten stark wasserführenden vertikalen Störungszone im Abstand von 200 m (A7.1 bis A7.3)
4. Geologische Langzeitentwicklung		
Gesteins-Dekompaktion infolge langfristiger Hebung/Erosion	7 13	Keine Berücksichtigung notwendig

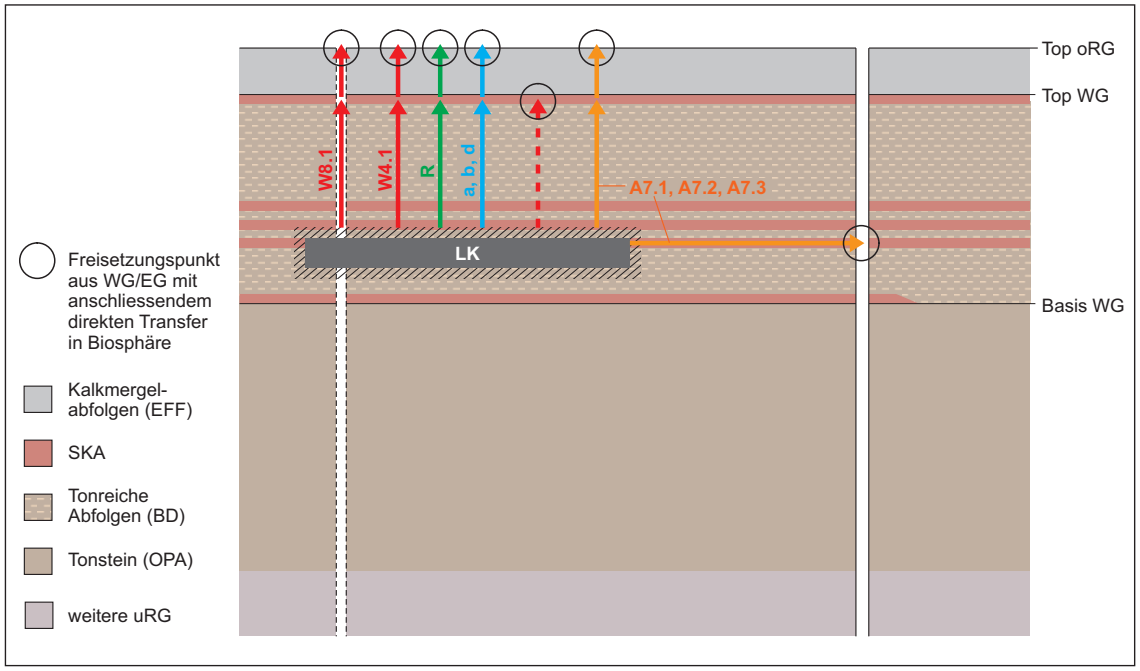


Fig. A5-2a: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Zürich Nord-Ost für die obere Lagerebene ('Brauner Dogger'), Variante 1: Lagerkammern im 'Braunen Dogger' im unteren Abschnitt des 'Braunen Doggers'.

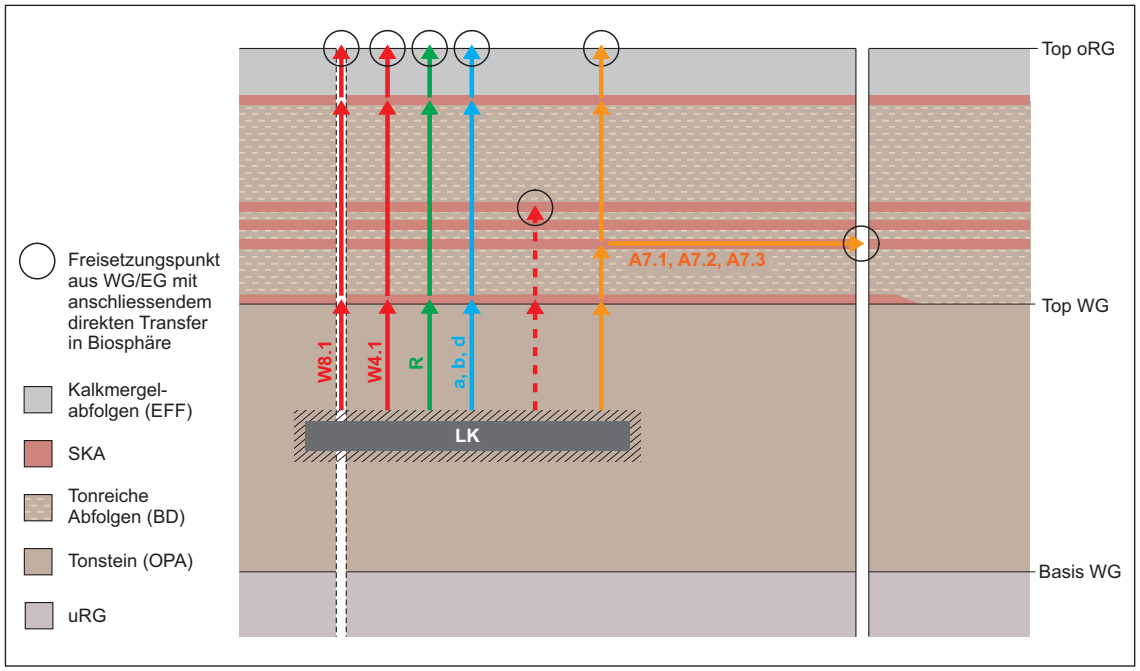


Fig. A5-2b: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Zürich Nord-Ost für die untere Lagerebene (Opalinuston), Variante 1.

Für die Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich geologischer Aspekte in den Rechenfällen siehe nebenstehende Tabelle. Für Details zur Charakterisierung der Rechenfälle siehe Tab. A4-3.

Variante 2: Lagerkammern im 'Braunen Dogger' in Württembergica-Parkinsoni-Schichten

Aspekt	PG	Ungewissheit in Aspekt berücksichtigt durch
1. Geometrie		
Mächtigkeit	13	Rechenfall mit reduzierter Transportpfadlänge im WG und stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (W9.2)
Lage von sedimentären Architekturelementen in RG (nur relevant wenn wasserführend)	11	Rechenfälle mit wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (A7.4, A7.5) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (W9.2)
Lage von grösseren Störungszonen (nur relevant wenn wasserführend)	14	Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD bis zur nächsten stark wasserführenden vertikalen Störungszone im Abstand von 200 m (A7.4, A7.5)
Lage Lagerebene innerhalb WG (Welligkeit WG, Versätze)	13	Rechenfall mit reduzierter Transportpfadlänge im WG (W9.2)
2. Eigenschaften WG/RG		
Wasserfluss	6	siehe Variante 1
Horizontale Durchlässigkeit von sedimentären Architekturelementen	11	Rechenfälle mit wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (A7.4, A7.5) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (W9.2)
Transmissivität von grösseren Störungszonen	14	siehe Variante 1
Art der Transportpfade (Konzeptualisierung als homogen-poröses Medium oder als geklüftetes Medium)	9	Rechenfälle mit alternativer Konzeptualisierung der sedimentären Architekturelemente an Basis BD (A7.4, A7.5)
Diffusion	22	Rechenfall mit ungünstigen Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre (b)
Geochemisches Rückhaltevermögen	20 21	Rechenfall mit verringerten Sorptionskoeffizienten im Nahfeld und in der Geosphäre (d); Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD unter Berücksichtigung von Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration (A7.5)
3. Transportpfade		
Geometrie der Transportpfade	11 13	Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD bis zur nächsten stark wasserführenden vertikalen Störungszone im Abstand von 200 m (A7.4, A7.5) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (W9.2)
4. Geologische Langzeitentwicklung		
Gesteins-Dekompaktion infolge langfristiger Hebung/Erosion	7 13	Keine Berücksichtigung notwendig

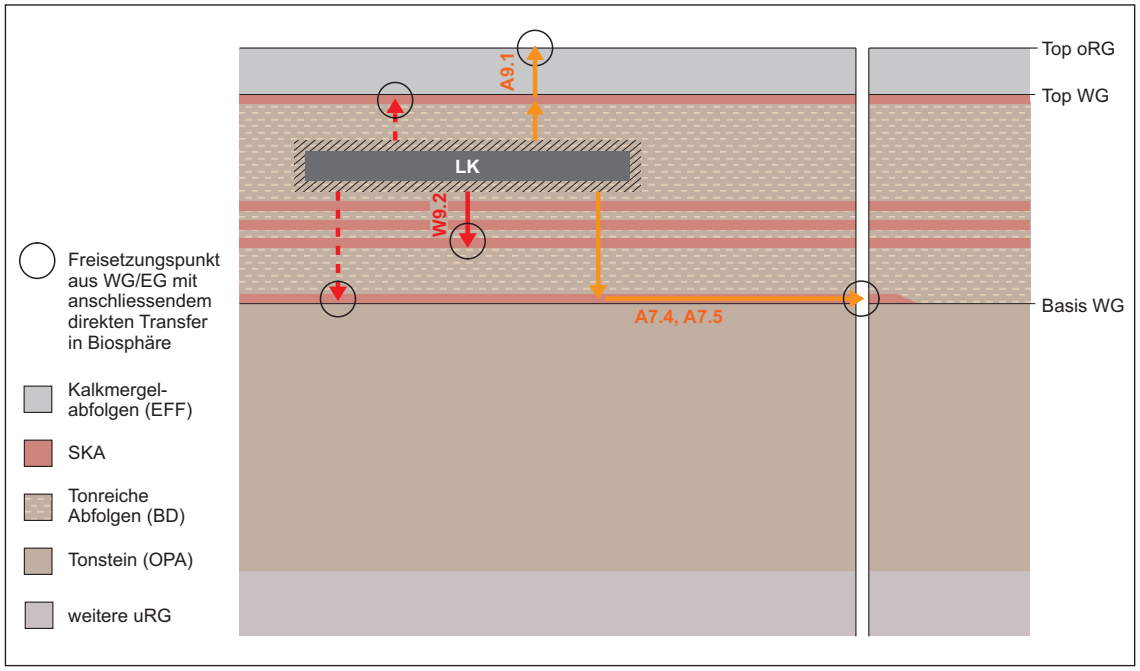


Fig. A5-2c: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Zürich Nord-Ost für die obere Lagerebene ('Brauner Dogger'), Variante 2: Lagerkammern im 'Braunen Dogger' in Württembergica-Parkinsoni-Schichten.

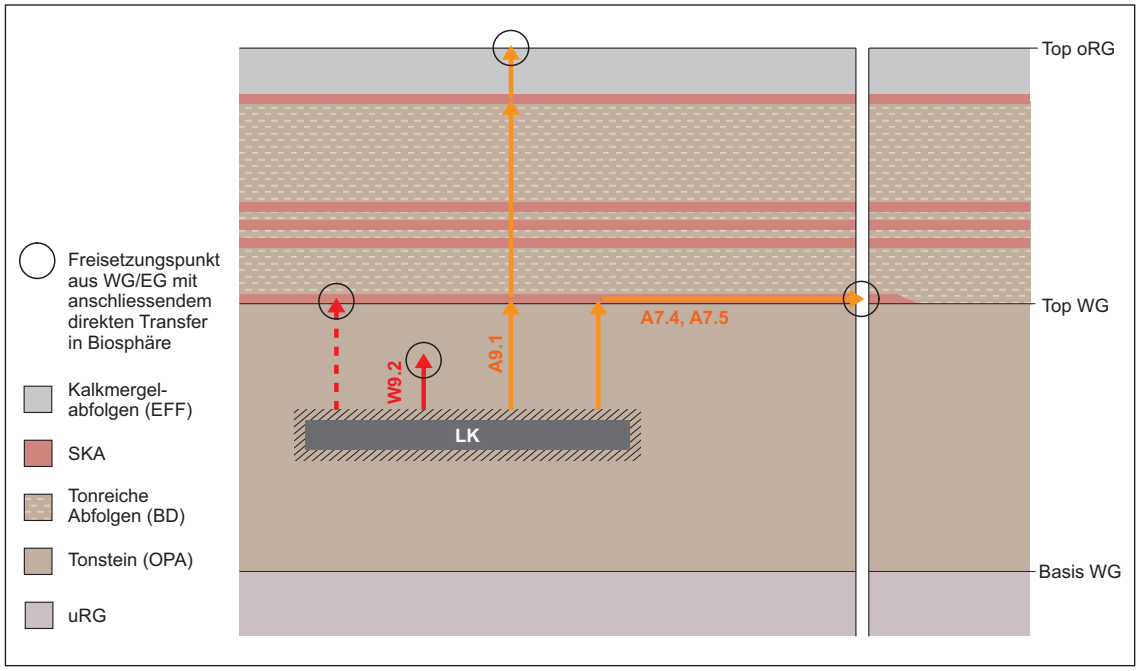


Fig. A5-2d: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Zürich Nord-Ost für die untere Lagerebene (Opalinuston), Variante 2.

Für die Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich geologischer Aspekte in den Rechenfällen siehe nebenstehende Tabelle. Für Details zur Charakterisierung der Rechenfälle siehe Tab. A4-3.

A5.3 Geologisches Standortgebiet Nördlich Lägeren

Lagertypen: SMA, HAA, Kombi; Wirtgesteine: Opalinuston (OPA, untere Lagerebene), 'Brauner Dogger' (BD, obere Lagerebene)
Referenzfall (R): Vertikaler Radionuklidtransport im Opalinuston (OPA), im 'Braunen Dogger' (BD) und in den Effinger Schichten (EFF), alle konzeptualisiert als homogen-poröses Medium

Aspekt	PG	Ungewissheit in Aspekt berücksichtigt durch
1. Geometrie		
Mächtigkeit	13	Rechenfall mit reduzierter Transportpfadlänge im WG und stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (W9.1)
Lage von sedimentären Architekturelementen in RG (nur relevant wenn wasserführend)	11	Rechenfälle mit wasserführendem sedimentärem Architekturelement (A7.1 bis A7.5) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (W9.1)
Lage von grösseren Störungszonen (nur relevant wenn wasserführend)	14	Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement bis zur nächsten stark wasserführenden vertikalen Störungszone im Abstand von 200 m (A7.1 bis A7.5); Rechenfall mit wasserführender vertikaler Störungszone, die alle Lagerkammern schneidet (W8.1)
Lage Lagerebene innerhalb WG (Welligkeit WG, Versätze)	13	Rechenfall mit reduzierter Transportpfadlänge im WG (W9.1)
2. Eigenschaften WG/RG		
Wasserfluss	6	Rechenfälle mit erhöhtem Wasserfluss in WG/RG (a, W4.1)
Horizontale Durchlässigkeit von sedimentären Architekturelementen	11	Rechenfälle mit wasserführendem sedimentärem Architekturelement (A7.1 bis A7.5) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (W9.1)
Transmissivität von grösseren Störungszonen	14	Rechenfall mit wasserführender vertikaler Störungszone, die alle Lagerkammern schneidet (W8.1)
Art der Transportpfade (Konzeptualisierung als homogen-poröses Medium oder als geklüftetes Medium)	9	Rechenfälle mit erhöhtem Wasserfluss im WG/RG, in denen EFF als geklüftetes Medium konzeptualisiert ist (a, W4.1); Rechenfälle mit alternativer Konzeptualisierung der sedimentären Architekturelemente (A7.1 bis A7.5)
Diffusion	22	Rechenfall mit ungünstigen Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre (b)
Geochemisches Rückhaltevermögen	20 21 24	Rechenfall mit verringerten Sorptionskoeffizienten im Nahfeld und in der Geosphäre (d); Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement unter Berücksichtigung von Auswirkungen pH-Fahne (A7.4) und reduzierter Kolloidfiltration (A7.2, A7.5)
3. Transportpfade		
Geometrie der Transportpfade	11 13	Rechenfälle mit Transport in sedimentärem Architekturelement bis zur nächsten stark wasserführenden vertikalen Störungszone im Abstand von 200 m (A7.1 bis A7.5) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis BD (W9.1)
4. Geologische Langzeitentwicklung		
Gesteins-Dekompaktion infolge langfristiger Hebung/Erosion	7 13	Keine Berücksichtigung notwendig

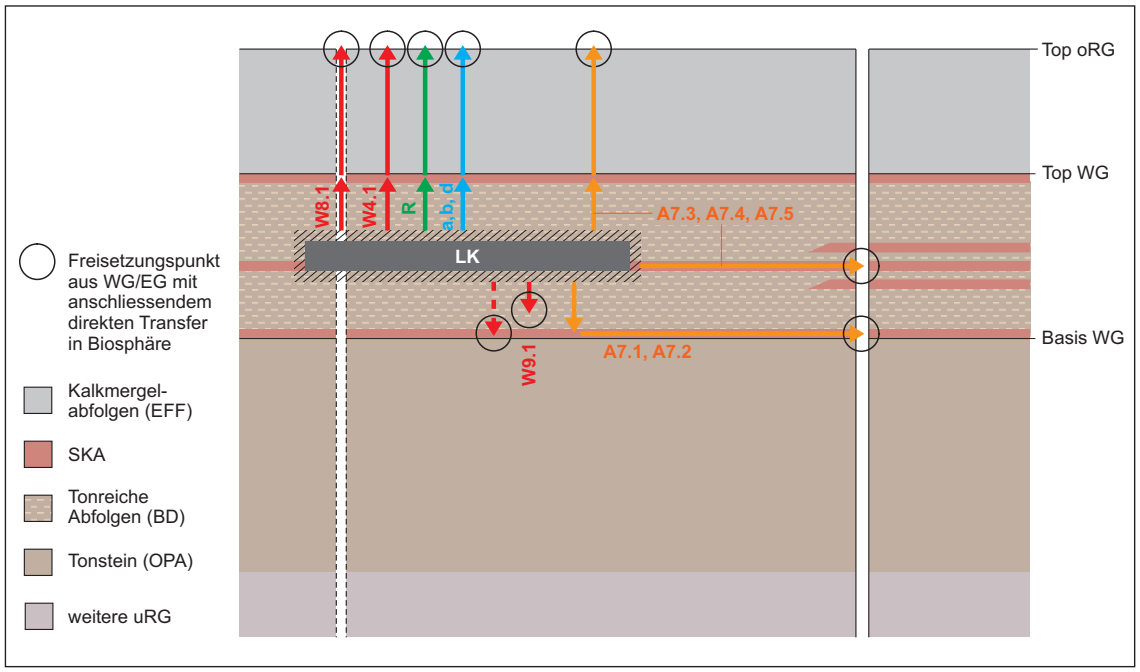


Fig. A5-3a: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägeren für die obere Lagerebene ('Brauner Dogger').

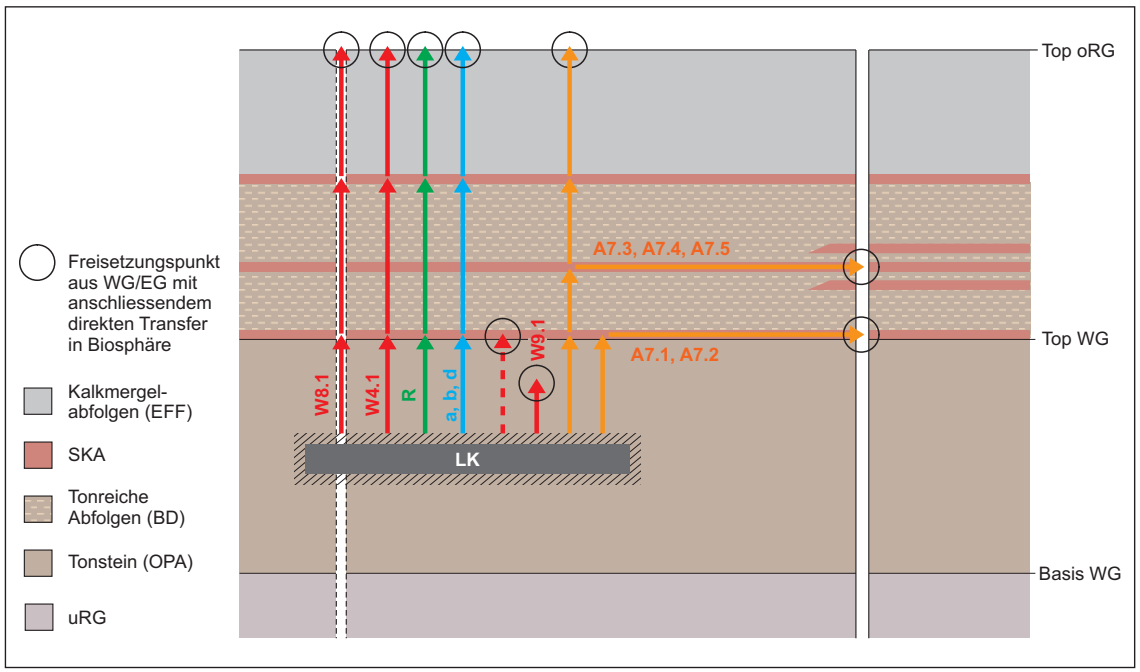


Fig. A5-3b: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägeren für die untere Lagerebene (Opalinuston).

Für die Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich geologischer Aspekte in den Rechenfällen siehe nebenstehende Tabelle. Für Details zur Charakterisierung der Rechenfälle siehe Tab. A4-3.

A5.4 Geologisches Standortgebiet Bözberg

Lagertypen: SMA, HAA, Kombi; Wirtgestein: Opalinuston (OPA)
Referenzfall (R): Vertikaler Radionuklidtransport im Opalinuston (OPA) und in den oberen Rahmengesteinen (oRG), alle konzeptualisiert als homogen-poröses Medium

Aspekt	PG	Ungewissheit in Aspekt berücksichtigt durch
1. Geometrie		
Mächtigkeit	13	Rechenfall mit reduzierter Transportpfadlänge im WG und stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG (W9.1)
Lage von sedimentären Architekturelementen in RG (nur relevant wenn wasserführend)	11	Rechenfälle mit wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG (A7.1, A7.2) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG (W9.1)
Lage von grösseren Störungszonen (nur relevant wenn wasserführend)	14	Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement bis zur nächsten stark wasserführenden vertikalen Störungszone im Abstand von 200 m (A7.1, A7.2); Rechenfall mit wasserführender vertikaler Störungszone, die alle Lagerkammern schneidet (W8.1)
Lage Lagerebene innerhalb WG (Welligkeit WG, Versätze)	13	Rechenfall mit reduzierter Transportpfadlänge im WG (W9.1)
2. Eigenschaften WG/RG		
Wasserfluss	6	Rechenfälle mit erhöhtem Wasserfluss in WG/RG (a, W4.1)
Horizontale Durchlässigkeit von sedimentären Architekturelementen	11	Rechenfälle mit wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG (A7.1, A7.2) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG (W9.1)
Transmissivität von grösseren Störungszonen	14	Rechenfall mit wasserführender vertikaler Störungszone, die alle Lagerkammern schneidet (W8.1)
Art der Transportpfade (Konzeptualisierung als homogen-poröses Medium oder als geklüftetes Medium)	9	Rechenfälle mit alternativer Konzeptualisierung der sedimentären Architekturelemente an Basis oRG (A7.1, A7.2)
Diffusion	22	Rechenfall mit ungünstigen Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre (b)
Geochemisches Rückhaltevermögen	20 21	Rechenfall mit verringerten Sorptionskoeffizienten im Nahfeld und in der Geosphäre (d); Rechenfälle mit Transport in sedimentärem Architekturelement an Basis oRG unter Berücksichtigung von Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration (A7.2)
3. Transportpfade		
Geometrie der Transportpfade	11 13	Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG bis zur nächsten stark wasserführenden vertikalen Störungszone im Abstand von 200 m (A7.1, A7.2) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG (W9.1)
4. Geologische Langzeitentwicklung		
Gesteins-Dekompaktion infolge langfristiger Hebung/Erosion	7 13	SMA: Keine Berücksichtigung notwendig; HAA/Kombi (HAA-Teil): Rechenfall mit zeitabhängiger Zunahme der hydraulischen Durchlässigkeit wegen Dekompaktion (A10.1); Rechenfall mit reduzierter Transportpfadlänge im WG und stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG (W9.1)

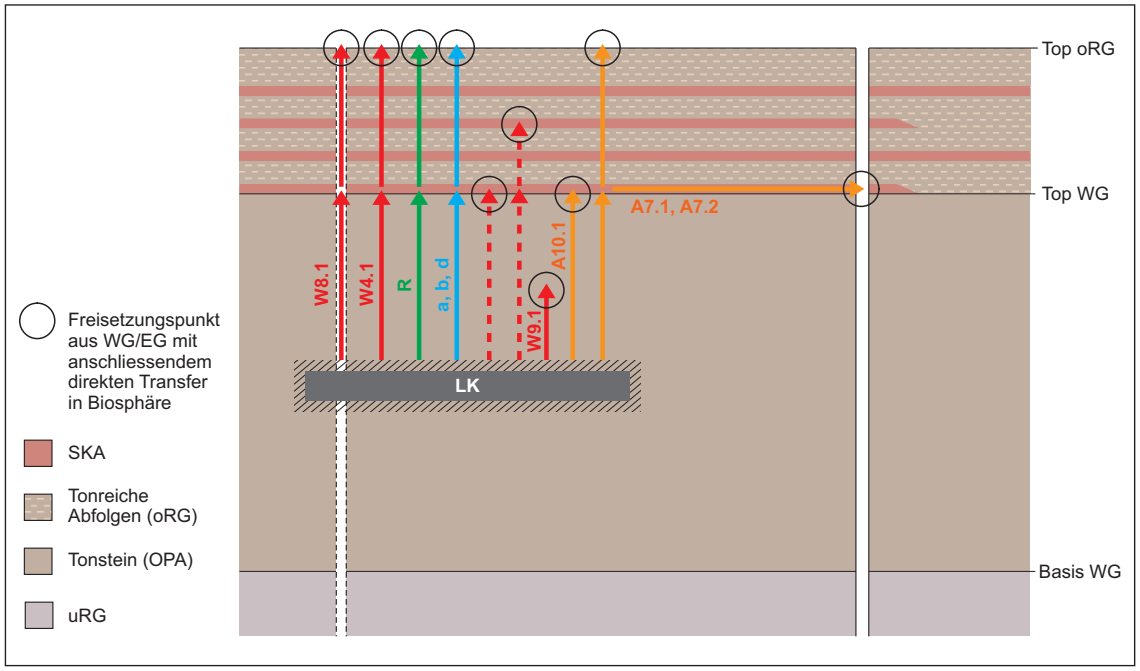


Fig. A5-4: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Bözberg (Opalinuston).

Für die Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich geologischer Aspekte in den Rechenfällen siehe nebenstehende Tabelle. Für Details zur Charakterisierung der Rechenfälle siehe Tab. A4-3.

A5.5 Geologisches Standortgebiet Jura-Südfuss

Lagertyp: SMA; Wirtgestein: Opalinuston (OPA, untere Lagerebene)
Referenzfall (R): Vertikaler Radionuklidtransport im Opalinuston (OPA) und in den oberen Rahmengesteinen (oRG), alle konzeptualisiert als homogen-poröses Medium

Aspekt	PG	Ungewissheit in Aspekt berücksichtigt durch
1. Geometrie		
Mächtigkeit	13	Rechenfall mit reduzierter Transportpfadlänge im WG und stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG (W9.1)
Lage von sedimentären Architekturelementen in RG (nur relevant wenn wasserführend)	11	Rechenfälle mit wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG (A7.4, A7.5) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG (W9.1)
Lage von grösseren Störungszonen (nur relevant wenn wasserführend)	14	Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement bis zur nächsten stark wasserführenden vertikalen Störungszone im Abstand von 200 m (A7.4, A7.5); Rechenfall mit wasserführender vertikaler Störungszone, die alle Lagerkammern schneidet (W8.1)
Lage Lagerebene innerhalb WG (Welligkeit WG, Versätze)	13	Rechenfall mit reduzierter Transportpfadlänge im WG (W9.1)
2. Eigenschaften WG/RG		
Wasserfluss	6	Rechenfälle mit erhöhtem Wasserfluss in WG/RG (a, W4.1)
Horizontale Durchlässigkeit von sedimentären Architekturelementen	11	Rechenfälle mit wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG (A7.4, A7.5) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG (W9.1)
Transmissivität von grösseren Störungszonen	14	Rechenfall mit wasserführender vertikaler Störungszone, die alle Lagerkammern schneidet (W8.1)
Art der Transportpfade (Konzeptualisierung als homogen-poröses Medium oder als geklüftetes Medium)	9	Rechenfälle mit alternativer Konzeptualisierung der sedimentären Architekturelemente an Basis oRG (A7.4, A7.5)
Diffusion	22	Rechenfall mit ungünstigen Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre (b)
Geochemisches Rückhaltevermögen	20 21	Rechenfall mit verringerten Sorptionskoeffizienten im Nahfeld und in der Geosphäre (d); Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG unter Berücksichtigung von Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration (A7.5)
3. Transportpfade		
Geometrie der Transportpfade	11 13	Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG bis zur nächsten stark wasserführenden vertikalen Störungszone im Abstand von 200 m (A7.4, A7.5) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement an Basis oRG (W9.1)
4. Geologische Langzeitentwicklung		
Gesteins-Dekompaktion infolge langfristiger Hebung/Erosion	7 13	Keine Berücksichtigung notwendig

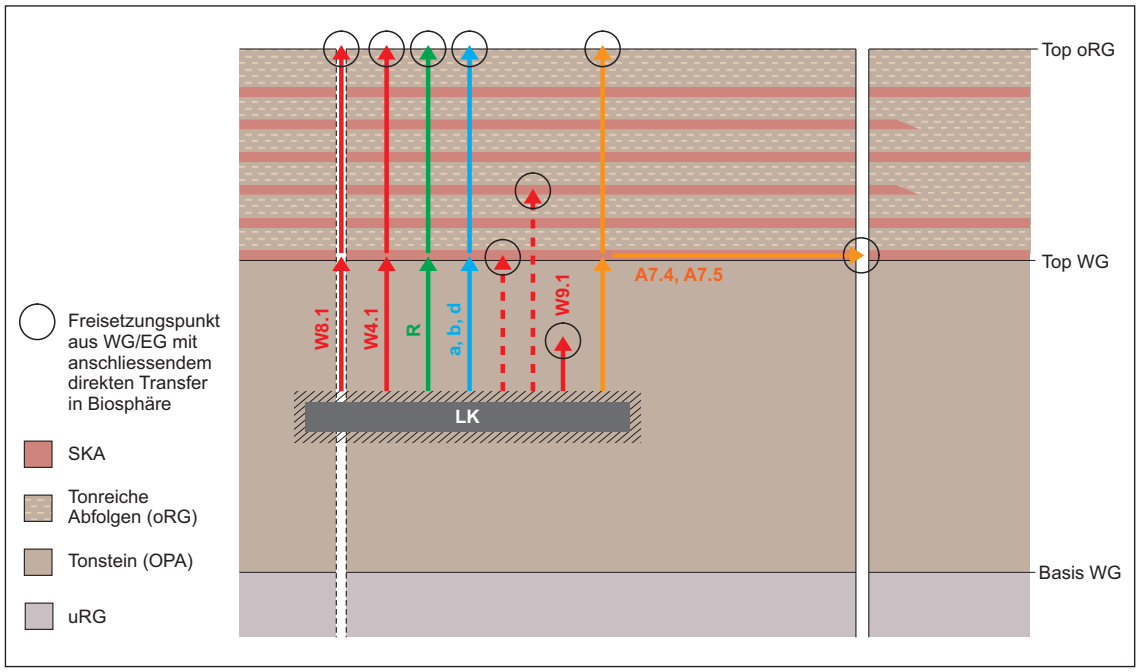


Fig. A5-5a: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss für die untere Lagerebene (Opalinuston).

Für die Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich geologischer Aspekte in den Rechenfällen siehe nebenstehende Tabelle. Für Details zur Charakterisierung der Rechenfälle siehe Tab. A4-3.

Lagertyp: SMA; Wirtgestein: Effinger Schichten (EFF, obere Lagerebene)
Referenzfall (R): Vertikaler Radionuklidtransport in den Effinger Schichten (EFF), konzeptualisiert als homogen-poröses Medium

Aspekt	PG	Ungewissheit in Aspekt berücksichtigt durch
1. Geometrie		
Mächtigkeit	13	Rechenfall mit reduzierter Transportpfadlänge im WG und stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement in EFF (W9.1)
Lage von sedimentären Architekturelementen in RG (nur relevant wenn wasserführend)	11 12	Rechenfälle mit wasserführendem sedimentärem Architekturelement in EFF (A7.1 bis A7.3) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement in EFF (W9.1)
Lage von grösseren Störungszonen (nur relevant wenn wasserführend)	14	Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement bis zur nächsten stark wasserführenden vertikalen Störungszone im Abstand von 200 m (A7.1 bis A7.3); Rechenfall mit wasserführender vertikaler Störungszone, die alle Lagerkammern schneidet (W8.1)
Lage Lagerebene innerhalb WG (Welligkeit WG, Versätze)	13	Rechenfall mit reduzierter Transportpfadlänge im WG (W9.1)
2. Eigenschaften WG/RG		
Wasserfluss	6	Rechenfälle mit erhöhtem Wasserfluss in WG/RG (a, A5.1, A5.2, A6.1, A6.2, W9.1)
Horizontale Durchlässigkeit von sedimentären Architekturelementen	11 12	Rechenfälle mit wasserführendem sedimentärem Architekturelement in EFF (A7.1 bis A7.3) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement in EFF (W9.1); letzterer deckt auch den Fall eines verkarsteten sedimentären Architekturelements in EFF ab
Transmissivität von grösseren Störungszonen	14	Rechenfälle mit wasserführenden vertikalen Störungszonen, die alle Lagerkammern schneidet (A5.1, A5.2, W8.1)
Art der Transportpfade (Konzeptualisierung als homogen-poröses Medium oder als geklüftetes Medium)	9	Rechenfälle mit alternativer Konzeptualisierung der sedimentären Architekturelemente in EFF (A7.1 bis A7.3); Rechenfälle, in denen EFF als geklüftetes Medium konzeptualisiert sind (a, A6.1, A6.2)
Diffusion	22	Rechenfall mit ungünstigen Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre (b)
Geochemisches Rückhaltevermögen	18 20 21 24	Rechenfall mit verringerten Sorptionskoeffizienten im Nahfeld und in der Geosphäre (d); Rechenfälle mit Transport in engständiger Klüftung in EFF unter Berücksichtigung von Auswirkungen pH-Fahne (A6.1) bzw. reduzierter Kolloidfiltration (A6.2); Rechenfall mit zusätzlichem Transport in kleinen vertikalen Störungszonen unter Berücksichtigung von Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration (A5.2); Rechenfall mit erhöhter Salinität des Porenwassers in EFF (A6.3); Rechenfälle mit Transport in wasserführender KBA durch Lagerkammern unter Berücksichtigung von Auswirkungen pH-Fahne (A7.2) bzw. reduzierter Kolloidfiltration (A7.3)
3. Transportpfade		
Geometrie der Transportpfade	11 12 13	Rechenfälle mit Transport in wasserführendem sedimentärem Architekturelement in EFF bis zur nächsten stark wasserführenden vertikalen Störungszone im Abstand von 200 m (A7.1 bis A7.3) bzw. stark wasserführendem sedimentärem Architekturelement in EFF (W9.1)
4. Geologische Langzeitentwicklung		
Gesteins-Dekompaktion infolge langfristiger Hebung/Erosion	7 13	Keine Berücksichtigung notwendig

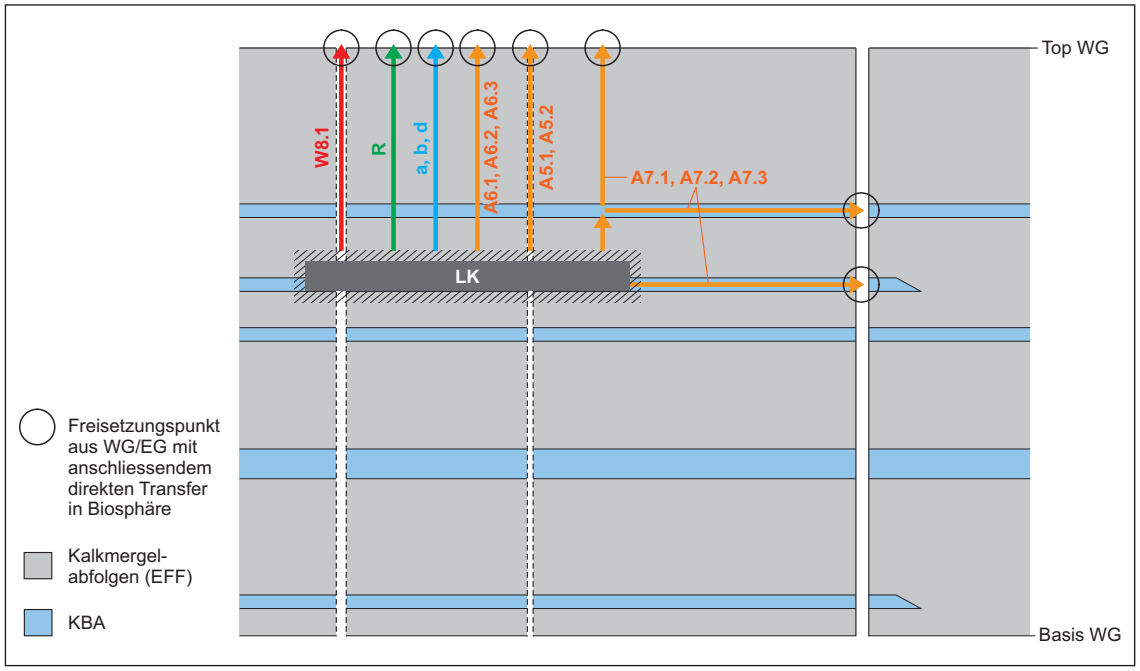


Fig. A5-5b: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss für die obere Lagerebene (Effinger Schichten), Variante 1: Obere Lagerkammern mittig zwischen Gerstenhübel-Schichten und Top EFF

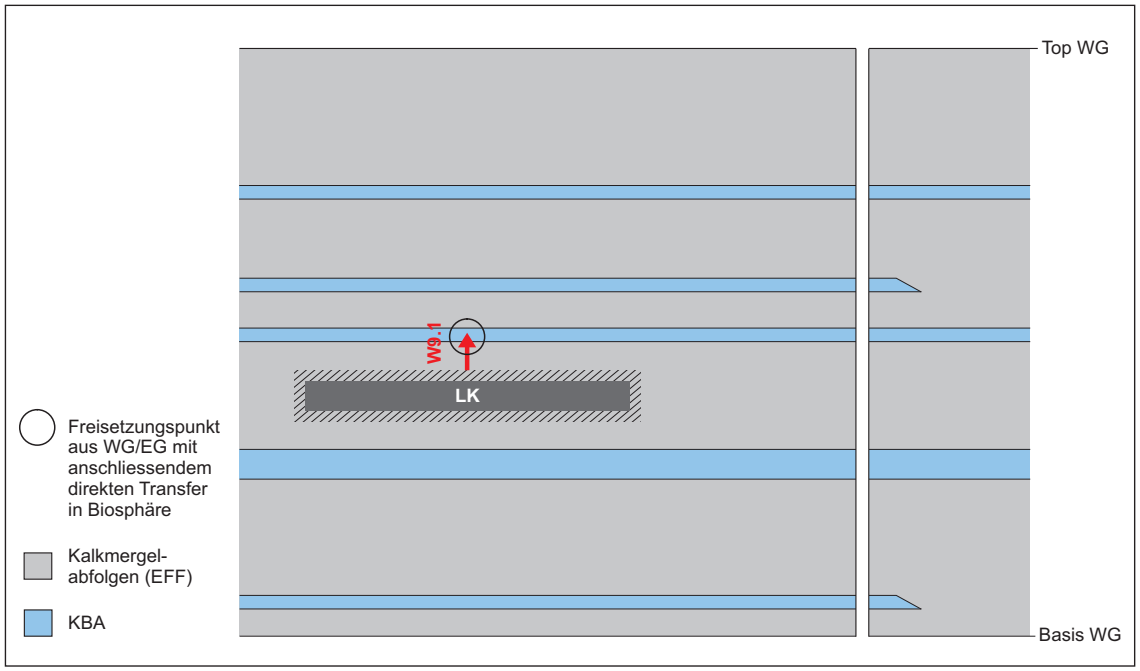


Fig. A5-5c: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss für die obere Lagerebene (Effinger Schichten), Variante 2: Lagerkammern in Effinger Schichten mittig in Kalkmergelabfolge

Für die Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich geologischer Aspekte in den Rechenfällen siehe nebenstehende Tabelle. Für Details zur Charakterisierung der Rechenfälle siehe Tab. A4-3.

A5.6 Geologisches Standortgebiet Wellenberg

Lagertyp: SMA; Wirtgestein: Mergel-Formationen des Helvetikums (MGL, Rechenfälle für untere und obere Lagerebene unterscheiden sich nur in der Parametrisierung, nicht in der Konzeptualisierung)
Referenzfall (R): Radionuklidtransport im Mergel (MGL), konzeptualisiert als geklüftetes Medium

Aspekt	PG	Ungewissheit in Aspekt berücksichtigt durch
1. Geometrie		
Mächtigkeit	13	Verwendete Transportpfadlänge von 200 m ist abdeckend
Lage von sedimentären Architekturelementen in RG (nur relevant wenn wasserführend)	11	Nicht anwendbar (Entstehungsgeschichte)
Lage von grösseren Störungszonen (nur relevant wenn wasserführend)	14	Rechenfälle mit wasserführenden vertikalen Störungszonen, die alle Lagerkammern schneiden (A8.1 bis A8.4, W8.5)
Lage Lagerebene innerhalb WG (Welligkeit WG, Versätze)	13	Verwendete Transportpfadlänge von 200 m ist abdeckend
2. Eigenschaften WG/RG		
Wasserfluss	6	Rechenfälle mit erhöhtem Wasserfluss in WG (a, W4.1)
Horizontale Durchlässigkeit von sedimentären Architekturelementen	11	Nicht anwendbar (Entstehungsgeschichte)
Transmissivität von grösseren Störungszonen	14	Rechenfälle mit wasserführenden vertikalen Störungszonen, die alle Lagerkammern schneiden (A8.1 bis A8.4, W8.5)
Art der Transportpfade (Konzeptualisierung als homogen-poröses Medium oder als geklüftetes Medium)	9	WG für alle Rechenfälle konzeptualisiert als geklüftetes Medium; Rechenfall mit Transport ausschliesslich in kataklastischen Scherzonen (A5.1)
Diffusion	22	Rechenfall mit ungünstigen Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre (b)
Geochemisches Rückhaltevermögen	20 21 24	Rechenfall mit verringerten Sorptionskoeffizienten im Nahfeld und in der Geosphäre (d); Rechenfälle mit Auswirkungen pH-Fahne (A6.1) bzw. reduzierter Kolloidfiltration (A6.2); Rechenfall mit zusätzlichem Transport in wasserführender grösseren Störungszone mit Anteil Transportpfad in KBA (A8.2), mit Auswirkunge pH-Fahne in WG (A8.3) sowie mit Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration (A8.4)
3. Transportpfade		
Geometrie der Transportpfade	13	Verwendete Transportpfadlänge von 200 m ist abdeckend
4. Geologische Langzeitentwicklung		
Gesteins-Dekompaktion infolge langfristiger Hebung/Erosion	7 13	Keine Berücksichtigung notwendig

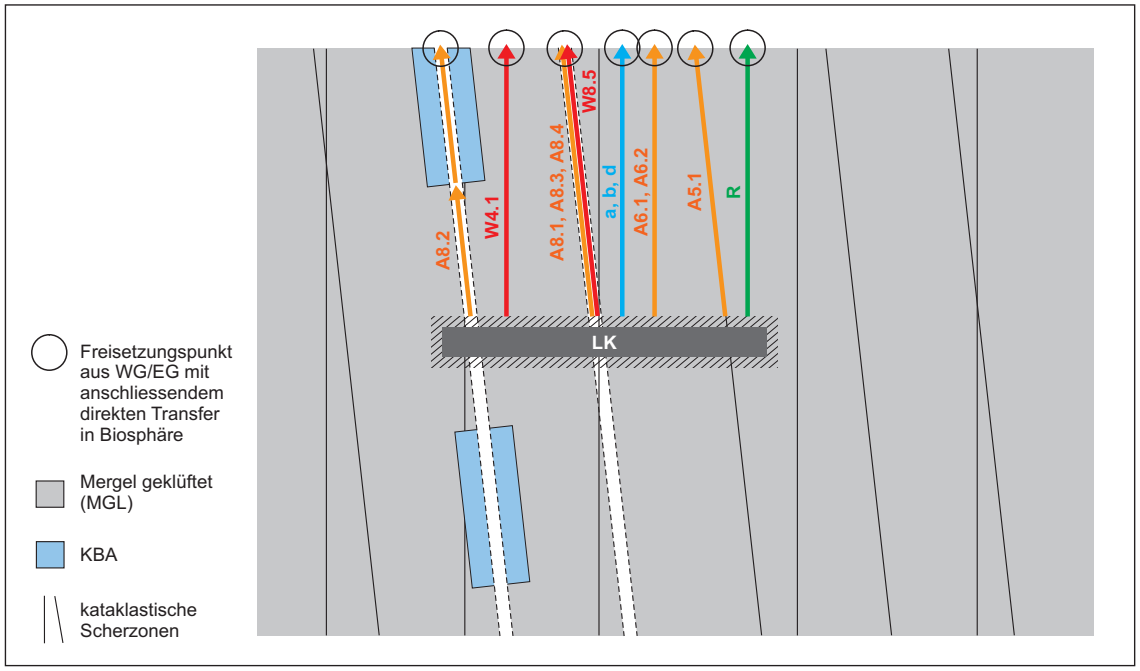


Fig. A5-6: Modellkonzepte für den Radionuklidtransport im geologischen Standortgebiet Wellenberg für die obere und untere Lagerebene (Mergel-Formationen des Helvetikums).

Für die Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich geologischer Aspekte in den Rechenfällen siehe nebenstehende Tabelle. Für Details zur Charakterisierung der Rechenfälle siehe Tab. A4-3.

Anhang A6: Wichtige Inputdaten für die Testrechnungen

A6.1 Inventar

Tab. A6-1: MIRAM Abfallsorten.

Das Vorgehen bei der Zuteilung der Abfallsorten zum SMA- und HAA-Lager (LMA-Teil) entspricht demjenigen in SGT Etappe 1 (vgl. Tabelle A3.1-1 in Nagra 2008d), die Angaben für die Anzahl Gebinde entsprechen dem umhüllenden Inventar (Nagra 2009a).

MIRAM-Abfallsorte (1)	MIRAM-Bezeichnung (1)	Anzahl Gebinde (2)	Kat. KEV (3)	Referenz-zuteilung (4)	Alternative Zuteilung (4)	Abfall-gruppe (5)
BA-B*-F1	Filterkerzen zementiert in 200-l-Fass	609	SMA	SMA	SMA	1
BA-B-F2	Filterkerzen zementiert in 1 m^3-BC	8	SMA	SMA	SMA	1
BA-B**-H1	Harze in Polystyrol in 200-l-Fass	4'473	SMA	SMA	SMA	2
BA-B-K1	Konzentrate zementiert in 200-l-Fass	233	SMA	SMA	SMA	1
BA-B-K2	Konzentrate zementiert in 1 m^3-BC	170	SMA	SMA	SMA	1
BA-B-M1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	1375	SMA	SMA	SMA	2
BA-B*-NP1	Nachbetriebsphase-Abfälle in 200-l-Fass	745	SMA	SMA	SMA	2
BA-B*-S1	Schlämme zementiert in 200-l-Fass	1'623	SMA	SMA	SMA	2
BA-B*-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	2'332	SMA	SMA	SMA	1
BA-B-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	206	SMA	SMA	SMA	1
BA-G*-F1	Filtermaterial zementiert in 200-l-Fass	653	ATA	LMA	LMA	1
BA-G**-H1	Harze bituminiert in 200-l-Fass	743	SMA	SMA	SMA	2
BA-G-H2	Harze bituminiert in 1 m^3-BC	12	SMA	SMA	SMA	1
BA-G-H3	Harze zementiert in 200-l-Fass	7	SMA	SMA	SMA	1
BA-G**-K1	Konzentrate bituminiert in 200-l-Fass	1'945	SMA	SMA	SMA	2
BA-G-K2	Konzentrate bituminiert in 1 m^3-BC	12	SMA	SMA	SMA	2
BA-G-M1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	344	SMA	SMA	SMA	2
BA-G*-NP1	Nachbetriebsphase-Abfälle in 200-l-Fass	917	SMA	SMA	SMA	2
BA-G*-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	1'056	SMA	SMA	SMA	1
BA-G-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	139	SMA	SMA	SMA	1
BA-L*-H1	Harze und Konzentrate zementiert in 200-l-Fass	45'415	SMA	SMA	SMA	2
BA-L-M1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	1'286	SMA	SMA	SMA	2
BA-L*-NP1	Nachbetriebsphase-Abfälle in 200-l-Fass	2'059	SMA	SMA	SMA	2
BA-L-S1	Schlämme zementiert in 200-l-Fass	10	SMA	SMA	SMA	1
BA-L*-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	2'962	SMA	SMA	SMA	1
BA-L-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	237	SMA	SMA	SMA	1
BA-M-F1_ATA	Filterkerzen zementiert in 200-l-Fass	3	ATA	LMA	LMA	1
BA-M-F1_SMA	Filterkerzen zementiert in 200-l-Fass	11	SMA	SMA	SMA	1
BA-M*-F2	Filtermaterial zementiert in 200-l-Fass	25	SMA	SMA	SMA	1
BA-M*-H1	Harze zementiert in 200-l-Fass	16'293	SMA	SMA	SMA	2
BA-M-M1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	735	SMA	SMA	SMA	2

Tab. A6-1: (Fortsetzung)

MIRAM-Abfallsorte (1)	MIRAM-Bezeichnung (1)	Anzahl Gebinde (2)	Kat. KEV (3)	Referenz-zuteilung (4)	Alternative Zuteilung (4)	Abfall-gruppe (5)
BA-M*-NP1	Nachbetriebsphase-Abfälle in 200-l-Fass	1'362	SMA	SMA	SMA	2
BA-M-S1	Schlämme zementiert in 200-l-Fass	45	SMA	SMA	SMA	1
BA-M*-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	1'820	SMA	SMA	SMA	1
BA-M-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	193	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-AM1	BAG-Zylinder mit Am-241 zementiert in 200-l-Fass	55	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-AM2	BAG-Zylinder mit Am-241 zementiert in 1 m^3-BC	8	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-AO1_ATA	BAG-Zylinder H-3/C-14/Ra-226 (ohne Am-241) zementiert in 200-l-Fass	2	ATA	LMA	LMA	2
BA-P-AO1_SMA	BAG-Zylinder H-3/C-14/Ra-226 (ohne Am-241) zementiert in 200-l-Fass	23	SMA	SMA	SMA	2
BA-P-AO2	BAG-Zylinder H-3/C-14/Ra-226 (ohne Am-241) zementiert in 1m^3-BC	7	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-AO3_ATA	BAG-Zylinder (ohne Am-241) zementiert in 4.5 m^3-KC	2	ATA	LMA	LMA	2
BA-P-AO3_SMA	BAG-Zylinder (ohne Am-241) zementiert in 4.5 m^3-KC	51	SMA	SMA	SMA	2
BA-P-BI1	Bitumen/Glas-Muster WA zementiert in 200-l-Fass	1	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-CE1	Isolde-Targets CERN zementiert in 200-l-Fass	26	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-HL1	Pu-haltige Abfälle zementiert in 200-l-Fass	793	ATA	LMA	LMA	2
BA-P-HL2	Pu-/β-/γ-haltige Abfälle zementiert in 200-l-Fass	38	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-HL3	Pu-/β-/γ-haltige Abfälle zementiert in 1m^3-BC	9	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-HL4	Pu-/β-/γ-haltige Abfälle zementiert in 4.5 m^3-KC	8	ATA	LMA	LMA	2
BA-P-HL5_ATA	Pu-/β-/γ-haltige Abfälle zementiert in 200-l-Fass	312	ATA	LMA	LMA	2
BA-P-HL5_SMA	Pu-/β-/γ-haltige Abfälle zementiert in 200-l-Fass	4'064	SMA	SMA	SMA	2
BA-P-HL6_ATA	Pu-kont. Sperrgut zementiert in 200-l-Fass	5	ATA	LMA	LMA	2
BA-P-HL6_SMA	Pu-kont. Sperrgut zementiert in 200-l-Fass	545	SMA	SMA	SMA	2
BA-P-HL7	Pu-kont. Bauschutt zementiert in 200-l-Fass	382	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-HL8	Laborausrüstungen zementiert in 200-l-Fass	16	SMA	SMA	SMA	2
BA-P-HL9	Pu-Lösungen zementiert in 1.2 m^3-Container	248	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-M1	Mischabfälle BAG verpresst/zementiert in 200-l-Fass	4'989	SMA	SMA	SMA	2
BA-P-M2_ATA	Mischabfälle BAG zementiert in 200-l-Fass	1	ATA	LMA	LMA	1

Tab. A6-1: (Fortsetzung)

MIRAM-Abfallsorte (1)	MIRAM-Bezeichnung (1)	Anzahl Gebinde (2)	Kat. KEV (3)	Referenz-zuteilung (4)	Alternative Zuteilung (4)	Abfall-gruppe (5)
BA-P-M2_SMA	Mischabfälle BAG zementiert in 200-l-Fass	1'871	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-MI1	Mischabfälle BAG H-3/C-14/Ra-226 zementiert in 200-l-Fass	2'144	SMA	SMA	LMA	1
BA-P-MI2_ATA	Mischabfälle BAG zementiert in 1m^3-BC	1	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-MI2_SMA	Mischabfälle BAG zementiert in 1m^3-BC	8	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-O1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	498	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-O2	Militär-Abfälle zementiert in 4.5 m^3-KC	6	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-O3_ATA	Filterabfälle zementiert in 200-l-Fass	1	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-O3_SMA	Filterabfälle zementiert in 200-l-Fass	51	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-O4_ATA	Uran-Abfälle zementiert in 200-l-Fass	14	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-O4_SMA	Uran-Abfälle zementiert in 200-l-Fass	117	SMA	LMA	LMA	1
BA-P-S1	Schlämme zementiert in 200-l-Fass	1'782	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	1'071	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	248	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-W1	PSI-West Beschleunigerabfälle zementiert in 4.5 m^3-KC	678	SMA	SMA	SMA	1
BA-Z*-1	Betriebsabfälle zementiert in 200-l-Fass	542	SMA	SMA	SMA	2
BE-D-2	Brennelemente UO_2/MOX-DWR in Behälter	380	HAA	HAA	HAA	-
BE-D-3	Brennelemente UO_2-DWR in Behälter	3'407	HAA	HAA	HAA	-
BE-S-1	Brennelemente UO_2-SWR in Behälter	1'086	HAA	HAA	HAA	-
RA-B*-E1	Reaktoreinbauten zementiert in 200-l-Fass	48	SMA	SMA	SMA	1
RA-B*-E2	Reaktoreinbauten in Mosaik-II-Behältern	39	SMA	LMA	LMA	1
RA-G*-E1	Reaktoreinbauten zementiert in 200-l-Fass	48	SMA	SMA	SMA	1
RA-G*-E2	Reaktoreinbauten in Mosaik-II-Behältern	54	SMA	LMA	LMA	1
RA-G-E3	Reaktoreinbauten zementiert in 1m^3-BC	3	SMA	SMA	SMA	1
RA-L*-E1	Reaktoreinbauten zementiert in 200-l-Fass	436	SMA	SMA	SMA	1
RA-L*-E2	Reaktoreinbauten in Mosaik-II-Behältern	62	SMA	SMA	SMA	1
RA-L-E3	Brennelementkästen zementiert in 200-l-Fass	123	SMA	SMA	SMA	1
RA-L*-F1	Filterelemente UWS zementiert in 200-l-Fass	12	SMA	SMA	SMA	1
RA-M*-E1	Reaktoreinbauten zementiert in 200-l-Fass	133	SMA	SMA	SMA	1
RA-M*-E2	Reaktoreinbauten in Mosaik-II-Behältern	39	SMA	SMA	SMA	1
RA-M*-E3	Brennelementkästen zementiert in 200-l-Fass	596	SMA	SMA	SMA	1
RA-M*-E4	Kleinteile zementiert in 200-l-Fass	12	SMA	SMA	SMA	1
RA-M*-E5	Schwachaktive Lanzen zementiert in 200-l-Fass	12	SMA	SMA	SMA	1
RA-M-E6	Bolzen zementiert in 200-l-Fass	13	SMA	SMA	SMA	1

Tab. A6-1: (Fortsetzung)

MIRAM-Abfallsorte (1)	MIRAM-Bezeichnung (1)	Anzahl Gebinde (2)	Kat. KEV (3)	Referenz-zuteilung (4)	Alternative Zuteilung (4)	Abfall-gruppe (5)
RA-M-E7	Vergiftungsbleche zementiert in 1 m^3-BC	48	SMA	SMA	SMA	1
RA-M*-F1	Filterelemente UWS zementiert in 200-l-Fass	15	SMA	SMA	SMA	1
SA-B*-B1	Aktivierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	105	SMA	SMA	SMA	1
SA-B*-B10	Kontaminierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	92	SMA	SMA	SMA	1
SA-B*-B2	Aktivierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	115	SMA	SMA	SMA	1
SA-B*-S1	Aktivierter Stahl zementiert in 26 m^3-LC1	11	SMA	SMA	SMA	1
SA-B*-S10	Kontaminiertes Material zementiert in 26 m^3-LC1	134	SMA	SMA	SMA	1
SA-B*-S2	Aktiviertes Material zementiert in 14.3 m^3-LC2	70	SMA	SMA	SMA	1
SA-B*-S20	Kontaminierter Stahl zementiert in 14.3 m^3-LC2	37	SMA	SMA	SMA	1
SA-B*-SM	Aktivierter Stahl in Mosaik-II-Behältern zementiert in 26 m^3-LC1	105	SMA	SMA	LMA	1
SA-B*-VS	Sekundärabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	32	SMA	SMA	SMA	2
SA-G*-B1	Aktivierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	18	SMA	SMA	SMA	1
SA-G*-B2	Aktivierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	135	SMA	SMA	SMA	1
SA-G*-B20	Kontaminierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	49	SMA	SMA	SMA	1
SA-G*-S20	Kontaminierter Stahl zementiert in 14.3 m^3-LC2	115	SMA	SMA	SMA	1
SA-G*-S2H	Aktivierter Stahl hoher Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	21	SMA	SMA	SMA	1
SA-G*-S2N	Aktivierter Stahl niedriger Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	25	SMA	SMA	SMA	1
SA-G*-SM	Aktivierter Stahl in Mosaik-II-Behältern zementiert in 26 m^3-LC1	56	SMA	SMA	LMA	1
SA-G*-VS	Sekundärabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	27	SMA	SMA	SMA	2
SA-L*-B1	Aktivierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	53	SMA	SMA	SMA	1
SA-L*-B2	Aktivierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	108	SMA	SMA	SMA	1
SA-L*-B20	Kontaminierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	68	SMA	SMA	SMA	1
SA-L*-S20	Kontaminierter Stahl zementiert in 14.3 m^3-LC2	357	SMA	SMA	SMA	1
SA-L*-S2H	Aktivierter Stahl hoher Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	24	SMA	SMA	SMA	1
SA-L*-S2N	Aktivierter Stahl niedriger Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	153	SMA	SMA	SMA	1
SA-L*-SM	Aktivierter Stahl in Mosaik-II-Behältern zementiert in 26 m^3-LC1	88	SMA	SMA	LMA	1
SA-L*-VS	Sekundärabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	61	SMA	SMA	SMA	2

Tab. A6-1: (Fortsetzung)

MIRAM-Abfallsorte (1)	MIRAM-Bezeichnung (1)	Anzahl Gebinde (2)	Kat. KEV (3)	Referenz-zuteilung (4)	Alternative Zuteilung (4)	Abfall-gruppe (5)
SA-M*-B1	Aktivierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	22	SMA	SMA	SMA	1
SA-M*-B20	Kontaminierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	142	SMA	SMA	SMA	1
SA-M*-S20	Kontaminierter Stahl zementiert in 14.3 m^3-LC2	89	SMA	SMA	SMA	1
SA-M*-S2H	Aktivierter Stahl hoher Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	19	SMA	SMA	SMA	1
SA-M*-S2N	Aktivierter Stahl niedriger Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	68	SMA	SMA	SMA	1
SA-M*-SM	Aktivierter Stahl in Mosaik-II-Behältern zementiert in 26 m^3-LC1	30	SMA	SMA	LMA	1
SA-M*-VS	Sekundärabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	21	SMA	SMA	SMA	2
SA-P-DI1	DIORIT-Abfälle zementiert in 200-l-Fass	11	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-DI2	DIORIT-Peraluman zementiert in 4.5 m^3-KC	55	SMA	SMA	LMA	1
SA-P-DI3	DIORIT-Metall/Beton zementiert in 4.5 m^3-KC	63	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-HL1	HL-Stilllegungsabfälle zementiert in 200-l-Fass	103	ATA	LMA	LMA	1
SA-P-HL2_ATA	HL-Stilllegungsabfälle (Baustoffe und Metalle) zementiert in 200-l-Fass	28	ATA	LMA	LMA	2
SA-P-HL2_SMA	HL-Stilllegungsabfälle (Baustoffe und Metalle) zementiert in 200-l-Fass	469	SMA	SMA	SMA	2
SA-P-PR1	PROTEUS Stilllegungsabfall zementiert in 4.5 m^3-KC	16	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-PV1	PVA-Stilllegungsabfall/Keramikkacheln zementiert in 4.5 m^3-KC	14	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-SA1	SAPHIR Stilllegungsabfall zementiert in 4.5 m^3-KC	19	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W1	PSI-West Kupfer zementiert in 4.5 m^3-KC	182	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W10	PSI-West Kupfer zementiert in 16 m^3-GC	39	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W2	PSI-West Edelstahl zementiert in 4.5 m^3-KC	65	SMA	SMA	LMA	1
SA-P-W20	PSI-West Edelstahl zementiert in 16 m^3-GC	13	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W3	PSI-West Aluminium zementiert in 4.5 m^3-KC	177	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W30	PSI-West Aluminium zementiert in 16 m^3-GC	35	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W4	PSI-West Stahl zementiert in 4.5 m^3-KC	2'487	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W40	PSI-West Stahl zementiert in 16 m^3-GC	471	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W5	PSI-West Stahl/Mörtel zementiert in 4.5 m^3-KC	3'339	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W50	PSI-West Stahl/Mörtel zementiert in 16 m^3-GC	601	SMA	SMA	SMA	1

Tab. A6-1: (Fortsetzung)

MIRAM-Abfallsorte (1)	MIRAM-Bezeichnung (1)	Anzahl Gebinde (2)	Kat. KEV (3)	Referenz-zuteilung (4)	Alternative Zuteilung (4)	Abfall-gruppe (5)
SA-P-WG	PSI-West Strahlfänger zementiert in 16 m^3-GC	1	SMA	SMA	SMA	1
SA-Z*-1	Stilllegungsabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	56	SMA	SMA	SMA	1
SA-Z-LU1	Lucens-Abfälle zementiert in 26 m^3-LC1	7	SMA	SMA	LMA	1
SA-Z-LU2	Lucens-Abfälle zementiert in 14.3 m^3-LC2	6	SMA	SMA	SMA	1
SA-Z-LU3	Lucens-Abfälle zementiert in 1 m^3-BC	13	SMA	SMA	SMA	1
WA-F-1	Verglaste Abfälle AREVA in 180-l-Kokille in Behälter	220	HAA	HAA	HAA	-
WA-F-2	Abfälle AREVA bituminiert in 215-l-Fass	390	ATA	LMA	LMA	2
WA-F-4A	Hülsen und Endstücke AREVA in 180-l-Kokille	634	ATA	LMA	LMA	1
WA-U-1	Verglaste Abfälle Sellafield Ltd in 180-l-Kokille in Behälter	103	HAA	HAA	HAA	-

(1) Bezeichnung gemäss MIRAM (Nagra 2008e, Nagra 2009a). Das Symbol '*' nach den Buchstaben B, G, L, M, Z bedeutet, dass es sich hier nicht um effektiv erwartete Abfallmengen der bestehenden Werke/ZWILAG handelt, sondern um eine Abschätzung des umhüllenden Inventars (60-jähriger Betrieb der bestehenden Werke, zusätzlicher Betrieb von drei neuen KKW) mittels einer Skalierung für die Abfallsorten der bestehenden Werke. Die mit '**' markierten Abfallsorten (Verfestigung mit Polystyrol bzw. Bitumen) werden nur für den 60-jährigen Betrieb von KKB und KKG weitergeführt; für die neuen KKW wird von Zementierung ausgegangen und die entsprechende Skalierung der Abfallsorte BA-L-H1 zugeschlagen.

(2) Anzahl Einzelgebinde für umhüllendes Inventar. BE: Anzahl BE-Behälter; verglaste HAA: Anzahl HAA-Behälter (mit 2 Kokillen pro Behälter).

(3) Abfallkategorie gemäss Definition KEV (2004); siehe MIRAM (Nagra 2008e).

(4) Abfallzuteilung (Nagra 2008d).

(5) Abfallgruppeneinteilung bzgl. des Gehalts an Komplexbildnern.

Tab. A6-2a: Zuteilung der SMA-Abfallsorten auf zwei Lagerebenen: Abfallsorten in Lagerkammern in der unteren Lagerebene (SMA-u) ausgehend von Tab. A6-1.

Für Erläuterungen zu den Abfallsorten siehe Tab. A6-1.

Nr.	**Abfallsorte**	**Beschrieb**	**Vol.** [m^3]
1	BA-B**-H1	Harze in Polystyrol in 200-l-Fass	3'220
2	BA-L*-H1	Harze und Konzentrate zementiert in 200-l-Fass	32'698
3	BA-M*-H1	Harze zementiert in 200-l-Fass	11'731
4	BA-M*-NP1	Nachbetriebsphase-Abfälle in 200-l-Fass	980
5	BA-P-AO3_SMA	BAG-Zylinder (ohne Am-241) zementiert in 4.5 m^3-KC	231
6	BA-P-MI1	Mischabfälle BAG H-3/C-14/Ra-226 zementiert in 200-l-Fass	1'544
7	RA-L*-E2	Reaktoreinbauten in Mosaik-II-Behältern	540
8	RA-L-E3	Brennelementkästen zementiert in 200-l-Fass	89
9	RA-M*-E2	Reaktoreinbauten in Mosaik-II-Behältern	342
10	RA-M*-E3	Brennelementkästen zementiert in 200-l-Fass	429
11	RA-M-E7	Vergiftungsbleche zementiert in 1 m^3-BC	178
12	SA-B*-S2	Aktiviertes Material zementiert in 14.3 m^3-LC2	1'002
13	SA-B*-SM	Aktivierter Stahl in Mosaik-II-Behältern zementiert in 26 m^3-LC1	2'732
14	SA-G*-S20	Kontaminierter Stahl zementiert in 14.3 m^3-LC2	1'639
15	SA-G*-SM	Aktivierter Stahl in Mosaik-II-Behältern zementiert in 26 m^3-LC1	1'449
16	SA-L*-S2H	Aktivierter Stahl hoher Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	342
17	SA-L*-SM	Aktivierter Stahl in Mosaik-II-Behältern zementiert in 26 m^3-LC1	2'277
18	SA-M*-S2H	Aktivierter Stahl hoher Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	273
19	SA-M*-SM	Aktivierter Stahl in Mosaik-II-Behältern zementiert in 26 m^3-LC1	787
20	SA-P-DI1	DIORIT-Abfälle zementiert in 200-l-Fass	8
21	SA-P-DI2	DIORIT-Peraluman zementiert in 4.5 m^3-KC	248
22	SA-P-DI3	DIORIT-Metall/Beton zementiert in 4.5 m^3-KC	284
23	SA-P-PR1	PROTEUS Stilllegungsabfall zementiert in 4.5 m^3-KC	72
24	SA-P-SA1	SAPHIR Stilllegungsabfall zementiert in 4.5 m^3-KC	86
25	SA-P-W1	PSI-West Kupfer zementiert in 4.5 m^3-KC	817
26	SA-P-W10	PSI-West Kupfer zementiert in 16 m^3-GC	623
27	SA-P-W2	PSI-West Edelstahl zementiert in 4.5 m^3-KC	292
28	SA-P-W20	PSI-West Edelstahl zementiert in 16 m^3-GC	208
29	SA-P-W4	PSI-West Stahl zementiert in 4.5 m^3-KC	11'190
30	SA-P-W40	PSI-West Stahl zementiert in 16 m^3-GC	7'542
31	SA-P-W5	PSI-West Stahl/Mörtel zementiert in 4.5 m^3-KC	15'024
32	SA-Z-LU1	Lucens-Abfälle zementiert in 26 m^3-LC1	182
	Summe SMA-u	**Summe 1 bis 32**	**99'060**

Tab. A6-2b: Zuteilung der SMA-Abfallsorten auf zwei Lagerebenen: Abfallsorten in Lagerkammern in der oberen Lagerebene (SMA-o), ausgehend von Tab. A6-1.

Für Erläuterungen zu den Abfallsorten siehe Tab. A6-1

Nr.	**Abfallsorte**	**Beschrieb**	**Vol.** [m^3]
1	BA-B*-F1	Filterkerzen zementiert in 200-l-Fass	438
2	BA-B-F2	Filterkerzen zementiert in 1 m^3-BC	30
3	BA-B-K1	Konzentrate zementiert in 200-l-Fass	168
4	BA-B-K2	Konzentrate zementiert in 1 m^3-BC	631
5	BA-B-M1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	990
6	BA-B*-NP1	Nachbetriebsphase-Abfälle in 200-l-Fass	536
7	BA-B*-S1	Schlämme zementiert in 200-l-Fass	1'168
8	BA-B*-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	1'679
9	BA-B-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	148
10	BA-G**-H1	Harze bituminiert in 200-l-Fass	535
11	BA-G-H2	Harze bituminiert in 1 m^3-BC	45
12	BA-G-H3	Harze zementiert in 200-l-Fass	5
13	BA-G**-K1	Konzentrate bituminiert in 200-l-Fass	1'401
14	BA-G-K2	Konzentrate bituminiert in 1 m^3-BC	45
15	BA-G-M1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	248
16	BA-G*-NP1	Nachbetriebsphase-Abfälle in 200-l-Fass	660
17	BA-G*-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	760
18	BA-G-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	100
19	BA-L-M1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	926
20	BA-L*-NP1	Nachbetriebsphase-Abfälle in 200-l-Fass	1'483
21	BA-L-S1	Schlämme zementiert in 200-l-Fass	7
22	BA-L*-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	2'133
23	BA-L-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	171
24	BA-M-F1_SMA	Filterkerzen zementiert in 200-l-Fass	8
25	BA-M*-F2	Filtermaterial zementiert in 200-l-Fass	18
26	BA-M-M1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	529
27	BA-M-S1	Schlämme zementiert in 200-l-Fass	32
28	BA-M*-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	1'311
29	BA-M-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	139
30	BA-P-AO1_SMA	BAG-Zylinder H-3/C-14/Ra-226 (ohne Am-241) zementiert in 200-l-Fass	17

Tab. A6-2b: (Fortsetzung)

Nr.	**Abfallsorte**	**Beschrieb**	**Vol.** [m^3]
31	BA-P-AO2	BAG-Zylinder H-3/C-14/Ra-226 (ohne Am-241) zementiert in 1m^3-BC	26
32	BA-P-CE1	Isolde-Targets CERN zementiert in 200-l-Fass	19
33	BA-P-HL3	Pu-/β-/γ-haltige Abfälle zementiert in 1m^3-BC	27
34	BA-P-HL5_SMA	Pu-/β-/γ-haltige Abfälle zementiert in 200-l-Fass	2'926
35	BA-P-HL6_SMA	Pu-kont. Sperrgut zementiert in 200-l-Fass	392
36	BA-P-HL7	Pu-kont. Bauschutt zementiert in 200-l-Fass	275
37	BA-P-HL8	Laborausrüstungen zementiert in 200-l-Fass	12
38	BA-P-M1	Mischabfälle BAG verpresst/zementiert in 200-l-Fass	3'592
39	BA-P-M2_SMA	Mischabfälle BAG zementiert in 200-l-Fass	1'347
40	BA-P-MI2_SMA	Mischabfälle BAG zementiert in 1m^3-BC	30
41	BA-P-O1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	359
42	BA-P-O2	Militär-Abfälle zementiert in 4.5 m^3-KC	27
43	BA-P-O3_SMA	Filterabfälle zementiert in 200-l-Fass	37
44	BA-P-S1	Schlämme zementiert in 200-l-Fass	1'283
45	BA-P-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	771
46	BA-P-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	179
47	BA-P-W1	PSI-West Beschleunigerabfälle zementiert in 4.5 m^3-KC	3'053
48	BA-Z*-1	Betriebsabfälle zementiert in 200-l-Fass	390
49	RA-B*-E1	Reaktoreinbauten zementiert in 200-l-Fass	34
50	RA-G*-E1	Reaktoreinbauten zementiert in 200-l-Fass	34
51	RA-G-E3	Reaktoreinbauten zementiert in 1m^3-BC	11
52	RA-L*-E1	Reaktoreinbauten zementiert in 200-l-Fass	314
53	RA-L*-F1	Filterelemente UWS zementiert in 200-l-Fass	9
54	RA-M*-E1	Reaktoreinbauten zementiert in 200-l-Fass	96
55	RA-M*-E4	Kleinteile zementiert in 200-l-Fass	9
56	RA-M*-E5	Schwachaktive Lanzen zementiert in 200-l-Fass	9
57	RA-M-E6	Bolzen zementiert in 200-l-Fass	9
58	RA-M*-F1	Filterelemente UWS zementiert in 200-l-Fass	10
59	SA-B*-B1	Aktivierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	2'732
60	SA-B*-B10	Kontaminierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	2'401
61	SA-B*-B2	Aktivierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	1'639
62	SA-B*-S1	Aktivierter Stahl zementiert in 26 m^3-LC1	290

Tab. A6-2b: (Fortsetzung)

Nr.	Abfallsorte	Beschrieb	Vol. [m^3]
63	SA-B*-S10	Kontaminiertes Material zementiert in 26 m^3-LC1	3'477
64	SA-B*-S20	Kontaminierter Stahl zementiert in 14.3 m^3-LC2	524
65	SA-B*-VS	Sekundärabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	828
66	SA-G*-B1	Aktivierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	455
67	SA-G*-B2	Aktivierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	1'935
68	SA-G*-B20	Kontaminierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	706
69	SA-G*-S2H	Aktivierter Stahl hoher Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	296
70	SA-G*-S2N	Aktivierter Stahl niedriger Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	364
71	SA-G*-VS	Sekundärabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	704
72	SA-L*-B1	Aktivierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	1'366
73	SA-L*-B2	Aktivierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	1'548
74	SA-L*-B20	Kontaminierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	979
75	SA-L*-S20	Kontaminierter Stahl zementiert in 14.3 m^3-LC2	5'100
76	SA-L*-S2N	Aktivierter Stahl niedriger Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	2'186
77	SA-L*-VS	Sekundärabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	1'573
78	SA-M*-B1	Aktivierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	580
79	SA-M*-B20	Kontaminierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	2'026
80	SA-M*-S20	Kontaminierter Stahl zementiert in 14.3 m^3-LC2	1'275
81	SA-M*-S2N	Aktivierter Stahl niedriger Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	979
82	SA-M*-VS	Sekundärabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	538
83	SA-P-HL2_SMA	HL-Stilllegungsabfälle (Baustoffe und Metalle) zementiert in 200-l-Fass	338
84	SA-P-PV1	PVA-Stilllegungsabfall/Keramikkacheln zementiert in 4.5 m^3-KC	63
85	SA-P-W3	PSI-West Aluminium zementiert in 4.5 m^3-KC	798
86	SA-P-W30	PSI-West Aluminium zementiert in 16 m^3-GC	554
87	SA-P-W50	PSI-West Stahl/Mörtel zementiert in 16 m^3-GC	9'618
88	SA-P-WG	PSI-West Strahlfänger zementiert in 16 m^3-GC	16
89	SA-Z*-1	Stilllegungsabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	1'462
90	SA-Z-LU2	Lucens-Abfälle zementiert in 14.3 m^3-LC2	86
91	SA-Z-LU3	Lucens-Abfälle zementiert in 1 m^3-BC	48
	Summe SMA-o	**Summe 1 bis 91**	**79'126**

Tab. A6-3: Fraktionale Auflösungsraten für UO_2/MOX (Brennstoff)-Matrizen und für die Brennelementhüllrohre (Referenzwerte).

Die zeitabhängigen Auflösungsraten für die einzelnen Brennstofftypen (UO_2 und MOX) entsprechen jenen im Entsorgungsnachweis (Tabelle A2.2.2 in Nagra 2002c). Für den BE-D-2-Behälter, welcher sowohl PWR-UO_2-BE als auch PWR-MOX-BE enthält, werden die Brennstoff-Auflösungsraten näherungsweise als – über die initialen Schwermetallanteile der beiden Brennstofftypen im BE-D-2-Behälter – gewichtetes Mittel für das umhüllende Inventar neu berechnet. Für die Brennelementhüllrohre wird ein konstanter Wert von 3×10^{-5} a^{-1} angenommen (Tabelle A2.2.3 in Nagra 2002c).

Zeit [a]	**Auflösungsrate** [a^{-1}]	
	Werte für BE-Behälter Typ BE-D-2; Abbrand: 48 GWd/t_{HM}	**Werte für BE-Behälter Typen BE-S-1 (SWR) und BE-D-3 (DWR);** Abbrand: 48 GWd/t_{HM}
1.0×10^{3}	4.4×10^{-6}	2.4×10^{-6}
2.0×10^{3}	2.3×10^{-6}	1.3×10^{-6}
3.0×10^{3}	1.6×10^{-6}	8.9×10^{-7}
5.1×10^{3}	1.2×10^{-6}	6.7×10^{-7}
7.6×10^{3}	1.0×10^{-6}	5.9×10^{-7}
1.0×10^{4}	9.2×10^{-7}	5.3×10^{-7}
1.5×10^{4}	6.9×10^{-7}	4.2×10^{-7}
2.0×10^{4}	5.3×10^{-7}	3.3×10^{-7}
3.0×10^{4}	3.2×10^{-7}	2.1×10^{-7}
5.1×10^{4}	1.5×10^{-7}	1.1×10^{-7}
6.4×10^{4}	1.1×10^{-7}	7.6×10^{-8}
8.1×10^{4}	8.2×10^{-8}	5.6×10^{-8}
1.1×10^{5}	6.1×10^{-8}	4.0×10^{-8}
1.5×10^{5}	4.6×10^{-8}	3.0×10^{-8}
2.1×10^{5}	4.2×10^{-8}	2.7×10^{-8}
3.1×10^{5}	3.8×10^{-8}	2.5×10^{-8}
5.2×10^{5}	3.3×10^{-8}	2.2×10^{-8}
8.2×10^{5}	2.7×10^{-8}	1.8×10^{-8}
1.0×10^{6}	2.4×10^{-8}	1.6×10^{-8}
1.6×10^{6}	1.9×10^{-8}	1.3×10^{-8}
2.1×10^{6}	1.7×10^{-8}	1.2×10^{-8}
3.1×10^{6}	1.4×10^{-8}	1.1×10^{-8}
4.9×10^{6}	1.2×10^{-8}	1.0×10^{-8}
7.0×10^{6}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}
$> 1.0 \times 10^{7}$	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}

A6.2 Nahfelddaten

A6.2.1 SMA und LMA

Tab. A6-4: Löslichkeitslimiten für das Zementnahfeld LMA

Werte (in mol/L) aus Nagra (2008i).

Element	LMA-1			LMA-2		
	Referenzwert	**Unterer Eckwert (optimistisch)**	**Oberer Eckwert (pessimistisch)**	**Referenzwert**	**Unterer Eckwert (optimistisch)**	**Oberer Eckwert (pessimistisch)**
Be	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
C_{anorg} [122]	2×10^{-4}	1×10^{-4}	4×10^{-4}	2×10^{-4}	1×10^{-4}	4×10^{-4}
C_{org}	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Cl	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
K	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Co [122]	7×10^{-7}	7×10^{-7}	7×10^{-6}	hoch	hoch	hoch
Ni [122]	3×10^{-7}	1×10^{-8}	8×10^{-6}	hoch	hoch	hoch
Se	1×10^{-5}	7×10^{-6}	hoch	hoch	hoch	hoch
Sr	3×10^{-3}	2×10^{-3}	6×10^{-3}	3×10^{-3}	2×10^{-3}	6×10^{-3}
Zr	6×10^{-6}	6×10^{-7}	6×10^{-4}	6×10^{-6}	6×10^{-7}	6×10^{-4}
Nb	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Mo	3×10^{-5}	3×10^{-6}	2×10^{-3}	3×10^{-5}	3×10^{-6}	2×10^{-3}
Tc	hoch	3×10^{-7}	hoch	hoch	hoch	hoch
Ag	3×10^{-6}	1×10^{-20}	3×10^{-6}	hoch	hoch	hoch
Sn	1×10^{-7}	1×10^{-7}	8×10^{-6}	1×10^{-7}	1×10^{-7}	8×10^{-6}
I	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Cs	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Sm	2×10^{-6}	2×10^{-7}	2×10^{-5}	2×10^{-6}	2×10^{-7}	2×10^{-5}
Eu	2×10^{-6}	2×10^{-7}	2×10^{-5}	2×10^{-6}	2×10^{-7}	2×10^{-5}
Pb	3×10^{-3}	3×10^{-3}	hoch	3×10^{-3}	3×10^{-3}	hoch
Po	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Ra	1×10^{-5}	1×10^{-6}	2×10^{-2}	1×10^{-5}	1×10^{-6}	2×10^{-2}
Ac	2×10^{-6}	2×10^{-7}	2×10^{-5}	2×10^{-6}	2×10^{-7}	2×10^{-5}
Th	3×10^{-9}	8×10^{-10}	1×10^{-8}	3×10^{-9}	8×10^{-10}	1×10^{-8}
Pa	1×10^{-8}	1×10^{-8}	hoch	1×10^{-8}	1×10^{-8}	hoch
U	5×10^{-7}	1×10^{-8}	5×10^{-5}	5×10^{-7}	1×10^{-8}	5×10^{-5}
Np	5×10^{-9}	3×10^{-9}	1×10^{-8}	hoch	hoch	hoch
Pu	4×10^{-11}	1×10^{-11}	1×10^{-10}	6×10^{-10}	2×10^{-11}	6×10^{-10}
Am	2×10^{-9}	3×10^{-10}	1×10^{-8}	2×10^{-9}	3×10^{-10}	1×10^{-8}
Cm	2×10^{-9}	3×10^{-10}	1×10^{-8}	2×10^{-9}	3×10^{-10}	1×10^{-8}

[122] Bei Anwendung dieser Löslichkeitslimiten werden die entsprechenden Sorptionswerte auf Null gesetzt (vgl. Fussnote in Anhang A6, Tab. A6-5).

Tab. A6-5: Sorptionskoeffizienten für das Zementnahfeld SMA und LMA.

Die Werte in Klammern gelten für die Abfallgruppe LMA-2 (oxidierende Bedingungen aufgrund des Oxidationsmittels Nitrat in der Abfallsorte WA-F-2). Für SMA-2 gelten die Werte ohne Klammern. Falls der K_d-Referenzwert weniger als 0.001 m^3/kg beträgt, wird für den ENSI-Fall d gemäss Vorgabe in ENSI (2010a) ein K_d-Wert von 0 m^3/kg verwendet. Aus Nagra (2008i).

Element	**K_d [m^3/kg] Abfallgruppe 1**			**K_d [m^3/kg] Abfallgruppe 2**		
	Referenzwert	**Unterer Eckwert (pessimistisch)**	**Oberer Eckwert (optimistisch)**	**Referenzwert**	**Unterer Eckwert (pessimistisch)**	**Oberer Eckwert (optimistisch)**
Be	0	0	0	0	0	0
C_{anorg} [123]	0.4	0.03	4	0.4	0.03	4
C_{org}	0	0	0	0	0	0
Cl	0.005	0	0.007	0.005	0	0.007
K	0	0	0	0	0	0
Co [123]	0.01	1×10^{-4}	0.09	0	0	0
Ni [123]	1	0.03	2	0	0	0
Se	0.03	0	0.04	0.03 (0.001)	0	0.04 (0.001)
Sr	0.001	1×10^{-4}	0.001	0.001	1×10^{-4}	0.001
Zr	10	0.1	30	1	0.01	3
Nb	1	0.1	1	1	0.1	1
Mo	0	0	0	0	0	0
Tc	0.001	0	1	0.001	0	0.1
Ag	0	0	0	0	0	0
Sn	10	1	30	1	0.1	3
I	0.001	0	0.001	0.001	0	0.001
Cs	5×10^{-4}	5×10^{-5}	7×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-5}	7×10^{-4}
Sm	20	1	300	2	0.1	30
Eu	20	1	300	2	0.1	30
Pb	0.5	0.005	0.7	0.05	5×10^{-4}	0.07
Po	0	0	0	0	0	0
Ra	0.05	1×10^{-4}	0.07	0.05	1×10^{-4}	0.07
Ac	20	1	300	2	0.1	30
Th	5	0.5	300	0.5	0.05	30
Pa	0.1	0.01	0.1	0.1	0.01	0.1
U	2	0.1	2	2	0.1	2
Np	5	0.1	300	0.5 (0.1)	0.01	30 (0.1)
Pu	5	0.1	300	0.5 (0.1)	0.01	30 (0.1)
Am	20	1	300	2	0.1	30
Cm	20	1	300	2	0.1	30

[123] Da die Sorptionskoeffizienten für die Elemente C_{anorg}, Co und Ni aus "shared solubilities" ermittelt wurden, werden für das LMA-Nahfeld, für welches Löslichkeitslimiten unterstellt werden, diese Sorptionskoeffizienten auf Null gesetzt (vgl. Fussnote in Anhang A6, Tab. A6-4).

A6.2.2 HAA

Tab. A6-6: Löslichkeitslimiten für das BE/HAA-Nahfeld

Werte (in mol/L) aus Nagra (2008i).

Element	Referenzwert	Unterer Eckwert (optimistisch)	Oberer Eckwert (pessimistisch)
Be	1×10^{-6}	1×10^{-6}	hoch
C_{anorg}	3×10^{-3}	6×10^{-4}	7×10^{-3}
C_{org}	hoch	hoch	hoch
Cl	hoch	hoch	hoch
Ca	1×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^{-2}
Ni	3×10^{-5}	1×10^{-5}	8×10^{-5}
Se	5×10^{-9}	2×10^{-11}	1×10^{-5}
Sr	1×10^{-4}	3×10^{-6}	1×10^{-4}
Zr	2×10^{-9}	3×10^{-11}	2×10^{-8}
Nb	3×10^{-5}	1×10^{-8}	1×10^{-4}
Mo	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-5}
Tc	4×10^{-9}	1×10^{-9}	1×10^{-8}
Pd	5×10^{-8}	1×10^{-10}	2×10^{-7}
Ag	3×10^{-6}	1×10^{-10}	3×10^{-6}
Sn	1×10^{-8}	5×10^{-9}	1×10^{-5}
I	hoch	hoch	hoch
Cs	hoch	hoch	hoch
Sm	5×10^{-7}	3×10^{-7}	5×10^{-6}
Ho	5×10^{-7}	3×10^{-7}	5×10^{-6}
Pb	2×10^{-6}	2×10^{-8}	8×10^{-5}
Po	hoch	hoch	hoch
Ra	5×10^{-8}	4×10^{-12}	5×10^{-8}
Ac	1×10^{-6}	5×10^{-8}	3×10^{-5}
Th	7×10^{-7}	2×10^{-7}	3×10^{-6}
Pa	1×10^{-5}	1×10^{-8}	1×10^{-5}
U	3×10^{-9}	3×10^{-10}	5×10^{-7}
Np	5×10^{-9}	3×10^{-9}	1×10^{-8}
Pu	5×10^{-8}	3×10^{-9}	1×10^{-6}
Am	1×10^{-6}	5×10^{-8}	3×10^{-5}
Cm	1×10^{-6}	5×10^{-8}	3×10^{-5}

Tab. A6-7: Sorptions- und Diffusionskoeffizienten, sowie zugängliche Porositäten für das BE/HAA-Nahfeld

Falls der K_d-Referenzwert weniger als 0.001 m^3/kg beträgt, wird für den ENSI-Fall d gemäss Vorgabe in ENSI (2010a) ein K_d-Wert von 0 m^3/kg verwendet. Aus Nagra (2008i).

Element	K_d [m^3 kg^{-1}]			D_e [m^2 s^{-1}]	ε [-]	Bemerkungen
	Referenzwert	Unterer Eckwert (pessimistisch)	Oberer Eckwert (optimistisch)			
Be	0.2	0.009	5	2×10^{-10}	0.36	
C_{anorg}	6×10^{-5}	2×10^{-5}	3×10^{-4}	3×10^{-12}	0.05	Anion
C_{org}	0	0	0	2×10^{-10}	0.36	
Cl	0	0	0	3×10^{-12}	0.05	Anion
Ca	0.003	5×10^{-4}	0.02	2×10^{-10}	0.36	
Ni	0.2	0.009	5	2×10^{-10}	0.36	
Se	0	0	0	3×10^{-12}	0.05	Anion
Sr	0.003	5×10^{-4}	0.02	2×10^{-10}	0.36	
Zr	10	1	4'000	2×10^{-10}	0.36	
Nb	1	0.1	900	2×10^{-10}	0.36	
Mo	0	0	0	3×10^{-12}	0.05	Anion
Tc	0.2	0.02	600	2×10^{-10}	0.36	
Pd	5	0.2	100	2×10^{-10}	0.36	
Ag	0	0	0	2×10^{-10}	0.36	
Sn	800	0.1	10'000	2×10^{-10}	0.36	
I^{124}	0	0	0	3×10^{-12}	0.05	Anion
Cs	0.03	0.005	0.3	2×10^{-10}	0.36	
Sm	4	0.1	100	2×10^{-10}	0.36	
Ho	4	0.1	100	2×10^{-10}	0.36	
Pb	7	0.5	100	2×10^{-10}	0.36	
Po	0.06	0	0.5	3×10^{-12}	0.05	Anion
Ra	0.002	3×10^{-4}	0.01	2×10^{-10}	0.36	
Ac	4	0.1	300	2×10^{-10}	0.36	
Th	60	5	200	2×10^{-10}	0.36	
Pa	5	0.05	100	2×10^{-10}	0.36	
U	40	0.2	400	2×10^{-10}	0.36	
Np	60	0.5	600	2×10^{-10}	0.36	
Pu	4	0.1	300	2×10^{-10}	0.36	
Am	4	0.1	300	2×10^{-10}	0.36	
Cm	4	0.1	300	2×10^{-10}	0.36	

[124] Aufgrund eines ENSI-Kommentars in ENSI (2010b) und in Abweichung zu Nagra (2008i) werden Werte für Iod auf Null gesetzt.

A6.3 Geosphärendaten

Tab. A6-8: Tongehalte und Kationenaustauschkapazitäten (CEC) der Wirtgesteine

Aus Nagra (2010a). Diese Werte werden für die Berechnung der Sorptionskoeffizienten für die Testrechnungen verwendet.

Legende: OPA = Opalinuston, BD = 'Brauner Dogger', SKA = Sandkalkabfolge, EFF = Effinger Schichten, KBA = Kalkbankabfolge, MGL = Mergel-Formationen des Helvetikums.

Wirtgestein	**Tongehalt**				**Referenz-CEC**
	Referenzwert [Gew.-%]	**Unterer Eckwert** [Gew.-%]	**Oberer Eckwert** [Gew.-%]	**Ungewiss-heitsfaktor** [-]	[meq/kg]
OPA	60	40	80	1.5	106
BD	40	20	60	2.0	72
BD-SKA	10	5	15	2.0	18
EFF	30	25	50	1.5	79
EFF-KBA	10	5	25	2.5	26
MGL	30	5	60	nach unten 6.0 / nach oben 2.0	36

Tab. A6-9: Sorptionskoeffizienten der Wirtgesteine

Die Werte (in m^3/kg) sind nach einer signifikanten Stelle trunkiert. Falls der K_d-Referenzwert weniger als 0.001 m^3/kg beträgt, wird für den ENSI-Fall d gemäss Vorgabe in ENSI (2010a) ein K_d-Wert von 0 m^3/kg verwendet. Legende: UE = Unterer Eckwert; OE = Oberer Eckwert; OPA = Opalinuston; BD = 'Brauner Dogger'; SKA = Sandkalkabfolge; EFF = Effinger Schichten; KBA = Kalkbankabfolge; MGL = Mergel-Formationen des Helvetikums. Aus Nagra (2010a). Für den Rechenfall zum Einfluss einer pH-Fahne auf die Sorption wird der in SGT Etappe 1 abgeleitete, pessimistische Sorptionsdatensatz 'Calcit' verwendet (vgl. Tab. A3.3-2 in Nagra 2008d).

Element	**OPA**			**BD**			**BD-SKA**		
	Referenz	**UE**	**OE**	**Referenz**	**UE**	**OE**	**Referenz**	**UE**	**OE**
Be(II)	0.9	0.02	30	0.6	0.01	30	0.1	0.003	8
C_anorg	0.001	0.0001	0.02	0.001	0.00008	0.03	0.001	0.00008	0.03
C_org	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl(-I)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K(I)	0.002	0.0002	0.01	0.001	0.0001	0.01	0.0003	0.00002	0.004
Ca(II)	0.001	0.0001	0.009	0.0007	0.00006	0.008	0.0001	0.00001	0.002
Co(II)	0.4	0.008	20	0.3	0.004	20	0.08	0.001	6
Ni(II)	0.9	0.02	30	0.6	0.01	30	0.1	0.003	7
Se(-II)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sr(II)	0.001	0.0001	0.009	0.0007	0.00006	0.008	0.0001	0.00001	0.002
Zr(IV)	1	0.06	10	0.6	0.03	10	0.1	0.008	3
Nb(V)	1	0.06	10	0.6	0.03	10	0.1	0.008	3
Mo(VI)	0.01	0	0.3	0.01	0	0.2	0.002	0	0.07
Tc(IV)	0.04	0.002	0.6	0.02	0.001	0.5	0.006	0.0003	0.1
Pd(II)	5	0.1	100	3	0.08	100	0.8	0.02	30
Ag(I)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sn(IV)	100	0.06	1'000	70	0.03	1'000	10	0.008	300
I(-I)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cs(I)	0.5	0.006	4	0.3	0.003	4	0.09	0.0008	1
Sm(III)	10	0.6	100	6	0.3	100	1	0.08	30
Eu(III)	10	0.6	100	6	0.3	100	1	0.08	30
Ho(III)	10	0.6	100	6	0.3	100	1	0.08	30
Pb(II)	2	0.01	400	1	0.007	400	0.4	0.001	100
Po(IV)	0.1	0	1	0.1	0	0.9	0.03	0	0.2
Ra(II)	0.0007	0.00008	0.006	0.0005	0.00004	0.006	0.0001	0.00001	0.001
Ac(III)	10	0.7	300	10	0.4	300	2	0.1	80
Th(IV)	50	10	200	30	5	200	9	1	60
Pa(V)	5	0.03	100	3	0.01	100	0.8	0.004	30
U(IV)	20	0.06	200	10	0.03	200	3	0.008	60
Np(IV)	50	0.3	700	30	0.1	700	9	0.04	100
Pu(III)	10	0.8	300	10	0.4	300	3	0.1	90
Am(III)	10	0.7	300	10	0.4	300	2	0.1	80
Cm(III)	10	0.7	300	10	0.4	300	2	0.1	80

Tab. A6-9: (Fortsetzung)

Element	EFF			EFF-KBA			MGL		
	Referenz	UE	OE	Referenz	UE	OE	Referenz	UE	OE
Be(II)	0.7	0.01	20	0.2	0.003	10	0.3	0.002	10
C_anorg	0.001	0.0001	0.02	0.001	0.00006	0.04	0.001	0.00002	0.03
C_org	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl(-I)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K(I)	0.001	0.0001	0.01	0.0004	0.00003	0.007	0.0006	0.00001	0.008
Ca(II)	0.0008	0.00009	0.007	0.0002	0.00001	0.004	-	-	-
Co(II)	0.3	0.006	20	0.1	0.001	10	0.1	0.0007	10
Ni(II)	0.6	0.01	20	0.2	0.003	10	0.3	0.002	10
Se(-II)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sr(II)	0.0008	0.00009	0.007	0.0002	0.00001	0.004	0.0003	0.00001	0.004
Zr(IV)	0.7	0.04	10	0.2	0.009	6	-	-	-
Nb(V)	0.7	0.04	10	0.2	0.009	6	0.3	0.005	6
Mo(VI)	0.01	0	0.2	0.004	0	0.1	0.005	0	0.1
Tc(IV)	0.02	0.001	0.4	0.009	0.0003	0.2	-	-	-
Pd(II)	3	0.1	100	1	0.02	60	-	-	-
Ag(I)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sn(IV)	80	0.04	1'000	20	0.009	600	30	0.005	700
I(-I)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cs(I)	0.4	0.004	3	0.1	0.0009	2	0.1	0.0005	2
Sm(III)	7	0.4	100	2	0.09	60	-	-	-
Eu(III)	7	0.4	100	2	0.09	60	-	-	-
Ho(III)	7	0.4	100	2	0.09	60	-	-	-
Pb(II)	2	0.01	300	0.6	0.002	100	0.9	0.001	200
Po(IV)	0.1	0	0.8	0.04	0	0.4	0.06	0	0.4
Ra(II)	0.0005	0.00006	0.005	0.0001	0.00001	0.002	0.0002	0.000007	0.003
Ac(III)	10	0.5	200	4	0.1	100	5	0.06	100
Th(IV)	40	8	100	10	1	100	10	0.9	100
Pa(V)	3	0.02	100	1	0.004	60	1	0.002	60
U(IV)	10	0.04	200	5	0.009	100	6	0.005	100
Np(IV)	40	0.2	500	10	0.04	300	10	0.02	300
Pu(III)	10	0.6	200	4	0.1	100	6	0.07	100
Am(III)	10	0.5	200	4	0.1	100	5	0.06	100
Cm(III)	10	0.5	200	4	0.1	100	5	0.06	100

Tab. A6-9: (Fortsetzung)

	'Calcit'		**'Calcit'**		**'Calcit'**
Be(II)	0.0005	Nb(V)	0.005	Pb(II)	0.1
C_anorg	0.001	Mo(VI)	0	Po(IV)	0
C_org	0	Tc(IV)	0.005	Ra(II)	0.00005
Cl(-I)	0	Pd(II)	0.1	Ac(III)	1
K(I)	0	Ag(I)	0	Th(IV)	0.7
Ca(II)	0.00005	Sn(IV)	0.01	Pa(V)	0.04
Co(II)	0.002	I(-I)	0	U(IV)	0.2
Ni(II)	0.0005	Cs(I)	0	Np(IV)	0.1
Se(-II)	0	Sm(III)	1	Pu(III)	1
Sr(II)	0.00005	Eu(III)	1	Am(III)	1
Zr(IV)	0.01	Ho(III)	1	Cm(III)	1

Tab. A6-10: Totale Porositäten der Wirtgesteine mit Ungewissheiten.

Alle Werte in Vol.-%. Legende: OPA = Opalinuston, BD = 'Brauner Dogger', SKA = Sandkalkabfolge, EFF = Effinger Schichten, KBA = Kalkbankabfolge, MGL = Mergel-Formationen des Helvetikums. Aus Nagra (2010a). Für Anionen (vgl. Liste in Tab. A6-7) reduziert sich das zugängliche Porenvolumen um 50%.

Wirtgestein	**Referenzwert**	**Unterer Eckwert**	**Oberer Eckwert**
OPA	12	6	18
BD	10	5	15
BD-SKA	5	2	8
EFF	8	5	12
EFF-KBA	3	2	4
MGL	1.4	0.8	3

Tab. A6-11: Effektive Diffusionskoeffizienten der Wirtgesteine.

Die Werte (in m^2/s) gelten senkrecht zur Schichtung. Parallel zur Schichtung ist für Referenzwert, oberen und unteren Eckwert ein Faktor von fünf zu berücksichtigen ($D_{e\parallel} = 5 \cdot D_{e\perp}$). Für MGL werden isotrope Verhältnisse unterstellt. Legende: UE = Unterer Eckwert; OE = Oberer Eckwert; OPA = Opalinuston; BD = 'Brauner Dogger'; SKA = Sandkalkabfolge; EFF = Effinger Schichten; KBA = Kalkbankabfolge; MGL = Mergel-Formationen des Helvetikums. Aus Nagra (2010a).

Element	**OPA**[125]			**BD**			**BD-SKA**		
	Referenz	**UE**	**OE**	**Referenz**	**UE**	**OE**	**Referenz**	**UE**	**OE**
Be	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
C_anorg	1×10^{-12}	-	3×10^{-12}	2×10^{-12}	3×10^{-13}	1×10^{-11}	7×10^{-13}	1×10^{-13}	5×10^{-12}
C_org	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	3×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	1×10^{-13}	2×10^{-11}
Cl	1×10^{-12}	-	3×10^{-12}	2×10^{-12}	3×10^{-13}	1×10^{-11}	7×10^{-13}	1×10^{-13}	5×10^{-12}
K	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Ca	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Co	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Ni	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Se	1×10^{-12}	-	3×10^{-12}	2×10^{-12}	3×10^{-13}	1×10^{-11}	7×10^{-13}	1×10^{-13}	5×10^{-12}
Sr	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	4×10^{-11}	3×10^{-12}	3×10^{-10}	1×10^{-11}	1×10^{-12}	8×10^{-11}
Zr	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Nb	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Mo	1×10^{-12}	-	3×10^{-12}	2×10^{-12}	3×10^{-13}	1×10^{-11}	7×10^{-13}	1×10^{-13}	5×10^{-12}
Tc	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Pd	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Ag	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Sn	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
I	1×10^{-12}	-	3×10^{-12}	2×10^{-12}	3×10^{-13}	1×10^{-11}	7×10^{-13}	1×10^{-13}	5×10^{-12}
Cs	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	4×10^{-11}	3×10^{-12}	3×10^{-10}	1×10^{-11}	1×10^{-12}	8×10^{-11}
Sm	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Eu	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Ho	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Pb	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Po	1×10^{-12}	-	3×10^{-12}	2×10^{-12}	3×10^{-13}	1×10^{-11}	7×10^{-13}	1×10^{-13}	5×10^{-12}
Ra	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Ac	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Th	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Pa	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
U	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Np	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Pu	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Am	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}
Cm	1×10^{-11}	-	1×10^{-10}	9×10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-11}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	2×10^{-11}

[125] Die Werte für OPA wurden aus Nagra (2002a) übernommen, wo nur Referenzwerte und OE-Werte angegeben wurden. UE-Werte für die Testrechnungen werden gemäss ENSI (2010a) nur für Wirtgesteine benötigt, welche im Referenzfall als geklüftet konzipiert sind (d.h. Mergel-Formationen des Helvetikums). Die übrigen UE-Werte sind der Vollständigkeit halber für allfällige zusätzliche spätere Analysen angegeben.

Tab. A6-11: (Fortsetzung)

Element	EFF			EFF-KBA			MGL[126]		
	Referenz	UE	OE	Referenz	UE	OE	Referenz	UE	OE
Be	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
C_anorg	1×10^{-12}	3×10^{-13}	1×10^{-11}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	6×10^{-14}	1×10^{-12}
C_org	5×10^{-12}	3×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	1×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	6×10^{-14}	3×10^{-12}
Cl	1×10^{-12}	3×10^{-13}	1×10^{-11}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	6×10^{-14}	1×10^{-12}
K	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
Ca	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	-	-	-
Co	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
Ni	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
Se	1×10^{-12}	3×10^{-13}	1×10^{-11}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	6×10^{-14}	1×10^{-12}
Sr	3×10^{-11}	3×10^{-12}	2×10^{-10}	5×10^{-12}	1×10^{-12}	3×10^{-11}	2×10^{-12}	5×10^{-13}	2×10^{-11}
Zr	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	-	-	-
Nb	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
Mo	1×10^{-12}	3×10^{-13}	1×10^{-11}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	6×10^{-14}	1×10^{-12}
Tc	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	-	-	-
Pd	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	-	-	-
Ag	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
Sn	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
I	1×10^{-12}	3×10^{-13}	1×10^{-11}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	6×10^{-14}	1×10^{-12}
Cs	3×10^{-11}	3×10^{-12}	2×10^{-10}	5×10^{-12}	1×10^{-12}	3×10^{-11}	2×10^{-12}	5×10^{-13}	2×10^{-11}
Sm	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	-	-	-
Eu	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	-	-	-
Ho	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	-	-	-
Pb	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
Po	1×10^{-12}	3×10^{-13}	1×10^{-11}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	2×10^{-12}	2×10^{-13}	6×10^{-14}	1×10^{-12}
Ra	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
Ac	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
Th	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
Pa	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
U	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
Np	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
Pu	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
Am	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}
Cm	5×10^{-12}	5×10^{-13}	4×10^{-11}	9×10^{-13}	2×10^{-13}	5×10^{-12}	4×10^{-13}	1×10^{-13}	3×10^{-12}

A6.4 Biosphärendaten

Die Biosphären-Transferkoeffizienten für den Biosphären-Referenzfall und für die ENSI-Fälle für ein wärmeres und trockeneres Klima sowie für ein eiszeitliches Klima sind in Tab. A6-12 bis A6-14 aufgelistet. Der Biosphären-Transferkoeffizient für ein bestimmtes Radionuklid wird

[126] Die fehlenden Werte werden für die Testrechnungen nicht benötigt, da die entsprechenden Radioelemente für SMA nicht sicherheitsrelevant sind (vgl. Nagra 2008d) und die Mergel-Formationen im Gegensatz zum 'Braunen Dogger' und den Effinger Schichten auch nicht als Rahmengestein für das HAA-Lager vorkommen.

mit dem Biosphären-Code TAME (Nagra 2002d) wie folgt berechnet: Für jedes Radionuklid wird ein konstanter Radionuklidfluss von 1 Bq/a als Eingangsfunktion vorgegeben. Der Code berechnet damit eine zeitlich variable Ausgangsfunktion (die Jahresdosis), die einem konstanten Wert zustrebt (*"steady state"* Wert[127]). Der BTK ist das Verhältnis der entsprechenden *"steady state"* Jahresdosis [Sv/a] zum Eingangswert von 1 Bq/a.

Tab. A6-12: Biosphären-Transferkoeffizienten (BTK) für den Biosphären-Referenzfall.

Aus Nagra (2010d).

Nuklid	**BTK** [Sv/Bq]
^{10}Be	4.0×10^{-16}
^{14}C	7.4×10^{-16}
^{36}Cl	7.0×10^{-15}
^{40}K	7.7×10^{-15}
^{41}Ca	3.3×10^{-16}
^{59}Ni	1.2×10^{-16}
^{60}Co	2.2×10^{-17}
^{63}Ni	4.3×10^{-18}
^{79}Se	6.6×10^{-14}
^{90}Sr	2.9×10^{-15}
^{93}Mo	2.8×10^{-15}
^{93m}Nb	1.0×10^{-18}
^{93}Zr	7.8×10^{-15}
^{94}Nb	1.6×10^{-13}
^{99}Tc	5.2×10^{-14}
^{107}Pd	7.7×10^{-17}
^{108m}Ag	7.9×10^{-15}
^{121m}Sn	1.3×10^{-17}
^{126}Sn	4.1×10^{-13}
^{129}I	2.0×10^{-13}
^{135}Cs	2.8×10^{-14}
^{137}Cs	1.3×10^{-16}
^{151}Sm	4.7×10^{-19}
^{154}Eu	2.9×10^{-18}
^{166m}Ho	1.4×10^{-14}
^{210}Pb	3.1×10^{-15}
^{210}Po	7.1×10^{-18}

Nuklid	**BTK** [Sv/Bq]
^{226}Ra	2.8×10^{-13}
^{227}Ac	1.0×10^{-15}
^{228}Ra	6.3×10^{-15}
^{228}Th	3.8×10^{-18}
^{229}Th	9.4×10^{-14}
^{230}Th	3.3×10^{-12}
^{231}Pa	1.4×10^{-11}
^{232}Th	2.4×10^{-11}
^{232}U	9.9×10^{-15}
^{233}U	4.5×10^{-14}
^{234}U	7.5×10^{-14}
^{235}U	7.9×10^{-13}
^{236}U	2.1×10^{-14}
^{237}Np	3.4×10^{-14}
^{238}Pu	2.5×10^{-16}
^{238}U	2.4×10^{-14}
^{239}Pu	4.6×10^{-14}
^{240}Pu	1.8×10^{-14}
^{241}Am	1.0×10^{-15}
^{241}Pu	3.5×10^{-17}
^{242m}Am	4.2×10^{-16}
^{242}Pu	8.1×10^{-14}
^{243}Am	4.3×10^{-14}
^{243}Cm	1.1×10^{-16}
^{244}Cm	7.9×10^{-17}
^{245}Cm	4.9×10^{-14}
^{246}Cm	1.4×10^{-14}

[127] Bei einer Pulsfreisetzung wird dieser *"steady state"* Wert nicht vollständig erreicht; in solchen Fällen führt die Verwendung der BTK zu einer Überschätzung der Jahresdosis.

Tab. A6-13: Biosphären-Transferkoeffizienten (BTK) für den ENSI-Fall mit einem wärmeren und trockeneren Klima.

Aus Nagra (2010d).

Nuklid	**BTK** [Sv/Bq]	**Nuklid**	**BTK** [Sv/Bq]
^{10}Be	2.2×10^{-15}	^{226}Ra	1.7×10^{-12}
^{14}C	9.6×10^{-15}	^{227}Ac	1.7×10^{-15}
^{36}Cl	8.5×10^{-14}	^{228}Ra	9.4×10^{-15}
^{40}K	6.5×10^{-14}	^{228}Th	5.3×10^{-18}
^{41}Ca	4.6×10^{-15}	^{229}Th	1.6×10^{-13}
^{59}Ni	7.0×10^{-16}	^{230}Th	2.6×10^{-11}
^{60}Co	4.3×10^{-17}	^{231}Pa	3.0×10^{-11}
^{63}Ni	7.7×10^{-18}	^{232}Th	5.6×10^{-11}
^{79}Se	7.6×10^{-13}	^{232}U	1.7×10^{-14}
^{90}Sr	6.1×10^{-15}	^{233}U	3.4×10^{-13}
^{93}Mo	3.5×10^{-14}	^{234}U	1.7×10^{-12}
^{93m}Nb	1.7×10^{-18}	^{235}U	8.2×10^{-12}
^{93}Zr	2.0×10^{-14}	^{236}U	1.3×10^{-13}
^{94}Nb	1.2×10^{-12}	^{237}Np	2.0×10^{-13}
^{99}Tc	8.6×10^{-13}	^{238}Pu	8.8×10^{-16}
^{107}Pd	4.8×10^{-16}	^{238}U	1.9×10^{-13}
^{108m}Ag	7.0×10^{-14}	^{239}Pu	7.9×10^{-14}
^{121m}Sn	2.4×10^{-17}	^{240}Pu	2.7×10^{-14}
^{126}Sn	2.8×10^{-12}	^{241}Am	1.3×10^{-15}
^{129}I	1.9×10^{-12}	^{241}Pu	4.5×10^{-17}
^{135}Cs	1.2×10^{-13}	^{242m}Am	7.0×10^{-16}
^{137}Cs	2.4×10^{-16}	^{242}Pu	1.7×10^{-13}
^{151}Sm	8.5×10^{-19}	^{243}Am	7.5×10^{-14}
^{154}Eu	5.6×10^{-18}	^{243}Cm	1.8×10^{-16}
^{166m}Ho	2.4×10^{-14}	^{244}Cm	1.1×10^{-16}
^{210}Pb	4.7×10^{-15}	^{245}Cm	8.0×10^{-14}
^{210}Po	1.0×10^{-17}	^{246}Cm	2.3×10^{-14}

Tab. A6-14: Biosphären-Transferkoeffizienten (BTK) für den ENSI-Fall mit einem eiszeitlichen Klima.

Aus Nagra (2010d).

Nuklid	**BTK** [Sv/Bq]
^{10}Be	4.0×10^{-18}
^{14}C	7.4×10^{-18}
^{36}Cl	7.0×10^{-17}
^{40}K	7.7×10^{-17}
^{41}Ca	3.3×10^{-18}
^{59}Ni	1.2×10^{-18}
^{60}Co	2.2×10^{-19}
^{63}Ni	4.3×10^{-20}
^{79}Se	6.6×10^{-16}
^{90}Sr	2.9×10^{-17}
^{93}Mo	2.8×10^{-17}
^{93m}Nb	1.0×10^{-20}
^{93}Zr	7.8×10^{-17}
^{94}Nb	1.6×10^{-15}
^{99}Tc	5.2×10^{-16}
^{107}Pd	7.7×10^{-19}
^{108m}Ag	7.9×10^{-17}
^{121m}Sn	1.3×10^{-19}
^{126}Sn	4.1×10^{-15}
^{129}I	2.0×10^{-15}
^{135}Cs	2.8×10^{-16}
^{137}Cs	1.3×10^{-18}
^{151}Sm	4.7×10^{-21}
^{154}Eu	2.9×10^{-20}
^{166m}Ho	1.4×10^{-16}
^{210}Pb	3.1×10^{-17}
^{210}Po	7.1×10^{-20}

Nuklid	**BTK** [Sv/Bq]
^{226}Ra	2.8×10^{-15}
^{227}Ac	1.0×10^{-17}
^{228}Ra	6.3×10^{-17}
^{228}Th	3.8×10^{-20}
^{229}Th	9.4×10^{-16}
^{230}Th	3.3×10^{-14}
^{231}Pa	1.4×10^{-13}
^{232}Th	2.4×10^{-13}
^{232}U	9.9×10^{-17}
^{233}U	4.5×10^{-16}
^{234}U	7.5×10^{-16}
^{235}U	7.9×10^{-15}
^{236}U	2.1×10^{-16}
^{237}Np	3.4×10^{-16}
^{238}Pu	2.5×10^{-18}
^{238}U	2.4×10^{-16}
^{239}Pu	4.6×10^{-16}
^{240}Pu	1.8×10^{-16}
^{241}Am	1.0×10^{-17}
^{241}Pu	3.5×10^{-19}
^{242m}Am	4.2×10^{-18}
^{242}Pu	8.1×10^{-16}
^{243}Am	4.3×10^{-16}
^{243}Cm	1.1×10^{-18}
^{244}Cm	7.9×10^{-19}
^{245}Cm	4.9×10^{-16}
^{246}Cm	1.4×10^{-16}

Anhang A7: Resultate der Testrechnungen

In vorliegendem Anhang A7 werden die Resultate der Testrechnungen in Form von standortspezifischen Dosiskurven für jeden Lagertyp (SMA, HAA, Kombilager) präsentiert. Die Dosiskurven sind in allen Figuren einheitlich dargestellt (Referenzfälle in grün; ENSI-Fälle in blau, zusätzliche alternative Fälle in orange und "What if?"-Fälle in rot), unter Verwendung der in Anhang A4 erläuterten Rechenfallbezeichnungen. Jede Kurve enthält alle relevanten Dosisbeiträge des betreffenden Lagertyps (obere/untere Lagerebene im Falle des SMA-Lagers; BE/HAA/LMA im Falle des HAA-Lagers; alle SMA und HAA (bestehend aus BE/HAA/LMA) im Falle des Kombilagers). Die Dosiskurven werden auch für Zeiten ausserhalb des Betrachtungszeitraums dargestellt (schattierter Bereich in der rechten Bildhälfte).

Dieser Anhang enthält folgende Dosiskurven:

SMA-Lager:

- Südranden (Fig. A7-1)
- Zürich Nord-Ost (Fig. A7-2)
- Nördlich Lägeren (Fig. A7-3)
- Bözberg (Fig. A7-4)
- Jura-Südfuss (Fig. A7-5)
- Wellenberg (Fig. A7-6)

HAA-Lager:

- Zürich Nord-Ost (Fig. A7-7)
- Nördlich Lägeren (Fig. A7-8)
- Bözberg (Fig. A7-9)

Kombilager:

- Zürich Nord-Ost (Fig. A7-10)
- Nördlich Lägeren (Fig. A7-11)
- Bözberg (Fig. A7-12)

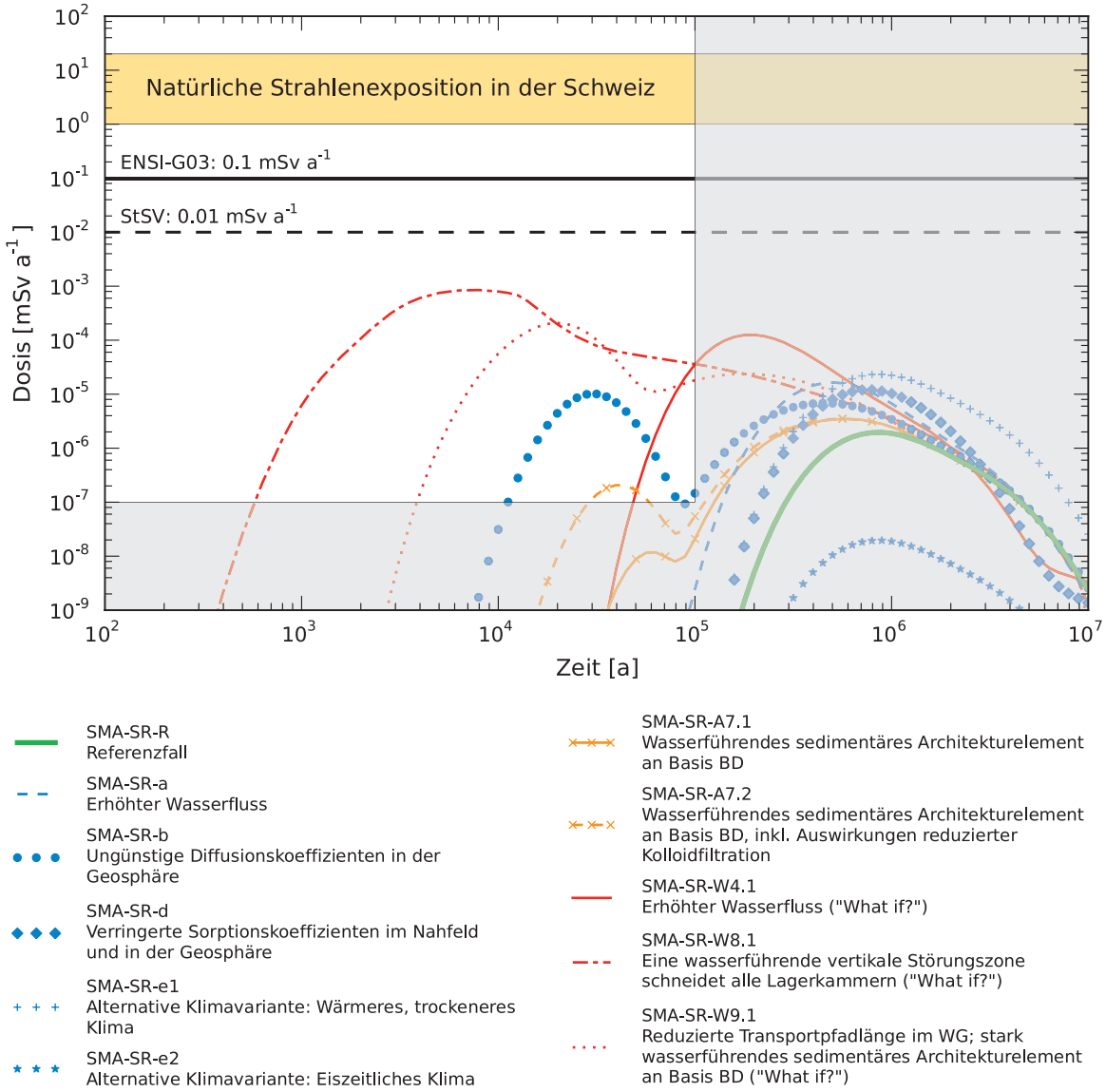


Fig. A7-1: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Südranden (SH) für das SMA-Lager.

Darstellung der Dosiskurven: Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), "What if?"-Fälle (rot).

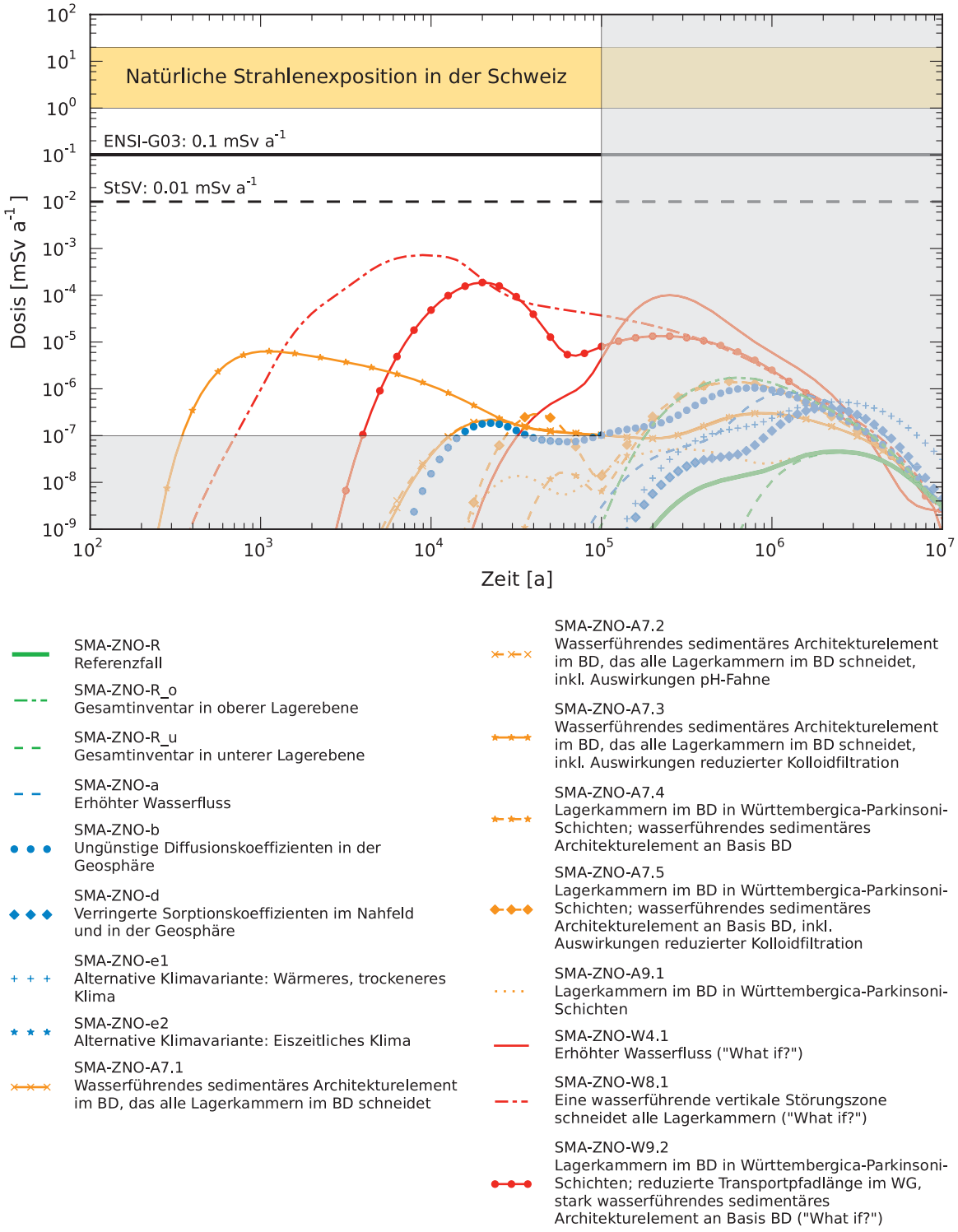


Fig. A7-2: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Zürich Nord-Ost (ZH, TG) für das SMA-Lager.

Darstellung der Dosiskurven: Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), "What if?"-Fälle (rot).

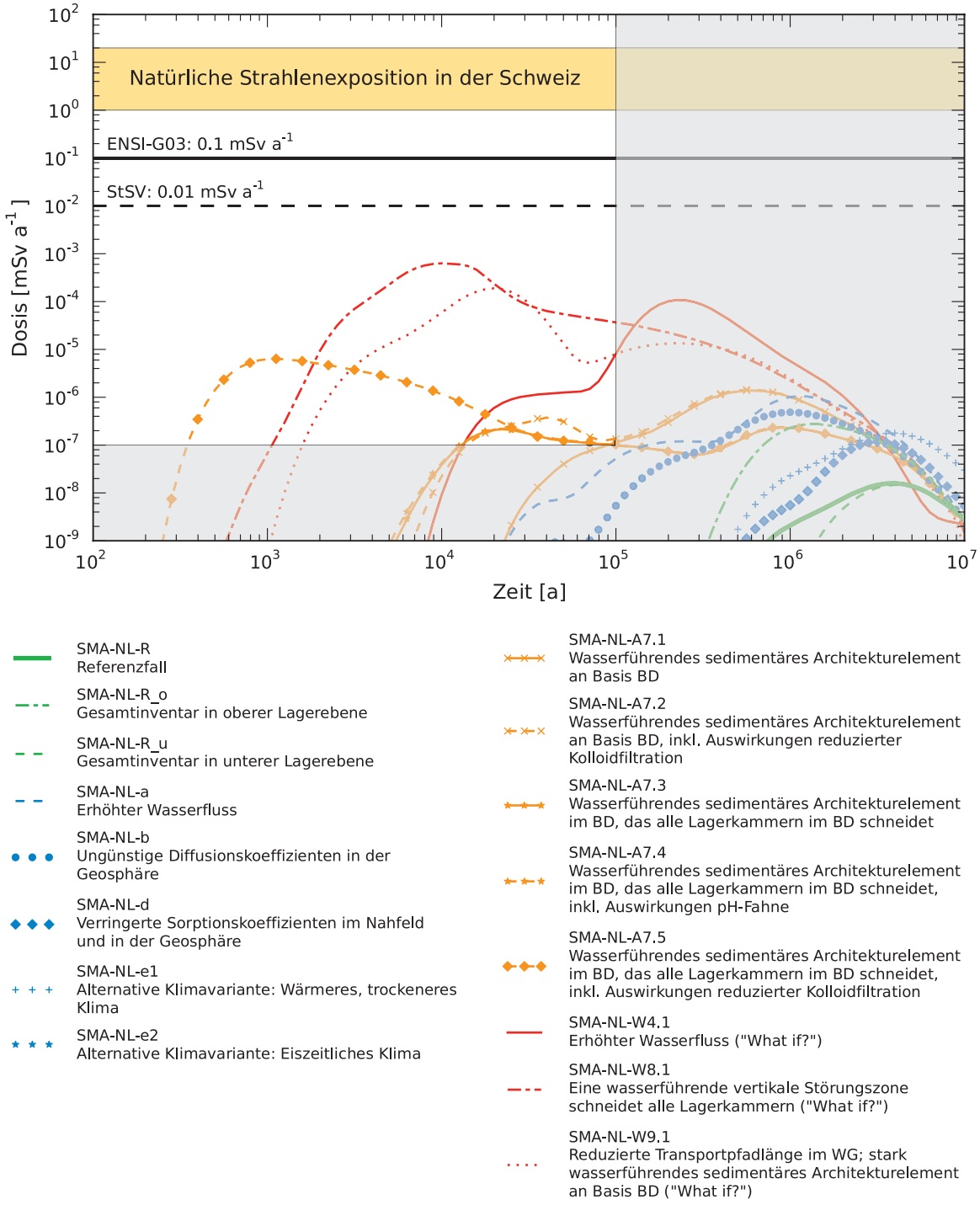


Fig. A7-3: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Nördlich Lägeren (ZH, AG) für das SMA-Lager.

Darstellung der Dosiskurven: Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), "What if?"-Fälle (rot).

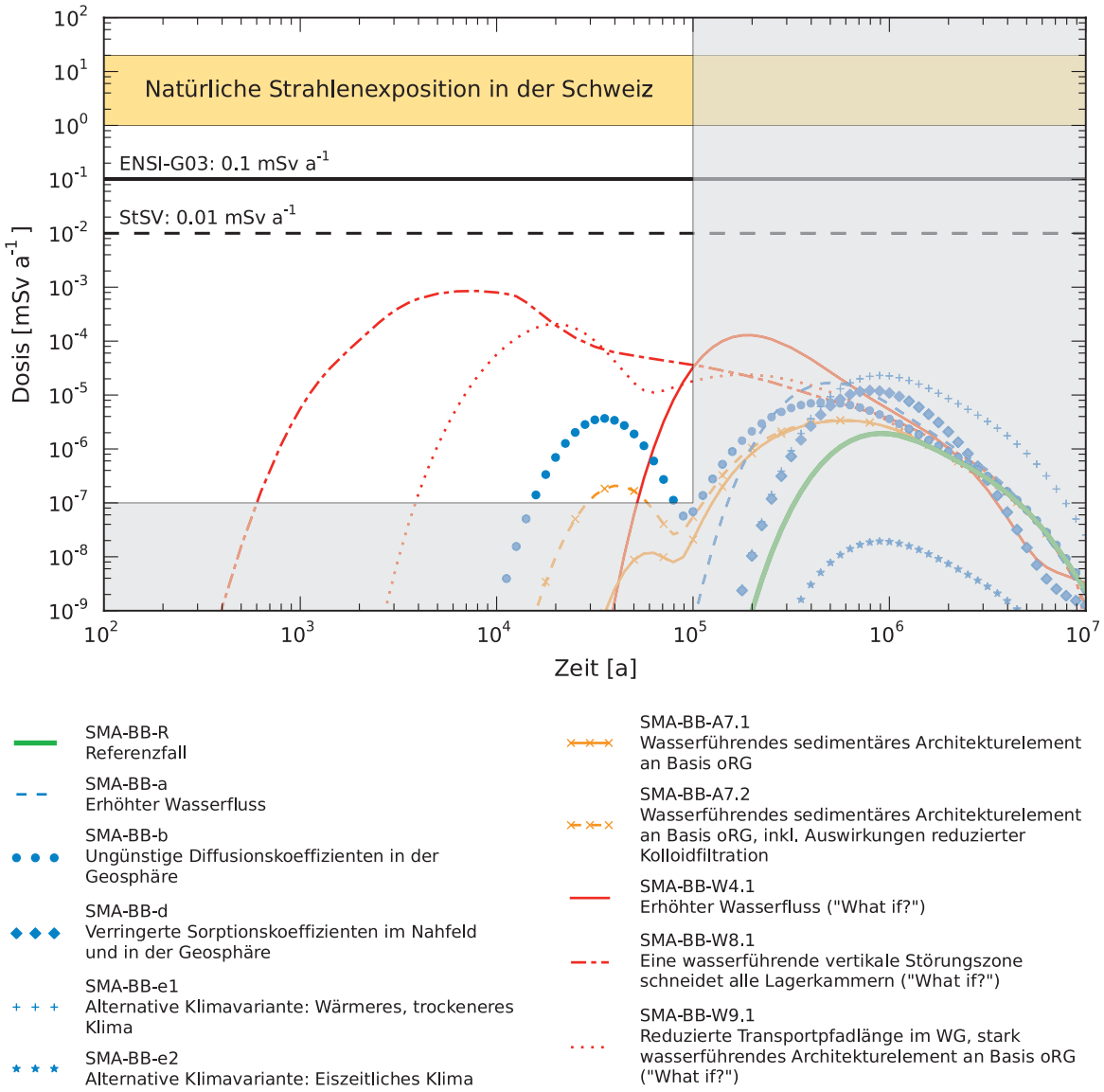


Fig. A7-4: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Bözberg (AG) für das SMA-Lager.

Darstellung der Dosiskurven: Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), "What if?"-Fälle (rot).

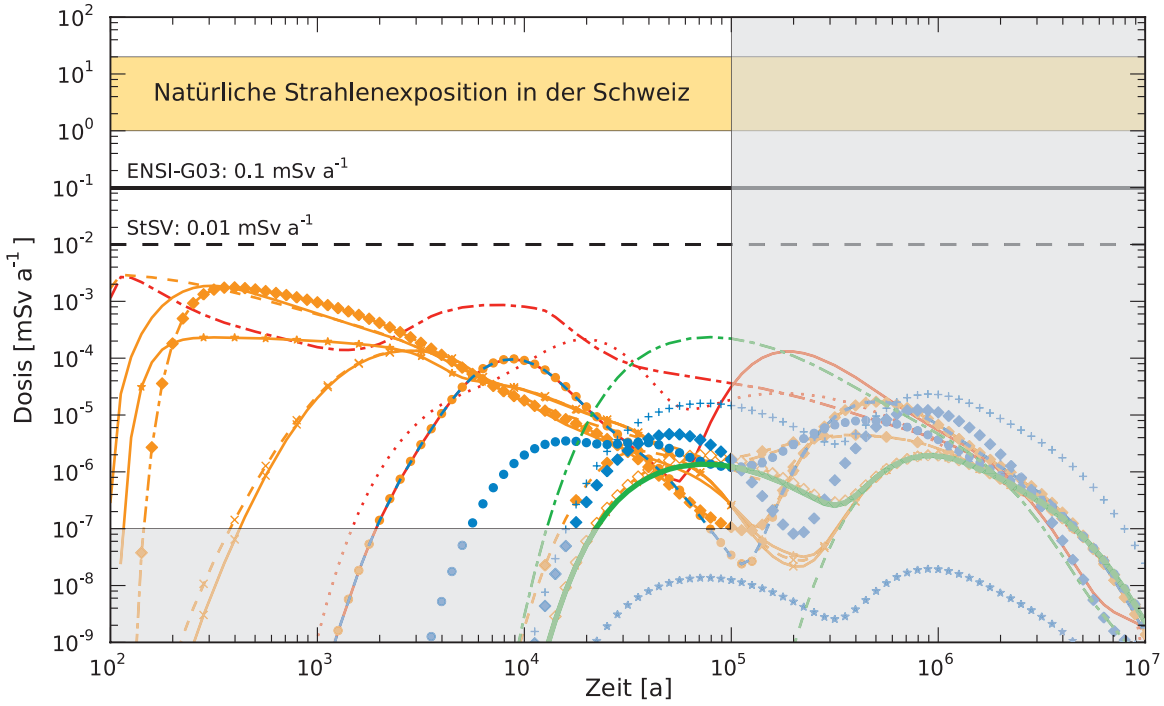


Fig. A7-5: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Jura-Südfuss (SO, AG) für das SMA-Lager.

Darstellung der Dosiskurven: Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), "What if?"-Fälle (rot).

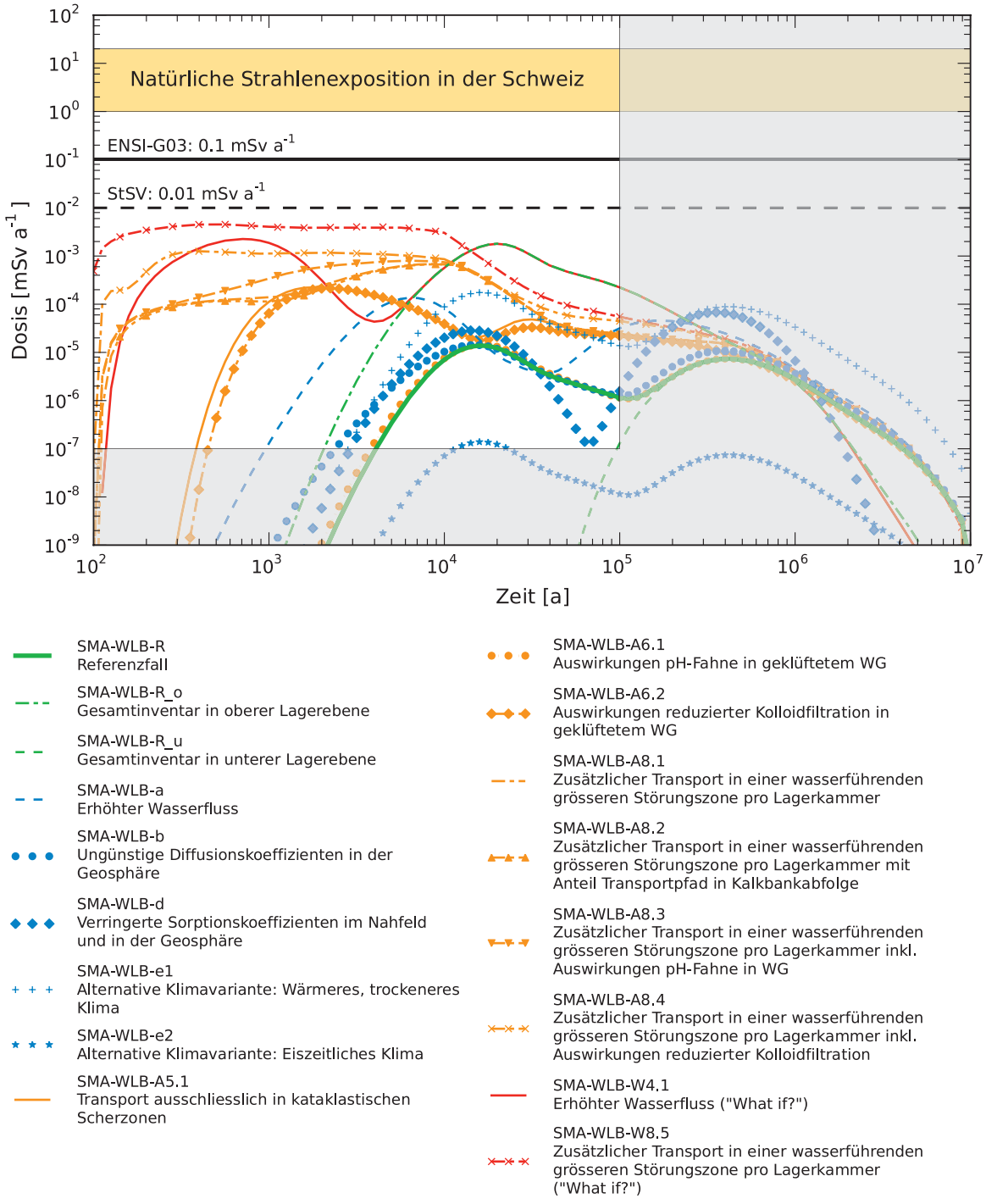


Fig. A7-6: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Wellenberg (NW, OW) für das SMA-Lager.

Darstellung der Dosiskurven: Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), "What if?"-Fälle (rot).

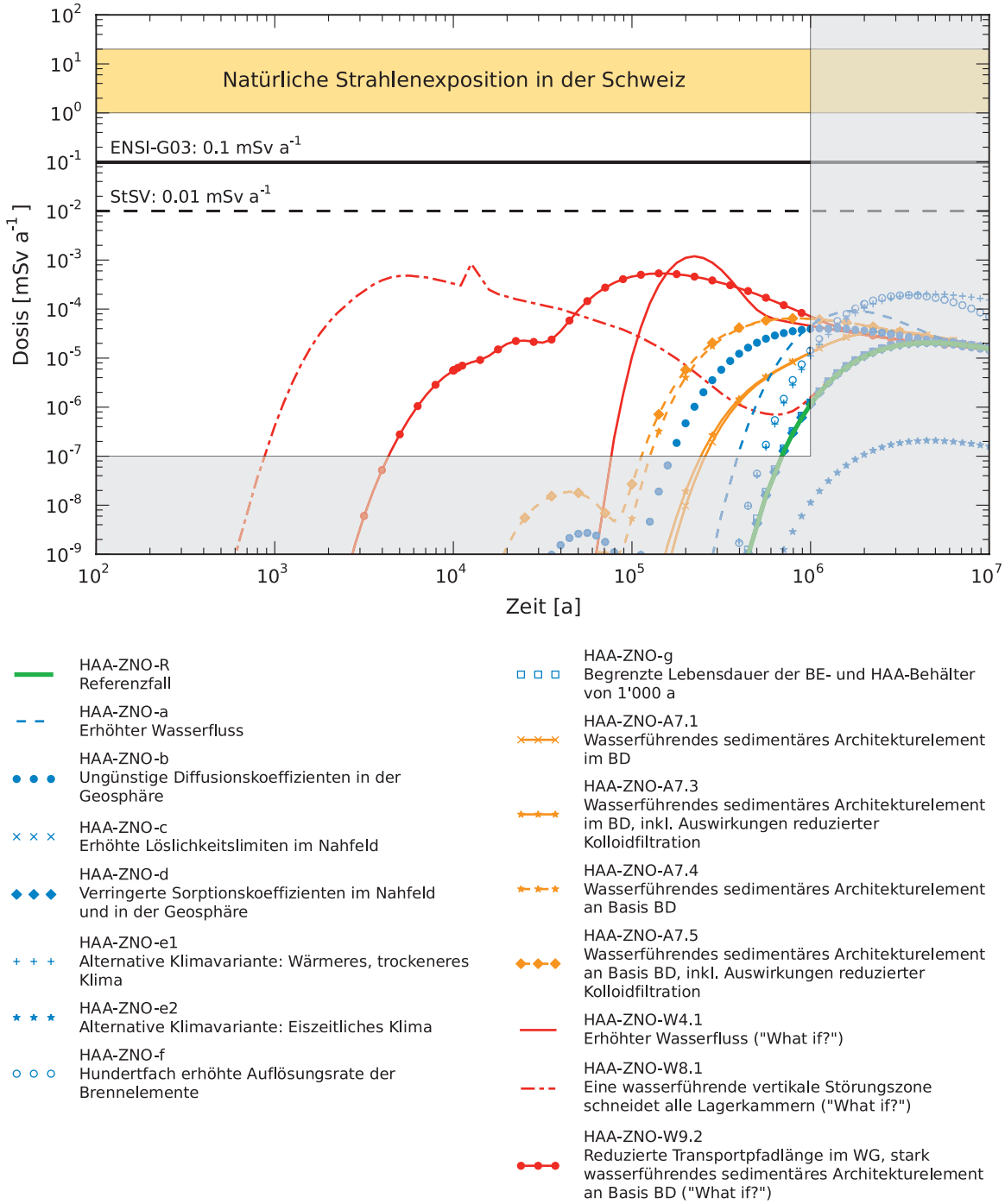


Fig. A7-7: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Zürich Nord-Ost (ZH, TG) für das HAA-Lager.

Darstellung der Dosiskurven: Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), "What if?"-Fälle (rot).

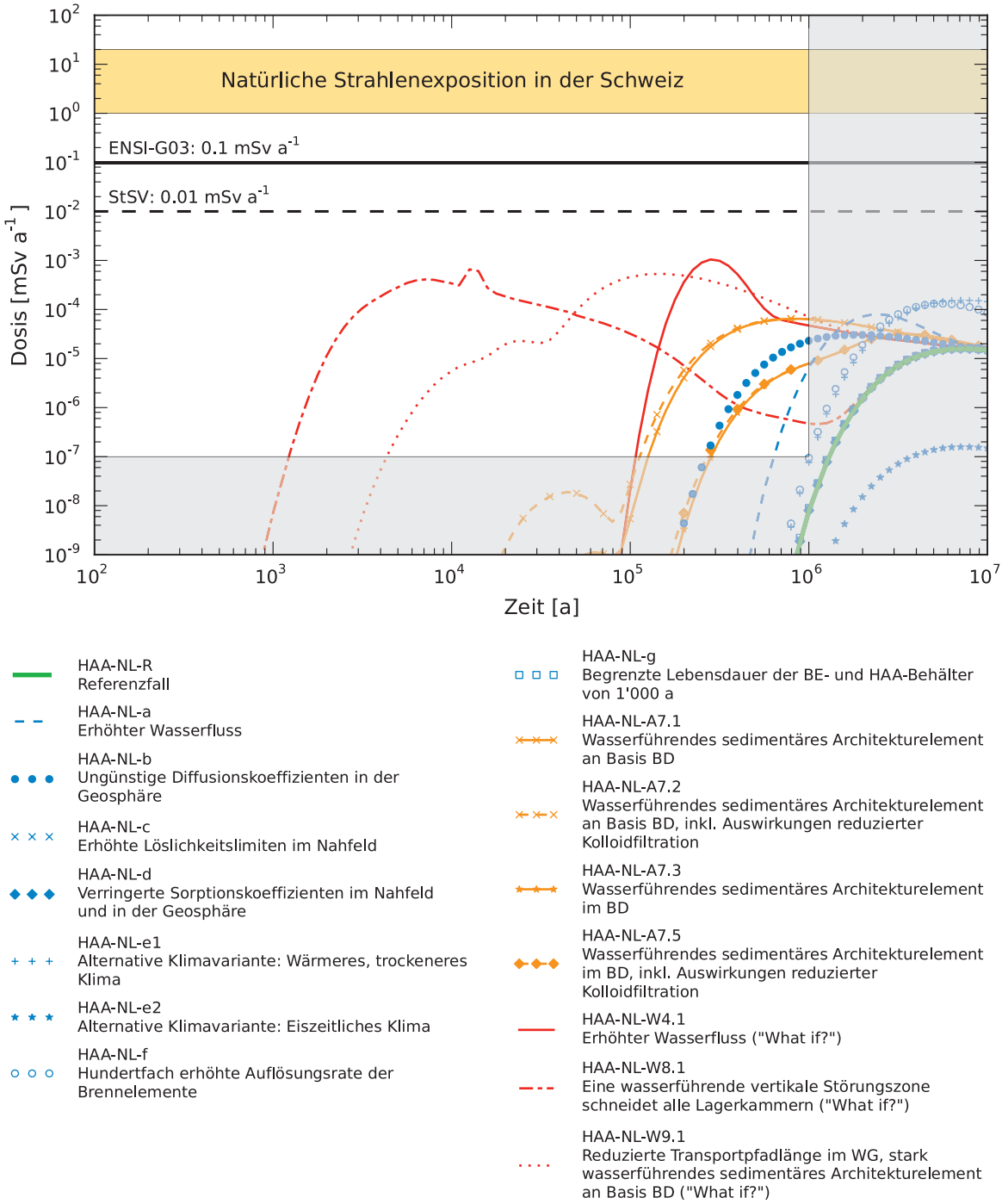


Fig. A7-8: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Nördlich Lägeren (ZH, AG) für das HAA-Lager.

Darstellung der Dosiskurven: Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), "What if?"-Fälle (rot).

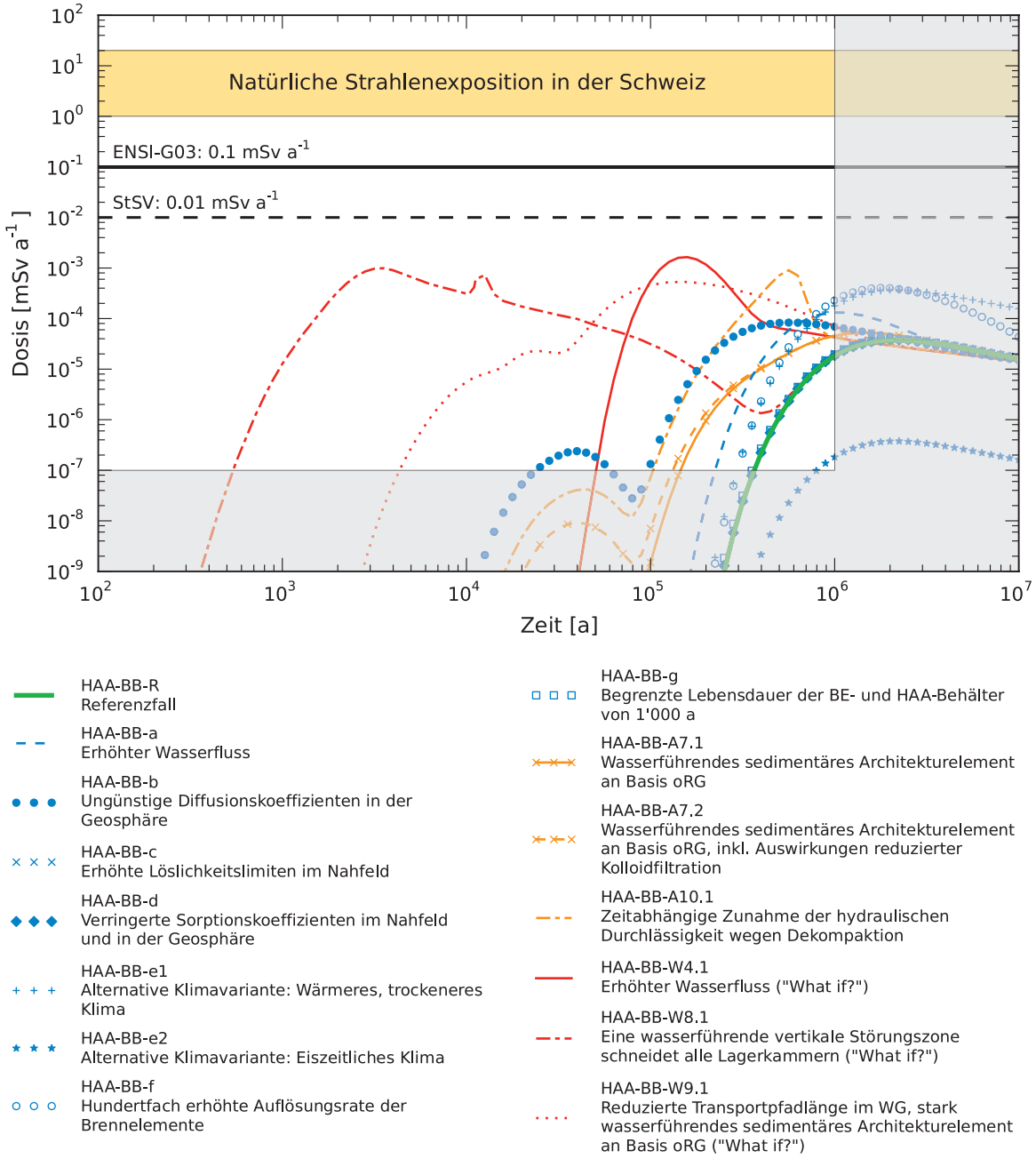


Fig. A7-9: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Bözberg (AG) für das HAA-Lager.

Darstellung der Dosiskurven: Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), "What if?"-Fälle (rot).

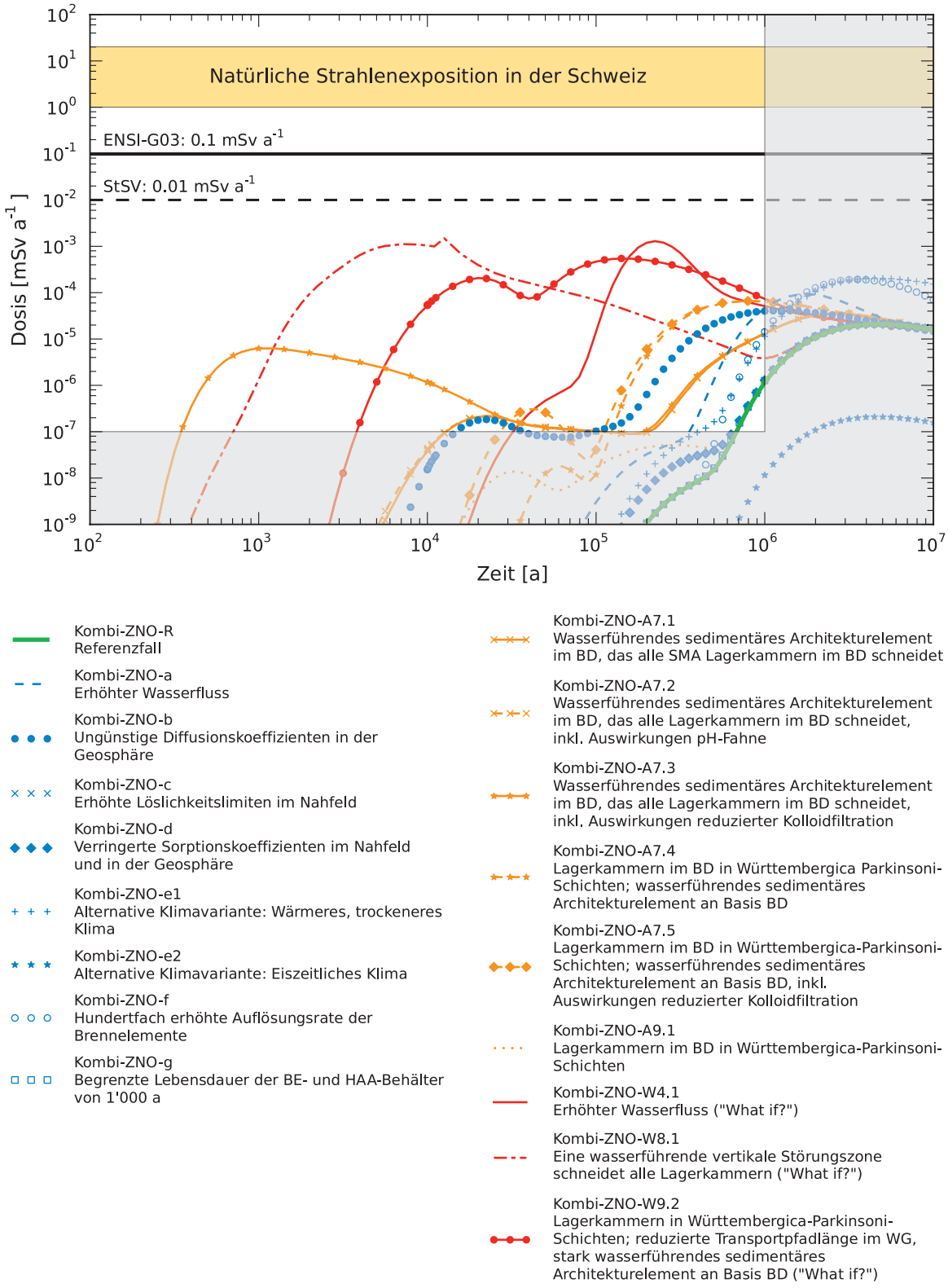
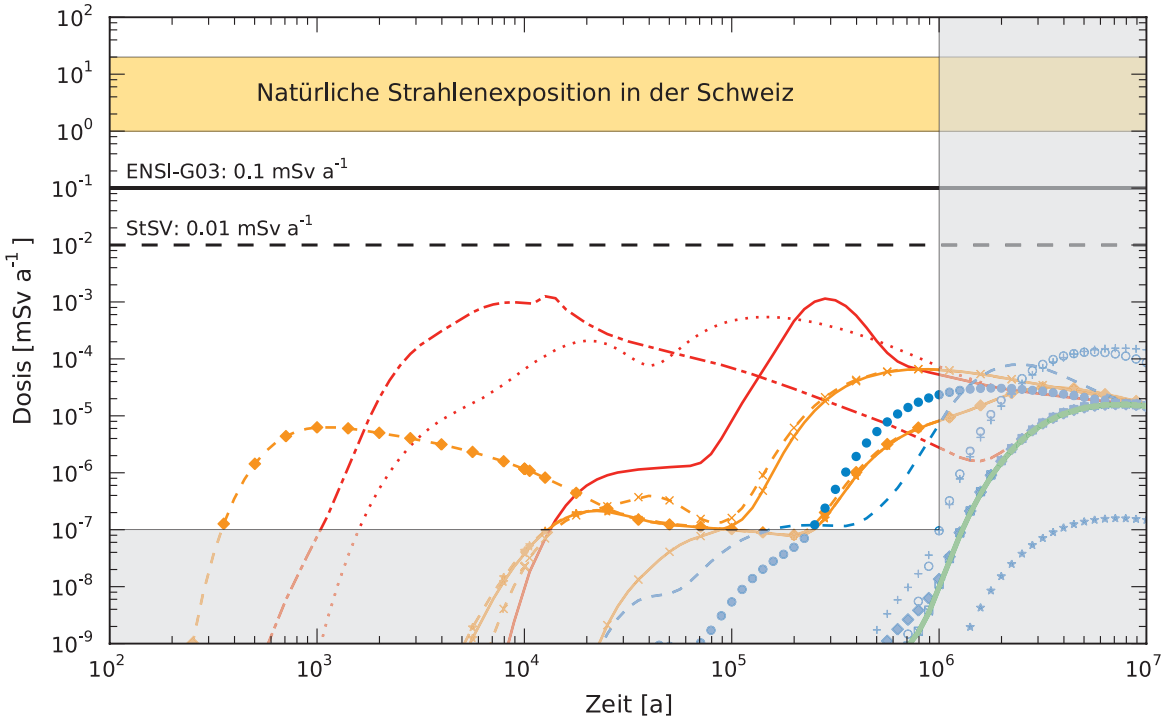


Fig. A7-10: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Zürich Nord-Ost (ZH, TG) für das Kombilager.

Darstellung der Dosiskurven: Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), "What if?"-Fälle (rot).



Kombi-NL-R
Referenzfall

Kombi-NL-a
Erhöhter Wasserfluss

Kombi-NL-b
Ungünstige Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre

Kombi-NL-c
Erhöhte Löslichkeitslimiten im Nahfeld

Kombi-NL-d
Verringerte Sorptionskoeffizienten im Nahfeld und in der Geosphäre

Kombi-NL-e1
Alternative Klimavariante: Wärmeres, trockeneres Klima

Kombi-NL-e2
Alternative Klimavariante: Eiszeitliches Klima

Kombi-NL-f
Hundertfach erhöhte Auflösungsrate der Brennelemente

Kombi-NL-g
Begrenzte Lebensdauer der BE- und HAA-Behälter von 1'000 a

Kombi-NL-A7.1
Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD

Kombi-NL-A7.2
Wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration

Kombi-NL-A7.3
Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet

Kombi-NL-A7.4
Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet, inkl. Auswirkungen pH-Fahne

Kombi-NL-A7.5
Wasserführendes sedimentäres Architekturelement im BD, das alle Lagerkammern im BD schneidet, inkl. Auswirkungen reduzierter Kolloidfiltration

Kombi-NL-W4.1
Erhöhter Wasserfluss ("What if?")

Kombi-NL-W8.1
Eine wasserführende vertikale Störungszone schneidet alle Lagerkammern ("What if?")

Kombi-NL-W9.1
Reduzierte Transportpfadlänge im WG, stark wasserführendes sedimentäres Architekturelement an Basis BD ("What if?")

Fig. A7-11: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Nördlich Lägeren (ZH, AG) für das Kombilager.

Darstellung der Dosiskurven: Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), "What if?"-Fälle (rot).

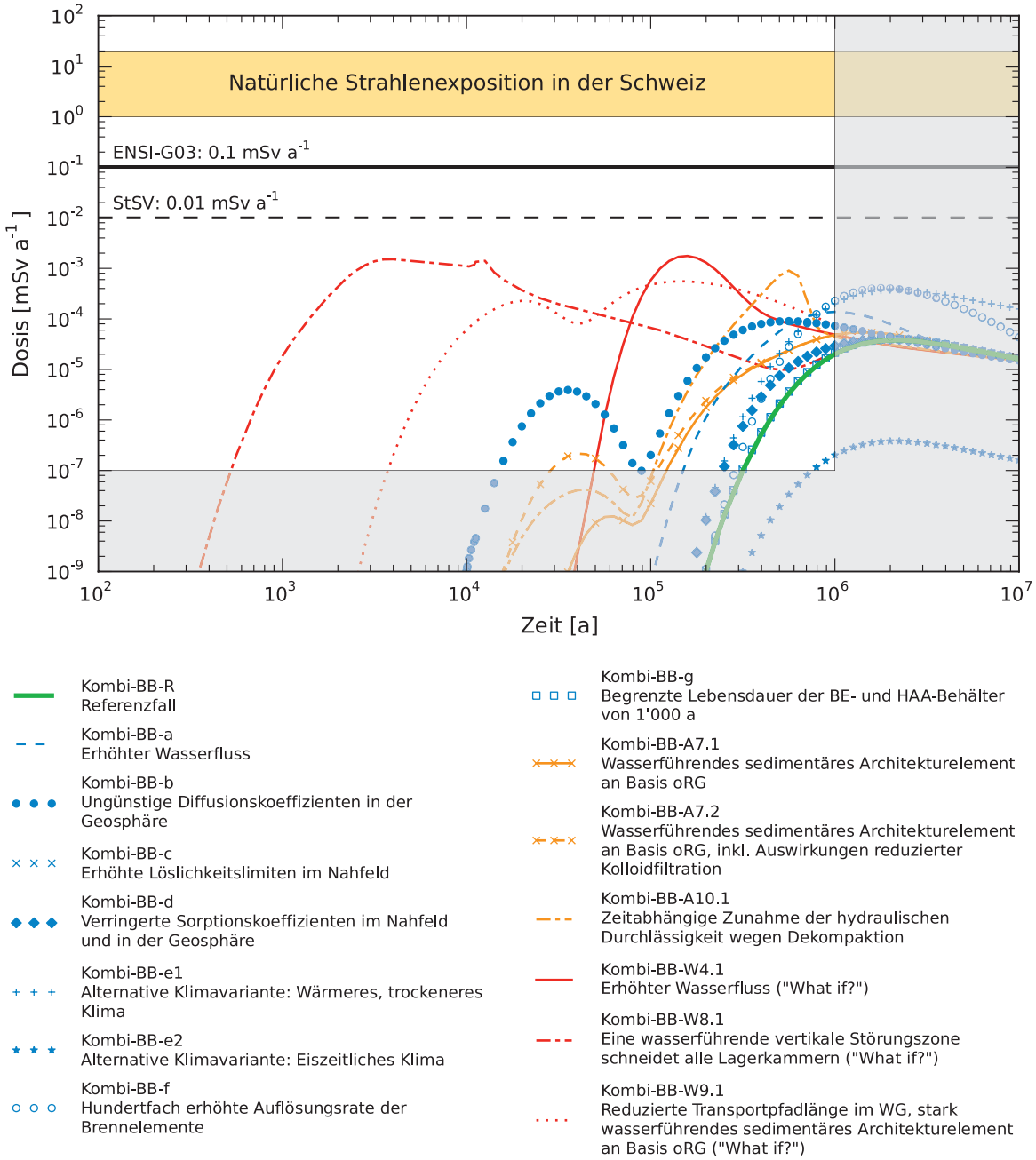


Fig. A7-12: Dosiskurven für das geologische Standortgebiet Bözberg (AG) für das Kombilager.

Darstellung der Dosiskurven: Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), "What if?"-Fälle (rot).

Anhang A8: Liste der verwendeten Abkürzungen

Abkürzung	Begriff
A	Alternativer Fall
AW	Alternativer (Parameter)Wert
BB	Bözberg
BD	Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'
BE	abgebrannte Brennelemente
BF	Basisfall
BFE	Bundesamt für Energie
BTK	Biosphären-Transferkoeffizient
EDR	Elektronischer Daten- und Resultateordner
EFF	Effinger Schichten
EG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
GOK	Geländeoberkante
GSchG	Gewässerschutzgesetz
GSchV	Gewässerschutzverordnung
HAA	Hochaktive Abfälle
HPM	Homogen-poröses Medium
i	Hydraulischer Gradient
JSF	Jura-Südfuss
K	Hydraulische Durchlässigkeit
KBA	Kalkbankabfolge
L	Transportpfadlänge
LK	Lagerkammer
LMA	Langlebige mittelaktive Abfälle
MGL	Mergel-Formationen des Helvetikums
NL	Nördlich Lägeren
OBS	Oberbauenstock
OPA	Opalinuston
oRG	Obere Rahmengesteine

(Fortsetzung)

Abkürzung	**Begriff**
R	Referenzfall
RG	Rahmengesteine
RW	Referenz(parameter)wert
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager
SKA	Sandkalkabfolge
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
SMA-o	Anteil des SMA-Inventars in Lagerkammern in der oberen Lagerebene
SMA-u	Anteil des SMA-Inventars in Lagerkammern in der unteren Lagerebene
SR	Südranden
StSV	Strahlenschutzverordnung
T	Transmissivität
TGA	Tongesteinabfolge
uRG	Untere Rahmengesteine
v_D	Darcy-Geschwindigkeit
W	"What if?"-Fall
WG	Wirtgestein
WLB	Wellenberg
ZNO	Zürich Nord-Ost