

# HINWEISE

---

Hinweise aus der Beurteilung  
des Entsorgungsprogramms  
und des RD&D-Plans 2021

---

Mai 2023



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI  
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN  
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN  
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI





ENSI 33/939

# Hinweise aus der Beurteilung des Entsorgungsprogramms und des RD&D-Plans 2021

Brugg, Mai 2023

# 1 Einleitung

Das ENSI hat im Rahmen des Entsorgungsprogramms 2021 (EP21) der Nagra die zwei Berichte NTB 21-01 (Entsorgungsprogramm) und NTB 21-02 (RD&D-Plan) neben den darin referenzierten zusätzlichen Berichten beurteilt. Im Zuge seiner Beurteilung des Entsorgungsprogramms 2021 der Nagra hat das ENSI Auflagenanträge für den Bundesrat formuliert. Die Auflagenanträge sind im ENSI-Gutachten zum EP21 (ENSI 33/915) enthalten. Zusätzlich hat das ENSI Hinweise aus der Beurteilung des Entsorgungsprogramms 2021 und des RD&D-Plans formuliert. Diese werden vom ENSI im Rahmen der laufenden Aufsichtstätigkeit behandelt und sind in dieser Aktennotiz aufgeführt.

Bei den Hinweisen handelt es sich um Aspekte, deren Berücksichtigung für kommende Aktualisierungen des Entsorgungsprogramms (Kap. 2) und des RD&D-Plans (Kap. 3) von Relevanz ist. Die darin angesprochenen Aspekte werden vom ENSI bei künftigen Beurteilungen des Entsorgungsprogramms und des RD&D-Plans geprüft. Das ENSI unterteilt die aus der Beurteilung der beiden Dokumente resultierenden Hinweise wie folgt:

1. Im Kapitel 2 werden jene Hinweise aufgeführt, welche im Gutachten zum EP21 (ENSI 33/915) bereits formuliert wurden.
2. Im Kapitel 3 werden Hinweise aufgelistet, die sich auf den RD&D-Plan der Nagra beziehen.

## 2 Hinweise für künftige Aktualisierungen des Entsorgungsprogramms

In diesem Kapitel werden Hinweise dokumentiert, die sich aus der Beurteilung des Entsorgungsprogramms ergeben haben und deren Berücksichtigung für die zukünftigen Aktualisierungen des Entsorgungsprogramms von Relevanz ist. Am Ende jedes Hinweises wird gezeigt, wo der Hinweis im ENSI-Gutachten steht.

- H1. In künftigen Aktualisierungen des Entsorgungsprogramms sollen die erwarteten Abfallmengen für Szenarien mit längeren unterstellten Laufzeiten der KKW ausgewiesen und die Auswirkungen auf die Entsorgung bewertet werden. (ENSI 33/915, Kap. 2).
- H2. Das ENSI empfiehlt, weiterhin vor jeder Revision des Entsorgungsprogramms die Anlagenplanungen der nennenswerten MIF-Abfallproduzenten dahingehend abzufragen, ob sich Änderungen in den Abfallprognosen ergeben haben. (ENSI 33/915, Kap. 2).
- H3. Das Gebirgsverhalten und die Wechselwirkungen zwischen Ausbau und Gebirge (Systemverhalten) im Bereich sicherheitsrelevanter Untertagebauwerke und komplexer Abschnitte des Tiefenlagers, u. a. Kreuzungsbauwerke und Untertagebauwerke mit grosser Spannweite und komplexen Übergangsbereichen mit sich ändernden Querschnitten, sollen für das Rahmenbewilligungsgesuch vertieft untersucht und analysiert werden. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse und resultierenden möglichen Auswirkungen sollen in die Betrachtung der Langzeitsicherheit einfließen. (ENSI 33/915, Kap. 3.1.3).
- H4. Es ist zu erwarten, dass im Opalinuston während der Vortriebsarbeiten auf Lager ebene Störungszonen durchfahren werden. Experimentelle Daten über die hydromechanischen Eigenschaften solcher Störungszonen sollen bestimmt werden. Mögliche Auswirkungen auf den Bau der HAA-Lagerstollen und SMA-Lagerkavernen und auf die Langzeitsicherheit sollen untersucht werden. Daraus sollen praktische Kriterien für die Identifikation und Beurteilung von einlagerungsbestimmenden Störungszonen während der Vortriebsarbeiten festgelegt werden. (ENSI 33/915, Kap. 3.1.3).
- H5. Das ENSI empfiehlt der Nagra, dass sie für die Nivellement-Nullmessungen mindestens einen Zeitraum von mehreren Jahren mit jährlichen Messkampagnen vorsieht, so dass vor Baubeginn aufgrund der mehrfachen Messungen geklärt ist, ob die dazu gewählten Fixpunkte tatsächlich langfristig geeignet sind. (ENSI 33/915 Kap. 3.1.4).
- H6. Bei einer allfälligen Verzögerung der Inbetriebnahme des SMA-Lagers sollen aus Sicht des ENSI neue Kapazitätsreserven für die Zwischenlagerung von MIF-Abfällen (Produktion ab 2050) und für die Stilllegung der Anlagen des PSI-West geplant werden. (ENSI 33/915, Kap. 6).
- H7. Das ENSI empfiehlt, in den künftigen Untersuchungen der Langzeitstabilität von abgebrannten Brennelementen während der Zwischenlagerung auch das Störfallverhalten von hochabgebrannten Siedewasserreaktor-Brennstäben zu betrachten. (ENSI 33/915, Kap. 6).

- H8. Das ENSI empfiehlt im nächsten Entsorgungsprogramm das Optimierungsverfahren zu aktualisieren (vgl. Richtlinie ENSI-G03) und mit konkreten Beispielen zu ergänzen. (ENSI 33/915, Kap. 7).

### 3 Hinweise für künftige Aktualisierungen des RD&D-Plans

In diesem Kapitel werden Hinweise dokumentiert, die sich aus der Beurteilung des RD&D-Plans (NTB 21-02) ergeben haben und welche für die zukünftigen Aktualisierungen des RD&D-Plans von Relevanz sind. Am Anfang jedes Hinweises wird angegeben, worauf der Hinweis sich im Bericht NTB 21-02 bezieht.

- H9. Die «Verification of HLW site» ist in der Roadmap «Safety Development & Optimisation» (NTB 21-02, Fig. 3.6, Fig. A3-2) aus Sicht des ENSI zu spät geplant. Die untertägige Bestätigung der Lagerfelder für den HAA-Lagerteil in einem Kombilager soll bereits vor dem Baubewilligungsgesuch für den SMA-Lagerteil erfolgen (vgl. ENSI 33/915, Kap. 5, Auflagenantrag A.4), (NTB 21-02, Kap. 3).
- H10. In der Zusammenfassung der Roadmap «Strategic summary of the Nagra Roadmap» (NTB 21-02, Fig. 3-3) werden die RD&D-Aktivitäten mit der Bewilligung für die EUU beendet. In der detaillierten Roadmap im Appendix (NTB 21-02, Fig. A3-1) ist dargestellt, dass die RD&D-Aktivitäten bis zur Betriebsbewilligung des HAA-Lagers weitergehen. Die Inkonsistenzen in den Roadmaps sollen bei der nächsten Aktualisierung bereinigt werden. (NTB 21-02, Kap. 3).
- H11. In der «Roadmap for Safety Development & Optimisation» NTB 21-02, Fig. 3.6 und Fig. A3-2 NTB 21-02 ist die Aktualisierung des Sicherheitsnachweises während der Betriebsphase nicht abgebildet. Im dazugehörigen Text werden sie korrekterweise genannt. Die Inkonsistenzen in den Roadmaps sollen bei der nächsten Aktualisierung bereinigt werden. (NTB 21-02, Kap. 3).
- H12. Bei der Gastransportmodellierung wurde von der Nagra bisher eine TH<sup>2</sup>-Kopplung betrachtet. Aus Sicht des ENSI ist die mechanische Kopplung wichtig und deswegen soll die gesamte TH<sup>2</sup>M-Kopplung in den nächsten Realisierungsschritten betrachtet werden. (NTB 21-02, Kap. 7.4).
- H13. In den Kapiteln 8.3.3 und 8.5.3 (NTB 21-02) wird nicht ersichtlich, wie der Wissens-erhalt, insbesondere auch für experimentelle Studien, z. B. für Wechselwirkungen von Materialien im Tiefenlager für den Optimierungsprozess oder für Diffusionsexperimente in den EUU, ausreichend erhalten bleibt, wenn viele Studien bis zum RBG abgeschlossen werden sollen und nur noch der internationale Stand verfolgt werden soll. Ebenfalls ist nicht ersichtlich, wie die Ergebnisse der oben genannten Studien ohne experimentelle Bestätigung für einen Sicherheitsnachweis ausreichen werden, insbesondere wenn im gleichen Zeitabschnitt noch Materialien für die technischen Barrieren getestet und anschliessend optimiert werden sollen. Die Entsorgungspflichtigen sollen daher für das nächste Entsorgungsprogramm aufzeigen, welche Expertise für die Roadmap «Hydrochemie und Barrieren» nach dem Rahmenbewilligungsgesuch noch notwendig ist und mit welchen geplanten Aktivitäten sie den Wissens-erhalt, insbesondere auch für experimentelle Studien sicherstellen wollen. (NTB 21-02, Kap. 7.6).
- H14. Das ENSI empfiehlt eine systematische Betrachtung der zeitlichen Anforderungen an die Sicherheitsfunktionen der Versiegelungsbauwerke im Zusammenhang mit den erwarteten hydromechanisch-gekoppelten Prozessen im Lagernahfeld. Hier geht es insbesondere um die sich zeitlich verändernden Eigenschaften von Versiegelung, Widerlager und Bentonitgranulatverfüllung. Dabei sollen unterschiedliche

mechanische und hydraulische Beanspruchungen aufgrund von Prozessen wie Auf-sättigung, Quelldruckentwicklung und Entfestigung/Zersetzung vom Widerlager berücksichtigt werden. (NTB 21-02, Kap. 7.9).

H15. Hinweise zum Thema «Primärer Spannungszustand» («stress field», NTB 21-02, Kap. 8.2.1.3):

1. Bei der Auswertung von Messungen des primären Spannungszustands in den Tiefbohrungen, insbesondere in topographisch und tektonisch geprägten Gebieten, aber auch in der Nähe von Störungszonen oder lokalen Inhomogenitäten, soll berücksichtigt werden, dass das Spannungsfeld geneigt sein kann.
2. Bei der Ableitung von standortspezifischen Spannungsprofilen aus den Messungen in den Tiefbohrungen der Etappe 3 SGT soll berücksichtigt werden, dass auch lateral sehr kleinräumig erhebliche Spannungsänderungen und -schwankungen (Inhomogenitäten im Spannungsfeld), z. B. durch Fazieswechsel, Störungszonen, Klüfte, Schichtversätze oder auch unterschiedliche Genese, auftreten können.
3. Neben den klassischen Herdflächenlösungen sollen auch Moment-Tensor-Inversionen durchgeführt werden, aus denen weitergehende Informationen über Bruchmechanismen und Spannungszustände erhalten werden können.
4. Bei der zukünftigen Auswertung von Herdflächen-Messungen sollen die neuesten Ergebnisse bzw. die vorgeschlagene Auswertemethodik von de Lesquen und Armand 2022 beachtet werden.
5. Als Weiterentwicklung der Untersuchungen zum primären Spannungszustand sollen auch die möglichen Auswirkungen variierender vertikaler Belastungen durch glaziale Zyklen und/oder Erosion, z. B. im Hinblick auf eine potentielle Reaktivierung von Störzonen, untersucht werden.

H16. Hinweise zum Thema «Mechanische Gesteins- und Gebirgseigenschaften» («Mechanical properties», NTB 21-02, Kap. 8.2.1.3, 8.2.2.3):

1. Die felsmechanischen Parameter von Diskontinuitäten (Störungen, Scherzonen) mit weicher, toniger Füllung («fault gouge») oder spiegelpolierten Oberflächen («scaly clay», «slickensides») sollen untersucht werden, da diese für das Reaktivierungsverhalten relevant sein können. Beispielsweise legen Ergebnisse von Orellana et al. 2019; Orellana et al. 2018a; Orellana et al. 2018b zu den Reibungseigenschaften von Opalinuston nahe, dass sich Bruchgleiten im Allgemeinen aseismisch verhält und daher stabiles Kriechen widerspiegelt. Andererseits kann das Bruchgleiten in trockenem „fault gouge“ und in „scaly clay“ unter bestimmten Umständen instabil und möglicherweise seismisch werden. In den zukünftigen Untersuchungen soll explizit das Verhalten von den zu erwartenden steilstehenden Störungen im Opalinuston unter erhöhten Korrosionsgasdrücken berücksichtigt werden.
2. Das Langzeitverhalten des Opalinustons (Kriechen, subkritisches Risswachstum) bedarf weiterer Untersuchungen, insbesondere unter Berücksichtigung der hydraulisch-thermisch-mechanisch-gekoppelten Bedingungen.



3. Die Resultate aus Laborversuchen zum Kriechverhalten sollen mit Daten aus in situ-Versuchen abgeglichen werden und in die weiterführende numerische Modellierung des Spannungsfeldes einfließen.

H17. Hinweise zum Thema «geomechanische Prozesse» (NTB 21-02, Kap. 8.2.2.3):

1. Das hydro-mechanisch gekoppelte Verhalten von Opalinuston bei niedriger Einspannung (im Ausbruchsbereich) bedarf weiterer Untersuchung, um Hüllkurven und die zeitliche Entwicklung der effektiven Spannungen realistisch abzubilden. Hier sollen insbesondere realistische Spannungspfade mit Entlastung berücksichtigt werden (echte triaxiale Situation beachten) sowie der Umstand, dass anfänglich auch grosse negative Porendrucke und Entsättigung im Vortriebsbereich, aber lokal auch Überdrücke beobachtet werden und sich nach der Verfüllung der HAA-Lagerstollen vermutlich durch die nachfolgende Aufsättigung instabilere Verhältnisse entwickeln.
2. Die Prozesse der Fluid-Migration durch Diskontinuitäten inkl. Dilatanzverhalten sollen genauer untersucht werden. So sind trotz verschiedener Studien die Ursachen der beobachteten nassen Stellen im Opalinuston («wet spots») zu wenig verstanden und sollen vertieft mit hydro-mechanisch gekoppelten Ansätzen untersucht werden.
3. Untersuchungen zur Skalierung der geomechanischen Materialparameter und Prozesse (Labor, Bohrloch, Lagerstollen) sollen weiter vorangetrieben werden, insbesondere unter Nutzung der Daten aus den Tiefbohrungen und später der Daten aus den erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag (EUU). Bereits abgeleitete Skalierungsgesetze sollen im Rahmen der EUU bestätigt bzw. angepasst werden. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den Untersuchungen im Felslabor Mont Terri soll überprüft werden, wobei einzelne Versuche, z. B. zur Ausbildung von Auflockerungszonen, im Rahmen der EUU erneut auszuführen wären.

H18. Aus Sicht des ENSI soll das temperaturabhängige Quellverhalten von Opalinuston in Bezug auf Selbstabdichtung von Rissen und das temperaturabhängige Quellverhalten von Bentonit in Bezug auf die Funktionsfähigkeit von Versiegelungsbauwerken näher untersucht werden. (NTB 21-02, Kap. 8.2.2.4).

H19. Das ENSI empfiehlt weiterführende Untersuchungen zur Selbstabdichtung tektonischer Scherzonen von unterschiedlicher Architektur. Bei nahezu allen bisherigen Laborexperimenten zur Selbstabdichtung von Opalinuston wurde das Gestein zunächst gebrochen und anschliessend das Selbstabdichtungsvermögen dieser Bruchflächen im Tonstein untersucht. Tektonische Scherzonen im Opalinuston sind teilweise durch diskontinuierliche Kalzit- und Coelestinadern und Rutschharnische gekennzeichnet, so dass die beiden Kontaktflächen nicht einfach aus Tonstein bestehen und darum möglicherweise abweichende Selbstabdichtungseigenschaften aufweisen. Des Weiteren empfiehlt das ENSI Selbstabdichtungsphänomene und Prozesse in aufgelockertem Gebirge, beispielsweise in Verbindung mit vortriebsinduzierten Niederbrüchen und Verbrüchen und speziell im Bereich von tektonischen Scherzonen, vertieft zu untersuchen. (NTB 21-02, Kap. 8.2.2.5).

- H20. Für das Verfüllen der HAA-Lagerstollen werden seitens Nagra im EP21 und im RD&D-Plan eine Reihe möglicher Materialien wie Bentonitgranulat, Bentonitblöcke, Bentonit/Sand-Gemische auch aus anderen Bentonitvorkommen oder andere Tonmaterialien sowie eine zementbasierte Verfüllung in Betracht gezogen. Falls die Nagra ein zum MX-80 Bentonit alternatives Material für die Verfüllung der HAA-Stollen vorsieht, empfiehlt das ENSI rechtzeitig ein umfassendes Untersuchungsprogramm aufzubauen, um alle relevanten Aspekte für den Sicherheitsnachweis beurteilen zu können. (NTB 21-02, Kap. 8.4.2 und 8.4.4.1).
- H21. Das ENSI empfiehlt weiterführende Untersuchungen zum aktuellen Vortriebs- und Ausbaukonzept der HAA-Lagerstollen, zur Aufsättigung des Bentonitgranulats, welches für die Verfüllung vorgesehen ist und zum Langzeitverhalten der verschiedenen Elemente. Dabei sollen folgende Fragen berücksichtigt werden (NTB 21-02, Kap. 8.4.3):
1. Welche Lebensdauer haben die für den Ausbau geplanten vorfabrizierten Betonsegmente (Tübbinge) und das Ringspaltmaterial? Werden sich diese Elemente langfristig zersetzen und könnten dadurch einen bevorzugten Transportpfad (sekundäre EDZ) parallel zum HAA-Lagerstollen bilden?
  2. Welche Rolle spielt die Ringspaltverpressung in Bezug auf die Entwicklung eines potentiellen Transportpfades entlang der HAA-Lagerstollen bei noch intaktem Tübbingausbau? Welche Materialien sollen verwendet werden?
  3. Wenn die Aufsättigung des Bentonitgranulats über das Gebirge erfolgen soll: Welchen Einfluss haben der Stollenausbau und die Ringspaltverpressung auf diesen Prozess?
  4. Führen hydrochemische Prozesse (Grenzflächenwechselwirkungen) durch den Kontakt Opalinuston-Ringspaltverpressung-Stollenausbau zu einer langfristigen Veränderung von Porosität und Permeabilität der Ausbauelemente?
  5. Normalerweise werden vorfabrizierte Betonsegmente (Tübbinge) mittels Elastomer-Dichtprofilen oder Dichtungen aus quellfähigem Material abgedichtet. Ist das im aktuellen Ausbaukonzept auch vorgesehen oder sollen die Segmentfugen als Wasserwege fungieren? Falls spezielle Fugenmaterialien verwendet werden sollen, soll das Langzeitverhalten inklusive der Wechselwirkung mit den anschliessenden Materialien untersucht werden. Falls die Fugen für die Aufsättigung des Bentonits durch das Gebirge offen bleiben sollen, soll dies mit der Verpressung des Ringspalts abgestimmt werden.
  6. Wie werden Störungzonen (z. B. mit Verbrüchen) während der Bauphase erkannt, sicherheitstechnisch charakterisiert und bautechnisch bewältigt? Falls für die bautechnische Bewältigung Injektionsmassnahmen zur Ertüchtigung des Gebirges vorgesehen sind, mit welchem Injektionsmittel und welcher Technologie sollen diese durchgeführt werden?
- H22. Der internationale Trend in der Zementindustrie geht aus Umweltschutzgründen weg vom Bindemittel Portlandzement. Deshalb soll diese Entwicklung von der Nagra verfolgt werden und bzgl. Tests / Nachweisen entsprechend rechtzeitig reagiert werden, wenn sich herausstellen soll, dass andere Materialien bzw. Betongemische zum Einsatz kommen könnten. (NTB 21-02, Kap. 8.4.3, Kap. 8.5.3.5).

- H23. Hinsichtlich der Bewertung von alternativen Behälterkonzepten soll die Nagra auch die aktuellen Entwicklungen in Bezug auf Keramikbehälter (wie z. B. Knorr und Kerber 2021; Zhao et al. 2021) weiterverfolgen und den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik im nächsten RD&D-Plan darlegen. (NTB 21-02, Kap. 8.4.5).
- H24. Das ENSI empfiehlt, eine Synthese von existierenden Modellierungswerkzeugen für THM-gekoppelte Prozesse für die nächste Aktualisierung des RD&D-Plans zu erstellen, in der der erreichte Stand und der Entwicklungsbedarf erläutert wird. Insbesondere soll detailliert dokumentiert werden, welchen Stand die modellbasierte Vorhersagefähigkeit für Parameter wie zum Beispiel Temperatur, Porenwasserdruck, Wassersättigung, relative Luftfeuchtigkeit und Deformationen erreicht hat und welcher Entwicklungsbedarf im Hinblick für ein zukünftiges Pilotlager besteht. (NTB 21-02, Kap. 8.5.2.1).
- H25. Das ENSI empfiehlt weiterführende Untersuchungen zur Ausbildung und zu den Transporteigenschaften der EDZ, speziell in tektonisch gestörten Bereichen und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Vortriebskonzepte und Stützmittel (NTB 21-02, Kap. 8.5.3.4, 8.4.3):
1. Als wichtig erachtet das ENSI weitere Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung der EDZ und dessen Transporteigenschaften während den verschiedenen Projektphasen unter Berücksichtigung variierender mechanischer Belastungen (Ausbruch, Stützung durch Ausbau (Tübbinge und Ringspaltverpressung), Zersetzung des Ausbaus, Quelldruck der Verfüllung nach Aufsättigung) und sich verändernder thermischer und hydraulischer Zustände.
  2. Des Weiteren werden Untersuchungen zur Entwicklung und zum Verhalten der EDZ um einen Schacht mit anderen Hauptspannungsorientierungen relativ zum Bauwerk im Vergleich zum Streckenvortrieb empfohlen.
  3. Zusätzlich zu den bereits von der Nagra angewandten numerischen Simulationen der EDZ-Entwicklung mit FDEM-Ansätzen, empfiehlt das ENSI weitere Ansätze wie z. B. Peridynamics, XFEM, Phasenfeld-Modelle oder Code-Kopplungen wie FEM/FDM und DEM zu prüfen.
  4. Es ist damit zu rechnen, dass im Endabschnitt der HAA-Lagerstollen hinter der Ortsbrust (Vortriebsfront) Auflockerungszonen im Opalinuston gebildet werden, welche für die Langzeitsicherheit relevant sein können. Das Gebirgsverhalten in solchen Endabschnitten unter Berücksichtigung der von der Nagra geplanten bautechnischen Massnahmen (Systemverhalten) und der daraus resultierenden möglichen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit sollen untersucht werden.
- H26. Das ENSI empfiehlt, bereits für das Rahmenbewilligungsgesuch geeignete Konzepte für den Abbau und Abtransport der Tunnelbohrmaschine aus dem geplanten HAA-Lagerstollen zu entwickeln. (NTB 21-02, Kap. 8.4.3).

## 4 Referenzen

- de Lesquen C., Armand G. (2022): Use of flow-back and pressure rebound data improves the minimum stress estimation in a tight claystone formation, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1124, DOI: 10.1088/1755-1315/1124/1/012090
- ENSI 33/915: Gutachten zum Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, Mai 2023
- Knorr J., Kerber A. (2021): TRIPLE C waste container for increased long-term safety of HHGW disposal in salt, clay and crystalline, atw. Internationale Zeitschrift fuer Kernenergie 66, 54-62,.
- NTB 21-01: Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2021
- NTB 21-02: The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2021
- Orellana L.F., Giorgetti C., Violay M. (2019): Contrasting Mechanical and Hydraulic Properties of Wet and Dry Fault Zones in a Proposed Shale-Hosted Nuclear Waste Repository, Geophysical Research Letters 46, 1357-1366, DOI: 10.1029/2018GL080384
- Orellana L.F., Scuderi M.M., Collettini C., Violay M. (2018a): Do scaly clays control seismicity on faulted shale rocks? Earth and Planetary Science Letters 488, 59-67, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.01.027>
- Orellana L.F., Scuderi M.M., Collettini C., Violay M. (2018b): Frictional Properties of Opalinus Clay: Implications for Nuclear Waste Storage, Journal of Geophysical Research: Solid Earth 123, 157-175. DOI: 10.1002/2017JB014931
- Zhao Y., Konietzky H., Knorr J., Kerber A. (2021): SSiC nuclear waste canisters Stability considerations during static and dynamic impact, atw. Internationale Zeitschrift fuer Kernenergie 66, 42-49







