

Schlussbericht, 01. April 2018

Bericht «Hinterfüllbaustoffe von Erdwärmesonden»

**Analyse und Statistik von Markt,
Anforderungen, Merkmalen und Qualität der
in der Schweiz eingesetzten
Hinterfüllbaustoffe**



energie schweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Autoren

Dr. Andreas Ebert
Geo Explorers AG
Wasserturmplatz 1
CH-4410 Liestal
www.geo-ex.ch

**Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.**

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern
Infoline 0848 444 444. www.energieschweiz.ch/beratung
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

Inhalt

1	Einleitung	4
1.1	Ausgangslage	4
1.2	Ziele des Projekts.....	5
2	Grundlagen Hinterfüllung	6
2.1	Hauptaufgaben der Hinterfüllung	6
2.2	Weitere Anforderungen an den Hinterfüllbaustoff.....	7
2.3	Arbeitsschritte Anmischen und Verfüllung	10
2.3.1	Allgemeine Vorgaben.....	10
2.3.2	Generell verwendete Produkte	11
2.3.3	Anmischen: Vorgehen und Anforderungen	12
2.3.4	Verpress- / Verfüllvorgang und Anforderungen	16
2.4	Zement-Zusammensetzung und Hydratation	18
2.5	Forschungsstand und Literatur	18
3	Kantonale Anforderungen an Hinterfüllbaustoffe bei EWS	22
3.1	Einleitung	22
3.2	Vorgehen.....	22
3.3	Ergebnisse	23
3.4	Fazit.....	25
4	Statistik der in der CH verwendeten Hinterfüllbaustoffe sowie Qualitätssicherung ...	27
4.1	Einleitung und Vorgehen.....	27
4.2	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	27
5	Merkmale und Vergleich von eingesetzten Hinterfüllbaustoffen	32
5.1	Anforderungen an Hinterfüllbaustoffe	32
5.2	Merkmale Hinterfüllbaustoffe und Anmischenanforderungen.....	33
5.3	Einfluss Typ und Anmischen von Hinterfüllbaustoffen auf Qualität und Langlebigkeit.....	34
5.4	Verbesserte Hinterfüllbaustoffe.....	35
6	Analyse von verpressten Hinterfüllmaterialien	37
6.1	Vorgehen.....	37
6.2	Dichten der beprobten Suspensionen.....	37
6.3	Frostbeständigkeit der Hinterfüllstoffe	40
6.4	Weitere Merkmale der beprobten Baustoffe	42
7	Kontrollmöglichkeiten	43
8	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	45
8.1	Allgemeine Anforderungen an die Hinterfüllung	45
8.2	Kantonale Anforderungen und Empfehlungen	45
8.3	Eingesetzte Hinterfüllbaustoffe, deren Qualität und Empfehlungen	46
8.4	Verbesserte Hinterfüllbaustoffe.....	48
8.5	Fazit: Wie variiert die Qualität der in der Schweiz eingesetzten Mörtel.....	49
8.6	Zusammenfassung der Verbesserungsempfehlungen	49
9	Schlussbemerkungen	50
10	Referenzen	51

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Das vom Bundesrat im Jahr 2001 gestartete Programm EnergieSchweiz, vom Bundesamt für Energie (BFE) geführt, zielt auf die Erhöhung der Energieeffizienz und die Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien ab. Damit soll ein wesentlicher Beitrag zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele geleistet werden. Das Programm fokussiert auf die Sensibilisierung, Information und Beratung, Aus- und Weiterbildung und die Qualitätssicherung in verschiedenen Schwerpunkten.

Erdwärmesonden-Wärmepumpen-Anlagen können bei guter Planung, korrekter Erstellung und richtigem Betrieb eine deutlich höhere Energieeffizienz als Luft/Wasser-Wärmepumpen erreichen. Da die Erstellung einer Erdwärmesonden-Anlage im Vergleich zu anderen Wärmeerzeugungsanlagen kapitalintensiv ist, sind der effiziente Betrieb und die tiefen Betriebskosten entscheidend für die Amortisation der Erstellungskosten. Aus energiepolitischer Sicht gilt es zudem zu verhindern, dass Anlagen mit hohem Effizienzpotenzial ineffizient betrieben werden. Zusätzlich gilt zu beachten, dass nicht fachgerecht erstellte Erdwärmesonden eine Gefährdung für das Grundwasser darstellen können.

Die vorliegende Arbeit soll helfen, die Qualität und Effizienz von Erdwärmesonden zu erhöhen und die Marktsituation besser zu verstehen. Da Erdwärmesonden nach der Erstellung nur begrenzt zugänglich sind, ist es wichtig, dass u.a. das Bohren, der Einbau, die Hinterfüllung korrekt und mit bestmöglicher Qualität erfolgt. Dazu gehört auch die Qualitätskontrolle. Im Bereich der Hinterfüllung kennt man die Situation in der Schweiz kaum. Diese Arbeit für EnergieSchweiz soll diese Lücke schliessen.

In der Schweiz werden derzeit jährlich ca. 2'500'000 Bohrmeter für Erdwärmesonden erstellt. Dabei kommen verschiedenste Hinterfüllbaustoffe von unterschiedlichen Herstellern zum Einsatz. Auch das Anmischen und Verpressen erfolgt häufig in unterschiedlicher Art und Weise. Damit der Grundwasserschutz wie auch die langjährige Funktionstüchtigkeit der Anlagen gewährleistet werden kann, kommt der Hinterfüllung eine wesentliche Bedeutung zu. Nicht nur die Qualität und Langlebigkeit des Baustoffes ist entscheidend, sondern auch das Anmischen und der korrekte Einbau.

Derzeit gibt es keinen umfassenden Überblick, welche Hinterfüllbaustoffe wie häufig und wo eingesetzt werden. Das gleiche betrifft die kantonalen Anforderungen an die Hinterfüllung, mit welcher z.B. der Grundwasserschutz garantiert werden soll. Trotz der Bedeutung der Hinterfüllung werden generell die eingebrachte Suspension sowie der Verpressvorgang selten kontrolliert. Eine umfassende Analyse der verwendeten Hinterfüllbaustoffe in der Schweiz hinsichtlich Qualität und Langlebigkeit besteht bisher nicht.

Die genauen Ziele der Arbeit werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben. Die Arbeiten wurden im Zeitraum August 2017 bis März 2018 ausgeführt.

1.2 Ziele des Projekts

In der Schweiz werden Erdwärmesonden sowohl mit der sogenannten FWS-Standardmischung (Mischverhältnis definiert, Anmischung auf Baustelle) sowie mit Fertigmischungen unterschiedlicher Herkunft hinterfüllt. Nicht bekannt ist, ob die Vorgaben der FWS / der Fertigmischungs-Hersteller korrekt umgesetzt werden und ob alle eingesetzten Fertigmischungen die Anforderungen gemäss Vollzugshilfe des BAFU «Wärmenutzung aus Boden und Untergrund» (2009) erfüllen.

Mit der vorliegenden Studie sollen folgende Punkte untersucht werden:

- Analyse der Merkmale von Hinterfüllbaustoffen und deren Anmischanforderungen inkl. Definition und Vergleich des Einfluss auf Qualität und Langlebigkeit verschiedener Hinterfüllbaustoffe (in Abhängigkeit von Mischverhältnissen und Anmisch-Arten) inkl. Angabe zu Kontroll-Möglichkeiten
- allfällige weiterreichende kantonale Anforderungen an Hinterfüllbaustoffe und deren Anmischung
- Abklärungen über das Kosten-Nutzen Verhältnis von Spezialbaustoffen mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit, Sulfat-Beständigkeit und mit beschleunigter Abdichtung inkl. Beurteilung, ob die angebotenen Produkte die Anpreisung auch tatsächlich einhalten
- Empfehlungen zur Verbesserung der aktuellen Situation

Zum Einsatz kommen verschiedenste Hinterfüllbaustoffe, es werden unterschiedliche Anforderungen gefordert, die Anmischverfahren unterscheiden sich, sowie Kontrollen bzw. Qualitätsprüfungen werden unterschiedlich durchgeführt. Dabei besteht das Hauptproblem, dass nicht ersichtlich ist, ob und wie gut hinterfüllt wurde, wie gut die eingebrachte Suspension ist und ob der verwendete Baustoff den Anforderungen genügt. Alle Faktoren beeinflussen die langfristige Qualität der Hinterfüllung. Eine unzureichende Qualität der Hinterfüllung zeigt sich meist erst nach Jahren, wenn das System nicht optimal läuft (z.B. ungenügende Hinterfüllung, schlechte Ankoppelung an den Fels, nicht frost- o. sulfatbeständig). Die ungünstigste Folge wäre ein Vereisen, weil der Sonde nicht ausreichend Energie zugeführt werden kann.

- Auf Grund der Wichtigkeit der Hinterfüllung wurden folgende Detail-Analysen durchgeführt:
- Abfrage und Statistik der kantonalen Anforderungen an die Hinterfüllung und deren Baustoffe
- Analyse und Statistik der verwendeten Hinterfüllbaustoffe und Vorgehensweisen auf Basis einer Umfrage bei den Bohrfirmen
- Analyse der Merkmale, Qualität, Langlebigkeit der meist verwendeten Hinterfüllbaustoffe sowie Spezialmörtel gemäss allgemeingültigen Anforderungen und Produktdatenblättern der Hersteller sowie Literaturangaben
- Analyse von Suspensions-Proben von der Baustelle sowie dem Vorgehen (Anmischen & Verpressen & Qualitätsprüfungen)

2 Grundlagen Hinterfüllung

Nachfolgend werden die wichtigsten bekannten Anforderungen an die Hinterfüllbaustoffe tabellarisch aufgelistet und im Detail beschrieben. Sie beruhen i. W. auf Anforderungen vom BAFU (Vollzugshilfe 2009), der SIA-Norm 384/6 und FWS (Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz), sowie Anforderungen in Deutschland und generell anerkannten bzw. relevanten Publikationen. Die beschriebenen Anforderungen bilden die Grundlage für die Analyse der Hinterfüllbaustoffe und der Arbeitsschritte der Hinterfüllung. Werden diese Anforderungen eingehalten, so kann davon ausgegangen werden, dass die Qualität der Hinterfüllung gut ist. Die Anforderungen werden im Nachfolgenden in zwei Kapitel unterteilt. Im ersten werden die Mindestanforderungen bzw. Hauptaufgaben der Hinterfüllung beschrieben, welche sich i.W. von den behördlichen Forderungen ableiten. Im zweiten Absatz werden weiterführende bzw. detaillierte Anforderungen gelistet.

2.1 Hauptaufgaben der Hinterfüllung

Jede Erdwärmesonden-Bohrung wird nach dem Setzen der Sondenrohre hinterfüllt. Die Hinterfüllung muss bzgl. des Grundwasserschutzes und den technischen Anforderungen des Wärmesystems bestimmten Anforderungen genügen. Die wichtigsten Anforderungen für die Hinterfüllung von EWS in der Schweiz werden in der SIA 384/6 und der Vollzugshilfe „Wärmenutzung aus Boden und Untergrund“ vom BAFU (2009) genannt. Viele weitere empfohlene Anforderungen werden in verschiedenen Publikationen beschrieben und bewertet; siehe dazu Kapitel 2.5.

Die Hauptaufgaben der Hinterfüllung bei Erdwärmesonden-Bohrungen oder ähnlichen Bohrungen sind (entsprechende Referenzen in Kapitel 2.5):

Aufgabe	Detailangaben und Nutzen
Ankoppelung an den Untergrund	Mit dem bestmöglichen Kontakt zum Untergrund soll der Wärmefluss garantiert werden. Energie soll möglichst widerstandsfrei vom Untergrund zur Sonde und umgekehrt geführt werden können.
Abdichtung des Bohrloches	Damit soll i.W. das Grundwasser dauerhaft geschützt werden (z.B. Vermeidung von hydraulischen Kurzschlüssen oder Austritt der Wärmeträgerflüssigkeit in den Untergrund). Gemäss verschiedensten Studien (siehe Referenzen in Kapitel 2.5) und der Internationalen Gesellschaft für erdgekoppelte Wärmepumpen sollte die Durchlässigkeit bei $\leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ liegen (gemäss BAFU 2009 und FWS 2013 bei $\leq 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$). Dabei sei beachtet, dass die Durchlässigkeit des Gesamtsystems Bohrloch - Hinterfüllung - Sonde generell um 1 bis 2 Zehnerpotenzen grösser ist und Zeit-abhängig ist (Durchlässigkeit nimmt mit dem Alter ab). Die langfristige Dichtigkeit wird durch die Gefügeentwicklung während der Aushärtung aber auch die beigemischten quellfähigen Tonminerale in der Hinterfüllung bestimmt. Hinterfüllungen ohne Tonminerale tendieren eher zu geringeren Durchlässigkeiten mit Rissbildung. Die Abdichtung bzw. Verhinderung eines Grundwasserflusses ist in Sulfat-führenden Gesteinen zwingend, damit Schäden entweder durch Gipsverkarstung und damit verbundenen Setzungen oder Vergipsung von Anhydrit und damit einhergehender Volumenvergrösserung unterbunden werden. Ein bekanntes Bsp. mit Schäden ist Staufen (D).
Abdichtung zur Oberfläche hin	Damit soll verhindert werden, dass z.B. Wasser ein- oder austreten kann oder es zu Verunreinigungen des Grundwassers kommen kann. Oft kommt es im Bohrloch zu Setzungen. Diese oberflächennahen

	Bereiche sollten nachverfüllt oder mit Tonpellets verfüllt werden.
Stabilität gewährleisten	Damit soll das Bohrloch dauerhaft stabilisiert und die Sondenrohre vor Schäden geschützt werden. Dies wird mit einer Mindestfestigkeit erreicht. Die Druckfestigkeit sollte gemäss BAFU 2009 nach 28 Tagen bei min. 1.5 N/mm² liegen. Im Vergleich zu Beton im Bauwesen mit Werten von min. 20 N/mm ² ist der Wert tief! Damit die Mindestwerte erreicht werden, bedingt es nicht nur einen guten Baustoff, sondern auch ein korrektes Verarbeiten und Verpressen.

Für diese Aufgaben genügt ein Standardzement wie er z.B. in der SIA 384/6 Absatz F.3 beschrieben wird: 100 kg Bentonit + 200 kg Zement + 900 l Wasser. Weitere wichtige Anforderungen an die Hinterfüllbaustoffe betreffen deren Eigenschaften bzgl. Qualität, Langlebigkeit, Handhabung und Einbau und werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

2.2 Weitere Anforderungen an den Hinterfüllbaustoff

Generell und mit zunehmenden Mass werden weitere thermische, rheologische und mechanische Anforderungen an den Hinterfüllbaustoff gestellt. Diese sind abhängig von Geologie, dem Wärmesystem, hydrogeologischen Aspekten und Wünschen bzgl. Qualität und Verarbeitung. Weitere Anforderungen sind (entsprechende Referenzen in Kapitel 2.5):

zusätzliche Anforderungen	Detailangaben und Nutzen
Dichte	<p>Die Suspensions-Dichte bei Eintritt in das Bohrloch sollte bei mind. 1.1-1.3 kg/dm³ liegen (BAFU 2009, FWS 2013 bzw. Referenzen in Kapitel 2.5), damit Bohrschlamm / Wasser möglichst vollständig aus dem Bohrloch verdrängt werden kann. Die Dichte sollte je nach Referenz ca. 0.1-0.3 kg/dm³ grösser als die der Bohrspülung bzw. Grundwasser sein. Die meist verwendete Dichte liegt bei ca. 1.4-1.6 kg/dm³. Die Dichte sollte den Herstellerangaben entsprechen, kontrolliert und protokolliert werden! Der Wasser / Feststoff-Wert sollte zwischen 0.2 und 1.0 liegen (Empfehlungen Bund/ Länder-arbeitsgruppen 2015). Bei Wasser / Feststoff-Werten >0.4 verbleibt auch nach vollständiger Hydratation Wasser in den Poren. Je höher der Wassergehalt, desto weniger frostbeständig sind die Hinterfüllungen und desto geringer ist die Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Dichtigkeit, sowie steigt das Absetzmass (Arbeit des Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech 2016). Umgekehrt lassen sich die Suspensionen leichter verpressen.</p> <p>Die Dichte der Suspension muss auf die Sonden-Tiefe angepasst sein, damit es nicht zu einem Quetschen der Sondenrohre kommt (SIA 384/6 F.3). Der durch die Suspension wirkende Aussendruck auf das Sondenrohr, welches mit Wasser gefüllt ist und druckdicht verschlossen ist, darf bei PN16 (PN20) Sonden max. 8 bar (12 bar) grösser sein als der Innendruck bzw. der innere Überdruck von innen nach aussen darf 21 bar (25 bar) nicht überschreiten.</p>
Wärmeleitfähigkeit	<p>Eine optimale Wärmeleitfähigkeit stellt sicher, dass der Wärmefluss zwischen Untergrund und Sondenrohr gut funktioniert. Von Vorteil ist es, wenn die Wärmeleitfähigkeit dem Untergrundmaterial ähnelt, aber zumindest dem Wert von 0.85 W/mK der Standard - Hinterfüllung aus der SIA 384/6 entspricht.</p> <p>Thermisch verbesserte Hinterfüllbaustoffe mit entsprechenden Zuschlagstoffen wie Graphit, Quarzmehl oder Eisenpulver verkleinern</p>

	<p>den Bohrlochwiderstand und ermöglichen somit, dass Wärme bzw. Kälte schneller vom Untergrund zur Sonde und umgekehrt gelangen können. Diese werden zunehmend bes. bei EWS-Feldern und bei Systemen mit Wärme-Kälte-Nutzung eingesetzt. Die Effizienzsteigerung kann bei mehreren Baustoffen liegen. Thermisch verbesserte Baustoffe zeigen Trocken-Werte von ca. 2 W/mK, wobei diese in der Realität je nach Mischverhältnis und hydrogeologischen Einflüssen variieren.</p>
Frostbeständigkeit	<p>Die Erfahrung zeigt, dass besonders mit zunehmender Nutzungsdauer System-Temperaturen von unter 0°C möglich sind (BFE-Bericht 2017 «Analyse von Erdwärmesondenanlagen», Rohner & Rybach 2001). Deshalb wird ein frostschutz-sicheres Fluid als Wärmeträgermedium eingesetzt, das auch einen Betrieb von <0°C zulässt. Vermehrt werden Schadensfälle auf Grund einer Durchfrostung bekannt.</p> <p>Bei Betriebstemperaturen von <0°C kommt es zu Frost-Tau-Zyklen im Nahbereich der Sonde während der Ein- und Ausschaltvorgänge der WP. Ein nicht frostsicherer Hinterfüllbaustoff, wie z.B. der Standardzement gemäss SIA 384/6 Absatz F.3 oder häufig verwendete Fertigbaustoffe, kann durch wiederholtes Gefrieren und Auftauen geschädigt werden. Durch Eisbildung und damit verbundener 9% Volumenausdehnung bilden sich Risse im Hinterfüllbaustoff. Durch eindringendes Felsgrundwasser in die Risse wird das Gefüge kontinuierlich durch weitere Frost-Tau-Zyklen weiter geschwächt. Dadurch kann der Hinterfüllbaustoff seine Aufgaben der Abdichtung, Festigkeit und guten Ankopplung an den Untergrund und somit seine Funktionalität und Langzeitstabilität nicht mehr gewährleisten. Neben dem schlechteren Wärmeentzug und Verlust des Grundwasserschutzes kann es auch zu Sekundärschäden kommen, wie z.B. Hebungen o. Setzungen. Die schlechtere Wärmeübertragung führt zu noch tieferen Systemtemperaturen und folglich zu einem weiteren Schadenspotential.</p> <p>Es sollte ein unabhängiges Prüfzeugnis bzgl. einer Frost-Tau-Beständigkeit vorliegen. Allerdings bestehen derzeit keine standardisierten Prüfmethode bzgl. der Frostbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen bei EWS. Verschiedenste Arbeiten zeigen, dass die Art und Weise wie die Prüfungen durchgeführt werden, entscheidend die Resultate beeinflussen (siehe Referenzen in Kapitel 2.5). Grundsätzlich sollte der Baustoff nach häufigen Frost-Tau-Wechseln (z.B. 6x gemäss VDI 4640) eine geringe irreversible Gefügelockerung aufweisen. Sinnvolle Kriterien dafür sind z.B. kein Abplatzen, geringe Rissbildung, Massenkonzanz, geänderte Durchlässigkeit von max. einer Zehnerpotenz, konst. Ultraschallgeschwindigkeiten, Anteil quellfähiger Tonminerale (siehe auch Kapitel 2.5). Der beste Frostschutz ist aber immer noch eine ausreichende Dimensionierung. Alternativ kann auch auf ein Frostschutzmittel verzichtet werden und die EWS mit reinem Wasser betrieben werden.</p> <p>Die Frostsicherheit der Hinterfüllung wird häufig als wenig wichtig angesehen, da nach SIA 384/6 so dimensioniert werden sollte, so dass die gemittelte Fluid-Temperatur nach 50 Jahren noch min. -1.5°C beträgt und somit die Hinterfüllung gerade noch nicht bzw. wen nur teilweise gefriert. In Deutschland wird / wurde nach VDI weniger grosszügig dimensioniert. Folglich ist dort der Frostschutz wichtiger.</p>
Sulfatbeständigkeit	<p>Die Sulfatbeständigkeit wird besonders in Gebieten mit Gips- u. Anhydrit-reichen Schichten gefordert. Damit soll verhindert werden, dass die Zement-aggressiven Felsgrundwässer den Zement zersetzen. Sulfate gehören zu den Wasserinhaltsstoffen, die Beton und Zement am</p>

	<p>stärksten angreifen.</p> <p>Je nach Zusammensetzung des Hinterfüllbaustoffes (Tricalciumaluminat C_3A, Sulfat, Kieselsäure, Karbonat), Temperaturen, pH und Sulfatkonzentrationen kann Ettringit (Calciumaluminatsulfat) oder Thaumasit (Calciumsilicatcarbonatsulfathydrat) entstehen (siehe Referenzen Kapitel 2.5). Dabei kommt es durch Volumenvergrößerung (Sulfattreiben) bzw. lösenden Angriff zu einer Rissbildung bzw. Gefüge-Entfestigung.</p> <p>In sulfatbeständigen Baustoffen sollte daher der C_3A-Gehalt bestimmte Grenzen nicht überschreiten, damit sich Ettringit nicht mit Hilfe von reaktiven Aluminiumverbindungen bilden kann. Bzgl. der Thaumasitbildung werden besonders an die Bindemittel höhere Anforderungen gesetzt (z.B. höhere Dehnfähigkeit). Bzgl. der Sulfatbeständigkeit bestehen noch keine genormten Prüfverfahren. Die ausgewiesenen Prüfverfahren dürfen somit kritisch hinterfragt werden.</p>
Technische Anforderungen	<p>Festigkeit, welche je nach Anforderung unterschiedlich rasch einsetzen sollte. Nach 7 Tagen sollte die einaxiale Druckfestigkeit min. 1 N/mm^2 und nach 28 Tagen min. 1.5 N/mm^2 erreichen (BAFU 2009). Die Erfahrung zeigt, dass der Sondenkopf nach der Hinterfüllung oft rasch geöffnet wird. Hier ist eine rasche Eigenfestigkeit wichtig, damit ein Quetschen der Sondenrohre verhindert werden kann. Eine niedrige Entfestigung gewährleistet eine dauerhafte Stabilität.</p> <p>Ein geringes Schwinden bzw. Setzen im Bohrloch, damit eine Volumen-Konstanz gewährleistet wird. Damit dies gering ist und eine gleichbleibende Festigkeit über die gesamte Bohrlochsäule erreicht wird, sollte die Suspension möglichst stabil und homogen sein. Diese wird mit dem Absetzmass bzw. dem Sedimentationsverhalten definiert (BAFU 2009, FWS 2013: Absetzmass max. 2% der Bohrtiefe bzw. max. 5 m).</p> <p>Ein gutes thixotropes Verhalten ist für den optimalen Einbau bzw. Verpressvorgang von Vorteil. Eine Fließfähigkeit mit einer Fließgrenze von $10 - 70 \text{ N/m}^2$ ist anzustreben (Empfehlungen Bund/ Länderarbeitsgruppen 2015). Die Viskosität der Suspension sollte so gering sein, dass alle Hohlräume gefüllt werden, aber auch so hoch, dass die Suspension nicht unnötig in den Untergrund abfließt. Ein Mass dafür ist die Trichterauslaufzeit von einem Liter Suspension aus einem Marshtrichter, welche zwischen 40-100 Sekunden liegen sollte (Empfehlungen vom Arbeitskreis „Geothermie“ 2015). Die plastische Viskosität ist ebenfalls ein Mass mit Werten im Bereich von $0.25 - 1.25 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Arbeit des Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech 2016).</p> <p>Eine optimale Verarbeitungsdauer garantiert ein nicht zu schnelles Abbinden, damit eine vollständige Hinterfüllung garantiert werden kann, aber das Hinterfüllmaterial trotzdem im Bohrloch rasch abbindet.</p> <p>Eine hohe Ergiebigkeit und eine geringe Erosionsfähigkeit sind aus wirtschaftlichen Gründen von Vorteil.</p> <p>Zum Schutz der Sondenrohre sollte die Hydratationswärme die von den Herstellern angegebenen Einsatzbereiche für übliche Sondenrohre von bis zu 40°C nicht überschreiten. Auf Grund dem eher kleinen Ringraumvolumen, dem geringeren Anteil an Klinkermaterial und der Wärmeableitung in den Fels / Grundwasser erhöht sich im Normalfall die Temperatur in der Erdwärmesonde um max. wenige $^\circ\text{C}$ (Touzin</p>

	<p>2017). Eine langsame Reaktion und folglich geringere Freisetzung der Hydratationswärme ist auch für die Gefügeentwicklung wichtig, da schnelle Reaktionen und hohe Temperaturen zu Spannungen, Schwinden und somit Rissen führen können.</p> <p>Bei Fertigmischungen sind zwingend die Anmisch-Angaben des Herstellers einzuhalten. Nur so werden oben genannten Eigenschaften eingehalten. Bei tiefen Bohrungen muss die Dichte der Hinterfüllung beachtet werden. Damit die Sondenrohre bei tiefen Sonden nicht nachhaltig gequetscht werden, sollte nicht die Rezeptur der Mischung geändert werden, sondern ein angepasster Hinterfüllbaustoff mit geringerer Dichte oder eine Stufenzementation zum Einsatz kommen (siehe SIA 384/6, F.3).</p>
Umweltverträglichkeit	<p>Der Baustoff darf das Grundwasser nicht gefährden bzw. muss unbedenklich sein. Entsprechend sollte er geprüft sein. Das betrifft z.B. den pH-Wert, welcher sich im umliegenden Grundwasser nicht wesentlich erhöhen sollte. Generell findet während der Aushärtung eine gewisse Beeinträchtigung statt (z.B. geringe pH-Erhöhung, Suspensionsverluste je nach Durchlässigkeit im Untergrund, chemische Reaktionen je nach Gewässerchemie), ist aber auf Grund der Mengen unbedeutend. Entsprechende Prüfzertifikate sollten vorhanden sein.</p>
chemische Beständigkeit	<p>Je nach Gewässerchemie sollte der Baustoff bei vorhandener kalklösender Kohlensäure wie auch austauschfähigen Salzen (Magnesium- u. Ammoniumsalze) stabil sein. Eine Carbonatisierung führt je nach Feuchtigkeit zu einem Schwinden oder Quellen. Auch das Quellverhalten von Tonen bei Vorhandensein von gelöstem Salz darf sich nicht ändern, da sie sonst ihre zusätzliche abdichtende Wirkung verlieren (z.B. Empfehlungen Bund/ Länderarbeits-gruppen 2015 und Arbeit des Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech 2016).</p>

Für die **langfristige Qualitätssicherung** der Erdwärmesonde sind besonders die Parameter Dichtigkeit, Frostbeständigkeit und Sulfatbeständigkeit von Bedeutung. Die anderen Parameter sind vielmehr für das kurzfristige korrekte Gelingen der Erdwärmesonde entscheidend. Werden letztere nicht erfüllt, hat das aber ebenfalls einen Einfluss auf die langfristige Funktionstüchtigkeit der Erdwärmesonde. Höhere **Gehalte an quellfähigen Tonmineralen** (meist Montmorillonit) begünstigen die Langlebigkeit, z.B. durch die Fähigkeit der Selbsteilung durch die langanhaltende Quellfähigkeit bei z.B. Frost- oder Sulfatschäden, sowie ermöglichen eine höhere Widerstandsfähigkeit gegen aggressive Wässer, ein geringeres Setzungsverhalten und eine höhere Frostbeständigkeit.

2.3 Arbeitsschritte Anmischen und Verfüllung

2.3.1 Allgemeine Vorgaben

In der Schweiz werden die Anforderungen an die Hinterfüllung gemäss den Richtlinien vom BAFU geregelt (**Vollzugshilfe „Wärmenutzung aus Boden und Untergrund“ vom BAFU 2009**). Auf diese beziehen sich auch die SIA 384/6, sowie die meisten kantonalen Merkblätter. Die detaillierten Anforderungen an den Baustoff sind in den beiden Kapiteln 2.1 und 2.2 genannt. Bzgl. dem Vorgehen bei der Hinterfüllung wird folgendes vorgeschrieben: *„Die Erdwärmesonde ist bei gesetzter Verrohrung ohne Verzug nach Einsetzen in das Bohrloch vom Bohrlochfuss her mit einer aushärtenden Suspension bis zur Oberfläche vollständig und lückenlos zu hinterfüllen. Die Hinterfüllung ist über ein beim Sondenfuss befestigtes, im Bohrloch verbleibendes zusätzliches Rohr vorzunehmen. Für eine zweckmässige Suspension gelten die Richtwerte nach Anhang A7. Die Menge der Suspension ist zu erfassen. Übersteigt der Bedarf an Suspension das Zweifache des Bohrlochvolumens, so ist der Hinterfüllungsvorgang vorerst zu unterbrechen und die zuständige Behörde zu informieren.“*

Etwas detaillierter wird im Absatz 6.17-20 im Reglement von der Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS (**Gütesiegel für Erdwärmesonden – Bohrfirmen, Reglement 2013**) die Hinterfüllung beschrieben: „Die Erdwärmesonde ist ohne Verzug nach Einsetzen in das Bohrloch vom Bohrlochfuss her mit einer plastisch aushärtenden Suspension bis zur Oberfläche vollständig und lückenlos zu hinterfüllen. Die Hinterfüllung ist über ein beim Sondenfuss befestigtes, im Bohrloch verbleibendes zusätzliches Rohr vorzunehmen. Für die Suspension gelten u.a. die folgenden Mindestanforderungen:

- *spezifisches Gewicht der Suspension: mindestens 1.2 kg/dm³ bzw. nach Herstellerangaben,*
- *Eigenschaften in ausgehärtetem Zustand: Durchlässigkeitsbeiwert $k_f \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s, keine Rissbildung, keine Sedimentation (Opalit ist nicht zugelassen). Die Setzung der Suspension darf 2% der Bohrtiefe, maximal 5 m, nicht überschreiten, ansonsten ist eine geeignete Nachverfüllung auszuführen.*

Zum Beispiel erfüllt folgende Standardmischung für 1 m³ Suspension diese Bedingungen: 100 kg Bentonit, 200 kg Zement und 900 kg Wasser. Es dürfen nur Zuschlagsstoffe ohne Umweltgefährdung eingesetzt werden. Bei Fertigmischungen sind die Mischverhältnisse nach Vorschrift des Herstellers einzuhalten.

Pro Bohrauftrag muss mindestens eine Injektionsanlage auf Platz sein. Die Verrohrung darf erst nach erfolgter Hinterfüllung gezogen werden. Nach erfolgter Hinterfüllung wird eine Durchflussprüfung und eine Dichtheitsprüfung nach SIA 384/6 durchgeführt und protokolliert.“

In der **SIA-Norm 384/6 F.3** wird zusätzlich auf die Dichte der Suspension eingegangen, um ein Quetschen der Sondenrohre zu verhindern. Der Differenzdruck von aussen nach innen darf am Erdwärmesondenfuss je nach Festigkeit und Tiefe/Länge der Sonde sowie Dichte der Hinterfüllung bestimmte Werte nicht überschreiten. Siehe dazu auch Kapitel 2.2 und 2.3.2. Z.B. kann eine Suspension mit einer Dichte von 1.6 t/m³ bei PN16 Sonden nur bis 340m tiefe / lange Sonden eingebaut werden, da sonst der Kopfdruck in der verschlossenen Sonde den kurzfristig erlaubten Druck von 21 bar überschreiten würde. Als Alternative müsste eine Stufenzementation erfolgen oder eine leichtere Hinterfüllung verwendet werden. Bei einer Dichte der Suspension z.B. von 1.4 t/m³ könnte die druckdicht verschlossene Sonde tiefer als 400 m eingebaut werden. Es sei angemerkt, dass die Dichte der Suspension immer gemäss Angaben des Herstellers anzumischen ist. Wird eine leichtere Hinterfüllung benötigt, so muss eine entsprechende Fertigmischung mit vorgegebener geringerer Dichte verwendet werden. Solche z.B. mit Werten von 1.25 t/m³ sind auf dem Markt erhältlich.

Das Anmischen selber, weiterführende konkrete Anforderungen an den Baustoff, sowie Kontrollen bzw. Prüftests auf der Bohrstelle sind nicht genormt und werden selten kontrolliert. Entsprechend kommen verschiedenste Materialien, Mischgeräte und Verpressvorgehen zum Einsatz (siehe auch Kapitel 4). Auch die Kontrolle der Hinterfüllung sowie des Verpressvorgangs durch den Bohrmeister werden unterschiedlich gehandhabt.

Weitere aktuelle und vergleichsweise detaillierte Leitfäden sind (siehe auch Kapitel 2.5):
Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie vom dt. Arbeitskreis Geothermie (2015)
Empfehlungen zur Durchlässigkeit der dt. Bund-Länderarbeitsgruppe (2015).

Das allgemeine Vorgehen bei der Erstellung und Hinterfüllung einer Erdwärmesonde ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

2.3.2 Generell verwendete Produkte

Am häufigsten kommen Fertigmischungen in Sackware zum Einsatz. Eigenmischungen werden selten verbaut. Es kommen verschiedenste Baustoffe mit unterschiedlichsten Eigenschaften zum Einsatz (siehe nachfolgende Kapitel). Wenn keine Forderungen von Seiten Behörde oder Planer bzw. Bauherr gestellt werden, werden günstige und gut verarbeitbare Standardprodukte eingesetzt. Die Vorteile von Fertigmischungen gegenüber Eigenmischungen sind, dass sich die verpressten Mengen, Eigenschaften und Vorgaben vom Hersteller bei Fertigmischungen besser kontrollieren lassen. Zudem ist die Gefahr bei Fertigmischungen geringer, dass der Hinterfüllbaustoff z.B. die Frost- und Sulfatbeständigkeit, Dichtigkeit im Bohrloch oder Wärmeleitfähigkeit nicht einhält. Beim Produkt sollten immer die Bedürfnisse und Anforderungen beachtet werden, wie z.B. eine verbesserte thermische Eigenschaft, eine geringere Dichte bei sehr tiefen Sonden oder behördliche Auflagen (z.B. Sulfatbeständigkeit). Bei Sonden mit

Regeneration bzw. thermischer Aufladung muss beachtet werden, ob hohe Temperaturen das Hinterfüllungsmaterial durch Austrocknung und Schwinden schädigen könnten.

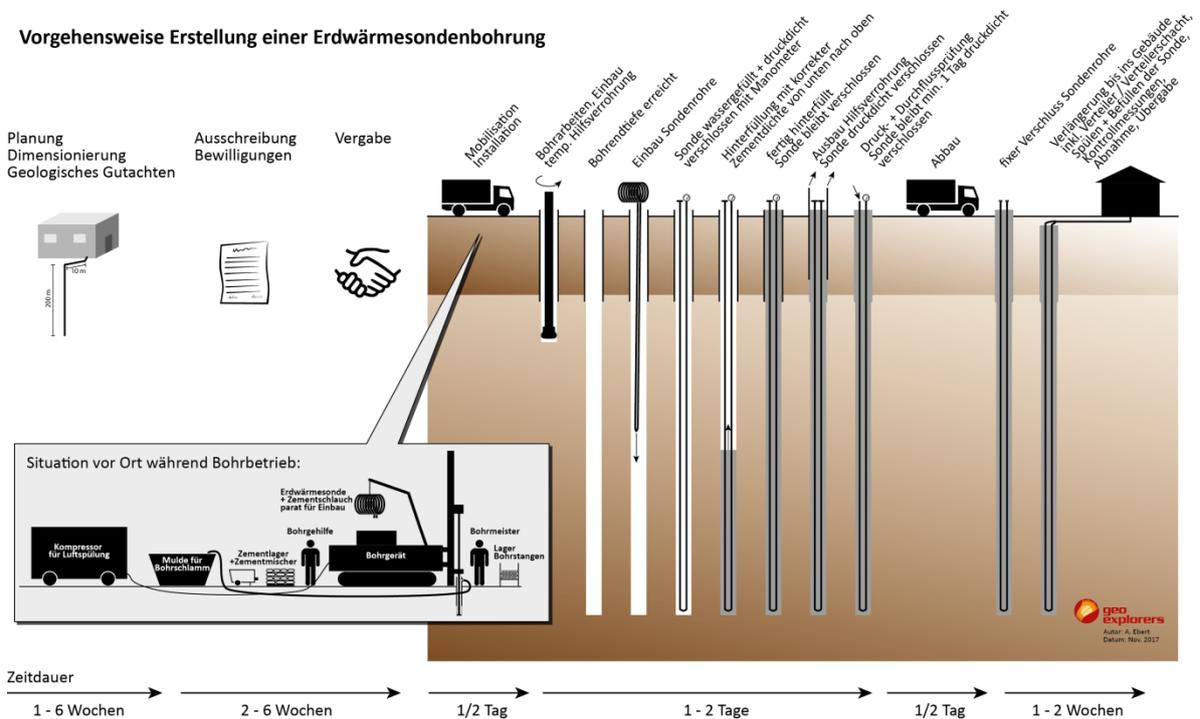


Abb. 1 Vorgehensweise bei der Erstellung einer EWS

2.3.3 Anmischen: Vorgehen und Anforderungen

Der Trockenbaustoff, meist eine Fertigmischung, wird auf der Baustelle mit Wasser angemischt und dann sofort verarbeitet. Das Anmischen erfolgt z.B. mit einem Kolloidalmischer.

Die Qualität und Eigenschaften der Hinterfüllung hängen nicht nur vom Baustoff ab, sondern auch von der Art und Weise wie die Suspension angemischt bzw. hergestellt wird. Dabei sind besonders die tatsächliche Dichte und Homogenität der einzubringenden Suspension, aber auch die Mischintensität und Verweil- bzw. Quellzeit von Bedeutung. Die Anmischgeräte müssen entsprechend gut dosierbar sein, ausreichend mischen können und dem Produkt die richtige Misch- bzw. Quellzeit gewährleisten können. Nur so können alle Bestandteile im Baustoff (u.a. die Kolloide) richtig aufgeschlossen werden. Generell werden Mischzeiten von einigen bis zehn Minuten empfohlen. Sehr wichtig ist, dass die korrekte Dichte gemäss Herstellerangaben eingestellt wird. Dabei sollte diese nicht nach Augenmass erfolgen, wie es meist erfolgt, sondern die Dichte gemessen werden. Dies kann z.B. mit einem Aräometer oder einem einfachen Abwiegen eines definierten Volumens erfolgen. Zudem sollte beachtet werden, dass die eingebrachte Suspension homogen ist, nicht klumpt und eine korrekte Viskosität aufweist (z.B. Marschzeiten von grob einer Minute).

Generell kommen drei Anmischgeräte zum Einsatz: Kolloidalmischer, Zwangs-/ Durchlaufmischer bzw. Mörtelmischpumpen und das Anmischen in einer grossen Wanne. In der Schweiz erfolgt der grösste Teil des Anmischens mit Hilfe der Zwangsmischer und Kolloidalmischer, wobei man die Zwangsmischer etwas häufiger im Einsatz sieht. Wannen werden vergleichsweise selten verwendet (siehe auch Kapitel 4).

Kolloidalmischer (Abb. 2):

Die Sackware bzw. der Zement wird über ein Gitter zusammen mit Wasser in einer Mischwanne von ca. 150 l mit Hilfe von einem Rührgerät mit hoher Scherkraft zu einer homogenen Suspension

verarbeitet. Die Mischung wird dann in einen zweiten Nachbehälter (ca. 150-300 l) gepumpt, in welchem der optimale Aufschluss der quellfähigen Kolloide (Tonminerale) erfolgt. Aus diesem wird die Suspension mit Hilfe von einer Exzentrerschneckenpumpe über den Injektionsschlauch in den Ringraum gepumpt. Auf Grund der zwei Wannen ist ein rasches Verpressen möglich und es muss nicht lange gewartet werden, bis das Mischen und der Aufschluss der Kolloide erfolgt ist. Die Mischqualität kann sehr gut kontrolliert werden, sodass eine gleichbleibende homogene, stabile Suspension entsteht, die wenig sedimentiert und gute Flieseigenschaften zeigt. Die Mischverhältnisse, Misch- und Quellzeiten der Hersteller sind zu beachten. Die Förderleistung ist etwas höher als bei den Zwangs- bzw. Durchlaufmischern. Dafür benötigt er etwas mehr Strom und das Handling ist geringfügig aufwändiger.



Abb. 2 Kolloidalmischer

Zwangsmischer / Durchlaufmischer / Mörtelmischpumpe (Abb. 3):

Die Sackware bzw. der Zement werden über ein Einfüllgitter in eine trichterartige Kammer geschüttet und von dort mit einer Schnecke in eine kleine Mischkammer befördert, wo der Zement mit eingespritztem Wasser kontinuierlich gemischt und sofort in das Injektionsrohr gepumpt wird. Im Unterschied zum Kolloidalmischer wird die Suspension nicht chargenweise angemischt und dann verpresst, sondern kontinuierlich.

Es bestehen unterschiedliche Meinungen, ob dadurch schneller hinterfüllt werden kann. Ein Vorteil ist sicher, dass es sich um ein einfaches, handliches und leicht zu bedienendes Gerät handelt. Zudem muss mit Frischwasser gearbeitet werden. Es ist somit nicht möglich, dass Bohrschlamm /-wasser zugemischt wird, wie es vereinzelt bei den anderen Mischsystemen schon vorgekommen ist.

Nachteile sind, dass die Suspension im Vergleich zum Anmischen im Kolloidalmischer oder in der Wanne weniger gut kontrolliert werden kann, so dass eine Homogenität und korrekte Dichte nur garantiert ist, wenn die Sackware sowie Wasser konstant zugeführt werden und vorweg die Dichte mittels der Justierung der Wasserzufuhr eingestellt wurde. Die Erfahrung zeigt, dass es Bohrmeister gibt, die die Mischer sehr gut im Griff haben, aber auch dass während der Hinterfüllung willkürlich an der Wasserzufuhr gedreht wird und es immer wieder personenbedingte

Lücken bei der Zementzugabe gibt und dann nur Wasser gepumpt wird. Oft beobachtet man Probleme durch ein Verstopfen der Schnecke und wiederholt auch ein Platzen des Injektionsschlauches zwischen Mischgerät und Bohrlochkopf. Letztere liegt wahrscheinlich meist daran, dass das Wasser/Feststoff Verhältnis und/oder die Homogenität der Suspension nicht mehr korrekt ist; z.T. auch durch variierende Druckverhältnisse bei der Wasserzufuhr auf der Baustelle hervorgerufen. Gemäss Lieferant wird empfohlen, dass die Anwender regelmässig geschult werden, die Mischer korrekt gewartet werden und zwingend die Dichte zu Beginn und am Ende des Mischvorgangs mit einer Waage gemessen und protokolliert wird und entsprechend die Wasserzufuhr also der W/F-Wert richtig eingestellt wird. Zudem erfolgt der eigentliche Aufschluss der quellfähigen Tonanteile erst im Ringraum.



Abb. 3 Mörtelmischpumpe

Anmischen in einer Wanne (Abb. 4):

Wenige Bohrfirmen mischen die Suspension der Hinterfüllung auch in einer Wanne an. Dies erlaubt das Anmischen einer grösseren Menge, die auf einmal in den Ringraum gepumpt werden kann. Es kann die Fertigmischung wie auch eine Eigenmischung angemischt werden. Der Nachteil kann sein, dass je nach Abschätzung die Menge nicht ausreicht oder umgekehrt reichlich Suspension übrig bleibt und entsorgt werden muss. Bei der Anmischung in einer grossen Wanne muss darauf geachtet werden, dass das gesamte Suspensionsvolumen gut und homogen durchmischt wird und gleichwohl die Misch- und maximalen Verweilzeiten eingehalten werden. Gegenüber den Zwangsmischern hat die Wanne den Vorteil, dass die Homogenität und Dichte der Suspension besser kontrolliert und einfacher erreicht werden kann.



Abb. 4 Wanne zum Anmischen der Suspension

Beim Mischen der Baustoffe mit dem Wasser sollte folgendes beachtet werden:

- Verwendung von Baustoffen, die den in Kapitel 2.1 und 2.2 genannten **Mindestanforderungen** genügen. Ev. werden sulfatbeständige Baustoffe verlangt.
- **Ausreichend Baustoff** auf der Baustelle. Die Erfahrung zeigt, dass dies wiederholt nicht der Fall ist. So kann nicht lückenlos von unten bis nach oben verfüllt werden. Es sollte vorgängig das benötigte Volumen berechnet werden. Dabei sollten Zementverluste bei entsprechender Geologie (z.B. Karst, Störzonen) mit einem entsprechenden Zuschlag eingerechnet werden. Der Baustoff muss feuchtigkeitsgeschützt gelagert werden.
- **Dichte der Suspension** und deren **regelmässige Kontrolle** während des Anmischens speziell beim Zwangsmischer. Die Dichte ist die einfachste und genaueste Möglichkeit zu kontrollieren, ob die Suspension den Herstellerangaben konform angemischt wurde (Datenblatt beachten!). Nur so kann die Hinterfüllung eine ausreichende Festigkeit erlangen und die Suspension die Bohrspülung bestmöglich und vollständig im Bohrloch verdrängen. Ist die Suspension zu dünnflüssig, erlangt die Hinterfüllung nicht ihre geforderte Mindestfestigkeit. Im schlechtesten Fall bleibt eine Erhärtung aus. Zudem wird die angestrebte Wärmeleitfähigkeit nicht erreicht und kann sich die Suspension entmischen mit der Folge von einer zu geringen Dichtigkeit bzgl. dem Grundwasserschutz und entstehenden Wasserkammern, die potentiell gefrieren können und so das Gefüge der Hinterfüllung zerstören können.
- **Homogenität.** Die Suspension darf nicht klumpig sein.
- **Viskosität** gemäss Hersteller damit die Suspension gut verpresst werden kann und der Druck im Injektionsschlauch nicht zu hoch wird.
- **Marshzeit.** Höhere Werte (also zähflüssiger) können positiv sein, damit das Bohrloch vollständig und lückenlos gefüllt wird (Trichterauslaufzeit ca. 40-100 Sekunden).
- **Absetzmass** von <1.5% sollte angestrebt werden.
- Die Suspension darf sich **nicht entmischen**.

- **Protokollierung** mindestens von Baustoff, Produktionsdatum, Menge. Nur so gibt es Unterlagen bei möglichen Schadensfällen.

Bei Eigenmischungen ist die Qualitätssicherung und -prüfung ein Problem. Bei Fertigmischungen ist die Dichte oft zu hoch (siehe Kapitel 6).

2.3.4 Verpress- / Verfüllvorgang und Anforderungen

Zusammen mit der Erdwärmesonde wird das Injektionsrohr, welches am Sondenfuss befestigt ist, in das Bohrloch eingebracht. Die Sondenrohre sind wassergefüllt und druckdicht verschlossen, bevor mit der Hinterfüllung begonnen wird. Der druckdichte Verschluss vermindert die Gefahr, dass die Sondenrohre durch die Suspensionsäule im Ringraum gequetscht werden. Je nach Sondentiefe und Suspensionsdichte sollte ein weiteres Injektionsrohr, z.B. bis auf halbe Bohrlochtiefe mitgeführt werden, damit eine Stufenzementation möglich ist. Verfüllgestänge kommen in der Schweiz vergleichsweise selten bis gar nicht zum Einsatz.

Damit die Bohrspülung vollständig verdrängt wird, erfolgt die Verfüllung des Ringraumes im Kontraktorverfahren. Die angemischte und geeignete Suspension wird von unten nach oben verpresst. Es wird solange verfüllt bis die Suspension an der Oberfläche austritt und die Dichte der austretenden Suspension der eingebrachten entspricht (Abb. 1). Letztere ist natürlich abhängig von der Umgebung. Je nach Anmischgerät erfolgt die Verfüllung chargenweise oder kontinuierlich. Zur Kontrolle des Sondendrucks (max. ist ein Druck von innen nach aussen bei PN16 von 21 bar erlaubt (siehe Kapitel 2.2)) muss am Sondenkopf ein Manometer montiert sein. Die Sondenrohre bleiben bis zur teilweisen Aushärtung der Suspension druckdicht verschlossen. Dies sind gemäss den Hydratationsphasen min. einige Stunden (siehe Kapitel 2.4). Häufig wird hierbei fälschlicherweise angenommen, dass die Suspension innerhalb einer Stunde standfest ausgehärtet ist. Um trotzdem der Problematik des Ziehens der Schutzverrohrung nachkommen zu können, bieten sich druckdichte Kupplungen an. Diese werden auch von mehreren Bohrfirmen eingesetzt, sodass die temporäre Schutzverrohrung trotzdem gezogen werden kann. Falls dies nicht erfolgt, sollten die Sondenrohre zumindest so rasch wie möglich nach dem Ziehen wieder aktiv unter Druck gesetzt werden. Das Injektionsrohr verbleibt generell im Bohrloch und wird ebenfalls verfüllt.

Bei tiefen Sonden muss eine Stufenzementation erfolgen, damit die Sondenrohre nicht gequetscht werden oder der Innendruck im Sondenrohr nicht zu hoch wird. Dies betrifft je nach Suspensionsdichte Sondentiefen ab ca. 250 m. Die Erfahrung zeigt nämlich, dass ab diesen Tiefen immer wieder zu hohe Drücke im Sondenrohr o. Injektionsrohr erreicht werden und der Verpressvorgang abgebrochen werden muss. Bei einer Stufenzementation wird nach einer Wartezeit (die Suspension muss teilweise ausgehärtet sein) über den zweiten Injektionsschlauch die Hinterfüllung fortgesetzt. Die Erfahrung zeigt, dass wiederholt erst nachträglich ein Injektionsschlauch von oben in die Bohrung gestossen wird und über dieses die weitere Hinterfüllung erfolgt. Da das Injektionsrohr meist kurz ist bzw. dieses selten auf grössere Tiefe runtergestossen werden kann, muss davon ausgegangen werden, dass die Hinterfüllung von oben lückenhaft sein wird.

Setzungen der Hinterfüllung lassen sich nicht vermeiden und kommen häufig vor. Diese können bei nicht zu grossen Setzungsbeträgen mit Tonpellets gefüllt werden.

Bei der Hinterfüllung sollte folgendes beachtet werden:

- **Lückenlos** von unten nach oben, damit vollständige lückenlose Hinterfüllung gewährleistet werden kann (→ Wärmefluss garantiert, keine Wasserwegsamkeiten)
- **Vorgaben** der Behörden beachten, z.B. Packer, Strumpf, Zementtyp (z.B. sulfatbeständig)
- **Suspensionsdichte** grösser als die der Bohrspülung, damit die Bohrspülung vollständig nach oben aus Bohrloch verdrängen wird (generell wird eine Dichte von ca. $\geq 1.2 \text{ kg/dm}^3$ empfohlen)
- **Herstellerangaben** der Rezepturen zwingend einhalten, damit die Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit erreicht werden
- Festigkeit des **Injektionsschlauches** beachten (kurzzeitig ca. 34 bar, es kommt immer wieder vor, dass dieser platzt, weil die Suspension zu dick ist bzw. der Einpressdruck zu hoch sind)

- Bohrmeister sollte während dem Bohrvortrieb **Hohlräume erkennen** und dokumentieren (z.B. Durchsacken beim Bohren o. plötzliche starke Wasserzutritte), damit werden nicht beherrschbare Zementverluste minimiert (z.B. kann bei oberhalb grösserer Hohlräume ein Packer gesetzt werden).
- Bei zu erwartenden Zementverlusten, z.B. im Lockergestein sollten **Gewebepacker o. Strümpfe** zum Einsatz kommen, welche Zementverluste unterbinden.
- Bei **artesischen GW-Austritten** sollte die Suspension z.B. mit Baryt beschwert werden o. spezielle Hinterfüllungen die schnell abbinden zum Einsatz kommen.
- **Kontrolle & Dokumentation** von Sondenrohrdruck, Suspensiondichte, Menge und Homogenität
- **Verluste** dem Geologen melden



Abb. 5 Am Bohrlochkopf austretende Suspension.

Was beeinflusst die Qualität der Hinterfüllung:

- Meist wird gestoppt, wenn die Suspension am Bohrlochkopf ankommt. Eigentlich sollte diese solange weiter austreten, bis die Dichte der verpressten Suspension entspricht. Je nach Umgebung z.B. in einem Garten ist das aber praktisch nicht immer umsetzbar!
- Abstandshalter o. Zentrierung helfen Lücken in der Hinterfüllung zu minimieren, erschweren aber den Einbau. Die räumliche Lage der Sondenrohre beeinflusst das Temperaturprofil in der Hinterfüllung und somit auch eine mögliche partielle Durchfrostung.
- Grundsätzlich wird die Qualität der Hinterfüllung durch folgende Parameter beeinflusst: lückenlos (dreidimensionale Lage der Sondenrohre (z.B. wie verdrillt) beeinflusst ebenfalls ob Lücken eher möglich sind), Grundwasser / Geologie, Zementtyp / Zementdichte, Homogenität, Bohrlochtiefe, Sondenoberfläche.

2.4 Zement-Zusammensetzung und Hydratation

Standard-Hinterfüllbaustoffe bestehen aus den Hauptkomponenten Zementklinker, Bentonit und Zuschlagstoffen wie Quarzsand. Der Zement wird durch das Brennen bei 1450°C aus feingemahlenem Kalkstein, Tonstein / Mergel, Quarzsand sowie Eisenoxid und anschliessend zugeführtem Gips / Anhydrit hergestellt (Portlandzement). Beim Brennprozess entstehen die Hauptbestandteile Tricalciumsilikat (C_3S bzw. $3 CaO \times SiO_2$), das Dicalciumsilikat (C_2S bzw. $2 CaO \times SiO_2$), das Tricalciumaluminat (C_3A bzw. $3 CaO \times Al_2O_3$) und Calciumaluminatferrite (z.B. $C_4(A,F)$ bzw. $4 CaO \times Al_2O_3 \times Fe_2O_3$). Je feiner der Zement gemahlen wird, desto höhere Festigkeiten entwickelt er und desto stärker die Reaktionsgeschwindigkeit der Klinker. Je nach geforderten Eigenschaften kommen weitere Zuschlagstoffe hinzu, z.B. Graphit für eine höhere Wärmeleitfähigkeit.

Der Zement dient als hydraulisches Bindemittel und erhärtet bei Zugabe von Wasser zu einer beständigen Hinterfüllung. Mit Einsetzen der Hydratation entstehen die Hauptprodukte wie Calciumsilikathydrate (CSH) und Ettringit (wasserhaltiges Sulfat) (siehe z.B. Taylor 1992). Das Wasser/Zement-Gemisch liegt bei Werten von ca. 0.3-0.8. Die Hydratation mit der Bildung eines Gefüges aus den Hydratationsprodukten in den Poren kann grob in 3 Phasen gegliedert werden: Ansteifen, Erstarren und Erhärten des Gefüges. Die Reaktionsgeschwindigkeit und Dauer hängt folglich stark vom Porenraum und Wasser/Zement-Wert ab. Die Festigkeit wird je nach Tongehalt durch die Bildung der Calciumsilikathydrate bzw. Calciumaluminathydrate bestimmt.

In den ersten Minuten bis ca. 2 Stunden werden Calciumsulfate und Alkalisulfate gelöst, welche mit den Klinkerphasen reagieren und erste Ettringit- und CSH-Kristalle bilden. Diese sind aber noch zu klein und füllen den Porenraum nicht aus und bilden somit noch kein festes Gefüge. Das Gefüge wird nur wenig steifer und ist weiterhin labil. In der Zeit von ca. 2 bis 24 Stunden nach dem Anmischen setzt eine intensive Hydratation der Klinkerphasen ein. Durch das fortschreitende Wachsen und Verzahnen der CSH- und Ettringitkristalle entsteht ein Grundgefüge und der Porenraum wird gefüllt. Mit abnehmender Anzahl aktiver Klinkerphasen reduziert sich die Reaktionsgeschwindigkeit. Die Suspension erstarrt zunehmend. In der Zeit von 2 bis 28 Tage wachsen die Hydratationsprodukte weiter in den Porenraum und stabilisieren das Gefüge. Der Baustoff erlangt seine Festigkeit.

Während der Hydratation wird Wärme frei. Die freigesetzte Wärmeenergie hängt von der Baustoffmenge sowie der Zusammensetzung des Zementklinkers ab. Da im Bereich der Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden nur eine geringe Festigkeit im Vergleich zu Beton verlangt wird, ist der Anteil des Zementklinkers geringer. Folglich wird auch weniger Wärme freigesetzt. Die freigesetzte Wärme kann in Erdwärmesonden gemessen werden. Die Erwärmung liegt bei wenigen Zehntel bis wenige °C und ist spätestens nach ca. 10 Tagen vernachlässigbar klein (Touzin, 2017).

2.5 Forschungsstand und Literatur

Die wichtigsten Anforderungen für die Hinterfüllung von EWS in der Schweiz werden in der **SIA 384/6** und der **Vollzugshilfe „Wärmenutzung aus Boden und Untergrund“ vom BAFU (2009)** genannt. Ebenfalls werden Mindestanforderungen an die Hinterfüllung im **Gütesiegel-Reglement vom FWS §6.17** sowie in verschiedenen Merkblättern der Kantone beschrieben. Letztere beziehen sich meist auf die SIA und die Vollzugshilfe.

Besonders in Deutschland wurden in den letzten Jahren einige Untersuchungen zur Qualität von Hinterfüllbaustoffen bei EWS durchgeführt. Meist beziehen sie sich aber auf Laborversuche. Auch haben einige Bundesländer detaillierte Studien und Leitfäden veröffentlicht. Für die vorliegende Arbeit sind nachfolgende Publikationen von Bedeutung. Es werden nur die aktuellsten gelistet, da in diesen die älteren Arbeiten zusammengefasst, oft im Detail beschrieben und aufgearbeitet werden.

Eine gute anwendungsbezogene Zusammenfassung zum Kenntnisstand und den Anforderungen an die Hinterfüllung, sowie wie eine korrekte Hinterfüllung durchgeführt werden sollte, erfolgt in den **„Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Überwachung – EA Geothermie“ vom Arbeitskreis „Geothermie“ der Fachsektion Hydrogeologie und Ingenieurgeologie** (von 2015).

Folgende akademischen Arbeiten haben sich besonders mit den Anforderungen an die Hinterfüllbaustoffe und Prüfmethode besonders bzgl. der Frostbeständigkeit beschäftigt, welche sehr entscheidend für die langfristige Qualität der Erdwärmesonde sind:

Dissertation von **Herrmann, V.J. (2008) „Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Hinterfüllung von Geothermie-Bohrungen mit Erdwärmesonden“** In der Arbeit wurden im Labor und in Grossversuchen verschiedene Hinterfüllbaustoffe, die bei Erdwärmesonden zum Einsatz kommen, auf ihre Frostbeständigkeit geprüft. Dabei wurden auch Testmethoden geprüft und angepasst. Zudem wurden Hinterfüllbaustoffe entwickelt, die bei Frost-Tau-Wechsel keine Risse bilden. Frost-Tau-Zyklen führen bei nicht-frost sicheren Hinterfüllungen zu Rissen und ein Ablösen der Sondenrohre. Standard- und Fertigmischungen sind zwar gut fliess- und pumpfähig, aber generell nicht frostbeständig. Mit allen Prüfmethode wurden in diesen irreversible Risse festgestellt. Je wasserhaltiger die Suspension war, desto mehr wurde der Baustoff geschädigt.

Als Kriterien der Frostbeständigkeit dienen z.B. die mikroskopische und makroskopische Gefügeschädigung, Variation der Ultraschallgeschwindigkeit oder die Massenkonstanz. Der Prüfkörper sollte keine Risse mit Breiten >0.1 mm aufweisen. Die Abwitterung also der Gewichtsverlust nach jedem Frost-Tau-Wechsel sollte bei <1 g liegen. Die Ultraschalllaufzeiten in beide Achsenrichtungen bleiben konstant. Die vertikale Ausdehnung des Prüfkörpers ist $<1\%$. Zusätzlich sollte nach 28 Tagen der dynamische E-Modul $>75\%$ sein.

Bei Wasser/Feststoff-Verhältnissen von >1 kam es zum kompletten Zerfall der Proben. Bei Werten von ca. 0.4 wurden zwar auch Risse gebildet, aber die Prüfkörper zerfielen nicht. Zemente mit einer langsamen Aushärtung tendierten zu geringeren Schädigungen. Frostbeständige Baustoffe wiesen geringe Wassergehalte mit Wasser-Feststoff-Werten von ca. 0.25 (ca. 20 Gew.%) auf. Je weniger Wasser im System ist, desto geringer ist die Chance, dass es auf Grund von Volumenausdehnungen zu Eislinsen und Rissen kommt. Bei den Prüfungen beeinflussen folgende Punkte die Ergebnisse: Grösse, Form sowie Gefäss des Probekörpers, Ort sowie Art und Weise der Frosteinwirkung, Abstand der Proben, Feuchte in sowie Grösse der Kammer. Z.B. sollten die Proben während der Tests feucht gehalten werden und die Prüfkörper eine gewisse Mindestgrösse aufweisen.

Dissertation von **Anbergen, H. (2015) „Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechseleinflusses auf Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden“** Auf Grund fehlender genormter Prüfverfahren wurde in dieser Arbeit ein solches für die Frostbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen entwickelt und an verschiedenen Baustoffen getestet und numerisch überprüft. Das Prüfverfahren basiert i.W. auf der reproduzierbaren Messung der Systemdurchlässigkeit nach Frost-Tau-Zyklen, da sich diese bei Frostschäden auf Grund der Gefüge-Entfestigung z.B. durch Risse erhöht. Die Prüfkriterien waren die Massstabstreuung des Prüfkörpers, die Durchfrostung über ein integriertes Sondenrohr von innen nach aussen und das direkte Messen der hydraulischen Leitfähigkeit. Dabei zeigte sich, dass die Systemdichtigkeit von Sondenrohren und Hinterfüllung um zwei Zehnerpotenzen geringer ist als der Baustoff alleine (abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit der Sondenrohre) und die ersten Frost-Tau-Wechsel entscheidend für die Dichtigkeit sind. Nach 6 Frost-Tau-Zyklen ist eine fundierte Aussage möglich bzw. ändert sich der Durchlässigkeitsbeiwert kaum mehr. Der Durchlässigkeitsbeiwert des Gesamtsystems erhöhte sich während der Frost-Tau-Wechsel von durchschnittlich 10^{-7} bis 10^{-8} m/s auf 10^{-7} bis 10^{-6} m/s, also im Mittel um eine max. um drei Zehnerpotenzen. Letztere hohe Werte beziehen sich auf Hinterfüllbaustoffe ohne quellfähiger Tonminerale, weil ein Nachquellen nicht möglich ist. Die Änderungen der Durchlässigkeit sind materialspezifisch, d.h. jedes Produkt zeigt zwar eine unterschiedliche Anfangsdurchlässigkeit, aber diese ändert sich bei allen innerhalb der ersten 6 Frost-Tau-Wechsel. Dabei ist das Alter der Probe zu beachten, denn ältere Proben zeigen eine geringere Durchlässigkeit. In der Arbeit werden zudem viele bestehende Prüfmethode verglichen und bewertet.

Etwas umfassender ist die **Arbeit des Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech** (von 2016). In dieser wurden mit Laborversuchen und Grossversuchen verschiedene Prüfmethode an üblichen und thermisch verbesserten Hinterfüllbaustoffen bzgl. der Eigenschaften Dichte, Rheologie, Homogenität, Stabilität und Umwelteinflüsse wie Wasser und Temperatur untersucht und die Qualität der Hinterfüllbaustoffe (Langlebigkeit, Durchlässigkeit,...) geprüft. Dabei wurden zusätzlich verschiedenste Parameter wie z.B. der Wasser/Feststoff-Gehalt oder die Anmischdauer variiert. Es hat sich gezeigt, dass die meisten Prüfmethode vergleichbare Ergebnisse produzieren.



Abb. 6 Fertigmischung nach 0, 2 und 4 Frost-Tau-Wechsel

Aus Dissertation Herrmann 2008. Fertigmischung auf Quarz-Basis mit 32 Gew.% Wasser.



Abb. 7 Standardmischung nach 6 Frost-Tau-Wechsel

Aus Dissertation Herrmann 2008. Standardmischung gemäss SIA 384/6.

Eine Bund/Länderarbeitsgruppe der staatlichen geologischen Dienste in Deutschland hat eine „**Empfehlung für die Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde**“ erarbeitet (von 2015), in welcher viele bestehende Grundlagendaten zu den Anforderungen und Eigenschaften von Hinterfüllbaustoffen, deren Anmischen, Verfüllen und Kontrollen aufgearbeitet werden. Zum Schutz des Grundwassers und der Funktionstüchtigkeit der Erdwärmesonde soll ein Durchlässigkeitsbeiwert für das Gesamtsystem (Bohrloch – Hinterfüllung – Sondenrohr) über die gesamte Lebensdauer von min. $1 \cdot 10^{-9}$ m/s erreicht werden, unter Berücksichtigung der Sulfat- und Frostbeständigkeit und der gewünschten Eigenschaften an den Baustoff (Wärmeleitfähigkeit, Plastizität, Schwindmass,...). Mit Tabelle 5 werden konkrete Mindestanforderungen und Beurteilungskriterien an den Baustoff gegeben. Je höher der Gehalt an quellfähigen Tonmineralen, desto höher die Dichte, Selbstheilung durch die langanhaltende Quellfähigkeit bei z.B. Frost- oder Sulfatschäden, höhere Langlebigkeit, höhere

Widerstandsfähigkeit gegen aggressive Wässer, geringes Setzungsverhalten und höhere Frostbeständigkeit.

Weitere umfangreiche **Eignungsuntersuchungen** an verschiedenen Verpressmaterialien für Erdwärmesonden in **Österreich** werden im Bericht von **Niederbrucker & Steinbacher (2007)** beschrieben. Diese zeigen gut dass die Standard- bzw. Eigenmischungen bzgl. Festigkeit, Absetzmass, Frostbeständigkeit, Dichtigkeit, Wärmeleitfähigkeit qualitativ deutlich schlechter sind als die Fertigmischungen oder z.T. die Mindestanforderungen nicht erreichen.

3 Kantonale Anforderungen an Hinterfüllbaustoffe bei EWS

3.1 Einleitung

Mit dem Bohrloch werden künstliche Wasserwegsamkeiten erstellt, welche zum Schutz des Grundwassers rasch und bestmöglich wieder abgedichtet werden sollen. Diese Aufgabe muss der Hinterfüllbaustoff erfüllen. Deshalb bewilligen die kantonalen Behörden Bohrungen nur, wenn eine korrekte Hinterfüllung möglich ist und auch erfolgt, damit das GW geschützt bleibt. Je nach Geologie werden spezielle Hinterfüllbaustoffe, Gewebestrümpfe oder ähnliches gefordert oder es werden keine Bohrungen bewilligt. Des Weiteren ist es den kantonalen Behörden wichtig, dass zum Schutz des Grundwassers die Umweltverträglichkeit und die Langlebigkeit der Hinterfüllbaustoffe gegeben sind.

Eine wichtige Grundlage ist die Vollzugshilfe vom BAFU 2009, auf welche sich die meisten kantonalen Behörden beziehen (Anforderungen darin siehe Kapitel 2). Da sich der Untergrund von Kanton zu Kanton z.T. deutlich unterscheidet, werden auch unterschiedliche Anforderungen an die Hinterfüllung gestellt. In Gebieten mit Karst oder Vorhandensein von Gips-Anhydrit-reichen Schichten sind die Vorgaben anders, als z.B. in der Molasse im Mittelland. Aus diesem Grund wurden die kantonalen Anforderungen analysiert.

3.2 Vorgehen

Die Internetauftritte der Kantone wurden bzgl. den Anforderungen an die Hinterfüllbaustoffe analysiert. Dabei wurden vor allem die Merkblätter und Verweise auf die SIA 384/6, das FWS oder die BAFU Vollzugshilfe gesucht. In einigen Kantonen werden den Bewilligungen Merkblätter beigelegt, auf welchen Anforderungen an die Hinterfüllung genannt werden. Des Weiteren kann im Bewilligungs-Gesuch z.B. der Hersteller, der Typ, die Menge oder Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung abgefragt werden. Speziell wurde auch recherchiert, ob weiterreichende Anforderungen als z.B. in den Richtlinien vom BAFU 2009 gemacht werden. Auf Basis der zugänglichen oder uns bereits vorliegenden Informationen wurden konkrete Anfragen bei den zuständigen Personen der kantonalen Behörden getätigt. Folgende Fragen wurden gestellt bzw. wurde gebeten unsere Recherchen zu verifizieren o. korrigieren:

Bzgl. Anforderungen, Hinweise in Merkblättern, Bewilligungen, Gesuche:

- Allg. Anforderungen an Hinterfüllung auf kantonaler Homepage einsehbar (z.B. Merkblatt, Links zu o. Verweise auf SIA 384/6, FWS, BAFU Vollzugshilfe,...)
- Anforderungen an Hinterfüllung in Bewilligung genannt (z.B. beigelegtes Merkblatt, direkt auf Bewilligung als Auflage)
- Angaben zu Hinterfüllbaustoffen, die im Gesuch abgefragt werden (z.B. Hersteller, Typ, Menge, Wärmeleitfähigkeit)
- Hinweise auf potentielle Probleme bei der Hinterfüllung (z.B. Karst, Grundwasser) und entsprechende geforderte Massnahmen z.B. in Bewilligung?
- Was wird konkret bzgl. der Hinterfüllung genannt bzw. zusätzlich gefordert (z.B. Zementation von unten nach oben, spezielle Zemente z.B. sulfatbeständig, Strumpf im Au-Bereich,...)?
- Wann, wo und warum erfolgen spezielle Anforderungen (z.B. Karst, Gipskeuper,...)?

Kontrolle, Dokumentation, Konsequenzen:

- Wird die Hinterfüllung kontrolliert und dokumentiert (wenn ja, wie, wie oft, vereinzelt o. systematisch, von wem)?
- Werden Daten zur erfolgten Hinterfüllung vom Kanton systematisch erfasst (z.B. Zementtyp, Zementmenge, Zementverluste,...)?
- Teils wird nicht korrekt hinterfüllt (z.B. falsche Dichte, nicht vollständig von unten nach oben,...), wenn das erkannt wird, wie geht der Kanton damit um?

Erfahrungen:

- Welche Erfahrung mit Zementen hat der Kanton gemacht (Probleme, Schäden,...)?

3.3 Ergebnisse

Von den 26 angefragten Kantonen haben je nach Frage zwischen 14 und 16 Kantone geantwortet. Die Daten wurden in Eigenrecherche (Stand Dezember 2017) ergänzt. Die Daten sind in der Auswertung enthalten.

Anforderungen und/oder Hinweise in Merkblättern, Bewilligungen und Gesuch

Auf 16 kantonalen Homepages werden die allgemeinen Anforderungen an die Hinterfüllung genannt oder auf diese verwiesen (Verweise auf SIA 384/6, FWS und / oder Vollzugshilfe BAFU 2009, z.T. Merkblätter mit ähnlichen Verweisen oder genannten Anforderungen wie in der BAFU Vollzugshilfe). 14 Kantone weisen in der Bewilligung auf entsprechende Reglemente / Anforderungen bzgl. der Hinterfüllung hin. Sowohl auf der Homepage wie auch in der Bewilligung finden sich in mind. 10 Kantonen entsprechende Verweise. Konkret wird auf den kantonalen Homepages am häufigsten auf ein Merkblatt oder Erdwärmekonzept (10 Kantone) hingewiesen. Verweise auf das BAFU finden sich in 8 Kantonen. 5 Kantone berufen sich jeweils auf die SIA 384/6 und das FWS. In den Bewilligungen wird in 9 Kantonen auf die SIA 384/6, in 8 auf das BAFU und in 4 auf das FWS verwiesen. 5 Kantone verweisen auf das Merkblatt.

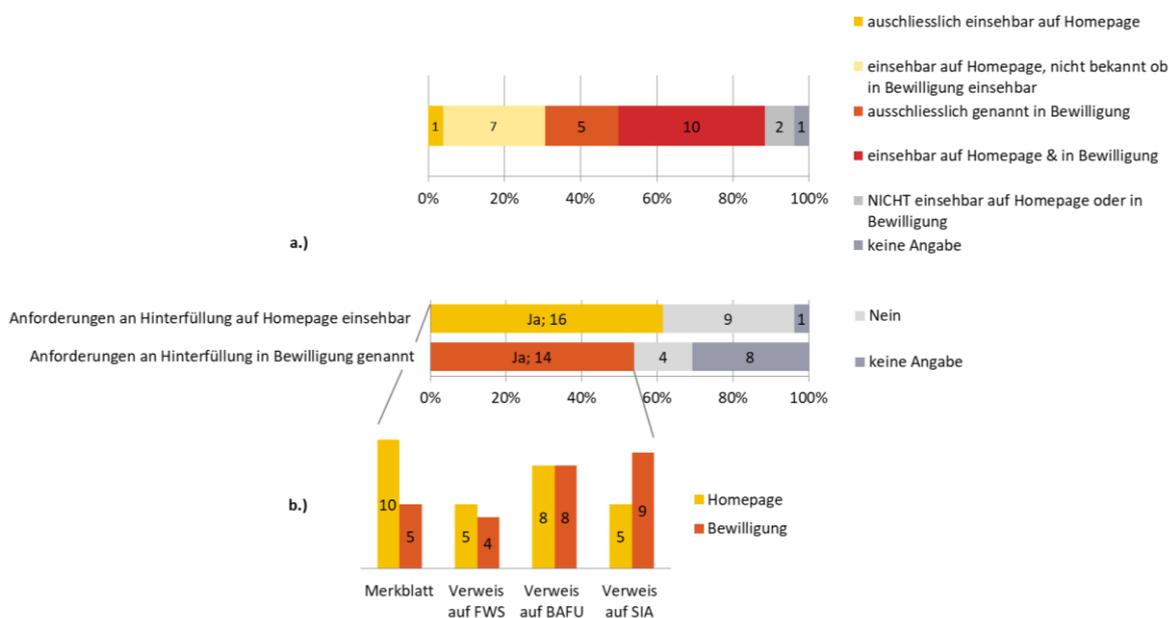


Abb. 8 a.) Anforderungen an Hinterfüllung auf Homepage einsehbar oder in Bewilligung genannt
b.) Anforderungen auf beigelegtem Merkblatt / Erdwärmekonzept bzw. Verweise auf SIA 384/6, FWS, BAFU (inkl. Mehrfachnennungen)

Ein Kanton fragt im Gesuch konkret den Hersteller, Zementtyp, die geplante Zementmenge sowie die Wärmeleitfähigkeit des Zements ab. 14 Kantone, die geantwortet haben, verlangen keine Angaben bzgl. der Hinterfüllung im Gesuch.

Hinweise auf mögliche Probleme bei der Hinterfüllung (z.B. mächtige Lockergesteinsschichten, Karst, Grundwasser, Gasgefährdung, Gipskeuper) werden bei 6 von 16 Kantonen gegeben. In 2 Kantonen wird konkret auf Karst und daraus resultierende Probleme durch Zementverluste hingewiesen. 1 Kanton plant langfristig, die Antragsteller über das Vorhandensein von Karst über entsprechenden Karten zu informieren. 5 Kantone geben Hinweise auf Probleme mit gewässerschutzrechtlicher Relevanz und stellen z.T. entsprechende Forderungen (z.B. Einbau von einem Strumpf zur Verhinderung des Abfliessens der Suspension, Verwendung einer sulfatbeständigen Hinterfüllung im Gipskeuper, Tiefenbeschränkung oder Begleitung durch Geologen).

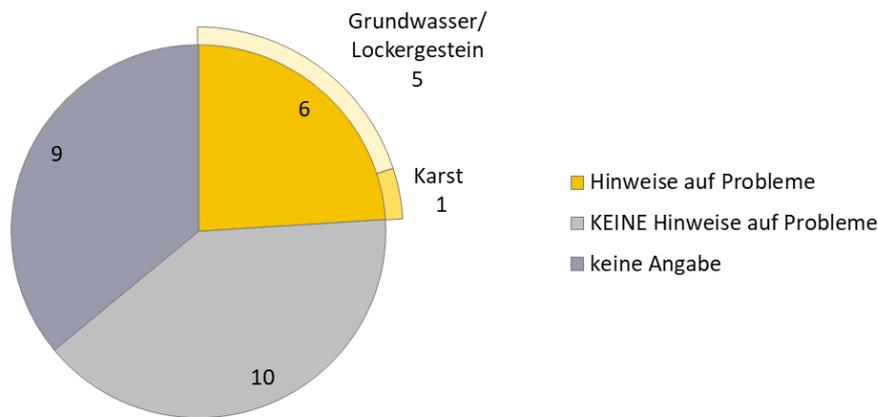


Abb. 9 Hinweis auf Probleme bei der Hinterfüllung

Konkret werden unterschiedliche Vorgehensweisen und Massnahmen bzgl. der Hinterfüllung gefordert. Von den 26 angefragten Kantonen haben 16 Kantone geantwortet.

10 Kantone zitieren konkret aus den BAFU Richtlinien bzw. SIA oder FWS (vgl. 2.3.1). **Meist handelt es sich um den Auszug, dass der Ringraum von unten nach oben lückenlos mit einer geeigneten Suspension verfüllt werden soll, damit eine dichte, permanente, physikalisch und chemisch stabile Einbindung der Sonde in den Untergrund gewährleistet wird. Konkrete Eigenschaften an den Hinterfüllbaustoff (z.B. Dichte, Durchlässigkeitsbeiwert, Frostbeständigkeit) werden generell nicht genannt.**

Generell legen Kantone vielmehr Wert auf den Grundwasserschutz als die langjährige Funktionstüchtigkeit der Erdwärmesonde selber. Der Grundwasserschutz ist Aufgabe des Kantons, wobei die Funktionstüchtigkeit als Privatsache verstanden wird. Entsprechend werden z.B. keine Anforderungen an die Wärmeleitfähigkeit oder den Zementtyp gemacht. Vielmehr werden Hinweise gegeben, die z.B. Zementverluste in Lockergesteinsschichten oder Karsthohlräumen betreffen, mit entsprechenden Vorgaben wie dem Einbau von einem Strumpf. In 10 Kantonen werden explizit weiterführende Probleme genannt, welchen entsprechend begegnet werden muss. Dazu zählen das Auftreten von Gipskeuper (6 Kantone), Arteser (2 Kantone) und Gaszutritte (2 Kantone). Entsprechend werden sulfatbeständige Baustoffe, zusätzliche technische Einbauten wie Packer, oder ein unmittelbares Verfüllen des Ringraums verlangt. Eine zusätzliche Anforderung an die Hinterfüllung, welche weder in BAFU, SIA oder FWS genannt wird, gibt es nur in einem Kanton. Dieser fordert bei Erdwärmesondenfeldern in anthropogen stark erwärmten Grundwasser-Gebieten einen Zement mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit.

Zusätzlich haben 4 Kantone auf die Zuständigkeiten hingewiesen. Die Massnahmen liegen in 4 Kantonen in der Verantwortung des Geologen und in 2 Kantonen in der Verantwortung der Bohrfirma. In 16 von 16 Kantonen sind die Gesuchsunterlagen online zugänglich.

Kontrolle, Dokumentation, Konsequenzen

In 1 von 16 Kantonen erfolgt die systematische Erfassung der Daten zur erfolgten Hinterfüllung (z.B. Zementtyp, Zementmenge, Zementverluste,...) sowie die Kontrolle vor Ort. In 9 Kantonen wird die Hinterfüllung teilweise vom begleitenden Geologiebüro oder der Bohrfirma dokumentiert und an den Kanton weitergeleitet. In einem Kanton wird erfasst, ob die Auflagen für die Hinterfüllung generell gemäss Bewilligung erfüllt wurden. Weder erfasst, noch kontrolliert oder dokumentiert wird die Hinterfüllung in 5 von 16 Kantonen. 10 Kantone haben nicht auf die Frage geantwortet.

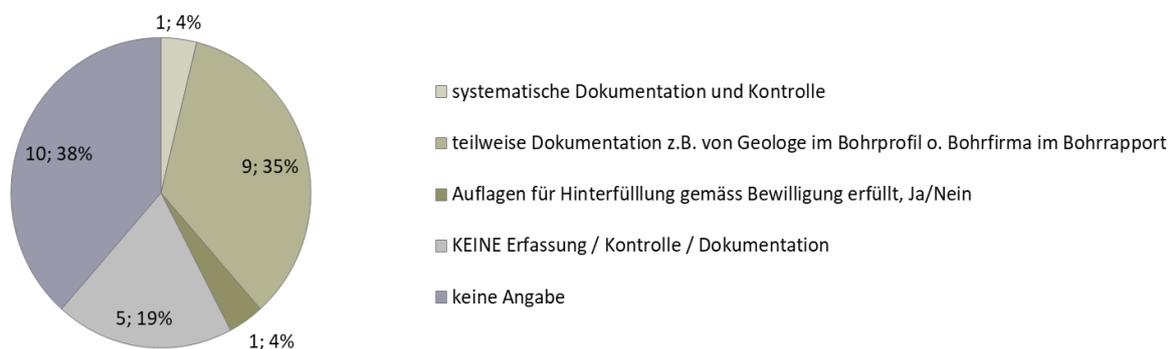


Abb. 10 Dokumentation und systematische Datenerfassung der Hinterfüllung sowie Kontrollen

13 von 26 Kantonen haben auf die Frage nach dem Umgang bei lückenhafter Verfüllung geantwortet. 5 Kantone geben an, dass ein solcher Fall nicht / in den seltensten Fällen erkannt wird oder das Amt darüber nicht in Kenntnis gesetzt wird. In 2 Kantonen hat die unvollständige Hinterfüllung keine Konsequenzen. 1 Kanton beurteilt jeden Fall einzeln.

In einem Kanton erfolgt die Sensibilisierung der Bohrfirma durch das Fachbüro sowie schriftliche Mahnungen oder Aussprachen mit verantwortlichen Geschäftsinhabern nach Mehrfachverstössen. In 1 Kanton muss die Sonde ausser Betrieb genommen werden. Dieser Fall ist jedoch noch nie eingetreten. In 2 Kantonen wird beim Auftreten von Artesern ein Verbot für die Installation weiterer Sonden ausgesprochen. In 2 Kantonen wird mit der Bohrfirma Kontakt aufgenommen. In einem Kanton müssen durch den Bohrmeister oder den Hydrogeologen Messungen durchgeführt werden.

Erfahrungen

Nur 7 von 14 Kantonen haben Erfahrung im Umgang mit der Hinterfüllung bei unterschiedlichen Problemen angegeben. In 3 Kantonen wurden Suspensionsverluste im Karst, in 1 Kanton in der subalpinen Molasse gemeldet. In 3 Kantonen war es bereits nötig angebohrte Arteser zu hinterfüllen.

3.4 Fazit

Fast alle Kantone stellen Anforderungen an die Hinterfüllung. In knapp über der Hälfte aller Fälle finden sich diese sowohl auf der Homepage wie auch in der Bewilligung. Die Kantone verweisen dabei meist auf FWS und SIA oder direkt auf das BAFU. Häufig werden kurze Auszüge zitiert. Es handelt sich dabei um die minimalen Anforderungen. Am häufigsten wird genannt, dass eine geeignete Suspension verwendet werden soll, welche eine dauerhafte dichte, permanente, physikalisch und chemisch stabile Einbindung der Sonde in den Untergrund gewährleistet. Diese Anforderungen sind eigentlich umfassend, ohne dass weitere detaillierte Eigenschaften an den Baustoff genannt werden müssen. Es wird somit dem Bauherrn oder der Bohrfirma die Freiheit gelassen, selber den geeigneten Baustoff zu wählen und entsprechend zu verbauen.

Den Kantonen ist besonders der Grundwasserschutz wichtig (~4/5 der teilnehmenden Kantone). Deshalb wird häufig die lückenlose Hinterfüllung von unten nach oben gefordert. Eine Kontrolle der Beständigkeit und Qualität, welche sich langfristig ebenfalls auf den Gewässerschutz auswirken kann, erfolgt nicht durch den Kanton. Die speziellen Forderungen an den Umgang mit der Hinterfüllung bei auftretenden Artesern, Gipskeuper, Gas etc. sind stark an die jeweilige Geologie geknüpft. Die Kantone AG, BL, JU und VS verlangen deshalb in bestimmten Fällen Spezialbaustoffe.

Die Kontrolle vor Ort sowie eine systematische Erfassung erfolgt einzig im Kanton SO. In ca. ¼ aller an der Umfrage teilgenommenen Kantone werden die Daten vereinzelt durch die Bohrfirma oder den begleitenden Geologen aufgenommen. Die notwendigen Massnahmen bei auftretenden Problemen liegen z.T. vollständig in der Verantwortung des Geologen oder der Bohrfirma. Viele Kantone sind der Meinung, dass Probleme bzgl. der Hinterfüllung nur in den wenigsten Fällen

erkannt bzw. mitgeteilt werden. Einige Kantone haben nachgefragt, welche Massnahmen in der Bewilligung sinnvoll wären. Z.T. wird die Kontrolle nicht als Aufgabe des Kantons angesehen. Weniger als die Hälfte, der an der Umfrage teilgenommenen Kantone geben Hinweise auf mögliche auftretende Probleme bei der Hinterfüllung und machen entsprechende Vorschläge für die Hinterfüllung.

Für entsprechende Empfehlungen wird auf Kapitel 8 verwiesen.

4 Statistik der in der CH verwendeten Hinterfüllbaustoffe sowie Qualitätssicherung

4.1 Einleitung und Vorgehen

Eine Analyse der in der Schweiz verbauten Hinterfüllbaustoffe ist nur möglich, wenn bekannt ist, welche Baustoffe zum Einsatz kommen, in welchen Mengen diese verbaut werden und wie diese angemischt, verpresst und kontrolliert werden. Deshalb wurden alle in der Schweiz tätigen Bohrfirmen angeschrieben und gebeten einen Fragenkatalog auszufüllen.

Folgende Fragen wurden gestellt:

1. Verwenden Sie Fertig- oder Eigenmischungen?
2. Wie hoch ist Ihre jährliche verbrauchte Zementmenge?
3. Welche Hinterfüllstoffe für EWS verwenden Sie (Hersteller, Zementtyp, jährliche Menge)?
4. Gesamtbohrmeterzahl pro Jahr?
5. Verwenden Sie digitale Messgeräte für Qualitätsmessungen (für Durchfluss, Druck)? Wenn ja Gerätetyp angeben.
6. Verwenden Sie digitale Messgeräte zur Bestimmung der Dichte und Menge der Hinterfüllung? Wenn ja Gerätetyp angeben.
7. Falls oben nicht beantwortet: Wie häufig setzen sie Spezialzemente ein?
8. Wie wird bei Ihnen der Zement angemischt (z.B. Zwangsmischer, Kolloidalmischer, Wanne)?
9. Wie wird die Dichte des eingebrachten Zements kontrolliert / protokolliert?
10. Wie häufig pro Jahr kommt es vor, dass die Qualität der Hinterfüllung während des Verpressvorgangs gemessen wird?
11. Gibt es aus Ihrer Erfahrung Zemente welche problematisch sind?
12. Wie ist Ihr Vorgehen bei tiefen Sonden >250m, damit ein Quetschen der Sonden verhindert wird?

Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse beschrieben.

4.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Von den 40 angefragten Bohrfirmen haben 19 Bohrfirmen geantwortet. Wenige sind kaum oder gar nicht mehr in der Schweiz tätig. Die totalen jährlichen Bohrmeter dieser Bohrfirmen, die geantwortet haben, liegen bei ca. **1'700 km pro Jahr** (Stand 2016 / 2017). Gesamthaft werden in der Schweiz derzeit jährlich ca. 2'500 km pro Jahr gebohrt. Die Ergebnisse der Umfrage sind somit aussagekräftig, auch wenn nicht alle Bohrfirmen geantwortet haben. Dies belegt auch die Tatsache, dass der Hauptanbieter von Mörteln in der Schweiz im Jahr ca. 5500 t Rohware verkauft, wobei in der Umfrage ca. 5000 t berücksichtigt werden. Die Spanne der Bohrmeter pro Bohrfirma liegt zwischen ca. 11'000 bis 260'000 m (blaue Punkte in Abb. 11).

Dabei kamen ca. **9200 t Hinterfüllmaterial** bzw. Zement zum Einsatz. 17% davon waren Eigen- bzw. Standardmischungen. Es fällt auf, dass eher die grösseren Bohrfirmen Eigenmischungen einsetzen (gelbe Balken in Abb. 11). 12 von 19 Bohrfirmen verwendeten im Jahr 2016 Spezialzemente wie z.B. thermisch verbesserte oder speziell sulfatbeständige Baustoffe (rote Balken in Abb. 11). Die eingesetzte Menge macht ca. 8% aller verwendeten Hinterfüllbaustoffe aus.

Die gemittelte Verfüllmenge pro 100 Bohrmeter beträgt ca. 700 kg (grüne Dreiecke in Abb. 12). Es fällt aber auf, dass abhängig vom verwendeten Baustoff pro 100 Bohrmeter unterschiedlich viel Baustoff eingesetzt wird. Beim BTD Füller 350 und den Eigenmischungen liegt dieser Wert gemittelt bei ca. 360 kg pro 100 Bohrmeter und bei den Kuchler-Produkten bei ca. 950 kg pro 100 Bohrmeter. Es sei angemerkt, dass der Wasser/Feststoff-Wert eine entscheidende Rolle bei den verschiedenen Eigenschaften und Anforderungen spielt (siehe Kapitel 2). Die Ergiebigkeit sollte entsprechend kritisch bewertet werden.

Das Anmischen der Suspension erfolgt grösstenteils mit dem Zwangs- bzw. Durchlaufmischer, gefolgt vom Kolloidalmischer (Buchstaben in Abb. 12). Einige Bohrfirmen setzen mehrere Systeme ein. Es fällt auf, dass die kleineren Bohrfirmen überwiegend den Zwangsmischer einsetzen, während die grösseren Firmen mit Bohrmetern >100'000 m eher die Kolloidalmischer und / oder

Wannen verwenden. Die Firmen, die Baustoffe von Kuchler verwenden, setzen tendenziell eher die Mungg Durchlaufmischer (von Kuchler vertrieben) ein.

Die in der Schweiz verwendeten Produkte sind in Abb. 12 ersichtlich. Die Produkte von Kuchler werden zu ca. 54% eingesetzt, wobei der K Injekttherm 110 am häufigsten Anwendung findet. Es folgen die Produkte von BTD (ca. 20%), die Eigenmischungen (ca. 17%) und die Spezialzementen von HDG-Umwelttechnik GmbH (ca. 5%).

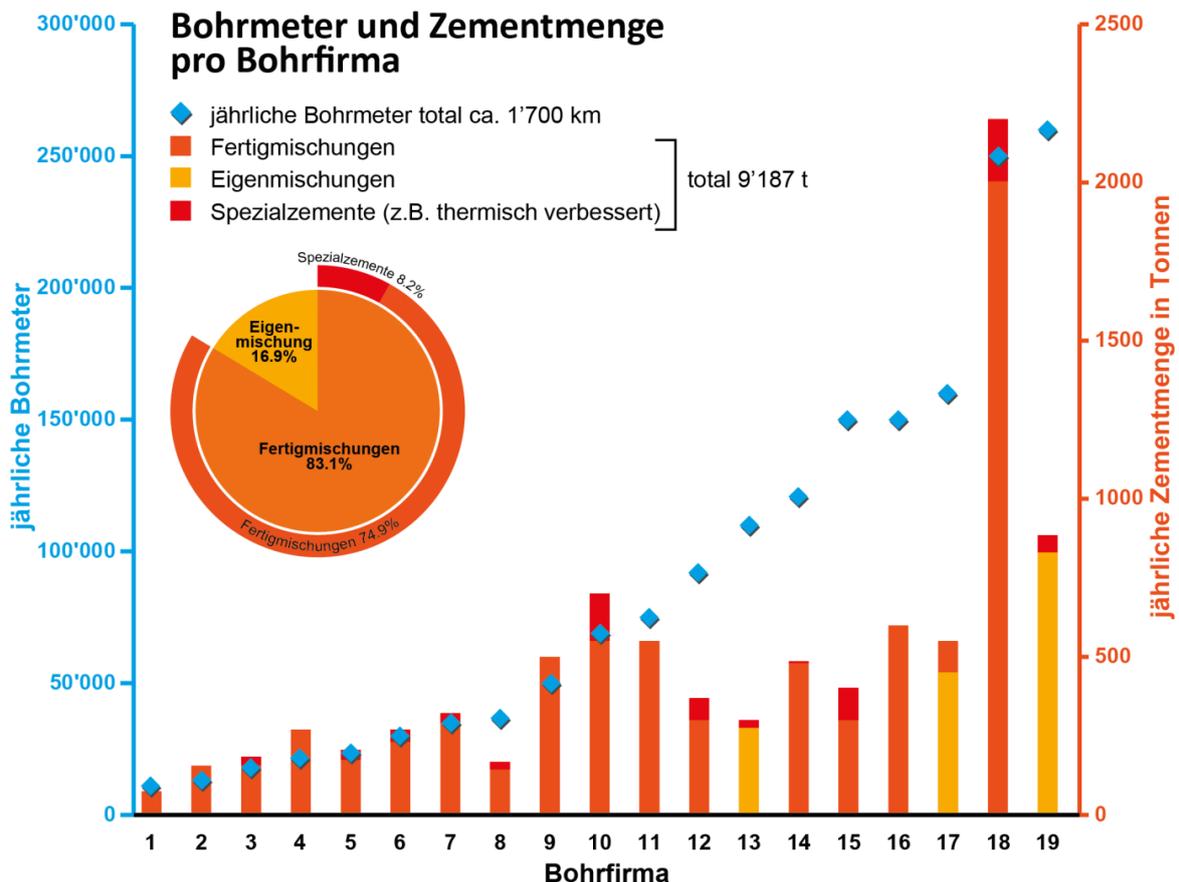


Abb. 11 Bohrmeter (blaue Rauten) und Zementmengen (gelbe, orangene, rote Balken) pro Bohrfirma und Jahr

Genannte Probleme mit Hinterfüllbaustoffen waren:

13 Bohrfirmen haben keine Angaben gemacht o. hatten bisher keine problematischen Erfahrungen mit den Hinterfüllbaustoffen. Ansonsten wurde folgendes genannt: z.T. zu grosses Absatzmass; z.T. zu quarzreich und deshalb schlecht zu pumpen; thermisch verbesserte Zemente bei tiefen Sonden wegen Eigengewicht problematisch; z.T. zu schwer; z.T. falsche Angaben; es gibt keine frostsicheren Mörtel - zudem ist frostsicher nicht notwendig, da Boden auch gefriert und Hinterfüllung nicht verantwortlich für Durchfrostung ist, sondern die falsche Dimensionierung; Mörtelmischpumpen mischen nicht richtig.

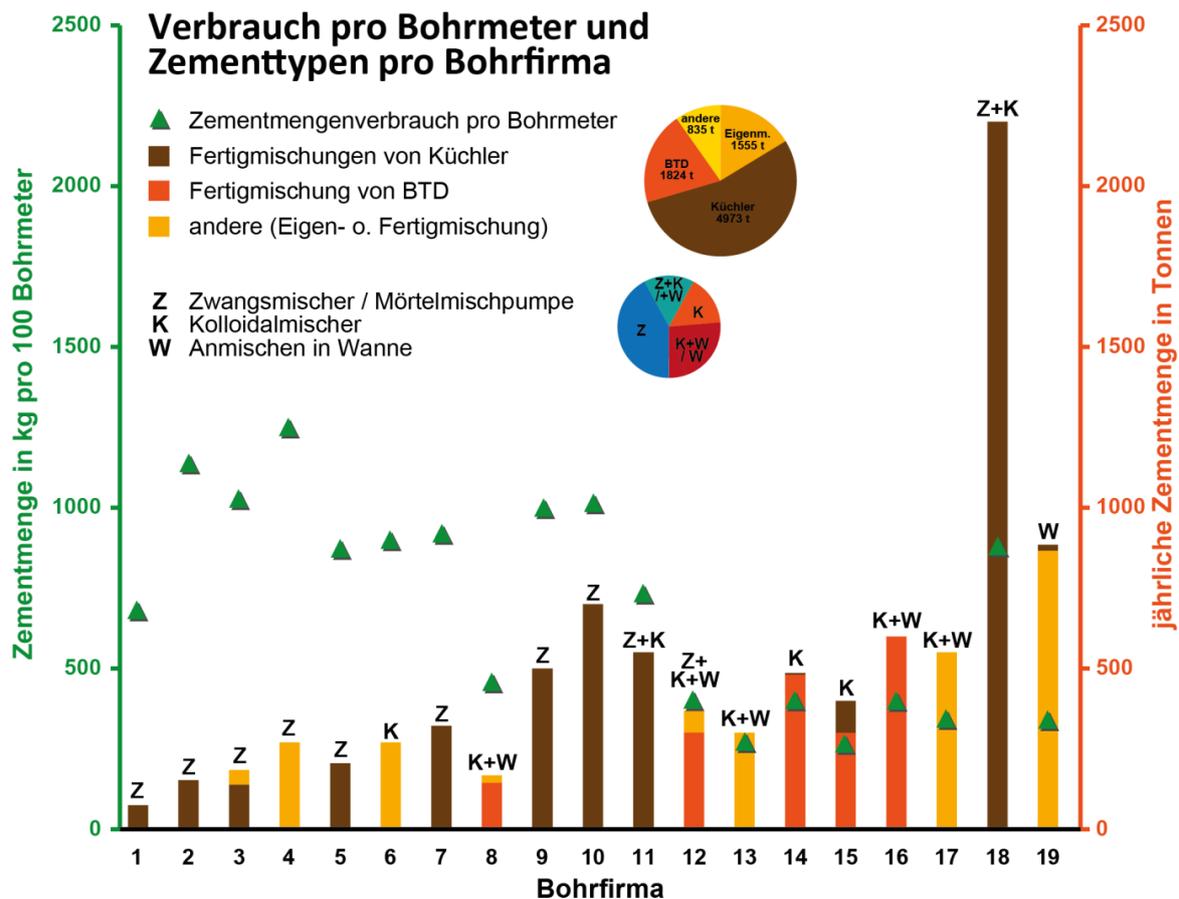


Abb. 12 Verwendete Zementtypen (Balken) und Verbrauch pro Bohrmeter (grüne Dreiecke)

Die farbigen Balken stehen für die verschiedenen verwendeten Zementtypen (rechte y-Achse). Die grünen Dreiecke zeigen den durchschnittlichen Zementverbrauch jeder Firma in kg pro 100 Bohrmeter (ermittelt aus der jährlichen verbrauchten Zementmenge und den Gesamtbohrmetern von jeder Firma). Die Buchstaben über den Balken zeigen, mit welchem Mischer die Suspension angemischt wird. Die beiden Kuchendiagramme vergleichen die eingesetzten Zementtypen und Mischer.

Das Vorgehen bei tiefen Sonden >250 m, damit ein Quetschen der Sonden verhindert werden kann, wurde wie folgt beantwortet (19 Teilnehmer bzw. Antworten):

- **4x** wurde **keine Angabe** gemacht bzw. werden nicht so tiefe EWS erstellt.
- **11x** wurde die **Kontrolle des Drucks** mit Manometer in den Sondenrohren u. z.T. des Verpressdrucks genannt.
- **8x** wurde als mögliches Vorgehen die **Stufenzementation** erwähnt, wobei nur wenige nennen, dass auch mehrere Injektionsschläuche eingebaut werden. Das restliche Befüllen von oben wird auch genannt. Anmerkung: Letztere wird immer wieder auf der Bohrstelle beobachtet, wenn der Innendruck kritische Werte überschreitet.
- **4x** wird genannt, dass als Gegenmassnahme die **Sonde unter Druck** gesetzt wird (z.B. mit 5 bar vorgespannt wird).
- **3x** wird genannt, dass die **Suspension dünner** angemischt wird. Anmerkung: Generell sollte die Hinterfüllung immer gemäss Rezepturangaben vom Hersteller angemischt werden.
- **3x** wird genannt, dass ein **leichterer Baustoff** zum Einsatz kommt.
- **3x** wird genannt, dass die Sondenrohre ab einer bestimmten Tiefe **verschlossen** werden bzw. mit Wasser befüllt werden. Anmerkung: Gemäss SIA 384/6 Absatz 5.4.3 soll die Sonde nicht

nur bei tiefen EWS während der Hinterfüllung vollständig mit Wasser gefüllt und oben druckdicht verschlossen sein.

- Einzelantworten waren: Verwendung von PN20 oder 30 Sonden, vorher Bohrloch fluten, eine Nacht warten, Sonde druckdicht verschliessen. Anmerkung zu letzter Bemerkung: Bei den obigen Antworten bzgl. der Druckkontrolle schliesst das natürlich das druckdichte Verschliessen mit ein. Hier wurde aber explizit geantwortet, dass das druckdichte Verschliessen ein Quetschen verhindert! Nur das Verschliessen alleine kann aber das Quetschen nicht verhindern; siehe SIA 384/6 F.3.

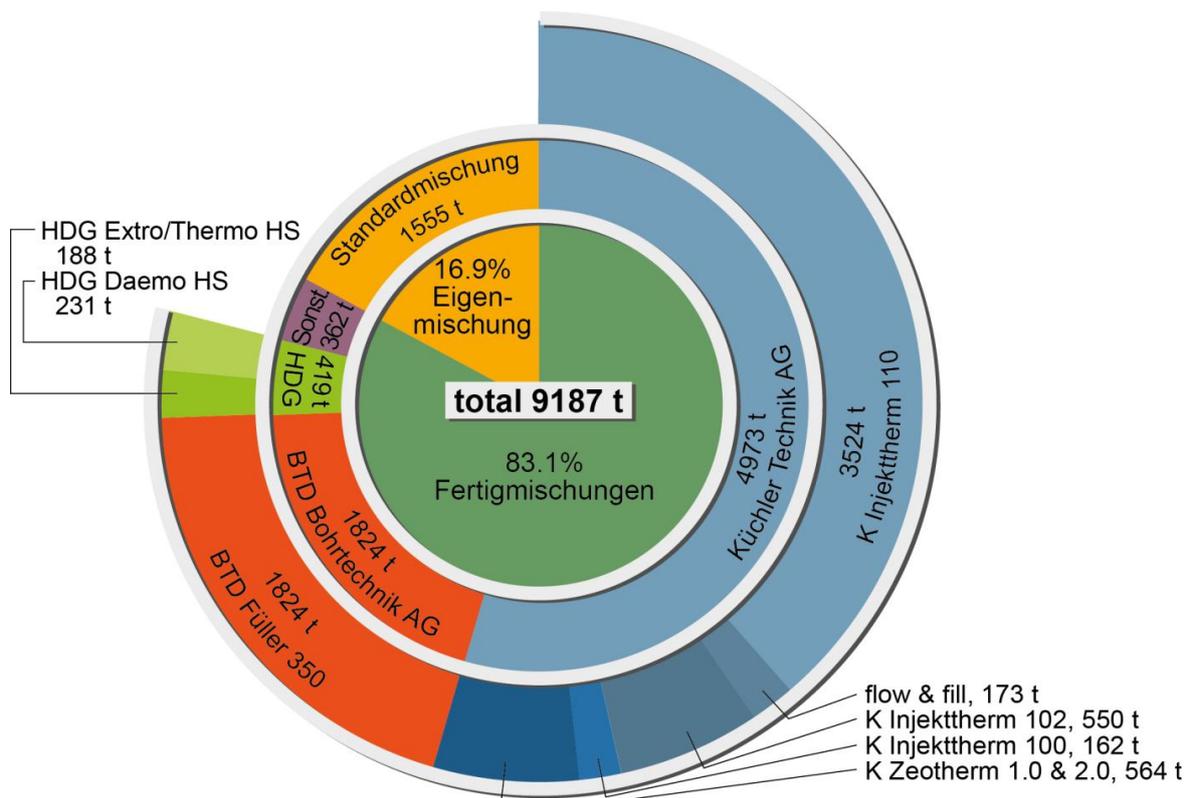


Abb. 13 In der CH eingesetzte Hinterfüllbaustoffe, gemäss Umfrage

Die Produkte von Küchler werden zu mehr als die Hälfte eingesetzt (ca. 54%), gefolgt von den Produkten von BTD (ca. 20%), den Eigenmischungen (ca. 17%) und den Spezialzementen von HDG-Umwelttechnik GmbH (ca. 5%).

Die wichtigsten Parameter sind die Kontrolle des Innendrucks der Sondenrohre und die entsprechende Reaktion (z.B. Stufenzementation), sowie die angepasste Wahl der Materialien (leichtere Hinterfüllbaustoffe u./o. druckstabilere Sonden). Man sollte auf jeden Fall nicht einfach nur die Suspension von oben her reinlaufen lassen, da sonst eine lückenlose Hinterfüllung kaum möglich ist. Die Sondenrohre sollten immer während der Hinterfüllung wassergefüllt und druckdicht verschlossen sein. Nach erfolgter Hinterfüllung sollten die Sondenrohre solange verschlossen bleiben, bis die Hinterfüllung standfest ist, damit auch ein nachträgliches Quetschen ausgeschlossen werden kann.

Tab. 1 Antworten zu Qualitätsmessungen (19 Teilnehmer bzw. Antworten)

Kontrollmessung	Einsatz erfolgt	Kein Einsatz / keine Kontrolle	Gerätetypen
Einsatz digitaler Messgeräte für Durchfluss- und Druckprüfung	14 Bohrfirmen setzen diese ein, allerdings zeigt die Erfahrung auf dem Bohrplatz und einzelne Antworten, dass diese bei einigen Bohrfirmen nur gelegentlich o. wenn verlangt eingesetzt werden	5x	7x wird das Gerät von Geowatt DPG-C3 genannt; ansonsten werden Eigenbauten genannt o. es wird zwar digital gemessen, aber nicht vollautomatisch
Einsatz von digitalen Hinterfüllungsmessgeräten	6 Bohrfirmen setzen die Geräte zumindest wenn verlangt ein; im Durchschnitt setzen diese Firmen die Hinterfüllungsmessung bei ca. 10% der Projekte ein	13x	4x wurde das Gerät von Geowatt HMG genannt; ansonsten kommen noch Eigenbauten zum Einsatz
Wie wird die Dichte der Suspension kontrolliert	11x wird das Abmessen eines definierten Volumens mit einer Waage genannt. Die meisten protokollieren dies. Die Erfahrung auf den Baustellen zeigen, dass die tatsächliche Dichtemessung eher selten erfolgt. Die restlichen Angaben sind das Zählen der Säcke oder die Abschätzung über Bohrlochlänge und W/Z-Wert	3x keine Angabe o. Kontrolle	Waage und Messbecher

5 Merkmale und Vergleich von eingesetzten Hinterfüllbaustoffen

Wie Kapitel 4 zeigt, werden in absteigender Reihenfolge folgende Hinterfüllbaustoffe in der Schweiz eingesetzt: K-Injekttherm 110, BTD Füller 350, Standardmischungen, K-Zeotherm, K Injekttherm 102, HDG Daemo HS, HDG Extro/Thermo HS, sowie der Flow & Fill. Die beiden Fertigprodukte K-Injekttherm 110 und BTD Füller 350 machen zusammen 58% der eingesetzten Baustoffe aus. Bei letzteren beiden haben einige Bohrfirmen schon beide im Einsatz gehabt.

5.1 Anforderungen an Hinterfüllbaustoffe

Im Kapitel 2 werden die wichtigsten Anforderungen an die Hinterfüllbaustoffe von Erdwärmesonden beschrieben. Diese kann man in kurz- und langfristige Anforderungen unterscheiden. Die kurzfristigen betreffen vielmehr das Anmischen, den Verfüllvorgang und die anfängliche Stabilität bzw. Entmischung. Die langfristigen definieren die langfristige Beständigkeit und Stabilität der Hinterfüllung, damit diese dem Grundwasserschutz und der Funktionstüchtigkeit der Erdwärmesonden gerecht werden. Einige Anforderungen werden von Spezialzementen erfüllt, wie z.B. speziell die Frost- und Sulfatbeständigkeit oder eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit. In Abb. 14 werden die Anforderungen, deren Auswirkungen und mit welchen Zementeigenschaften diese erreicht werden tabellarisch zusammengefasst. Im Detail wird dies in Kapitel 2 beschrieben. Die nachfolgende Tabelle soll helfen, die eingesetzten Baustoffe zu vergleichen.

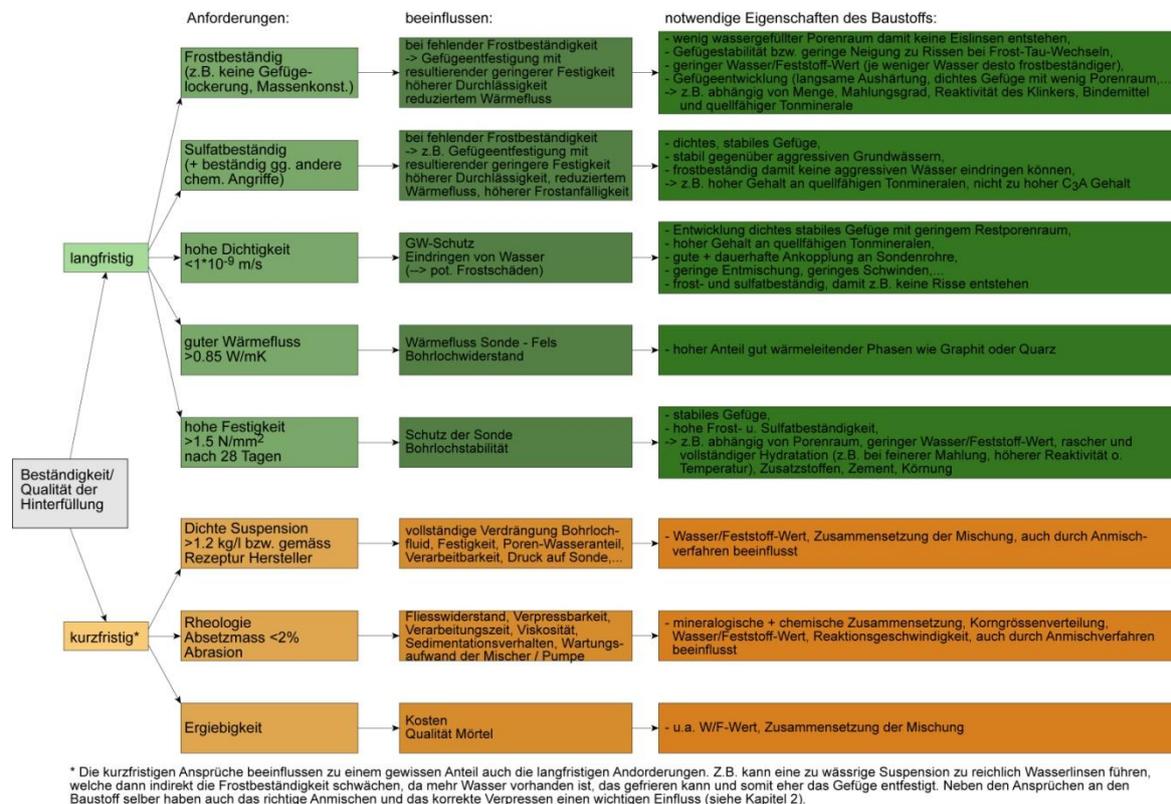


Abb. 14 Kurz- u. langfristige Anforderungen an den Hinterfüllbaustoff

Ob ein Hinterfüllbaustoff nun langfristig gut oder schlecht ist, kann nur schwer beziffert werden, denn jede Eigenschaft soll eine bestimmte Aufgabe erfüllen. Es kann sein, dass der Baustoff die eine Anforderung bestens erfüllt, aber umgekehrt dann eine andere nicht. So wird die Bewertung

subjektiv. Besonders die kurz- und langfristigen Anforderungen konkurrenzieren sich gegenseitig. So steht z.B. ein hoher W/F-Wert für eine leichte Verarbeitbarkeit und hohe Ergiebigkeit. Umgekehrt hat sich gezeigt, dass diese Baustoffe dann weniger frostbeständig sind, zu einem höheren Absetzmass führen und geringere Festigkeiten aufweisen.

Für einen optimalen langfristigen Betrieb, sowie eine lange stabile dichte Hinterfüllung sind quellfähige Tonminerale (z.B. Bentonit), ein geringer W/F-Wert und eine langsame und gute Gefügebildung während der Hydratation von Vorteil. Ein erwünschter guter Wärmefluss ist einfach mit Zuschlägen wie z.B. Graphit erreichbar, ohne, dass die anderen Eigenschaften gemindert werden.

5.2 Merkmale Hinterfüllbaustoffe und Anmischanforderungen

Nachfolgend werden die für die langfristige Qualität wichtigsten Eigenschaften und Merkmale der meistgenutzten Hinterfüllbaustoffe gegeben. Zum Vergleich werden auch Werte von Proben angegeben (siehe Kapitel 6). Die Gesamtbewertung erfolgt in Kapitel 8.

Tab. 2 Merkmale und Anmischvorgaben der meist eingesetzten Hinterfüllbaustoffen

Mörtel:	K-Injektthem 110	BTD Füller 350	Standard-, Baustellen-, bzw. Eigenmischung	K-Zeotherm
Anteil (Abb. 13):	38%	20%	17%	6%
Total der eingesetzten Mörtel	81%			
Produkt-Anpreisung gemäss Hersteller	Ergiebig, gute Wärmeleitfähigkeit, leicht → für tiefe Sonden, gute Rheologie, geringes Absetzmass	Sehr ergiebig, hoher Sulfatwiderstand, wasserrechtlich umweltverträglich, volumenbeständig	Erfüllt Anforderungen gemäss Richtlinien BAFU 2009	Spezialmörtel, hohe Wärmeleitfähigkeit, sulfat-, frostbe-ständig, ergiebig, leicht → für tiefe Sonden, gute Rheologie,
Dichte-Empfehlung gemäss Hersteller	1.45 kg/l	1.22 kg/dm ³	Ca. 1.2 kg/dm ³ (gemäss z.B. Herrmann 2008)	1.48 kg/l
Dichte gemäss Proben (Kapitel 6)	1.27-1.74 kg/dm ³ 8 Proben	1.06-1.26 kg/dm ³ 9 Proben	1.48 kg/dm ³ eine Probe	1.16-1.59 kg/dm ³ 4 Proben
W/F-Wert-Empfehlung (Wasser-Feststoff-Wert)	0.8 (gemäss Hersteller)	2.48 (gemäss Hersteller)	3 (gemäss SIA 384/6 F.3)	0.8 (gemäss Hersteller)
Durchlässigkeit	*	<1*10 ⁻¹⁰ m/s (nach DIN 18130, nach 28 Tagen)	<6*10 ⁻⁸ m/s (gemäss Herrmann 2008)	*
Festigkeit nach 7 / 28 Tagen	0.7 / 1.5 N/mm ²	1.1 / 2.0 N/mm ²	- / 0.09 N/mm ² (gemäss z.B. Niederbrucker & Steinbacher 2007)	*
Wärmeleitfähigkeit	0.9 W/mK (trocken) 2.0 W/mK (feucht)	0.8 W/mK	0.8 W/mK (feucht, gemäss z.B. Herrmann 2008)	>2 W/mK
Absetzmass	-3.5%	Keine Angaben	Abhängig vom Vorquellen bis 31% (gemäss z.B. Niederbrucker & Steinbacher 2007)	*
Frostbeständigkeit	Keine Empfehlung gemäss Hersteller	Keine Empfehlung gemäss Hersteller	NEIN (gemäss Herrmann 2008, Niederbrucker &	Frostbeständig gemäss Hersteller

			Steinbacher 2007)	
Frostbeständigkeit Proben (Kapitel 6)	Abgrusung nach 2 Frost-Tau-Zyklen	Haarrisse nach 2 Frost-Tau-Zyklen	Nicht getestet	Keine Gefügeänderung
Sulfatbeständigkeit	Keine Empfehlung gemäss Hersteller	Hoher Sulfatwiderstand gemäss Hersteller	NEIN	Sulfatbeständig gemäss Hersteller
Rheologie (Marschzeit / Viskosität)	*	Ca. 60 s (nach DIN V 4126-100) / $3.2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	Ca. 30 s / 400 mPas (gemäss z.B. Herrmann 2008)	*
Besonderheiten		sehr hoher W/F-Wert	verschiedenste Anmischungen mit z.B. Opalit, Bentonit, verschiedenen Zementen → grosser Spielraum	nachweislich frostbeständig und hohe Wärmeleitfähigkeit

(* derzeit läuft eine umfangreiche Prüfphase. Die Werte liegen erst ab Oktober 2018 vor. Sollwerte siehe Abb. 14 und Kapitel 2)

5.3 Einfluss Typ und Anmischen von Hinterfüllbaustoffen auf Qualität und Langlebigkeit

Wie verschiedene Studien und Tab. 2 zeigen (z.B. Herrmann 2008 und Niederbrucker & Steinbacher 2007) variieren die Merkmale der verschiedenen Hinterfüllbaustoffe stark. Generell schneiden die Standard-, Baustellen-, bzw. Eigenmischungen bei den meisten Merkmalen (z.B. Festigkeit, Absetzmass, Frostbeständigkeit, Durchlässigkeit) am schlechtesten ab. Je nach verwendeten Quelltonen, min. & chem. Zusammensetzungen, Anmischvorgehen und Vorquellzeiten erreichen die Eigenmischungen z.T. unzulängliche Werte. Es zeigt sich, dass nicht nur der Zementtyp alleine für gute Merkmale und die Qualität massgebend ist, sondern auch das korrekte Anmischen und Verpressen des Mörtels (z.B. homogen, W/F-Wert bzw. Dichte gemäss Hersteller, lückenlos von unten bis nach oben; siehe dazu auch Kapitel 2 und 8).

Mehrere Merkmale sind für die langfristige Stabilität und Funktionstüchtigkeit der Hinterfüllung entscheidend (siehe auch Kapitel 2 und 8). Neben der Frost- und Sulfatbeständigkeit sind dies auch die Gefügestabilität und -festigkeit, welche wiederum z.B. vom W/F-Wert, Tonmineralgehalt, Bindemittel und Aushärtedauer abhängen. Ist die Hinterfüllung nicht beständig bzw. erreicht erst gar nicht die Mindestanforderungen, so kann sie die Dichtigkeit, Ankopplung, Festigkeit und den Wärmefluss nicht mehr gewährleisten.

Viele Studien zeigen, dass die Frostbeständigkeit ein wichtiges Merkmal ist. Vermehrte unterkühlte Sonden, sowie die zunehmende Sondendichte begründen dies. Bei Wasser / Feststoff-Werten >0.4 verbleibt auch nach vollständiger Hydratation Wasser in den Poren (z.B. Empfehlungen Bund/ Länder-arbeitsgruppen 2015). Je höher der Wassergehalt, desto weniger frostbeständig sind die Hinterfüllungen und desto geringer ist die Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Dichtigkeit (z.B. Herrmann 2008). Selbst wenn der beste Baustoff alle notwendigen Anforderungen erfüllt, aber nicht frostbeständig ist kann er langfristig eine dauerhafte, dichte und stabile Einbindung der Sonde in den Untergrund nicht erfüllen. Nachfolgendes Kapitel sowie die verschiedenen Studien zeigen, dass einige Hinterfüllbaustoffe schon nach wenigen Frost-Tau-Zyklen eine starke Gefügestabilisierung aufweisen.

Es sei angemerkt, dass tiefe W/F-Werte umgekehrt eher ungünstig für die Fliess- und Pumpfähigkeit der Suspension sind, sowie höhere Dichten bei tiefen Sonden zu einem Quetschen führen können. Es muss somit ein guter Mittelweg bzgl. der Verarbeitung bzw. dem Verpressen und der langfristigen Qualität der Hinterfüllung gefunden werden. Die Statistik zeigt aber, dass immer wieder gute Hinterfüllbaustoffe eingesetzt werden, die eine langfristige Qualität aufweisen. Dies sind die Spezialmörtel, wie z.B. der am häufigsten eingesetzte Zeotherm.

5.4 Verbesserte Hinterfüllbaustoffe

Wie in Kapitel 4 gezeigt, kommen i.W. nur die Spezialmörtel von Kuchler (Zeotherm 1.0 und 2.0) und von HDG (Extro, Thermo, Daemo HS) zum Einsatz. Diese weisen höhere Wärmeleitfähigkeiten, sowie Frost- und Sulfatbeständigkeiten auf. Zusammen machen diese ca. 10% der eingesetzten Hinterfüllbaustoffe aus.

Dass sie qualitativ höherwertig sind, ist unbestritten. Es stellt sich aber die Frage zum Kosten – Nutzen – Verhältnis und ob die Produkte in der Realität die Anpreisungen auch tatsächlich einhalten.

Bzgl. der **Anpreisung** ist massgebend, wie der Baustoff geprüft wurde (z.B. im trocken / offenen o. feuchten / geschlossenen Milieu und bei welchem W/F-Gemisch) und wie dieser in der Realität verbaut wird. Häufig beruhen die Herstellerangaben auf internen Labormessungen auf Basis unterschiedlichster oder unbekannter Prüfdurchführungen. Gegenprüfungen der einzelnen Hersteller kommen oftmals mit anderen Prüfmethode zu anderen Ergebnissen. Für einzelne Parameter bestehen teilweise keine Prüfberichte oder wurden diese gar nicht getestet (siehe z.B. Tab. 2). So ist die Vergleichbarkeit schwierig und man muss den Anpreisungen glauben. Wie Kapitel 6 zeigt, variieren die Dichten also auch die Anmischverhältnisse. Entsprechend werden die Spezialeigenschaften ihrer Aufgaben je nachdem unterschiedlich gerecht. Wie schon mehrfach genannt, kann auch der beste Baustoff bei unsachgemässer Anmischung und Verpressung seine Anforderungen nicht erfüllen. Wie gravierend aber der Einfluss wirklich ist und ob die Baustoffe ihre Anpreisungen wirklich dauerhaft und in der Realität einhalten können, müsste systematisch untersucht bzw. gemessen werden. Dies müsste unabhängig mit verschiedenen bzw. geeigneten Prüfmethode erfolgen. Wie aber einzelne Vergleichsmessungen zeigen (siehe Referenzen bzw. Kapitel 2), werden im feuchten Zustand die angepriesenen Wärmeleitfähigkeiten generell erreicht. Häufig geht die verbesserte Wärmeleitfähigkeit einher mit einer Anpreisung der Frost- und Sulfatbeständigkeit. Wie Studien (siehe Kapitel 2) und eigene vereinfachte Untersuchungen in Kapitel 6 zeigen, halten diese verbesserten Baustoffe, die explizit ausgewiesene Frostbeständigkeit grösstenteils auch ein.

Für den **Kosten-Nutzen-Vergleich** wurden Simulationen mit der Software EWS von Huber Energietechnik AG durchgeführt. Dabei wurde die Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung variiert und die notwendige die notwendige Bohrmeterlänge berechnet. Dies erfolgte für ein typisches neues Einfamilienhaus mit einer mit einer Erdwärmesonde und für ein kleines Sondenfeld von 4 Sonden. Zudem wurde die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes variiert (Standarduntergrund mit 2.2 W/mK sowie ein Untergrund mit Untergrund mit höherer Wärmeleitfähigkeit von 2.8 W/mK wie z.B. in Kalksteinen, quarzreichen Molassesandsteinen oder im Fall von Grundwasserfluss). Wie

Tab. 3 zeigt, können im Fall einer thermisch verbesserten Hinterfüllung auf Grund des geringeren Bohrlochwiderstandes Bohrmeter eingespart werden. Bei einem Mehrpreis pro Bohrmeter von gemittelt ca. 2.5 SFR (Herstellerangabe) bis 4.5 SFR (verrechnete Mehrkosten von Bohrfirma) für die bessere Hinterfüllung bei Kleinobjekten gleichen sich die Mehrkosten für den teureren Mörtel und die eingesparten Bohrmeter nahezu aus. Je höher die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes, desto geringer sind die Mehrkosten für den thermisch verbesserten Mörtel, weil sukzessive weniger Bohrmeter notwendig sind. Bedenkt man, dass die meisten eingesetzten, thermisch verbesserten Hinterfüllbaustoffe auch höhere Qualitäten z.B. bzgl. der Frostbeständigkeit, Dichtigkeit oder langfristiger Gefügestabilität aufweisen, erhält man bei nahezu Kostengleichheit einen deutlichen Mehrwert.

Tab. 3 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung auf die Sondenmeter bzw. Mehrkosten

	Typischer Neubau EFH		4 Sonden in Reihe Sondenabstand 7 m	
	normale Hinterfüllung	verbesserte Hinterfüllung	normale Hinterfüllung	verbesserte Hinterfüllung
Heizenergie ohne WW	12'000 kWh	12'000 kWh	48'000 kWh	48'000 kWh
Heizenergie WW	4'000 kWh	4'000 kWh	16'000 kWh	16'000 kWh
Freecooling	-	-	2'400 kWh	2'400 kWh
COP B0/W35	4.5	4.5	4.5	4.5
COP B0 / W55	2.8	2.8	2.8	2.8
Heizleistung WP	8 kW	8 kW	32 kW	32 kW
Wärmeleitfähigkeit Standarduntergrund (höhere Wärmeleitf. vom Untergrund)	2.2 (2.8) W/mK	2.2 (2.8) W/mK	2.2 (2.8) W/mK	2.2 (2.8) W/mK
Standard-Temperaturprofil	3°C/100 m	3°C/100 m	3°C/100 m	3°C/100 m
Auslegung	50 Jahre, mittl. Vor-Rücklauf-Temp. -1.5°C	50 Jahre, mittl. Vor-Rücklauf-Temp. -1.5°C	50 Jahre, mittl. Vor-Rücklauf-Temp. -1.5°C	50 Jahre, mittl. Vor-Rücklauf-Temp. -1.5°C
Wärmeleitfähigkeit Hinterfüllung	0.8 W/mK	2.0 W/mK	0.8 W/mK	2.0 W/mK
Bohrlänge gemäss Simulation inkl. 10% Sicherheit	169 m (147 m)	156 m (134 m)	4*197 m (171 m)	4*184 m (156 m)
Mehrkosten für mehr Bohrmeter +45 SFR / m weil schlechtere Wärmeleitfähigkeit	(169m-156m) * 45,- = 585 SFR (13m * 45,- = 585,-)		(4*(197m-184m)) * 45,- = 2'340 SFR (60m*45,- = 2'700,-)	
bzw. verbesserte Hinterfüllung +4.5 SFR / m weil teurerer Mörtel		156m * 4.5,- = 624,- (134m*4.5,- = 603,-)		736m*4.5,- = 2'944,- (624m*4.5,-=2'808,-)
Anmerkungen	Im Vergleich zu thermisch verbesserter Hinterfüllung sind mehr Bohrmeter notwendig (13 m) → Bohrkosten entsprechend um 585,- höher	Mehrkosten für bessere Hinterfüllung (603,-) entsprechen ca. eingesparten Bohrmeter (585,-)	Auf Grund gegenseitiger thermischer Beeinflussung mehr Bohrmeter nötig als bei EFH (197 anstatt 169 m pro Sonde)	Mehrkosten für bessere Hinterfüll. bei Berücksichtigung eingesparter Bohrmeter bei Untergrund mit höherer Wärmeleitfähigkeit geringer als bei normalem (108 SFR anstatt 604 SFR)

Hinterfüllbaustoffe mit höherer Wärmeleitfähigkeit (z.B. Zeotherm 2.0) weisen generell auch höhere Qualitäten bzgl. Frostbeständigkeit o. langfristiger Gefügestabilität auf. Bei der Tatsache, dass durch eine höhere Wärmeleitfähigkeit Bohrmeter eingespart werden, erhält man praktisch ohne Mehrkosten eine qualitativ höherwertigere und langlebigere Hinterfüllung.

6 Analyse von verpressten Hinterfüllmaterialien

6.1 Vorgehen

Dank der Zusammenarbeit mit den Bohrmeistern vor Ort konnten 42 Suspensions-Proben während der Hinterfüllung entnommen werden. Dabei wurden 35 Proben aus dem Mischer (meist über Verpressschlauch, selten direkt aus dem Mischer entnommen) sowie 7 Proben von der Suspension, welche aus dem Bohrloch kam, sobald der Zementpiegel die Oberfläche erreicht hat, entnommen. Ziel war es, möglichst viele Proben von allen Hinterfüllbaustoffen und von verschiedensten Bohrfirmen bzw. Bohrmeistern zu sammeln. Durch die Vorortbegleitung während des Hinterfüllens konnte auch das Vorgehen analysiert werden.

Die Proben wurden verglichen bzgl. Dichte, Homogenität, Absetzmass, Entwicklung der Festigkeit und z.T. Frostbeständigkeit. Dafür wurden die Suspensionen in 1 oder 1.5 Liter-Gefässen entnommen und bis auf wenige Ausnahmen vollständig gefüllt. Entsprechend der Aushärtung im Bohrloch / Fels wurden die Gefässe geschlossen gehalten. Die Analysen sind als erste einfache Vergleiche anzusehen und ersetzen keine Laboruntersuchungen. Sie sollen nur einen Überblick verschaffen und insbesondere aufzeigen, wie die Hinterfüllungen auf der Bohrstelle angemischt werden. Insbesondere war von Interesse, ob die Suspensionen die von den Herstellern empfohlenen Dichten aufweisen. Es geht weniger darum, die tatsächliche Qualität der Mörtelprodukte zu bestimmen. Dies müsste mit genormten Laborprüftests erfolgen. Bei der Verifizierung der Frostbeständigkeit ging es ebenfalls nur um eine erste simple vergleichende Untersuchung, wie sich das Gefüge bei einer Frostbeanspruchung entwickelt (Rissbildung, Volumen- und Massenveränderung). Die Dichte wurde mittels Waage bestimmt. Mittels optischer Prüfung wurde die Homogenität, Absetzmass und Gefügeentwicklung während der Frost-Tau-Versuche ermittelt. Die Festigkeit wurde per Hand überprüft, wie schnell und ob die Suspension überhaupt ausreichend abbindet.

6.2 Dichten der beprobten Suspensionen

Suspensionsdichte

In Abb. 15 sind die verschiedenen gemessenen Suspensionsdichten dargestellt. Die vom Hersteller empfohlene Dichte ist ebenfalls aufgetragen. 8 verschiedene Mörteltypen wurden gemessen. Die Anzahl verschiedener Suspensions-Mischungen pro Mörteltyp liegen bei 1 bis 11. Die Suspensionen können 10 verschiedenen Bohrfirmen und 17 Bohrmeistern zugeordnet werden.

Die Suspensionsdichten pro Zementtyp haben eine Varianz von bis zu 0.4 kg/l zum vom Hersteller angegebenen Referenzwert. Im Durchschnitt liegt die Abweichung bei ca. 0.17 kg/l, wobei diese beim BTD-Füller 350 mit 0.07 kg/l am kleinsten ist. Abgesehen vom BTD wird tendenziell eher zu dick angemischt, was die Qualität der Hinterfüllung (z.B. Festigkeit, Dichtigkeit, Frostbeständigkeit) i. Vgl. zu „wässrigen“ Mischungen verbessert. Zudem zeigt dies, dass scheinbar nicht an Material gespart wird, damit Kosten eingespart werden können. Bei höheren Dichten muss bei tiefen Sonden zwingend darauf geachtet werden, dass die Sonden nicht gequetscht werden. Gleichwohl sollte generell gemäss Hersteller-Empfehlung angemischt werden.

Es konnten Proben von Durchlauf-, Kolloidalmischern und eine aus der Wanne analysiert werden. Eine eindeutige Korrelation der Suspensionsdichten mit den Mischern besteht aber nicht. Eine leichte Tendenz scheint vorzuliegen, dass die Dichten bei der Verwendung von Kolloidalmischern näher bei den empfohlenen Werten liegen und weniger stark variieren. Die Varianz bei allen Mörteltypen zeigt zudem, dass generell über alle Bohrmannschaften hinweg unterschiedliche Dichten bestehen.

6 Proben zeigten Suspensionsdichten von <1.2 kg/l, also unter dem vom FWS vorgegebenem Richtwert. Diese Hinterfüllungen sind mit Wahrscheinlichkeit von geringerer Qualität. Dies betrifft besonders den Baustoff BTD-Füller 350, welcher ohnehin schon einen hohen W/F-Wert aufweist und entsprechend bei einem nicht genau eingestellten Mischungsverhältnis noch schneller zu tiefe Dichten erreicht.

Es sei angemerkt, dass bei der Begleitung der Hinterfüllungen aufgefallen ist, dass die Homogenität besonders bei den Durchlaufmischern variiert. Z.T. konnte ein klumpiges Gefüge

festgestellt werden oder waren die Mischungen bereits optisch feststellbar unterschiedlich dick bzw. wässrig. Letztere kann z.T. darauf zurückgeführt werden, dass nicht immer kontinuierlich Rohmasse zugeschüttet wurde, die Wasserzufuhr wiederholt neu eingestellt wurde, oder die Wasserzufuhr bauseits nicht konstant war. Es würde wahrscheinlich Sinn machen, während des gesamten Hinterfüllvorgangs wiederholt die Dichte zu bestimmen und deren Variation zu analysieren.

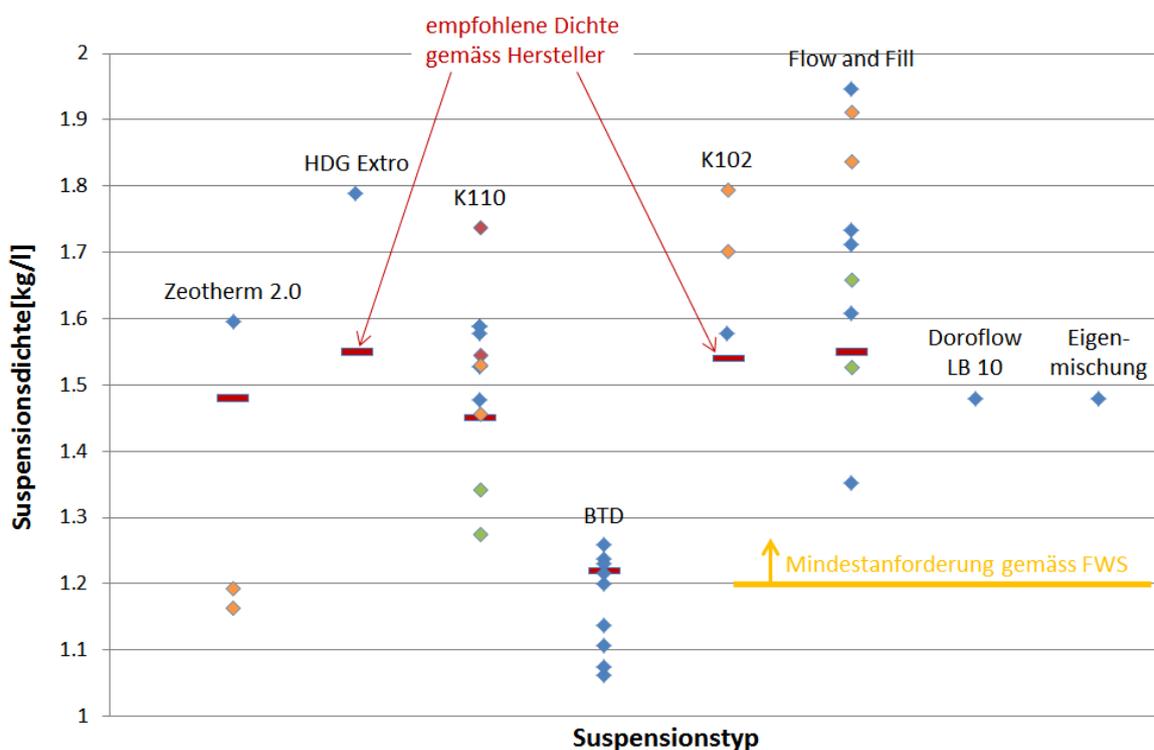


Abb. 15 Suspensionsdichte in Abhängigkeit vom Mörteltyp.

Die vom Hersteller empfohlene Dichte wird als roter Balken dargestellt. Die Vor- und Rücklaufproben der jeweiligen Injektion werden in derselben Farbe (orange bzw. grün) dargestellt. Die Mindestanforderungen liegen bei 1.1 bis 1.3 kg/l (siehe Kapitel 2.2).

Vergleich Suspensionsdichte bei Vorlauf und Rücklauf

Die Abb. 16 zeigt wie zu erwarten, dass es Dichte-Unterschiede der Suspension vor Ein- und nach Austritt aus dem Bohrloch gibt. Während 7 Injektionen wurden sowohl Proben aus dem Vorlauf bzw. Injektionsschlauch, wie auch aus der wieder am Bohrloch austretenden Suspension entnommen. 5 von 7 Proben vom Auslauf am Bohrlochkopf weisen eine kleinere Dichte als die jeweilige Vorlauf-Probe auf. Es gibt zudem keine Korrelation mit Wasserzutritten im Bohrloch. 2 Proben weisen eine höhere Dichte der Rücklauf-Probe auf. Dies spiegelt ev. wie oben schon angedeutet, die variierende Homogenität der Suspensionen während des Mischvorgangs wieder. Diese Mörtel wurden mit einem Durchlaufmischer aufbereitet. Die geringeren Dichten bei den Rücklauf-Proben lassen sich generell damit erklären, dass sich die Suspension beim Aufstieg mit dem Wasser im Bohrloch verdünnt.

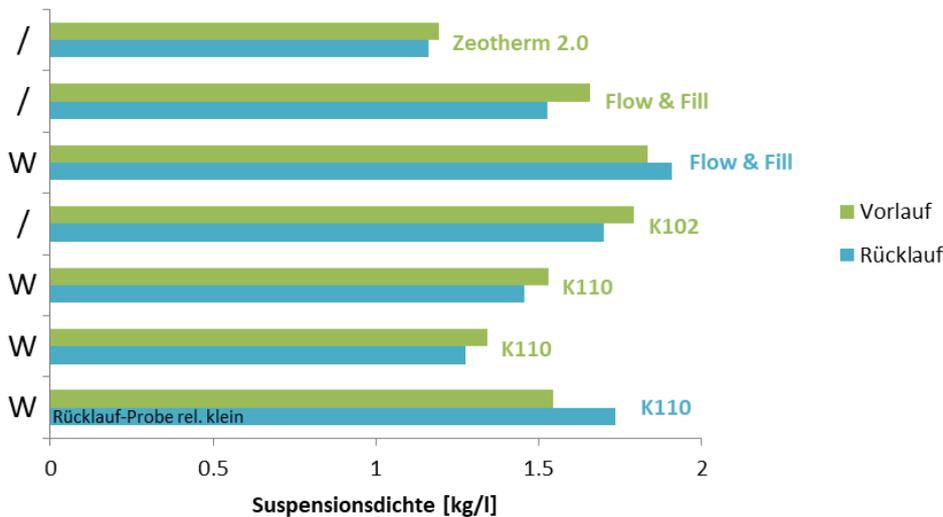


Abb. 16 Vergleich der Suspensionsdichte von Proben aus Vor- und Rücklauf.
Wassereintritte in das Bohrloch werden links mit „W“ gekennzeichnet

Suspensionsdichte vs. Sondenlänge

Bei Ablenkungs- und/oder Temperaturmessungen in den Sondenrohren kann immer wieder bei tieferen Sonden eine geringfügige Quetschung der Sondenrohre beobachtet werden, weil die Messgeräte aufstehen. Es liegt nahe, das Problem bei zu schweren Hinterfüllungen oder nicht korrekt dicht verschlossenen oder zu früh geöffneten Sondenrohrköpfen während der Hinterfüllung zu suchen. Gemäss SIA 384/6 muss die Suspensionsdichte an die Sondenlänge angepasst werden oder eine Stufenzementation durchgeführt werden, um einen Überdruck zu vermeiden.

Selten trifft man an, dass während der gesamten Hinterfüllung der Innendruck im Sondenrohr nicht mit einem Manometer überwacht wird. Generell wird die Schutzverrohrung rasch nach der Hinterfüllung gezogen. Dabei zeigt sich, dass wiederholt der druckdichte Verschluss an der Sonde geöffnet oder ganz abgenommen wird. Immer wieder beobachtet man, dass danach die Sonde nicht wieder unter Druck gesetzt wird. Allerdings verwenden zunehmend mehr Bohrmeister Schnellkupplungen, die es erlauben, die Schutzverrohrung zu ziehen, ohne die Sondenrohre zu öffnen.

Die tatsächliche Umsetzung im Alltag wird mithilfe der Abb. 17 dargestellt. Die Grafik zeigt, dass keine eindeutige Korrelation mit der Sondentiefe besteht. Die Dichte der Hinterfüllung wird eher nicht an die Sondentiefe angepasst. Einzig beim K110 besteht eine Tendenz, dass mit zunehmender Sondenlänge eine geringere Suspensionsdichte zur Anwendung kommt. Zudem zeigen die Werte, dass alle eingebauten Hinterfüllungen die maximal zulässigen Dichten nicht überschreiten, ab welchen ein Einbau nicht mehr erlaubt wäre. Gemäss Aussage einiger Bohrmeister wird aber der Hinterfüllstoff immer mit dem gleichen W/F-Verhältnis angemischt. Trotz einiger Nachteile beim BTM ist dieser Mörtel auf Grund der geringen Dichte hinsichtlich der Sondenstabilität von Vorteil.

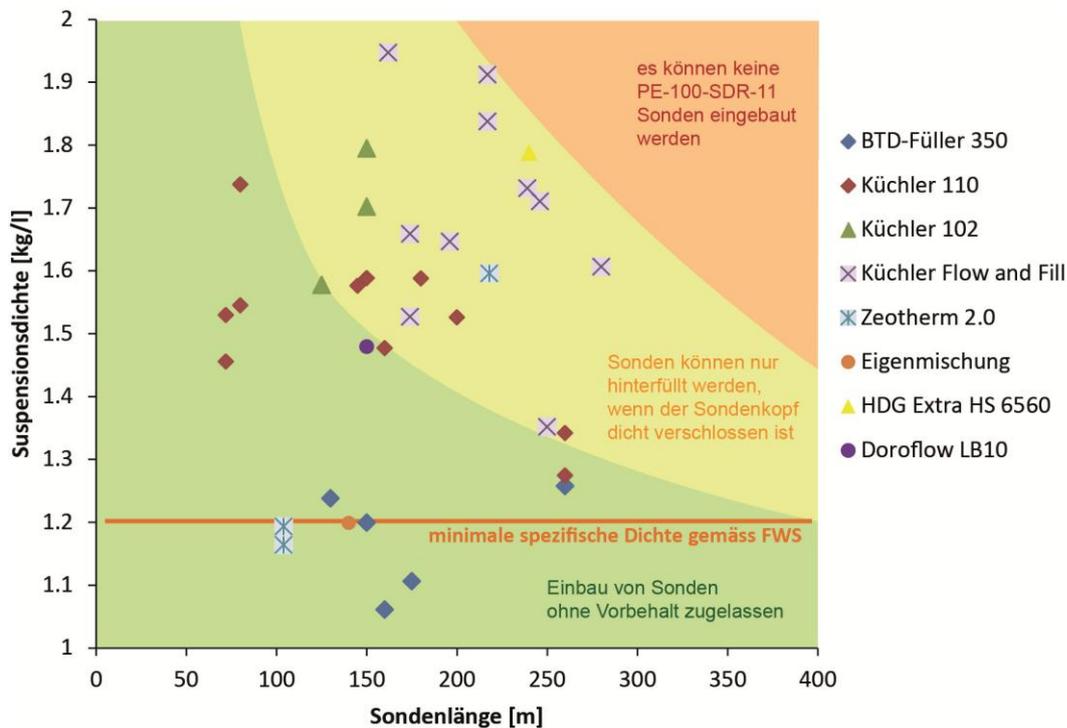


Abb. 17 Suspensionsdichte in Abhängigkeit der Sondenslänge

Mit farblichen Hintergründen, sind die Grenzen gemäss SIA 384/6 aufgetragen, bis zu welchen je nach Suspensionsdichte der Sondenkopf offen oder druckdicht verschlossen sein muss bzw. eine Hinterfüllung nur als Stufenzementation erfolgen darf, damit die Sondenrohre nicht gequetscht werden.

6.3 Frostbeständigkeit der Hinterfüllstoffe

In verschiedenen Studien und Berichten (siehe Referenzen und Kapitel 2) wird die Frostbeständigkeit für die langfristige Qualität der Hinterfüllung als ein sehr wichtiger Parameter angesehen. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Studie wenige ausgewählte Proben von der Bohrstelle auf ihre Frostbeständigkeit überprüft. Es wurden die Mörteltypen gewählt, die am häufigsten zum Einsatz kommen und die Mörtel von preiswert bis hochqualitativ abdecken, der Küchler 110, BTD-Füller 350, Zeotherm 2.0 und Flow and Fill.

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, wurde nur eine simple Überprüfung durchgeführt (entsprechende Vorschläge für ausgereifte Tests finden sich z.B. in Anbergen 2015). Aus den Flaschenproben wurden ca. 7 cm breite Scheiben mit einem Durchmesser von 10 cm gesägt. Der Flaschenrand wurde an der Probe belassen. Die Proben wurden, mit dem Ziel reale Bedingungen nachzustellen, luftdicht verpackt und 5 Frost-Tau-Zyklen ausgesetzt. Nach dem 5. Auftauen wurden die Proben während 2 Zyklen zwischendurch in Wasser gelegt sowie weitere 2x gefroren und aufgetaut. Alle Proben wurden exakt den gleichen Bedingungen ausgesetzt. Alle Proben wiesen vor dem ersten Gefrieren keine Risse auf.

Nach der 2. Gefrierphase zeigten sich die ersten deutlichen Auswirkungen bei der Flow and Fill und der BTD-Probe. Es bildeten sich mehrere Risse mit Öffnungsweiten von bis zu 0.2 mm im Flow and Fill und zahlreiche Haarrisse im BTD. Im K110 ist ein Abgrusen bzw. kies-artiges Abplatzen zu erkennen. Bei den weiteren Gefrier- und Auftauzyklen ändert sich das Gefüge nur noch kaum. Die Zeotherm Probe zeigt auch nach mehreren Frost-Tau-Zyklen keine Gefügeänderung.

Werden die Proben zwischen den Frost-Tau-Zyklen einem Wasserbad unterzogen, so erfolgt eine weitere starke Gefügeschwächung. Bereits nach einem Wasserbad nach dem 5. Frost-Tau-Zyklus wurde ein starker Massenverlust bei Probe K110 und ein leichter bei BTD festgestellt. Nach 2

weiteren Gefrier- und Auftauzyklen haben sich die Risse im Fill and Flow auf bis zu 1.3 mm verbreitert. Im BTM haben sich zahlreiche Risse bis zu einer Breite von 0.6 mm gebildet

Nach einem weiteren Wasserbad und Frost-Tau-Zyklus ist vor allem der BTM stark angegriffen. Die bis zu 0.6 mm breiten Risse ziehen sich durch die gesamte Probe. Auch die Flow and Fill-Probe zeigt eine weitere Zunahme feiner Haarrisse. K110 zeigt nur vereinzelt weitere Haarrisse. Bei der BTM- sowie bei der Kuchler 100-Probe lässt sich ein weiterer Massenverlust feststellen. Nach 2 weiteren Gefrier- und Auftauzyklen verschlechtert sich v. a. die Qualität des BTM merklich. Zeotherm 2.0 zeigt weiterhin keine Risse oder Massenverluste.

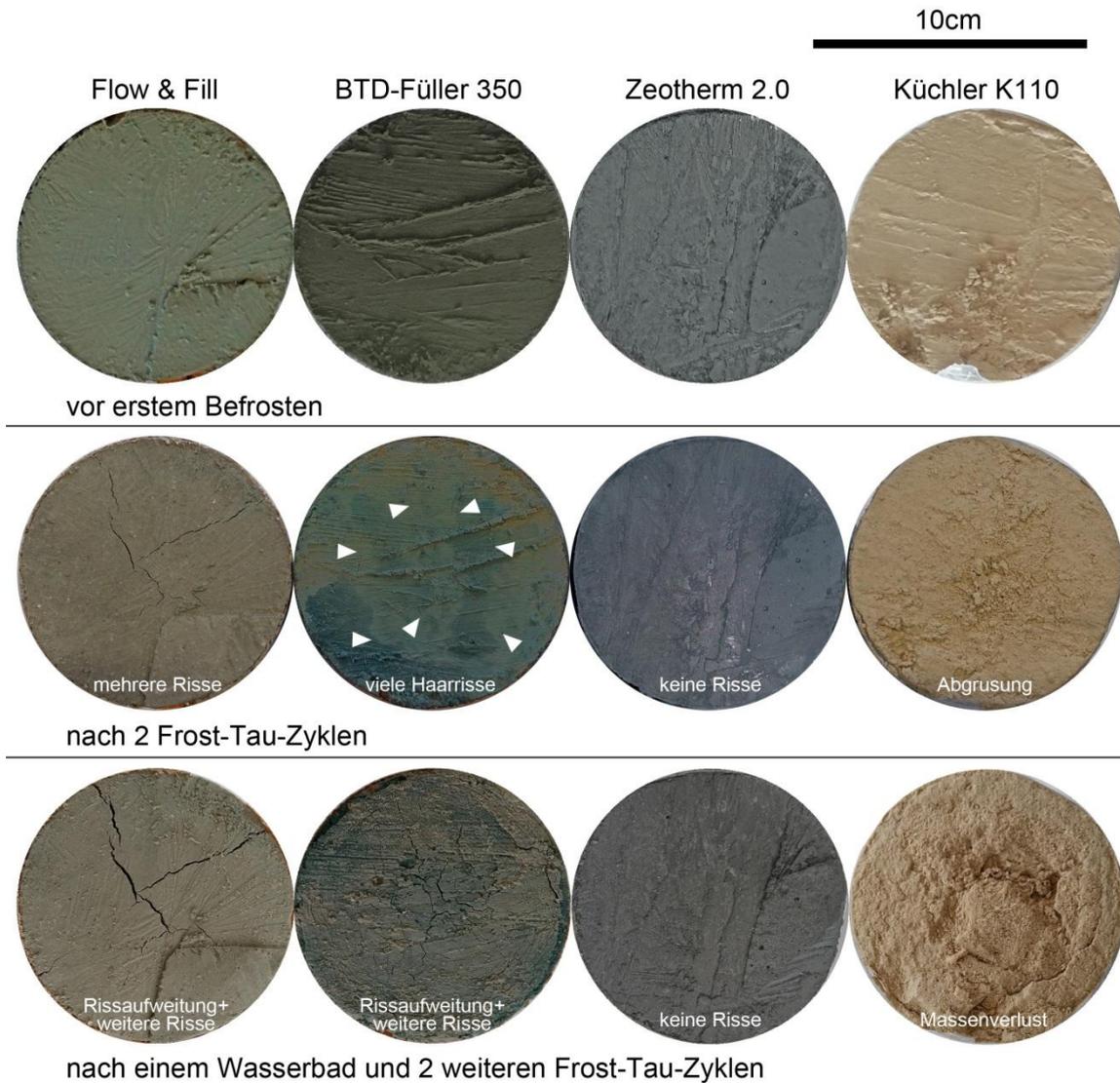


Abb. 18 Gefügeänderungen nach wenigen Frost-Tau-Zyklen

Jede Spalte spiegelt die gleiche Probe bzw. Mörteltyp wider. Die oberste Reihe zeigt die vollständig ausgehärteten, gerade zersägten Proben vor dem Versuchsbeginn. Die gleichen Proben der mittleren Reihe zeigen nach 2 Befrostungen, abgesehen vom Zeotherm, erste deutliche Risse oder Abgrusungen. Nach 5 Frost-Tau-Zyklen, einem folgenden Wasserbad und weiteren 2 Frost-Tau-Zyklen zeigen alle bis auf den Zeotherm eine deutliche weitere Gefügeschwächung bzw. Massenverluste.

Fazit:

Wie von den Herstellern angegeben, ist nur der Zeotherm 2.0 von Kuchler frostbeständig. Alle anderen zeigen bereits nach ein bzw. zwei Frost-Tau-Zyklen deutliche Risse, Haarrisse oder Abgrusungserscheinungen. Dies ist nicht weiter problematisch, werden die Sonden korrekt ausgelegt und kommt es nicht zu einem deutlichen Frostbetrieb. Es zeigt sich jedoch, dass

Sonden nicht immer richtig dimensioniert werden oder Nachbarsonden bzw. neue Wärmepumpen mit einem besseren COP nicht berücksichtigt werden. Entsprechend kommt es zu einer schnelleren oder stärkeren Unterkühlung im näheren Umkreis der Sonden. Dies zeigt auch die Auswertungen von Kriesi (2017), sowie vermehrte Schadensfälle wegen Vereisungen.

Kommt es zu einer Durchfrostung der Hinterfüllung kommt es bei den meisten verwendeten Hinterfüllbaustoffen zu Rissen und Gefügedestabilisierungen. Entsprechend sind die Dichtigkeit, die Festigkeit, der Wärmefluss und die Ankopplung an den Fels nicht mehr gegeben.

6.4 Weitere Merkmale der beprobten Baustoffe

Von 8 homogenen und nicht entmischten Zementproben waren 3 nach 24 Stunden noch deutlich druckweich. Bei zwei druckweichen Proben handelt es sich um K110, bei einer um BT-D. 3 stark entmischten Proben waren auch nach Monaten noch im oberen Bereich zur Wasser-Suspensionsgrenze druckweich. Ein Belastungstest zur exakten Bestimmung der Druckfestigkeit wurde nicht durchgeführt.

3 von 42 Suspensions-Proben zeigten ein grosses Absetzmass bzw. Entmischung. Der entmischte Wasseranteil lag bei 15, 20 bzw. 35% (2x Flow&Fill bzw. 1x K110, Abb. 19). Die entmischten Proben wurden mit einem Durchlauf-Mischer angemischt. 2 stammen von derselben Bohrfirma, aber von unterschiedlichen Bohrmeistern. Sonst zeigten die Proben kein oder nur ein vernachlässigbares Absetzen (Mörteltypen siehe Abb. 15). Auch die BT-D-Proben mit dem höchsten empfohlenen W/F-Wert wiesen keine Entmischungen auf.



Abb. 19 Unterschiedliches Absetzmass der beprobten Hinterfüllungen

Links 2 entmischte Suspensionsproben, rechts homogene und nicht entmischte Proben.

Bei der Probennahme wurde vereinzelt festgestellt, dass die Suspensionen, welche von den Durchlaufmischern dem Bohrloch zugeführt wurden, klumpig waren. Einige Male mussten die Hinterfüllungen gestoppt werden, da die Durchlaufmischer verstopften oder der Injektionsschlauch geplatzt war. Auch war nicht bei jeder Hinterfüllung von Anfang an ausreichend Rohware vor Ort. Zudem war nicht immer die Wasserzufuhr konstant. Entsprechend inhomogen waren zumindest vorübergehend einige verpressten Suspensionen. Wenige Male wurde kein Manometer zur Drucküberwachung in der Sonde eingesetzt. Im Grossen und Ganzen funktionierten aber die Hinterfüllungen gut und waren die Suspensionen homogen und gut verarbeitbar. Generell wurde von unten bis an die Oberfläche verfüllt. Nur bei wenigen EWS wurde eine grössere Menge von oben nachverfüllt.

7 Kontrollmöglichkeiten

Die verschiedenen Kontrollmöglichkeiten der Hinterfüllung wurden bereits in verschiedenen Berichten im Detail beschrieben und diskutiert. Die wichtigsten Berichte sind: Hess et al. (2015) (Qualitätssicherung Erdwärmesonden, Übersicht Messmethoden zur Prüfung der Hinterfüllung) und Empfehlungen der Bund/Länderarbeitsgruppen 2015.

Im vorliegenden Bericht geht es darum Kontrollmöglichkeiten aufzuzeigen, damit eine gute Hinterfüllung ermöglicht bzw. kontrolliert werden kann. Es geht weniger darum, Lücken in der Hinterfüllung aufzudecken. Für letzteres kommen z.B. **thermische, radiometrische oder magnetische Messungen** zum Einsatz. Diese werden im Detail in *Energieschweiz 2015* beschrieben. Alle Messungen sind aber interpretativ und nur mit Erfahrung können ausreichende Rückschlüsse gemacht werden. Einige Beispiele: Gemessene Temperatur-Profile können z.B. einen Grundwasserfluss oder eine homogene Abbindewärme aufzeigen, die wiederum Rückschlüsse zulassen, dass eine lückenlose Verfüllung vorliegt. Ein Kurz-TRT erhöht die Aussagekraft der Temperatur-Profile. Alternativ kann mit einer radioaktiven Quelle die EWS befragt werden und mit Hilfe der Rückstreuung können Dichteanomalien in der Hinterfüllung auffindig gemacht werden. Diese Methode wird ungern gesehen und ist mit entsprechendem Aufwand nur alleine beim Zoll verbunden, weil die Methode nicht in der Schweiz angeboten wird. Wenn der Hinterfüllbaustoff mit ferromagnetischen Zusatzstoffen dotiert ist, kann entweder der Hinterfüllvorgang selber oder nachträglich in der EWS die magnetische Suszeptibilität gemessen werden und entsprechend die Qualität der Hinterfüllung definiert werden. Auch hier gibt es keine schweizer Anbieter und ist der Interpretationsspielraum gross bes. wenn der natürliche Untergrund bereits ferromagnetische Bestandteile aufweist.

Die einfachste Möglichkeit ist die Kontrolle des **verbrauchten Materials**. Bei den Kuchler-Produkten wird in der Regel grob eine Tonne Rohmaterial pro 100 Bohrmeter benötigt. Beim BTD Füller 350 werden ca. 360 kg pro 100 Bohrmeter eingesetzt (Abb. 12). Es ist einfach zu überprüfen, ob vor Beginn der Hinterfüllung ausreichend Säcke der Fertigmischung vor Ort sind und wieviele verbraucht wurden. Diese Kontrolle kann z.B. vom Geologen, Bauherrn oder Architekten erfolgen. Dabei kann auch kritisch die Suspension auf Homogenität und das Vorgehen des Anmischers geprüft werden, ob z.B. beim Durchlaufmischer kontinuierlich Sackware nachgeschüttet wird.

Die wichtigste und ebenfalls sehr einfache Möglichkeit der Prüfung der korrekten Mischung ist das Bestimmen der **Dichte der angemischten Suspension**. Mit einer **Waage** und einem Gefäss kann simpel die Dichte bestimmt werden und entsprechend der korrekte W/F-Wert eingestellt werden. Dies ist besonders bei den Durchlaufmischern von Bedeutung, denn beim Anmischen in einer Wanne oder Kolloidmischer können die Mengen von Frischwasser und Mörtelrohmasse einfacher dosiert werden und besteht keine Abhängigkeit von einer oftmals nicht konstanten Baustellen-Wasserversorgung. Dafür sollte bei den Kolloidmischern oder Wannenanmischungen darauf geachtet werden, dass Frischwasser verwendet wird (nicht Wasser aus der Bohrung!) und ausreichend lange angemischt wird. Eigentlich sollte die Dichtebestimmung immer, am besten zu Beginn und am Ende des Hinterfüllvorgangs erfolgen. Die Mörtel-Hersteller empfehlen dies ebenfalls. Der Geologe, Bauherr oder Architekt sollte kontrollieren, ob eine entsprechende Waage überhaupt vor Ort ist und protokollierte Werte verlangen. Gemäss Umfrage in Kapitel 4 geben viele Bohrfirmen an, dass eine Waage verwendet wird. Die Erfahrung zeigt aber, dass dies zum Teil gar nicht oder nur sporadisch erfolgt und meist nach Gefühl oder Erfahrungswerten angemischt wird. Die unterschiedlichsten Dichte-Werte in Kapitel 6 untermauern diese Feststellung. Bei den Kolloidmischern ist die Problematik etwas geringer, da meist gemäss Herstellervorgaben immer die gleiche Menge Wasser und Anzahl Mörtelsäcke zugegeben und gemischt werden (beim BTD Füller 350 z.B. 2 Säcke und 110 Liter Wasser). Alternativ kann die Dichtemessung auch mit einem **Aräometer** erfolgen. Diese liefern zwar rascher ein genaues Ergebnis, sind aber auch weniger robust.

Soll der Hinterfüllvorgang sehr genau vermessen werden, so bieten sich **digitale Hinterfüllungsmessungen** an. Dafür sind verschiedenste Geräte auf dem Schweizer Markt, die von Geologiebüros, Mörtelherstellern oder messtechnischen Büros angeboten werden. Je nach Gerätetyp können diese mehrere Parameter gleichzeitig messen. Diese sind die zeitaufgelöste Verpressmenge, der Injektionsdruck, der Volumenstrom und die Dichte der Suspension. So kann lückenlos und relativ fälschungssicher die korrekte Suspensionsdichte und Verfüllmenge während des gesamten Verfüllvorgangs kontrolliert werden und der korrekte W/F-Wert eingestellt werden. Auch Verluste in Hohlräume können so erkannt und lokalisiert werden. Bei grösseren EWS-

Feldern werden diese oftmals gefordert. Je nach Erfahrung können diese Messungen vom Bohrpersonal selber oder von Externen durchgeführt werden. Wenige Bohrgeräte in der Schweiz haben solche Geräte direkt auf der Maschine integriert und können somit die Hinterfüllung protokollieren. Bei Kleinobjekten sind diese Messungen vergleichsweise teuer und die oben genannten Prüfmethode ebenso ausreichend, insbesondere weil meist eine intensivere Überwachung z.B. durch den Bauherrn erfolgt.

Generell kann festgehalten werden, dass der Hinterfüllung kein grosses Gewicht gegeben wird. Ev. liegt das am Unwissen bzgl. der möglichen Konsequenzen oder da alles nicht sichtbar ist und man ohnehin nur vertrauen kann. Entsprechend wird auch wenig die Hinterfüllung kontrolliert. Die Unwissenheit beginnt z.T. auch beim Hersteller wie eine Antwort zeigt. Dieser meinte, dass eine Frostbeständigkeit doch nicht relevant ist, da sich die Hinterfüllung immer unterhalb der Frostgrenze befindet (tiefer als 1m von der Oberfläche!). Bei Gesprächen mit den Bohrmeistern scheint es, dass es vielen nicht bewusst ist, was eine lückenhafte Verfüllung oder eine falsche Anmischung für Folgen haben kann. Viele Planer und auch begleitende Geologen, sowie erst Recht die Bauherren sind sich der Bedeutung des Zementtyps, der korrekt angemischten Suspension, sowie der lückenlosen Hinterfüllung wenig bewusst.

8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

8.1 Allgemeine Anforderungen an die Hinterfüllung

Im Kapitel 2 werden die wichtigsten Anforderungen inkl. Grenzwerten an einen Hinterfüllbaustoff genannt. Diese sind u.a. die Dichte, Wasser/Feststoff-Wert, Druckfestigkeit, Durchlässigkeit, Gefügebeständigkeit z.B. bei Einwirkung von Frost o. aggressiven Wässern, Rheologie und Wärmeleitfähigkeit. Mit diesen Anforderungen kann die Hinterfüllung die wichtigsten Aufgaben, wie dauerhafte Ankopplung an den Untergrund, Wärmefluss, Schutz der Sondenrohre und den Grundwasserschutz garantieren. Mit Hilfe dieser Anforderungen kann die Qualität von einem Hinterfüllbaustoff bewertet werden.

8.2 Kantonale Anforderungen und Empfehlungen

Im Kapitel 3 werden die kantonalen Anforderungen an die Hinterfüllbaustoffe aufgezeigt. Grundsätzlich verweisen die Kantone auf die Vorgaben in der Vollzugshilfe vom BAFU 2009, welche ebenfalls in der SIA 384/6 oder vom FWS zitiert werden. Weiter reichende Anforderungen als in diesen werden kaum genannt. Allerdings wird mit dem meist genannten Auszug, dass der Ringraum von unten nach oben lückenlos mit einer geeigneten Suspension verfüllt werden soll, damit eine dichte, permanente, physikalisch und chemisch stabile Einbindung der Sonde in den Untergrund gewährleistet wird, ausreichend gefordert. Es wird somit dem Bauherrn freigelassen, welche Produkte er verwendet, damit diese Vorgaben der dauerhaften Eignung eingehalten werden.

Selten werden sulfatbeständige Baustoffe verlangt. Dies betrifft nur die Kantone, in denen Gips- bzw. Anhydrit-führende Schichten angebohrt werden könnten (z.B. Baselland, Aargau o. Solothurn). Nur einmal werden Anforderungen an die Wärmeleitfähigkeit gemacht (Verwendung eines Zements mit geringer Wärmeleitfähigkeit in stark erwärmten Grundwasser-Bereichen). Weitere spezielle Anforderungen werden z.T. in Gebieten mit Arteser- o. Erdgas-Risiken gefordert. Diese betreffen aber mehr die technische Umsetzung der Hinterfüllung (z.B. Einsatz von Packer und unverzügliche Hinterfüllung) als den Typ und die Qualität des Hinterfüllbaustoffs. Generell wird nicht systematisch, wenn nur selten die Hinterfüllung kontrolliert. Daten zur Hinterfüllung werden generell nicht vom Kanton eingefordert und eher selten erhoben. Nur in einem Kanton werden im Gesuch der Hinterfüllbaustoff und Eigenschaften dazu abgefragt.

Wie die Erfahrung zeigt, wird zwar im Grossen und Ganzen gemäss Vorschrift hinterfüllt, aber unzureichende Hinterfüllung werden immer wieder beobachtet (z.B. nicht lückenlos bis zur Oberfläche, falsche Suspensionsdichten, inhomogene Suspension). Vermehrte aber nicht systematische Kontrollen und Sensibilisierung, entweder durch den Geologen, den Lieferanten oder durch den Kanton selber, würden die Qualität der Ausführung automatisch erhöhen. Dies ist nicht zwingend mit Mehraufwänden bzw. Zusatzkosten verbunden. Z.B. könnte in einigen Kantonen der Geologe diese Aufgabe während seiner normalen geologischen Begleitung einbinden und versuchen die Bohrstellenbesuche so zu legen, dass er auch mal während der Hinterfüllung den Bohrplatz besucht (z.B. Kontrolle ob Waage und ausreichend Mörtelsäcke vor Ort, Abfrage der gemessenen Dichtewerte, Blick auf Mischer).

Ob aber der Kanton konkrete Anforderungen an die Eigenschaften und Qualität des Hinterfüllbaustoffs stellen sollte, ist fraglich. Wenn der Kanton nämlich bestimmte Baustoffe mit dem Grund der Langlebigkeit und Verbesserung des Gesamtsystems verlangt, begibt er sich zu einem gewissen Grad auf die Planerseite und macht sich haftbar. Eigentlich reicht die oft genannte Anforderung, dass eine dichte, permanente, physikalisch und chemisch stabile Einbindung der Sonde in den Untergrund gewährleistet werden soll.

Etwas anders sieht dies bei der Frostbeständigkeit aus. Die Frage stellt sich, ob diese nicht grundsätzlich verlangt werden sollte, da gemäss Kriesi, R. (2017) ca. 1/3 von 91 untersuchten Erdwärmesonden unterkühlt sind und immer häufiger vereiste Sonden bekannt werden. Die potentielle Unterkühlung wird durch die zunehmende Dichte von Erdwärmesondenanlagen verstärkt, bei welcher bei der Dimensionierung häufig die umliegenden Sonden nicht berücksichtigt werden (Ebert und Dörner, 2017). Da Frost-Tau-Zyklen das Gefüge von nicht frostbeständigen Hinterfüllungen stark schädigen (Kapitel 2 und 6.3), würde es aus Sicht des Kantons bzgl. des Grundwasserschutzes und der geforderten Dichtigkeit der Hinterfüllung Sinn

machen, frostbeständige Baustoffe zu fordern. Der Kanton ist generell fachlich besser informiert als der Bauherr und kennt alle bestehenden Projekte. Deshalb wäre es dem Grundwasserschutz aber auch der Energieeffizienz förderlich, wenn der Kanton z.B. in Gebieten mit hoher EWS-Dichte oder geologischen Problemen entsprechende Vorgaben (z.B. Frostbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit) machen würde.

8.3 Eingesetzte Hinterfüllbaustoffe, deren Qualität und Empfehlungen

Wie Kapitel 4 zur **Statistik** der eingesetzten Mörtel zeigt, werden vergleichsweise, wenige verschiedene Mörtel verwendet. Es kommen mit ca. 10% nur selten Spezialhinterfüllbaustoffe zum Einsatz. Zwei Hersteller bzw. Lieferanten dominieren den Markt. Auffällig ist, dass die kleinen Bohrfirmen tendenziell eher auf andere Mörtel und Anmischer setzen als die grösseren Bohrfirmen.

In Kapitel 5 werden die **Merkmale** der meist verwendeten Hinterfüllbaustoffe beschrieben. Da es keine unabhängigen einheitlichen Prüftests zu diesen Mörteln gibt, ist der Vergleich schwierig und man ist z.T. an die Anpreisungen gebunden, da es für einzelne Parameter keine Prüfberichte gibt (siehe auch nachfolgende Absätze). Konkurrenzbedingt ist verständlich, wenn die Hersteller nicht alle Details preisgeben! Grundsätzlich sind die Fertigmischungen geeignet, zumindest wenn man die Frostbeständigkeit ausser Acht lässt (dies wird in verschiedensten Studien auch so bestätigt, siehe Referenzen). Abgesehen von den Standardmischungen (siehe nachfolgendes Kapitel) erfüllen die Fertigmischungen generell die Mindestanforderungen, wobei es gleichwohl deutliche Unterschiede bzgl. Gefügestabilität, Festigkeit, Absetzmass, Rheologie usw. gibt (siehe verschiedenste Studien in Kapitel 2). In der Schweiz kommen die Anfragen und entsprechend die Wünsche an den Baustoffhersteller generell von den Bohrfirmen. Diese können nämlich bei den meisten Projekten die Hinterfüllbaustoffe frei vorgeben. So verwundert es nicht, wenn besonders Wert auf die Ergiebigkeit, Preis, Verarbeitbarkeit und Rheologie gelegt wird. Bei Gesprächen mit den Herstellern und Bohrmeistern fällt entsprechend auf, dass Anforderungen wie z.B. an die Dichtigkeit oder Frostbeständigkeit eher kein Thema sind und es für einige eingesetzte Mörtel keine Werte wie z.B. zum Durchlässigkeitsbeiwert gibt (Tab. 2). Generell ist der W/F-Wert, der Typ und Mengenanteil von Tonmineralen, sowie die Klinkerart bzw. -qualität wichtig für die langfristige Festigkeit, Gefügestabilität, Absetzmass, Frost- und Sulfatbeständigkeit, sowie Dichtigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllbaustoffe. Die Spezial-Mörtel zeigen diesbzgl. meist sehr gute Qualitäten und können für die langfristige Stabilität und Qualität empfohlen werden (siehe z.B. Kapitel 5.4). Wie mit Simulationen in Kapitel 5.4 gezeigt wurde, sind die Mehrkosten für die verbesserten Mörtel durch den Mehrgewinn an Qualität und die eingesparten Bohrmeter mehr als gerechtfertigt. Generell sind die Hersteller von Hinterfüllbaustoffen und Sondenrohren zusammen gefordert, die Gefügestabilität und Systemdichtigkeit zu erhöhen. Letztere ist z.B. meist deutlich geringer wenn man das Gesamtsystem von Rohr und Mörtel betrachtet, als nur den Mörtel alleine. Auch wenn es z.B. der Ergiebigkeit und Rheologie widerspricht, sollten höhere Dichten also geringe W/F-Werte angestrebt werden (siehe Kapitel 2 und nachfolgender Abschnitt). Es sollte beachtet werden, dass eine höhere Dichte im Widerspruch zu den vergleichsweise tiefen Sonden in der Schweiz steht, da somit ein Quetschen der Sondenrohre auf Grund der schwereren Suspension möglich ist. Gegebenenfalls muss eine Stufenzementation durchgeführt werden, oder ein leichter Mörtel gewählt werden. Die tatsächliche Qualität hängt ebenso stark vom korrekten Anmischen und Verpressen ab (siehe nachfolgende Absätze).

Viele Baustoff-Parameter wirken gegensätzlich wie z.B. das Absetzmass und die Marschtrichter-Zeiten, da beide z.B. vom Wasser/Feststoff-Wert abhängig sind. Hohe Wassergehalte resultieren in niedrigen Marsch-Zeiten und umgekehrt in einem höheren Absetzmass. Ein hoher Wassergehalt führt zu einer besseren Rheologie, Verpressbarkeit und höheren Ergiebigkeit aber umgekehrt auch zu einer geringeren Dichte, Dichtigkeit, Gefügestabilität, Wärmeleitfähigkeit und Frostbeständigkeit, sowie einem höheren Absetzmass. Ein eindeutiges Gut und Schlecht ist je nach Anforderungswunsch besonders bei tiefen Sonden schwierig zu definieren. Dennoch kann für die Langlebigkeit grundsätzlich folgendes festgehalten werden: Für die langfristige Qualität, also Beständigkeit bzgl. Gefügestabilität, Dichtigkeit und Wärmefluss sollten Mörtel mit geringen W/F-Werten und höheren Anforderungen an die Wärmeleitfähigkeit, Frost- und Sulfatbeständigkeit verwendet werden (siehe auch Referenzen in Kapitel 2). Es sollte überlegt werden, ob in der BAFU Vollzugshilfe (2009) im Anhang A7 die Anforderungen um den vergleichsweise wichtigen W/F-Wert ergänzt werden. Gemäss

verschiedenen Studien sollte dieser zumindest kleiner 1 sein. Der wichtigste Mörtel-Lieferant in der Schweiz empfiehlt bei seinen Mörteln Werte von 0.8. D.h. eine entsprechende Forderung ist umsetzbar. Die kritischen Standard- bzw. Eigenmischungen mit 100 kg Bentonit, 200 kg Zement und 900 l Wasser wären nicht mehr zulässig (siehe nachfolgend).

Frostbeständigkeit: Kapitel 6.3 sowie eine Reihe von Studien (z.B. Herrmann, V.J., 2008) zeigen, dass die meisten üblichen Mischungen nicht frostbeständig sind und bereits nach dem ersten Frost-Tau-Wechsel Risse aufweisen. Folglich kann die Hinterfüllung seine wichtigsten Aufgaben nicht mehr erfüllen: Abdichtung bzgl. Grundwasserschutz und Ankopplung bzgl. Wärmefluss (siehe Kapitel 2). Eine Gefügelockerung hat zur Folge, dass die Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung abnimmt bzw. der Bohrlochwiderstand zunimmt und entsprechend die Sondenleistung reduziert wird. Folglich wird eine Durchfrostung noch zusätzlich gefördert, das zu einer weiter reichenden Gefügeentfestigung führt. Gemäss Kriesi, R. (2017) laufen einige Systeme im Frostbereich und ist gemäss SIA 384/6 eine minimale Sondenflüssigkeit bei Eintritt von -3°C erlaubt. Mit der zunehmenden Dichte von Erdwärmesonden nimmt die Gefahr des Unterkühlens zu, bes. weil häufig Nachbarsonden bei der Dimensionierung nicht berücksichtigt werden (Ebert und Dörner, 2017). Eine Frostbeständigkeit der Hinterfüllung sollte somit zwingend sein. Alternativ kann der Betrieb mit Wasser angedacht werden oder die Wärmepumpe so eingestellt werden, dass diese bei 0°C abschaltet, oder man dimensioniert so, dass sicher kein Frostbetrieb erreicht wird.

Die **Standardmischungen** schneiden bei Testversuchen generell in allen Untersuchungen am schlechtesten ab. Dies spiegelt sich wie folgt wider: nicht ausreichende Endfestigkeit, nicht frostbeständig, generell höhere Wasserdurchlässigkeit, geringste Wärmeleitfähigkeit, hohes Absetzmass, häufig nicht Volumenstabil, zerfällt häufig (siehe z.B. Niederbrucker, R. & Steinbacher, N., 2007). Von der Theorie her und bei Verwendung bester und geeigneter Materialmischungen sind sicher einige Anforderungen erfüllbar. Im Vergleich zu den Fertigmischungen ist aber die Überprüfbarkeit problematisch, da ein sehr grosser Spielraum bei der Herstellung der Mörtel besteht. Es braucht eine grosse Erfahrung bei der Materialwahl und beim Anmischen (z.B. geeignete Tonmineral- und Zementtypen). Wie schon die verschiedenen Vorgehensweisen beim Anmischen der Fertigmischungen zeigen, kann vermutet werden, dass bei Standardmischungen die Qualitätsunterschiede noch ausgeprägter sind. Es gibt sicher einzelne, die eine gute Suspension mit geeigneten Produkten aufbereiten können. Gleichwohl sind gute Fertigmischungen auf Grund der besseren Prüfergebnisse und Überprüfbarkeit, sowie der geringeren Fehleranfälligkeit bei der Herstellung zu bevorzugen (siehe auch vorheriger Abschnitt).

Die Eigenschaften der Mörtel werden generell unterschiedlich gemessen, weil es z.T. keine **genormten bzw. einheitlichen Prüfmethode**n gibt. Häufig testen die Hersteller die Mörtel intern in eigenen Labors, sodass die Vergleichbarkeit auf Grund unterschiedlicher Laboreinrichtungen und Prüfmethode oft nicht gegeben ist. Es ist z.B. relevant, nach welcher Zeit nach dem Anmischen ein Test durchgeführt wird, ob ein Test in einem feuchten oder trockenen Milieu stattfindet oder ob in einem offenen oder geschlossenen System gemessen wird, entsprechend variieren die gemessenen Werte der Eigenschaften. Z.B. sind in einem geschlossenen System das Absetzverhalten und die Gefügeentwicklung anders als in einem offenen, in welchem Wasser entweichen kann. Zudem kann man einen Mörtel so anpreisen, dass er eine gute Gefügestabilität und Wärmeleitfähigkeit aufweist (z.B. getestet bei einem geringen W/F-Wert), der aber bei tiefen Bohrlochern kaum verpressbar ist. Er wird dann entsprechend auf der Bohrstelle viel flüssiger angemischt, damit er überhaupt verpressbar ist, kann aber dann seine angepriesenen Eigenschaften gar nicht mehr einhalten. Beim Absetzmass ist es ähnlich; wann wird der Wert definiert, direkt bzw. kurz nach der Hinterfüllung oder erst nach der Aushärtung und liegt ein offenes oder geschlossenes System vor. Besonders Mörtel mit einem hohen Wasser-Feststoff-Wert neigen dazu, dass sie sich über längere Zeit setzen, besonders wenn während der Aushärtungsphase Feuchtigkeit im Untergrund entweichen kann. Bzgl. der Frostbeständigkeit ist die Problematik der verschiedensten Prüfmethode im Kapitel 2 beschrieben worden. Alle diese Punkte zeigen, wie wichtig es wäre, wenn geeignete und genormte Prüfverfahren vorliegen würden und die Mörtel gemäss diesen wiederkehrend und unabhängig geprüft würden. Besonders die Schweizer Hersteller bzw. Lieferanten sind gewillt, bei entsprechender Notwendigkeit, ihre Mörtel entsprechend zu testen bzw. anzupassen. Ev. ist hier der Bund gefragt, erste Prüfreiheiten aufzulegen, damit die Notwendigkeit transparent aufgezeigt werden kann.

In Kapitel 6 und vereinzelt in den anderen Abschnitten wird die **Realität auf der Bohrstelle** beschrieben. Generell gibt es viele Bohrmannschaften die sorgfältig und gut verfüllen. Allerdings sind auch sie sich oftmals der Bedeutung des Zementtyps, der korrekten Dichte oder der lückenlosen Hinterfüllung nicht bewusst. Es kann immer wieder beobachtet werden, dass nicht

gemäss Vorgabe angemischt wird und die Dichte nach eigenen optischen Vorstellungen angepasst wird. Dabei kann man häufig auch allgemeine Unterschiede von Bohrfirma zu Bohrfirma feststellen. Immer wieder wird nicht homogen verpresst, was eher die Durchlaufmischer betrifft, wenn z.B. nicht kontinuierlich Sackware nachgegeben wird oder die Wasserzufuhr nicht konstant ist. Ebenso wird nicht immer lückenlos in einem Stück von unten nach oben hinterfüllt. Bes. bei tiefen Bohrlöchern wird oftmals mit einem 2. kurzen Injektionsschlauch von oben nachverfüllt. Auch wird gelegentlich Bohrschlamm / -wasser zum Anmischen verwendet. Folglich kann die Hinterfüllung einige ihrer Anforderungen nicht vollständig erfüllen (über ganze Bohrsäule gleichbleibende Festigkeit, Ankopplung, Dichtigkeit, Wärmefluss). Langfristig besteht dann die Gefahr, dass die Hinterfüllung z.B. bei Frost-Tau-Wechseln schneller geschädigt wird. Wichtig ist eine gute Schulung und Sensibilisierung von jedem Mitarbeiter, ev. vom Lieferant mit entsprechendem Nachweis, genauso wie eine gute Wartung. Dies betrifft auch die Bauführer der Bohrfirmen, welche den Bohrmeistern die zu verwendenden Materialien und Qualitätsstandards vorgeben. Das Mitführen und Verwenden einer Waage vor Ort sollte ein Muss sein. Besonders bei den Durchlaufmischern sollte zu Beginn und am Ende die Dichte gemessen werden und entsprechend das W/F-Mischverhältnis gemäss Hersteller eingestellt werden. Eine gleichbleibende Wasserversorgung muss gesichert sein. Es sollte immer vor Beginn der Hinterfüllung ausreichend Rohmasse auf dem Platz sein, was vereinzelt nicht der Fall ist. Eine allgemeine Sensibilisierung bzgl. der Wichtigkeit der Hinterfüllung sollte vom FWS, den Lieferanten und den Geologen erfolgen. Es sollten immer der Zementtyp, die Dichte bzw. das W/F-Verhältnis und allfällige Probleme protokolliert werden. Es geht nicht nur darum, dass man am Ende an der Oberfläche im Bohrloch Mörtel sieht! Die Hinterfüllung muss auch langfristig ihre Anforderungen meistern können und vollständig das Bohrloch füllen. Bohrmeister mit langer Erfahrung mit allen Mischtechniken berichten, dass sie die Kolloidalmischer bevorzugen, da sie weniger zu technischen Problemen neigen (z.B. Verstopfen), ein schnelleres Verpressen einer gut verpressbaren Suspension ermöglichen und unabhängig von der Wasserzufuhr sind, welche auf Baustellen oftmals sehr variieren kann. Die bessere Homogenität und der bessere Aufschluss der einzelnen Mörtelbestandteile sprechen ebenfalls für diese Mischer. Des Weiteren sind diese weniger Fehleranfällig bzgl. der Dichte, da für jeden Anmischvorgang immer gemäss Hersteller die gleiche Menge Sackware und Wasser (z.T. automatisiert) zugegeben werden. Entsprechend empfiehlt sich, die Kolloidalmischer trotz der höheren Anschaffungskosten bevorzugt einzusetzen.

Generell kann festgehalten werden, dass die meisten Bohrmannschaften nach bestem Wissen und Gewissen hinterfüllen, aber der Qualität der Hinterfüllung allgemein ein nicht zu grosses Gewicht gegeben wird (es geht eher darum, „einfach“ das Loch aufzufüllen!). Ev. liegt das am Unwissen bzgl. der möglichen Konsequenzen oder daran, dass alles nicht sichtbar ist und nachträglich kaum überprüft wird bzw. werden kann. Selbst den Herstellern / Lieferanten sind nicht alle Anforderungen geläufig. Einer meinte nämlich, dass eine Frostbeständigkeit doch nicht relevant sei, da sich doch die Hinterfüllung unterhalb der winterlichen Frostgrenze im Boden befindet. Bei Gesprächen mit den Bohrmeistern scheint es, dass es vielen nicht bewusst ist, was eine lückenhafte Verfüllung oder eine falsche Anmischung für Folgen haben kann. Z.B. haben wir auch schon zu hören bekommen, dass sie das Bohrwasser zum Anmischen verwenden, da so ja Sackware eingespart werden kann und weniger Bohrschlamm entsorgt werden muss. Auch Planer und begleitende Geologen, sowie erst Recht die Bauherren sind sich oftmals der Bedeutung des Zementtyps, der korrekt angemischten Suspension, sowie der lückenlosen Hinterfüllung wenig bewusst. Dies zeigt sich daran, dass die Wahl des Mörteltyps meist der Bohrfirma überlassen wird und diese eher einen günstigen einsetzt, was bei dem derzeitigen Preisdruck verständlich ist. Auch hier zeigt sich, wie wichtig eine allgemeine Sensibilisierung ist.

8.4 Verbesserte Hinterfüllbaustoffe

Im Kapitel 5.4 wird das Kosten-Nutzen-Verhältnis von verbesserten Baustoffen diskutiert. Generell zeigen die verbesserten Hinterfüllbaustoffe eine deutlich bessere Qualität und Langzeitstabilität. Sie sind üblicherweise frost- und sulfatbeständig und weisen höhere Wärmeleitfähigkeiten auf. Zwar verteuern sie den Bohrmeter-Preis um wenige Prozent, bewirken aber, dass auf Grund des geringeren Bohrlochwiderstandes weniger Bohrmeter gebohrt werden müssen, sodass sich die Mehrkosten für den teureren Mörtel mit den eingesparten Bohrmetermetern nahezu ausgleichen. Dafür, dass bei minimalen Mehrkosten ein hochwertigerer Mörtel zum Einsatz kommen kann, der allen Anforderungen genügt, sollte man sich wirklich überlegen, ob dieser nicht generell zum Einsatz kommen sollte.

8.5 Fazit: Wie variiert die Qualität der in der Schweiz eingesetzten Mörtel

Mit nachfolgendem Diagramm (Abb. 20) wird versucht, aufzuzeigen, welche in der Schweiz eingesetzten Mörtel welchen Anforderungen eher genügen. Es sei hingewiesen, dass es keine umfassenden und unabhängig mit geeigneten Prüfverfahren erhobene Daten zu allen Mörtel-Eigenschaften gibt. Die Angaben sind entsprechend als Tendenzen zu verstehen. Zudem muss beachtet werden, dass einige Eigenschaften sich konträr verhalten. Je nach Anwendungsanforderungen und Kosten-Nutzen-Überlegungen machen unterschiedliche Mörtel Sinn. Es wurde unterteilt in Spezial-, Standard- und preiswerte Fertigmischungen sowie die klassische Standard- bzw. Eigenmischung. Je grösser die Schrift des Mörteltyps, desto häufiger wird er in der Schweiz eingesetzt. Der graue Balken zeigt die Spannweite der auf den Bohrstellen gemessenen Mörteldichten (bei den Eigenmischungen wurde nur ein Wert erhoben, entsprechend ist hier die Variation unbekannt!). Die unterschiedlichen W/F-Werte haben einen entsprechenden Einfluss auf die Eigenschaften, welche rechts in den Pfeilen benannt werden. Die unterschiedlichen Eigenschaften zwischen den Mörtelklassen werden im oberen Pfeil benannt.

Klare Trennungen sind schwer, da jeder Baustoff verschiedene spezielle bzw. gute Eigenschaften aufweist. Z.B. weist der BTD Füller 350 einen sehr hohen W/F-Wert auf, was gemäss verschiedenen Studien schlecht für die Frostbeständigkeit ist. Dafür wird er als sehr sulfatbeständig, gut verpressbar und ergiebig ausgewiesen. Die Einordnung ist schematisch zu sehen und muss je nach Bedarf und Einsatzanforderungen speziell betrachtet werden. Generell werden gemäss Studien die Eigenmischungen als kritisch bes. bzgl. der Frostbeständigkeit und Überprüfbarkeit bzgl. Qualität durch den Bauherren betrachtet. Auf Grund der oben beschriebenen Fakten müssten eigentlich im Sinne der besten Qualität und Langlebigkeit der Hinterfüllung Baustoffe und Dichten innerhalb des grünen Bereiches empfohlen werden. Wie oben aufgezeigt, sind die Mehrkosten für die verbesserten Baustoffe im Vergleich zur Einsparung von Sondenmetern und der höheren Qualität gering.

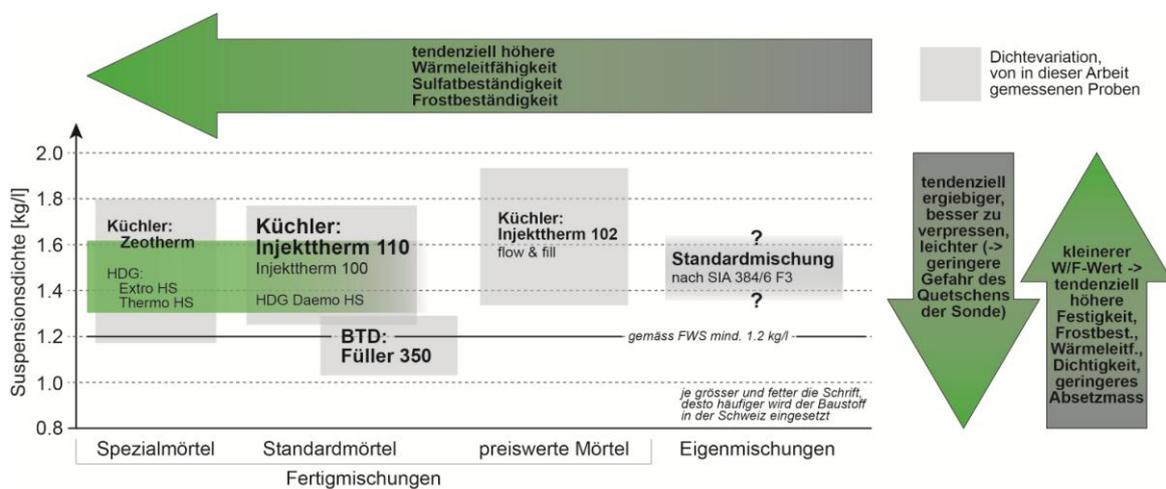


Abb. 20 Qualität eingesetzter Hinterfüllbaustoffe

Ein guter Hinterfüllbaustoff muss eine hohe Dichtigkeit für den Grundwasserschutz garantieren, langfristig stabil sein und eine gute Wärmeleitfähigkeit an den Fels ermöglichen. Erfüllt er diese Anforderungen nicht, können Schäden nicht ausgeschlossen werden. Diese können z.B. eine Verbindung von Grundwasserstockwerken oder Leistungseinbußen sein.

8.6 Zusammenfassung der Verbesserungsempfehlungen

Bereits bei der Planung sollte überlegt werden, welcher Mörtel Sinn macht und eingesetzt werden sollte. Dabei sollte die Qualität und Langlebigkeit, wie auch die Wärmeleitfähigkeit beachtet werden. Je nachdem sind die Mehrkosten für einen besseren Mörtel vernachlässigbar. Dazu gehört auch eine korrekte Dimensionierung bei Beachtung von Nachbarsonden, Untergrundparametern oder Heizungsersatz, damit ein Frostbetrieb ausgeschlossen werden kann.

Bzgl. der Qualität der Mörtel sollten diese mit genormten, vergleichbaren und geeigneten Prüfmethode getestet werden. Nur so können die Mörtel mit einander verglichen werden, was derzeit auf Grund z.T. fehlender Werte und Prüfberichte oder der Tatsache, dass mit eigenen Tests in eigenen Labors gemessen wird, nicht möglich ist. Hier braucht es sicherlich noch Anstrengungen von unabhängiger Seite, z.B. dem Bund. Auch die Anforderungen müssten kritisch überprüft und ev. ergänzt werden. Es würde Sinn machen, wenn in der BAFU Vollzugshilfe (2009) die Anforderungen um den qualitätsbestimmenden Wasser/Feststoff-Wert ergänzt würden.

Mit einer umfangreichen Sensibilisierung von Bauherren, Planern, begleitenden Geologen aber auch den Bohrfirmen selber könnte die Qualität der Hinterfüllung sicher verbessert werden. Das betrifft das korrekte Anmischen und Verpressen, sowie gute Anmischtechniken bzw. funktionstüchtige Geräte. Die Mörteldichte sollte z.B. auf der Baustelle besonders bei den Durchlaufmischern mit einer Waage kontrolliert werden. Auf dem Bau wird vieles genau kontrolliert, aber die Hinterfüllung, welche unter Boden und somit nicht sichtbar ist, wird kaum kritisch hinterfragt. Ein vermehrter Kontroll-Blick würde bestimmt nicht schaden, ob z.B. wirklich lückenlos von unten nach oben, homogen und gemäss Herstellerangaben angemischt und verpresst wird.

Aus Sicht der kantonalen Behörden könnte überlegt werden, ob besonders in kritischen Gebieten (z.B. in solchen mit vielen Nachbarsonden oder ausgeprägtem Grundwasserfluss) spezielle Mörtel, die bestimmte Anforderungen garantieren, eingesetzt werden müssen (z.B. frost- und sulfatbeständig oder hohe System-Dichtigkeit).

Bei allen Empfehlungen sollte aber beachtet werden, dass höhere Anforderungen und mehr Prüfungen zwangsweise auch zu höheren Kosten führen können. Es sollte dabei mit einem gesunden Augenmass vorgegangen werden, damit der Kostendruck auf die Erdwärmesonden-Sparte nicht noch grösser wird. Allerdings sollten bestehende Normen eingehalten werden und viele oben beschriebene Empfehlungen sind nicht kostentreibend, wie auch das korrekte Vorgehen bei vielen Objekten bei gleichen Preisen zeigt.

Jeder Schadensfall schadet der Erdwärmesonden-Branche und gilt zu verhindern. Viele der bisher bekannten grösseren Schadensfälle, wie z.B. in Baden-Württemberg beruhen auf ungenügenden Hinterfüllungen. Diese zeigen, wie wichtig eine sorgfältige Verpressung mit guten Baustoffen ist.

9 Schlussbemerkungen

Es wird ausdrücklich nochmal betont, dass trotz aller Kritik im Bericht, gute Hinterfüllbaustoffe auf dem Markt verfügbar sind und es viele Bohrmannschaften gibt, die gut ausgebildet sind, reichlich Erfahrung haben und den Vorschriften und Empfehlungen gemäss gut hinterfüllen.

Einige genannte Kritikpunkte beruhen ev. auf in der Branche fehlenden Fachkenntnissen und ev. an einem zu geringen Austausch zwischen Behörden, den Fachstellen, die die Anforderungen definieren, Planern, Bohrfirmen und Mörtel-Herstellern / Lieferanten. Von dem her kann diese Arbeit als Diskussions-Grundlage zwischen den verschiedenen betroffenen Parteien verstanden werden, damit in Zukunft die Erdwärmesonde inkl. Hinterfüllung hinsichtlich Qualität, Langlebigkeit, Sicherheit, Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit weiter optimiert werden kann.

10 Referenzen

- Anbergen, H., 2015. Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechseleinflusses auf Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden. Dissertation, TU Darmstadt, 196 Seiten.
- Arbeitskreis „Geothermie“ der Fachsektion Hydrogeologie und Ingenieurgeologie, 2015. Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Überwachung – EA Geothermie“. Herausgeber Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften e.V., Seiten 163-197.
- Bund/Länderarbeitsgruppe der Staatlichen geologischen Dienste der Deutschen Bundesländer, Ad-hoc Arbeitsgemeinschaft Hydrogeologie, 2015. Empfehlung für die Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde, 64 Seiten.
- Bundesamt für Umwelt BAFU, 2009. Vollzugshilfe „Wärmenutzung aus Boden und Untergrund“, 51 Seiten.
- Ebert, A. und Dörner, E., 2017. Bericht «EWS-Umfrage» Ergebnisse zu einer Umfrage zum Vorgehen bei der Dimensionierung von Erdwärmesonden bei Beachtung von Nachbarsonden. Energie Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, 55 Seiten.
- Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS, 2013. Reglement für Gütesiegel für Erdwärmesonden – Bohrfirmen, 14 Seiten.
- Herrmann, V.J., 2008. Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Hinterfüllung von Geothermie-Bohrungen mit Erdwärmesonden. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 192 Seiten.
- Hess, M., Sommerhalder, M., Burger, F., Badoux, V., 2015. Qualitätssicherung Erdwärmesonden, Übersicht Messmethoden zur Prüfung der Hinterfüllung. Energie Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, 38 Seiten.
- Kriesi, R., 2017. Bericht «Analyse von Erdwärmesondenanlagen» Abschätzung des Anteils unterkühlter Erdwärmesonden von Anlagen, die vor Einführung der SIA 384/6 erstellt wurden. Energie Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, 42 Seiten.
- Niederbrucker, R. & Steinbacher, N., 2007. Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden. Technischer Endbericht, Land Oberösterreich, 61 Seiten.
- Rohner, E. und Rybach, L., 2001. Lebensdauer von Erdwärmesonden in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung. Bundesamt für Energiewirtschaft, 30 Seiten.
- SIA-Norm 384/6, 2010. Erdwärmesonden. 76 Seiten.
- Taylor, H. F. W., 1992. Cement Chemistry, third edition: London, Thomas Telford, 475 Seiten.
- Touzin, M., 2017. Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Temperaturverteilung im Tiefenbereich von oberflächennahen Erdwärmesonden in der Nordwestschweiz. Masterarbeit, Universität Basel. 198 Seiten.
- Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech, 2016. Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben EWS-Tech, Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technologie. 368 Seiten.

