

Informationen aus den Bund/Länderarbeitsgruppen
der Staatlichen Geologischen Dienste

PERSONENKREIS

DURCHLÄSSIGKEIT DES SYSTEMS ERDWÄRMESONDE

der Ad-hoc-Arbeitsgemeinschaft Hydrogeologie

**Empfehlungen für die Anforderungen an die hydraulische
Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde**

erarbeitet für den Bund/Länder-Ausschuss Bodenforschung (BLA-GEO)
durch die Staatlichen Geologischen Dienste der Deutschen Bundesländer (SGD)

Juni 2015

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Aufgabenstellung.....	4
3	Organisation des Personenkreises	4
4	Grundlagen: Definitionen und Begriffe	5
4.1	Definition des Systems Erdwärmesonde.....	5
4.2	Material- und Systemdurchlässigkeit	6
4.3	Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde	6
4.4	Durchlässigkeit und Abdichtung.....	9
4.5	Grundwasserüberdeckung und Grundwasserstockwerksbau.....	11
5	Empfehlungen für Anforderungen an die Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde.....	12
5.1	Systemdurchlässigkeit als Maß der Abdichtung einer Erdwärmesondenbohrung	12
5.2	Maximale Systemdurchlässigkeit	14
5.3	Geltungszeitraum der Anforderungen	16
5.4	Übertragbarkeit von Werten der Systemdurchlässigkeit aus Laboruntersuchungen.....	16
5.5	Bohrverfahren	18
5.6	Zentrierter Einbau	21
5.7	Abdichtung bei Druckpotenzialunterschieden	25
5.8	Materialeigenschaften der Verfüllbaustoffe.....	27
5.8.1.	Thermischer Ausdehnungskoeffizient.....	30
5.8.2.	Frost-Tau-Wechsel-Widerstand der Verfüllbaustoffe.....	31
5.8.3.	Chemischer Widerstand	34
5.8.4.	Dichte der Verfüllsuspension	38
5.9	Herstellen (Anmischen) der Verfüllbaustoffe	38
5.10	Verfüllung des Bohrlochs.....	40
5.11	Zeitpunkt der Druckprüfung.....	43
5.12	Temperaturgrenzen.....	43
5.13	Kontrolle der Ringraumverfüllung.....	45
5.14	Sondenmaterial	48
5.15	Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Erdwärmesonden	49
5.16	Überwachung der Bohr-, Einbau- und Verfüllarbeiten	50

6	Forschungs- und Entwicklungsbedarf	51
6.1	Untersuchung zur Systemdurchlässigkeit von (realen) EWS-Bohrungen.....	51
6.2	Systemdurchlässigkeit von Koaxialsonden.....	52
6.3	Bohrdurchmesser	52
6.4	Verwendung von Tonprodukten zur Abdichtung.....	53
6.5	Verbesserung Kontakt Rohr-Verfüllung	53
6.6	Zentrischer Einbau.....	54
7	Zusammenfassung.....	55
8	Literatur (zitiert)	56
9	Literatur (nicht zitiert)	62

1 Einleitung

Bohrungen (z. B. für Brunnen, Grundwassermessstellen und Erdwärmesonden) reduzieren die natürliche Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. Sie können hydraulische Verbindungen zwischen zuvor getrennten Grundwasserstockwerken schaffen, durch die es zu einer Änderung von Druckpotenzialen und/oder zu einer Vermischung von hydrochemisch unterschiedlichen Grundwässern kommen kann. Dies kann das Grundwasser sowohl qualitativ wie auch quantitativ maßgeblich beeinträchtigen. Es ist zu unterscheiden, ob es sich um eine temporäre hydraulische Verbindung während des Bohrvorganges sowie des Ein- und Ausbaus handelt oder um eine dauerhafte Verbindung, hervorgerufen durch nicht fachgerecht ausgeführte Arbeiten oder durch Alterungsprozesse des Bauwerks.

Bereits im „Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern“ des Personenkreises Geothermie (PK Geothermie 2011) werden die möglichen schädlichen Auswirkungen von hydraulischen Stockwerksverbindungen erläutert.

Insbesondere durch die hohe Zahl und die vergleichsweise großen Teufen von Erdwärmesondenbohrungen haben die Genehmigungsbehörden in Bezug auf die Ringraumabdichtung von Erdwärmesondenbohrungen einen erhöhten Beratungsbedarf. Neben der Qualität der technischen Ausführung einer Erdwärmesondenanlage haben unter anderem auch die Betriebsweise und der verwendete Verfüllbaustoff eine große Bedeutung für die Wirksamkeit der Ringraumabdichtung. Unwirksame Abdichtungen von Erdwärmesondenbohrungen führen daher unmittelbar zu der Frage, welche fachlichen Anforderungen an die Abdichtung bzw. an die Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden zu stellen sind.

2 Aufgabenstellung

Mit Beschlussprotokoll der gemeinsamen Sitzung des Bund/Länder-Ausschusses Bodenforschung (BLA-GEO) und des Direktorenkreises (DK) der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD) am 18./19. September 2013 in Lübeck beauftragte der BLA-GEO die Ad-hoc-Arbeitsgemeinschaft Hydrogeologie (Ad-hoc-AG Hydrogeologie) mit der *Erarbeitung einer Empfehlung für die Anforderungen an die hydraulische Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden*.

Mit Schreiben vom 14. Januar 2014 wurden die SGD durch den Obmann der Ad-hoc-AG Hydrogeologie, Herrn Thomas Walter, zur Benennung von Personen für einen neu zu konstituierenden Personenkreis gebeten. Die konstituierende Sitzung des Personenkreises „Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde“ fand am 14. Februar 2014 in Mainz statt.

3 Organisation des Personenkreises

An der Erarbeitung der Empfehlungen haben 12 Geologische Dienste aktiv mitgewirkt (Tab. 1). Ansprechpartner aller Geologischen Dienste wurden fortlaufend über den Stand der Arbeiten informiert und hatten Zugriff auf den in Bearbeitung befindlichen Berichtsentwurf.

Tab. 1: Besetzung des länderübergreifenden Personenkreises
„Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde“

Bundesland	Dienststelle
Baden-Württemberg	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau
Bayern	Landesamt für Umwelt
Brandenburg	Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe
Bremen	Geologischer Dienst
Hamburg	Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt / Geologisches Landesamt
Hessen	Landesamt für Umwelt und Geologie
Niedersachsen	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
Nordrhein-Westfalen	Geologischer Dienst
Rheinland-Pfalz	Landesamt für Geologie und Bergbau
Sachsen	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Sachsen-Anhalt	Landesamt für Geologie und Bergwesen
Schleswig-Holstein	Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume

An dem Bericht haben mitgewirkt: Tatjana Häntze, Holger Jensen, Lothar Moosmann, Dr. Björn Panteleit, Dr. Peter Riedel, Dr. Sven Rumohr (Sprecher des PK), Ingo Schäfer, Dr. Norbert Schlaak, Marcellus Schulze, Hannsjörg Schuster, Roman Storz, Claudia Thomsen, Dr. Christian Trapp.

4 Grundlagen: Definitionen und Begriffe

4.1 Definition des Systems Erdwärmesonde

Das System Erdwärmesonde entsteht durch den Einbau einer Erdwärmesonde (EWS)¹ in ein hierzu niedergebrachtes Bohrloch. Es umfasst den durch den Bohrvorgang, den Ausbau der Bohrung und den Betrieb der EWS veränderten Bereich des Untergrundes. Insbesondere gehören folgende Bereiche und Einbauten dem System EWS an:

- die Bohrlochwand mit dem angrenzenden, durch den Bohrvorgang teils aufgelockerten Gebirge
- sämtliche im Bohrloch eingebrachte Einbauten. Hierzu gehören die EWS und verbleibende Verfüllrohre, Abstandshalter und Zentrierhilfen, Klebeband, Gewichte aus Metall, Beton oder Kunststoff sowie Eisenstangen zur Begradigung der EWS-Rohre am Sondenfuß
- Verfüllbaustoffe inkl. möglicher Beimengungen (aushärtende Suspensionen sowie Tonpellets und Kies/Sand)
- mögliche (aber nicht gewollte) Fehlstellen, Fugen oder Risse innerhalb der Verfüllung
- Kontaktflächen von Einbauten und Verfüllbaustoffen

¹ Zur besseren Lesbarkeit wird folgende Abkürzung verwendet: Erdwärmesonde i.e.S. (Wärmeübertrager): EWS

Weitere bekannte Einbauten sind z. B. Gewebepacker, Heiz-/Messkabel zur Durchführung von Enhanced Geothermal Response Tests (EGRT), Schutzrohre oder durchgängige Metallführungen für die Sondenrohre bekannt².

Sonstige mögliche Materialien im System EWS sind Bohrspülungsreste und Filterkuchen inkl. möglicher Spülmittelzusätze wie Bentonit oder polymerer Spülmittelzusätze (CMC). Auch Wasser und Luft sind Materialien, die sich in nicht vollständig verfüllten Bereichen (Lunker, Schrumpfrisse) des Bohrlochs befinden können.

Das innerhalb der Sondenrohre der EWS zirkulierende Wärmeträgermittel wird nicht als Bestandteil des Systems EWS betrachtet. Betrachtet werden jedoch die vom Wärmeträgermittel auf das System EWS ausgehenden Druck- und Temperaturänderungen.

Die EWS ist aus hydrogeologischer Sicht im Idealfall in einem lotrechten und kalibertreuen Bohrloch errichtet, begrenzt vom umgebenden, durch den Bohrvorgang ungestörten Gestein durch eine gleichmäßige Bohrlochwand. Sie ist durchgehend von einem Verfüllbaustoff umgeben.

4.2 Material- und Systemdurchlässigkeit

Mit dem Begriff **Durchlässigkeit** wird das Vermögen eines Materials beschrieben, durchlässig für Fluide oder Gase zu sein.

Die **Material- bzw. Gesteinsdurchlässigkeit**, auch Permeabilität genannt, ist das material- bzw. gesteinspezifische Maß für die Durchlässigkeit von Wasser und Gas (DIN 4049-3). Die Permeabilität ist aus dem Darcy-Gesetz abgeleitet und wird als Permeabilitätskoeffizient K in der Einheit „Darcy“ (m^2) angegeben. Die Permeabilität beschreibt ausschließlich die Eigenschaft des Materials, unabhängig von der Art und Beschaffenheit der Flüssigkeit oder des Gases (DIN 4049-3).

Bei den im Grundwasser üblichen Dichte- und Viskositätsverhältnissen (i. W. durchschnittliche Salinitäten, Gasgehalte und Temperaturen) wird die Gesteinsdurchlässigkeit üblicherweise mit dem **Durchlässigkeitsbeiwert k_f** beschrieben.

Der k_f -Wert berücksichtigt sowohl die Eigenschaften des Fluids als auch die des Grundwasserleiters bzw. des Gesteins und kann, insbesondere erforderlich bei hochsalinaren Fluiden oder hohen Gasgehalten, in den Permeabilitätskoeffizienten umgerechnet werden.

Die **Systemdurchlässigkeit** ist das Maß der Durchlässigkeit eines Systems, bestehend aus mehreren Komponenten, die unterschiedliche Durchlässigkeiten aufweisen können. Der in der Hydrogeologie verwendete Begriff **Gebirgsdurchlässigkeit**, der Primär- und Sekundärdurchlässigkeiten des Gebirges umfasst, beschreibt die Systemdurchlässigkeit des Gebirges.

4.3 Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde

Bei der Betrachtung der hydraulischen Durchlässigkeit des Systems EWS müssen sämtliche in Abschnitt 4.1 beschriebenen Bereiche und Einbauten berücksichtigt werden.

² siehe <http://www.uniwork.de/unigeo-system.html> (Link geprüft 29.06.2015)

Die Durchlässigkeit des Gesamtsystems ergibt sich aus den Durchlässigkeiten der Teilbereiche und Teilkomponenten des Systems. Dies umfasst den aus dem Verfüllbaustoff inkl. möglicher Zumischungen bestehende Abdichtungskörper, dessen Kontaktflächen zu den Einbauten ins Bohrloch und zur Bohrlochwand sowie das infolge des Bohrvorgangs bzw. Sondenbetriebes aufgelockerte Gebirge.

Seit 2008 weisen deutschsprachige Veröffentlichungen zum Frost-Tau-Wechsel-Widerstand von zementgebundenen Verfüllbaustoffen für EWS-Bohrungen darauf hin, dass Systemproben, die neben dem Verfüllbaustoff auch ein oder mehrere Sondenrohre umfassen, höhere Durchlässigkeiten aufweisen als reine Materialproben von Verfüllbaustoffen. Ursächlich für die (höhere) Systemdurchlässigkeit ist die bereits von der International Ground Source Heat Pump Association (1991) beschriebene Entstehung eines **Ringspalts** („Debonding“) zwischen Sondenrohr und Verfüllbaustoff (Abb. 1).

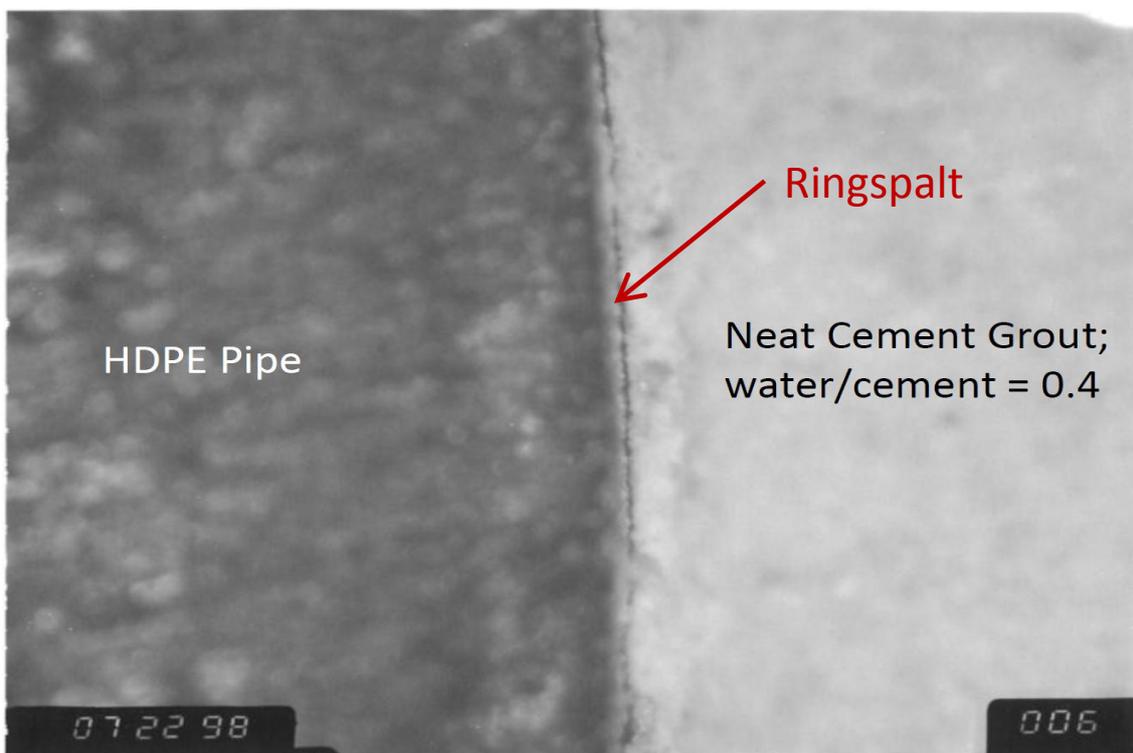


Abb. 1: Kontaktfläche zwischen Sondenrohr („HDPE Pipe“) und Verfüllbaustoff („Neat Cement Grout“) mit erkennbarem Ringspalt. Foto: Marita Berndt (Allan), Swinburne University of Technology, Australia (Foto mit 50-facher Vergrößerung). Siehe hierzu Allan (1997).

Bei Systemproben, deren Durchlässigkeit um den Faktor 100 höher ist als die des reinen Verfüllbaustoffs (vgl. Abb. 2), erfolgt 99% der Durchströmung im Ringspalt. In diesen Fällen geht das Verfüllmaterial keine feste Bindung mit dem Sondenmaterial ein.

Allan & Philippacopoulos (2000) haben die Systemdurchlässigkeiten bei unterschiedlichen Temperaturniveaus untersucht. Eingesetzt wurden dabei zementgebundene Verfüllmaterialien mit unterschiedlicher Zusammensetzung und Plastizität. Bei 1°C ergaben die Messungen eine um den Faktor 10 höhere Durchlässigkeit als bei 21°C (Abb. 3).

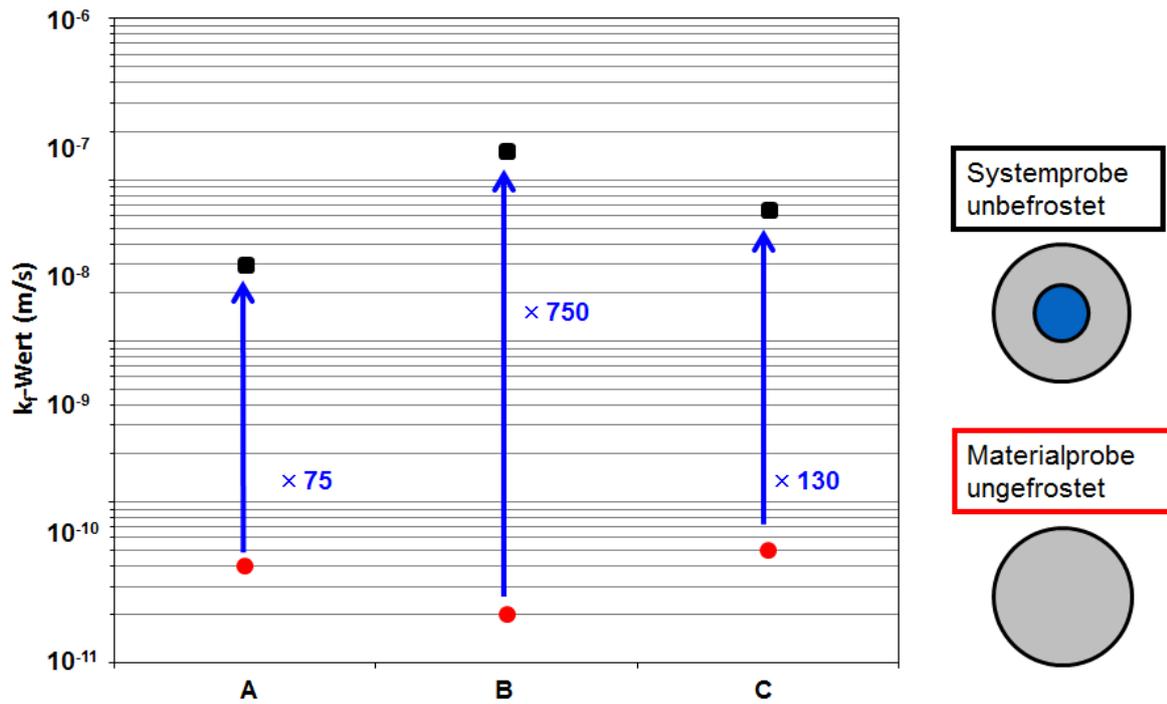


Abb. 2: Vergleich von Material- und Systemdurchlässigkeiten; Proben A, B und C (Anbergen et al. (2014), umgezeichnet aus Rumohr & Schäfer (2015))

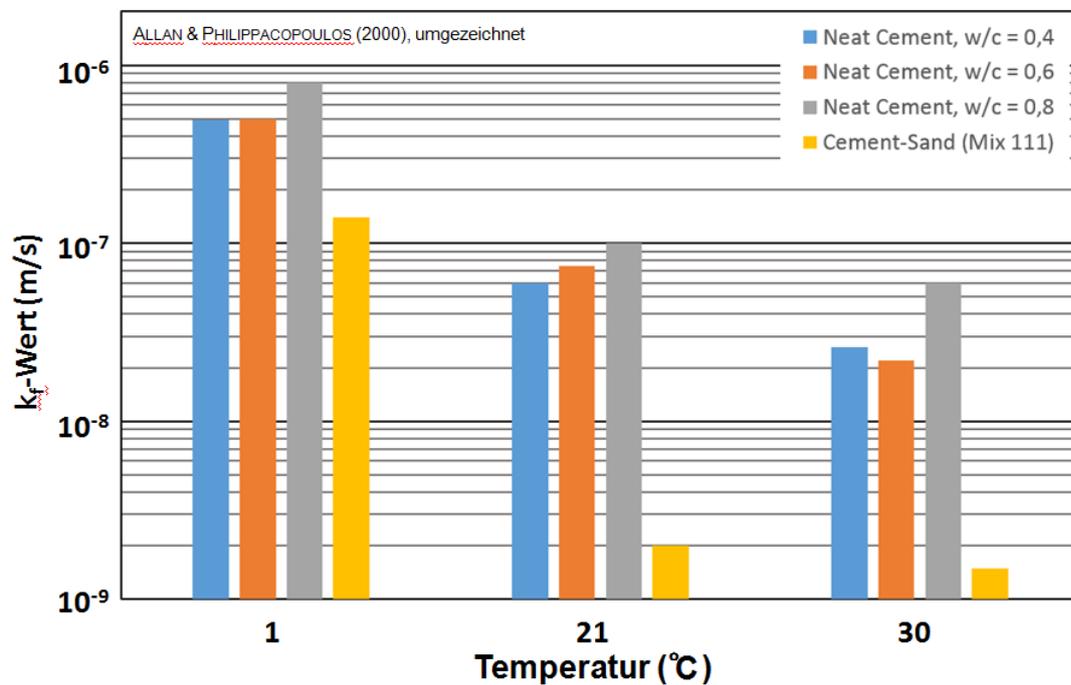


Abb. 3: Abhängigkeit der Systemdurchlässigkeiten von der Betriebstemperatur (Allan & Philippacopoulos (2000), umgezeichnet aus Rumohr & Schäfer (2015))

4.4 Durchlässigkeit und Abdichtung

Gemäß *Hydrogeologischem Wörterbuch* (Adam et al. 2001) werden die Begriffe Abdichtung und Abdichtungsmaterial wie folgt definiert:

Abdichtung: Technischer Einbau oder Vorhandensein von Material, dass die Durchsickerung bzw. Durchströmung durch Fluide verhindert.

Abdichtungsmaterial: Undurchlässiges oder sehr schlecht durchlässiges Bodenmaterial, Gestein und/oder Kunststoff für eine technische Abdichtung (z. B. Sohlen von Deponien oder wasserwirtschaftlichen Bauwerken).

Für den Brunnen- und Messstellenbau führt Rubbert (2003) aus, dass eine Abdichtung als wirksam angesehen werden kann, wenn die vertikale Wasserwegsamkeit unter einem im Vorfeld zu definierenden Schwellenwert liegt. Der Begriff „Abdichtung“ umfasst hierbei nicht nur das eigentliche Abdichtungsmaterial selbst, sondern auch die Grenzflächen des Abdichtungsmaterials zum Gebirge und zur Verrohrung, also das gesamte „System Ringraumabdichtung“.

Aufgrund der Schwierigkeit, für den Bereich der Geotechnik die Frage „Wie dicht ist dicht?“ zu beantworten, hat Kluckert (2007) folgende Definitionen vorgeschlagen³:

wasserdicht

Wasserdicht heißt, bei einem Bauteil oder einem Baustoff begrenzter Dicke darf Wasser an der benetzten Oberfläche weder eindringen noch an der dem Wasser abgewandten Oberfläche austreten. Diese Eigenschaften besitzen z. B. Glas, Stahl oder Kunststoff.

wasserundurchlässig

Wasserundurchlässig heißt, bei einem Bauteil oder einen Baustoff begrenzter Dicke darf Wasser an der benetzten Oberfläche zwar bis in eine begrenzte Tiefe eindringen, jedoch nicht an der dem Wasser abgewandten Oberfläche austreten. Diese Eigenschaften besitzt z. B. WU-Beton (WU = wasserundurchlässig).

wasserdurchlässig

Wasserdurchlässig sind alle Bauteile, Baustoffe und Böden, in die an der benetzten Oberfläche eine bestimmte Menge Wasser eindringt und an der dem Wasser abgewandten Oberfläche wieder austritt.

Im Gegensatz zur Definition der Dichtigkeit von Baustoffen und Bauteilen beschreibt der Begriff „dicht“ in der Geotechnik somit zumeist nur eine relative Dichtigkeit als Eigenschaft von Böden und Gesteinen mit einer zwangsläufig dazugehörigen Durchlässigkeit, weshalb der Widerstand gegen das Eindringen von Wasser auch nicht mit einem Dichtigkeitsbeiwert, sondern einem Durchlässigkeitsbeiwert definiert wird (vgl. Kluckert 2007).

Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte von Böden werden nach der DIN 18130-1 (1998) sowie nach Ad-hoc-AG Hydrogeologie (1997) in folgende Durchlässigkeitsbereiche unterteilt⁴:

³ Kluckert befasst sich in seinen Ausführungen überwiegend mit Umfassungswänden des Spezialtiefbaus.

Tab. 2: Durchlässigkeitsklassen gemäß Ad-hoc-AG Hydrogeologie (1997).

BREDDIN (1963)	praktisch undurchlässig			sehr gering		gering		mittel	hoch	sehr hoch			
SCHAEF (1964) (Festgestein)	undurchlässig		wenig durchlässig			durchlässig			stark durchlässig				
DIN 19 711 (1975)	sehr gering				gering		mittel		groß		sehr groß		
VON SOOS (1980) Grundbau-Taschenbuch (3. Aufl.)	praktisch undurchlässig	sehr gering		niedrig		mittel			groß				
AG BODEN (1994); Bodenkundl. Kartieranlgt. (4. Aufl.)	sehr gering			gering	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch					
HK 50, DDR (1987)	Grundwasserstauer					Grundwasserleiter							
DIN 18 130 (1989) / ÖELTZSCHNER (1990)	sehr gering bis nahezu undurchlässig	sehr schwach durchlässig	schwach durchlässig		durchlässig			stark durchlässig			sehr stark durchlässig		
AD-HOC-AG-HYDROGEOLOGIE / DEUTSCHE GLÄ (1980)	ann. undurchlässig	sehr wenig durchlässig	wenig durchlässig		mäßig durchlässig		gut durchlässig			sehr gut durchlässig			
k_f-Wert (Grenzen) [m/s]	1 * 10 ⁻¹⁰	1 * 10 ⁻⁹	1 * 10 ⁻⁸	1 * 10 ⁻⁷	1 * 10 ⁻⁶	1 * 10 ⁻⁵	3 * 10 ⁻⁵	1 * 10 ⁻⁴	3 * 10 ⁻⁴	1 * 10 ⁻³	3 * 10 ⁻³	1 * 10 ⁻²	
HK 50 - Vorschlag													
Leitertyp		Grundwassergeringleiter					Grundwasserleiter						
Durchlässigkeitsklasse		7 äußerst gering	6 sehr gering		5 gering		4 mäßig		3 mittel		2 hoch		1 sehr hoch
Unterklasse		7	6.2	6.1	5.2	5.1	4.2	4.1	3.2	3.1	2.2	2.1	1
k_f-Wert (Grenzen) [m/s]		1 * 10 ⁻⁹	1 * 10 ⁻⁸	1 * 10 ⁻⁷	1 * 10 ⁻⁶	1 * 10 ⁻⁵	3 * 10 ⁻⁵	1 * 10 ⁻⁴	3 * 10 ⁻⁴	1 * 10 ⁻³	3 * 10 ⁻³	1 * 10 ⁻²	

Fazit:

Die im Zusammenhang mit der Errichtung von EWS-Anlagen bisher sowie im vorliegenden Bericht verwendeten Begriffe „Abdichtung“ oder „abdichten“ sind nicht mit einer „flüssigkeitsundurchlässigen“ Barriere oder deren Herstellung gleichzusetzen.

Da Gesteine bzw. Gesteinsformationen bis auf wenige Ausnahmen⁵ ebenfalls nicht „flüssigkeitsundurchlässig“ sind, muss dies das System EWS nach Herstellen der „Abdichtung“ ebenfalls nicht sein.

Es besteht jedoch die Notwendigkeit der Regelung, welche Durchlässigkeit das System EWS nach Herstellen der „Abdichtung“ aufweisen muss (siehe 5.2).

⁴ Die Durchlässigkeitsklassen der DIN 18130-1 (1998) haben sich gegenüber der in Tab. 2 genannten DIN 18130 (1989) nicht geändert.

⁵ z. B. Steinsalz ist „praktisch undurchlässig“

4.5 Grundwasserüberdeckung und Grundwasserstockwerksbau

Jede Bohrung, die das Grundwasser erreicht, durchteuft die Grundwasserüberdeckung. Bei der nachfolgenden Abdichtung des Bohrlochs gilt es, die ursprüngliche Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung wiederherzustellen.

Als **Grundwasserüberdeckung** wird der Gesteinskörper oberhalb einer Grundwasseroberfläche bezeichnet (DIN 4049-3). Nach der DIN 4049 sind dies der Boden und der Gesteinskörper über dem obersten zusammenhängenden, in der Regel weiträumigen Grundwasserstockwerk, das für Grundwassererschließungen nutzbar gemacht werden kann.

Unter der **Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung** wird das Rückhaltevermögen gegenüber Schadstoffen aus zur Versickerung kommenden Wassers verstanden. Maß des Rückhaltevermögens ist die Verweildauer des Sickerwassers und die Rückhaltekapazität in den grundwasserüberdeckenden Schichten. Die Verweildauer des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung wird im Wesentlichen von drei Faktoren bestimmt:

- der Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung,
- der Durchlässigkeit der Grundwasserüberdeckung, die von der pedologischen bzw. lithologischen Ausbildung abhängt,
- der anfallenden Sickerwassermenge.

Für die Rückhaltekapazität ist die Kationenaustauschkapazität ein wesentlicher Faktor, welcher bei Lockergesteinen von Sand über Schluff nach Ton zunimmt.

Eine Konzeption zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung ist durch die Ad-hoc-AG Hydrogeologie der SGD und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe erarbeitet worden (Höiting et al. 1995).

Ein **Grundwasserstockwerksbau** liegt vor bei mehreren übereinander liegenden Grundwasserleitern, die durch Grundwassergeringleiter getrennt sind.

Ein **Grundwasserleiter** ist ein Gesteinskörper, der geeignet ist, Grundwasser weiterzuleiten. Ein **Grundwassergeringleiter** (auch als Grundwasserhemmer bezeichnet) ist ein Gesteinskörper, der im Vergleich zu einem benachbarten Gesteinskörper gering wasserdurchlässig ist (DIN 4049-3). Die DIN 4049 führt entgegen der hydrogeologischen Kartieranleitung (Ad-hoc-AG Hydrogeologie 1997) darüber hinaus noch den Begriff „Grundwassernichtleiter“, der als Gesteinskörper definiert wird, welcher wasserundurchlässig ist oder unter der jeweiligen Betrachtungsweise als wasserundurchlässig angesehen werden kann.

Gemäß der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2002) ist unter einer wesentlichen Stockwerkstrennung eine weiträumig wirksame Stockwerkstrennung zu verstehen, die zu deutlich unterschiedlichen Grundwasserständen bzw. hydraulischen Druckhöhen oder Grundwasserbeschaffenheiten der einzelnen Stockwerke führt.

Treskatis (2015) weist darauf hin, dass „eine ungestörte, natürliche Grundwasserüberdeckung in den meisten Fällen den Transport von Störstoffen retardiert, vor allem von partikulären Substanzen wie Mikroorganismen. Bauliche Störungen der Struktur und Textur der Grundwasserüberdeckung fördern dagegen den Transport dieser Substanzen mit dem Sickerwasser. Bohrkanäle und undichte Ringräume können zu einer Beschleunigung der Verlagerung von Störstoffen aus der ungesättigten Zone in den Grundwasserraum beitragen.“

5 Empfehlungen für Anforderungen an die Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde

Der PK *Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde* empfiehlt nachfolgende Anforderungen an die Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde. Die Empfehlungen des PK erfolgen maßgeblich unter Aspekten des Grundwasserschutzes, des Schutzes des Bauherrn sowie des Schutzes des Eigentums Dritter. Für eine Bewirtschaftung des Grundwassers ist nach WHG § 47 Abs. 1 (1) darauf zu achten, dass eine Verschlechterung seines mengenmäßigen und chemischen Zustandes vermieden wird.

Die Empfehlungen gliedern sich in solche, die sich direkt auf die Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde beziehen (Empfehlungen 5.1 bis 5.4) und solche, die dazu beitragen eine dauerhaft bestmögliche Abdichtung zu erzielen (Empfehlungen 5.5 – 5.16). Darüber hinaus sieht der Personenkreis Forschungsbedarf zu verschiedenen Aspekten der Systemdurchlässigkeit (siehe Abschnitt 6).

5.1 Systemdurchlässigkeit als Maß der Abdichtung einer Erdwärmesondenbohrung

EMPFEHLUNG

Als Maß der „Abdichtung“ einer EWS-Bohrung ist deren Systemdurchlässigkeit parallel zum Verlauf der Bohrung (nachfolgend vereinfacht vertikale Durchlässigkeit), nicht hingegen die Durchlässigkeit des zur Abdichtung verwendeten Verfüllbaustoffs heranzuziehen.

BEGRÜNDUNG

Laboruntersuchungen zeigen, dass die Durchlässigkeit von modellhaft nachgebildeten EWS-Bohrungen (Systemproben) stets höher ist als die Durchlässigkeit des zur Abdichtung verwendeten Verfüllbaustoffs (Materialprobe). Die untersuchten Systemproben haben eine um bis zu einem Faktor > 1.000 höhere Durchlässigkeit als der verwendete Verfüllbaustoff.

Ein systematischer Zusammenhang zwischen Material- und Systemdurchlässigkeit ist nicht erkennbar, so dass die Materialdurchlässigkeit des Verfüllbaustoffs nicht als Maß der „Abdichtung“ einer EWS-Bohrung herangezogen werden kann.

Farbtracerversuche weisen darauf hin, dass die gegenüber der Materialdurchlässigkeit deutlich erhöhte Systemdurchlässigkeit der modellhaft nachgebildeten EWS-Bohrungen insbesondere auf die Bildung eines Ringspaltes um die Sondenrohre zurückzuführen ist.

DETAILS

Allan (1997) führte im Rahmen von Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit von Verfüllbaustoffen u. a. Untersuchungen zur Durchlässigkeit von Materialproben („bulk probe“) und Systemproben („simulated boreholes“) durch. Die Untersuchungen ergaben, dass die Durchlässigkeit des aus einem Sondenrohr und Verfüllbaustoff bestehenden Systems aufgrund von erhöhten Wegsamkeiten an der Kontaktfläche Verfüllbaustoff/Sondenrohr höher ist als die des Materials allein.

In weitergehenden Untersuchungen an Systemproben konnten Allan & Philippacopoulos (2000) aufzeigen, dass die Durchlässigkeit mit sinkender Temperatur steigt, was die Autoren auf die Kontraktion des Sondenrohres und des Verfüllbaustoffs bei sinkender Temperatur zurückführten (siehe 4.3).

Im Jahr 2008 legte die Austrian Research Centers GmbH – ARC die Ergebnisse der von der Abteilung Wasserwirtschaft, Grund- und Trinkwasserwirtschaft des Landes Oberösterreich beauftragten Studie „Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden“ vor (Niederbrucker & Stein-

bacher 2008a), die zudem in zwei nachfolgenden Artikeln (Niederbrucker & Steinbacher 2008b und Niederbrucker & Steinbacher 2008c) teilweise ergänzt veröffentlicht wurden.

Niederbrucker & Steinbacher (2008b) weisen ausdrücklich darauf hin, dass die im Labor ermittelten Durchlässigkeiten nur die reine Materialdurchlässigkeit der abgebundenen Suspension wiedergeben und die Systemdurchlässigkeit, d. h. die Durchlässigkeit der „Verpressung samt Sondenverrohrung“ höher anzusetzen ist. Die Untersuchungen an 12 Baustoffproben ergaben, dass der Durchlässigkeitsbeiwert des Materials zwischen $k_f = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s und $5 \cdot 10^{-7}$ m/s variiert, was bei Lockergesteinsböden einem sehr schwach bis schwach durchlässigen Boden entspricht.

Auch die im Rahmen der „Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden“ von Niederbrucker & Steinbacher (2008c) durchgeführten Modelluntersuchungen, bei denen Doppel-U-Sonden 32*2,9 mm in 150 mm-PVC-Rohre eingebaut wurden, ergaben, dass die Durchlässigkeit des Modellsystems um den Faktor 10 bis 1.000 höher ist als die des reinen Baustoffs. Der Einsatz von Markierungsstoffen bei den Durchlässigkeitsversuchen bestätigte dabei, dass die Erhöhung der Durchlässigkeit des Systems gegenüber dem Baustoff durch Wasserwegsamkeiten an den Grenzflächen Verfüllbaustoff – Sondenrohr bzw. Verfüllbaustoff – PVC-Rohr bedingt ist.

Aufbauend auf den Voruntersuchungen von Albrecht & Frank (2010) wurde im Auftrag der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg eine gegenüber den Vorversuchen modifizierte Messzelle entwickelt, bei der ein zentral eingebautes PE-Rohr der Simulation einer EWS dient (Anbergen et al. 2011). Durch diesen Versuchsaufbau kann eine von innen nach außen gerichtete Frostbeanspruchung simuliert werden⁶. Die Untersuchungen bestätigen die Feststellung aus vorangehenden Untersuchungen, dass die Systemdurchlässigkeit grundsätzlich höher ist als die Materialdurchlässigkeit.

Auch die am Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. - ZAE Bayern durchgeführten Versuche im Großversuchsstand (Doppel-U-Sonden im 150 mm-PVC-Rohr; Länge: 3,5 m) ergaben, dass die Systemdurchlässigkeit deutlich größer als die Materialdurchlässigkeit der untersuchten Verfüllbaustoffe ist (Reuß & Kuckelkorn 2011, Kuckelkorn & Reuß 2013, Reuß 2014).

Nach Rumohr & Schäfer (2015) ist aufgrund der vorgenannten Untersuchungen davon auszugehen, dass i. d. R. > 99% der Vertikalströmung in den Systemproben in den/dem Ringspalt(en) erfolgt.

Das Vorhandensein erhöhter Wasserwegsamkeiten im Bereich der Kontaktflächen von Ausbaumaterial und Verfüllbaustoff ist auch aus dem Bereich des Brunnenbaus bekannt:

Im Jahr 2002 wurde das F&E-Vorhaben „Abdichtungen im Brunnenbau“ des DVGW abgeschlossen, mit dem nachvollziehbare und auf der Baustelle überprüfbare Qualitätskriterien für Ton-Zement-Suspensionen zur Ringraumabdichtung sowie eventuelle Schwachstellen des „Systems Ringraumabdichtung“ ermittelt werden sollten.

Zusammenfassend ist nach Treskatis (2003), Rubbert (2003), Niehues (2002) und Niehues et al. (2003) im Wesentlichen die Migration von Wässern im Bereich von Kontaktflächen zwischen dem Verfüllbaustoff und dem Ausbaumaterial bzw. der Bohrlochwand als Grund für Leckagen im Ringraum anzusehen. So konnten bei den Untersuchungen insbesondere Wegsamkeiten an den

⁶ Das bei diesem Versuchsaufbau vorgenommene Auftauen der Probe von innen nach außen entspricht jedoch nicht den realen Verhältnissen, bei denen sich der Bohrlochringraum und damit der Verfüllbaustoffkörper von außen nach innen erwärmt.

Kontaktflächen zu den glatten PVC-Vollwandrohren festgestellt werden. Diese Kontaktflächen sind u. a. nach den Befunden von Farbtracerversuchen als präferentielle Fließwege für unerwünschte Fremdwässer im Brunnenringraum zu definieren. Die Kontaktfläche zum angrenzenden Lockergestein konnte im für die durchgeführten Versuche vorliegenden Fall (Feinsand) als eher unkritisch hinsichtlich potenzieller Wegsamkeiten eingestuft werden.

Die für den Brunnen- und Messstellenbau untersuchten Suspensionen zeigten unterschiedliche Materialeigenschaften und reagierten auf Verarbeitungsfehler auf der Baustelle mit z. T. erheblichen Abweichungen in ihren physikalischen Charakteristika. Die Probleme des Abdichtungskörpers im System sind jedoch mit unterschiedlichem Ausmaß bei allen untersuchten Produkten vergleichbar. Niedrig viskose Suspensionen scheinen im direkten Vergleich anfälliger für die Ausbildung von Inhomogenitäten, harte und dabei spröde Produkte anfälliger für Rissbildungen, welche nicht mehr „heilfähig“ sind, zu sein.

Bei einer relativ frühzeitigen hydraulischen Belastung der Ringraumabdichtung, wie sie in der Praxis vielfach nicht zu vermeiden ist (Hinweis: siehe 5.7), fand in den Untersuchungen eine Durchströmung im Bereich der noch nicht verfestigten Suspension an den Kontaktflächen statt, was in diesem Bereich zur Auswaschung („Erosion“) der Abdichtungsmasse führt (Treskatis 2003). Der Autor geht davon aus, dass dieser Effekt insbesondere bei einer hohen Viskosität der Verfüllsuspension auftritt: Durch die Reibung der höher viskosen Suspension an Kontaktflächen wird ein Widerstand ausgeübt. Im zentralen Querschnitt des Ringraums eilt die Suspension gegenüber dem Kontaktbereich zum Brunnenrohr und zur Bohrlochwand voraus. Aufgrund der geringen Aufstiegs geschwindigkeit in den Randbereichen kann dort keine wirksame Verdrängung der Bohrspülung erfolgen.

Nach Abschluss des F&E-Vorhabens lässt sich nach Treskatis (2003) festhalten, dass pumpfähige Ton-Zement-Suspensionen prinzipiell geeignet sind, Ringräume in Brunnenbohrungen abzudichten. Es besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf, um die materialspezifischen und verarbeitungstechnischen Einflüsse auf die Systemdurchlässigkeit und deren Zusammenhänge mit dem hydrogeologischen Umfeld exakter beschreiben zu können.

5.2 Maximale Systemdurchlässigkeit

EMPFEHLUNGEN

Die vertikale Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde sollte zu keinem Zeitpunkt und in keiner Tiefenlage größer als die vertikale Durchlässigkeit des umgebenden Untergrundes vor Durchführung und Ausbau der EWS-Bohrung sein; jedoch wird eine Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde von geringer als $1 \cdot 10^{-9}$ m/s als nicht erforderlich erachtet.

Wenn eine tiefenangepasste Abdichtung von EWS-Bohrungen nicht möglich ist, ist die minimale vertikale Durchlässigkeit der für den Standort relevanten Schichten (z. B. ein Grundwasserstauer) maßgebend.

Liegen keine verlässlichen Informationen zu der minimalen vertikalen Durchlässigkeit der erschlossenen Schichtenfolge vor, sollte eine einzuhaltende Systemdurchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-9}$ m/s gefordert werden.

BEGRÜNDUNG

Die Abdichtung einer EWS-Bohrung soll durch die Bohrung geschaffene Durchlässigkeiten schließen und somit dauerhaft gegenüber dem durch die Bohrung unbeeinflussten Zustand zusätzliche

Strömungen zwischen Grundwasserstockwerken oder von der Erdoberfläche in das Grundwasser parallel zum Verlauf einer EWS-Bohrung verhindern. Um dies zu erreichen, darf die vertikale Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde nicht größer sein als die des direkt umgebenden ungestörten Untergrundes.

Das System Erdwärmesonde und insbesondere die Verfüllbaustoffe unterliegen dauerhaft Belastungen (siehe 5.8.2, 5.8.3), die zu einer Änderung (Erhöhung) der Systemdurchlässigkeit führen können. Dies macht die Forderung notwendig, dass die vertikale Durchlässigkeit zu keinem Zeitpunkt (siehe hierzu 5.3) größer als die vertikale Durchlässigkeit des umgebenden Untergrundes sein darf.

Eine Durchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-9}$ m/s liegt gemäß der Ad-hoc-AG Hydrogeologie (1997) im Übergangsbereich der Durchlässigkeitsklassen „wenig durchlässig“ zu „sehr wenig durchlässig“. Dieser Wert wird vom PK im Sinne des Grundwasserschutzes als ausreichende Systemdurchlässigkeit zur Sicherstellung einer Abdichtung erachtet, auch wenn das umgebende Gestein eine geringere vertikale Durchlässigkeit aufweist (Tab. 2).

DETAILS

Mit seiner Empfehlung folgt der PK Systemdurchlässigkeit folgenden vergleichbaren Empfehlungen:

Zum Schutz des Grundwassers empfiehlt die International Ground Source Heat Pump Association (1991) eine geringe Durchlässigkeit der Verfüllung von EWS-Bohrungen zur Unterbindung einer hydraulischen Verbindung verschiedener Grundwasserleiter, die von der Bohrung durchteuft wurden.

Der Durchlässigkeitsbeiwert des ins Bohrloch eingebauten Verfüllbaustoffs sollte gemäß International Ground Source Heat Pump Association (1991) idealerweise $k_f = 1 \cdot 10^{-9}$ bis $1 \cdot 10^{-11}$ m/s betragen und kleiner als der Durchlässigkeitsbeiwert der durchteuften Formationen sein. Für eine gute Abdichtung muss der Baustoff im Bohrloch eine feste Verbindung mit dem Wärmetauscher und der Bohrlochwand aufweisen.

Die Groundwater Division des Michigan Department of Natural Resources & Environment empfiehlt, dass der Durchlässigkeitsbeiwert der Bohrlochverfüllung von EWS-Bohrungen maximal $k_f = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s betragen soll (Michigan Department of Natural Resources & Environment Groundwater Division 2010).

Gemäß den von den britischen Ground Source Heat Pump Association (2011) formulierten Standardanforderungen an die Bemessung und Installation von EWS sowie die hierbei eingesetzten Materialien soll der Durchlässigkeitsbeiwert des Verfüllbaustoffs max. $1 \cdot 10^{-11}$ m/s betragen oder auch, wenn spezifische lokale Vorschriften dies fordern, noch niedriger sein.

Im Falle zementhaltiger Verfüllbaustoffe darf die kombinierte Durchlässigkeit von Verfüllbaustoff, Bohrloch und EWS (= „Systemdurchlässigkeit“) hierbei nicht höher sein als die Durchlässigkeit des umgebenden Gesteins⁷. Die Möglichkeit der Erhöhung der Systemdurchlässigkeit durch die Kontraktion der Sondenrohre unter Betriebsbedingungen sollte gemäß der Ground Source Heat Pump Association (2011) berücksichtigt werden.

⁷ Where cementitious grouts are used, the maximum allowable permeability of the combined grout material, borehole and installed loop pipe shall no higher than the surrounding ground.

Gemäß der von der britischen Environment Agency (2011) veröffentlichten Empfehlung *Environmental good practice guide for ground source heating and cooling* soll die hydraulische Leitfähigkeit der über die gesamte Bohrlochlänge eingebrachten Verfüllung einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f \leq 10^{-9}$ m/s aufweisen.

Die seit Herbst 2013 als Entwurf vorliegende DIN EN ISO 17286 (2013) fordert die Verfüllung der Bohrungen nach Einbringen der EWS mit einer Suspension, die eine geringere oder gleiche Durchlässigkeit wie der umgebende Untergrund hat, um u. a. hydraulische Verbindungen zwischen Grundwasserleitern und eine Vertikaldrainage entlang der Rohre zu verhindern. Aufgrund des Hinweises auf die Drainage entlang der Rohre ist zu vermuten, dass sich die Forderung der Abdichtung mit einer geringeren oder gleichen Durchlässigkeit wie der umgebende Untergrund auf das System Erdwärmesonde bezieht, da die Kontaktfläche zwischen ausgehärteter Suspension und Rohren nicht Bestandteil der ausgehärteten Suspension selbst ist.

5.3 Geltungszeitraum der Anforderungen

EMPFEHLUNGEN

Anforderungen an die Systemdurchlässigkeit einer EWS-Bohrung müssen so lange eingehalten werden, wie sich die EWS im Untergrund befindet, d. h. unabhängig von ihrer Nutzung.

Nach dem Rückbau einer EWS darf die vertikale Durchlässigkeit der wieder verfüllten Bohrung in keiner Tiefenlage größer sein als die der zuvor durchteuften Schichten.

BEGRÜNDUNG

Das System EWS und hier insbesondere der Verfüllbaustoff unterliegen auch ohne die thermische Nutzung der EWS bestimmten Belastungen, z. B. einem chemischen Angriff. Dies macht die Forderung notwendig, dass die Anforderungen an die Systemdurchlässigkeit unabhängig von der Nutzung der EWS eingehalten werden müssen.

DETAILS

EWS werden gelegentlich nicht in Betrieb oder außer Betrieb genommen. Bekannt sind z. B. Pilot-EWS zur geothermischen Erkundung (Durchführung eines TRT) mit nachfolgendem Abbruch des Projektes, EWS mit einer unzureichenden Durchgängigkeit oder EWS mit unzureichender thermischer Leistung sowie EWS, für deren Betrieb die Erlaubnis zurückgenommen wurde.

Solche EWS werden meist mit einer Bentonit-Suspension verfüllt. Einen Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit der Bohrung hat das Verfüllen der Sondenrohre nicht.

5.4 Übertragbarkeit von Werten der Systemdurchlässigkeit aus Laboruntersuchungen

EMPFEHLUNGEN

Bisher vorliegende Werte der Durchlässigkeit, die an modellhaft nachgebildeten EWS-Bohrungen im Labormaßstab ermittelt wurden, sollten nicht zur Beurteilung der Abdichtung realer EWS-Bohrungen übertragen werden. Hiervon unabhängig können die hieraus abgeleiteten Durchlässigkeitsbeiwerte für Vergleiche innerhalb eines Versuchsaufbaus verwendet werden. Sie können somit Hinweise auf

Wirkungszusammenhänge geben, z. B. die Wirkung von Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchungen auf verschiedene Verfüllbaustoffe.

Bezüglich der Übertragbarkeit der Ergebnisse von Laboruntersuchungen auf das System Erdwärmesonde sind ergänzende Untersuchungen erforderlich (siehe auch 6.1).

BEGRÜNDUNG

System-Durchlässigkeitsbeiwerte, die an modellhaft nachgebildeten EWS-Bohrungen im Labormaßstab ermittelt werden, gelten nur für das jeweils untersuchte System bzw. den Versuchsaufbau mit den i. d. R. idealisierten Randbedingungen. Eine Übertragung dieser Werte auf andere Systeme mit abweichenden Randbedingungen, z. B. reale EWS-Bohrungen, ist grundsätzlich nicht zulässig.

Die Durchlässigkeit eines Systems hängt entscheidend von seinem Aufbau und seinen Komponenten sowie den hydraulisch wirksamen Randbedingungen ab. Modellhaft nachgebildete EWS-Bohrungen im Labormaßstab mit i. d. R. idealisierten Randbedingungen weichen stark bis sehr stark von realen EWS-Bohrungen ab.

DETAILS

Von bisherigen Untersuchungen an modellhaft nachgebildeten EWS-Bohrungen im Labormaßstab sind u. a. die in Tab. 3 aufgeführten Abweichungen bzgl. Aufbau, Komponenten oder Randbedingungen von realen EWS-Bohrungen bekannt (aus Rumohr & Schäfer 2015).

Auch Treskatis (2015) geht davon aus, dass die Randbedingungen im Labor nicht denen im Bohrloch entsprechen und führt hierzu aus: „Beim Einbau und nach Abbinden bzw. Ausquellung unterliegen Ringraumsperrern im Bohrloch mechanischen und hydraulischen Beanspruchungen, die von den Laborbedingungen der Prüfkörper deutlich abweichen. Im Bohrloch herrschen höhere hydrostatische Drücke und inhomogene Wasseraufnahmefähigkeiten der Bohrlochwand. Hinzu kommen Einflüsse durch die Anmischung der Verfüllbaustoffe, die in der Mischanlage zu unterschiedlichen Dichten und heterogenen Chargen führen. Die flüssigen Abdichtungsmaterialien können in die Hohlräume der ungesättigten und gesättigten Zone eindringen und verloren gehen. Ebenso können sich durch unterschiedliche Wasserabgaberraten an das Gebirge ungleichmäßige Verfüllungen ergeben. In der ungesättigten Zone kann es zu Schrumpfrissen kommen, da dort der Sickerwasserfluss nicht homogen stattfindet. Ein erhöhtes Absetzmaß der Suspension führt zu Lücken in der Ringraumverfüllung, die frei von nachträglich dichtenden Baustoffen und daher dauerhaft und bevorzugt wegsam für Kurzschluss- oder Sickerströmungen sind. Flüssige Verfüllbaustoffe vermischen sich auch mit der noch im Bohrloch verbliebenen Bohrsuspension oder mit Nachfall aus der Bohrlochwand.“

Tab. 3: Vergleich der Randbedingungen realer und modellhafter Bohrlöcher

Reales Bohrloch (Baustelle)	Bohrloch-Modell (Labor)
Bohrspülung / -zusätze vorhanden	Keine Bohrspülung / -zusätze vorhanden
Suspension häufig nicht homogen	Suspension homogen
Tiefenvariable Wasserabgabe der Suspension an das Gebirge möglich	Wasserabgabe der Suspension nicht möglich
Kontakt der EWS mit Bohrlochwand	Kein Kontakt der EWS zur Messzellenwand
Beanspruchung durch Druckprüfung	Keine Druckprüfung
Große Spannweite der Temperatur	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes bei Raumtemperatur; Korrektur auf 10 °C
Größenverhältnis „Bohrdurchmesser-EWS-Umfang“ richtet sich nach Ländervorgaben	Einheitsdurchmesser (Versuchsaufbau)

Versuche aus dem Bereich des Brunnen- / Messstellenbaus zeigen eine Abhängigkeit der Wirksamkeit der Abdichtung von der Konzentration polymerer Spülgusätze („CMC“) in der Bohrspülung. Ein höherer Anteil an CMC ergab in der Mehrzahl der untersuchten Fälle auch eine höhere Systemdurchlässigkeit. Die Mechanismen, die zu der beschriebenen Auswirkung eines höheren CMC-Anteils führen, sind nach Niehues et al. (2003) bisher weitgehend unklar. Die Autoren führen aus, dass die Feststoffbestandteile der Suspensionen (Tonmehle und Zemente) durch den Kontakt mit CMC-Molekülen beeinflusst werden, was z. B. zu einer Verlangsamung der Hydratation des Zementes und einer Reduzierung der Wasseraufnahmekapazität der Tonminerale führen kann. Zudem vermuten die Autoren einen Schmiereffekt durch die Anhaftung der CMC-Moleküle an den Kontaktflächen (Ausbauverrohrung und Bohrlochwand).

5.5 Bohrverfahren

EMPFEHLUNGEN

Für die Ausführung der EWS-Bohrung sollte ein Bohrverfahren eingesetzt werden, das keine starke Auflockerung des umliegenden Gebirges verursacht. Die Bohrung ist richtungstreu (bevorzugt lotrecht) und kalibertreu auszuführen. Der Bohrgutaustrag sollte möglichst eine DIN-gerechte Ansprache des Bohrgutes ermöglichen.

Bei Bohrverfahren, die eine detaillierte und teufengerechte Ansprache der durchteuften Gesteine nicht gewährleisten, ist eine ergänzende geophysikalische Untersuchung zu empfehlen.

BEGRÜNDUNG

Die Ausführung der Bohrung führt durch sämtliche mit dem Bohrverfahren verbundenen Prozesse zu einer irreversiblen Änderung des Gefüges, der Stabilität und der Hydraulik des Gebirges. In der Literatur (z. B. Kreuter et al. 2010) werden die relevanten Prozesse beschrieben, die Einfluss auf das Gebirge haben. Die irreversiblen Änderungen des Gefüges, der Stabilität und der Hydraulik des Gebirges führen zu einer Änderungen der Systemdurchlässigkeit. Diese Änderungen sind durch den Einsatz angepasster Bohrverfahren zu minimieren.

Für die geologische, hydrogeologische und nicht zuletzt geothermische Bewertung des Untergrundes ist die Ansprache des Bohrgutes erforderlich. Ein qualitativ guter Beschrieb der erbohrten Schichten ist für die fachgerechte Ausführung der Bohrung hilfreich und führt zu weiterführenden Erkenntnissen hinsichtlich der geologische Bedingungen im Umfeld des Standortes, die Bauherren, Planern und

Behörden bei weiteren Bauvorhaben nützlich sind. Das Lösen und der Austrag des Bohrgutes sind deshalb dergestalt vorzunehmen, dass ein Bohrgutbeschrieb möglich ist.

DETAILS

In Abhängigkeit von den am Bohrpunkt anstehenden Gesteinen kommen unterschiedliche Bohrverfahren zum Einsatz. Eine Einteilung der Bohrverfahren erfolgt in der DIN EN ISO 22475-1 (2007). Danach kann die Lösung des Gesteins drehend, rammend, schlagend, drückend, greifend oder in Kombination der Verfahren vorgenommen werden. Damit die Bohrlochwand nicht einfällt und das Bohrwerkzeug gekühlt wird, wird eine in der Regel mit Zusätzen versehene Bohrspülung verwendet. Diese hat darüber hinaus die Funktion, das gelöste und zerkleinerte Gestein aus dem Bohrloch zu fördern. Für die Erstellung der EWS kommen überwiegend drehende und schlagende Bohrverfahren mit Luft- oder Wasserspülung zur Anwendung.

Durch die in Tab. 4 beschriebenen Prozesse entstehen sowohl zylindrisch um das Bohrloch als auch senkrecht zur Bohrlochwand verlaufende Risse und Klüfte (Abb. 4), die häufig an vorherrschende Gefügerichtungen gebunden sind. Diese führen zu einer Auflockerung und Destabilisierung des Gebirges. Nachfolgend können ein Ausbrechen und eine Erosion durch den Spülungsstrom von Gesteinsmaterial an der Bohrlochwand erfolgen. In Abhängigkeit vom Bohrverfahren, der Lithologie des Gebirges und des Gefüges bzw. der Lagerung des Gesteinsverbands sind diese Ausbrüche und Ausspülungen unterschiedlich stark.

Tab. 4: Einflüsse der Prozesse des Bohr- und Ausbavorgangs auf den Untergrund

Prozesse	Funktion	Einflüsse / Folgen
Bohrvorgang	<ul style="list-style-type: none"> • Lösen und Zerkleinern des Gesteins 	<ul style="list-style-type: none"> • Schnelle Lastwechsel unter den Zähnen von Rollen- und Meißelbohrwerkzeugen führen zu Beanspruchungen an der Bohrlochwand und -sohle. • Besonders in Weichformationen treten grabende und schabende Beanspruchungen an der Bohrlochwand auf. • Durch Be- und Entlastungen im Verlauf einer Bohrung führen Spannungsänderungen zur Bildung von Scher- und Zugbrüchen und kleinen Rissen in einer Zone um die Bohrung. • Beim Auffahren von Hohlräumen entstehen durch Spannungsänderungen Risse und Klüfte um den Hohlraum. • Es treten thermische Belastung im Bohrloch auf und führen zur Änderung des Temperaturfeldes in der umgebenden Formation. • Durch Änderung des thermischen Regimes erfolgt eine Störung des Porenfluiddrucks: Wasser besitzt einen deutlich höheren volumetrischen Ausdehnungskoeffizienten als die Gesteinsmatrix. Im Falle der Erwärmung treten erhöhte Spannungen auf, bei Abkühlung erfolgt ein Abbau der Spannungen.

Spülung	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrklein von Bohrlochsohle austragen • Bohrklein bei Unterbrechung der Spülungszirkulation in Schwebe halten • Bohrklein, Fluide und Gase übertage ausfördern • Bohrwerkzeuge kühlen • Reibung zwischen Bohrstrang und Bohrlochwand reduzieren • Bohrlochwand stabilisieren • Zuflüsse aus dem Gebirge verhindern 	<ul style="list-style-type: none"> • Es kommt zu mechanischen und chemischen Wechselwirkungen zwischen Gebirge und Spülung. • Durch Reibung der Spülung an Bohrlochwand tritt Erosion ein, die bei turbulenter Strömung noch stärker als bei laminarer auftritt. • Thixotrope Eigenschaften der Bohrspülung: In Ruhe erstarrt Bohrspülung zu einem Gel. Erst durch Einwirkung genügend großer Scherspannung, die durch die Pumpen aufgebracht werden muss, verflüssigt sich Spülung wieder => Anlagerung von Feststoffen an Bohrlochwand/ Austrag bei Änderung der Phase der Spülung. • Bei hohem Spülungsdruck tritt Spülung über Klüfte/ tektonische Störungen in das Gebirge ein und fördert die Instabilität des Gebirges. • Durch Druckänderungen im Spülungsstrom und beim Ein- und Ausfahren des Bohrstrangs erfolgt eine progressive Entfestigung des Gebirges. • Änderungen des Porenfluiddrucks und Wassergehaltes
Verrohrung	<ul style="list-style-type: none"> • Standverrohrung • Mitgeführte Verrohrung 	<ul style="list-style-type: none"> • Durch die Verrohrung werden die mechanischen, hydraulischen und thermischen Auswirkungen des Bohrvorgangs auf das Gebirge gedämpft.
Offenes Bohrloch		<ul style="list-style-type: none"> • Bohrlochkonvergenz durch Kriechverformung insbesondere von Tonen und Tonsteinen. • Kristallines und osmotisches Quellen von smektithaltigen Tonen und Tongesteinen. • Verformung des Bohrlochs durch tektonischen Druck. • Nachfall von Gesteinsmaterial aus Bohrlochwand. • Vertikale Grundwasserströmung im Bohrloch: dadurch Entfestigung und Verfrachtung von Gesteinsmaterial.

Im Hinblick auf die hydraulische Durchlässigkeit von EWS-Bohrungen ist zusammenfassend festzustellen, dass die mechanischen, hydraulischen und thermischen Einwirkungen im Verlauf des Bohrprozesses Auswirkungen haben. Die Auflockerung des Gebirges sowie das Auftreten von Rissen und Klüften führen zu einer Änderung des hydraulischen Regimes.

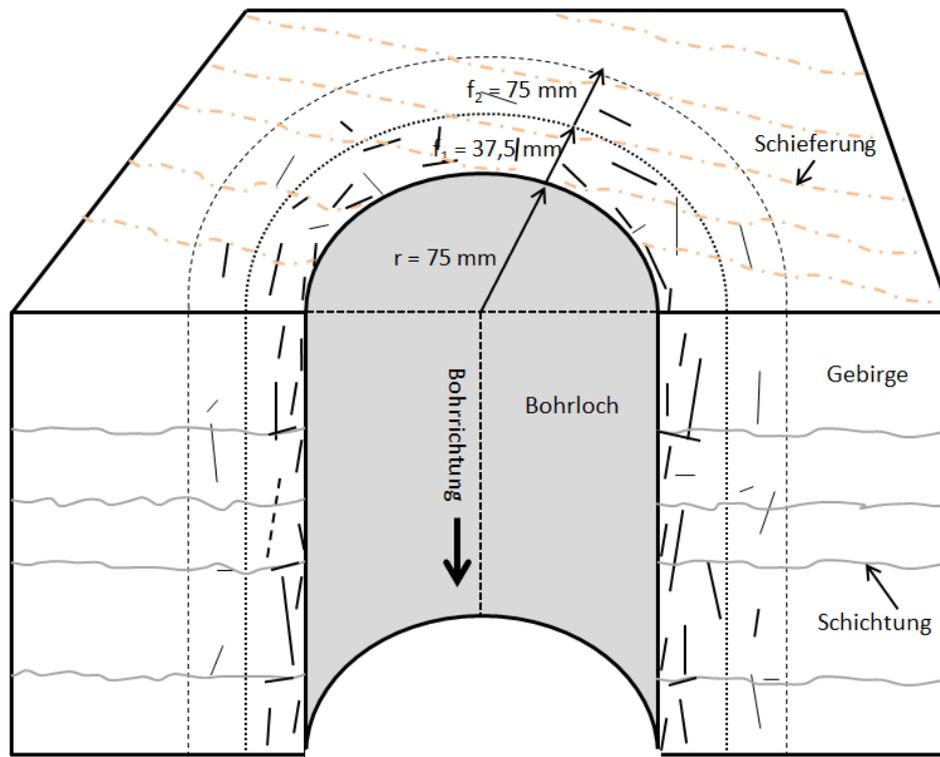


Abb. 4: Schematische Darstellung der durch den Bohrprozess induzierten Risse und Klüfte um ein Bohrloch. (r stellt den Radius einer EWS-Bohrung dar, f_1 ist die Eindringtiefe von deutlichen Rissen, Klüften und Auflockerungen in Folge des Bohrprozesses, f_2 ist die Eindringtiefe von schwachen Rissen, Klüften und Auflockerungen in Folge des Bohrprozesses, die Größenordnung der Eindringtiefen gelten für Tone und Tonsteine) (umgezeichnet nach Bossart et al. 2002).

5.6 Zentrierter Einbau

EMPFEHLUNGEN

Der zentrische Einbau der EWS in eine lotrechte Bohrung bei gleichzeitiger vollständiger Umhüllung der Sonde mit Verfüllbaustoff ist anzustreben.

Wenn der zentrische Einbau der EWS bei gleichzeitiger vollständiger Umhüllung der Sonde technisch nicht sicher umsetz- und nachweisbar ist, sollte bei relevantem Stockwerksbau (d. h. mit Potenzialunterschied) eine Tiefenbegrenzung erfolgen.

BEGRÜNDUNG

Die Lage der Sondenrohre im Bohrlochquerschnitt sowie die anschließende Verfüllung haben eine unmittelbare Bedeutung auf die Systemdurchlässigkeit. Gelingt es nicht, mittels Sonde und Verfüllung die durch die Bohrung geschaffene vertikale Wegsamkeit zu schließen, besteht die Gefahr dauerhafter ungewollter Systemdurchlässigkeiten. Eine vertikale Wegsamkeit wird durch den Ringspalt zwischen dem Sondenmaterial und der Verfüllung verursacht (siehe 4.3). Erhält dieser Ringspalt Kontakt zur Bohrlochwand, direkt oder durch Wegsamkeiten im Verfüllmaterial, kann dies zu ungewollten Systemdurchlässigkeiten führen.

Wenn das Sondenbündel zentriert im Bohrloch eingebaut ist, wird das Sondenbündel bei dem Verfüllvorgang vollständig vom Verfüllbaustoff umhüllt und es besteht ein allseitiger Ringraum. Wegen der vollständigen Umhüllung des Sondenbündels ist hinsichtlich der Systemdurchlässigkeit die potenzielle Wegsamkeit zwischen Sondenrohren und Verfüllbaustoff somit nicht mehr relevant, da dieser Bereich nur bedingt mit dem Gebirge (Bohrlochwand) hydraulisch kommunizieren kann.

DETAILS

In Kombination mit den aus der Lotrechten abweichenden Bohrstrecken und den unregelmäßigen Bohrlochwänden führt der Drall der von der Haspel abgewickelten EWS zu einer unkontrollierten Lage der Sonden im Bohrlochquerschnitt. Die Sondenbündel verdrehen sich i. d. R. über die gesamte Sondenlänge, so dass sich deren Abstände und Positionen untereinander und zu der Bohrlochwand laufend verändern.

Um die Sondenrohre einer Doppel-U-Sonde, dem häufigsten EWS-Typ, möglichst in Idealposition in das Bohrloch einzubringen, wurden „innere Abstandshalter“ und „äußere Zentrierhilfen“ entwickelt. „Idealposition“ bedeutet, dass die Sondenrohre parallel verlaufen, d. h. sowohl zueinander als auch zur Bohrlochwand immer denselben Abstand und die gleiche Position aufweisen. Wobei die inneren Abstandshalter die gleich bleibende Position der einzelnen Sonden untereinander, die äußeren Zentrierhilfen den Abstand zu der Bohrlochwand über die gesamte Sondenlänge sicherstellen sollen.



Abb. 5: Innerer Abstandhalter (Fa. Frank)



Abb. 6: Äußere Zentrierhilfe (Müller, VHF)

Im Rahmen des Forschungsprojekts *EWSplus* wurden am Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme im baden-württembergischen Crailsheim Untersuchungen zur Qualitätssicherung von EWS an unter Realbedingungen eingebauten EWS durchgeführt. Hierdurch konnte der Einfluss von inneren Abstandshaltern und äußeren Zentrierhilfen auf die Position der Sondenrohre im Bohrloch untersucht werden. In PE-Innenrohren wurden hierzu EWS bis ca. 30 m Tiefe eingebaut und im Kontraktorverfahren mit Verfüllbaustoff verfüllt. In den Versuchsbohrungen wurden Bohrdurchmesser von 150 mm und von 200 mm nachgebaut. Der Einbau der inneren Abstandshalter und äußeren Zentrierhilfen erfolgte dabei in Abständen zwischen 1 und 5 m.

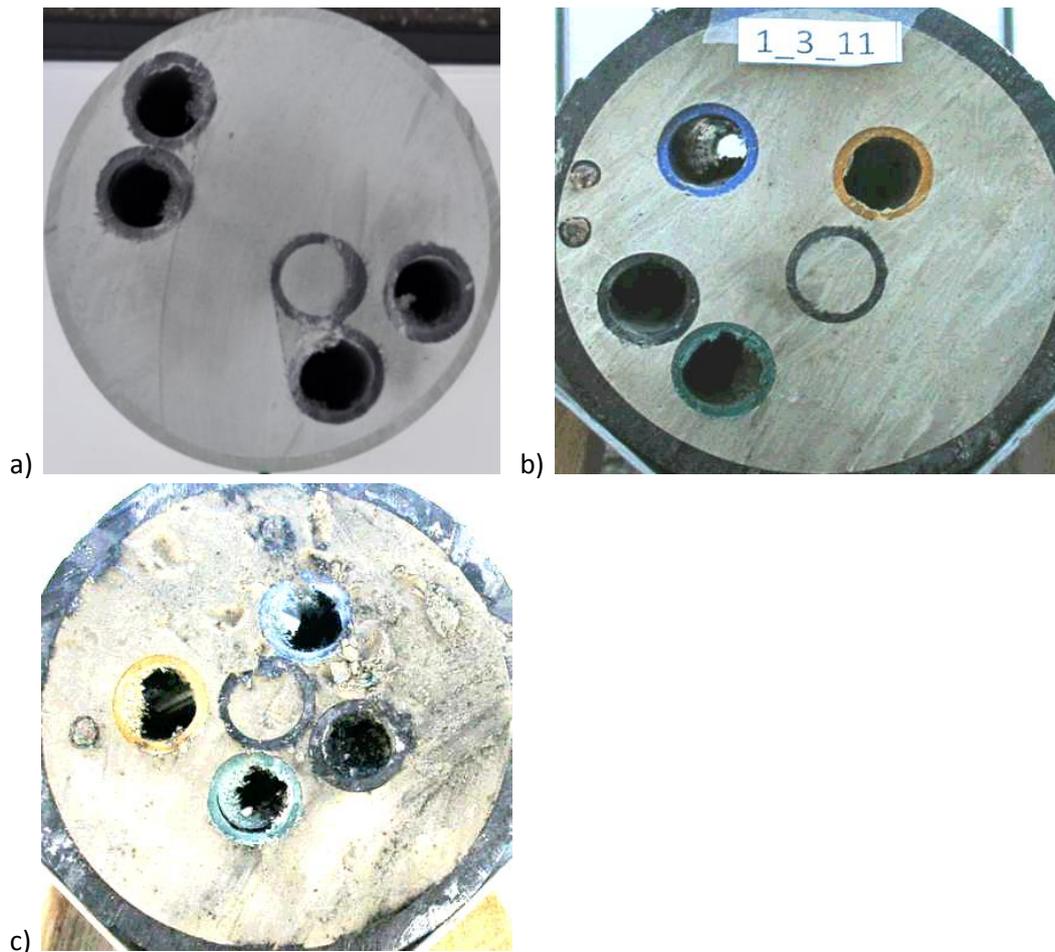


Abb. 7: Einbau ohne Abstandshalter und Zentrierhilfen (Riegger & Rolker 2014),
 b) Einbau mit inneren Abstandhaltern (Riegger 2010),
 c) Einbau mit äußeren Zentrierhilfen (Riegger 2010),
 zur Orientierung: Verfüllrohr jeweils mit Suspension verschlossen.

Abb. 7 a) - c) zeigen die gezogenen und zur Untersuchung zur Querachse aufgesägten Zylinder. Die Querschnitte entstammen den Bereichen, in dem die Abstandshalter bzw. Zentrierhilfen in 1 m-Abständen gesetzt wurden.

Die Bilder verdeutlichen, dass die Sondenrohre ohne Einsatz von Positionierungshilfen unkontrolliert und nicht prognostizierbar im Bohrloch durch die ausgehärtete Verfüllsuspension fixiert werden. In der Praxis geforderte Ringräume, durch welche die Abdichtung des Systems gewährleistet werden soll, zur Bohrlochwand werden damit in der Regel nicht eingehalten. Die Auswertung der Bohrungen mit inneren Abstandshaltern zeigt, wie stark sich die Positionen der Sondenrohre im Bohrloch innerhalb eines Meters trotz Abstandshalter ändern können.

Der Einsatz der inneren Abstandshalter sorgte zwar dafür, dass die Sondenrohre für Rück- und Vorlauf durchgehend einen Mindestabstand zueinander aufwiesen. Sie konnte aber nicht verhindern, dass die Sondenrohre dicht an der Bohrlochinnenwand geführt und durch die Suspension dort fixiert wurden. Hieraus lässt sich rückfolgern, dass durch die inneren Abstandshalter zwar eine ungewollt große thermische gegenseitige Beeinflussung verhindert werden kann, sie jedoch keine Sicherheit in Bezug auf eine achsparallele Zentrierung bieten. Der Ringraum zwischen den Sondenrohren und der Bohrlochinnenwand bleibt variierend.

Nur durch den Einsatz von Zentrierhilfen in kurzen Abständen (maximal 1 m) wurde in dem oben genannten Forschungsvorhaben eine definierte Position der Sondenrohre zueinander und gleichzeitig eine Zentrierung des Sondenrohrbündels im Bohrloch erreicht.

In Abb. 8 sind typischen Verläufe von Sonden- und Verfüllrohren im Bohrloch bei den verschiedenen Einbauszenarien dargestellt. Während 0,0 m die vertikale Bohrlochachse (Bohrlochzentrum) darstellt, begrenzt die Bohrlochinnenwand bei ca. 0,062 m den maximal möglichen Abstand vom Bohrlochzentrum. Der Verzicht von Positionshilfen und die Verwendung von inneren Abstandshaltern zeigten keine signifikanten Vorteile in Bezug auf die zentriergenaue Lagetreue. Erkennbar ist, dass durch die Abstandshalter das Verfüllrohr geringeren Abweichungen vom Bohrlochzentrum ausgesetzt ist als bei dem freien Einbringen der Rohre ohne Positionshilfen.

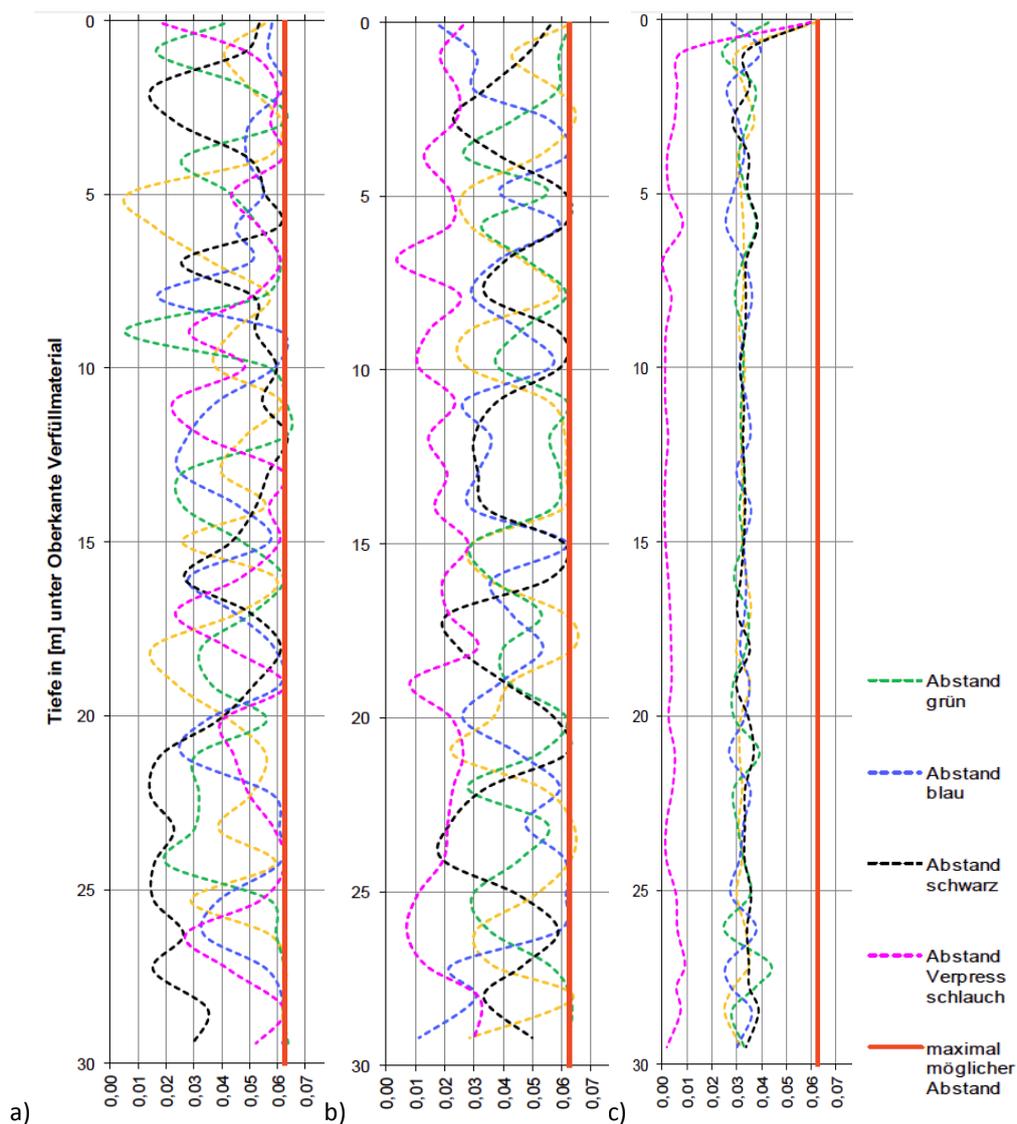


Abb. 8: Abstand der Sonden- und Verpressrohre einer Doppel-U-Sonde vom Bohrlochzentrum in [m]
a) ohne Positionshilfen,
b) mit inneren Abstandshaltern und
c) mit äußeren Zentrierhilfen (Riegger 2013).

Bei dem Einsatz von äußeren Zentrierhilfen ist erkennbar, dass das Verfüllrohr über die ganze Strecke im Bohrlochzentrum gehalten wird. Die maximale Abweichung vom Zentrum beträgt 1 cm. Hierdurch wird im Versuchsaufbau ein kontinuierlicher Ringraum von 20 mm gewährleistet.

Ein Vergleich der durchschnittlichen Sondenrohranordnungen verdeutlicht, dass die gewünschten Effekte (bei Abstandshaltern: Mindestabstand der Sondenrohre unter einander; bei Zentrierhilfen: Zentrierung des Sondenbündels im Bohrloch) nur bei Einsatz der Einbauten in sehr kurzen Abständen von rund 1 m erreicht werden. Nach Riegger (2013), können auch große Bohrlochdurchmesser von knapp 200 mm in Verbindung mit dem Einsatz von Abstandshaltern in Abständen von maximal 5 m eine Beabstandung der Sondenrohre von der Bohrlochwand nicht sicherstellen.

In dem oben genannten Forschungsvorhaben wurde auch die Verfüllqualität und hydraulische Abdichtung von EWS-Bohrungen untersucht. Hierzu wurden in den Ringraum vor dem Verpressvorgang durch luft- oder wassergefüllte Hindernisse künstliche Fehlstellen eingebaut.

Zusätzlich zu den künstlich eingebauten Fehlstellen wurden bei der anschließenden Sichtprüfung auch unbeabsichtigt entstandene so genannte natürliche Fehlstellen aufgenommen.

Das Ergebnis der Untersuchung war, dass die Verfüllqualität in der Mehrzahl der erstellten EWS auf Grund von in der Regel wassergefüllten Fehlstellen unbefriedigend ist. Wegen der zahlreichen Einflussfaktoren war es nicht möglich, die in den EWS festgestellte Verfüllqualität abschließend mit konkreten Einflussfaktoren zu korrelieren (Riegger 2013). Es ließen sich jedoch u. a. die nachfolgenden zwei Tendenzen ableiten:

- 1) Es konnte keine Abhängigkeit der Verfüllqualität vom Bohrlochdurchmesser festgestellt werden.
- 2) Der Einsatz von Einbauten wie Abstandshalter und Zentrierhilfen begünstigt Fehlstellen (insbesondere kleine Fehlstellen), verursacht diese aber nicht zwangsläufig.

Unterstützt wird die Beobachtung von Fehlstellen im Verfüllbaustoff in Verbindung mit Positionierungshilfen durch eine Untersuchung am Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE-Bayern) zur „Abdichtung von EWS-Bohrungen mit Verfüllbaustoffen“ (Kuckelkorn et al. 2010). Ebenso nahm der Illinois State Geological Survey (2004) in seiner Veröffentlichung „The Environmental Effects of Ground-Source Heat Pumps – A Preliminary Overview“ zu Abstandshaltern wie folgt Stellung: „Spacers reduce the amount of grout between the heat conductor pipe and groundwater, thus they appear to pose a higher risk for groundwater contamination.“

5.7 Abdichtung bei Druckpotenzialunterschieden

EMPFEHLUNGEN

Die geohydraulischen Verhältnisse müssen insbesondere im Hinblick auf Druckpotenziale bzw. mögliche Druckpotenzialunterschiede innerhalb der von einer EWS-Bohrung durchteuften Schichtenfolge bekannt sein und hierzu ggfs. erkundet werden. Die Durchführung der Abdichtungsarbeiten ist den zuvor erkundeten geohydraulischen Verhältnissen anzupassen.

BEGRÜNDUNG

Durch die Schaffung vertikaler Wegsamkeiten im Bohrloch kann es zu einer nachteiligen Veränderung des Grundwassers kommen. Dies gilt insbesondere, wenn beim Bau einer EWS verschiedene Grundwasserstockwerke mit unterschiedlichen Druckpotenzialen durchteuft werden. Da dies bei den Bohrarbeiten oft unvorbereitet auftritt, bzw. häufig sogar nicht erkannt wird, besteht die Gefahr, dass die Wiederherstellung der Funktion der die Grundwasserstockwerke trennenden Horizonte bei den Abdichtungsarbeiten durch Strömung im Bohrloch nicht gelingt.

DETAILS

Beim Verfüllvorgang, d.h. bei der Auffüllung und Abdichtung des Ringraumes, können insbesondere bei Stockwerksbau durch die angetroffenen hydraulischen Verhältnisse verschiedene Probleme auftreten:

Vertikalströmungen im Bohrloch entstehen beim Durchbohren von Grundwasserstockwerken mit unterschiedlichen hydraulischen Druckhöhen. Je nach Potenzialverhältnissen können die Strömungen entweder von oben nach unten oder von unten nach oben gerichtet sein. Sie können eine Verdünnung der Verfüllsuspension vor dem Abbinden bis hin zum vollständigen Ausspülen des Verfüllmaterials zur Folge haben. Dies gilt schon bei geringen Strömungen (vgl. Burkhardt 2014). Detaillierte Untersuchungen hierzu sind nicht bekannt. Oft werden Strömungen im Bohrloch nicht bemerkt; sie können aber auch überraschend heftig und unvorbereitet auftreten.

Das Erkennen von unterschiedlichen Druckverhältnissen beim Bohrvorgang und die Vermeidung von Vertikalströmungen im Bohrloch zum vollständigen Wiederherstellen der ursprünglichen Potenzialverhältnisse durch den Verfüllvorgang erfordern eine sorgfältige Planung und eine vorzeitige Information der Bohrfirma über die geologischen / hydrogeologischen Verhältnisse am Standort, soweit bekannt.

Für die Ansprache der Grundwasserverhältnisse und das Erkennen der Druckverhältnisse des Grundwassers bei dem Durchbohren der Trennschichten zweier Grundwasserleiter ist die Wahl des Bohrvorgangs von großer Bedeutung. Bei den Bohrvorgängen, die üblicherweise bei EWS-Bohrungen zur Anwendung kommen, handelt es sich meist um direkte Spülbohrungen (Wasser mit Spülmittelzusätzen bzw. Imlochhammerbohrverfahren mit Luftspülung). Bei der Verwendung von Spülmittelsuspension ist das Bohrloch immer vollständig mit Spülung gefüllt und ein Erkennen von Grundwasserzutritten kaum möglich.

Durch das thixotrope Verhalten der Spülmittelzusätze werden die durchlässigen Bereiche im Lockergestein jedoch „verschlossen“, was Strömungen in den Bohrungen trotz einem Potenzialunterschied zwischen zwei Grundwasserleitern verhindert bzw. einschränkt. Dies bedeutet, dass Bohrungen auch stockwerksübergreifend möglich sind. Für den Fall von Problemen muss durch eine geeignete Gerätetechnik jedoch gewährleistet werden, dass eine Verrohrung bis in den Grundwassergeringleiter mitgenommen werden kann. Dies kann nur simultan erfolgen und erfordert einen Doppelkopf, Doppelrotorkopf oder vergleichbare Systeme (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2012): Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS), Anl. 4).

Bei unverrohrten Imlochhammerbohrungen sind im Festgestein Grundwasserzutritte prinzipiell erkennbar. Der Container, der das Bohrklein aufnimmt, sollte daher neben dem Bohrgerät stehen, so dass die Menge des austretenden Wassers jederzeit erkannt werden kann. In der Praxis kann das Erkennen der Grundwasserzutritte und des hydrogeologischen Baus jedoch erschwert sein.

Beispielsweise kann gespanntes Grundwasser, das durch Spülung oder Druckluft verdrängt wurde, verzögert austreten und so nicht richtig erkannt werden.

Die Bestimmung der Wasserstände und Druckpotenziale ist nach sorgfältiger Planung im Vorfeld mit dem dazu erforderlichen Equipment auf der Bohrstelle durchzuführen und zu dokumentieren, bevor die Verfüllung erfolgt.

Durch das Vorhalten und den Einsatz einer entsprechenden bohrtechnischen Ausrüstung können erkannte Strömungen im Bohrloch „beherrscht“ werden, so dass keine nachteiligen Auswirkungen auftreten.

Bei zu erwartendem Auftreten von sehr großen Druckpotenzialunterschieden ist der Einbau eines Sperrrohres, das Vorhalten geeigneter schwerer Spülungszusätze, der Einbau eines geeigneten Packersystems zum verlässlichen Absperren sowie das Vorhalten eines Preventers erforderlich.

Auch zur Verhinderung hydraulischer Auswirkungen auf die Abdichtung werden an den Verfüllbaustoff hohe Anforderungen gestellt. Dies betrifft neben der stofflichen Zusammensetzung den Aufschluss und die Anmischung des Materials sowie die Materialeigenschaften der Verfüllsuspension (siehe Abschnitte 5.8 bis 5.10). Die Dichte der Verfüllsuspension sollte $0,3 \text{ g/cm}^3$ größer als die eingesetzte Bohrspülung sein, mindestens jedoch $1,3 \text{ g/cm}^3$ betragen (siehe 5.8.4).

5.8 Materialeigenschaften der Verfüllbaustoffe

EMPFEHLUNGEN

Die Verfüllbaustoffe sollten so beschaffen sein, dass die geforderte Systemdurchlässigkeit (siehe 5.2) während der gesamten Lebensdauer gewährleistet ist. Dies beinhaltet auch eine dauerhafte, kraftschlüssige Anbindung des Verfüllbaustoffs an die eingebauten Sondenrohre.

Daher sollten die zur Verfügung stehenden Verfüllbaustoffe entsprechende Eigenschaften aufweisen und Daten, die unter realitätsnahen Bedingungen ermittelt wurden, hierzu verfügbar sein (z. B. Technische Datenblätter, Angaben auf der Produktpackung). Dazu zählen z. B. Plastizität, Quell-/Schwindmaß, Abbindezeit und Materialdurchlässigkeit.

Die Widerstandsfähigkeit gegen äußere Angriffe wie z. B. Sulfat- und Salzwasserangriff und Frost-Tau-Wechsel sollten unter definierten realitätsnahen Prüfbedingungen ermittelt werden.

Um eine Vergleichbarkeit verschiedener Produkte zu gewährleisten, sollten die Prüfverfahren herstellerübergreifend abgestimmt und angewendet werden.

BEGRÜNDUNG

Die verfügbaren, für den Einsatz in der oberflächennahen Geothermie bestimmten zementgebundenen Verfüllbaustoffe sind Mehrkomponentensysteme mit z. T. sehr unterschiedlichen Zusammensetzungen und folglich unterschiedlichen Eigenschaften (siehe Tab. 5). Die in Tab. 5 aufgeführten Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, Durchlässigkeit, Druckfestigkeit etc. sind unter Laborbedingungen ermittelt und stellen somit materialspezifische Werte dar. Versuche von Albrecht & Frank (2010) deuten auf eine starke Zeit- und Temperaturabhängigkeit der Durchlässigkeit und der Druckfestigkeit hin.

Die Angaben zu den Prüfbedingungen vorliegender Prüfberichte sind bisher meist unvollständig. Von den Prüfbedingungen abweichende Wasser-Baustoffmengen oder äußere Einflüsse wie

Wärmeeintrag oder Druckprüfungen während der Hydratation verändern das Hydratationsverhalten. Entsprechend kann die aufgrund des hohen Bentonitanteils und der im Verfüllbaustoff verbleibenden Wasser gefüllten Porenräume bestehende Frost-Tau-Wechsel-Empfindlichkeit variieren.

Angaben zu den unter Baustellenbedingungen zu erwartenden Eigenschaften der Produkte und ihrer Lebensdauer sowie Angaben zu kraftschlüssigen Verbindungen des Verfüllbaustoffs an die EWS fehlen bisher.

Zur Vermeidung der Aufweitung der – bei Einsatz zementgebundener Baustoffe – per se vorhandenen Ringspalten (siehe Abschnitt 4.3) durch Druckprüfungen sollten Nachweise über die Abbindezeit des Produktes und der Druckstabilität gefordert werden. Bis entsprechende Angaben vorliegen, sollte von einer Dauer des Abbindeprozesses von 28 Tagen ausgegangen werden. Für nicht zementgebundene Baustoffe sollte ein Hinweis vom Hersteller gefordert werden, wann bzw. wie lange nach der Verfüllung die Druckprüfung mit welchem Druck erfolgen kann, ohne dass es zu einer mechanischen Störung des Verfüllbaustoffs kommt.

DETAILS

Für die Verfüllung des Ringraums von EWS-Bohrungen kommen Baustoffe in Betracht, die die Wiederherstellung von grundwasserstockwerkstrennenden Schichtkörpern und Sicherstellung des Wärmetransportes vom Erdreich zur EWS sowie spezifische Anforderungen hinsichtlich des Schutzes des Grundwassers und Bodens sowie der Dauerhaftigkeit erfüllen. Die Anforderungen richten sich beispielsweise an die wasserhygienische Unbedenklichkeit des Verfüllbaustoffs, Widerstandsfähigkeit gegenüber aggressiven Grundwässern und Frost-Tau- Wechseln.

Neben zementgebundenen Verfüllbaustoffen sind aus dem Brunnenbau bewährte Verfüllbaustoffe wie Tonpellets aufgrund der Eigenschaft, Wasser fest an die Oberfläche seiner feinsten Körnungen zu binden und bei Durchfeuchtung stark zu quellen grundsätzlich geeignet, eine kraftschlüssige Anbindung an das Sondenrohr zu ermöglichen. Allerdings muss dabei durch spezielle Einbringtechniken das vorzeitige Quellen des Tones, die Brückenbildung an Engstellen und die lückenhafte Abdichtung vermieden werden. Hochquellfähige Tonmineralgemische weisen im Verhältnis zu den zementgebundenen Verfüllbaustoffen eine höhere Dichte, Selbstheilungseffekte durch die langanhaltende Quellfähigkeit, höhere Langlebigkeit, eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen betonaggressive Wässer und keine Setzungen auf (Zorn et al. 2009). Das Material ist frostempfindlich, verändert sein Quellverhalten bei Auftreten von Salzwasser und weist geringe Wärmeleitfähigkeiten auf, sofern diese nicht durch z. B. Graphitbeigaben verbessert wird.

Die handelsüblichen werksfertigen zementgebundenen Verfüllbaustoffe bestehen aus Zement, Bentonit und weiteren Zuschlagsstoffen wie Quarzsand oder Graphit zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit oder Betonverflüssiger zur Reduzierung der Wassergehalte. Die volumetrischen Anteile der Komponenten Zement, Bentonit und Zuschlagstoffe der Fertigverfüllbaustoffe variieren bei den Herstellern und Produkten. Einige Verfüllbaustoffe weisen hohe Zement- und Quarzsandgehalte verbunden mit geringen Bentonitanteilen auf, andere geringe Zement- und hohe Bentonitanteile. Der Bentonit besteht aus verschiedenen Tonmineralen im wesentlichen Montmorillonit und neigt zur starken Wasseraufnahme, die eine Quellung nach sich zieht und damit ein hydraulisches Abdichten der EWS-Bohrung bewirkt. Zement ist der am stärksten vertretene Anteil und gewährleistet als hydraulisches Bindemittel die spätere Druckfestigkeit. Er setzt sich wiederum aus den Bestandteilen Zementklinker, Gips, Anhydrit und eventuell weiteren Zusatzstoffen wie Kalksteinmehl, Hüttensand, Flugasche oder Silicastaub zusammen.

Nachfolgende Tab. 5 zeigt die Bandbreite der Eigenschaften und Beurteilungskriterien derzeit verfügbarer zementgebundener Verfüllbaustoffe zur Abdichtung von EWS-Bohrungen.

Tab. 5: Eigenschaften von Verfüllbaustoffen und Beurteilungskriterien

Eigenschaften und Beurteilungskriterien	Relevanter Parameter für Kontrolle der Eigenschaften	Größenordnung der Parameter bei branchenüblichen Produkten
Qualitätskontrolle für Verarbeitung und Sedimentationseffekte	Absetzmaß (abgesetztes Wasser in Standardzylinder auf Suspensionsoberfläche in definierter Zeit)	Idealwert 0 % bis max. 3 % in 24 h; in der Praxis wird der Wert von 3 % auch überschritten.
Schutz vor Punktbelastungen, Ringspaltbildung und Erosion	Einaxiale Druckfestigkeit nach 28 d (Probekörper unter Laborbedingungen)	Fertigprodukte 2 bis > 11N/mm ²
Erosionsstabilität bei Durchströmung	Erosionsstabilität (Pinhole-Test: Laborversuch an wasserdurchströmter 1 mm starker Bohrung in Prüfkörper)	20 bis 35 l/h nach ÖNORM B 4452 (meist keine Angaben auf Produktblättern)
Filtration an einer porösen Grenzschicht (nur für Lockergesteine relevant)	Filtratwasserabgabe (Wassermenge aus Filterpresse bei 7,5 bar und 7,5 Minuten; DIN 4126)	< 130 ml
Bestimmung der Fließfähigkeit und des Sedimentationsverhalten	Fließgrenze (Bestimmung mittels Kugelharfe; Laborversuch)	10 bis 70 N/mm ²
Frost-Tau-Wechselwiderstandsfähigkeit	Frost-Tau-Wechselwiderstandsfähigkeit; versch. Testverfahren (DIN 52104-1, DIN CEN/TS 12390-9)	Angaben variieren in Abhängigkeit der Testverfahren
Kontrolle der Fließ- und Pumpfähigkeit der Suspension	Marsh-Zeiten (Auslaufzeit bestimmt im Marsh-Trichter für 1l Suspension; DIN 4126)	30 bis 150 s
Umweltverträglichkeit	pH-Wert, EOX, Cyanid, BTEX, LHKW, PAK, Königswasser-aufschluss nach Prüfplänen LAGA-Boden, BBSchG, TVO, etc.	pH-Wert stofflich bedingt erhöht, sonst überwiegend nach LAGA, BBSCHG, TVO unbedenklich
Qualitätskontrolle für Verarbeitung	Suspensionsdichte (Messung z. B. mit Spülungswaage)	1,3 bis 1,9 kg/l
Verarbeitbarkeit	Verschleiß der Verpresspumpe	Abhängig von Quarzgehalt und Korngröße in Suspension
Gute Wärmeübertragung zwischen Gebirge und EWS	Wärmeleitfähigkeit des Materials	0,8 bis 3,0 W/(m*K)
Verarbeitung	Wasser/ Feststoff-Wert	0,2 bis 1,0
Hydraulische Abdichtung	Wasserdurchlässigkeit des Baustoffes k _f -Wert nach 28d	10 ⁻⁹ bis 10 ⁻¹⁰ m/s
Sulfat-Widerstandsfähigkeit		k. A. bis sulfatbeständig
CO ₂ -Widerstandsfähigkeit		Meist k. A.

Der chemische Prozess, welcher hinter der Festigkeits- und Porositätsentwicklung zementbasierter Verfüllbaustoffe steht, ist die sowohl temperatur- als auch zeitabhängige Hydratation (Adam 2006). Die Zugabe von Gips und Anhydrit zum Zement und die Mahlfineinheit und Menge des Zementklinkers ist für den Hydratationsablauf bestimmend. Nach der Zugabe von Wasser zum Verfüllbaustoff setzt die Zementhydratation ein. Der Hydratationsprozess gliedert sich nach Locher et al. (1976), Taylor (1992) und Herrmann (2008) in mehrere Phasen. Während der ersten Minuten nach Wasserzugabe beginnt die Hydratation mit dem Lösen von Calcium- und Sulfationen und mit der Bildung erster kleiner Kristallpartikel (Calciumhydroxid und Ettringit) um die Zementklinkerpartikel.

Nach 30 Minuten bis 2 Stunden erfolgt die Bildung dünner Lagen von Hydratationsprodukten auf den Klinkerpartikeln. Der entstehende schwach erstarrte Zementleim besteht aus kleinen verfestigten Partikeln und einem leimartigen Gel im Zwischenraum der Partikel. Nach 2 bis 8 Stunden setzt die intensive Phase der Hydratation der Klinkerphase ein. Es findet eine lockere Verzahnung und Aufbau eines faserigen, blättrigen Kristallgefüges statt. Nach 8 Stunden nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit ab und geht nach ca. 24 Stunden in eine stetige Phase des Kristallwachstums in den Porenraum hinein über. Diese Phase kann bis zu 28 Tage und teilweise auch länger dauern.

Entscheidend für die Zusammensetzung der sich ausbildenden Hydrate ist die zugegebene Wassermenge im Verhältnis zur Zementmenge, der Wasserzementwert w/z . Während der Hydratation des Zements dringen die Hydratationsprodukte in die wassergefüllten Zwischenräume vor. Ist der Wasser/Zement-Wert (w/z) niedrig (z. B. 0,2) wird der sehr kleine Zwischenraum vollständig mit Zementgel ausgefüllt, bevor der Zement vollständig hydratisiert ist. Bei einem w/z -Wert von 0,6 verbleiben auch nach vollständiger Hydratation noch Teile des ursprünglich mit Wasser gefüllten Zwischenraums in Form von Kapillarporen.

Diese – je nach w/z -Wert – unterschiedlich großen Porenteile, die durch das nicht für die Hydratation gebrauchte „Überschusswasser“ eingenommen werden, sind ab einem w/z -Wert $> ca. 0,4$ ein unvermeidbarer Bestandteil des Zementsteingefüges. Ihr Anteil wächst sehr stark mit zunehmendem w/z -Wert.

Zusätzlich kommt es während der Hydratationsphase zur Freisetzung von Wärme. Je schneller die Hydratation stattfindet, desto mehr Energie wird in kürzerer Zeit freigesetzt. Je langsamer die Reaktion abläuft, desto geringere Zwangsspannungen entstehen im Körper. Dies verringert das Risiko der Bildung von Rissstrukturen (Anbergen 2015). Für Verfüllbaustoffe eignen sich daher besonders langsam hydratisierende Zemente, mit geringen Schwindmaßen. Angaben hierzu finden sich in den jeweiligen Produktblättern nicht.

Angaben zur Haltbarkeit liegen für die einzelnen Produkte nicht vor. Es wird meist davon ausgegangen, dass zementgebundene Baustoffe in der Regel auf eine Haltbarkeit von 50 Jahren ausgelegt sind.

5.8.1. Thermischer Ausdehnungskoeffizient

EMPFEHLUNGEN

Der thermische Ausdehnungskoeffizient des in einer Bohrung eingesetzten Verfüllbaustoffs sollte dem in der gleichen Bohrung eingesetzten Sondenmaterial (siehe 5.14) dahingehend entsprechen, dass Temperaturänderungen von Sondenmaterial und Verfüllbaustoff nicht zur Vergrößerung des Ringspalts führen.

BEGRÜNDUNG

Allan & Philippacopoulos (2000) haben die Systemdurchlässigkeiten bei unterschiedlichen Temperaturniveaus untersucht. Eingesetzt wurden dabei zementgebundene Verfüllmaterialien mit unterschiedlicher Zusammensetzung und Plastizität. Bei 1 °C ergaben die Messungen eine um den Faktor 10 erhöhte Durchlässigkeit als bei 21 °C (vgl. Abschnitt 4.3 bzw. Abb. 3). Ursächlich für diesen

Zusammenhang sind nach Ansicht der Autoren unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten von Sondenmaterial und Verfüllbaustoff.

5.8.2. Frost-Tau-Wechsel-Widerstand der Verfüllbaustoffe

EMPFEHLUNGEN

Material, das für den Betrieb einer EWS im Frostbereich (Wärmeträgermittel $< 0\text{ °C}$) eingesetzt werden soll, muss eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel aufweisen. Die Widerstandsfähigkeit ist in einem Versuchsaufbau entsprechend VDI 4640 Blatt 2 (2015, Entwurf) zu überprüfen. Hiernach darf die Veränderung der Durchlässigkeit nach 6 Frost-Tau-Wechseln gegenüber dem Wert der ungefrostenen Probe im Prüfapparat nur eine Zehnerpotenz betragen.

BEGRÜNDUNG

Beim Absinken der Vorlauftemperatur des Wärmeträgermittels einer EWS-Anlage kommt es zu einer zunehmenden Abkühlung des Verfüllbaustoffs im Ringraum. Sinkt die Temperatur des Wärmeträgermittels für einen längeren Zeitraum unter den Gefrierpunkt ($< 0\text{ °C}$) können auch im Verfüllbaustoff und ggfs. sogar im Gebirge Temperaturen $< 0\text{ °C}$ auftreten.

Bei EWS-Anlagen, die mittels der in der VDI-Richtlinie 4640-2 (2001) aufgeführten spezifischen Entzugsleistungen geplant sind, ist hierbei grundsätzlich von einem zeitweiligen Absinken der Wärmeträgermittel-Temperatur unter 0 °C zu rechnen (siehe Abb. 9).

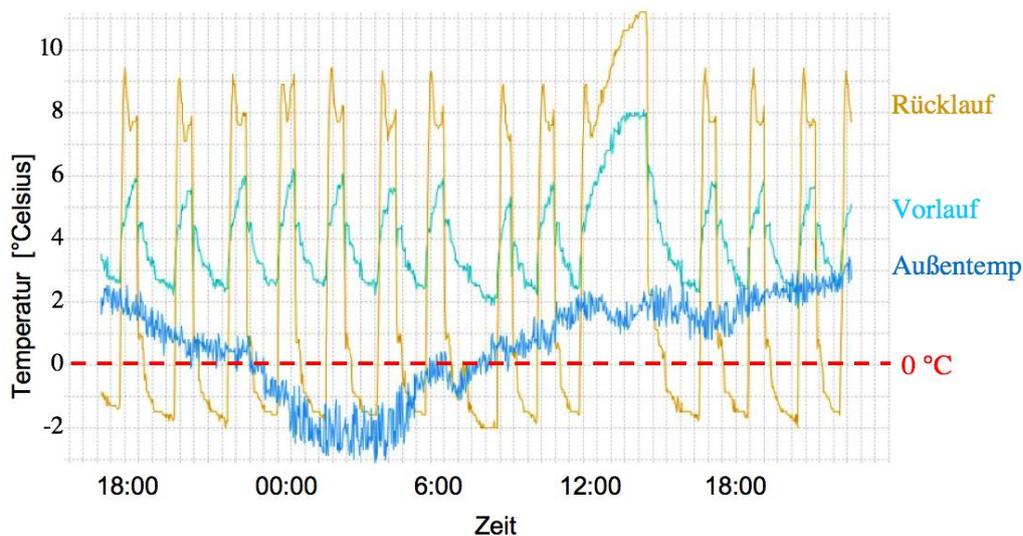


Abb. 9: Typisches Temperatur-Log einer Wärmepumpenanlage eines einzelnen Tages im Monat Februar (Wenzel 2012)

DETAILS

Bei unterdimensionierten EWS-Anlagen kann es zu deutlichen Temperaturabsenkungen unter den Gefrierpunkt kommen. Dabei ist die Temperatur des Wärmeträgers nicht überall gleich (z. B. Huber 2010). Der Grad der Durchfrostung des Ringraums hängt somit wesentlich von der Dauer und dem erreichten Minimaltemperatur und der erreichten Minusgrade des Wärmeträgermittels, von der Konfiguration der Sondenrohre, der relativen Tiefenlage innerhalb des Bohrloches und der Dauer der Frosteinwirkung ab.

Da mit dem Phasenübergang von Wasser zu Eis eine Volumenausdehnung von 9% verbunden ist, führt diese Gefrierdehnung zu Strukturschädigungen innerhalb der betreffenden wasserhaltigen Materialien. Die Frostbeeinflussung kann sowohl den (zementgebundenen) Verfüllbaustoff als auch das anstehende Erdreich betreffen. Nach dem Auftauen bestehen die Strukturschädigungen in der Regel fort und bieten vertikale Wegsamkeiten für das Grundwasser (s. Abb. 10).

Prozesse durch den Frost-Tau-Wechsel

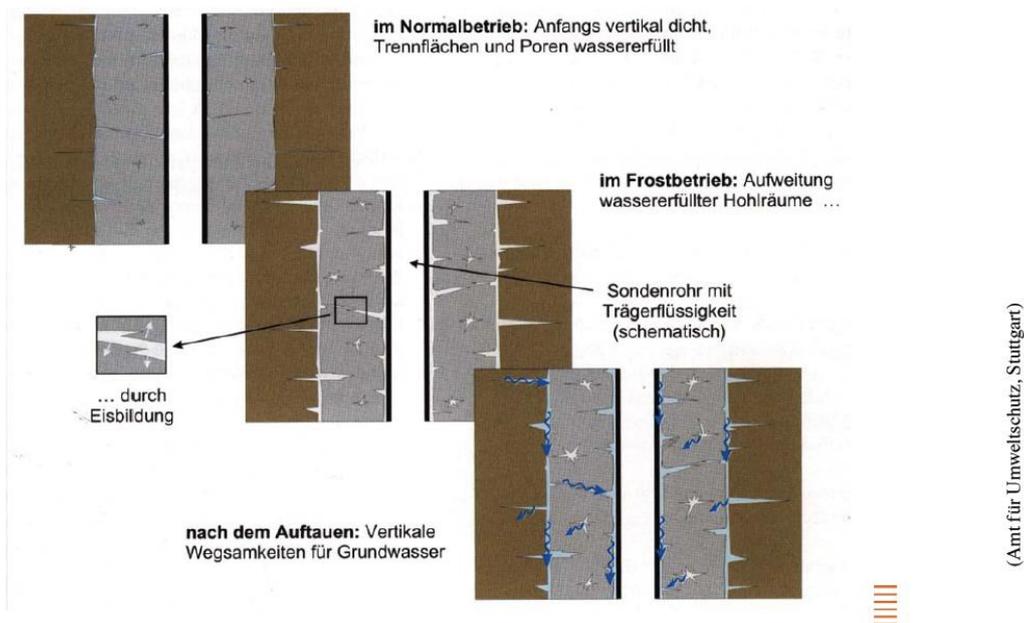


Abb.10: Wasserwegsamkeiten für Grundwasser durch Frosteinwirkungen (Amt für Umweltschutz Stuttgart 2005)

Die Verfüllbaustoffe, die in EWS-Bohrungen Verwendung finden, sind Mehrkomponentensysteme. Sie unterscheiden sich zum Teil deutlich in ihrer Zusammensetzung und somit in ihren Eigenschaften. Zement ist der am stärksten vertretene Anteil und gewährleistet als hydraulisches Bindemittel die spätere Druckfestigkeit. Der chemische Prozess, welcher hinter der Festigkeits- und Porositätsentwicklung zementbasierter Verfüllbaustoffe steht, ist die Hydratation.

Dem Schädigungsmechanismus von zementgebundenem Verfüllbaustoff bei Frosteinwirkung liegen verschiedene Effekte zugrunde, die auf makroskopischer ($> 1 \text{ mm}$), mikroskopischer ($1 \cdot 10^{-7} \text{ m} - 1 \text{ mm}$) und nanoskopischer ($< 1 \cdot 10^{-7} \text{ m}$) Ebene der Porengröße wirken (nach Herrmann 2008 und Bast 2009). Neben der Komponente Zement sind in der Regel noch Tonminerale (z. B. Bentonit) und Kalkmehl beigefügt. Die Tonminerale können bei unsachgemäßer Herstellung der Suspension zur Abgabe von freiem Wasser führen, welches die in Abb. 10 dargestellten unerwünschten Prozesse begünstigt.

Auswirkungen von Frost auf die Durchlässigkeit von Verfüllbaustoffen

Ergebnisse von verschiedenen Labor- und Feldmessungen werden im Folgenden zusammengefasst:

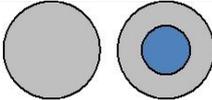
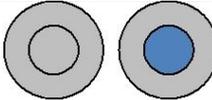
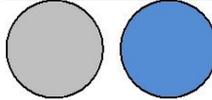
Gemäß makroskopischer Analysen zeigen sich bereits nach wenigen Frost-Tau-Wechsel-Belastungen die Entstehung von kleinen Rissen oder geringen Abplatzungen bis zu größeren Massenverlusten unter extremen Bedingungen und Belastungen (Herrmann 2008, Müller 2009, Niederbrucker &

Steinbacher 2008a, Anbergen et al. 2011 etc.). Kuckelkorn & Reuß (2013) konnten ebenfalls feststellen, dass bei den Gefrierzyklen die erste thermische Belastung zur größten Erhöhung der Systemdurchlässigkeit führen. Daneben führte die Frost-Tau-Wechsel-Belastung zur Abnahme der einaxialen Druckfestigkeit sowie der Wärmeleitfähigkeit. Diese Veränderungen können auf eine Veränderung der Gefügestruktur durch Mikrorisse zurückgeführt werden (Niederbrucker & Steinbacher 2008a). Der Zeitpunkt, ab dem die Frost-Tau-Wechsel-Belastungen stattfinden, spielt dabei eine große Rolle. So konnte anhand von Versuchen vor der Durchführung von Frost-Tau-Wechsel-Untersuchung (Albrecht & Frank 2010) festgestellt werden, dass während des Abbindeprozesses die einaxiale Druckfestigkeit zunimmt und die Wasserdurchlässigkeit abnimmt. Die resultierende Durchlässigkeit entsprechender Proben ist umso kleiner, je später der erste Frost-Tau-Wechsel eintritt. Ergebnisse eines Großversuchstandes am ZAE Bayern (Kuckelkorn & Reuß 2013) zeigen, dass eine tatsächliche Eisbildung im Verfüllbaustoff erst auftrat, als dort Temperaturen unter etwa $-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ beobachtet wurden.

Bei Frostbeanspruchung können die Porengrößen um einen Faktor von bis zu einer Zehnerpotenz zunehmen (Herrmann 2008). Aufgrund der unterschiedlichen Rezepturen der Verfüllbaustoffe ist dabei mit unterschiedlichen Porengrößen- und Porenverteilungen zu rechnen.

In den letzten Jahren sind aufgrund der bekannten Frost-Tau-Wechsel-Problematik unterschiedliche Labor- und Feldexperimente durchgeführt worden, die zu den in Tab. 6 zusammengefassten Ergebnissen kamen (kein Anspruch auf Vollständigkeit). Bzgl. der Frage der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf EWS-Bohrungen siehe 5.4.

Tab. 6: Vergleich der Durchlässigkeiten unbefrosterter und befrosterter Proben / Systeme

Quelle	Anzahl FTW-Zyklen	Erhöhung der Durchlässigkeit (hier k_f -Wert) nach Frost-Tau-Wechsel-Belastung		
				
		Material (unbefroster) zu System (befroster)	System (unbefroster) zu System (befroster)	Material (unbefroster) zu Material (befroster)
Anbergen et al. 2013	6	3 - 4 Zehnerpotenzen	0,5 - 3 Zehnerpotenzen	
Kuckelkorn & Reuß 2013	11	2,3 - 3 Zehnerpotenzen	0,5 - 1 Zehnerpotenzen	
Herrmann 2008	4			1 Zehnerpotenz

Anhand der oben aufgezeigten Ergebnisse im Labormaßstab und Technikumsversuchsstand wird deutlich, dass das System EWS höhere Durchlässigkeiten als das Verfüllmaterial an sich aufweist, welches bei Frost-Tau-Wechsel-Belastung weiter erhöht wird.

Auswirkungen von Frost auf Boden/Erdreich

Wie in Abschnitt 5.6 beschrieben, liegen die Sondenrohre in der Regel korkenzieherartig im Bohrloch; eine direkte Berührung der EWS mit dem umgebenden Gebirge ist nicht auszuschließen. Hier kann ein Frost-Tau-Wechsel-Betrieb auch unmittelbar auf die anstehenden Gesteine einwirken.

Frostwirkungen im Locker-/Festgestein verursachen irreversible Änderungen der Gesteinseigenschaften, z. B. der Verteilung des Wassergehaltes und der Struktur (Rissbildungen, geringere Scherfestigkeiten u. a.). Das Auftauen führt durch das Schmelzen des Eises, verbunden mit einer Volumenkontraktion zu Setzungen und verursacht damit die Umkehrung der beim Gefrieren aufgetretenen Volumenausdehnung (Frosthebung). Kommt es zu einer zyklischen Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung, verändern sich infolgedessen nahezu alle mechanischen Eigenschaften des Untergrundes. Es ergeben sich Änderungen im Porenraum und im Wassergehalt sowie bezüglich der Dichte und der Scherfestigkeit (Herrmann 2008).

5.8.3. Chemischer Widerstand

EMPFEHLUNG

Der Baustoff muss seine dichtenden Eigenschaften (siehe 5.2) bei chemischem Angriff behalten.

Es wird empfohlen ausschließlich Sulfat-widerstandsfähige Verfüllbaustoffe zu zulassen, wenn ein Sulfatangriff aufgrund vorhandener oder im Zusammenhang mit der Errichtung der EWS erhobener Daten nicht sicher ausgeschlossen werden kann.

Tab. 7: Grenzwerte für die Expositionsclassen bei chemischem Angriff durch natürliche Böden und Grundwasser ^{1), 2)} (Verein Deutscher Zementwerke e.V. 2014)

Chemisches Merkmal	XA1 (schwach angreifend)	XA2 (mäßig angreifend)	XA3 (stark angreifend)
Grundwasser			
pH-Wert	6,5...5,5	< 5,5...4,5	< 4,5 und ≥ 4,0
kalklösende Kohlensäure (CO ₂) [mg/l]	15...40	> 40...100	> 100 bis zur Sättigung
Ammonium ³⁾ (NH ₄ ⁺) [mg/l]	15...30	> 30...60	> 60...100
Magnesium (Mg ²⁺) [mg/l]	300...1 000	> 1 000...3 000	> 3 000 bis zur Sättigung
Sulfat ⁴⁾ (SO ₄ ²⁻) [mg/l]	200...600	> 600...3 000	> 3 000 und ≤ 6 000
Boden			
Sulfat ⁵⁾ (SO ₄ ²⁻) [mg/kg] insgesamt	2 000...3 000 ⁶⁾	> 3 000 ⁶⁾ ...12 000	> 12 000 und ≤ 24 000
Säuregrad	> 200 Bauman-Gully	in der Praxis nicht anzutreffen	

¹⁾ Werte gültig für Wassertemperatur zwischen 5 °C und 25 °C sowie bei sehr geringer Fließgeschwindigkeit (näherungsweise wie für hydrostatische Bedingungen)

²⁾ Der schärfste Wert für jedes einzelne Merkmal ist maßgebend. Liegen zwei oder mehrere angreifende Merkmale in derselben Klasse, davon mindestens eines im oberen Viertel (bei pH im unteren Viertel), ist die Umgebung der nächsthöheren Klasse zuzuordnen. Ausnahme: Nachweis über eine spezielle Studie, dass dies nicht erforderlich ist.

³⁾ Gülle darf, unabhängig vom NH₄⁺-Gehalt, in Expositionsklasse XA1 eingeordnet werden.

⁴⁾ Sulfatgehalte oberhalb 600 mg/l sind im Rahmen der Festlegung des Betons anzugeben. Bei chemischen Angriffen durch Sulfat (ausgenommen bei Meerwasser) für Expositionsklasse XA2 und XA3 Zement mit hohem Sulfatwiderstand (HS-Zement) erforderlich. Für SO₄²⁻ ≤ 1 500 mg/l anstelle HS-Zement eine Mischung aus Zement und Flugasche zulässig.

⁵⁾ Tonböden mit einer Durchlässigkeit ≤ 10⁻⁶ m/s dürfen in eine niedrigere Klasse eingestuft werden.

⁶⁾ Falls die Gefahr der Anhäufung von Sulfationen im Boden – zurückzuführen auf wechselndes Trocknen und Durchfeuchten oder kapillares Saugen – besteht, ist der Grenzwert von 3 000 mg/kg auf 2 000 mg/kg zu vermindern.

Sind betonaggressive Inhaltsstoffe im Grundwasser zu erwarten, die die Werte der Expositionsklasse XA3 gemäß Tab. 7 erreichen, sollte auf Grundlage einer vor Ort entnommenen Wasseranalyse die Widerstandsfähigkeit des anzuwendenden Verfüllbaustoffs durch den Antragsteller oder dessen Planer nachgewiesen werden.

BEGRÜNDUNG

Die Schädigungsmechanismen in und an Verfüllbaustoffen sind in Verbindung mit Transportvorgängen zu sehen. Dabei werden die Transportvorgänge vom Porennetzwerk im Verfüllbaustoff, durch

die Transportmechanismen wie Diffusion und kapillares Saugen und durch die Wechselwirkung zwischen den im Grundwasser gelösten Stoffen (zugleich Reaktionspartner und Reaktionsmedium) und dem Verfüllbaustoff bestimmt. Den entscheidenden Anteil am Transport im Verfüllbaustoff haben die untereinander verbundenen Kapillarporen.

Entscheidende Prozesse, die die Durchlässigkeit bzw. Stabilität des Verfüllbaustoffs negativ beeinflussen sind (a) lösender und sprengender Angriff auf den Zementanteil und (b) abnehmende Quellfähigkeit des Bentonits.

Als Ursache für Eigenschaftsänderungen des Verfüllbaustoffs kommt in der Regel Grundwasser in Frage, das eine ungünstige chemische Zusammensetzung aufweisen kann. Andererseits besteht aber auch die Möglichkeit, dass über bereits bestehende Undichtigkeiten im Ringraum Wasser in den Bereich von z. B. sulfathaltigen Gesteinen (z. B. in Staufen, Baden-Württemberg und Halberstadt, Sachsen-Anhalt) gelangt, sich dort aufkonzentriert und dann u. a. ein Angriff auf den Verfüllbaustoff stattfindet.

(a) Lösender und treibender Angriff auf den Zementanteil

Lösender Angriff durch kalklösende Kohlensäure

Aus zementgebundenen Verfüllbaustoffen können im Kontakt mit Wässern, die kalklösende Kohlensäure enthalten, Calciumverbindungen herausgelöst werden. Beim Zersetzungsvorgang wird das schwerlösliche Kalziumkarbonat (Kalk) in leicht lösliches Kalziumhydrogenkarbonat umgewandelt, welches nur in wässriger Lösung existiert. Die Zersetzung schreitet von der Randzone ins Innere des Baustoffs ein. Als Reaktionsprodukt des Angriffs bleibt ein amorphes Silikat-Gel auf der Oberfläche zurück, welches als Diffusionsbarriere die Diffusion im weiteren Verlauf reduziert (Schwotzer 2008).

Wie schnell zementgebundene Verfüllbaustoffe auf den lösenden Angriff von Kohlensäure reagieren, hängt sowohl von den in den Grundwässern gelösten Inhaltsstoffen als auch von Zementart und dem Wasser-Zement-Wert ab. Entscheidend ist der Anteil von Kalkstein bzw. säurebeständigem Zuschlag. Bei einem höheren Wasser-Zement-Wert, wie insbesondere bei Verfüllbaustoffen für EWS vorhanden, kann ein stärkerer Angriff erfolgen.

Lösender Angriff durch austauschfähige Salze

Zu den austauschfähigen Salzen, die in chemisch angreifenden Wässern gelegentlich vorkommen, gehören vor allem Magnesium- und Ammoniumsalze. Magnesium- und Ammoniumchlorid greifen Beton an, indem sie mit dem Kalkhydrat des Zementsteins leicht lösliche Chloride bilden. Gelöstes Magnesium scheidet sich im basischen Betonbereich als Brucit ab und bildet eine den weiteren Angriff hemmende Schicht (Thienel 2008). Chloride können mit den Calciumaluminathydrat- und Calciumaluminatsulfathydratphasen des Zementsteins nahezu wasserunlösliches Friedel'sches Salz bzw. Sulfatchloridmonophase, ein 1:1-Salz aus Friedel'schem Salz und Monosulfat bilden. Erst wenn die Aluminiumverbindungen im Zementstein einen Teil des von außen zugeführten Chlorids gebunden haben, liegt im Beton weiteres Chlorid als freies und damit korrosionsauslösendes Chlorid vor (Thienel 2008).

Durch die Kombination verschiedener als betonaggressiv eingeschätzter chemischer Inhaltsstoffe in Wasser kann sich die Wirkung abschwächen. So zeigen Erfahrungen und Auslagerungsversuche von Betonen in Meerwasser (rel. hohe Magnesium- und Sulfatgehalte), dass der hohe Chloridgehalt des

Meerwassers den Sulfatangriff hemmen kann, denn die Chloride binden einen Teil der zum Sulfatreiben notwendigen Aluminate durch Bildung von Friedel'schem Salz.

Treibender Angriff durch Sulfat

Grundwässer können eine hohe geogene Sulfatkonzentration aufweisen. Bei nicht qualitätsgerechter Ausführung der Bohrung oder Verfüllung können Grundwässer aus ober- oder unterhalb von Sulfatgesteinen liegenden Gesteinsschichten in Kontakt mit den sulfathaltigen Gesteinen treten und dort eine Aufkonzentration mit Sulfat erfahren, welches wiederum auf den Verfüllbaustoff wirken kann. Zum anderen sind aber bei Kontakt mit Wasser Umwandlungsprozesse in den Sulfatschichten selbst möglich (Gipsverkarstung = Substanzverlust und Vergipsung von Anhydrit = Volumenvergrößerung). Bekanntestes Beispiel dafür sind die Prozesse, welche in Stufen zur Hebung des Stadtzentrums geführt haben.

Nachfolgend wird auf die Prozesse eingegangen, die bei Kontakt von sulfatreichen Grundwässern mit dem Verfüllbaustoff ablaufen können.

Nach Müllauer (2013) wird ein von außen wirkender Sulfatangriff nach seiner Erscheinungsform und seinen Mechanismen in zwei Arten unterteilt:

- a) treibender Sulfatangriff durch Ettringit und/oder Gips
(im englischen auch als ESA (**E**ttringite **S**ulfate **A**ttack bezeichnet)
- b) Sulfatangriff durch Thaumasit
(im englischen auch als TSA (**T**haumasite **S**ulfate **A**ttack bezeichnet)

Wirken auf Verfüllbaustoffe sulfathaltige Lösungen, bildet sich der sehr kristallwasserreiche Ettringit und bei hohen Sulfatkonzentrationen auch Gips. Dabei kommt es zu Volumenvergrößerungen, die zum Sulfatreiben bzw. Gipstreiben mit Dehnung und Rissbildung führen. Auch in den Rissen bilden sich Ettringitkristalle, die durch ihr Wachstum weiter in den Baustoff eindringen und die Zerstörung fortsetzen. Im ungünstigsten Fall tritt ein vollständiger Gefüge- und Festigkeitsverlust auf (Neumann & Rasch 2015). Daneben wird bei hohen Sulfatkonzentrationen bevorzugt bei niedrigen Temperaturen (< 15 °C) und in Gegenwart von Karbonaten Thaumasit gebildet (Schwotzer 2008). Bei Untersuchungen in Suspensionen ließ sich der Trend zu bevorzugter Thaumasitbildung bei Temperaturen von 5 °C erkennen (Köhler 2005). Dies ist bei der Betrachtung der chemischen Widerstandsfähigkeit von Verfüllbaustoffen für EWS von besonderer Bedeutung. Es wird von einem „lösenden“ Angriff gesprochen, weil die festigkeitsbildenden C-S-H-Phasen (Carbonat-Sulfat-Hydrat) angegriffen werden und es zu einer Entfestigung des Gefüges kommt. Dabei bleibt ein weißes, kohäsionsloses Pulver, das im feuchtem Zustand pastös ist, zurück (Bauer et al. 2004). Eine Volumenzunahme kann bei dieser Reaktion nicht erwartet werden. Bisher fehlen nach Neumann & Rasch (2012) die Möglichkeiten, eine Thaumasitbildung durch sulfathaltige Grundwässer sicher auszuschließen.

Grundvoraussetzung für die Bildung von Ettringit ist das Vorhandensein von reaktiven Aluminiumverbindungen. Zur Vermeidung einer schädigenden Ettringitbildung wird daher in zahlreichen nationalen und internationalen Normen und Richtlinien ein maximal erlaubter C₃A-(Tricalciumaluminat) Gehalt für Zement mit erhöhtem Sulfatwiderstand vorgeschrieben.

In vielen Forschungsarbeiten zeigte sich, dass neben dem C₃A-Gehalt auch andere Faktoren den Sulfatwiderstand deutlich beeinflussen können. So wurde in mehreren Untersuchungen beobachtet, dass auch Zemente mit einem niedrigen C₃A-Gehalt bei Langzeitprüfungen oder in der Praxis die

Kriterien für den Sulfatwiderstand nicht erfüllen können. Speziell im Hinblick auf eine schädigende Thaumasitbildung oder in Anwesenheit von Mg-Ionen kann es auch bei Zementen, die nach aktuellen Normen und Richtlinien einen erhöhten Sulfatwiderstand aufweisen, in Abhängigkeit von den Lagerungsbedingungen zu einer Schädigung kommen (Müllauer 2013). Untersuchungen durch Bellmann (2011) ergaben zudem, dass sich die untersuchten Bindemittel als besonders anfällig gegenüber einer Schädigung durch die Bildung von Thaumasit erweisen, wenn der Angriff nicht durch Sulfationen, sondern durch die Anwesenheit des Minerals Gips erfolgt.

Nur bei den wenigsten Prüfverfahren wird die Thaumasitbildung berücksichtigt. So können z. B. Bindemittel bei einer Prüfung bei 20 °C bestehen, bei niedrigeren Temperaturen jedoch versagen sie innerhalb weniger Wochen oder Monate. Bei den meisten Prüfverfahren ist die Dehnung das entscheidende Kriterium. Die Bildung von Thaumasit ist aber nicht zwangsweise mit einer Dehnung verbunden und wird mit vielen Prüfverfahren daher nicht erfasst. All diese Unterschiede führen dazu, dass es in Europa bis heute kein genormtes Prüfverfahren für den Sulfatwiderstand von Beton gibt (Müllauer 2013).

Einige Hersteller von Verfüllbaustoffen führen eigene Versuche zum Nachweis der Widerstandsfähigkeit durch. So wird bei einem Hersteller beispielsweise unter Laborbedingung 28 Tage lang das Fließ-, Abbinde- und Erhärungsverhalten des Verfüllbaustoffs im Grundwasser mit einem Sulfatgehalt von 700 mg/l und kalklösendem CO₂ von 130 mg/l geprüft. „Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass das anstehende Grundwasser keine Beeinträchtigung der Eigenschaften des Verpressmörtels im frischen als auch im abgebundenen Zustand zu bewirken scheint. Eine endgültige Aussage zur Dauerhaftigkeit über die 28 Tage hinaus können nur Langzeitversuche ermöglichen“ (siehe z. B. www.terra-calidus.de⁸).

Einige Hersteller weisen die Eignung bei Kontakt mit hohen Salzgehalten nach, oft ist dieser Nachweis aber lediglich an einzelne Eigenschaften gebunden, wie z. B. Pumpbarkeit der Suspension. Bei einem Hersteller heißt es: „Klärung des Einflusses des anstehenden Grundwassers auf das Fließ-, Abbinde- und Erhärungsverhalten des Verpressbaustoffs ...“. Das Langzeitverhalten des Baustoffes wird mit diesem Versuch nicht geklärt.

b) Veränderung des Quellverhaltens von Tonen bei Zutritt hochkonzentrierter Salzlösungen

In der Regel enthalten Verfüllbaustoffe Tonkomponenten zur Aussteuerung der Rheologie und zur Sicherstellung der Suspensionstabilität. Durch anziehende Wechselwirkungen zwischen den Tonpartikeln kommt es in der ruhenden Baustoffsuspension zur Ausbildung von Gerüststrukturen, in die die Bindemittel eingebettet und so in Schwebe gehalten werden. Enthält die Tonkomponente des Verfüllbaustoffs quellfähige Tonminerale wie z. B. Natrium-Bentonit, so werden die Calciumionen von zementbasierten Bindemitteln in die Schichtzwischenräume der Tonkristalle eingelagert (Dietrich et al. 2007).

Untersuchungen zum Wechselverhalten von Tonen mit hoher Quellfähigkeit und Wasseradsorption in Verbindung mit hochkonzentrierten Salzlösungen wurden vor allem im Rahmen der Endlagerforschung durchgeführt (Sitz 1997) sowie an verschiedenen Baustoffen des Brunnenbaus.

⁸ Abfrage 29.06.2015

www.terra-calidus.de/media/produkte/verpressmittel/pdf/Stellungnahme%20kalkloesende%20Kohlensaure.pdf

Problematisch stellt sich insbesondere der Einfluss auf das Quellvermögen der Tone dar. Durch die Verdichtung der elektrochemischen Doppelschicht und durch die geringere Wasseraktivität in hochkonzentrierten Salzlösungen erfolgt eine Abnahme der innerkristallinen Wasseraufnahmefähigkeit von Tonen, was zu einer Abnahme der innerkristallinen Quellfähigkeit führen kann. Die Quelldrücke, die sich bei Zutritt von Salzlösungen entwickeln, werden daher im Vergleich zum Wasserzutritt bei sonst gleichen Bedingungen niedriger sein. Untersuchungen zum Durchlässigkeitsverhalten von Quillon WP in Salzwasser ergaben, dass nach Aktivierung des Quillons durch salzhaltiges Wasser mit 15 g und 30 g NaCl der Verlust der Quelleigenschaften eintrat und sich die Durchlässigkeit um bis zu sechs Zehnerpotenzen vergrößerte (Kayser 1993). Im Ergebnis wurde festgestellt, dass bis zu einer Grenzkonzentration von NaCl = 10 g/l ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f \leq 1^{-10}$ m/s zu erwarten ist. Die rapide Zunahme der Durchlässigkeit bei Kontakt von Bentonit mit Salzwässern (NaCl, MgCl₂) mit Konzentrationen > 10 g/l wird auch in anderen Untersuchungen bestätigt.

Nach Hofmann (2003) tendieren experimentell untersuchte Bentonite trotz der chemischen Stabilität während des Kontaktes mit Salzlösung zur Bildung sandkornartiger Aggregate und einer damit verbundenen Erhöhung der Permeabilität. Inwiefern diese Ergebnisse auf die in innerhalb des Verfüllbaustoffes eingelagerten Tonanteile übertragbar ist, ist unklar.

5.8.4. Dichte der Verfüllsuspension

EMPFEHLUNGEN

Die Dichte der Verfüllsuspension sollte 0,3 g/cm³ größer als die eingesetzte Bohrspülung sein, mindestens jedoch 1,3 g/cm³ betragen.

BEGRÜNDUNG

Um nach Beendigung der Bohrarbeiten eventuell im Bohrlochringraum verbliebene Bohrspülung ohne Mischzonen zu verdrängen, muss die Suspensionsdichte der verwendeten Suspension mindestens 1,3 g/cm³ betragen, in jedem Fall größer als die Dichte der Bohrspülung (VDI 4640-2, Entwurf 2015).

DETAILS

In einzelnen Bundesländern wird ein Wert von mindestens 1,5 g/cm³ gefordert. Bei erkannten Wasserzutritten werden zu deren Verdrängung Suspensionen mit höheren Dichten von bis zu 2,3 g/cm³ eingesetzt.

5.9 Herstellen (Anmischen) der Verfüllbaustoffe

EMPFEHLUNG

Der Verfüllbaustoff sollte kolloidal aufgeschlossen werden, wobei insbesondere bei quellfähigen Tonprodukten (z. B. Bentonit) auf eine ausreichende Mischzeit geachtet werden muss. Angaben der Hersteller sind einzuhalten, wofür mindestens die Eigenschaften Dichte und Viskosität zu überprüfen sind.

BEGRÜNDUNG

Für die Dichtwirkung der Verfüllbaustoffe sind in der Regel Anteile von quellfähigen Tonen enthalten. Damit diese ihre Funktion erfüllen können, sind sie in eine kolloidale Suspension zu überführen. Dies ist nur durch dafür geeignete Mischeinrichtungen möglich.

Ob ein angemischter Verfüllbaustoff die vom Hersteller angegebenen Eigenschaften erreicht hat, ist auf der Baustelle zu überprüfen, bevor dieser eingebaut wird.

DETAILS

Die Eigenschaften einer zur Bohrloch- bzw. Ringraumabdichtung verwendeten Suspension hängen nicht nur vom gewählten Verfüllbaustoff selbst, sondern auch bei ansonsten gleichen Mischungsverhältnissen von der Herstellung der Suspension auf der Baustelle ab.

Für einen vollständigen Aufschluss des Baustoffs ist eine ausreichende Mischzeit und Mischintensität einzuhalten. Für eine entsprechende Aufbereitung sind Kolloidalmischer geeignet. Andere Mischverfahren wie Mörtelmischpumpen und Durchlaufmischer sind nur bedingt oder gar nicht für die bei EWS verwendeten Fertigprodukte geeignet, da der Produktanteil, der für die Dichtwirkung des Verfüllkörpers zuständig ist, kolloidal aufbereitet werden muss (Urban 2013).

Hierbei sind die beim Mischprozess eingetragene Scherenergie sowie die Quellzeiten von besonderer Bedeutung. Dieses kann nur durch eine angepasste Mischtechnik mit entsprechenden Dosiermöglichkeiten für das Mischwasser und die Feststoffkomponenten erfolgen.

Zwar konnte Riegger (2013) in einem Feldversuch keine Verbesserung der Verfüllqualität durch den Einsatz eines Kolloidalmischer gegenüber dem zuvor verwendeten Durchlaufmischer beobachten, jedoch erfolgte lediglich eine visuelle Kontrolle der Proben. Versuche zur Durchlässigkeit oder zur Widerstandsfähigkeit wurden nicht durchgeführt.

In der Praxis werden häufig die Verfüllbaustoffe neben den von Verfüllbaustoffherstellern empfohlenen Kolloidalmischern mit branchenüblichen Durchlaufmischern verarbeitet. Dies scheint den Herstellern bewusst zu sein und spiegelt sich in Hinweisen und Empfehlungen einiger Hersteller für ein bevorzugt zu verwendendes Mischverfahren wieder. Beispielsweise finden sich in technischen Merk- und Datenblättern zu Verfüllbaustoffen Angaben wie „In Kolloidalmischern wird der Baustoff optimal aufgeschlossen“ oder „Die Kennwerte für den Baustoff wurden mit einem hochtourigen Mischer unter Laborbedingungen ... ermittelt“. Ein Hersteller gibt Empfehlungen für das Mischungsverhältnis von Wasser und Baustoff bei Aufbereitung im Durchlauf- (W/F-Wert 0,25) oder im Kolloidalmischer (W/F-Wert 0,4). Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass Mischzeiten von mindestens 10 Minuten zu empfehlen sind, aber auch sehr kurze Mischzeiten von 90 - 120 Sekunden einen verwendbaren Baustoff erzeugen, bei dem es jedoch durch nicht ausreichende Dispergierung oder zu geringer Quellzeit zu einem Mehrverbrauch von bis zu 50 % Feststoff bzw. nur einem Teilaufschluss der Kolloide kommen kann (Schößler et al. 2012).

Die für die **Dichte**prüfung übliche Messverfahren sind: Messungen mit der Spülungswaage, Suspensionsdichtemessung durch Abwiegen eines definierten Volumens (z. B. eines Litergefäßes) oder Dichtemessung mit einem Aräometer.

Die **Viskosität** des angemischten Baustoffs kann nach DIN 4126 und DIN 4127 mit einem Marshtrichter auf der Baustelle ermittelt werden.

Funktionsweise eines Kolloidalmischers

Er erzeugt hohe Scherkraft, die Suspension geht aus dem Mischer in einen Nachbehälter. Hier ist ein optimaler Aufschluss des quellfähigen Tonanteils möglich, das Verfahren ist sehr schnell.

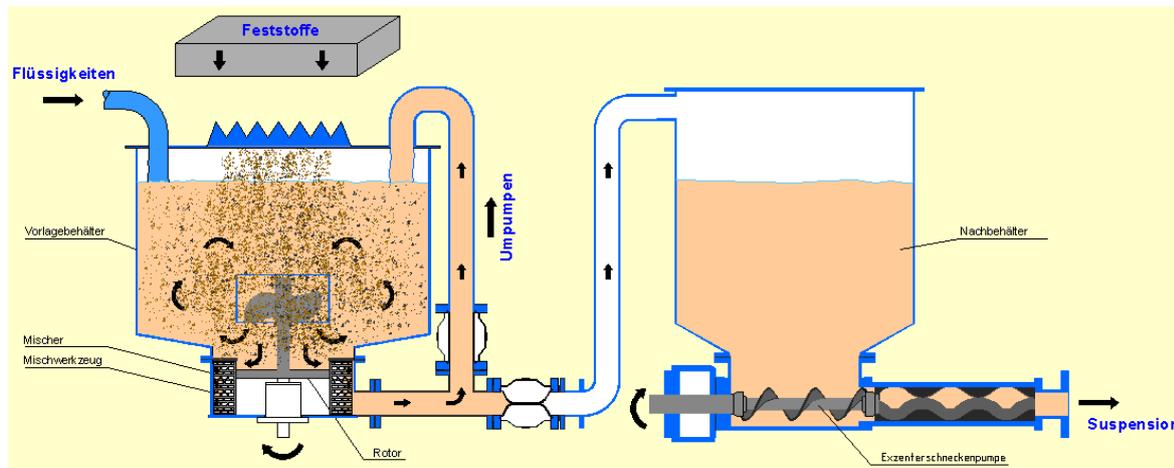


Abb. 11: Kolloidalmischer (Quelle: Fa. Gertec)

5.10 Verfüllung des Bohrlochs

EMPFEHLUNG

Der Verfüllvorgang sollte über ein mitgeführtes Injektionsrohr im Kontraktorverfahren vom Bohrloch-tiefsten bis zum Bohransatzpunkt ohne Unterbrechung durchgeführt werden. Wird das Injektionsrohr während des Verfüllvorgangs gezogen, muss die Öffnung des Rohres immer unterhalb des Verfüllspiegels verbleiben. Gleiches gilt bei der Verwendung eines Verpressgestänges. Die Verfüllung ist erst dann vollständig abgeschlossen, wenn die Dichte der am Bohransatzpunkt austretenden Suspension mit der im Datenblatt des Herstellers angegebenen bzw. der angemischten Suspension übereinstimmt.

Bei Setzungen der Verfüllsuspension bis zu 2 m unter GOK sollte das Füllen dieses Abschnittes mit ausreichend gewässerten Tonpellets als Alternative zur Nachverpressung akzeptiert werden.

Kommen Tonpellets zur Verfüllung des Ringraumes zur Anwendung, sollte der Einbau mittels Schlauchpumpe/Verpressleitung von unten nach oben erfolgen. Bei dieser Technik ist die Verpressleitung oberhalb des bereits aufgefüllten Ringraumes durch kontinuierliches Zurückziehen zu führen.

BEGRÜNDUNG

Das Einbringen des gewählten Verfüllbaustoffs muss sicherstellen, dass alle durch den Bohrvorgang geschaffenen Wegsamkeiten (Hohlräume) im Gesteinsverband wieder wirksam verschlossen werden und verschlossen bleiben. Das gilt sowohl nach erfolgreichem Einbau von EWS als auch bei Fehlbohrungen.

Aufgrund ihrer hohen Dichte dringt die Suspension vor dem Abbinden/Erhärten in die umgebenden Hohlräume ein. Hier ist häufig ein Nachverpressen im oberen Bereich notwendig.

DETAILS

In der Regel erfolgt die Bohrlochverfüllung mit einer aushärtenden Zement-Ton-Suspension, in speziellen Einzelfällen werden auch Sand, Kies oder Tonpellets eingebaut.

Der Einsatz von Tonpellets erfolgt z. B. beim Vorhandensein von großen Klüften über weite Teile der Bohrlochstrecke und hiermit verbundenen Suspensionsverlusten. Sand und Kies werden zur Verfüllung kleinerer (einzelner) geklüfteter bzw. verkarsteter Bohrlochabschnitte genutzt, wenn diese zu Verlusten der Suspension führen. Bevorzugt sollten spezielle Gewebepacker zum Einsatz kommen, die ein Abdichten von Verlustzonen im Bohrloch ermöglichen. Kluft- und Karstbereiche sind in Bohrungen meist wasserführend und sollten abgedichtet werden. Bei stark bis artesisch gespanntem Grundwasser werden Suspensionen teilweise mit Baryt beschwert.

Die Herstellung und die Ziele der Abdichtung werden in verschiedenen Richtlinien und Regelwerken beschrieben. In einigen Regelwerken wird der Begriff „Verpressen“ statt „Verfüllen“ verwendet.

Die Verwendung von quellfähigem Ton zur Abdichtung von Ringräumen setzt den Einsatz speziell dafür entwickelter Einbringetechniken voraus. Damit werden das vorzeitige Quellen des Tons, die Ausbildung von Brüchen und eine lückenhafte Abdichtung vermieden. Das Führen der Verpressleitung während des Verfüllvorgangs erfolgt oberhalb des bereits aufgefüllten Ringraumes, um ein Verstopfen zu vermeiden. Für einen zielgenauen und kontrollierten Einbau von Dichtungston in tiefe, enge Ringräume hat sich die Verwendung einer Tonpelletverpumpanlage bewährt. Nach Zorn et. al (2009) können damit Tonpellets zerstörungsfrei über eine Schlauchpumpe und einer HDPE Rohrleitung direkt in den abzudichtenden Ringraumabschnitt zielgenau platziert werden.

Gemäß der Richtlinie VDI 4640-1 (2010) ist der Abdichtungsvorgang „sorgfältig“ auszuführen und zu dokumentieren. Bei gespannten oder artesisch gespannten Grundwasserverhältnissen sind besondere Abdichtungsmaßnahmen vorzusehen; alternativ ist das Bohrloch aufzugeben und zu verschließen.

Gemäß der Richtlinie VDI 4640-2 (2001) muss der Einbau der Abdichtung über ein mit der EWS eingebrachtes Injektionsrohr erfolgen, wobei bei größeren Bohrtiefen (> 60 m) zwei Injektionsrohre empfohlen werden. Das erste Rohr verbleibt auf der Bohrlochsohle, das zweite Injektionsrohr soll auf halber Bohrtiefe eingebracht werden und kann mit dem Verfüllvorgang gezogen werden, wobei die untere Öffnung des Injektionsrohrs immer unterhalb des Verfüllspiegels zu verbleiben hat. Gleiches gilt bei der Verwendung eines Verpressgestänges, welches ebenfalls mit dem Verfüllvorgang gezogen wird.

Nach Elbe & Bayer (2010) muss die Verfüllung lückenlos sein, d. h. es dürfen keine Lufteinschlüsse und/oder Wassertaschen („Waterpockets“ bzw. „Lunker“, siehe Abb. 12) nach den Verfüllarbeiten in der Verfüllsäule mehr vorhanden sein. Lufteinschlüsse behindern die Wärmeleitung des Verfüllbaustoffs, Wassertaschen können beim EWS-Betrieb gefrieren und die Verfüllsäule mechanisch durch Frostsprengung zerstören.

Bei überhöhten Wassergehalten in der Suspension ist mit Minderfestigkeiten oder gar einem vollständigen Ausbleiben der Erhärtung sowie einer Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit zu rechnen (Dietrich & Pufahl 2007).

Beim Rückbau einer Forschungs-EWS des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (siehe hierzu Homuth et al. 2008) im Jahr 2012 konnten Teile der Ringraumverfüllung geborgen werden, die deutliche Fehlstellen („Lunker“) im direkten Kontakt zu den Sondenrohren aufwiesen (Abb. 12). Hierbei handelt es sich um wassergefüllte Hohlräume, die durch nicht vollständig verdrängte

Bohrspülungs-Reste in der Verfüllsuspension entstehen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens EWS-tech konnte die Entstehung derartiger Strukturen auf die Ausbildung von Strömungskanälen in der noch flüssigen Verfüllsuspension nach Abschluss des Verfüllvorgangs zurückgeführt werden (Riegger & Rolker 2015).



Abb. 12: Fehlstellen („Lunker“) in geborgener Ringraumverfüllung im direkten Kontakt zu den Sondenrohren. Foto Rumohr (2013)

Bereits im Abschlussbericht zum Forschungsprojekt EWS plus von Solites (Riegger 2013) wurden einige Kriterien festgestellt, die für die Qualität der Verfüllung von Bedeutung sind:

- Die Fließeigenschaften der Verfüllbaustoff-Suspensionen sind u.a. für Art, Lage und Ausdehnung von Fehlstellen ursächlich.
- Eine gute Verfüllqualität der EWS-Bohrungen ist bei tendenziell höheren Marshzeiten (78 – 120 s) aufgetreten.
- Das maximale Absetzmaß mit guter Verfüllqualität beträgt 1,5 %. Die Suspensionen, die in EWS mit schlechter Hinterfüllung eingebracht wurden, weisen deutlich darüber liegende Absetzmaße auf.
- Die W/F-Werte lassen keine Rückschlüsse auf die Qualität des Verfüllbaustoffs zu.
- Kleine Fehlstellen im Verfüllbaustoff werden durch Abstandshalter und Zentrierung begünstigt.
- Die Qualität der Verfüllung erwies sich als unabhängig vom Bohrlochdurchmesser.

5.11 Zeitpunkt der Druckprüfung

EMPFEHLUNGEN

Da die vorgeschriebenen Druckprüfungen zu einer Materialdehnung der Sonden führen können (insbesondere bei PE-Materialien), müssen die Druckprüfungen zu einem Zeitpunkt durchgeführt werden, an welchem die Bohrlochverfüllung noch ausreichend fließfähig ist oder bereits eine ausreichende Festigkeit gegenüber dem bei der Druckprüfung aufgebauten Druck erreicht hat.

Bei der Durchführung der Druckprüfung an den Sonden sollte die Konsistenz des eingebrachten Baustoffes entweder noch unterhalb der Stichfestigkeit, also noch innerhalb der Frischsuspensionsphase liegen oder der Baustoff sollte ausreichend fest sein, um dem aufgebrauchten Druck zu widerstehen.

Die Dauer der Frischsuspensionsphase und die Dauer bis zum Erreichen einer ausreichenden Festigkeit muss vom Hersteller angegeben werden.

Liegen keine Angaben vor, sollte von einer Abbindezeit zur Erreichung einer ausreichenden Festigkeit von 28 Tagen ausgegangen werden.

BEGRÜNDUNG

Erfolgt die Druckprüfung während des Abbindeprozesses (Hydratationsphase) besteht das Risiko, dass sich um die bei der Druckprüfung ausdehnenden EWS-Rohre ein zusätzlicher Ringspalt bildet, der sich nach der Druckprüfung nicht wieder schließt.

DETAILS

Die nach Einbau einer EWS z. B. gemäß VDI 4640 durchzuführende Druckprüfung dient dem Nachweis, dass die Sondenrohre keine Undichtigkeiten aufweisen. Um die Materialeigenschaften thermoplastischer Kunststoffe entsprechend zu berücksichtigen, werden derzeit von verschiedenen Regelwerken und Leitfäden die Durchführung der Kontraktions-Druckprüfung in Anlehnung an die DIN V 4279-7 (BFE 2005) empfohlen oder vorgegeben. Infolge der Druckprüfung ändert sich der Durchmesser bzw. das Volumen der EWS, sofern diese sich ausdehnen kann.

Die Empfehlungen sind den Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS) aus Baden-Württemberg angelehnt (vgl. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2012).

5.12 Temperaturgrenzen

EMPFEHLUNG

Im Heizbetrieb sind Temperaturen im Solekreislauf der EWS im Rücklauf von der Wärmepumpe in die EWS auf minimal -3°C zu begrenzen. Diese Begrenzung ist durch einen Temperaturregler zu überwachen.

BEGRÜNDUNG

Bei einer minimalen Temperatur des Wärmeträgermittels von -3°C im Spitzenlastfall sinkt die Temperatur im Ringraum nicht unter 0°C .

Untersuchungen von Bassetti et al. (2005), Lenarduzzi et al. (2000) und Rohner & Rybach (2001) haben ergeben, dass bei EWS-Anlagen, die im Solekreislauf der EWS im negativen Temperaturbereich betrieben werden Frost-Tau-Wechsel Beanspruchungen im Umfeld der EWS auftreten. Diese Frost-Tau-Wechsel Beanspruchungen können den Verfüllbaustoff im Ringraum und ggf. auch das Gebirge bei fortwährend vorliegenden negativen Temperaturen nachhaltig schädigen.

Die Auswirkungen der Frost-Tau-Wechsel Beanspruchungen auf die Systemdurchlässigkeit wurden im Labormaßstab durch Müller (2004), Anbergen et al. (2011) und Reuß (2013 + 2014) beschrieben.

DETAILS

Das Ziel der Bemessung von EWS-Anlagen ist es, innerhalb eines definierten Zeitraums (= Ausleugszeitraum) den Entzug und/oder Eintrag gegebener Wärmemengen aus bzw. in den Untergrund mit einer gegebenen Betriebsweise (= Lastverteilung, Jahresbetriebsstunden) und Leistung der Wärmepumpe bei Einhaltung vorgegebener Minimal- bzw. Maximaltemperaturen des in der EWS zirkulierenden Wärmeträgermittels sicherzustellen.

Die VDI-Richtlinie 4640-2 (2001) macht diesbezüglich folgende Vorgabe: „Die Temperatur des zu der/den EWS zurückkehrenden Wärmeträgermediums soll im Dauerbetrieb (Wochenmittel) den Grenzbereich von ± 11 K Temperaturänderung gegenüber der ungestörten Erdreichtemperatur nicht überschreiten; bei Spitzenlast soll ± 17 K Temperaturänderung nicht überschritten werden.“

Ausgehend von einer über die Tiefe einer EWS gemittelten Untergrundtemperatur von beispielsweise 11 °C (typisches Mittel einer 100 m tiefen EWS) folgt hieraus für den Heizfall (= Wärmeentzug), dass die Temperatur des aus der Wärmepumpe zu der/den EWS zurückkehrenden Wärmeträgermediums auf 0 °C im Dauerbetrieb (Wochenmittel) und kurzzeitig bei Spitzenlast⁹ auf -6 °C sinken kann.

Rohner & Rybach (2001) gingen davon aus, dass es infolge einer thermischen Überlastung von EWS und den damit in der Bohrlochverfüllung auftretenden Temperaturen unter 0 °C zu einem Schrumpfen des Verfüllbaustoffs kommt, bei dem es sich zu diesem Zeitpunkt ausschließlich um Baustellenmischungen handelte. Die von ihnen durchgeführten Laboruntersuchungen an Baustoffproben bestätigten, dass das in der Praxis festgestellte Absinken von Bohrlochverfüllungen (vgl. Bassetti et al. (2005)) eine Folge des gefrierbedingten Schrumpfens der Verfüllbaustoffe ist.

Müller (2004) berichtet über Frost-Tau-Wechsel-Versuche an zu diesem Zeitpunkt marktgängigen Verfüllbaustoffen für EWS-Bohrungen. Bei den untersuchten Baustoffen aus dem Brunnenbau traten bereits nach wenigen Frost-Tau-Wechsel-Belastungen deutliche Risse und Abplatzungen an den Probekörpern auf. Die nach 28 Tagen Abbindezeit ohne Frostbeaufschlagung ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte variierten zwischen $3 \cdot 10^{-10}$ m/s und $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Für Baustellenmischungen auf Bentonit/Zement-Basis, die in der VDI-Richtlinie 4640, Blatt 2 (2001) empfohlen werden, sowie für andere Hinterfüllbaustoffe und Dämmen aus dem Brunnenbau konnte von Müller (2004) keine Frostbeständigkeit nachgewiesen werden.

Lenarduzzi et al. (2000) berichten über Funktionsprobleme und die Schädigung von EWS durch das Gefrieren des Untergrundes und Eislinsenbildung. Die Funktionsfähigkeit von 129 Wärmepumpenanlagen im Heiz- und Kühlmodus in frostempfindlichem Untergrund (Geschiebemergel aus

⁹ Als „Spitzenlast“ wird der Zustand bezeichnet, bei dem die Wärmepumpe ununterbrochen über mehrere Stunden arbeitet. Insbesondere in kalten Monaten bzw. am Ende der Heizperiode kommt es bei diesem Zustand zu den tiefsten Wärmeträgermittel-Temperaturen.

Sand und Ton) mit einer 3 m mächtigen grundwasserführenden Schicht wurde durch Gefrierprozesse bei Fluidtemperaturen von -5 °C bis -10 °C beeinträchtigt. Die Bildung von Eislinsen im Untergrund führte zu einer Quetschung der Rohre infolge des Frostdruckes von bis zu 13 mm und zur Leckage der Sondenrohre. Die Probleme während des Heizzyklus beinhalteten das Gefrieren des Untergrundes und der Hinterfüllung um die Sondenrohre. Das Grundwasser führte zu verstärkter Eislinsenbildung und Quetschungen der Sondenrohre, da deren Kompressibilität größer war als die des umgebenden Gesteins (aus Herrmann 2008).

5.13 Kontrolle der Ringraumverfüllung

EMPFEHLUNGEN

Die EWS sollten nach der Errichtung der Anlage dauerhaft zugänglich sein, um bei Bedarf die technisch einwandfreie Ausführung und den ordnungsgemäßen Zustand einer Ringraumverfüllung einer EWS durch Messungen kontrollieren zu können.

EWS-Bohrungen, die zwei oder mehr Grundwasserstockwerke erschließen, sollten insbesondere im Falle von Druckpotenzialunterschieden zwischen den Stockwerken für eine ggfs. notwendige Sanierung der Abdichtung und für einen ggfs. notwendigen Rückbau nicht überbaut werden.

BEGRÜNDUNG

Die Möglichkeit Kontrollmessungen durchführen zu können, ist insbesondere für EWS-Anlagen in Gebieten mit schwierigen geologischen hydrogeologischen Untergrundverhältnissen bedeutsam. Durch die Befahrbarkeit des Vor- und Rücklaufs mittels einer geeigneten Messsonde, ist eine Kontrolle der Verfüllung sowohl während als auch nach Abschluss des Verfüllvorgangs möglich. Um auch nach der Inbetriebnahme der EWS eine Kontrolle zu gewährleisten, ist der Zugang zu den Sondenköpfen dauerhaft z. B. über Kontrollschächte zu realisieren. Hier erfolgt eine Befahrbarkeit der Vor- und Rückläufe über T-Stücke mit druckstabilen, mobilen Schraubverschlüssen.

DETAILS

Grundsätzlich eignen sich für messtechnische Kontrolluntersuchungen der Ringraumverfüllung von EWS-Bohrungen im Hinblick auf die hydraulische Wirksamkeit der Abdichtung thermische, radiometrische und magnetische Messungen (Lux et al. 2012).

Temperatur-Log (TMP)

Die Auswertung der im unbeeinflussten Ruhezustand einer EWS durchgeführten Temperatur-Logs (TMP) kann Aufschluss über Fluidbewegungen in der Sondenumgebung geben.

Ein ungestörter, mit wachsender Teufe zunehmender Temperaturgradient ist dabei ein Zeichen reiner (konduktiver) Wärmeleitung. Störungen des Gradienten können auf überlagernde (advektive) Fluidbewegungen hindeuten. Solche Advektionsströmungen können durch den Kurzschluss von Grundwasserleitern mit unterschiedlichen Druckpotentialen hervorgerufen werden (siehe auch Lux & Scheffel 2012).

Thermal-Response-Test (TRT)

Der Thermal-Response-Test (TRT) ist ein geophysikalisches Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes und des thermischen Bohrlochwiderstandes. Bei dem Verfahren zirkuliert ein Wärmeträgermittel (in der Regel Wasser) in einer EWS, das mit einer definierten Wärmeleistung beaufschlagt wird. Anhand des Verlaufs der Ein- und Austrittstemperaturkurven des Wärmeträgermittels kann z. B. mit Hilfe der Kelvin'schen Linienquellentheorie die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes als Mittelwert über die Sondenlänge bestimmt werden. Ein TRT dauert üblicherweise 72 Stunden.

Mit dem Verfahren des Kurz-TRT wird die Hinterfüllung einer EWS mit hoher Energierate vorübergehend aufgeheizt. Temperaturprofilmessungen während und nach Abschluss der Energiezufuhr beobachten das thermische Verhalten der Hinterfüllung. Die Idee ist dabei, dass Inhomogenitäten in der Hinterfüllung, insbesondere Wasservorkommen wegen ihrer von der Hinterfüllungsmatrix stark abweichenden Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit markante thermische Reaktionen bei der Aufheiz- bzw. Abkühlungsphase verursachen.

Folgende weitere messtechnische Verfahren zur Kontrolle der Abdichtung werden derzeit eingesetzt:

Gamma-Ray-Log (GR)

Der Einsatz des Gamma-Ray-Logs erfordert den Einsatz von gammastrahlungsaktiv markierten (= dotierten) Verfüllbaustoffen. Angesichts des für Gammamessungen geltenden Prinzips der ungestörten Superposition dominiert andernfalls im Wesentlichen die natürliche Gammastrahlung des Gebirges den Messwert. Der nötige Kontrast zur Strahlung des Gebirges und damit die weitgehende Aussagesicherheit zum Grad der Verfüllung entstehen erst durch die Markierung, wobei zu bedenken ist, dass diese Markierung zur Ausprägung des notwendigen Messeffektes ein ausreichend großes und repräsentatives Volumen einnehmen muss. In den engen Ringräumen kleinkalibriger Erdwärmebohrungen ist das zumeist nicht gewährleistet. Eine Nullmessung vor Einbringung der markierten Suspension, z. B. in der unverrohrten Aufschlussbohrung, ist dabei in jedem Falle ausgesprochen hilfreich (Lux et al. 2012).

Dichte-Log / Gamma-Gamma-Dichte-Log (GG.D)

Die Gamma-Gamma-Dichte-Messung ist ein geophysikalisches Messverfahren, das die Dichte der Gesteinsmatrix bestimmt. Dazu werden von einer Quelle Gamma-Strahlen in das Gebirge entsandt. Die Gamma-Strahlung tritt in Wechselwirkung mit den Elektronen der Außenhülle der am Matrixaufbau beteiligten Atome, wobei diese gestreut bzw. absorbiert werden (Compton-Effekt). Die verbliebene Gamma-Reststrahlung wird an einem Detektor registriert (Voelker & Voutta 2013).

Um innerhalb einer EWS Dichtemessungen durchzuführen, wurde eine für EWS geeignete Gamma-Gamma-Messsonde entsprechend modifiziert:

- Die Abmessungen wurde soweit verkleinert, dass sie durch eine U-Rohr-Sonde mit > 20 mm Innendurchmesser fahren kann.
- Der Messradius wurde durch die Reduktion des Abstandes von Quelle zu Detektor soweit eingegrenzt, dass dieser auf den Ringraum von ca. 150 mm konzentriert ist.
- Von der Quelle austretende und am Detektor eintretende Strahlung wird nicht ausgerichtet. Mit dieser radialsymmetrischen Anordnung wird der ganze Ringraumquerschnitt erfasst.

Die Messungen sind im Einzelnen nicht als absolute Dichtemessung zu verstehen. Für die Aufdeckung einer Dichteanomalie ist die relative Signaländerung am Detektor in Bezug auf ein Basissignal maßgeblich. Die Signale der Gamma-Gamma-Messungen in cps (counts per second) sind das Ergebnis, das sich aus wechselnden Anteilen Zementmatrix, luftgefüllter Porenraum und/oder wassererfüllter Porenraum in der Zementmatrix bzw. fehlender Zementation und damit Luft-, Wasser- oder Lockergestein erfülltem Ringraum ergeben. Das Messverfahren ermöglicht in Verbindung mit anderen Messverfahren Aussagen zur Qualität der Hinterfüllung.

Suszeptibilitäts-Log (Magnet-Log, MAL)

Das Messverfahren des Suszeptibilitäts-Logs greift auf das physikalische Prinzip der magnetischen Suszeptibilität zurück. Gemessen wird die Suszeptibilität, d. h. die „Übernahmefähigkeit“ eines externen Magnetfeldes durch ein Material, die sich durch eine Abschwächung oder Verstärkung eines künstlich angelegten Magnetfeldes ausdrückt (Voelker & Voutta 2014).

Messungen der magnetischen Suszeptibilität verlangen daher ebenfalls die Verwendung eines markierten (dotierten) Verfüllbaustoffs. Seit 2014 werden erste mit Magnetit (Fe_3O_4) markierte Verfüllbaustoffe für EWS-Bohrungen angeboten (Neumann & Rasch 2014); einen Erfahrungsbericht zum Einsatz des Messverfahrens und hiermit erkannten Fehlstellen in Ringraumverfüllungen geben Voelker & Voutta (2014). Es wird beschrieben, dass mittels Messtechnik dem hierfür geschulten Bohrergeräteleiter bereits während des Verfüllvorgangs die Möglichkeit besteht, z. B. Verlustzonen zu erkennen und damit direkt auf den Einbau des Verfüllbaustoffs Einfluss zu nehmen. Auch eine spätere Nachmessung durch einen unabhängigen Sachverständigen ist damit möglich.

Aufgrund der nur wenigen bisher veröffentlichten Erfahrungen sind noch einige Fragen offen: Wie wirken sich metallische Gegenstände im Bohrloch, z. B. eine im Bohrloch vorhandene Verrohrung oder metallische Führungen von EWS, auf die Messung aus? Kann eine im Verpressschlauch verbliebene Verfüllsuspension das Vorhandensein einer Verfüllung im Ringraum vortäuschen oder ist diese über die Signalstärke zu unterscheiden? Inwieweit wirkt sich die gravitative Entmischung bis zum Abbinden des jeweiligen Verfüllbaustoffs auf das Messsignal aus? Ist mittels der Messtechnik auch eine quantitative Aussage zur Verteilung des Verfüllbaustoffs möglich (Abbildung von Kaliberausbrüchen)?

Zusammenfassend sind die radiometrischen und magnetischen Messverfahren nach Lux et al. (2012) letztlich nur geeignet, das Vorhandensein einer Bohrlochverfüllung als „notwendige Voraussetzung der Dichtheit“ zu untersuchen. Die o. g. thermischen Messverfahren können hingegen auch Hinweise auf das Vorhandensein einer Grundwasserströmung in diskreten Tiefenabschnitten oder einer Wasserströmung entlang der EWS im Bohrlochringraum geben.

Zudem zeigt sich, dass die Messergebnisse der vorgenannten Verfahren nicht in jedem Fall eine eindeutige Interpretation zulassen. Im Falle der Gamma-Gamma-Dichte-Messung wird u. a. aus diesem Grunde empfohlen, diese in Kombination mit dem Kurz-TRT durchzuführen.

5.14 Sondenmaterial

EMPFEHLUNG

Das Sondenmaterial sollte einen möglichst geringen thermischen Längenausdehnungskoeffizient aufweisen. Bei EWS aus HDPE sollte vernetztes Polyethylen (PE-X / PE-RC) verwendet werden, da die räumliche Vernetzung des Materials die Temperatur-Widerstandsfähigkeit, die Schlagzähigkeit und die Spannungsrisss-Widerstandsfähigkeit verbessert. Die Oberfläche des Sondenmaterials sollte derart gestaltet sein, dass möglichst kein Ringspalt zwischen Sonde und Verfüllbaustoff entsteht.

BEGRÜNDUNG

Bei Sondenmaterial aus Polyethylen sind thermische Verformungen grundsätzlich reversibel, allerdings sind mit dem thermischen „Atmen“ Konsequenzen verbunden. Können sich die thermischen Dehnungen oder Schrumpfungen nicht ungehindert ausbreiten, rufen sie thermisch induzierte Spannungen – die Wärmespannungen – in den Werkstoffen und damit in den Konstruktionen hervor. Dieser Effekt verstärkt sich mit Zunahme des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten.

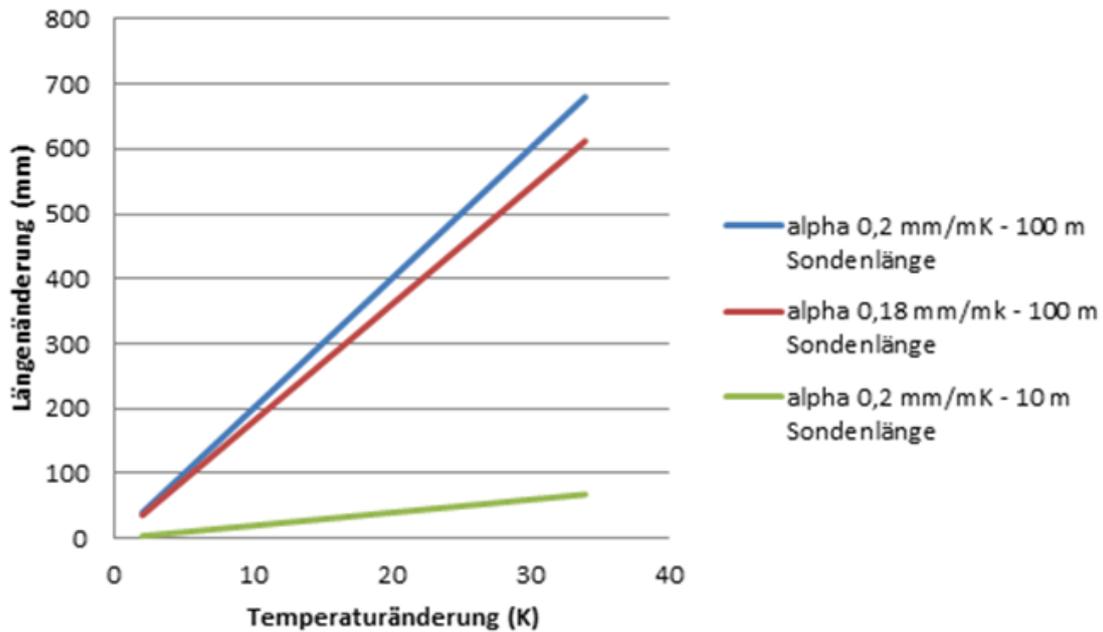
Reibungskräfte zwischen den Sondenrohren und dem umgebenden Verfüllmaterial behindern einen Teil der temperaturbedingten Ausdehnung (z. B. bei Sondenrohren mit rauer Oberfläche). Im Haftbereich findet keine Dehnung und somit keine Verschiebung statt, das Rohr verhält sich wie ein eingespannter Stab (Weidlich & Huther 2014). Da eine Temperaturdehnung in der Längsrichtung des Rohrs dann nicht möglich ist, wird sie in die Ebene des Rohrquerschnittes gezwungen. Dabei müssen diese behinderten Dehnungen in Form von Spannungen aufgenommen werden. Deshalb ist besonders darauf zu achten, dass kein beschädigtes Sondenmaterial (Kratzer, tiefe Risse etc.) eingebaut wird.

Sind die Reibungskräfte nicht groß genug, führen differentielle Ablösungen zwischen Sondenrohr und Verfüllmaterial („debonding“) im sogenannten Gleitbereich zu Verschiebungen, es kommt zur Ausbildung eines Ringspalts.

DETAILS

Unter Einwirkung von Temperaturänderungen verändern sich die Längen von PE-Rohren in Abhängigkeit von ihrem thermischen Längenausdehnungskoeffizienten und der Temperaturdifferenz (Verband der Kunststoffrohre-VKR-, 2007)¹⁰. Bei Abkühlung kommt es zu Schrumpfungen, bei Erwärmung zu Dehnungen. Können sich die PE-Rohre ungehindert ausdehnen oder schrumpfen, so sind damit die in Abb. 13 beispielhaft für 10 m bzw. 100 m lange Rohre dargestellten Längenänderungen rechnerisch möglich.

¹⁰ vorausgesetzt, dass sie hieran nicht gehindert werden, z. B. aufgrund dessen, dass sie eingespannt sind.



$$\Delta L_t = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

- ΔL_t Längenänderung, thermisch, in mm
 L Länge der Rohrstrecke in mm
 α Thermischer Längenänderungskoeffizient
 (für PE zwischen -20°C und 60°C : $\alpha = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$)
 ΔT Differenz der mittleren Rohrwandtemperatur in K (Kelvin, entspricht Differenz in $^\circ\text{C}$)

Abb. 13: Einfluss von Temperaturänderungen auf die Sondenlänge in Abhängigkeit von unterschiedlichen Längenausdehnungskoeffizienten ($\alpha = 0,2 \text{ mm/mK}$ bzw. $0,18 \text{ mm/mK}$).

Während der Errichtungs- und Betriebsphase von EWS-Anlagen können sich Temperaturänderungen auf das Sondenmaterial in unterschiedlichem Ausmaß auswirken. Folgende Einflüsse sind hierzu zu benennen:

- Wärmeentwicklung beim Abbinden des Verfüllmaterials
- Jahreszeitliche Temperaturänderungen des Erdreichs durch Änderungen der Sonneneinstrahlung
- Betriebsbedingte Temperaturänderungen im Sondenfluid durch Wärmeentzug/Wärmeeintrag

5.15 Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Erdwärmesonden

EMPFEHLUNG

Die Inbetriebnahme der EWS sollte bei Verwendung zementgebundener Verfüllbaustoffe erst nach weitgehend abgeschlossenem und ungestörtem Durchlaufen sämtlicher Phasen des Hydratationsprozesses erfolgen. Herstellerangaben sind hierbei zu beachten. Bei fehlenden Herstellerangaben sollte die Inbetriebnahme frühestens 28 Tage nach der Verfüllung erfolgen.

BEGRÜNDUNG

Entscheidend für die Aushärtung, Stabilität, Festigkeit und letztendlich die Herstellung einer Abdichtung im Ringraum ist der Hydratationsprozess des Verfüllbaustoffs. Der Hydratationsprozess beginnt nach der Zugabe von Wasser zum Verfüllbaustoff und verläuft über verschiedene Phasen (Locher et al. 1976; Taylor 1992). Für die Gefügeverdichtung und Festigkeitsentwicklung werden teilweise bis zu über 28 Tage benötigt.

5.16 Überwachung der Bohr-, Einbau- und Verfüllarbeiten

EMPFEHLUNG

Bei komplexen hydrogeologischen Bedingungen sollte die Durchführung der Bohr-, Einbau- und Verfüllarbeiten durch einen fachkundigen Fremdüberwacher beaufsichtigt werden. Die überwachten Arbeiten und ermittelten Werte sollten in einer Dokumentation festgehalten werden.

Im Falle auftretenden Schwierigkeiten/Unregelmäßigkeiten beim Verfüllvorgang sind durch den Überwacher zusammen mit dem Bohrpersoneal die notwendigen Maßnahmen festzulegen, ggf. die Verfüllarbeiten einzustellen und, soweit erforderlich, Kontakt mit den Genehmigungs- bzw. Fachbehörden herzustellen.

Für In-Situ-Kontrollen des Verfüllvorgangs innerhalb des Bohrlochs sollte auf die in den Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS) (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2012) beschriebenen Systeme zur automatisierten Kontrolle des Verfüllvorgangs zurückgegriffen werden.

BEGRÜNDUNG

Eine sorgfältige Durchführung der Bohr-, Einbau- und Verfüllarbeiten ist entscheidend für die Minimierung der Durchlässigkeit des EWS-Systems. Eine Überwachung kann sicherstellen, dass die Ringraumverfüllung fachgerecht erfolgt und dass die Arbeiten ordnungsgemäß unter Einhaltung der wasserrechtlichen Auflagen und dem Stand der Technik durchgeführt werden.

Die Überwachung sollte zusätzlich zu der generellen Überwachung durch das Bohrpersoneal durch einen qualifizierten Fremdüberwacher erfolgen, welcher im Einvernehmen mit der Wasserbehörde beauftragt wird.

Eine ordnungsgemäße Überwachung beinhaltet zur Nachvollziehbarkeit der Arbeiten sowie zur Beweissicherung eine ordnungsgemäße Dokumentation. Es ist daher ein Überwachungsprotokoll zu erstellen.

6 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

6.1 Untersuchung zur Systemdurchlässigkeit von (realen) EWS-Bohrungen

FORSCHUNGSBEDARF

Weitergehende Materialuntersuchungen an neu entwickelten Verpress-Suspensionen (Tonprodukte etc.) sollten wie bisher im Labormaßstab mit den verfügbaren Methoden untersucht und mit bisher ermittelten Daten abgeglichen werden. Die bestehenden Labormethoden sollten in Richtung Übertragbarkeit auf das reale System Erdwärmesonde weiterentwickelt und mit neu zu konzipierenden Feldversuche ergänzt werden. Diese Untersuchungen dienen zur Ermittlung bzw. Ableitung der spezifischen Einflüsse auf die Systemdurchlässigkeit des realen System Erdwärmesonde.

BEGRÜNDUNG

In Abschnitt 5.1 wird die **Systemdurchlässigkeit als Maß der Abdichtung einer EWS-Bohrung** definiert, da diverse Laboruntersuchungen zeigen, dass die Durchlässigkeit vom Verbund aus Sondeninbauten und Verfüllbaustoff (Systemproben) stets höher ist als die Durchlässigkeit des zur Abdichtung verwendeten Verfüllbaustoffs (Materialprobe) allein. Außerdem wurde festgestellt, dass bisher ein systematischer Zusammenhang zwischen Material- und Systemdurchlässigkeit nicht erkennbar ist. Die Systemdurchlässigkeit ist demzufolge entscheidend für die Beurteilung der Abdichtung einer EWS und somit kommt deren Ermittlung eine zentrale Bedeutung zu.

Bisher wurden nachfolgende Untersuchungen zur **Ermittlung der Systemdurchlässigkeit** durchgeführt:

Allan (1997) führte im Rahmen von Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit von Verfüllbaustoffen u. a. Untersuchungen zur Durchlässigkeit von Materialproben („bulk probe“) und Systemproben („simulated boreholes“) durch. In weitergehenden Untersuchungen an Systemproben konnte Allan & Philippacopoulos (2000) aufzeigen, dass die Durchlässigkeit mit sinkender Temperatur steigt.

Im Bereich des Brunnenbaus ist bekannt, dass erhöhte Wasserwegsamkeiten im Bereich der Kontaktflächen von Ausbaumaterial und Verfüllbaustoff auftreten (siehe 5.1)

Im Jahr 2008 wurde die österreichische Studie „Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden“ (Niederbrucker & Steinbacher 2008a) ergänzt um die nachfolgenden Artikel (Niederbrucker & Steinbacher 2008b und Niederbrucker & Steinbacher 2008c) veröffentlicht. Sie weisen ausdrücklich darauf hin, dass die im Labor ermittelten Durchlässigkeiten nur die reine Materialdurchlässigkeit der abgebundenen Suspension wiedergeben und die Systemdurchlässigkeit, d. h. die Durchlässigkeit der „Verpressung samt Sondenverrohrung“ höher anzusetzen ist.

Aufbauend auf Voruntersuchungen von Albrecht & Frank (2010) wurde im Auftrag der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU, Hamburg) eine modifizierte Messzelle zur Prüfung der Widerstandsfähigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel entwickelt, bei der ein mittig eingebautes PE-Rohr zur Simulation einer EWS dient (Anbergen et al. 2011). Die Untersuchungen bestätigen die Feststellung aus vorangehenden Untersuchungen, dass die Systemdurchlässigkeit der Messzelle grundsätzlich höher ist als die Materialdurchlässigkeit des Verfüllbaustoffs. Außerdem wurde eine materialabhängige Widerstandsfähigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel belegt (Anbergen et al. 2014)

Am Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE-Bayern) durchgeführte Versuche im Großversuchsstand ergaben, dass die Systemdurchlässigkeit deutlich größer als die Materialdurchlässigkeit der untersuchten Verfüllbaustoffe ist (Reuß & Kuckelkorn 2011, Kuckelkorn & Reuß 2013, Reuß 2014).

Die Übertragbarkeit der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte aus diesen Laboruntersuchungen auf das reale System Erdwärmesonde ist noch nicht allgemein anerkannt. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf, um alle spezifischen Einflüsse auf die Systemdurchlässigkeit und deren Zusammenhänge exakter beschreiben zu können.

6.2 Systemdurchlässigkeit von Koaxialsonden

FORSCHUNGSBEDARF

Es sollten vergleichende Untersuchungen der Systemdurchlässigkeit von Doppel-U-Sonden und Koaxialsonden durchgeführt werden.

BEGRÜNDUNG

Aufgrund der kompakteren Bauart von Koaxialsonden gegenüber einer Doppel-U-Sonde wird seitens des PK angenommen, dass die Auswirkungen des Ringspaltes auf die Systemdurchlässigkeit geringer ausfallen. Zudem geht der PK davon aus, dass Koaxialsonden für einen zentrischen Einbau mittels Zentrierhilfen besser geeigneter sind.

6.3 Bohrdurchmesser

FORSCHUNGSBEDARF

Die Auswirkung des Bohrlochdurchmessers auf die Systemdurchlässigkeit ist durch spezifische Untersuchungen zu ermitteln.

BEGRÜNDUNG

Bisher existieren keine spezifischen Untersuchungen zu den Auswirkungen des Bohrlochdurchmessers auf die Systemdurchlässigkeit von EWS.

Es ist allerdings davon auszugehen, dass der Bohrlochdurchmesser einen Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit hat. Bei großen Bohrlochdurchmessern ist die Grenzfläche zwischen dem Gebirge und dem Verfüllbaustoff sehr groß. Entlang dieser Grenzfläche besteht die Möglichkeit der Anlage und Öffnung von Wegsamkeiten für Fluidströme, die einen Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit haben.

Zudem erreicht das durch den Bohrvorgang beeinflusste Gebirge größere volumetrische Dimensionen im Umfeld der Bohrung als bei kleinen Bohrlochdurchmessern. Das bedeutet, dass die Auswirkungen des Bohrprozesses durch Auflockerungen, Gefügeänderungen, Austräge- und Ausbrüche auf das Gebirge bei kleineren Bohrlochdurchmessern geringer sind. Deshalb ist die Änderung oder der Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit bei kleineren Bohrlochdurchmessern voraussichtlich geringer.

Dem steht die Sorge entgegen, dass ein kleiner Ringraum um die EWS bzw. ein (zu) kleiner Bohrdurchmesser die Entstehung von Fehlstellen fördert.

6.4 Verwendung von Tonprodukten zur Abdichtung

FORSCHUNGSBEDARF

Es sollten Untersuchungen durchgeführt werden, ob mit Verfüllbaustoffen aus quellfähigen, dauerhaft plastischen Tonen bei gleichen Randbedingungen bzw. Einflüssen geringere Systemdurchlässigkeiten als mit zementgebundenen Verfüllbaustoffen erzielt werden können.

Als Einflüsse sind z. B. das Vorkommen erhöht bis hochmineralisierter Grundwässer, chemischer Angriff, Volumenänderungen der Sondenrohre sowie Temperaturschwankungen zu berücksichtigen.

Im Falle der Temperaturschwankungen sollte untersucht werden, in welchem Temperaturbereich die Tone ausreichend plastisch sind, um Volumenänderungen der EWS zu kompensieren.

BEGRÜNDUNG

Nach Einschätzung des PK sollten quellfähige, dauerhaft plastische Tone in der Lage sein, betriebsbedingte Volumenänderungen der Sondenrohre (z. B. durch Druckprüfung, Temperaturänderungen) zu kompensieren, so dass die Systemdurchlässigkeit durch diese Prozesse nicht steigt.

Im Falle eines Austrocknens bzw. Gefrierens des Tons wird dieser jedoch seine plastischen Eigenschaften verlieren.

6.5 Verbesserung Kontakt Rohr-Verfüllung

FORSCHUNGSBEDARF

Zur Minimierung eines Ringspaltes zwischen Sondenrohren und Verfüllung sind solche Systemkomponenten zu entwickeln, die eine möglichst dauerhafte Verbindung eingehen.

Dies erfordert, dass die Komponenten nach Einbau im Bohrloch potenzielle Volumenänderungen des Sondenmaterials ausgleichen und dauerhaft plastisch bleiben.

Zudem sollte der thermische Ausdehnungskoeffizient des in einer Bohrung eingesetzten Verfüllbaustoffs dem in der gleichen Bohrung eingesetzten Sondenmaterial (siehe Abschnitt 5.14) dahingehend entsprechen, dass Temperaturänderungen von Sondenmaterial und Verfüllbaustoff nicht zur Vergrößerung des Ringspalts führen.

BEGRÜNDUNG

Eine der Hauptwegsamkeiten im System Erdwärmesonde stellt der Ringspalt zwischen Sondenrohr und Verpressmaterial dar. Ursächlich hierfür sind die unterschiedlichen Wärme- und Druckausdehnungen der Komponenten Verfüllbaustoff und Kunststoffrohr.

Die derzeit üblichen PE-Sondenrohre weisen sehr glatte Oberflächen auf, die nur eine geringe Kraftübertragung vom Sondenrohr zum Verfüllbaustoff ermöglichen. Hierdurch kann es zu Ablösungen des Verfüllbaustoffs vom Sondenrohr kommen, so dass an der Grenzfläche ein Spalt entsteht. Durch eine bessere Verzahnung dieser Grenzfläche können die übertragbaren Scherspannungen erhöht und ein Ablösen erschwert werden. Neuere Produktentwicklungen zeigen, dass hier eine deutliche Verbesserung dieser Kontaktfläche erreichbar ist. Es wird empfohlen zukünftig Produkte zu entwickeln und zu verwenden, die eine verbesserte Verbindung zwischen Sondenrohr und Verpressmaterial aufweisen.

Der Einfluss weiterer betriebsbedingter Ausdehnungen der Komponenten Verfüllbaustoff und Sondenrohr auf die Bildungen von Umläufigkeiten entlang des Sondenrohres sollte im Rahmen von Projekten praxisnah untersucht werden.

Anbindung des Verfüllbaustoffs an die Bohrlochwand und die Erdwärmesonde

Nach Darstellung der Fa. Rehau (Rehau 2013) können zwischen den glatten Außenflächen herkömmlicher EWS-Rohre und den derzeit zum Einsatz kommenden Verfüllmaterialien Spalten von mehreren Millimetern entstehen, durch welche die Durchlässigkeit des Gesamtsystems auf 10^{-6} m/s ansteigt und somit keine ausreichende Dichtheit gewährleistet werden kann.

Ursächlich sind unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten von Sondenrohr und Verfüllmaterial bei schlechter Scherkraftübertragung von Rohr auf das Verfüllmaterial. Neben den durch thermische Einflüsse verursachten Spannungen treten durch Druck verursachte Spannungen, insbesondere während der mit hohem Druck (z. T. > 10 bar) ausgeführten Druck-Dichtigkeitsprüfung auf. Eine Übertragung der auftretenden Scherkräfte ist durch eine bessere Verzahnung des Verfüllmaterials mit den Sondenrohren möglich. Hierzu werden die Rohre mit einer rauen Oberfläche beschichtet. Die mit solch einem verbesserten Verbund übertragbaren Scherkräfte sind abhängig von den jeweiligen Verfüllmaterialien (herstellerabhängig) und den eingesetzten Beschichtungsverfahren (Mikro-, Makrorauigkeit).

Die Verbindung zwischen Gebirge und Verfüllbaustoff kann durch mehrere Faktoren behindert werden, so dass Wegsamkeiten für das Wasser entstehen können. Der Umstand der Gebirgsauflöckerung mit der Entstehung von Klüften und Rissen im Umfeld der Bohrung ist insbesondere bei der Luft-Hammer-Bohrtechnik verbreitet. Ein weiterer Faktor ist der an der Bohrlochwand entstehende Filterkuchen, der beim Einbringen der Verfüllsuspension nicht voll ausgetragen wird und so eine Trennschicht zwischen Gebirge und Verfüllbaustoff ausbilden kann. Der Filterkuchen kann die Bohrlochwand abdichten und kann in hoch durchlässigen Gesteinen ein Versickern der Bohrspülung oder der Verfüllsuspension in den Untergrund (Elbe & Bayer 2010) verhindern. Die langfristigen Auswirkungen eines im Bohrloch verbleibenden Filterkuchens auf die Systemdurchlässigkeit von EWS-Bohrungen ist bisher nicht untersucht worden.

Bezogen auf den Bohrlochwiderstand ist die Ausbildung eines Filterkuchens nach Elbe & Bayer (2010) von erheblichem Nachteil.

Der Einfluss weiterer betriebsbedingter Ausdehnungen der Komponenten Verfüllbaustoff und Sondenrohr auf die Bildungen von Umläufigkeiten entlang des Sondenrohres sollte im Rahmen von Projekten praxisnah untersucht werden.

6.6 Zentrischer Einbau

FORSCHUNGSBEDARF

Zentrierhilfen, die bisher entwickelt wurden, haben sich in der Praxis nicht bewährt. Hier ist von Seiten der Industrie und Bohrunternehmen auf eine Lösung hinzuwirken.

Es besteht Untersuchungsbedarf, ob lokale Fehlstellen sowie durch Zentrierhilfen geschaffene Fließwege zur Bohrlochwand für eine erhöhte vertikale Durchlässigkeit innerhalb des System EWS verantwortlich sein können.

BEGRÜNDUNG

Äußere Zentrierhilfen sind bei Abständen von max. 1 m grundsätzlich geeignet, Sondenbündel zentrisch in das Bohrloch einzubringen (siehe 5.6). Sie können Fehlstellen in der Verfüllung begünstigen, müssen diese jedoch nicht zwangsläufig verursachen. Unklar ist, ob die Zentrierhilfen in Lockergesteinsbereichen in die Bohrlochwand eindringen, so dass keine Zentrierung erzielt wird.

7 Zusammenfassung

Die ungewollte Schaffung von hydraulischen Verbindungen zwischen Grundwasserstockwerken durch die Errichtung und den Betrieb von Erdwärmesonden mit unterschiedlichen Auswirkungen hat die Sensibilität in Bezug auf die Durchlässigkeit von Erdwärmesonden-Bohrungen verstärkt. Obwohl aktuelle Leitfäden und Merkblätter der Länder sowie verschiedene technische Richtlinien oder Regelwerke Forderungen nach einer vollständigen und dauerhaften Abdichtung enthalten, fehlt es bislang an einer Spezifizierung der von der Abdichtung zu erfüllenden Anforderungen.

Mit dem vorliegenden Bericht hat der Personenkreis „Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde“ eine Zusammenstellung der im „System Erdwärmesonde“ wirkenden Parameter und Einflussgrößen erarbeitet. Als „System Erdwärmesonde“ wird der durch die Bohrung veränderte Bereich des Gebirges, die Bohrlochwand, sämtliche ins Bohrloch eingebrachte Einbauten, die Verfüllbaustoffe sowie die Kontaktflächen von Einbauten und Verfüllbaustoffen verstanden.

Der Bericht spezifiziert erstmals Anforderungen an die Durchlässigkeit des „Systems Erdwärmesonde“. Er gibt Empfehlungen hinsichtlich der Errichtung und dem Betrieb von Erdwärmesonden ab, die dazu beitragen, dass die Anforderungen an die Durchlässigkeit erfüllt werden.

Folgende grundsätzliche Definitionen bzw. Ziele werden der Betrachtung vorangestellt:

- Durch den Einbau und Betrieb einer Erdwärmesonde darf die natürliche vertikale Durchlässigkeit der durchteuften Gesteine nicht nachteilig verändert werden.
- Die Forderungen einer Abdichtung beziehen sich nicht auf die Betriebsdauer einer Erdwärmesonde, sondern auf den Zeitraum, in welcher die Sonde im Untergrund verbleibt.
- Für die Beurteilung einer Abdichtung sind die System-Durchlässigkeitsbeiwerte entscheidend, welche sich i. d. R. von den Material-Durchlässigkeitsbeiwerten unterscheiden.

Der Bericht trägt zu einem besseren Verständnis der Zusammenhänge im „System Erdwärmesonde“ bei und unterstützt somit die Hersteller und Anwender der Technik sowie Entscheidungsträger in Behörden.

Da nach Ansicht des Personenkreises noch offene Fragen in Bezug auf das System Erdwärmesonde und dessen Durchlässigkeit bestehen, zeigt der Bericht Forschungsbedarf auf. Die Klärung der offenen Fragen soll die Qualität der Anlagen steigern und somit auch die Akzeptanz der Nutzung mit dieser Technik verbessern.

8 Literatur (zitiert)

- Adam, C., Gläßer, W. & Hölting, B. (2001): Hydrogeologisches Wörterbuch. – 3. Aufl.; Spektrum Akademischer Verlag.
- Adam, T. (2006): Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. - Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt
- Ad-hoc-AG Hydrogeologie (1997): Hydrogeologische Kartieranleitung. – Informationen aus den Bund/Länder-Arbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste. – Reihe G, Heft 2.
- Albrecht, I.; Frank, J. (2010): Vorversuche an Verpressmaterialien für Erdwärmesonden zum mechanisch-hydraulischen Verhalten bei Frost/Tau-Wechseln. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 05/2010, S. 28-33.
- Allan, M. (1997): Thermal Conductivity of Cementitious Grouts for Geothermal Heat Pumps. – FY 97 Progress Report 65129, Brookhaven National Laboratory, November 1997; Office of Geothermal Technologies, United States Department of Energy, Washington.
- Allan, M. & Philippacopoulos, A. (2000): Performance characteristics and modelling of cementitious grouts for geothermal heat pumps. – Proceedings World Congress 2000; Kyushu – Tohoku.
- Amt für Umweltschutz Stuttgart (2005): Nutzung der Geothermie in Stuttgart. - Landeshauptstadt Stuttgart, Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, Heft 1/2005: 90 S.; 29 Abb., 7 Tab., 4 Anlagen; Stuttgart. Internet: <http://www.stuttgart.de/img/mdb/publ/10128/8399.pdf>
- Anbergen, H., Frank, J., Albrecht, I. & Dittrich, H. (2011): Prüfzelle zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechsel-Widerstands von Verpressmaterial für EWS. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 10/2011, S. 38 - 42.
- Anbergen, H. (2015): Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechseleinflusses auf Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden – Dissertation; Technische Universität Darmstadt: 221 S.
- BAST (2009): Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Brücken- und Ingenieurbau; Heft B 70: 38 S, Bergisch-Gladbach
- Bauer, C.; Klammer, D.; Klima, K. (2004): Schädigung der Spritzbetonauskleidung des Bosrucktunnels durch SO₂-haltige Bergwässer unter Bildung von sekundärem Ettringit, Thaumasit und Gips; Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Graz, 2004. Internetlink: <http://iewarchiv.uni-graz.at/berichte/files/band9.pdf>
- Bassetti, S.; Rohner, E. & Matthey, B. (2005): Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden. - Schlussbericht der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie (SVG); Zürich.
- Bellmann, F. (2011): Grundlagen der Thaumasitbildung, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus Universität Weimar, 9.5.2011.
- Bossart, P., Meier, P. M., Moeri, A., Trick, T. & Mayor, J.-C. (2002): Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory, Engineering Geology, 66, 19 - 38.
- Burkhardt, F. (2014): Herausforderungen im kritischen Stockwerksbau in Baden-Württemberg: Lösungen und Hintergründe. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 02/2014, S. 25-29.

Dietrich, J. & Pufahl, C. (2007): Verfüllbaustoffe für Geothermiebohrungen – Möglichkeiten, Anforderungen und Grenzen (Teil 1). bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 05/2007, S. 38-41.

Dietrich, J., Pufahl, C. & Zorn, R. (2007): Verfüllbaustoffe für Geothermiebohrungen – Möglichkeiten, Anforderungen und Grenzen (Teil 2). bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 07-08/2007, S. 32-37.

DIN 4049-3 (1994): Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Berlin (Beuth).

DIN 4126 (2013): Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden. Berlin (Beuth)

DIN 4127 (2014): Erd- und Grundbau – Prüfverfahren für Stützflüssigkeiten im Schlitzwandbau und für deren Ausgangsstoffe. Berlin (Beuth)

DIN EN ISO 17628 (2013): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Geothermische Versuche – Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Boden und Fels unter Anwendung von Erdwärmesonden (ISO/DIS 17628:2013); Deutsche Fassung prEN ISO 17628:2013 - ENTWURF

DIN 18130-1 (1989): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts. Berlin (Beuth).

DIN EN ISO 22475-1 (Jan. 2007): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen - Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung; S. 127; Beuth Verlag, Berlin.

DIN CEN/TS 12390-9 (2006): Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Forts-Tausalz-Widerstand-Abwitterung; Deutsche Fassung. Berlin (Beuth)

DIN 52104-1 (1982): Prüfung von Naturstein; Frost-Tau-Wechsel-Versuch; Verfahren A bis Q. Berlin (Beuth) (Dokument zwischenzeitlich zurückgezogen)

Elbe, L. & Bayer, H.J. (2010): Bohrspülungen für HDD- und Geothermiebohrungen. – Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau Oldenburg; 272 S.; Vulkan-Verlag.

Environment Agency (2011¹¹): Environmental good practice guide for ground source heating and cooling (Anmerkung:

Ground Source Heat Pump Association (2011): Closed-loop Vertical Borehole – Design, Installation & Material Standards.

Herrmann, V. (2008): Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Hinterfüllung von Geothermiebohrungen mit Erdwärmesonden - Dissertation ; 218 S., Karlsruhe

Hölting B., Haertle, T., Hohberger, K.-H., Nachtigall, K.H., Villinger E., Weinzierl, E., Wrobel, J.-P. (1995): Konzept zur Ermittlung der Gesamtschutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. – Geol.Jb C63: 5-24

Hofmann, H. (2003): Einfluss konzentrierter Salzlösungen auf die physiko-chemischen Eigenschaften quellfähiger Tonminerale: Konsequenzen für den Einsatz von Bentonit als Versatzmaterial in einem Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Salzformationen, Dissertation Ruprecht-Karls-

¹¹ Environmental good practice guide for ground source heating and cooling; GEHO0311BTPA-E-E – Version 3; Jahresangabe der Veröffentlichung unsicher, da diese fortgeschrieben wird und nur mit einer Versionsnummer versehen ist.

Universität Heidelberg 2003. Internetlink: http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/3483/1/diss_hofmann_eBook.pdf

Homuth, S., Hamm, K. Rumohr, S. & Sass, I. (2008): In-Situ-Messungen zur Bestimmung geothermischer Untergrundwerte. Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 13: 241-251.

Huber, A. (2010): Forschungsprojekt Erdsondenoptimierung: Einfluss der Sonden hinterfüllung. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2010.

Illinois State Geological Survey (2004): The Environmental Effects of Ground-Source Heat Pumps – A Preliminary Overview. – Illinois State Geological Survey Open-File Series Report 2004-2.

International Ground Source Heat Pump Association (1991): Grouting Procedures for Ground-Source Heat Pump Systems. – Ground Source Heat Pump Publications, Oklahoma State University.

Kayser, J. (1993): Untersuchungen zum Quell- und Durchlässigkeitsverhalten von Quellung WP in Salzwasser; Institut für Grundbau und Bodenmechanik TU Braunschweig, Juni 1993

Köhler, S. (2005): Mechanismen der Thaumasitbildung in unterschiedlichen Bindemittelsystemen; Wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 5 (2005); TU München. Internetlink: http://www.cbm.bgu.tum.de/fileadmin/w00bdr/www/pdf/Kurzberichte/KB_005_04-2005__K_.pdf

Kluckert, K. D. (2007): Wie dicht ist dicht? - 22. Christian Veder Kolloquium, Heft 30 der Gruppe Geotechnik, Graz.

Kuckelkorn, J. M., Biank, M. & Reuß, M. (2010): Großversuchsstand zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit von Erdwärmesonden-Systemen, Tagungsband, 10. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, OTTI, Regensburg.

Kuckelkorn, J. M. & Reuß, M. (2013): Hydraulische Systemdichtheit und Frostbeständigkeit von Erdwärmesonden. – bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau. Sonderheft Geothermie 2013, S. 6 - 13.

Kreuter et al. (2010): Abschlussbericht zum Forschungsprojekt „Reduzierung der geologisch bedingten bohrtechnischen Risiken“. S. 121, KIT Karlsruhe

Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2002): Anforderungen an Erdwärmepumpen, 16./17.9.2002. Lehr, C. & Sass, I. 2013; Qualitätssicherung durch Druckprüfung nach DIN V 4279-7 und Durchflussprüfung an Erdwärmesonden - Der Geothermiekongress 2013" Essen, 12.-14. November 2013

Lenarduzzi, F. J., Radhakrishna, H. S. & Cragg, C. B. H. (2000): The Importance of Grouting to Enhance the Performance of Earth Energy Systems. - Technical and Symposium Papers of the ASHRAE, 106, 1: 424-434.

Locher, F.W. & Richartz, W. & Sprung, S. (1976): Erstarren von Zement – Teil I: Reaktion und Gefügeentwicklung. – Zement, Kalk, Gips 29: 435 – 442.

Lux, K.-N. u. Scheffel, I.: Temperaturmonitoring – Ein Verfahren zur Kontrolle der hydraulischen Wirksamkeit von Abdichtstrecken in Brunnen und Grundwassermeßstellen. In: bbr Wasser und Rohrbau, Heft 6, 2002.-Verlagsges. Rudolf Müller, Köln

Lux, K.-N., Baumann, K., Blumtritt, J. & Beck, W. (2012): Geothermie und Schutz des Grundwassers – ein Widerspruch? bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 10/2012, S. 44-51

- Michigan Department of Natural Resources & Environment Groundwater Division (2010): Best Practices for Geothermal Vertical Closed-Loop Installations.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2012): Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS); Stand 01.07.2012.
- Müllauer, W. E. (2013): Mechanismen des Sulfatangriffs auf Beton – Phasenneubildungen und Expansionsdrücke in Mörteln unter Na₂SO₄ Belastung, Diss. Technische Universität München, 15.10.2013. Internetlink: <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1163583/1163583.pdf>
- Müller, L. (2009): Frost-Tau-Widerstand von Verfüllbaustoffen für Erdwärmesonden - Beitrag „Der Geothermiekongress 2009 „ Bochum;
- Müller, L. (2009): Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 07-08/2009, S. 30-36.
- Neumann, T. & Rasch, S. (2012): Sulfatwiderstand von Spezialbaustoffen für Hohlraumverfüllungen und geothermischen Anlagen – bbr 04/2012; S. 54-59.
- Niederbrucker, R. & Steinbacher, N. (2008a): Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden - Amt der Oö. Landesregierung, Linz: 85 S.
- Niederbrucker, R. & Steinbacher, N. (2008b): Verfüllbaustoffe für Geothermiebohrungen – Möglichkeiten, Anforderungen und Grenzen (Teil 1). bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 05/2007, S. 38-41.
- Niederbrucker, R. & Steinbacher, N. (2008c): Verfüllbaustoffe für Geothermiebohrungen – Möglichkeiten, Anforderungen und Grenzen (Teil 2). bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 07/2007, S. 32-37.
- Niehues, B. (2002): Anforderungen und Problematiken von Abdichtungen in Bohrungen, Messstellen und Brunnen. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 03/2002, S. 22-25.
- Niehues, B., Baumann, K., Tholen, M. & Treskatis, C. (2003): Qualitätskriterien für Abdichtungssuspensionen im Brunnenbau. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 04/2003, S. 24-32
- Neumann, T. (2011): Sulfatwiderstand von Verfüllbaustoffen, Vortrag Geotherm Offenburg 2011
- Neumann, T. & Rasch, S. (2014): Markierte Verfüllbaustoffe für Erdwärmesonden und Brunnenabdichtungen. - bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau Sonderheft Geothermie 2015, S. 28 - 31.
- PK Geothermie (2011): Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern. Internetlink: http://www.infogeo.de/dokumente/download_pool/FS2011_Top_6.2_Anlage_PK_Geothermie_Bericht.pdf
- Rehau (2013): RAUGEO SONDE PE-XA – Die neue Generation – Die Lösung zur hydraulischen Systemdichtheit von Erdwärmesondenbohrungen (2-seitiger Flyer A13800 TYP 02.2013)
- Reuß, M. (2013): Beitrag “Geotherm 2013” Offenburg, 27. Februar 2013; Systemdichtigkeit von Erdwärmesonden – ein geeignetes Verfahren zur Bewertung von Verfüllbaustoffen
- Reuß, M. (2014): Prüfstand zur Untersuchung der Abdichtung von Erdwärmesonden-Bohrungen unter realitätsnahen Bedingungen. – Vortrag 7. Norddeutsche Geothermietagung, Hannover.

- Reuß, M. & Kuckelkorn, J. (2011): Systemdichtheit von Erdwärmesonden. – Vortrag Otti-Kolleg Oberflächennahe Geothermie Regensburg
- Riegger, M. (2010): Beitrag “Der Geothermiekongress 2010” Karlsruhe, 17.-19. November 2010; EWSplus (Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden) – Erste Ergebnisse
- Riegger, M. (2011): Beitrag “Geotherm 2011” Offenburg, 24.-25. Februar 2011; Realmaßstabs-experimente zur Qualitätsuntersuchung von Erdwärmesonden
- Riegger, M. & Rolker, J. (2014): EWS-tech Projektübersicht und Ergebnisse zur Visualisierung des Verfüllvorgangs von Erdwärmesonden. - Beitrag bei Der Geothermiekongress DGK 2014. Essen, 11.-13. November 2014
- Riegger, M. 2013: Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben EWSplus: Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden; Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme Stuttgart. Internetlink: <http://www.solites.de/download/literatur/2013-09-10%20EWSplus%20Abschlussbericht.pdf>
- Rohner, E. & Rybach, L. (2001): Hinterfüllung und Druckverhältnisse von Erdwärmesonden. Bulletin Geothermie CH, Nr. 29, S. 10-14.
- Rubbert, T. (2003): Ringraumverpressmittel – Wirksamkeit und Verarbeitung. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 09/2003, S. 19-27.
- Rumohr, S. (2013): Anforderungen des Gewässerschutzes + geothermisches Potenzial – Rahmenbedingungen für Errichtung und Betrieb geothermischer Anlagen. - Vortrag beim Dialogforum der Ingenieurkammer Hessen am 11.06.2013 in Darmstadt.
- Rumohr, S. & Schäfer, I. (2015): Anforderungen an die Abdichtung von Erdwärmesondenbohrungen. Vortrag Geotherm 2015.
- Schöblier, B., Thewes, M., Budach, C., Zenner, B. (2012): Rheologische Eigenschaften von Bentonit-suspensionen - Der Einfluss von Misch- und Quellzeiten,- bi_ UmweltBau 2/12 Kiel.
- Schwotzer, M. (2008): Zur Wechselwirkung zementgebundener Werkstoffe mit Wässern unterschiedlicher Zusammensetzung am Beispiel von Trinkwasserbehälterbeschichtungen. –Diss., Karlsruhe
- Sitz, P. (1997): Materialuntersuchungen für Mehrkomponentensysteme auf Ton/ Bentonit-Basis für Dichtung und Lastabtrag, mit hohem Rückhaltevermögen, für den langzeitsicheren Verschluss von UTD und Endlagern im Salinar- Abschlußbericht, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau, 1997.
- Taylor, H.F.W. (1992): Cement Chemistry.- San Diego (Academic Press).
- Thienel, K.C. (2008): Werkstoffe des Bauwesens ;Dauerhaftigkeit von Beton, Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens Frühjahrstrimester 2008 <http://www.unibw.de/bauw3/lehre/skripten/1dauerhaftigkeitvonbeton2008.pdf>
- Treskatis, C. (2003): Neue Erkenntnisse zur Wirksamkeit von Abdichtungen im Bohr- und Brunnenbau. - gwf - Wasser|Abwasser 144 Nr. 13, S. 85-92.
- Treskatis, C. (2015): Abdichtung von Erdwärmesonden: Problemstellung und Lösungsansätze. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 05/2015, S. 56 62.
- Urban, D. (2013): Arbeitshilfen für den Brunnenbauer: Bohrtechnik für Brunnenbau und Geothermie. – 2. Vollständig überarb. Auflage; 596 S.

Verband Kunststoff-Rohre und Rohrleitungsteile (VKR), 2007 – Erdverlegte Druckrohrleitungen aus Polyethylen PE 80 und PE 100, Aarau, Schweiz (www.vkr.ch)

VDI 4640 Blatt 1 (2010): Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte

VDI 4640 Blatt 2 (2001): Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen.

VDI 4640 Blatt 2 (2015): Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. – ENTWURF.

Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2014): Zement-Merkblatt Betontechnik B 9, 9.2014. - Expositionsclassen für Betonbauteile im Geltungsbereich des EC2. Internetlink: <http://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkblaetter/B9.pdf>

Voelker, H. & Voutta, A. (2013): Überprüfung der Wirksamkeit einer Erdwärmesondensanierung. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 02/2013, S. 30-35.

Voelker, H. & Voutta, A. (2014): Erdwärmesonden werden „transparent“ – dank neuer Verfüllbaustoffe und zugehöriger Messtechnik. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 11/2014, S. 72-79

Weidlich, I. & Huther, H. (2014): 65. Deutsche Brunnenbauertage und BAW-Baugrundkolloquium 7. – 9. Mai 2014 im Bau-ABC Rostrup / Bad Zwischenahn

Wenzel, B. (2012): Beitrag: „Frostfreie Auslegung von Erdwärmesondenanlagen - Auswirkung auf Technik und Betrieb von Solewärmepumpen“, 5. Norddeutscher Geothermietag 2012; Hannover.

Zorn, R., Steger, H., Mielenz, O., Timmermans, T., Kölbel, T., Walker-Hertkorn, S. & Fechner, W. (2008): Hinterfüllung von Erdwärmesonden mit Tonpellets. – bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau - Sonderheft 2009, S. 54-79.

9 Literatur (nicht zitiert)

Albrecht, I. & Frank, J. (2010): Vorversuche an Verpressmaterialien für Erdwärmesonden zum mechanisch-hydraulischen Verhalten bei Frost-Tauwechsel – Beitrag zum „Der Geothermiekongress 2010“ Karlsruhe

Allan, M. (1999): Cementitious grouts 101. In: Outside the loop – A Newsletter for Geothermal Heat Pump Designers and Installers, Vol. 2, No. 2

Allan, M. L. & Kavanaugh, S. P. (1999): Thermal Conductivity of Cementitious Grouts and Impact on Heat Exchanger Length Design for Ground Source Heat Pumps. - HVAC&R Research 5 (2): 87-98.

Allan, M. L. & Philippacopoulos, A. J. (2000): Performance Characteristics and Modelling of Cementitious Grouts for Geothermal Heat Pumps. Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu – Tohoku, Japan, pp. 3355-3360.

Anbergen, H., Lehr, C., Frank, J., Müller, L. und Sass, I. (2013): Verpressungen in der oberflächennahen Geothermie – Qualitätssicherung im Feld und im Labor – Beitrag „Der Geothermiekongress DGK 2013“ Essen: 12 S.

Anbergen, H., Reuß, M., Kuckelkorn, J., Frank, J., Müller, L. und Sass, I. (2014): Hydraulische Integrität des Systems Erdwärmesonde,- Beitrag “Der Geothermiekongress DGK 2014” Essen, 11.-13. November 2014.

AWEL (2007): Überprüfung der Bohrloch-Ringraumverfüllung bei Erdwärmesonden, 21 Bohrungen ausgeführt 2005 – 2006 im Kanton Zürich (Schlussbericht). – Bericht des Geologischen Büro Dr. Lorenz Wyssling AG im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (Kanton Zürich).

Baumann, K. (2010): Erste Erfahrungen bei der bohrlochgeophysikalischen Überprüfung von Erdwärmesonden. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 05/2010, S. 34-37.

Carlson, S. W. (2000): GSHP Bore Field Performance Comparisons of Standard and Thermally Enhanced Grout. - Technical and Symposium Papers of the ASHRAE 106, (2): 442-446.

Deutsches Institut für Bautechnik (2001): Merkblatt für die Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser. - Berlin.

Fichter, C. (2014): Schädigung der Verrohrung und der Zementation geothermischer Bohrungen und Werkstoffempfehlungen. – In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H. & Neu, T. (Eds.): Handbuch Tiefe Geothermie: S. 595-608.

FIGAWA (2012): Handout zur Informationsveranstaltung „Abdichtung von Brunnen und Grundwassermessstellen“, Kassel

Flohr, C. (2005): Frost- bzw. Frost-Taumittel-Widerstand von Beton - Diplomarbeit, 61 S.

Ground Source Heat Pump Association (2011): Closed-loop Vertical Borehole Design, Installation & Materials Standards.

Haka Gerodur 2010: GEROtherm® Erdwärmesysteme - Technisches Handbuch; 28 S.

HeidelbergCement (2011): ThermoCem Plus – damit die ganze Wärme oben ankommt; 20 S.

Hohberg, I. (2003): Charakterisierung, Modellierung und Bewertung des Auslaugverhaltens umweltrelevanter, anorganischer Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen. – Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau (DAfStb), 542: 173; Berlin, (Beuth Verlag).

- International Ground Source Heat Pump Association (2000): Grouting for vertical Geothermal Heat Pump Systems. Engineering Design and Field Procedures Manual. – Ed. Carl Hiller.
- Kuckelkorn, J. M. (2010): Großversuchstand zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit von Erdwärmesonden-Systemen, Tagungsband Otti Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie 2010, Linz.
- Kübert, M, Kuntz, D. & Walker-Hertkorn, S. (2013): Die Temperaturentwicklung im Ringraum einer Erdwärmesonde, 13. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, OTTI, Neumarkt i. d. Oberpfalz (2013).
- Lenarduzzi, F. J., Radhakrishna, H. S. & Cragg, C. B. H. (2000): The Importance of Grouting to Enhance the Performance of Earth Energy Systems. - Technical and Symposium papers of the ASHRAE, 106 (1): 424-434.
- LGRB (2010): Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br., Sachstandsbericht vom 01.03.2010, Az.: 94-4763//10-563.
- Lura, P. (2010): Vorlesungsmaterial
http://www.ifb.ethz.ch/education/bachelor_werkstoffe1/2010FS/Vorlesung12_Zement_Folien
- Martin, C.D., Lanyon, G.W., Blumling, P., Mayor, J.C. (2003): The excavation disturbed zone around a test tunnel in the Opalinus Clay. Tunnelling Association of Canada Annual Publication.
- Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg [Hrsg.] (2001): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden.- 3., Stuttgart.
- Müller, L. (2004): Geotechnische Untersuchungen zur Optimierung der geothermischen Energiegewinnung mit Erdwärmesonden. – Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen 89: 49-59.
- Philippacopoulos, A. J. & Berndt, M. L. (2001): Influence of debonding in ground heat exchangers used with geothermal heat pumps. – Geothermics 30, S. 527 – 545.
- Reuß, M. & Busso, A. (2009): Einfluss von Bohrloch und Sondengeometrie auf den Wärmetransport in Tagungsband 9. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie – Erdgekoppelte Wärmepumpen und unterirdische thermische Energiespeicher, Bad Staffelstein.
- Riegger, M., Heidinger, P., Lorinser, B. & Stober, I. (2012): Auswerteverfahren zur Kontrolle der Verfüllqualität in Erdwärmesonden mit faseroptischen Temperaturmessungen. – Grundwasser 17 (2), 91-103.
- Rohner, E., Rybach, L. & Salton, M. (2001): Schlussbericht: Lebensdauer von Erdwärmesonden in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung. - erstellt im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft.
- Rumohr, S. (2011): Verfüllbaustoffe für Erdwärmesondenbohrungen: eine kritische Betrachtung bestehender Nachweise der Frost-Tau-Wechsel-Beständigkeit. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 04/2011, S. 32-36.
- Schellhorn, M. (2004): Tonschüttungen für hochqualitative Abdichtungen im Brunnenbau. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 10/2004, S. 33-37.

Schmid, S., Wolff, H. & Oppelt, J. (2002): Verbesserung des Wärmeübergangs vom Gebirge auf das Wärmeträgerfluid beim Untertägigen geschlossenen geothermischen Wärmetauscher. – Projekt Untertägig Geschlossener Geothermischer Wärmetauscher: 393-400.

Smith, M. D. & Perry, R. L. (1999): Borehole Grouting: Field Studies and Thermal Performance Testing. - Technical and Symposium Papers of the ASHRAE, 105 (1): 451-457. Stark, J. & Wicht, B. (1996): Umweltverträglichkeit von Baustoffen.- Schriften der Bauhaus Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, 104: 99; Weimar.

Tholen;M. (keine Jahresangabe): Artikel »Schadensfälle bei EWS-Anlagen <http://www.bfi-zeiser.de/presse.html> (Abruf Nov. 2014)

Tholen & Walker-Hertkorn (2008): Arbeitshilfen Geothermie – Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen, Wirtschafts und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn 226 S.

Trätzl, T. (2004): Suspensionen – Einbringverfahren und Qualitätskontrollen. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 04/2004, S. 21-25.

Treskatis, C. (2001): Abdichtungen im Brunnenbau. Wasserwirtschaft Wassertechnik mit Abwassertechnik 03/2001, S. 47-51.

Urban, D. (2007): Verpressarbeiten bei Erdwärmesonden. – Vortrag Landesfachgruppensitzung Hannover. 49 S.

Urban, D. (2010): Druckprüfungen für Erdwärmesonden – Teil 1. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 02/2010, S. 50-57.

Urban, D. (2010): Druckprüfungen für Erdwärmesonden – Teil 2. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 03/2010, S. 48-51.

Urban, D. (2013): Seminarunterlagen Fortbildung: Leitfaden Erdwärmenutzung in der Praxis; Rostrup

Voigt,T.(1995): Frosteinwirkung auf mineralische Deponieabdichtungen. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 47,. Zusammenfassung Heft-Nr. 47 <http://www.igb.tu-bs.de/>

Watzel. R. (2012): Beitrag: „20. Symposium Felsmechanik und Tunnelbau“, Stuttgart, 06.-07. März 2012; Nutzung von Erdwärme in Baden-Württemberg

Zhang, Q. & Murphy, W. E. (2000): Measurement of Thermal Conductivity for Three Borehole Fill Materials used for GSHP. - Technical and Symposium Papers of the ASHRAE, 106 (2): 434-441.