

**Ingenieurgeologische Untersuchungen
zur Hinterfüllung von Geothermie-Bohrungen
mit Erdwärmesonden**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER NATURWISSENSCHAFTEN

von der Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)
genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Geol. Verena Johanna Herrmann
aus Feuchtwangen

Tag der mündlichen Prüfung: 14.11.2008

Hauptreferent: Prof. Dr. Dr. K. A. Czurda

Koreferent: Dr. habil. R. Haus

Karlsruhe 2008

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit im Bereich der oberflächennahen Geothermie sind Untersuchungen an Baustoffen, die zur Verfüllung von Erdwärmesonden-Bohrungen eingesetzt werden. Die Eignung für diesen Anwendungsbereich steht in Frage, da bislang Erkenntnisse hinsichtlich des Frost-Tau-Verhaltens sowie der Langzeitbeständigkeit fehlten. Dies gilt im Hinblick auf den zyklischen Betrieb der Anlagen, die zur Bereitstellung von Heizwärme, zur Warmwasserbereitung sowie zur Klimatisierung von Gebäuden in Kombination mit einer Wärmepumpe verwendet werden.

Die qualitativ hochwertige Ausführung der erdgekoppelten Anlagenteile ist - neben einer guten Planung - der Schlüssel zu einer effizienten, kostengünstigen Nutzung der Erdwärme als erneuerbare Energieform. Die Langzeitbeständigkeit sowie der sichere Betrieb der Erdwärmesonden ist unabdingbare Voraussetzung für die Genehmigung und den Schutz der Ressourcen Boden und Grundwasser. Hierfür bedarf es einer guten Qualitätskontrolle mit klar definierten Kennwerten zur Überwachung der eingesetzten Hinterfüllkonzepte mit geeigneten Prüfmethoden.

Die eingesetzten Baustoffe müssen vielfältigen Anforderungen genügen. Ein guter Kontakt zum umgebenden Untergrund, die Abdichtung zur Oberfläche hin sowie das Unterbinden von hydraulischen Kurzschlüssen (Grundwasservermischungen) sind wichtige Genehmigungsvoraussetzungen. In der Praxis werden Erdwärmesonden als geschlossene Wärmeübertragungssysteme in Bohrungen - wie im Brunnenbau üblich - mit Hinterfüllbaustoffen auf Ton/Zement-Basis sowie thermisch verbesserten Baustoffen, die speziell für Erdwärmesonden entwickelt wurden, verpresst. Da die Frosteinwirkung auf die Hinterfüllung systembedingt durch die Zirkulation frostschutzhaltiger, stark unterkühlter Fluide für den Wärmeentzug erfolgt, muss die Frostbeständigkeit der Baustoffe sichergestellt sein. Zudem ist durch den Betrieb der Erdwärmeeinrichtungen bei Ein- und Ausschaltungen der Wärmepumpen mit zyklischen Gefrier- und Auftauprozessen zu rechnen.

Strukturelle Schädigungen der Prüfkörper durch die Frost-Tau-Wechselbelastungen sind bei Laborversuchen und Versuchen in einem Geothermie-Prüfstand in einem größeren Maßstab zu beobachten. Das Gefüge der zementgebundenen Baustoffe wird durch die Bildung von Eislinsen und die damit verbundene Volumenausdehnung irreversibel geschädigt, so dass sich mikro- und makroskopisch sichtbare Risse bilden. Als weitere Methode zur Beurteilung der Frostschädigungen wurden Ultraschallmessungen durchgeführt; diese zeigen verminderte Schalllaufzeiten durch Reflexionen an den frostbedingt entstandenen Rissen und anderen Fehlstellen. Auch die Wärmeleitfähigkeiten der Hinterfüllbaustoffe nehmen durch die Gefügeschädigung ab. Die Veränderungen der Porenverteilung hin zu größeren durchflusswirksamen Kapillarporen führt zu erhöhten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerten nach Frosteinwirkung.

Im Zuge der Prüfung des Versuchskonzeptes mit verschiedenen, an die Fragestellungen angepassten, Versuchen wurden neu entwickelte Hinterfüllbaustoffe mit frostsicheren Eigenschaften und guter Langzeitbeständigkeit hergestellt. Es zeigt sich anhand dieser Baustoffe im Zuge des 'Proof-of-Concept', dass es möglich ist Hinterfüllungen zu realisieren, die keine Risse durch Frost-Tau-Wechsel und keine Verschlechterung der Prüfparameter für die Wärmeleitfähigkeit und Wasserdurchlässigkeit zeigen.

Untersuchungen zum Auslaugungsverhalten der Hinterfüllbaustoffe, das eine wichtige Rolle für die Umweltverträglichkeit spielt, zeigen, dass die Einbringung der zementhaltigen Suspensionen zu pH-Wert-Erhöhungen im Nahbereich des Bohrloches führt. Des Weiteren werden Inhaltsstoffe im Kontakt mit Wasser ausgelaugt. Die Zusammensetzung dieser Eluate hängt von den verwendeten Materialien, vor allem jedoch von den verwendeten Zementen ab.

Bei nicht frostsicheren Hinterfüllungen können durch Volumenänderungen des Porenwassers bzw. des (Grund-) Wassers im Umfeld der Sonde Risse und Wasserwegsamkeiten in der Bohrlochhinterfüllung entstehen. Diese Prozesse begünstigen das Ablösen der Sondenrohre von der umgebenden ausgehärteten Ringraumfüllung und können den Wärmetransport vom Gestein zur Sonde verschlechtern, was zu Leistungseinbußen bis zum Versagen der Anlagen führen kann. Zudem ist

bei einer Vermischung von Grund- und/oder Oberflächenwässern ein ausreichender Grundwasserschutz nicht mehr gewährleistet. Da Erdwärmebohrungen meist im Bereich der Infrastruktur von Gebäuden (Zufahrten, Parkplätze) ausgeführt werden, können, neben Primärschäden an den Sondenrohren bzw. der Hinterfüllung durch die Bildung von Eislinsen/-keilen, zudem Sekundärschäden in Form von geotechnischen Problemen verursacht werden.

Da bisher klar definierte Prüf-/Kennwerte für die Qualitätskontrolle fehlen, vor allem im Hinblick auf die Frostbeständigkeit, wurden im Rahmen dieser Forschungsarbeit auch geeignete Testmethoden für die Baustoffe geprüft und modifiziert. Die Methoden zur Überwachung sowie Qualitätskontrolle gilt es dringend zu optimieren, da sich in der Praxis vielfach Mängel an Fachkenntnis sowie in Ausrüstung, Ausführung und Dokumentation zeigen, die nach dem Ausbau nicht mehr nachzuvollziehen und zu beseitigen sind.

Abstract

Borehole heat exchangers are installed to enable the use of shallow geothermal energy for domestic heating and cooling supply. Vertical heat exchangers are a reliable and common technique to make geothermal heat accessible. Well-engineered heat pump technology already exists, yet the quality of borehole heat exchanger constructions could be improved. Grouting of the borehole plays a prominent role shortly after the heat transfer pipes have been installed. Cementitious grouts are supposed to ensure the performance of these systems for a very long time. According to the applicable regulations, the grouting of the borehole must secure the heat transfer from the rock to the heat carrier fluid, seal the borehole near the surface to prevent contamination and seal penetrated aquifers.

Most of the boreholes in Germany are either grouted with clay/cement or incorporate specially designed thermally enhanced grouts. In practice, quality problems sometimes appear due to the lack of suitable equipment, construction and documentation. Presently, there are few quality checks after the installation of borehole heat exchangers in the ground.

During the operation of ground coupled heat pumps used for pure heat extraction, the circulating heat carrier fluid (water containing alcohol) in the heat exchanger pipes is cooled to temperatures below zero. Grouts that are not frost proof could crack and become damaged due to the expansion of freezing pore water. This can initially lead to less efficient heat transport, and may subsequently result in a fully damaged system with unwanted mixing of groundwater.

Laboratory work shows that established grouts become damaged in freeze-thaw-tests. Therefore, it is clear that the materials used in compliance with the current standards are inadequate for practical use. Heating and cooling cycles have been simulated and the temperature distribution in the heat pipes, the grout and the surrounding soil has been logged in a small laboratory scale test.

New grouting materials were designed and tested. It is possible to create freeze-thaw resistant grouts that are suitable for application in boreholes for ground source heat exchangers. These new grouts show no damage due to freezing and thawing and keep their properties (thermal conductivity, impermeability, stability). Furthermore, recommendations concerning testing methods and quality control are given.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe (TH) unter Leitung von Herrn Prof. Dr. Dr. Kurt Czurda. Ihm gilt mein besonderer Dank für die Vergabe des Themas und die fachliche Betreuung. Herrn Privatdozent Dr. habil. Reiner Haus von der Dorfner ANZAPLAN GmbH in Hirschau danke ich für die Übernahme des Koreferates und die langjährige Unterstützung aus seinem Hause.

Ein Promotionsstipendium der Landesgraduiertenförderung des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg ermöglichte die Bearbeitung des Themas; einen weiteren wichtigen Beitrag zur finanziellen Unterstützung leistete die Klimaschutzinitiative **CO₂NTRA** der Saint-Gobain ISOVER G + H AG in Ludwigshafen.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Heinz Hötzl vom Lehrstuhl für Angewandte Geologie für seine wohlwollende Unterstützung sowie allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Angewandte Geologie für die nette Arbeitsatmosphäre. Ein besonderer Dank geht an Nadine Göppert, Jochen Klinger, Petra Schlager und Maïke Woernle. Marc Ludewig danke ich für seine geduldige Hilfe bei Computerproblemen und Dr. Hagen Steger für seine Unterstützung bei Versuchsaufbauten und technischen Problemen. Ein weiterer Dank geht an Dr. Roman Zorn (European Institute for Energy Research) und Christoph Priess (Dorfner ANZAPLAN GmbH) für Ihre Unterstützung.

Für wertvolle Anregungen, fachliche Unterstützung und interessante Diskussionen danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller, Herrn Dr. Dr. Herold, Herrn Dr. Guse sowie Herrn Eduard Langner vom Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe.

Viele Menschen in meinem persönlichen Umfeld haben mich immer sehr unterstützt, Ihnen allen gilt mein Dank. Im Besonderen bedanke ich mich bei Else und Heinz Mayer. Der größte Dank gilt meinen Eltern Gertrud und Richard Herrmann für Ihre wertvolle, langjährige Unterstützung und Ermutigung in schwierigen Situationen.

Für Sven Mayer, den Mann an meiner Seite.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	I
ABSTRACT	IV
VORWORT	VI
INHALTSVERZEICHNIS	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IX
TABELLENVERZEICHNIS	XII
FORMELVERZEICHNIS	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Nutzung der oberflächennahen Erdwärme	1
1.2 Forschungsgegenstand und Zielsetzung	2
2 Grundlagen	5
2.1 Ingenieurgeologische Grundlagen	5
2.1.1 Grundlagen der Geothermienutzung	5
2.1.1.1 Einführung	5
2.1.1.2 Systemkomponenten	7
2.1.1.3 Genehmigungsrechtliche Grundlagen	13
2.1.1.4 Umwelteinwirkungen	15
2.1.2 Bohrloch-Hinterfüllung	20
2.1.2.1 Stand der Technik	20
2.1.2.2 Prüfmethoden	31
2.1.2.3 Umfrage Erdwärme-Bohrfirmen	37
2.2 Betontechnische Grundlagen	41
2.2.1 Überblick	41
2.2.2 Phasen der Gefügebildung	45
2.2.2.1 Zementchemie	45
2.2.2.2 Porenstruktur	51
2.3 Mechanismen der Frostschädigung	55
2.3.1 Grundlagen	55

2.3.2	Boden und Gestein.....	55
2.3.3	Zementgebundene Baustoffe	58
3	Material und Methoden.....	67
3.1	Untersuchungskonzept.....	67
3.2	Untersuchte Hinterfüllmassen	69
3.3	Chemische und mineralogische Untersuchungsmethoden..	72
3.4	Physikalische Untersuchungsmethoden	75
3.5	Frostbeständigkeit der Hinterfüllmassen	83
3.5.1	Frost-Tau-Wechselversuche	84
3.5.2	CIF-Test-Geothermie	85
3.6	Gefügeuntersuchungen	97
3.7	Untersuchungen Gesamtsystem: Prüfstand-Geothermie ..	100
3.7.1	Theoretische Grundlagen.....	100
3.7.2	Konzeption	103
4	Ergebnisse.....	107
4.1	Zusammensetzung der Hinterfüllmassen.....	107
4.2	Frost-Tau-Beständigkeit der Hinterfüllmassen.....	129
4.3	Neue Kriterien zur Frostbeständigkeit	152
4.4	Untersuchungen Gesamtsystem: Prüfstand Geothermie...	157
4.4.1	Versuche und Randbedingungen.....	157
4.4.2	Integritätsuntersuchungen.....	158
4.4.3	Temperaturausbreitung	159
4.4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse am Prüfstand	164
5	Bewertung	166
6	Handlungsempfehlungen für die ingenieurgeologische/ geothermische Praxis.....	175
7	Literaturverzeichnis.....	180

Anhang

Anhang A: Ergebnisse der CIF-Tests Geothermie

Anhang B: Porenverteilung Quecksilberporosimetrie

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Systemkomponenten einer Erdwärmeanlage.....	8
Abb. 2-2: Prinzipskizze einer ausgebauten Erdwärmebohrung	10
Abb. 2-3: Skizze möglicher Probleme beim Verpressvorgang	12
Abb. 2-4: Ablaufschema zur Bewertung von Bauprodukten.....	16
Abb. 2-5: Wechselwirkungen Gestein-Hinterfüllung-Sondenrohr.....	19
Abb. 2-6: Querschnitt eines Erdwärmesonden-Bohrlochs	24
Abb. 2-7: Hinterfüllmasse mit Schadensbildern	25
Abb. 2-8: Schadensfälle Erdwärmennutzungen: Vereisung (1)	28
Abb. 2-9: Schadensfälle Erdwärmennutzungen: Vereisung (2)	28
Abb. 2-10: Bilder der Modellversuche mit Farbtracern.....	30
Abb. 2-11: Art der Verpressbaustoffe	39
Abb. 2-12: Bildung der Hydratphasen und Gefügeentwicklung	48
Abb. 2-13: Schem. Darstellung gängigste Modelle CSH-Gel.....	53
Abb. 2-14: Mikroeislinienmodell nach SETZER (2001)	65
Abb. 2-15: Gefrieren von Porenwasser	66
Abb. 3-1: Skizze der Durchströmungszellen	81
Abb. 3-2: Ablauf der Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfung.....	82
Abb. 3-3: PE-Flaschen zur Prüfkörperherstellung.....	87
Abb. 3-4: Skizze der Prüfruhe des CIF-Tests.....	88
Abb. 3-5: Messaufbau zur Bestimmung der Ultraschalllaufzeit.....	89
Abb. 3-6: Skizze modifizierter 12-stündiger Temperaturverlauf	90
Abb. 3-7: Durchführung eines Geothermal Response Test	102
Abb. 3-8: Skizze des Geothermie-Prüfstands	104
Abb. 3-9: Prüfstand Geothermie in der Klimakammer.....	105
Abb. 4-1: Röntgendiffraktogramme der Mischungen C und D	108

Abbildungsverzeichnis

Abb. 4-2: pH-Werte im Batch-Versuch.....	113
Abb. 4-3: Werte der elektr. Leitfähigkeit im Batch-Versuch.....	113
Abb. 4-4: Konzentrationen eluierte Kationen (Abb. 4-4/A-E).....	114
Abb. 4-5: Konzentration eluierte Kaliumionen	117
Abb. 4-6: Konzentration eluierte Natriumionen.....	118
Abb. 4-7: Konzentration eluierte Calciumionen	118
Abb. 4-8: Konzentration eluierte Magnesiumionen.....	119
Abb. 4-9: Messergebnisse des Fließverhaltens der Baustoffe	122
Abb. 4-10: Wärmeleitfähigkeiten der Baustoffe	123
Abb. 4-11: Abnahme der Wärmeleitfähigkeit	125
Abb. 4-12: Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte der Baustoffe	127
Abb. 4-13: Ergebnisse einaxiale Druckfestigkeitsmessungen.....	128
Abb. 4-14: Mischung C vor Gefrieren	129
Abb. 4-15: Mischung B und Mischung G im Grundzustand.....	130
Abb. 4-16: Mischung C im Dünnschliff vor Gefrieren.....	131
Abb. 4-17: Mischung F im Dünnschliff vor Gefrieren	132
Abb. 4-18: Messung der Ultraschallgeschwindigkeit Mischung D	133
Abb. 4-19: Messung der Ultraschallgeschwindigkeit Mischung E	134
Abb. 4-20: Messung der Ultraschallgeschwindigkeit Mischung G....	134
Abb. 4-21: Aufnahme der Mischung A mit dem REM	136
Abb. 4-22: Aufnahme der Mischung G mit dem REM.....	136
Abb. 4-23: Porenverteilung der Mischungen B bis H.....	137
Abb. 4-24: Porenverteilung Mischung D im Grundzustand.....	138
Abb. 4-25: Porenverteilung Mischung D und Mischung G.....	139
Abb. 4-26: Probekörper Mischung D mit HDPE-Rohren.....	140
Abb. 4-27: Probekörper der Mischung A	144
Abb. 4-28: Probekörper der Mischung C	145

Abbildungsverzeichnis

Abb. 4-29: Probekörper der Mischung E	146
Abb. 4-30: Probekörper der Mischung G.....	147
Abb. 4-31: Schema Frostkriterien CIF-Test-Geothermie.....	154
Abb. 4-32: Versuch 1: Sondenrohre mit Hinterfüllung	158
Abb. 4-33: Versuch 1: Querschnitt des Temperaturfeldes	160
Abb. 4-34: Versuch 1: Querschnitt des Temperaturfeldes	161
Abb. 4-35: Versuch 3: Querschnitt des Temperaturfeldes	163

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Vorgehensweise bei der Qualitätsprüfung.....	32
Tabelle 2-2: Fragebogen für Erdwärmesonden-Bohrfirmen	38
Tabelle 2-3: Definition verschiedener Arten v. Injektionsmitteln	43
Tabelle 2-4: Expositionsclassen (EK) nach DIN EN 206-1	44
Tabelle 2-5: Hydratationswärme der einzelnen Klinkerphasen	49
Tabelle 2-6: Einteilung der Poren (aus ALIGIZAKI 2006)	54
Tabelle 2-7: Porenklassifikation nach SETZER (2002)	61
Tabelle 3-1: Baustoffe für die Hinterfüllung von EWS	70
Tabelle 3-2: Baustoffe für Laborversuche und Prüfstand	71
Tabelle 3-3: Prüfkörper-Geometrien für Frost-Tau-Versuche	83
Tabelle 3-4: Werte für Ultraschallgeschwindigkeiten	96
Tabelle 4-1: Wassergehalte der Mischungen	110
Tabelle 4-2: Kationenkonzentrationen Königswasseraufschluss ...	111
Tabelle 4-3: Konzentrationen eluierte Anionen Mischung D	117
Tabelle 4-4: Korndichten, Trockendichten und Porenanteile.....	120
Tabelle 4-5: pH-Werte und Dichte der Suspensionen	121
Tabelle 4-6: Messung der Auslaufzeit mit dem Marsh-Zylinder	121
Tabelle 4-7: Typische Wärmeleitfähigkeiten Luft und Wasser	124
Tabelle 4-8: Vergleich der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte	126
Tabelle 4-9: Wasseraufnahme der Probekörper.....	148
Tabelle 4-10: Ultraschalllaufzeiten und E-Modul der Prüfkörper	149
Tabelle 4-11: Abwitterung der Prüfkörper	150
Tabelle 4-12: Flüssigkeitsaufnahme der Prüfkörper	151
Tabelle 4-13: Versuche und Versuchsbedingungen im Prüfstand ...	157

Formelverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
Cl^-		Chlorid
C_2S		Dicalciumsilikat
C_3S		Tricalciumsilikat
C_3A		Tricalciumaluminat
$\text{C}_2(\text{A},\text{F})$		Calciumaluminatferrit
$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$		Calciumsilikathydrat
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		Gips
CaSO_4		Anhydrit
$\text{Ca}(\text{OH})_2$		Calciumhydroxid
$\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$		Trisulfat (Ettringit)
$\text{C}_4\text{ASH}_{12}$		Monosulfat
NO_4^{2-}		Nitrat
PO_4^{2-}		Phosphat
SO_4^{2-}		Sulfat
A	$[\text{mm}^2]$	Prüfoberfläche
A	$[\text{m}^2]$	durchströmte Fläche
CL	$[\text{m}/\text{s}]$	Schallgeschwindigkeit
d	$[\text{m}]$	Netzebenenabstand
i	$[-]$	hydraulisches Gefälle
l	$[\text{m}]$	Länge des Heizdrahtes
l	$[\text{m}]$	Fliessstrecke
l_c	$[\text{mm}]$	Durchschallungstrecke aus $l_{c1} + l_{c2}$ im Ankopplungsmedium
$m_{s,n}$	$[\text{g}]$	Gesamtmasse des getrockneten abgewitterten Materials nach n Frost-Tau-Wechseln, auf 0,1 g gerundet
$m_{s,before}$	$[\text{g}]$	Gesamtmasse des getrockneten abgewitterten Materials bei der vorherigen Messung

Symbol	Einheit	Beschreibung
m_{s+f}	[g]	Masse des getrockneten Filters mit abgewittertem Material, auf 0,1 g gerundet
m_f	[g]	Masse des trockenen Filters auf 0,1 g gerundet
m_{susp}	[g]	Masse der Suspension
n	[-]	Ordnungszahl der Interferenz (ganzzahlig > 0)
n	[-]	Porenanteil
P	[bar]	Druck
Q	$\frac{m^3}{s}$	Durchfluss
\dot{Q}	[W]	Wärmestrom
r	[nm]	Porenradius
r_p	[nm]	Porenradius
$R_{H,C}$	[nm]	hydraulischer Radius
$R_{u,n}$	[-]	relativer dynamischer E-Modul
S_n	[g/m ²]	Masse des getrockneten abgewitterten Materials bezogen auf die Prüffläche nach dem n-ten Frost-Tau-Wechsel
t_c	[μs]	Durchschallungszeit im Ankopplungsmedium
t_{cs}	[μs]	Gesamt-Durchschallungsgeschwindigkeit nach kapillarem Saugen, vor erstem Frost-Tau-Wechsel
t_n	[μs]	Gesamt-Durchschallungsgeschwindigkeit nach n Frost-Tau-Wechseln
T_1, T_2	[K]	Temperatur zum Zeitpunkt t_1 bzw. t_2
V_d	[-]	Volumenanteil der Partikel

Symbol	Einheit	Beschreibung
v	[m/s]	Geschwindigkeit des Ultraschallsignals im Ankopplungsmedium
v_f	[m/s]	Filtergeschwindigkeit
V_{susp}	[cm ³]	Volumen der Suspension
w_0	[g]	Referenzmasse jeden Probekörpers (vor Vorsättigung, ohne Versiegelung)
w_1	[g]	Masse jeden Probekörpers (vor Vorsättigung, mit Versiegelung)
w_n	[g]	Masse jeden Probekörpers zum jeweiligen Prüftermin
θ	[°]	Glanzwinkel, Winkel zwischen ein- oder ausfallendem Strahl und der Netzebene
λ	[m]	Wellenlänge
λ	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit
λ_c	[W/(mK)]	thermische Leitfähigkeit der Matrix
λ_d	[W/(mK)]	thermische Leitfähigkeit der Partikel
$\overline{\mu S}$	[g]	Masse des abgewitterten Materials zum jeweiligen Prüftermin (Summe über alle zum Messungen n-ten Zyklus)
σ	[mN/m]	Oberflächenspannung von Quecksilber
ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte
ρ_{susp}	[g/cm ³]	Suspensionsdichte
τ_n	[-]	relative Durchschallungsgeschwindigkeit
Δh	[m]	Differenz der Standrohrspiegelhöhen
Δw_n	[M-%]	Flüssigkeitsaufnahme jedes Probekörpers zum jeweiligen Prüftermin

Definitionen

1. In der vorliegenden Arbeit werden mit dem Begriff „**Gestein**“ der geologischen Terminologie sowohl das Festgestein, als auch veränderliche feste Gesteine und Lockergesteine (Ton, Schluff, Sand etc.) beschrieben.
2. Der Normenausschuss Bauwesen NABau 005-05-21 AA „Geothermie - Geschlossene Wärmeübertragungssysteme in Bohrungen (Erdwärmesonden)“, der im Jahr 2008 mit der Bearbeitung einer Norm begonnen hatte, definiert Erdwärmesonden als „geschlossene Wärmeübertragungssysteme in Bohrungen“. In der vorliegenden Arbeit werden diese Begriffe äquivalent verwendet.

1 Einleitung

1.1 Nutzung der oberflächennahen Erdwärme

Im Zuge einer nachhaltigen Energieversorgung und von Klimaschutzzielen, die in den nächsten Jahrzehnten erreicht werden sollen, kommt innovativen Konzepten zur Nutzung regenerativer Energien eine wichtige Bedeutung zu. Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen werden für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie zur Bereitstellung von Kühl- und Heizenergie sowie für die Warmwasserbereitung für Gebäude realisiert. Mit dieser Technologie können Primärenergieeinsparungen von etwa 40% gegenüber einer konventionellen Ölheizung und Kohlendioxideinsparungen von bis zu 55% (KALTSCHMITT 2005) erreicht werden. Eine optimierte Gebäudeklimatisierung ist mit diesen Anlagen ebenfalls technisch und kosteneffizient möglich.

Im Zuge konkurrierender Nutzungen des Untergrundes zur Energie- und Trinkwasserversorgung, muss ein ressourcenschonender, sicherer und dauerhafter Betrieb der Erdwärmeanlagen gewährleistet sein. Eine ausgereifte Wärmepumpentechnologie mit einem sehr guten Stand der Technik ist in der Praxis verfügbar. Bei der Anlagenplanung und technischen Erschließung des Untergrundes bestehen Optimierungspotentiale und die Notwendigkeit einer umfangreichen intensivierten Qualitätssicherung.

Für den Bau von erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden werden Wärmetauscherrohre als geschlossene Wärmeübertragungssysteme in Bohrlöcher eingebaut und der vorhandene Ringraum mit sich verfestigenden Verfüllmaterialien ausgebaut. Ausführung und Qualität der Verfüllung, d.h. des Bohrlochausbaus nach dem Einbau der Wärmerohre sind für die Funktionsfähigkeit und Betriebssicherheit der Anlagen über einen langen Zeitraum entscheidend. Andernfalls können Probleme mit dem Grundwasserschutz, schlechter Wärmeentzug mit Leistungseinbußen sowie geotechnische Probleme entstehen.

1.2 Forschungsgegenstand und Zielsetzung

Art und Ausführung der Erdwärmesonden-Installation werden in der Richtlinie 4640 „Thermische Nutzung des Untergrundes“ Blatt 2 „Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen“ des Vereins Deutscher Ingenieure (2001) definiert. Der Stand der Technik für die Bohrlochverfüllung orientiert sich an den Hinterfüllbaustoffen und -konzepten, die für den Brunnenbau seit langem in Verwendung sind. In der Praxis ergeben sich verschiedene Ausführungsvarianten, die durch Vorgaben der Genehmigungsbehörden in den einzelnen Bundesländern und regionale geologische Besonderheiten variieren und in Leitfäden für Erdwärmesonden (u.a. MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BW 2005, HLUG 2004) gesondert erläutert werden.

Laborversuche zu Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden (HERRMANN 2003, RÜSGEN 2003, MÜLLER 2004) sowie In-Situ-Testreihen (ROHNER & RYBACH 2001) und Praxiserfahrungen (LENARDUZZI et al. 2000, BASSETTI et al. 2005) dokumentieren die Notwendigkeit, die in den Bohrlochraum eingebrachten Materialien auf das Anforderungsprofil der Erdwärmennutzung abzustimmen. Bislang erfolgt die Bohrloch-Ringraumfüllung der Erdwärmesonden mit Hinterfüllbaustoffen aus dem Brunnenbau auf Ton/Zement-Basis und mit thermisch verbesserten, speziell für diese Nutzung entwickelten Materialien. Beim Einsatz von zementhaltigen, pH-Wert-verändernden Suspensionen im Untergrund - meist auch im Grundwasserbereich - sind Umweltverträglichkeit sowie ordnungsgemäße Einbringung mit sorgfältiger Dokumentation wesentliche Gesichtspunkte. In der praktischen Anwendung zeigen sich jedoch Mängel in Ausrüstung, Ausführung sowie Dokumentation. Bislang fehlen klar definierte Standards hinsichtlich der Qualitätskontrolle mit Prüfungen und Kennwerten für Rückstellproben der verpressten Suspension, sowie zuverlässige In-Situ-Tests (z.B. standardmäßig durchgeführte Bohrloch-Loggings).

Im Sondenkreislauf einer Erdwärmeanlage zirkulieren in der Regel frostschutzhaltige Fluide, die auf Temperaturen bis unter Null Grad Celsius herunter gekühlt werden. Dies wird in der Planungspraxis so gehandhabt, um einen optimierten Wärmeentzug zu ermöglichen und die Betriebssicherheit der Anlage zu gewährleisten. Gefrier- und Auf-

tauprozesse können bei zyklischem Wärmepumpenbetrieb in unmittelbarer Umgebung der Sondenrohre auftreten. Bei frostempfindlichen Hinterfüllbaustoffen kann dies zur Bildung von Frostkeilen und Eislinen sowie nachhaltigen Strukturschädigungen im Ausbaumaterial und im umgebenden Gestein führen.

BASSETTI et al. (2005) erörtern Betriebserfahrungen aus den vergangenen Jahren mit Störungen im Anlagenbetrieb und geotechnisch relevante Schädigungen der Baustoffe, wie bereits von den Autoren VON CUBE & STEIMLE (1984), EUGSTER (1991) und KALTSCHMITT (2005) prognostiziert und veröffentlicht wurde.

In der vorliegenden Arbeit werden folgende Fragestellungen ausführlich untersucht und beschrieben:

- Untersuchung und Detailbewertung gängiger, in der Praxis verwendeter, Hinterfüllmassen und -konzepte im Hinblick auf chemische und physikalische Eigenschaften sowie hinsichtlich der mineralogischen Charakteristik
- Entwicklung und Prüfung von Versuchstechniken und Untersuchungsmethodik für Hinterfüllbaustoffe
- Möglichkeiten der Herstellung neuer Frost-Tau-beständiger Baustoffe ('Proof-of-Concept')
- Innovativer Prüfstand Geothermie
- Handlungsempfehlungen für die ingenieurgeologische/geothermische Praxis zum Hinterfüllen oberflächennaher Erdwärmesonden

Im Geothermiebereich existiert bislang keine einheitliche Qualitätskontrolle mit Standardprüfverfahren oder Eignungsprüfungen unabhängiger Prüfinstitute. In Anlehnung an bestehende Richtlinien/DIN-Normen war es im Rahmen der Forschungsarbeiten notwendig, geeignete Laborprüfverfahren für diesen speziellen Anwendungsfall zu testen und gegebenenfalls zu modifizieren. Zur Betrachtung des Gesamtsystems wurde ein neuer innovativer Prüfstand Geothermie in einer anwendungsnahen Geometrie entwickelt, um vor allem die Schnittstel-

len des Systems Gestein-Hinterfüllmasse-Erdwärmerohr erforschen zu können. Mit den Laborversuchen und der Untersuchung des Gesamtsystems im eigens konzipierten Prüfstand Geothermie konnten Modifikationen für den Anwendungsfall erforscht und Materialeigenschaften abgeleitet werden, die im Zuge der Überprüfung des Versuchskonzeptes ('Proof-of-Concept') zur Entwicklung neuer Frost-Tau-beständiger Hinterfüllbaustoffe führten. Die Zielsetzung war vor allen Dingen, die chemische Stabilität der Hinterfüllmassen im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit sowie das Auslaugungsverhalten zu testen. Darüber hinaus wurden die physikalischen Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, Fließverhalten, Wasserdurchlässigkeit, mechanische Festigkeit und Frost-Tau-Beständigkeit geprüft.

Diese Ziele wurden im Rahmen der Arbeit erreicht und bieten Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschungsaufgaben und praxisorientierte Hinweise für Bau und Qualitätskontrolle der Erdwärmeanlagen.

2 Grundlagen

2.1 Ingenieurgeologische Grundlagen

2.1.1 Grundlagen der Geothermienutzung

2.1.1.1 Einführung

Erdwärme wird definiert als in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der Oberfläche der festen Erde; die Herkunft der Energie wird in Betracht gezogen, relevant ist jedoch wo diese einer Nutzung zugeführt wird (VDI 4640 Blatt 1, 2001).

Der Wärmefluss an der Erdoberfläche wird aus folgender Beziehung berechnet (Gl. 1):

$$q = -k \cdot \frac{dT}{dz} \quad \text{Gl. 1}$$

q	Wärmefluss [mW/m ²]
k	Wärmeleitfähigkeit [mW/m°C]
$\frac{dT}{dz}$	Temperaturgradient [°C/m]

Der Wärmefluss für „normale“ kontinentale Krustenbereiche beträgt nach EISBACHER (1996) im Durchschnitt rund 60 mW/m². Die Energie im oberflächennahen Erdreich resultiert jedoch nur zu einem geringen Anteil aus dem geothermischen Wärmefluss. Der wesentliche Anteil wird aus der von der Sonne eingestrahlten Energie generiert. Der aus dem Erdinneren an die Erdoberfläche dringende Energiestrom stammt aus drei Quellen; zum einen aus Ursprungswärme aus Zeiten vor der Erdentstehung sowie aus Gravitationsenergie, die während der Erdentstehung in Wärme umgesetzt wurde. Zum anderen wird durch Zerfallsprozesse radioaktiver Isotope (u.a. Uran U²³⁸, U²³⁵, Thorium Th²³², Kalium K⁴⁰) Energie freigesetzt und in Form von Wärme in Gesteinen

mit verhältnismäßig geringen Wärmeleitfähigkeiten gespeichert (KALTSCHMITT 2005).

Der gegenwärtige Temperaturverlauf in der Lithosphäre wird als Geotherme bezeichnet. Für die Extrapolation des Temperaturverlaufes in größere Tiefen ist es erforderlich, Annahmen über die Tiefenverteilung von Wärmeproduktion und Wärmeleitfähigkeit der Gesteine zu machen. In einer tektonisch inaktiven Kruste kann ein oberflächennaher Temperaturgradient von 3°C pro 100 m angenommen werden. Eine Beeinflussung durch jahreszeitliche Temperaturschwankungen findet bis in eine Tiefe von wenigen Zehnermetern unter der Geländeoberfläche statt. Der Übergangsbereich (Neutrale Zone) zeigt vernachlässigbare Temperaturschwankungen mit maximal 0,1 K im Jahresgang, in größeren Tiefen findet keine Oberflächenbeeinflussung mehr statt und die Temperaturen nehmen gemäß des geothermischen Gradienten zur Tiefe hin zu.

Beim Wärmetransport bzw. der -übertragung können drei mögliche Vorgänge unterschieden werden. Die Übertragung kann durch Wärmestrahlung, mit der Emission und mit der Absorption elektromagnetischer Strahlung erfolgen. Ein weiterer Mechanismus ist Konvektion, bei der der Wärmetransport an einen Massentransport gebunden ist. Bei Konduktion oder Wärmeleitung erfolgt ein molekularer Transport von Wärme in Form von innerer Energie, von Stoffteilchen zu Stoffteilchen innerhalb von festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen.

Bezogen auf die kontinentale Kruste bzw. die Gesteine dominiert die Wärmeleitung als Vorgang, beim Vorhandensein von Grundwasser kommt ein konvektiver Anteil hinzu. Der Wärmetransport erfolgt immer in Richtung des Temperaturgefälles. Führt man einem Körper Wärme zu, so verändert sich die Temperaturverteilung innerhalb des Körpers in Abhängigkeit von seinen thermischen Eigenschaften. Bei konstanter Energiezufuhr stellt sich nach gewisser Zeit ein nicht variabler, d.h. über die Zeit stationärer, Zustand der Temperaturverteilung ein.

2.1.1.2 Systemkomponenten

Die Nutzung oberflächennaher Erdwärme reicht definitionsgemäß bis in eine Tiefe von 400 m. Diese Abgrenzung zur tiefen Geothermie geht auf eine administrative Festlegung in der Schweiz zurück mit der Übernahme des Bohrrisikos durch den Staat für Anlagen ab 400 m Tiefe. Diese Definition wurde seither, auch in verschiedenen Richtlinien, als ungefähre Untergrenze der Nutzung der so genannten oberflächennahen Geothermie gezogen (KALTSCHMITT 2005), ist jedoch nicht als exakte Grenze zu verstehen.

Die Erschließung der oberflächennahen Geothermie erfolgt indirekt über geschlossene Wärmeübertragungssysteme in verschiedenen Bauformen. Diese werden horizontal als Erdwärmekollektoren, vertikal als Erdwärmesonden, in aktivierten (Beton-)Bauteilen oder mit anderen Sonderformen (Erdwärmekörbe, Grubenwassernutzung etc.) genutzt. Wärmetauscherrohre entziehen dem Untergrund Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau, das mit Hilfe einer Wärmepumpe auf das für den Betrieb von Heizungssystemen und Warmwasserbereitung notwendige Niveau angehoben wird. Für den Betrieb der Wärmepumpe ist von außen zugeführte Energie (Strom aus dem öffentlichen Versorgungsnetz oder aus dem Umsatz anderer Brennstoffe) notwendig. Mit dieser Technologie ist neben der Bereitstellung von Heizwärme und Warmwasser auch die Klimatisierung von Gebäuden möglich.

Die Systemelemente einer Erdwärmeanlage bestehen aus dem Wärmequellenkreislauf für den Entzug der Energie aus dem Erdreich (Abb. 2-1 mit Erdwärmesonde), dem Wärmepumpenkreislauf zur Erhöhung des Temperaturniveaus und dem Heizkreislauf zur Einspeisung der Wärme in das Gebäude (KALTSCHMITT 2005).

Die Wärmepumpentechnologie erläutern u.a. VON CUBE & STEIMLE (1984) sowie KIRN (1983).

Im Folgenden werden nur Anlagen mit Erdwärmesonden (auch genannt geschlossene Wärmeübertragungssysteme in Bohrungen) in Betracht gezogen, andere Nutzungen werden nicht erläutert.

Erdwärmesondenanlagen werden in vielen Ländern weltweit zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und häufig auch zur Kühlung verwendet. Die ersten erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen wurden in den USA installiert (CRANDALL 1946, KEMLER 1946). In Europa wurden Erdwärmeanlagen erstmals um 1970 mit Grundwassernutzung (DRAFZ 1972) und horizontalen Erdwärmekollektoren (WATERKOTTE 1972) beschrieben. Erste Erdwärmesondenanlagen wurden ab 1980 in Deutschland und der Schweiz gebaut (SANNER 2005).

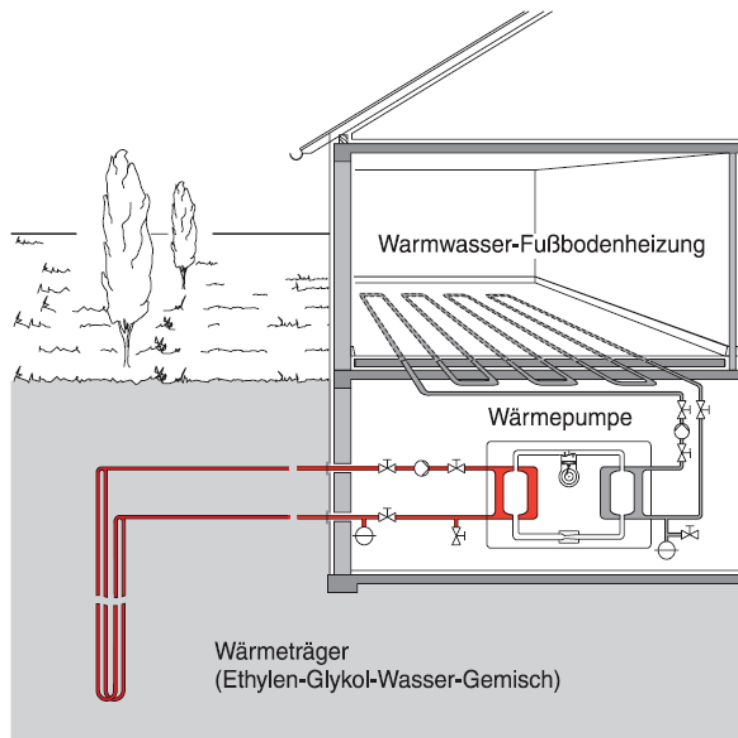


Abb. 2-1: Systemkomponenten einer Erdwärmeanlage (VDI 4640 Blatt 2, 2001)

Für den Bau einer Erdwärmesondenanlage wird eine Bohrung in Tiefen bis etwa 100 m abgeteuft. Die Bohrtiefe richtet sich nach den geologischen Voraussetzungen für den Wärmeentzug sowie genehmigungsrechtlichen Vorgaben (u.a. Grundwasserschutz). Je nach Planung und örtlichen Gegebenheiten können auch mehrere Bohrungen mit geringeren Tiefen oder eine sehr tiefe Bohrung (>100 m) abgeteuft werden. Das Bohrverfahren richtet sich nach Geologie und technischer Ausrüstung. Im Lockergestein werden Bohrungen mit Hohlbohrschnecken oder nach dem Spülbohrverfahren mit dem Spülmedium Luft oder Wasser abgeteuft. Im Festgestein haben sich schlagende Bohrverfahren mit dem Imlochhammerverfahren (ROHNER 2007) mit Bohrdurchmessern von 115-142 mm in der Endteufe (STAHL & BELLINGER 2003) etabliert. Der Bohrhammer wird mit Pressluft betrieben, die zugleich als Spülungsmedium dient und das Bohrklein mit Aufstiegs geschwindigkeiten von bis zu 20 m/s nach Übertage transportiert (KALTSCHMITT 2005).

Nach Erreichen der geplanten Tiefe werden die Wärmetauscherrohre in das Bohrloch eingebaut. Genutzt werden Kunststoffrohre, die sich mit dem Überbegriff „Sonde“ etabliert haben, in U-Form aus Polyethylen hoher Dichte (High-Density-Polyethylen [HDPE]) mit Rohrdimensionierungen von 25 x 2,3 mm und 32 x 2,9 mm (Abb. 2-2); zur Oberflächenmaximierung werden in Deutschland zwei Doppel-U-Sondenrohre in die Bohrungen eingebracht; in Skandinavien sind Einfach-U-Sonden gebräuchlich. Andere Rohr-Bauarten wie Koaxial-Erdwärmesonden sind in Deutschland nicht etabliert; auch Direktverdampfungssysteme mit CO₂ als Heat-Pipe werden bisher selten ausgeführt. Der Einbau von Abstandhaltern zwischen den Sondenrohren bzw. zur Bohrlochwand hin ist aus energetischen Gründen empfehlenswert und wird teils von Genehmigungsbehörden aus Gründen der Ausbauqualität (Grundwasserschutz) gefordert (AfU 2006). Derzeit wird dieses Konstruktionselement jedoch noch nicht standardisiert eingebaut.

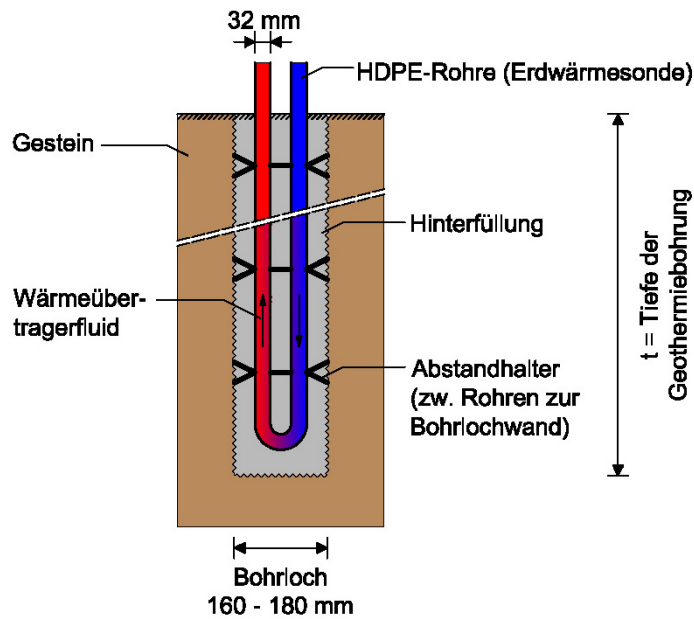


Abb. 2-2: Prinzipskizze einer ausgebauten Erdwärmebohrung

Der freie Bohrlochraum und -ringraum muss nach dem Einstellen der Sondenrohre wieder verfüllt, d.h. verpresst werden. Verwendung finden hierfür ein bzw. mehrere Verpressrohre, die zusammen mit den Wärmeübertragerrohren in das Bohrloch eingebracht werden (bis zur Endteufe bzw. auf halbe Höhe) oder ein geeignetes Verpressgestänge. Die Verpressung erfolgt zur Verdrängung des Wassers im Bohrloch im Kontraktorverfahren von unten nach oben mit dem verbleibenden Verpressrohr bis zur vollständigen Verpressung der Bohrung oder mit dem Ziehen des Verfüllrohres bzw. Verpressgestänges, so dass das Rohr unterhalb des Suspensionsspiegels verbleibt. Die Verpressung kann nach VDI 4640 „Thermische Nutzung des Untergrundes“ Blatt 2 „Erd-

gekoppelte Wärmepumpenanlagen“ (2001) mit einer Suspension aus Zement, Bentonit und Wasser erfolgen. In der Richtlinie werden für die Hinterfüllbaustoffe verschiedene Mischungsverhältnisse empfohlen, die mit Quarzsand ergänzt werden können. Eine Besonderheit stellt die Empfehlung dar, dass der Bohrspülung Zement zugegeben und diese Mischung in das Bohrloch eingebracht werden darf. Im Grundwasserleiter kann die Füllung mit Kies (Verkiesung) bzw. das Einspülen von Bohrklein erfolgen (Kap. 2.1.2.1, Kap.3.2). Das Aufbereiten und Anmischen der Suspensionen erfolgt in geeigneten Mischanlagen. Die Verpressung wird beendet, wenn die Suspension (ohne Wasser und Bohrspülung) an der Oberfläche austritt. Die Art der Verpressung wird von den Genehmigungsbehörden durch entsprechende Vorgaben eingeschränkt; auch das Blatt 2 der VDI-Richtlinie 4640 befindet sich in Revision. Es ist geplant, die Möglichkeiten der verwendeten Materialien auf die Verwendung von Fertigprodukten einzuschränken.

Mögliche Probleme beim Verpressvorgang zeigt Abb. 2-3. Die Suspension kann in Hohlräume, Spalten oder Klüfte in der Bohrlochwand abfließen und größere Bereiche ausfüllen. Bei zu großer Klüftigkeit oder löchrigem/kavernösen Gebirge ist es generell schwierig bzw. unmöglich das Bohrloch dicht und vollständig zu verpressen. Des Weiteren kann eine Entmischung der Verpresssuspension mit dem Absetzen der schwereren Mischungsbestandteile an der Bohrlochsohle und die Einbringung von Lufteinschlüssen erfolgen. Ursachen hierfür sind die Verwendung u.U. ungeeigneter Rezepturen und Mischungsbestandteile sowie die unzureichende Durchmischung bei der Vermengung der Trockenbaustoffe mit Wasser in niedertourigen Mischanlagen und die nicht fachgerechte Einbringung in das Bohrloch. Dies bedeutet meist, dass, nach dem anfänglichen Einbringen der Suspension im Kontraktorverfahren von unten nach oben, der Verpressschlauch abgekoppelt wird und die Verfüllung der restlichen Verpresssuspension von oben erfolgt. (Abb. 2-3). Je nach Tiefe des Bohrloches bzw. Art der verwendeten Suspension reicht oft der Pumpendruck der verwendeten Verpressanlagen (Kap. 2.1.2.3) von bis zu 20 bar nicht aus, um die gesamte Bohrlochlänge im Kontraktorverfahren zu verpressen. Dies liegt unter anderem daran, dass der Verpressschlauch häufig händisch, ohne entsprechende technische Unterstützung gezogen werden müsste, und somit häufig der Schlauch im Bohrloch verbleibt.

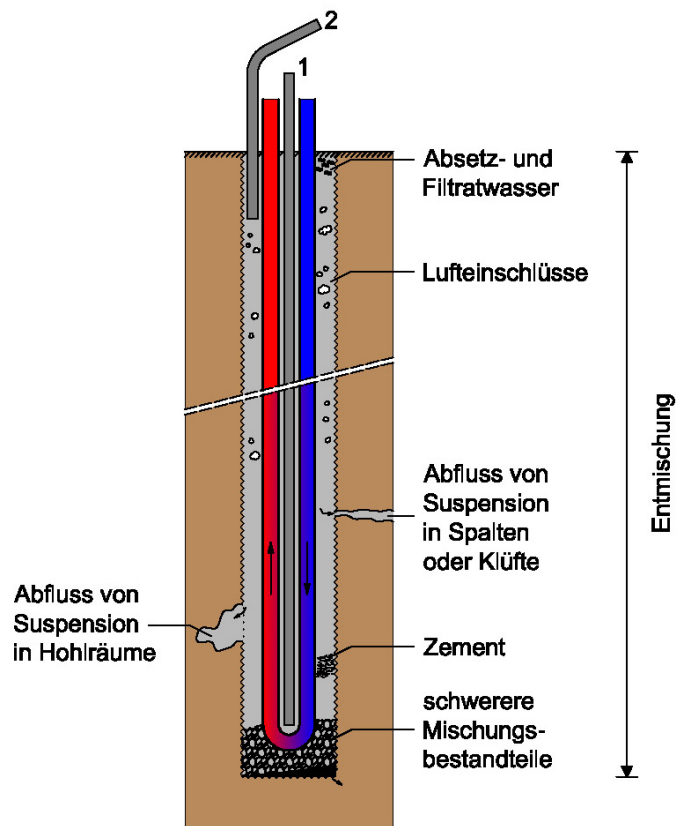


Abb. 2-3: Skizze möglicher Probleme beim Verpressvorgang:
Nr. ①: Einbringung der Suspension im Kontraktorverfahren;
Nr. ②: Einbringung der Suspension über weiteren Verpressschlauch von oben

Nach dem Einbau werden die Sondenrohre einer Druckprüfung unterzogen, um die Dichtigkeit sicherzustellen. Der Erdwärmesonden-Kreislauf wird in Anschlussleitungen unterhalb der Frostgrenze zum Gebäude hingeführt und an die Wärmepumpe angeschlossen.

Für den Anlagenbetrieb werden die Sondenrohre mit der Wärmeübertragerflüssigkeit, die aus Wasser bzw. in den meisten Fällen aus Wasser mit Frostschutzmittel besteht, gefüllt. Als Frostschutzmittel sind Alkohole (Monoethylenglykol/Propylenglykol/Ethanol) oder andere Stoffe wie Betain und Calciumchlorid in Anteilen bis 33% (LAWA 2002) zugelassen.

Nach Fertigstellung ist den Genehmigungsbehörden eine ausführliche Dokumentation des Anlagenbaus der Geothermie-Bohrungen mit Lageplan der Bohransatzpunkte, der Beschreibung des Bohrvorganges (erreichte Teufen/Tiefen, Bohrprofile nach DIN EN ISO 22475-1 2005) und den Besonderheiten (stark gespanntes oder artesisches Grundwasser) mit Darstellung nach DIN 4023 sowie eventuell die entnommenen Bohrproben zu übermitteln. Verpressmaterial und Verpressmengen sowie die Ergebnisse der Druckprüfung sind überdies ausführlich zu dokumentieren.

2.1.1.3 Genehmigungsrechtliche Grundlagen

Bei Planung, Bau und Betrieb von Energiegewinnungsanlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes sind die wasserrechtlichen Regelungen und landesplanerischen Zielsetzungen zu beachten. Dabei gelten das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) bzw. die Wassergesetze der Länder und die dazugehörigen Verwaltungsvorschriften, sowie das Bundesberggesetz (BBergG) und das Lagerstättengesetz.

Grundsätzlich sind Bohrungen für Erdwärmesondenanlagen nach dem jeweiligen Landeswassergesetz bzw. aus Wassergefährdungsgründen nach §35 WHG in allen Bundesländern anzeigepflichtig, da Probleme im Rahmen der Bohrtätigkeit (§3 WHG), vor allem in hydrogeologisch ungünstigen Gebieten, nicht ausgeschlossen werden können. Eine Beeinträchtigung bzw. Schädigung des Grundwassers (§3 WHG, Absatz 2, Nr. 2 bzw. Absatz 1, Nr. 5) ist durch Temperaturänderungen in Verbindung mit dem Wärmepumpenkreislauf, durch austretende Son-

denfluide sowie bohrbedingte Verunreinigungen durch Schmieröl, Spülzusätze und Ähnliches möglich.

Bei ungünstiger hydrogeologischer Situation wird in der Regel eine Einzelfallprüfung auf wasserrechtliche Erlaubnis bzw. ein wasserrechtliches Erlaubnisverfahren eingeleitet, das die zuständigen Behörden gesondert bearbeiten. Eine thermische Nutzung des Untergrundes in Trinkwasserschutzgebieten, in Einzugsgebieten von Trinkwassergewinnungsanlagen sowie in Heilquellenschutzgebieten ist in der Regel ausgeschlossen. Ausnahmen in Trinkwasserschutzzone III müssen geprüft und von der zuständigen Behörde genehmigt werden.

Im Bezug auf die Umweltverträglichkeit der eingesetzten Baustoffe sowie der Wärmeübertragerflüssigkeiten gilt die „Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum WHG über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen“ (VwVwS). Darin werden Stoffe näher bestimmt, die geeignet sind die „Beschaffenheit des Wassers nachteilig zu verändern“ und entsprechend ihrer Gefährlichkeit aufgrund der physikalischen, chemischen und biologischen Stoffeigenschaften in Wassergefährdungsklassen (WGK) eingestuft. Stoffe im Sinne dieser WGKs sind auch Stoffgruppen und Gemische; als Gemische definiert sind „aus zwei oder mehreren Stoffen bestehende Gemenge, Mischungen und Zubereitungen“ (Abs. 2.2.1 VwVwS). Für die Zementation der Bohrlöcher sowie die Sondenfluide gilt generell, dass nur Stoffe der Wassergefährungsklasse WGK 1 („schwach wassergefährdend“) eingesetzt werden dürfen (LAWA 2002). Die VwVwS sieht in Absatz 3a die Verpflichtung zur Selbsteinstufung vor. Danach müssen entweder die Betreiber von Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen oder die Stoffhersteller die Wassergefährdung der eingesetzten Stoffe und Gemische dokumentieren.

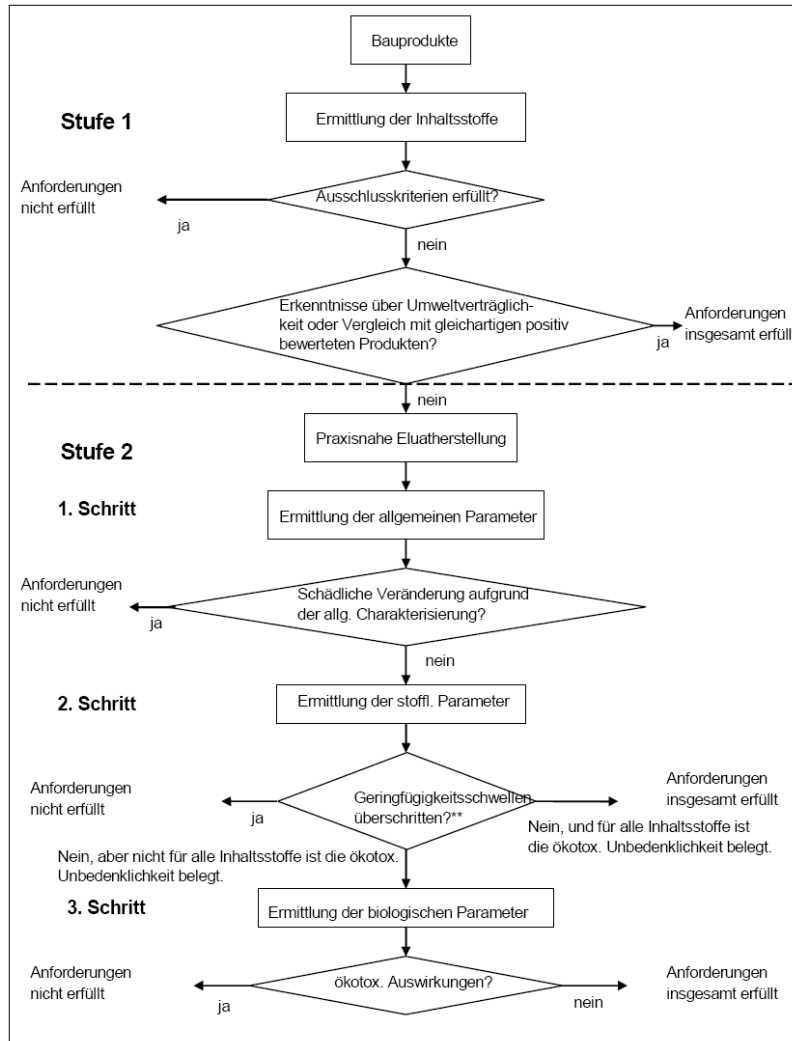
Bohrunternehmen für Arbeiten im Rahmen der oberflächennahen Geothermie müssen gemäß der verschiedenen Leitfäden der Bundesländer als Fachfirma nach DVGW W 120 (2005) oder dem „Gütesiegel für Erdwärme-Bohrfirmen“ (BWP 2005) zertifiziert sein oder entsprechende Qualifikationen nachweisen können. Ansonsten können die Behörden die gesonderte Überwachung durch ein geotechnisches Fachbüro anordnen.

2.1.1.4 Umwelteinwirkungen

Bereits bei der Erstellung der Erdwärmeanlagen sind Umwelteinwirkungen bei Bohrarbeiten durch Schadstoffeinträge von Bohrerät, -gestänge und Zubehör sowie chemisch-biologische Veränderungen durch Spülmittelzusätze zu verhindern. Auch der Baulärm muss sich im Rahmen der gesetzlichen Vorgaben (TA Lärm 1998) bewegen.

Durch den Eingriff in den Untergrund mit dem Bohrvorgang können hydraulische Kontakte zwischen vormals getrennten Grundwasserstockwerken hergestellt werden. Bei unzureichender Abdichtung kann ein Eintrag von unerwünschten Stoffen über die Oberfläche erfolgen. Daher muss die Bohrlochverfüllung gemäß VDI 4640 Blatt 2 (2001) „dicht, dauerhaft und undurchlässig“ ausgeführt werden, um negative Beeinflussungen zu vermeiden (Kap. 2.1.2.1, Kap. 3.2).

Der Ausbau sollte mit Materialien erfolgen, die für den Einsatz im Grundwasser geeignet sind. Für den „Bau und Betrieb von Grundwasserbeschaffenheitsmessstellen“ empfiehlt das DVGW Merkblatt W 121 (2003), „dass das in den Ringraum einzubringende Material keine Fremdstoffe an das Grundwasser oder Gestein abgeben darf“. Die Problematik der Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe beschreiben u.a. STARK et. al (1996), EISWIRTH (2001) und HOHBERG (2003). In den Schriften des Deutschen Institutes für Bautechnik werden in den „Grundsätzen zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ (2008) als Kriterien für ein Grundwasser gefährdendes Bauprodukt der Einbauort (ungesättigte/gesättigte Bodenzone) sowie das Langzeitverhalten festgelegt. Das Bewertungskonzept umfasst ein Ablaufschema mit mehreren Schritten (Abb. 2-4). HOHBERG (2003) stellte im Bezug auf das Auslaugverhalten umweltrelevanter Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen fest, dass eine gute Immobilisierung der Schwermetalle in Mörteln und Betonen in der alkalischen, dichten Zementmatrix erfolgt. Die Verwendung von Hochofenzement führt aufgrund der chemischen Eigenschaften gegenüber Portlandzement zu geringeren Auslaugraten. Als Prüfverfahren werden Schütteltests zur Eluatanalyse sowie Standtests mit aushärtenden Prüfkörpern empfohlen.



**unter Berücksichtigung der relevanten Übertragungsfunktion

Abb. 2-4: Ablaufschema zur Bewertung von Bauprodukten hinsichtlich Boden- und Grundwasserschutz (DIBT 2008)

Hinweise auf das Elutionsverhalten von Erdwärmebaustoffen in einem Technikumsversuch liefert die Arbeit von HUNN (2004). Vor allem direkt nach dem Einbau der Baustoffe in das Testfeld zeigte sich eine deutliche Grundwasserbeeinflussung durch die Zementanteile.

Ein weiteres Problem in der Praxis stellen betonangreifende Grundwässer dar. Eine Einstufung der Betonaggressivität nach DIN 4030 Teil 1 (2008) der Grundwässer, die am Standort der Erdwärmesonde vorhanden sind, wird bislang bei den meisten Bauvorhaben nicht vorgenommen. Dies ist jedoch für die Langzeitbeständigkeit der zementgebundenen Hinterfüllmasse und für den sicheren Betrieb der Systeme von entscheidender Bedeutung. Gegen Sulfatangriff im Grundwasser muss in diesen Fällen der Mischungsrezeptur ein spezieller, sulfatbeständiger Zement zugesetzt werden, um derartige Schäden zu vermeiden. Allerdings gilt es auch den chemischen Angriff durch andere Arten von betonaggressiven Grundwässern zu berücksichtigen (stark kohlenstoffhaltig etc.).

Die, als Wärmeträgermedium verwendeten, Gemische mit den Frostschutzmitteln Ethylenglykol und Propylenglykol werden als schwach wassergefährdend (WGK 1) eingestuft. Die Umweltwirkungen, die sich durch Leckagen ergeben sind in der Regel gering. Die Umweltwirkung der Arbeitsmittel in der Wärmepumpe spielt bei einer Vermeidung von Leckagen keine Rolle (KALTSCHMITT 2005).

Beim Betrieb der Erdwärmeanlagen entsteht durch die Wärmenutzung im Untergrund eine i. d. R. trichterförmige Temperaturabsenkung, je nach Entzugsleistung und -dauer. Der Temperatur-Absenktrichter erzeugt einen horizontalen Temperaturgradient und somit einen lateralen Wärmefluss zur Erdwärmesonde hin. Dabei gilt, dass bei gleicher Trichtersteilheit der Wärmefluss umso stärker ist, je höher die Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches ist. Bei geringen thermischen Untergrundleitfähigkeiten sind größere Sondenlängen erforderlich, um die gleiche Leistung zu erzielen. Zunächst erfolgt die Regeneration der Temperaturen im Untergrund sehr schnell, später nähert sich die Temperatur asymptotisch dem Ausgangszustand an. Bei optimal dimensionierten Anlagen stellt sich langfristig ein thermisches Gleichgewicht zwischen Wärmeentnahme und -zufluss ein. Der Einfluss des Wärmeentzugs

bleibt bei technisch richtiger Auslegung der Anlagen zudem lokal begrenzt. Das Grundwasser bewirkt im „stehenden“ Zustand keinen Wärmetransport; bei fließender Bewegung jedoch kann es - abhängig von der Fließgeschwindigkeit - durch die hohe spezifische Wärmekapazität des Wassers den Wärmetransport zur Sonde hin deutlich verbessern (SANNER et al. 2003, KALTSCHMITT 2005).

Die VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 (2001) legt fest, dass „die Temperatur des zu der Erdwärmesonde zurückkehrenden Wärmeträgermediums im Dauerbetrieb (Wochenmittel) den Grenzbereich von ± 11 K Temperaturänderung gegenüber der ungestörten Erdreichtemperatur nicht überschreiten“ soll. Bei Spitzenlast sollten ± 17 K Temperaturänderung nicht überschritten werden. Thermische Beeinflussungen des Untergrundes sind stark von Geologie, Grundwassersituation sowie von der Anlagenbetriebsart abhängig (PANNIKE et al. 2006). Änderungen der Temperaturverhältnisse im Grundwasser führen zu veränderten geochemischen Gleichgewichten mit Mineralausfällungen (ARNING et al. 2006). Ein wesentlicher negativer Einfluss von Erdwärmeanlagen auf Mikroorganismen konnte von SCHIPPERS & REICHLING (2006) jedoch nicht bestätigt werden.

Eine thermische Beeinflussung durch die Erdwärmenutzung ist im Hinblick auf starke Abkühlungen im Bereich um die Sondenrohre bei übermäßigem Wärmeentzug von Bedeutung. Im Betrieb wird der Sondenkreislauf häufig auf mehrere Grad unter Null heruntergekühlt. Die zyklische Taktung der Wärmepumpe je nach Heizbedarf kann Gefrier- und Auftauprozesse im Umfeld der Sondenrohre verursachen. Die Einwirkung atmosphärischer Frosteinflüsse spielt keine Rolle, da alle Anlagenbauteile, sowohl die Bohrung als auch die Anschlussleitungen, unterhalb der Frosteindringtiefe verlegt werden. Bei frostempfindlichen Hinterfüllungen und Böden kann dies durch Volumenänderungen des Wassers in den Poren des Baustoffes bzw. im Umfeld der Sonde (Grundwasser erfüllte Poren im Gestein, feinkörnige Böden) zu Strukturänderungen führen. Es entstehen Risse und Wasserwegsamkeiten (Abb. 2-5) und es zeigen sich Hebungen und Senkungen des Bodens im Umfeld der Erdwärmebohrung sowie an den Anschlussleitungen.

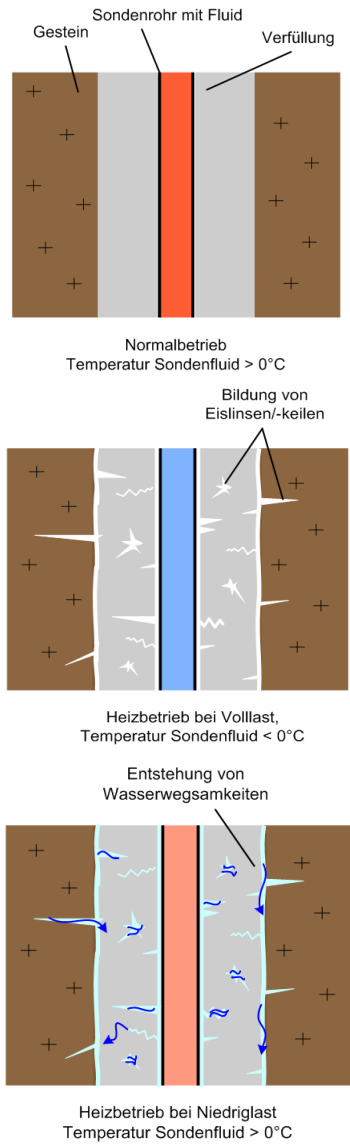


Abb. 2-5: Wechselwirkungen zw. Gestein-Hinterfüllung-Sondenrohr in der ausgebauten Geothermie-Bohrung bei nicht frostbeständigen Hinterfüllmassen

2.1.2 Bohrloch-Hinterfüllung

2.1.2.1 Stand der Technik

Geothermie-Bohrungen mit geschlossenen Wärmeübertragungssystemen (Erdwärmesonden) werden weltweit in vielen Ländern genutzt und sind vor allem in der Schweiz, Österreich, Skandinavien und den USA weit verbreitet. Im Folgenden wird ein Überblick über den ingenieurgeologischen Stand der Technik im Hinblick auf den Ausbau von Geothermie-Bohrungen mit geschlossenen Wärmeübertragungssystemen gegeben, wie er sich in Forschung und Praxis in den verschiedenen Ländern entwickelte.

Die Art der Verpressung der Bohrlöcher bzw. spezielle Rezepturen sind - im Vergleich zur Betontechnik (Kap. 2.2.1) - nicht genormt, sondern werden gemäß der Anforderungen und Traditionen in den einzelnen Ländern eingesetzt.

Generell ist bisher sogar eine Wiederverfüllung der Bohrlöcher nicht zwingend vorgeschrieben. In Schweden beispielsweise muss bislang nur eine Abdichtung zur Oberfläche erstellt werden. Gängig sind dort auch offene Fluidzirkulationen in ungeklüfteten Granitbohrlöchern, in denen das Wärmeübertragerfluid in einem Rohr nach unten strömt, dort austritt und entlang der Bohrlöcherwand wieder aufsteigt. HELLSTRÖM¹ berichtet jedoch von wachsenden Bedenken der Umweltbehörden und von Tendenzen ebenfalls das Verpressen der Bohrlöcher mit zementhaltigen Baustoffen für eine optimierte Abdichtung zu fordern.

Die Hinterfüllung von Erdwärmebohrungen mit körnigen Bentonit-Wasser-Gemischen wird 1989 von BRAUD & MCNAMARRA sowie im Jahre 1991 von ECKHART beschrieben. REMUND & LUND berichten im 1993 von thermisch verbesserten Bentonit-Hinterfüllungen für Erdwärmesonden-Systeme mit Füllstoffen wie Quarzsand („Thermal Enhancement of Bentonite Grouts for Vertical GSHP Systems“). Weitere thermisch verbesserte Baustoffe werden von ALLAN & KAVANAUGH

¹ Geothermische Fachtagung, Karlsruhe, September 2006, mündliche Mitteilung von Göran Hellström

(1999), SMITH & PERRY (1999), CARLSON (2000) und ZHANG et al. (2000) beschrieben und getestet. Die Autoren konnten in Labor- und Feldmessungen im Vergleich von thermisch verbesserten und thermisch nicht optimierten Baustoffen nachweisen, dass geringere Bohrlochwiderstände, bessere Entzugsleistungen und kürzere Bohrlängen beim Einsatz von Baustoffen mit höheren Wärmeleitfähigkeiten realisiert werden können.

ALLAN & KAVANAUGH (1999) wenden zwei Strategien zur Optimierung der Wärmeleitfähigkeit der zementhaltigen Baustoffe an; zum einen die Zugabe hochwärmeleitfähiger Füllstoffe wie Quarzsand, Siliciumcarbid, körniges Aluminium und Eisenpartikel und zum anderen die Zugabe von Betonverflüssigern zur Reduzierung der Wassergehalte in der Mischung.

Rezepturen mit Zementgehalten von 18 MA.-% bis 70 MA.-% und verschiedenen Zementsorten kamen zum Einsatz; als Fließmittel wurde ein Naphthalinsulfonat verwendet. Es konnten Wärmeleitfähigkeitswerte von 2,4 W/(mK) mit Quarzsand (57 MA.-%), von 3,3 W/(mK) mit grobem SiC (57 MA.-%) und von 2,9 W/(mK) mit Stahlspänen (72 MA.-%) erreicht werden. Diese neu entwickelten Hinterfüllbaustoffe wurden in Laborversuchen hinsichtlich ihrer thermischen Eigenschaften optimiert und auf weitere Parameter wie Druckfestigkeit und Wasserdurchlässigkeit geprüft. Untersuchungen zur Frostbeständigkeit wurden nicht durchgeführt. Im Bezug auf die Frostbeständigkeit weisen ALLAN & KAVANAUGH (1999) darauf hin, dass die Eigenschaften der Baustoffe bei Frost mit dem Einsatz von Luftporenbildnern verbessert werden können, berichten jedoch nicht über spezielle Frostversuche. Die Autoren stellen fest, dass bei kleineren Bohrdurchmessern der Einfluss von gering wärmeleitfähigen Hinterfüllmassen größer ist als bei großen Bohrdurchmessern. Eine Reduzierung der Bohrlängen von bis zu 22% bis 37% in Abhängigkeit von Bohrdurchmesser und Gesteinswärmeleitfähigkeit wird postuliert.

Das Ergebnis der Forschungen resultierte 2001 im US Patent 6251179 vom US Department of Energy und der Erfinderin Dr. Marita ALLAN für ein „Thermally Conductive Cementitious Grout for Geothermal Heat Pump Systems“. Die Bohrlochhinterfüllungen, die in den Vereinigten Staaten von Amerika erlaubt sind, können nicht in allen Fällen mit den

deutschen korreliert werden, da andere Inhaltsstoffe wie z. B. Polymere (Polyacrylamidpolymere, Xanthangummi) und Biozide (u.a. WO 9963282) den Mischungen zugesetzt werden dürfen und die Wassergefährdung nicht äquivalent zur deutschen Klassifizierung beurteilt wird.

In der Schweiz wird eine im „Gütesiegel für Erdwärme-Bohrfirmen“ (FWS 2004) definierte Hinterfüllung mit der Rezeptur 8,3 MA.-% Bentonit, 16,7 MA.-% Zement, 75 MA.-% Wasser verpresst (Kap. 2.1.2.1). Die Suspension, die in das Bohrloch eingebracht wird, soll gemäß der Angaben des FWS (2004) eine Suspensionsdichte von $1,2 \text{ g/cm}^3$ und einen Wasserdurchlässigkeitsbeiwert $k_f < 10^{-7} \text{ m/s}$ aufweisen. In Absprache mit dem Gewässerschutz soll mit dieser Art von Verpressung nach Ernst ROHNER² das Ausfließen von Suspension in das Nebengestein sowie die Bildung von massiven Zementkörpern im Untergrund vermieden werden. ROHNER zufolge sieht die Schweizer Norm SIA 384/6³ mit geplantem Erscheinungstermin 2008 die Auslegung von Erdwärmesonden auf 50 Jahre Betriebszeit mit einem 20%igen Zuschlag an Bohrlänge vor, damit im Sondenkreislauf keine mittleren Temperaturen von $< 1,5^\circ\text{C}$ erreicht und Frostschäden in der Hinterfüllung vermieden werden.

Die *Anforderungen an die Bohrlochverfüllung* in Deutschland werden seit 2001 durch die VDI-Richtlinie 4640 „Thermische Nutzung des Untergrundes“ Blatt 2 „Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen“ (2001) definiert. Demnach muss die Wärmeübertragung vom Gestein zu den Sondenrohren sowie die Stabilisierung und Abdichtung des Bohrloches sichergestellt sein. Es muss generell der Grundwasserschutz gewährleistet sein, so ist u.a. die Vermischung von Grundwässern zu vermeiden, falls durch den Bohrvorgang zwei Grundwasserstockwerke durchbohrt wurden. Die Verfüllsuspension muss für die jeweilige Einsatztemperatur geeignet sein, insbesondere bei reinem Wärmeentzug ist auf Frostsicherheit zu achten. Zudem muss die Suspension „nach

² Vortrag „Bohrtechnik für Brunnen und Erdwärmesonden“ am 26.04.2007, OTTI-Profiforum „Oberflächennahe Geothermie“, Freising; mündliche Mitteilung

³ SIA 384/6: Erdwärmesonden – Erarbeitung einer technischen Norm für Planung, Konstruktion, Betrieb und Rückbau von Erdwärmeregistern und Erdwärmesonden

Aushärtung eine dichte und dauerhafte, physikalisch und chemisch stabile Einbindung der Erdwärmesonde in das umgebende Gestein gewährleisten“ (VDI 4646, Blatt 2, 2001, S. 25). Basierend auf diesen Richtlinien des Vereins deutscher Ingenieure (VDI 4640, Blatt 1, 2000 und Blatt 2, 2001) wurden von den Genehmigungs- und Fachbehörden der deutschen Bundesländer eigene Vorgaben in Leitfäden ausgearbeitet. Blatt 2 der Richtlinie enthält zahlreiche Empfehlungen zu möglichen Verpressbaustoffen und -rezepturen (Kapitel 3.2).

Die Probleme, die in der Praxis durch technisch unzureichende Verpressung der Bohrlöcher entstehen, sind in Abb. 2-3 (Kap. 2.1.1.2) illustriert. Diese werden detaillierter in den Skizzen der Bohrlochquerschnitte von Abb. 2-6 und Abb. 2-7 gezeigt. Abb. 2-6 zeigt einen Ausbau für ein Bohrloch, der die technischen Anforderungen voll erfüllt, im Querschnitt mit Doppel-U-Sondenrohren, Hinterfüllung und dem Übergang zur Bohrlochwand. Ursachen für Undichtigkeiten und weniger dauerhafte Hinterfüllungen mit mangelhafter thermischer Anbindung an das Gestein sind in der Skizze des Bohrloches in Abb. 2-7 dargestellt. In der Hinterfüllmasse können durch unfachmännischen Einbau Inhomogenitäten mit Lufteinschlüssen und „Klumpen“ auftreten, ebenso wie Hohlräume zwischen Hinterfüllung und Gestein, zwischen Hinterfüllung und Sondenrohren sowie Rissbildungen.

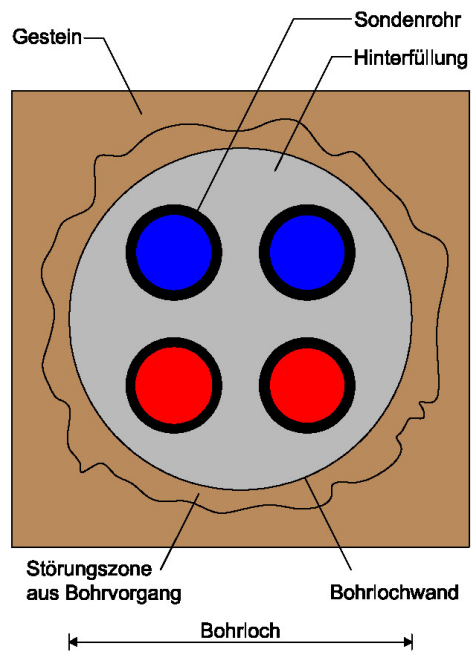


Abb. 2-6: Querschnitt eines Erdwärmesonden-Bohrlochs mit Doppel-U-Sondenrohren

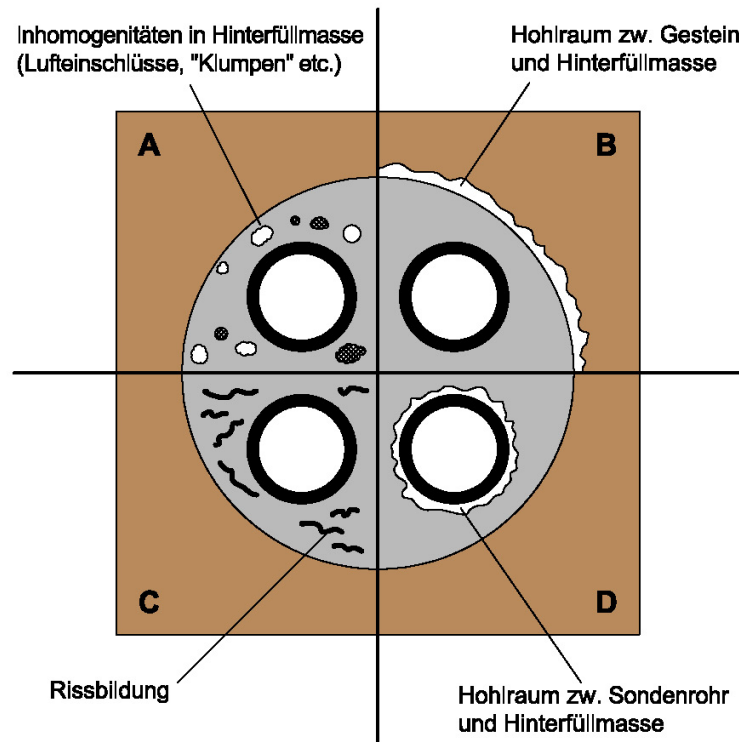


Abb. 2-7: Hinterfüllmasse mit
A: Inhomogenitäten (Luftschlüsse, „Klumpen“)
B: Hohlraum zw. Gestein und Hinterfüllmasse
C: Rissbildungen
D: Hohlraum zwischen Sondenrohr und Hinterfüllmasse

Zum Stand der Technik in Deutschland gehören auch die Patente DE 19929697 A1, DE 19958765 A1 (und EP 1065451) des Zentrums für Angewandte Energieforschung (ZAE) aus dem Jahre 2001, die ein „Graphithaltiges Verfüllmaterial für Erdreichwärmeüberträger und Erdstarkstromkabel“ anmelden. Diese Mischung enthält 5 bis 50 Gewichtsprozent an pulver- oder granulatformigem Graphit/Blähgraphit mit Korngrößen zwischen 1 µm und 1 mm mit einem Bindemittel aus mindestens zwei der Bestandteile Wasser, Ton (Bentonit), hydraulisches Bindemittel und Sand. Seit dem Jahr 2001 wird darauf basierend ein kommerzielles Produkt mit Wärmeleitfähigkeiten von $\geq 2,0 \text{ W/(mK)}$ verkauft (AZBUT 2001).

Weitere Untersuchungen zur *Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit* von Tiefbohrzementen für untertägige geschlossene Wärmetauscher wurden von SCHMID et al. (2002) mit verschiedenen Zuschlagstoffen wie Quarzmehl, Hämatit, Naturgraphit, Aluminiumoxid, Eisenpulver und Siliziumcarbid durchgeführt.

Im Rahmen des Projektes „Entwicklung von hochwärmeleitfähigen Verpressbaustoffen für Erdwärmesonden“ werden die Forschungsergebnisse der Firma STÜWA K. Stükerjürgen GmbH und des Kooperationspartners, der Fachhochschule Lippe und Höxter, Fachgebiet Geotechnik, 2004 mit dem 2. Preis der IHK Ostwestfalen-Lippe (OWL), der Handwerkskammer OWL, der Initiative für Beschäftigung und der Stiftung Standortsicherung Kreis Lippe ausgezeichnet. Die im Zuge der Forschungsarbeiten entwickelte Hinterfüllmasse ist kommerziell erhältlich.

Im Laufe der Jahre folgen weitere Produkt-Entwicklungen zu thermisch verbesserten Baustoffen und umfangreiche Labor-, Technikums- und Praxistests (HERRMANN 2003, RÜSGEN 2003, HUNN 2004, HERRMANN et al. 2004).

LENARDUZZI et al. berichten im Jahr 2000 über Funktionsprobleme und die Schädigung von Erdwärmesonden durch das *Gefrieren des Untergrundes und Eislinsenbildung* in Toronto (Kanada). Die Funktionsfähigkeit von 129 Wärmepumpenanlagen im Heiz- und Kühlmodus in frostempfindlichem Untergrund (Geschiebemergel aus 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 Eislinen 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 Erdsondenrohre. Das Grundwasser führte zu verstärkter Eislinenbildung und Quetschungen traten auf, da die Kompressibilität der Erdsondenrohre größer als die des umgebenden Gesteins war. LENARDUZZI und Kollegen empfehlen als frostsichere Hinterfüllung eine reine Zement-Wasser-Suspension mit einem geringen Wasseranteil, um weitere Schadensfälle zu vermeiden. Die vorgeschlagene Rezeptur genügt durch den hohen Zementanteil allerdings nicht den Anforderungen an die Umweltverträglichkeit der Baustoffe in Deutschland und weist zudem verhältnismäßig schlechte thermische Eigenschaften auf.

ROHNER & RYBACH (2001) beschreiben ausführlich - auch belegt durch In-Situ-Messungen - Frost-Schädigungen von Erdwärmesonden bei einer Überlastung durch verschiedene Gefrier- und Auftau-Zyklen. Eislinenbildung im Untergrund kann dabei zum Abreißen oder Abklemmen der Sondenrohre und somit zu einer deutlichen Verringerung der Anlagen-Lebensdauer führen.

Marktgängige Verpressbaustoffe wurden von MÜLLER (2004) hinsichtlich ihrer Eignung zur geothermischen Energiegewinnung untersucht. Bei Frost-Tau-Wechselversuchen zeigten die untersuchten Baustoffe Massenverluste zwischen 2 und 78%. Im Jahr 2007 berichtet MÜLLER von Frost-Tau-Wechselversuchen in Anlehnung an DIN 52104. Die empfohlene VDI-Mischung (25% Bentonit/25% Hochofenzement/50% Wasser) zeigt hohe Massenverluste bis über 50%; Angaben zum Temperaturbereich der Versuche werden nicht gemacht. MÜLLER definiert eine Probe mit einem Massenverlust von $<10\%$ nach 10 Frost-Tau-Beanspruchungen als ausreichend frostbeständig.

Da Erdwärmesonden meist in der unmittelbaren Umgebung von Gebäuden bzw. an und unter Nebengebäuden wie Garagen und den zugehörigen Einfahrten gebohrt werden, ergeben sich auch geotechnische Probleme bei einer Frostbeanspruchung des Untergrundes bzw. der Hinterfüllung, die sich in Form von Geländehebungen und Gelän-

desetzungen im Sondenumfeld und im Bereich der Anschlussleitungen sowie durch trichterförmige Nachbrüche äußern können.

BASSETTI et al. (2005) schildern in der „Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden“ Funktionsprobleme bei Erdwärmesondenanlagen (Abb. 2-9). Beispiele mit Hebungen und Setzungen infolge einer Vereisung der Zuleitungen zeigen Abb. 2-8 und Abb. 2-9.



Abb. 2-8: Schadensfälle durch Erdwärmennutzungen: Hebungen und Setzungen infolge einer Vereisung der Zuleitungen (BASSETTI et al. 2005)



Abb. 2-9: Schadensfälle durch Erdwärmennutzungen: vereister Sondenverteiler (BASSETTI et al. 2005)

Die neueste Studie zur „Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden“ wurde im Zuge der Überarbeitung eines Regelblattes (ÖWAV-207) von der Abteilung für Wasserwirtschaft, Grund- und Trinkwasserwirtschaft des Landes Oberösterreich im Oktober 2007 veröffentlicht. Die Untersuchungen wurden bei der Austrian Research Centers GmbH durchgeführt und beinhalteten Prüfungen von frischen Suspensionen sowie an abgebundenen Prüfkörpern in Labor- und Modellversuchen (Abb. 2-10). Über eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Laborversuche berichten auch NIEDERBRUCKER & STEINBACHER (2008).

Geprüft wurden Fertigprodukte sowie Baustellenmischungen, unter anderem auch die Mischung der VDI-Richtlinie sowie die „Schweizer Standard-Mischung“ und Fertigprodukte mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit, die auch im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit getestet wurden (Kap.3.2). Die Suspensionen wurden jedoch nicht nach der vorgeschriebenen Herstellerrezeptur mit Wasser angerührt, sondern auf eine bestimmte Trichterauslaufzeit (Marsh-Trichter, vgl. Kap.3.4) normiert.

Die Frost-Tau-Wechselbeanspruchung wurde nach der ÖNORM B 3303 mit zylindrischen und quadratischen Prüfkörpern nach einer Aushärtedauer von 28 Tagen mit einem zyklischen Temperaturprofil von +10°C bis -10°C getestet. Durchgeführt wurden insgesamt 10 bzw. 28 Frost-Tau-Wechsel. Die Befrostung der zylindrischen Prüfkörper erfolgte allseitig, die der quadratischen mit wärmedämmendem Material an den Seitenflächen und an einer Unterseite. Direkter Frostbeanspruchung war nur die Oberseite, die mit einer PE-Folie abgedeckt war, ausgesetzt. Die Beurteilung der Frostschädigung erfolgte durch die einaxiale Druckfestigkeit, die Wärmeleitfähigkeit sowie durch visuelle Aufnahme. Hinzu kommt, dass „als weitere Abweichung zu den Normversuchen die Lagerung während des Versuches nicht in Wasser erfolgte, da dies teilweise zu einer vollständigen Zerstörung der Probekörper führen würde“ (S. 10, AMT DER OÖ. LANDESREGIERUNG, GRUND- UND TRINKWASSERSCHUTZ 2007). Die Probekörper zeigten uneinheitliche leichte bis schwere Schädigungen mit Rissbildungen mit durchgehenden Horizontal- und Vertikalrissen einer Rissbreite zwischen 0,1 und >0,2 mm. Die Wärmeleitfähigkeit liefert keine aussagekräftigen

Vergleichswerte zwischen befrostenen und unbefrostenen Prüfkörpern und wird in der Studie als ungeeignet zur Beurteilung der Frostbeständigkeit bezeichnet. Das Gleiche gilt für die Druckfestigkeit, da die Proben teilweise aufgrund ihrer Schädigung nicht mehr verwendet werden konnten bzw. starke vertikale und horizontale Risse zeigten.



Abb. 2-10: Bilder der Modellversuche mit Farbtracern zur Kennzeichnung der Wegsamkeiten; Bild oben: Detail Grenzfläche Sondenrohr-Hinterfüllung, Bild unten: Wegsamkeiten entlang der Mantelfläche (AMT DER OÖ. LANDESREGIERUNG, GRUND- U. TRINKWASSERSCHUTZ 2007)

Die Wasser-/Feststoffwerte lagen mit Verhältnissen zwischen 1 und 3 sehr hoch. Die Druckfestigkeit der Prüfkörper fiel - neben nicht messbaren Proben - um 18 bis 56%. Der beschriebene Versuch der Serie 1 zeigt, dass die Ergebnisse nach 10 Frost-Tau-Wechseln um weitere 10 bis 20% bei 28 Frost-Tau-Wechseln abnehmen, was auf eine zunehmende Frostschädigung der Prüfkörper schließen lässt. Ein Abnahmekriterium für die Frost-Tau-Wechselbeständigkeit konnte aufgrund der Ergebnisse nicht festgelegt werden.

Die Wasserdurchlässigkeiten der Prüfkörper liegen in den Laborversuchen bei Werten zwischen 1×10^{-9} m/s und 5×10^{-7} m/s. Die Modellversuche zur Untersuchung der Systemdurchlässigkeit an einer 1,5 m langen Rohrstrecke zeigen um eine Zehnerpotenz erhöhte Wasserdurchlässigkeiten, im Vergleich zu den Laborprüfkörpern. Die Wegsamkeiten sind an die Grenzflächen zwischen Sondenverrohrung und Verpressmaterial gebunden.

Im Rahmen der vorgelegten Forschungsarbeit wurden verschiedene Baustoffe verwendet. Ein Überblick über derzeit in der Praxis eingesetzte, verschiedenartige Baustoffe und Rezepturen wird in Kap. 3.2 (u.a. Tabelle 3-1) gegeben.

2.1.2.2 Prüfmethoden

Für die Qualitätskontrolle der in der Praxis eingesetzten Hinterfüllbaustoffe existieren keine speziell vorgeschriebenen Prüfmethoden bzw. Standardtests. Da bislang für den Bereich der oberflächennahen Geothermie keine Norm des Deutschen Instituts für Normung auf nationaler oder europäischer Ebene existiert, wird bislang keine standardisierte, dem Anwendungsbereich angepasste, Qualitätssicherung bzw. -kontrolle durchgeführt. Obwohl die Anzahl der gebauten Erdwärme-Anlagen in den letzten Jahren mit Zuwachsraten im zweistelligen Prozentbereich stieg (Bundesverband WP 2007), wird die Qualitätskontrolle sehr uneinheitlich (Tabelle 2-1) in Anlehnung an bekannte, im Baubereich für andere Verpressbaustoffe bzw. Betone verwendete, Verfahren gehandhabt.

Tabelle 2-1: Vorgehensweise bei der Qualitätsprüfung für Hinterfüllbaustoffe

Qualitätsprüfung für Hinterfüllbaustoffe	
Behörden/offizielle Stellen	Baustoffhersteller/Bohrfirmen
<ul style="list-style-type: none"> - bei Verwendung von Fertigprodukten: Unbedenklichkeitsbescheinigung¹ - Rückstellproben der verpressten Suspension² - Bauüberwachung durch Behördenvertreter/Fachbüro³ 	<p><u>Prüfzeugnisse Standardverfahren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Druckfestigkeit (DIN EN 196-1) - Wasserdurchlässigkeit (DIN 18130-1) <p><u>Prüfzeugnisse für verschiedene Untersuchungen:</u> (in Anlehnung an Normen/nicht genormte Verfahren)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wärmeleitfähigkeit - Fließfähigkeit - Wasserabsetzmaß - Auslaugung - Frostversuche

¹ Leitfaden für Erdwärmesonden Bayern: Art der Bescheinigung nicht näher spezifiziert

² Leitfaden für Erdwärmesonden Baden-Württemberg: keine weitere Vorgehensweise für die Prüfung der Proben festgelegt

³ Je nach Vorgaben: Kontrolle des Sondeneinbaus, Verpressmengen, Druckprüfung

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde die Anwendung der, in Tabelle 2-1 beschriebenen, Prüfverfahren getestet und durch weitere geeignete Untersuchungsmethoden ergänzt. Dies gilt vor allem für die verschiedenen Untersuchungen, die bislang an bestehenden Normen angelehnt bzw. von den verschiedenen Prüfinstituten aus ähnlichen Prüfbereichen ausgewählt wurden.

Bekannte Methoden zur chemischen Analyse der Baustoffe bzw. zur Untersuchung des Auslaugungsverhaltens (detaillierte Beschreibung in Kap. 3.3) konnten ohne Modifikationen angewandt werden. Dies gilt für die Bestimmung der Kationengehalte mit Atomabsorptionsspektroskopie, für die Photometrie zur Anionenanalyse und ebenfalls für die Analyse der Kristallstrukturen und des semiquantitativen Mineralbestandes. Der Königswasseraufschluss nach dem Deutschen Einheitsverfahren wurde verwendet, um die pulverförmigen Baustoffe in Lösung zu bringen und den Gesamtgehalt an Ionen zu bestimmen. Weitere Standardverfahren aus der chemischen Analytik dienten der Auswertung der Eluierbarkeit der Stoffe mit Wasser, der Messung der elektrischen Leitfähigkeit sowie der Analyse des pH-Wertes im Eluat und in den frisch angerührten Suspensionen.

Die physikalischen Eigenschaften der Trockenbaustoffe, der frisch angerührten Suspensionen und der aushärtenden Prüfkörper, wurden auch mit bekannten Standardverfahren aus der Ingenieurgeologie und Baustofftechnologie (detaillierte Beschreibung Kap. 3.4) untersucht. Dies umfasste die Bestimmung der Korndichte und des Porenanteils. An den frisch angesetzten Suspensionen wurden Suspensionsdichte und Fließfähigkeit mit Rheometrie sowie einem Marsh-Trichter ermittelt. An ausgehärteten Prüfkörpern wurde zur Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit die Wärmeleitfähigkeit gemessen. Zudem wurden Wasserdurchlässigkeit und Druckfestigkeit bestimmt. Zur Gefügeanalyse (Kap.3.6) wurden Rasterelektronen- und Durchlichtmikroskopie sowie die Quecksilberporosimetrie angewandt.

Die Analyse der möglichen Prüfverfahren stellt einen wichtigen Baustein der Forschungsarbeit dar, da bis dato keine systematische Probenanalytik für Erdwärmesonden-Baustoffe durchgeführt wird, keine einheitlichen Qualitätskriterien definiert sind und somit keine Qualitätskontrolle etabliert ist.

Da auch aussagekräftige Untersuchungen zum Frostverhalten der Baustoffe fehlen und die Frostbeständigkeit nicht methodisch tragfähig analysiert wurde, wurden im Rahmen der Forschung als weitere analytische Komponente Frostversuche durchgeführt, geprüft und modifiziert.

Die Anwendbarkeit gängiger Frostkriterien aus der Bodenforschung bzw. dem Betonbau ist für die Erdwärmesonden-Hinterfüllbaustoffe nicht gegeben, da im Einsatzbereich die Installation unterhalb der atmosphärischen Frosteindringtiefe und permanente Frost-Tau-Wechselbeanspruchung durch die Anlagentechnik erfolgt. Dies hat wechselnde Systemtemperaturen in Abhängigkeit von der Außentemperatur und durch das Heizprofil des Gebäudes zur Folge. Zunächst wurden Prüfkörper verschiedener Geometrien zyklischen Frost-Tau-Belastungen unterzogen, um Einflussfaktoren wie Probengröße und -art zu untersuchen. Bislang wurden in der Literatur nur Untersuchungen nach DIN 52104-1 (1982) beschrieben (MÜLLER 2004); hierbei handelt es sich jedoch um einen Frost-Tau-Wechselversuch zur Prüfung von Naturstein mit einer Schadensanalyse nach Augenschein bzw. hinsichtlich der Gewichtsveränderung des Prüfkörpers, ohne methodisch ausreichend tragfähige, messbare Frostkriterien. Die Konzeption der Frostversuche erfolgte ausgehend von Versuchen nach DIN 52104-1 und wurde ergänzt durch Messungen der Ultraschalllaufzeiten zur Schadensanalyse. Des Weiteren wurden Gefügeuntersuchungen mit Aufnahmen unter dem Rasterelektronenmikroskop und an Dünnschliffen im Durchlichtmikroskop sowie detaillierte Porengrößenanalysen mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie durchgeführt.

Da im Zuge der Untersuchungen festzustellen war, dass die Reproduzierbarkeit der Frostversuche nur bei genau definierten Prüfbedingungen, vor allem hinsichtlich der Probenkörpergeometrie, der Frosteinwirkung und des Temperaturprofils, gegeben ist, wurde zur Analyse des Frost-Tau-Wechsel-Verhaltens als weiteres Verfahren das CF-Verfahren in Anlehnung an DIN CEN/TS 12390 Teil 9 (2006) bzw. auch bekannt als CIF-Tests (Capillary Suction, Internal Damage and Freeze-Thaw) nach SETZER et al. (2001) und den RILEM-Empfehlungen (2004) durchgeführt. Die Norm wurde zur Prüfung von Betonbauteilen, die atmosphärischen Frost-Tau-Wechseln in Kontakt mit Wasser ausgesetzt sind, konzipiert und fand bislang zur Prüfung von Erdwärmesonden-Baustoffen keine Anwendung.

Frostkriterien der Norm sind die Abwitterung, also der Materialverlust an der Betonoberfläche und die innere Gefügestörung mit - an der Oberfläche unsichtbaren - Rissen innerhalb des geprüften Betons. Da

während der Prüfung isothermes kapillares Wasseransaugen durch den Prüfkörper erfolgen kann, ermöglicht der CIF-Test die gleichzeitige Messung der Feuchteaufnahme und der inneren Gefügeschädigung durch Frost-Tau-Wechsel mit einaxialem Wärme- und Feuchte-transport in Gegenwart von Wasser.

Da bei einer Frostprüfung, bei der die Probe gleichmäßig Wärme über alle Seitenflächen abgibt, der Probekörper umso stärker von der Rückseite her gefriert, je mehr Wärme die Prüfflüssigkeit im Vergleich zum Probekörper verbraucht, sind die Prüfergebnisse nur bedingt reproduzierbar, da der Mechanismus der „Frostpumpe“ (Kap. 2.3) außer Kraft gesetzt ist.

Der CIF-Test wurde für die Forschungsarbeiten an Erdwärmebaustoffen modifiziert, da eine 1:1-Anwendung nicht sinnvoll gewesen wäre und vermutlich keine reproduzierbaren Ergebnisse geliefert hätte. Die wichtigste Anpassung beim modifizierten CIF-Test Geothermie wurde im Bezug auf die Temperaturzyklen im Versuchsverlauf vorgenommen. Da die genormten Temperaturen von +20°C bis -20°C im Anwendungsbereich der Erdwärmesonden nicht erreicht werden, wurden die Temperaturen im Zyklus auf +10°C bis -10°C angepasst. Diese Maßnahme hatte zur Folge, dass die Temperatur für die Prüfungen der Frostzerstörung (Abwitterung, Ultraschallmessungen etc.) auf +20°C erhöht werden musste, um ein komplettes Auftauen der Proben zu erreichen und reproduzierbare Messungen der Schalllaufzeiten durchführen zu können. Für die Versuche wurde ergänzend das BAW-Merkblatt von 2004 für die Frostprüfung von Beton berücksichtigt, das auf dem Normentwurf prEN 12390-9 aus dem Jahre 2002 (neu: DIN/CEN TS 12390-9, 2006) und der RILEM-Empfehlung basiert und zusätzlich eine Messung der Ultraschalllaufzeit an beiden horizontalen Achsen des Probekörpers zur Ermittlung der inneren Schädigung vorsieht.

Eine weitere Modifikation erfolgte im Bezug auf die Anzahl der Frostzyklen; diese wurden auf 28 Frost-Tau-Wechsel verringert und als ausreichend definiert, da sehr schnell nach Testbeginn eine Reaktion der getesteten Prüfkörper (Rissbildung, Abwitterung) erfolgte und der Schädigungsverlauf nachvollzogen werden konnte. Die genormte Zyk-

lenanzahl von 54 hätte für diese Art von Baustoffen keine sinnvollen Testergebnisse gebracht.

Auch für die Prüfkörper wurden Anpassungen vorgenommen; die Norm sieht die Herstellung von Betonwürfeln einer Kantenlänge von 150 mm vor. Die Prüfkörper der Erdwärmesonden-Hinterfüllmassen wurden unter Berücksichtigung der Mindestanforderungen an die normativen Maße in 1,5 l PE-Flaschen mit einer Kantenlänge von 110 mm erstellt und die PE-Oberfläche von 2 mm Dicke wurde als Versiegelung der Seitenflächen genutzt. Die Prüfkörper wurden zudem im Hinblick auf die leichtere Handhabbarkeit der gut fließfähigen Suspensionen in den PE-Flaschen erstellt; ein weiterer Vorteil besteht in der Möglichkeit zur Entnahme von Rückstellproben auf der Baustelle und der Nutzung der Seitenwand der Flasche zur Abdichtung der Probe, da die Prüfvorschrift die Durchführung mit behinderter Seitendehnung vorsieht.

Die Auswertung der Zwischenergebnisse erfolgte, wie in der Norm beschrieben, jedoch in selbst gewählten Prüfzyklen von 6 bzw. 10, 14, 22 und 28 Frost-Tau-Wechseln.

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden neue Frostkriterien für Erdwärmesonden-Baustoffe für die Prüfung des Frost-Tau-Wechselverhaltens definiert. Dies erfolgte unter Berücksichtigung aller im Test zu ermittelnden Parameter wie der Abwitterung sowie der Schalllaufzeiten der Prüfkörper. Aus der Änderung der relativen Durchschallungszeit wurde zur Auswertung der inneren Schädigung der relative dynamische E-Modul berechnet. Da nur die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) im Merkblatt aus dem Jahre 2004 einen relativen dynamischen E-Modul von $R_{u,n} = 0,75$ bzw. 75% definiert, wurde auch hierfür mit der Zyklenanzahl von 28 ein neues Abnahmekriterium festgelegt, bis zu dem das Schädigungskriterium nicht unterschritten werden darf. Ausgehend von den Ergebnissen wurde die Übertragbarkeit der Versuche auf das In-Situ Verhalten der Baustoffe ausführlich diskutiert.

In Ergänzung zu den Versuchen nach DIN 52104-1 wurden weitere Untersuchungen an Prüfkörpern mit eingebauten HDPE-Rohren durchgeführt. Diese Probenkörpergeometrie wurde selbst erarbeitet und diente der Untersuchung des Verhaltens an der Grenzfläche Rohr/Hinterfüllung.

Die Laborversuche an einzelnen Prüfkörpern wurden mit der Untersuchung des Gesamtsystems im Prüfstand Geothermie weitergeführt.

Der Prüfstand Geothermie ermöglicht im größeren technischen Maßstab thermische Einzelversuche, die an die Randbedingungen beim Betrieb von Erdwärmesonden angepasst sind. Des Weiteren wird bei diesen Versuchen die detaillierte Analyse der Schnittstellen zwischen Geosystem (Gestein) und anthropogenem System (Rohr + Hinterfüllung) mit der Beanspruchung der verwendeten Baustoffe und Materialien sowie der Ausbreitung des Temperaturfeldes möglich. Der Prüfstand Geothermie wurde eigens für die Forschungsarbeiten, ausgehend von den Laborversuchen, konzipiert und kann als Methode zur Prüfung von Gesamt-/Verbundsystemen etabliert werden.

Mit der Anwendung der Standardprüfverfahren sowie der modifizierten Prüfverfahren und der Betrachtung des Gesamtsystems im Prüfstand Geothermie wurde die Definition von Materialeigenschaften möglich, die in der Gesamtbetrachtung zur Überprüfung des Gesamtkonzeptes ('Proof-of-Concept') mit neuen Frost-Taubeständigen Materialien verifiziert werden konnte.

2.1.2.3 Umfrage Erdwärme-Bohrfirmen

Bislang gibt es keine Studien über Verpressstandards und nur wenig dokumentierte Informationen zur Umsetzung der aktuellen Technikstandards (Kap. 2.1.2.1) in die Praxis. Ebenso existieren keine statistischen Erhebungen über die Art der verwendeten Materialien.

Die Umsetzung des Leitfadens Baden-Württemberg in den Jahren 2002 bis 2004 anhand der Auswertung von Genehmigungsunterlagen der Unteren Wasserbehörden wurde von WOERNLE (2008) analysiert. Bei 91% der erfassten Anlagen waren die zur Verpressung eingesetzten Komponenten gemäß der geltenden Bestimmungen (VDI 4640, Leitfaden BW) zulässig, allerdings wurde nur bei circa einem Drittel der Anlagen die Zusammensetzung der Verfüllung eindeutig nachvollziehbar dokumentiert. Die Verpressvolumina hingegen wurden in drei Viertel der Fälle plausibel protokolliert.

Im Jahr 2005 wurde daher von der Autorin dieser Forschungsarbeit eine Umfrage unter Erdwärmesonden-Bohrfirmen, die ihre Hauptniederlassung in Deutschland haben, durchgeführt. Dabei handelte es

sich um Unternehmen, die in Deutschland sowie im benachbarten europäischen Ausland tätig sind. Für die Umfrage wurde ein selbst konzipierter Fragebogen mit Fragen zu den in Tabelle 2-2 aufgelisteten Kriterien verschickt.

Tabelle 2-2: Fragebogen für Erdwärmesonden-Bohrfirmen

Kriterien
Firmengröße: Bohrleistung in Erdwärmesonden-Metern pro Jahr
Tätigkeitsbereich (In-/Ausland)
Planungsleistungen (Dimensionierung der Erdwärmeanlagen)
Vorgehensweise nach Erdsonden-Einbau: Bohrloch wird nicht verfüllt Bohrloch wird mit Bohrklein verfüllt Bohrloch wird zementiert: -mit Fertigprodukt/Eigenmischung -unter Berücksichtigung der Geologie
Verpressung: <ul style="list-style-type: none"> • Dokumentation: ja/nein • Pumpentyp/-art (z.B. Schneckenpumpe etc.) • Verpressdruck (Kontrolle)

Für die Umfrage wurden 100 Firmen angefragt, es wurde ein Rücklauf von 40 Stück erreicht. Die Firmen waren zu 40% kleine Firmen mit einer Bohrleistung von < 5000 Meter pro Jahr, mit einer maximalen Bohrleistung von > 40000 Meter im Jahr waren drei Firmen vertreten. Nur 5 Firmen sind bundesweit tätig, die anderen Firmen arbeiten mit regionalem Bezug auf das Bundesland ihres Firmensitzes bzw. angrenzende Bundesländer. Ca. 20% der angefragten Firmen arbeiten auch im benachbarten Ausland, vor allem in Österreich und der Schweiz sowie in Luxemburg und Frankreich. 65% der Firmen bieten

auch die Dimensionierung bzw. Auslegung der Erdwärmeanlagen an. Verwendete Dimensionierungsmethoden waren die VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 (2001), die pauschale Annahme einer Entzugsleistung von 50 W/m (4 Firmen) sowie Thermal Response Tests (6 Firmen) und andere Simulationsrechnungen. Weitere Planungshilfen stellten für die Firmen die vorliegenden Planungsmaterialien der Geologischen Dienste (GD NRW 2004), mit den Angaben aus den Leitfäden sowie dem Programm Earth Energy Designer (HELLSTRÖM & SANNER 1994) und Erfahrungswerte sowie die Abstimmung mit den geologischen Landesämtern dar.

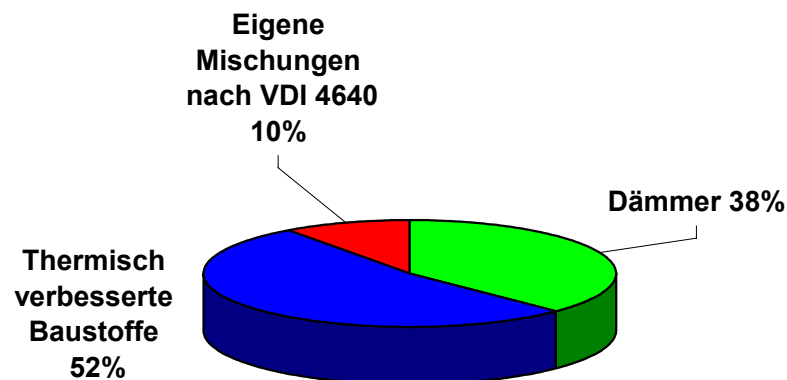


Abb. 2-11: Art der Baustoffe, die von Firmen zur Verpressung verwendet werden

87% der Unternehmen gaben an eine Verpressung durchzuführen. Bei 3% wurde der Ringraum mit Bohrgut verfüllt. In Abb. 2-11 ist die Auswertung der verwendeten Baustoffe zur Verpressung der Bohrlöcher dargestellt.

Es zeigt sich, dass nur von 10% der Firmen Eigenmischungen gemäß der VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 (2001), vgl. Kap. 3.2, verwendet werden. Meist handelt es sich dabei um Mischungen aus Zement, Bentonit

und Wasser; Zusätze sind Quarzsand bzw. -mehl; der Wasseranteil variiert meist zwischen 30 bis 50%. Von den befragten Firmen verpressen 38% so genannte „Dämmer“, dabei handelt es sich um Baustoffe aus Zement/Tonbestandteilen, die auch für andere Anwendungsbereiche im Brunnenbau und zur Bodenverbesserung eingesetzt werden. Die meisten Unternehmen (52%) verwenden für die Verpressung der Geothermie-Bohrung für Erdwärmesonden entwickelte Fertigprodukte mit guten thermischen Eigenschaften auf Graphit- bzw. Quarzsandbasis.

30% der befragten Unternehmen stimmen die Verpressung auf die an der Bohrstelle vorhandene Geologie ab. Bei klüftigem Gebirge, großen Hohlräumen bzw. Verpressverlusten werden nach Bedarf Suspensionen erhöhter Dichte bzw. mit geringen Wasser/Zement-Werten und Nachinjektionen vorgenommen; für den Verschluss von Hohlräumen findet je nach Machbarkeit die Einbringung von Kies in das Bohrloch statt.

Bei der Verpressung dokumentieren 90% der Firmen die Verpressmengen; als Verpresspumpen werden hauptsächlich Kolben- bzw. Schneckenpumpen verwendet. Der Verpressdruck liegt zwischen 15 und 20 bar und wird häufig nicht exakt protokolliert.

Die Umfrage bei den Bohrfirmen wurde durchgeführt, um genauere Erkenntnisse über die eingesetzten Baustoffe sowie die Verwendung in der Praxis zu erhalten. Die genannten Baustoffe/Rezepturen wurden als „Standard“ für die Laborversuche definiert, durch weitere Mischungen ergänzt und entsprechend getestet.

Die Ergebnisse der Umfrage zeigen, dass Baustoffe zur Verpressung der Erdwärme-Bohrungen in der Praxis vor allem als Fertigprodukte verwendet werden. Gründe liegen mit Sicherheit in der einfacheren Handhabung sowie Dosierung. „Dämmer“-Baustoffe werden aufgrund des - im Vergleich zu thermisch verbesserten Baustoffen - günstigen Preises sowie der Verfügbarkeit in den Firmen bedingt durch die Anwendung in anderen Bereichen, ebenfalls sehr häufig verwendet. Spezifische geologische Verhältnisse werden durch die, im Herstellerdatenblatt festgelegten, Rezepturen der Baustoffe nicht berücksichtigt. Hierfür erfolgt von einem Drittel der Firmen eine Anpassung der Pro-

dukte hinsichtlich des w/z-Wertes bzw. der Inhaltsstoffe. Die Dokumentation der Verpressmengen wird von den meisten Firmen durchgeführt, wünschenswert wären zudem genauere Angaben zu den verwendeten Verpressgeräten und die Protokollierung der Drücke während der Verpressung (u.a. zur Prüfung der Anlagenfunktionstüchtigkeit).

2.2 Betontechnische Grundlagen

2.2.1 Überblick

Die Betontechnologie hat im Laufe der vergangenen Jahrzehnte bis heute einen international anerkannten sehr hohen Qualitätsstandard erreicht. Die Grundlage für den Standard in Europa bildet die europäische Norm DIN EN 206-1 aus dem Jahr 2001 mit dem Titel „Beton, Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“. Dieses Regelwerk umfasst sehr viele weitere Normen, die generell für Betonbauwerke gelten und verschiedenste Anforderungen an verwendete Materialien sowie Prüfverfahren und Verarbeitung im Detail regeln. Der Geltungsbereich wird definiert für die Anwendung von Beton, der für Ortbetonbauwerke, für vorgefertigte Bauwerke sowie für Fertigteile für Gebäude und Ingenieurbauwerke hergestellt wird.

Wichtig sind im Zusammenhang mit der vorgelegten Forschungsarbeit die europäischen Normen zur Prüfung von Beton im Bauwerk (u.a. DIN EN 12504) und zur Prüfung im Festbeton DIN EN 12390 Teil 9 zur Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Betonbauteilen.

Die Klassifikation der Betone erfolgt nach verschiedenen Kriterien; es kann eine Unterscheidung nach der Trockenrohdichte in Normal- (> 2,0 bis 2,8 kg/dm³), Leicht- (max. 2,0 kg/dm³) und Schwerbeton (> 2,8 kg/dm³) getroffen werden. Eine weitere Einordnung kann abhängig vom Verarbeitungs-/Erhärtungszustand in Frischbeton, Junger Beton und Festbeton bzw. nach der Konsistenz im frischen Zustand erfolgen.

Weitere Klassifizierungen werden anhand der besonderen Eigenschaften des Betons vorgenommen, die sich aus dem Anwendungsbereich (Exposition je nach Umweltbedingungen) mit einem spezifischen Anforderungsprofil ergeben:

- Wasserundurchlässiger Beton
- Beton mit hohem Frostwiderstand/Frost-Tausalz-Widerstand
- Beton mit hohem Widerstand gegen chemische Angriffe
- Beton mit hohem Verschleißwiderstand
- Beton für hohe Verbrauchstemperaturen
- Leichtbeton
- Faserbeton
- Selbstverdichtender Beton
- Hoch- und ultrahochfester Beton u.a.

Auch nach dem Größtkorn der zugesetzten Gesteinskörnungen (Zuschläge) kann eine Einordnung erfolgen. Grobbeton bezeichnet Beton mit einer Gesteinskörnung > 32 mm; Feinbeton hingegen enthält nur Körner bis 8 mm Größe.

Als Mörtel werden Gemische aus mineralischen Bindemitteln, Anmachflüssigkeit, Wasser, Zuschlagstoffen und ggf. Zusätzen bezeichnet. Die zugesetzten Gesteinskörnungen bestehen hierfür aus Körnern bis maximal 4 mm Korngröße, meist Sand (GRÜBL 2001). Es wird je nach Verarbeitungszustand zwischen Frisch- und Festmörtel unterschieden. Mörtel werden im Bezug auf ihren Einsatzbereich als Mauermörtel, Estrichmörtel oder Wassermörtel/hydraulischer Mörtel verwendet.

Für den Einsatzbereich im Baugrund können Injektionen bzw. Injektionsmittel in Mörtel und Pasten, Suspensionen, Lösungen und Emulsionen unterschieden werden (SEMPRICH & STADLER, 2001). Tabelle 2-3 gibt einen Überblick über die Definitionen verschiedener Arten von Injektionsmitteln. Die Abgrenzung zu Mörtel und Pasten zu Suspensionen wird über den Wasser-Zement-Wert (w/z-Wert) vorgenommen. Dieser ist bei Mörteln und Pasten im Allgemeinen kleiner als 1 und bei Suspensionen größer 1. Im Anwendungsbereich für Erdwärmesonden werden hauptsächlich Suspensionen mit hohem Wasseranteil und w/z-Werten > 1 eingesetzt (Kap. 2.1.2.1, Kap. 3.2).

Tabelle 2-3: Definition verschiedener Arten von Injektionsmitteln
(SEMPRICH & STADLER, 2001)

Injektionsmittel		
Art	Begriffsbestimmung	Zusammensetzung
Mörtel und Pasten	Suspensionen mit sehr hohem Feststoffanteil	Mischungen aus Wasser, Zement, Sand und ggf. Zusätzen, w/z-Wert i.A. < 1
Suspensionen	feine Verteilung eines nicht gelösten Stoffes in einer Trägerflüssigkeit	Mischungen aus Wasser, Zement oder Feinstbindemittel und ggf. Bentonit, w/z-Wert i.A. >1
Lösungen und Emulsionen	Mischungen mit Kunstharzen, Wasserglas und Härtern; werden für Anwendungsbereich nicht berücksichtigt	

Die **Wärmeleitfähigkeit des Betons** ist hauptsächlich von der Porosität und dem Feuchtegehalt abhängig. Die Wärmeübertragung erfolgt durch Wärmeleitung in Richtung des vorhandenen Temperaturgefälles. Dichter Normalbeton (nach DIN 1045 Teil 1, Kies- oder Splittbeton mit geschlossenem Gefüge) hat mit einer Rohdichte von $2,4 \text{ kg/dm}^3$ eine gute Wärmeleitfähigkeit von $2,1 \text{ W/mK}$ (Rechenwert aus DIN 4108). Die Frage nach guten thermischen Eigenschaften von Beton stellt sich in der Baupraxis selten, da für den baulichen Wärmeschutz im Allgemeinen Baustoffe mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit und somit einer guten Dämmfähigkeit benötigt werden. Der Kapillarporenraum spielt eine Rolle im Hinblick auf die thermischen Eigenschaften, da ein hoher Wassergehalt in den Kapillarporen die Leitfähigkeit gegenüber trockenem Beton weiter erhöht. Entscheidend für die Verringerung der Wärmeleitfähigkeit sind daher größere Poren im Beton (LOHMEYER 1997).

Frostbeanspruchter Beton wird für Bauteile mit Frosteinwirkung hergestellt. Dazu gehören z.B. Außenbauteile im Bereich von Wasserwechsel-Zonen wie Bauwerke aus dem Wasser- (Schleusen, Klärwer-

ke etc.) und Industrieanlagenbau (Kühltürme, Behälter etc.). Diese Art von Betonen wird in DIN EN 206/DIN 1045-2 in Abhängigkeit von der Angriffsart und der Sättigung des Betongefüges in vier Expositionsklassen (Tabelle 2-4) eingeteilt. Für diese Expositionsklassen werden Mindestanforderungen der Betonzusammensetzung vorgeschrieben.

Tabelle 2-4: Expositionsklassen (EK) nach DIN EN 206-1/DIN 1045-1

Frostangriff mit und ohne Taumittel			
EK	Bedingungen	Anwendungsbereich	Betonfestigkeitsklasse
XF1	Mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel	Außenbauteile	C25/30 LC25/28
XF2	Mäßige Wassersättigung, mit Taumittel	Betonbauteile im Sprühnebel-/Spritzwasserbereich bei geneigten oder vertikalen taumittelbeanspruchten Flächen, soweit nicht XF 4; Bauteile im Sprühnebelbereich von Meerwasser	C25/30 LC25/28
XF3	Hohe Wassersättigung, ohne Taumittel	Offene Wasserbehälter, Bauteile in Wasserwechselzone von Süßwasser	C25/30 LC25/28
XF4	Hohe Wassersättigung, mit Taumittel oder Meerwasser	Bauteile, die mit Tausalz behandelt werden, horiz. Bauteile im Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen, direkt befahrene Parkdecks, Meerwasser	C30/37 LC30/33

Die genauen Anforderungen an die Betonzusammensetzung regelt DIN 1045-2. Der höchst zulässige w/z-Wert liegt für Beton der Expositionsklasse XF1 bei 0,60. Für die Bedingungen der Klassen XF2 bis XF4 müssen Werte von 0,55 unter dem Einsatz von Luftporenbildnern bzw. $\leq 0,50$ ohne Luftporen eingehalten werden. Weitere Details finden sich in den vorgenannten Regelwerken (VDZ 2002).

Generell bestehen bei der Betonherstellung eine Vielzahl an Nachbehandlungsmöglichkeiten (u.a. verschiedene chemische und physikalische Methoden); dies gilt für den Anwendungsbereich der Erdwärmesonden-Hinterfüllung im Gegensatz zur Betontechnik nicht. Mit dem Einbringen der zementgebundenen Suspensionen bestehen keine Möglichkeiten der Nachbehandlung bzw. der Beeinflussung der sich ausbildenden „Materialqualität“ mehr.

2.2.2 Phasen der Gefügebildung

2.2.2.1 Zementchemie

Zement setzt sich aus den Bestandteilen Zementklinker, Gips, Anhydrit und eventuell weiteren Zusatzstoffen wie Kalksteinmehl, Hüttensand, Flugasche oder Silicastaub zusammen. Zementklinker als Grundstoff wird durch Brennen von Kalkstein-, Ton- und Quarzmehl sowie Eisenoxid hergestellt; bei Temperaturen von ca. 1450°C entstehen beim Sintern der Ausgangsstoffe neue reaktive Phasen. Portlandzementklinker wird durch die Hauptphasen Tricalciumsilikat (C_3S), Dicalciumsilikat (C_2S), Tricalciumaluminat (C_3A) und Calciumaluminatferrite ($\text{C}_2(\text{A},\text{F})$) gebildet (VDZ 2002).

Erstarrung und Erhärtung zementgebundener Materialien beruhen auf dem Hydratationsprozess des Zements. Nach dem Anmischen des Zementes mit Wasser bildet sich der Zementleim, der zunächst aus Zementkörnern besteht, die von einer Wasserhülle umgeben sind. Mit dem Einsetzen der Hydratation bilden sich Hydratationsprodukte wie Calciumsilikathydrate, Calciumhydroxide, Ettringit und Monosulfat, die aus der Auflösung der Zementkörner an der Oberfläche und Umwand-

lung der Zementkörner zu Zementgel mit entsprechendem Kristallwachstum aus den Hauptphasen des Portlandzementklinkers entstehen (TAYLOR 1992).

Beim Mischen von Zement und Wasser bildet sich Zementleim für die Umhüllung der einzelnen Zuschlagstoffe; dieser erstarrt im Laufe des Hydratationsprozesses. Bei vollständig vollzogener Umwandlung der Zementkörner erfolgt eine Volumenvergrößerung um 60% (ALIGIZAKI 2006). Die Hydratationsgeschwindigkeit hängt von der Reaktionsgeschwindigkeit der Klinkerphasen ab; diese wiederum wird durch die Mahlfineinheit des Zements und somit von der Größe der Zementkörner beeinflusst.

Das Anmachwasser wird von ca. 25 Massenprozent (MA.-%) des Zements chemisch gebunden, ein weiterer Wasseranteil liegt als Porenwasser oder als geordnetes Zwischenschichtwasser innerhalb der Calciumsilikathydrate (CSH) vor (10 ± 5 MA.-% des Zements) vor oder haftet adsorptiv an den anderen Hydratationsprodukten (HERB 2003). Wasser-Zement-Werte $> 0,4$ führen zu überschüssigem Wasser, das sich in Hohlräumen zwischen den Hydratationsprodukten, den Kapillarporen, ablagert und bei Austrocknung zu luftgefüllten Porenräumen führt; als Hohlräume zwischen den Zementgel-Partikeln bleiben die so genannten Gelporen.

Der Hydratationsablauf funktioniert nur unter Zugabe eines angepassten Sulfatträgers (Erstarrungsregler); meist ein Gemisch aus Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ und natürlichem Anhydrit CaSO_4 . Andernfalls erfolgt ein sofortiges Erstarren des frischen Zementleims durch die Bildung von großen blättchenförmigen Tetracalciumaluminathydratkristallen aus Tricalciumaluminat. Bei hüttensandhaltigen Zementen wird der glasige Hüttensand (basische, granuliert Hochofenschlacke) durch das, bei der Klinkerhydratation freiwerdende, Calciumhydroxid alkalisch sowie sulfatisch durch den Sulfatträger angeregt. Unterschiede zur Hydratation mit Portlandzement bestehen im CaO/SiO_2 -Molverhältnis der CSH-Phasen. Hüttensandreiche Hochofenzemente enthalten Calciumsilikathydrate mit C/S-Werten um 1,2 bis 1,5. Bei Portlandzement liegen diese bei Werten $> 1,5$ (VDZ 2002).

Die Gliederung der Zementhydratation (Abb. 2-12) wird in mehrere Hauptstadien unterteilt (LOCHER et al. 1976, TAYLOR 1992):

- **Prä-Induktionsperiode/Anfangshydrolyse** (erste Minuten nach Wasserzugabe):
Beginn der Hydratation, Lösen von Calcium- und Sulfationen, diese bilden mit Tricalciumaluminat kurze, hexagonal säulenförmige Ettringitkristalle und erste Calciumsilikathydrate auf den Oberflächen der Klinkerpartikel (Abb. 2-12 a).
- **Induktionsperiode** (30 Minuten bis 2 Stunden):
Bildung einer dünnen Lage von Hydratationsprodukten auf den Klinkerpartikeln; zunächst keine weitere Hydratation (Ruhephase), da die Hydratationsprodukte zu klein sind, um den Raum zwischen den Zementpartikeln zu überbrücken. Das Ansteifen des Zementleims erfolgt durch erste, sehr feine Calciumsilikathydrat-Kristalle und Längenwachstum der Ettringitkristalle (Abb. 2-12 b).
- **Accelerationsperiode** (2 bis 8 Stunden):
Einsetzen intensiver Hydratation der Klinkerphasen; Ausbildung einer voluminösen, schwammartigen Struktur an der Oberfläche der Klinkerpartikel durch CSH-Phasen; damit lockere Verzahnung; Aufbau von Grundgefüge aus verschiedenen fasrigen und blättrigen Calciumsilikathydratkristallen, plattigem Calciumhydroxid und langen Ettringitkristallen; zunehmende Verfestigung des Gefüges durch Kristallwachstum und faserförmige CSH-Phasen (Abb. 2-12 c).
- **Deaccelerationsperiode** (8 bis 24 Stunden):
Fortsetzung der Reaktionen der vorherigen Phase, allerdings mit abnehmender Reaktionsgeschwindigkeit durch weniger aktive Klinkerphasen; zunehmende Verzahnung der Partikel durch kurzfasrige CSH- sowie $C_4(A,F)H_{13}$ -Kristalle und Bildung von hexagonalem Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$).

- **Stetige Periode** (ab 24 Stunden):
Wachstum der Hydratationsprodukte in den Porenraum hinein, Entstehung der Gelporen; weitere Gefügeverdichtung und Festigkeitsentwicklung (Abb. 2-12 d).

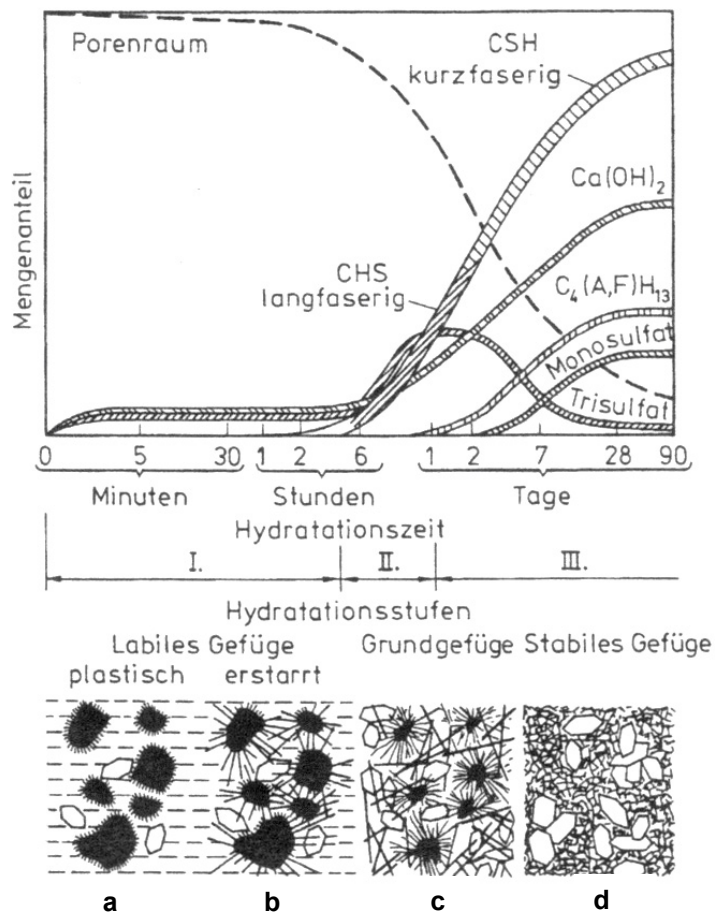


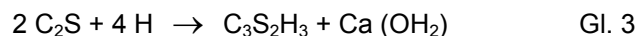
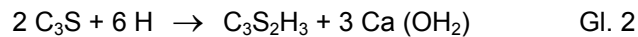
Abb. 2-12: Bildung der Hydratphasen und Gefügeentwicklung bei der Hydratation des Zements (nach LOCHER et al. 1976)

Die Hydratation der einzelnen Klinkerphasen zu Hydratphasen führt zur Entwicklung von Hydratationswärme (Tabelle 2-5).

Tabelle 2-5: Hydratationswärme der einzelnen Klinkerphasen (VDZ 2002)

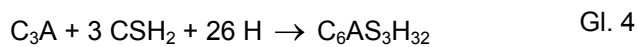
Klinkerphase	Hydratationswärme (J/g)
C ₃ S	520
C ₂ S	260
C ₄ AF	440
C ₃ A	1670

Die Calciumsilikathydrate C₂S und C₃S stellen die festigkeitsbestimmenden Zementphasen dar, während C₃A das Erstarren und Verarbeiten der zementhaltigen Mischung bestimmt. Zur Beschreibung dienen die Reaktionsgleichungen Gl. 2 und Gl. 3 (LOCHER et al. 1976, LOCHER 2000):

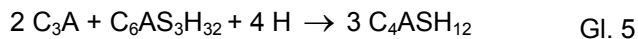


Bei Kontakt mit Wasser beginnen diese Klinkerphasen Calcium- und Hydroxidionen abzugeben, wodurch eine stark alkalische Lösung (pH>12) entsteht. Die Kristallisation des Calciumhydroxids (CH; genauer Ca(OH₂)) und des Calciumsilikathyrats (CSH, genauer C₃S₂H₃) beginnt ab einer bestimmten Ionenkonzentration. Mit zunehmendem Kristallwachstum der Calciumsilikathydrate werden die Tricalciumsilikatkörner dichter umhüllt und bilden eine Barriere für Ionen und Wasser. Die chemisch kontrollierte Reaktion wird zu einer diffusionsgesteuerten und verlangsamt sich im Zuge des Kristallwachstums.

Diese Vorgänge erklären den asymptotischen Verlauf des Hydratationsgrades (Abb. 2-12), der zunächst sehr schnell ansteigt und mit zunehmender Zeitdauer nur noch von Diffusionsvorgängen gesteuert wird. Die Reaktionen des Dicalciumsilikates verlaufen in ähnlicher Weise in geringerer Intensität. Die Hydratation des Tricalciumaluminates benötigt das Vorhandensein von Sulfationen, diese werden in Form von Gips bzw. Anhydrit bei der Herstellung zugesetzt.



Nach der Primärreaktion bildet sich nadelförmiges Trisulfat $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ (Ettringit, Gl. 4), das den Erstarrungsvorgang hervorruft. Bei fehlenden Sulfationen und unvollständiger C_3A -Hydratisierung wandelt sich Ettringit in tafelförmiges Monosulfat $\text{C}_4\text{ASH}_{12}$ (Gl. 5) um.



Ebenso wie bei der Hydratation der CSH-Phasen entsteht durch das Trisulfat eine zunehmende Diffusionsbarriere. Diese hemmt die Reaktion des C_3A sukzessive und wird bei einer Umwandlung von Tri- in Monosulfat wieder abgebaut, so dass das Tricalciumaluminat erneut nach 12 bis 36 Stunden reagiert. Bei Kontakt von Monosulfat mit Sulfationen, wie dies bei einem äußeren Sulfatangriff möglich wird, bildet sich erneut Ettringit (VDZ 2000). Die Klinkerphase Calciumaluminatferrit reagiert bei der Hydratation entweder mit Gips oder Ettringit. MINDESS & YOUNG (1981) berichten von guter Sulfatbeständigkeit bei hohen Calciumaluminatferritgehalten.

2.2.2.2 Porenstruktur

Die Mikrostruktur der zementgebundenen Matrix bildet das CSH-Gel als Hauptbestandteil des Zementleimes. Das kolloidale Gel weist mit Poren von 0,5 nm eine Porosität von 28% auf. Das Gel existiert in einer Vielzahl von Formen von faserigen Partikeln bis wabenförmigen Strukturen sowie flachen und unregelmäßigen Körnern. Die Struktur des CSH-Gels wird von verschiedenen Autoren beschrieben.

POWERS & BROWNYARD (1947) gehen von einer zwei bis drei Lagen-Struktur aus, die, ähnlich wie bei Tonen, durch Oberflächenkräfte sowie kovalente Ionenbindungen stabilisiert wird (Abb. 2-9).

Das in der Struktur enthaltene Wasser wird in drei Kategorien eingeteilt:

- *Water of constitution*: Kristallisationswasser und anderes nicht verdampfbares Wasser (Hydroxidgruppen mit Metallionen)
- *Gelwasser*: adsorbiertes Wasser und durch Oberflächenkräfte (van der Waals-Kräfte) gebundenes Wasser
- *Kapillarwasser*: freies Wasser in den Poren, nicht durch Oberflächenkräfte gebunden

Wird Wasser durch starke Trocknung aus der Lagenstruktur freigesetzt, führt dies zum Zusammenbruch der geschichteten Lagen. Dieser Vorgang ist irreversibel und führt daher zu starkem Schrumpfen.

FELDMAN & SEREDA (1970) gehen von einem ähnlichen Modell aus, allerdings nicht von geordneten, sondern von der unregelmäßigen Anordnung einzelner Lagen mit breiten Schichtzwischenräumen (Abb. 2-9).

Das Wasser lässt sich mit Übergängen nach SEREDA et al. (1980) in drei Phasen einteilen:

- *Chemisch gebundenes Wasser*: nicht verdampfbares Wasser
- *Physikalisch gebundenes Wasser*: Wasser in den Gelporen sowie in den Zwischenschichten
- *Freies Wasser*: auch Porenwasser in den Kapillarporen

Das Münchner Modell von WITTMANN (1977) basiert auf einem dreidimensionalen Netzwerk amorpher, kolloidaler Gelpartikel, die ein so genanntes Xerogel bilden (Abb. 2-9). In Abhängigkeit von dünnen, adsorbierten Wasserfilmen um die Partikel herum kann das Verhalten von Zementleimen mit Quellen und Schrumpfen bei verschiedenen Feuchtebedingungen erklärt werden.

JENNINGS & TENNIS (1994) gehen von einer Mikrostruktur der Größe 1 nm bis 100 nm aus, die aus kugelförmigen Anhäufungen (Clustern) mit hoher und niedriger Dichte besteht.

Nach ALIGIZAKI (2006) bindet bei der Hydratation 1 g Zement chemisch 0,23 g Wasser und 0,19 g stark physikalisch gebundenes Gelwasser. Erst bei Wasser-Zement-Werten $> 0,42$ wird das Zementkorn komplett hydratisiert. Das chemisch gebundene, nicht verdampfbare Wasser ist ein wichtiger Stukturbestandteil und wird erst bei einer Temperatur von 1000°C über einen Zeitraum von 15 Minuten freigesetzt. Nur ungebundenes Wasser im Zementleim, so genanntes freies Wasser oder Kapillarwasser, ist frei für die Hydratation verfügbar.

Im aushärtenden Zementleim bilden sich weitere Kanäle oder Hohlräume, die durch Gelporen verbunden sind. Dies sind in Abhängigkeit vom Wasser-Zement-Verhältnis die so genannten Kapillarporen. Diese ändern sich im Laufe der Hydratation und bilden unregelmäßige Formen und Größen von 2 nm bis 10 μm . Durch mineralische Zusatzstoffe vergrößert sich die Anzahl an Poren zwischen 2 und 50 nm. Das Fluid in den Kapillarporen besteht nicht aus reinem Wasser, sondern aus einer Ionenlösung, die im Gleichgewicht mit dem hydratisierten Gel steht. Das Wasser in den Poren ist mobilisierbar und kann komplett verdampfen. Für die Hydratation spielen die Kapillarporen nur eine unwesentliche Rolle, sind allerdings sehr wichtig für alle Transportprozesse. Schädigungen durch Gefrieren äußern sich in einer Zerstörung in den Kapillarporen, da die Gelporen zu klein für eine Aufnahme von Eislinen sind, so dass strukturzerstörende Frostdrücke auftreten.

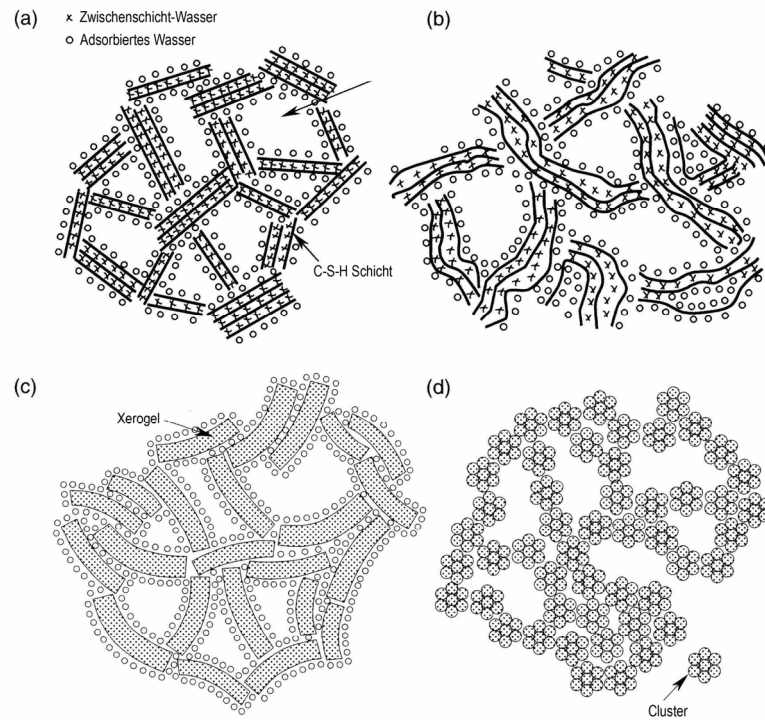


Abb. 2-13: Schematische Darstellung der gängigsten Modelle für das CSH-Gel, a) Modell von POWERS & BROWNYARD (1948), b) Modell von FELDMAN & SEREDA (1970), c) Münchner Modell von WITTMANN (1977), d) Modell von JENNINGS & TENNIS (1994), Abbildung nach ALIGIZAKI (2006)

Ein weiterer Porentyp sind die Hohlshalen-Poren (hollow-shell pores), die als geschlossene, ausgeprägte Poren in Form von reliktschen Zementpartikeln auftreten. Diese Poren entstehen, wenn bei der Hydratation Hohlräume entstehen, die die neuen Phasen nicht ausfüllen. Die Größe der Poren beträgt 1-15 μm . Bedingt durch ihre stark

verengte Form (ink-bottle) können die Poren mit indirekten Methoden wie der Quecksilberporosimetrie nicht erfasst werden.

Luftporen entstehen im Zementleim entweder definiert eingebracht oder durch Mischungs- und Verteilungsvorgänge. Diese liegen meist isoliert vor und spielen für die Permeabilität keine wichtige Rolle.

Die Porengrößen werden allgemein von der International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) wie folgt definiert:

- Mikroporen: Größe < 2nm
- Mesoporen: Größe 2 - 50 nm
- Makroporen: Größe > 50 nm

Die Einteilung der Poren im Beton bzw. Zementstein nach POWERS, ROMBERG und SMOLTCHYK (aus ALIGIZAKI 2006) zeigt Tabelle 2-6. Das Porenspektrum der untersuchten Hinterfüllmassen liegt in diesem Bereich (Kap. 4).

Tabelle 2-6: Einteilung der Poren nach POWERS, ROMBERG und SMOLTCHYK (aus ALIGIZAKI 2006)

Porenradienbereich nach	Porenarten im Zementstein		
	Gelporen	Kapillarporen	Luftporen
POWERS	< 0,0025 µm	1 - 10 µm	100 – 2000 µm
SMOLTCHYK	< 0,03 µm	0,03 – 10 µm	> 10 µm
ROMBERG	0,001 – 0,01 µm	0,01 – 100 µm	1 - 1000 µm

2.3 Mechanismen der Frostschädigung

2.3.1 Grundlagen

Die Bildung von Eis hängt von den Gleichgewichtsbedingungen an den Grenzflächen zwischen Eis, Wasser und Luft ab. Im Allgemeinen stehen Eis und Wasser bei einem Druck von 1 bar und 0°C im energetischen Gleichgewicht. Bei einer Temperaturabsenkung bei konstantem Druck findet der Übergang in die Eisphase statt. Für reines Wasser liegt der Gefrierpunkt bei genau 0°C; dieser erniedrigt sich bei Wasser mit gelösten Salzen. Da auch bei Temperaturen unter 0°C größere Mengen von Wasser ungefroren bleiben, werden Eislinsenbildung und Frosthebung durch Wasserbewegungen von der ungefrorenen Zone zur Eislinse oder innerhalb der gefrorenen Zone möglich.

Eislinsen werden von VOIGT (1994) als Eisfilme definiert, die durch das Wasser in den Hydrathüllen gespeist werden.

Der hydrodynamische (hydraulische) Druck baut sich durch die Volumenausdehnung von 9,1% (Dichteanomalie des Wassers) beim Phasenübergang von Eis zu Wasser auf. Diese Gefrierdehnung führt bei unzureichenden Expansionsmöglichkeiten zu Strukturschädigungen. Diese Auswirkungen werden in den folgenden Kapiteln für Böden und zementgebundene Baustoffe erläutert.

2.3.2 Boden und Gestein

Frosteinwirkungen auf den Untergrund entstehen normalerweise infolge natürlicher klimatischer Bedingungen, wenn eine Abkühlung unter 0°C eintritt und das Wasser im Gestein gefriert. Der Gefriervorgang ist wesentlich bestimmt durch die thermischen Parameter sowie die Stoffeigenschaften der Locker- und Festgesteine. Einflussgrößen sind Wärmeleitfähigkeit sowie Wärmekapazität, die Wassersättigung und der Porenanteil/das Kluftvolumen (JESSBERGER 1994).

Im Fall der Erdwärmesonden-Nutzung muss eine künstlich hervorgerufene Frostausbreitung berücksichtigt werden, wie diese für die künstliche Bodenvereisung als geotechnische Methode entwickelt wurde. Hierfür werden zur Abkühlung des Bodens doppelwandige Gefrierrohre in Bohrlöcher eingebracht und an eine Gefrieranlage angeschlossen,

die mit einem Kälteträger - in der Regel eine Salzlösung - mit Temperaturen von -20 bis -40°C durchströmt werden. Neben den Auswirkungen von Frost in der Bohrlochhinterfüllung ist für die Betrachtung bei Erdwärmesondensystemen auch die Schnittstelle zum Untergrund und dessen Frostempfindlichkeit zu beachten.

Die Betrachtung der Frostausbreitung im Boden stellt ein dreidimensionales Wärmeströmungsproblem dar, für das die natürlichen Einflussgrößen wie thermische Bodenkennwerte, der Wassergehalt sowie die Bodentemperatur und Grundwassergeschwindigkeit berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus spielen auch bei der Bodenvereisung verfahrenstechnische Parameter wie der Abstand der Gefrierrohre, der Durchmesser der Rohre, die Temperatur des Fluides und die Gefrierdauer eine wesentliche Rolle. Im Anwendungsbereich der Geothermie stellen sich bei einem Betrieb im Frostbereich vergleichbare Abläufe ein.

Der Temperaturgradient, der sich beim Abkühlen des Bodens einstellt, verursacht einen Wassertransport zu den kühleren Bereichen des Bodens. Bei Absinken der Temperatur unter den Gefrierpunkt des Poren-/Kluftwassers, wird ein Teil gefroren. In frostempfindlichen Gesteinen wird aufgrund des, an der Gefrierfront entstehenden, Unterdruckes zusätzlich Wasser in den gefrierenden Bereich transportiert (Kap. 2.3.3). Dies führt zu Frosthebungen durch die Volumenvergrößerung in Richtung des Temperaturgradienten. Bei groben, nicht frostempfindlichen Lockergesteinen wird beim Gefrierprozess ungefrorenes Wasser verdrängt und fließt im Porenraum ab. Frosthebungen treten in geringer, bautechnisch vernachlässigbarer Form auf.

Die bestimmenden Faktoren für die Auswirkungen von Gefrierprozessen im Boden sind:

- Locker-/Festgesteinseigenschaften
- Kornverteilung, spezifische Oberfläche, Tonmineralogie
- Grundwasser-Flurabstand/Wassernachschub
- Wärmeentzugsrate
- Auflast

Frostwirkungen im Locker-/Festgestein verursachen irreversible Änderungen der Eigenschaften, die nicht dem Ausgangszustand entsprechen. Dies gilt für die Verteilung des Wassergehaltes und für die 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-Beanspruchung, verändern sich infolgedessen nahezu alle mechanischen Eigenschaften des Bodens. Es ergeben sich Änderungen im Porenraum und im Wassergehalt, sowie bezüglich der Dichte und der Scherfestigkeit.

Beim Gefrieren von Tonen hingegen werden in Abhängigkeit vom Mineralbestand und Wassergehalt verschiedenartige kryogene Gefüge ausgebildet (u.a. LUDWIG 1993).

Für praktische Fragestellungen im Erd- und Straßenbau sowie in der Geotechnik wird für die Baumaßnahmen die Frostempfindlichkeit der Böden auf Grundlage der DIN 18196 klassifiziert; maßgebend für die Gliederung ist das Frosthebungsverhalten und der kapillare Wassernachschub mit folgender Eislinsenbildung (Frostdruck infolge geschlossener Porensysteme und Wassernachschub infolge der Durchlässigkeit des Bodens). Es werden nach ZTVE-StB 94 (1997) in Abhängigkeit von der Bodenart drei Frostempfindlichkeitsklassen bei Böden von F1 mit „nicht frostempfindlichen“ Böden über „gering bis mittlempfindlich“ (F2) zu „sehr frostempfindlichen“ Böden (F3) unterschieden. Die Abschätzung der Frostempfindlichkeit wird auf Grundlage standardisierter Frosthebungsversuche im Labor (Stufe III nach Technical Committee on Frost (ISSFME)) durchgeführt. Für veränderlich feste Gesteine und Festgesteine gelten im Wesentlichen die gleichen Mechanismen der Frosteinwirkungen; Frostempfindlichkeitsklassen existieren nicht.

2.3.3 Zementgebundene Baustoffe

Theorien zur Wirkung von Frostangriffen bei Beton wurden nach AUBERG (1998) seit den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt. Der komplexe Gefrierprozess in einem porösen Gefüge wurde bis heute aufgrund wechselnder und schwer zu fassender Randbedingungen nicht durch ein allgemein anerkanntes Modell beschrieben. Makroskopische Spannungen können durch ungleiche Temperaturausdehnungskoeffizienten entstehen; Zementstein hat im Vergleich zum Eis in den Poren einen bis zu 5-fach niedrigeren Temperaturausdehnungskoeffizient, was zur Ausbildung von kritischen Zugspannungen führen kann. Mikroskopische Schädigungen beruhen auf der Volumenausdehnung beim Gefrieren von Wasser. Durch die behinderte Expansion im Gefüge können Spannungen auftreten, die zu Schäden führen.

Frostschädigungen im Beton äußern sich folgendermaßen:

- Abwittern bzw. Abplatzen oberflächennaher Feinmörtelschichten („scaling“)
- Netz- und Haarrisse sowie gefügezerstörende Risse („map-, d-cracking“)
- (Ausbrüche über Zuschlagkörnern, „pop-out“)

Die wichtigsten Einflussfaktoren bzw. Zerstörungsmechanismen von Frostangriffen sind nach FLEISCHER (1997):

- Unterschiede im Temperaturausdehnungskoeffizienten (Zementstein, Zuschlag, Eis)
- Chemisch-mineralogische Zusammensetzung der Zuschläge
- Wasseraufnahmevermögen und Porosität
- Kritische Korngröße der Zuschläge
- Kritischer Sättigungsgrad
- Temperatur- und feuchteabhängige Volumenänderungen
- Hydraulischer und osmotischer Druckaufbau

Dynamischer Schädigungsverlauf

Ein dynamischer Schädigungsverlauf wird von AUBERG (1998), PALECKI & SETZER (2004) postuliert. Demzufolge führt das kapillare Saugen vor Beginn der Befrostung mit zunächst teilgesättigten Proben zu einer Sättigung des kapillar aktiven Porenraumes. Während der ersten Frost-Tau-Wechsel tritt die Sättigung des kapillar nicht aktiven Porenraumes auf; mit fortschreitender Frost-Tau-Wechsel-Anzahl kommt es zur kritischen Sättigung und Schädigung mit Mikrorissbildung.

Theoretisch können nach RÖSLI (1979) bei vollständiger Behinderung der Expansion durch Gefrierdehnung Drücke bis zu 200 N/mm² erreicht werden. Der kapillare Effekt entsteht durch das spätere Gefrieren von Wasser in den kleineren Gelporen als in den größeren Kapillarporen; Wasser und Eis liegen gleichzeitig im Gefüge vor und der differierende Dampfdruck der Phasen verursacht ein thermodynamisches Ungleichgewicht, das eine Wasserbewegung aus den Gelporen zu den Kapillarporen nach sich zieht. Somit kann das Eisvolumen in den Kapillarporen trotz konstanter Temperaturen zunehmen und im Zuge auch der Eisdruck. Die Entstehung horizontaler Risse kennzeichnet ein laminares Frostgefüge mit Eislinsenbildung. Eislinsen werden von VOIGT (1994) als Eisfilme definiert, die durch das Wasser in den Hydrathüllen gespeist werden. Die Risse bilden sich parallel zur Frostfront bzw. normal zur Frosteindringrichtung. Bei verringerter Durchlässigkeit aufgrund eines sehr dichten Gefüges und fortgeschrittener Zementhydratation bilden sich dünne begrenzte Haarrisse anstatt der Horizontalrisse. Es ist anzunehmen, dass die in der Gefrierzone entstehende Saugspannung aufgrund der geringen Durchlässigkeit behindert und somit weniger Wasser zu den potenziellen Eislinsen transportiert wird. Das Wasser gefriert vielmehr an Ort und Stelle und verursacht die Haarrisse.

Die Hauptschäden durch Frost treten nach CAI & LIU (1998) bei Temperaturen von 0°C bis -10°C auf, da die Porenlösung in diesem Temperaturbereich schneller gefriert; zudem führen höhere Gefrierarten zu höherem hydraulischen Druck im Inneren der Poren. Bei -10°C liegt ein Wendepunkt bei dem die Schädigungen bei weiter sinkenden Temperaturen nur in geringem Maße zunehmen. Die Porengröße spielt insofern eine Rolle, als sich in den größeren Poren genügend

Porenlösung zum Gefrieren befindet und diese zuerst in Eislinsen umgewandelt wird. In feinporigen, dichten Hochleistungsbetonen nimmt der Gefrierpunkt der Porenlösung mit kleineren Porenradien ab; daher werden auch die Gefrierdaten wesentlich geringer.

Generell handelt es sich jedoch um komplexe Prozesse im porösen Gefüge zementgebundener Frost-Tau-Wechseln ausgesetzter Baustoffe. Aufgrund der „quasi“ offenen Porenstruktur mit unterschiedlichen Porengrößen und dissoziierten Salzen in der Porenlösung überlagern sich verschiedenste Effekte. Für Modellvorstellungen ist entscheidend, dass der Zementstein eine sehr große innere Oberfläche mit bis zu 200 m²/g, mit einem Porenspektrum vom Nanometer- bis in den Millimeterbereich aufweist.

Nach AUBERG (1998) führt die alkalische Porenlösung im Beton zu einer konzentrationsabhängigen Gefrierpunktniedrigung um ca. 1,3 bis 3 K. In Gel- und Mikrokapillarporen ($R_H < 100$ nm) spielen Oberflächenkräfte eine Rolle. Die innere Oberfläche führt zu einer Verringerung des chemischen Potentials des Porenwassers, so dass in Abhängigkeit vom Porenradius der Gefrierpunkt erniedrigt wird. Die Gefrierpunktniedrigung kann nach SETZER (2002) vereinfacht abgeschätzt werden (Gl. 6) mit:

$$\Delta T \approx \frac{-32[K \cdot nm]}{R_{H,C}[nm]} \quad \text{Gl. 6}$$

$R_{H,C}$	Volumen/Oberfläche = $r/2$
r	Porenradius [nm]
$R_{H,C}$	hydraulischer Radius [nm]

Die Porenklassifikation nach SETZER (2002) ist in Tabelle 2-7 aufgeführt.

Tabelle 2-7: Porenklassifikation nach SETZER (2002), basierend auf hydraulischem Radius $R_{H,C}$ und Poreneigenschaften

Typ	$R_{H,C}$	Besonderheiten	Art des Porenwassers
Grobporen	$\geq 1 \text{ mm}$	Leer	
Makrokapillarporen	$< 1 \text{ mm}$	Saugend sofort befüllbar	Freies, makroskopisches Wasser
Mesokapillarporen	$< 30 \text{ }\mu\text{m}$	Saugend in Minuten bis Wochen befüllbar	
Mikrokapillarporen	$< 1 \text{ }\mu\text{m}$	Kein makroskopisches Gleichgewicht	
Mesogelporen	$< 30 \text{ nm}$	Übergang vom freien makroskopischen Verhalten zur Oberflächenphysik; befüllt durch Kondensation bei rel. F. 50% - 98%	Vorstrukturiertes, kondensiertes Wasser
Mikrogelporen	$< 1 \text{ nm}$	Oberflächenphysik, befüllt durch Sorption bei rel. F. $> 50\%$	Strukturiertes Oberflächenwasser

Neben der Gefrierpunktniedrigung können auch Unterkühlungseffekte (supercooling) auftreten. Bei Beton sind Unterkühlungen von bis zu -4°C zu erwarten, die bei höheren w/z-Werten ($> 0,6$) verstärkt beobachtet werden. Unterkühlungen sind möglich, wenn eiskeimfördernde Stoffe (Eis an der Oberfläche) fehlen und kein stabiles Eiskristallwachstum stattfindet.

Auf die verschiedenen Modelle (beispielsweise das „Münchener Modell“, Kap. 2.2.2.2) wird nicht im Detail eingegangen. Das Modell des hohen hydraulischen Drucks nach POWERS (1945) geht für das Ge-

frierverhalten im Zementstein davon aus, dass die Phasen Wasser und Eis nebeneinander vorliegen und durch die Volumenvergrößerung des Eises noch nicht gefrorenes Wasser aus den Poren gedrückt wird, was zu hohen hydraulischen Drucken in Abhängigkeit von der Gefrierate führen kann.

Bei weiteren Untersuchungen von POWERS & HELMUTH wurde festgestellt, dass es einen kapillaren Effekt gibt, da Wasser aus kleineren Poren aufgrund eines thermodynamischen Ungleichgewichtes zu bestehenden Eiskristallen in größere Poren wandert. In einem Betongefüge bei w/z -Werten $> 0,5$ ist Expansion durch ein fortschreitendes Eiskristallwachstum zu beobachten. Für die Wasserverteilung sind unterschiedliche Grenzflächenspannungen von Wasser zu Eis verantwortlich. Der Wassertransport findet über Diffusion statt.

Das thermodynamische Modell von SETZER (2001) berücksichtigt das Gefrierverhalten im Zementstein durch die Wirkung von Oberflächenkräften zwischen Festkörper und Wasser bzw. Festkörper und Eis mit einer zwischenliegenden, nicht gefrorenen Wasserschicht. Druckunterschiede durch die Grenzflächenspannung resultieren bei niedrigen Gefrieraten in Kontraktionen in den kleinen Poren und bei hohen Gefrieraten zusätzlich in Expansionen in großen Poren. Zur Erklärung dieses Verhaltens entwickelte SETZER das Modell der Mikroeislinnenbildung und künstlichen Sättigung. Die künstliche Mikropumpe „Zementsteingefüge“ führt bei Frost-Tau-Wechselbelastung abhängig von der Permeabilität und dem Gehalt an kapillar nicht aktiven Poren zu einer kritischen Sättigung und damit zur Gefügezerstörung.

Die Grundzüge des Frostangriffs gelten für alle porösen Baustoffe; der Widerstand gegen Frostangriffe ist dabei reziprok proportional zum Wassergehalt des Baustoffes. Der Schädigungsgrad hängt von der Wassersättigung, von der Gefrierate, der Minimaltemperatur und der Gefrierdauer ab. Im erhärteten, gesättigten Zementstein zeigt sich kein linearer Zusammenhang zwischen Temperaturentwicklung und Eisbildung. Vielmehr zeigen sich abhängig vom Porensystem drei Gefrierpeaks bei ca. -8°C , -23°C und -40°C . Auch ein chemischer Schädigungseinfluss durch temperaturbedingte Phasenumwandlungen spielt eine Rolle. Die Verschiebung des thermodynamischen Gleichgewichts der Porenlösung führt bei niedrigen Temperaturen zu einer höheren

Calciumhydroxid-Löslichkeit und einer Neubildung von stabilem Sekundärettringit durch Monosulfatumbildung. Die Auskristallisation der neu gebildeten Phasen findet bei höheren Temperaturen an anderer Stelle, in größeren Poren bzw. Mikrorissen, statt.

Das Mikroislinsenmodell

Das Mikroislinsenmodell von SETZER (2001) basiert darauf, dass die Effekte des ungefrorenen Gelporenwassers, Frostschrindens und Frostsaugens nicht makroskopisch erklärt werden können, da im Submikrobereich die Oberflächenphysik eine wichtige Rolle spielt. Bei Untersuchungen des Widerstands gegen Frost-Tau-Wechselbelastungen wurde der Effekt beobachtet, dass sich der Sättigungsgrad im Porenraum erhöht und, dass unterhalb des Gefrierpunktes erhebliche Mengen an Porenwasser ungefroren vorliegen. Dies kann nur ungefroren bleiben, wenn in ihm ein Unterdruck entsteht, der mit fallender Temperatur zunimmt. Bei Abkühlung wird das Zementgel durch den Prozess des Gefrierschrindens kontrahiert; Erwärmung führt zu Nachsaugen von außen. Dieser Mechanismus der Eislinsepumpe führt zu einer sukzessiven Erhöhung des Sättigungsgrades im Porenraum. Wenn dieser weit genug erhöht ist, so dass die Gefrierdehnung des Eises sowie die hydraulischen Drücke wirksam werden, wird der Beton sehr schnell geschädigt und zerstört. Die Schadensbilder äußern sich in einer Oberflächenabwitterung und einer inneren Schädigung.

Das Mikroislinsenmodell basiert auf geringen Porendurchmessern im Zementstein zwischen 1 nm und 100 nm, in diesem System liegen flüssiges Wasser, Wasserdampf und Eis nebeneinander als stabile Phasen vor. Voraussetzung für das 3-Phasengleichgewicht sind mechanische und chemische Stabilitätskriterien. Das chemische Stabilitätskriterium setzt voraus, dass im thermodynamischen Gleichgewicht zwischen den drei Phasen auch die chemischen Potentiale gleich sein müssen. Das Eis wird i. d. R. als makroskopisch ohne nennenswerten Druck angesehen, während im ungefrorenen Gelporenwasser ein sehr hoher Unterdruck entsteht, der schnell die Zugfestigkeit von Beton erreicht. Auf dem mechanischen Stabilitätskriterium basieren die Phasenübergänge von Wasser zu Eis bzw. in die dampfförmige Phase. Wenn das mechanische Kriterium der Grenzflächenspannungen verletzt wird, kommt es zu Phasenübergängen (Abb. 2-14).

Im Zementstein bzw. Beton ist Wasser die benetzende Phase, während Eis die nicht benetzende Phase an der inneren Matrixoberfläche ist, d.h. für das Gefrieren muss Grenzflächenenergie aufgebracht werden. Falls dies nicht der Fall wäre, würde bei Temperaturen unter Null Grad Celsius sofort alles Wasser in den Porenräumen gefrieren und kein ungefrorenes Porenwasser vorliegen. Zunächst vermindert sich beim Abkühlen der Krümmungsradius des Eiskeims zum ungefrorenen Wasser in einer Gelpore und erhöht so den Unterdruck im Porenwasser (Abb. 2-15, Bild A). Der Krümmungsradius wird so klein, dass das Eis in die Pore eindringt, angetrieben durch den großen Unterdruck (Abb. 2-15, Bild B). Beim Tauen kommt es zum Kollaps des Poreneis-kristalls, die Schmelztemperatur ist daher höher als die Gefriertemperatur. Bei sinkenden Temperaturen wird immer mehr Wasser aus dem ungefrorenen Gelporensystem herausgedrückt und gefriert am makroskopischen Eis. Falls genügend Expansionsraum vorhanden ist, beobachtet man nur die Kontraktion des Systems, das so genannte „Gefrierschwinden“. Beim Erwärmen ist das Wasser am Eis angefroren, dadurch verzögert sich der Rücktransport in den Gelporenraum. Bei Wasserangebot wird Wasser aus äußeren Quellen angesaugt.

Aussagen über die Lebensdauer und Langzeitstabilität von Baustoffen können nur durch geeignete Prüfverfahren gemacht werden. Mit Kurzzeitprüfmethoden werden Alterungsprozesse beschleunigt, simuliert und die Dauerhaftigkeit prognostiziert. Dieses „performance concept“ nach WISCHERS (1990) soll es ermöglichen, geeignete Baustoffe für entsprechende Umweltaforderungen auszuwählen. Für die zuverlässige und reproduzierbare Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands wurde das Prüfverfahren CDF-Test (Capillary Suction of Deicing chemical and Freeze-Thaw-Test) von SETZER (1990) entwickelt und in den folgenden Jahren weiter optimiert. Wichtig für die Reproduzierbarkeit des Prüfverfahrens ist, dass die Mechanismen der Frostpumpe nicht außer Kraft gesetzt werden. Der CIF-Test (Capillary Suction, Internal Damage and Freeze-Thaw-Test) wurde daher so konzipiert, dass ein einachsiger Wärme- und Feuchtetransport über eine Beanspruchungsfläche gewährleistet ist. Eine detaillierte Beschreibung gibt Kap. 3.5.2.

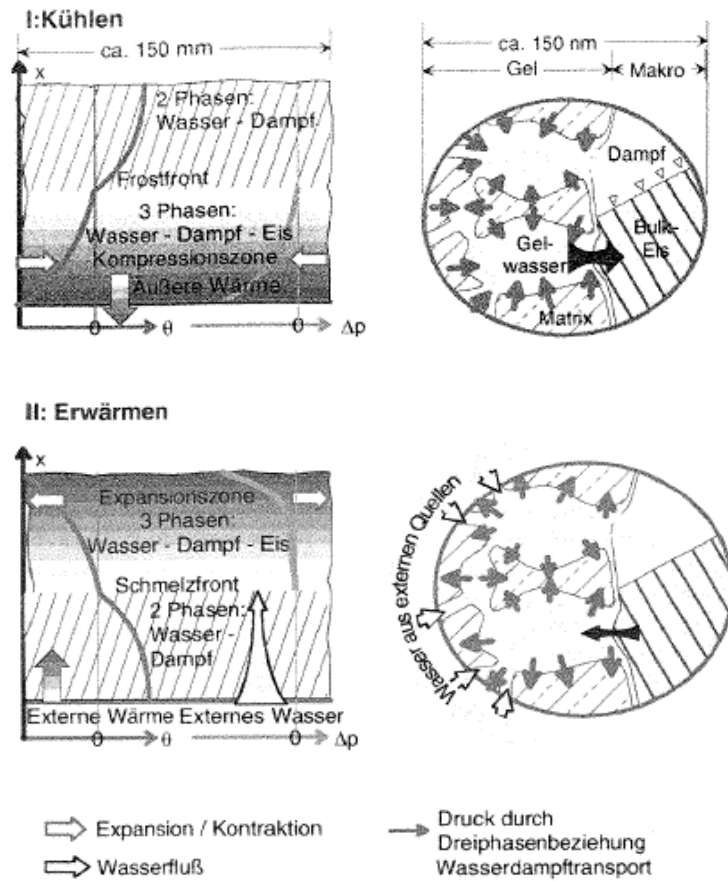


Abb. 2-14: Mikroeislinnenmodell nach SETZER (2001),
 Bild oben: Abkühlen mit Eindringen der Frostfront;
 Bild unten: Auftauen, Ausdehnung der Matrix, „Pumpeffekt“
 mit Einsaugen von Wasser

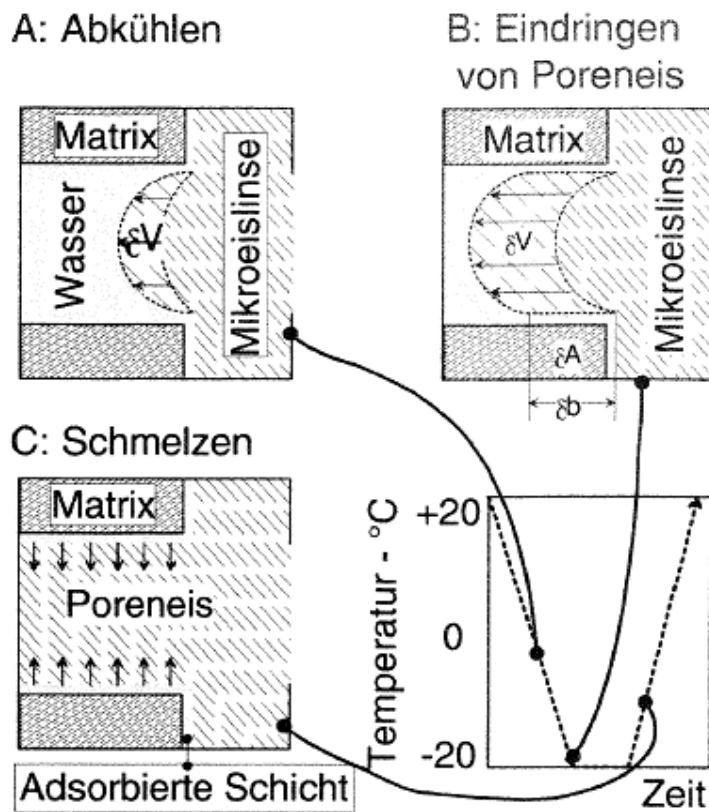


Abb. 2-15: Gefrieren von Porenwasser; Bild A: Wasser gefroren; verminderter Krümmungsradius des Poreneises mit sinkender Temperatur; Bild B: Krümmungsradius so klein, dass Eis in Pore vordringt; Bild C: Schmelzvorgang/ Kollaps des Poreneises (nach SETZER 2001)

3 Material und Methoden

3.1 Untersuchungskonzept

Zur Ermittlung der Grundlagen wurde eine Umfrage konzipiert (Kapitel 2.1.2.3) und an Bohrfirmen als ausführende Firmen verschickt. Nach Auswertung der Informationen wurden die am häufigsten in der Praxis eingesetzten Hinterfüllbaustoffe als „Standards“ definiert und mit den in den Richtlinien vorgegebenen Rezepturen ergänzt (VDI 4640, FWS Schweiz). Diese Hinterfüllungen (Tabelle 3-2) bildeten die Grundlage für die Untersuchungen im Labor sowie im Prüfstand Geothermie.

Da bislang keine speziell vorgeschriebenen Prüfmethoden bzw. Standardtests für Hinterfüllungen von Erdwärmesonden existieren, wurden verschiedene Standardversuche aus der chemischen und physikalischen Materialanalyse herangezogen. Die Qualitätsprüfung der Baustoffe bzw. Suspensionen erfolgte in Anlehnung an bekannte, im Baubereich für andere Verpressbaustoffe bzw. Betone verwendete, Verfahren. Die Anwendung dieser Prüfverfahren wurde im Bezug auf „Standardbaustoffe“ getestet und gegebenenfalls modifiziert beziehungsweise durch weitere geeignete Untersuchungsmethoden ergänzt. Modifikationen erfolgten im Hinblick auf die Verarbeitung der Suspensionen sowie hinsichtlich der Prüfbedingungen (u.a. Anpassung der Prüftemperatur, Prüfzyklen).

Die Hinterfüllbaustoffe wurden versuchstechnisch folgendermaßen geprüft:

- als Trockenbaustoff (Pulver)
- als Suspension (Trockenbaustoff mit Wasser angerührt)
- als aushärtender bzw. ausgehärteter Prüfkörper

Um das Stoffverhalten der Hinterfüllbaustoffe detailliert zu analysieren, wurden die verwendeten Trockenbaustoffe zunächst hinsichtlich der chemischen Bestandteile mittels Atomabsorptionsspektroskopie und Photometrie sowie mit Röntgendiffraktometrie untersucht. Korndichte und Porenanteil wurden ebenfalls ermittelt. Die Analyse der Eluierbar-

keit der pulverförmigen Baustoffe erfolgte mit Batch-Versuchen und mit dem Königswasseraufschluss.

An den Suspensionen wurden pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit bestimmt, um Aussagen bezüglich der Wechselwirkungen der zementgebundenen Baustoffe mit Wasser zu treffen. Die Suspensionsdichte wurde gemessen, ebenso wie weitere wichtige Parameter wie die Fließfähigkeit mittels rheometrischer Verfahren.

An den aushärtenden Probekörpern wurden verschiedene Untersuchungen, vor allem zur Prüfung der physikalischen Eigenschaften durchgeführt. Diese umfassten Messungen der Wärmeleitfähigkeit und der Frost-Tau-Wechselbeständigkeit. Geprüft wurden auch Veränderungen der Eigenschaften im Bezug auf das zeitabhängige Aushärten sowie Unterschiede in der Wassersättigung/Austrocknung der Prüfkörper. Ergänzend wurden Druckfestigkeiten, Änderungen der Wasserdurchlässigkeit und Veränderungen im Gefüge mit dem Mikroskop untersucht. Indirekte Methoden wie die Messung der Ultraschalllaufzeiten und Quecksilberporosimetrie rundeten das Spektrum der Untersuchungen ab.

Im Zuge der Untersuchungen wurden gängige Prüfmethode aus dem Bereich der Verpress-/Betontechnik verwendet und gegebenenfalls im Hinblick auf die Verarbeitung der verhältnismäßig flüssigen Suspensionen sowie hinsichtlich der Prüfbedingungen modifiziert.

Basierend auf den Ergebnissen der untersuchten Standard-Baustoffe wurden zur Überprüfung des Versuchskonzeptes ('Proof-of-Concept') neue Rezepturen entwickelt und getestet. Diese neu definierten Mischungen wurden gemäß vorgenannter Prüfmethode und im Vergleich mit den Ergebnissen der Standard-Baustoffe getestet. Der Schwerpunkt der Betrachtung lag dabei auf der Frost-Tau-Wechselbeständigkeit, während auch alle anderen Parameter (u.a. gute Verarbeitbarkeit, gute Wärmeleitfähigkeit, geringe Durchlässigkeiten) erfüllt sein mussten.

Da die Laborversuche mit einzelnen Prüfkörpern nur eine Betrachtung von Teilaspekten erlauben, wurde ein Prüfstand Geothermie im größeren technischen Maßstab konzipiert, um weitere Untersuchungen unter anwendungsnahen Bedingungen durchführen zu können. In Einzel-

rohrversuchen mit umgebender Hinterfüllung wurde praxisnah ein Sondenfluid zyklisch durchströmt, um die detaillierte Betrachtung der Schnittstellen zwischen Geosystem (Gestein) und anthropogenem System (Rohr+Hinterfüllung) mit der Beanspruchung der verwendeten Baustoffe und Materialien sowie der Ausbreitung des Temperaturfeldes vorzunehmen.

Die umfangreiche Prüfung von verwendeten Materialien und Methoden unter verschiedensten, für die Praxis relevanten Gesichtspunkten, ermöglicht die Bewertung des Gesamtsystems und die Ableitung von Prüfkriterien sowie Empfehlungen für den qualifizierten Einbau der Hinterfüllungen und die Qualitätskontrolle.

3.2 Untersuchte Hinterfüllmassen

In der Praxis werden derzeit verschiedene Arten von Baustoffen eingesetzt. Als Stand der Technik sind bisher hauptsächlich Hinterfüllkonzepte und Materialien, die für den Ausbau von Brunnen und für bohrtechnische Zwecke seit langem bekannt sind, verwendet. Dies dokumentiert die VDI-Richtlinie „Thermische Nutzung des Untergrundes“, deren Blatt 2 für „Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen“ im Jahre 2001 erschienen ist und sich derzeit in Überarbeitung befindet. Die Leitfäden für Erdwärmesonden, die von Umweltämtern und Geologischen Diensten der Bundesländer erarbeitet wurden, basieren hinsichtlich der Verpressung der Bohrungen auf der vorgenannten Richtlinie. Die Baustoffe lassen sich hinsichtlich ihrer Bestandteile und Materialeigenschaften in verschiedene Kategorien einteilen. In Tabelle 3-1 sind die Baustoffe aufgeführt, die als Fertigprodukte verwendet werden sowie die Mischungen, die nach vorgegebenen Rezepturen selbst angemischt werden können (gemäß VDI 4640, Blatt 2, 2001; FWS 2004). In den vergangenen Jahren wurden spezielle Baustoffe für die Hinterfüllung von Erdwärmesonden-Bohrungen entwickelt, die vor allem im Bezug auf ihre thermischen Eigenschaften optimiert wurden. Gute thermische Eigenschaften der Hinterfüllung führen zu niedrigeren Bohrlochwiderständen (RICHTER 2005) und gehen auch als Parameter bei der Anlagendimensionierung mit entsprechender Software (u.a. HELLSTRÖM & SANNER 1994: Earth Energy Designer) in die Berechnungen ein.

Tabelle 3-1: Baustoffe für die Hinterfüllung von Erdwärmesonden

Baustoff	Hersteller/ Regelwerk	Inhaltsstoffe/ Rezeptur	Einsatzgebiet/ Eigenschaften
Fertigmischung („Dämmer“)	Verschiedene Baustoffhersteller	Zement + Tonkomponenten, variable w/b ¹ -Anteile	nicht thermisch verbessert; für Bodenverbesserung, Brunnenbau, EWS ²
Eigenmischung	VDI 4640, Blatt 2 (2001)	Bentonit/HOZ ³ /Wasser (25:25 50) ⁴	für EWS
Eigenmischung	VDI 4640, Blatt 2 (2001)	Bentonit/ HOZ ³ / Sand ⁵ / Wasser (10 : 10 : 30 : 50) ⁴	für EWS
Eigenmischung	VDI 4640, Blatt 2 (2001)	Feinkies/Bohrgut	für EWS
Eigenmischung	VDI 4640, Blatt 2 (2001)	Bohrspülung + Dämmer/ Kalksteinmehl	für EWS
Fertigmischung	Baustoffhersteller	auf Graphitbasis ⁵ , mit Zement	thermisch verbessert, speziell für EWS
Fertigmischung	Verschiedene Baustoffhersteller	auf Quarzbasis ⁵ , mit Zement	thermisch verbessert, speziell für EWS
Pellets	Baustoffhersteller	Bentonit + Graphit ⁵	Brunnenbau, speziell für EWS
Eigenmischung („Standard“ Schweiz)	FWS Schweiz (2004)	Bentonit/Zement/ Wasser (8,3 : 16,7 : 75) ⁴	für EWS
Keine Verfüllung ⁶	VDI 4640, Blatt 2 (2001)	Lockergestein, nicht standfester Untergrund	für EWS

¹ w/b = Wasser/Baustoff-Verhältnis

² EWS = Erdwärmesonden

³ HOZ = Hochofenzement

⁴ Anteile in Gew.-%

⁵ Zugabe von Graphit, Quarzsand etc., vgl. Kap. 2.1.2.1, für bessere therm. Eigenschaften

⁶ Zulässig, wenn Sonde nur das obere GW-Stockwerk erfasst; zur Oberfläche hin ist eine Tonabdichtung erforderlich.

Für die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Laborversuche und Versuche im Prüfstand Geothermie (Kap. 3.3, Kap. 3.7) wurden die in Tabelle 3-2 aufgeführten Fertigmischungen bzw. Mischungsempfehlungen verwendet.

Tabelle 3-2: Baustoffe für Laborversuche und Prüfstand Geothermie

Benennung	Baustoff	Inhaltsstoffe	Wassergehalt
Mischung A	Mischungsempfehlung FWS Schweiz (2004)	8,3 Gew.-% Bentonit 16,7 Gew.-% Zement	75 Gew.-% (w/z-Wert ³ =4,5)
Mischung B	Mischungsempfehlung VDI 4640, Blatt 2 (2001)	30 Gew.-% Quarzsand, 10 Gew.-% Bentonit, 10 Gew.-% HOZ ¹	50 Gew.-% (w/z-Wert ³ =5,0)
Mischung C	Fertigmischung	auf Quarzbasis	30 Gew.-%
Mischung D	Fertigmischung	auf Quarzbasis	32 Gew.-%
Mischung E	Fertigmischung	auf Quarzbasis	25 Gew.-%
Mischung F	Fertigmischung	auf Graphitbasis	48 Gew.-%
Mischung G	Neu entwickelte Mischung ²	auf Quarzbasis	18 Gew.-%
Mischung H	Neu entwickelte Mischung ²	auf Quarzbasis	20 Gew.-%

¹ HOZ=Hochofenzement

² im Zuge der Forschungsarbeiten

³ Wasser-Zement-Wert

Die Baustoffe wurden für die Untersuchungen entweder als Rohmaterialien (Pulver) verwendet oder als Suspensionen mit Wasser versetzt angerührt. Für Auslaugungsversuche erfolgte die Verwendung von destilliertem Wasser; ansonsten wurde - entsprechend der praktischen Anwendung - Leitungswasser verwendet.

Die Suspensionen wurden in zylinderförmige Plexiglasröhren mit 10 cm Innendurchmesser gegossen und härteten bei Lagerung im Wasser aus. Abweichungen der Probenvorbereitung erfolgten entsprechend der Anforderungen an die einzelnen Untersuchungsmethoden.

3.3 Chemische und mineralogische Untersuchungsmethoden

Atomabsorptionsspektroskopie

Die Bestimmung der Ionengehalte der Kationen Natrium (Na^+), Kalium (K^+), Calcium (Ca^{2+}) und Magnesium (Mg^{2+}) erfolgte mittels Atom-Absorptionsspektroskopie (AAS). Die Messungen wurden mit dem Gerät Perkin-Elmer 3030B Atomic Absorption Spectrophotometer durchgeführt. Das Messprinzip basiert auf der Absorption optischer Strahlung durch Atome im Gaszustand, die von einem Grundzustand in einen angeregten Zustand übergehen. Bei diesen energetischen Übergängen erfolgt elementspezifische Strahlungsabsorption äquivalent zu den Energiedifferenzen. Nach dem Lambert-Beerschen Gesetz lässt sich aus der Extinktion bzw. der Menge der adsorbierten Energie einer bestimmten Wellenlänge die Konzentration des Elementes in der Lösung bestimmen.

Die Emissionstechnik verwendet das umgekehrte Prinzip mit der Anregung der Atome in der Flamme, dem Zurückfallen der Atome in den Grundzustand und der Abgabe von Energie einer spezifischen Wellenlänge. Natrium wurde bei einer Wellenlänge von 589,0 nm, Kalium bei einer Wellenlänge von 766,5 nm mittels Emissionstechnik bestimmt. Calcium wurde bei einer Wellenlänge von 422,7 nm und Magnesium auf einer Wellenlänge von 285,2 nm mit der Absorptionstechnik gemessen. Zur Probenvorbereitung ist die Verdünnung der Proben auf bis zu 1:10000 und die Zugabe von 65%iger Salpetersäure sowie Cäsiumnitrat (CsNO_3) als Ionisationspuffer erforderlich.

Photometrie

Die Analyse der Anionen von Nitrat (NO_4^{2-}), Sulfat (SO_4^{2-}), Phosphat (PO_4^{2-}) und Chlorid (Cl^-) erfolgte mit einem Photometer MPM3000 der Firma WTW.

Bei der Messung adsorbieren farbige Lösungen das Licht einer bestimmten Wellenlänge (der Komplementärfarbe); die Intensität der adsorbierten Strahlung ist der Konzentration der Lösung direkt proportional. Die Messung wird an verdünnten Proben (Verdünnung bis 1:1000) unter Zugabe verschiedener Reagenzien (H_2SO_4 , H_3PO_4 , Dimethylphenollösung) durchgeführt.

pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit

Die pH-Messungen wurden nach DIN 38404 Teil 1 (1984) mit dem Messgerät pH197 der Firma WTW und einer Messsonde vom Typ Mettler Toledo InLab417-pH durchgeführt.

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit erfolgte mit dem Messgerät LF197 der Firma WTW.

Batch-Versuche

Die Bestimmung der Eluierbarkeit eines Stoffes mit Wasser wird mit dem Batch-Versuch nach DIN 38414 Teil 4 (1984) geprüft. Eine Probenmenge von 4 g wurde mit 40 ml Wasser versetzt und 24 h auf einem Schütteltisch in Bewegung gehalten. Der ungelöste Rückstand wird durch Zentrifugieren und Filtrieren abgetrennt und das Eluat untersucht, während der Rückstand erneut ausgelaugt wird.

Königswasseraufschluss

Mit dem Verfahren des Königswasseraufschlusses nach DIN 38414 Teil 7 (1983) werden die im Trockenrückstand vorliegenden Metallverbindungen durch verschiedene Säuren in Lösung gebracht und der Gesamtgehalt an Ionen bestimmt.

Röntgendiffraktometrie

Kristallstrukturen sowie der semiquantitative Mineralbestand wurden mit der Röntgendiffraktometrie über die Beugung von Röntgenstrahlen in einem Wellenlängenbereich von 0,03 nm bis 0,5 nm an den Gitterebenen der Minerale bestimmt. Die mineralogische Zusammensetzung wurde qualitativ aus den Röntgendiffraktogrammen anhand der Peakhöhen bzw. -flächen abgeschätzt. SKOOG & LEARY (1996) beschreiben das Verfahren detailliert.

Nach BRAGG gilt, wenn Röntgenlicht auf eine Netzebene fällt, wirkt jedes darauf liegende Teilchen als Streuzentrum und emittiert eine Sekundärwelle. Sekundärwellen setzen sich zu einer regulär reflektierten Welle zusammen. Dieser Vorgang findet an allen dazu parallelen Netzebenen statt, wobei alle diese Wellenlängen interferieren. Bei einem Gangunterschied der Wellenlänge λ oder einem ganzzahligen Vielfachen von λ entstehen Intensitätsmaxima durch positive Interferenz.

Für diesen Fall gilt das BRAGG'sche Beugungskriterium (Gl. 7):

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \theta \quad \text{Gl. 7}$$

d	Netzebenenabstand [m]
λ	Wellenlänge [m]
θ	Glanzwinkel, Winkel zwischen ein- oder ausfallendem Strahl und der Netzebene [°]
n	Ordnungszahl der Interferenz (ganzzahlig, > 0) [-]

Der Winkel zwischen dem einfallenden und dem reflektierten Strahl (Ablenkungswinkel) beträgt 2θ . Bei der BRAGG'schen Methode erfolgt die Messung bei festem λ und variablem θ .

Zur Herstellung von Pulverpräparaten wurden die Proben bei 60°C getrocknet, in einer Achtmühle gemahlen und auf einen Probenträger aufgetragen. Texturpräparate, so genannte LUBOs (Luftgetrocknet bevorzugt orientiert) wurden mit 1 g bis 5 g Probenpulver und 100 ml

monodestilliertem Wasser aufgeschlämmt und mit Natriumpyrophosphat zur Dispergierung versetzt. Anschließend wurde die Suspension auf eine Glasplatte als Probenträger geträufelt.

In einem Gerät der Firma Siemens D-500 (Cu K α -Röhre, $\lambda = 1,5404$ Angström, 30 mA, 40 kV) wurden im Winkelbereich von $2\theta = 1^\circ - 65^\circ$ Pulver- bzw. $1^\circ - 15^\circ$ Texturpräparate untersucht. Die Auswertung erfolgt unter Verwendung der JCPDS (Joint Committee of Powder Diffraction Standards)-Datei.

3.4 Physikalische Untersuchungsmethoden

Korndichte und Porenanteil

Für die Bestimmung des Porenanteils n wird zunächst die Korndichte mit einem Kapillarpyknometer ermittelt. Die Korndichte ρ_s wird über das bekannte Volumen des Pyknometers sowie des Wassers bestimmt. Die Gesamtporosität lässt sich bei bekannter Korndichte ρ_s sowie Trockendichte ρ_d errechnen (PRINZ & STRAUSS 2006; Gl. 8).

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad \text{Gl. 8}$$

ρ_d Trockendichte [g/cm³]

ρ_s Korndichte [g/cm³]

n Porenanteil [-]

Suspensionsdichte

Die Bestimmung der Suspensionsdichte ρ_{susp} erfolgte mittels eines Messzylinders, der mit der entsprechenden Suspensionsmenge abgewogen wird. Die Suspensionsdichte errechnet sich aus dem Quotienten der Masse der Suspension und dem Volumen (Gl. 9).

$$\rho_{susp} = \frac{m_{susp}}{V_{susp}} \quad \text{Gl. 9}$$

ρ_{susp} *Suspensionsdichte [g/cm³]*

m_{susp} *Masse der Suspension [g]*

V_{susp} *Volumen der Suspension [cm³]*

Rheologie

Zur Ermittlung der Fließfähigkeit wurden zwei Verfahren angewendet. So wurde einerseits eine Messung nach dem Trichterverfahren durchgeführt und andererseits die dynamische Viskosität mit einem Rheometer bestimmt.

Die Messung nach dem Trichterverfahren wird vor allem als Baustellentest zur Überprüfung der Fließfähigkeit eingesetzt. Das Trichterverfahren (IKEN et al. 2003) bestimmt das Fließvermögen einer Suspension, indem die Zeit in Sekunden gemessen wird, die die Suspensionsmenge benötigt, um durch die Öffnung des Trichters zu fließen. Der Versuch wurde mit einem so genannten Marsh-Trichter mit der genormten Öffnungsweite von 4,76 mm durchgeführt. In den Trichter wurden 1,5 l Suspension gegossen und beim Ausfließen von 1 l die Zeit auf 0,5 s genau notiert. Die Messung erfolgte unmittelbar nach dem Anrühren der Suspension.

Zur Messung der dynamischen Viskosität wurde ein Rheometer vom Typ LVDV-II+ der Firma Brookfield verwendet. Als Messkörper dient eine Spindel, die mit definierter Geschwindigkeit um ihre eigene Achse rotiert. Die Übertragung der Bewegung wird über eine Feder gesteuert. Das Drehmoment der Bewegung wird über die Spannung der Feder

angegeben. Mit verschiedenen Messkörpergeometrien (Spindeln LV1 bis LV4) kann ein Messbereich von 15 mPas bis 6 kPas abgedeckt werden. Aus der Geräte- sowie einer Messkörperkonstante, der Drehzahl und dem Drehmoment in Prozent ergibt sich die dynamische Viskosität in mPas (BROOKFIELD 1997).

Die Messungen erfolgen in einem Bereich von 10-100% des Drehmomentes, aufgrund der besseren Genauigkeit werden die Messwerte im Bereich von 70-90% des Drehmomentes aufgenommen. Bei langen Messzeiten und höheren Drehzahlen kommt es bei zementhaltigen Suspensionen zum Absetzen von Messstoffpartikeln auf der Spindel sowie zur Bildung eines Flüssigkeitsfilmes, der die Messergebnisse verfälscht.

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit wurde mit dem Wärmeleitfähigkeitsmessgerät Isomet 2104 der Firma Applied Precision bestimmt. Das instationäre Messverfahren basiert auf einer Weiterentwicklung der, von BLACKWELL (1954) beschriebenen, Heizdrahtmethode. Die Methode sieht das Aufheizen eines Heizdrahtes im Vollraum mit definierter Leistung vor und die Messung der zeitabhängigen Temperaturveränderung in der radialen Distanz r (m) oder unmittelbar im Heizdraht. Die Temperatur T (K) ändert sich dann linear mit dem natürlichen Logarithmus der Zeit t (s).

Die Wärmeleitfähigkeit λ (W/(mK)) kann aus der Steigung der Kurve $T \mapsto \ln t$ ermittelt werden (PARROTT & STUCKES 1975, Gl. 10).

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot l \cdot (T_2 - T_1)} \cdot (\ln t_2 - \ln t_1) \quad \text{Gl. 10}$$

λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
\dot{Q}	Wärmestrom (= Heizleistung) [W]
l	Länge des Heizdrahtes [m]
T_1, T_2	Temperaturen zum Zeitpunkt t_1 bzw. t_2 [K]

Der Proportionalitätsfaktor λ ist ein Maß für das Vermögen eines Stoffes, Wärme weiterzuleiten, wird als Wärmeleitfähigkeit bezeichnet und ist temperaturabhängig.

Bei den verwendeten Oberflächensonden ist die scheibenförmige Heizfläche in einen Isolator eingebettet und gibt die Wärme nur in den Halbraum ab. Dem wird in der Auswertung durch Verdopplung der Heizleistung Rechnung getragen. Statt der Länge l des Heizdrahts wird vom Hersteller die effektive Länge der Quelle durch Kalibrierung mit Standardmaterialien bestimmt. Die verwendeten Oberflächensonden haben einen Messbereich von 0,7-6,0 W/(mK). Die Messgenauigkeit wird vom Hersteller für die verwendeten Oberflächensonden mit ca. 10 % des Messwertes angegeben.

Für die Berechnung der thermischen Leitfähigkeit von Beton diskutieren COOK & USHER (1974, in ALLAN & KAVANAUGH 1999) theoretische Modelle zur Vorhersage der Wärmeleitfähigkeit von Beton. Das einfache Modell von RICHESON (ALLAN & KAVANAUGH 1999) geht von einem Zwei-Phasen-Modell mit einer zusammenhängenden Matrix und zufällig gestreuten Partikeln aus (Gl. 11).

$$\lambda = \frac{\lambda_c \left[1 + 2V_d \left(\frac{1 - \lambda_c / \lambda_d}{2 \lambda_c / \lambda_d + 1} \right) \right]}{1 - V_d \left(\frac{1 - \lambda_c / \lambda_d}{\lambda_c / \lambda_d + 1} \right)} \quad \text{Gl. 11}$$

λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
λ_c	thermische Leitfähigkeit der Matrix [W/(mK)]
λ_d	thermische Leitfähigkeit der Partikel [W/(mK)]
V_d	Volumenanteil der Partikel [-]

Da eine Erdwärmesonde im Prinzip einen mehrwandigen Hohlzylinder darstellt, addieren sich bei der vereinfachten Betrachtung die Einzelwiderstände gegenseitig auf. Die Berechnung eines Mehrschichtsystems zeigt bei RÜSGEN (2003), dass der Anteil der Hinterfüllung am Gesamtwiderstand umso größer ist, je größer die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gesteins ist. Dies gilt jedoch nur, solange die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gesteins nicht übertroffen wird, andernfalls tritt keine bedeutende Verringerung des Hinterfüllwiderstandes ein. Einen Vergleich zwischen thermisch verbesserten Hinterfüllmaterialien und Baustoffen, die nicht thermisch verbessert wurden und verschiedenen Sondengeometrien findet sich im Hinblick auf die Entwicklung der Übergangswiderstände bei RICHTER (2005). Er gibt auch Größenordnungen für die Wärmeleitfähigkeiten der unterschiedlichen Materialien an. Diamant besitzt mit über 2000 W/(mK) die höchste Wärmeleitfähigkeit aller Feststoffe; Metalle verfügen über die thermische Leitfähigkeit von 50 bis 500 W/(mK). Die Wärmeleitfähigkeit von Festgesteinen liegt bei - im Vergleich zu den anderen Stoffen - niedrigen Werten zwischen 1 und 7 W/(mK).

Wasserdurchlässigkeit

Die Durchlässigkeit eines Materials wird nach DIN 18130 Teil 1 (1998) mit dem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_f in Meter pro Sekunde angegeben. Das Gesetz von DARCY beschreibt unter Zugrundelegung einer linearen, laminaren Strömung die Proportionalität zwischen Filtergeschwindigkeit v_f und dem hydraulischen Gefälle i (Gl. 12).

Nach DARCY gilt:

$$v_f = k_f \cdot i \quad \text{Gl. 12}$$

v_f	Filtergeschwindigkeit	[m/s]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]
i	hydraulisches Gefälle	$[\frac{\Delta h}{l}]$ [-]

Zur Ermittlung des k_f -Wertes wird ein Probekörper mit Wasser mit einem konstanten oder nicht konstanten hydraulischen Gefälle i durchströmt und aus dem Durchfluss Q als Quotient von Volumen und Zeiteinheit sowie dem hydraulischen Gefälle i und der durchströmten Fläche A bestimmt.

Mit Gl. 13 ergibt sich auf der Grundlage einer Durchströmung im Gültigkeitsbereich des DARCY'schen Gesetzes folgende Beziehung:

$$Q = A \cdot v_f \quad \text{Gl. 13}$$

$$k_f = \frac{Q}{i \cdot A} \quad \text{Gl. 14}$$

$$Q \quad \text{Durchfluss} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$
$$A \quad \text{durchströmte Fläche} \left[\text{m}^2 \right]$$

Für den Versuch mit konstantem hydraulischem Gefälle i erhält man k_f wie folgt:

$$k_f = \frac{Q \cdot l}{A \cdot \Delta h} \quad \text{Gl. 15}$$

$$\Delta h \quad \text{Differenz der Standrohrspiegelhöhen} \left[\text{m} \right]$$
$$l \quad \text{Flie遝sstrecke} \left[\text{m} \right]$$

Die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes k_f wurde in Triaxialzellen mit zylinderförmigen Proben und mit konstantem hydraulischen Gefälle durchgeführt (Abb. 3-1). Dabei wird in der Zelle ein Außendruck P_a um die Proben herum angelegt, der eine Latexmanschette gegen die Zylinderwände der Probe presst, um Umläufigkeiten zu vermeiden. Damit kann im Versuch ein Innendruck P_i zur Herstellung eines hydraulischen Gefälles aufgebracht werden, der jedoch kleiner als der Druck in der Außenkammer der Zelle sein muss.

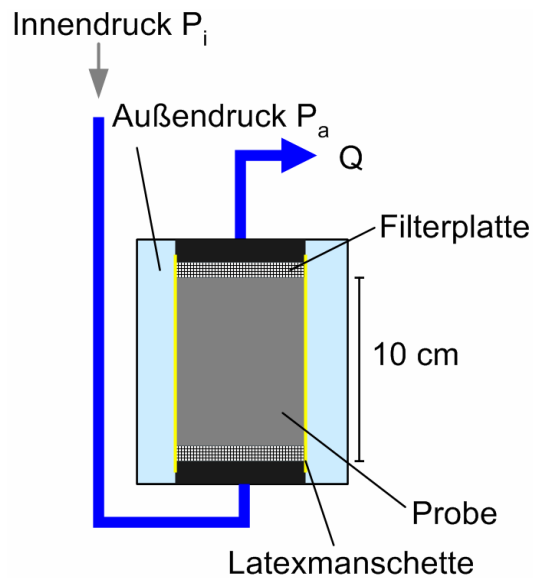


Abb. 3-1: Skizze der Durchströmungszellen
(Außendruck $P_a >$ Innendruck P_i)

Festigkeit

Die Biegezug- und Druckfestigkeitsmessungen wurden nach DIN EN 196 Teil 1 (2005) durchgeführt. In einer Form mit drei Fächern wurden jeweils 3 Prüfprismen von 40 mm x 40 mm x 160 mm hergestellt. Für die Prüfung der Hinterfüllbaustoffe wurden Styroporformen gewählt, die für diese Materialien aufgrund ihrer Dichtigkeit besser geeignet sind. Die Prüfprismen wurden nach dem Aushärten nach 24 Stunden entformt und entsprechend der Norm senkrecht in Wasser mit einer Temperatur von $20,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$ gelagert. Die Prüfung auf Biegezug- bzw. Druckfestigkeit erfolgte nach 28 Tagen Aushärtezeit.

Im späteren Anwendungsbereich sind Biegezugfestigkeiten nur untergeordnet relevant. Da diese im Messablauf ermittelt werden (Abb. 3-2), wurden diese Prüfwerte vor Durchführung der Druckfestigkeitsmessung ebenfalls gemessen.

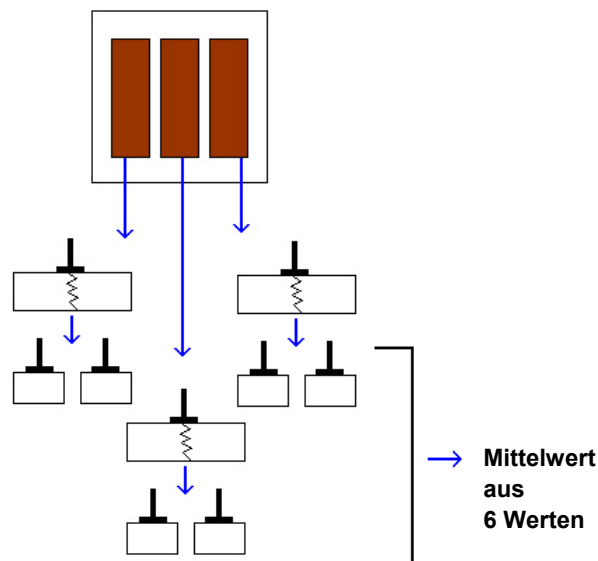


Abb. 3-2: Ablauf der Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfung nach DIN EN 196 Teil 1 (HERRMANN 2003)

3.5 Frostbeständigkeit der Hinterfüllmassen

Da die Anwendbarkeit gängiger Frostkriterien aus der Bodenforschung bzw. dem Betonbau für die Hinterfüllbaustoffe von Erdwärmesonden nicht gegeben ist, wurden im Zuge der Forschungen Frostversuche aus der Betontechnik für den Einsatzbereich Geothermie adaptiert (Kap. 2.1.2.2, 3.1). Besonderheiten bei Systemen mit Erdwärmesonden sind der Bau unterhalb der atmosphärischen Frosteindringtiefe und die Frost-Tau-Wechselbeanspruchung durch das Kreislaufsystem der Wärmequelle, das von der Taktung der Wärmepumpe gesteuert wird. Die Systemtemperaturen werden in Abhängigkeit von der Außentemperatur durch das Heizprofil des Gebäudes bestimmt.

Prüfkörper verschiedener Geometrien (Tabelle 3-3) wurden zyklischen Frost-Tau-Belastungen unterzogen, um auch Einflussfaktoren wie Probengröße und -art zu untersuchen. Gefügeveränderungen (Rissbildung, Materialablösung etc.) wurden makroskopisch beschrieben und mit weiteren Methoden (Durchlichtmikroskopie an Dünnschliffen, Rasterelektronenmikroskopie) untersucht. Quecksilberporosimetrische Messungen (Kap. 3.6) wurden zur Analytik des Porenraumes und der -verteilung durchgeführt. Des Weiteren wurden Ultraschalllaufzeiten zur Prüfung der inneren Schädigung an Probenkörpern gemessen. Das Verhalten an der Grenzfläche Rohr/Hinterfüllung wurde an Prüfkörpern mit eingebauten HDPE-Rohren untersucht.

Tabelle 3-3: Prüfkörper-Geometrien für Frost-Tau-Versuche

Probekörper-Geometrie	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Prüfvorschrift
zylindrisch ¹	50	50	DIN 52104-1 (1982)
zylindrisch ¹	100	100	DIN 52104-1 (1982) DIN 18130-1 (1998)
zylindrisch ¹	200	100	eigene Konzeption
quadratisch	70	110 ²	DIN CEN/TS 12390-9 (2006, modifiziert)
zylindrisch mit HDPE-Rohren	150 - 200	100	eigene Konzeption

¹ Auswahl der Geometrie, da Durchführung anderer Prüfungen (Wärmeleitfähigkeitsmessung, Messung des k_f -Wertes etc.) an den Prüfkörpern möglich ist.

² Länge in mm

Die durchgeführten Frostversuche lassen sich generell in drei verschiedene Arten hinsichtlich Durchführung, Probengeometrie sowie Temperaturbereich gliedern:

- 1) Frost-Tau-Wechselversuche in Anlehnung an DIN 52104-1 (1982) in Klimaschrank mit Temperaturen bis $-15/-20^{\circ}\text{C}$ (Kap. 3.5.1)
- 2) CIF-Test (Capillary Suction, Internal Damage and Freeze-Thaw) in Anlehnung an DIN CEN/TS 12390-9 (2006) als CIF-Test Geothermie in temperaturgesteuerter Prüfruhe, Temperaturbereich $+10^{\circ}\text{C}$ bis -10°C (Kap. 3.5.2)
- 3) Prüfstand Geothermie mit Erdwärmesonden nach eigener Konzeption, an Praxis orientierter Temperaturbereich (Kap. 3.7) von 15°C bis -10°C

3.5.1 Frost-Tau-Wechselversuche

Frost-Tau-Wechselversuche wurden in einem Klimaschrank in Anlehnung an DIN 52104 (1982) durchgeführt. In vorgenannter Norm sind mehrere Anwendungsfälle beschrieben, da die Probenbeanspruchung durch Frost unter anderem vom Grad der Wassersättigung sowie von der Abkühlungsgeschwindigkeit abhängt. Falls Versuche nach dieser Norm gemacht werden, ist die Art des Verfahrens zu beschreiben. Für die vorliegende Arbeit wurde das Verfahren A der „Wassertränkung bei Atmosphärendruck“ mit „Wasserlagerung für starke Durchfeuchtung“ und der „Frostbeanspruchung an Luft“ mit einem „Probekörper regelmäßiger Form“ verwendet.

Für die Durchführung wurde auf die Trocknung der Probekörper aufgrund der Zementbestandteile verzichtet; die Probekörper wurden nach dem Entformen bis zur Prüfung in Leitungswasser bei 20°C gelagert. Die Proben wurden zur Befrostung in einen Kälteschrank mit einer Lufttemperatur von -20°C so eingestellt, so dass allen Probekörpern die Wärme möglichst gleichmäßig und von allen Seiten entzogen wurde.

Nach jedem Frost-Tau-Wechsel wurden die Probekörper durch Inaugenscheinnahme auf Veränderungen untersucht und gewogen. Nach der Befrostung wurden die Probekörper dem Kälteschrank entnommen und in Wasser mit einer Temperatur von 20°C aufgetaut. Die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel wurde auf vier beschränkt und große Intervalle von drei Tagen Befrostung und drei Tagen Auftauen/ohne Befrostung gewählt, um das Frostverhalten nach einem bzw. wenigen Frost-Tau-Wechseln zu analysieren.

Es wurden Untersuchungen mit Prüfkörpern von 50 mm, 100 mm und 200 mm Höhe sowie mit eingebauten HDPE-Rohren durchgeführt (Tabelle 3-3). Zeitreihen mit Proben unterschiedlicher Aushärtedauer von 7, 14 und 28 Tagen wurden geprüft, um die Frostschädigung in Abhängigkeit von der Strukturausbildung zu erfassen. Die Analyse der Frostschäden wurde nach den Kriterien der makroskopischen Rissbildung bzw. Abwitterung sowie durch Messung der Ultraschalllaufzeiten bestimmt. Des Weiteren wurden Dünnschliffe untersucht und die Auswirkung der Frostschäden auf die Wärmeleitfähigkeit geprüft.

3.5.2 CIF-Test-Geothermie

Zur Untersuchung des Frost-Tau-Wechsel-Verhaltens wurde in einer temperaturgesteuerten Prüfruhe als weiteres Verfahren das CF-Verfahren in Anlehnung an DIN CEN/TS 12390 Teil 9 (2006) bzw. auch bekannt als CIF-Tests (Capillary Suction, Internal Damage and Freeze-Thaw) nach SETZER et al. (2001) und den RILEM-Empfehlungen (2004) durchgeführt. Das Verfahren wurde konzipiert um Betonbauteile zu prüfen, die atmosphärischen Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt sind. Beim CDF-Verfahren (Capillary Suction, Deicing Chemicals and Freeze-Thaw-Test) werden die Prüfkörper mit Taumittellösungen beaufschlagt.

Die Norm wurde entwickelt, um den Widerstand gegenüber wiederholten Frost-Tau-Wechseln in Kontakt mit Wasser bei Betonbauteilen zu prüfen. Frostkriterien für die Schädigung der Prüfkörper sind die Abwitterung, also der Materialverlust an der Betonoberfläche durch Einwirkung von Frost-Tau-Wechseln und die innere Gefügestörung, die definiert wird durch Risse innerhalb des geprüften Betons, die an

der Oberfläche nicht sichtbar sind. Dies führt jedoch ebenfalls zu einer Änderung der Betoneigenschaften. Während der Prüfung wird ein ansteigender Wassersättigungsgrad durch isothermes, kapillares Saugen mit definierten Frost-Tau-Wechseln getestet. Der CIF-Test ermöglicht die gleichzeitige Messung der Feuchteaufnahme und der inneren Gefügeschädigung durch Frost-Tau-Wechsel mit einaxialem Wärme- und Feuchtetransport in Gegenwart von Wasser. Zunächst erfolgt kapillares Saugen vor Beginn der Frostbelastung; dann Frostsaugen durch Frost-Tauwechselbelastung durch zwei Frost-Tau-Zyklen pro Tag. Alle Betone nehmen trotz der erreichten Gleichgewichtssättigung unter Frostbelastung mindestens noch einmal die Menge an Prüflösung auf, die sie bereits beim kapillaren Saugen aufgesaugt haben. Der Wasser-Zement-Wert beeinflusst wesentlich die Menge der Kapillarporen und die Dichtigkeit des Gefüges. Je dichter das Gefüge wird, umso höher ist der Reibungswiderstand gegenüber dem Frostsaugen, umso geringer ist die Saugleistung. Desto länger dauert es bis die Schädigungs-sättigung überschritten wird.

Versuchsdurchführung

Die Norm sieht die Herstellung von Betonwürfeln einer Kantenlänge von 150 mm vor; die Prüfkörper der Erdwärmesonden-Hinterfüllmassen wurden in 1,5 l PE-Flaschen mit 110 mm Kantenlänge (Kap. 3.3) erstellt und die PE-Oberfläche von 2 mm Dicke wurde als Versiegelung der Seitenflächen genutzt (alternativ wird Aluminium mit Butylkautschuk oder Epoxidharz aufgeklebt). Eine Abweichung von den normativen Maßen ist zulässig, solange die Prüfkörperhöhe mindestens 70 mm beträgt und die Gesamtprüfoberfläche $\geq 0,08 \text{ m}^2$ beträgt. Die Suspensionen lassen sich in PE-Flaschen aufgrund ihrer hohen Fließfähigkeit einfacher als in würfelförmigen Metallformen handhaben; zudem könnten zukünftig bei Bedarf PE-Flaschen zur Entnahme von Rückstellproben auf der Baustelle verwendet werden. Nach dem Aushärten der Suspension wurde nach 28 Tagen je ein Probekörper mit einer Kantenlänge von 110 mm und einer Höhe von 70 mm aus einer Flasche gesägt und der Spalt zwischen Seitenfläche und Prüfkörper an der Prüfoberfläche mit Silikon abgedichtet. Gemäß der bestehenden Norm erfolgt nach dem Entformen der Prüfkörper nach sieben Tagen die Lagerung für 21 Tage in einer Klimakammer;

dies wurde mit dem Aushärten der Suspensionen in den PE-Flaschen entsprechend modifiziert. Die Frost-Tau-Prüfung beginnt mit der Wiederbefeuchtung der Prüfkörper nach 28 Tagen; dafür werden diese mit der Prüffläche nach unten in einen Behälter auf 5,0 ($\pm 0,1$) mm hohe Abstandhalter gelegt und entionisiertes Wasser als Prüfflüssigkeit bis zu einer Höhe von 10,0 ($\pm 0,1$) mm in den Behälter gefüllt ohne die Oberseite des Probekörpers zu befeuchten. Der Prüfbehälter wird während der kapillaren Flüssigkeitsaufnahme verschlossen; die Dauer der kapillaren Befeuchtung wurde aufgrund der verringerten Probekörpergröße von sieben Tagen (DIN CEN/TS 12390-9) auf vier Tage verkürzt. Messtechnisch wurde vor Einsetzen der Prüfkörper in die Prüfruhe (Abb. 3-4) die Gewichtszunahme der Prüfkörper durch die kapillare Wassersättigung erfasst.

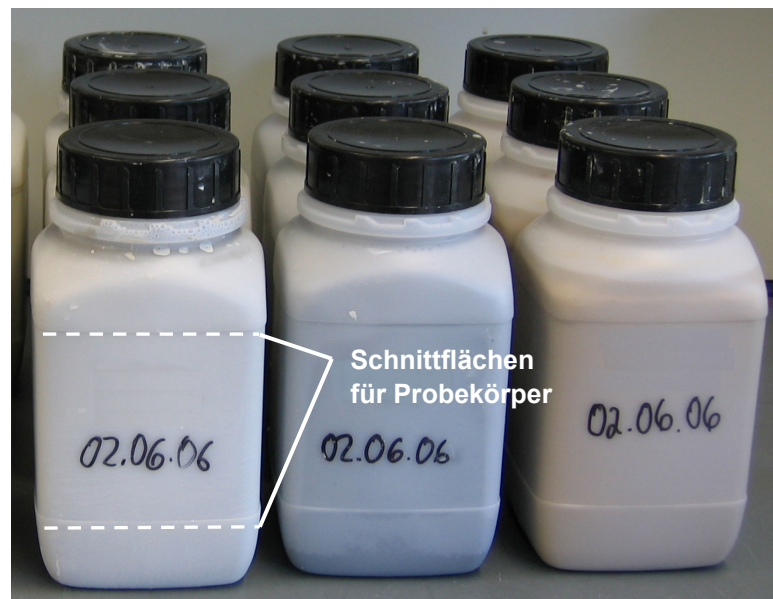


Abb. 3-3: PE-Flaschen zur Prüfkörperherstellung

Bei einer Frostprüfung, bei der die Probe gleichmäßig Wärme über alle Seitenflächen abgibt (z.B. DIN 52104), gefriert der Probekörper umso

stärker von der Rückseite her, je mehr Wärme die Prüfflüssigkeit im Vergleich zum Probekörper verbraucht. Die Prüfergebnisse sind damit nur bedingt reproduzierbar, da der Mechanismus der „Frostpumpe“ (Kap. 2.3) außer Kraft gesetzt ist. Daher wurde der CIF-Test derart konzipiert, dass ein einachsiger Wärme- und Feuchtetransport über eine Beanspruchungsfläche gewährleistet ist. Mit dem Eintauchen des Probekörpers mit der Beanspruchungsfläche nach unten in die Prüflösung erfolgt der einachsige Transport von Feuchte. Der einachsige Wärmetransport wird durch das Eintauchen des Prüfbehälters in ein geregeltes Temperierbad und eine sehr genaue Temperaturführung sichergestellt (Abb. 3-4). Die Seitenflächen des Probekörpers sind von einer Luftschicht umgeben, die nicht bewegt ist; die Luft wirkt als Dämmmedium; der Strahlungsaustausch wird durch die metallischen Oberflächen der Behälterwand weitgehend unterdrückt. Der einachsige Wärme- und Feuchtetransport erfolgt über die unten liegende Beanspruchungsfläche. Die Wärme wird über die gleiche Fläche ab- und zugeführt wie die Prüflösung.

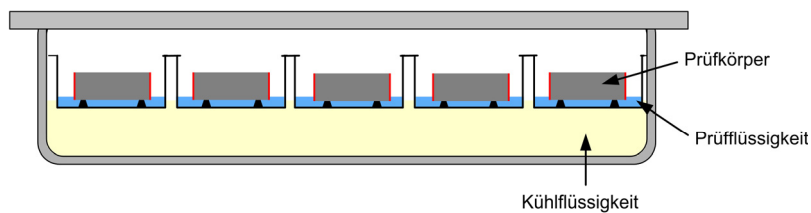


Abb. 3-4: Skizze der Prüfruhe des CIF-Tests (HERRMANN & CZURDA 2007, nach SETZER et al. 2001)

Für die Versuche wurde ergänzend das BAW-Merkblatt von 2004 für die Frostprüfung von Beton berücksichtigt, das auf dem Normentwurf prEN 12390-9 aus dem Jahre 2002 (neu: DIN/CEN TS 12390-9, 2006) und der RILEM-Empfehlung basiert und zusätzlich eine Messung der Ultraschalllaufzeit zur Ermittlung der inneren Schädigung (Abb. 3-5) vorsieht. Es wurden die Ultraschalllaufzeiten an beiden horizontalen

Achsen der Probekörper in einem Prüfbehälter mit definiertem Abstand zu den Schallköpfen bestimmt. Bei den Ultraschallmessungen wird die Probe um 90° gedreht nochmals durchschallt, um Inhomogenitäten zu detektieren.

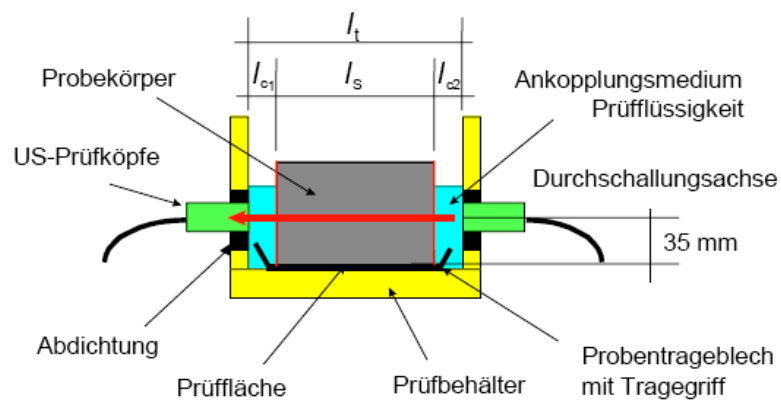


Abb. 3-5: Messaufbau zur Bestimmung der Ultraschalllaufzeit (BAW 2004)

Die Prüfkörper liegen in der Prüftruhe auf Abstandshaltern in mit 10 mm Wasser gefüllten Behältern. Als Prüfoberfläche ist die Probenfläche definiert, die in das Wasser eintaucht. Es werden 12-stündige Frost-Tau-Wechsel durchgeführt. Die Temperaturzyklen wurden auf Temperaturen von +10°C bis -10°C (Abb. 3-6) angepasst, da die genormten Temperaturen von +20°C bis -20°C im Anwendungsbereich der Erdwärmesonden nicht erreicht werden. Für die Prüfungen der Frostzerstörung (Abwitterung etc.) wurde die Temperatur bis auf +20°C erhöht, um ein komplettes Auftauen der Proben und reproduzierbare Messungen der Schalllaufzeiten durchführen zu können. Die Anzahl der Frostzyklen wurde auf 28 Frost-Tau-Wechsel verringert und als ausreichend erachtet, da sehr schnell nach Testbeginn eine Reaktion der getesteten Prüfkörper (Rissbildung, Abwitterung) erfolgt und somit Schädigungen sicher festgestellt werden können.

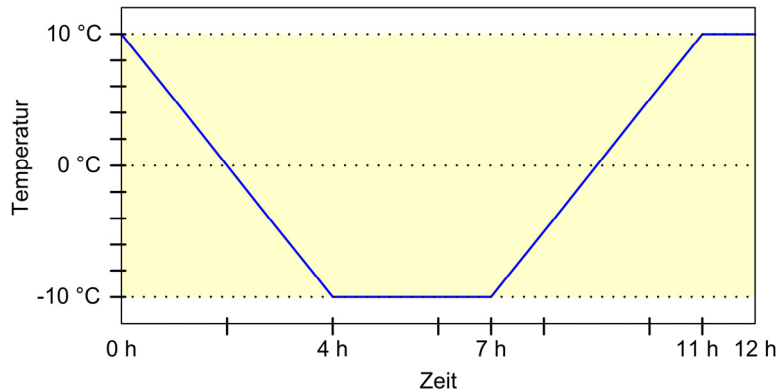


Abb. 3-6: Skizze des modifizierten 12-stündigen Temperaturverlaufes beim CIF-Test Geothermie

Auswertung

Die Prüfung der Abwitterung und die Messungen der Ultraschalllaufzeiten erfolgten nach 6 bzw. 10, 14, 22 und 28 Frost-Tau-Wechseln. Um lose abgewittertes Material zu entfernen, wurden die Behälter mit Prüfkörper in ein dreiminütiges Ultraschallbad eingesetzt. Die Lösung mit dem abgewitterten Material wurde in einem Papierfilter filtriert und 24 Stunden getrocknet. Die Masse des Filters mit dem abgewitterten Material wurde, ebenso wie der Filter selbst, auf 0,1 g genau gewogen. Die Masse des getrockneten, abgewitterten Materials wurde nach Gl. 16 bestimmt.

$$m_{s,n} = m_{s,before} + (m_{s+f} - m_f) \quad \text{Gl. 16}$$

$m_{s,n}$ Gesamtmasse des getrockneten abgewitterten Materials nach n Frost-Tau-Wechseln, auf 0,1 g gerundet [g]

$m_{s,before}$ Gesamtmasse des getrockneten abgewitterten Materials bei der vorherigen Messung [g]

m_{s+f} Masse getrockneter Filter mit abgewittertem Material, auf 0,1 g gerundet [g]

m_f Masse des trockenen Filters auf 0,1g gerundet [g]

Nach Bestimmung der Abwitterung wird vor Beginn des nächsten Frost-Tau-Wechsels der Behälter mit neuer Prüfflüssigkeit aufgefüllt und die Schalllaufzeiten durch die Probekörper gemessen (Abb. 3-5).

Für jede Messung und jeden Probekörper ist die flächenbezogene Gesamtmenge an abgewittertem Material zu berechnen (Gl. 17).

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \quad \text{Gl. 17}$$

S_n Masse des getrockneten abgewitterten Materials bezogen auf die Prüffläche nach dem n-ten Frost-Tau-Wechsel [g/m²]

$m_{s,n}$ Gesamtmasse des getrockneten abgewitterten Materials nach n Frost-Tau-Wechseln [g]

A Prüfoberfläche [m²]

In die Auswertung einbezogen wurde zudem die Masse $\Delta m_{s,n}$ als differentielle Masse des getrockneten abgewitterten Materials nach dem jeweils n-ten Frost-Tau-Wechsel in g (bezogen auf die normierte Prüfoberfläche von 11 x 11 cm).

Auch die Flüssigkeitsaufnahme der Prüfkörper für die Untersuchungen wurde nach dem kapillaren Saugen, vor Beginn der Testzyklen sowie bei der Prüfung der Frostschäden durch Wägung bestimmt.

Die Auswertung der Flüssigkeitsaufnahme eines jeden Probekörpers wird nach Gl. 18 berechnet.

$$\Delta w_n = \frac{w_n - w_1 + \sum \overline{\mu s}}{w_0} \cdot 100 \quad \text{Gl. 18}$$

Δw_n Flüssigkeitsaufnahme jedes Probekörpers zum jeweiligen Prüftermin [M.-%]

$\overline{\mu s}$ Masse des abgewitterten Materials zum jeweiligen Prüftermin; die Summe wird über alle Messungen bis zum n-ten Zyklus gebildet [g]

- w_0 Referenzmasse jeden Probekörpers (vor Vorsättigung, ohne Versiegelung) [g]
 w_1 Masse jeden Probekörpers (vor Vorsättigung, mit Versiegelung) [g]
 w_n Masse jeden Probekörpers zum jeweiligen Prüfetermin [g]

Zur Auswertung der inneren Schädigung wird die Durchschallungszeit im Ankopplungsmedium berechnet (Gl. 19).

$$t_c = \frac{l_c}{v_c} \quad \text{Gl. 19}$$

- t_c Durchschallungszeit im Ankopplungsmedium [μs]
 l_c Durchschallungsstrecke $l_{c1} + l_{c2}$ im Ankopplungsmedium [mm]
 v_c Geschwindigkeit des Ultraschallsignals im Ankopplungsmedium; wird bei $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ mit 1490 m/s angenommen

Die Änderung der Durchschallungsgeschwindigkeit τ_n nach n Frost-Tau-Wechseln wird für jeden Probekörper und jede Achse mit Gl. 20 berechnet.

$$\tau_n = \frac{t_{cs} - t_c}{t_n - t_c} \quad \text{Gl. 20}$$

- τ_n relative Durchschallungsgeschwindigkeit [-]
 t_{cs} Gesamt-Durchschallungsgeschwindigkeit nach kapillarem Saugen [μs], vor erstem Frost-Tau-Wechsel
 t_n Gesamt-Durchschallungsgeschwindigkeit nach n Frost-Tau-Wechseln [μs]

Aus der relativen Durchschallungsgeschwindigkeit wird der *relative dynamische E-Modul* $R_{u,n}$ nach n Frost-Tau-Wechseln berechnet (Gl. 21).

$$R_{u,n} = \tau_n^2 \quad \text{Gl. 21}$$

Der Mittelwert aus den Werten an beiden horizontalen Achsen (Abb. 3-5) gibt den relativen dynamischen E-Modul des Probekörpers an. Gemäß BAW 2004 gilt Beton als geschädigt, wenn ein relativer dynamischer E-Modul $R_{u,n} = 0,75$ bzw. 75% unterschritten wird. Als Abnahmekriterium ist eine Zyklenanzahl zu definieren, bis zu der das Schädigungskriterium nicht unterschritten wird.

Übertragbarkeit

Bei der Bewertung der Übertragbarkeit der Testergebnisse auf das In-situ-Verhalten der Baustoffe in einer Erdwärmebohrung ist zunächst die behinderte Seitendehnung zu nennen. Diese ist in der realen Anwendung je nach umgebendem Locker- bzw. Festgestein gegeben; allerdings kann Material je nach Größe des Porenraumes bzw. vorhandener Hohlräume ins umgebende Gestein eingepresst werden und somit eine partielle Druckentlastung stattfinden. Im Laborversuch wurde mit der seitlichen Ummantelung der PE-Wandung die behinderte Seitendehnung erreicht. Die Feuchteaufnahme des Hinterfüllbaustoffes durch kapillares Saugen vor sowie während der Frost-Belastung findet je nach Wasserangebot in der ungesättigten sowie gesättigten Bodenzone in jedem Fall statt. Im Laborversuch erfolgt lediglich ein einaxialer Feuchtetransport, dieser ist im realen Anwendungsfall nicht begrenzt, d.h. die Ergebnisse im Versuch stellen die untersten Werte der kapillar angesaugten Wassermenge dar. Es ist zudem davon auszugehen, dass auch der Wärmetransport über die gesamte Bohrlochlänge nicht auf eine Richtung beschränkt bleibt, wie dies in der Labor-Prüfruhe der Fall ist. Infolge der vorhandenen Rotationssymmetrie in der horizontalen Schnittebene der Bohrung, ist bei einer tiefen/langen Bohrung, auch in situ ein einaxialer, radialer Wärmetransport vorherrschend.

Als Prüflösung wurde für die Versuche destilliertes Wasser verwendet; in der Realität ist je nach Grundwasserchemismus von einer großen Spannbreite an gelösten Wasserinhaltsstoffen auszugehen. Dies könnte für weitere geothermische CIF-Versuche berücksichtigt werden und beispielsweise die Frostschädigung in stark sulfathaltigen, betonaggressiven Wässern oder Wässern mit hohem Kalk-Kohlensäure-Gehalt getestet werden.

Die Frostbelastung wirkt auf eine Prüfoberfläche ein, dies entspricht auch dem In-situ-Fall mit der Fläche der Hinterfüllung, die an den Erdwärmerohren anliegt. Das Prüfintervall von 12 Stunden mit Maximaltemperaturen von -10°C über drei Stunden und anschließender Temperaturerhöhung entspricht dem realen Betrieb einer Wärmepumpe mit zwei Starts und einer Laufzeit von jeweils drei Stunden. Bedingt durch Sperrzeiten der Energieversorgungsunternehmen zu Spitzenlastzeiten des Stromverbrauchs werden Wärmepumpen mit längeren Laufzeiten getaktet und bei Deckung des aktuellen Heiz- sowie Warmwasserbedarfs die Pufferspeicher gefüllt.

Die Prüftemperaturen von -10°C wurden im Hinblick auf Maximaltemperaturen von -7°C , die in Erdwärmesondensystemen erreicht werden, definiert. Diese sind jedoch, wie auch im ursprünglichen Versuchskonzept für Betonbauteile mit -20°C , überdefiniert, um in kürzeren Versuchszeiten als in der Natur, Schädigungseffekte beobachten zu können.

Ultraschallmessungen

Die interne Schädigung der Probekörper wurde zerstörungsfrei mittels eines Ultraschallverfahrens geprüft. Das Verfahren nutzt die mechanische Bewegung von Materie. Atome bzw. Moleküle des Ausbreitungsmediums schwingen periodisch um ihre Ruhelage und übertragen ihre Bewegung auf die angrenzenden Moleküle. Der Schwingungsvorgang breitet sich mit Schallgeschwindigkeit aus und die Schwingungszustände der Schallwellen wiederholen sich in festen Abständen, dabei gibt die Frequenz f die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde wieder (DEUTSCH 1997). Die Geschwindigkeit der Schwingungen ist die materialspezifische Schallgeschwindigkeit v und errechnet sich aus dem Quotienten von Laufweg und Laufzeit. Da die

Schallgeschwindigkeit eine Werkstoffkonstante ist, bestimmt die Wahl der Frequenz auch die Wellenlänge. Für die Prüfung von Bauteilen aus Beton werden, bedingt durch Inhomogenitäten und die damit verbundene Schallschwächung, Frequenzen von 50 kHz eingesetzt.

Für die Messungen wurde die Methode der direkten Durchschallung verwendet, bei der die beiden Signalwandler mit ausreichender Kopplung durch ein Kontaktmittel an den gegenüberliegenden Seitenflächen des Prüfkörpers angebracht werden und die Laufzeit von Longitudinalschwingungsimpulsen gemessen wird. Fehlstellen im Prüfkörper können durch eine verringerte Energieübertragung über die Grenzfläche zwischen dem Material und Luft hinweg detektiert werden. Bei schrägem Auftreffen der Schallwellen an einem Riss kommt es zur Streuung durch Reflexionen. Dadurch wird das Schallfeld geschwächt und die Schallgeschwindigkeit im Prüfkörper verringert. Die Schallwelle verliert generell mit zunehmender Wegstrecke an Energie. Der Schalldruck nimmt durch werkstoffabhängige Eigenschaften wie Absorption (Umwandlung in Wärme) und Streuung am strukturellen Aufbau eines Werkstoffes (Korngrenzen, Risse etc.) ab und die Schallwelle verliert dadurch mit zunehmender Wegstrecke an Energie.

Zur Untersuchung der Frost-Tau-Schädigung wurden Relativmessungen an Probekörpern während verschiedener Frost-Tau-Zyklen durchgeführt und mit den Ausgangswerten verglichen. Anhand der ermittelten Werte lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Probe und den gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten herstellen. Tabelle 3-4 zeigt typische Werte für Ultraschallgeschwindigkeiten, die an unterschiedlichen Materialien getestet wurden.

Tabelle 3-4: Werte für Ultraschallgeschwindigkeiten (DEUTSCH 1997)

Werkstoff	Schallgeschwindigkeit CL [m/s]
Aluminium	6200 – 6360
Basalt	5930
Beton	3000 – 4380
Gneis	4700
Graphit gepresst	1600 – 2500
Quarz	7540 – 5760
Sandboden	270 – 2000
Ton, gebrannt	3652

3.6 Gefügeuntersuchungen

Quecksilberporosimetrie

Quecksilberporosimetrie als Methode zur Bestimmung der Porosität von Materialien und Porenverteilung findet Verwendung seit WASHBURN (1921), der die theoretischen Grundlagen mit den zugehörigen Berechnungsmethoden für nicht benetzende Flüssigkeiten in Kontakt mit porösen Stoffen definierte. Die Methode wird aufgrund der guten Reproduzierbarkeit für eine Vielzahl von Stoffen angewendet. Die ersten Analysen von zementgebundenen Materialien gehen auf EDEL`MAN et al. (1961) zurück, der mit der Quecksilberporosimetrie die Porenverteilung in Zementleimen verschiedener Wasser-Zement-Werte untersuchte. Quecksilberporosimetrie findet mittlerweile Anwendung als Standardmethode für den Test zementgebundener Baustoffe (RÜBNER & HOFFMANN 2006).

Die Methode der Quecksilberporosimetrie zur Bestimmung der Porengrößenverteilung basiert auf den physikalischen Eigenschaften einer nicht benetzenden Flüssigkeit in Kapillaren. Quecksilber verfügt über eine hohe Oberflächenspannung und einen Benetzungswinkel (Kontaktwinkel) $>90^\circ$, was zur Folge hat, dass Kapillaren bzw. Poren nicht spontan, sondern nur beim Aufbringen eines ausreichend großen Druckes gefüllt werden. Dieser Druck hängt vom Kontaktwinkel, der Oberflächenspannung der Flüssigkeit sowie von Porenform und -größe ab und ist umgekehrt proportional zum Porenradius.

Nach WASHBURN (1921) ergibt sich für zylindrische Poren zwischen Druck und Porenradius die in Gl. 22 beschriebene Beziehung.

$$r_p = \frac{-2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{P} \quad \text{Gl. 22}$$

r_p	Porenradius [nm]
σ	Oberflächenspannung von Quecksilber [mN/m]
θ	Benetzungswinkel [°]
P	Druck [bar]

Der Benetzungswinkel variiert abhängig von der chemischen Reinheit des Quecksilbers und den Probeneigenschaften. In der Literatur werden Werte für den Benetzungswinkel zwischen 125° bis 143° angegeben, als Durchschnittswert gilt $\theta = 140^\circ$. Die Oberflächenspannung hängt von Temperatur, Material und dem Krümmungsradius der Flächen ab. Als Durchschnittswert für die Oberflächenspannung von Quecksilber wird $\sigma = 485 \text{ mN/m}$ verwendet. Ausgehend von diesen Werten ergibt sich Gl. 23 mit:

$$r_p = \frac{7500}{P} \quad \text{Gl. 23}$$

Die Bestimmung der Porosität von Feststoffen mittels Quecksilberintrusion erfolgte nach DIN 66133 (1993). Die Proben wurden nach einer Aushärzeit von 28 Tagen im Ofen bei 105°C getrocknet. Nach RÜBNER & HOFFMANN (2006) und ALIGIZAKI (2006) ist diese Trocknungsmethode standardmäßig mit guten Ergebnissen anwendbar. Die getrocknete Probe wurde mit einem Gewicht zwischen 0,3 und 1,3 g in einen kalibrierten Probenkolben (Penetrometer) eingewogen und luftdicht verschlossen. In der Niederdruckeinheit des Messgerätes zur Analyse der Makroporen erfolgte die Entgasung im Vakuum bis auf einen Druck $< 13,33 \text{ Pa}$, anschließende Luftzugabe bis zum Atmosphärendruck und im Zuge dessen die vollständige Überdeckung der Probe mit Quecksilber. Nach erneutem Wiegen wurde das Penetrometer in die Hochdruckeinheit des Gerätes eingesetzt und der Druck in einer Hydraulikflüssigkeit kontinuierlich erhöht.

Mittels mathematischer Berechnungen lassen sich Porengrößenverteilung, Porenflächenverteilung und das Porenvolumen bestimmen. Als Messergebnisse erhält man die kumulative, intrudierte Menge Quecksilber, die dem Porenvolumen entspricht, in Abhängigkeit vom Äquivalentporenradius. Die Porenradienverteilung ergibt sich aus der 1. Ableitung des Porenvolumens nach dem Porenradius ($dV/d(\log d)$).

Die Messungen wurde mit dem Quecksilberporosimeter Autopore III Analyzer der Firma Micromeritics durchgeführt; mit diesem Gerät können Porendurchmesser zwischen 360 μm und 3 nm bestimmt werden. Es konnte eine gute Reproduzierbarkeit der Methode mit guten Ver-

gleichbarkeiten zwischen den einzelnen Proben festgestellt werden. Das maximale Porenvolumen lässt sich nicht ausreichend genau ermitteln. Ungenauigkeiten ergeben sich u. a. durch die Anwendung des Porenmodells (AYLMORE & QUIRK 1967) sowie durch „kommunizierende Porositäten“ und den Anteil von „Flaschenhalsporen“ (Kap. 2.2.2.2).

Mikroskopie

Rasterelektronenmikroskopie

Bei der Rasterelektronenmikroskopie wird die Oberfläche eines leitfähigen Festkörpers von einem Elektronenstrahl rasterförmig abgefahren, dabei werden unterschiedliche Signale aus rückgestreuten Elektronen sowie Sekundärelektronen erzeugt.

SKOOG & LEARY (1992) beschreiben Aufbau und Funktionsweise eines Rasterelektronenmikroskops.

Die ofengetrockneten Proben wurden mittels Leitsilber auf einem Probenträger befestigt und unter Vakuum mit Platin bedampft, um die Probenoberfläche leitfähig zu machen. Bei der verwendeten Methode wurde das Signal der Sekundär-Elektronen mit einem Elektronendetektor erfasst und in ein Bild der Probenoberfläche verwandelt. Die Untersuchungen erfolgten am Laboratorium für Elektronenmikroskopie der Universität Karlsruhe mit einem hochauflösenden (1 nm bei 20 keV; 3 nm bei 1 keV) Rasterelektronenmikroskop mit Schottky Feldemitter LEO 1530 Gemini.

Nachteile der konventionellen Elektronenmikroskopie bestehen in der Probenpräparation durch die Bedampfung mit Platin und den Bedingungen für die Mikroskopie. Diese benötigt ein Hochvakuum; hierfür darf die Probe kein freies Wasser enthalten. Die angewandte Präparationsart kann nach MÖSER (1998) zu präparationsbedingten Veränderungen der Hydratationskristalle und zur Bildung von Schwindrissen führen. Das Fortschreiten der Hydratation kann nur per Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) beobachtet werden (HERB 2003).

Durchlichtmikroskopie

Zur Gefügebestimmung wurde die Durchlichtmikroskopie mit Dünnschliffen von 20-30 µm Dicke hergestellt. Die Dünnschliffpräparate wurden senkrecht und parallel zur Schnittfläche der Probe über Trocknung, Eingießen in Epoxydharz und das Schleifen auf die benötigte Dicke hergestellt.

Es wurde ein Mikroskop der Firma Zeiss (Stemi SV6) verwendet; die Bildaufnahmen wurden mit einer Kamera gemacht.

3.7 Untersuchungen am Gesamtsystem: Prüfstand-Geothermie

3.7.1 Theoretische Grundlagen

Das Gesamtsystem mit seinen Wechselwirkungen zwischen Gestein, Bohrloch, Hinterfüllung, Wärmetauscherrohren und Sondenfluid ist in Laborversuchen bzw. größerem technischen Maßstab nur komplex nachzubilden. Erste Ansätze lieferte eine Großtechnikumsanlage mit zwei Erdwärmesonden am Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe (TH) zum Funktionsvergleich zwischen thermisch optimierten Hinterfüllmassen und Baustoffen ohne thermische Verbesserung. Dieser Prüfstand lieferte zudem wichtige Ergebnisse zum chemischen Verhalten der Materialien und zur Verteilung des Temperaturfeldes; über die Ergebnisse berichten RÜSGEN (2003), HUNN (2004) und HERRMANN et. al (2004). SIGNORELLI (2004) untersuchte weitere theoretische Grundlagen mit der Simulation von thermischen und hydraulischen Prozessen im Zusammenhang mit dem Betrieb von Erdwärmesonden.

In-Situ-Versuche zum Verhalten der Erdwärmesonden sind vielfach in Planung und wurden unter anderem von ROHNER & RYBACH (2001) im Bezug auf das Gefrieren der Bohrlochhinterfüllung und die Auswertung auf die Druckverhältnisse durchgeführt.

Geothermische Bohrlochversuche in der Praxis dienen vor allem der Erkundung der geothermischen Untergrundeigenschaften für die Projektierung sowie der tiefenorientierten Qualitätsprüfung. Dies wird über Bohrlochversuche wie den Geothermal Response Test (GeRT oder

TRT) oder auch den Enhanced Geothermal Response Test und verschiedene Bohrloch-Logs realisiert.

Zur Durchführung des Geothermal Response Tests wird ein Bohrloch erstellt und mit Erdwärmesondenrohren sowie Hinterfüllung vollständig ausgebaut (Abb. 3-7). Mit dem Anschluss einer Messapparatur wird die kurzzeitige Temperaturentwicklung einer Erdwärmesonde bei einer definierten Wärmezufuhr und -abfuhr gemessen. Anhand der mittleren Fluidtemperatur, die durch bekannte Heiz- und Kühlleistungen variiert und an Vor- und Rücklauf gemessen wird, können Rückschlüsse auf die thermischen Untergrundeigenschaften und den Wärmedurchgang gezogen werden. Zur Prüfung der Untergrundeigenschaften wird das System mit Wasser durchströmt und eine definierte Heizleistung eingebracht; die daraus resultierenden Temperaturänderungen des zirkulierenden Fluids werden gemessen. Die aufgezeichnete Temperaturkurve kann mit verschiedenen Methoden ausgewertet werden. Der für die thermischen Untergrundeigenschaften ermittelte Wärmeleitfähigkeitswert wird als „effektive“ Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} bezeichnet. Dieser Wert beinhaltet den gesamten Wärmetransport im Untergrund mit Einflüssen wie der Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung sowie aller Widerstände oder dem konvektiven Wärmetransport durch Grundwasser.

Die Methodik wurde seit Mitte der 1990er Jahre entwickelt, erste theoretische Grundlagen bzw. Umsetzungsmöglichkeiten für den Test wurden schon vorher, u.a. von MOGENSEN (1983) entwickelt. Erste Praxistests mit einer mobilen Einheit wurden 1995 in Schweden und 1996 in den USA durchgeführt.

Für die Grundlagen sowie weitere Details wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen. Die Grundlagen erläutern u.a. CLAEISSON & ESKILSON (1988) und GEHLIN (2002); SANNER et al. (2007) geben einen aktuellen Überblick über den Stand der Technik.

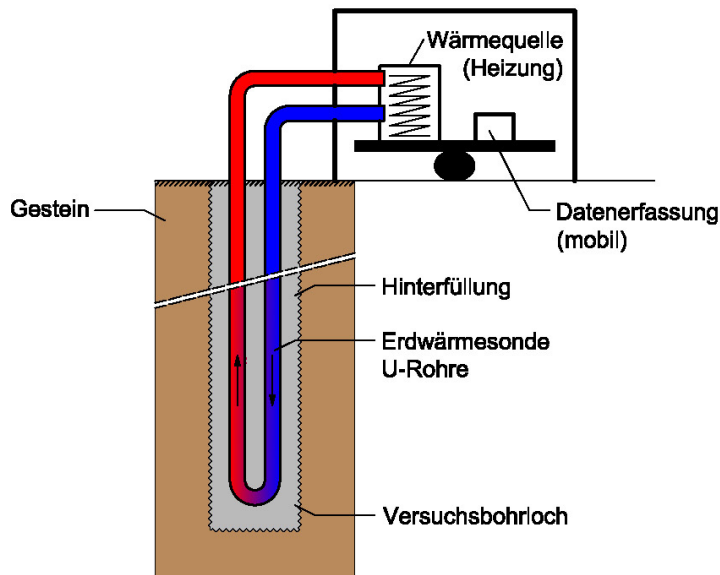


Abb. 3-7: Durchführung eines Geothermal Response Test

Die Einzel- und Gesamtwiderstände zwischen Bohrloch, Hinterfüllung und Sondenrohren wurden theoretisch von RICHTER (2005) beschrieben. Der „Bohrlochwiderstand“ als thermischer Widerstand zwischen Sondenfluid und -rohr, bezogen auf einen Meter Sondenlänge, kann abgeschätzt oder durch eine Messung bestimmt werden. Das Polyethylen (PE) aus dem die Sondenrohre bestehen, hat eine geringe Wärmeleitfähigkeit von ca. $0,4 \text{ W/(mK)}$. Zusammen mit der Wärmeleitfähigkeit der Verfüllung als Stoffkonstanten kann der thermische Widerstand einer einfachen Zylinderanordnung berechnet werden. Der Vergleich zwischen einer Zement-Bentonit-Hinterfüllung mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,8 \text{ W/(mK)}$ mit einem thermisch verbesserten Material von $2,0 \text{ W/(mK)}$ zeigt, dass sich bei gleicher Geometrie deutlich geringere thermische Bohrlochwiderstände von $0,141 \text{ K/W}$ (bei WLF Hinterfüllung = $0,8 \text{ W/(mK)}$) bzw. $0,074 \text{ K/W}$ (bei WLF Hinterfüllung = $2,0 \text{ W/(mK)}$) ergeben. Diese können durch den Einbau von Abstandshaltern noch weiter reduziert werden, für weitere Details sie-

he RICHTER (2005). Für die Ausführungen von RÜSGEN (2003) zur Betrachtung der Erdwärmesonden als mehrwandigen Hohlzylinder, bei dem sich die Einzelwiderstände aufaddieren, siehe Kap. 3.4.

3.7.2 Konzeption

Der Prüfstand Geothermie wurde konzipiert, um Versuche am Gesamtsystem durchführen und die Wechselwirkungen zwischen Sondenrohren, Hinterfüllung und dem Untergrund berücksichtigen zu können. Unter Abbildung der realitätsnahen Geometrie eines Bohrloches konnte zudem die Temperatursausbreitung, ausgehend vom Sondenfluid, in der Hinterfüllung und weiter im Untergrund betrachtet werden. Entscheidend für die Beeinflussung der Hinterfüllung durch Frosttemperaturen war die Ausbreitung ausgehend von den Sondenrohren radial nach außen. Die Frost-Tau-Wechsel, die auf die Hinterfüllung einwirken, konnten durch eine zyklische Steuerung der Temperaturen des Wärmeübertragerfluids ebenfalls realitätsnah abgebildet werden.

Die Konzeption des Prüfstandes Geothermie erfolgte, ausgehend von den Laborversuchen, in Anlehnung an eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Bedingungen, die beim Betrieb der Erdwärmesonde auf die Hinterfüllung wirken. Der Prüfstand Geothermie wurde entworfen, um die Ausbreitung des Temperaturfeldes sowie die Übergänge an den Schnittstellen Rohr - Hinterfüllung - Untergrund, d.h. am Gesamtsystem zu analysieren.

Der Prüfstand Geothermie besteht aus zwei parallel laufenden thermischen Einzelrohrversuchen und wurde in einer Klimakammer aufgebaut, um konstante, den natürlichen Untergrundbedingungen angepasste, Umgebungstemperaturen von 15°C realisieren zu können. Der Untergrund wurde in Bezug auf trockene bzw. feuchte Lockergesteine durch Quarzsand abgebildet. In zwei, zunächst mit trockenem Quarzsand gefüllte, Behälter wurde jeweils eine Einzelrohrsonde mit Hinterfüllung eingebaut und an ein Kühlaggregat angeschlossen. Der Fluidkreislauf des Kühlaggregates wurde mit Wasser und einem Frostschutzmittel betrieben, um Temperaturen unter 0°C realisieren zu können. Zur Aufzeichnung des Temperaturfeldes wurden Pt-100 Temperaturfühler eingebaut und an eine automatische Messwertaufzeichnung

angeschlossen. Die Klimakammer sowie das Kühlaggregat wurden ebenfalls mit einer automatischen Steuerung bzw. Messwerterfassung betrieben. Temperaturfühler wurden in Vor- und Rücklauf des Fluidkreislaufes sowie mittig am Erdwärmesondenrohr an der Kontaktstelle zur Hinterfüllung sowie in zwei Achsen in verschiedenen Tiefen horizontal und vertikal in den Behälter eingesetzt.

Abb. 3-8 zeigt in einer Skizze den schematischen Versuchsaufbau, die Anordnung der Messtechnik in der Seitenansicht sowie im Querschnitt; Abb. 3-9 zeigt ein Foto des in der Klimakammer aufgebauten Versuchstands.

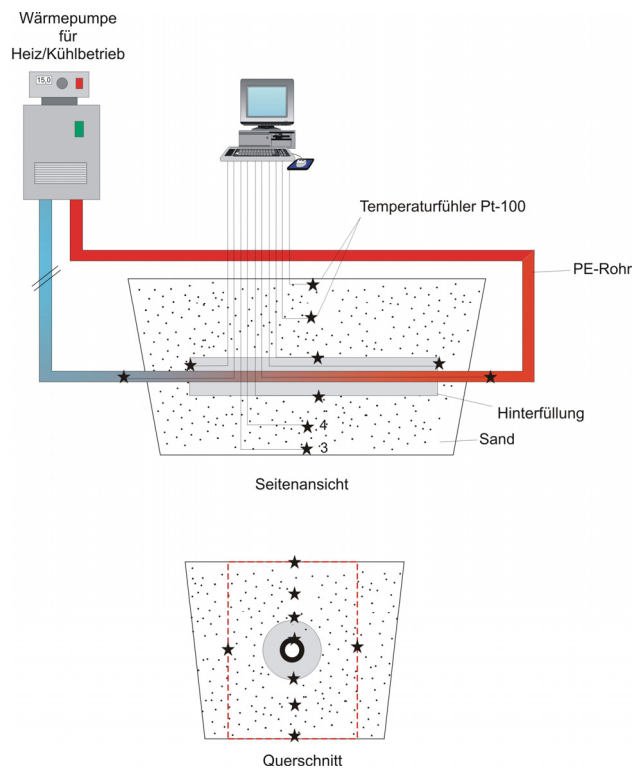


Abb. 3-8: Skizze des Geothermie-Prüfstands in der Seitenansicht sowie im Querschnitt (rote Linie: Ausschnitt der Darstellung des Temperaturfeldes in Kap.4.4.3)



Abb. 3-9: Prüfstand Geothermie in der Klimakammer

Für die Konzeption des Geothermie-Prüfstands wurden im Gegensatz zum In-situ-Betrieb mit Doppel-U-Sonden zur Erzielung klarer Randbedingungen nur Einzelrohrsonden verwendet. Das Einzelrohr wird im Gegensatz zur Doppel-U-Sonde nicht durch ein weiteres Rohr thermisch beeinflusst, es finden somit keinesfalls „thermische Kurzschlüsse“ zwischen den Rohren, in dem das kältere sowie dem Rohr in dem das erwärmte Fluid zirkuliert, statt. Für den Versuchsaufbau wurden Erdwärmesondenrohre, wie sie in Material und Durchmesser auch in der Praxis eingesetzt werden, verwendet. Die Rohre wurden im Laborversuch, ebenso wie für den In-situ-Betrieb empfohlen, turbulent durchströmt.

Die Dicke der Hinterfüllung wurde nach den Vorgaben des Leitfadens für Erdwärmesonden Baden-Württemberg (MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG 2005) so gewählt, dass „die Querschnittsfläche der Ringraumverfüllung durch Zementsuspension mehr als 65% der Bohrquerschnittsfläche“ beträgt. Als umgebendes Lockergestein wurde im Laborversuch nur trockener bzw. vollständig gesättigter, gleichförmiger Quarzsand verwendet. Dies entspricht vereinfachten Bedingungen in der realen Anwendung, denn Erdwärmesonden werden häufig in ungleichförmigen teilgesättigten bzw. vollständig gesättigten Lockergesteinen sowie Festgesteinen mit variablen thermischen Eigenschaften gebaut. Um diese Verhältnisse abzubilden,

müsste ein größerer Locker-/Festgesteinskörper in situ entnommen und möglichst ungestört, unter Beibehaltung der natürlichen Bodenfeuchte, im Prüfstand eingebaut werden. Dies wäre bei weiteren Versuchen möglich, ist aber bei klar definierten Materialien und Wassersättigung nicht notwendig, da unter Berücksichtigung der Varianz geologisch gebildeter Locker- und Festgesteine die Genauigkeit und Interpretierbarkeit nicht gesteigert werden kann. Die kapillare Wasseraufnahme der Hinterfüllung ist jedoch, ähnlich wie in der natürlichen geologischen Situation mit einem Betrieb im Grundwasser, ständig möglich.

In der Klimakammer des Prüfstands Geothermie wurde die Umgebungstemperatur auf 15°C gehalten; dies entspricht in etwa realen Untergrundtemperaturen, die jedoch tiefenabhängig bis 100 m im Durchschnitt 10 bis 12°C erreichen. Der Wärmeentzug erfolgt, unter Berücksichtigung der Einzelrohrgeometrie, wie im realen Anwendungsfall. Die Intervalle der Fluid-Durchströmung wurden mit mehreren Stunden dem vereinfachten Betriebszustand realer Wärmepumpen angepasst. Tiefe Temperaturen des Wärmeüberträgerfluides werden radial aus dem Sondenrohr in die Umgebung abgeleitet, dies erfolgt in Abhängigkeit von den thermischen Untergrundeigenschaften. Die Beanspruchung der Hinterfüllung durch Frosteinwirkung erfolgt somit entsprechend dem realen Betrieb; dies gilt auch für die Schädigung durch Austrocknung in trockener Umgebung.

Der Prüfstand Geothermie wurde konzipiert, um Hinterfüllmassen in Geometrie sowie Betriebszustand unter an die Realität angepassten Bedingungen, d.h. am Gesamtsystem, testen zu können. Für den Versuchsstand waren präzise einstellbare Temperaturen, verschiedenartige Hinterfüllmassen, trockene und feuchte Bedingungen sowie die variable Handhabbarkeit der Prüfanordnung wesentlich. Der Prüfstand Geothermie liefert wertvolle Hinweise auf das Verhalten der Materialien sowie die Ausbreitung des Temperaturfeldes und kann zukünftig noch weiter optimiert werden. Möglich ist der Einsatz verschiedener Bodenkörper und Wassersättigungszustände, die Verwendung größerer Lockergesteinszonen sowie der Einbau von längeren Doppel-U-Sonden. Auch eine Kombination von Frost-Tau-Wechselversuchen mit der Analytik des, im Prüfstand eingebrachten, Wassers ist möglich, somit könnte beispielsweise auch der Einfluss von betonaggressiven Wässern auf die Hinterfüllung getestet werden.

4 Ergebnisse

Die Bewertung der Hinterfüllmassen mit den verschiedensten Versuchen erfolgt gegliedert hinsichtlich der Zusammensetzung (Kap. 4.1) und der Frost-Tau-Beständigkeit (Kap. 4.2). In Kapitel 4.3 werden anhand des CIF-Test Geothermie neue Kriterien für die Frost-Tau-Beständigkeit definiert. Die Versuchsergebnisse des Prüfstands Geothermie werden in Kapitel 4.4 beschrieben.

Anmerkung:

Im Rahmen der Arbeit wurden die in Tabelle 3-2 aufgeführten Fertigmischungen bzw. Mischungsempfehlungen verwendet. Aus Gründen der Versuchskoordination und des Untersuchungsumfangs wurden nicht alle Mischungen A bis H mit allen dargestellten Analysen getestet.

4.1 Zusammensetzung der Hinterfüllmassen

Mineralbestand

Der Mineralbestand der Mischungen A und B ist bekannt, da diese Mischungen auf Rezepturen mit bekannten Gewichtsanteilen der Inhaltsstoffe basieren (Kap. 3.2, Tabelle 3-2). Für Mischung A wurde in den Laborversuchen ein Natriumbentonit sowie ein Hochofenzement verwendet. Das gilt auch für die VDI-Mischung (Mischung B), der noch Quarzsand zugesetzt wurde. Hochofenzemente CEM III, die für die Erstellung frostbeständiger Betone/Erdwärmesonden-Hinterfüllungen empfohlen werden, bestehen in ihren Zementphasen als Hauptbestandteil aus Calcit CaCO_3 und Hochofenschlacke als röntgenamorpher Phase; enthalten sind zudem Zementphasen als Nebenbestandteile $\text{Ca}_{54}\text{MgAl}_2\text{Si}_{16}\text{O}_{90}$ und $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_4\text{O}_{10}$ (röntgendiffraktometrisch). Weitere Nebenbestandteile sind Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, Anhydrit CaSO_4 , Bassanit $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5 \text{H}_2\text{O}$, Dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, Hämatit Fe_2O_3 und Quarz SiO_2 .

Der Mineralbestand der Mischungen C und D (Abb. 4-1) zeigt, dass die Hinterfüllbaustoffe hauptsächlich aus Quarz (SiO_2), Calcit (CaCO_3), Zementphasen und Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) sowie Tonkomponenten

(Smektit, Glimmer, Illit, Kaolinit), je nach Art des Baustoffes (Kap. 3.2, Tabelle 3-2), bestehen. Dies gilt auch für Mischung E.

Bei Mischung F handelt es sich um ein kommerzielles Produkt, das auf den in Kap. 2.1.2.1 beschriebenen deutschen bzw. europäischen Patenten basiert. Demnach enthält diese Mischung 5 bis 50 Gewichtsprozent an pulver- oder granulatformigem Graphit/Blähgraphit mit Korngrößen zwischen 1 μm und 1 mm und enthält zudem mindestens zwei der Bestandteile Wasser, Ton (Bentonit), hydraulisches Bindemittel und Sand.

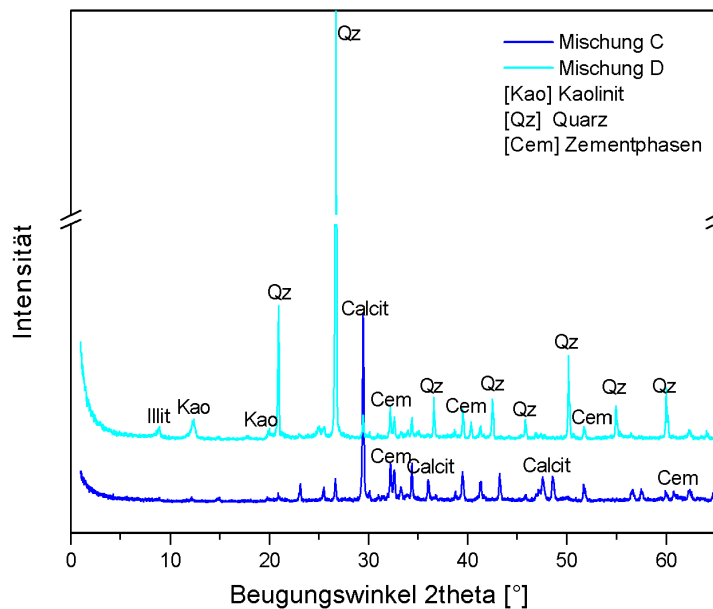


Abb. 4-1: Röntgendiffraktogramme der Mischungen C und D

Mischungsentwicklung

Die beiden Mischungen G und H wurden im Rahmen der Forschungsarbeit neu entwickelt und dienten der Überprüfung des gesamten Versuchskonzeptes ('Proof-of-Concept') in Laborversuchen sowie dem Prüfstand Geothermie.

Für diese Forschungsarbeit lag das Hauptaugenmerk auf der Realisierung frostbeständiger, in der Praxis einsetzbarer, Hinterfüllbaustoffe mit guten thermischen Eigenschaften. Dies ist gelungen, wie die Versuche zeigen, verhalten sich die Prüfkörper der Mischung G sowie der Mischung H im Gegensatz zu den, in der Praxis eingesetzten, Baustoffen frostsicher. Ansatzpunkt für die Rezepturen war die Verwendung von handelsüblichen, hochwertigen Inhaltsstoffen, um die Praxistauglichkeit zu gewährleisten. Es wurden Hochofenzemente als hydraulisches Bindemittel verwendet. Mit dem Test von sulfatbeständigen Zementen wurde auch der Anwendungsbereich der betonaggressiven Grundwässer mit eingeschlossen.

Zur Umsetzung der Ziele spielen vor allen Dingen - gemäß der in der Betontechnik bekannten Erstellung frostbeständiger Betonrezepturen (Kap.2.2.1) - eine Optimierung der Sieblinie, die Erhöhung des Feststoffgehaltes und die damit verbundene Minimierung der Wasserzugabe eine wesentliche Rolle. Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass bislang chemische Betonzusatzmittel in den Rezepturen für Erdwärmesonden-Hinterfüllbaustoffe nicht eingesetzt werden. Dies hängt vor allem mit dem aktuellen Stand der Technik (Kap. 2.1.2.1) und der Anlehnung an - im Brunnenbau üblichen - Rezepturen zusammen. Ein weiterer Grund ist die Verarbeitung in der Praxis mit niedertourigen Mischanlagen und Verpressdrucken bis 20 bar (Kap.2.1.2.3) mit der Mischung von Trockenbaustoffen auf der Baustelle oder dem Einsatz als Fertigprodukte (Sackware, Big Bags, Siloware) ohne Zugabe weiterer (auch flüssiger) Zusatzstoffe. So erweist sich beispielsweise die Verwendung von Luftporenbildnern zur definierten Einbringung von Luftporen für diesen Anwendungsbereich als ungeeignet und ist bedingt durch die Verarbeitung als Suspension und dem anschließenden Einpumpen ins Bohrloch nicht praktikabel. Die Herstellung von Luftporen, wie sie bei Betonen in einer vorwiegend „trockenen“ Umgebung als Extensionsraum für das beim Gefrieren verdrängte Wasser und Eis effektiv sind, würde infolge der vorwiegend „nassen“ Umgebung mit

teil- bzw. vollständig wassergesättigten Böden, d.h. langfristig eintretender Wassersättigung der Luftporen, keinen ausreichenden Schutz gegen Frost-Tau-Schäden darstellen. Generell bestehen für die Verfüllbaustoffe nach der Einbringung ins Bohrloch keine Nachbehandlungsmöglichkeiten.

Die Wassergehalte der Mischungsrezepturen variieren in einer sehr weiten Spanne von 75 Gew.-% bis 18 Gew.-% (Kap. 3.2, Tabelle 3-2, Tabelle 4-1). Da die Trockenbaustoffe mit Wasser versetzt und als, möglichst gut fließfähige, Suspensionen ins Bohrloch eingebracht werden, werden sehr hohe Wasseranteile eingesetzt. Dies zeigen auch die Verhältnismerte der Wasser- zu Feststoffanteile aus Tabelle 4-1. Eine Bewertung hinsichtlich der Frostbeständigkeit sowie weiterer wesentlicher Eigenschaften der Hinterfüllmassen in Abhängigkeit vom Wassergehalt ist in Kap. 0 beschrieben.

Tabelle 4-1: Wassergehalte der Mischungen und Feststoffverhältnis

Bezeichnung	Wassergehalt Gew.-%	Verhältnis Wasser/Feststoff (W/F-Wert)
Mischung A	75	3,00
Mischung B	50	1,00
Mischung C	30	0,43
Mischung D	32	0,47
Mischung E	25	0,33
Mischung F	48	0,92
Mischung G	18	0,22
Mischung H	20	0,25

Königswasseraufschluss

In Tabelle 4-2 sind die Ergebnisse des Königswasseraufschlusses mit den, aus den pulverförmigen Trockenbaustoffen freigesetzten, Kationen dargestellt. Hauptbestandteil der Mischungen ist Calcium mit freigesetzten Konzentrationen zwischen 52,67 mg/g und 216,17 mg/g. Der niedrigste Calcium-Wert in Mischung D resultiert aus geringen Zementanteilen, während hingegen Mischung C die höchsten Zementanteile enthält und auch das meiste Calcium eluiert. Die erhöhten Natrium- und Kalium-Konzentrationen, die aus Mischung A freigesetzt werden, lassen sich mit dem enthaltenen Bentonit erklären. Magnesium wird generell nur in sehr geringen Mengenanteilen zwischen 0,06 und 0,15 mg/g aus den Baustoffen herausgelöst.

Tabelle 4-2: Kationenkonzentrationen aus Königswasseraufschluss

Probe	Konzentration			
	Natrium [mg/g]	Kalium [mg/g]	Calcium [mg/g]	Magnesium [mg/g]
Mischung A	5,23	2,85	181,83	0,09
Mischung C	0,39	0,39	216,17	0,06
Mischung D	0,21	1,62	52,67	0,15
Mischung E	0,84	2,23	143,93	0,08

Batch-Versuche

Die Batch-Versuche zur Elution der Ionen aus den Trockenbaustoffen wurden mit Messintervallen von 24 Stunden, 7, 14, 21, 28 und 56 Tagen durchgeführt. Die Entwicklung der pH-Werte zeigt Abb. 4-2; zunächst liegen diese bei Werten um 13,5 (Mischungen C, D, F) und nehmen nach 56 Tagen auf Werte um 13,0 (Mischung A, C, F) bzw. 12,5 (Mischung D, E) ab. Die gleiche Tendenz zeigen die Werte der elektrischen Leitfähigkeit (Abb. 4-3). Die Werte um 12 mS/cm für Mischung A, um 8 mS/cm sowie um 5,5 mS/cm für Mischung E nach einer 24-stündigen Elution, gehen auf Werte um 6 mS/cm, 3mS/cm und 1,5 mS/cm nach 56 Tagen zurück.

In den Abb. 4-4 A-E sind die Ergebnisse der Batch-Versuche dargestellt und zeigen, dass als Hauptelemente die Kationen Natrium, Kalium und vor allem Calcium wichtig sind. Magnesium spielt nur untergeordnet eine Rolle. Die Auslaugung von Kalium und Natrium ist am stärksten zu Beginn des Wasserkontaktes ausgeprägt und erfolgt weiterhin hauptsächlich in den ersten 14 bis 21 Tagen. Calcium hingegen sowie die Anionen (Tabelle 4-3) werden über einen längeren Zeitraum eluiert; dieser Vorgang ist nach 56 Tagen noch nicht beendet.

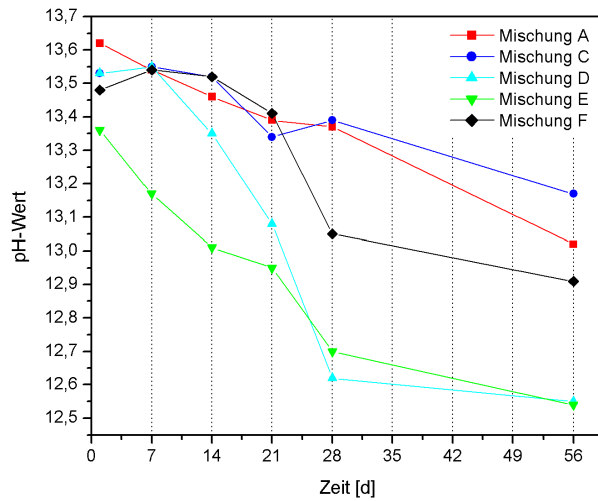


Abb. 4-2: pH-Werte im Batch-Versuch

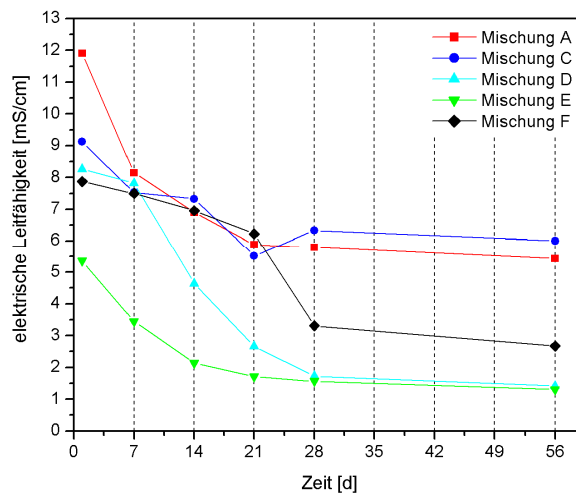
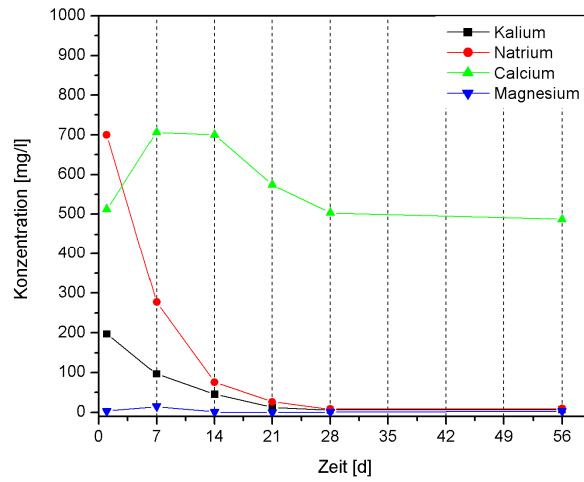
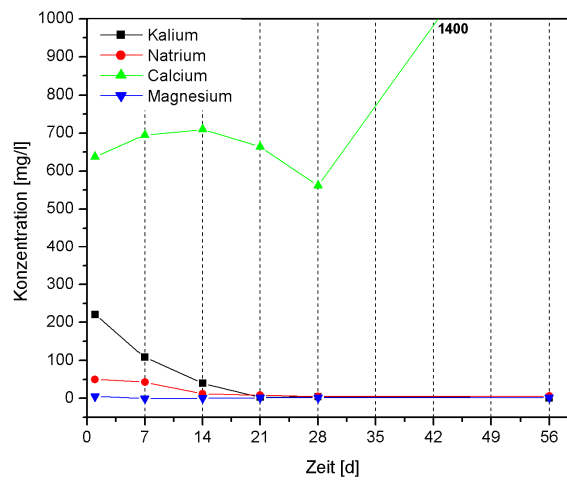


Abb. 4-3: Werte der elektrischen Leitfähigkeit im Batch-Versuch

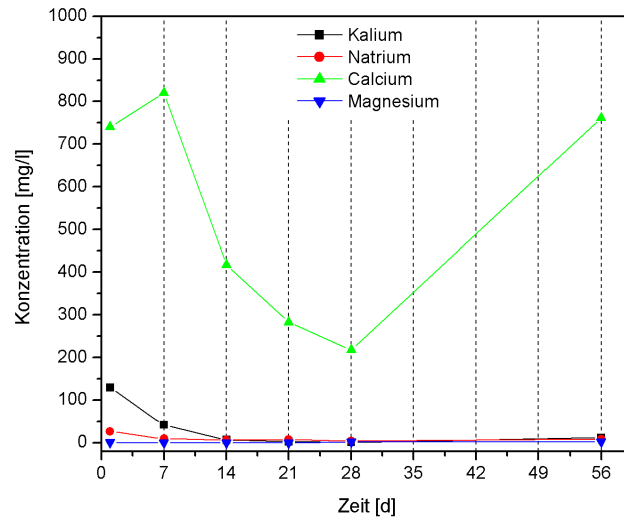


A: Elution der Kationen Mischung A

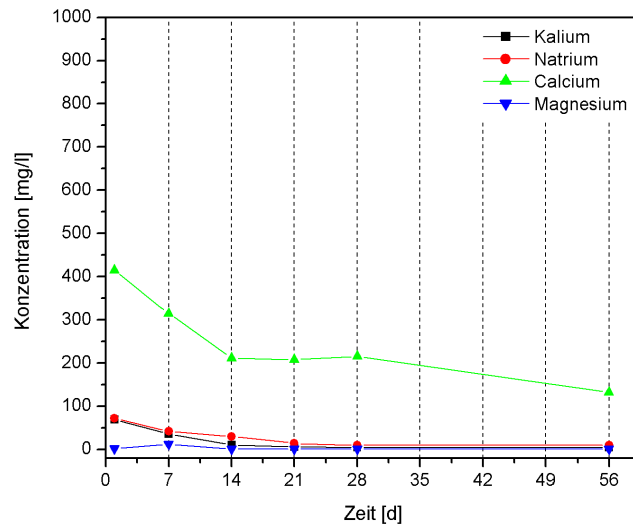


B: Elution der Kationen Mischung C

Abb. 4-4: Konzentrationen der eluierten Kationen (Abb. 4-4/A-B)

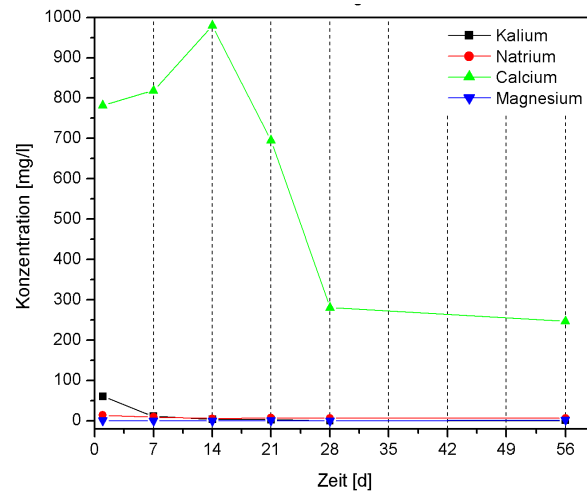


C: Elution der Kationen Mischung D



D: Elution der Kationen Mischung E

Abb. 4-4: Konzentrationen der eluierten Kationen (Abb. 4-4/C-D)



E: Elution der Kationen Mischung F

Abb. 4-4: Konzentrationen der eluierten Kationen (Abb. 4-4/ E)

Abb. 4-5 bis Abb. 4-8 zeigen die Analysenergebnisse der eluierten Mischungen A, C, D, E und F im Vergleich; in Tabelle 4-3 sind die Konzentrationen der eluierten Anionen dargestellt. Die höchsten Werte werden für Calcium erreicht, die geringsten für Magnesium. Sulfat wird in konstant hohen Mengen um 130 mg/l eluiert. Nitrit, Chlorid und Fluorid liegen in Bereichen von 2,6 bis 3,9 mg/l.

Weitere Auslaugungsversuche wurden nicht durchgeführt. Mit der Mobilisierung von Schwermetallen ist laut HOHBERG (2003) nur in geringem Maße bei weiter steigenden pH-Werten zu rechnen. Für die Prüfung der Umweltverträglichkeit muss das Auslaugungsverhaltens in jedem Fall gemäß den bisher vorliegenden Empfehlungen (DIBT 2008, HOHBERG 2003) untersucht werden.

Tabelle 4-3: Konzentrationen der eluierten Anionen der Mischung D

Messzeitpunkt nach Beginn der Elution [d]	F [mg/l]	Cl [mg/l]	NO ₂ [mg/l]	SO ₄ [mg/l]
1 (24 h)	0,63	3,94	2,61	129,11
7	0,91	3,94	1,93	131,02
14	1,90	2,49	0	130,81
21	1,75	2,38	1,41	134,27
28	2,00	2,44	1,28	131,88
56	1,30	2,17	2,17	136,51

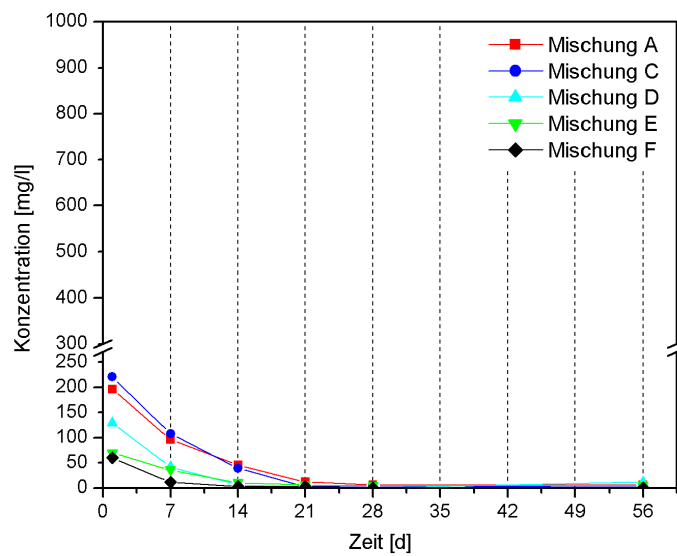


Abb. 4-5: Konzentration eluierte Kaliumionen

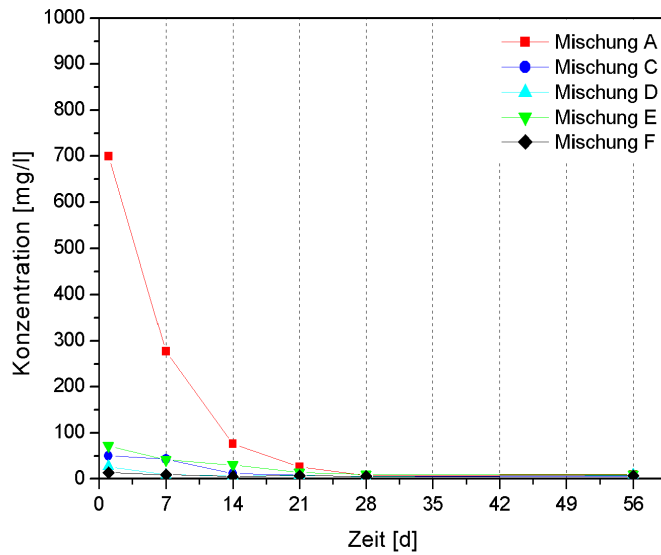


Abb. 4-6: Konzentration eluierte Natriumionen

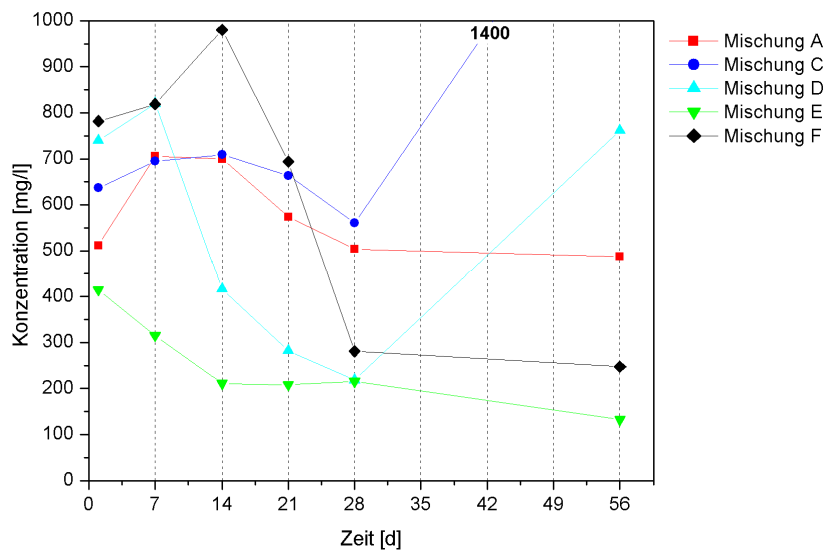


Abb. 4-7: Konzentration eluierte Calciumionen

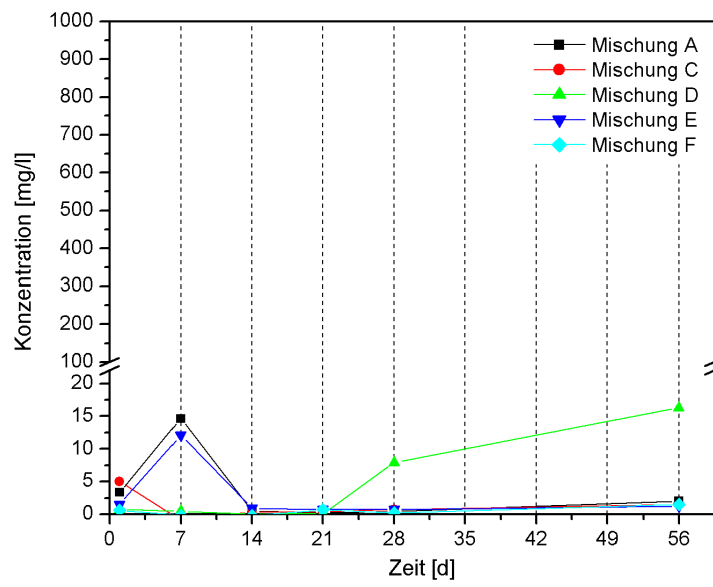


Abb. 4-8: Konzentration eluierte Magnesiumionen

Korn- und Suspensionsdichte

Die Korndichte der Verfüllbaustoffe liegt im Bereich von 2,6 g/cm³. Der Porenanteil n wurde über die Korndichte, den Wassergehalt sowie die Feuchtdichte der Probekörper berechnet und befindet sich im Bereich von 0,41 und 0,69 (Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Korndichten, Trockendichten und Porenanteile der Probekörper

Probe	Korndichte ρ_s [g/cm ³]	Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	Porenanteil n [-]
Mischung C	2,6080	0,8894	0,66
Mischung D	2,6319	1,2606	0,52
Mischung E	2,5703	0,8057	0,69
Mischung F	2,6065	1,5154	0,41

Die pH-Werte der zementhaltigen Suspensionen liegen im basischen Bereich bei Werten zwischen 12,3 und 12,9 (Tabelle 4-5). Das Einbringen der Baustoffe in Wasser führt zu einer kurzfristigen pH-Wert-Erhöhung. Auslaugbare Ionen werden mit zunehmender Erhärtung verzögert abgegeben, da die Proben bedingt durch die geringen Durchlässigkeiten (Abb. 4-12) nur langsam und mit sehr hohen Verweilzeiten durchströmt werden.

Die Suspensionsdichte der Baustoffe hängt vom Wasser- und Feststoffgehalt der Suspensionen ab und variiert zwischen 1,2 und 2,0 kg/dm³ (Tabelle 4-5). Idealerweise sollen die Suspensionen mit einer Dichte >1,4 kg/dm³ (HLUG 2004) verpresst werden, um durch ausreichende Dichtedifferenz zu Wasser eine sichere Verfüllung im Kontraktorverfahren von unten nach oben mit der Verdrängung des eventuell im Bohrloch vorhandenen Grundwassers zu gewährleisten.

Tabelle 4-5: pH-Werte und Dichte der Suspensionen

Probe	pH-Wert [-]	Suspensionsdichte ρ_{susp} [kg/dm ³]
Mischung A	12,40	1,2
Mischung B	12,90	1,9
Mischung C	12,88	1,7
Mischung D	12,76	1,7
Mischung E	12,46	1,5
Mischung F	12,90	1,9
Mischung G	12,30	2,0
Mischung H	12,30	2,0

Rheologie

Das Fließverhalten der Baustoffe wurde mit dem Marsh-Zylinder geprüft. Tabelle 4-6 zeigt die Werte für die Auslaufzeiten aus dem Marsh-Zylinder.

Tabelle 4-6: Messung der Auslaufzeit mit dem Marsh-Zylinder

Probe	Auslaufzeit [s]
Wasser ¹	28,8
Mischung A	35,9
Mischung B	- ²
Mischung C	- ²
Mischung D	54,1
Mischung E	51,7
Mischung F	- ²
Mischung G	- ²
Mischung H	- ²

¹ als Referenzwert gemessen

² keine Messung mit diesem Verfahren möglich

Messwerte konnten nur für die Suspensionen der Mischungen A, D und E bestimmt werden, die Auslaufzeit der anderen Suspensionen konnte nicht mit dem Marsh-Zylinder gemessen werden. Es zeigt sich, dass der Marsh-Trichter mit einer Zylinderöffnungsweite von 4,76 mm als einfache Baustellenmethode in der Praxis nicht zur Beurteilung der Fließfähigkeit von Standardverfüllmassen für Erdwärmesonden geeignet ist.

Weitere Verfahren zur Bestimmung der Fließfähigkeit von Suspensionen wie, z.B. eine Kugelharfe oder eine Spülungswaage, kamen nicht zum Einsatz.

Werte im Bereich um 2500 mPas wurden bei den Messungen der dynamischen Viskosität für Mischung C, Mischung E und F sowie für die neu entwickelte Mischung G (Abb. 4-9) gemessen. Die Messungen an der Suspension von Mischung D erreichten geringere Werte um 1200 mPas. Eine sehr geringe Viskosität zeigt Mischung A mit einem Wert von 400 mPas.

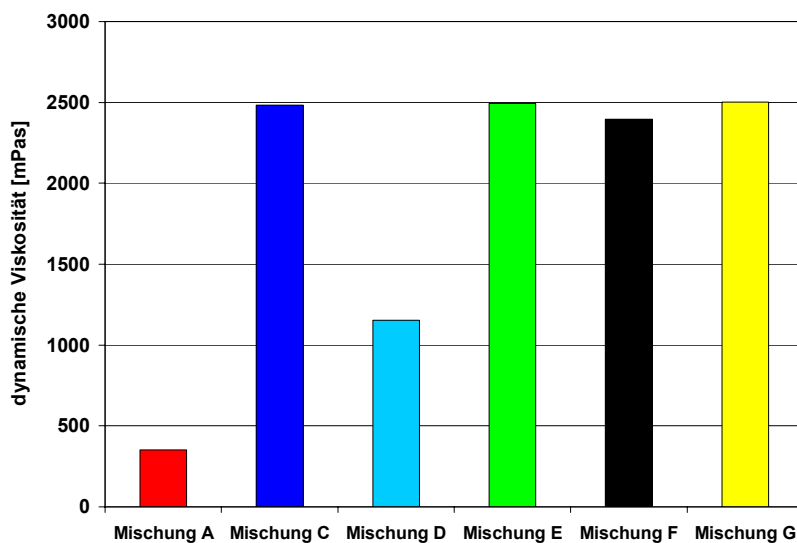


Abb. 4-9: Messergebnisse des Fließverhaltens der Baustoffe mit dem Viskosimeter

Wärmeleitfähigkeit

Die Ergebnisse zur Wärmeleitfähigkeit der Füllbaustoffe zeigt Abb. 4-10. Wärmeleitfähigkeiten von 0,8 W/(mK) bis 1,1 W/(mK) werden von Mischung A und Mischung C bei Messungen an feuchten, wassergesättigten Prüfkörpern erreicht. Mischung D und Mischung E weisen höhere thermische Leitfähigkeiten von 1,9 W/(mK) bis 2,3 W/(mK) auf. Die neu entwickelten Mischungen G und H (in Abb. 4-10 nicht dargestellt) erreichen mit 2,4 W/(mK) eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit und sind damit im Bereich > 2 W/(mK) den thermisch verbesserten Baustoffen zuzuordnen.

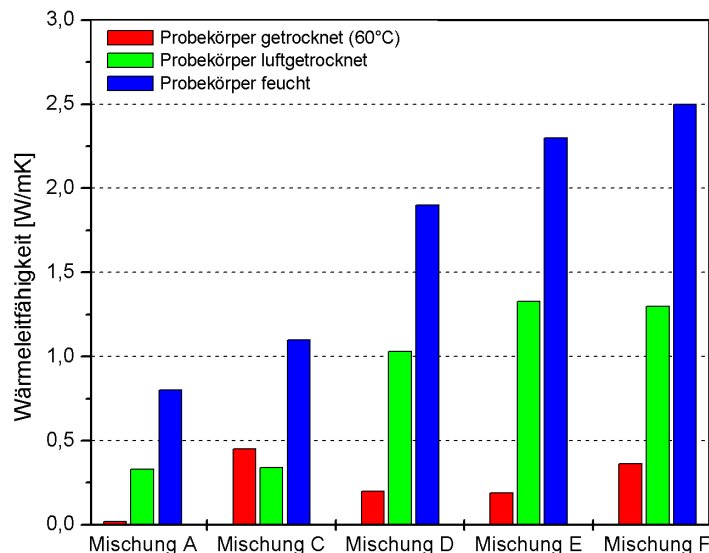


Abb. 4-10: Wärmeleitfähigkeiten der Baustoffe in Abhängigkeit von der Probenvorbereitung (Aushärten 28 Tage)

Abb. 4-10 zeigt auch die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Zustand des Gefüges. Bei einer Trocknung der Prüfkörper im Trockenschrank bei 60°C wird dem Prüfkörper Wasser entzogen und durch Luft (Tabelle 4-7) mit einer sehr schlechten Wärmeleitfähigkeit ersetzt. Dies äußert sich in sehr geringen Messwerten $< 0,5$ W/(mK). Luftge-

trocknete Prüfkörper mit Restfeuchte im Gefüge zeigen höhere Wärmeleitfähigkeiten bis 1,2 W/(mK) als die Prüfkörper, die im Trockenschrank getrocknet wurden.

Tabelle 4-7: Typische Wärmeleitfähigkeiten für Luft und Wasser
(VDI-WÄRMEATLAS 2006)

Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Spez. Wärmekapazität c [J/kg·K]
Quarz	8,4	732,69
Luft	0,026	1004
Wasser (10°C)	0,586	4192
Eis (0°C)	2,24	2106
Eis (-20°C)	2,43	2035

Eine Beeinflussung findet zudem durch die Frostschädigung statt. Abb. 4-11 zeigt die prozentuale Abnahme der Wärmeleitfähigkeit nach dem 4. Frost-Tau-Zyklus bezogen auf den Messwert im Grundzustand (Test nach Kap. 3.5.1). Die Wärmeleitfähigkeit der Mischungen C bis E nimmt um 16 bis 23% gegenüber dem Ausgangswert ohne Frostschädigung ab. Prüfkörper der Mischungen A und B konnten nicht mehr für eine Messung verwendet werden, da diese nach dem 4. Frost-Tau-Zyklus vollständig zerfallen waren.

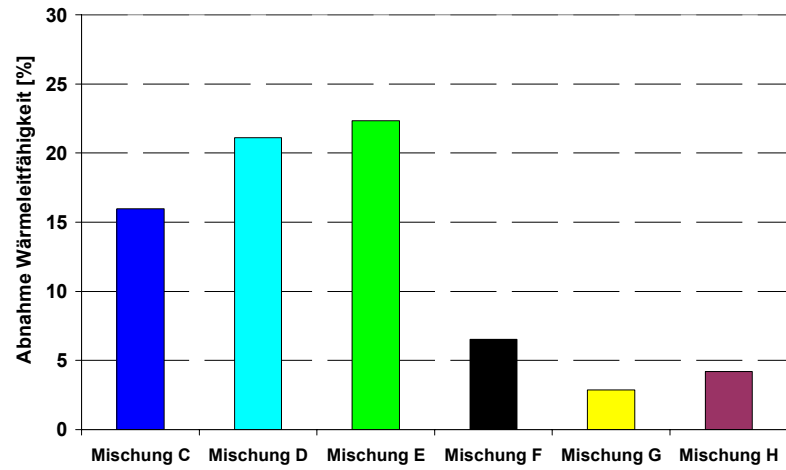


Abb. 4-11: Abnahme der Wärmeleitfähigkeit in Prozent nach dem 4. Frost-Tau-Zyklus-bezogen auf den Messwert im Grundzustand (Mischung A und B waren nicht mehr messbar)

Wasserdurchlässigkeit

Die Wasserdurchlässigkeit der Hinterfüllbaustoffe für Geothermiebohrungen sollte gemäß der Empfehlung des LUA NRW (2004) einen k_f -Wert von $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}^4$ nicht überschreiten. In Abb. 4-12 sind die Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte der Baustoffe im Ausgangszustand ohne Frostbeanspruchung dargestellt. Mischung A mit $5,78 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, Mischung C mit $5,68 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ sowie Mischung D mit $6,7 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ liegen über den empfohlenen Durchlässigkeitsbeiwerten. Bei Frost-Tau-Wechselbeanspruchung erhöhen sich die Durchlässigkeitsbeiwerte der Baustoffe deutlich um die Größenordnung einer Zehnerpotenz (Tabelle 4-8). Einige der Proben konnten nach dem 4. Frost-Tau-Wechsel nicht mehr gemessen werden, da die Gefügezerstörung zum vollständigen Zerfall der Prüfkörper geführt hatte. Die Ergebnisse lassen sich mit den Ergebnissen der quecksilberporosimetrischen Messungen korrelieren, die eine Vergrößerung der Kapillarporen durch die Frostschädigung bis in den durchflusswirksamen Bereich ab $3\text{-}8 \mu\text{m}$ zeigen (Abb. 4-12).

Tabelle 4-8: Vergleich der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte für Prüfkörper im Grundzustand und mit Frostbeanspruchung

Probe	Mittlerer k_f -Wert im Grundzustand [m/s]	Mittlerer k_f -Wert nach 4 Frost-Tau-Zyklen [m/s]
Mischung A	$5,78 \times 10^{-8}$	- ¹
Mischung C	$5,68 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-8}$
Mischung D	$6,7 \times 10^{-9}$	$5,4 \times 10^{-8}$
Mischung E	$1,9 \times 10^{-10}$	$7,2 \times 10^{-9}$
Mischung F	$1,14 \times 10^{-10}$	$2,4 \times 10^{-9}$
Mischung G	$7,06 \times 10^{-11}$	$1,7 \times 10^{-10}$

¹ Zerfall des Probekörpers, Durchlässigkeitsbestimmung nicht durchführbar

⁴ Anmerkung: Das LUA NRW definiert damit Anforderungen an die Wasserdurchlässigkeit, die einem Deponie-Standard entsprechen.

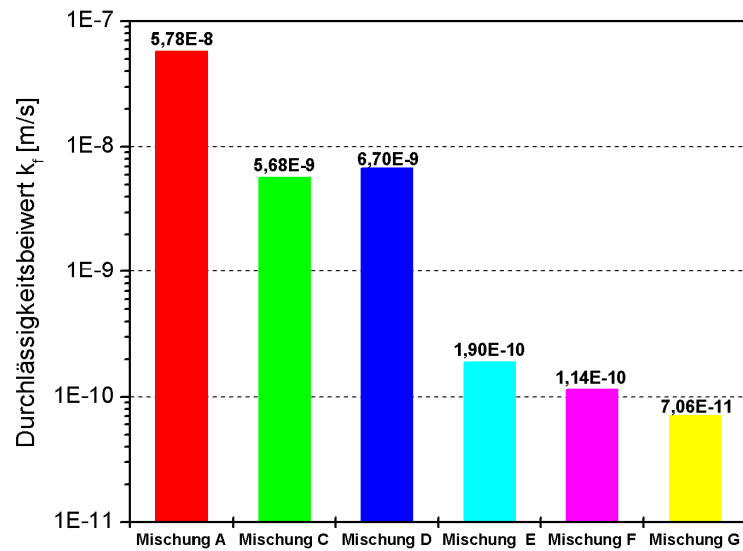


Abb. 4-12: Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte der Baustoffe ohne Frostbeanspruchung

Für die Auslaugung der Probekörper wurden ebenfalls Proben nach DIN 18130-1 (1993) durchströmt. Die ermittelten Durchlässigkeitswerte lagen dabei im Bereich der Werte für die Proben ohne Frostbeanspruchung aus Tabelle 4-8.

Festigkeit

Die Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeitsmessungen der Baustoffe zeigt Abb. 4-13. Mischung A hat eine sehr geringe, nicht mehr messbare Festigkeit. Die Mischung C erreicht aufgrund höherer Zementgehalte Werte um 17 N/mm². Die Mischungen D und E weisen niedrige Festigkeitswerte < 5 N/mm² auf. Für Mischung F wurden Druckfestigkeitswerte von 8 N/mm² gemessen. Die neu konzipierten Mischungen erreichen Werte um 38,0 N/mm².

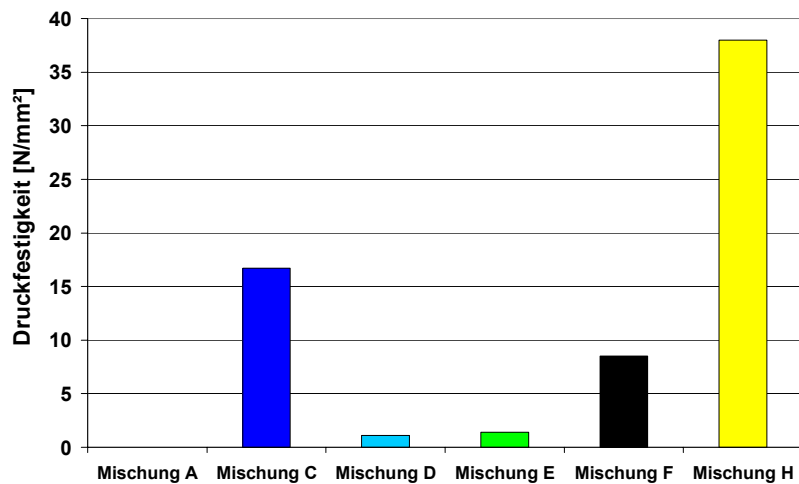


Abb. 4-13: Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeitsmessungen der Baustoffe im Überblick; Prüfkörper zerfallen:
Druckfestigkeit Mischung A = 0 N/mm²

4.2 Frost-Tau-Beständigkeit der Hinterfüllmassen

Probekörper nach DIN 52104 (1982) mit Abmessungen von 50 mm Höhe und einem Durchmesser von 50 mm zeigten keine reproduzierbaren Ergebnisse bei den Frostprüfungen und wurden daher nicht ausgewertet. Die Verwendung der DIN 52104 (1982) ist für die Prüfung der Erdwärmesondenbaustoffe, auch aufgrund fehlender Frostkriterien, nicht geeignet.

Makroskopische Analyse

Die Prüfkörper der Hinterfüllbaustoffe zeigen bereits nach 2 Frostzyklen deutliche Rissbildungen bis hin zum Zerfall der Probekörper. Abb. 4-14 zeigt Probekörper der Mischung C vor dem Gefrieren sowie die Rissbildung nach 2 Frost-Tau-Zyklen.

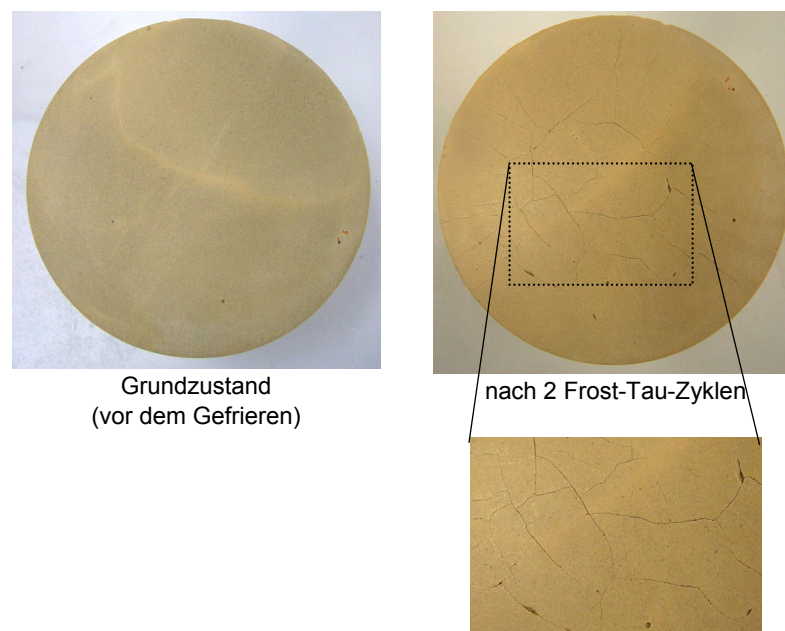


Abb. 4-14: Mischung C vor Gefrieren: linkes Bild; nach 2 Frostzyklen: rechtes Bild oben; Detailausschnitt: rechtes Bild unten

In Abb. 4-15 sind Probekörper der Mischung B und G im Vergleich im Grundzustand sowie nach 2 und 4 Frost-Tau-Zyklen dargestellt. Die Frosteinwirkung führt zur Bildung von makroskopisch sichtbaren Rissen bis hin zum vollständigen Zerfall der Prüfkörper.

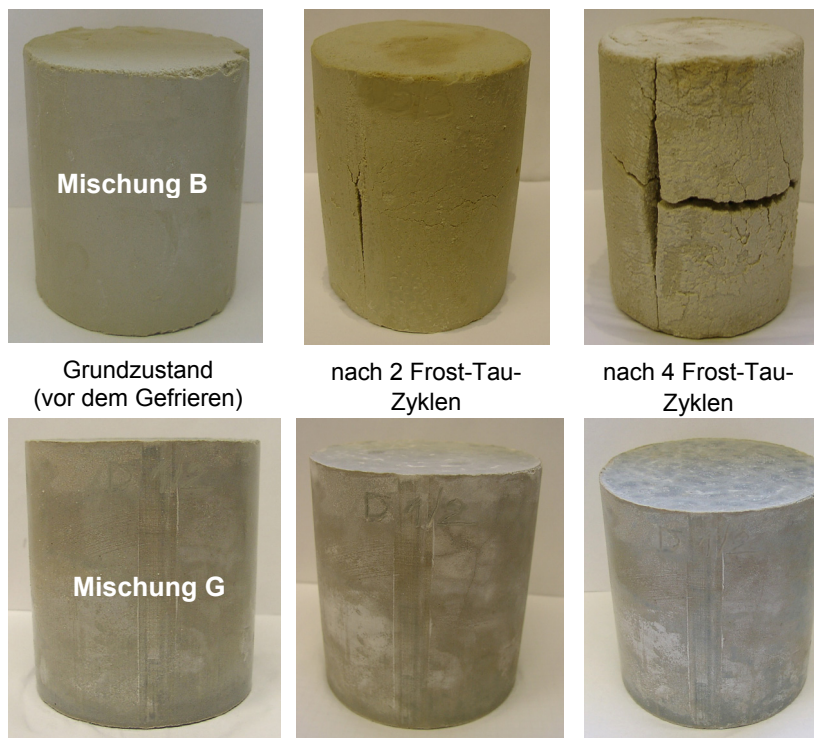
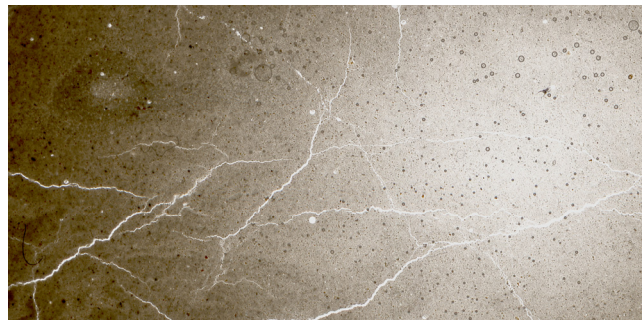


Abb. 4-15: Mischung B (Bilder oben) und Mischung G (Bilder unten) im Grundzustand (links), nach 2 Frost-Tau-Zyklen (Mitte), nach 4 Frost-Tau-Zyklen (rechts)

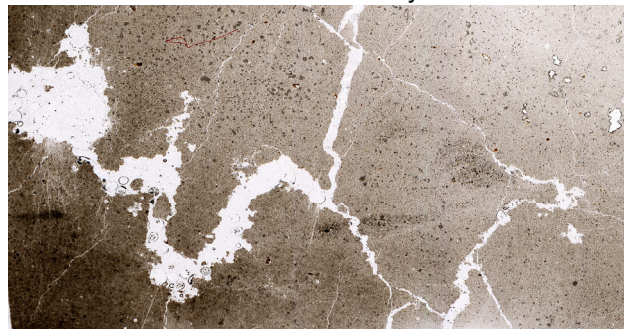
Die Frosteinwirkungen auf der mikroskopischen Ebene zeigen Dünnschliffe der Mischung C (Abb. 4-16) und Mischung F (Abb. 4-17) im Grundzustand sowie nach 1 bzw. 2 Frost-Tau-Zyklen. Die beiden Orientierungen parallel und senkrecht zur Zylinderachse zeigen keine Unterschiede bezüglich der Ausbildung der Frostschädigungen. Die Dünnschliffe zeigen, dass das Gefüge vor der Beanspruchung intakt ist; nach dem 1. Zyklus wird der Schliff von feinen Rissen durchzogen, die nach dem 2. Zyklus zum Zerfall des Prüfkörpers führen.



Grundzustand (vor dem Gefrieren)

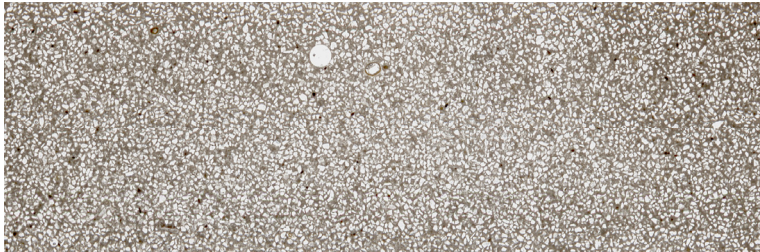


nach 1. Frost-Tau-Zyklus



nach 2. Frost-Tau-Zyklus

Abb. 4-16: Mischung C im Dünnschliff vor Gefrieren (oben), nach 1.Frost-Tau-Zyklus (Mitte), nach 2 Frost-Tau-Zyklus (unten); 5fache Vergrößerung



Grundzustand (vor dem Gefrieren)



nach 1. Frost-Tau-Zyklus



nach 2. Frost-Tau-Zyklus

Abb. 4-17: Mischung F im Dünnschliff vor Gefrieren (oben), nach 1. Frost-Tau-Zyklus (Mitte), nach 2. Frost-Tau-Zyklus (unten); 5fache Vergrößerung

Ultraschallmessungen

Ultraschallmessungen zeigen die Frostschädigung der Prüfkörper mittels der Laufzeiten der Schallwellen. Die Messungen wurden an aufgetauten Probekörpern durchgeführt, da durch das Vorliegen von gefrorenem Porenwasser die Laufzeiten der Schallwellen verfälscht werden. Dies gilt auch für das Antauen und stark wechselnde Temperaturen.

Die Laufzeit der Schallwellen ist abhängig von der Strukturentwicklung der Prüfkörper. Die Ergebnisse der Ultraschallmessungen für Mischung D sind in Abb. 4-18, Mischung E in Abb. 4-19 und Mischung G in Abb. 4-20 dargestellt. Geprüft wurde die Frostschädigung der Prüfkörper in Abhängigkeit verschiedener Aushärtedauern von 7, 14 und 28 Tagen. Die Ergebnisse zeigen abnehmende Ultraschallgeschwindigkeiten im Prüfverlauf. Eine starke Beeinträchtigung der Prüfkörper durch das Gefrieren und Auftauen nach einem Zyklus weisen die Prüfkörper mit einer Aushärtedauer von 7 Tagen auf. Mischung D zeigt verringerte Ultraschalllaufzeiten von 1818 m/s auf 640 m/s; Mischung E erreicht nur geringe Werte um 200 m/s und bei Mischung G wurden verringerte Laufzeiten von 3130 m/s auf 2500 m/s gemessen.

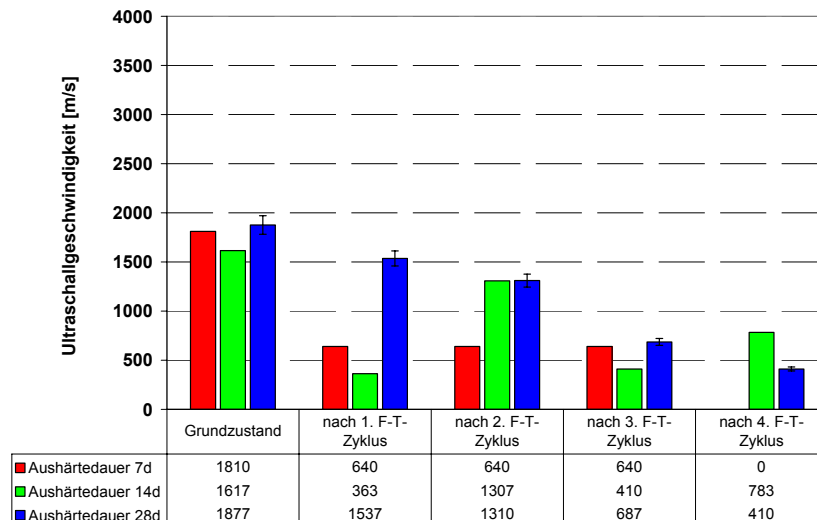


Abb. 4-18: Messung der Ultraschallgeschwindigkeiten an Prüfkörper der Mischung D (Messgenauigkeit: Aushärtedauer 28d)

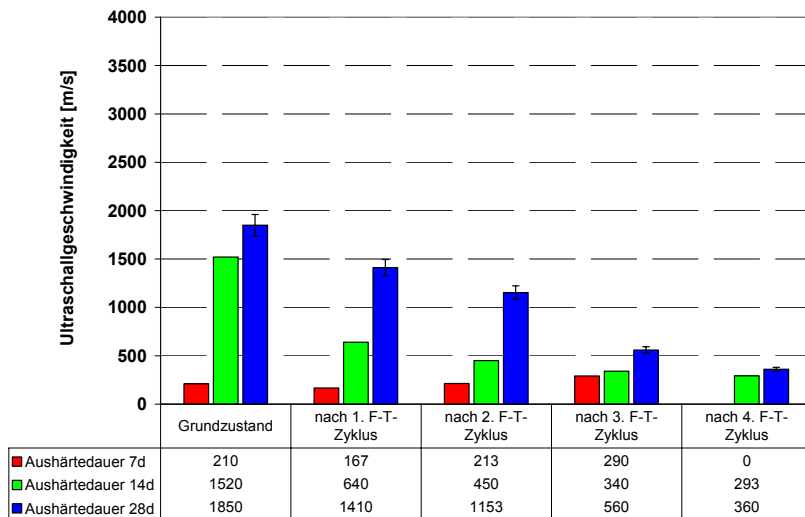


Abb. 4-19: Messung der Ultraschallgeschwindigkeit an Prüfkörper der Mischung E (Messgenauigkeit: Aushärtedauer 28d)

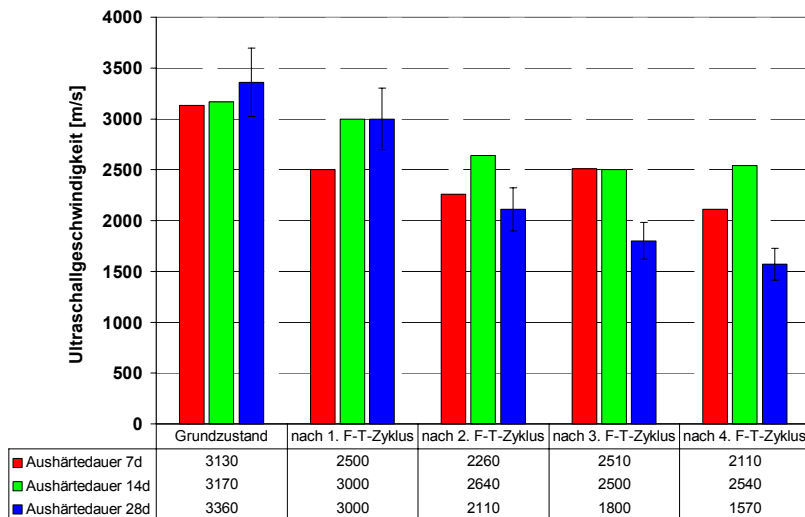


Abb. 4-20: Messung der Ultraschallgeschwindigkeit an Prüfkörper der Mischung G (Messgenauigkeit: Aushärtedauer 28d)

REM-Aufnahmen

Aufnahmen der ausgehärteten Hinterfüllbaustoffe wurden unter dem Rasterelektronenmikroskop im Grundzustand sowie nach 4 Frost-Tau-Zyklen untersucht, um einen Überblick über die Probenstruktur zu erhalten.

Abb. 4-21 und Abb. 4-22 zeigen Mischung A sowie die neu entwickelte Mischung G nach einer Aushärtedauer von 28 Tagen. Es sind strukturelle Unterschiede mit einem dichteren Gefüge von Mischung G zu erkennen; allerdings sind mit dieser Methode Poren und Porenräume sowie deren Veränderung durch Frostbeeinflussung nicht darstellbar. Diese Effekte können sehr detailliert mit Messungen im Quecksilberporosimeter (Abb. 4-23, Abb. 4-24, Abb. 4-25) verdeutlicht werden. Die dominierenden Gefüge-Elemente bei Mischung A (Abb. 4-21) sind die plättchenförmigen Calciumaluminathydrat-Kristalle sowie die Ettringit-Kristalle in Stabform. Die Grundmatrix besteht aus neu gebildeten CSH-Phasen. Die REM-Aufnahme von Mischung G zeigt hauptsächlich Calciumaluminathydrat-Kristalle (Abb. 4-22).

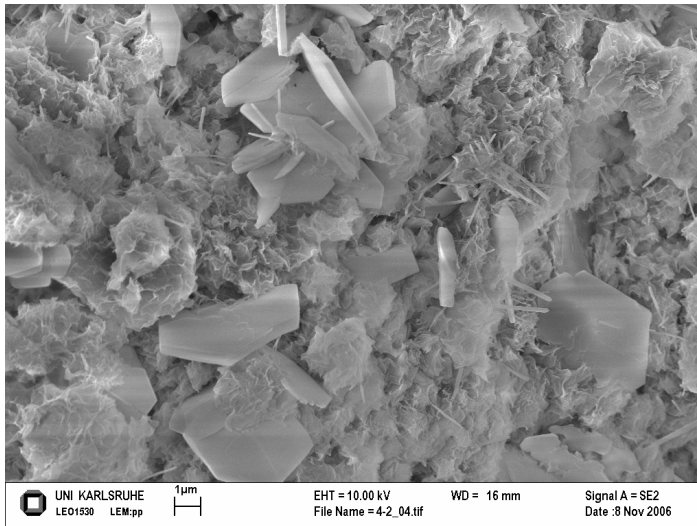


Abb. 4-21: Aufnahme der Mischung A mit dem Rasterelektronenmikroskop

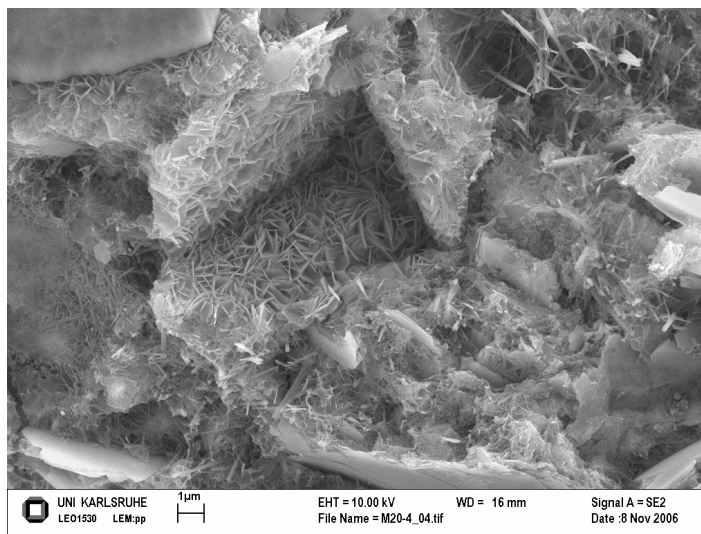


Abb. 4-22: Aufnahme des neu entwickelten Baustoffes Mischung G mit dem Rasterelektronenmikroskop

Quecksilberporosimetrie

Die Ergebnisse der quecksilberporosimetrischen Messungen zeigen die unterschiedlichen Porenspektren der Baustoffe in Abhängigkeit der Wassergehalte sowie der Packungsdichte (Abb. 4-23). Das Hauptporenspektrum liegt im Bereich zwischen 0,05 und 100 μm .

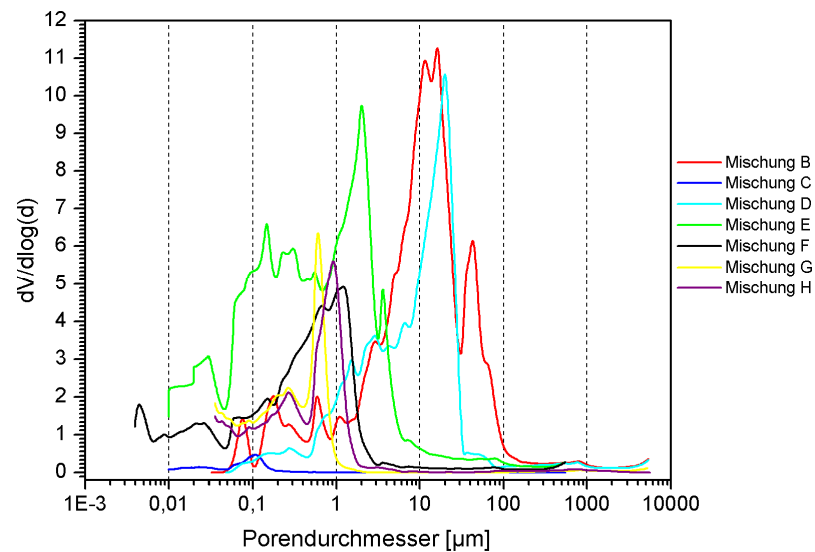


Abb. 4-23: Porenverteilung der Mischungen B bis H im Grundzustand ohne Frostbeanspruchung

In Abb. 4-24 sind für Mischung D die Veränderungen des Porenspektrums nach mehreren Frost-Tau-Zyklen bezogen auf den Ausgangszustand ohne Frostbeanspruchung dargestellt. Die strukturzerstörende Bildung von Eislinsen (Kap. 2.2.2.2) führt zu einer Verschiebung der Porengröße von maximalen Durchmessern von 2 μm hin zu größeren Durchmessern von 10-11 μm sowie zu einer Veränderung der Porenverteilung. Wesentlich ist in diesem Zusammenhang vor allem die Vergrößerung der Poren hin zu durchflusswirksamen Größen ab 5 μm sowie die Bildung von großen neuen Grobporen im Bereich ab 5 μm bis zu 100 μm . Diese Tendenz zeigen alle praxisüblichen Baustoffe

der Mischungen A bis F (Anhang B2 - B4). Mischung A (Anhang B1) weist sehr große Porendurchmesser auf, aber auch sehr voluminöse Poren, in die große Quecksilbermengen eingepresst werden.

Abb. 4-25 illustriert die Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie für Mischung D und die neu entwickelte Mischung G. Im Porenspektrum der Mischung D zeigen sich mit der Bildung von Grobporen Veränderungen; dies gilt auch für die Peakhöhe, die vom eingepressten Quecksilberteilvolumen abhängt. In diesem Fall wird deutlich, dass die Porengrößen bei Frostbeanspruchung um bis zu einer Zehnerpotenz zunehmen können. Für Mischung G zeigen sich keine wesentlichen Änderungen in der Porenverteilung; auch die Menge an Quecksilber, die in die Poren eingepresst wird, vergrößert sich nicht.

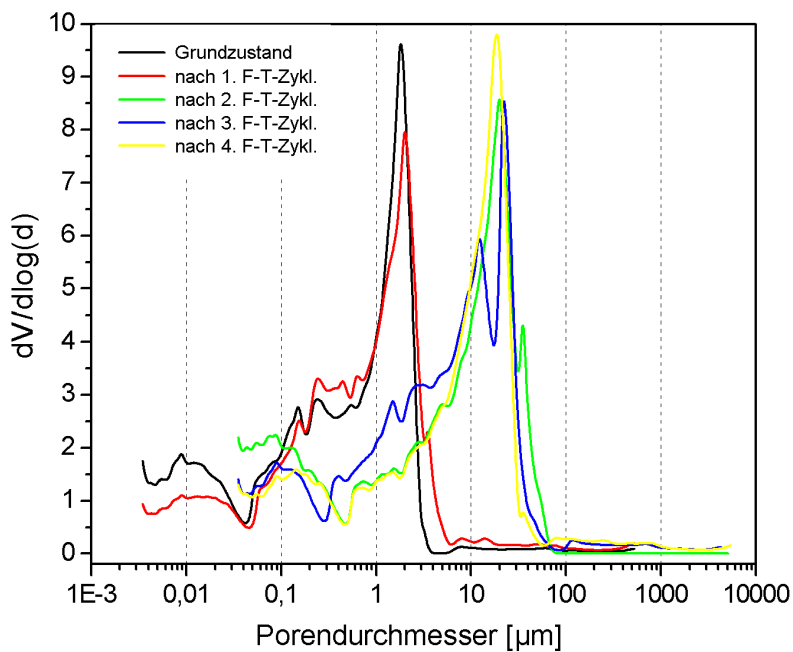


Abb. 4-24: Porenverteilung Mischung D im Grundzustand sowie nach 4 Frost-Tau-Zyklen

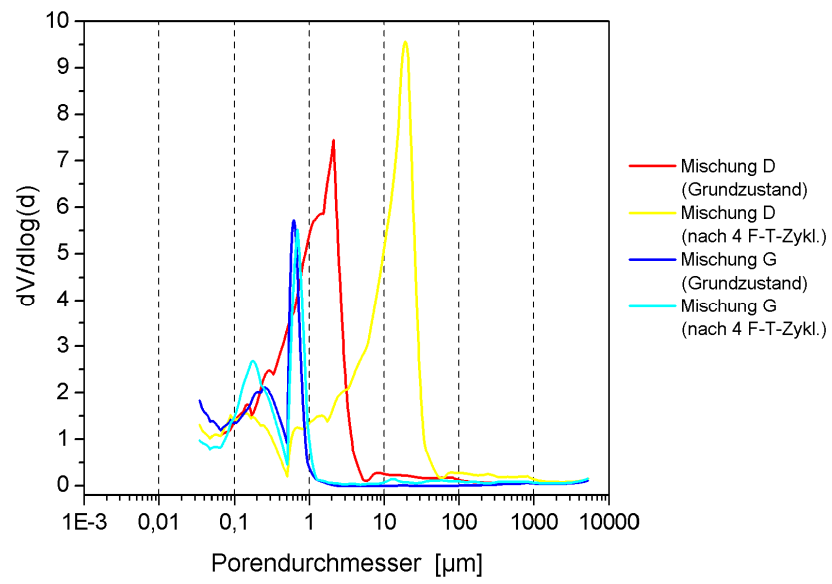


Abb. 4-25: Porenverteilung Mischung D und Mischung G im Grundzustand und nach 4 Frost-Tau-Zyklen

Probekörper als Verbundsystem Hinterfüllung-Rohr

Probekörper mit eingebauten HDPE-Rohren weisen gleiche Schadensbilder wie andere Prüfkörper ohne Rohre auf (Abb. 4-14, Abb. 4-15). Die zyklische Frost-Tau-Beanspruchung führt zur Entstehung von Rissen und zum allmählichen Zerfall des Probekörpers, zudem kommt es zu einer Ablösung der Hinterfüllmasse von den Rohren.



Abb. 4-26: Probekörper Mischung D mit eingebauten HDPE-Rohren,
links: Seitenansicht im Grundzustand,
Mitte: nach 2 Frost-Tau-Zyklen (Mitte),
rechts: nach 4 Frost-Tau-Zyklen;
Ursprungsmaße: Höhe 18 cm, Durchmesser 10 cm,
HERRMANN et al. (2006)

Untersuchungen an Prüfkörpern von 100 mm und 200 mm Höhe sowie mit eingebauten HDPE-Rohren (Tabelle 3-3), unter anderem mit unterschiedlichen Aushärtedauern zeigen, dass sich die in der Praxis verwendeten Mischungen A bis F bei ausgeprägten Temperaturwechseln von Plus- zu Minusgraden nicht frostbeständig verhalten. Es entstehen irreversible Schädigungen, je nach untersuchtem Baustoff unterschiedlich stark ausgeprägt, die sich mit allen angewandten Methoden (makro- und mikroskopische Rissbildung, Ultraschallgeschwindigkeit, Wasserdurchlässigkeit, thermische Leitfähigkeit) nachweisen lassen.

Deutliche Abhängigkeiten bei den Frostversuchen waren in Bezug auf die Probenkörper-Geometrie festzustellen. Prüfkörper mit 50 mm Höhe nach DIN 52104 (1982) waren nicht geeignet. Probekörper dieser Größe zerfallen bereits nach dem 1. Frost-Tau-Zyklus und liefern somit keine verwertbaren Ergebnisse. Bei größeren zylindrischen Probenkörpern (bis 20 cm Höhe) trat eine ausgeprägtere Frostschädigung auf. Mit den so genannten CIF-Tests Geothermie wurden weitere Versuche mit einer anderen, nach DIN CEN/TS 12390 (2006) definierten, Probengeometrie durchgeführt.

CIF-Test Geothermie

Die Testvorbereitung und -durchführung ist in Kap. 3.5 detailliert beschrieben. Die in der Praxis verwendeten Baustoffe (Mischung A bis Mischung F) wurden mit ihren Kennwerten nach 6 sowie nach 14 Prüfzyklen ermittelt; das Prüfende wurde nach 14 Frost-Tau-Zyklen mit dem vollständigen Zerfall der Probekörper erreicht. Die Prüfwerte der neu entwickelten Baustoffe (Mischungen G und H) wurden nach 10, 14, 22 sowie nach 28 Frost-Tau-Zyklen bestimmt.

Die **kapillare Wassersättigung** vor Beginn des Tests führt zu einer Gewichtszunahme der Prüfkörper (Tabelle 4-9). Die Probe der Mischung C verzeichnet eine Zunahme von 0,6% bezogen auf das Anfangsgewicht vor dem kapillaren Saugen. Die Proben der Mischung D nehmen um bis zu 0,3% und die Probekörper der Mischung E um bis zu 0,5% an Gewicht zu. Die größte Flüssigkeitsaufnahme zeigt Mischung B mit bis zu 9,4%.

Die **Art der Frostschädigung** zeigt die Bild-Dokumentation während des Testverlaufs (Abb. 4-27 bis Abb. 4-30, Anhang A1 - A4). Makroskopisch sind an den Proben der praxisüblichen Baustoffe starke Gefügezerstörungen zu sehen. Gefrorenes Wasser im Inneren des Prüfkörpers verursacht kreisrunde Aufwölbungen; nach kurzer Prüfzeit entwickelten sich deutliche Risse. Mit zunehmender Prüfdauer wurden die Prüfkörper von Mischung A bis Mischung F infolge der behinderten Seitenausdehnung durch die laterale Eisbildung aus der umgebenden PE-Form herausgedrückt. Dieser Prozess verstärkte sich bis zum Prüfende bis zur kompletten Zerstörung der Prüfkörper. Die Prüfkörper der

Mischung G und H zeigen keine Änderung in der Höhe, was darauf hindeutet, dass keine Eislinnenbildung im Inneren der Proben stattgefunden hat.

Die **Abwitterung der Proben** und die **Ultraschallgeschwindigkeiten** sind in Tabelle 4-10 aufgeführt. Die Messung der Schalllaufzeiten entlang zweier Achsen des rechteckigen Probekörpers gibt Aufschluss über die Homogenität des Prüfkörpers. Die starke Rissbildung der Prüfkörper der praxisüblichen Baustoffe verhinderte eine präzise Messung der Schalllaufzeiten, da durch Reflexionen der Schallwellen an den Fehlstellen die Messwerte verfälscht werden; ein eindeutiger Trend zur Zunahme der Schalllaufzeiten ist im Prüfverlauf nicht erkennbar. Die Schalllaufzeit dient bei diesen Proben nur bedingt als Parameter für die Gefügezerstörung, da eine Messung bei zunehmender Rissbildung bzw. vollständigem Zerfall oft nicht mehr möglich ist. Eine weitere Beeinflussung der Schalllaufzeiten besteht durch die, während der Prüfung erfolgende, kontinuierliche Flüssigkeitsaufnahme durch kapillares Saugen (Tabelle 4-12), die bis zum Prüfende anhält. Die Schalllaufzeiten liegen im Bereich von 86 μs . Bei den Prüfkörpern der neu entwickelten Mischungen mit einem sehr dichten Gefüge liegen die Werte deutlich niedriger bei 65 μs . Mischung G zeigt sehr konstante Werte in beiden Achsenrichtungen sowie nach den verschiedenen Frost-Tau-Zyklen, was darauf hindeutet, dass sich im Inneren der Probe keine Risse gebildet haben. Mischung H zeigt gegen Ende der Prüfung abweichende Werte für die Schalllaufzeiten; bei den Prüfkörpern dieser Probe bildeten sich gegen Prüfende feine Risse (Anhang A4, in der Bild-Dokumentation nicht deutlich zu erkennen). Man muss davon ausgehen, dass für diese Probekörper eine höhere Zerstörungstendenz besteht.

Die Auswertung des relativen dynamischen E-Moduls (Kap. 3.5) wird im BAW-Merkblatt (2004) neben der Abwitterung als zusätzliches Kriterium der inneren Schädigung herangezogen. Demnach gilt Beton als geschädigt, wenn ein relativer dynamischer E-Modul von 0,75 bzw. 75% unterschritten wird. Als Abnahmekriterium ist eine Zyklenanzahl zu vereinbaren, bis zu der das Schädigungskriterium nicht unterschritten werden darf; falls keine andere Vereinbarung getroffen wurde, werden 28 Zyklen angenommen. Die Auswertung des relativen dyna-

mischen E-Moduls in Tabelle 4-10 zeigt im Prüfverlauf, dass für die Mischungen A bis F aufgrund der großen Frostschädigungen bereits zu Prüfbeginn keine konstanten Ultraschalllaufzeiten gemessen werden können und somit auch die Berechnung des E-Moduls als Frostkriterium entfällt. Mischung G kann als frostbeständig eingestuft werden, der relative dynamische E-Modul bleibt konstant bei Werten von 1. Für Mischung H waren konstante relative dynamische E-Moduli zu beobachten, zwischen dem 22. und dem 28. Frost-Tau-Zyklus setzte jedoch eine späte Schädigung mit der Bildung von feinen Rissen ein, die zu einem Abfall des E-Moduls von 1 auf 0,58 führt. Gemäß dem Kriterium der BAW (2004) kann dieser Hinterfüllbaustoff nicht als frostbeständig eingestuft werden.

Die Ergebnisse der **Abwitterung** sind in Tabelle 4-11 dargestellt. Die Abwitterung betrug bei einigen Prüfkörpern nach dem 14. Frost-Tau-Zyklus 100%, da diese zum Zeitpunkt der Messung vollständig zerfallen waren. Den geringsten Abwitterungsanteil zeigen die neu entwickelten Mischungen G und H mit 119 bzw. 104 g/m² nach 28 Tagen. Der Prüfwert der Abwitterung, der bei Betonteilen als Kriterium herangezogen wird, kann für Hinterfüllmaterialien bei Erdwärmesonden nicht verwendet werden. So gelten Betonteile mit einer Abwitterung ≤ 1500 g/m² nach 28 Frost-Tau-Wechseln gemäß DIN CEN/TS 12390-9 (2006) als frostbeständig. Die Bild-Dokumentation zeigt exemplarisch, dass bei Mischung C (Abb. 4-14) mit einer verhältnismäßig geringen Abwitterung von 110 g/m² keine Frostbeständigkeit vorliegt, da sich im Prüfverlauf große Risse bilden und die Struktur geschädigt ist.

Die Definition von Prüfkriterien für die Frostbeständigkeit von Erdwärmesonden-Baustoffen im CIF-Test kann nicht bzw. nur bedingt nach den bisher bekannten Kennwerten (BAW 2004, DIN CEN/TS 12390-9, 2006) erfolgen.

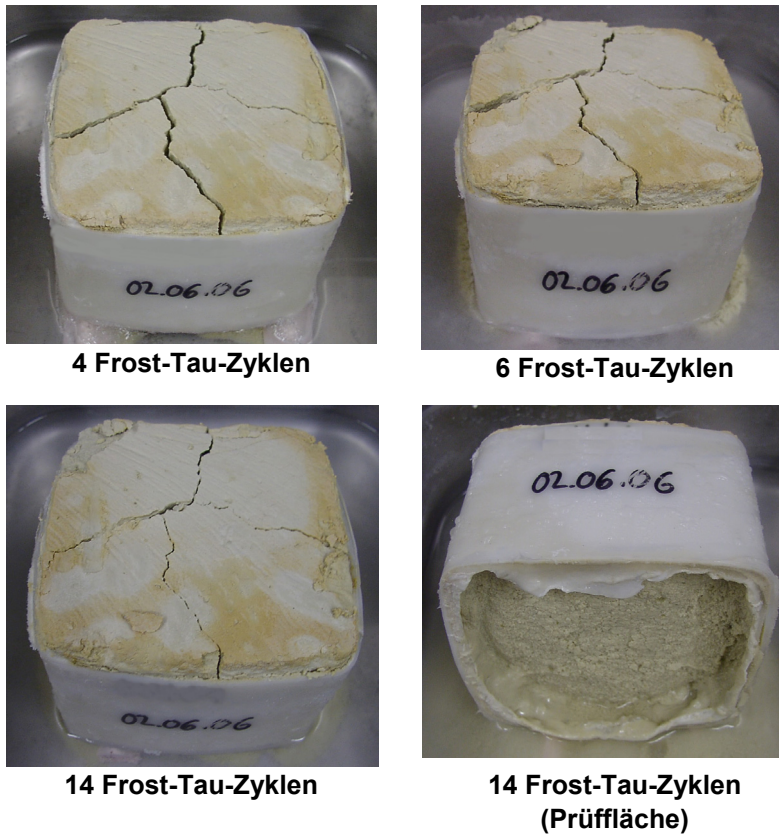
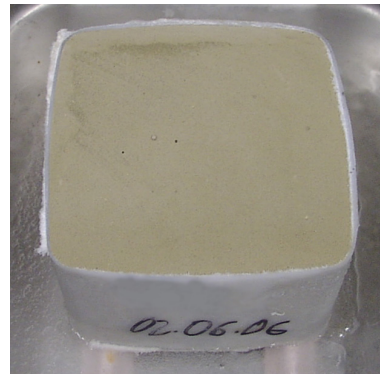
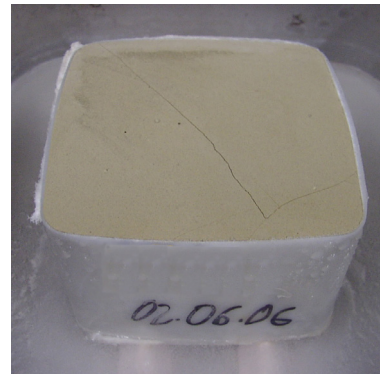


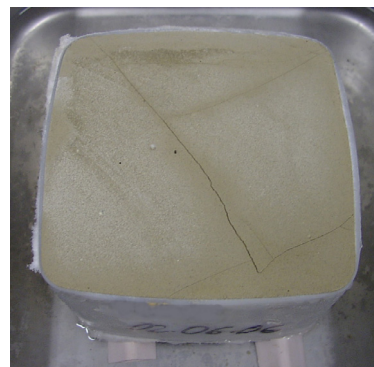
Abb. 4-27: Probekörper der Mischung A,
Bild links oben: Probekörper nach 4 Frost-Tau-Zyklen,
Bild rechts oben: Probekörper nach 6 Frost-Tau-Zyklen
Bilder links/rechts unten: Probekörper am Prüfende nach
14 Frost-Tau-Zyklen;
Ursprungshöhe des Prüfkörpers: 70 cm, Länge: 11,5 cm



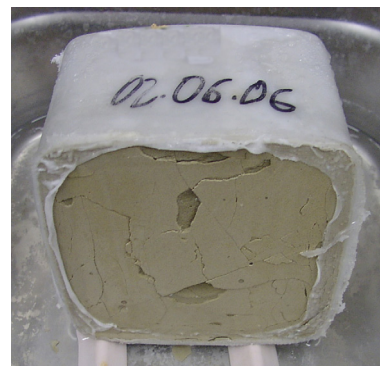
4 Frost-Tau-Zyklen



6 Frost-Tau-Zyklen



14 Frost-Tau-Zyklen

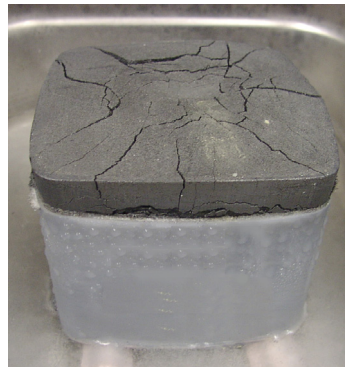


**14 Frost-Tau-Zyklen
(Prüffläche)**

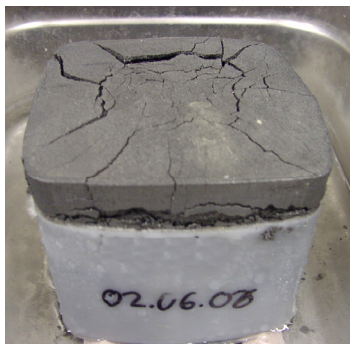
Abb. 4-28: Probekörper der Mischung C,
Bild links oben: Probekörper nach 4 Frost-Tau-Zyklen,
Bild rechts oben: Probekörper nach 6 Frost-Tau-Zyklen,
Bilder links/rechts unten: Probekörper am Prüfende nach
14 Frost-Tau-Zyklen;
Ursprungshöhe des Prüfkörpers: 70 cm, Länge: 11,5 cm



4 Frost-Tau-Zyklen



6 Frost-Tau-Zyklen

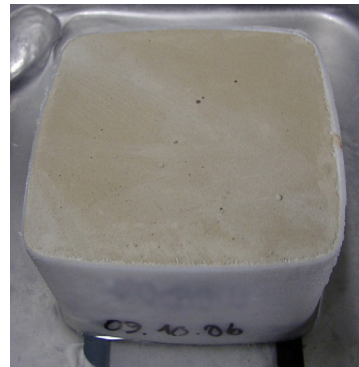


14 Frost-Tau-Zyklen

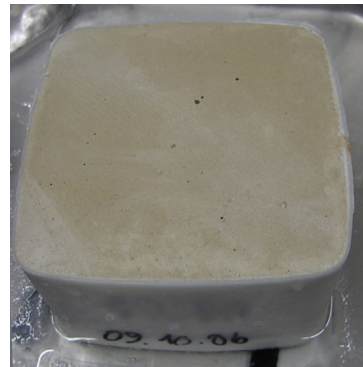


**14 Frost-Tau-Zyklen
(Prüffläche)**

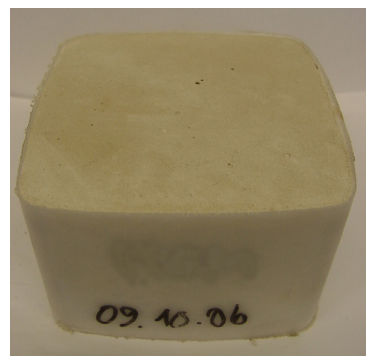
Abb. 4-29: Probekörper der Mischung E,
Bild links oben: Probekörper nach 4 Frost-Tau-Zyklen,
Bild rechts oben: Probekörper nach 6 Frost-Tau-Zyklen,
Bilder links/rechts unten: Probekörper am Prüfende nach
14 Frost-Tau-Zyklen;
Ursprungshöhe des Prüfkörpers: 70 cm, Länge: 11,5 cm



8 Frost-Tau-Zyklen



14 Frost-Tau-Zyklen



28 Frost-Tau-Zyklen



**28 Frost-Tau-Zyklen
(Prüffläche)**

Abb. 4-30: Probekörper der Mischung G,
Bild links oben: Probekörper nach 4 Frost-Tau-Zyklen,
Bild rechts oben: Probekörper nach 6 Frost-Tau-Zyklen,
Bilder links/rechts unten: Probekörper am Prüfende nach
14 Frost-Tau-Zyklen;
Ursprungshöhe des Prüfkörpers: 70 cm, Länge: 11,5 cm

Tabelle 4-9: Wasseraufnahme der Probekörper durch kapillares Saugen vor Testbeginn

Probe	Masse vor kapillarem Saugen [g]	Masse nach kapillarem Saugen [g]	Differenz [g]	Flüssigkeitsaufnahme [%]
Mischung A/1 ¹	959,9	959,8	0,0	0,0
Mischung A/2	943,5	945,4	1,9	0,2
Mischung B/1 ¹	1027,1	1122,0	94,9	9,2
Mischung B/2	940,0	1037,4	97,4	10,4
Mischung B/3	988,9	1079,8	90,9	9,2
Mischung B/4	985,9	1080,0	94,1	9,5
Mischung C/1 ¹	1470,4	1479,3	8,9	0,6
Mischung C/2	1470,5	1478,9	8,4	0,6
Mischung D/1 ¹	1346,6	1350,1	3,5	0,3
Mischung D/2	1359,0	1360,1	1,1	0,1
Mischung D/3	1405,9	1406,0	0,1	0,0
Mischung E/1 ¹	1176,3	1180,6	4,3	0,4
Mischung E/2	1161,4	1167,3	5,9	0,5
Mischung E/3	1172,1	1173,0	0,9	0,1
Mischung F/1 ¹	1530,6	1535,9	5,3	0,3
Mischung F/2	1535,8	1540,7	4,9	0,3
Mischung G/1 ¹	1602,1	1624,4	22,3	1,4
Mischung G/2	1599,5	1617,1	17,6	1,1
Mischung G/3	1599,2	1616,8	17,6	1,1
Mischung H/1 ¹	1593,1	1612,1	19,0	1,2
Mischung H/2	1592,2	1607,6	15,4	1,0
Mischung H/3	1584,1	1605,5	21,4	1,3

¹Mittelwertbildung, da mehrere Prüfkörper pro Serie geprüft wurden.

Tabelle 4-10: Ultraschalllaufzeiten und relativer dynamischer E-Modul der Prüfkörper

Probe	Messzeitpunkt	Schalllaufzeit		Relativer Dynamischer E-Modul $R_{u,n}$ [-]
		Achse 1 [μ s]	Achse 2 [μ s]	
Mischung A	Ausgangsmessung	85,7	86,0	1
	6 F-T-Zyklen	84,2	84,9	0,92
	14 F-T-Zyklen	- ¹	- ¹	- ¹
Mischung B	Ausgangsmessung	115,1	115,3	1
	6 F-T-Zyklen	119,2	121,5	1,03 ³
	14 F-T-Zyklen	- ¹	- ¹	- ¹
Mischung C	Ausgangsmessung	72,5	71,8	1
	6 F-T-Zyklen	85,7	74,6	0,82
	14 F-T-Zyklen	85,9	86,0	0,7
Mischung D	Ausgangsmessung	86,1	87,0	1
	6 F-T-Zyklen	81,6	82,9	1,07 ³
	14 F-T-Zyklen	- ¹	- ¹	- ¹
Mischung E	Ausgangsmessung	86,0	85,1	1
	6 F-T-Zyklen	85,1	84,3	1,02 ³
	14 F-T-Zyklen	86,0	85,1	1,0
Mischung F	Ausgangsmessung	79,3	77,1	1
	6 F-T-Zyklen	71,8	72,0	1,2 ³
	14 F-T-Zyklen	88,1	87,1	0,8
Mischung G	Ausgangsmessung	64,5	64,7	1
	10 F-T-Zyklen ²	64,2	64,6	1,04 ³
	14 F-T-Zyklen ²	62,1	62,7	1,07 ³
	22 F-T-Zyklen ²	64,3	64,6	1,0
	28 F-T-Zyklen ²	64,4	64,7	1,0
Mischung H	Ausgangsmessung	63,9	63,9	1
	10 F-T-Zyklen ²	67,1	67,4	0,97
	14 F-T-Zyklen ²	63,0	63,1	1,04 ³
	22 F-T-Zyklen ²	63,1	64,0	1,01 ³
	28 F-T-Zyklen ²	83,7	83,7	0,58 ⁴

¹ Proben nicht mehr messbar, da komplett zerfallen (keine E-Modul-Berechnung möglich)

² längere Prüfdauer mit anderem Prüfturnus

³ Werte > 1,0 bedingt durch Messgenauigkeit der Ultraschallmessung

⁴ relativer dynamischer E-Modul $R_{u,n} < 0,75$

Tabelle 4-11: Abwitterung der Prüfkörper

Probe	Messzeitpunkt	Abwitterung	
		$\Delta m_{s,n}$ [g]	S_n [g/m ²]
Mischung A	Ausgangsmessung	0,0	0,0
	6 F-T-Zyklen	39,0	3324
	14 F-T-Zyklen	212,2	20760
Mischung B	Ausgangsmessung	0,0	0,0
	6 F-T-Zyklen	75,1	3103
	14 F-T-Zyklen	- ¹	- ¹
Mischung C	Ausgangsmessung	0,0	0,0
	6 F-T-Zyklen	0,24	19,8
	14 F-T-Zyklen	1,1	111
Mischung D	Ausgangsmessung	0,0	0,0
	6 F-T-Zyklen	36,3	3000
	14 F-T-Zyklen	412,9	37123
Mischung E	Ausgangsmessung	0,0	0,0
	6 F-T-Zyklen	14,0	1157
	14 F-T-Zyklen	260,4	22679
Mischung F	Ausgangsmessung	0,0	0,0
	6 F-T-Zyklen	1,1	150
	14 F-T-Zyklen	60,8	5175
Mischung G	Ausgangsmessung	0,0	0,0
	10 F-T-Zyklen ²	0,4	34
	14 F-T-Zyklen ²	0,3	61
	22 F-T-Zyklen ²	0,3	87
Mischung H	28 F-T-Zyklen ²	0,4	119
	Ausgangsmessung	0,0	0,0
	10 F-T-Zyklen ²	0,4	31
	14 F-T-Zyklen ²	0,2	50
	22 F-T-Zyklen ²	0,3	75
	28 F-T-Zyklen ²	0,4	104

¹ Proben nicht mehr messbar, da komplett zerfallen² längere Prüfdauer mit anderem Prüfturnus

Tabelle 4-12: Flüssigkeitsaufnahme der Prüfkörper durch anhaltendes kapillares Saugen während der Frost-Tau-Prüfung

Probe	Messzeitpunkt	Flüssigkeitsaufnahme
		Δw_n [M -%]
Mischung A	Ausgangsmessung	0,0
	6 F-T-Zyklen	0,2
	14 F-T-Zyklen	- ¹
Mischung B	Ausgangsmessung	9,2
	6 F-T-Zyklen	5,5
	14 F-T-Zyklen	- ¹
Mischung C	Ausgangsmessung	0,6
	6 F-T-Zyklen	1,3
	14 F-T-Zyklen	1,9
Mischung D	Ausgangsmessung	0,1
	6 F-T-Zyklen	5,9
	14 F-T-Zyklen	- ¹
Mischung E	Ausgangsmessung	0,1
	6 F-T-Zyklen	7,5
	14 F-T-Zyklen	- ¹
Mischung F	Ausgangsmessung	0,3
	6 F-T-Zyklen	2,9
	14 F-T-Zyklen	4,8
Mischung G	Ausgangsmessung	1,4
	10 F-T-Zyklen ²	1,9
	14 F-T-Zyklen ²	2,1
	22 F-T-Zyklen ²	2,3
	28 F-T-Zyklen ²	2,5
Mischung H	Ausgangsmessung	1,2
	10 F-T-Zyklen ²	1,7
	14 F-T-Zyklen ²	2,2
	22 F-T-Zyklen ²	2,6
	28 F-T-Zyklen ²	2,7

¹ Probe nicht mehr messbar, da komplett zerfallen² längere Prüfdauer mit anderem Prüfturnus

4.3 Neue Kriterien zur Frostbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Geothermiebohrungen mit Erdwärmesonden

Die Analysenergebnisse der CIF-Tests Geothermie wurden in Kap. 4.2 beschrieben.

Bei der Durchführung von Laborversuchen zur Frost-Tau-Wechselbeständigkeit ist es wichtig, die Vorgehensweise detailliert zu beschreiben und genau definierte Prüfbedingungen einzuhalten.

Um die Eignung der Hinterfüllmassen für den Anwendungsbereich für Erdwärmesondenbohrungen festzustellen, ist es nicht ausreichend die Frostbeständigkeit nur anhand von visuellen Kriterien mit qualitativen Aussagen zur Schädigungscharakteristik oder mit u.U. nicht konsistenten Parametern wie der Änderung der Wärmeleitfähigkeit zu beurteilen.

Es werden - ausgehend von den durchgeführten Untersuchungen - folgende Prüfkriterien für die Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Erdwärmesonden-Hinterfüllmassen empfohlen, die im Zuge der Beurteilung schrittweise zu berücksichtigen sind:

1. Visuelle Prüfung: Definition von Rissen mit einer Rissbreite $\Delta s_r > 0,1$ mm als Abbruchkriterium, da dann keine ausreichende Frostbeständigkeit mehr vorhanden ist.
2. Messung der Abwitterung mittels Gewichtsbestimmung: geringe Abwitterungen für den n-ten Frost-Tauwechsel mit $\Delta m_{s,n} < 1$ g sind zu tolerieren, bei größeren Abplatzungen ist keine ausreichende Frostbeständigkeit vorhanden
3. Messung der Ultraschalllaufzeiten: Die Voraussetzung für Frostbeständigkeit sind konstante Ultraschalllaufzeiten in beiden Achsenrichtungen (keine Veränderung im Prüfverlauf, im Rahmen der Messgenauigkeit); diese dürfen nur an Proben durchgeführt werden, die die Kriterien nach Pkt. 1 und 2 erfüllen.

- 4a. Messung der vertikalen Ausdehnung des Prüfkörpers; Baustoffe, die als frostbeständig definiert werden können, zeigen Vertikal-Ausdehnungen (Frosthebung) mit Längenänderung $\Delta l < 1 \text{‰}$.
- 4b. zusätzliches Kriterium der inneren Schädigung nach 28 Tagen: Berechnung des relativen dynamischen E-Moduls $R_{u,n}$
Der Baustoff gilt als geschädigt, wenn ein relativer dynamischer E-Modul $R_{u,n}$ von 0,75 bzw. 75% unterschritten wird (Übernahme des BAW-Kriteriums (2004); Abnahmekriterium für $R_{u,n}$ sind 28 Frost-Tau-Zyklen.

Die vorgenannten Prüfkriterien wurden in ein Bewertungsschema für die Frostkriterien des CIF-Test Geothermie umgesetzt und in Abb. 4-31 dargestellt.

Der Vorteil der vorgestellten Prüfmethode liegt darin, dass die Beurteilung bzw. Klassifizierung der Frostbeständigkeit bereits während des CIF-Test-Geothermie vorgenommen werden und die Bewertung für die einzelnen Prüfschritte erfolgen kann. Nach der jeweiligen Zyklanzahl, bei der die Prüfungen der Abwitterung/Ultraschallgeschwindigkeit etc. erfolgen, kann anhand des Bewertungsschemas eine Beurteilung vorgenommen werden und ggf. das Abbruchkriterium angewendet werden. Nach 28 Frost-Tau-Zyklen kann zusätzlich der relative dynamische E-Modul $R_{u,n}$ als Abnahmekriterium für die innere Schädigung festgelegt werden. Probekörper der Hinterfüllbaustoffe, die nach 28 Tagen einen relativen dynamischen E-Modul von 0,75 bzw. 75% unterschreiten, sind als nicht frostsicher einzustufen.

Die Anzahl der, im Rahmen der Arbeit durchgeführten, Versuche erscheint nicht als ausreichend, um das Kriterium der BAW, nach dem Betonteile mit einer Abwitterung $\leq 1500 \text{ g/m}^2$ nach 28 Frost-Tau-Wechseln gemäß DIN CEN/TS 12390-9 (2006) als frostbeständig gelten, anzuwenden.

Vorbehaltlich weiterer Untersuchungen wird empfohlen, das Bewertungsschema nach Abb. 4-31 zu nutzen, das eine Bewertung der Frostsicherheit der Hinterfüllbaustoffe in allen Phasen des CIF-Test Geothermie ermöglicht.

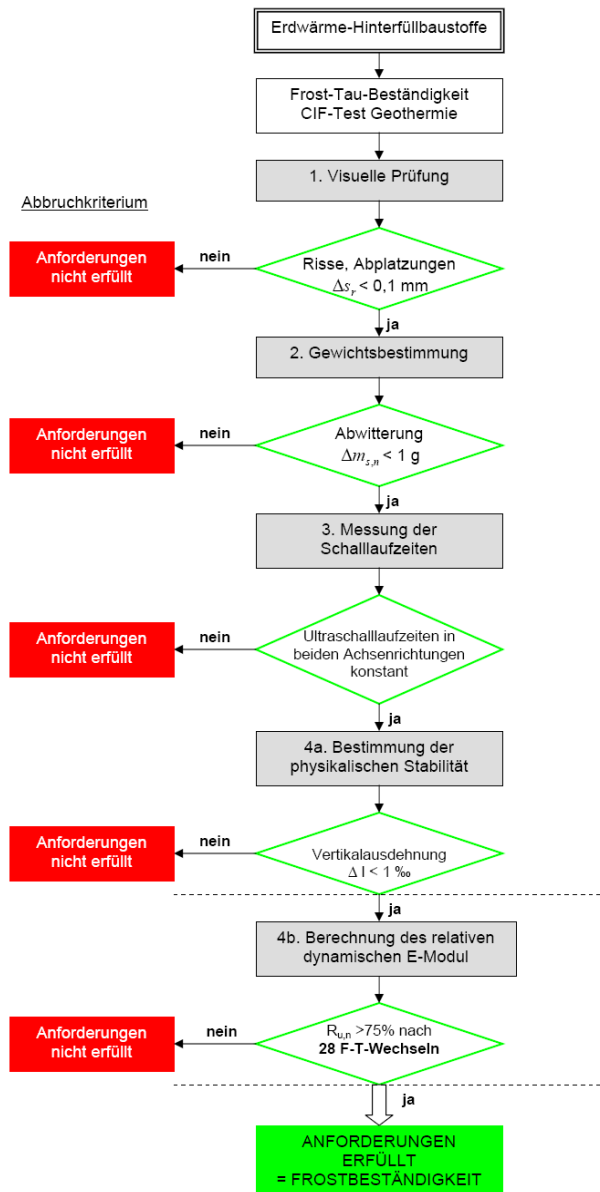


Abb. 4-31: Bewertungsschema Frostkriterien des CIF-Test Geothermie

Zusammenfassung Ergebnisse Laboranalysen

Die Laboranalysen der praxisüblichen Baustoffe zeigen, dass diese im Hinblick auf ihre Umweltverträglichkeit mit den ausgelaugten Ionen die Grundwasserchemie qualitativ beeinflussen können, quantitativ jedoch eher unbedeutend sind. Der wesentliche Einfluss ist die Erhöhung des pH-Wertes, vor allem unmittelbar nach dem Verpressen des Bohrloches mit der zementhaltigen Suspension.

Die Fließfähigkeit der Baustoffe ist so eingestellt, dass sie mit den, in der Praxis verwendeten, Mischern aufgeschlossen und mit den Verpresseinrichtungen durch den Verpressschlauch/das Verpressgestänge in das Bohrloch eingebracht werden können. Eine Qualitätsprüfung der Fließfähigkeit mit dem Marsh-Zylinder erwies sich in den Laborversuchen als ungeeignet. Die Suspensionsdichte kann hingegen zur Überprüfung der Einhaltung der im Herstellerdatenblatt vorgegebenen Rezeptur herangezogen werden.

Die Wärmeleitfähigkeit wird momentan als wichtigster Parameter für die Qualität der Baustoffe herangezogen und die Messwerte entsprechend hervorgehoben. Die Versuche zeigen, dass es sehr wichtig ist, die Prüfkörper unter den gleichen Prüfbedingungen zu messen und das verwendete Messverfahren genau zu dokumentieren.

Die Ausbildung der Druckfestigkeit ist unmittelbar von den verwendeten Zementanteilen abhängig. Die Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit zeigen, dass die zementgebundenen Hinterfüllmassen Werte im gering durchlässigen Bereich erreichen.

Wesentlich für alle vorgenannten Parameter ist die genaue Einhaltung einer Rezeptur, um die Vergleichbarkeit der Prüfungen (feucht/trocken) zu gewährleisten, sowie die Unversehrtheit der Probekörper.

Die Frost-Tau-Versuche zeigen, dass die praxisüblichen Baustoffe bereits nach einem Frost-Tau-Zyklus geschädigt werden. Diese Schädigung äußert sich in mikro- und makroskopischer Rissbildung, Vergrößerung des Porenspektrums sowie Materialverlust durch Abwitterung. Die Messwerte ungeschädigter Probekörper für Wärmeleitfähigkeit sowie Dichtigkeit werden bei Prüfkörpern von nicht frostsicheren Baustoffen nicht mehr erreicht. Frost-Tau-Versuche können mit verschiedenen Prüfkörpergeometrien und Prüfbedingungen durchgeführt

werden. Die Untersuchungen zeigen, dass nicht jedes Verfahren geeignet ist, reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Zudem mussten für genormte Prüfungen im Hinblick auf Erdwärmesonden-Hinterfüllbaustoffe eigene Frostkriterien definiert werden; dies erfolgte im Zuge des neu entwickelten CIF-Tests Geothermie.

In den Laborversuchen konnte gezeigt werden, dass es möglich ist Baustoffe herzustellen, die auch gegen häufige Frost-Tau-Wechsel (28 Zyklen) beständig sind und die definierten Frostkriterien einhalten.

Die Versuche zeigen auf, welche Möglichkeiten zukünftig für die Qualitätsprüfung von Hinterfüllbaustoffen und Rückstellproben, die in der Praxis auf Baustellen genommen werden, bestehen. Damit können Qualitätssicherungssysteme konzipiert und etabliert werden.

4.4 Untersuchungen am Gesamtsystem: Prüfstand Geothermie

4.4.1 Versuche und Randbedingungen

Im Prüfstand Geothermie wurden Versuche mit unterschiedlichen Baustoffen und Versuchsbedingungen durchgeführt. Der Versuchsaufbau wurde nach Abb. 3-9 erstellt. Die Bedingungen sind in Tabelle 4-13 erläutert. Variiert wurden die eingesetzten Baustoffe sowie die Randbedingungen in den Behältern, die die umgebenden Lockergesteine simulieren sollen. Die Tests erfolgten im trockenen sowie wassergesättigten Zustand. Die Temperaturprofile wurden - aus Gründen der Vergleichbarkeit - nicht verändert.

Tabelle 4-13: Versuche und Versuchsbedingungen im Prüfstand Geothermie

Ver-such	Baustoffe	Behälterinhalt	Temperaturen
1	Wanne 1: Mischung D	Quarzsand, trocken	Klimakammer: 15°C Fluid: 15°C/5°C/0°C/-5°C, -10°C
	Wanne 2: Mischung X ¹	Quarzsand, trocken	
2	Wanne 1: Mischung E	Quarzsand, trocken	Klimakammer: 15°C Fluid: 15°C/5°C/0°C/-5°C, -10°C
	Wanne 2: Mischung F	Quarzsand, trocken	
3	Wanne 1: Mischung G	Quarzsand, trocken	Klimakammer: 15°C Fluid: 15°C/5°C/0°C/-5°C, -10°C
	Wanne 2: Mischung G	Quarzsand, wassergesättigt	
4	Wanne 1: Mischung G	Quarzsand, trocken	Klimakammer: 15°C Fluid: 15°C/5°C/0°C/-5°C, -10°C
	Wanne 2: Mischung G	Quarzsand, wassergesättigt	

¹ Hochwärmeleitfähiger Füllbaustoff mit einer Wärmeleitfähigkeit von 3,5 W/(mK), der in der Praxis nicht eingesetzt wird und für die Laborversuche nicht berücksichtigt wurde.

4.4.2 Integritätsuntersuchungen

Die Erdwärmesondenrohre mit den verschiedenen Hinterfüllungen aus Versuch 1 zeigt Abb. 4-32. Auf den Bildern sind die Erdwärmesonden vor dem Einbau in die Versuchseinrichtung sowie nach der Frostbelastung (Versuchsende) dargestellt. Das Erdwärmesondenrohr, das mit dem Baustoff der Mischung D umhüllt war, weist erhebliche Frostschädigungen bis hin zum Zerfall der Hinterfüllmasse auf.

Farbveränderungen der Hinterfüllungen ergeben sich durch den Einbau der zum Aushärten des Hinterfüllbaustoffes feucht gelagerten Erdwärmesonden in den Versuchsaufbau mit trockenem Quarzsand und den damit verbundenen Feuchteverlustes im Versuchsverlauf.

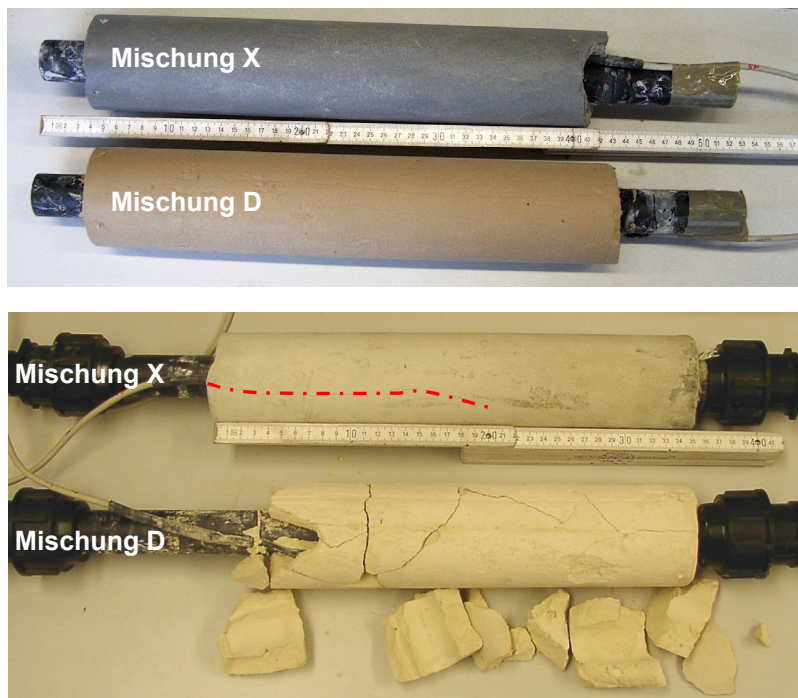


Abb. 4-32: Versuch 1: Sondenrohre mit Hinterfüllung und Temperaturfühlern; Bild oben: vor dem Versuch, Bild unten: nach dem Versuch mit Rissbildungen in Hinterfüllung Mischung X sowie großen Rissen und Zerfall bei Mischung D

4.4.3 Temperaturlausbreitung

Versuch 1 wurde mit den beiden Mischungen D und X durchgeführt, um zwei Baustoffe mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit Mischung D: 1,8 W/(mK), Mischung X: 3,5 W/(mK)) zu untersuchen. Abb. 4-33 zeigt das Ausgangstemperaturfeld, das sich bei einer Außentemperatur in der Klimakammer von 15°C und einer Durchströmung der Erdwärmesonden mit einer Fluidtemperatur von 15°C als Grundzustand zur Modellkalibrierung. Die Temperaturverteilung erfolgt gleichmäßig über den gesamten Querschnitt der Versuchsbehälter, die geringen Abweichungen liegen im Rahmen der Messgenauigkeit der Pt-100 Temperaturfühler.

Bei Temperaturen der Wärmeüberträgerflüssigkeit von 5°C (Abb. 4-33) breiten sich die tieferen Temperaturen konzentrisch um die Sonden herum aus. Dabei werden in Wanne 2 tiefere Temperaturen, bedingt durch die deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllbaustoffes, in größeren Entfernungen von der Sonde aufgezeichnet. Dieser Effekt wird besonders deutlich in Abb. 4-34, in denen die Temperaturaufzeichnungen der Versuche mit Fluidtemperaturen von -5°C und -10°C dargestellt sind.

In Versuch 1 (Abb. 4-33, Abb. 4-34) wird im Vergleich von zwei Baustoffen deutlich, dass sich das Temperaturfeld im unmittelbaren Sondenumfeld sowie im weiteren Umfeld in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung verschiedenartig ausbreitet. Temperaturänderungen des Fluids, das die Rohre durchströmt, wirken sich bei Baustoffen mit besseren thermischen Eigenschaften schneller und in einem größeren Radius um die Sonde herum aus.

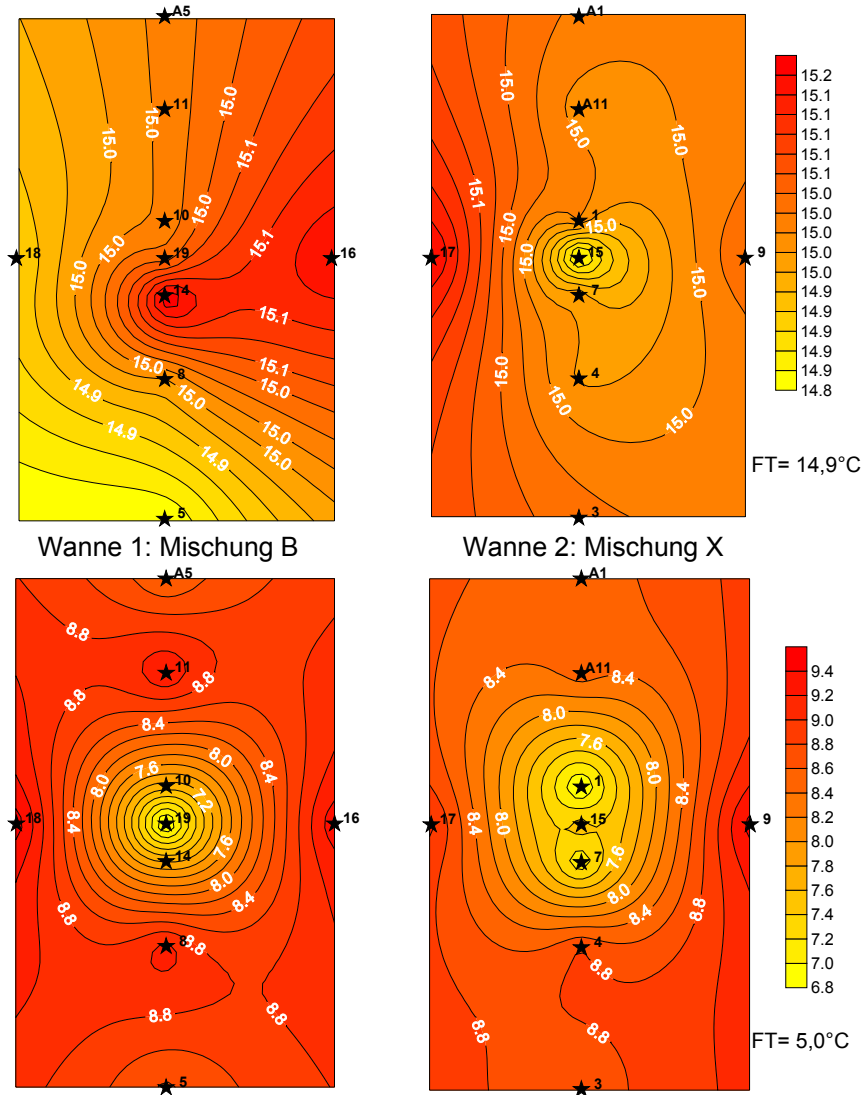


Abb. 4-33: Versuch 1: Querschnitt des Temperaturfeldes in Wanne 1 (links) und Wanne 2 (rechts); Fluidtemperatur (FT): 14,9°C (Bilder oben), 5°C (Bilder unten); Temperatur Klimakammer: 15°C; (Temperatur fähler: Sterne); Skizze des Querschnitts vgl. Kap. 3.7.2

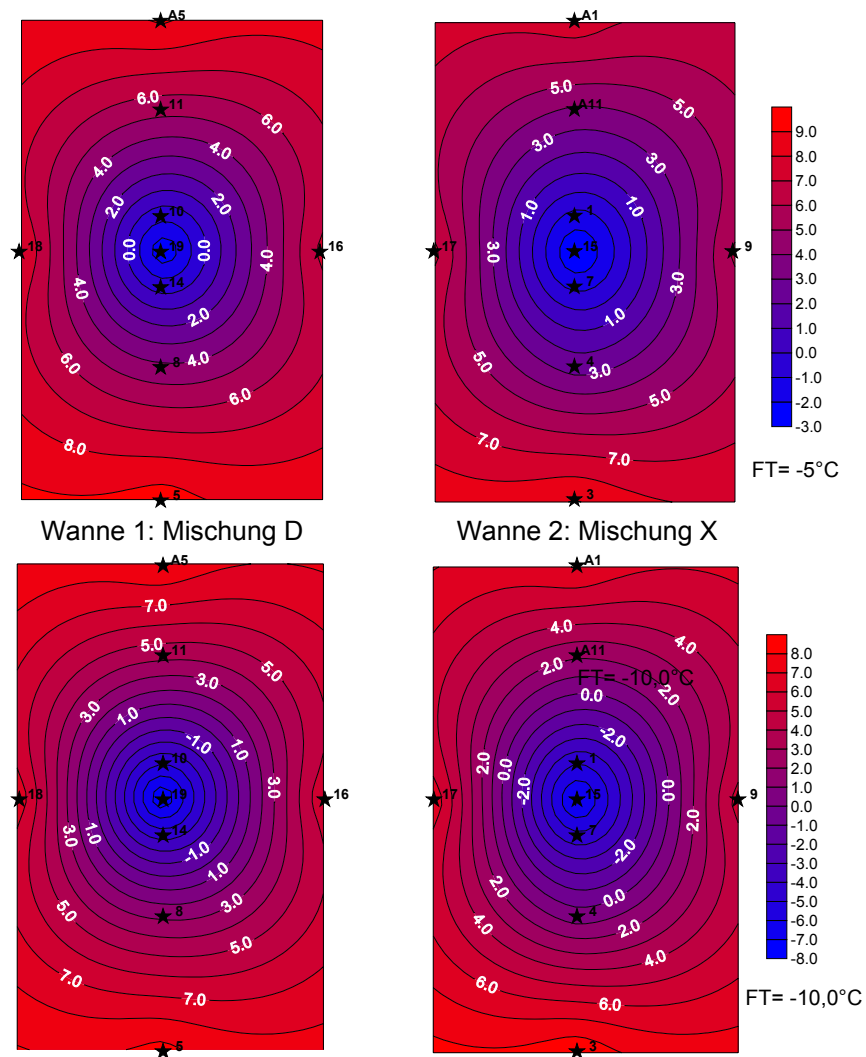


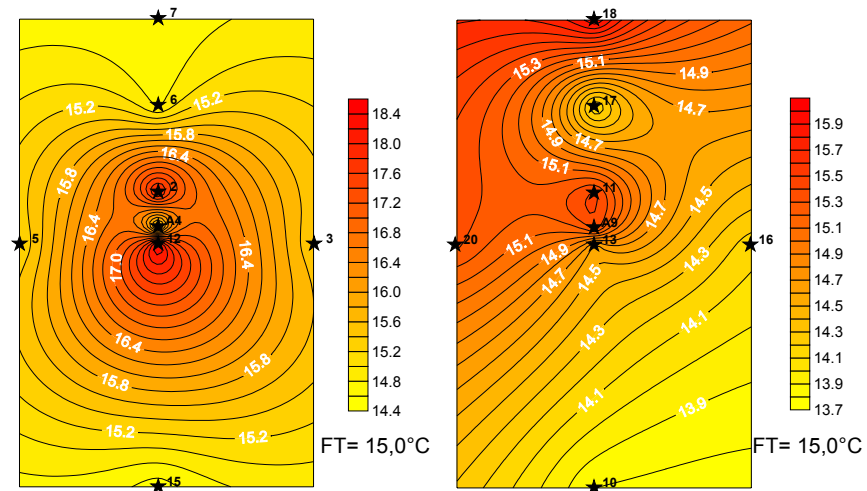
Abb. 4-34: Versuch 1: Querschnitt des Temperaturfeldes in Wanne 1 (links) und Wanne 2 (rechts); Fluidtemperatur (FT): -5°C (Bilder oben), -10°C (Bilder unten); Temperatur Klimakammer: 15°C; (Temperaturfühler: Sterne); Skizze des Querschnitts, vgl. Kap. 3.7.2

Die Frosteinwirkung erfolgt bei dieser Versuchsanordnung von innen nach außen und führt mit der Bildung von makroskopisch sichtbaren Rissen mit Rissbreiten von > 2 mm (Abb. 4-32) zu den gleichen Schadensbildern, die auch in den Laborversuchen zu beobachten waren. Die Frostschädigung führt zum Zerfall der Baustoffe und zu einer Ablösung von den PE-Rohren.

Die Ergebnisse des Versuches Nr. 2 mit den Mischungen E und F in trockenem Quarzsand zeigen Temperaturverteilungen wie im Versuch 1 und sind deshalb nicht gesondert dargestellt.

In den Versuchen 3 und 4 wurde der neu entwickelte Baustoff der Mischung G im Prüfstand Geothermie getestet. Für diese Experimente wurden veränderte Bedingungen gewählt, indem eine der beiden Wannen mit Quarzsand gefüllt und anschließend mit Wasser bis zur Sättigung gefüllt wurde. Die Versuche sollten zeigen, inwiefern die unterschiedlichen Prüfbedingungen mit trockenem und feuchtem Sand, die Temperaturverteilung in den beiden Wannen bei gleicher Hinterfüllung beeinflussen. Die Ergebnisse aus Versuch 3 mit zwei Erdwärmesonden und einer Hinterfüllung aus Mischung G sind in Abb. 4-35 dargestellt.

Die Temperaturverteilung in Wanne 1, die mit trockenem Quarzsand gefüllt war, bildet sich konzentrisch um die eingebaute Erdwärmesonde herum aus. Im Ausgangszustand bei Durchströmung mit Fluidtemperaturen von 15°C werden Temperaturen bis zu 18°C im Sondenumfeld mit einer Art „Wärmespeicherung“ des sehr gut leitfähigen Quarzsandes (Tabelle 4-6) erreicht. In Wanne 2 mit wassergesättigtem Quarzsand bildet sich ein gleichmäßiges Temperaturfeld von 15°C im gesamten Behälter aus. Die Durchströmung mit Fluidtemperaturen von -5°C führt zur Ausbildung einer konzentrischen Temperaturverteilung in Wanne 1 mit Temperaturen von max. 2°C in der Hinterfüllung. In Wanne 2 werden an der Erdwärmesonde tiefere Temperaturen bis $-2,5^{\circ}\text{C}$ erreicht. Die Temperaturverteilung im Sondenumfeld ist mit höheren Temperaturen gleichmäßiger im Vergleich zu Wanne 1. Das Wasser mit einer hohen Wärmekapazität (Tabelle 4-6) scheint zu einer „Abpufferung“ der tieferen Temperaturen zu führen.



Wanne 1 (trocken): Mischung G

Wanne 2 (feucht): Mischung G

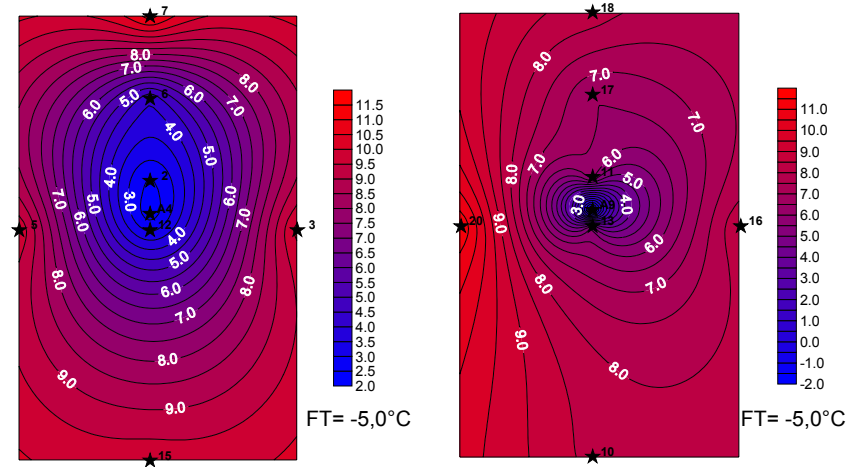


Abb. 4-35: Versuch 3: Querschnitt des Temperaturfeldes in Wanne 1 (links) und Wanne 2 (rechts); Fluidtemperatur (FT): 15°C (Bilder oben), -5°C (Bilder unten); Temperatur Klimakammer: 15°C; (Temperaturfühler: Sterne); Skizze des Querschnitts vgl. Kap.3.7.2

4.4.4 Zusammenfassung: Ergebnisse Untersuchungen am Gesamtsystem - Prüfstand Geothermie

Die Versuche am Gesamtsystem mit dem Prüfstand Geothermie wurden durchgeführt, um die Hinterfüllbaustoffe aus den Laboranalysen angepasst an eine Geometrie, die dem realen Anwendungsfall entspricht, zu testen. In Einzelrohrversuchen in zwei Wannen zum direkten Vergleich kann eine turbulente Durchströmung mit dem stark unterkühlten Fluid erfolgen und die Temperaturentwicklung in der Umgebung des Sondenrohres sowie der Hinterfüllung beobachtet werden. Die Baustoffe, die sich in den Laborversuchen als nicht frostsicher erwiesen, zeigten auch in dieser Versuchsanordnung Schädigungen mit der Bildung von makroskopisch sichtbaren Rissen. Die Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe spielt eine Rolle für die Ausbreitung des Temperaturfeldes in den Versuchswannen. Baustoffe mit guten thermischen Eigenschaften leiten tiefe Temperaturen des Sondenfluids in einem größeren Radius (um das Sondenrohr herum) in die Umgebung ab. Somit ist davon auszugehen, dass sich Temperaturänderungen der Wärmeüberträgerflüssigkeit bei Baustoffen mit besseren thermischen Eigenschaften schneller und in einem größeren Radius um die Sonde herum auswirken.

Die Frosteinwirkung führt zu einer Ablösung der PE-Rohre von der Hinterfüllung (Kap. 3.5) und zu einer Schädigung der Baustoffe bis zum vollständigen Zerfall. Der Einfluss von Wasser in der Umgebung der Erdwärmesonden konnte mit den durchgeführten Versuchen sehr vereinfacht aufgezeigt werden; er führt zu tieferen Temperaturen unmittelbar am Sondenrohr sowie in der Hinterfüllung. In der Charakteristik des Temperaturfeldes zeigt sich, dass jedoch generell höhere Temperaturen in kürzerer Entfernung von der Erdwärmesonde erreicht werden, als im Vergleich zum trockenen Quarzsand. Dies lässt sich mit den wassergefüllten Poren erklären, die einen besseren Wärmetransport ermöglichen.

Im Hinblick auf die Beeinflussung von Erdwärmesonden-Anlagen durch Grundwasser und die Entzugsleistungen besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Die Versuche am Gesamtsystem des Prüfstands Geothermie dienen im Wesentlichen der Prüfung der Hinterfüllbaustoffe im Bezug auf thermische Eigenschaften sowie der Frost-

Tau-Wechselbeständigkeit. Hierfür wurde ein anwendungsnahes Modell benutzt. Das Ergebnis dieser Versuche lässt sich damit zusammenfassen, dass noch weiterer Forschungsbedarf besteht, vor allem was In-situ Gefrierversuche an im Betrieb befindlichen Erdwärmesonden anbelangt. Diese Versuche müssen zudem die im Untergrund vorherrschenden Druckverhältnisse und die Bedingungen der verschiedenartigen ungesättigten und gesättigten Locker- und Feststeinszonen berücksichtigen.

5 Bewertung

Frostschädigung

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass in der Praxis verwendete Eigen- und Fertigmischungen für Erdwärmesonden, die mit hohen Wassergehalten von bis zu 75 Gew.-% als gut fließ- und pumpfähige Suspensionen in die Bohrlöcher eingebracht werden, bei einer Frost-Tau-Beanspruchung in ihrem Gefüge geschädigt werden. Bei ausgeprägten Temperaturwechseln von Plus- zu Minusgraden in verschiedenen Laborversuchen sowie im Prüfstand Geothermie verhalten sich die „Standard-Hinterfüllbaustoffe“ nicht frostbeständig oder frostsicher. Die irreversiblen Schädigungen durch Frost konnten mit allen angewandten Methoden nachgewiesen werden und variieren in ihrer Ausprägung je nach Art des Hinterfüllbaustoffs.

Das prägnanteste Schädigungsbild stellen makroskopisch sichtbare Netz- und Haarrisse sowie gefügezerstörende Risse dar. Diese führen zum kompletten Zerfall der Probekörper und äußern sich zudem im Abwittern bzw. Abplatzen oberflächennaher Schichten. Auch auf der mikroskopischen Ebene im Dünnschliff sind Rissbildungen erkennbar. Bei der zerstörungsfreien Messung der Ultraschalllaufzeiten zeigt sich eine dadurch verursachte deutliche Verlangsamung der Schalllaufzeiten durch die Probekörper, da an Rissen und Fehlstellen Abschwächungen und Reflexionen der Schallwellen stattfinden.

Die Frostschädigungen bewirken durch die Volumenausdehnung der Eislinsen eine Veränderung der Porenverteilung mit einer Verschiebung des Porenspektrums hin zu größeren durchflusswirksamen Poren. Dies äußert sich in erhöhten Wasserdurchlässigkeiten um bis zu einer Zehnerpotenz.

Probekörper der Mischung A und Mischung B mit den höchsten Wassergehalten aller getesteten Hinterfüllungen von 75 bzw. 50 Gew.-% (w/z-Werte von 4,5 bzw. 5,0/Wasser/Feststoff-Verhältnis von 3,0 bzw. 1,0) zeigen in den Frostversuchen die am schnellsten eintretenden Schädigungen, die zum kompletten Zerfall der Prüfkörper führten. Der Schädigungsverlauf ist irreversibel, trotz des Bentonit-Anteiles von 8,3 bzw. 10%. Die häufig postulierte „Plastizität“ (u.a. MÜLLER 2007)

kommt nicht zum Tragen, da, bedingt durch die hohen Wasseranteile, die Schädigungsintensität der Eislinsen so hoch war, dass dies zum Zerfall der Prüfkörper führte. Infolge der starken Zerstörung war die Analytik bezüglich Wärmeleitfähigkeit, Festigkeit sowie Wasserdurchlässigkeit nicht mehr durchführbar.

Mischung C enthält verhältnismäßig hohe Zementanteile mit einem Wasseranteil von 30 Gew.-% und einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 0,4. Es zeigte sich ein moderaterer Schädungsverlauf mit makroskopischen Rissbildungen, die jedoch nicht zum vollständigen Zerfall des Prüfkörpers führten. Im mikroskopischen Maßstab waren die Rissbildungen im Dünnschliff allerdings schon nach dem 1. Frostzyklus zu erkennen.

Eine sehr schnell eintretende Frostschädigung mit makro- und mikroskopischen Rissbildungen, Abplatzungen sowie deutlich verringerten Ultraschalllaufzeiten nach dem 4. Frost-Tau-Zyklus zeigen die Prüfkörper der thermisch verbesserten Mischungen D, E und F mit Wassergehalten zwischen 48 Gew.-%, 32 Gew.-% sowie 25 Gew.-%.

Die Versuche zeigen auch sehr deutlich die wesentliche Abhängigkeit der Intensität der Frostschädigung im Bezug auf die Aushärtedauer der Hinterfüllbaustoffe. Die Hydratationsprozesse der Zemente müssen in jedem Fall ausreichend berücksichtigt werden. Prüfungen in der Betontechnik geben als Prüfzeitpunkt 28 Tage nach dem Erstellen der Prüfkörper an; gemessen wird beispielsweise die Druckfestigkeit zu diesem Zeitpunkt, auch wenn sich noch eine weitere Nacherhärtung über einen langen Zeitraum anschließt. Prüfkörper mit einer Aushärtedauer von 7 bis 14 Tagen zeigen eine deutlich größere Schädigung durch Frost-Tauwechsel, als nach einer Aushärtedauer von 28 Tagen. Dies gilt es in der praktischen Ausführung unbedingt zu berücksichtigen, da der Schädigungsvorgang als weitgehend irreversibel angenommen werden muss. Die in der Praxis häufig postulierte „Selbsteilung“ des Zementgefüges sowie die durch die Zugabe von Bentonit erhoffte „Plastizität“ konnte im Rahmen der Versuche nicht nachgewiesen werden.

Die neuen Frost-Tau-beständigen Hinterfüllbaustoffe, die im Zuge der Überprüfung des Versuchskonzeptes in Laborversuchen und im Prüf-

stand Geothermie getestet wurden, weisen verhältnismäßig geringe Wassergehalte von 20 bzw. 18 Gew.-% und sehr niedrige Wasser-/Feststoffverhältnisse von 0,25 bzw. 0,22 auf. Die Prüfkörper der Mischung G sowie der Mischung H verhalten sich im Gegensatz zu den in der Praxis eingesetzten Baustoffen frostsicher und erfüllen die neu definierten Kriterien der Frostbeständigkeit im CIF-Test Geothermie.

Die Realisierung frostbeständiger Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden erfordert die Verwendung hochwertiger Inhaltsstoffe und geeigneter Hochofenzemente. Die Gewährleistung der Frostbeständigkeit erfordert vor allen Dingen die Erhöhung des Feststoffgehaltes und die Minimierung der Wasserzugabe. Die Einbringung der Hinterfüllungen als Suspension in das Erdwärmesonden-Bohrloch darf nicht über die Zugabe zusätzlichen Wassers erfolgen, sondern muss unter strengster Einhaltung der vorgegebenen Rezepturen mit anderen rheologieverbessernden Maßnahmen sichergestellt werden. Hierfür können Betonzusatzmittel verwendet werden. Der Einsatz von Luftporenbildnern zur definierten Einbringung von Luftporen erweist sich hingegen für diesen Anwendungsbereich als ungeeignet und ist bedingt durch die Verarbeitung als Suspension und das anschließende Einpumpen ins Bohrloch nicht praktikabel. Die Herstellung von Luftporen, wie sie bei Betonen in einer vorwiegend „trockenen“ Umgebung als Expansionsraum für das beim Gefrieren verdrängte Wasser und Eis effektiv ist, stellt keinen Schutz gegen Frost-Tau-Schäden dar. Dies hängt mit der langzeitlichen Wassersättigung der Luftporen infolge der vorwiegend „nassen“ Umgebung mit teil- bzw. vollständig wassergesättigten Böden zusammen.

Thermische Eigenschaften

Die Hinterfüllbaustoffe wurden bislang im Hinblick auf die thermischen Eigenschaften, die unter anderem durch die Messung der Wärmeleitfähigkeit definiert werden, entwickelt. Die Versuche zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Messwerte von der Art der Probenvorbereitung. Im getrockneten Zustand werden sehr geringe Wärmeleitfähigkeitswerte durch luftgefüllte Poren im Gefüge erreicht. Erfolgt lediglich eine Lufttrocknung und ist noch Wasser bzw. Wasserdampf in den Porenräumen vorhanden, werden höhere Messwerte gemessen. Die höch-

ten Messwerte werden bei Wassersättigung des Prüfkörpers erreicht. Für Wärmeleitfähigkeitsmessungen sind in jedem Fall die Prüfbedingungen zu dokumentieren. Frostschädigungen führen zu abnehmenden Messwerten der Wärmeleitfähigkeit bedingt durch die Gefügeschädigung und die Entstehung von Fehlstellen, die mit schlecht wärmeleitfähiger Luft gefüllt werden. Die Beurteilung der Frostbeständigkeit anhand der veränderten Wärmeleitfähigkeitsmesswerte ist zu unpräzise und daher nicht geeignet.

Im Prüfstand Geothermie wurden Temperaturverläufe um Sondenrohr und Hinterfüllung bei verschiedenen Temperaturen der, in den Rohren zirkulierenden, Fluide aufgezeichnet. Im Vergleich von zwei Hinterfüllungen kann beobachtet werden, dass sich das Temperaturfeld im unmittelbaren Sondenumfeld sowie in der weiteren Umgebung in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe verschiedenartig ausbreitet. Thermisch verbesserte Baustoffe verursachen eine weitreichendere Ausbreitung niedriger Temperaturen. Dies bedeutet beim Einsatz nicht frostsicherer, gut wärmeleitfähiger Baustoffe eine schnellere und in einem größeren Radius erfolgende Ableitung niedrigerer Temperaturen aus dem Sondenrohr. Bei nicht frostsicheren Hinterfüllungen wird das Gefüge schneller geschädigt. Im realen Anwendungsfall ist mit einer Frostbeanspruchung des umgebenden Gesteines (Locker- und/oder Festgesteine) zu rechnen, zumal die empfohlenen Mindestabstände zwischen Sondenrohren und Bohrlochwand in der Praxis häufig nicht eingehalten werden, wodurch direkter Kälteeintrag in den Untergrund erfolgt. Die umgebenden Gesteine werden in Abhängigkeit von der Frostempfindlichkeit geschädigt.

Reproduzierbarkeit der Versuche/Prüfkörpergeometrie

Die Prüfkörpergeometrie erweist sich als entscheidend für die Reproduzierbarkeit der Versuche und die Frostschädigung. Sehr kleine Probekörper (Höhe 50 mm) waren aufgrund der Größe ungeeignet für die durchzuführenden Versuche; bei großen zylindrischen Probekörpern (bis 20 cm Höhe) trat die Frostschädigung schneller und ausgeprägter auf. Auch die Art und Weise der Frosteinwirkung ist zu berücksichtigen. Bei Versuchen in einer Klimakammer erfolgt die Frosteinwirkung von außen nach innen; bei durchströmten Rohren im Technikumsversuch radial von innen nach außen. In den Klimakammer-Versuchen

beeinflussen verschiedene Parameter wie die Größe der Kammer, der Abstand der Probekörper zueinander sowie die Feuchte in der Kammer den Gefrierprozess. Die Frosteinwirkung erfolgt außen am Prüfkörper mit - je nach Geometrie - unterschiedlich großer Oberfläche. Die Versuche im Prüfstand Geothermie - in der Klimakammer - zeichnet die Rohrgeometrie aus, die dem realen Anwendungsfall (1:1-Modell) entspricht. Die Frosteinwirkung erfolgt konzentrierter, auf die Fläche des Wärmetauscherrohres bezogen. In der Versuchsanordnung können Rohrgeometrie und -materialien sowie die Temperaturausbreitung der zirkulierenden Fluide mit in den Versuch einbezogen werden. Nachteilig ist die damit verbundene Komplexität der Prüfkörpervorbereitung sowie Handhabung im Versuchsstand.

Die Reproduzierbarkeit der Versuche ist, bedingt durch die präzise definierten Prüfbedingungen des CIF-Test Geothermie, am größten. Die CIF-Tests Geothermie zeigen, dass es notwendig ist, auf den Anwendungsbereich abgestimmte Prüfmethode zu verwenden bzw. bestehende entsprechend zu modifizieren. Eine Durchführung der Prüfung mit allen Vorgaben nach DIN/CEN TS 12390 Teil 9 (2006) ist vor allem im Hinblick auf die Prüftemperaturen nicht sinnvoll. Mit der Verwendung von PE-Flaschen können zukünftig einfache Baustellen-Probenahmen durchgeführt werden. Die Seitenwände der Flasche dienen zudem als Umschließung während der Tests und der behinderten Seitendehnung. Die Ergebnisse der Frostversuche mit zylindrischen Probekörpern werden durch die CIF-Tests Geothermie bestätigt. Die definierte Prüfanordnung mit der behinderten Seitendehnung zeigt die Volumenausdehnung des Wassers durch die Bildung von Eis im Prüfkörper. Der Prozess des kapillaren Saugens berücksichtigt das Vorhandensein von Wasser in der Umgebung der Erdwärmesonde; die behinderte Seitendehnung und die vorgegebene einaxiale Wasserbewegung bei kapillarem Saugen simuliert das umgebende Locker- oder Festgestein. Im natürlichen Environment muss immer das Vorhandensein von Bodenfeuchte bzw. Sicker- und/oder Grundwasser berücksichtigt werden. Daher sind Frostprüfungen, die eine Durchfeuchtung der Prüfkörper aus Gründen der potentiell stärkeren Schädigung verhindern generell nicht für die Bewertung der Frostbeständigkeit geeignet. Das kapillare Wasseransaugen mit dem von SETZER (2001) postulierten Mechanismus der Frostpumpe lässt sich durch die zunehmende Flüssigkeitsaufnahme während des Prüfverlaufs nachvollziehen. Die-

ser Vorgang sowie die starke Zerstörung der nicht frostbeständigen Baustoffe beeinträchtigt die Aussagekraft der Ultraschallmessungen. Bei starker Gefügezerstörung kann eine Ultraschallmessung an den Probekörpern nicht mehr durchgeführt werden. Die Messung der Abwitterung gibt einen Überblick über den Materialverlust an den Probekörpern, ist jedoch bei starker Gefügeschädigung nur bedingt aussagefähig, da bei einem Herauslösen des Probekörpers aus der umgebenden PE-Hülle die Abwitterung mit 100% zu dokumentieren ist, d.h. die Probe zerfällt komplett. Der relative dynamische E-Modul $R_{u,n}$ wird als Frostkriterium aus den Ultraschallmessungen definiert.

Das Versuchskonzept konnte mit der Frostbeständigkeit der neu entwickelten Hinterfüllbaustoffe bestätigt werden, da diese mit geringen Abwitterungsbeträgen, konstanten Ultraschallgeschwindigkeiten, der Massenkonstanz ohne Probekörpervergrößerung sowie geringer bzw. nicht vorhandener Rissbildung die neu definierten Prüfkriterien erreichen. Für Mischung H mit einem sehr dichten Gefüge zeigt sich der von VOIGT (1994) postulierte Mechanismus einer spät einsetzenden Schädigung mit dünnen begrenzten Haarrissen. Bei sehr gering durchlässigen Probekörpern gefriert das Wasser in den Poren an Ort und Stelle; zudem setzt eine Schädigung ein, wenn eine kritische Sättigung des Probekörpers erreicht wurde. Für den CIF-Test Geothermie wurden neue, für Erdwärmesonden-Hinterfüllungen geeignete Prüfkriterien mit einem Bewertungsschema definiert.

Langzeitstabilität

Generell verlieren die Baustoffe durch Frostschädigung ihre Funktionalität und die von den Genehmigungsbehörden geforderten Eigenschaften. Damit sind die Anforderungen an die Langzeitstabilität sowie die Schonung und der Schutz der Ressourcen Boden und Grundwasser nicht mehr gewährleistet. Eine „dichte und dauerhafte, physikalisch und chemisch stabile Einbindung der Erdwärmesonde in das umgebende Gestein“, wie in der VDI 4640 Blatt 2 (2001) gefordert, ist nicht mehr sichergestellt. Für Erdwärmesonden die mit derartigen Verfüllbaustoffen ausgebaut werden, bedeuten diese Ergebnisse, dass die eingesetzten Materialien beim Anlagenbetrieb ihre Kopplung an den Untergrund zusehends verlieren und sich der Wärmeentzug deutlich verschlechtert. Zudem kann die Frost-Tau-Schädigung zum Quetschen und Abreißen der Sondenrohre, zum vollständigen Zerfall der Hinter-

füllmassen und somit zum totalen Funktionsverlust der Hinterfüllbaustoffe im Bohrloch führen (LENARDUZZI et al. 2000; ROHNER & RYBACH 2001). Ein Grundwasserschutz ist bei der Verwendung ungeeigneter bzw. qualitativ schlecht eingebauter Hinterfüllungen nicht gegeben. Eine Sicherung durch die abdichtende Wirkung der Hinterfüllung gegen eindringendes Oberflächenwasser sowie ausreichende Stockwerkstrennung der Grundwässer ist bei Wegsamkeiten bzw. Fehlstellen ebenfalls nicht mehr vorhanden.

Schadensfälle an bereits in Betrieb befindlichen Anlagen resultieren aus vielfältigen bau- und/oder betriebsbedingten Ursachen. Eine nachträgliche Schadensanalyse ist deshalb meist sehr schwierig, da sich die Anlagenbauteile in Geothermiebohrungen in Tiefen bis 400 m befinden. Frostschädigungen der Hinterfüllung und/oder des umgebenden Untergrundes als Primärschäden zeigen sich meist als Sekundärschäden in Hebungs- und Senkungserscheinungen mit Nachbrüchen im Umfeld der Bohrungen (trichterförmig) sowie im Bereich der Hausanschlussleitungen. Da Erdwärmebohrungen häufig im Bereich der Infrastruktur von Gebäuden (Zufahrten, Garagenvorplätze) ausgeführt werden, können weitere geotechnische Probleme als Sekundärschäden im Bezug auf die Standsicherheit oder Gebrauchstauglichkeit von Gebäuden auftreten.

Grundwasserbeeinflussung

Die Grundwasserbeeinflussung durch die Bestandteile der Hinterfüllbaustoffe ist unmittelbar nach dem Einbau und in den ersten Wochen während des Aushärtens am größten. Die Versuche zur Auslaugung von Ionen, die durchgeführt wurden, um eine Beeinflussung des Grundwasserchemismus abschätzen zu können, zeigen, dass es in jedem Fall nach dem Einbringen der Baustoffe in das Bohrloch zu einer kurzfristigen pH-Wert-Erhöhung kommt. Die Größenordnung der eluierten Stoffe hängt von der Qualität der eingebrachten Suspensionen ab. Bei großen Mengenanteilen von Portlandzement mit einem hohen Klinkeranteil, wie sie in den so genannten „Dämmern“ und den anderen gängigen Fertigprodukten verwendet werden, ist mit einem - um ein Vielfaches höheren - Stoffaustrag zu rechnen. Portlandkompositzemente, wie Hochofenzemente, die in der VDI-Richtlinie (2001) sowie für frostbeständige Betone empfohlen werden, erniedri-

gen den Anteil ausgelaugter Ionen deutlich. Eine Beeinflussung des Grundwasserchemismus findet qualitativ nachhaltig statt, ist quantitativ jedoch eher als unbedeutend einzustufen. Problematisch könnte sich in bestimmten Grundwässern infolge hoher Kohlensäure-Konzentrationen im Sinne „starker betonangreifender Eigenschaften“ nach DIN 4030 (2008) der Eintrag von Calciumionen auswirken, da hierdurch das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht gestört werden kann. Für diese Bedingungen muss bei der Entwicklung von neuen frostsicheren Baustoffen auch der Zement als Komponente, die für den Haupteintrag von Calciumionen verantwortlich ist, mit seinem spezifischen Chemismus berücksichtigt werden und durch geeignete Zementsorten ersetzt werden. Die hohen pH-Werte der Suspensionen im basischen Bereich führen dazu, dass nur in sehr geringem Maße Schwermetalle freigesetzt werden (HOHBERG 2003). Dies wurde im Rahmen der Versuche jedoch nicht geprüft.

Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zeigen, dass die praxisüblichen Hinterfüllbaustoffe aus dem Brunnenbau bzw. auch die speziell für Erdwärmesonden thermisch verbesserten Materialien, die derzeit in der Praxis verwendet werden, nicht für den Anwendungsbereich der Geothermie geeignet sind. Da die Wärmepumpen in Abhängigkeit vom Heizbedarf und den Außentemperaturen zyklisch mit längeren Lauf- sowie Standzeiten betrieben werden, werden die Erdwärmerohre in unterschiedlich langen Intervallen mit unterkühlten Wärmeübertragerfluiden durchströmt. Beim Einbringen stark wasserhaltiger Suspensionen sowie einem frostempfindlichen Baugrund kann dies zum Gefrieren wassererfüllter Porenräume in Gestein und Hinterfüllung führen. Beim Abschalten der Wärmepumpe tauen die gebildeten Eislinsen oder -keile wieder auf. Diese zyklische Beanspruchung wurde in Frost-Tau-Wechselversuchen im Labor und im Prüfstand Geothermie simuliert.

Neben der Verwendung nicht frostsicherer, definierter Fertigprodukte, werden häufig eigene Mischungen mit unterschiedlichsten, ggf. nicht richtlinienkonformen Baustoffen erstellt. Damit steigt die Möglichkeit einer Grundwassergefährdung durch nicht sachgemäße, im Nachgang nicht mehr in ihrer Ausführung nachvollziehbarer, Bohrlochverfüllungen.

Im Rahmen dringend notwendiger und verbesserter Qualitätskontrollen ist die Unbedenklichkeitsprüfung der kommerziell erhältlichen Baustoffe nach definierten Prüfkriterien erforderlich. Diese muss auch die Frost-Tau-Wechselbeständigkeit der Hinterfüllbaustoffe beinhalten. Dies ist bislang durch die Auswahl beliebiger Prüfinstitute und -verfahren mit nicht nachvollziehbaren „Modifikationen“ nicht gewährleistet. Zu empfehlen wäre zukünftig eine zentrale Prüfung durch offizielle Stellen (z.B. Deutsches Institut für Bautechnik) mit der Zulassung der geeigneten Bauprodukte und somit klaren Leitlinien für die Genehmigungsbehörden wie für die ausführenden Firmen.

6 Handlungsempfehlungen für die ingenieurgeologische/geothermische Praxis

Die Nutzung der Erdwärme-Technologie erfolgt bereits seit einigen Jahrzehnten in Europa und verzeichnet vor allem in den letzten Jahren auch in Deutschland stark steigende Zuwachsraten. Es besteht damit die dringende Notwendigkeit einer qualitätsoptimierten Ausführung und Überwachung der Anlagen zur Schonung und Schutz der Ressourcen Boden und Grundwasser und zum erfolgreichen Betrieb der Systeme.

„Da prinzipiell beim Betreiben einer Erdwärmesonde besonders gegen Ende der Heizperiode ständig wechselnde Temperaturen im Minusbereich gefahren werden, ist eine Untersuchung des Verhaltens der Hinterfüllbaustoffe bei entsprechendem Temperaturverhalten als sehr wünschenswert anzusehen. Hierzu stehen derzeit keine wissenschaftlich bewertbaren Aussagen zur Verfügung“⁵. Die vorgelegte Forschungsarbeit mit einem Überblick zum Stand der Technik sowie zur Frost-Tau-Wechsel- und Langzeitbeständigkeit der, in der Praxis üblicherweise zur Verpressung verwendeten, Baustoffe zeigt, dass zukünftig eine qualifizierte Prüfung der Hinterfüllkonzepte - angefangen bei der Zusammenstellung der Baustoffe bis hin zur Ausführung - erfolgen muss.

Der notwendige Blick über den „Tellerrand“ in Richtung der Betontechnologie zeigt, dass dort qualitativ hochwertige Konzepte zur Erstellung von Betonen für verschiedenste Anwendungsbereiche existieren. Es gibt einheitliche europäische Qualitätsstandards und genaue Spezifikationen der einzelnen Zuschlagstoffe. Dies gilt auch für die Mischungserstellung mit definierten Körnungslinien bis hin zur Prüfung von Frisch- und Festbeton. Dies gilt auch für die Herstellung von Betonen, die frostbeständig sind und/oder chemischen Angriffen standhalten. Die Auswahl bzw. Konzeption erfolgt auf den Anwendungsbereich und die spezifischen Anforderungen abgestimmt. Zur Erstellung frostbe-

⁵ Schriftl. Mitteilung, Dr. S. Walker-Hertkorn, Bundesverband Wärmepumpe e.V., Mai 2005

ständiger Betonrezepturen gibt es klare Vorgaben bezüglich der einzusetzenden Zementsorten, optimierte Sieblinien mit definierten Kornverteilungen und als zentralen Gesichtspunkt minimierte Wasser-/Zementgehalte, die mit einer Erhöhung des Feststoffgehaltes einhergehen. Im Hinblick auf Verarbeitung bzw. Qualitätsoptimierung spielen auch chemische Betonzusatzmittel in den Rezepturen eine wesentliche Rolle.

Des Weiteren werden Qualitätssicherungskonzepte u.a. mit Güteüberwachung durch zertifizierte Laboratorien und das Deutsche Institut für Bautechnik auf einer breiten Basis umgesetzt. Hierfür gibt es zudem klar definierte Prüfwerte und festgesetzte Handlungsabläufe. Diese Wissensbasis gilt es zu nutzen und in die weitere Forschung und Normung einzubeziehen.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden, ausgehend von einer Bestandsaufnahme, neue Konzepte für den Erdwärmebereich betrachtet und geeignete Untersuchungsmethoden mit Fokussierung auf die relevanten Fragestellungen getestet und modifiziert. Die Untersuchung von „Zement-Ton-Gemischen“, die aufgrund ihrer Einsetzbarkeit hohe Wasser-/Zement-Werte erfordern und in Locker- und Festgesteine mit teil- oder vollständiger Wassersättigung eingebracht werden, in Verbindung mit den Randbedingungen einer thermischen - insbesondere durch Frost-Tau-Wechsel gekennzeichneten - Beanspruchung stellte eine Herausforderung dar.

Die Prüfung der Konzeption erfolgte mit der Entwicklung neuer frostbeständiger Baustoffe, die die neu definierten Prüfkriterien erfüllen. Gerade für Erdwärmeeinbauten muss zukünftig in jedem Fall die Hinterfüllung der Bohrungen mit geprüften frostbeständigen Baustoffen erfolgen, um Folgeschäden in Zukunft zu vermeiden und die Langzeitstabilität sicher zu gewährleisten.

Die einzig sicheren dauerhaften Lösungen für die Frostproblematik beim Betrieb von Erdwärmesonden-Anlagen sind die Verwendung von reinem Wasser als Sondenfluid, da damit ein längerer Betrieb im Frostbereich vermieden wird, bzw. der Einsatz geprüfter frostbeständiger Füllbaustoffe, die qualitativ hochwertig eingebaut werden.

Die Ergebnisse der vorgelegten Arbeit zeigen, dass weiterer Forschungsbedarf besteht. Die Optimierungen an Hinterfüllbaustoffen müssen fortgeführt werden und durch umfangreiche In-situ-Messungen an realen Anlagen mit entsprechender messtechnischer Überwachung ergänzt werden. Zudem muss der Einfluss des Grundwasserchemismus mit betonaggressiven Wässern, die die zementgebundenen Hinterfüllbaustoffe angreifen, systematisch untersucht und in den Richtlinien berücksichtigt werden.

Folgende Handlungsempfehlungen für die ingenieurgeologische/geothermische Praxis sind im Hinblick auf den Bau der Anlagen und die Systemsicherheit unbedingt zu beachten:

- Verantwortungsvolle Planung der Anlagen durch Fachplaner mit ausreichender Dimensionierung der Wärmequelle unter Berücksichtigung der geologischen/geothermischen Gegebenheiten und der späteren Nutzung
- Verwendung von geeigneten, insbesondere frostsicheren Hinterfüllbaustoffen als Fertigprodukte auf der Grundlage einer unabhängigen bauaufsichtlichen Zulassung, beispielsweise durch das Deutsche Institut für Bautechnik oder die staatlichen Materialprüfungsanstalten der Bundesländer
- Einhalten der Rezepturen - vor allem im Hinblick auf die Wassermenge - und Mischzeiten mit Dokumentation und Dichtekontrolle der angesetzten Suspension vor der Verpressung auf der Grundlage genereller Vorgaben der Hersteller in den zugehörigen Datenblättern und der Zulassung
- Verpressen mit geeigneten und funktionstüchtigen Mischanlagen, insbesondere mit ausreichend leistungsfähigen Pumpen
- Verpressung mit Verpressschlauch oder -gestänge gemäß der VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 (2001) im Kontraktorverfahren von unten nach oben, um Wasser und Bohrspülung vollständig auszutragen und das Bohrloch ohne Lufteinschlüsse gleichmäßig zu verfüllen
- Vollständige Bohrlochverfüllung bis zum Austritt der Suspension an der Oberfläche, mit anschließender Dichtekontrolle

- Einhalten von Verpress-Standards (z.B. Suspensionsdichte), die von den Richtlinien bzw. Leitfäden der einzelnen Bundesländer sowie qualifizierenden Institutionen wie der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches (DVGW) e.V vorgeschrieben sind
- Berücksichtigung ausreichender Abbindezeiten der zementhaltigen Baustoffe; Aushärten der Verpressung mindestens 28 Tage lang ohne Inbetriebnahme der Anlage.
- Qualitätskontrolle in Abhängigkeit von der „Geothermischen Kategorie“⁶ durch Fachbehörden/Verbände/zuständige Personenkreise:
 - Dokumentation der Baustellentätigkeiten (Bohrung, Schichtenverzeichnisse, Probenahme, Verpress- und Prüfprotokolle etc.)
 - Rückstellproben der verpressten Hinterfüllbaustoffe mit Kontrolle der wichtigsten Parameter (Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Wasserdurchlässigkeit)
 - In-situ-Tests: Prüfung des geothermischen Ausbaues im Bohrloch durch messtechnische Untersuchungen

Ein enger Kontakt und intensiver Austausch zwischen den Fachgremien, den Genehmigungsbehörden und der Industrie ist unumgänglich, um Optimierungen und die zuverlässige Umsetzung der Richtlinien und Leitfäden zu gewährleisten. Wichtig ist jedoch, abgesehen von regionalen geologischen Besonderheiten, die Unübersichtlichkeit der bestehenden Leitfäden und Empfehlungen verschiedenster Verbände und Gremien zu beseitigen und klare Ausführungs- und Kontrollstandards zu definieren. Die in Bearbeitung befindliche Normung zu Erdwärmesonden⁷ wird dazu einen wichtigen Beitrag leisten. Zudem kann nur mit einer guten Qualifizierung auf allen Ebenen (Planer, Firmen, ausführendes Personal/Bohrmannschaft) ein entsprechender Qualitätsstandard garantiert werden. Dieser Standard muss zudem

⁶ Definition in geplanter Norm des NABau 005-05-21 AA „Geothermiesonden“ in Abhängigkeit von den geologischen und geothermischen Anforderungen

⁷ DIN-Ausschuss: NA-Bau 005-05-21 AA „Geothermiesonden“

kontinuierlich geprüft und dokumentiert werden und stellt ein wichtiges Element der Qualitätssicherung „Geothermie“ dar.

Angesichts stetig steigender Energiepreise für Primärenergieträger wie Erdöl und Erdgas und neuen gesetzlichen Regelungen zur Energieeffizienz von Gebäuden mit dem Energiepass sowie der Nutzung regenerativer Energien werden alternative Systeme zur Bereitstellung von Heiz- und Kühlenergie sowie zur Warmwasserbereitung weiterhin stark nachgefragt werden. Deshalb ist es von großer Wichtigkeit, dass in Wohn- ebenso wie in Geschäftsgebäuden eine optimierte Technik für effiziente Energienutzung zum Einsatz kommt. Die Betriebssicherheit und Langzeitbeständigkeit der Anlagen sind Grundvoraussetzungen für eine dauerhafte, erfolgreiche und nachhaltige Technologienutzung. Dies gilt insbesondere unter dem Gesichtspunkt, dass Anlagen zum Heizen und Kühlen von Gebäuden verwendet werden. Damit ergeben sich neue Fragen der Beanspruchung für die Hinterfüllmaterialien, die nur durch erweiterte Forschungsarbeiten zu beantworten sind. Herausforderungen für alle beteiligten Fachplaner bestehen zukünftig vor allen Dingen in der Sanierung von Gebäuden mit regenerativen Energiekonzepten.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in der messtechnischen Überwachung (Monitoring) bereits in Betrieb befindlicher Gebäude, die häufig mit sehr ambitionierten regenerativen Energiekonzepten ausgestattet werden, dann jedoch durch den Verbrauch vieler Hilfsenergien und/oder durch überfordertes Gebäudemanagement nicht effizient funktionieren. Auch die Erhebung systematischer Anlagendaten im Betriebszustand ist hierfür von großer Wichtigkeit, um die Beanspruchung der geothermischen Anlagen zu ermitteln. Damit können Daten für eine verbesserte Auslegung, d.h. die „energetisch-geothermische“ Wechselwirkung, gesammelt und ganzheitliche Energiekonzepte entwickelt werden.

7 Literaturverzeichnis

- AMT DER OÖ. LANDESREGIERUNG, GRUND- UND TRINKWASSERSCHUTZ [HRSG.] (2007): Eignungsuntersuchungen von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden - Technischer Endbericht. - 61 S.; Linz.
- AMT FÜR UMWELTSCHUTZ (AfU) - LANDESHAUPTSTADT STUTTGART (2006): Nutzung der Geothermie in Stuttgart. - Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz; 89 S.; Stuttgart.
- ALIGIZAKI, K. K. (2006): Pore structure of cement-based materials. - Modern Concrete Technology Series; London (Taylor & Francis).
- 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.
- ANNELIESE BUT (2001): Ein neuer Baustoff für die optimale Einbindung von Erdwärmesonden. - 3 R international **40**: 305.
- ARNING, E.; KÖLLING, M.; PANTELEIT, B.; REICHLING, J. & SCHULZ, H.D. (2006): Einfluss oberflächennaher Wärmegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter. - Grundwasser, **1**: 27-39.
- AUBERG, R. (1998): Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz widerstandes. - Dissertation, Fachbereich Bauwesen, Universität Essen.
- AYLMORE, L.A.G & QUIRK J.P (1967): The micropores distribution of clay mineral systems. - Journal of Soil Science, **18**: 1-17.
- BASSETTI, S.; ROHNER, E. & MATTHEY, B. (2005): Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden. - Schlussbericht der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie (SVG); Zürich.
- BLACKWELL, J. (1954): A Transient Flow Method for Determination of Thermal Constants of Insulating Materials in Bulk. - J. Appl. Phys., **25**: 137-144.; Melville, NY.

- BÖHMER, S. (2001): Dauerhaftigkeit wärme- bzw frostbeanspruchter Normmörtel unter besonderer Berücksichtigung der Rissbildung. - Dissertation; 196 S.; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- BRAUD, H. J. & MCNAMARRA S. (1989): Enhancement of Heat Transfer to Earth in Ground Coupled Heat Pump Bores. - ASAE/CSAE Meeting, Quebec.
- BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES VERTRIEBS GMBH (1998): Brookfield Digital Viskosimeter, Modell RVDV II+, Bedienungsanleitung.
- BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE E.V. [BWP] (2003): Leitfaden für die Erstellung von Erdwärmesonden für Wärmepumpenanlagen in Zusammenarbeit mit dem Bayer. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen und dem Bayer. Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie. - 20 S.
- BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE E.V. [BWP] (2005): Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrunternehmen - Information, Dokumentation.
- 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.
- CLAESSON, J. & ESKILSON, P. (1988): Conductive Heat Extraction to a deep Borehole, Thermal Analysis and Dimensioning Rules. - Energy **13**, 6: 509-527.
- COOK, D. J. & USHER, C. (1974): The Thermal Conductivity of Fibre-Reinforced Concrete. - Cement and Concrete Research **4**: 497-509.
- CRANDALL, A. C. (1946): House Heating with Earth Heat Pump. - Electrical World **126**, 19: 94 - 95, New York.
- DEUTSCH, V.; PLATTE, M. & VOIGT, M. (1997): Ultraschallprüfung - Grundlagen und industrielle Anwendungen. - 372 S.; Berlin.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK [DIBT] (2008): Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser. - Berlin (Ernst & Sohn).

- DEUTSCHE VEREINIGUNG DES GAS- UND WASSERFACHES E. V. [DVGW] (2003): Bau und Ausbau von Grundwassermessstellen - Arbeitsblatt W 121. - Bonn (Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH).
- DEUTSCHE VEREINIGUNG DES GAS- UND WASSERFACHES E. V. [DVGW] (2005): Qualifikationsanforderungen für die Bereiche Bohrtechnik, Brunnenbau und Brunnenregenerierung - Arbeitsblatt W 120. - Bonn (Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH).
- DRAFZ, H.-J. (1972): Wasser-Wasser-Wärmepumpe in einem Einfamilienhaus. - ETA Elektro-Wärme int **30**, A: 25 S., Essen.
- ECKHART, F. (1991): Grouting Procedures of Ground-Source Heat Pump Systems. - Oklahoma State University, Ground Source Heat Pump Publications; Tulsa.
- EISBACHER, G. H. (1996): Einführung in die Tektonik. - Stuttgart (Enke).
- EISWIRTH, M. (2001): Baustoffe im Grundwasser - Umweltverträglichkeit und Materialanforderungen. - Niedersächsische Akademie der Geowissenschaften, **19**: 7-16.
- EDEL`MAN, L. I.; SOMINSKII, D. S. & KOPCHIKOVA, N. V. (1961): Pore size distribution in cement rocks. - Colloid Journal, **23**, 2: 192-196 (im Original: 228-233).
- EUGSTER, W. (1991): Erdwärmesonden - Funktionsweise und Wechselwirkung mit dem geologischen Untergrund - Feldmessungen und Modellsimulation. - Dissertation; 139 S., Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- FELDMAN, R.F & SEREDA, P. (1970): A new model for hydrated Portland cement and its practical implications. - Eng. J. Can. **53**, 8-9: 53-59.
- FÖRDERGEMEINSCHAFT WÄRMEPUMPEN SCHWEIZ [FWS] (2004): Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen, Reglement. - 9 S.; Bern.
- GEHLIN, S. (2002): Thermal Response Test - Method Development and Evaluation. - Doctoral Thesis, Lulea University of Technologie, Sweden.

- GEOLOGISCHER DIENST NORDRHEIN-WESTFALEN (2004): Geothermie - Daten zur Nutzung des oberflächennahen geothermischen Potenzial, **2**: CD-ROM.
- GRÜBL, P.; WEIGLER, H. & KARL, S. (2001): Beton - Arten, Herstellung und Eigenschaften. - Handbuch für Beton, Stahlbeton- und Spannbetonbau, **2**: Berlin (Ernst & Sohn).
- HELLSTRÖM, G. & SANNER, B. (1994): PC-Programm zur Auslegung von Erdwärmesonden. - IZW-Bericht, **1**: 341-350.
- HERB, A. T. (2003): Indirekte Beobachtung des Erstarrens und Erhärtens von Zementleim, Mörtel und Beton mittels Schallwellenausbreitung. - Dissertation; 136 S., Fakultät für Bauingenieur- und Umweltwissenschaften, Universität Stuttgart.
- HERRMANN, V. J. (2003): Entwicklung neuer Hinterfüllmassen für un tiefe Erdwärmesonden. - Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität (TH) Karlsruhe; Diplomarbeit [unveröffentlicht].
- HERRMANN, V. J.; RÜSGEN, M. I.; ZORN, R.; STEGER, H.; HAUS, R.; PRIESS, C.; SCHRAMEDEI, R. & LEYENS, D. (2004): Technikumsversuch zum Vergleich thermisch verbesserter und herkömmlicher Hinterfüllmassen für un tiefe Erdwärmesonden. – Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut [Hrsg.]: OTTI-Profiforum Oberflächennahe Geothermie, Garching, 17.-18.02.2004: 203-208.
- HERRMANN, V.J., ZORN, R., STEGER, H. & CZURDA, K. (2006): Entwicklung neuer Frost-Tau-beständiger Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden. - Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut Regensburg [Hrsg.]: OTTI-Profiforum Oberflächennahe Geothermie, Freising, 05.-06.04.2006: 215-220.
- HERRMANN, V. J. & CZURDA, K. (2007): Frost-Tau beständige Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden. - Tagungsband der 16. Tagung für Ingenieurgeologie, Bochum, 07.-09.03.2007: 11-14.
- HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (HLUG) [HRSG.] (2004): Erdwärmenutzung in Hessen - Leitfaden für Erdwärmepumpen (Erdwärmesonden) mit einer Heizleistung bis 30 kW. - 32 S., Wiesbaden.

- HOHBERG, I. (2003): Charakterisierung, Modellierung und Bewertung des Auslaugverhaltens umweltrelevanter, anorganischer Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen. - Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau (DAfStb), **542**: 173; Berlin (Beuth).
- HUNN, M. (2004): Das Testfeld in Herbrachhofen und Untersuchungen neuer Hinterfüllmassen für untiefe Erdwärmesonden im Technikumsversuch. - Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe (TH); Diplomarbeit [unveröffentlicht].
- IKEN, H.-W.; LACHNER, R.; ZIMMER, U. & WÖHNL, U. (2003): Handbuch der Betonprüfung. - 5; Düsseldorf (Bau+Technik).
- JENNINGS, H. M. & TENNIS, P. D. (1994): Model for the developing microstructure in Portland cement pastes. - Journal of the American Ceramic Society **77**, 12: 3161-3172.
- JESSBERGER, H. L. (1994): Frost im Baugrund. - In: Smolczyk, U. (Hrsg.), Grundbautaschenbuch, Teil 1, **4**: 513-544, Berlin (Ernst & Sohn).
- JESSBERGER, H. L. & JAGOW-KLAFF, R. (2001): Bodenvereisung. - In: Smolczyk, U. (Hrsg.), Grundbautaschenbuch, Teil 2, **6**: 121-165, Berlin (Ernst & Sohn).
- KALTSCHMITT M., WIESE A. & STREICHER W. [HRSG.] (2005): Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. - 280 Abb.; Berlin, Heidelberg (Springer).
- KEMLER, E. N. (1946): Heat for the Heat Pump. - Heating, Piping & Air Conditioning **12**: 84-86, Cleveland.
- KIRN, H. (1983): Wärmepumpen – Band 1: Grundlagen der Wärmepumpentechnik. - Karlsruhe (C.F. Müller).
- LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN [LUA NRW; HRSG.] (2004): Wasserwirtschaftliche Anforderungen an die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme. - Merkblätter, Band 48; Essen.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) UNTER VORSITZ DES NIEDERSÄCHSISCHEN UMWELTMINISTERIUMS [HRSG.] (2002): Anforderungen an Erdwärmepumpen. - 5 S.; Hannover.
- LI, Z.; CHAU, C. K & LI, F. (2001): Effects of the natural polymer-based durability-enhancing admixture on the frost resistance of concrete. - Magazine of Concrete Research, **53**, 2: 73-84.

- 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.
- LOCHER, F. W. (2000): Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung. - Dresden (Technik-Verlag).
- LOHMEYER, G. (1997): Betontechnik, Handbuch für betongerechte Planung und Ausführung. - Düsseldorf (Beton-Verlag).
- LUDWIG, S. (1993): Frostgefährdung toniger Deponiebarrieren - Gefrierverhalten, bodenmechanische Eigenschaften, Mikrogefüge. - Schr. Angew.Geol., **26**: 225 S.; Karlsruhe.
- MINDESS, S. & YOUNG, J. F. (1981): Concrete. - New Jersey, USA (Prentice-Hall).
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG [HRSG.] (2005): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. - **4**: Stuttgart.
- MÖSER, B. (2000): Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung. - Dresden (Technik-Verlag).
- MÜLLER, L. (2004): Geotechnische Untersuchungen zur Optimierung der geothermischen Energiegewinnung mit Erdwärmesonden. - Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen **89**: 49-59.
- MÜLLER, L. (2007): Geotechnische Anforderungen an die Qualität und Ausführung von Erdwärmesonden. - Tagungsband der 16. Tagung für Ingenieurgeologie, Bochum, 07.-09.03.2007: 359-366.
- NIEDERBRUCKER, R. & STEINBACHER N. (2008): Eignung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden - Teil 1: Laboruntersuchungen. - bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau **2**: 48-56.
- PANNIKE, S.; KÖLLING, M.; PANTELEIT, B.; REICHLING, J.; SCHEPS, V. & SCHULZ, H. D. (2006): Auswirkungen hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahren von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten. - Grundwasser **1**: 6-18.

- PALECKI, S. & SETZER, M. J. (2003): Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz widerstandes von Hochleistungsbeton mittels des CDF/CIF-Tests. - 15. Internationale Baustofftagung (ibausil), Weimar, **2**, 2: 799-809.
- PARROTT, J. E. & STUCKES, A. D. (1975): Thermal Conductivity of Solids. - 157 S.; London.
- PRINZ, H. & STRAUß, R. (2006): Abriss der Ingenieurgeologie.- (Spektrum).
- POWERS, T. C. & BROWN YARD, T. L. (1947): Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. - Journal of American Concrete Institut **43**, 9: 549-602.
- REMUND C. P. & LUND J. T. (1993): Thermal Enhancement of Bentonite Grouts for Vertical GSHP Systems. – In: Den Braven, K. R. & Mei, V. [Hrsg.]: Heat and Refrigeration Systems, American Society of Mechanical Engineers **29**: 95-106.
- RICHTER, K. (2005): Erdwärmesonden - Hinweise für Planung und Ausführung (Teil 1). - bbr Fachmagazine für Brunnen- und Leitungsbau **3**: 36-40.
- RILEM Technical Committee TC 179-IDC Internal damage of concrete due to frost action (2004): Test methods of frost resistance of concrete: CIF-Test: Capillary suction internal damage and freeze thaw test - Reference method and alternative methods A and B. - Materials and Structures, **37**: 743-753.
- RÖSLI, A. (1979): Zur Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton. – Schweizer Ingenieur und Architekt, **46**.
- ROHNER, E. (2007): Schadensfälle bei Erdwärmesonden, Ursachen und Vermeidung. - Tagungsband des 7. Anwenderforums Oberflächennahe Geothermie, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI): 49-74, Regensburg.
- ROHNER, E. & RYBACH, L. (2001): Lebensdauer von Erdwärmesonden in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung - Schlussbericht des Bundesamtes für Energiewirtschaft; Bern.
- ROMBERG, H. (1978): Zementsteinporen und Betoneigenschaften. - Beton-Informationen **18**: 50-55.

- RÜBNER, K. & HOFFMANN, D. (2006): Characterization of Mineral Building Materials by Mercury-Intrusion Porosimetry. - Particle & Particle Systems Characterization **23**, 1: 20-28.
- RÜSGEN, M.I. (2003): Entwicklungsbegleitende Untersuchungen und theoretische Betrachtungen zu neuen Hinterfüllmassen für oberflächennahe Erdwärmesonden. – Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität (TH) Karlsruhe; Diplomarbeit [unveröffentlicht].
- SANNER, B.; KARYTSAS, C.; MENDRINOS, D. & RYBACH, L. (2003): Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. – European Geothermal Congress.
- SANNER, B. (2005): Die erdgekoppelte Wärmepumpe wird 60 Jahre alt. – bbr Fachmagazine für Brunnen- und Leitungsbau **12**: 60-67.
- SANNER, B.; MANDS, E., SAUER, M. & GRUNDMANN, E. (2007): Technology, development status, and routine application of Thermal Response Test. – Proceedings European Geothermal Congress, Unterhaching.
- SCHIPPERS, A. & REICHLING, J. (2005): Laboruntersuchungen zum Einfluss von Temperaturveränderungen auf die Mikrobiologie des Untergrundes. - Grundwasser **1**: 40-45.
- SCHMID, S.; WOLFF, H. & OPPELT, J. (2002): Verbesserung des Wärmeübergangs vom Gebirge auf das Wärmeträgerfluid beim Untertägig geschlossenen geothermischen Wärmetauscher. - In: 20 Jahre Tiefe Geothermie in Deutschland, 7. Geothermische Fachtagung 06.-08. November 2002 in Waren (Müritz), Geothermische Vereinigung, Geeste: 393-400.
- SEMPRICH, S. & STADLER, G. (2001): Injektionen. – In: Smolczyk, U. (Hrsg.), Grundbautaschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren, **6**: 59-94, Berlin (Ernst & Sohn).
- SEREDA, P. J.; FELDMAN, R. F. & RAMACHANDRAN, V. S. (1980): Structure formation and development in hardened cement pastes. – Sub-Theme VI-1 in Proceedings of the Seventh International Congress on Chemistry of Cement: VI-1/3-VI-1/44.
- SETZER, M. J. (1990): Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands von Betonwaren. – Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen - Universität GH Essen, Heft 49.

- SETZER, M. J. et al. (2001): Prüfvorschrift CIF-Test – Testmethode zur Bestimmung des Frostwiderstands von Beton. – *Materials and Structures*, **29**: 523-528.
- SETZER, M. J. & AUBERG, R. (1997): Frost Resistance of Concrete. – *RILEM Proc.* 34; London (Spon).
- SETZER, M. J. (2001): Micro-Ice-Lens Formation in Porous Solid. – *Journal of Colloid and Interface Science*, **243**: 193-201.
- SETZER, M. J. (2002): Frostscha-den – Grundlagen und Prüfung. – *Beton- und Stahlbetonbau* **97**, 7: 350-359.
- SIGNORELLI, S. (2004): Geoscientific Investigations for the Use of Shallow Low-Enthalpy Systems. – Doctoral thesis, Swiss Federal Institut of Technology; Zurich.
- SKOOG, D. A. & LEARY, J. J. (1996): Instrumentelle Analytik. – 898 S.; Berlin (Springer).
- 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.
- STAHL, W. & BELLINGER, G. (2003): Erdwärmesonden - spezielle bohrtechnische Verfahren und der Einsatz der Sonden in der Praxis. - *bbr Fachmagazine für Brunnen- und Leitungsbau* **3**: 33-37.
- STARK, J. & WICHT, B. (1996): Umweltverträglichkeit von Baustoffen.- Schriften der Bauhaus Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, **104**: 99 S.; Weimar.
- TAYLOR, H. F. W. (1992): Cement Chemistry. - San Diego (Academic Press).
- THOLEN, M. & WALKER-HERTKORN, S. (2008): Arbeitshilfen Geothermie - Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen. - Bonn (wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH).
- VDI-WÄRMEATLAS (2006): Grundwerk; Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. – **5**: Berlin (Beuth).
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE [VDI] (2000): VDI Richtlinie 4640 - Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 1: Grundlagen, Umweltfragen, Genehmigungen. - Berlin (Beuth).

- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE [VDI] (2001): VDI Richtlinie 4640 - Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpen.- Berlin (Beuth).
- VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE (VDZ) E. V. [HRSG.] (2002): Zement-Taschenbuch 2002.- **50**: Düsseldorf (Verlag Bau + Technik).
- VOIGT, T. (1994): Frosteinwirkungen auf mineralische Deponieabdichtungen. - Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Heft 47.
- VON CUBE, H. L. & STEIMLE, F. (1984): Wärmepumpen - Grundlagen und Praxis. - **2**: Düsseldorf (VDI-Verlag).
- WARNER, J. (2004): Practical Handbook of Grouting. - John Wiley & Sons (New Jersey).
- WASHBURN, E. W. (1921): Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material. - Proceedings of the National Academy of Sciences, **7**, 4: 115-116.
- WATERKOTTE, K. (1972): Erdreich-Wasser-Wärmepumpe für ein Einfamilienhaus. - ETA elektrowärme int. **30**, A: 39-43, Essen.
- WEBB, P. A. & ORR, C. (1997): Analytical methods in fine particle technology. - 301 S.: Norcross (Micromeritics Instrument Corporation).
- WISCHERS, G. (1990): Leistungsfähigkeit als Kriterium für die Normung von Zement und Beton. – Betonwerk + Fertigteiltechnik, **90**, 3: 51-60.
- WITTMANN, F. H. (1977): Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons. – Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 290: Berlin (Ernst & Sohn).
- WOERNLE, M. I. (2008): Anwendbarkeit künstlicher Neuronaler Netze zur Untergrundbewertung in der oberflächennahen Geothermie. – Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe.
- 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.
- ZTVE-StB 94 (1997): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau.

ZTVE-STB 95 (2002): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau.

**Zitierte Normen des Deutschen Institutes für Normung
(Beuth Verlag, Berlin)**

DIN 1054 Teil 1 (2001): Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 Beton - Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.

DIN 4022 Teil 1 (1987): Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und Fels.

EN ISO 22475 Teil 1 (2005): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen – Technische Grundlagen der Ausführung.

DIN 4030 Teil 1 (2008): Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase - Grundlagen und Grenzwerte.

DIN 4108 Teil 4 (1991): Wärmeschutz im Hochbau.

DIN 18124 (1997): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Korndichte Kapillarpyknometer - Weithalspyknometer.

DIN 18130 Teil 1 (1998): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes - Laborversuche.

DIN 18196 (1988): Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.

DIN 38414 Teil 4 (1984): Deutsches Einheitsverfahren zur Wasser, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) Teil 4: Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4).

DIN 38414 Teil 7 (1983): Deutsches Einheitsverfahren zur Wasser, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) Teil 7: Königswasserauszug.

- DIN 51001 Teil 1 (2003): Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) - Allgemeine Arbeitsgrundlagen.
- DIN 52104, Teil 1 (1982): Prüfung von Naturstein - Frost-Tau-Wechselversuch, Verfahren A bis Q.
- DIN 66111 (1989): Partikelgrößenanalyse - Sedimentationsanalyse.
- DIN 66133 (1993): Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion.
- DIN EN 196 Teil 1 (2005): Prüfverfahren für Zement – Bestimmung der Festigkeit.
- DIN EN 583 Teil 1 (1998): Zerstörungsfreie Prüfung, Ultraschallprüfung: Allgemeine Grundsätze.
- DIN EN 12504 Teil 4 (2004): Prüfung von Beton in Bauwerken - Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit.
- EN ISO 14688 Teil 1 (2003): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden: Benennung und Beschreibung.
- EN ISO 14688 Teil 2 (2004): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden: Grundlagen für Bodenklassifizierungen.
- DIN CEN/TS 12390 Teil 9 (2006): Prüfung von Festbeton - Frost- und Frost-Tausalz widerstand - Abwitterung.

Zitierte Gesetzestexte

- BBERG (2006): Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 9. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2933).
- LAGERSTÄTTENGESETZ (1974): Gesetz über die Durchforschung des Reichsgebietes nach nutzbaren Lagerstätten vom 4. Dezember 1934, RGBl. I S. 1223, verk. am 10.12.1934; BGBl. III 750-1, geändert durch das Einführungsgesetz zum Strafgesetzbuch vom 2. März 1974, BGBl. I S. 591.

- TA Lärm (1998): Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm); sechste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 26. August 1998; veröffentlicht im GMBI. Nr. 26 vom 28.08.1998, S. 503.
- VwVwS (1999): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen vom 17. Mai 1999 (BAnz. vom 29.5.1999 Nr. 98a).
- WHG (2007): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 9. August 2002 (BGBl. I S 3245), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 10. Mai 2007 (BGBl. S. 666)

Wassergesetze der Bundesländer (Auszug):

- BAYWG (1994): Bayerisches Wassergesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 19. Juli 1994, GVBl. 1994, S. 822.
- LWG (2004): Wassergesetz für das Land Rheinland-Pfalz in der Fassung der Bekanntmachung vom 22. Januar 2004; GVBl. 2004, S. 54.
- WG FÜR BADEN-WÜRTTEMBERG (2005): Wassergesetz für Baden-Württemberg (WG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Januar 2005 (GBl. S. 219, ber. S. 404), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 11. Oktober 2005 (GBl. S. 668).

ANHANG

ANHANG A

Ergebnisse der CIF-Tests



8 Frost-Tau-Zyklen (Prüffläche)



14 Frost-Tau-Zyklen (Prüffläche)

Anhang A1: Probekörper der Mischung B

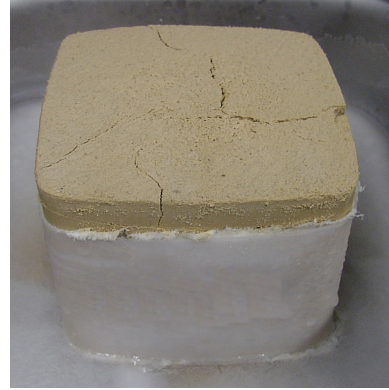
Bild links: Probekörper nach 8 Frost-Tau-Zyklen

Bild rechts: Probekörper am Prüfende nach 14 Frost-Tau-Zyklen;

Ursprungshöhe des Prüfkörpers: 70 cm, Länge: 11,5 cm



4 Frost-Tau-Zyklen



6 Frost-Tau-Zyklen



14 Frost-Tau-Zyklen

Anhang A2: Probekörper der Mischung D

Bild links: Probekörper nach 4 Frost-Tau-Zyklen

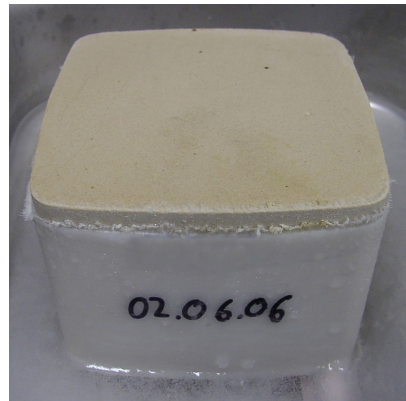
Bild rechts: Probekörper nach 6 Frost-Tau-Zyklen

Bild unten: Probekörper am Prüfende nach 14 Frost-Tau-Zyklen

Ursprungshöhe des Prüf-körpers: 70 cm, Länge: 11,5 cm



4 Frost-Tau-Zyklen



6 Frost-Tau-Zyklen



14 Frost-Tau-Zyklen



14 Frost-Tau-Zyklen (Prüffläche)

Anhang A3: Probekörper der Mischung F

Bild links oben: Probekörper nach 4 Frost-Tau-Zyklen

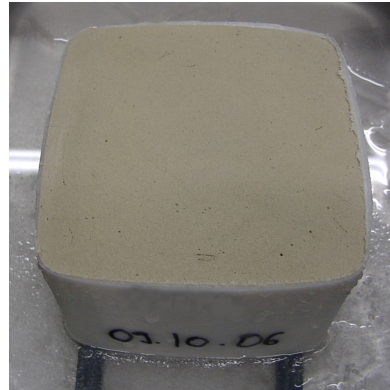
Bild rechts oben: Probekörper nach 6 Frost-Tau-Zyklen

Bilder unten: Probekörper am Prüfende nach 14 Frost-Tau-Zyklen

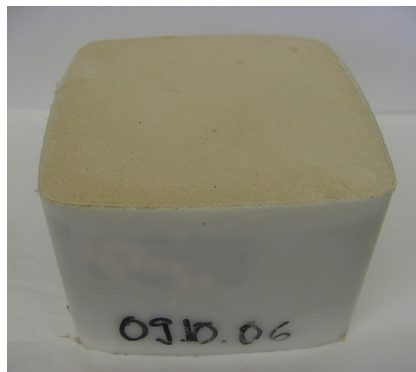
Ursprungshöhe des Prüfkörpers: 70 cm, Länge: 11,5 cm



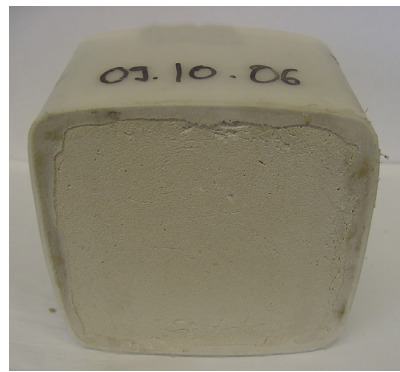
8 Frost-Tau-Zyklen



14 Frost-Tau-Zyklen



28 Frost-Tau-Zyklen



28 Frost-Tau-Zyklen (Prüffläche)

Anhang A4: Probekörper der Mischung H

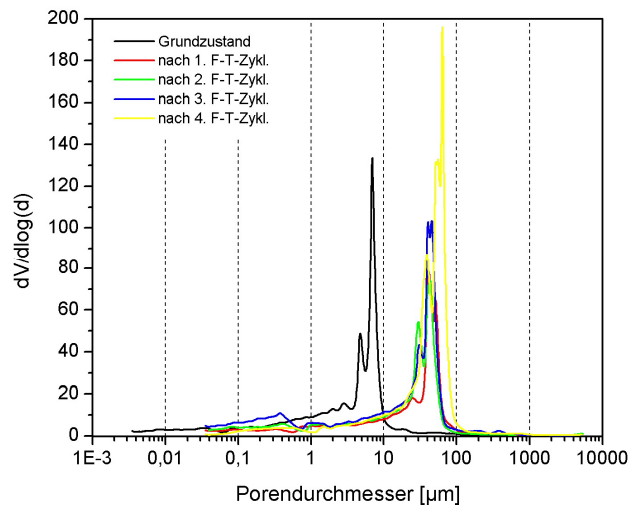
Bild links oben: Probekörper nach 8 Frost-Tau-Zyklen

Bild rechts oben: Probekörper nach 14 Frost-Tau-Zyklen

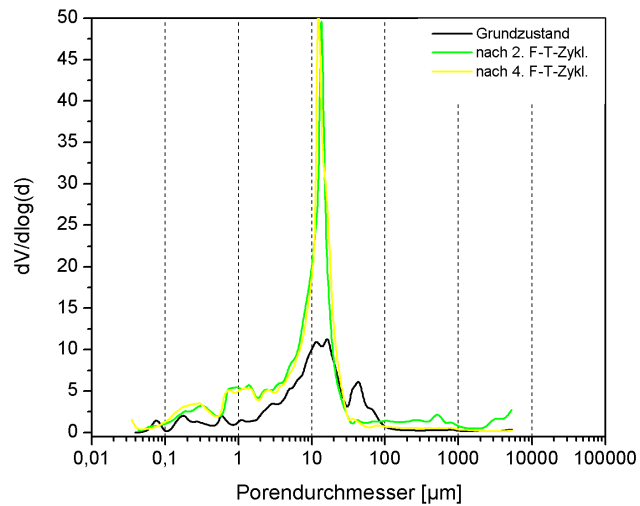
Bilder unten: Probekörper am Prüfende nach 28 Frost-Tau-Zyklen

Ursprungshöhe des Prüfkörpers: 70 cm, Länge: 11,5 cm

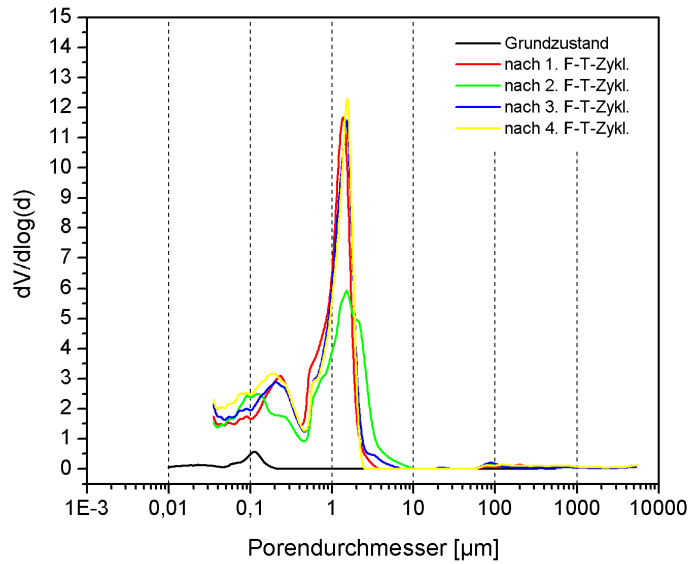
ANHANG B



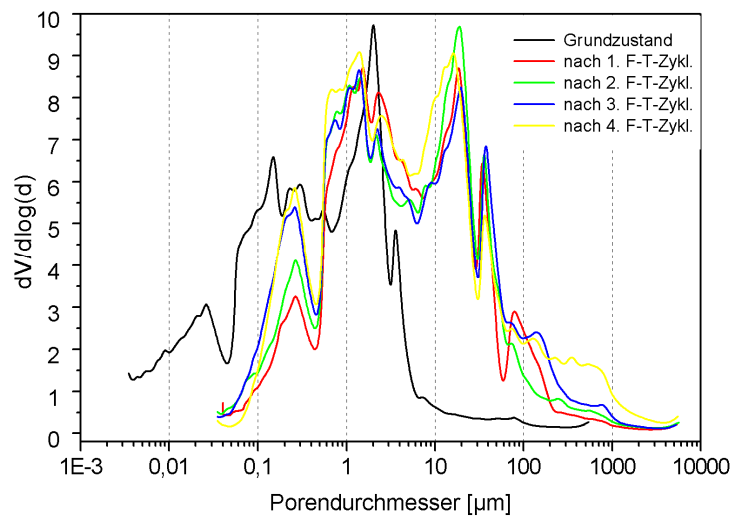
Anhang B1: Porenverteilung Mischung A, im Grundzustand sowie nach den verschiedenen Frost-Tau-Zyklen



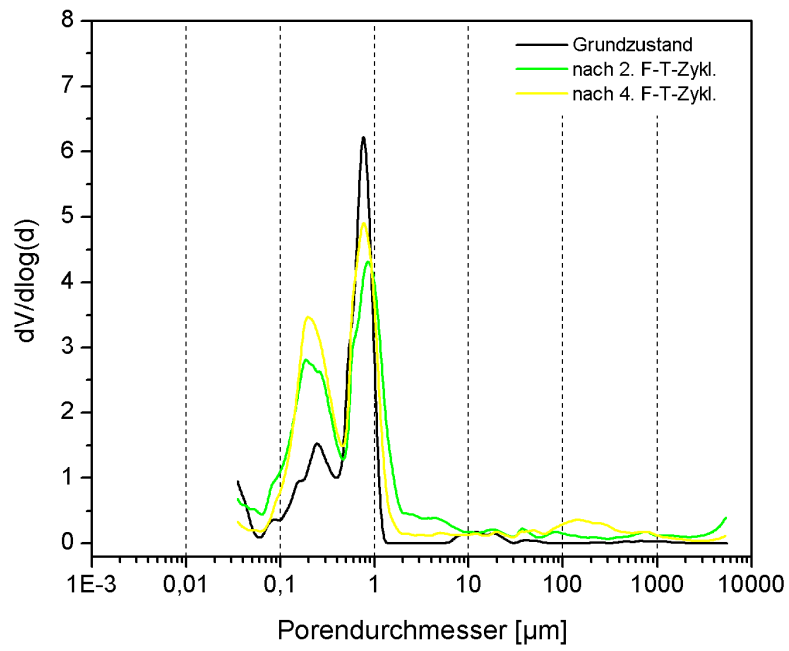
Anhang B2: Porenverteilung Mischung B im Grundzustand sowie nach den verschiedenen Frost-Tau-Zyklen



Anhang B3: Porenverteilung Mischung C im Grundzustand sowie nach den verschiedenen Frost-Tau-Zyklen



Anhang B4: Porenverteilung Mischung E im Grundzustand sowie nach den verschiedenen Frost-Tau-Zyklen



Anhang B5: Porenverteilung Mischung H im Grundzustand sowie nach den verschiedenen Frost-Tau-Zyklen