



Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren

**Investigations of the ice-wall grow and frost heave in
artificial ground freezing.**

**Recherches sur la formation corps gelés et du soulèvement
au gel pendant la procédure de congélation**

**ETH Zürich, Professur für Untertagbau
Dr. E. Pimentel
Dr. A. Sres
Prof. Dr. G. Anagnostou**

**Forschungsauftrag FGU 2005/003 auf Antrag der
Fachgruppe Untertagebau (FGU)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren

**Investigations of the ice-wall grow and frost heave in
artificial ground freezing.**

**Recherches sur la formation corps gelés et du soulèvement
au gel pendant la procédure de congélation**

**ETH Zürich, Professur für Untertagbau
Dr. E. Pimentel
Dr. A. Sres
Prof. Dr. G. Anagnostou**

**Forschungsauftrag FGU 2005/003 auf Antrag der
Fachgruppe Untertagebau (FGU)**

Dezember 2010

1342

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Georg Anagnostou

Mitglieder

Erich Pimentel

Anton Sres

Begleitkommission

Präsident

Felix Amberg

Mitglieder

Martin Bosshard

Sarah Springman

Roberto Cudmani

Ko-Finanzierung des Forschungsauftrags

ETH Zürich, Professur für Untertagebau

Antragsteller

Fachgruppe Untertagebau (FGU)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://partnershop.vss.ch> heruntergeladen werden

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	17
	Summary	27
1	Einleitung	37
1.1	Bedeutung des Gefrierverfahrens für den Untertagbau	37
1.2	Zielsetzung des Forschungsprojekts	38
1.3	Strukturierung des Berichtes	38
1.4	Projektbeteiligte	39
2	Bautechnologische Aspekte des Gefrierverfahrens	40
2.1	Gefrierverfahren	40
2.2	Sole-Gefrieren	42
2.3	Stickstoffvereisung	43
2.4	Bohrverfahren	44
2.5	Gefrierkörper	45
3	Thermo-hydraulische Eigenschaften des Bodens	49
3.1	Wassergehalt	49
3.2	Durchlässigkeit	50
3.3	Wärmekapazität	51
3.4	Wärmeleitfähigkeit	52
4	Das TH-Modell	53
5	Experimentelle Untersuchungen	55
5.1	Einleitung	55
5.2	Experimente aus der Literatur	55
5.3	Kälteanlage, Gefrierlanzen und Messsensoren	58
5.4	Bestimmung der Parameter	58
5.4.1	Geotechnische Parameter	58
5.4.2	Thermodynamische Parameter	59
5.5	Modellversuche mit einer Gefrierlanze	61
5.5.1	Versuchsaufbau	61
5.5.2	Durchgeführte Experimente	61
5.6	Grossmassstäbliche Modellversuche	63
5.6.1	Versuchsaufbau	63
5.6.2	Durchgeführte Experimente	67
6	Überprüfung theoretischer Prognosen über das Wachstum des Gefrierkörpers	73
6.1	Näherungslösungen	73
6.2	Numerisches TH-Modell	74
6.2.1	Experiment von Berggren	74
6.2.2	Einlanzenversuch	75
6.2.3	Grossmassstäblicher Modellversuch	76
7	Rechnerische Untersuchung ausgewählter Fragestellungen	79
7.1	Überblick	79
7.2	Wachstum einer Frostwand im homogenen Baugrund	79
7.2.1	Problemstellung	79
7.2.2	Schliesszeit	80
7.2.3	Kritische Sickergeschwindigkeit	83
7.2.4	Aufgefrierzeit zum Erreichen einer Wandstärke	84
7.2.5	Kühlleistung	85
7.3	Gefriervorgang im heterogenen Baugrund	85
7.3.1	Problemstellung	85
7.3.2	Zwei-Schichten-Modell	86
7.3.3	Drei-Schichten-Modell	87
7.4	Querschläge	89
7.4.1	Problemstellung	89
7.4.2	Queranströmung des Querschlags	89
7.4.3	Längsanströmung des Querschlags	95

8	Modellierung von ausgeführten Tunnelprojekten	98
8.1	U-Bahn Fürth – Durchquerung des Rednitztales.....	98
8.1.1	Projektbeschreibung	98
8.1.2	Modellierung	100
8.1.3	Simulation und Auswertung	102
8.1.4	Schlussfolgerungen	106
8.2	U-Bahn Neapel – U-Bahnstation Università	106
8.2.1	Projektbeschreibung	106
8.2.2	Eigenschaften des Untergrundes	108
8.2.3	Gefriermassnahme	109
8.2.4	Numerisches Modell	110
8.2.5	Simulation und Auswertung.....	111
8.2.6	Schlussfolgerungen	113
8.3	S-Bahn Zürich – Limmatunterquerung.....	114
8.3.1	Projektbeschreibung	114
8.3.2	Eigenschaften des Untergrundes	115
8.3.3	Zusätzliche Bauhilfsmassnahmen	116
8.3.4	Gefriermassnahme	117
8.3.5	Numerisches Modell	118
8.3.6	Simulationen und Auswertung	120
8.3.7	Schlussfolgerungen	128
9	Problematik der Eislinsenbildung	131
10	Berechnungsmodelle	133
10.1	Modellvorstellungen	133
10.2	Numerische Modelle	136
10.3	Modellauswahl	138
10.4	Beschreibung des TM-Modells	139
10.4.1	Grundlegende Gleichungen.....	139
10.4.2	Wachstumstensor	139
10.4.3	Die eislinsenbedingte Volumendehnungsrate	140
10.4.4	Sonstige Annahmen.....	142
11	Überprüfung des Berechnungsmodells anhand der Versuche von Fukuda	143
12	Eigene Versuche zur Eislinsenbildung	149
12.1	Einleitung	149
12.2	Modellmaterial.....	149
12.3	Vorversuche.....	151
12.3.1	Apparatur	151
12.3.2	Ablauf	152
12.3.3	Ergebnisse	153
12.4	Elementversuche	157
12.4.1	Apparatur	157
12.4.2	Ablauf	159
12.4.3	Ergebnisse	160
12.4.4	Thermische Berechnungen.....	166
12.4.5	Zusätzliche Vorversuche.....	168
13	Schlussbemerkungen zur Eislinienproblematik.....	169
	Anhänge	171
	Literaturverzeichnis	175
	Projektabschluss.....	181
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	185

Zusammenfassung

Von zentraler Bedeutung für den Untertagbau in wasserführendem Lockergestein ist die Standsicherheit des Vortriebsbereichs und – vor allem beim innerstädtischen Tunnelbau – die Beschränkung der Geländesetzungen. Bei geringer Überlagerung kann eine Instabilität im Vortriebsbereich bis zur Oberfläche fortschreiten und zum Tagbruch führen.

Die Kontrolle der Ortsbrust, die Beschränkung der Setzungen und die Verhinderung einer Sickerströmung gegen den Hohlraum, können durch Baugrundverbesserung (Verfestigung, Versteifung und Abdichtung des Baugrundes), durch Stützung und Versiegelung der Tunnelortsbrust und -leibung oder durch Kombinationen dieser Massnahmen erreicht werden.

Baugrundverbesserungsmassnahmen sind in der Regel kostenintensiv und zeitaufwändig. Tunnels in wasserführendem Lockergestein werden deshalb vermehrt durch den Einsatz geschlossener Schilde vorgetrieben, welche die Tunnelortsbrust und -leibung kontinuierlich während des Vortriebs stützen und das Grundwasser fernhalten. Allerdings kommen für hohe Bergwasserdrücke (> 6-10 bar) oder bestimmte Untertagbauten (wie kürzere Tunnels, vereinzelt Streckenabschnitte im Lockergestein, Querschläge usw.) nur konventionelle Vortriebsmethoden oder offene Betriebsmodi in Frage. In all diesen Fällen sind Baugrundverbesserungsmassnahmen oft unverzichtbar.

Der Baugrund kann entweder durch *Injektionen* oder durch *künstliche Vereisung* verfestigt, versteift und abgedichtet werden. Machbarkeit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit von Injektionsmassnahmen, können durch die Beschaffenheit des Baugrundes (hoher Feinkorngehalt, heterogener Aufbau) oder durch Umweltauflagen beschränkt sein. Fallweise kann das Gefrierverfahren vorteilhaft oder sogar die einzige technisch machbare Methode sein. Es ist generell anwendbar (feuchter Baugrund und geringe Strömungsgeschwindigkeit vorausgesetzt), die mechanischen Eigenschaften des gefrorenen Baugrundes sind verhältnismässig zuverlässig bestimmbar, das Verfahren ist reversibel und absolut schadstofffrei.

Beim Gefrierverfahren wird dem Boden Wärme entzogen. Man unterscheidet hierbei je nach Kälteträger zwischen zwei Verfahren, dem *cryogenen Gefrieren* mit Stickstoff (Stickstoffvereisung) und dem *Sole-Gefrieren* mit einer Salzlösung. In beiden Verfahren wird der Kälteträger durch das zu gefrierende Erdreich geführt, wo er durch sogenannte Gefrierlanzen dem Boden Wärme entzieht. Der Aufbau der Gefrierlanzen ist in beiden Fällen gleich und besteht aus einem inneren Fallrohr und einem Aussenrohr. Hierbei wirkt das Aussenrohr als Wärmetauscher zwischen Kälteträger und Erdreich. Ein wesentlicher Unterschied zwischen diesen beiden Verfahren ist die Temperatur des Kälteträgers. Diese liegt bei der Stickstoffvereisung zwischen -196 °C und etwa -80 °C und beim Solegefrieren zwischen -40 °C und etwa -20 °C.

Im Tunnelbau wird das Gefrierverfahren unterschiedlich eingesetzt: für Anfahr- und Einfahrplomben bei Schildvortrieben und Rohrvorpressungen, für die Überwindung von relativ kurzen Bereichen mit ungünstiger Geologie, für Startschächte, Querschläge, als Firstvereisung zur Vortriebssicherung, für das Box Jacking, zur Verbindung zweier Gegenvortriebe beim maschinellen Tunnelbau, zur Erstellung von SOS-Nischen, für den Kavernenbau, für das Ausbrechen von Aufweitungen, als Sanierungs- oder Notmassnahme zur Abdichtung bei Wasseranfall oder in unvorhergesehenen Störzonen beim TBM Vortrieb im Hartgestein oder in weichem Baugrund.

Das Gefrierverfahren erfordert hohes bautechnisches Niveau und seine Anwendung sollte daher auf klaren wissenschaftlichen Erkenntnissen und Überlegungen beruhen. Das Forschungsprojekt ist durch die Einschätzung motiviert, dass Bauhilfsmassnahmen im Allgemeinen und das Gefrierverfahren insbesondere in Zukunft vermehrt eingesetzt werden, weil neue Untertagbauvorhaben unter immer schwierigeren geotechnischen Randbedingungen realisiert werden. Man stellt auch fest, dass die Bereitschaft zu solchen aufwändigen Massnahmen in den letzten Jahren zugenommen hat. Sicher wird das Ge-

frierverfahren auch in Zukunft eher für Spezialfälle in Anwendung kommen, doch auch diese nehmen infolge des zunehmenden Schwierigkeitsgrades der Projekte zu. Zielsetzung des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung numerischer Modelle zur quantitativen Prognose der Baugrundgefriermassnahmen und die Bereitstellung von Entscheidungshilfen für deren Planung. Damit soll ein Beitrag zur rationalen Planung von Vereisungsmassnahmen geleistet werden.

Potentielle Probleme bei der Anwendung des Gefrierverfahrens stellen das Vorhandensein einer Grundwasserströmung sowie Oberflächenhebungen bzw. -setzungen während der Gefrier- bzw. der Auftauphase infolge Eislinsenbildung dar. Ersteres kann zu einer Verlangsamung der Bildung eines geschlossenen Gefrierkörpers führen oder dies gar verunmöglichen, während im zweiten Fall unzulässige Verformungen bestehender Gebäude die Folge sein könnten. In beiden Fällen ist die Behandlung des Problems komplex und erfordert die Berücksichtigung gekoppelter Prozesse, allerdings unter Zugrundelegung unterschiedlicher physikalischer Vorgänge. Aus diesem Grund werden diese Aspekte im vorliegenden Forschungsprojekt getrennt voneinander behandelt.

a) Gefrierverfahren im strömenden Grundwasser

Die mathematische Erfassung des Gefriervorganges im strömenden Grundwasser stellt einen wesentlichen Bestandteil des Forschungsprojektes dar. Eine Literaturstudie ergab, dass analytische Lösungen nur für den einfachen Fall einer einzelnen Gefrierlanze in einem homogenen Untergrund und unter Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit der thermo-hydraulischen Parameter abgeleitet worden sind. Für die Herleitung dieser Lösungen mussten vereinfachende Annahmen getroffen werden, so dass ihre Aussagekraft begrenzt ist. Ferner sind kaum Ergebnisse aus gut dokumentierten Experimenten, die eine ausreichende Datenbasis für die Überprüfung analytischer Lösungen oder numerischer Modelle liefern könnten, vorhanden. Dies gilt insbesondere für die Fälle einer verhältnismässig hohen Sickergeschwindigkeit des Grundwassers.

Bei der mathematischen Erfassung des Gefriervorgangs musste ein numerisches Modell speziell für die Simulation von Gefriermassnahmen formuliert, implementiert und anschliessend überprüft werden. Dabei wurde besonders geachtet auf (i) eine rigorose Berücksichtigung der physikalischen Zusammenhänge sowie auf (ii) die Entwicklung und Implementierung einfacher und effizienter Algorithmen.

Bei der Modellierung wurde die starke Temperaturabhängigkeit der thermo-hydraulischen Eigenschaften des Untergrundes beachtet. Der Boden ist ein Mehrstoffsystem bestehend aus dem mineralischen Feststoffanteil und Porenräumen. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde nur der gesättigte Zustand berücksichtigt. Nach Erreichen der Gefriertemperatur gefriert ein wesentlicher Teil des Wassers in den Porenräumen, aber es gefriert nicht vollständig. Mit weiter absinkenden Temperaturen gefriert immer mehr Wasser. Der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Temperatur kann mittels eines Potenzansatzes beschrieben werden. Die Durchlässigkeit des Bodens oberhalb der Gefriertemperatur hängt von der Viskosität des Wassers ab. Unterhalb der Gefriertemperatur nimmt sie hyperbolisch als Funktion des Wassergehaltes ab. Die spezifische Wärmekapazität kann unter der Annahme, dass sich der Boden wie eine ideale Mischung verhält, d.h. dass keine Reaktionen stattfinden, additiv aus den anteilmässigen Wärmekapazitäten und dererer Mischungskomponenten errechnet werden, d.h. aus den der Mineralien, des Wassers und des Eises. Insbesondere die Wärmekapazität des Wassers und des Eises sind temperaturabhängig. Hingegen kann die Wärmekapazität der Mineralien für praktische Belange im Temperaturbereich von Gefriermassnahmen als konstant betrachtet werden. Die latente Wärme hängt nur vom Wassergehalt ab. Die Wärmeleitfähigkeit des Bodens hängt nicht nur von der Materialzusammensetzung ab, sondern auch vom Korngefüge und kann mit Hilfe eines logarithmischen Ansatzes gut beschrieben werden. Dieser ergibt Werte die zwischen den hypothetischen Extremfällen einer Parallel- oder einer Reihenschaltung aller Komponenten liegen.

Das numerische Modell berücksichtigt neben der allgemeinen Wärmetransportgleichung auch die Erhaltung der Masse (Kontinuitätsgleichung). Diese sind über die Strömungsgleichung nach dem Darcy'schen Gesetz gekoppelt. Hierbei wird die oben genannte Temperaturabhängigkeit der thermo-hydraulischen Parameter realitätsnah berücksichtigt. Die Gleichungen wurden numerisch nach der FE-Methode in einem vorgegebenen 3D Bereich gelöst. Die zeitliche Integration erfolgte nach einem Einschnitt, nicht iterativen rückwärts Euler Schema. Um die Recheneffizienz zu steigern, werden weiterhin isoparametrische hexaedrale Elemente mit biquadratischen Formfunktionen (würfelförmige Elemente) für die Diskretisierung des Simulationsgebietes gewählt. Das numerische Modell ermöglicht die Berücksichtigung bzw. Modellierung eines beliebig aufgebauten Untergrundes, komplexer Geometrien der Gefriermassnahmen sowie variable externe Randbedingungen, wie die zeitabhängige Temperatur der Gefrierlanzen. Damit sind Modellierungen von komplexen aber realitätsnahen Baustellensituationen möglich.

Die Überprüfung der Prognosekraft des numerischen Modells erfolgte mehrstufig. Zunächst wurde das einzige in der Literatur gut dokumentierte Experiment, jenes von Berggren (Sickergeschwindigkeit $v = 0.24$ m/d), nachgerechnet. Der Vergleich der Messwerte von sechs Temperatursensoren mit den Simulationsergebnissen ergab eine gute Übereinstimmung während der ganzen Versuchsdauer. Die in der Literatur gefundene Datenbasis ist allerdings unzureichend, um eine zuverlässige Überprüfung des numerischen Modells durchführen zu können, insbesondere betreffend der Grenzfälle mit hoher Sickergeschwindigkeit sowie der 3D Situation. Deshalb war es erforderlich mittels eines eigens entwickelten physikalischen Modells Experimente durchzuführen. Um Massstabeffekte auszuschliessen und um eine ausreichende Flexibilität in der Auswahl der Randbedingungen zu gewährleisten (höhere hydraulische Gradienten, Lage und Abstand zwischen den Gefrierlanzen), wurde ein grossmassstäbliches physikalisches Modell konzipiert und gebaut.

Aufgrund des sehr grossen Aufwandes des grossmassstäblichen Modellversuches wurde eine stufenweise Vorgehensweise als zielführend erachtet. Zunächst wurde mit einem in kleinerem Volumen aufgebauten Einlanzenversuch (Volumen des Modellmaterials ca. 0.13 m³) mit nur einer Gefrierlanze und ohne Sickerströmung die Kälteanlage und das Mess- und Datenerfassungssystem gründlich ausgetestet. Nach diesem, sogenannten «Einlanzenversuch» wurde der grossmassstäbliche Modellversuch (Volumen des Modellmaterials 1.6 m³) für die vorgesehene Versuchsserie vorbereitet. Alle Versuche wurden in einem klimatisierten Raum durchgeführt.

Das Kühlsystem wurde für eine Minimaltemperatur von -35 °C ausgelegt. Es besteht hauptsächlich aus einer Kühlanlage mit einer Nennkälteleistung von 3.0 kW und den Gefrierlanzen. Als Kühlmedium wurde ein Wasser-Glykol-Gemisch verwendet. Die Kühlanlage ist elektronisch geregelt. Die Zulauf- und Rücklaufleitungen, welche die Kühlanlage mit den Gefrierlanzen verbinden, bestehen aus mit Neopren isolierten Kunststoffschläuchen. Die Gefrierlanzen bestehen aus einem inneren PVC-Fallrohr mit einem Innendurchmesser von 21 mm und einem äusseren Gefrierrohr aus Kupfer mit einem Aussendurchmesser von 41 mm. Für den Einlanzenversuch wurde die Lanze direkt an die Kühlleitungen angeschlossen, während beim grossmassstäblichen Modell die drei Gefrierlanzen an einem entsprechenden Verteiler- bzw. Sammelblock aus PVC und diese Blöcke wiederum an die entsprechenden Kühlleitungen angeschlossen wurden. Bei jedem Experiment werden die Ein- und Austrittstemperatur des Kühlmittels mittels Temperatursensoren sowie dessen Volumenstrom gemessen und aufgezeichnet.

Für die Überprüfung der Qualität der theoretischen Prognosen war es von grossem Vorteil, die Materialparameter völlig unabhängig von den oben genannten Modellversuchen zu bestimmen, dadurch konnte eine Kalibrierung der Materialparameter anhand der Versuchsergebnisse vermieden werden. Zu diesem Zweck wurden bodenmechanische und thermodynamische Elementversuche durchgeführt. Als Modellmaterial für alle Experimente wurde ein enggestufter Mittelsand mit einem Grösstkorn von 1 mm abgebaut aus den Flussablagerungen des Oberrheins verwendet. Die Kornverteilungskurve wurde mittels Siebanalyse bestimmt. Die mineralogische Zusammensetzung wurde untersucht und ergab u.a. einen Quarzgehalt von etwa 45% . Der Durchlässigkeitsbeiwert wurde mittels Grosspermeameter und die Korndichte mittels Pyknometerversuch bestimmt. Für die Ex-

perimente wurde der Sand trocken eingebaut und alle 10 cm verdichtet. Durch Wägung des eingebauten Materials und unter Berücksichtigung des belegten Volumens, wurde die trockene Einbaudichte ermittelt. Die restlichen Kennziffern, d.h. Porosität, Porenzahl und der Wassergehalt können von diesen Grössen abgeleitet werden.

Die spezifische Wärmekapazität des trockenen Sandes wurde kalorimetrisch ermittelt. Die Messresultate wurden nachträglich mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (Differential Scanning Calorimetry DSC) überprüft. Da die temperaturabhängige Wärmekapazität des Wassers und des Eises bekannt ist, kann die Wärmekapazität des Modellmaterials in Abhängigkeit des Wasser- und des Eisgehaltes ermittelt werden. Für die Bestimmung der anderen Parameter des Modellmaterials wurden neben Temperatursensoren ein TDR-System (Time-Domain-Reflectometer) zur Messung des Wassergehaltes, eine NSSP-Sonde (Non-Steady-State-Probe) zur Messung der Wärmeleitfähigkeit und eine Klimakammer eingesetzt. Die Temperatur in der Klimakammer wird mittels Thermostat geregelt und kann bis auf -30 °C gekühlt werden. In einem wasserdichten PVC-Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 450 mm wurden nebst trockenem Sand zwei Temperatursensoren, der TDR-Geber und die NSSP-Sonde, eingebaut. Nach Sättigung der Probe wurde diese in der Klimakammer eingebaut. Die Temperatur wurde danach stufenweise gesenkt bis das gesamte Porenwasser zugefroren war. Die ermittelte Wärmeleitfähigkeit wurde basierend auf deren mineralogischen Zusammensetzung und der in der Literatur veröffentlichten Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen Mineralien überprüft.

Der Einlanzenversuch besteht aus einem handelsüblichen Fass aus Kunststoff mit einem Fassungsvermögen von 250 l und einem inneren Durchmesser von ca. 60 cm. Er wurde mit 38 Temperatursensoren bestückt. Diese waren während der lagenweisen Füllung des Fasses mehrheitlich entlang dreier radialer Messlinien auf drei verschiedenen Ebenen platziert. Ebenfalls erfasst wurden die Soletemperatur sowie an verschiedenen Stellen die Lanzentemperatur. Das Fass wurde fachgerecht thermisch isoliert. Vor dem Sättigen wurde das gesamte Kälte- und Messsystem erfolgreich überprüft. Anschliessend wurde das eingebaute Material mittels einer perforierten Ringleitung gesättigt, die Kühlmaschine erneut gestartet und die Messung aller Sensoren in regelmässigen Zeitabständen aufgezeichnet. Die Messungen der Sensoren entlang der Messlinien zeigten ein konsistentes Bild. Sowohl das Kälte- als auch das Messsystem funktionierten einwandfrei. Die Messdaten dieses Versuches lieferten die Datenbasis für eine erste Überprüfung des numerischen Modells. Dabei konnte eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse gegenüber den Simulationen festgestellt werden. Ferner wurde die Kühlleistung mit Hilfe der entsprechenden Messwerte errechnet. Diese wurde verglichen mit der aus der Simulation ermittelten Kühlleistung, dabei war wieder eine gute Übereinstimmung zu verzeichnen.

Das grossmassstäbliche Modell besteht im Wesentlichen aus einem isolierten, mit Wasser durchströmbar, Sandkasten. Dadurch wird der Gefriervorgang mit fliessendem Grundwasser simuliert. Da seine Abmessungen $H \times B \times L = 1.3\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.3\text{ m}$ betragen, können hydraulische Druckgradienten von bis zu 1 m/m eingestellt werden. Der Sandkasten besteht aus 2 cm dicken PVC Platten. Er kann von der Seite her mit Wasser durchströmt werden. Die Einstellung eines stationären Strömungszustandes vor dem Starten des Gefriervorganges wird durch die Vorgabe der Wasserstände im Ein- und Austrittsbereich erreicht. Um ein 2D Anfangsströmungsfeld zu erzielen, wird im Ein- und Austrittsbereich eine Diffusorplatte vorgesetzt. Eingespeist wird Leitungswasser, dessen Temperatur erfasst wird. Die durchströmende Wassermenge im Eintrittsbereich wird mittels eines Mengenflussgebers gemessen und aufgezeichnet. Der Sandkasten wurde seitlich verstärkt und thermisch fachgerecht isoliert. In dem Sandkasten wurden während der lagenweisen Füllung des Materials 37 Temperatursensoren platziert, wobei die Mehrzahl dieser auf eine horizontale Messebene auf halbe Höhe des Modells verteilt wurden und zwar entlang von drei Messlinien. Zwei dieser Messlinien verlaufen parallel zur Wasserströmungsrichtung und durch die mittlere bzw. rechte Gefrierlanze, während die dritte senkrecht hierzu verläuft und die Gefrierlanzen verbindet. Um die Zuverlässigkeit des Messsystems zu erhöhen, wurde an gewissen Stellen redundant gemessen. Weitere Temperatursensoren wurden platziert, um die Randbedingungen während der Versuche zu erfassen. Nach dem lagenweisen Einbau des Materials wurde dieses durch Durch-

strömung und Hochstellen des Wasserreservoirs gesättigt. Es wurden insgesamt sechs Experimente mit verschiedenen hydraulischen Randbedingungen durchgeführt. Hierbei wurde die erwünschte Sickergeschwindigkeit vor dem eigentlichen Beginn aller Experimente, d.h. vor dem Gefrieren, durch genaue Positionierung des Wasserreservoirs eingestellt und das Modell solange durchströmt bis sich ein stationärer Zustand eingestellt hatte. Gleichzeitig mit dem Einschalten des Kühlaggregates wurde die Datenerfassung neu gestartet. Das Gefrieren wurde solange fortgesetzt bis entweder ein Zusammenschliessen des Gefrierkörpers um die benachbarten Gefrierlanzen verzeichnet wurde, oder bis nahezu stationäre Zustände eintraten. Die Messergebnisse der Sensoren zeigen bei allen Experimenten ein konsistentes Bild, d.h. redundante Sensoren zeigen nahezu gleiche Ergebnisse und Symmetriebedingungen. Ebenso widerspiegelt sich der Advektionseinfluss. Die Kühlleistung konnte aus dem in regelmässigen Zeitabständen gemessenen Volumenstrom des Kühlmittels und seiner Eintritts- und Austrittstemperatur unter Berücksichtigung seiner Wärmekapazität sowie den Leistungsverlusten im System berechnet werden.

Die numerische Nachrechnung der sechs grossmassstäblichen Modellversuche ergab eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Temperaturwerten. Dies gilt nicht nur für ruhendes Grundwasser und Fälle mit moderater Sickerströmung, sondern auch für Fälle mit hoher bis sehr hoher Sickergeschwindigkeit. Auch die berechneten Kühlleistungen stimmen gut mit den experimentellen Werten überein. Es ist zu vermerken, dass, dank der oben beschriebenen akkuraten Parameterbestimmung, bei keiner der Simulationen jegliche Art von Kalibrierung erforderlich war. Das wertet die Güte der Verifikation auf.

Ferner wurde anhand der Versuchsergebnisse die Aussagekraft der aus der Literatur bekannten und am meisten verwendeten Näherungslösungen überprüft. Dabei handelte es sich um die Lösungen für künstliche Vereisung bei ruhendem Grundwasser von Ständer und von Sanger & Sayles sowie diejenige bei strömendem Grundwasser von Victor. Die Lösungen geben das zeitliche Wachstum des Gefrierkörpers um eine Gefrierlanze herum, d.h. die benötigte Aufgefrierzeit zum Erreichen einer bestimmten Stärke des Gefrierkörpers. Da die Herleitung der Lösungen grundsätzlich für eine Gefrierlanze erfolgte, wurden die Lösungen von Ständer und Victor mit Hilfe von empirisch abgeleiteten Korrekturfaktoren für eine Gefrierlanzenreihe erweitert, d.h. es wurde der Vorkühleffekt, hervorgerufen durch eine benachbarte Gefrierlanze, berücksichtigt. Die Lösung von Sanger & Sayles sieht diese Erweiterung nicht vor. Alle Näherungslösungen zeigen bei den Experimenten ohne Sickerströmung eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen, der Vorkühleffekt muss jedoch unbedingt berücksichtigt werden. Bei den Experimenten mit Sickerströmung unterschätzt die Lösung von Victor die Aufgefrierzeit. Die Abweichungen sind proportional zur Sickergeschwindigkeit, d.h. je stärker die Konvektion ist, desto ungenauer wird die Lösung. Diese Lösung kann deshalb nur bedingt für Vordimensionierungszwecke eingesetzt werden. Der Ansatz von Sanger & Sayles ist der einzige, der eine Formel zur Abschätzung der erforderlichen Kühlleistung beinhaltet. Der Vergleich der errechneten Kühlleistung der Versuche ohne Sickerströmung ergab mit den theoretischen Werten eine gute Übereinstimmung.

Als Zwischenergebnis konnte festgehalten werden, dass das numerische Modell erfolgreich überprüft worden ist, und dass die Näherungslösungen für den Fall von ruhendem Grundwasser als Entscheidungshilfe z.B. für Vordimensionierungszwecke eingesetzt werden können. Lediglich der Fall mit Sickerströmung bedurfte weiterer Untersuchungen. Dies erfolgte auf der Basis einer Parameterstudie für eine Gefrierlanzenreihe in einem homogenen Untergrund. Dabei wurden die üblichen Parameter wie Sickergeschwindigkeit, Bodentemperatur, Durchmesser und Temperatur der Gefrierlanzen sowie deren Abstand untereinander variiert. Die Simulationen wurden hinsichtlich der Schliesszeit ausgewertet, d.h. der erforderlichen Gefrierzeit bis die Gefrierkörper um die Gefrierlanzen zusammenwachsen. Mit Hilfe dieser Ergebnisse und einer Dimensionsanalyse konnte ein Ausdruck für die kritische Sickergeschwindigkeit als Funktion der oben genannten Parameter festgelegt werden. D.h. für Vordimensionierungszwecke kann die Gefriermassnahme dank dieser Formel so ausgelegt werden, dass die errechnete kritische Sickergeschwindigkeit höher liegt, als der in-situ Wert, somit ist ein Schliessen des Gefrierkörpers trotz Sickerströmung gewährleistet. Es ist einleuchtend, dass je niedriger die in-situ Si-

ckergeschwindigkeit bezüglich der errechneten kritischen Geschwindigkeit ist, desto zuverlässiger wird die geplante Gefriermassnahme sein. Als weiteres Ergebnis dieser Studie konnte ein Ausdruck zur Berechnung der erforderlichen Gefrierzeit bis zum Schliessen des Gefrierkörpers gewonnen werden, und zwar als Funktion der Schliesszeit im ruhenden Grundwasser und des Quotienten der in-situ zu der kritischen Sickergeschwindigkeit.

Ebenfalls wurde der Einfluss der natürlichen Bodenheterogenität auf das Gefrierkörperwachstum untersucht. Dafür wurden ein horizontal geschichteter Untergrund mit vertikal platzierten Gefrierlanzen und eine horizontal und senkrecht zu der Gefrierlanzenreihe verlaufende Sickerströmung modelliert. Berücksichtigt wurden ein Zwei-Schichten-Modell aus gleichstarken Schichten und ein Drei-Schichten-Modell als sogenanntes Sandwichmodell. Als Modellmaterialien wurde neben dem mittelfeinen Sand aus den Experimenten ein weniger durchlässiger Sand sowie Silt betrachtet. Aufgrund der gewählten Anordnung ist die initiale Fliessgeschwindigkeit für die beiden Schichten unterschiedlich hoch entsprechend deren Permeabilität. Aus den Simulationsergebnissen geht hervor, dass bei Schichten mit sehr unterschiedlichen Permeabilitäten (Grössenordnung von 2 10-er Potenzen, wie z.B. zwischen Silt und mittelfeinem Sand) keine gegenseitige Beeinflussung feststellbar ist. Dagegen ist bei einer moderaten Abweichung der Permeabilität zwischen den Schichten (in der Grössenordnung einer halben 10-er Potenz, wie z.B. zwischen Sand und mittelfeinem Sand) ein ausgeprägter Bereich nahe der Kontaktzone mit lokal erhöhter Sickergeschwindigkeit und daher verlangsamter Schliesszeit zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Bereiche mit niedriger Permeabilität schneller gefrieren und daher das im Fernfeld dieser Schicht eingespeiste Grundwasser in die noch nicht gefrorene Schicht höherer Permeabilität umgeleitet wird, wodurch sich lokal die Sickergeschwindigkeit erhöht. Dieser Effekt ist ausgeprägter, je stärker die Sickergeschwindigkeit ist und kann insbesondere im Drei-Schichten-Modell ein Schliessen des Gefrierkörpers verhindern. Da in-situ Abweichungen in dieser Grössenordnung in der Permeabilität nicht auszuschliessen sind bzw. der Genauigkeit, mit welcher dieser Parameter bestimmt werden kann, entsprechen, wird empfohlen die Gefriermassnahme konservativ bezüglich der Schliesszeit auszulegen, d.h. tendenziell kürzere Schliesszeiten anstreben.

Eine der wichtigsten Anwendungen des Gefrierverfahrens im Untertagbau ist jene als Bauhilfsmassnahme für die Auffahrung von Querschlägen. Es wurden zwei grundsätzliche Querschlagssituationen untersucht und zwar mit einer horizontalen Grundwasserströmung parallel zu den Haupttröhen und senkrecht dazu. Im ersten Fall lag der Schwerpunkt bei der Optimierung der Lanzenverteilung um den Querschlag, während im zweiten Fall die Identifizierung von Problemstellen im Vordergrund stand. Für beide Fälle wurde die Geometrie der Röhren konstant gehalten, d.h. der Durchmesser der Haupttröhen betrug 8 m und deren Achsen verliefen horizontal und parallel mit einem Abstand von 24 m. Die Querschläge hatten einen Durchmesser von 5 m. Der Untergrund wurde als homogen angesehen und bestand aus dem gleichen Modellmaterial wie aus den Experimenten. Im ersten Fall wurden verschiedene Lanzenanordnungen modelliert. Die optimale Anordnung, d.h. bei welcher die kürzeste Gefrierzeit erforderlich ist bis überall eine Mindeststärke des Gefrierkörpers von 2 m erreicht wird, ohne dass dabei der mittlere auszubrechende Bereich zufriert, wurde mit einer gleichmässigen Verteilung der Gefrierlanzen entlang einer Ellipse um den Querschlag ermittelt. Gegenüber der üblichen Anordnung erfordert diese entlang eines Kreises vier zusätzliche Gefrierlanzen, dabei reduziert sich die Gefrierzeit jedoch um etwa 30%. Im zweiten Fall verursacht die Längsströmung ein verspätetes Schliessen des Gefrierkörpers im Kontaktbereich zwischen Haupttunnel und Querschlag und zwar im Firstbereich. Dies könnte eventuell durch die Platzierung zusätzlicher kurzer Gefrierlanzen in dieser Problemzone beseitigt werden.

Die oben untersuchten Fälle bzw. Fragestellungen sind zwar praxisrelevant, aber beziehen sich auf idealisierte Situationen. Um die Praxistauglichkeit des entwickelten Modelles zu überprüfen, wurden bereits ausgeführte Vortriebe simuliert und die Ergebnisse mit Feldmessungen verglichen. Es wurden drei U-Bahn bzw. S-Bahn Projekte simuliert: Die Durchquerung des Rednitztales in Fürth, die U-Bahn Station Universität in Neapel und die Limmatunterquerung in Zürich. Diese Modellierungen hatten unterschiedliche Schwerpunkte. Im ersten Fall sollte die gesamte Gefriermassnahme bis zur Schliesszeit als 3-D simuliert werden. Da die Ausführung dieser Massnahme sehr gut dokumentiert war, war

eine realitätsnahe Modellierung unter Berücksichtigung eines nicht horizontal geschichteten Untergrundes, eines gekrümmten Verlaufes der Gefrierlanzen (Länge etwa 60 m) und einer variablen Gefrierlanzentemperatur möglich. Die Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Feldmessungen. Es ist zu erwähnen, dass in der Literatur bislang über keine vergleichbar aufwändige Simulationen einer Gefriermassnahme (über zwei Mio. Elemente als gekoppeltes thermo-hydraulisches Problem) berichtet worden ist. Die weiteren Fälle wurden in 2-D simuliert. Die Unterlagen zum Projekt Neapel enthielten keine Angaben zu den thermischen Parametern. Diese wurden mit Hilfe von Feldmessungen an einem Querschnitt mittels Back-Analysis ermittelt. Der Vergleich der Simulationsergebnisse an einem anderen Querschnitt mit den entsprechenden Feldmessungen ergab eine gute Übereinstimmung. Im dritten Projekt war bekannt, dass die Gefrierzeit die Prognose während der Ausführung nicht nur deutlich überschritt, sondern auch, dass vermutlich ohne den Einsatz von Injektionsmassnahmen zur Hemmung der Sickerströmung kein geschlossener Gefrierkörper entstanden wäre. Die durchgeführten Simulationen zeigen die grosse Sensitivität der Gefriermassnahme in Bezug auf die Strömungsverhältnisse. Mit diesen drei Fallbeispielen konnte nachgewiesen werden, dass das numerische Modell für die Simulation komplexer Gefriermassnahmen entsprechend praxisrelevanter Bauprojekte sowie für nachträgliche Untersuchungen geeignet ist.

b) Eislinsenproblematik beim Gefrierverfahren

Bei den sogenannten frostempfindlichen Böden können sich beim Gefrieren Eislinsen bilden, die dadurch entsprechende Hebungen verursachen. Es ist seit langem bekannt, dass dieses Phänomen nicht durch die Volumendehnung des Eises beim Gefrieren verursacht wird. Beobachtungen aus Labor- und Feldversuchen bilden die Grundlage für alternative Erklärungen und konzeptionelle Modelle. Sehr grobkörnige Böden gelten mangels Hydrathüllen oder Kapillaren als nicht frostempfindlich und ebenso tonige Böden aufgrund ihrer sehr niedrigen Permeabilität. Ein wesentlicher Aspekt im Zusammenhang mit der Eislinsenbildung ist, dass das Wasser in den Porenräumen nicht vollständig gefrieren kann. Aufgrund osmotischer oder Kapillarpotentiale können sich Saugspannungen bilden, die eine Wassermigration verursachen können (Modell der primären Frosthebung). Die aktuellere Modellvorstellung - auch bekannt als Modell der sekundären Frosthebung - basiert auf dem Effekt des Auftauens und Wiedergefrierens (thermal regelation) infolge Druckänderungen und dem Vorhandensein eines Temperaturgradienten entlang der Partikel. Das Modell erklärt auch die Segregation zwischen Eislinse und Bodenpartikel. Bei der Eislinsenbildung können alle genannten Mechanismen der primären und sekundären Frosthebung aktiviert sein. Allerdings ist bei grösseren Hebungen von einem ausgeprägten sekundären Hebungsvorgang auszugehen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten vordergründig tunnelbauspezifische Probleme beim Gefrierverfahren im Zusammenhang mit der Eislinsenbildung untersucht werden. Daher sah das Forschungsprogramm die Implementierung eines entsprechenden numerischen Modells vor. Aufgrund der Komplexität der Vorgänge ist zu erwarten, dass einfache Modelle Unzulänglichkeiten aufweisen, während rigorosere Modelle gewiss ihre Vorteile in der Grundlagenforschung haben. Allerdings können sich bei diesen Modellen Nachteile bezüglich ihrer Anwendbarkeit für die praxisorientierte Forschung ergeben. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wurden die bekannten numerischen Modelle beurteilt. Diese können in empirische/semi-empirische, hydrodynamische, «Rigid-Ice», «Segregation Potential», thermo-hydraulisch-mechanische (THM)-Modelle und thermo-mechanische (TM)-Modelle eingeteilt werden. Die empirischen und semi-empirischen Modelle berücksichtigen massgebende physikalische Vorgänge nicht oder nicht für den allgemeinen Fall und sind daher nur bedingt einsetzbar. Das hydrodynamische, das Rigid Ice und das Segregation-Potential Modell sind eindimensional formuliert worden. Daher ist ihr Einsatzbereich sehr eingeschränkt. Das THM-Modell ist das rigoröseste und daher ursprünglich für das Forschungsvorhaben favorisierte Modell, aber eine nähere Prüfung ergab, dass neben der grösseren Schwierigkeit der Bestimmung von unbekanntem Funktionalitäten des ungefrorenen Wassergehaltes und der Durchlässigkeit bezüglich der Temperatur, insbesondere im «frozen fringe» Bereich, mit weiteren Unklarheiten zu rechnen war, wie dem Zusammenhang zwischen Spannungstensor und Krümmung der Frostgrenze bezüglich der Wachstumsrichtung der Frostkristalle. Hinzu kommt, dass das THM-Modell für kleine Dehnungen und ein linear elastisches Materialverhalten formuliert

wurde und daher je nach Problemfall erweitert werden müsste. Aufgrund dieser Probleme wurde die Bestimmung der unbekanntenen Funktionalitäten sowie eine Verbesserung bzw. Erweiterung des Modells als nicht erfolgsversprechend eingestuft. Stattdessen wurde das TM-Modell von Michalowski & Zhu (2006) für die Implementierung und die anstehenden Modellierungen praktischer Problemstellungen gewählt. Es bildet die Eislinnenbildung unter Berücksichtigung von Auflasten, gemessen an in der Literatur veröffentlichten Messergebnissen von Experimenten, gut nach. Ferner können die Materialkennwerte mit vertretbarem Aufwand bestimmt werden. Gegenüber den Mikromodellen (THM-Modelle) ist eine Erweiterung für den 2D Fall wesentlich einfacher und konnte in ein allgemein verfügbares FE Programm implementiert werden. Im Zuge dieser Implementierungen wurden Verbesserungen bezüglich der Beziehung zwischen Porosität und Volumendehnung und der zu berücksichtigenden Vergleichsspannung zur Eindämmung des Hebungsprozesses vorgenommen. Diese Verbesserungen basieren auf Plausibilitätsbetrachtungen.

Die Überprüfung der TM-Modelle, d.h. des Modells von Michalowski & Zhu sowie einem mit den implementierten Verbesserungen, erfolgte mittels der von Fukuda veröffentlichten zehn Frosthebungsversuche. Einer dieser wurde nach der Step-Freezing-Methode, die übrigen nach der Ramped-Freezing-Methode unter teilweise verschiedenen Auflasten durchgeführt. Die Kalibrierung, d.h. die Bestimmung der optimalen Materialparameter, erfolgte mit Hilfe einiger dieser Versuche während die restlichen für die Überprüfung herangezogen wurden. Dies ergab, dass die Simulationsserien mit den von Michalowski & Zhu vorgeschlagenen Parametern keine gute Übereinstimmung mit den Messungen zeigte. Nach der Optimierung der Parameter konnte mit diesem Modell eine Verbesserung erzielt werden. Eine ebenso gute Übereinstimmung konnte mit dem verbesserten Modell erreicht werden. Da hier im Gegensatz zu den anderen Modellen die Definierung der Parameter aus physikalischer Sicht plausibler erscheinen, wird dieses Modell als das am Besten geeignete für die Modellierung von Hebungen infolge Eislinnenbildung eingestuft.

Die Versuchstechnik für eindimensionale Experimente ist weitestgehend entwickelt, allerdings sind in der Literatur relativ wenige Ergebnisse von gut dokumentierten Experimenten zu finden. Diese Versuche bestehen im Wesentlichen aus einer gesättigten Probensäule, deren beide Enden unterschiedlichen thermischen Bedingungen ausgesetzt werden (sogenannter Frosthebungsversuch). Variationen in der Ausführung betreffen die relative Änderung der Temperatur an beiden Probenenden sowie die allfällige Aufbringung einer Auflast. Die Durchführung von eigenen experimentellen Untersuchungen verfolgte das Ziel eine Datenbasis nicht nur von eindimensionalen, sondern auch von grossmassstäblichen, zweidimensionalen Experimenten zu erzeugen. Ergebnisse aus Letzteren sind bislang in der Literatur nicht veröffentlicht worden. Die Probenvorbereitung bzw. der -einbau kann entweder durch Zugabe von Wasser oberhalb der plastischen Grenze, Mischung, Einbau und Konsolidation oder durch trockenen Einbau und Sättigung mittels Durchströmung erfolgen. Für die zweite Vorgehensweise kommen nur relativ sandige, aber dennoch frostempfindliche Böden in Frage. Aufgrund der angestrebten Durchführung zweidimensionaler Frosthebungsversuche wurde diese Einbautechnik favorisiert. Um das Versuchsprogramm zu optimieren wurde eine mehrstufige Vorgehensweise gewählt. In einer ersten Phase sollte anhand von Vorversuchen ein geeignetes Modellmaterial ausgewählt werden. Die hierfür verwendete Anlage erlaubt zwar nur den Einbau von kleineren Proben, dafür können bis sechs Versuche gleichzeitig gestartet werden. In einer zweiten Phase sollte anhand von Elementversuchen die Datenbasis mit eigenen Versuchen verbessert werden. Im Gegensatz zu den Vorversuchen können hier die Randbedingungen nicht nur genauer und flexibler eingestellt werden, sondern sie ermöglichen auch die Erfassung der Temperaturverteilung entlang der Probe sowie der aufgenommenen Wassermenge. In der letzten Phase sollte ein aufwändiger, grossmassstäblicher 2D Frosthebungsversuch durchgeführt werden. Messtechnisch stünden hier nicht nur die Erfassung des Temperaturfeldes, sondern auch des erwarteten 2D Verformungsfeldes im Vordergrund.

Die Durchführung der Vorversuche erfolgte mit Mischungen aus dem mittelfeinen Sand und Basalt- oder Kalkmehl. Es wurden fünf Serien mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen durchgeführt, wobei für die ersten zwei Serien Basaltmehl und in den letzten drei Kalkmehl beigemischt wurde. Anschliessend wurde in regelmässigen Zeitabständen die Hebung gemessen. Bei den meisten Proben kam es zur Eislinnenbildung, allerdings

erwartungsgemäss nicht bei den Proben mit geringem Feinanteil (weniger als 15%). Bei praktisch allen Serien kam es bei einigen Proben zur Makroeislinnenbildung. Bei den restlichen Proben kam es in unterschiedlichem Mass zur Mikroeislinnenbildung. Der zeitliche Verlauf der Hebungsrates war nahezu konstant, insbesondere bei den Proben, die Makroeislinnen bildeten, während bei den meisten restlichen Proben eine eher gleichmässig abnehmende Tendenz erkennbar war. Nach der Durchführung der ersten fünf Serien konnte festgestellt werden, dass beide untersuchten Feinmaterialien grundsätzlich für die Frosthebungsversuche geeignet sind. Die Mischverhältnisse mit einer Zugabe zwischen 20% und 30% Gesteinsmehl führte, ausser bei einer einzigen Probe, immer zur Eislinnenbildung. Erwartungsgemäss ist die Eislinnenbildung bei einer geringeren Beimengung unwahrscheinlich und bei der höchsten untersuchten Beimengung von 35% kam es sogar vor, dass nicht einmal Hebungen infolge des Frierens des Porenwassers zu verzeichnen waren. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Verdichtung der Probe in trockenem Zustand nicht ausreichend war. Da die Ergebnisse der Frosthebungsversuche mit beiden Feinmaterialien ähnlich waren, wurde aus hygienischen Gründen, d.h. um die Feinstaubbildung von Quarz zu vermeiden, das Kalkmehl bevorzugt. Eine Beimengung zwischen 25% und 30% wurde für die nachfolgenden Elementversuche als optimal erachtet.

Es wurden drei Elementversuche durchgeführt mit Beimengungen von 30% (zwei Versuche) und 25% (ein Versuch). Alle Versuche wurden als Step-Freezing-Methode gestartet, d.h. das obere Ende der Probe wurde deutlich unter dem Gefrierpunkt schlagartig gekühlt, während die Temperatur am unteren Ende der Probe konstant und oberhalb des Gefrierpunktes gehalten wurde. Bei keinem dieser Versuche konnte die Bildung von Eislinnen festgestellt werden. Nach dem Einstellen von stationären Zuständen wurden die Versuche abgebrochen. Da der erste Versuch mit einer moderaten Wärmedämmung und unter Raumtemperatur durchgeführt wurde, bestand der Verdacht, dass die Ursache der Nicht-Eislinnenbildung an eine unvollkommene seitliche Dämmung zurückzuführen war. Daher wurde die seitliche Dämmung für die nachfolgenden Versuche verstärkt und eine Klimakammer gebaut, um die Umgebungstemperatur möglichst nahe an der höchsten Temperatur des Versuches einstellen zu können. Der letzte Elementversuch diente in erster Linie der Bestätigung der Ergebnisse aus den vorangegangenen Versuchen, allerdings unter Berücksichtigung einer Mischung mit leicht geringerem Feinanteil von 25%. Es ist zu vermerken, dass es bei allen Vorversuchen mit Proben in diesem Mischungsverhältnis zur Eislinnenbildung kam.

Da es bei keinem der drei Elementversuche zur Eislinnenbildung kam, wurden parallel zum dritten Elementversuch drei weitere Serien von Vorversuchen durchgeführt, mit der Zielsetzung mögliche Ursachen für die Probleme bei den Elementversuchen zu klären bzw. auszuschliessen. So wurde die Serie 6 mit nur drei Proben der Mischung Sand zu Kalkmehl von 70%:30%, die Serie 7 als vollständige Serie, d.h. sechs Proben mit einer Mischung von 75%:25% und die Serie 8 ebenfalls mit dieser Mischung, allerdings wurden bei drei Proben künstliche dünne Zwischenschichten von reinem Kalkmehl eingebaut. Bei diesen drei Proben wurde abwechselnd alle 10 mm verdichteter Bodenmischung, eine 1 mm Lage Kalkmehl kompaktiert. Der Grund für die Prüfung geschichteter Proben war, zu untersuchen, ob sich Eislinnen infolge von lokalen Heterogenitäten leichter bilden, als im homogenen Fall. Nach dem Versuch der Serie 6 zeigten alle drei Proben Eislinnen, aber im Gegensatz zu den ersten Serien kam es nicht zur Bildung von Makroeislinnen. Unerklärlich bleibt auch, weshalb es bei einer Probe erst mit drei Tage Verspätung zur Eislinnenbildung kam. Bei den restlichen Proben, d.h. denjenigen aus den Serien 7 und 8 kam es zu keiner Eislinnenbildung. Daraufhin wurde aufgrund der mangelnden Erfolgsaussichten sowohl auf die Durchführung weiterer Elementversuche, als auch den grossmasstäblichen Versuch verzichtet.

Nach der ausführlichen Auseinandersetzung mit der Problematik der Eislinnenbildung kann behauptet werden, dass dieses Phänomen weitestgehend bekannt ist, und dass dessen wichtigste Einflussfaktoren bereits identifiziert worden sind. Dennoch sind die Zusammenhänge der Eislinnenbildung aufgrund der Komplexität der involvierten Vorgänge noch nicht vollständig verstanden worden. So ist beispielsweise für die Grenzfälle noch unklar, unter welchen Bedingungen (Materialzusammenstellung und thermo-hydro-mechanischen Randbedingungen) es zur Eislinnenbildung kommt und falls ja, wann ge-

nau es zu einer Mikro- oder Makroeislinnenbildung kommt. Diese Fragen könnten grundsätzlich mit Hilfe von rigoröseren THM-Mikromodellen beantwortet werden. Derzeit sind einige wesentliche Funktionalitäten und Zusammenhänge dieser Modelle unbekannt, deren Erforschung hat einen starken Grundlagencharakter und würde den Rahmen dieses Forschungsprojektes sprengen. Die TM-Makromodelle umgehen diese Problematik mit der Betrachtung eines verschmierten Kontinuums und sind daher einfacher auf 2-D zu erweitern und zu Implementieren. Mit dem verbesserten TM-Modell können die eindimensionalen Experimente zwar gut nachgerechnet werden, sie erlauben allerdings nicht eine quantitative Aussage zur Steuerung der Kühlaggregate zu machen, um die Bildung von Eislinnen zu unterbinden.

Die zur Zeit noch bestehenden theoretischen und experimentellen Schwierigkeiten erfordern eine vertiefte Grundlagenforschung. Andererseits reife während der Durchführung des Forschungsprojektes die Einsicht, dass das Problem der Frosthebung in der Praxis weitgehend durch ingenieurmässige Massnahmen, wie intermittierendes Gefrieren, erfolgreich umgangen werden kann, während das Problem der Sickerströmung von grundsätzlicherer Natur ist, weil es die Machbarkeit der Gefriermassnahme in Frage stellen kann. Deswegen haben wir diesem Problem im Rahmen des Forschungsprojektes eine viel höhere Gewichtung gegeben, als ursprünglich geplant.

Résumé

La sécurité dans la zone de creusement et, surtout pour les constructions de tunnel en site urbain, la limitation des tassements en surface, sont d'importance primordiale pour les travaux souterrains dans des terrains meubles drainants. En présence d'une couverture réduite, une instabilité dans la zone de creusement peut se propager jusqu'à la surface et mener à une rupture jusqu'en surface.

Le contrôle du front d'attaque, la limitation des tassements et l'empêchement d'un écoulement vers la cavité peuvent être réalisés par une amélioration du terrain (consolidation, durcissement et imperméabilisation du terrain de construction), par le soutien et l'étanchéisation du front d'attaque et de la voûte du tunnel ou par une combinaison de ces mesures.

En règle générale, des mesures d'amélioration du terrain de construction sont chères avec un temps d'exécution long. Des tunnels en terrain meubles drainant seraient donc facilités par l'utilisation de boucliers fermés, qui soutiennent le front d'attaque et la voûte du tunnel en permanence pendant le creusement et ne laissent pas entrer les eaux souterraines. En effet, pour des cas de fortes pressions d'eau (> 6-10 bar) ou pour des constructions souterraines spéciales (p.es. tunnels courts, tronçons isolées en terrain meuble, galeries transversales, etc.) seules des méthodes traditionnelles de creusement ou bien des procédures à ciel ouvert peuvent être considérées. Dans ces cas, des mesures d'amélioration du terrain de construction sont souvent indispensables.

Le terrain de construction peut être densifié, compacté ou imperméabilisé par des injections ou par congélation artificielle. La faisabilité, la fiabilité et l'efficacité économique des mesures d'injection peuvent être limitées par l'état du terrain (grande teneur en particules fines, composition hétérogène) ou par des conditions environnementales. Dans certains cas, la procédure de congélation peut être favorable ou même la seule méthode techniquement faisable. Elle est généralement applicable (pour des conditions de terrain de construction humide et faible vitesse d'écoulement de l'eau), les caractéristiques mécaniques du terrain de construction congelé peuvent être évaluées d'une façon relativement fiable, la procédure est réversible et absolument sans production de polluants.

Pendant la procédure de congélation, la chaleur est soustraite au terrain. On différencie entre deux procédures selon le corps refroidissant: la congélation cryogène avec du nitrogène (congélation au nitrogène) et la congélation à la saumure avec une solution saline. Dans les deux procédures, le corps refroidissant est introduit dans le terrain à congeler où il prélève la chaleur du terrain par des lances dites à congélation. La mise en place des lances à congélation est identique dans les deux cas et comporte un tube d'immission intérieur et un tube extérieur. Le tube extérieur joue le rôle d'échangeur de chaleur entre le corps refroidissant et le terrain. Une différence importante entre les deux procédures est la température du corps refroidissant. Pour la congélation au nitrogène elle se situe entre -196 °C et environ -80 °C tandis que pour la congélation à la saumure elle varie entre -40 °C et environ -20 °C .

Dans la construction de tunnels, la procédure de congélation est appliquée de façon différente: pour des portails d'entrée et de sortie pendant le creusement par bouclier et le préfonçage des tubes, pour traverser de petites zones de géologie peu favorable, pour des puits de départ, des galeries transversales, pour la congélation de la calotte pour la protection du creusement, pour le Box Jacking, pour assurer la liaison entre deux contreavancements par des méthodes de creusement mécanique, pour la construction de niches de fuite, pour la construction de cavernes, pour le creusement d'élargissements, pour des mesures d'assainissement ou d'urgences pour l'imperméabilisation en cas d'infiltrations d'eau ou dans des zones accidentées imprévues pendant le creusement par TBM dans la roche dure ou dans des terrains déformables.

La procédure de congélation exige un niveau élevé de technique de la construction et son application doit se baser sur des connaissances scientifiques et des réflexions

claires. Le projet de recherche est motivé par l'opinion que les mesures d'aide à la construction en général et la procédure de congélation en particulier peuvent être mieux utilisées dans l'avenir, car les constructions souterraines se font dans des conditions géotechniques de plus en plus difficiles. On peut également constater que la préparation pour de telles mesures coûteuses a augmenté dans les dernières années. Bien sûr, l'application de la procédure de congélation sera surtout réservée pour des cas spéciaux, mais elle croît aussi en fonction de la difficulté du projet. Le but de cette recherche est le développement de modèles numériques pour la prédiction quantitative des mesures de congélation du terrain et la préparation d'aides à la décision pour leur planification. Ceci devrait contribuer à une planification rationnelle des mesures de congélation.

Des problèmes potentiels dans l'application de la procédure de congélation consistent en la présence d'un écoulement de la nappe phréatique ainsi qu'un soulèvement ou un tassement en surface pendant les phases de gel et de dégel dus à la formation de lentilles de glace. Dans le premier cas, un ralentissement de la formation d'un corps congelé fermé ou même l'impossibilité de produire cela, mais dans le deuxième cas des déformations inacceptables peuvent se produire sur des bâtiments existants. Dans les deux cas, le traitement du problème s'avère complexe et exige la prise en compte de processus couplés, conformément à des phénomènes physiques différents. Pour cette raison, ces aspects seront traités séparément dans le présent projet de recherche.

a) La procédure de congélation en cas d'un écoulement souterrain

La représentation mathématique de la procédure de congélation en présence d'un écoulement souterrain constitue une partie importante du projet de recherche. Une étude de la littérature montre que des solutions analytiques sont disponibles uniquement pour le cas simple d'une seule lance de congélation dans un sous-sol homogène sans prendre en compte la dépendance de la température des paramètres thermo-hydrauliques. Des hypothèses simplifiées ont été utilisées pour la dérivation de cette solution, limitant ainsi sa capacité de prédiction. En plus, on manque de résultats d'expériences bien documentées disponibles qui pourraient constituer une banque de données pour la vérification des solutions analytiques ou des modèles numériques. Ceci vaut spécialement pour les cas avec une vitesse d'écoulement souterrain relativement élevée.

Un modèle numérique spécial doit être formulé, implémenté et ensuite contrôlé pour la représentation mathématique de la procédure de congélation pour la simulation des mesures de congélation. Dans tout cela une attention particulière doit être prêtée à (i) une considération rigoureuse des relations physiques ainsi que (ii) au développement et à l'implémentation d'algorithmes faciles et efficaces.

Dans la modélisation, la forte dépendance des caractéristiques thermo-hydrauliques du sous-sol de la température doit être prise en compte. Le terrain est un système à plusieurs composants composé de la partie solide minérale et des pores. Seulement l'état saturé a été évalué dans le présent projet de recherche. Quand la température de gel est atteinte, une grande partie de l'eau dans les pores gèle, mais pas entièrement. Avec une baisse successive de la température, de plus en plus d'eau gèle. La relation entre la teneur en eau et la température peut être décrite selon une loi de puissance. La perméabilité du terrain au-dessus de la température de gel est une fonction de la viscosité de l'eau. En-dessous de la température de gel, elle décroît selon une loi hyperbolique en fonction de la teneur en eau. La capacité thermique spécifique peut être calculée avec l'hypothèse que le terrain se comporte comme un mélange idéal, c'est-à-dire qu'aucune réaction due à la partie de la capacité thermique des composants du mélange, c'est-à-dire des minéraux, de l'eau et de la glace, n'ait lieu. Notamment, la capacité thermique de l'eau et de la glace dépendent de la température. Par contre, la capacité thermique des minéraux peut être considérée constante pour des buts pratiques dans le domaine de température concerné par la procédure de congélation. La chaleur latente n'est fonction que de la teneur en eau. La conductivité thermique du terrain n'est pas seulement fonction de la composition minéralogique, mais aussi de la structure des grains et peut être bien décrite à l'aide d'une loi logarithmique. Ceci fournit des valeurs qui se situent entre les cas extrêmes hypothétiques d'un comportement en parallèle ou en série.

Le modèle numérique prend en considération, en plus des équations de transport de chaleur généralisées, aussi la conservation de la masse (équation de continuité). Elles sont couplées selon la loi de Darcy à travers l'équation d'écoulement. Ainsi la dépendance des paramètres thermo-hydrauliques de la température citée ci-dessus peut être prise en compte d'une façon plus réaliste. Les équations sont résolues numériquement par la méthode des éléments finis dans un domaine fermé en 3D. L'intégration dans le temps se fait après un pas par le schéma d'Euler régressif non-itératif. Pour améliorer d'avantage l'efficacité du calcul, des éléments iso paramétriques hexagonaux avec des fonctions bi-quadratiques (éléments en forme de cube) pour la discrétisation du domaine de la simulation. Le modèle numérique permet la prise en compte, respectivement la modélisation de n'importe quel sous-sol, d'une géométrie complexe du système de congélation ainsi que des conditions limites variables comme une variation en fonction du temps de la température des lances de congélation. Ainsi la modélisation de situations de constructions complexes, mais plus réalistes, est possible.

L'évaluation de la capacité de prédiction du modèle numérique a été faite d'une façon échelonnée. Pour commencer, les quelques essais bien documentés de la littérature de Berggren (vitesse d'écoulement $v = 0.24$ m/d) ont été calculés à rebours. La comparaison des valeurs mesurées avec six capteurs de température a démontré une bonne correspondance pendant la durée complète de l'essai. La base de données trouvée dans la littérature est néanmoins insuffisante pour pouvoir faire une évaluation fiable du modèle numérique, surtout concernant les cas limites avec une vitesse élevée d'écoulement ou bien une situation en 3D. Pour cette raison il s'est avéré nécessaire d'effectuer des essais avec un modèle physique développé par nous-mêmes. Un modèle physique à grande échelle a été conçu et construit pour pouvoir exclure un effet d'échelle et offrir une grande flexibilité dans le choix des conditions aux limites (gradient hydraulique élevé, emplacement et distance entre les lances de congélation

A cause des très grands efforts liés à des essais à grande échelle, un déroulement par étapes a été planifié pour mieux atteindre les buts. D'abord un essai avec une seule lance de congélation, effectué dans un volume réduit sans écoulement (volume des matériaux du modèle approximativement 0.13 m³), a permis de tester d'une façon rigoureuse le corps refroidissant et les systèmes de mesures et d'enregistrement de données. Après ce test, appelé "Essai avec un seul lance", le modèle à grande échelle (volume des matériaux du modèle approximativement 1.6 m³) a été préparé pour la série d'essais prévue. Tous les essais ont été effectués dans une halle climatisée.

Le système de refroidissement a été conçu pour une température minimum de -35 °C. Il comporte fondamentalement une installation de congélation avec une capacité nominale de refroidissement de 3.0 kW et des lances de congélation. Un mélange d'eau-glycol a été utilisé comme fluide refroidissant. L'installation de congélation est dirigée électroniquement. Les tuyaux d'entrée et de sortie, qui connectent l'installation de congélation avec les lances de congélation, sont constitués de tubes en plastiques isolés par du néoprène. Les lances de congélation consistent en un tube de descente intérieur en PVC avec un diamètre interne de 21 mm et un tube de congélation extérieur en cuivre avec un diamètre extérieur de 41 mm. Pour l'essai avec une seule lance, la lance a été connectée directement à l'installation de congélation mais pour le modèle à grande échelle, les trois lances de congélation ont été connectées à un distributeur respectivement à un bloc de connexion en PVC et ce bloc a été à son tour connecté aux tubes de congélation respectifs. Pour chaque expérience, les températures d'entrée et de sortie du fluide refroidissant, ainsi que le débit ont été mesurés par des capteurs de température et ensuite dessinés.

Pour l'évaluation de la qualité des prédictions théoriques, il a été avantageux que les paramètres des matériaux ont été déterminés d'une façon entièrement indépendante des essais sur modèle cités ci-dessus, épargnant ainsi une calibration des paramètres des matériaux selon les résultats d'essais. Dans ce but, des essais géotechniques et thermodynamiques ont été effectués. Le matériau utilisé pour le modèle pour tous les essais a été un sable moyen de granulométrie mal graduée avec un diamètre de grain maximum de 1 mm extrait d'un dépôt alluvial du Rhin Supérieur. La courbe granulométrique a été déterminée par tamisage. La composition minéralogique a été étudiée et une teneur en

quartz d'approximativement 45% a été découverte. Le coefficient de perméabilité a été trouvé par un perméamètre de grandes dimensions et la densité des grains par des essais pycnométriques. Pour les essais, le sable a été mis en place par voie sèche et compacté tous les 10 cm. La densité sèche en place a été déterminée après avoir pesé les matériaux placés et évalué le volume construit. Les autres paramètres, p.ex. la porosité, l'indice des vides et la teneur en eau ont pu être déduits des valeurs mesurées.

La capacité thermique spécifique du sable sec a été déterminée par calorimètre. Les résultats des mesures ont été vérifiés ensuite par calorimétrie différentielle dynamique (Differential Scanning Calorimetry DSC). Puisque la capacité thermique, qui dépend de la température de l'eau et de la glace, est connue, la capacité thermique des matériaux des modèles peut être déterminée en fonction de la teneur en eau et en glace. Pour la détermination des autres paramètres des matériaux des modèles, à côté des capteurs de température, ont été utilisés un système TDR (Time-Domain-Reflectometer) pour la mesure de la teneur en eau, une sonde NSSP (Non-Steady-State-Probe) pour la mesure de la conductivité thermique et une chambre climatique. La température dans la chambre climatique est réglée par thermostat et peut descendre jusqu'à -30 °C. Dans un cylindre imperméable en PVC avec un diamètre de 150 mm et une hauteur de 450 mm, ont été placés deux capteurs de température, le capteur TDR et la sonde NSSP. Après la saturation de l'échantillon, celui-ci a été placé dans la chambre climatique. La température a été baissée par paliers jusqu'à ce que toute l'eau des pores ait gelée. La conductivité thermique relevée dépend de la composition minéralogique et a été comparée aux valeurs des conductivités de différents minéraux publiées dans la littérature.

L'essai avec une seule lance consistait en un fût en plastique du commerce avec une capacité de 250 l et un diamètre intérieur d'approximativement 60 cm. Il a été pourvu de 38 capteurs de température, pendant le remplissage par couches du fût, principalement selon trois lignes de mesure radiales à trois niveaux. La température au fond ainsi que à plusieurs endroits de la lance ont également été enregistrée. Le fût a été isolé thermiquement selon les règles de l'art. Avant saturation, le système complet de refroidissement et de mesure a été amplement testé. Enfin, le matériau en place a été saturé par un anneau perforé, la machine de refroidissement de nouveau mise en marche et la mesure de tous les capteurs sur la ligne de mesure dessinée en fonction d'intervalles de temps réguliers. Les mesures des capteurs le long de la ligne de mesure ont montré une image cohérente. Tant le système de refroidissement que celui de mesure ont fonctionné sans problèmes. Les données de mesure de cet essai ont fourni une base de données pour une première vérification du modèle numérique. Ainsi une bonne comparaison entre les résultats de mesure et les valeurs de la simulation pouvait être constatée. En plus, l'efficacité de refroidissement a été calculée à l'aide des données mesurées appropriées et puis comparée avec l'efficacité de refroidissement trouvée par simulation. Une bonne correspondance a été de nouveau observée.

Le modèle à grande échelle consiste principalement en une caisse à sable isolée, avec la possibilité d'introduire un écoulement d'eau, dans laquelle la procédure de congélation pouvait être simulée avec une nappe phréatique en écoulement. Puisque ces dimensions étaient de $H \times B \times L = 1.3 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$, un gradient hydraulique jusqu'à 1 m/m pouvait être appliqué. La caisse à sable était constituée de plaques en PVC de 2 cm d'épaisseur et l'écoulement pouvait être introduit depuis le côté. Le réglage d'un état d'écoulement stationnaire avant le début de la procédure de congélation a été accompli par l'établissement des niveaux d'eau dans les zones d'entrée et de sortie. Pour pouvoir réaliser un champ d'écoulement initial 2D, une plaque de diffusion a été placée dans les zones d'entrée et de sortie. De l'eau du robinet a été utilisée et sa température mesurée. La quantité d'eau d'écoulement dans la zone d'entrée a été mesurée et dessinée grâce à un capteur de débit. La caisse à sable a été renforcée et isolée thermiquement sur les côtés. Dans la caisse à sable, 37 capteurs de température ont été placés pendant le remplissage par couches avec la plupart des capteurs sur un plan de mesure horizontal plus ou moins à mi-hauteur du modèle, alignés sur trois axes de mesure. Deux de ces axes de mesure étaient parallèles à la direction d'écoulement de l'eau et traversaient la lance de congélation centrale respectivement celle de droite, et le troisième était perpendiculaire et liait les lances de congélation. A certains endroits, des mesures multiples ont été exécutées dans le but d'augmenter la fiabilité du système de mesure. Des capteurs de tem-

pérature supplémentaires ont été placés pour pouvoir mesurer les conditions aux limites pendant l'essai. Après la mise en place des matériaux par couche, ceux-ci ont été saturés par un écoulement et un placement en hauteur des réservoirs d'eau. En total, six essais avec des conditions hydrauliques limites variables ont été réalisés. Ainsi, les vitesses d'écoulement désirées pouvaient être ajustées avant le vrai début de tous les essais, c'est-à-dire avant la congélation, par un placement exact des réservoirs d'eau et l'écoulement à travers le modèle pouvaient avoir lieu jusqu'à l'obtention d'un état stationnaire. Simultanément à l'enclenchement de l'appareil de congélation, l'enregistrement des données a démarré. Le refroidissement a été poursuivi jusqu'au moment du jointement du corps gelé entre les lances de congélations voisines, ou jusqu'au rétablissement d'un état presque stationnaire. Les résultats de mesure des capteurs ont montré une image cohérente pour tous les essais, c'est-à-dire les capteurs dédoublés ont montré presque les mêmes résultats et conditions de symétrie. Au même titre, l'influence de l'advection se reflète. L'efficacité de refroidissement pouvait être calculée sur la base des débits du fluide de refroidissement mesurés à des intervalles de temps réguliers et ces températures d'entrée et de sortie sous réserve de sa capacité thermique ainsi que les pertes d'efficacité du système.

L'analyse numérique théorique des six essais à grande échelle a montré une bonne correspondance avec les valeurs de température mesurées. Ceci n'était pas valable uniquement pour une nappe sans écoulement ou des cas d'écoulement modéré, mais aussi pour des cas de vitesse d'écoulement élevée jusqu'à très élevée. Les efficacités de refroidissement calculées montrent aussi une bonne correspondance avec les valeurs expérimentales. Il faut d'ailleurs remarquer que grâce à l'obtention soignée des paramètres décrite ci-dessus, aucun type de calibration n'a été nécessaire pour aucune des simulations. Ceci démontre la qualité de la vérification.

Par la suite, la capacité de prédiction des solutions approximatives de la littérature, et celles les plus utilisées, a été contrôlée en utilisant les résultats d'essai. Celles-ci sont des solutions pour un refroidissement artificiel d'une nappe phréatique sans écoulement de Ständer et de Sanger & Sayles ainsi que celles pour une nappe phréatique en écoulement de Victor. Les solutions donnent, en fonction du temps, l'accroissement du corps gelé autour d'une lance de congélation, c'est-à-dire le temps nécessaire de congélation pour atteindre un corps gelé d'une taille donnée. Puisque les déductions pour les solutions sont fondamentalement pour une lance de congélation, les solutions de Ständer et de Victor ont été étendues pour une rangée de lances de congélation à l'aide de facteurs de correction empiriques, c'est-à-dire l'effet d'une congélation préliminaire due à une lance voisine a été pris en considération. La solution de Sanger & Sayles ne prévoit pas cette extension. Toutes les solutions approximatives montrent une bonne correspondance avec les résultats de mesure pour les essais sans écoulement, mais l'effet d'une congélation préliminaire doit nécessairement être pris en considération. Pour les essais avec écoulement, la solution de Victor sous-estime le temps de congélation. Les divergences sont proportionnelles à la vitesse d'écoulement, c'est-à-dire pour des valeurs de convection plus élevées la solution devient moins exacte. C'est pourquoi cette solution ne peut être utilisée que d'une façon limitée pour le prédimensionnement. L'approche de Sanger & Sayles est la seule à fournir une formule pour l'évaluation pour la capacité de refroidissement nécessaire. La comparaison de la capacité de refroidissement calculée de l'essai sans écoulement donne une bonne correspondance avec les valeurs théoriques.

Comme résultat intermédiaire, il a pu être constaté que le modèle numérique a été contrôlé avec succès et que les solutions approchées pour le cas sans écoulement peuvent être utilisées comme aide à la décision, p. ex. pour un prédimensionnement. Seul, le cas avec écoulement a d'avantage besoin d'études. Celles-ci se basaient sur une étude paramétrique d'une rangée de lances de congélation dans un sous-sol homogène. Les paramètres usuels, comme la vitesse d'écoulement, la température du sol, le diamètre et la température des lances de congélation ainsi que la distance entre eux, ont été variés. Les simulations ont été évaluées en fonction d'un temps de fermeture, c'est-à-dire le temps de congélation nécessaire jusqu'à l'obtention d'un corps gelé complet entre les lances de congélation. Une expression pour la vitesse d'écoulement critique en fonction des paramètres ci-dessus a été déterminée à l'aide de ces résultats et une analyse des

dimensions. C'est-à-dire que, lors d'un prédimensionnement, les mesures de congélation peuvent être disposées suivant cette formule pour que la vitesse d'écoulement critique théorique soit plus élevée que la valeur in situ pour pouvoir assurer qu'une fermeture du corps gelé peut être garantie malgré la présence de l'écoulement. Il est évident que plus la vitesse d'écoulement in situ est petite par rapport à la vitesse critique calculée, plus les mesures de congélation planifiées seront fiables. Comme résultat supplémentaire, cette étude fournit une expression pour le calcul du temps de congélation nécessaire jusqu'à la fermeture du corps gelé soit atteinte, et surtout en fonction du temps de fermeture pour un nappe sans écoulement et le rapport entre la vitesse d'écoulement in situ et la vitesse critique.

L'influence de l'hétérogénéité naturelle du sol sur la croissance du corps gelé a été également étudiée. Pour ceci, un sous-sol avec des couches horizontales et des lances de congélation placée verticalement sous un écoulement horizontal et perpendiculaire à la rangée de lances de congélation a été modélisé. Un modèle à deux couches à épaisseurs égales et un modèle à trois couches (dit modèle à sandwich) ont été pris en considération. Les matériaux pour les modèles étaient, en plus du sable fin à moyen déjà employé, du sable moins perméable et du limon. Sur la base de la disposition choisie, la vitesse d'écoulement initiale pour les deux couches est élevée proportionnellement à leur perméabilité. Des résultats des simulations il résulte que pour les deux couches avec des perméabilités différentes (ordre de grandeur de 10², comme par exemple entre le limon et le sable moyen à fin), aucune influence réciproque n'a été observée. Par contre, pour une légère différence de perméabilité entre les couches (ordre de grandeur d'une demi-puissance de 10, comme par exemple entre le sable et le sable moyen à fin) près de la zone de contact il a été observé un domaine, caractérisé par des vitesses d'écoulement localement plus élevées et donc un temps de fermeture plus lent. Ceci peut être attribué au fait que les domaines de perméabilité réduite gèlent plus rapidement et l'eau emmagasinée dans un champ loin de cette couche est amenée dans la couche de perméabilité plus élevée qui n'est pas encore gelée, ce qui augmente localement la vitesse d'écoulement. Cet effet est plus marqué pour des vitesses d'écoulement plus élevées et peut surtout empêcher la fermeture du corps gelé dans le modèle à trois couches. Puisque des variations de perméabilité in situ de cet ordre de grandeur ne peuvent pas être exclues respectivement la précision avec laquelle ce paramètre peut être déterminé, il est recommandé d'interpréter les mesures de congélation d'une façon conservatrice concernant le temps de fermeture, c'est-à-dire tendanciellement de tendre à des temps de fermeture plus courts.

Une des applications les plus importantes de la procédure de congélation dans les constructions souterraines est celle d'une aide à la construction pour la réalisation des galeries transversales. Deux situations de base pour des galeries transversales ont été étudiées, c'est-à-dire avec un écoulement de la nappe phréatique horizontale parallèle aux tubes principaux ou perpendiculaire. Dans le premier cas, l'accent a été mis sur l'optimisation de la disposition des lances autour de la galerie transversale, et dans le deuxième cas, sur l'identification des endroits problématiques. Pour les deux cas, la géométrie des tubes a été maintenue constante, c'est-à-dire le diamètre du tube principale était de 8 m et les axes étaient horizontaux et parallèles avec un espacement de 24 m. La galerie transversale avait un diamètre de 5 m. Le sous-sol était considéré homogène et était composé du même matériau que celui utilisé pour les essais sur modèle. Dans le premier cas, des dispositions différentes des lances ont été modélisées. La disposition optimale, c'est-à-dire celle qui nécessite le temps de congélation le plus court pour atteindre presque partout une épaisseur moyenne de corps gelé de 2 m, sans la congélation de la zone intermédiaire à excaver, consistait en une disposition régulière des lances de congélation selon une ellipse autour de la galerie transversale. Par rapport à la disposition usuelle, celle-ci nécessite de quatre lances de congélation en plus le long de ce circuit, réduisant ainsi le temps de congélation d'à peu près 30%. Dans le deuxième cas, l'écoulement longitudinal provoque une fermeture retardée du corps gelé dans le domaine de contact entre le tunnel principal et la galerie transversale, surtout dans le domaine de la calotte. Ceci pourrait éventuellement être rectifié par le placement de lances supplémentaires plus courtes dans cette zone problématique.

Les cas respectivement les questions étudiées ci-dessus sont surtout très pertinents pour des cas liés à la pratique mais il se réfère aux situations idéalisées. Pour pouvoir tester l'aptitude des modèles développés à être utilisés dans la pratique, des creusements déjà réalisés ont été simulés et les résultats ont été comparés avec des mesures sur le terrain. Deux projets d'U-Bahn et de S-Bahn ont été simulés: Le creusement du Val de Rednitz à Fürth, la gare Università de l'U-Bahn de Naples et la traversée sous la Limmat à Zürich. Ces modélisations ont des points critiques différents. Dans le premier cas, la totalité des mesures de congélation jusqu'au temps de fermeture doivent être simulées en 3D. Puisque l'exécution de ces mesures a été très bien documentée, il a été possible d'effectuer une modélisation réaliste sous réserve d'un sous-sol avec des couches non-horizontales, une disposition inclinée des lances de congélation (de plus ou moins 60 m de longueur) et une température de congélation variable. Les résultats ont montré une bonne correspondance avec les mesures sur le terrain. On doit mentionner que dans la littérature jusqu'à présent, aucune simulation des mesures de congélation aussi complexe (plus de 2 millions d'éléments dans un problème couplé thermo-hydraulique) n'a été publiée. Les autres cas ont été simulés en 2D. Les documents pour le projet de Naples n'ont contenu aucune donnée sur les paramètres thermiques. Ceux-ci ont été obtenus pour une section transversale à l'aide de mesures sur le terrain et d'une analyse à rebours. La comparaison des résultats de la simulation avec une autre section transversale avec des mesures in situ correspondantes a montré une bonne correspondance. Dans le troisième projet, le temps de congélation qui a été prévu pendant l'exécution n'a pas seulement été largement dépassé, mais probablement la formation d'aucun corps gelé fermé n'aurait été possible sans l'utilisation de mesures d'injection pour limiter les écoulements. Les simulations effectuées ont montré la grande sensibilité des mesures de congélation relative aux conditions d'écoulement. Avec ces trois exemples de cas pratiques, on a pu démontrer que le modèle numérique pour la simulation des mesures de congélation complexes est convenable pour des projets de construction correspondant à la pratique ainsi que pour des études à posteriori.

b) La problématique des lentilles de glace pendant la procédure de congélation

Pour des terrains dits sensibles au gel, des lentilles de glace peuvent se former pendant la congélation qui peut être la cause de soulèvements. Il est connu de longue date que ce phénomène n'est pas causé par l'augmentation de volume de la glace pendant le gel. Des observations en laboratoire et sur le terrain fournissent les bases pour des explications alternatives et des modélisations conceptuelles. Les terrains granulaires sont réputés ne pas être sensibles au gel dû à un manque de passages hydriques ou capillaires de même que les sols argileux sur la base de leur faible perméabilité. Un aspect important en relation avec la formation des lentilles de glace est que l'eau dans les vides ne peut pas complètement geler. A cause du potentiel osmotique ou capillaire, des pressions de succion peuvent se former qui peuvent être la cause d'une migration d'eau (le modèle du soulèvement primaire dû au gel). La formulation du modèle actuel - aussi connu comme le modèle du soulèvement secondaire dû au gel - se base sur l'effet du dégel et du regel (thermal regelation) suite à des changements de contrainte et à la présence d'un gradient de température le long de la particule. Le modèle explique également la ségrégation entre les lentilles de glace et les particules de sol. Pendant la formation des lentilles de glace, tous les mécanismes connus de soulèvements primaires et secondaires sont actifs. Néanmoins lors de grands soulèvements on part du principe qu'il s'agit d'un processus net de soulèvement secondaire.

Dans le cadre du projet de recherche, de prime abord devaient être étudiés les problèmes spécifiques à la construction des tunnels pendant les procédures de congélation avec formation de lentilles de glace. C'est pourquoi, le programme de recherche a prévu l'implémentation d'un modèle numérique approprié. Sur la base de la complexité de la procédure, on peut s'attendre à ce que des modèles simplifiés s'avèrent insuffisants, alors que des modèles rigoureux montrent leurs avantages surtout pour la recherche de base. Néanmoins ces modèles peuvent aussi comporter des désavantages en relation avec leur applicabilité pour la recherche appliquée. Sous réserve de ces aspects, les modèles numériques connus ont été évalués. Ceux-ci peuvent être classés en empirique/semi-empirique, hydrodynamique, "rigid ice", "segregation potential", thermo-hydraulique-mécanique (THM) et thermo-mécaniques (TM). Les modèles empiriques et

semi-empiriques ne prennent pas assez en considération les processus physiques ou pour des cas généraux et ne sont applicables que d'une façon limitée. Celui hydrodynamique, le Rigid Ice et le Segregation Potential Model ont été formulés en une dimension et le domaine d'application est ainsi très limité. Le modèle THM est le plus rigoureux et il est ainsi en principe celui préféré pour la recherche, mais en regardant de plus près, en plus de la grande difficulté de déterminer les fonctionnalités inconnues de la teneur en eau non-congelée et de la perméabilité en fonction de la température dans le domaine du "frozen fringe", il y a l'adjonction d'ambiguïtés supplémentaires, comme la relation entre le tenseur de contraintes et la courbure de la limite de gel respectivement la direction de croissance des cristaux de givre. En plus, le modèle THM a été formulé uniquement pour de petites déformations et une loi de comportement linéaire-élastique et a dû être complété selon les cas traités. En vertu de ce problème, la détermination des fonctionnalités inconnues ainsi qu'une amélioration ou respectivement une extension du modèle a été évaluée comme peu probable. A la place de celui-ci, le modèle TM de Michalowski & Zhu (2006) a été choisi pour l'implémentation et la modélisation pour des cas pratiques. Il traite assez bien la formation des lentilles de glace en prenant en considération des surcharges mesurées et des résultats expérimentaux publiés dans la littérature. En plus, les caractéristiques des matériaux peuvent être déterminées avec un niveau d'effort acceptable. Contrairement aux micro-modèles (modèles THM), l'extension pour des cas en 2D est beaucoup plus facile et peut être implémentée dans un programme général d'éléments finis. Pendant cette implémentation de plus amples améliorations relatives à la relation entre la porosité et la déformation volumique et les équations de contraintes à prendre en compte pour l'atténuation des processus de soulèvement ont été effectuées. Ces améliorations se basent sur des considérations de plausibilité.

L'évaluation du modèle TM, c'est-à-dire le modèle de Michalowski & Zhu, ainsi qu'un modèle avec des améliorations implémentées, a été effectuée en utilisant dix essais de soulèvement au gel publiés par Fukuda. Une évaluation a été faite selon la méthode de Step Freezing et les autres selon la méthode de Ramped Freezing avec des surcharges partiellement différentes. La calibration, c'est-à-dire la détermination des paramètres optimaux des matériaux, a été effectuée à l'aide d'un de ces essais tandis que les autres ont été utilisés pour l'évaluation. Ceci a montré que la série de simulations avec les paramètres suggérés par Michalowski & Zhu n'a pas donné une bonne correspondance avec les mesures. Après l'optimisation des paramètres, une amélioration peut être atteinte avec ce modèle. Une correspondance toute aussi bonne peut être atteinte avec le modèle amélioré. Ici, contrairement aux autres modèles, la définition des paramètres du point de vue physique semble plus plausible pour ce modèle, qui se montre le mieux adapté à la modélisation des soulèvements à la suite de la formation des lentilles de glace.

La technique d'essai pour les essais en 1D est largement développée, malgré le fait qu'il y ait relativement peu d'essais bien documentés dans la littérature. Ces essais sont constitués en général par une colonne d'essai saturée, avec des conditions thermiques différentes aux deux extrémités (dits essais de soulèvement au gel). Des variations dans l'exécution portent sur le changement relatif de la température aux deux extrémités de l'échantillon ainsi que pour l'application éventuelle d'une surcharge. L'exécution de propres essais poursuit le but de ne pas créer une base de données seulement des essais 1D, mais aussi des essais 2D à grande échelle. Les résultats de ces derniers n'ont pas été publiés jusqu'à présent. La préparation respectivement la mise en place des échantillons peut se faire ou bien en ajoutant de l'eau au delà de la limite plastique, puis malaxage, montage et consolidation ou bien par montage à sec et saturation par écoulement. Pour la deuxième approche, ne peuvent cependant être considérés que des sols relativement sableux mais sensibles au gel. En vertu de la mise en exécution souhaitée des essais 2D de soulèvement au gel, cette technique de mise en place a été préférée. Pour optimiser le programme d'essais, une procédure par étapes a été choisie. Dans la première étape, un matériau d'essai approprié devrait être choisi sur la base d'essais préliminaires. L'installation utilisée à cet effet ne permet que la mise en place de petits échantillons, en échange jusqu'à six essais peuvent se dérouler simultanément. Dans une deuxième étape, la base de données devrait être améliorée par les propres essais sur échantillons. Contrairement aux essais préliminaires, ici les conditions aux limites peuvent être non seulement fixées d'une façon plus précise et plus flexible mais on peut

aussi mesurer la distribution de la température le long de l'échantillon ainsi que la quantité d'eau absorbée. Dans la dernière étape, un essai de soulèvement au gel plus ardu et à grande échelle en 2D devrait être effectué. Les défis des mesures n'incluent pas seulement le domaine de la température, mais aussi celui des déformations 2D attendues.

L'exécution des essais préliminaires a été effectuée avec un mélange de sable moyen à fin et farine de basalte ou de calcaire. Cinq séries avec des mélanges différentes ont été effectuées, les deux premières avec de la farine de basalte et les trois dernières avec de la farine de calcaire. Enfin le soulèvement a été mesuré à des intervalles réguliers. Pour la plupart des échantillons, la formation de lentilles de glace a été observée, mais comme attendu, il n'y en avait pas dans les échantillons avec un pourcentage des fins réduit (moins de 15%). Dans presque toutes les séries, une macro-formation de lentilles de glace a été observée pour quelques échantillons. Pour le reste des échantillons, une micro-formation de lentilles de glace s'est produite d'une certaine mesure. L'allure de la vitesse de soulèvement en fonction du temps a été quasi constante surtout pour les échantillons qui ont eu la macro-formation de lentilles de glace, mais pour la plupart des autres échantillons, une tendance plutôt régulièrement décroissante a été observée. Après le déroulement des cinq premières séries, il a pu être observé que les deux matériaux fins d'essais ont été en principe appropriés pour les essais de soulèvement au gel. Les mélanges avec un apport de farine de pierre entre 20% et 30% ont toujours amené à une formation de lentilles de glace, à l'exception de quelques échantillons. Comme attendu, la formation de lentilles de glace a été peu probable pour des apports réduits et pour l'apport maximal de 35% carrément aucun soulèvement n'a été observé suite à la congélation de l'eau interstitielle. Ceci est probablement dû au fait que l'imperméabilisation des échantillons dans l'état sec n'a pas été suffisante. Puisque les résultats des essais de soulèvement au gel ont été très semblables, pour des raisons d'hygiène, c'est-à-dire pour réduire la formation de poussières fines de quartz, la farine de calcaire a été retenue. Un apport entre 25% et 30% a été considéré optimal pour les essais sur les échantillons suivants.

Trois essais sur échantillon ont été effectués avec un apport de 30% (deux essais) et de 25% (un essai). Tous les essais ont commencé avec la méthode de Step Freezing, c'est-à-dire que l'extrémité supérieure de l'échantillon a été refroidie par paliers nettement sous le point de congélation et la température de l'extrémité inférieure de l'échantillon a été gardée constante et supérieure au point de congélation. Aucune formation de lentilles de glace n'a été observée pour ces essais. Les essais ont été arrêtés après l'établissement de l'état stationnaire. Puisque le premier essai a été effectué avec une faible isolation thermique et à température ambiante, un soupçon existe que la cause de la non-formation de lentilles de glace était l'isolation latérale incomplète. Pour cette raison, l'isolation latérale a été renforcée pour les essais suivants et une chambre climatisée a été construite pour pouvoir maintenir la température ambiante aussi proche à la température la plus élevée de l'essai. Le dernier essai sur échantillon a servi en premier lieu pour la confirmation des résultats des essais précédents, surtout sous réserve d'un mélange avec une teneur en fins légèrement réduite de 25%. Il doit être remarqué que tous les essais préliminaires sur des échantillons avec ce type de mélange ont montré une formation de lentilles de glace.

Puisque aucun des trois essais sur échantillon n'a montré une formation de lentilles de glace, trois séries supplémentaires d'essais préliminaires ont été effectuées parallèlement au troisième essai sur échantillon dans le but d'expliquer et d'exclure au mieux des sources possibles des problèmes dans les essais sur échantillon. La série 6 a été préparée seulement avec trois échantillons avec mélange de sable et de farine de calcaire dans le rapport 70%/30%, la série 7a été effectuée complètement, c'est-à-dire avec six échantillons avec le mélange de 75%/25% et la série 8 également avec ce mélange, cependant dans trois échantillons de fines couches de farine de calcaire pure ont été ajoutées. Dans ces trois échantillons, alternativement tous les 10 mm il y avait une couche de mélange compacté suivi d'une couche de 1 mm de farine de calcaire compactée. La raison pour l'épreuve sur les échantillons stratifiés était d'étudier si les lentilles de glaces se formaient à la suite d'hétérogénéités locales comme dans le cas homogène. Tous les trois échantillons de la série 6 ont montré des lentilles de glace mais contrairement aux essais de la première série, il n'y avait que la formation de macro-lentilles. Il reste aussi

impossible d'expliquer pourquoi la formation des lentilles a eu lieu dans un échantillon avec trois jours de retard. Pour les autres échantillons, c'est-à-dire ceux des séries 7 et 8, il n'y avait pas de formation de lentilles de glace. Sur la base de ce manque de réussite conclusive, il a été décidé de ne plus continuer ni avec des essais sur échantillon ni avec des essais à grande échelle.

Après l'exposé complet de la problématique de la formation des lentilles de glace, on peut être affirmé que ce phénomène est essentiellement connu et que les facteurs d'influence ont déjà été identifiés. Néanmoins, les relations de la formation des lentilles de glace ne sont pas encore complètement comprises à cause de la complexité des processus impliqués. Par exemple, pour des cas particuliers, il n'est pas encore clair dans quelles conditions (la composition des matériaux et les conditions thermo-hydro-mécaniques aux limites) les lentilles de glace se forment et, si elles se forment, s'il s'agit d'une micro-formation ou d'une macro-formation de lentilles de glace. Ces questions ne peuvent en principe trouver de réponses qu'à l'aide des micro-modèles THM rigoureux. Au stade actuel, certaines fonctionnalités et relations importantes de ce modèle sont inconnues, donnant un caractère fortement élémentaire à la recherche et sortant du cadre de ce projet de recherche. Les macro-modèles TM contournent cette problématique avec la considération d'un continuum et sont ainsi plus faciles à développer et implémenter en 2D. Les essais unidimensionnels ont pu être bien évalués surtout avec le modèle TM amélioré, mais ils ne permettent pas de prédiction quantitative pour le contrôle du dispositif de congélation pour empêcher la formation des lentilles de glace.

Les difficultés théoriques et expérimentales qui restent actuellement nécessitent une recherche de base encore plus approfondie. D'autre part, pendant le déroulement de ce projet de recherche l'idée a murie que le problème de soulèvement dû au gel dans la pratique peut largement être résolu avec succès par des mesures d'ingénieur, comme une congélation intermittente, mais le problème d'écoulement est de nature plus fondamentale et peut se remettre en question la faisabilité des mesures de congélation. Pour cette raison, dans le cadre de ce projet de recherche, nous avons accordé plus de poids que prévu à ce problème.

Summary

In underground construction in water-bearing soil, the stability of the area around the tunnel excavation is of key importance, together with – particularly in the case of urban tunnelling – efforts to limit settlements at the ground surface. In the case of a small overburden, instability in the area close to the tunnel face can lead to failures which propagate up to the ground surface, causing a complete collapse of the ground above the tunnel heading.

Controlling the tunnel face, limiting settlement and preventing groundwater inflow into the underground opening can be achieved by soil improvement (strengthening or stiffening the ground, or reducing its permeability), or by supporting and sealing the excavation boundary including the face, or by a combination of these measures.

In general, soil improvement measures are costly and time-consuming. For this reason, tunnels in water-bearing soils are increasingly being constructed using tunnel boring machines with closed shields, which continuously support the tunnel face and the tunnel intrados during the excavation of the tunnel, and prevent groundwater inflow. But in the case of high groundwater pressures in mountainous areas (> 6-10 bar) or for certain kinds of underground structures (such as short tunnels, tunnels crossing stretches of soil, cross passages, etc.), conventional excavation methods or excavation with TBMs in open mode are the only feasible options. In all of these cases, there may be no alternative to ground improvement measures.

Ground can be strengthened, stiffened or made impermeable either by means of grouting or by artificial ground freezing. The feasibility, reliability and cost-effectiveness of grouting measures may be limited either by the properties and fabric of the ground (i.e. high fine grain content, heterogeneous structure) or by environmental restrictions. In such cases the artificial ground freezing (AGF) method may be advantageous or may even be the only feasible technical solution. The method may be applied anywhere, provided the soil has sufficient moisture and groundwater with a low seepage flow velocity. The mechanical properties of the frozen ground can be determined quite reliably. The method is also reversible and entirely pollution-free.

In the freezing process, heat is extracted from the ground. The two methods of achieving this are differentiated on the basis of the coolant, between cryogenic freezing using liquid nitrogen and brine freezing using a saline solution. In both methods, the coolant is circulated by means of so called freeze pipes, whereby heat is extracted from the ground. The setup of the freeze pipes is the same in both cases and consists of an inner refrigerating down pipe and an outer pipe. The outer pipe acts as a heat exchanger between the coolant and the ground. The main difference between the two methods is the temperature of the coolant. In the case of nitrogen freezing it ranges between -196 °C and about -80 °C, while for brine freezing it ranges between -40 °C and about -20 °C.

The AGF method is applied for many different reasons: to freeze a sealing block at the start or end of tunnel excavation using a shield TBM and pipe jacking, to overcome relatively short zones with an unfavourable geology, to excavate access shafts or cross passages, to create a frozen roof in order to ensure safe tunnelling advance conditions, to allow box jacking, to connect two tunnel drives advancing in opposite directions in the case of tunnels driven with a TBM, to construct SOS niches and underground chambers, to excavate tunnel enlargements, to seal against water inflow as a repair or emergency measure or to cope with unforeseen fault zones in TBM drives through both hard rock and soft ground.

The AGF method demands a high level of technical know-how and its use should therefore be based on clear scientific principles and considerations. The current research project is motivated by the assessment that auxiliary measures in general and the AGF method in particular will find increased application in the future, because new underground construction projects will have to be executed under ever more difficult geotech-

nical conditions. In addition, the willingness to adopt such complicated measures has increased in recent years. Surely the application of the AGF method will continue to be restricted to special cases, even in the future, but such cases are also increasing in number due to the increasing difficulties posed by new projects. The aims of the present research investigation are to develop numerical models allowing quantitative predictions to be made in respect of AGF measures and to supply decision-making aids for AGF planning purposes. In this way, we hope to make a contribution to the rational planning of AGF measures.

Potential problems may arise in the application of AGF from groundwater flow or from ground surface heave or settlement during the freezing and thawing phases due to the formation of ice lenses. The former can lead to a slowing down of the formation of a contiguous frozen body or even make it impossible for such a body to form, while the latter can lead to inadmissible deformations and damage to buildings. In both cases, the solution to the problem is complex, involving coupled processes that are governed by different physical processes. For this reason, these aspects will be handled separately in the present research project.

a) AGF in the presence of groundwater flow

The mathematical treatment of the freezing process in the presence of groundwater flow is a major part of the research project. A study of the literature shows that analytical solutions have been obtained only for the simple case of a single freeze pipe in homogeneous ground and by neglecting the temperature dependence of the thermo-hydraulic parameters. For the derivation of these solutions, simplifying assumptions must be made, and their value is therefore limited. Furthermore, there are hardly any results from well-documented experiments that provide an adequate database for verifying the analytical solutions or numerical models. This is true especially for all the cases in which there is a relatively high seepage flow velocity.

For the simulation of the ground freezing process, it was necessary to formulate, implement numerically and verify a mathematical model. Particular attention was given to (i) a rigorous consideration of the physical aspects and (ii) the development and implementation of simple and efficient algorithms.

In the modelling, the strong temperature dependence on the thermo-hydraulic properties of the ground was taken into account. Soil is a multiple material system consisting of mineral grains and voids. In the present research project, only the saturated state was considered. After reaching the freezing temperature a large part of the pore water freezes, but it does not freeze completely. As the temperature is lowered further, more water freezes. The relationship between water content and temperature can be described using a power law. The permeability of the soil above the freezing temperature depends on the viscosity of the water. Below the freezing temperature it decreases hyperbolically as a function of the water content. The specific heat capacity, assuming that the soil behaves like an ideal mixture, i.e. that no reaction takes place, can be calculated additively in proportion to the heat capacities and the mixture's components, i.e. the minerals, the water and the ice. The heat capacities of the water and the ice, in particular, are temperature-dependent. On the other hand, the heat capacity of the minerals in the temperature range of AGF measures may be assumed to be constant for all practical purposes. The latent heat depends only on the water content. The thermal conductivity of the soil not only depends on the material composition, but also on the grain structure and may be adequately described using a logarithmic approach. This gives values that lie between the hypothetical extreme cases of a parallel or a series arrangement of all the components.

The numerical model, in addition to the general heat transport equation, also takes into account conservation of mass (continuity equation). These equations are coupled via the flow equation as described by Darcy's law. In this way the above-mentioned temperature dependence of the thermo-hydraulic parameters is handled in a realistic way. The equations were solved numerically using the FE method in a predefined 3-D region. Time integration was carried out after each step, according to the non-iterative backward Euler scheme. Furthermore, to improve computing efficiency, isoparametric hexahedral ele-

ments with biquadratic shape functions (cubic elements) were chosen for the discretization of the region of simulation. The numerical model makes it possible to analyze and model any arbitrarily structured soil, as well as complex geometries of the freezing system and variable external boundary conditions, such as the time-dependent temperature of the freeze pipes. It is therefore possible to model complex but realistic in situ conditions.

Evaluation of the prediction capabilities of the numerical model is carried out in three steps. First, the only well-documented experiment in the literature, i.e. that of Berggren (flow rate $v = 0.24$ m/d), was back calculated. A comparison of the measurements from six temperature sensors with the results of the simulation showed that there was good agreement during the whole of the test duration. The database found in the literature, however, is inadequate for the purposes of producing a reliable appraisal of the numerical model, especially in relation to the limiting cases of a high groundwater flow rate and a 3-D situation. It was therefore necessary to perform experiments using physical models specifically designed for the purpose. To exclude scale effects and to ensure an adequate flexibility in the choice of boundary conditions (high hydraulic gradients, location of the freeze pipes and spacing between the freeze pipes) a large-scale physical model was designed and built.

Due to the very long time and major effort required for the large-scale model test, a step-wise procedure was considered the best way to achieve the aims of the experiment. First of all, the refrigeration plant and the measuring and data acquisition systems were tested thoroughly in a small volume test (the volume of the model material was approx. 0.13 m³) with only a single freeze pipe and without groundwater flow. After this "single pipe test" the large-scale model test (volume of model material = 1.6 m³) was prepared for the planned test series. All tests were carried out in a temperature controlled room.

The cooling system was designed for a minimum temperature of -35 °C. It consists essentially of a refrigeration plant with a nominal performance of 3.0 kW, together with freeze pipes. A water-glycol mixture was used as coolant. The refrigeration plant is controlled electronically. The inflow and outflow brine lines, which connect the refrigeration plant with the freeze pipes, consist of neoprene-insulated plastic hoses. The freeze pipes consist of an inner PVC downpipe with an inner diameter of 21 mm and an outer freeze pipe made of copper with an external diameter of 41 mm. For the single pipe test, the brine lines were connected directly to the refrigeration plant, while in the case of the large scale model the brine lines of the three freeze pipes were connected to the corresponding distributor and a collector block made of PVC, and these blocks connected the corresponding brine line to the refrigeration plant. For each test, the inflow and outflow temperatures of the coolant, together with the volume of flow, were measured and recorded using temperature sensors and a contactless flowmeter, respectively.

It was very helpful when checking the quality of the theoretical predictions to determine the material parameters completely independently of the above mentioned model tests, as this made it possible to avoid calibrating the material parameters by means of the test results. To this end, a series of soil mechanics and thermodynamic element tests were carried out. For all of the tests, a uniformly graded medium sand with a maximum grain size of 1 mm was used as model material. The sand was obtained from river sediments of the Upper Rhine. The grain size distribution curve was obtained by means of a sieve analysis. The mineralogical composition was investigated and yielded, among other things, a quartz content of about 45% . The permeability coefficient was determined using a large permeameter and the grain density using a pycnometer. The sand was filled in a dry state for the experiments and compacted every 10 cm. The initial dry density was determined by weighing the filled material and taking into account the volume occupied. The other parameters, i.e. porosity, void ratio and water content can be derived from these quantities.

The specific heat capacity of the dry sand was determined using calorimetry. The measurements were subsequently checked using differential scanning calorimetry (DSC). Since the temperature-dependent heat capacity of the water and the ice is known, the heat capacity of the model material is determined as a function of the water and ice con-

tents. To determine the other parameters of the model material, a time domain reflectometer system ("TDR", to measure the water content), a non steady state probe ("NSSP", to measure the thermal conductivity) and a temperature controlled chamber were used in addition to temperature sensors. The temperature in the chamber was controlled using a thermostat and could be cooled down to $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. The two temperature sensors, the TDR and the NSSP probes were installed in a watertight PVC cylinder of diameter 150 mm and height 450 mm, along with the dry sand. After the test specimen had been saturated it was placed in the chamber. The temperature was then lowered in steps until all the pore water was frozen. Based on its mineralogical composition and the values of thermal conductivity published in the literature, the measurements of thermal conductivity were checked against the values for the different minerals.

A commercially available plastic container of capacity 250 l with an inner diameter of around 60 cm was used for the single pipe test. The temperature was monitored with 38 temperature sensors, which were mainly placed along three radial measuring lines in three different planes whilst the container was being filled in layers. The brine temperature and the pipe temperature were recorded in this way, the latter in various locations. The container was thermally insulated to a professional standard. The complete refrigeration and measuring system was successfully verified prior to saturation. The filled material was then saturated by means of a perforated ring-shaped hose, and the refrigeration plant was then restarted and the measurements for all of the sensors were recorded at regular time intervals. The sensor measurements gave a consistent picture along the measuring lines. Both the cooling and measuring systems were functioning properly. The test data from the measurements provided a database for initial verification of the numerical model. This made it possible to obtain good agreement between the test results and the values obtained from the simulation. The cooling power of the system was also determined with the aid of the corresponding measurements. This was compared with the cooling power determined from the simulation, where good agreement was again obtained.

The large-scale model basically consists of a sand box through which water can flow. This allows the AGF simulation to include seepage flow. Since the dimensions of the box were $H \times B \times L = 1.3\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.3\text{ m}$, it was possible to specify hydraulic gradients of up to 1 m/m. The sand box is made of 2 cm thick PVC plates. The box has a water inlet and water outlet at the bottom of two of its opposing faces. Prior to starting the freezing process, a steady-state flow condition was achieved by adjusting the water levels at these inflow and outflow faces over a long enough period. To obtain an initial 2-D flow regime, a diffusor plate is placed at the inflow and outflow faces. Tap water is used and its temperature is recorded. The amount of water flowing into the box is measured and recorded by using a contactless flowmeter. The sides of the sand box are strengthened and thermally insulated. During the layer-by-layer filling process, 37 temperature sensors were placed in the sand box, the majority of which were distributed along three measuring lines on a horizontal plane mid-way up the model. Two of these measuring lines run parallel to the direction of flow and through the middle or right freeze pipe, whereas the third runs normal to the direction of flow and connects the freeze pipes. To increase the reliability of the measuring system, redundant measurements were made in some places. Further temperature sensors were placed to register the boundary conditions during the tests. After filling, the sand was saturated by causing a flow-through and raising the level of the water reservoir. In total, six tests with different hydraulic boundary conditions were carried out, in which, as indicated above, the desired flow rate was set before actually starting the tests, i.e. prior to freezing, by accurately positioning the water reservoir and subjecting the model to flow-through until a steady-state condition was achieved. Data acquisition commenced immediately after switching on the refrigeration plant. The freezing process continued either until the frozen bodies of soil around the freeze pipes merged together, or until practically steady state conditions were observed. The temperature measurements give a uniform picture in all tests, i.e. redundant sensors gave practically the same results, and symmetry conditions were obtained. Likewise, a mirror image was observed for the advection behaviour. It was possible to determine the cooling power from the volume flow of the coolant measured at regular intervals along with the inflow and outflow temperatures, taking into account heat capacity of the coolant and the power losses in the system.

The numerical back-calculation of the six large-scale model tests agreed well with the measured temperature values. This was true not only for stationary groundwater or for cases with moderate amounts of flow, but also for cases with high to very high seepage flow velocities. The calculated cooling power was also in good agreement with the experimental values. It should be noted that, thanks to the abovementioned accurate parameter determination, no calibration of any kind was necessary in any of the simulations. This increases the value of the verification.

The test results made it possible to verify the quality of the approximate and frequently-applied solutions found in the technical literature. These include the solutions of Ständer and of Sanger & Sayles for the artificial freezing of groundwater without seepage flow as well as those with seepage flow of Victor. The solutions supply the time development of the frozen body around a freeze pipe, i.e. the refrigeration time required to reach a specified thickness in the frozen body. Since the derivations of the solutions are principally for one freeze pipe, the solutions of Ständer and Victor were extended with the aid of empirically derived correction factors for a row of freeze pipes, i.e. the pre-cooling effects caused by the presence of a neighbouring freeze pipe were taken into account. The solution of Sanger & Sayles does not take this effect into account. In the tests with no groundwater flow, all of the approximate solutions are in good agreement with the measured results, though it is essential to take into account the pre-cooling effect. In the case of tests with groundwater flow, the solution of Victor underestimates the freezing time. The deviations are proportional to the flow rate, i.e. the stronger the convection the more inaccurate the solution. This solution should therefore be used only for preliminary dimensioning purposes in specific cases. The solution of Sanger & Sayles is the only one that includes a formula to estimate the required cooling power. The comparison of the cooling power derived from the tests without groundwater flow was in good agreement with the theoretical prediction.

As an intermediate result, it may be concluded that the validity of numerical model has been confirmed and that the approximate solutions for the case of no groundwater flow can be used in the decision-making process, e.g. for preliminary design purposes. Further investigation was required only for cases where there is significant groundwater flow. This was done by means of a parametric study involving a series of freeze pipes in homogeneous ground. The usual parameters, such as seepage flow velocity, soil temperature, and the diameter and temperature of the freeze pipes, as well as their spacing, were varied. The simulations were evaluated with reference to the closure time, i.e. the refrigeration time required for merging all the frozen bodies around the individual freeze pipes together. With the aid of these results and a dimensional analysis, it was possible to determine the expression for the critical flow velocity as a function of the abovementioned parameters. In other words, thanks to this formula, it was possible to implement the preliminary dimensioning of a AGF measure in such a way that the critical flow velocity obtained is greater than the in-situ value, with the result that closure of the frozen body can be assured, despite groundwater flow. It is obvious that the lower the in-situ flow rate is in relation to the derived critical flow rate, the more reliable will be the planned AGF measure. A further result of this study is the derivation of a formula to calculate the required freezing time for closure of a frozen body, particularly as a function of the closure time for the case of no seepage flow and the ratio of in-situ flow velocity to critical flow velocity.

The influence of natural soil heterogeneity on the growth of the frozen body was also investigated. For this purpose, horizontally layered ground was modelled with a row of vertically placed freeze pipes and with a flow horizontal and normal to the row of freeze pipes. Specifically, a two-layer model with layers of the same thickness, and a three-layer model – a so-called sandwich model - were investigated. In addition to the medium fine sand from the other tests, less permeable sand and also silt were used as model materials. Due to the chosen arrangement, the initial flow velocity for each layer depended on its permeability. It is clear from the simulation results that, in the case of layers with very different values of permeability (differences on the order of two orders of magnitudes, e.g. the difference between silt and medium fine sand), no interaction can be detected. On the other hand, for a moderate difference in permeability between the layers on the order of a half order of magnitude, e.g. the difference between the sand used in the other tests and the medium fine sand), a distinct region close to the contact zone was observed exhibit-

ing locally increased flow velocity and hence a slower closure time. This is due to the fact that the region with lower permeability freezes more quickly and thus the groundwater fed into the end of this layer is diverted into the still unfrozen layer of higher permeability, so that the flow velocity is increased locally. This effect is more pronounced with a higher flow velocity and it can prevent closure of the freezing body, especially in the three-layer model. Since in-situ deviations of this order of magnitude of permeability cannot be ruled out, and since the accuracy with which this parameter can be determined is also limited, it is recommended that the freezing measure is dimensioned conservatively with regard to the closure time, i.e. one has to aim at shorter closure times.

One of the most important applications of the ground freezing method in underground construction is as an auxiliary measure in the excavation of cross passages. Two basic situations in constructing cross passages were investigated, namely the case with a horizontal groundwater flow parallel to the main tubes and the case with a flow normal to the tubes. In the first case, the main focus was on optimising the distribution of the freeze pipes in the cross passage, whereas in the second case the identification of potential problematic zones was the main interest. For both cases, the geometry of the tubes was kept constant, i.e. the diameter of the main tubes was 8 m and their axes were horizontal and parallel, separated at a distance of 24 m. The cross passages had a diameter of 5 m. The ground was considered to be homogeneous and consisted of the same model material as in the previous tests. In the first case, different pipe arrangements were modelled. The optimum arrangement, i.e. that for which the shortest refrigeration time was required until a minimum frozen body thickness of 2 m was obtained everywhere - without at the same time causing a freezing of the enclosed zone that had still to be excavated - was found to be a uniform distribution of the freeze pipes along an ellipse around the cross passage. In contrast to the usual arrangement, a circle requires four additional freeze pipes, but the freeze time is reduced by about 30%. In the second case, the longitudinal flow causes a delayed closure of the frozen body in the contact zone between the main tunnel and the cross passage, in particular in the zone of the roof. This problem could possibly be overcome by placing short additional freeze pipes in this area.

The cases or problems investigated above are indeed relevant to tunnelling practice, but deal specifically with ideal situations. To verify the practical feasibility of the model developed, earlier tunnel excavations were simulated and the results were compared with the field measurements. Three metro or fast rail projects were simulated: the crossing of the Rednitz valley in Fürth, the Università metro station in Naples and the undercrossing of the river Limmatt in Zurich. The modelling of each project had different emphases. In the first case, the whole of the freezing process up to closure time had to be simulated in 3-D. Since this construction project was very well documented, it could be modelled realistically, e.g. by taking into account non-horizontal layered ground, a curved distribution of the freeze pipes (length approx. 60 m) and a variable freezing temperature. The results were in good agreement with the field measurements. It should, however, be mentioned that, no comparably detailed and time-consuming simulations of a ground freezing construction measure (with over two million elements in a coupled thermo-hydraulic problem) have, to our knowledge, yet been reported. The other two cases were simulated in 2-D. The documents describing the Naples project contain no information about the thermal parameters. These were determined with the aid of field measurements on a cross section by means of back-analysis. The comparison of the simulation results on another cross section with corresponding field measurements showed good agreement. In the third project it was known that the freezing time not only clearly exceeded the estimate during construction, but also that a closed frozen body would probably not have been obtained without the use of grouting to retard the flow. The simulations show the great sensitivity of the AGF method to flow conditions. These three case studies have demonstrated that the numerical model is suitable for the simulation of the sort of complex AGF measures that are often required in construction projects, as well as being useful for subsequent investigations.

b) The problem of ice lens formation in AGF

In so called frost susceptible soils, the freezing process may lead to the formation of ice lenses, which will cause a corresponding heave. It has long been recognized that this phenomenon is not the result of the volume change in the ice during freezing. Observations from laboratory and field tests provide a basis for alternative explanations and theoretical models. Very coarse-grained soils are not frost susceptible, due to a lack of hydrate films or capillaries, and likewise clayey soils due to their very low permeability. An important factor in connection with the formation of ice lenses is that the water in the voids cannot freeze completely. Due to osmotic or capillary potential, suction stresses can develop, which may result in water migration (the model for primary frost heave). A more recent theoretical explanation – also known as the secondary frost heave model – is based on the effect of thawing and refreezing (thermal regelation) due to pressure changes and the presence of a temperature gradient along the grain. This model also explains the segregation of ice lenses and soil grains. During the formation of ice lenses all the abovementioned mechanisms of primary and secondary frost heave may be activated. However, if there are large amounts of heave, it can be assumed that a pronounced secondary heave is present.

Within the framework of the research project we concentrated mainly on tunnelling problems connected with the formation of ice lenses when using the AGF method. The research programme aimed at developing a corresponding numerical model. Due to the complexity of the processes, it is to be expected that simple model will have their shortcomings, while more rigorous models will be advantageous in fundamental research. However, these models will no doubt have disadvantages regarding their application in practice-oriented research. Taking these factors into consideration, a reassessment was carried out into the existing, widely used, numerical models. These can be classified as empirical/semi-empirical, hydrodynamic, rigid ice, segregation potential, thermo-hydraulic-mechanical (THM) models and thermo-mechanical (TM) models. The empirical and semi-empirical models do not take the main physical processes into account, at least not in general terms, and are therefore of only limited use. The hydrodynamic, “rigid ice” and “segregation potential” models are one-dimensional. Thus their range of application is also very limited. The THM model is the most rigorous one and it has therefore previously been the favourite model for research projects, but on closer examination it was found that, besides the greater effort required for determining the unknown non-constant material parameters, i.e. the unfrozen water content and the permeability as a function of temperature, especially in the “frozen fringe” region, there were further uncertainties, such as the relationship between the stress tensor and curvature of the frost boundary with respect to the growth direction of the ice crystals. In addition, the THM model is based on small strains and a linear elastic material behaviour and therefore, depending on the problem under consideration, would have to be extended. As a result of these problems in determining the unknown functionalities, as well as the need for an improvement or extension of the model, this approach was not deemed to be promising. Instead, the TM model of Michalowski & Zhu (2006) was selected for the numerical implementation, and for the modelling of practical problems planned for the near future. The model simulates the formation of ice lenses under loading very well, reproducing the results of experimental investigations published in the literature. Furthermore, the material parameters can be determined with a reasonable effort. Compared to the micro-models (the THM models), extending this model to handle the 2-D case is much easier and it was implemented in a general-purpose FE program. In the course of this implementation, improvements were made regarding the relationship between porosity and volumetric strain and the equivalent stress needed to prevent ground heave. These improvements are based on plausibility considerations.

The verification of the TM models, i.e. the model of Michalowski & Zhu together with the model in which the improvements were implemented, was carried out using the published results of the ten frost heave tests of Fukuda. One of these tests was performed in accordance with the step freezing method, while the others followed the ramped freezing method performed, in some cases, under different applied loading. The calibration, i.e. determination of the optimum material parameters, was carried out for some of the tests, while the remaining tests were used for the verification. It was found that the simulation

series with the parameters proposed by Michalowski & Zhu did not show good agreement with the test results. After optimising the parameters, an improvement was achieved in this model. An equally good agreement was obtained with the improved model. Since the definition of the parameters from physical considerations appeared to be more plausible here, compared to other models, this model was rated as the most suitable for modelling heave caused by the formation of ice lenses.

The testing technique for the 1-D tests is the most highly developed, though it should be added that there are relatively few results of well-documented tests in the literature. These tests consist basically of a saturated column of soil, the ends of which are subjected to different thermal boundary conditions (the so-called frost heave test). Variations in the test procedure concern the relative change of temperature at both ends of the specimen, as well as any load application. Our own experimental investigations aimed at creating a database of the results not only of one-dimensional, but also of large-scale, two-dimensional tests. No such results have yet appeared in the technical literature. The specimen preparation and installation can be done either by adding water above the plastic limit, and by mixing, installation and consolidation or by installing the specimen in a dry state and subsequently saturating it by causing water to flow through. For the second method, only relatively sandy soils that are nevertheless susceptible to frost action are suitable. Due to the desire to carry out two-dimensional frost heave tests, this installation method was preferred. In order to optimise the testing program, a multi-step procedure was chosen. In the first phase, based on the results of preliminary tests, a suitable model material had to be selected. The equipment permitted the installation only of small specimens, but, on the positive side, up to six tests could be started at the same time. In the second phase, the aim was to improve the database by adding our own test results by means of element tests. In contrast to the preliminary tests, the boundary conditions here could not only be set more accurately and flexibly, but also allowed the temperature distribution to be recorded along the specimen, together with the amount of water absorbed. In the final phase, the more time-consuming, large-scale 2-D frost heave test had to be carried out. Here, the priority in the measurements was to record not only the temperature field, but also the expected 2-D deformation field.

For the preliminary tests, a mixture of medium-fine sand with basalt or lime flour was used. Five series of tests with different mixes were carried out, with basalt flour being used for the first two series and lime for the last three. The heave was then measured at regular time intervals. For most specimens, ice lenses formed, but, as expected, not with the samples having a low percentage of fines (less than 15%). In practically all of the series, the formation of macro ice lenses occurred with some of the specimens, while in the other specimens micro ice lenses were formed with varying extents. The time variation of the rate of heave was practically constant, especially for the specimens in which macro ice lenses formed, whereas for most of the other specimens, a uniform decreasing tendency was observed. After carrying out the first five test series it was noted that both of the fine materials investigated are, in principle, suitable for frost heave tests. The mixtures containing a powdered rock admixture of between 20% and 30% always produced ice lenses, with the exception of one particular specimen. As expected, the formation of ice lenses becomes less probable with a smaller proportion of admixture, and in the case of the test with the highest amount of admixture of 35%, heave was not observed even when the pore water froze. This is probably due to the fact that the compaction of the specimen in the dry state was insufficient. Since the results of the frost heave tests with both fine materials were similar, preference was given to the lime flour for hygienic reasons, i.e. in order to avoid the formation of fine quartz dust. An admixture of between 25% and 30% was considered optimal for the subsequent element tests.

Three element tests were carried out with admixtures of 30% (two tests) and 25% (one test). All of the tests started with the step freezing method, i.e. the upper end of the specimen was suddenly cooled to well below its freezing point, while the temperature at the other end of the specimen was held constant above the freezing point. In none of the tests could the formation of ice lenses be observed. After reaching a steady state in each case, the tests were stopped. Since the first test was carried out with only moderate thermal insulation and at room temperature, it was suspected that the reason for the lack of formation of ice lenses was insufficient insulation on the sides. The lateral insulation

was therefore increased for the remaining tests and an air-conditioned chamber was installed in order to be able to set the surrounding temperature as close as possible to the highest temperature reached in the test. The final element test served to confirm the results of the previous tests, but taking into account a mixture with a slightly lower percentage of fine material of 25%. It should be noted that ice lens formation was observed for all preliminary tests on specimens having this mix ratio.

Since no ice lenses formed in the element tests, three additional series of preliminary tests were carried out in parallel to the third element test, with the aim of clarifying or eliminating the possible causes of the problems encountered in the element tests. Series 6 therefore consisted of only three specimens with a sand to lime flour mix ratio of 70%:30%, but series 7 was a complete series, i.e. with six specimens having a mix ratio of 75%:25% and series 8 likewise had this mix ratio, although artificial thin intermediate layers of lime flour were inserted in the case of three specimens. For these three specimens, every 10 mm of compacted soil mixture was alternated with a 1 mm layer of compacted lime flour. The reason for testing layered specimens was to allow an investigation as to whether the ice lenses form more readily in the presence of local heterogeneities than in the homogeneous case. For all three specimens in test series 6, ice lenses were observed, but in contrast to the first series there was no formation of macro ice lenses. In the case of one specimen, ice lenses formed only after a delay of three days, but this could not be explained. In the case of the other specimens, i.e. those of series 7 and 8, there was no ice formation. Due to the lack of success it was decided to dispense with further element tests and also with the large-scale test.

Following this detailed examination of the problem of ice lens formation it was affirmed that, though this phenomenon is widely known and its most important factors have already been identified, the interrelationships involved in ice lens formation are still not fully understood, due to the complexity of the various processes. For example, as far as the limiting cases are concerned, it is still not clear under which conditions (material composition and thermo-hydro-mechanical boundary conditions) ice lens formation takes place and, where it does, whether macro or micro ice lens formation will be involved. These questions could be more or less answered with the help of a rigorous THM micro-model. At the present time, some of the important functionalities and interrelationships in these models remain to be explained and even identified, but their investigation belongs to the field of fundamental research and is thus beyond the scope of this research project. The TM macro-models avoid this problem by considering a smeared continuum, and are easier to extend and implement in the case of two-dimensional conditions. With the improved TM model, the one-dimensional tests can indeed be back-calculated, but they do not allow any quantitative conclusions to be made regarding the control of the cooling plant for the purpose of preventing ice lens formation.

The current theoretical and experimental difficulties require more thoroughgoing fundamental research. At the same time, the view gradually developed during the execution of this research project that the problem of frost heave can in practice largely be overcome through practical engineering measures, such as intermittent freezing, whereas the problem of groundwater flow is of a more fundamental nature, because it can undermine the entire feasibility of an AGF measure. We have therefore attached far greater importance than originally intended to the latter problem within the framework of this research project.

1 Einleitung

1.1 Bedeutung des Gefrierverfahrens für den Untertagbau

Von zentraler Bedeutung für den Untertagbau in wasserführendem Lockergestein ist die Standsicherheit des Vortriebsbereichs und – vor allem beim innerstädtischen Tunnelbau – die Beschränkung der Geländesetzungen. Bei geringer Überlagerung kann eine Instabilität im Vortriebsbereich bis zur Oberfläche fortschreiten und zum Tagbruch führen.

Die Kontrolle der Ortsbrust, die Beschränkung der Setzungen und die Verhinderung einer Sickerströmung gegen den Hohlraum, können durch Baugrundverbesserung (Verfestigung, Versteifung und Abdichtung des Baugrundes), durch Stützung und Versiegelung der Tunnelortsbrust und -leibung oder durch Kombination dieser Massnahmen erreicht werden.

Baugrundverbesserungsmassnahmen sind in der Regel kostenintensiv und zeitaufwändig. Tunnels in wasserführendem Lockergestein werden deshalb vermehrt durch den Einsatz geschlossener Schilde vorgetrieben, welche die Tunnelortsbrust und -leibung kontinuierlich während des Vortriebs stützen und das Grundwasser fernhalten. Obwohl das Einsatzspektrum solcher Maschinen in den letzten Jahren ausgeweitet wurde, ist man weit davon entfernt, die Ortsbrust in jedem Baugrund sicher zu beherrschen. Hinzu kommt, dass die Standsicherheit der Ortsbrust nicht nur während des laufenden Vortriebs, sondern auch während der Durchführung von Arbeiten in der Arbeitskammer (Wartungs- oder Reparaturmassnahmen, händisches Entfernen von Fremdobjekten usw.) gewährleistet werden muss. Ferner kommen für hohe Bergwasserdrücke (> 6-10 bar) oder bestimmte Untertagbauten (kürzere Tunnels oder vereinzelte Streckenabschnitte im Lockergestein, Querschläge usw.) nur konventionelle Vortriebsmethoden oder offene Betriebsmodi in Frage. In all diesen Fällen sind Baugrundverbesserungsmassnahmen oft unverzichtbar.

Der Baugrund kann entweder durch *Injektionen* oder durch *künstliche Vereisung* verfestigt, versteift und abgedichtet werden. Machbarkeit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit von Injektionsmassnahmen, kann durch die Beschaffenheit des Baugrundes (hoher Feinkorngehalt, heterogener Aufbau) oder durch Umweltauflagen beschränkt sein. Fallweise kann das Gefrierverfahren vorteilhaft oder gar die einzige technisch machbare Methode sein. Es ist generell anwendbar (feuchter Baugrund und geringe Strömungsgeschwindigkeit vorausgesetzt), die mechanischen Eigenschaften des gefrorenen Baugrundes sind zuverlässiger bestimmbar, das Verfahren ist reversibel und absolut schadstofffrei.

Im Tunnelbau wird das Gefrierverfahren verschiedentlich eingesetzt: für Anfahr- und Einfahrplomben bei Schildvortrieben und Rohrvorpressungen, für die Überwindung von relativ kurzen Bereichen mit ungünstiger Geologie, für Startschächte, Querschläge, als Firstvereisung zur Vortriebsicherung, für das Box Jacking, zur Verbindung zweier Gegenvortriebe beim maschinellen Tunnelbau, zur Erstellung von SOS-Nischen, für den Kavernebau, für das Ausbrechen von Aufweitungen, als Sanierungs- oder Notmassnahme zur Abdichtung bei Wasseranfall oder in unvorhergesehenen Störzonen beim TBM Vortrieb im Hartgestein oder in weichem Baugrund.

1.2 Zielsetzung des Forschungsprojekts

Das Gefrierverfahren weist zwar die erwähnten, fallweise sehr wichtigen Vorteile auf, ist jedoch kostenintensiv und zeitaufwändig und erfordert hohes bautechnisches Niveau.

Der Tunnelbau unter Zuhilfenahme des Gefrierverfahrens sollte daher auf klaren wissenschaftlichen Erkenntnissen und Überlegungen beruhen. Mit dem vorliegenden Forschungsprojekt soll ein Beitrag zur rationalen Planung von Vereisungsmassnahmen geleistet werden.

Das Forschungsprojekt ist durch die Einschätzung motiviert, dass Bauhilfsmassnahmen im Allgemeinen und das Gefrierverfahren insbesondere in Zukunft vermehrt eingesetzt werden, weil neue Untertagbauvorhaben unter immer schwierigeren geotechnischen Randbedingungen realisiert werden. Man stellt auch fest, dass die Bereitschaft zu solchen aufwändigen Massnahmen in den letzten Jahren zugenommen hat. Sicher wird das Gefrierverfahren auch in Zukunft eher für Spezialfälle in Anwendung kommen, doch auch diese nehmen infolge des zunehmenden Schwierigkeitsgrades der Projekte zu.

Potentielle Probleme bei der Anwendung des Gefrierverfahrens stellen das Vorhandensein einer Grundwasserströmung sowie Oberflächenhebungen bzw. -setzungen während der Gefrier- bzw. der Auftauphase infolge Eislinnenbildung dar. Ersteres kann zu einer Verlangsamung der Bildung eines geschlossenen Gefrierkörpers führen oder dies gar verunmöglichen, während im zweiten Fall unzulässige Verformungen bestehender Gebäude die Folge sein könnten. In beiden Fällen ist die Behandlung des Problems komplex und erfordert die Berücksichtigung gekoppelter Prozesse, allerdings unter Zugrundelegung unterschiedlicher physikalischer Vorgänge. Aus diesem Grund werden diese Aspekte im vorliegenden Forschungsprojekt getrennt voneinander behandelt.

1.3 Strukturierung des Berichtes

Nach einer kurzen – für das Verständnis der folgenden Kapitel erforderlichen Übersicht der relevanten bautechnologischen Aspekte des Gefrierverfahrens (Kapitel 2) – werden im ersten Teil dieses Berichtes (Kapitel 3 bis 8) die Ergebnisse unserer Arbeit zur Problematik des Bodengefrierens unter hohen Fliessgeschwindigkeiten dargestellt, während die Eislinnenproblematik im zweiten Teil (Kapitel 9 bis 13) erläutert wird.

Der wichtigste Beitrag des vorliegenden Forschungsprojektes umfasst die mathematische Erfassung des Gefriervorgangs im strömenden Grundwasser, die Überprüfung der Aussagekraft des numerischen Modells (einerseits durch eigene, speziell zu diesem Zweck konzipierten grossmassstäblichen Modellversuche, andererseits durch den Vergleich und die Interpretation von Feldmessungen an ausgeführten Tunnelprojekten) sowie die systematische Untersuchung einiger praktischen relevanten Fragestellungen.

Um diverse Fragestellungen des Gefrierverfahrens im strömenden Grundwasser zu untersuchen, wie z.B. den Einfluss eines heterogenen Untergrundes oder komplexe Hohlraumgeometrien und Lanzenanordnungen, wurde im Rahmen der Dissertation von Dr. Sres ein neues gekoppeltes thermo-hydraulisches Modell (das sogenannte «TH-Modell») in 3D formuliert und numerisch implementiert (Sres 2009). Die Gleichungen des TH-Modells und ihre numerische Lösung werden nach der Darstellung der wichtigsten thermo-hydraulischen Bodeneigenschaften (Kap. 3) im Kapitel 4 des vorliegenden Berichtes kurz umrissen.

Anschliessend werden die experimentellen Untersuchungen detailliert beschrieben (Kap. 5), die Aussagekraft der theoretischen Modelle (d.h. der aus der Literatur bekannten Näherungslösungen, sowie unseres TH-Modells) überprüft (Kap. 6), ausgewählte Fragestellungen rechnerisch untersucht (Kap. 7) und die Ergebnisse von Feldmessungen aus drei ausgeführten Projekten numerisch interpretiert (Kap 8).

Der Teil 2 behandelt das Problem der Eislinsenbildung. Er umfasst ebenfalls sowohl theoretische als auch experimentelle Arbeiten. Nach einer knappen Darstellung der Problematik (Kap. 9) werden im Kapitel 10 des Berichtes die gängigen Modellvorstellungen über die Ursachen der Frosthebung und die darauf basierenden vorgeschlagenen kontinuumsmechanischen Modelle dargestellt. Anschliessend wird ein für praktische Zwecke geeignet erscheinendes Modell ausgewählt, diskutiert und punktuell verbessert (Kap. 10) und anhand eines Vergleichs mit publizierten Ergebnissen experimenteller Untersuchungen Dritter überprüft (Kap. 11).

Analog zum Teil 1 des Forschungsprojektes sollte die zur Prüfung des Berechnungsmodells herangezogene Datenbasis durch Ergebnisse von eigenen Versuchen bereichert werden. Die diesbezüglichen experimentellen Untersuchungen werden im Kap. 12 beschrieben. Wie dort dargestellt, gelang es uns allerdings nicht, Eislinsen im Elementversuch zu erzeugen, und dies trotz intensiver Bemühungen, wiederholter Verbesserungen der Versuchsanlage und grosser Sorgfalt bei der Vorbereitung und Durchführung der Experimente und obwohl die grundsätzliche Eignung und Frostempfindlichkeit des Modellmaterials vorgängig durch vereinfachte Versuche nachgewiesen wurde.

Gleichzeitig mit diesen Erfahrungen aus den experimentellen Untersuchungen wuchs aufgrund der Auseinandersetzung mit ausgeführten Projekten die Einsicht, dass man das Problem der Frosthebungen durch einen geeigneten (intermittierenden) Betrieb der Gefrieranlage und durch adäquate messtechnische Überwachung weitgehend praktisch umgehen kann. Das Problem des Gefrierens im strömenden Wasser ist grundlegender Natur und entsprechend kritisch in der realen Durchführung. Aus diesen Gründen erschien es zweckmässig, die Ressourcen vermehrt in den mit dem Grundwasser verknüpften Fragestellungen einzusetzen und Teil 1 der Arbeit höher zu gewichten.

1.4 Projektbeteiligte

Zum erfolgreichen Abschluss des Forschungsprojektes hat eine Reihe von Personen beigetragen. Herr A. Ehrbar war für die Herstellung der Gefrierlanzen, des grossmassstäblichen Modells sowie des Elementversuches für die Eislinsenbildung zuständig. Herr E. Bleiker hat alle Sensoren angeschlossen, kalibriert und die Datenerfassung für alle Experimente bereitgestellt. Herr T. Jaggi war zusammen mit Herrn Ehrbar für die Aufbereitung des grossmassstäblichen Modells zuständig. Ferner hat Herr Jaggi die Klimakammer für den Elementversuch zur Eislinsenbildung gebaut. Herr Dr. S. Papakonstantinou hat die Modellierungen der Projekte Neapel und Limmat durchgeführt. Mehrere Studenten haben ihre Studienarbeiten auf dem Gebiet dieses Forschungsprojektes geschrieben und einen entsprechenden Beitrag hierzu geleistet. Herr T. Schneider hat im Rahmen seiner Diplomarbeit erste Modelle und Berechnungen zu den Projekten Limmat und Fürth erstellt bzw. durchgeführt, Frau P. Hiller, Herr M. Neracher und Herr M. Hinder haben im Rahmen ihrer Bachelorarbeiten bei der Untersuchung der Problematik des heterogenen Untergrundes, der Tunnelquerschlänge bzw. der Eislinsenbildung mitgewirkt. Herr Y. Willmann hat bei den weiteren Berechnungen zum Projekt Fürth sowie zur Parameterstudie mit homogenen Untergrund mitgewirkt.

Die Formulierung und Implementierung des TH-Modells zur Simulation des Gefrierverfahrens, welches nicht Bestandteil dieses Forschungsprojektes ist, wurde vom zweiten Autor im Rahmen seiner Dissertation durchgeführt. Diese Dissertation, deren experimenteller Teil sich teilweise mit dem Forschungsprojekt überlappt, wurde mit der Silbermedaille der ETH Zürich ausgezeichnet.

Die Bereitstellung der entsprechenden Projektdaten ermöglichte uns die Modellierung einiger ausgeführter Tunnelprojekte (Kapitel 8). Hierfür sei Herrn M. Bosshard von der Firma Basler und Hoffmann AG (Projekt Limmat), Herrn B. Müller von der Firma Max Bögl Bauunternehmung GmbH (Projekt Fürth) und Herrn G. Di Salvo von der Firma Trevi SpA sowie der Firma Astaldi SpA (Projekt Neapel) gedankt.

2 Bautechnologische Aspekte des Gefrierverfahrens

2.1 Gefrierverfahren

Das Gefrierverfahren als Bauhilfsmassnahme zur Auffahrung von untertägigen Hohlräumen wurde erstmals im Schachtbau 1862 in Thüringen (Deutschland) eingesetzt. Fast hundert Jahre blieb seine Anwendung auf dieses Gebiet der Geotechnik, d.h. den Schachtbau, bzw. den Bau gewölbartiger Strukturen, beschränkt. Wesentliche und weiterführende Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Materialforschung des gefrorenen Bodens in den 70er und 80er Jahren des letzten Jahrhunderts führten zum vermehrten Einsatz dieser Baumassnahme im Tunnelbau. Trotz seiner Kostspieligkeit haben Entwicklungen der Bohr-, Kälte- und Messtechnik sowie erhöhte Anforderungen bezüglich Umweltbelastung und Setzungen von Bauwerken im innerstädtischen Tunnelbau, zu einem vermehrten Einsatz dieser Baumethode im Tunnelbau in den letzten fünfzehn Jahren geführt. So wurden zwischen 1998 und 2007 etwa 50 Tunnelbauprojekte mit Hilfe einer Gefriermassnahme erstellt (Schneider, 2007). Es ist anzumerken, dass die Anwendung des Gefrierverfahrens ein interdisziplinäres Zusammenwirken von verschiedenen Fachbereichen wie Kältetechnik, Anlagebau, Ingenieurbau, Spezialtiefbau und Mess- und Regeltechnik bedingt. In allen Bereichen werden dabei höchste Anforderungen an Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit gestellt. Aus diesem Grund und den oben genannten Anforderungen konzentrieren sich die Anwendungen dieses Verfahrens bislang hauptsächlich auf Europa.

Beim Gefrierverfahren wird dem Boden Wärme entzogen. Man unterscheidet hierbei je nach Kälteträger zwischen zwei Verfahren, dem *cryogenen Gefrieren* mit Stickstoff (Stickstoffvereisung) und dem *Sole-Gefrieren* mit einer Salzlösung. In beiden Verfahren wird der Kälteträger durch das zu gefrierende Erdreich geführt, wo er durch sogenannte Gefrierlanzen dem Boden Wärme entzieht. Der Aufbau der Gefrierlanzen ist in beiden Fällen gleich und besteht aus einem inneren Fallrohr und einem Aussenrohr. Dabei wirkt das Aussenrohr als Wärmetauscher zwischen Kälteträger und Erdreich.

Die beiden Gefrierverfahren unterscheiden sich erheblich in der Eintritts- und Austritts-temperatur des Kälteträgers. Dies beeinflusst daher auch Wirkung und Einsetzbarkeit sowie verfahrensspezifische Aspekte wie Lanzendurchmesser, Steuerung, Zeitbedarf usw. (Tabelle 2). Bei der Stickstoffvereisung wird neben der Wärmekapazität des Kälteträgers von etwa 60 kJ/kg K die latente Verdampfungswärme von 199 kJ/kg (Phasenwechsel: flüssig – gas) genutzt. Diese zusätzliche Wärme, zusammen mit den grösseren Temperaturgradienten gegenüber der Solevereisung, führt zu einem höheren Wirkungsgrad und daher zu einem grundsätzlich breiteren Einsatzbereich unter widrigen Bedingungen bezüglich der Bodenfeuchte, der Grundwassergeschwindigkeit und der potentiellen Eislinnenbildung. Bei der Stickstoffvereisung werden die austretenden Gase nicht weiter verwendet (offenes System) (Abb. 1), während sich beim Sole-Gefrieren der Kälteträger in einem geschlossenen Kreislauf befindet und aus zwei weiteren Kreisläufen besteht (Abb. 2). Der Kälteträgerkreislauf ist über einen Wärmetauscher thermisch an einen Kältemittelkreislauf angeschlossen. In diesem Kreislauf wird durch Verdampfung eines Kühlmittels, in der Regel Ammoniak, dem Kältemittel Wärme entzogen. Die durch Verdichtung des Kühlmittels erzeugte Wärme wird an den Kühlkreislauf, der mit Wasser oder Luft als Abkühlmedium betrieben wird, an die Umwelt abgegeben.

<i>Tabelle 1 Gegenüberstellung der Gefrierverfahren</i>		
	Stickstoff	Sole
Kühlmittel	N ₂ (flüssig)	CaCl ₂ / H ₂ O Lösungen (verschiedene Konzentrationen) Kühlmittel
Eintrittstemperatur	-196 °C	-30 °C bis -40 °C
Austrittstemperatur	-70 °C bis -120 °C	-25 °C bis -35 °C
Wirkungsradius vor Ort	hohe Wärmeleistung pro m ³	niedrige Wärmeleistung pro m ³
Wirkung	Schockgefrieren	langsames Gefrieren
Einsetzbarkeit	Bodenfeuchte 5-100%	Bodenfeuchte 50-100%
Festigkeit des Eiskörper	sehr hoch	hoch
Grundwassergeschwindigkeiten	ab 10 m/d kritisch, aber bis 50 m/d möglich	ab 2 m/d kritisch
Eislinsenbildung	keine	bei stehender Frostgrenze
Zeitbedarf	Tage bis Wochen	Wochen bis Monate
Versorgung	Stickstoff nicht weltweit in notwendiger Menge verfügbar	mit Stromaggregat weltweit einsetzbar
Verfügbarkeit	kurze Aufrüstzeit	aufwändige Installationen
Lanzenaussendurchmesser	54 mm (2")	76 mm (3") bis 120 mm (4.75")
Fallrohrdurchmesser	10 mm bis 12 mm	30 mm bis 50 mm
Bohrdurchmesser	kleiner	größer
Steuerung	jede Lanze einzeln	in Gruppen, aufwändig
Flexibilität	Kühlleistung variabel	bestimmt durch Aggregatsleistung
Vorhaltung	keine	Gefrieraggregate
Know-how	hoch	sehr hoch
Emissionen	Stickstoff	Lärm durch Aggregat
Sicherheit	An- und Abdrehen möglich, Erstickungsgefahr	bei Ammoniak-Anlagen, Gefahr der Grundwasserverschmutzung
Leckverhalten	einmalig unkontrolliertes Entweichen	Durchtränken des Bodens mit Sole, Umweltbelastung
Energiekosten	abhängig vom Stickstofflieferanten	abhängig von den Stromkosten vor Ort

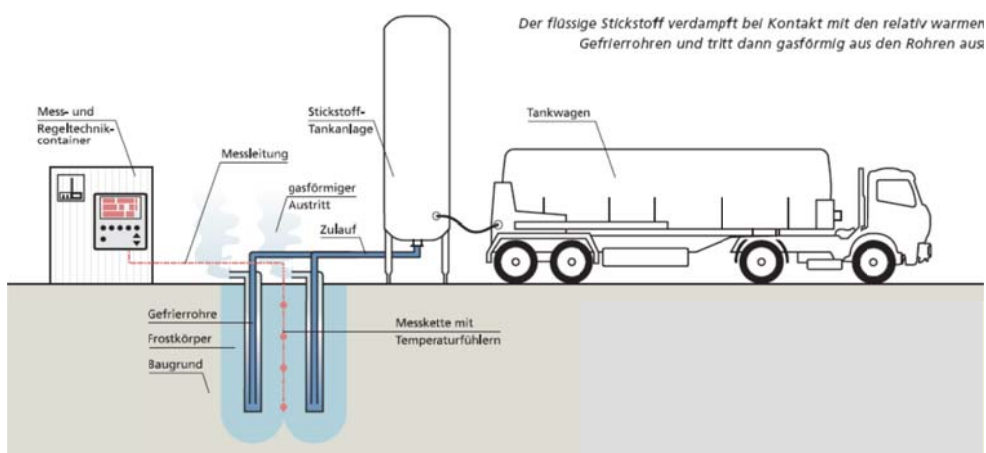


Abb. 1 Stickstoffvereisung (Quelle Max Bögl Bauunternehmung GmbH)

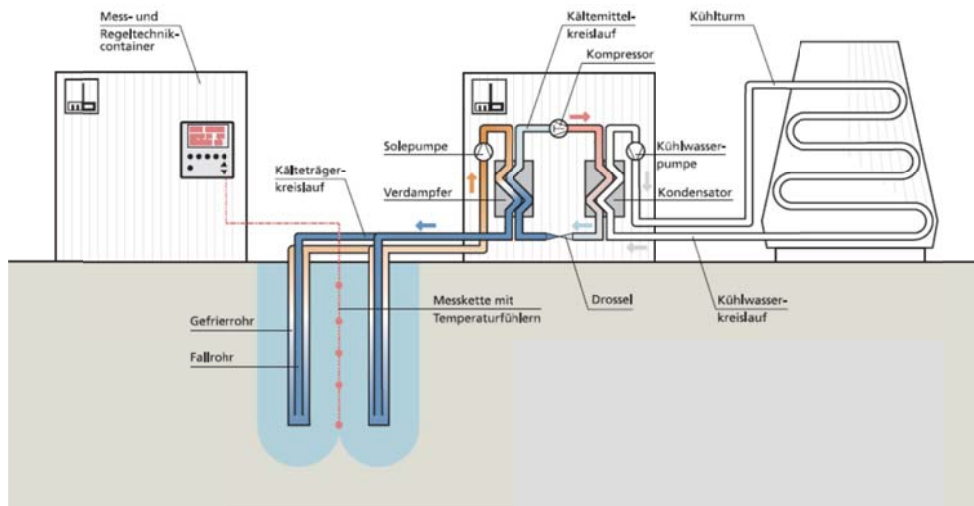


Abb. 2 Solevereisung (Quelle Max Bögl Bauunternehmung GmbH)

Zur Ausnutzung der spezifischen (Kosten-) Vorteile (Tabelle 1) können beide Verfahren auch kombiniert werden. In diesem Fall werden einzelne Rohrreihen oder der ganze Gefrierkörper mit Stickstoff aufgefroren, während die nachfolgende Gefrierk rperhaltung mittels Sole-Gefrieren erfolgt. Dadurch verringert sich einerseits die Aufgefrierzeit und andererseits wird seine Anwendbarkeit erweitert und die Zuverlässigkeit steigt. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Kältemaschine nicht auf den energieintensiveren Aufgefrierprozess dimensioniert werden muss.

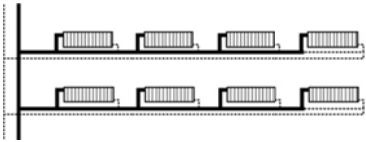
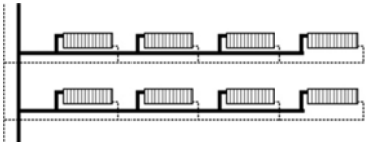
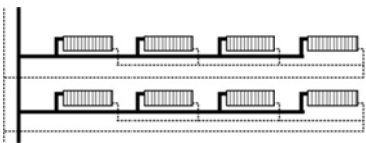
2.2 Sole-Gefrieren

Die am häufigsten verwendeten Solen bestehen aus einem Kalziumchlorid - Wasser-Gemisch. In Tabelle 2 werden die wichtigsten thermischen und hydraulischen Kennwerte der Solen, des Wassers und eines Glykols zusammengefasst. Thermogen stellt ein inhibierter Alkylenglykolether dar. Glykole können, je nach Verdünnungsgrad, einen tieferen Gefrierpunkt aufweisen. Sie sind aber in ihrer Handhabung anspruchsvoller (Vorkühlung notwendig, Gefahr der Destabilisierung). Bei niedrigen Temperaturen steigt die Viskosität der Kältemittel um etwa das 10-fache gegenüber hohen Temperaturen, das verursacht einen entsprechend höheren Pumpenaufwand. Der Kältemittelkreislauf besteht aus Sammel- und Hauptleitungen sowohl Vorlauf, als auch Rückleitung, sowie Verzweigungen, Schieber, Ventile und Gefrierlanzen. Dem Kreislauf werden hohe Anforderungen gestellt an eine effiziente Kühlleistung, eine vollkommene Dichtigkeit, eine Steuerungsmöglichkeit sowie an die R ckbaum glichkeit. Die Gefrierlanzen können als Einrohrk hlung, als Zweirohrkühlung oder als Zweirohrkühlung nach Tiechelmann angeschlossen werden bzw. in Gruppen nach diesen Leitungssystemen. Die Vor- und Nachteile dieser Anschlussschemata werden in Tabelle 3 aufgelistet. Gruppen von Gefrierlanzen werden immer parallel zwischen die Hauptleitung des Vor- und die Hauptleitung des Rücklaufs geschaltet. Als Kriterien für die Gruppenwahl sind zu berücksichtigen Länge und Leistung der Lanzen, Aspekte der Ausfallsicherheit, Druckausgleich und möglichst geringe Reibungsverluste über den gesamten Kreislauf sowie die zeitliche Abfolge des Gefriervorgangs unter Verwendung der betreffenden Lanzen. Die Hauptleitungen haben einen Durchmesser von 150 bis 250 mm (Harris, 1995). Sie werden für laminare Strömung dimensioniert und sind thermisch isoliert. Das gesamte System und insbesondere die Gefrierlanzen müssen absolut dicht sein, da sonst infolge des tiefen Gefrierpunktes der Sole der umgebende Boden auftaut und sich nur noch schwer oder gar nicht mehr gefrieren lässt.

Tabelle 2 Minimale Einsatztemperatur und Stoffeigenschaften von Solen

Medium	T_{min} [°C]	ρ [kg/m ³]		η [mPa·s]		c_p [kJ/kg·K]		λ [W/m·K]	
		(-40 °C)	(20 °C)	(-40 °C)	(20 °C)	(-40 °C)	(20 °C)	(-40 °C)	(20 °C)
CaCl₂ 28.4%	-43.6	1'297	1'272	30.4	3.1	2.68	2.81	0.48	0.56
CaCl₂ 29.9%	-55	1'313	1'283	35.3	3.5	2.64	2.78	0.48	0.55
Thermogen VP1869	-95	988	925	24.7	2.0	2.17	2.39	0.16	0.15
Wasser	0		997		1.0		4.18		0.59

Tabelle 3 Anschlussschemata beim Sole-Gefrieren (Geberit 2004)

Anschlussschema	Vorteile	Nachteile
Einrohrkühlung 	einfache Installation	unterschiedliche Vorlauftemperaturen, nur in Gruppen regulierbar, bei Ausfall ganze Gruppe betroffen
Zweirohrkühlung 	gleichmässige Vorlaufstemperatur	abfallende Drücke
Zweirohrkühlung nach Tichelmann 	gleichmässige Vorlaufstemperatur und Druckverteilung	hohe Leitungslänge

2.3 Stickstoffvereisung

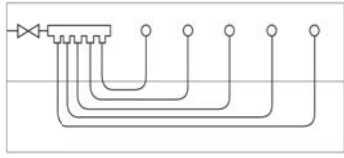
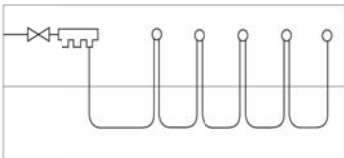
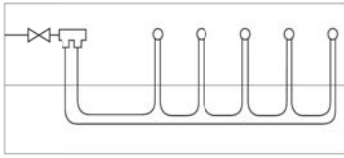
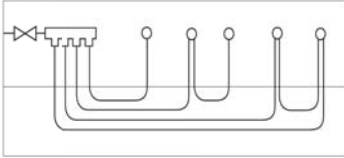
Bei der Stickstoffvereisung fliesst flüssiger Stickstoff ($T = -196 \text{ °C}$) aus einem Vorratstank in das Fallrohr der Gefrierlanzen und verdampft entlang des Zwischenspaltes zwischen Aussen- und Fallrohr. Aus wirtschaftlichen Gründen wird der Stickstoff nach dem Verlassen des Aussenrohres nicht erneut verflüssigt, sondern gefasst, gesammelt und um eine Erstickungsgefahr auszuschliessen, an einer sicheren Stelle in die Umwelt abgeführt¹.

Aufgrund der verfügbaren Wärmekapazität und der latenten Verdampfungswärme des Stickstoffes (Kap. 4.1) kann der Verbrauch pro m³ zu gefrierenden Boden auf 1'500 bis 2'500 Liter flüssigen N₂ geschätzt werden. In der Haltephase, d.h. während des Auffahrens des Tunnels, kann der Verbrauch auf etwa 90 Liter pro m³ und Tag reduziert werden (Linde AG, 2005). Die Gefrierlanzen können über T-Stücke oder Verteilerblöcke an die Zuleitung, in der Regel aus Edelstahl bestehend, angeschlossen werden. Bei der T-Stück-Montage werden die Lanzen oder Lanzengruppen in einer baumartigen Struktur angeordnet. Im zweiten Fall dagegen werden alle Lanzen zentral an einen Verteilerblock angehängt. Gegenüber der T-Stück-Montage zeichnet sich der Verteilerblockanschluss durch einen geringeren Druckabfall, kürzere Leitungswege und die einfachere Berechnung, Montage und Kontrolle aus. Für die Stickstoffvereisung können die Lanzen als Ein-

¹ Die relative Dichte von Stickstoff gegenüber Luft bei 15 °C und 1 bar beträgt 0.967

zelleitungs-, Reihenleitungs-, Ringleitungs- oder Kombinationsleitungssystem angeschlossen werden. Die Vor- und Nachteile dieser Anschlussschemata werden in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4 Anschlussschemata bei der Stickstoffvereisung (Geberit 2004)

Anschlussschema	Vorteile	Nachteile
Einzelleitungssystem 	Einzelregelung möglich, einfache hydraulische Berechnung	grosse Leitungslängen, grosse Druckverluste
Reihenleitungssystem 	kurze Leitungslängen, gruppenweise Steuerung	abfallende Drücke, aufwändige Einzelsteuerung
Ringleitungssystem 	gleichmässige Druckverteilung, geringe Druckverluste	geringe Anpassungsfähigkeit
Kombinationsleitungssystem 	grosse Flexibilität	grosse Leitungslängen

2.4 Bohrverfahren

Aufgrund des grossen Einflusses des Abstandes zwischen den Gefrierlanzen auf der Aufgefrierzeit (Kap. 7.2) werden hohe Anforderungen bezüglich deren Lagegenauigkeit gestellt. Vergrösserte Bohrlochabstände führen zu einer lokal längeren Aufgefrierzeit mit entsprechenden Kostenfolgen. Diese Abweichungen können gar ein Schliessen des Gefrierkörpers verhindern und damit zu einem Scheitern dieser Massnahme führen, d.h. die Genauigkeit der Bohrungen beeinflusst massgebend den Erfolg dieser Baumassnahme. Besonders problematisch sind diesbezüglich horizontale Bohrungen. Im Allgemeinen gilt, dass ab Bohrlängen von etwa 30 m der Einsatz gesteuerter Bohrungen notwendig ist, wie z.B. mit Hilfe des Horizontal Directional Drilling (HDD) Verfahrens. Mit diesem Bohrverfahren können Abweichungen in der Grössenordnung von etwa ± 25 mm eingehalten werden. Ihre Kosten übersteigen allerdings das 2-fache von nicht gesteuerten Bohrungen.

2.5 Gefrierkörper

Aufgrund der unterschiedlichen Aufgaben und Berechnungsansätze wird die Bemessung des Gefrierkörpers in eine statische und eine thermische Bemessung unterteilt. Ziel der statischen Bemessung ist die Festlegung des Untergrundbereiches, welcher mit Hilfe einer Vereisungsmassnahme bauzeitlich verbessert werden soll sowie deren Temperatur, um die Lasten infolge des Auffahrens des Hohlraumes sicher abtragen zu können und um ein Eindringen des Grundwassers im Tunnelbereich zu verhindern. Da das Festigkeitsverhalten des gefrorenem Bodens sowohl zeit- als auch temperaturabhängig ist, muss hierbei die Temperatur des Gefrierkörpers sowie die geplante Gefrierzeit nach dessen Erstellung ermittelt bzw. definiert werden. Die thermische Bemessung beinhaltet neben der Auswahl des Gefrierverfahrens, des Lanzendurchmessers und der räumlichen Verteilung der Lanzen auch die Berechnung der Aufgefrierzeit zur Erstellung des Gefrierkörpers sowie der benötigten Kühlleistung. Schliesslich werden bei der Planung der Vereisungsmassnahmen die baubetrieblichen Aspekte, wie Zusammenfügen der Lanzen in Gruppen, Wahl des Anschlussschemas, Anzahl und Typ der Kälteaggregate bzw. Vorratstanks, thermische Isolierungen usw. festgelegt sowie die messtechnischen Aufgaben ausformuliert wie Messprogramme zur Kontrolle der Lage der Gefrierlanzen, zur Kontrolle des erzeugten Gefrierkörpers und zu seiner Überwachung bzw. zur Überwachung benachbarter Bauwerke. Der vorliegende Forschungsbericht befasst sich mit der thermischen Bemessung. Für die Statik von Gefrierkörpern wird auf Orth (2009), Andersland & Ladanyi (2004) und Harris (1995) verwiesen.

Der Gefriervorgang des Untergrundes kann entsprechend der Form des Gefrierkörperwachstums und der benötigten Kühlleistung in folgende Phasen unterteilt werden:

- Schliessphase: Diese Phase umfasst den Zeitraum vom Beginn der Gefrierzeit bis zum Schliessen des Gefrierkörpers, d.h. bis sich die Gefrierkörper um alle benachbarten Gefrierlanzen herum berühren bzw. alle Isothermen $T = T_0$ zu einer einzigen Kurve zusammenwachsen. Die Dauer dieser Phase wird als Schliesszeit t_{close} definiert. Sie wird entsprechend der Stärke der Grundwasserströmung von dieser beeinflusst bis hin zu einem Nicht-Schliessen des Gefrierkörpers ($t_{close} \rightarrow \infty$).
- Wandwachstumsphase: Das weitere Gefrieren führt zu einem allmählichen Wachstum des einheitlichen Gefrierkörpers entsprechend der Lanzenanordnung bis zum Erreichen der geplanten Mindestabmessungen. Der Einfluss des advektiven Wärmetransports (d.h. der Sickerströmung) ist zwar nicht vernachlässigbar, spielt aber bei richtiger Lanzenanordnung nur eine untergeordnete Rolle für die Dauer dieser Phase. Diese ersten zwei Phasen werden auch als Aufgefrierphase zusammengefasst. Sie erfordern die höchste Kühlleistung, d.h. sie sind für die Auslegung der Kühlaggregate massgebend.
- Haltephase: Nach dem Erreichen der geplanten Gefrierkörperabmessungen wird die Kühlleistung gedrosselt, aber nicht gänzlich ausgeschaltet. Damit wird einerseits Energie gespart und andererseits sichergestellt, dass kein vorzeitiges Auftauen stattfindet. Während dieser Phase erfolgt der Hohlraumausbruch. Bei Untergründen mit Eislinsenbildungspotential soll eine stationäre Lage der Gefrierfront (Isotherme $T = T_0$) vermieden werden (langzeitige Unbeweglichkeit). Hierfür wird ein pulsierender Betrieb der Kühlaggregate vorgenommen, d.h. durch ein entsprechend längeres Ein- und Ausschalten der Kühlaggregate wird eine Bewegung der Gefrierfront erzwungen (Abb. 3).
- Auftauphase: Nach dem Auffahren und der Sicherung des Hohlraumes erübrigt sich die tragende Funktion des Gefrierkörpers. Die Gefrieranlage wird ausgeschaltet und abgebaut. Der Gefrierkörper taut allmählich auf, mit einer Temperaturrate von etwa 0.5 bis 0.8 °C / Tag. Eine Beschleunigung dieser Phase kann durch die Zirkulation von heissem Wasser durch die Gefrierlanzen erreicht werden.

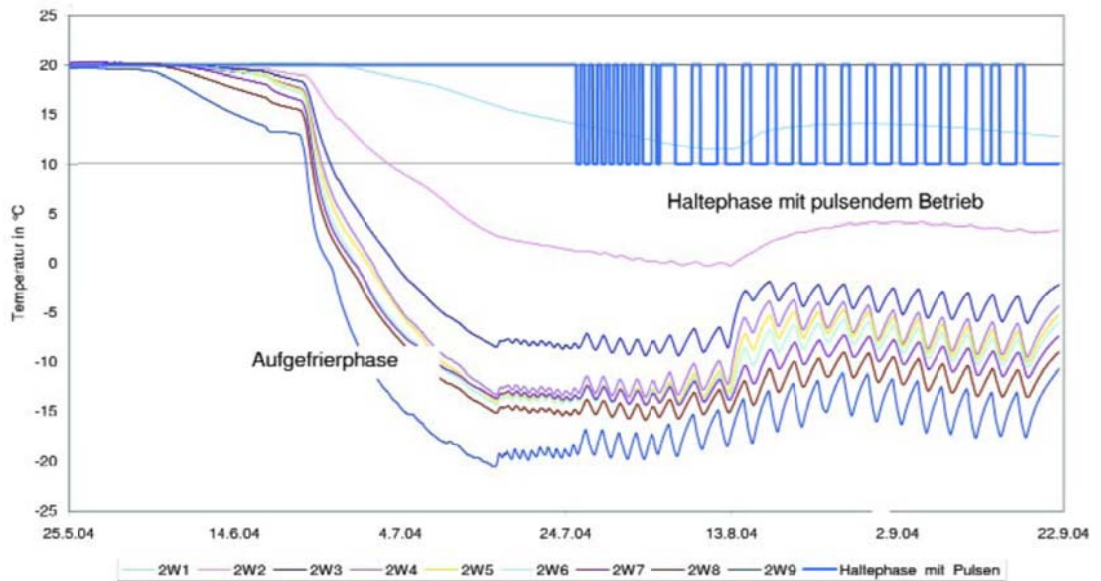


Abb. 3 Temperaturverlauf während der Aufgefrier- und Haltephase und Kühlaggregatbetrieb beim Bahnsteigerweiterungstunnel am Marienplatz in München (Eicher et al. 2005)

Die Überwachung der Abmessungen des Gefrierkörpers erfolgt indirekt über die Messung der Temperatur an ausgewählten Stellen mittels Temperatursensoren. Aus praktischen Gründen werden diese zu Messketten zusammengefasst. Diese sind entlang von hierfür abgeteuften Bohrungen verteilt, verlaufen parallel zur Tunnelachse und sind an kritischen Stellen tangential zum geplanten Gefrierkörper platziert. Zusätzliche Messketten, senkrecht zum Gefrierkörper platziert und bis in diesen reichend, können hilfreich sein für die Beurteilung des Wachstums des Gefrierkörpers und für dessen Temperaturverteilung. Die üblichen Abstände zwischen den Sensoren einer Messkette betragen in horizontaler und vertikaler Richtung zwischen 4 und 5 m bzw. 0.2 und 1 m. Aufgrund ihrer hohen Zuverlässigkeit haben sich elektrische Widerstandsthermometer des Typs Pt durchgesetzt. Sie basieren auf der temperaturbedingten Widerstandsänderung des Metalls Platin. Die Sensoren werden entsprechend ihres elektrischen Widerstandes bei 0 °C gekennzeichnet (z.B. hat ein Sensor Pt100 einen Widerstand von 100 Ω). Eine Fernabfrage aller Sensoren, die Übermittlung via Internet und eine entsprechend zeitnahe Visualisierung der Messwerte, ist heute Stand der Technik, womit grundsätzlich die zuverlässige Überwachung einer Gefriermassnahme möglich ist.

Gefriermassnahmen gehören zu den kostenintensivsten Bauhilfsmassnahmen. In Tabelle 5 werden Einheitspreise hierzu aufgelistet. Diese verstehen sich nur als Richtpreise und sollen für eine grobe Kostenabschätzung hilfreich sein.

Tabelle 5 Richtwerte zur Kostenabschätzung, Stand 2007

Position	Einheitspreise in €
Bohrung bis 40 m gegen drückendes Wasser, verrohrt und verdämmt	250 / m
Gesteuerte Bohrung	500 / m
Kältemaschine	15'000 bis 20'000 / Monat
Elektrizität Kältemaschine	variabel
2 Personen zur Bedienung Kältemaschine	variabel
Stickstoff (Preis stark mengenabhängig)	0.1 / kg
Messtechnik (Querschläge bis Grossvereisung)	40'000 bis 200'000
Baustelleneinrichtung	500'000 bis 900'000

TEIL 1

BODENGEFRIEREN UNTER STRÖMENDEM GRUNDWASSER

3 Thermo-hydraulische Eigenschaften des Bodens

3.1 Wassergehalt

Der Boden ist ein Mehrstoffsystem bestehend aus dem mineralischen Feststoffanteil und Porenräumen. Diese können je nach Sättigungsgrad S_r mit Wasser (gesättigter Zustand, $S_r = 1$) oder mit Luft (trockener Zustand, $S_r = 0$) bzw. mit einer Mischung aus beiden (teilgesättigter Zustand, $0 < S_r < 1$) gefüllt sein. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde nur der gesättigte Zustand berücksichtigt. Die Gefriertemperatur T_0 (in der Regel $T_0 = 0$ °C) ist definiert als die Temperatur, ab welcher der Gefriervorgang beginnt. Insbesondere aufgrund der Wirkung des gebundenen Wassers bei Feinpartikeln sowie Kapillarwirkungen zwischen Partikeln, friert das Wasser in den Poren nach der Unterschreitung der Gefriertemperatur nicht vollständig, sondern erst allmählich mit abnehmender Temperatur (Andersland & Ladanyi, 1994) (Abb. 4). Der ungefrorene Wassergehalt w_u wird entsprechend der üblichen Konvention der Bodenmechanik und ähnlich wie der anfängliche Wassergehalt w_0 , sowie der Eisgehalt w_f massenanteilmässig definiert. Unter der Voraussetzung, dass keine Wasseransaugung und Eislinnenbildung stattfindet (siehe Kap. 10.1),

$$w = w_u + w_f \quad (\text{für } T < T_0 = 0^\circ\text{C}). \quad (1)$$

Anderson & Tice (1973) haben die Temperaturabhängigkeit des ungefrorenen Wassergehaltes w_u anhand von verschiedenen Böden untersucht (Tice *et al.* 1976). Demnach ist dieser für eine bestimmte Bodenart nur von der Temperatur abhängig und nicht vom Wassergehalt, d.h. nicht abhängig von deren Porosität:

$$w_u = \alpha \left(-\frac{T}{T_{ref}} \right)^{-\beta}, \quad (2)$$

wobei T_{ref} die Referenztemperatur von 1 °C ist. Sie wird aus Dimensionsgründen eingeführt. Basierend auf den Messergebnissen von Johansen & Frivik (1980) hat Makowski (1986) für verschiedene Böden die Parameter α und β mittels linearer Regression bestimmt (Tabelle 1). Eine Korrelation zwischen dem ungefrorenen Wassergehalt und der spezifischen Oberfläche der Bodenpartikel wurde von Anderson & Tice (1972) vorgeschlagen. Diese Beziehung beschreibt gut den oben genannten Zusammenhang für Temperaturen unterhalb von -5 °C, ist aber wenig verlässlich für Temperaturen um den Gefrierpunkt (Freitag & Fadden, 1997) und wird daher nicht weiter verwendet.

Tabelle 6 Parameter α , β zur Abschätzung des ungefrorenen Wassergehaltes nach Makowski (1986)

Bodenart	α [-]	β [-]
Kies, Sand	0.008	-0.727
siltiger Sand	0.015	-0.699
Silt	0.030	-0.574
siltiger Ton	0.060	-0.602
Ton	0.120	-0.536
hochplastischer Ton	0.200	-0.456

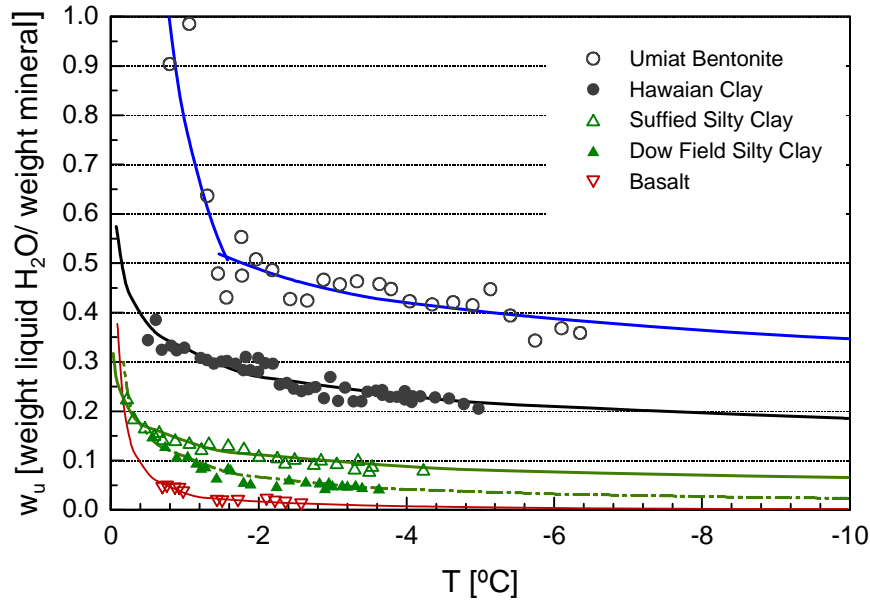


Abb. 4 Temperaturabhängigkeit des ungefrorenen Wassergehaltes für fünf repräsentative Böden (Anderson & Morgenstern, 1973)

3.2 Durchlässigkeit

Die im Forschungsprojekt betrachteten Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers können zwar hoch sein bezüglich der Einsetzbarkeit des Gefrierverfahrens, sind dennoch klein genug, so dass stets laminare Strömungsverhältnisse vorausgesetzt werden können. Demzufolge gilt als Transportgesetz das Gesetz von Darcy. Die Durchlässigkeit des Bodens wird mit dem Durchlässigkeitsbeiwert k beschrieben, der temperaturabhängig ist. Bei Temperaturen oberhalb des Gefrierpunktes ist hierfür die Viskosität entsprechend dem Ansatz von Neiss (1982) massgebend, während bei niedrigeren Temperaturen der ungefrorene Wassergehalt ausschlaggebend ist (Makowski, 1986). Für praktische Zwecke wird die Durchlässigkeit unterhalb einer Temperatur von -15 °C auf 10^{-14} m/s beschränkt (Abb. 5a):

$$k_f = k_f(T_0) \frac{\eta_{\text{water}}(T_0)}{\eta_{\text{water}}(T)} \quad (\text{für } T \geq T_0 = 0\text{ °C}), \quad (3)$$

$$k_f = k_f(T = T_0) \frac{w_u(T) - w_u(T = -15\text{ °C})}{w - w_u(T = -15\text{ °C})} + 10^{-14} \quad (\text{für } T < T_0 = 0\text{ °C}). \quad (4)$$

3.3 Wärmekapazität

Die Wärmekapazität stellt die Wärme dar, die einem Stoff zugeführt werden muss, damit sich seine Temperatur um ein Grad erhöht. Somit ist sie auch ein Mass für die Energiespeicherung. Unter der Annahme, dass sich der Boden wie eine ideale Mischung verhält, d.h. es finden keine Reaktionen statt, können die spezifische Wärmekapazität des ungefrorenen und des gefrorenen Bodens additiv aus den anteilmässigen Wärmekapazitäten der Mischungskomponenten errechnet werden (Russell *et al.* 2008) (Abb. 5). Insbesondere die Wärmekapazität des Wassers und des Eises sind temperaturabhängig, die der Mineralien hingegen kann für praktische Belange im Temperaturbereich von Gefriermassnahmen als konstant betrachtet werden. Aus praktischen Gründen wird sie als volumetrische Wärmekapazität ausgedrückt:

$$c_{soil} = \rho_{dry} (c_{mineral} + w_u c_{water} + (w - w_u) c_{ice}). \quad (5)$$

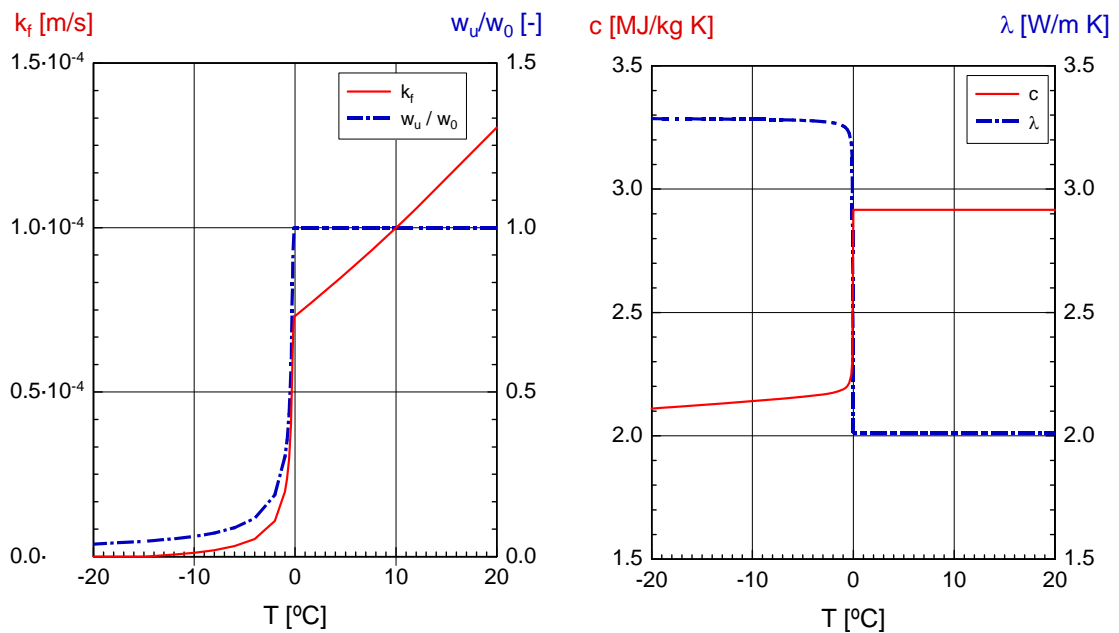


Abb. 5 (a) Durchlässigkeit und ungefrorener Wassergehalt, (b) Wärmekapazität und -leitfähigkeit über Temperatur für einen mittelfeinen Sand

3.4 Wärmeleitfähigkeit

Gemäss dem Wärmetransportgesetz von Fourier stellt die Wärmeleitfähigkeit den Proportionalitätsfaktor zwischen Wärmestrom und Temperaturgradienten dar. D.h. sie stellt das Vermögen eines Körpers dar, Energie in Form von Wärme zu transportieren. Da es sich um einen Transportvorgang handelt, wird dieser nebst der Zusammensetzung auch vom Korngefüge des Bodens beeinflusst. Hypothetische Extremfälle des Korngefüges wären eine Parallel- bzw. eine Reihenanordnung aller Komponenten, deren Betrachtung eine zu kleine bzw. zu grosse äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Bodens ergeben würde. Die tatsächliche Anordnung des Korngefüges liegt zwischen diesen beiden Fällen. Johansen & Frivik (1980) schlagen daher vor, die Wärmeleitfähigkeit des Bodens als Produkt aller seiner Komponenten potenziert durch deren relative Volumenanteile zu berechnen:

$$\lambda_{soil} = (\lambda_{mineral})^{1-n} (\lambda_{water})^{n \frac{w_u}{w}} (\lambda_{ice})^{n \left(1 - \frac{w_u}{w}\right)}. \quad (6)$$

Ferner kann die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Festsubstanz $\lambda_{mineral}$ in analoger Weise unter Berücksichtigung ihrer mineralogischen Zusammensetzung ermittelt werden:

$$\lambda_{mineral} = \prod_j (\lambda_{mineral\ i})^{\beta_j}, \quad (7)$$

wobei β_j die Anteile der jeweiligen Mineralien darstellen und ihre Summe gleich 1 beträgt.

Im Gegensatz zu den Mineralien, ist die Wärmeleitfähigkeit von Wasser (Makowski, 1986) und Eis (Farouki, 1981) von der Temperatur T abhängig:

$$\lambda_{water} = 0.551 + 0.002828 \frac{T}{T_{ref}} + 0.00002095 \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^2 \quad \left[\frac{W}{mK} \right], \quad (8)$$

$$\lambda_{ice} = \frac{488.19}{\left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^2 + 273.15} + 0.4655 \quad \left[\frac{W}{mK} \right]. \quad (9)$$

Für praktische Belange wird im Temperaturbereich oberhalb der Gefrieretemperatur die Wärmeleitfähigkeit des Bodens als konstant angenommen (Abb. 5).

4 Das TH-Modell

Bei der mathematischen Erfassung des Gefriervorgangs wurde auf (i) eine rigorose Berücksichtigung der physikalischen Zusammenhänge sowie auf (ii) die Entwicklung und Implementierung einfacher und effizienter Algorithmen besonders geachtet.

Das Temperaturfeld T wird durch die Wärmetransportgleichung bestimmt:

$$c_{eff\ soil} \dot{T} - \partial_k (\lambda_{soil} \partial_k T) + c_{water} v_k \partial_k T = 0 . \quad (10)$$

Hierin bedeuten v_k die Grundwasserströmungsgeschwindigkeit und $c_{eff\ soil}$ die sogenannte effektive volumetrische Wärmekapazität des Bodens, welche die latente Wärme L infolge Phasenwechsel des Porenwassers berücksichtigt:

$$c_{eff\ soil} = c_{soil} + \rho_{dry} L \partial_T w_u . \quad (11)$$

Die Strömungsgeschwindigkeit v_k wird nach dem Darcy'schen Gesetz berechnet:

$$v_k = -k_f \cdot \partial_k H \quad (12)$$

mit

$$H = \frac{P}{\rho_w g} + z , \quad (13)$$

wobei H die piezometrische und z die geodätische Höhe darstellen. Das Strömungsgeschwindigkeitsfeld v_k erfüllt die Kontinuitätsgleichung, welche für quasi-stationäre Durchströmungen reduziert werden kann zu:

$$\partial_k v_k = 0 . \quad (14)$$

Die Kontinuitäts- [Gl. 14] und die Wärmetransportgleichung [Gl. 10] sind durch die Strömungsgeschwindigkeit v_k und den temperaturabhängigen Durchlässigkeitsbeiwert k_f gekoppelt. Die Gleichungen [10] und [13] sind über die Darcy'sche Geschwindigkeit [Gl. 12] gekoppelt und der temperaturabhängigen Durchlässigkeit [Gl. 3 und Gl. 4].

Die Gleichungen [10] und [13] werden numerisch nach der FE-Methode in einem vorgegebenen 3D Bereich gelöst. Da 3D Berechnungen mit zunehmender Grösse des Modells stark speicher- und rechenintensiv werden, wurde bei der Implementierung besonders auf möglichst einfache und effiziente Algorithmen geachtet.

Die räumliche Diskretisierung wird nach dem Galerkinverfahren durchgeführt. Die zeitliche Integration erfolgt nach einem Einschnitt, nicht iterativen Rückwärts Euler Schema (Reddy & Gartling, 2001). Um Speicherplatz zu sparen, werden die beiden Felder H und T in jedem Zeitschritt nacheinander berechnet, und zwar jedes mit dem aktuellen Wert des anderen (Abb. 6).

Dabei wird die extrapolierte Temperatur folgendermassen berechnet:

$$T^* = \frac{3}{2} T^n - \frac{1}{2} T^{n-1} \quad (15)$$

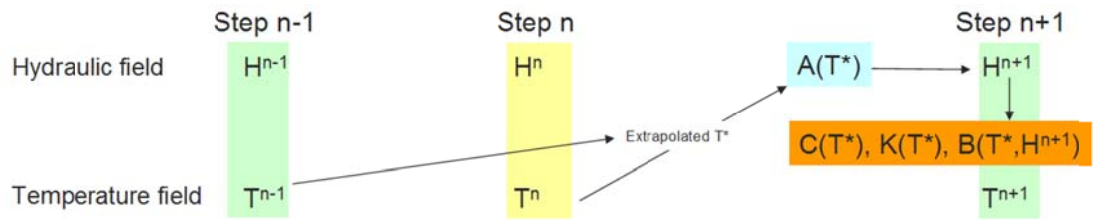


Abb. 6 Zeitlicher Berechnungsschema

Um die Recheneffizienz zu steigern, werden weiterhin isoparametrische hexaedrale Elemente mit biquadratischen Formfunktionen (würfelförmige Elemente) für die Diskretisierung des Simulationsgebietes gewählt. Dadurch sind alle Elemente formgleich, aber mit unterschiedlichen Dimensionen. Somit hängen die Jacobimatrix und ihre Determinante nur von der Kantenlänge der Würfel ab und sind sehr einfach zu berechnen (Korvink, 1993). Allerdings ergeben sich dadurch leichte Einschränkungen in der Diskretisierung. Die FE-Formulierung und die Implementierung des TH-Modells werden in Sres (2009) ausführlich beschrieben.

5 Experimentelle Untersuchungen

5.1 Einleitung

Grundsätzlich kann ein numerisches Modell entweder anhand exakter analytischer Lösungen oder mittels Vergleich mit Versuchsergebnissen aus physikalischen Modellen überprüft werden. Durch den Vergleich mit analytischen Lösungen wird die Richtigkeit der numerischen Prognosen nur im mathematischen Sinne überprüft. Demgegenüber bietet der zweite Weg den grossen Vorteil, dass zusätzlich zur Richtigkeit der numerischen Lösung auch die Angemessenheit der zugrundeliegenden kontinuumsmechanischen Gleichungen überprüft wird.

Wie im Kapitel 5.2 dargestellt, gibt es in der Literatur einen Mangel an gut dokumentierten und qualitativ geeigneten Ergebnissen aus Experimenten mit physikalischen Modellen. Die in der Literatur veröffentlichte Datenbasis ist unzureichend, um eine zuverlässige Überprüfung des numerischen Modells durchführen zu können, insbesondere betreffend der Grenzfälle mit hoher Sickergeschwindigkeit sowie der 3D Situation. Deshalb war es erforderlich mittels eines eigens entwickelten physikalischen Modells Experimente durchzuführen. Um Massstabeffekte auszuschliessen und eine ausreichende Flexibilität in der Auswahl der Randbedingungen zu gewährleisten, (höhere hydraulische Gradienten, Lage und Abstand zwischen den Gefrierlanzen) wurde ein grossmassstäbliches physikalisches Modell konzipiert und gebaut.

Aufgrund des sehr grossen Aufwandes des grossmassstäblichen Modellversuches wurde eine stufenweise Vorgehensweise als zielführend erachtet. Zunächst wurde mit einem in kleinerem Volumen aufgebauten Einlanzenversuch (Volumen des Modellmaterials ca. 0.13 m^3) mit nur einer Gefrierlanze und ohne Sickerströmung die Kälteanlage und das Mess- und Datenerfassungssystem gründlich ausgetestet. Nach diesem, sogenannten «Einlanzenversuch» wurde der grossmassstäbliche Modellversuch (Volumen des Modellmaterials 1.6 m^3) für die vorgesehene Versuchsserie vorbereitet.

Für die Überprüfung der Qualität der theoretischen Prognosen war es von grossem Vorteil, die Materialparameter völlig unabhängig von den obengenannten Modellversuchen zu bestimmen, dadurch konnte eine Kalibrierung der Materialparameter anhand der Versuchsergebnisse vermieden werden. Zu diesem Zweck wurden bodenmechanische und thermodynamische Elementversuche durchgeführt. Zusammenfassend wurden drei Arten von Experimenten durchgeführt:

- Elementversuche zur Bestimmung der Materialparameter,
- Einlanzenversuche zur Überprüfung der Kälteanlage, der Sensoren, der Datenerfassung und des 3D numerischen Modells, sowie
- Grossmassstäbliche Modellversuche zur Überprüfung des 3D numerischen Modells.

Bei allen Versuchen wurde ein besonderes Augenmerk auf die Messgenauigkeit gelegt. Nach einigen Angaben über verwendete Messsensoren, Kälteanlage und Gefrierlanzen (Kap. 5.3) wird zunächst das verwendete Modellmaterial und die Bestimmung seiner thermohydraulischen Parameter mittels Elementversuchen beschrieben (Kap. 5.4). Anschliessend werden in den Kapiteln 5.5 und 5.6 Aufbau und Ergebnisse der durchgeführten Modellversuche dargestellt.

5.2 Experimente aus der Literatur

Die Experimente von Ständer (1967) und Victor (1969) wurden entwickelt, um deren analytische Lösungen für das Gefrieren ohne bzw. mit Grundwasserströmung zu überprüfen, während das Experiment von Beggren (veröffentlicht in Frivik & Comini, 1982) zum Verifizieren eines am NGI (Norwegian Institute of Technology) entwickelten numerischen 2D-Modells konstruiert wurde.

Das Modell von Ständer (1967) besteht aus einem Kasten aus Polymethylacrylat (PMMA). Dieser wird von unten nach oben sehr langsam geflutet, d.h. praktisch ohne Grundwasserströmung. Anschliessend wird das Wasser in einer Überlaufrinne gefasst und in einem Sammelbehälter geheizt, um eine konstante Solltemperatur zu gewährleisten, bevor es das Modell wieder durchflutet (Abb. 7). Die Gefrierlanzen werden horizontal platziert und haben einen Aussenradius von $r_0 = 2$ mm. Als Modellmaterial wurde Quarzsand verwendet. Es wurden Versuche mit einer Gefrierlanze und mit einer kreisförmigen Anordnung mit einem Durchmesser von 400 mm durchgeführt. Letzteres um den Vorkühlereffekt benachbarter Gefrierlanzen gegenüber einer Einzellanzenanordnung insbesondere in Bezug auf den Schachtbau zu untersuchen. Als Versuchsergebnisse mit einer Einzellanze werden lediglich der Gefrierkörperwachstum über die Zeit sowie das Temperaturfeld nach 0.5 h und 2 h Versuchsdauer dargestellt. Für die kreisförmige Anordnung wird ebenfalls das Temperaturfeld nach einer Versuchsdauer eines Experimentes von 0.5 h, 1 h, 2 h und 4 h gezeigt.

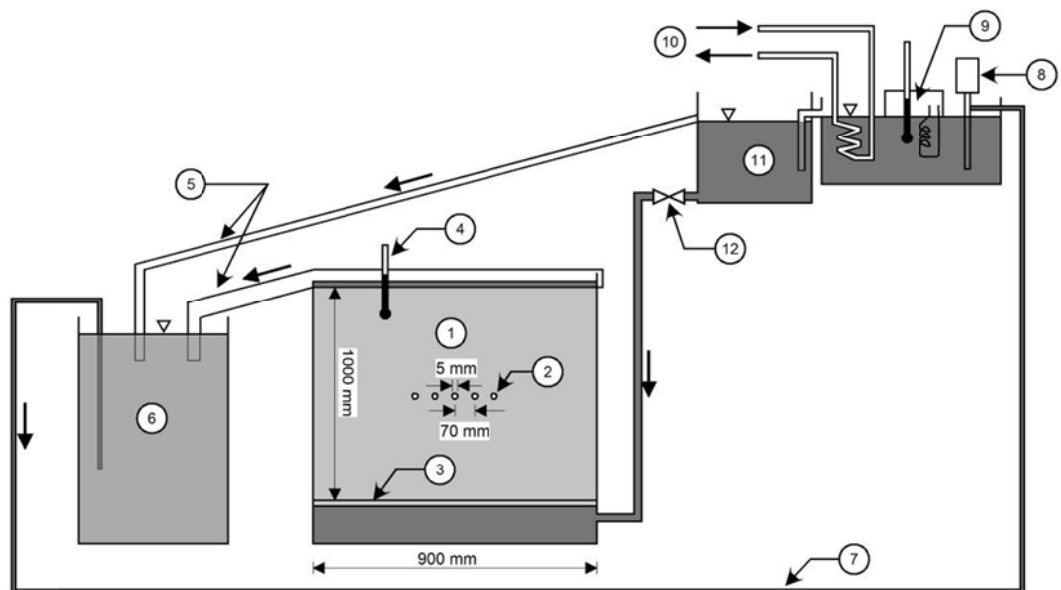


Abb. 7 Versuchsanordnung von Ständer (1967) und Victor (1969) (modifiziert), Modellmaterial (1), Bohrungen für Gefrierrohre (2), Filterplatte (3), Thermometer (4), Überlauf (5), Vorratsbehälter (6), Saugleitung (7), Pumpe (8), Thermostat (9), Kühlsole (10), Druckbehälter (11) und Regulierventil (12)

Victor (1969) verwendete dieselbe Apparatur von Ständer (1967). Um zu überprüfen, ob seine geschlossene Lösung für eine Gefrierlanze die jeweiligen Materialparameter richtig berücksichtigt, wurden neben dem Quarzsand von Ständer (1967) andere Modellmaterialien, wie z.B. Glaskugeln, eingebaut. Das Gefrierkörperwachstum zwischen benachbarten Gefrierlanzen wird gegenüber einer Einzellanze durch die gegenseitige Vorkühlung beschleunigt und beeinflusst damit die Schliesszeit t_{close} . Um diesen Effekt zu quantifizieren, wurden Experimente mit fünf horizontalen Gefrierlanzen reihenförmig angeordnet durchgeführt. Die Dauer dieser Versuche variierte zwischen 3 h und 12 h. Als Ergebnis werden lediglich die durch Interpolation berechneten Isotherme für die Versuche mit einem Gefrierlanzenradius $r_0 = 2.5$ mm und Lanzenabstand von $S = 70$ mm ($S/r_0 = 28$) zum Zeitpunkt t_{close} dargestellt und zwar für Sickergeschwindigkeiten von $v = 2.84, 3.38$ und 4.7 m/d.

Das am NGI entwickelte physikalische Modell zur Simulation einer Gefriermassnahme im strömenden Grundwasser wird in Frivik and Comini (1982) beschrieben (Abb. 8). Im Gegensatz zu den oben beschriebenen zwei Versuchen, wird das Modell horizontal durchströmt.

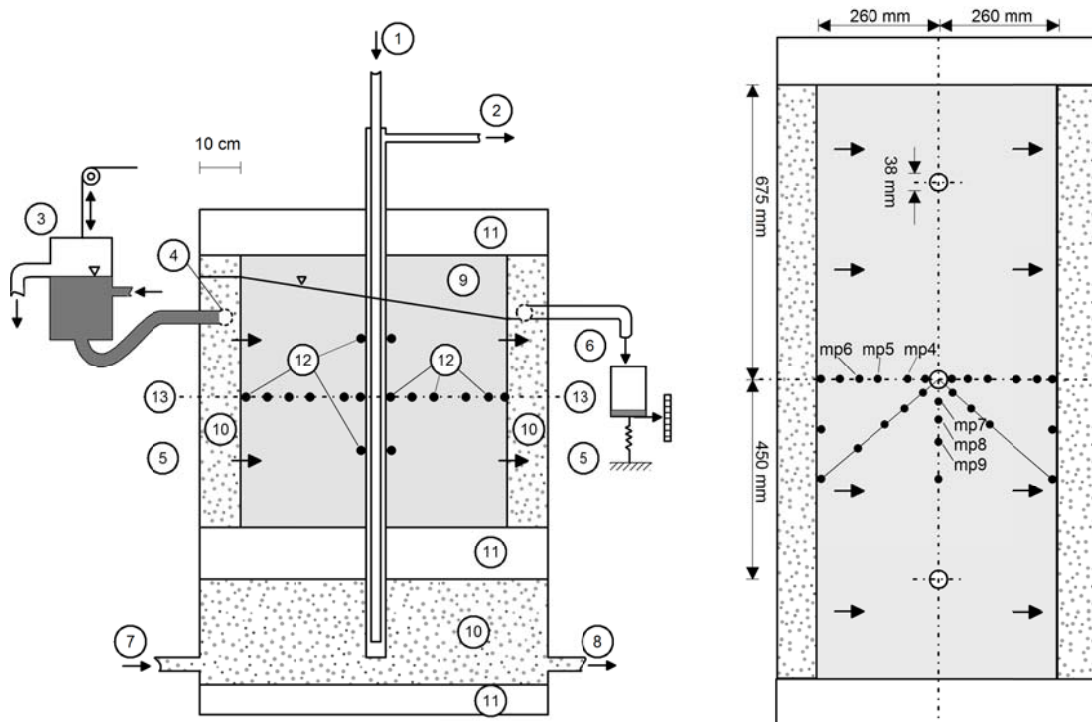


Abb. 8 Versuchsanordnung von Berggren (Frivik & Comini, 1982). Vertikalschnitt A-A (links) und Horizontalschnitt B-B in der Messebene (rechts), Sole Zu- (1) und Rücklauf (2), System zur Konstanthaltung des Wasserdruckes (3), Wassereintragsöffnung (4), perforierte Aluminiumplatten (5), Wasserabfluss (6), Hilfskühlsystem zur Konstanthaltung der Temperatur im Fußbereich des Modells (7) (8), Modellmaterial (9), Blähton (10), extrudiertes Polystyrol (11), Kupfer-Konstantan-Thermoelemente (12), Messebene (13)

Tabelle 7 Geotechnische Kennwerte des Modellmaterials von Berggren (1979)

	ρ_s [kN/m ³]	ρ_{dry} [kN/m ³]	n [%]	w [-]	e [-]	$k_r/\rho_w g$ [m ² s/Pa]
Hokksundsand	26.49	15.70	40.7	0.25	0.69	$6.97 \cdot 10^{-9}$

Es werden drei Gefrierlanzen mit einem Radius von $r_0 = 19$ mm und Lanzenabstand von $S = 450$ mm ($S/r_0 = 23.68$) vertikal angeordnet. Das Modell verfügt über eine relativ starke rundum thermische Isolierung. Als Modellmaterial wurde der sog. «Hokksundsand», welcher ein Quarzgehalt von 35% aufweist, verwendet. Die geotechnischen Kennwerte des Modellmaterials werden in Tabelle 7 zusammengefasst. Die mittlere Wärmeleitfähigkeit und -kapazität des gefrorenen und ungefrorenen Sandes betragen 3.26 W/m K und 1.8 MJ/kg K bzw. 2.00 W/m K und 2.48 MJ/kg K. Die veröffentlichten Messdaten beschränken sich lediglich auf die Ergebnisse eines Versuches mit einer Sickergeschwindigkeit von $v = 0.24$ m/d und zwar auf die Temperaturmessungen von acht Sensoren über eine Versuchsdauer von 30 h.

Zusammenfassend ist zu erwähnen, dass die Abmessungen der Gefrierlanzen in den Modellen von Ständer und Victor sehr klein sind, und die Materialparameter nicht gut dokumentiert sind. Nur die Ergebnisse aus drei Experimenten mit einer Reihenanzahl sind veröffentlicht. Das Modellmaterial von Berggren (Frivik & Comini, 1982) ist zwar gut dokumentiert, aber das physikalische Modell erlaubt aufgrund der Abmessungen nur die Einstellung von sehr moderaten hydraulischen Gradienten ($i < 0.1$) und entsprechend langsamen Sickergeschwindigkeiten, d.h. es fehlen die Daten für die Grenzsituationen mit hoher Sickergeschwindigkeit und erfolgreichem Schließen des Gefrierkörpers. Lediglich die Messergebnisse eines Versuches ($v = 0.24$ m/d) sind veröffentlicht worden.

5.3 Kälteanlage, Gefrierlanzen und Messsensoren

Das Kühlsystem wurde für eine Minimaltemperatur von -35 °C ausgelegt. Es besteht hauptsächlich aus einer Kühlanlage mit einer Nennkälteleistung von 3.0 kW und den Gefrierlanzen. Als Kühlmedium wurde ein Wasser:Glykol-Gemisch (48%:52%) verwendet. Die Kühlanlage ist elektronisch geregelt und wird in Sres (2009) ausführlich beschrieben. Die Zulauf- und Rücklaufleitungen, die die Kühlanlage mit den Gefrierlanzen verbinden, bestehen aus mit Neopren isolierten Kunststoffschläuchen. Die Gefrierlanzen bestehen aus einem inneren Fallrohr aus PVC mit einem Innendurchmesser von 21 mm und einem äusseren Gefrierrohr aus Kupfer mit einem Aussendurchmesser von 41 mm . Die Lanzenköpfe und -füsse wurden aus entsprechenden Adapterteilen aus PVC zusammengestellt. Die Zentrierung des Fallrohres wurde mit Abstandshalter gewährleistet. Für den Einlanzenversuch wurde die Lanze direkt an den/die Kühlleitungen angeschlossen, während beim grossmassstäblichen Modell die drei Gefrierlanzen an einem entsprechenden Verteiler- bzw. Sammelblock aus PVC und diese Blöcke wiederum an den entsprechenden Kühlleitungen angeschlossen wurden. Der Verteiler- und der Sammelblock sind baugleich und wurden so konstruiert und im Labor überprüft, dass eine gleichmässige Verteilung der Flussmenge durch ihre drei Ausgänge stattfindet. Während jedem Experiment werden die Ein- und Austrittstemperatur des Kühlmittels mittels Temperatursensoren des Typs Pt100 sowie dessen Volumenstrom berührungslos mittels eines magnetisch-induktiven Mengenflussgebers gemessen und aufgezeichnet.

5.4 Bestimmung der Parameter

5.4.1 Geotechnische Parameter

Als Modellmaterial für alle Experimente wurde ein enggestufter Mittelsand ($D_{max} = 1\text{ mm}$, $U = 2.9$, $C_c = 1.1$) abgebaut aus den Flussablagerungen des Oberrheins (Weiacher Sand) verwendet. Die Ergebnisse aus der Granulometrie sowie aus den mineralogischen Untersuchungen werden in Abb. 9 zusammengefasst. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f wurde mittels Grosspermeameter für eine Wassertemperatur von 14 °C und die Korndichte ρ_s mittels Pyknometerversuch bestimmt. Da die Viskosität des Wassers bekannt ist, kann in Abhängigkeit des Wasser- und des Eisgehaltes nach Gl. 3 und Gl. 4 die temperaturabhängige Durchlässigkeit des Modellmaterials ermittelt werden (Abb. 5). Für die Experimente wurde der Sand trocken eingebaut und alle 10 cm verdichtet. Durch Wägung des eingebauten Materials und unter Berücksichtigung des belegten Volumens, wurde die trockene Einbaudichte ρ_{dry} ermittelt. Die Porosität n , Porenzahl e und der Wassergehalt w können von diesen zwei Grössen abgeleitet werden. Der letzte Parameter w unter der Annahme einer nachträglichen vollständigen Sättigung nachgerechnet. In Tabelle 8 werden die geotechnischen Kennwerte aller Versuche zusammengefasst.

Tabelle 8 Geotechnische Kennwerte des Modellmaterials

	ρ_s [kN/m ³]	ρ_{dry} [kN/m ³]	n [%]	w [-]	e [-]	$k_f/\rho_w g$ [m ² s/Pa]
Einlanzenversuch		16.61	36.0	0.21	0.56	
grossmassstäbliches Modell	26.13	15.41	40.6	0.26	0.68	$2.45 \cdot 10^{-8}$

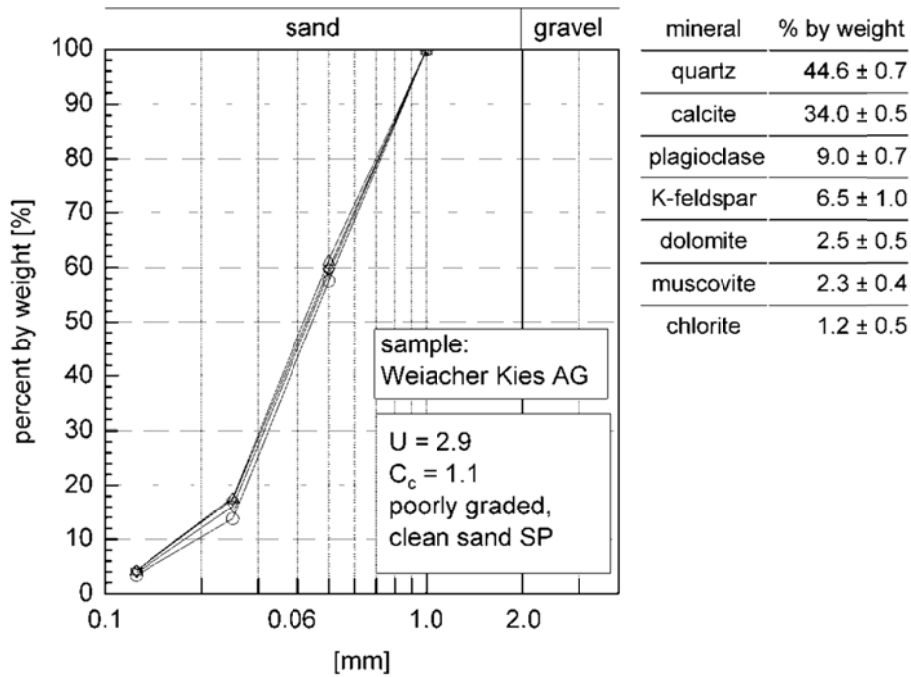


Abb. 9 Kornverteilungskurve und mineralogische Zusammensetzung des Modellmaterials Weiacher Sand

5.4.2 Thermodynamische Parameter

Die experimentelle Bestimmung der thermodynamischen Parameter wird in Sres (2009) ausführlich beschrieben. Die spezifische Wärmekapazität des trockenen Sandes c_{mineral} wurde kalorimetrisch ermittelt. Die Messresultate wurden nachträglich mittels dynamischer Differenzkalometrie (Differential Scanning Calorimetry DSC) überprüft. Die Abweichung der Ergebnisse nach diesen zwei Methoden ist kleiner als 5% und liegt innerhalb der Genauigkeit von etwa 10%. Da die temperaturabhängige Wärmekapazität des Wassers und des Eises bekannt ist, kann in Abhängigkeit des Wasser- und des Eisgehaltes nach Gl. 5 und Gl. 6, die Wärmekapazität des Modellmaterials ermittelt werden (Abb. 5). Für die Bestimmung der anderen Parameter des Modellmaterials wurden neben Temperatursensoren ein TDR-System (Time-Domain-Reflectometer) zur Messung des Wassergehaltes, eine NSSP-Sonde (Non-Steady-State-Probe) zur Messung der Wärmeleitfähigkeit und eine Klimakammer mit Innenabmessungen von $H \times B \times L = 0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ (Abb. 10) eingesetzt. Die Temperatur in der Klimakammer wird mittels Thermostat geregelt und kann bis zu $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ gekühlt werden. In einem wasserdichten PVC-Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 450 mm wurden nebst trockenem Sand zwei Temperatursensoren, der TDR-Geber und die NSSP-Sonde, eingebaut. Nach Sättigung der Probe wurde diese in der Klimakammer untergebracht. Die Temperatur wurde danach stufenweise gesenkt bis das gesamte Porenwasser zugefroren war.

Die gemessenen Wassergehalte wurden gemäss Gl. 2 zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit (Abb. 5) mittels linearer Regression ausgewertet (Abb. 11). Die Auswertung der Wärmeleitfähigkeit mittels NSSP Sonde ergab eine Wärmeleitfähigkeit des Bodens von 1.93 W/mK . Die Überprüfung dieses Parameters erfolgte gemäss Gl. 7 und Gl. 9 basierend auf den gemessenen Stoffanteilen, die mineralogische Zusammensetzung und deren bereits in der Literatur veröffentlichte Wärmeleitfähigkeiten (Coté & Konrad 2005). Daraus ergab sich eine theoretische Wärmeleitfähigkeit von 1.82 W/mK mit einer Abweichung gegenüber den experimentellen Wert von 6%. Bei den numerischen Simulationen werden die experimentell ermittelten Werte berücksichtigt (Abb. 5).



Abb. 10 Experimentelle Bestimmung der thermodynamischen Parameter, Messsensoren und Datenerfassung; links: TDR Sonde (1), NSSP Sonde (2), Temperatursensoren (3), Mehrkanalthermometer mit hoher Genauigkeit (4), Datalogger (5) und Laptop (6); PVC-Zylinder mit eingebauten Messgebern (mitte); geöffnete Klimakammer mit Probe (rechts)

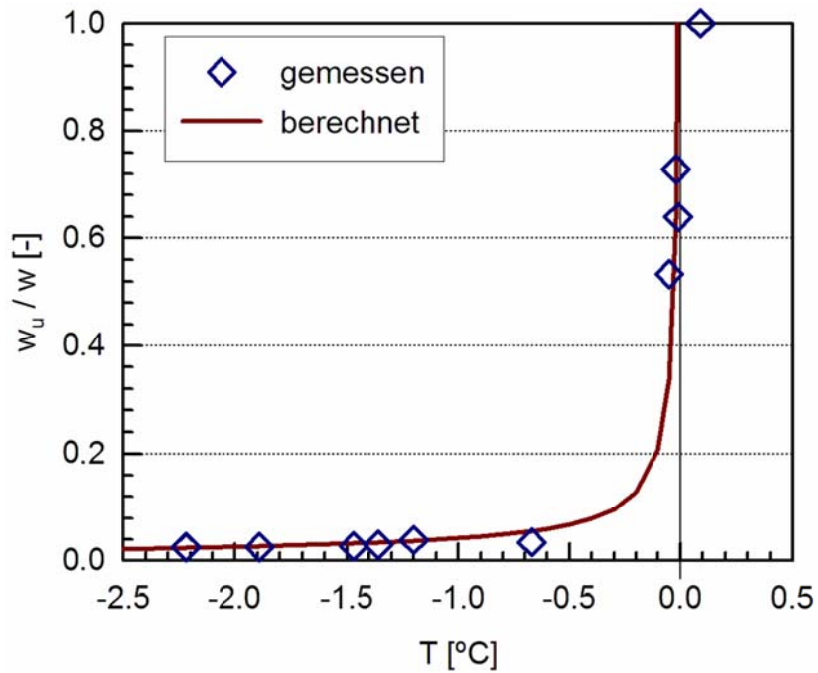


Abb. 11 Ungefrorener Wassergehalt w_u als Funktion der Temperatur

5.5 Modellversuche mit einer Gefrierlanze

5.5.1 Versuchsaufbau

Der Versuch besteht aus einem handelsüblichen Fass aus Kunststoff mit einem Fassungsvermögen von 250 l und einem inneren Durchmesser von ca. 60 cm. Die Gefrierlanze wurde in der Mitte des Fasses platziert. Dieser Modellversuch wird nachfolgend Einlanzenversuch bezeichnet. Es wurden 38 Temperatursensoren eingesetzt. In Abb. 12 (links) wird die Verteilung der Temperatursensoren dargestellt. Zum Ausgleich des unebenen Bodens und um eine hochwertige Isolation nach unten hin zu erreichen, wurde der Fassboden mit einer 8 cm dicken Hartschaumschicht ausgelegt. Sie diente gleichzeitig der Zentrierung der Gefrierlanze. Zum Zweck der thermischen Entkopplung wurde das Fass auf eine Holzpalette gestellt (Abb. 12 Mitte). Die Mantelfläche der unteren zwei Drittel des Fasses wurde zunächst mit zwei Lagen Neopren umwickelt. Nach dem Füllen des Fasses wurden sämtliche Seiten mit einer 30 cm starken Glaswolleummantelung thermisch isoliert (Abb. 12 rechts). Um den Einfluss der externen Temperatur trotz thermischer Isolierung weiter zu minimieren, wurden alle Versuche in einem klimatisierten Raum bei konstanter Temperatur von 20.5°C durchgeführt.

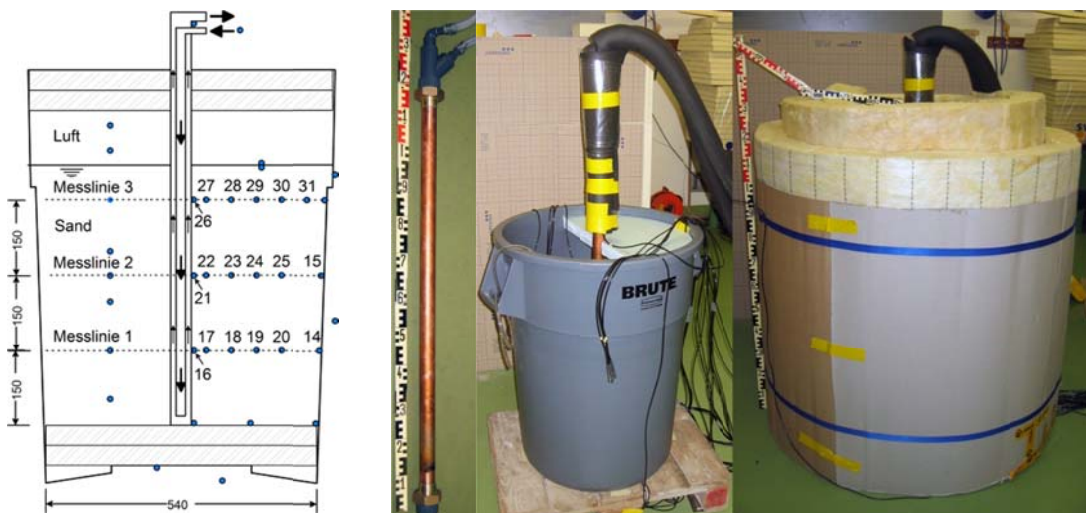


Abb. 12 Einlanzenversuch (von links nach rechts) Prinzipskizze (die Nummern entsprechen den jeweiligen Temperatursensoren), Gefrierlanze, Fass vor dem Füllen und mit thermischer Isolierung des Versuches

5.5.2 Durchgeführte Experimente

Das Modellmaterial wurde lagenweise trocken bis zur gewünschten Höhe eingebaut und nach jeder Lage von Hand verdichtet. Hierbei wurde die Masse des Modellmaterials erfasst, um später die jeweiligen Zustandsgrößen des Bodens zu ermitteln (Tabelle 8). Nach einem ersten Experiment zur Prüfung der gesamten Versuchsanlage wurde das Modellmaterial des Fasses vor dessen Füllen mittels einer auf den Boden gelegten perforierten Ringdrainageleitung gesättigt. Das zweite Experiment mit der gesättigten Probe sollte nicht nur einer weiteren Prüfung der Kühl- und Messanlage dienen, sondern auch Messdaten für eine erste Überprüfung des numerischen Modells und der ermittelten Modellparameter (Kapitel 8.1) liefern. Die zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfassten Messwerte der Temperatursensoren werden als radiale Temperaturverteilung in den drei Messebenen in Abb. 13 dargestellt. Sie zeigen insgesamt ein konsistentes Bild. D.h. alle Sensoren zeigen mit zunehmendem Abstand zur Gefrierlanze eine höhere Temperatur und da die Gefrierlanze am Fuss eine niedrigere Temperatur aufweist als im Kopfbereich, zeigen die entsprechenden Sensoren der Messebene 1 eine niedrigere Temperatur als die der Messebene 2 bzw. der Messebene 3. Nachdem das Modell vollständig gefroren war. Nach 40 Stunden verläuft die radiale Temperaturverteilung in den drei Messebenen (Abb. 13) exakt logarithmisch (Regressionskoeffizient 0.99) und entspricht somit der theoretischen Temperaturverteilung für den radialsymmetrischen und stationären Fall des Wärmetransportes ohne Advektion und ohne Phasenänderung, d.h. ohne latente Wärme.

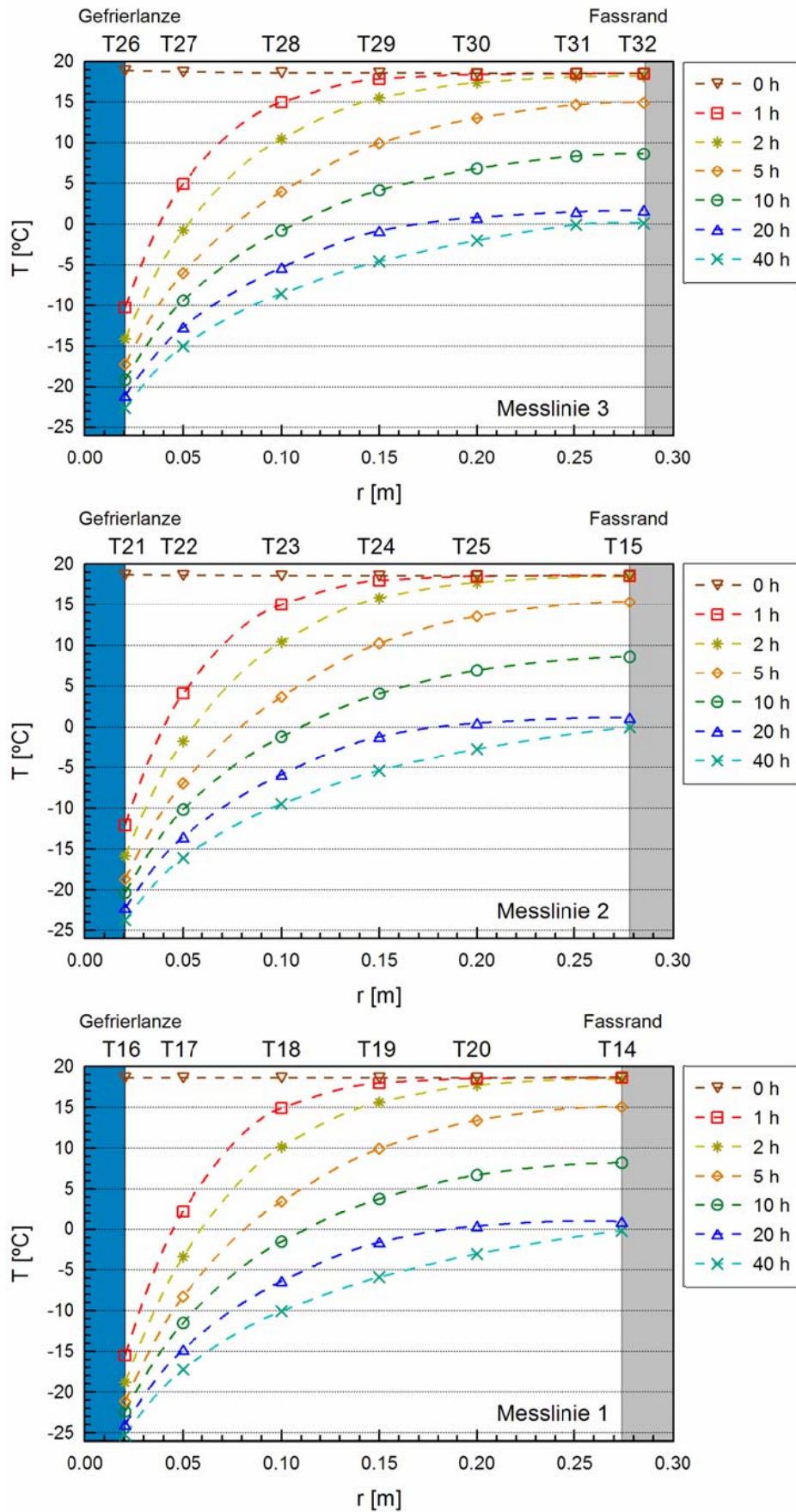


Abb. 13 Radiale Temperaturverteilung in den drei Messebenen zu verschiedenen Zeitpunkten (Lage der Sensoren in Abb. 12)

5.6 Grossmassstäbliche Modellversuche

5.6.1 Versuchsaufbau

Das grossmassstäbliche Modell besteht im Wesentlichen aus einem isolierten, mit Wasser durchströmbaren, Sandkasten. Dadurch wird der Gefriervorgang mit fließendem Grundwasser simuliert (Abb. 14). Von der Gestaltung und den Abmessungen bietet es eine grosse Flexibilität bei den Versuchsanordnungen. So können die Gefrierrohre vertikal oder horizontal angeordnet und deren Lage nahezu beliebig gewählt werden. Da seine Abmessungen $H \times B \times L = 1.3 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$ betragen, können hydraulische Druckgradienten von bis zu 1 m/m eingestellt werden. Der Sandkasten besteht aus 2 cm dicken PVC Platten. Er kann von der Seite her mit Wasser durchströmt werden. Die Einstellung eines stationären Strömungszustandes vor dem Starten des Gefriervorganges wird durch die Vorgabe der Wasserstände im Ein- und Austrittsbereich erreicht. Dies ist durch die genaue Höhenplatzierung der entsprechenden Wasserreservoirs gewährleistet. Um ein 2D Anfangsströmungsfeld zu erzielen, wird im Ein- und Austrittsbereich eine Diffusorplatte vorgesetzt. Diese ist mit einer Geotextillage als Filter versehen. Eingespeist wird Leitungswasser, dessen Temperatur mittels eines Sensors Pt100 erfasst wird. Die durchströmende Wassermenge im Eintrittsbereich wird berührungslos, mittels eines magnetisch-induktiven Mengenflussgebers, gemessen und aufgezeichnet. Da das Leitungswasser eine beachtliche Menge Luft enthielt, wurde diese teils mit Hilfe eines Entgasers nach dem Prinzip des Rieselturmes im Eintrittswasserreservoir und teils mit einer Luftsammelflasche, die vor dem Modell an die Wasserleitung angeschlossen war, vom Wasser getrennt.

Der Sandkasten wurde auf Paletten und Holzträger gestellt und seitlich mittels – analog zu einem Blockhaus – aufgestellten Reihen von Holzträgern, die mit Stahlankern zusammengespannt werden, versteift. Sämtliche Hohlräume wurden mit Hartschaummaterial gefüllt. Seitlich und im Deckelbereich wurde der Sandkasten mit zwei weiteren Lagen von Hartschaumplatten (PUR) abgedeckt, wodurch die thermische Isolation des Sandkastens im Boden- und Deckenbereich sowie seitlich über eine Gesamtstärke von 36 cm, 18 cm bzw. 8 cm verfügt (Abb. 15). Die dadurch erzielten Wärmedurchgangszahlen liegen beim Boden und bei den Seitenwänden bei ca. $0.16 \text{ W/m}^2\text{K}$ und beim Deckel bei $0.26 \text{ W/m}^2\text{K}$. Um den Einfluss der externen Temperatur trotz thermischer Isolierung weiter zu minimieren, wurden alle Versuche in einem klimatisierten Raum bei konstanter Temperatur von $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt. In Abb. 16 wird der Wasseranschluss sowie die Diffusorplatte und Geotextillage gezeigt und in Abb. 17 wird die Gesamtanlage dargestellt. Die Qualität der thermischen Isolation wurde gegen Ende eines Versucheszum Zeitpunkt an dem der Temperaturgradient zwischen Modellrand und Abdeckungsrand maximal ist, mit Hilfe einer hochauflösenden Infrarotkamera (Varioscan, Jenoptik GmbH) überprüft. Abb. 18 zeigt die Temperaturverteilung auf dem Abdeckungsrand des Modells sowie an ausgewählten Punkten auch ausserhalb des Modells. Da der Temperaturunterschied zwischen der Lufttemperatur im klimatisierten Raum und dem Abdeckungsrand des Modells weniger als $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ betrug, kann die eingebaute Abdeckung als ausreichend angesehen werden zur Gewährleistung von kontrollierten thermischen Randbedingungen.

Das Messsystem besteht aus den oben bereits genannten Sensoren der Kälteanlage, dem einströmenden Wassers sowie aus weiteren 37 Temperatursensoren des Typ Pt100 und 8 Tensiometern. Die Mehrzahl dieser Temperatursensoren wurde auf eine horizontale Messebene auf halbe Höhe des Modells verteilt und zwar entlang von drei Messlinien (ML1 bis ML3, Bild 10 und Abb. 19). Die Messlinien ML1 und ML3 verlaufen parallel zur Wasserströmungsrichtung und durch die mittlere bzw. rechte Gefrierlanze, während die Messlinie ML2 senkrecht hierzu verläuft und die Gefrierlanzen verbindet. Um die Zuverlässigkeit des Messsystems zu erhöhen, wurde an gewissen Stellen redundant gemessen. Z.B. entspricht der Sensor T40 dem Sensor T33 und bei idealen Versuchsbedingungen (gleichmässige Verteilung der Kühlflüssigkeit an den drei Gefrierlanzen und gute thermische Isolation des Modells) entspricht die Temperaturverteilung entlang ML1 der ML3. Weiterhin ist die Verteilung entlang ML2 mehrfach symmetrisch (Symmetrieachsen an den jeweiligen Gefrierlanzen und in der Mitte zwischen den Gefrierlanzen). Weitere Temperatursensoren wurden platziert, um die Randbedingungen während der Versuche zu erfassen (T14 für die Lufttemperatur an der Oberseite des Modells und T17 bis T19 für

die Temperatur der mittleren und rechten Lanze im Fuss- und Kopfbereich). Die Tensio-
meter zur Messung des Porenwasserdruckes wurden auf dem Boden des Modells plat-
ziert. Sie dienen der Kontrolle des Erreichens stationärer Zustände während der Durch-
strömung des Modells vor dem Einleiten der Gefrierphase. In Abb. 20 wird das mit Sen-
soren bestückte Modell im leeren und halbvollen Zustand dargestellt.

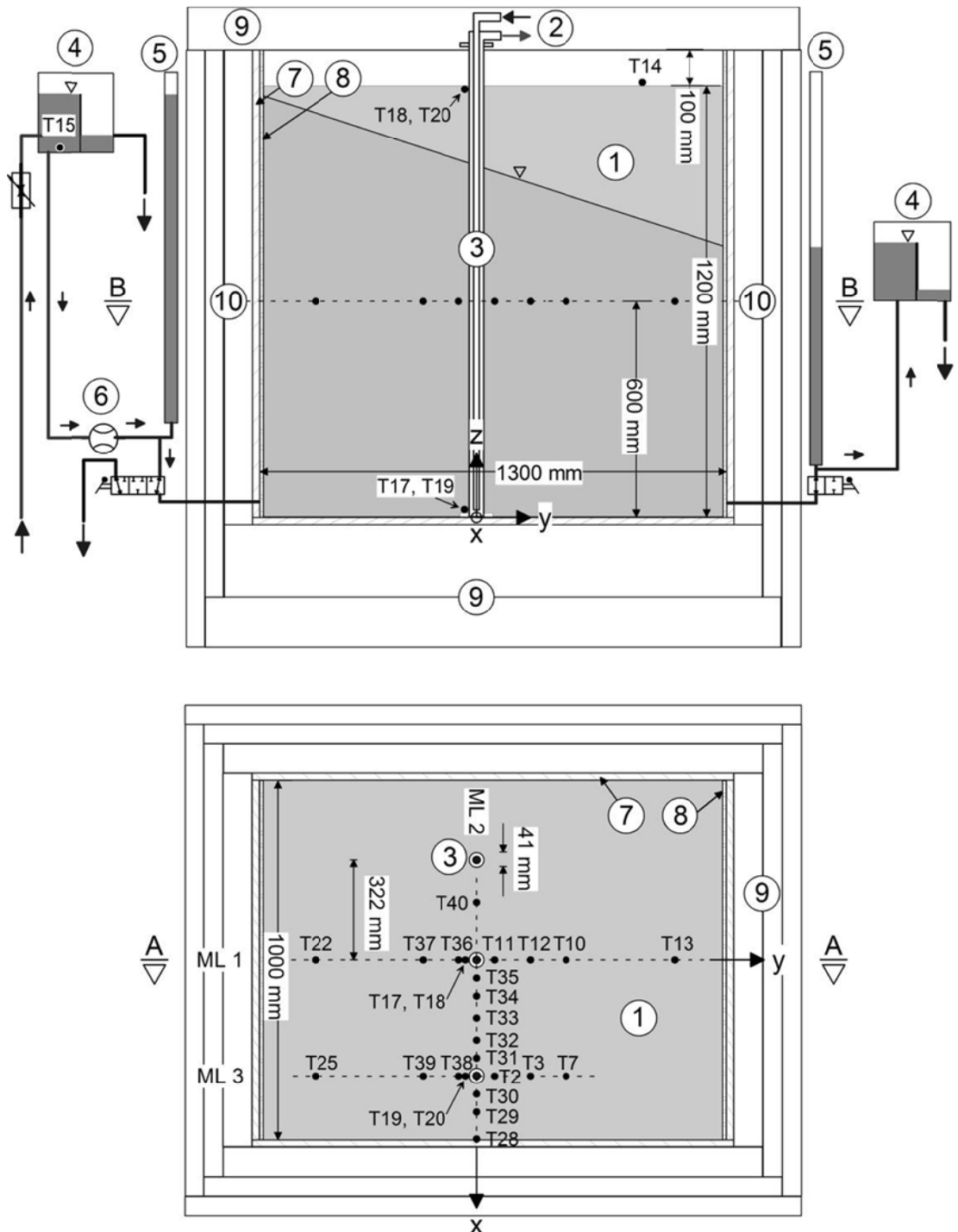


Abb. 14 Aufriss (Schnitt A-A), Grundriss des Modells (Schnitt B-B) und Lage der Temperatursensoren (Ts), Modellmaterial (1), Sole Zu- und Rücklauf (2), Gefrierlanze (3), Wasserreservoir (4), Standrohr (5), Durchflussgeber (6), PVC Kasten (7), Diffusorplatte und Geotextilfilter (8), thermische Isolation (9), Messebene (10). * Lage des Temperatursensor T15 nur für das Experiment V1



Abb. 15 Aufbau des Modells.

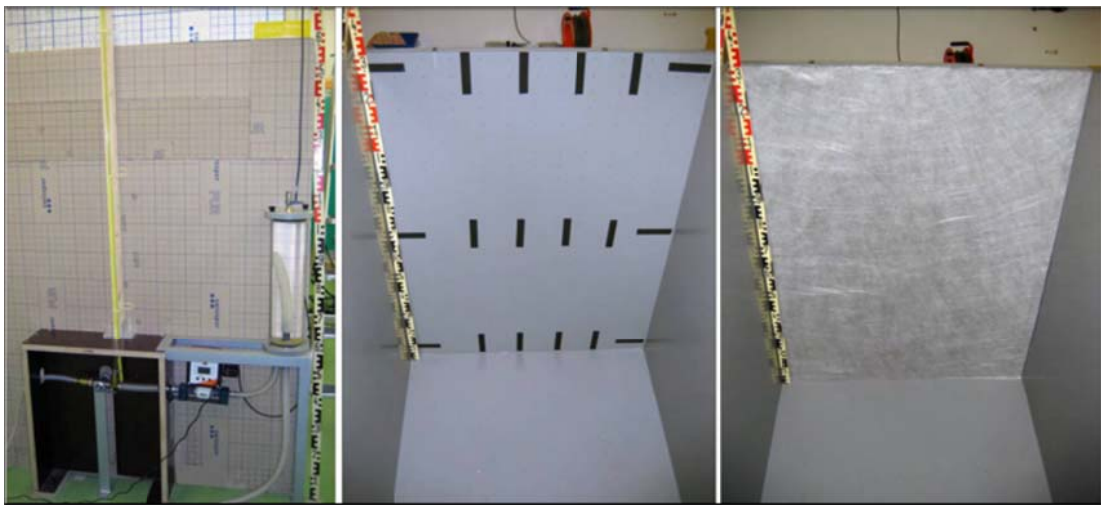


Abb. 16 Wassereinspeisung mit Durchflussgeber, Luftflasche und Standrohr (links), Diffusorplatte (Mitte), Diffusorplatte mit Geotextilfilter (rechts).

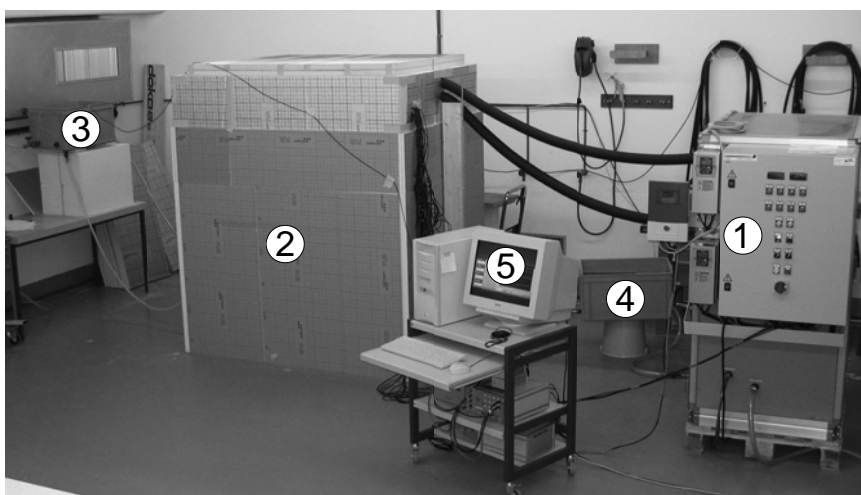


Abb. 17 Gesamtansicht des Modells, Kühlmaschine (1), Sandkasten mit thermischer Isolierung (2), Wasserreservoir (3, 4), Datenerfassungsanlage (5)

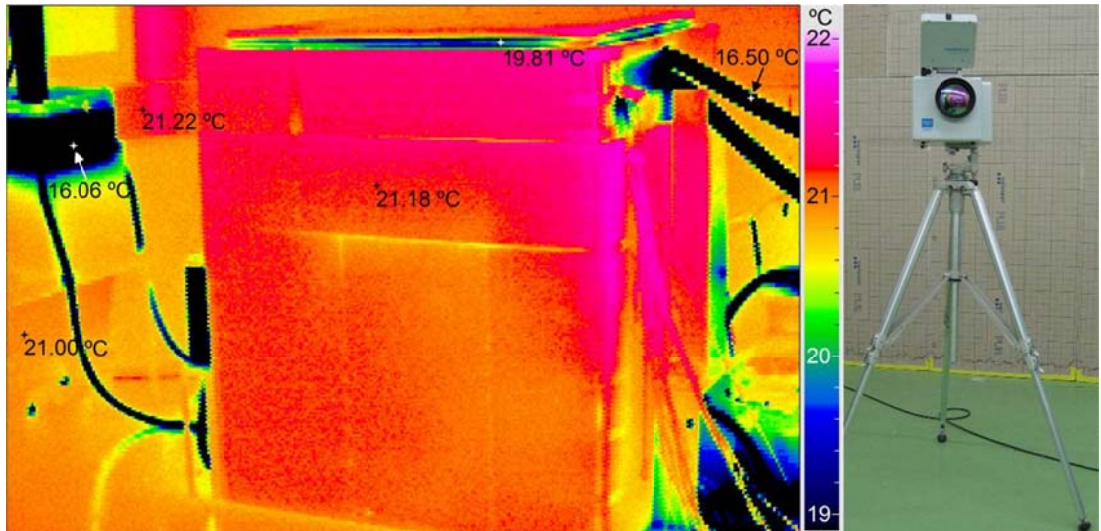


Abb. 18 Wärmebild nach einem Versuch (links) und verwendete Infrarotkamera (rechts)

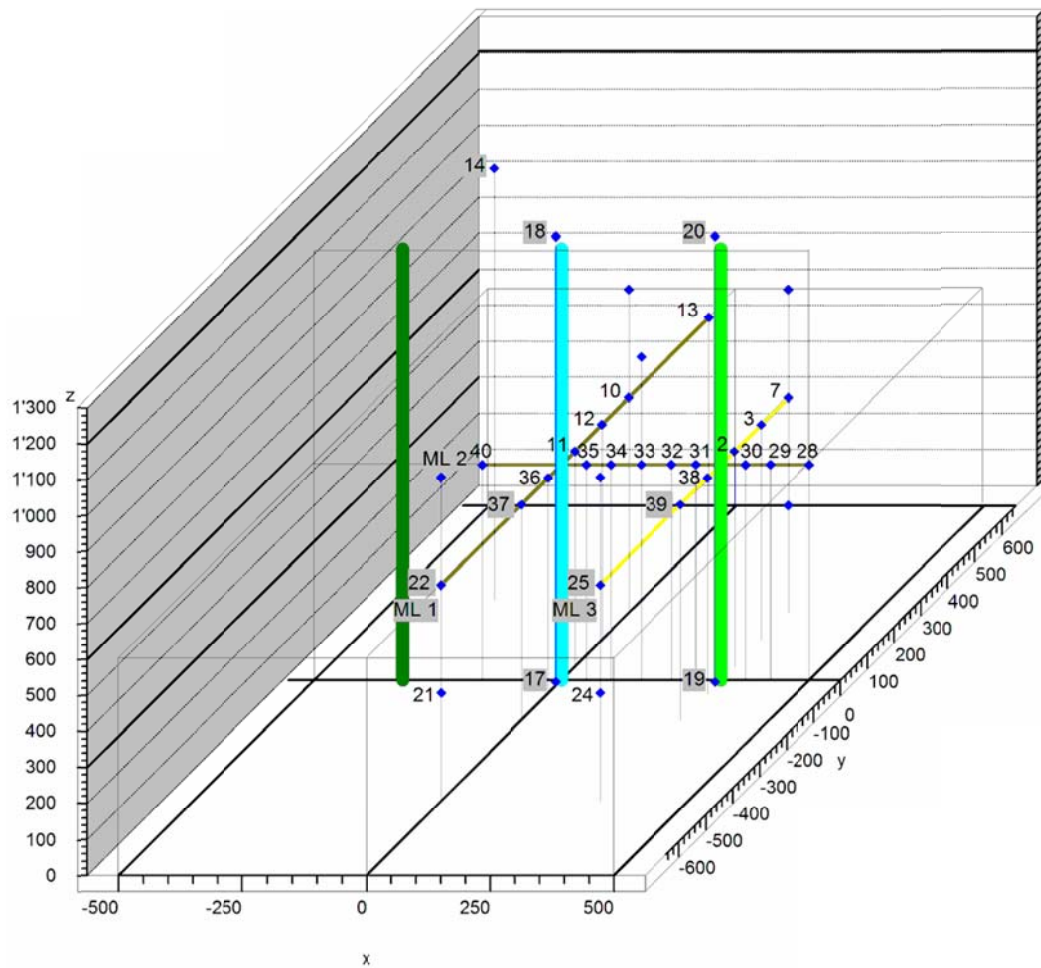


Abb. 19 Verteilung der Temperatursensoren im grossmasstäblichen Modell



Abb. 20 Grossmassstäbliches Modell mit Sensoren vor dem Sandfüllen (links) und im bis zur Messebene halbgefülltem Zustand (rechts)

5.6.2 Durchgeführte Experimente

Auch bei diesen Versuchen wurde der Weiacher Mittelsand gewogen, in Lagen zu 10 cm trocken eingebaut und von Hand verdichtet. Die Zustandsgrößen des Modellmaterials werden in Tabelle 8 zusammengefasst. Die Sättigung der Probe erfolgte im Gegensatz zum oben beschriebenen Modell durch Durchströmung und Hochstellen der Wasserreservoirs (Abb. 14). Es wurden sechs Experimente, nachfolgend als Experiment V1 bis V6 bezeichnet (Reihenfolge nach Strömungsgeschwindigkeit geordnet) und mit verschiedenen hydraulischen Randbedingungen durchgeführt (Tabelle 9). Die erwünschte Sickergeschwindigkeit v wurde vor dem eigentlichen Beginn aller Experimente, d.h. vor dem Gefrieren, durch genaue Positionierung des Wasserreservoirs eingestellt und das Modell solange durchströmt bis sich ein stationärer Zustand eingestellt hatte (konstante Sickerlinie und homogenes Temperaturfeld). Gleichzeitig mit dem Einschalten des Kühlaggregates wurde die Datenerfassung neu gestartet. Abgesehen vom Experiment V5 wurde das Gefrieren solange fortgesetzt, bis entweder ein Zusammenschliessen des Gefrierkörpers um die benachbarten Gefrierlanzen verzeichnet wurde, oder bis nahezu stationäre Zustände eintraten, d.h. kein nennenswerter Abfall der Temperaturen über die Zeit zu verzeichnen war. Das Experiment V5 musste wegen eines Lecks und Druckabfalls im Kühlsystem vorzeitig abgebrochen werden.

Tabelle 9 Daten der durchgeführten Experimente

Experiment	v [m/d]	Dauer [h]	T_{soil} [°C]	$T_{pipe\ mitte}$ [°C]	$T_{pipe\ rechts}$ [°C]	t_{close} [h]
V1	0.0	65	15.4	-17.95	-22.35	12.64
V2	0.0	83	20.7	-21.05	-21.05	14.40
V3	1.0	96	17.9	-15.68	-21.88	44.26
V4	1.5	145	18.4	-21.10	-21.10	54.22
V5	2.0	42	17.1	-15.20	-21.82	-
V6	2.1	148	17.6	-21.19	-21.19	76.25

Der gemessene zeitliche Temperaturverlauf der Temperatursensoren zur Erfassung des Materialverhaltens im Modell (Messlinien ML1 bis ML3) sowie der zur Erfassung der Randbedingungen (Lufttemperatur oberhalb des Modells T14, Wassereintrittstemperatur T15, und Temperatur der mittleren und rechten Gefrierlanzen T17 und T18 bzw. T19 und T20) werden in Abb. 21 bis Abb. 23 dargestellt. Es ist zu bemerken, dass aufgrund eines Montagefehlers die Zuleitung der mittleren Gefrierlanze etwas behindert war, was zu einer unplanmässigen gedrosselten Kühlleistung dieser Gefrierlanzen während der ersten drei Experimente führte (V1, V3 und V5). Nach Beseitigung des Fehlers wurden die Experimente (V2, V4 und V6) mit leicht veränderten Sickergeschwindigkeiten wiederholt. Die Messungen aller Experimente zeigen die erwartete symmetrische Temperaturverteilung entlang der Messlinie ML2, auch bei denjenigen Experimenten mit reduzierter Kühlleistung (V1, V3 und V5). Es ist zu vermerken, dass die Temperatursensoren T40 und T33 bezüglich der mittleren Gefrierlanze symmetrisch verteilt sind. Bei den Experimenten ohne Sickerströmung kann eine ebenfalls erwartete symmetrische Temperaturverteilung entlang der Messlinien ML1 und ML3 beobachtet werden. Bei den Experimenten mit reduzierter Kühlleistung (V1, V3 und V5) kann infolgedessen, sowohl eine erhöhte Temperatur der mittleren gegenüber der rechten Gefrierlanze (T17 vs. T19 bzw. T18 vs. T20), als auch ein langsames Gefrierkörperwachstum (ML1 vs. ML3) festgestellt werden. Erwartungsgemäss zeigen die anderen Experimente (V2, V4 und V6) diese Abweichungen nicht, d.h. in diesen Fällen kann das Temperaturfeld als 2D betrachtet werden. Im Allgemeinen ist bei allen Experimenten mit Sickerströmung (V3, V4, V5 und V6) der Einfluss der Advektion in Form einer Kältefahne bemerkbar, d.h. von der Gefrierlanze aus gesehen, ist der gekühlte Bereich stromaufwärts kleiner als stromabwärts und diese Abweichungen sind grösser, je stärker die Sickerströmung ist. Die oben genannten Beobachtungen lassen den Schluss zu, dass die gewonnenen Messdaten aller Experimente insgesamt in sich konsistent sind und eine sehr gute Datenbasis liefern für die Überprüfung numerischer Modelle. Weiterhin ist zu bemerken, dass, obwohl die Versuche V1, V3 und V5 durch den erwähnten Montagefehler eine ungleiche Temperatur der Gefrierlanzen aufweisen, sie sich dennoch sehr gut eignen als Datenbasis für die Überprüfung von 3D-Modellen auch deswegen, weil die Temperaturabweichung zwischen den Gefrierlanzen erfasst wurde.

Die Kühlleistung P wurde aus dem Volumenstrom des Kühlmittels Q_{brine} , seiner Eintritts- und Austrittstemperatur T_{in} bzw. T_{out} , seiner Wärmekapazität c_{brine} sowie den Leistungsverlusten im System P_{loss} berechnet:

$$P = Q_{brine}(T_{out} - T_{in})c_{brine} - P_{loss} \quad (16)$$

Hierbei wurde der zeitliche Verlauf des Volumenstromes und der jeweiligen Temperaturen mittels entsprechender Sensoren erfasst (Kap. 5.3). Die temperaturabhängige Wärmekapazität und Dichte des Kühlmittels wurde vom Lieferant angegeben (Abb. 24). Für die Berechnungen wurde diese interpoliert für eine Temperatur entsprechend dem Mittelwert des jeweiligen Temperaturintervalls $[T_{out}, T_{in}]$. Die Leistungsverluste wurden getrennt und nach Abschluss der Versuche ermittelt, indem man alle drei Gefrierlanzen ausbaute, aber angeschlossen liess, sie mittels einer Ummantelung aus Steinwolle thermisch isolierte und die entsprechende Kühlleistung gemäss Gl. 18 errechnete zu $P_{loss} = 560$ W (sogenannter Nullversuch, $P = 0$). Aus der zeitlichen Integration der Kühlleistung lässt sich die -energie E errechnen. Der zeitliche Verlauf der Kühlleistung sowie der -energie der jeweiligen Experimente werden in (Abb. 25) wiedergegeben.

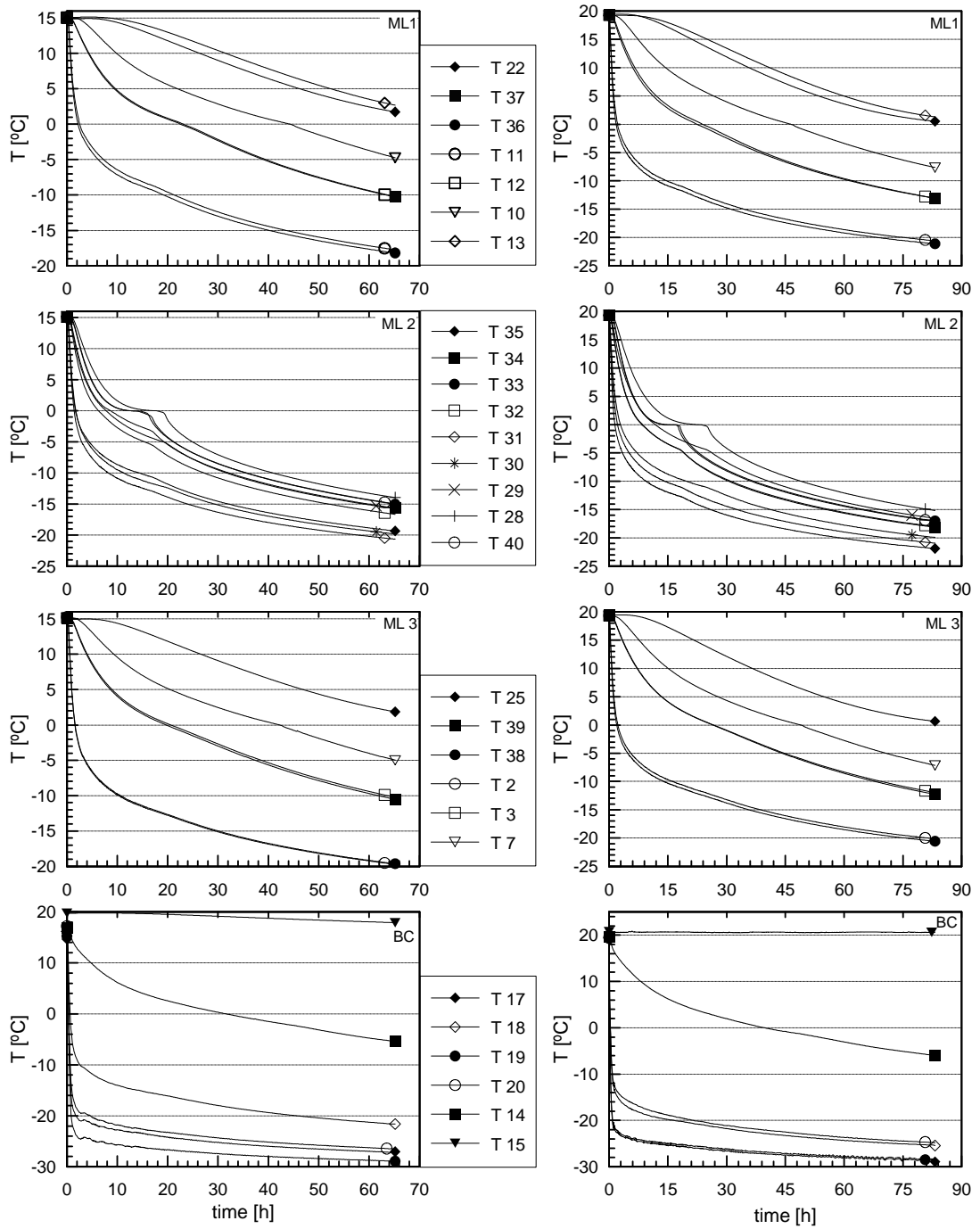


Abb. 21 Zeitlicher Temperaturverlauf der Sensoren entlang der Messlinien ML1, ML2 und ML3 sowie der Randbedingungen BC der Experimente V1 (links, $v = 0$ m/d) und V2 (rechts, $v = 0$ m/d)

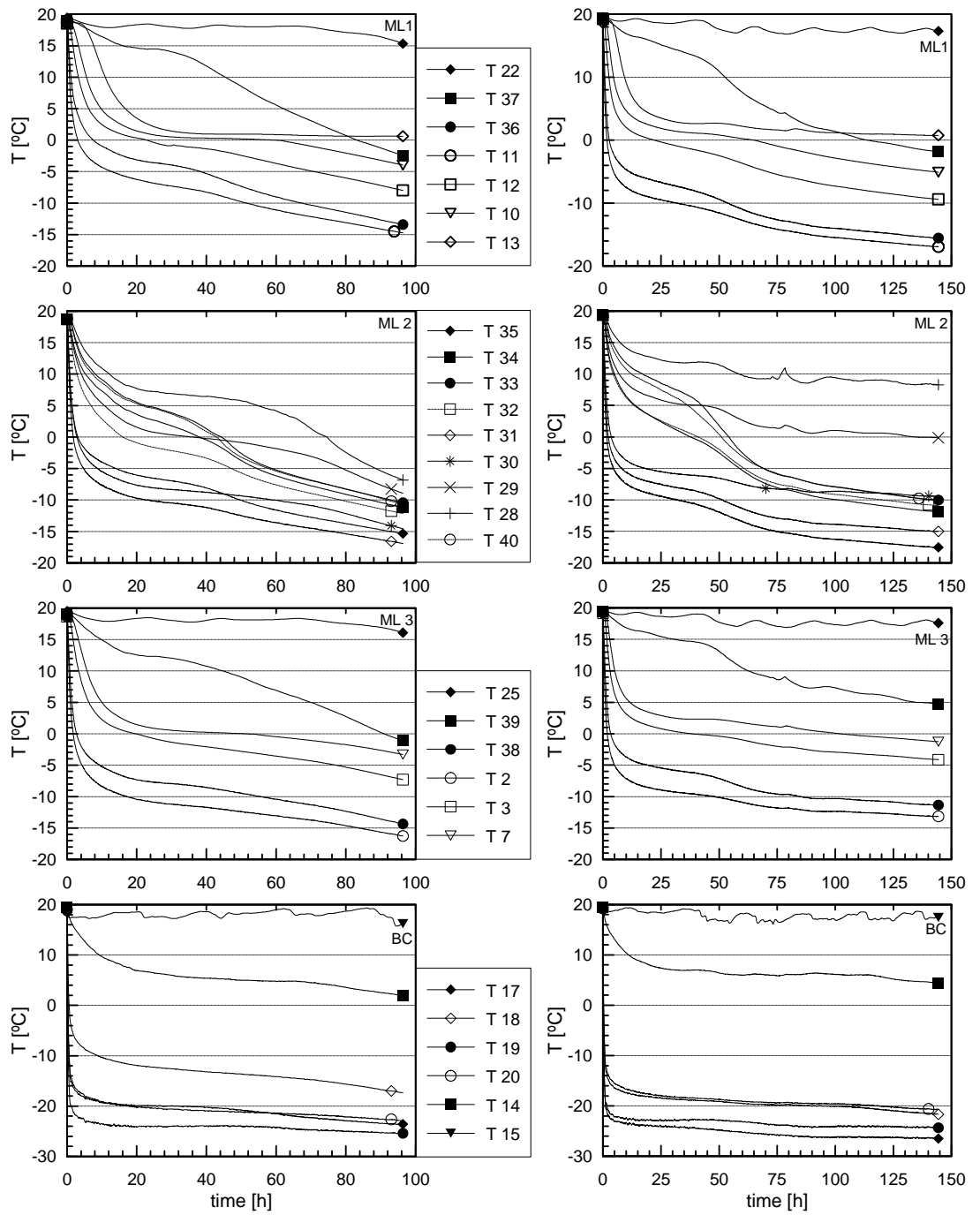


Abb. 22 Zeitlicher Temperaturverlauf der Sensoren entlang der Messlinien ML1, ML2 und ML3 sowie der Randbedingungen BC der Experimente V3 (links, $v = 1.0$ m/d) und V4 (rechts, $v = 1.5$ m/d)

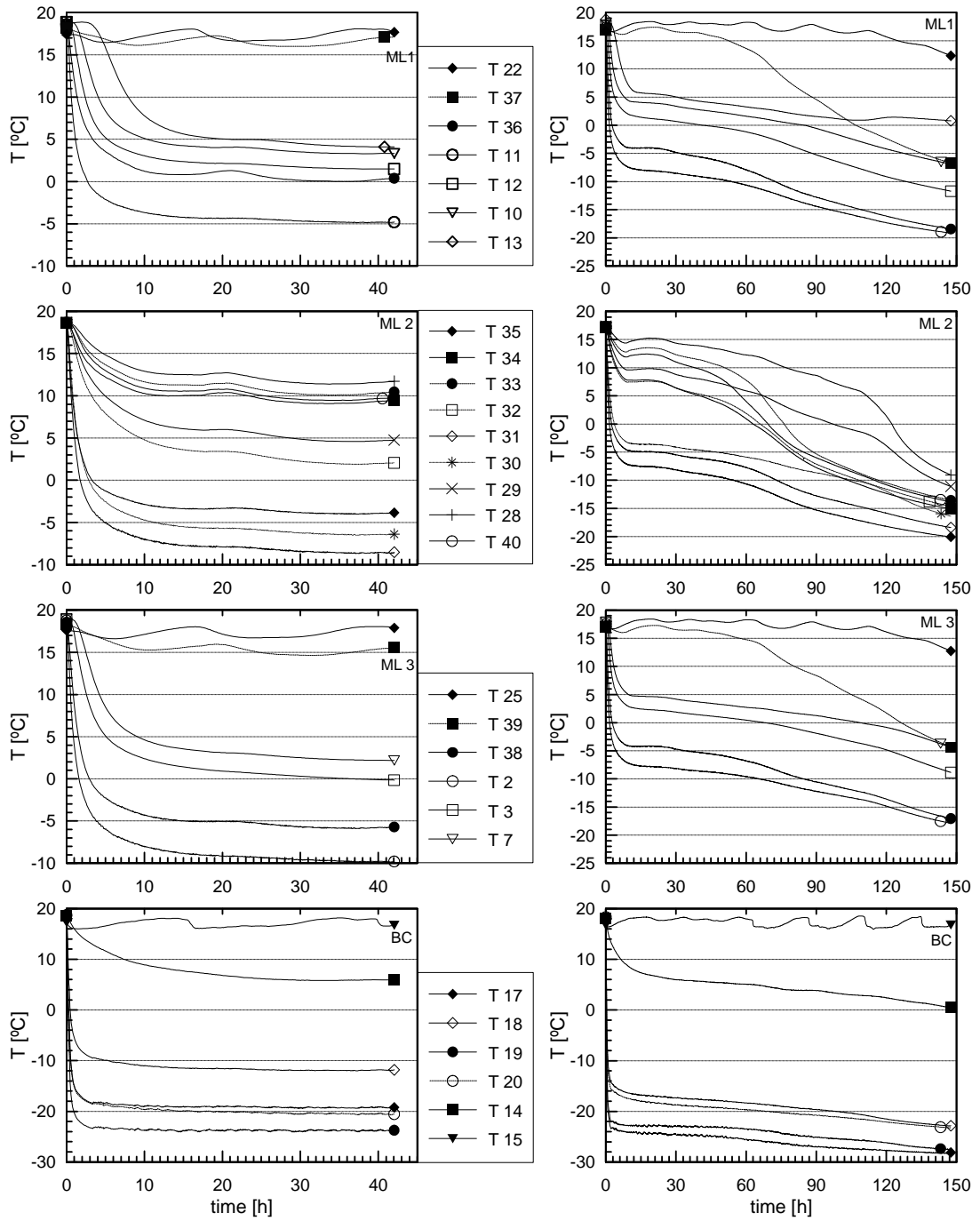


Abb. 23 Zeitlicher Temperaturverlauf der Sensoren entlang der Messlinien ML1, ML2 und ML3 sowie der Randbedingungen BC der Experimente V5 (links, $v = 2.0$ m/d) und V6 (rechts, $v = 2.1$ m/d)

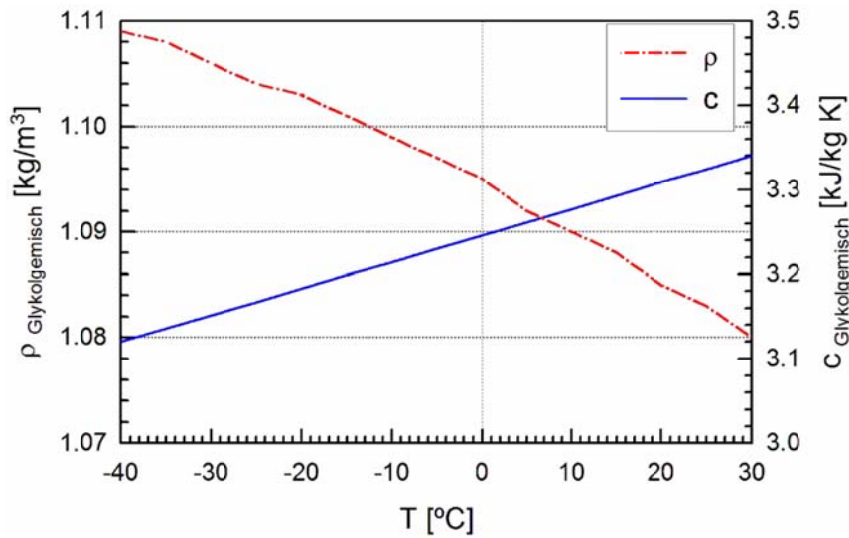


Abb. 24 Dichte und Wärmekapazität des verwendeten Glykolgemisches über die Temperatur (Anmerkung: Die volumetrische Wärmekapazität c_{brine} errechnet sich aus dem Produkt dieser Kennwerte)

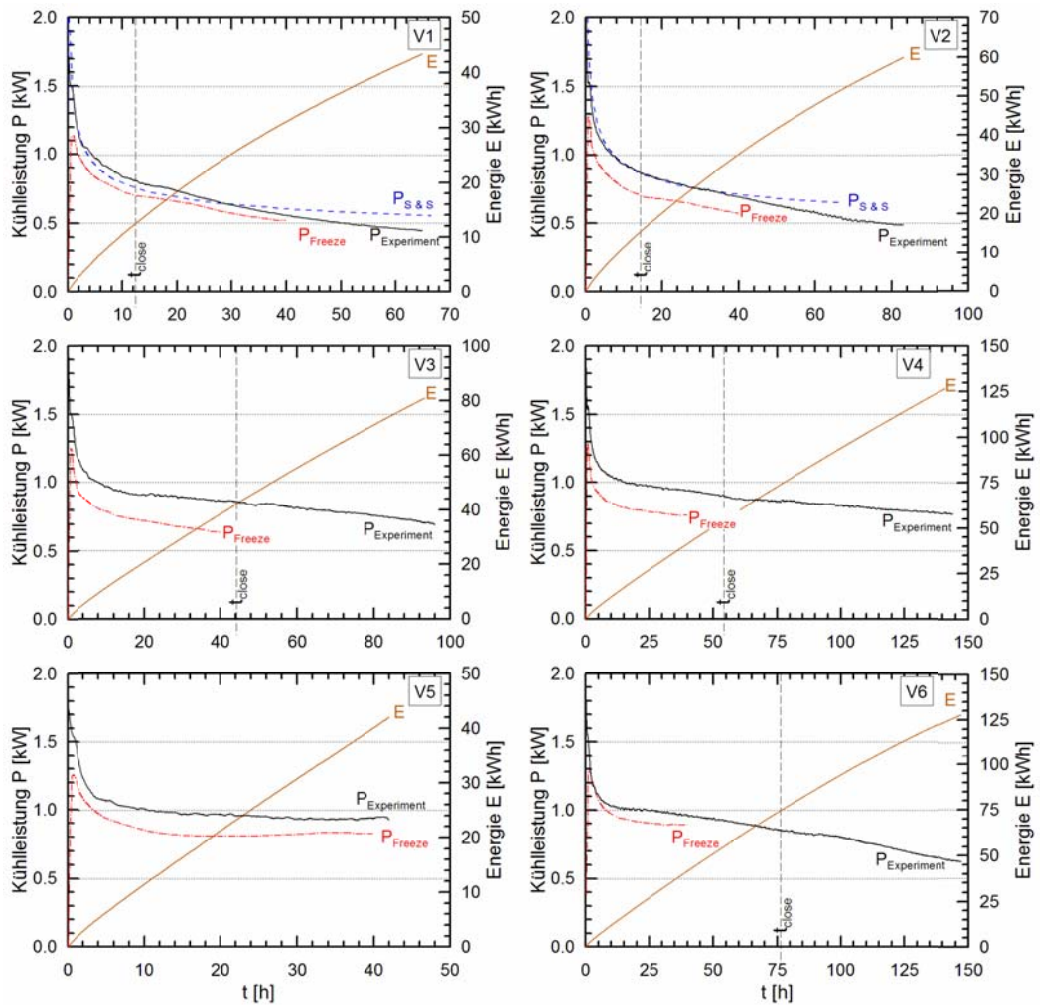


Abb. 25 Zeitlicher Verlauf der aus den Messungen ermittelte Kühlleistung $P_{\text{Experiment}}$ und Energie E sowie der aus der Simulation berechnete Kühlleistung P_{Freeze} . Für die Experimente ohne Sickerströmung (V1 und V2) werden die nach Sanger & Sayles (1979) berechnete Kühlleistung $P_{\text{S\&S}}$ ebenfalls dargestellt

6 Überprüfung theoretischer Prognosen über das Wachstum des Gefrierkörpers

6.1 Näherungslösungen

Aus der Literatur sind verschiedene Näherungslösungen bekannt. Die Anwendbarkeit der drei am meisten verwendeten Ansätze, und zwar die Lösungen von Ständer (1967) und Sanger & Sayles (1976) für künstliche Vereisung bei ruhendem sowie diejenige von Victor (1969) bei strömendem Grundwasser wurde anhand der Messergebnisse aus den Experimenten näher untersucht. Die Grundannahmen und Vereinfachungen dieser Näherungslösungen werden in Pimentel *et al.* (2011) näher erläutert. Es ist zu vermerken, dass die Lösung von Victor (1969) die einzig bekannte Lösung für den Fall mit Sickerströmung ist. Die Lösungen liefern als Ergebnis das zeitliche Wachstum des Gefrierkörpers um eine Gefrierlanze herum, d.h. die benötigte Aufgefrierzeit zum Erreichen einer bestimmten Stärke des Gefrierkörpers. Da die Herleitung der Lösungen grundsätzlich für eine Gefrierlanze erfolgte, wurden sie mit Hilfe von empirisch abgeleiteten Korrekturfaktoren (Ständer 1967, Victor 1969) für eine Gefrierlanzenreihe erweitert. Damit wurde der kühlende Einfluss benachbarter Gefrierlanzen berücksichtigt. Nur die Lösungen von Ständer und Victor beinhalten einen entsprechenden Korrekturfaktor in Form einer Reduzierung der Bodentemperatur, d.h. ein Vorkühleffekt. Bei allen Experimenten wurde der Gefrierkörperwachstum auf der Messlinie ML2 ausgewertet (zeitliche Entwicklung der Isotherme $T = 0 \text{ °C}$) und verglichen mit den Ergebnissen aus den Näherungslösungen (Abb. 26). Alle Näherungslösungen zeigen für die Experimente ohne Sickerströmung (V1 und V2) eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen der Sensoren im Bereich bis etwa ein Drittel des Abstandes zwischen den Gefrierlanzen. Der Vorkühleffekt für den Sensor in der Mitte zwischen den Gefrierlanzen, wird gut berücksichtigt, insbesondere bei dem Experiment mit gleichmässigen Lanzentemperaturen (V2). Da die Lösung von Sanger & Sayles den Vorkühleffekt nicht berücksichtigt, überschätzt diese die Schliesszeit t_{close} . Dadurch erhöht sich die Aufgefrierzeit bis die Gefrierkörper benachbarter Gefrierlanzen zusammenwachsen um das 3.4-fache (V1) und 2.5-fache (V2). Bei den Experimenten mit Sickerströmung zeigt die Lösung von Victor eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen der Sensoren, die nahe an den Gefrierlanzen platziert sind. Im Allgemeinen kann behauptet werden, dass diese Lösung die Aufgefrierzeit unterschätzt, und zwar sind die Abweichungen proportional zur Sickergeschwindigkeit, d.h. je stärker die Konvektion desto ungenauer die Lösung.

Der Ansatz von Sanger & Sayles (1976) ist der einzige, der eine Formel zur Abschätzung der erforderlichen Kühlleistung beinhaltet. Der Vergleich der nach Gl. 18 errechneten Kühlleistung der Versuche ohne Sickerströmung mit den theoretischen Werten ergab eine gute Übereinstimmung. Es ist hervorzuheben, dass für das Experiment mit gleichmässiger Lanzentemperatur (V2) die Übereinstimmung nahezu perfekt war (Abb. 25).

Zusammenfassend ist zu vermerken, dass alle Näherungslösungen für den Fall des Gefrierens im ruhenden Grundwasser einsetzbar sind, aber der Vorkühleffekt muss bei einer Reihenanordnung unbedingt berücksichtigt werden. Die einzig bekannte Näherungslösung für den Fall mit Sickerströmung sollte nur für Vordimensionierungszwecke angewendet werden, wohl wissend, dass diese die Aufgefrierzeit immer unterschätzt. Daher sind für die Fälle mit höheren Sickergeschwindigkeiten numerische Modellierungen, welche die physikalischen Vorgänge realistisch abbilden, für eine sichere Planung einer Gefriermassnahme unabdingbar. Die Schätzung der erforderlichen Kühlleistung kann mit Hilfe der Näherungslösung für die Fälle ohne Sickerströmung vorgenommen werden.

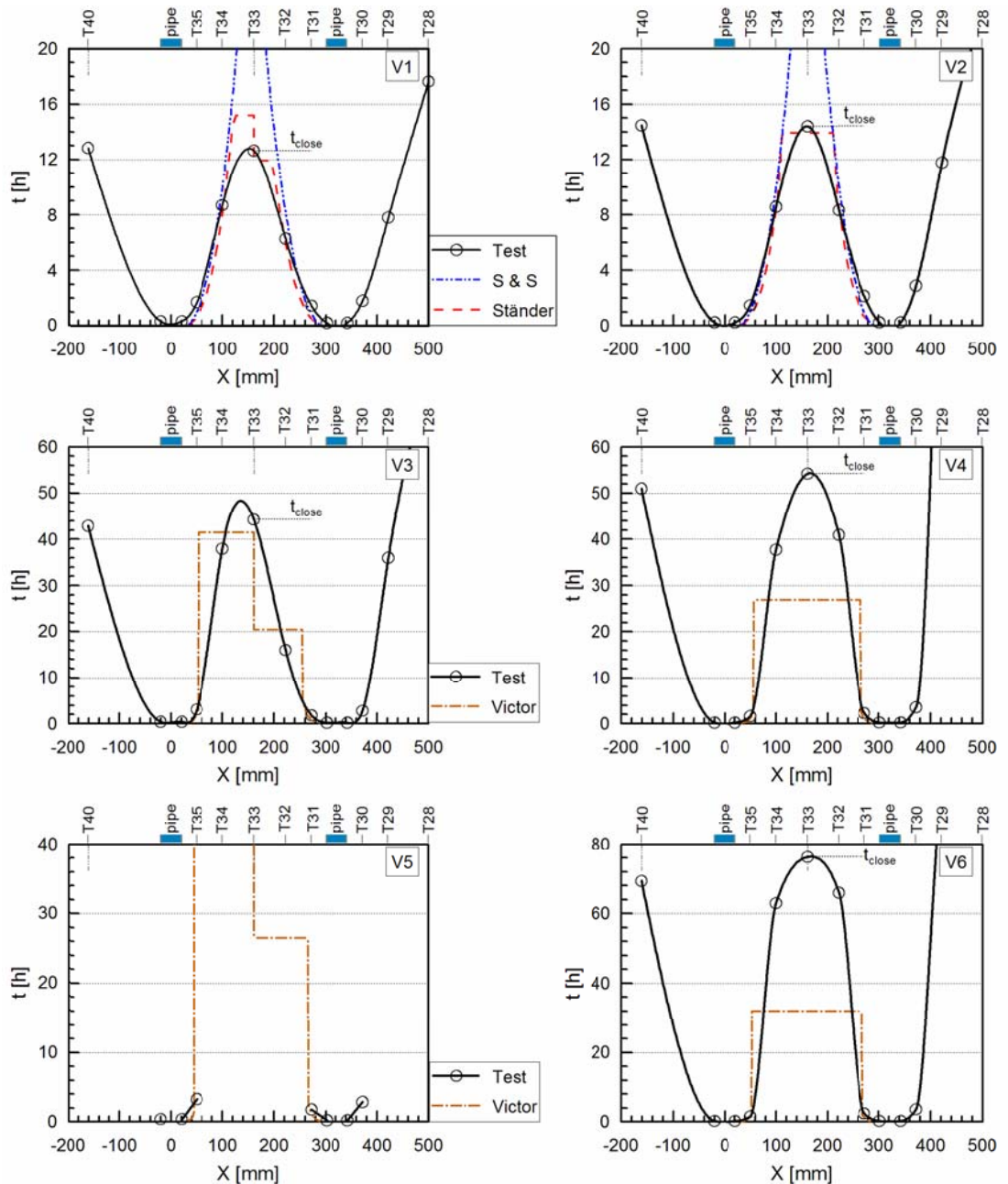


Abb. 26 Zeitliche Entwicklung der Isotherme $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (momentane Grenze des Gefrierkörpers) gemessen entlang der Messlinie ML2 und berechnet nach den analytischen Ansätze von Sanger & Sayles (1979), Ständer (1967) und Victor (1969). (Die Koordinate X entspricht der Entfernung zur mittleren Gefrierlanze in Abb. 14)

6.2 Numerisches TH-Modell

6.2.1 Experiment von Berggren

Die Überprüfung der Prognosekraft des numerischen Modells erfolgte mehrstufig. Zunächst wurde das Experiment von Berggren (Sickergeschwindigkeit $v = 0.24\text{ m/d}$) nachgerechnet. Die Datenbasis besteht aus der in Frivik & Comini (1982) veröffentlichten Messergebnisse über die Zeit von neun Temperatursensoren (mp4 bis mp9 in Abb. 8). Exemplarisch werden die Messwerte von sechs dieser Sensoren und die entsprechenden Ergebnisse aus der Simulation in Abb. 27 dargestellt. Diese zeigen eine gute Übereinstimmung. Es ist zu vermerken, dass dies das einzig gut dokumentierte Experiment war und daher kein weiteres Experiment aus der Literatur nachgerechnet wurde.

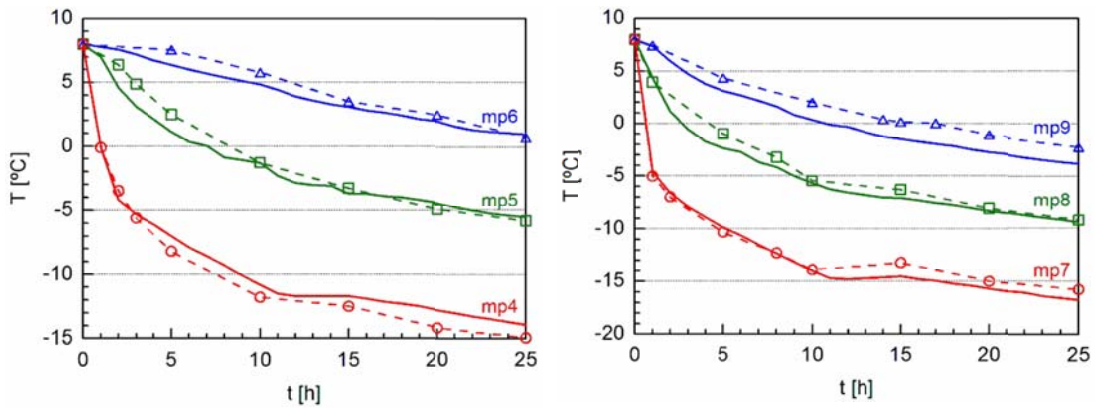


Abb. 27 Gemessene (Symbole) und berechnete (durchgezogene Linie) Temperaturen an den Messpunkten mp4 bis mp6 (links) und mp7 bis mp9 (rechts) (Sres et al. 2006)

6.2.2 Einlanzenversuch

Dieser Versuch wurde anhand von 128'220 Elementen und 136'851 Knoten diskretisiert (Sres 2009). Simuliert wurde eine Aufgefrierzeit von 40 h in Zeitschritten von 900 s. Die Wände und der Boden des Modells wurden adiabatisch angenommen. Dagegen wurde die auf der Oberfläche des Sandes gemessene Lufttemperatur (Sensor 9 in Abb. 12) als zeitabhängige Dirichlet Randbedingung vorgegeben, genauso wie die Lanzentemperatur. Diese wurde linear über die Lanzenlänge interpoliert zwischen den gemessenen Temperaturen am Lanzenkopf und -fuss (Sensor 34 bzw. Sensor 11 in Abb. 12). Exemplarisch wird die zeitliche radiale Temperaturverteilung auf der Messebene 2 (Abb. 12) in Abb. 29 gezeigt. Hier kann ebenfalls eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse gegenüber den Simulationsergebnissen festgestellt werden. Ferner wurde aus den jeweiligen Messwerten nach Gl. 18 die Kühlleistung errechnet sowie auch nach dem Ansatz von Sanger & Sayles. Diese Werte werden mit der aus der Simulation ermittelten Kühlleistung in Abb. 29 zusammen dargestellt. Hier ist ebenfalls eine gute Übereinstimmung der Werte zu verzeichnen.

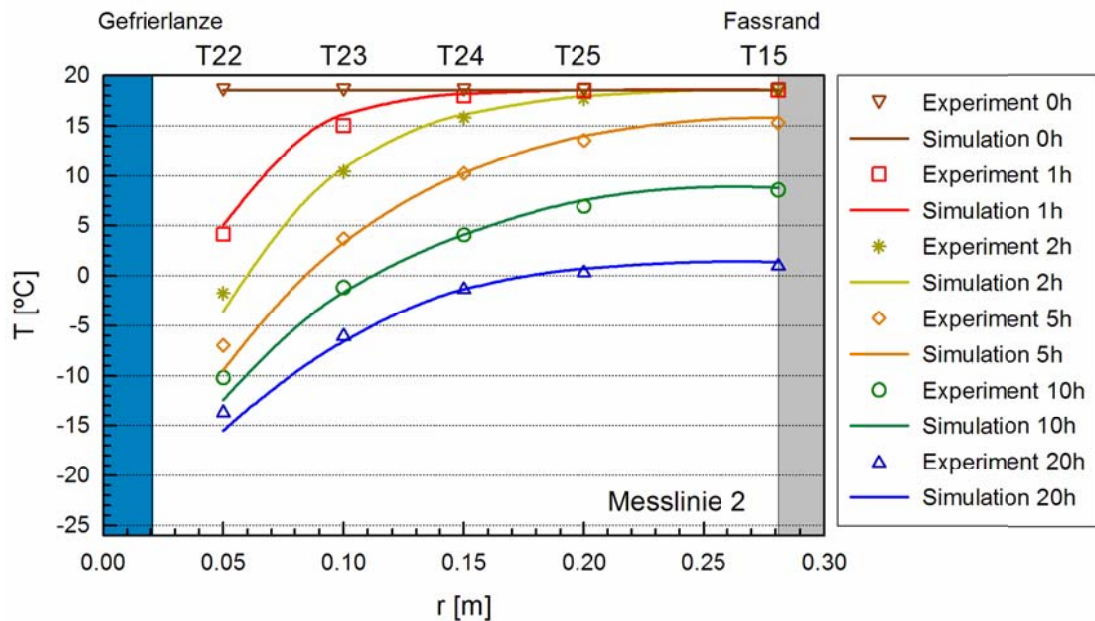


Abb. 28 Zeitliche radiale Temperaturverteilung in der Messebene 2 (Bild 9). Symbole stellen die Mess- und die Linien die Simulationsergebnisse dar

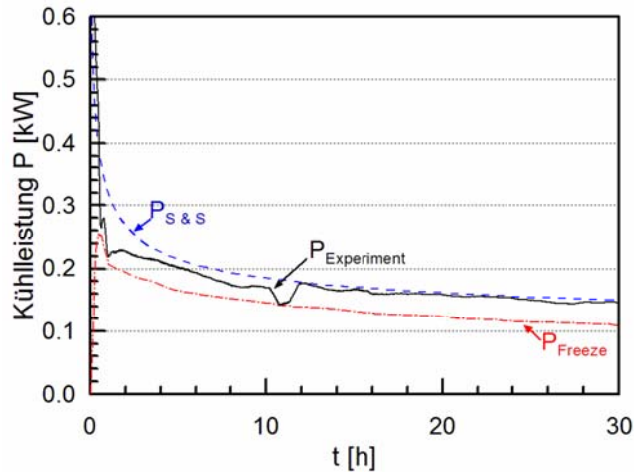


Abb. 29 Kühlleistung der Gefrierlanze

6.2.3 Grossmassstäblicher Modellversuch

Das physikalische Modell wurde anhand von 51'200 Elementen und 55'473 Knoten numerisch diskretisiert (Sres 2009). Analog zum Elementversuch wurden die Randbedingungen definiert, d.h. alle Seiten des Modells ausser der Wassereintrittsseite und der Oberfläche des Sandes wurden als adiabatisch angenommen. Es wurde eine lineare Temperaturverteilung entlang der Gefrierlanzen berücksichtigt. Die nicht adiabatisch angenommenen Randbedingungen wurden demzufolge als zeitabhängige Dirichlet Randbedingung gesetzt, wobei die Messwerte der entsprechenden Sensoren übernommen wurden (T14, T15, T17, T18, T19 und T20 in Abb. 14). Aus Symmetriegründen wurde die linke Gefrierlanze mit der gleichen Temperatur beaufschlagt wie die rechte. Für die Experimente mit Sickerströmung wurden auf der Eintritts- und Austrittsseite die gemessenen Wasserstände vorgegeben. Die Simulationen wurden mit Zeitschritten von 900 s durchgeführt. Exemplarisch wird die zeitabhängige Temperaturverteilung entlang der Messlinien ML1 und ML2 (Abb. 19), d.h. in Strömungsrichtung und senkrecht dazu, für die Experimente V2, V4 und V6 sowie die jeweiligen Messwerte für die ersten 40 h Aufgefrierzeit in Abb. 30 dargestellt. Die Simulationsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten, auch bei verhältnismässig hohen Sickergeschwindigkeiten. Weiterhin ist der Einfluss der Konvektion deutlich erkennbar, d.h. das Wachstum des Gefrierkörpers wird mit zunehmender Sickergeschwindigkeit stärker oval. Da ein Temperaturgradient entlang der Gefrierlanzen berücksichtigt wird, erhält der Gefrierkörper eine konische Form die ebenfalls von der Konvektion beeinflusst wird, d.h. der Fussbereich, weil kälter, friert schneller und drückt die durchströmenden Wassermassen in Richtung des grösseren freien Querschnitt, dadurch verlangsamt sich das Gefrierkörperwachstum im oberen Bereich zusätzlich. Dieser Effekt wird in Abb. 31 als 3D Darstellung des Experimentes V4 verdeutlicht. In Abb. 25 wird die aus den jeweiligen Messwerten nach Gl. 18 errechnete Kühlleistung (gemessen) sowie die aus der Simulation (gerechnet) zusammengefasst. Die Simulationsergebnisse der Kühlleistung zeigen ebenfalls für alle Experimente eine gute Übereinstimmung mit den sogenannten gemessenen Werten.

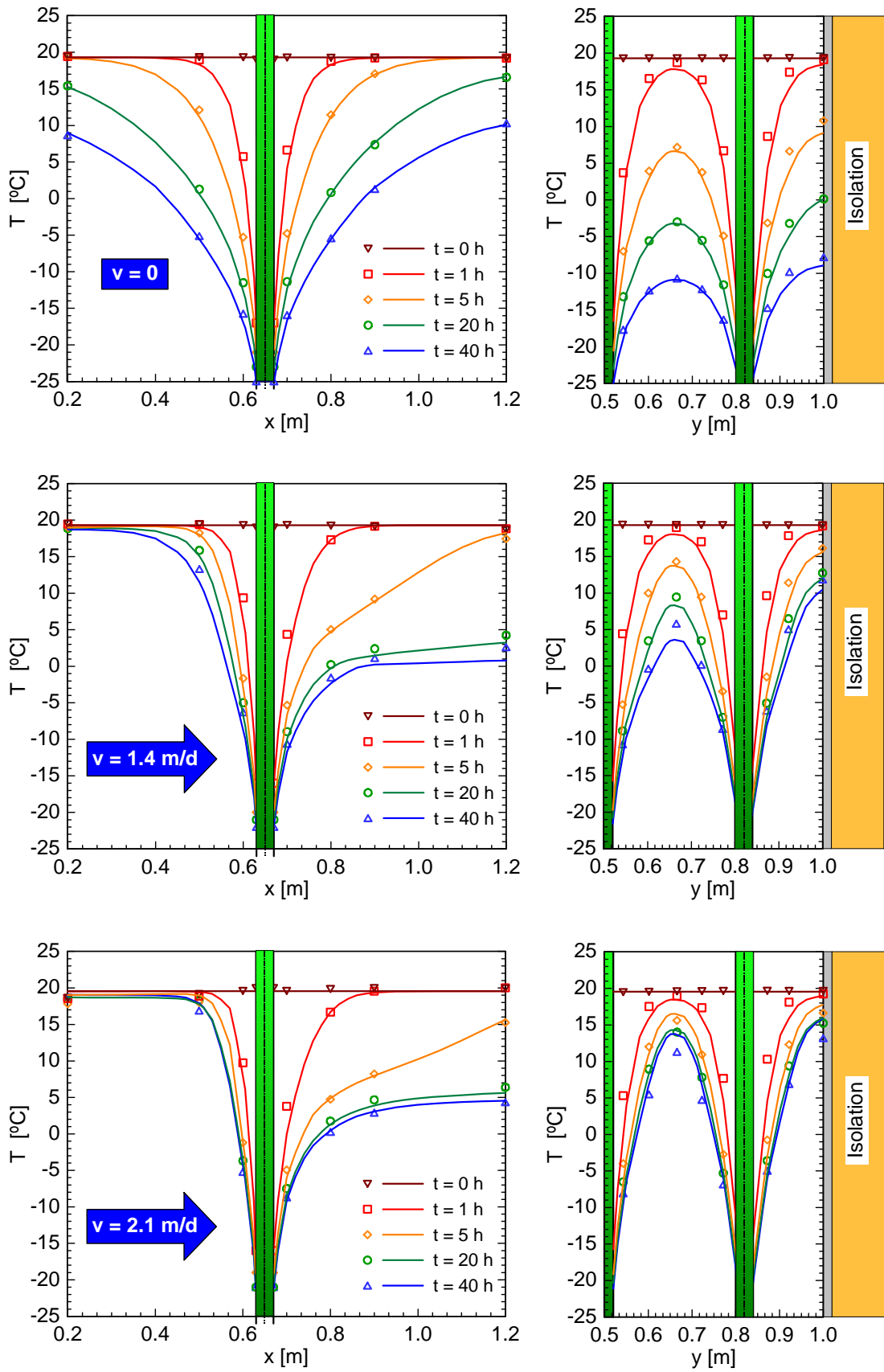


Abb. 30 Temperaturverteilung entlang der Messlinien ML1 (links) und ML2 (rechts) für die Experimente V2, V4 und V6 (von oben nach unten). Die Symbole stellen die Messwerte und die durchgezogenen Linien die Rechenergebnisse dar

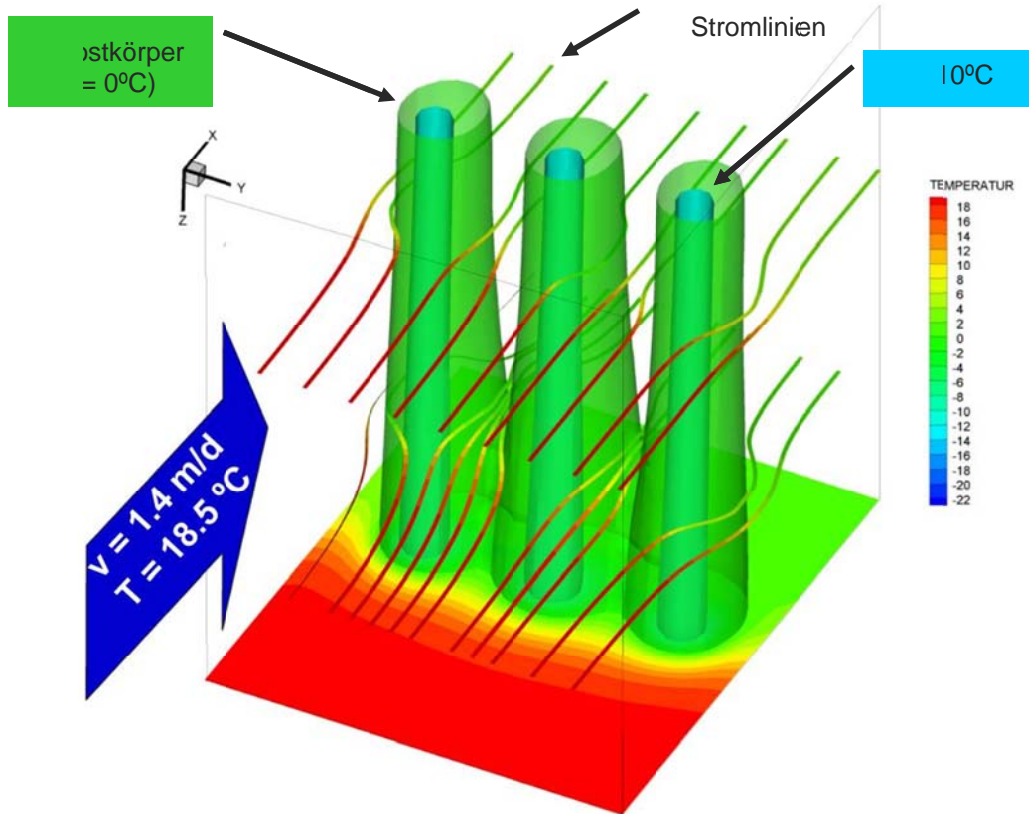


Abb. 31 3D Darstellung des Experimentes V4 nach 36 h Aufgefrierzeit

Abschliessend ist festzuhalten, dass die mehrstufige Verifikation des numerischen Modells in alle Etappen erfolgreich war. So konnten das Experiment von Berggren, mit dem Elementversuch, sowie die sechs Experimente mit dem grossmassstäblichen Modell realistisch simuliert werden und dies nicht nur für ruhendes Grundwasser und Fälle mit moderater Sickerströmung sondern auch für die Fälle mit hoher bis sehr hoher Sickergeschwindigkeit. Hiermit explizit gemeint sind, sowohl die zeitabhängigen Temperaturverteilungen, als auch die erforderliche Kühlleistung. Es ist zu vermerken, dass, dank der in Kapitel 5.4 akkuraten Parameterbestimmung, bei keiner der Simulationen jegliche Art von Kalibrierung erforderlich war. Das wertet die Güte der Verifikation auf.

7 Rechnerische Untersuchung ausgewählter Fragestellungen

7.1 Überblick

Der Einsatz des Gefrierverfahrens im strömenden Grundwasser kann problematisch sein, da die Strömung grundsätzlich zu einer Verlangsamung der Bildung eines geschlossenen Gefrierkörpers führt und es je nach Sickergeschwindigkeit sogar verunmöglicht. In der Literatur finden sich vage und unterschiedliche Angaben diesbezüglich. Während z.B. Andersland & Ladanyi (2004) behaupten, dass bei Sickergeschwindigkeiten höher als 1 bis 2 m/d die Gefrierkörper um benachbarte Gefrierlanzen nicht zusammenwachsen werden, sind Jessberger & Jagow-Klaff (2001) der Auffassung, dass Fließgeschwindigkeiten bis 2 m/d bei einer Solevereisung und zwischen 4 bis 6 m/d bei Stickstoffvereisung als unkritisch anzusehen sind. Schuster (1972) berichtet über das Stoppen einer Grundwasserströmung von etwa 50 m/d mit einem flüssigen Stickstoffsystem. Diese Angaben basieren auf Erfahrungen und können nur als Richtwerte verstanden werden.

Aus den vorangegangenen Kapiteln geht hervor, dass die zweckmässige Dimensionierung einer Gefriermassnahme darin besteht, die verfahrensspezifischen Parameter, wie Temperatur und Durchmesser der Gefrierlanzen sowie deren Abstand bzw. Verteilung den in-situ Gegebenheiten wie, Sickergeschwindigkeit, Bodentemperatur und deren Materialkennwerte und räumliche Verteilung so anzupassen, dass die Bildung des erforderlichen Gefrierkörpers in einer vertretbaren Zeit erreicht werden kann. Nach der erfolgreichen Überprüfung des Modells und als Entscheidungshilfen für eine bessere Vordimensionierung sind zwei Parameterstudien mit Sickerströmung durchgeführt worden, und zwar für einen homogenen Untergrund mit Schwerpunkt in der Bestimmung der kritischen Sickergeschwindigkeit (Kap. 7.2) sowie für einen heterogenen Untergrund, um den Einfluss der Heterogenitäten auf die zeitliche Veränderung des hydraulischen Feldes zu untersuchen (Kap. 7.3).

Die dritte hier untersuchte Fragestellung betrifft den Gefriervorgang bei Tunnelquerschlägen (Kap. 7.4). Letztere stellen einen der häufigsten Anwendungsfälle des Gefrierverfahrens im Tunnelbau. So wurden beispielsweise in den Jahren 1990 bis 2007 weltweit in 13 Tunnelprojekten die Querschläge mit Hilfe des Gefrierverfahrens aufgefahren (Schneider 2007). Diese Verbindungen sind naturgemäss kurz, so dass deren Auffahrung mittels Tunnelbohrmaschine (TBM) ausgeschlossen ist. Dabei kann die Auffahrung der Hauptrohren selbst sehr wohl mittels einer TBM erfolgen, wie z.B. beim Westerschelde Tunnel. Dort wurden die 6.6 km langen Doppelrohren mittels einer Hydroschild-TBM aufgefahren und die 26 Querschläge mit einer jeweiligen Länge von 12 m im Schutze einer Vereisungsmassnahme aufgebrochen (Heijboer *et al.* 2004). In der Literatur finden sich keine systematischen Untersuchungen zu Gefriermassnahmen für Querschläge im strömenden Grundwasser.

7.2 Wachstum einer Frostwand im homogenen Baugrund

7.2.1 Problemstellung

Bezüglich der Dimensionierung der typischen Gefriermassnahme – eine Reihe von Gefrierlanzen im strömenden Grundwasser – besteht ein Bedarf nach einfachen Entscheidungshilfen. Deshalb wurde im Rahmen des Projektes der idealisierte Fall einer unendlich langen Reihe gleichmässig verteilter Gefrierlanzen in einem homogenen Baugrund anhand einer Parameterstudie systematisch untersucht und aufgrund der numerischen Ergebnisse eine Bemessungsformel abgeleitet, was eine Verbesserung der ursprünglich vorgesehenen Nomogrammen darstellt.

Es wurden stets konstante Boden- (T_{soil}) und Gefrierlanzentemperaturen (T_{pipe}) angenommen. Letzteres bedeutet, dass kein Temperaturgradient entlang der Gefrierlanze berücksichtigt wurde. Im Fernfeld wurde die Grundwassertemperatur gleich der Bodentemperatur (T_{soil}) angesetzt. Betreffend Lanzenradius (r_0) und -temperatur wurden sowohl eine Sole- als auch eine Stickstoffvereisung untersucht. Ferner wurden verschiedene Lanzenabstände (S) sowie Sicker- geschwindigkeiten (v) modelliert (Abb. 32). Letztere wurde stets senkrecht zur Gefrierlanzenreihe angesetzt. Ausgewertet wurden die Simulationen bezüglich der Aufgefrierzeit bis zum Schliesszeitpunkt (t_{close}) sowie bis zum Erreichen einer bestimmten Frostwandstärke W (t_w). Als Modellmaterial wurde ein mittelfeiner Sand mit einem relativ hohen Quarzgehalt von 54% und einer Permeabilität von 10^{-4} m/s (bei $T = 10$ °C) angenommen.

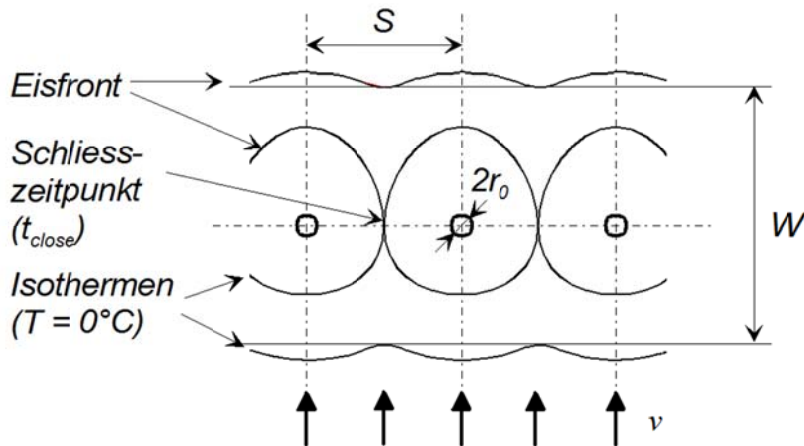


Abb. 32 Fall Gefrierlanzenreihe im homogenen Untergrund – Skizze der Frostwand zum Schliesszeitpunkt und nach dem Erreichen einer Wandstärke W

7.2.2 Schliesszeit

Der Einfluss von Lanzenabstand, -temperatur und Sicker- geschwindigkeit auf die Schliesszeit wird in Abb. 33 dargestellt. Es ist leicht erkennbar, dass sich bei üblichen Lanzenabständen von rund 1 m und moderaten Sicker- geschwindigkeiten von 0.4 – 0.6 m/d sich die Schliesszeit durch Herabsetzung der Lanzentemperatur von -30 °C auf -40 °C von 10 – 20 Tagen auf rund 5 Tage reduziert.

Weiterhin wurde der Einfluss der o.g. Parameter auf die erforderliche Aufgefrierzeit zum Erreichen einer bestimmten Wandstärke untersucht (Abb. 34). Bei verhältnismässig kleinen Lanzenabständen haben moderate Sicker- geschwindigkeiten keinen Einfluss auf die Aufgefrierzeit (Lanzenabstand 0.63 m bei einem Lanzendurchmesser von 0.1 m in Abb. 34). Bei grösseren Abständen, wie z.B. 0.94 m in Abb. 34 und moderater Sicker- geschwindigkeit ist die gesamte Aufgefrierzeit bei relativ mächtigen Frostwänden ($W > 2.5$ m) weitestgehend unabhängig von der Sicker- geschwindigkeit, d.h. die verzögerte Schliesszeit wird durch die Konvektion und durch deren Vorkühlung (Kältefahne) ausgeglichen. Dieser Effekt ist stärker, je grösser der Temperaturunterschied zwischen Boden und Lanzen ist.

Aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit gegenüber anderen Mineralien wirkt sich Quarz positiv auf die Aufgefrierzeit, d.h. je höher der Quarzgehalt desto kürzer wird diese (Abb. 35). Dieser Effekt ist ausgeprägter je stärker die Konvektion ist. So reduziert sich beispielsweise die Schliesszeit ($W = 0$ in Abb. 35) für den Fall mit 75% statt 50% Quarzgehalt ohne Sickerströmung von 5.5 auf 4.5 Tage, mit Sickerströmung aber von 19.5 auf 10.2 Tage. Die Materialkennwerte für diese Simulationen entsprechen dem Material mittelfeiner Sand, wobei lediglich nur eine veränderte Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt wurde, und zwar entsprechend dem Quarzgehalt und gemäss Gl. 7.

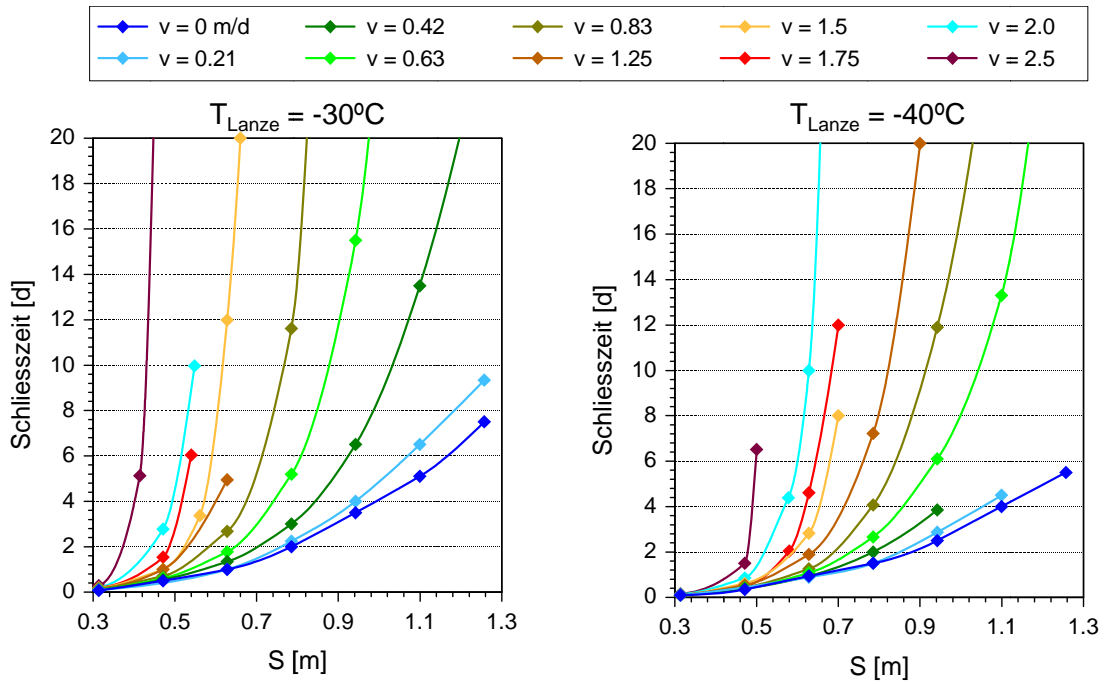


Abb. 33 Schliesszeit über Lanzenabstand im homogenen Untergrund aus mittelfeinem Sand mit $T_{soil} = 10^{\circ}C$, Lanzenradius $r_0 = 0.05$ m, Lanzentemperatur von $-30^{\circ}C$ (links) bzw. $-40^{\circ}C$ (rechts) und Sickergeschwindigkeiten bis 2.5 m/d

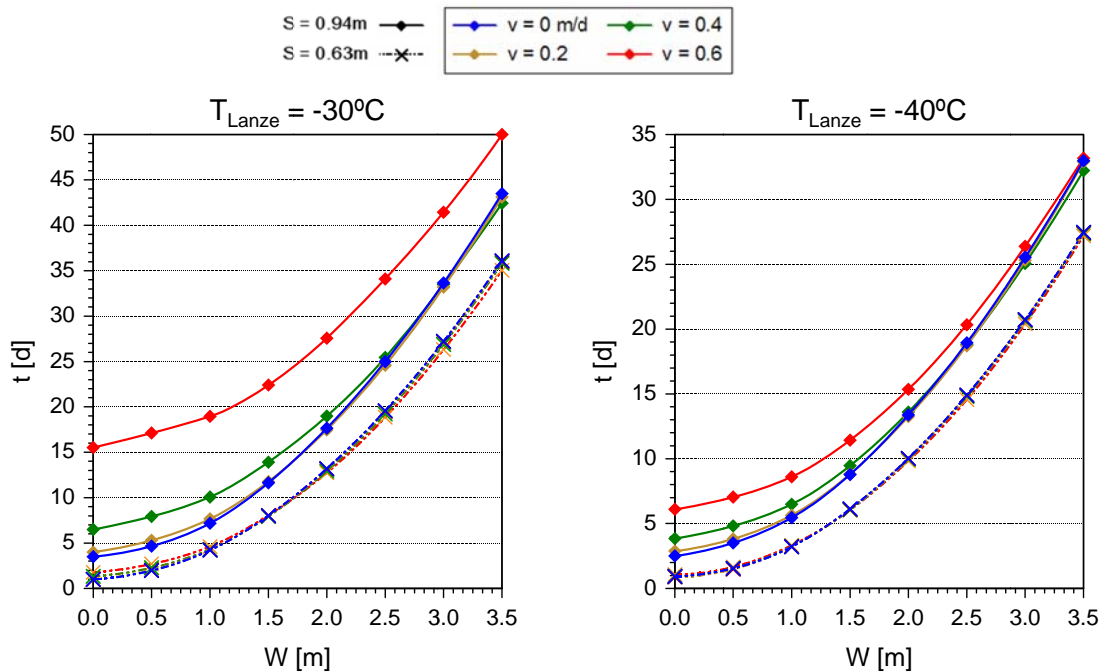


Abb. 34 Aufgefrierzeit über Frostwandstärke im homogenen Untergrund aus mittelfeinem Sand mit $T_{soil} = 10^{\circ}C$, Lanzenradius $r_0 = 0.05$ m, Lanzentemperatur von $-30^{\circ}C$ (links) bzw. $-40^{\circ}C$ (rechts), Sickergeschwindigkeiten bis 0.6 m/d und Lanzenabstand von 0.63 m (gestrichelte Linien) bzw. 0.94 m (durchgezogene Linie)

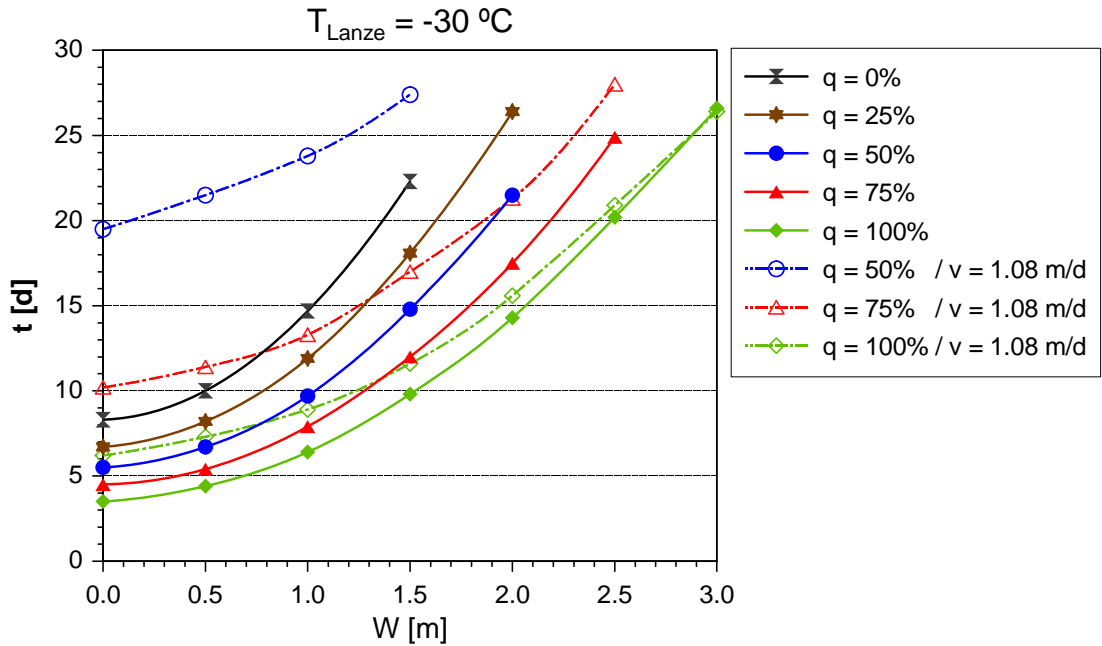


Abb. 35 Einfluss des Quarzgehaltes q auf die Aufgefrierzeit im homogenen Untergrund aus mittelfeinem Sand mit $T_{\text{soil}} = 10 \text{ °C}$, Lanzenradius $r_0 = 0.05 \text{ m}$, Lanzentemperatur von -30 °C , Lanzenabstand $S = 1.1 \text{ m}$, ohne (durchgezogene Linie) und mit Sickerströmung (gestrichelte Linien). Anmerkung: Bei den Fällen mit Sickerströmung und einem geringen bis keinem Quarzgehalt ($q = 25\%$ bzw. $q = 0\%$) konnte nach 30 Tage Simulationszeit kein Schliessen des Gefrierkörpers erreicht werden

Der Vergleich der Messergebnisse aus den durchgeführten Experimenten mit den Rechenergebnissen aus geschlossenen Lösungen (Kapitel 6) ergab u.a., dass diese Lösungen (Ständer 1967, Victor 1969 und Sanger & Sayles 1976) geeignet sind für die Schätzung der Schliesszeit bei ruhendem Grundwasser $t_{\text{close } 0}$. Allerdings muss hierbei der Vorkühleffekt benachbarter Lanzen unbedingt berücksichtigt werden (Pimentel *et al.* 2010), z.B. in der Form einer Reduzierung der Boden- bzw. Wassertemperatur T_{soil} (Ständer 1967), d.h.:

$$T_{\text{soil}}^* = 0.27 \cdot T_{\text{soil}} \quad (17)$$

Die Lösungen von Ständer und Victor gelten trotz vereinfachenden Annahmen als genaue Lösungen. Für ihre praktische Anwendung wirkt sich nachteilig, dass die Schliesszeit implizit in der Lösung enthalten ist, d.h. sie ist nur durch Iteration unter Auswertung numerischer Integrale (Exponentialintegrale) bestimmbar. Die Lösung von Sanger & Sayles dagegen ist explizit nach der Schliesszeit aufgelöst und enthält keine numerischen Integrale. Da sich die Rechenergebnisse dieser Lösungen nur geringfügig voneinander unterscheiden, wird aus praktischer Sicht die Lösung von Sanger & Sayles (1976) zur Schätzung der Schliesszeit im ruhenden Grundwasser $t_{\text{close } 0}$ empfohlen:

$$t_{\text{close } 0} = \frac{\left(\frac{S}{2}\right)^2 L_I}{4\lambda_1 (T_0 - T_{\text{pipe}})} \left(2 \ln \left(\frac{S}{2r_0} \right) - 1 + \frac{C_1 (T_0 - T_{\text{pipe}})}{L_I} \right), \quad (18)$$

wobei

$$L_I = n\rho_w L + \frac{m^2 - 1}{2\ln(m)} C_2 (T_{soil}^* - T_0). \quad (19)$$

Hierin ist λ_1 die Wärmeleitfähigkeit des gefrorenen Bodens, C_1 und C_2 die volumetrische spezifische Wärmekapazität des gefrorenen bzw. ungefrorenen Bodens, n die Porosität, ρ_w und L die Dichte bzw. die latente Wärme des Wassers und m das Verhältnis zwischen Abkühlradius und Frostradius².

Die Lösung von Victor (1969) gilt als bislang einzige Lösung für den Fall des strömenden Grundwassers. Der Vergleich der Rechenergebnisse mit den Messergebnissen aus den Experimenten ergab, dass diese Lösung die Schliesszeit tendenziell unterschätzt, und zwar in Abhängigkeit von der Sickergeschwindigkeit, d.h. je Stärker die Strömung desto unrealistischer und auf der unsicheren Seite ist die Berechnung (Pimentel *et al.* 2010). So beträgt beispielsweise die in den Experimenten V4 ($v = 1.4$ m/d) und V6 ($v = 2.1$ m/d) gemessene Schliesszeit 54 bzw. 74 Stunden, d.h. sie ist um Faktor 2 – 2.3 grösser als die berechnete Schliesszeit.

7.2.3 Kritische Sickergeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit v_{crit} , ab welcher die Gefrierkörper um die Gefrierlanzen quer zur Strömung nicht so weit wachsen, dass sie sich berühren und eine geschlossene Wand bilden, kann als «kritische Sickergeschwindigkeit» bezeichnet werden. Bei Sickergeschwindigkeiten nah zur v_{crit} schliesst sich der Gefrierkörper sehr langsam. Je grösser die Differenz zwischen vorliegender und kritischer Sickergeschwindigkeit, desto kürzerer wird die Schliesszeit. Da die kritische Sickergeschwindigkeit von den örtlichen Gegebenheiten, wie z.B. der Temperatur des Bodens und dessen Leitfähigkeit, aber auch von den verfahrensspezifischen Parametern (r_0 , T_{pipe} und S) abhängt, stellt sie eine wichtige Kennzahl für Vordimensionierungszwecke dar. In der Literatur finden sich die Ansätze von Khakimov (1963), Takashi (1969) und Sanger & Sayles (1976) zur Schätzung der kritischen Geschwindigkeit. Khakimov (1963) und Takashi (1969) betrachteten bei der Herleitung ihrer Ansätze die Wärmebilanz und die Erhöhung des Druckpotentials infolge des durch Stauung entstandenen verengten Raumes zwischen Gefrierkörpern im Fall einer Gefrierlanzenreihe mit einer endlichen Länge L_{wall} . Es wurde nur der Bereich mit der höchsten Druckpotentialerhöhung untersucht, also in der Mitte der Gefrierlanzenreihe. Ferner wurde angenommen, dass die Gefrierkörper um die Gefrierlanzen stets eine kreiszylindrische Form haben. Es ist zu vermerken, dass je stärker die Advektion, desto unrealistischer die letzte Annahme ist. Wesentlicher Nachteil des Ansatzes von Khakimov (1963) ist, dass der Temperaturunterschied des Wassers vor und nach dem Durchströmen der Verengung geschätzt werden muss. Ferner muss die kritische Geschwindigkeit durch die Ermittlung des Minimums der Strömungsfunktion in Abhängigkeit der Breite des ungefrorenen Bereiches zwischen Gefrierkörpern ermittelt werden. Eine Inkonsistenz dieses Ansatzes besteht darin, dass für Fälle unterhalb der kritischen Geschwindigkeit die erhöhte Sickergeschwindigkeit kurz vor dem Schliessen der Frostwand gegen «Unendlich» tendiert. Dies wurde von Takashi (1969) behoben:

$$v_{crit} = \frac{2\pi\lambda_1}{L_{wall}\rho_w c_{water}} \frac{(T_0 - T_{pipe})}{(T_{soil} - T_0)} F\left(\frac{2r_0}{S}, b\right), \quad (20)$$

wobei

² Sanger & Sayles schlagen ein Wert von $m = 3$ vor.

$$F\left(\frac{2r_0}{S}, b\right) = \frac{1-b + \frac{1}{\sqrt{1-b^2}} \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{b}{\sqrt{1-b^2}}\right) \right] - \frac{\pi}{2}}{\ln\left(\frac{S}{2r_0}\right) - \ln(b)}, \quad (21)$$

$$b = \frac{2R}{S}. \quad (22)$$

Hierin sind ρ_w und c_{water} Dichte und die spezifische Wärmekapazität des Wassers, L_{wall} die Länge der Gefrierlanzenreihe, R der Radius der jeweiligen Gefrierkörper und b die relative Breite der Verengung. Die kritische Sickergeschwindigkeit v_{crit} wird als Minimum der Gl. 20 ermittelt und die dazugehörige relative Breite der Verengung als b_{crit} bezeichnet.

Basierend auf Erfahrungswerten und in der Literatur nicht weiter dokumentierten thermodynamischen Überlegungen haben Sanger & Sayles (1976) einen einfachen Ansatz zur Schätzung der kritischen Sickergeschwindigkeit vorgeschlagen³:

$$v_{crit} = \frac{\lambda_1}{4S \ln\left(\frac{S}{4r_0}\right)} \frac{T_0 - T_{pipe}}{T_{soil} - T_0} \quad (23)$$

Dieser Ansatz wurde anhand der Simulationsergebnisse aus der Parameterstudie und mit Hilfe einer Dimensionsanalyse näher untersucht. Tendenziell wird mit Gl. 23 die kritische Sickergeschwindigkeit überschätzt, da sie nicht invers proportional zu $\ln(S/4r_0)$, sondern zu $\ln(S/2r_0)$ ist (Sres 2009). Daher wird folgender Ansatz empfohlen:

$$v_{crit} = F \frac{\lambda_1}{4S \ln\left(\frac{S}{2r_0}\right)} \frac{T_0 - T_{pipe}}{T_{soil} - T_0} \quad (24)$$

Der Faktor F wurde mit 0.78 bestimmt. Ferner, und auch im Rahmen der Dimensionsanalyse, wurde ein funktionaler Zusammenhang bezüglich der Schliesszeit in Abhängigkeit der Schliesszeit im ruhendem Grundwasser und der kritischen Geschwindigkeit abgeleitet (Sres 2009):

$$t_{close} = \frac{t_{close0}}{\left(1 - \frac{v}{v_{crit}}\right)} \quad (25)$$

Die entsprechenden Kennwerte können mit Gl. 18 und Gl. 24 geschätzt werden.

7.2.4 Aufgefrierzeit zum Erreichen einer Wandstärke

Die erforderliche Aufgefrierzeit zum Erreichen einer Wandstärke W nach dem Schliessen wurde von Sanger & Sayles (1976) für den Fall im ruhendem Grundwasser ($v = 0$) abgeleitet. Hierbei wurde für die langgestreckte Wand angenommen, dass aufgrund eines Vorkühlens die Wandstärke zum Schliesszeitpunkt nicht als $W = 0$ sondern als $W = 0.79 S$ betrachtet wird:

³ Dieser Ansatz ist nicht dimensionsrein. Es müssen die im Anhang 1 angegebenen Einheiten berücksichtigt werden.

$$t_{ref} = t_{close} + \frac{L_{II} \left(W^2 - (0.79S)^2 \right)}{8k_1 (T_0 - T_{pipe})} \text{ für } W > 0.79S, \quad (26)$$

wobei

$$L_{II} = n\rho_w L + \frac{1}{2} C_1 (T_0 - T_{pipe}) + C_2 (T_{soil} - T_0) \frac{m_{II} - 1}{\ln(m_{II})} \quad (27)$$

Hierin stellt m_{II} das Verhältnis zwischen Abkühlfront und Frostfront dar und darf gemäss Sanger & Sayles (1976) gleich 5 bzw. 4 für die angeströmte Seite bzw. Schattenseite der Frostwand angenommen werden. Diese Gleichung wurde anhand der o.g. Simulationen überprüft (Sres 2009).

7.2.5 Kühlleistung

Die momentane Kühlleistung wird definiert als die Wärmemenge pro Zeiteinheit, die dem Boden entzogen werden kann. Sie hängt unter anderem von der Ausdehnung des bereits gefrorenen Bodens ab und ist daher für die Annahme einer konstanten Temperatur der Gefrierlanze nicht konstant. Sie ist am Anfang des Gefrierprozesses maximal und nimmt monoton mit der Zeit ab. Analytische Ansätze zur Bestimmung der Kühlleistung sind in der Literatur nur für den Fall ohne Grundwasserströmung zu finden. Mit Hilfe des Ansatzes von Sanger & Sayles (1976) kann die momentane Kühlleistung pro Einheitslänge einer Gefrierlanze ermittelt werden. Zur Quantifizierung der Kühlleistung zum Schliesszeitpunkt P_{close} muss diese mit der Anzahl der Gefrierlanzen n_{pipe} und deren Länge H_{pipe} multipliziert werden:

$$P_{close} = n_{pipe} H_{pipe} \frac{2\pi\lambda_1 (T_0 - T_{pipe})}{\ln\left(\frac{R}{2r_0}\right)}. \quad (28)$$

Hierin ist R das Radius des Gefrierkörpers. Die Kühlleistung nach dem Ansatz von Sanger & Sayles (1976) ist nicht definiert für den Zeitintervall bis zum Erreichen eines Radius des Gefrierkörpers grösser als der Durchmesser der Gefrierlanze. Die Überprüfung dieses Ansatzes, d.h. der Vergleich der errechneten Leistung mit der in den Experimenten V1 und V2 gemessenen Leistung ergab eine sehr gute Übereinstimmung (Abb. 25), insbesondere für das Experiment mit gleichmässiger Kühlleistung für alle drei Gefrierlanzen (Experiment V2). Für die erforderliche Kühlleistung zum Erreichen einer Wandstärke W wurde ebenso wie bei der Bestimmung der Kühlzeit (Gl. 26) der Vorkühleffekt benachbarter Gefrierlanzen berücksichtigt:

$$P = n_{pipe} S H_{pipe} \frac{2\lambda_1 (T_0 - T_{pipe})}{W} \text{ für } W > 0.79S \quad (29)$$

Hierin entspricht das Produkt $n_{pipe} S$ den Umfang der Gefriermassnahme.

7.3 Gefriervorgang im heterogenen Baugrund

7.3.1 Problemstellung

Der Untergrund kann naturgemäss Heterogenitäten aufweisen, die einen Einfluss auf dem Gefrierkörperwachstum haben können. Aufgrund der Komplexität gibt es keine analytischen Lösungen, so dass die Untersuchung dieses Problems nur numerisch möglich ist. Daher wurde eine Parameterstudie mit dieser Zielsetzung durchgeführt (Hiller 2007).

Berücksichtigt wurde eine Gefrierlanzenreihe in einem geschichteten Untergrund. Als Referenzfall wurden die Ergebnisse aus den Simulationen mit homogenem Untergrund (Kap. 7.2) verwendet. Für den geschichteten Untergrund wurden aus stratigraphischer Sicht zu dem oben genannten homogenen Fall zwei weitere Fälle untersucht, und zwar ein Zwei-Schichten-Modell aus gleichstarken Schichten und ein Drei-Schichten-Modell als sogenanntes Sandwichmodell (Abb. 36). Als Modellmaterialien wurden neben dem mittelfeinen Sand (Kap. 7.2) ein weniger durchlässiger Sand sowie Silt betrachtet (Tabelle 10).

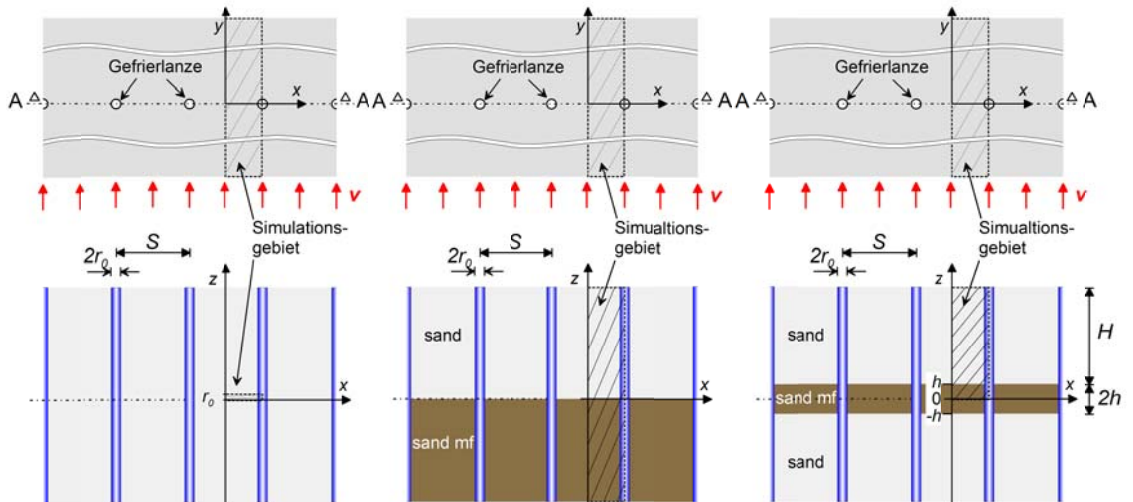


Abb. 36 Baugrundmodelle für die Parameterstudie: Homogener Untergrund, Zwei-Schichten-Modell und Drei-Schichten-Modell (von links nach rechts); Draufsicht (oben) und Schnitt A-A (unten)

Tabelle 10 Geotechnische Kennwerte der Modellmaterialien für die Parameterstudie

	ρ_s [kN/m ³]	ρ_{dry} [kN/m ³]	n [%]	w [-]	e [-]	k_f^* [m/s]
Sand mittelfein	26.13	16.61	36.4	0.21	0.56	1.0×10^{-4}
Sand	26.13	15.93	39.0	0.24	0.64	5.4×10^{-5}
Silt	26.13	16.19	38.0	0.23	0.62	2.5×10^{-7}

* bei $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

Als Eingangsparameter für die Simulation der Sickerströmung wurde ein für jedes Modell konstanter hydraulischer Gradient angegeben. Folglich ist die initiale Fließgeschwindigkeit unterschiedlich hoch für die zwei Schichten entsprechend derer Permeabilität.

7.3.2 Zwei-Schichten-Modell

Dieses Modell diente der Untersuchung der Gefrierkörperbildung im Übergangsbereich zwischen stark ausgedehnten Schichten, d.h. die Mächtigkeit der Schichten wurde so gewählt, dass weit ausserhalb der Kontaktzone keine gegenseitige Beeinflussung mehr stattfand. Der Fall mit zwei Schichten bestehend aus Silt und «Sand mittelfein» (Tabelle 10), d.h. Schichten mit sehr unterschiedlichen Permeabilitäten ergab eine geringe Beeinflussung in der Gefrierzeit. Dagegen ist bei einer moderaten Abweichung der Permeabilität zwischen den Schichten, wie im Fall Sand und Sand mittelfein (Abb. 37), ein ausgeprägter Bereich nahe der Kontaktzone mit lokal erhöhter Sickergeschwindigkeit und daher verlangsamter Schliesszeit zu erkennen. Unter der Voraussetzung einer gleichmässigen Lanzentemperatur werden die Bereiche mit niedriger Permeabilität grundsätzlich einen geringeren Einfluss der Konvektion hervorrufen und daher schneller gefrieren. Aufgrund des lokal gebildeten Gefrierkörpers, muss das im Fernfeld eingespeiste Grund-

wasser in die noch nicht gefrorenen Schichten höherer Permeabilität umgeleitet werden, wodurch sich die Sickergeschwindigkeit erhöht.

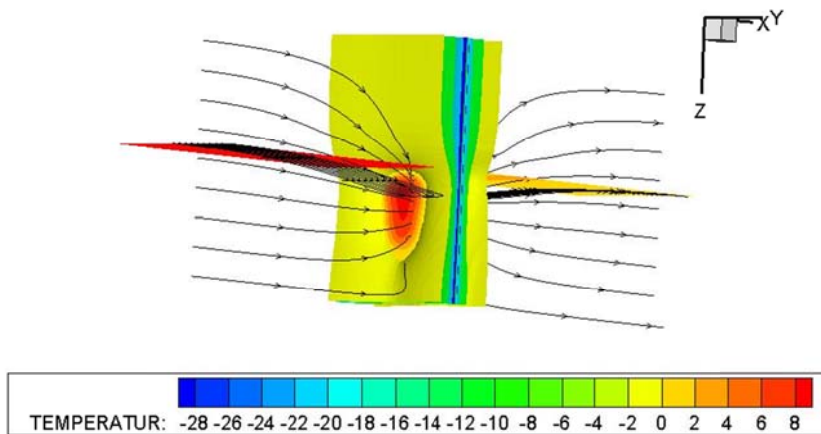


Abb. 37 3D Darstellung der Simulationsergebnisse mit einem Zwei-Schichten-Modell (Fall $i = 7\%$, $T_{\text{pipe}} = -30\text{ °C}$, $T_{\text{soil}} = 10\text{ °C}$, $S = 1.09\text{ m}$, $r_0 = 0.051\text{ m}$) nach 30 Tagen Gefrierzeit (Hiller 2007). Die schwarzen Linien stellen Strömungslinien dar. Die orange-rote Fläche markiert den Schichtübergang und die gekrümmte gelbe Fläche die Aussenfläche des Gefrierkörpers (Isofläche $T = 0\text{ °C}$). Die Darstellung ist vorne durch einen Schnitt parallel zur Strömungsrichtung begrenzt. An diesem Schnitt wird die Temperaturverteilung abgebildet. Der Schnitt verläuft durch eine Gefrierlanze (Symmetrieebene).

7.3.3 Drei-Schichten-Modell

Basierend auf den Ergebnissen aus den Zwei-Schichten-Modellen wurde für das Drei-Schichten-Modell, Sand und «Sand mittelfein» (Tabelle 10) als Modellmaterialien, berücksichtigt. Die mittlere Schicht bestand aus dem durchlässigeren Sand mittelfein. Ferner wurde angenommen, dass bei ausreichender Mächtigkeit der mittleren Schicht der beim Zwei-Schichten-Modell oben beschriebene Effekt der lokalen Erhöhung der Sickergeschwindigkeit sich verstärken könnte (Abb. 38). In Rahmen dieser Studie wurden die Schichtstärke und der Lanzenabstand variiert. Aus Symmetriegründen wurde in der Tiefe nur der Bereich bis zur Mitte der mittleren Schicht modelliert. In Abb. 39 (links) wird die Schliesszeit des Frostkörpers in verschiedenen Tiefen für den Fall mit einer halben mittleren Schichtstärke h von 0.47 m und einem Lanzenabstand S von 1.10 m dargestellt. Ebenfalls eingetragen wird die Lage der Schichtgrenze sowie die Schliesszeiten für den homogenen Fall mit beiden Materialien. Ab einer Entfernung zur Schichtgrenze entsprechend etwa die Hälfte der mittleren Schichtstärke, d.h. in etwa h , ist in diesem Fall kein Einfluss der Heterogenität auf die Schliesszeit der oberen Schicht zu erkennen. Es ist zu beachten, dass im unteren Teil des Modells, d.h. in der Mitte der mittleren Schicht, die Schliesszeit erhöht sich gegenüber den homogenen Fall. D.h. durch den oben genannten Effekt ist eine längere Gefrierzeit als für den vermeintlich konservativen Fall (Annahme eines homogenen durchlässigeren Untergrundes) bis zum vollständigen Schliessen des Frostkörpers erforderlich. In Abb. 39 (rechts) werden die Schliesszeiten in Abhängigkeit der normierten Tiefe für verschiedene Lanzenabstände dargestellt. Bei einem engen Lanzenabstand S von 0.78 m ist kein Einfluss der Heterogenität zu erkennen, selbst für eine relativ mächtige mittlere Schicht. Mit zunehmendem Lanzenabstand nimmt der Einfluss der Advektion zu sowie der des oben beschriebenen Effektes auf die Schliesszeit, d.h. die erforderliche Gefrierzeit bis zum vollständigen Schliessen des Gefrierkörpers nimmt zu. Gleiches kann bei den untersuchten Schichtstärken festgestellt werden, d.h. mit zunehmender Schichtstärke nimmt die Schliesszeit zu. Für den Fall einer mächtigen mittleren Schicht (h von 0.78 m) und einen weiten Lanzenabstand S von 1.1 m konnte kein Schliessen erreicht werden. Da in-situ Abweichungen in dieser Grössenordnung in der Permeabilität nicht auszuschliessen sind bzw. der Genauigkeit mit welcher dieser Parameter bestimmt werden kann entsprechen, wird empfohlen die Gefriermassnahme eher konservativ bezüglich der Schliesszeit auszulegen, d.h. tendenziell kürzere Schliesszeiten anstreben.

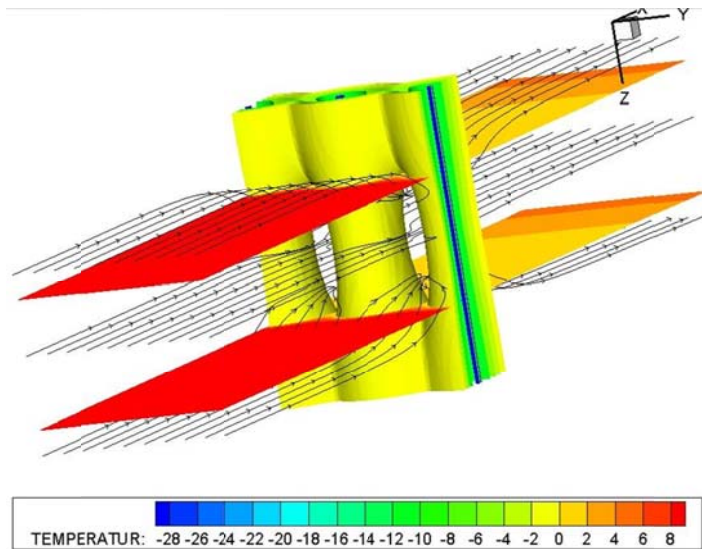


Abb. 38 3D Darstellung der Simulationsergebnisse mit einem Drei-Schichten-Modell (Fall $i = 7\%$, $T_{\text{pipe}} = -30\text{ °C}$, $T_{\text{soil}} = 10\text{ °C}$, $S = 1.10\text{ m}$, $r_0 = 0.051\text{ m}$) nach 17 Tagen Gefrierzeit (Hiller 2007). Die schwarzen Linien stellen Strömungslinien dar. Die orange-roten Flächen markieren die Schichtübergänge und die gekrümmte gelbe Fläche die Aussenfläche des Gefrierkörpers (Isofläche $T = 0\text{ °C}$). Die Darstellung ist vorne durch einen Schnitt parallel zur Strömungsrichtung begrenzt. An diesem Schnitt wird die Temperaturverteilung abgebildet. Der Schnitt verläuft durch eine Gefrierlanze (Symmetrieebene)

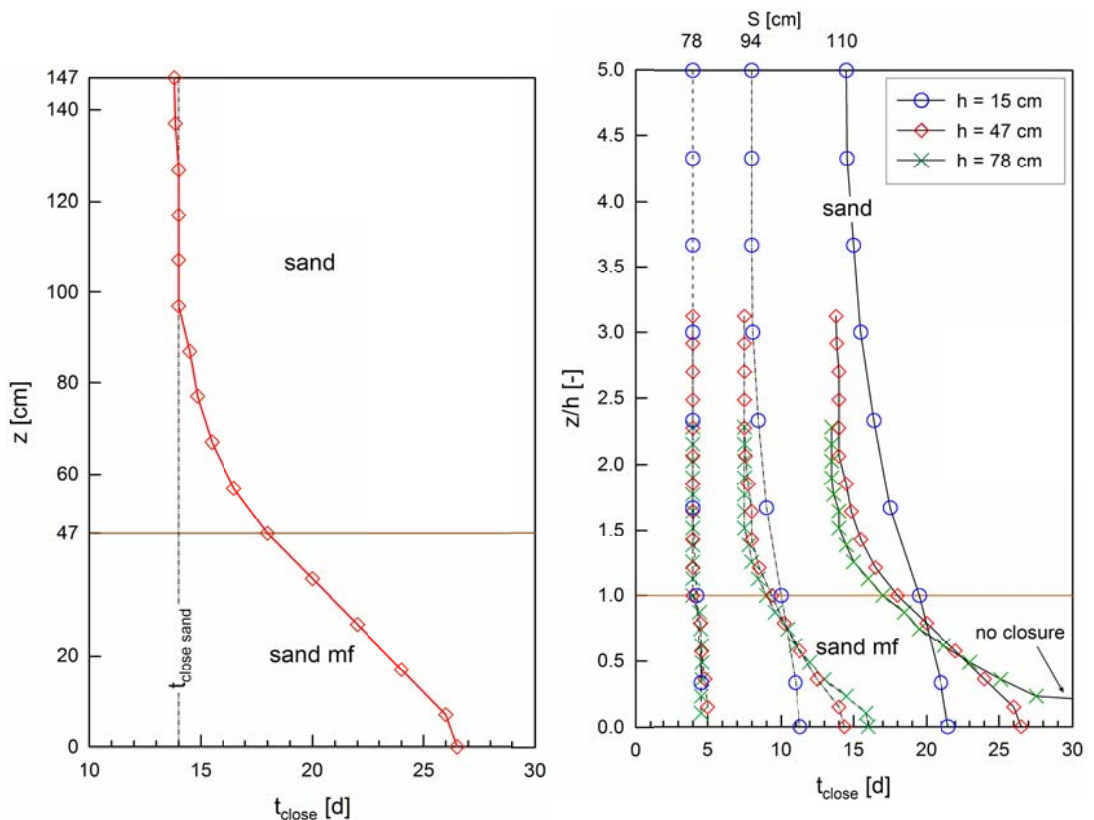


Abb. 39 Schliesszeit des Gefrierkörpers in Abhängigkeit von der Tiefe für eine halbe mittlere Schichtdicke von $h = 0.47\text{ m}$ und Lanzenabstand $S = 1.10\text{ m}$ (links) und in Abhängigkeit von der normierten Tiefe z/H für verschiedene Schichtdicken h und Lanzenabstände S (rechts). Die Simulationen wurden für den Fall $i = 7\%$, $T_{\text{pipe}} = -30\text{ °C}$, $T_{\text{soil}} = 10\text{ °C}$, $r_0 = 0.055\text{ m}$ gerechnet

7.4 Querschläge

7.4.1 Problemstellung

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurden zwei grundsätzliche Querschlagssituationen untersucht und zwar mit einer horizontalen Grundwasserströmung parallel zu den Hauptröhren und senkrecht dazu (Neracher 2007). Da die Querschläge senkrecht zwischen den Hauptröhren verlaufen, fliesst das Grundwasser demnach senkrecht bzw. parallel zur Achse der Querschläge. Im ersten Fall lag der Schwerpunkt bei der Optimierung der Lanzenverteilung um den Querschlag, während im zweiten Fall die Identifizierung von Problemstellen im Vordergrund stand. Für beide Fälle wurde die Geometrie der Röhren konstant gehalten, d.h. der Durchmesser der Hauptröhren betrug 8 m und deren Achsen verliefen horizontal und parallel mit einem Abstand von 24 m und die Querschläge hatten einen Durchmesser von 5 m (Abb. 40). Der Untergrund wurde als homogen angesehen und bestand aus dem gleichen Modellmaterial wie das Grossmodell (Weiacher Sand, Tabelle 8). Als Gefriertechnik wurde Solegefrieren berücksichtigt. Der Lanzenradius r_0 betrug 2" (50.8 mm). Die initiale Bodentemperatur T_{soil} wurde zu 10 °C gesetzt.

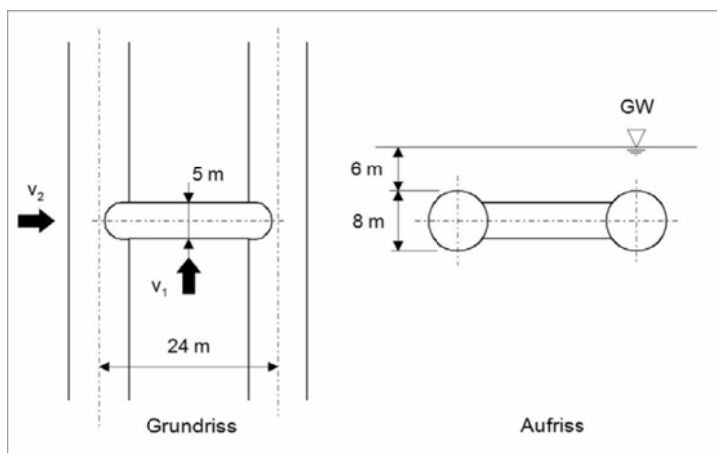


Abb. 40 Querschlagssituation für die Fälle mit einer Sickerströmung parallel (v_1) und senkrecht (v_2) zur Tunnelachse

7.4.2 Queranströmung des Querschlags

Bei einer gleichmässigen Verteilung der Gefrierlanzen um einen seitlich angeströmten künftigen Hohlraum wird der Gefrierkörper ungleichförmig wachsen, d.h. der Bereich auf der Schattenseite profitiert vom Vorkühleffekt infolge der durch Advektion entstandenen Kältefahne auf der Wasserseite. Durch diesen Vorkühleffekt wird auch der Gefrierkörper im First- und Sohlbereich deutlich schneller schliessen. Die Folge kann sein, dass bis zum Erreichen einer für die Statik erforderlichen Mindeststärke des Gefrierkörpers nicht nur Bereiche mit grösserer Eisstärke entstehen, sondern auch, dass ein wesentlicher Bereich des abzubauenen Tunnelquerschnittes zugefroren wäre. Beide Fälle führen zu höheren Energiekosten. Im zweiten Fall muss mit erheblich höheren Abbaukosten gerechnet werden, denn der Abbau kann dann nur mit schwerem Gerät (Abbauhammer oder Teilschnittmaschine) erfolgen. Daher war das Ziel dieser Untersuchungen die Optimierung der Lanzenanordnung, so dass ein in der Stärke möglichst gleichförmiger Gefrierkörper entsteht, und dass der abzubauenende Bereich möglichst ungefroren bleibt.

Der Vergleich der Gefrierkörperbildung bei verschiedenen Lanzenanordnungen erfolgte für eine Grundwasserströmung v_1 von 0.8 m/d und konstanten Lanzentemperaturen T_{pipe} entlang ihrer gesamten Länge von $-30\text{ }^\circ\text{C}$. Dank der Symmetriebedingungen wurde nur die obere Hälfte des Querschnittes modelliert, allerdings als 3D-Modell-Modell, das etwa mit 400'000 Elementen diskretisiert wurde. Als Referenzfall wurde der Fall mit einem konstanten Lanzenabstand S von 1 m, d.h. gleichmässig verteilt entlang eines Kreises mit 3.5 m Radius (Fall n22 in Abb. 41) ausgewählt. Weiterhin wurden Lanzenanordnungen berücksichtigt, die eine Platzierung von zwei weiteren Gefrierlanzen im unteren Bereich der Luv-Seite (Fall n22 + 2 in Abb. 41) und weiteren zwei Gefrierlanzen auf der Lee-Seite (Fall n22 + 2 + 2 in Abb. 41) beinhalten. Schliesslich wurden bei der Referenzanordnung alle Lanzen um 0.5 m nach aussen horizontal versetzt (Fall n22 opt in Abb. 41). Da dadurch die Lanzen entlang einer elliptischen und längeren Kurve verteilt wurden, beinhaltet diese Anordnung 24 Lanzen. Aufgrund der angenommenen konstanten Lanzentemperatur befindet sich der kritische Querschnitt auf einer vertikalen Ebene in der Mitte zwischen beiden Tunnelröhren.

Die nachfolgenden Auswertungen beziehen sich auf diese Ebene und zwar nach dem Erreichen einer Mindeststärke des Gefrierkörpers von 2.0 m. Beim Referenzfall n22 ist ein grosser Teil des Querschlagsbereichs zugefroren (Abb. 42). Die Fälle n22 + 2 und n22 + 2 + 2 ergaben gegenüber dem Referenzfall zwar eine kürzere Schliesszeit (Tabelle 11), allerdings verbunden mit dem Zufrieren eines noch grösseren Innenbereiches. Der Fall n22 opt zeigt die Ausbildung eines Gefrierkörpers ohne ausgedehntes Zufrieren des Innenbereiches. Lediglich ein kleiner Bereich in die Firste würde zufrieren (Abb. 42). Daher wird diese Lanzenanordnung als optimal angesehen. In Tabelle 11 werden die Schliesszeit t_{close} und Aufgefrierzeit bis zum Erreichen einer Eissollstärke W von 2 m $t_{ref\ total}$ aufgelistet. Um die Wirtschaftlichkeit der untersuchten Anordnungen miteinander vergleichen zu können, wurden als Einheitspreise für das Bohren 375 CHF/m, Kälteaggregatkosten KAK (Kältemaschine mit 230 kW Kälteleistung) von 22'500 CHF/Monat und ein Strompreis von 0.105 CHF/kW angenommen. In Tabelle 11 werden die Kosten der jeweiligen Varianten aufgelistet. Nicht dabei enthalten sind die Ausbruchkosten, die bei der Variante n22 opt deutlich geringer anfallen sollten.

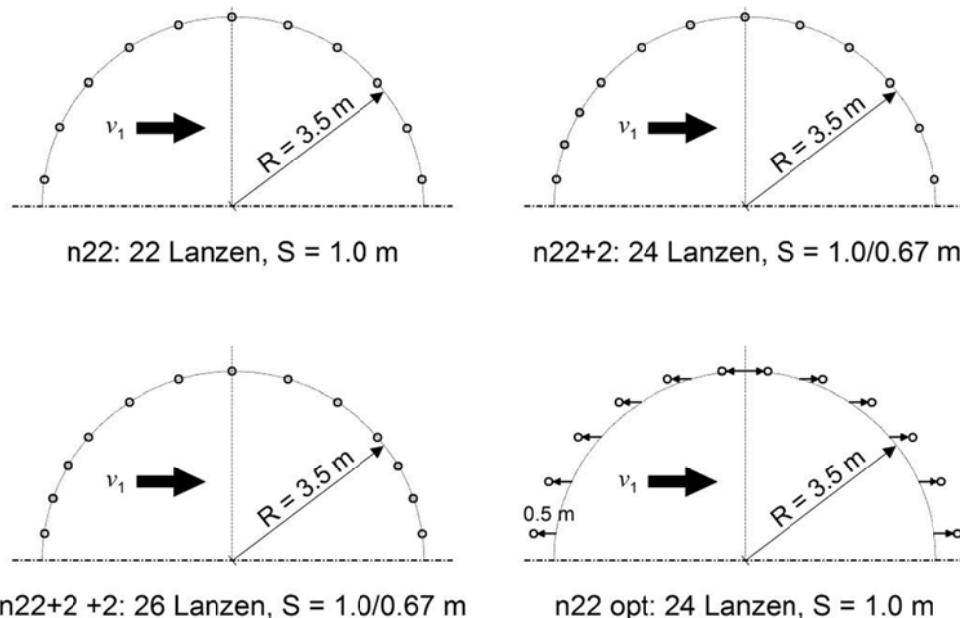


Abb. 41 Untersuchte Lanzenanordnungen

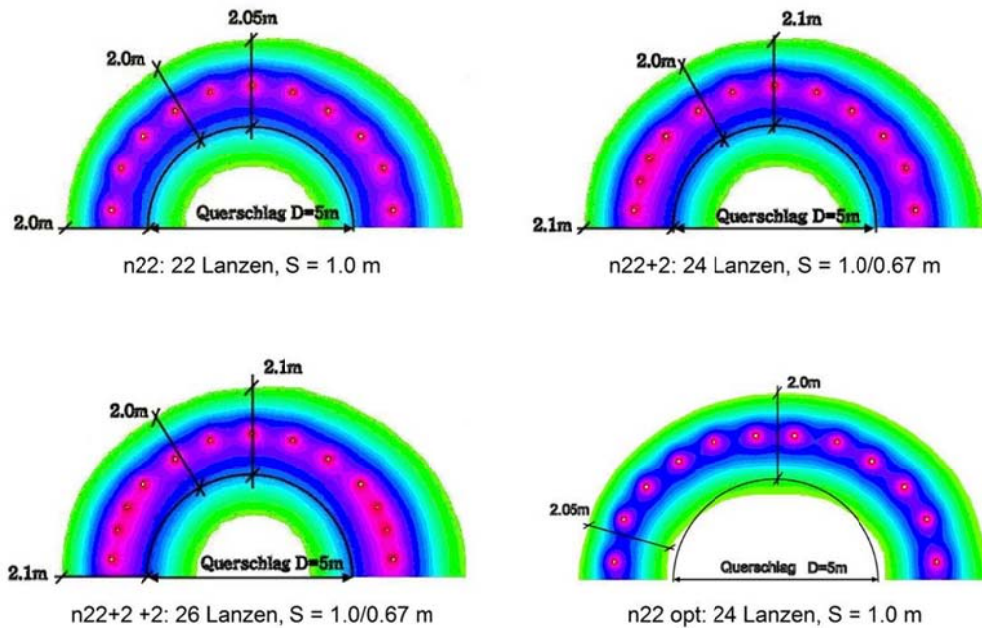


Abb. 42 Gefrierkörper auf der Ebene A-A (Abb. 43) nach dem Erreichen der Sollstärke (Gefrierzeit = $t_{ref\ total}$ in Tabelle 11) für eine Sickergeschwindigkeit $v_1 = 0.8\ m/d$ und verschiedene Lanzenanordnungen

Tabelle 11 – Lanzenanordnungen: Gefrierzeiten und Kostenvergleich (Fall $v_1 = 0.8\ m/d$)

Lanzenanordnung	Gefrierzeiten		Kosten			
	t_{close} [d]	$t_{ref\ total}$ [d]	Bohren [CHF]	KAK [CHF]	Strom [CHF]	Total [CHF]
n22	13.5	40.3	165'000	29'250	3'450	197'700
n22 + 2	12.0	40.3	180'000	29'250	3'750	212'250
n22 + 2 + 2	10.5	40.3	195'000	29'250	4'050	229'950
n22 opt	14.0	27.3	180'000	19'800	2'550	202'350

In Abb. 43 werden die Simulationsergebnisse nach sieben Tagen Gefrierzeit mit der Lanzenanordnung n22 opt gezeigt. Dargestellt werden der Gefrierkörper, ausgewählte Strömungslinien sowie die Temperaturverteilung auf dem kritischen Querschnitt. Wie erwartet, wird der Gefrierkörper auf dieser Ebene zuletzt schliessen. Der Einfluss der Vorkühlung in Form einer Kältefahne sowie die teilweise Umleitung des Grundwasserstromes infolge des Gefrierkörpers sind gut erkennbar. Da die Strömungslinien im mittleren Bereich des Querschlages stets auf einer vertikalen Ebene senkrecht zu deren Achse verlaufen, würden 2D-Modell-Modelle für eine realistische Simulation dieses Falles ausreichend sein. In Abb. 44 werden die Temperaturverteilung und ausgewählte Sickerlinien des o.g. massgebenden Querschnittes nach einer, zwei, drei und vier Wochen Gefrierzeit dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass der Firnbereich infolge Vorkühlung zwar schneller schliesst als die Ulmenbereiche, aber später langsamer wächst infolge einer stärkeren Aussetzung der umgeleiteten Konvektion. Im Umkehrschluss wird der Gefrierkörper im Ulmenbereich nach dem Schliessen kaum der Konvektion ausgesetzt und dadurch schneller wachsen. Daher müssen, um ein Zufrieren des Innenbereiches zu vermeiden, die Lanzen weiter nach aussen versetzt werden.

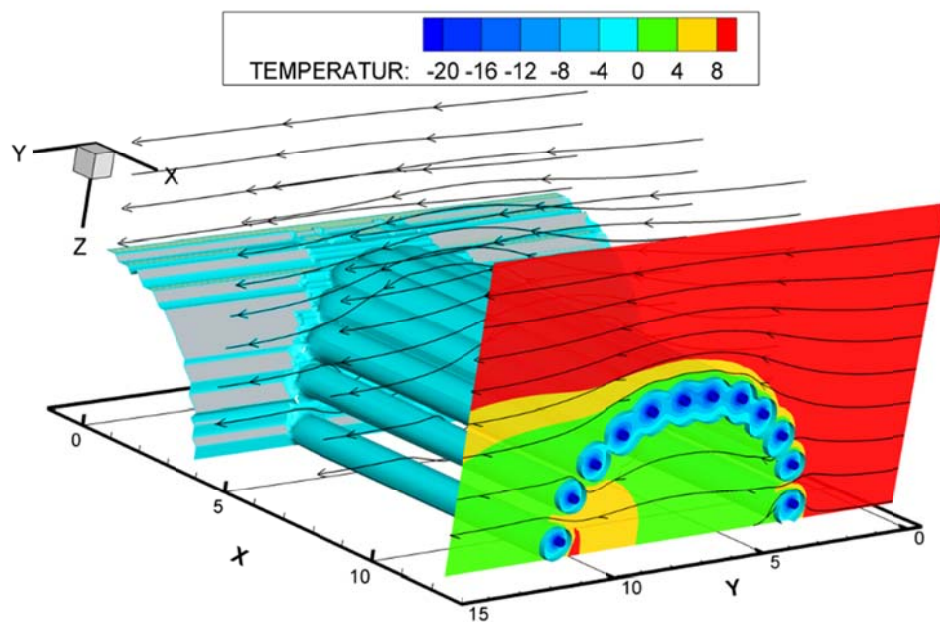


Abb. 43 Lanzenanordnung n22 opt mit Gefrierkörper (Isofläche $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), Temperaturverteilung auf der kritischen Ebene (Ebene A-A) und ausgewählte Sickerlinien nach sieben Tagen Gefrierzeit

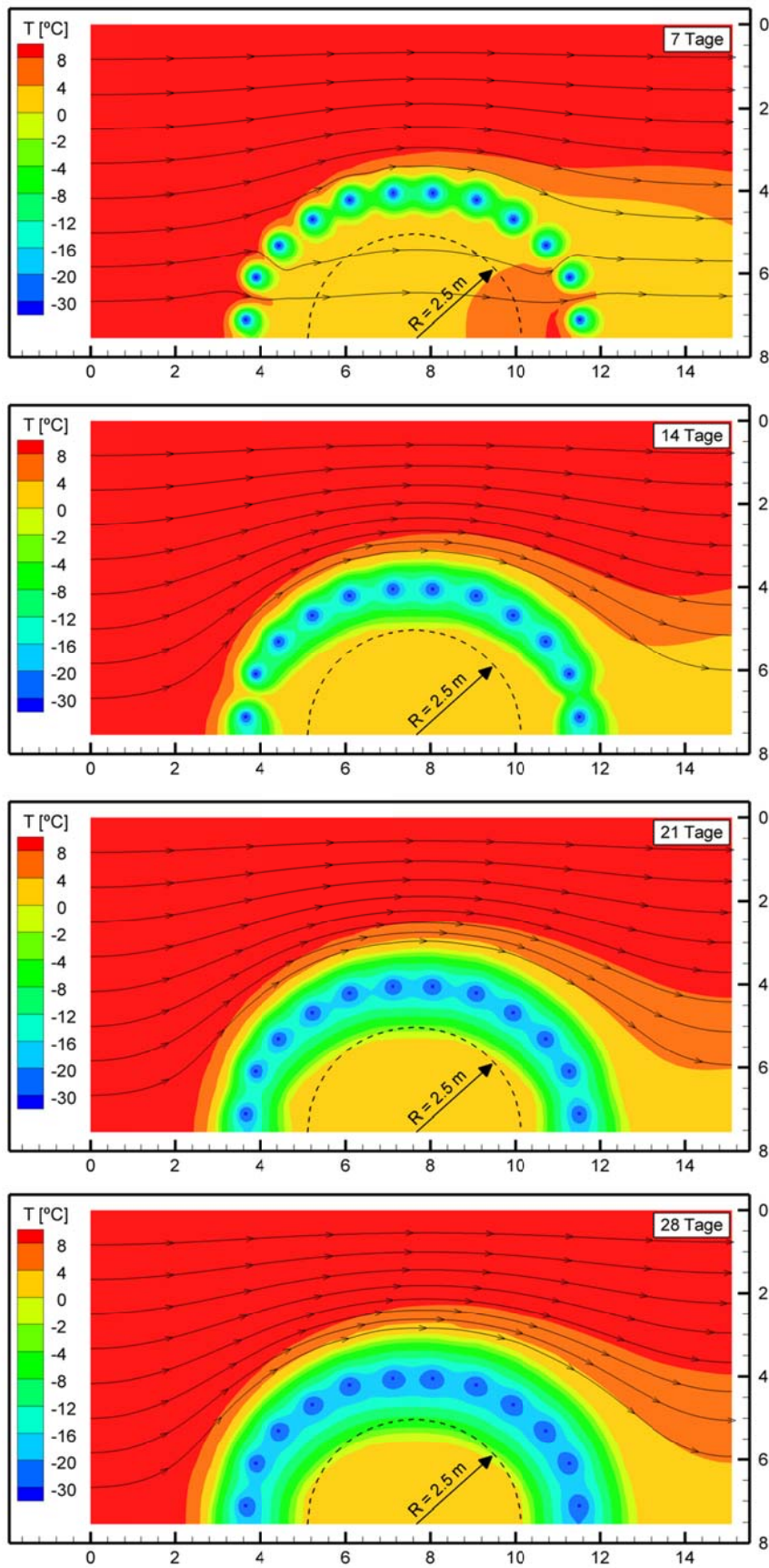


Abb. 44 Temperaturverteilung und ausgewählte Sickerlinien auf der Ebene A-A (Abb. 43) für die Lanzenanordnung n22 opt und einer Sickergeschwindigkeit $v_1 = 0.8 \text{ m/d}$

Der Einfluss der Sickergerwindigkeit auf die Schliesszeit für die verschiedenen Lanzenverteilungen entlang eines Kreises wurde ebenfalls untersucht. Hierbei wurden zusätzlich die Fälle mit 18 und mit 30 gleichmässig verteilten Lanzen (Fälle n18 bzw. n30) modelliert. Die Ergebnisse werden grafisch in Bild 38 zusammengefasst. Für eine langgestreckte Lanzenreihe gilt ein asymptotischer Zusammenhang zwischen Schliesszeit und Sickergerwindigkeit (Kap. 7.2). Einen ähnlichen Verlauf zeigen die Ergebnisse mit der Lanzenanordnung n18 in Abb. 45. Die Simulationsergebnisse der restlichen Anordnungen zeigen bei höheren Sickergerwindigkeiten einen solchen Verlauf, allerdings auch einen Zwischenbereich, bei dem die Zunahme der Sickergerwindigkeit zu einer moderaten Zunahme bis marginal längerer Schliesszeit führt (Abflachen der Kurven in Abb. 45). Dies ist auf ein Vorkühlen der Lanzen an der Leeseite zurückzuführen. D.h. diese Lanzen werden infolge der Advektion mit vorgekühltem Wasser angeströmt, wobei die Vorkühlung beim Vorbeiströmen der Lanzen auf der Luvseite stattfindet. Bildlich gesprochen – d.h. physikalisch nicht korrekt ausgedrückt – bedeutet das, dass je nach Lanzenabständen für bestimmte Sickergerwindigkeiten die durch Advektion «wegtransportierte Kälte» kaum verloren geht, da durch die Vorkühlung ein Schliessen des Gefrierkörpers auf der Leeseite und damit des gesamten Querschnittes begünstigt wird (Abb. 46 unten). Bei langsameren Sickergerwindigkeiten ist die Wärmeleitung der dominante Prozess (Abb. 46 oben), während bei höheren Sickergerwindigkeiten die Kältefahne grösstenteils den Querschlagsquerschnitt verlassen hat und dadurch die Schliesszeiten deutlich zunehmen.

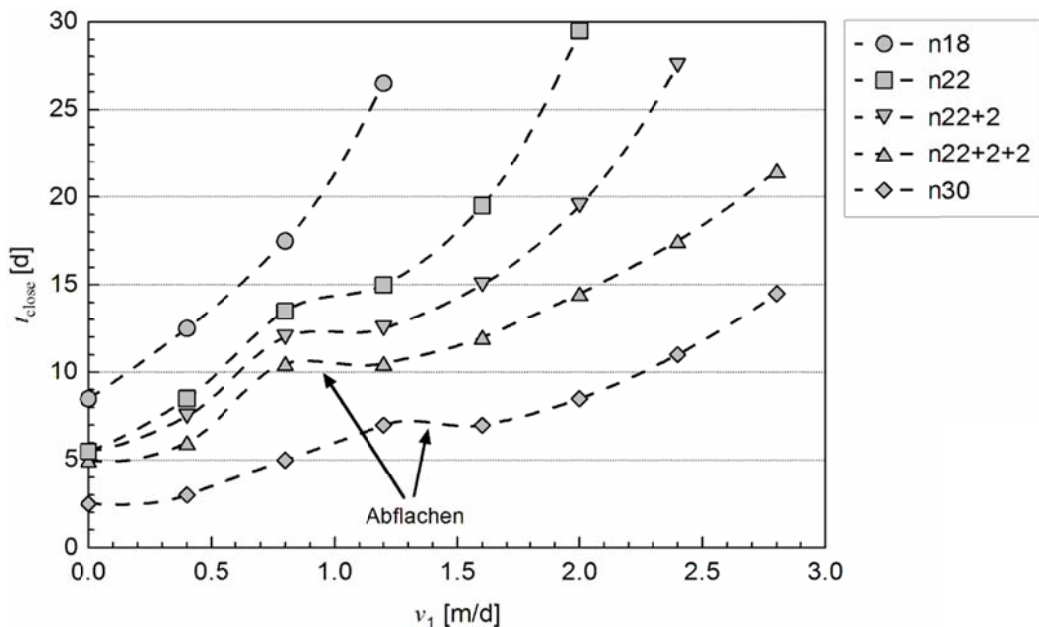


Abb. 45 Schliesszeiten des Tunnelquerschlags bei verschiedenen Sickergerwindigkeiten und Lanzenanordnungen

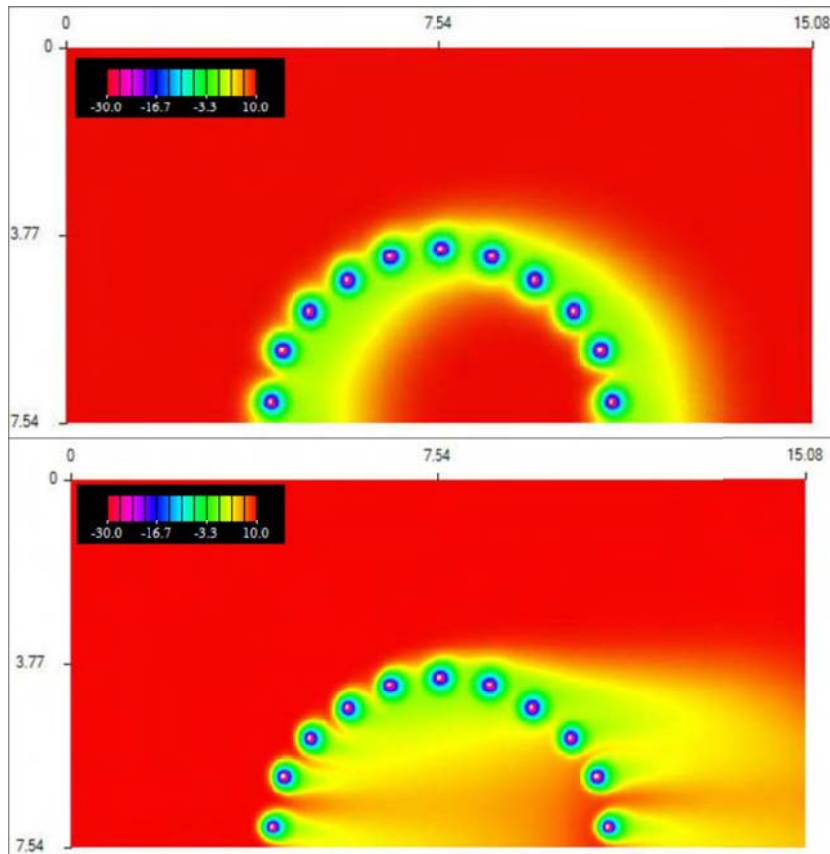


Abb. 46 Temperaturverteilung für die Lanzenanordnung n22 nach 4 Tagen Gefrierzeit und mit einer Sickergeschwindigkeit v_1 von 0.4 m/d (oben) und 1.2 m/d (unten)

7.4.3 Längsanströmung des Querschlags

Der Fall eines Querschlags mit einer Längsanströmung ist grundsätzlich als günstiger einzustufen als der Fall mit einer Queranströmung (Kapitel 7.4.2), was auf günstigere Strömungsverhältnisse infolge der Verhinderung bzw. Umleitung dieser Grundwasserströmung durch die Tunnelhaupttröhre auf der Luvseite zurückzuführen ist. Dadurch wird der Gefrierkörperwachstum insbesondere im Ulmenbereich des Querschlags begünstigt. Ferner findet keine Vorkühlung im Querschnitt, sondern nur in Längsrichtung statt. Aus diesen Gründen ist die Optimierung der Lanzenanordnung zweitrangig. Schwerpunkt der Untersuchungen zu diesem Fall war daher die Ortung von Problemzonen bei der Schliessung des Gefrierkörpers.

Simuliert wurde eine Gefriermassnahme entsprechend der Lanzenanordnung n22 mit gleicher Geometrie und gleichem Untergrund wie in Kapitel 7.4.2 beschrieben. Aufgrund der Sickerströmungsrichtung konnte nur eine Symmetrieebene für die Modellierung genutzt werden und zwar auf halber Höhe der Tunnelquerschnitte. D.h. es wurde ein 3D-Modell-Modell berücksichtigt, bei dem die Bereiche der Tunnelberandungen feiner diskretisiert wurden (Abb. 47). Der modellierte Bereich hatte Abmessungen von 25 m x 15 m x 8 m und wurde mit 828'371 Elementen diskretisiert. Für die Gefrierlanzen wurde eine lineare Temperaturverteilung entlang der Lanzen berücksichtigt. Die Temperaturen am Lanzenfuss bzw. am -kopf betragen -35 °C bzw. -30 °C . Um diesem Temperaturgradienten Rechnung zu tragen und den Vorkühleffekt in Längsrichtung besser auszunutzen, wurde der Lanzenfuss an der Tunnelhaupttröhre auf der Luvseite platziert. D.h. das wärmere anströmende Grundwasser trifft auf die kältere und das vorgekühlte Grundwasser auf die wärmere Stelle der Gefrierlanze. Es wurde eine gleichmässig verteilte Sickergeschwindigkeit von 0.8 m/d an der Luvseite des Modells angesetzt. In Abb. 48 werden der Gefrierkörper sowie ausgewählte Sickerlinien nach 10 Tagen Gefrierzeit dargestellt.

Deutlich zu erkennen sind die Fenster, d.h. Öffnungen im Gefrierkörper, lokalisiert im Firstbereich des Querschlages nahe den Tunnelhaupttröhen, Diese Fenster bilden sich durch die vorübergehende Umleitung der Sickerströmung im Querschlagsbereich und tragen zu einer verspäteten Schliessung des Gefrierkörpers bei. Die durch diese Umleitung entstandene Kältefahne ist in einem Schnitt in Querschlagsrichtung anhand der Temperaturverteilung sowie der Sickerlinien deutlich erkennbar (Abb. 49). Eine Möglichkeit die Gefrierzeit zu verkürzen, wäre die Installierung von zusätzlichen, kürzeren Gefrierlanzen in diesem Bereich. Es ist zu erwähnen, dass dieser Effekt zumindest für die betrachtete Sickergeschwindigkeit nicht kritisch ist, da ein weiteres Gefrieren um weitere 10 Tage zu einem weitgehend starken Gefrierkörper führt (Abb. 50).

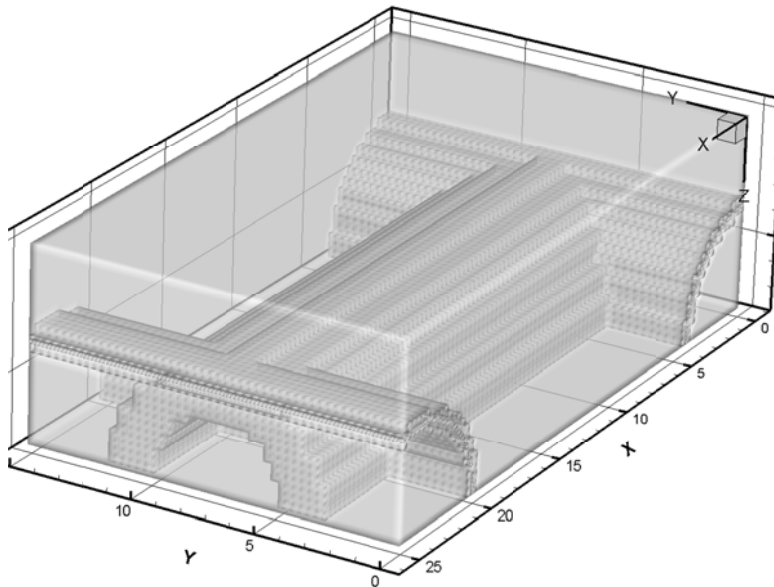


Abb. 47 Querschlag mit Längsanströmung – Modellabmessungen und Bereiche mit höherer Dichte von Elementen

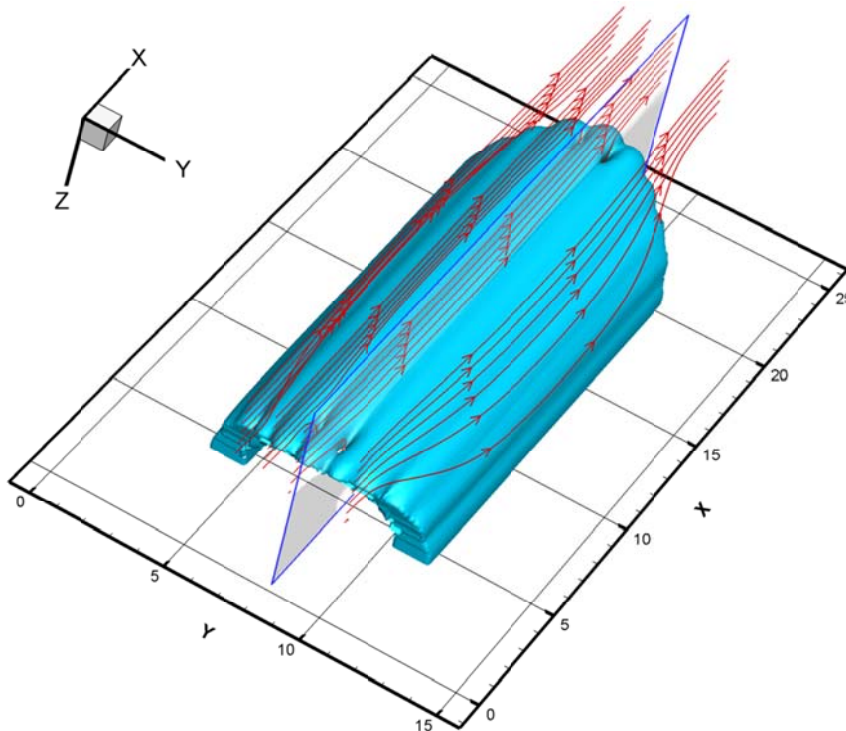


Abb. 48 Gefrierkörper (Isofläche mit $T = 0\text{ °C}$) und ausgewählte Sickerlinien nach 10 Tagen Gefrierzeit

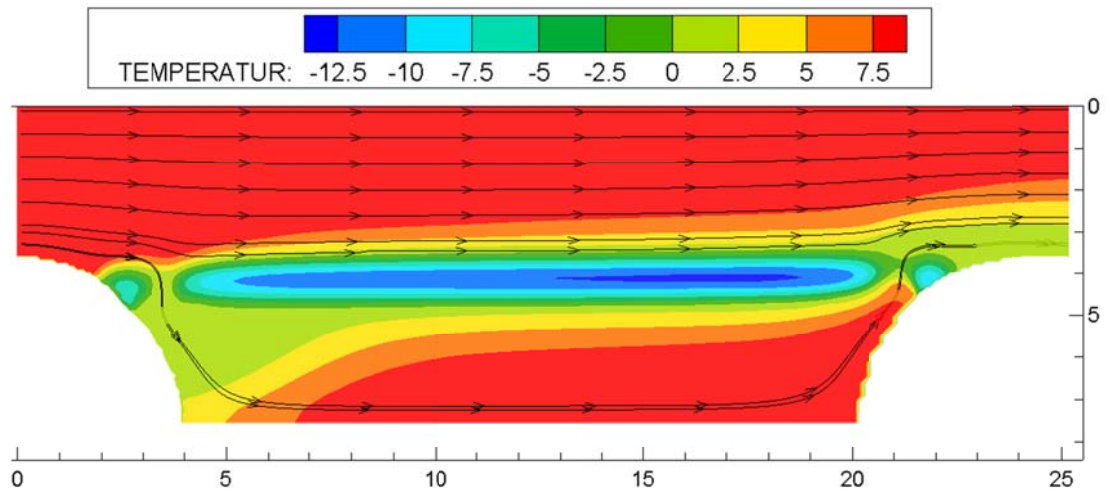


Abb. 49 Temperaturverteilung und Sickerlinien entlang eines Längsschnittes ($Y = 8$ m, in Abb. 48) nach einer Aufgefrierzeit von 10 Tagen

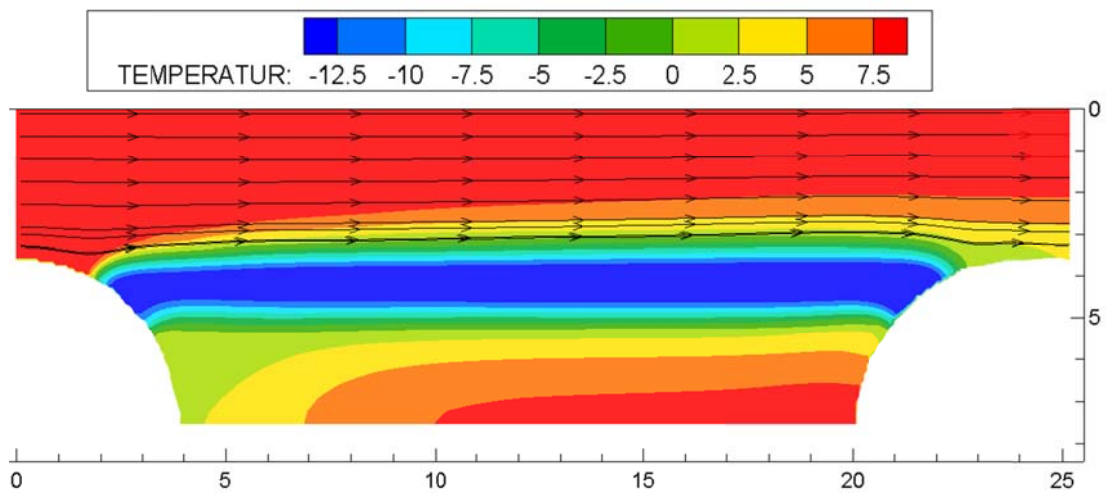


Abb. 50 Temperaturverteilung und Sickerlinien entlang eines Längsschnittes ($Y = 8$ m, in Abb. 48) nach einer Aufgefrierzeit von 20 Tagen

8 Modellierung von ausgeführten Tunnelprojekten

8.1 U-Bahn Fürth – Durchquerung des Rednitztales

8.1.1 Projektbeschreibung

Im Zuge der Erweiterung der U-Bahnlinie 1 der Stadt Fürth (Bayern, Deutschland) wurde die Station Klinikum mit der Station Stadthalle mittels zwei eingleisiger Tunnel verbunden (Bayer 2002). Die Gesamtlänge dieses Bauabschnittes beträgt 1.3 km. Das Projekt sah einen Vortrieb in nur einer Richtung vor, und zwar von Osten nach Westen (Abb. 51). Der erste Teil dieser Verbindung wurde in offener Bauweise ausgeführt und endete vor dem Rednitztal in Form einer Startkaverne. Die Durchquerung dieses Tales über eine Länge von etwa 56 m stellte als Besonderheit die Unterquerung einer setzungsempfindlichen und denkmalgeschützten Häuserzeile dar (Abb. 51). Der Untergrund in diesem Abschnitt besteht aus sandigen Ablagerungen aus dem Quartär, gefolgt von einem verwitterten Gesteinshorizont, die auf dem kompetenten unverwitterten Sandstein des Mittleren Keupers liegen. Am westlichen Rand des Tales steigt diese Formation steil an (Abb. 52). Das Grundwasser steht in der Talauwe knapp unterhalb der GOK. Bei Hochwasser war daher mit einer Überflutung des Geländes zu rechnen. Das Grundwasser fließt im Untergrund etwa talabwärts, d.h. senkrecht zur U-Bahnlinie und zwar mit einer Sickergeschwindigkeit von 1.25 m/d. Die Grundwassertemperatur wurde vor Projektbeginn gemessen und entsprach der prognostizierten mittleren Temperatur von 12.9 °C.



Abb. 51 Lageplan der Erweiterung der U-Bahnlinie 1 der Stadt Fürth (Quelle des Satellitenbildes: Google Earth)

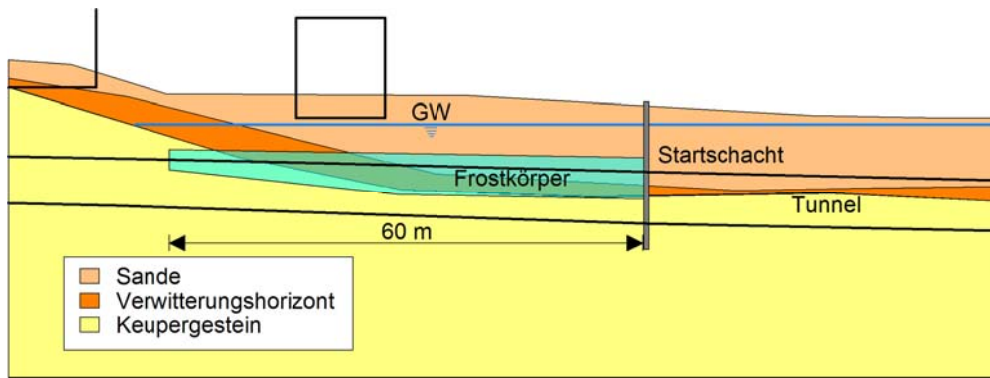


Abb. 52 Längsschnitt Vereisungsstrecke (Bayer 2002)

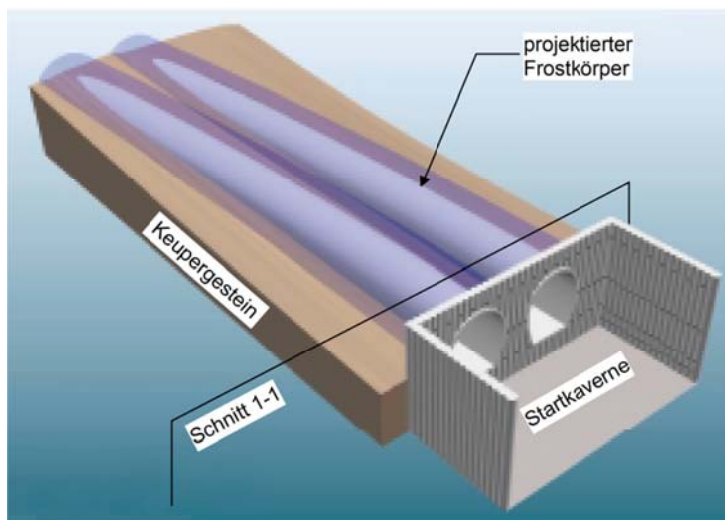


Abb. 53 Projektierter Gefrierkörper in der Perspektive (Bayer 2002)

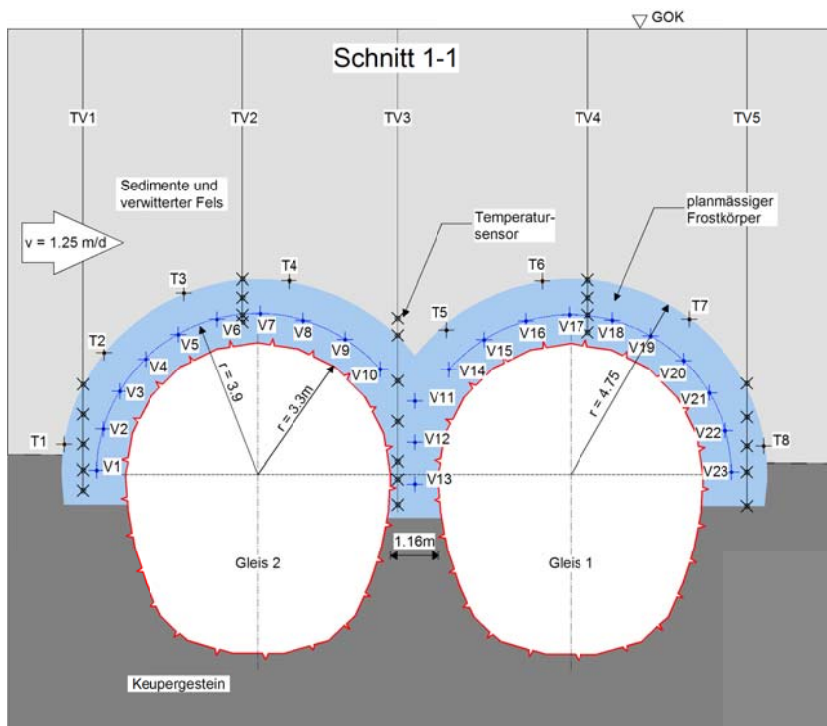


Abb. 54 Querschnitt der Gefriermassnahme (Lage siehe Abb. 53)

Auf Grund der o.g. Anforderungen bezüglich zulässigen Setzungen und der hydrogeologischen Gegebenheiten wurden Bauhilfsmassnahmen vor den Vortrieb der beiden einleisigen Röhren im Lockergesteinsbereich, d.h. bis zum Erreichen des kompetenten Felsens, als erforderlich erachtet. Hierfür wurde eine Sole-Bodenvereisung über die Gesamtlänge von 60 m gewählt und ausgeführt. Sie war als statisch tragfähige und wasserdichte «Kappen» über dem Ausbruchquerschnitt der beiden Tunnelröhren mit einer Mindeststärke von 1.5 m und mit einer Mindesteinbindung in den festen Keuper von 1.0 m konzipiert (Abb. 53). Daraus ergibt sich die Form eines halben Brillenprofils des Gefrierkörpers im Querschnitt (Abb. 54).

Die Herstellung des Gefrierkörpers sollte in einem Schritt aus der Startkaverne erfolgen, wodurch sich Längen der Gefrierlanzen bis zur sicheren Einbindung in den festen Keuper von bis zu 56 m ergaben. Die projektierte Tunneltrasse verläuft als Raumkurve mit einer leichten vertikalen und horizontalen Krümmung (Abb. 53). Damit die Eiskappen auch diese Form annehmen, mussten die Bohrungen für die Gefrierlanzen parallel zur gekrümmten Tunneltrasse verlaufen. Weiterhin sollte die Abweichung jeder Bohrung 25 cm nicht überschreiten, d.h. die Istlage jedes Punktes entlang jeder Bohrung sollte sich innerhalb eines Kreises um die Solllage mit 25 cm Radius befinden. Um diese Anforderungen zu gewähren, wurden alle Bohrungen als gesteuerte Sacklochbohrungen mittels Horizontal-spülbohr-verfahren und mit einem Bohrdurchmesser von 5“ hergestellt. Zwecks Bestimmung der Istlage wurden alle Bohrungen nach deren Fertigstellung mittels Kreiselkompass vermessen. Da bei allen Bohrungen die Toleranzen eingehalten wurden, waren Ersatzbohrungen nicht erforderlich. Nach Fertigstellung der Bohrung wurden die Bohrstanzen unter Einpressung einer Stützflüssigkeit rückgebaut. Danach wurden die Gefrierrohre mit 3.5“ Aussendurchmesser durch die Preventer in die gefüllte Bohrung eingeschoben. Schliesslich wurde die Gefrierlanze durch die Einführung eines PE-Fallrohres und die Montage des Gefrierlanzenkopfes anschlussfertig ausgebaut.

Die thermische Dimensionierung der Gefriermassnahme ergab, dass 23 Gefrierlanzen (V1 bis V23 in Abb. 54) gleichmässig verteilt mit einem Abstand von etwa 1.0 m erforderlich waren. Zwecks Überwachung des Gefrierkörperwachstums wurden parallel zu den Gefrierbohrungen acht horizontale Messbohrungen abgeteuft, die am äusseren Rand des theoretischen Gefrierkörpers verteilt wurden (T1 bis T8 in Abb. 54). Anschliessend wurden sie alle 5 m mit Temperatursensoren bestückt. Zusätzlich und zur Kontrolle der Temperaturverteilung im Frostkörper wurden auch fünf vertikale Messbohrungen (TV1 bis TV5 in Abb. 54) in drei Querschnitte abgeteuft und instrumentalisiert. Die Gefrierlanzen wurden an zwei Kälteaggregate mit einer Kälteleistung von je 465 kW bei -40 °C angeschlossen. Als Kältemittel kam eine Kalziumlauge (30%) zum Einsatz.

8.1.2 Modellierung

Die Modellerstellung zwecks Nachrechnung der durchgeführten Vereisungsmassnahme basiert auf folgende Unterlagen:

- U-Bahn Fürth, *Bereich*: Strecke BF. Klinikum – BF. Stadthalle, *Grundriss mit Istlage der horizontalen und vertikalen Gefrier- und Temperaturmessrohre*, (1:100) (2001)
- U-Bahn Fürth, *Bereich*: Strecke BF. Klinikum – BF. Stadthalle, *Schnitte 1-1 bis 13-13, Istlage der Gefrier- und Temperaturmessrohre, Querschnitte* (1:100) (2001)
- Vollständiger Datensatz an Messwerten aller Temperatursensoren und das Gefrierprogramm aus dem Archiv von Max Bögl Bauservice (2002)
- Veröffentlichte Berichte zum Bau des U-Bahn Bauabschnittes 3.1.1 (2001-2002)
- U-Bahn Fürth, *Bereich*: Strecke BF. Klinikum – BF. Stadthalle, *Grundriss mit Solllage der horizontalen und vertikalen Gefrier- und Temperaturmessrohre*, (1:100) (2001)
- U-Bahn Fürth, *Bereich*: Strecke BF. Klinikum – BF. Stadthalle, *Schnitte 1-1 bis 13-13, Solllage der Gefrier- und Temperaturmessrohre, Querschnitte* (1:100) (2001)
- U-Bahn Fürth, *Bereich*: Strecke BF. Klinikum – BF. Stadthalle, *Schnitte 14-14 und 15-15, Solllage der Gefrier- und Temperaturmessrohre, Längsschnitte* (1:100) (2001)
- Auszüge aus Berechnungen und Berichten zur thermischen Dimensionierung der Gefriermassnahme von Dr.-Ing. Orth GmbH (2000)

Die Stratigrafie wurde vereinfacht als aus zwei Schichten bestehend modelliert, und zwar als Fels (Keupergestein) und Lockergestein (Sedimente und verwitterter Fels). Die genaue Lage des Überganges zwischen beiden Schichten sowie die Materialkennwerte betreffend des Trockenraumgewichtes γ_d , der Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen und des gefrorenen Bodens λ_2 bzw. λ_1 und der volumetrischen Wärmekapazität des ungefrorenen und des gefrorenen Bodens C_2 bzw. C_1 wurden aus den Projektunterlagen übernommen. Die Permeabilität k_f wurde geschätzt. Die Parameter zur Beschreibung des ungefrorenen Wassergehaltes α und β (Gl. 2) für das Lockergestein entsprechen dem eines siltigen Sandes (Jessberger & Jagow-Klaff, 2001). Die Materialkennwerte werden in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12 – Materialkennwerte U-Bahn Fürth

Material	γ_d [kN/m ³]	k_f [m/s]	λ_2 [W/mK]	λ_1 [W/mK]	C_2 [MJ/m ³ K]	C_1 [MJ/m ³ K]	α [%]	β [-]
Lockergestein	17	10^{-4}	2.20	3.40	2.78	2.03	1.5	-0.7
Fels	20	10^{-14}	2.00	2.16	2.4	1.95	-	-

Die Modellierung der Gefriermassnahme erfolgte in 3D mit Abmessungen H x L x B von 14.5 m x 62.6 m x 26.8 m und wurde mit 1'746'927 Elementen und 2'164'537 Knoten diskretisiert (Abb. 55). Die Lage der Gefrierlanzen entsprach der Istlage aus den Projektunterlagen. Die Lanzen wurden als einzelne kubische Elemente abgebildet, wobei die Modellmantelfläche der Prototyplanze entsprach, d.h. die Abmessungen der kleinsten Elemente waren durch den Lanzendurchmesser vorgegeben. Der sich innerhalb der Modellabmessungen befindliche Teil der Startbaugrube wurde ins Modell aufgenommen, um seinem Einfluss auf den Grundwasserstrom Rechnung zu tragen. Der Einfluss der Einbauten von den sich über der Projektachse befindenden Gebäuden ist vernachlässigbar. Daher endet das Modell in der Höhe unterhalb dieser Einbauten. Der allfällige Einfluss der Anker der Anschlagwand wurde nicht berücksichtigt.

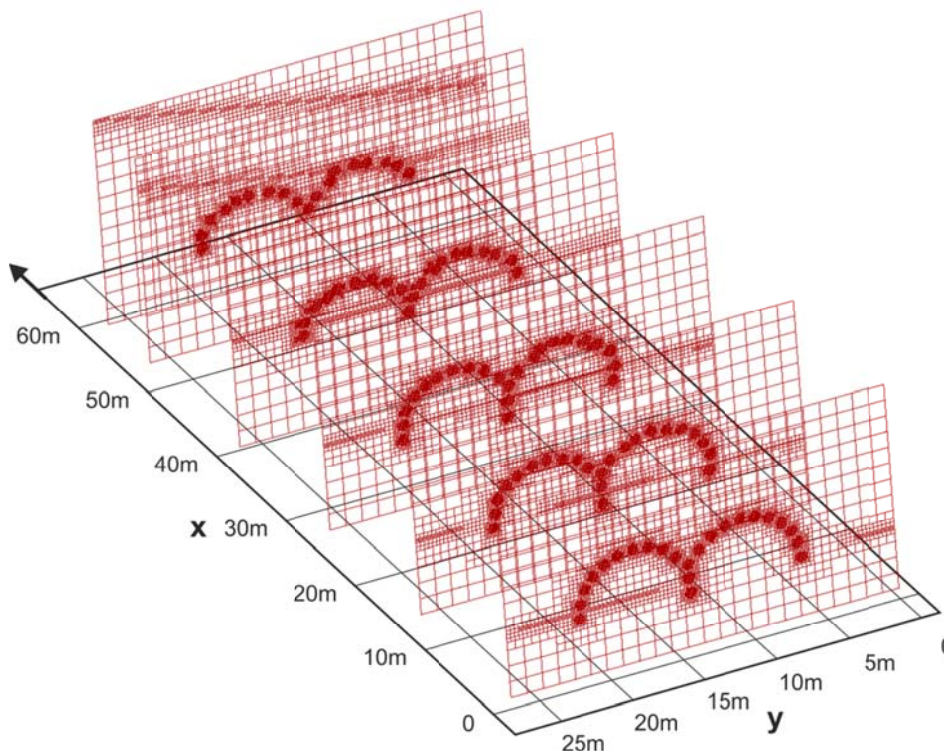


Abb. 55 Numerisches Modell: FE-Netz an sechs Querschnitten

Als thermische Randbedingungen wurden für die anströmende Seite des Modells eine konstante Temperatur von 12.9 °C entsprechend der Grundwasser- und Bodentemperatur vor Beginn der Gefriermassnahme angenommen. Die restlichen Modellseiten wurden adiabatisch betrachtet. Für eine erste Simulation wurde vereinfachend die Temperatur aller Gefrierlanzen über ihre Gesamtlänge über die ganze Dauer als konstant zu -30 °C angenommen. Die Ergebnisse ergaben aufgrund der zu konservativen Annahme eine zu lange erforderliche Gefrierzeit bis zum Schliessen des Gefrierkörpers (Pimentel et al. 2009). Um realistischere Simulationsergebnisse zu erzielen wurde in einer zweiten Simulation die tatsächlich gemessene Soletemperatur (Abb. 56) folgendermassen berücksichtigt: Für jeden Zeitschritt wurde am Fuss und am Kopf aller Gefrierlanzen die für diesen Zeitpunkt gemessene Vor- bzw. Rücklaufftemperatur eingesetzt. Für die Zuweisung der Temperatur an den restlichen Gefrierlanzenlemente wurde eine lineare Temperaturverteilung entlang der Gefrierlanze angenommen. Aus der Vorgabe einer Grundwasserströmung von 1.25 m/Tag und der Durchlässigkeit des Baugrundes ergibt sich die anzusetzende Potentialdifferenz.

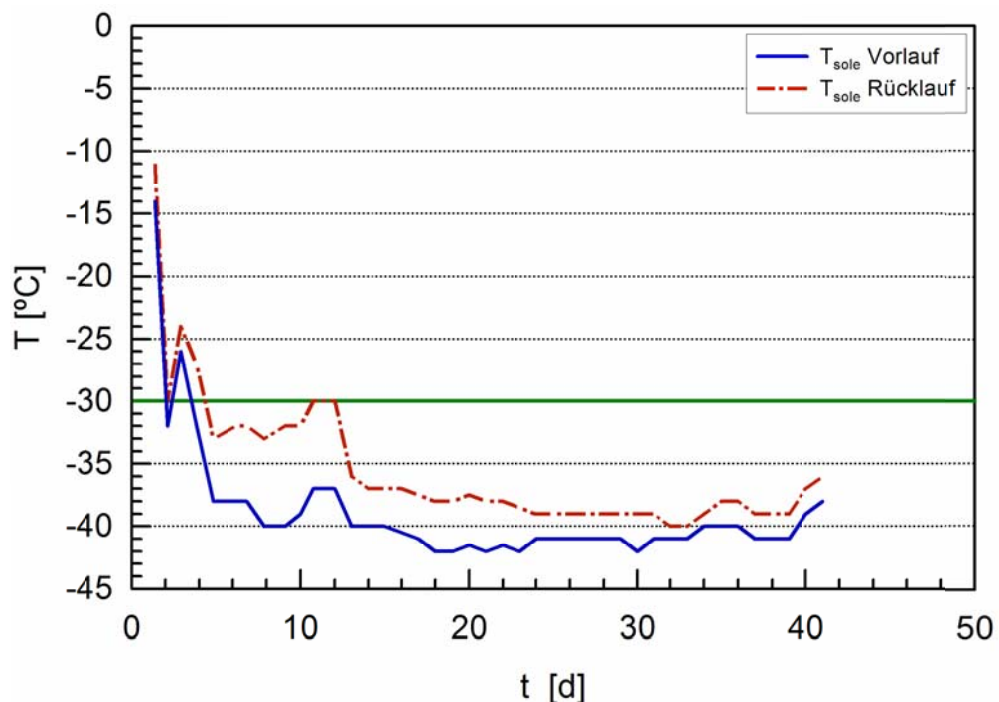


Abb. 56 Gemessene Vor- und Rücklaufftemperaturen der Sole über die Gefrierzeit

8.1.3 Simulation und Auswertung

Die Berechnungen wurden mit Zeitschritten zu 3600 s durchgeführt. Nach jedem Tag Simulationszeit wurden die Ergebnisse zwecks Auswertung gespeichert. Modelliert wurde ein Zeitraum von 40 Tagen. In Abb. 57 wird die gemessene Zeitentwicklung entlang der Temperaturmesskette T5 (Abb. 54) mit den Simulationsergebnissen verglichen und zwar für die Simulation der Gefrierlanzen mit einer konstanten ($T_{pipe} = -30$ °C) bzw. variablen Temperatur (Abb. 56) der Gefrierlanzen. Im ersten Fall (Abb. 57 a) ist die Übereinstimmung zwischen berechneter und gemessener Temperatur während der ersten Gefrierwoche weitestgehend gut. Diese Übereinstimmung verschlechtert sich mit zunehmender Zeit und zwar zeigen die gemessenen Temperaturwerte einen stärkeren Temperaturabfall als die Simulationsergebnisse. Diese Tendenz spiegelt sich wieder in der um mehr als zehn Tage längeren Gefrierzeit bis zum Schliessen des Gefrierkörpers. Die Simulationsergebnisse mit variabler Temperatur der Gefrierlanzen (Abb. 57 b) zeigen in der ersten Woche bis zum Erreichen der Gefriertemperatur eine sehr gute Übereinstimmung. Während des Gefrierens ist eine Zeitverzögerung zwischen Simulation und Messung in der Grössenordnung von etwa fünf Tagen zu beobachten. Nach dem Unterschreiten der Gefriertemperatur zeigen beide Werte der Sensoren einen etwa parallelen zeitlichen Verlauf, d.h. eine ähnliche Temperaturänderungsrate, was für eine realitätsnahe Simulation spricht. Mögliche Ursachen für die moderate Abweichung zwischen Simulation und Mes-

sung könnten sein: Leichte Überschätzung der Grundwassergeschwindigkeit, die Annahme einer konstanten Temperatur des Baugrundes vor Beginn der Gefriermaßnahme von 12.9 °C (die Sensoren 45.45 m und 55.32 in Abb. 57 zeigen eine Anfangstemperatur von 10 °C), keine Unterscheidung zwischen der Sedimentschicht und dem verwitterten Gestein, leichte Unterschätzung der Wärmeleitfähigkeit des gefrorenem Bodens und leichte Überschätzung der Porenzahl und damit des Wassergehaltes, d.h. der latenten Wärme.

Nachfolgend werden nur die Ergebnisse der Simulation für variable Temperatur der Gefrierlanzen präsentiert. In Abb. 58 wird die prognostizierte Ausbreitung des Gefrierkörpers (Isotherme 0 °C) sowie die Temperaturverteilung in fünf Querschnitten nach 7, 13 und 28 Tagen Gefrierzeit dargestellt. Wegen des nicht horizontalen Verlaufs der Kontaktfläche zwischen Fels und Lockergestein (angedeutet in Abb. 55) wächst der Gefrierkörper im Fussbereich der Gefrierlanzen schneller als in den Bereichen mit einer mächtigeren Lockergesteinsschicht. Die berechnete Gefrierzeit zum Schliessen des Frostkörpers von vier Wochen stimmt gut überein mit der in-situ gemessenen Zeit von weniger als ein Monat. Zum Vergleich ergaben die Simulationen mit der vereinfachten Annahme einer konstanten Temperatur der Gefrierlanzen (Kap. 8.1.2) eine Gefrierzeit von mehr als fünf Wochen.

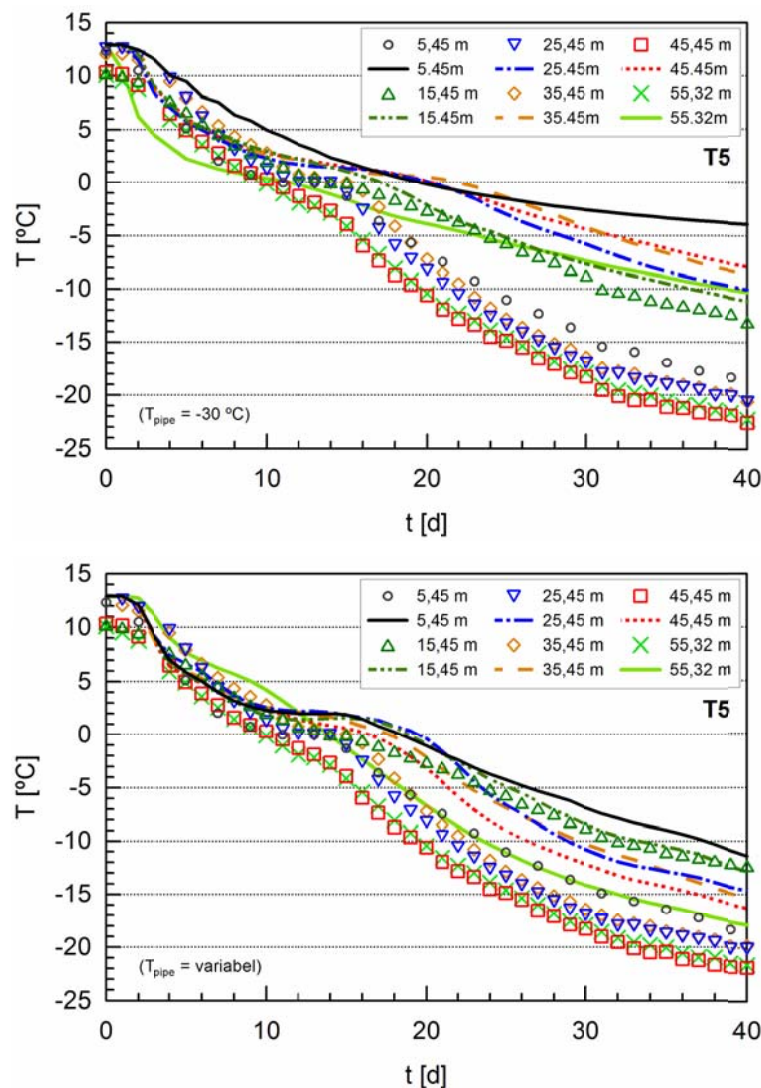


Abb. 57 Temperaturmesskette T5 (Abb. 54): Messungen (Symbole) und Simulationsergebnisse entlang der Messkette für die Simulationen a) mit einer konstanten ($T_{\text{pipe}} = -30 \text{ °C}$) und b) mit variabler Temperatur der Gefrierlanzen (Abb. 56). Die Lage der Sensoren bezieht sich auf ihrer Tiefe ab der Startkaverne (Abb. 53)

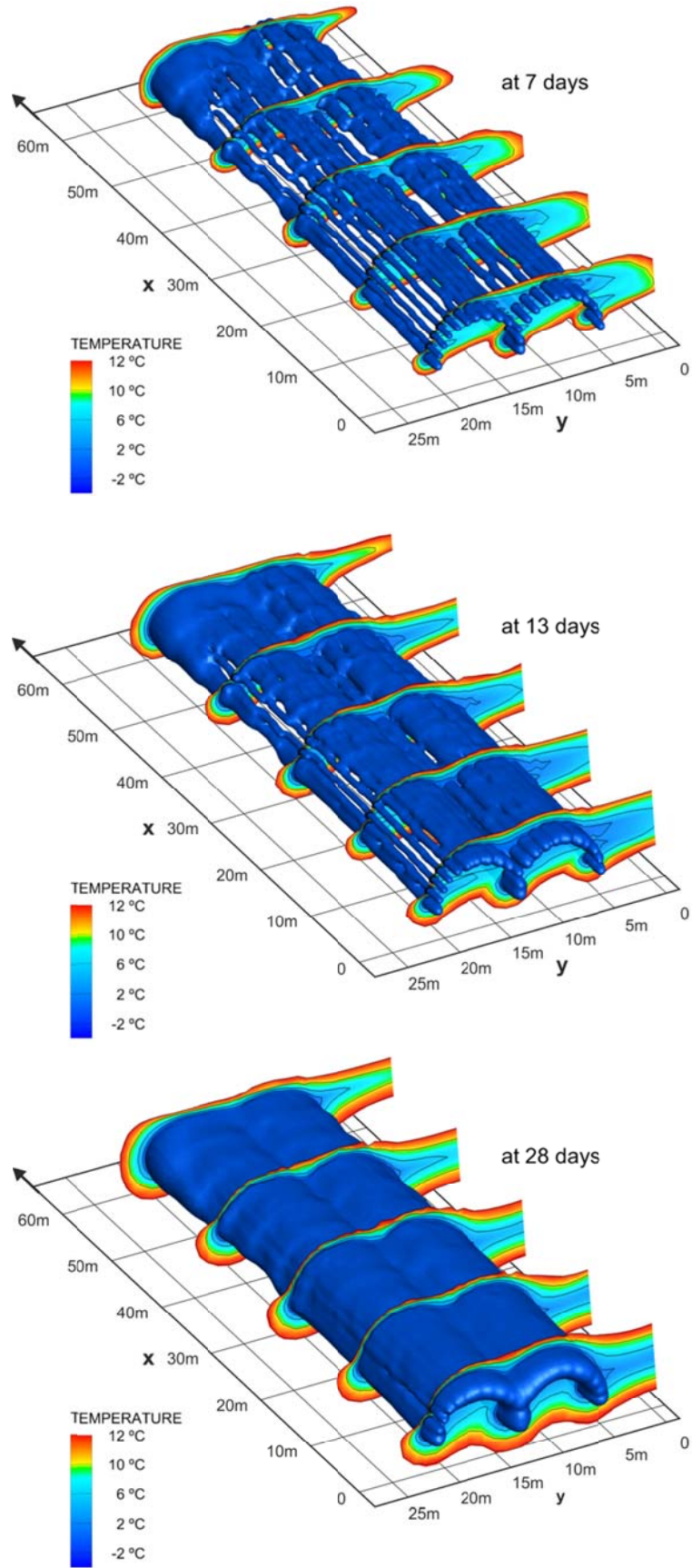


Abb. 58 Simulationsergebnisse nach 7, 13 und 28 Tagen Gefrierzeit: Aussenkontur des Gefrierkörpers (Isotherme 0 °C) und Temperaturverteilung als Isothermen entlang von fünf Querschnitten

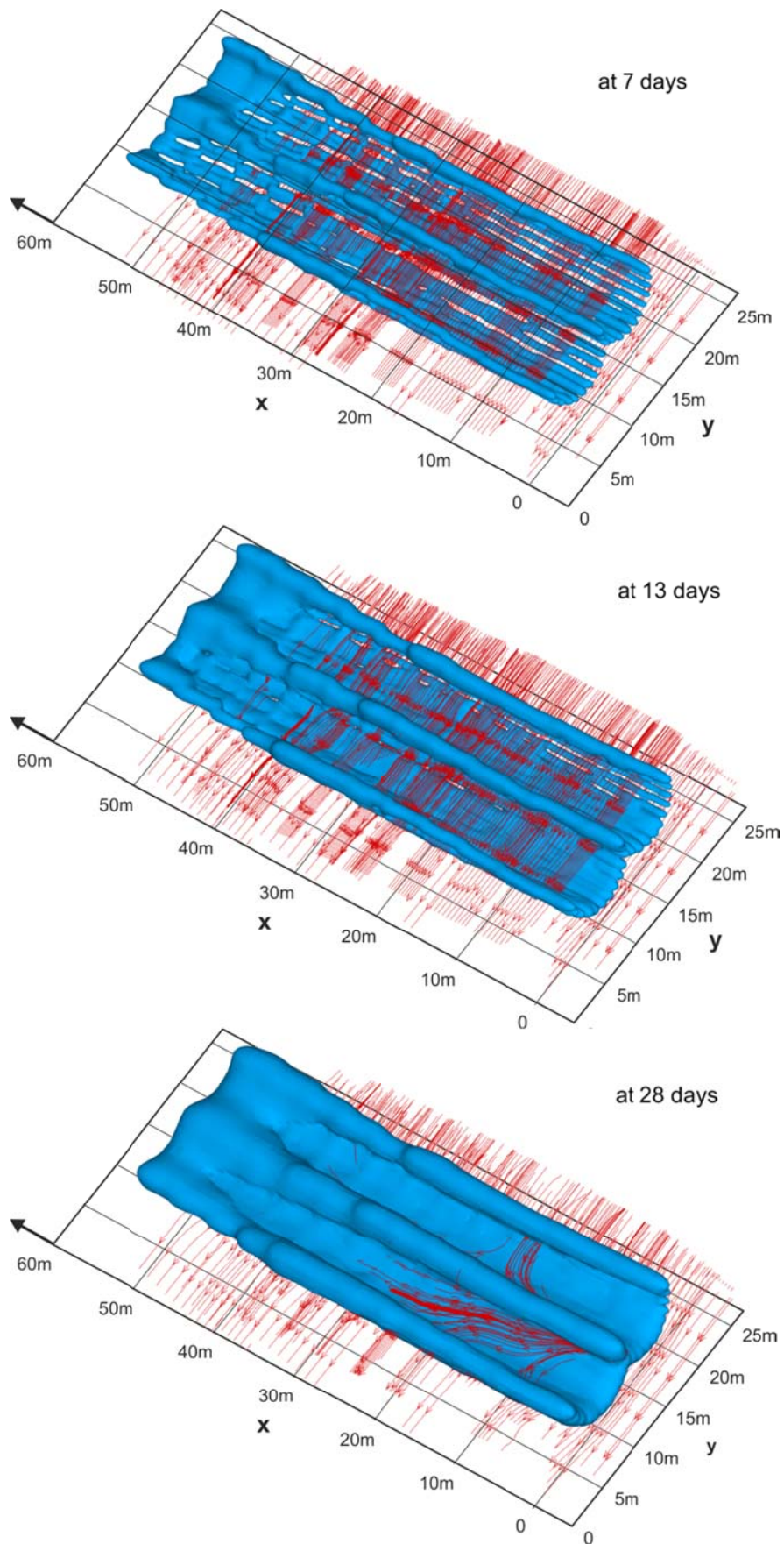


Abb. 59 Simulationsergebnisse nach 7, 13 und 28 Tagen Gefrierzeit (Ansicht von unten): Aussenkontur des Gefrierkörpers (Isotherme 0 °C) und ausgewählte Sickerlinien

Abb. 59 zeigt eine Ansicht der prognostizierten Ausbreitung des Gefrierkörpers (Isotherme 0 °C) von unten sowie ausgewählter Sickerlinien. Diese werden mit Hilfe des «particle tracking» Verfahren auf der Basis der in den Simulationen ermittelten Sickergeschwindigkeiten netzunabhängig gerechnet, und zwar für massenlose Partikel, die z.B. gleichmäßig verteilt sind entlang einer vertikalen Linie. Hierbei wird durch Integration der Verlauf der Strömungslinie schrittweise ermittelt. Die Anzahl der zu integrierenden Schritte steuert demnach die relative Reichweite der entsprechenden Sickerlinien und stellt somit ein Mass dar für ihre mittlere Geschwindigkeit. Die Sickerlinien verlaufen während der ersten Wochen des Gefriervorganges parallel zu einer Ebene senkrecht zur Tunnelachse entweder um die Aussenkontur des sich bildenden Gefrierkörpers oder durch die noch offenen verbliebenen länglichen Schlitze im Paramentbereich, d.h. sie um- oder durchströmen den Gefrierkörper. In den letzten Tagen vor dem Schliessen des Gefrierkörpers findet die Durchströmung des Gefrierkörpers durch die wesentlich kürzer gewordenen Schlitze statt. Ihre Richtung ändert sich stark, d.h. sie verlaufen nicht mehr parallel zur o.g. Ebene (3-D Effekt) und ihre Trajektorien verlängern sich. Einige von diesen erreichen das andere Modellende in der vorgegebenen Integrationszeit nicht, was auf eine relativ langsame Strömung hinweist. Es ist zu erwähnen, dass ein Schliessen des Gefrierkörpers zwischen dem 28. und 29. Tag Gefrierzeit verzeichnet werden konnte.

8.1.4 Schlussfolgerungen

Die Rechenergebnisse zeigen, dass eine realistische Simulation einer anspruchsvollen Gefriermassnahme mit dem dreidimensionalen thermo-hydraulisch gekoppelten numerischen Modell möglich ist. Es muss hervorgehoben werden, dass für diese Simulationen keine Kalibrierung oder Modellanpassung jeglicher Art durchgeführt wurde. Die Simulationsergebnisse konnten durch die realitätsnahe Berücksichtigung der Temperatur der Gefrierlanzen, d.h. die Berücksichtigung eines Temperaturgradienten entlang der Gefrierlanzen sowie einer zeitabhängigen Soletemperatur, deutlich verbessert werden.

8.2 U-Bahn Neapel – U-Bahnstation Università

8.2.1 Projektbeschreibung

Die Erweiterung der U-Bahnlinie 1 der Stadt Neapel verbindet die Piazza Dante mit dem Centro Direzionale und umfasst die U-Bahnstationen Toledo, Municipio, Università, Duomo und Garibaldi (Abb. 60). Der Untergrund Neapels besteht im Wesentlichen aus Auffüllungen und lockere Ablagerungen von Sedimenten vulkanischen Ursprungs. Darunter befinden sich vulkanische Sedimentgesteine, die verhältnismässig gute mechanische Eigenschaften aufweisen. Da die U-Bahnlinie unter dicht bebautem Gebiet verläuft und um das Setzungsrisiko zu minimieren, soll die vertikale Trasse hauptsächlich in dem vulkanischen Gestein verlaufen. Sie wurde entsprechend tief verlegt, d.h. etwa 45 m unterhalb der Geländeoberkante (GOK). Der Bauablauf sah die Auffahrung der Tunnels mittels Erddruckschild-Tunnelbohrmaschinen nach der Erstellung der oben genannten U-Bahn Stationen vor. Jede Station besteht aus einem rechteckigen Zentralschacht, vier Bahnsteigtunnels mit je einer Länge von 48 m und vier Rolltreppenstollen, welche die Perrons mit dem Stockwerk oberhalb der Gleise verbinden (Abb. 61).

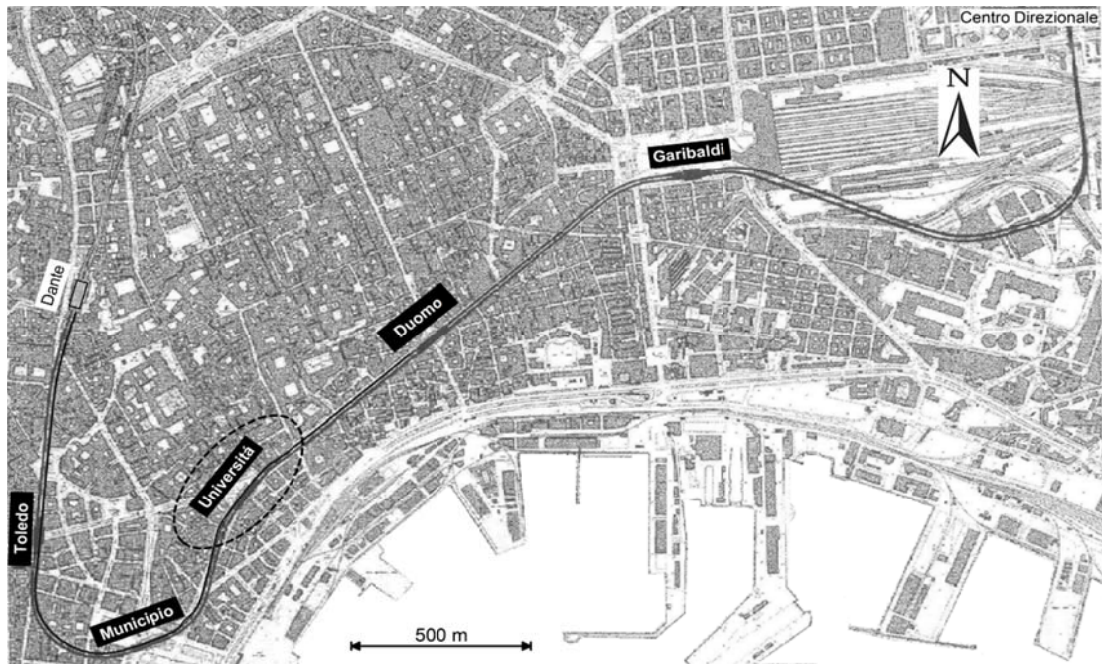


Abb. 60 Lageplan der Erweiterung der U-Bahnlinie 1 der Stadt Neapel (Colombo et al. 2008)

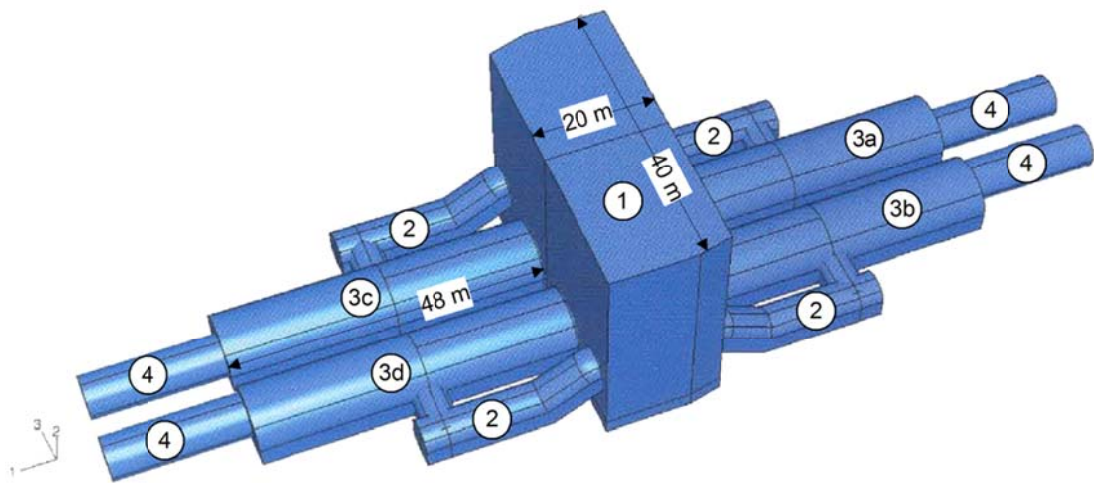


Abb. 61 Schematische Darstellung der Standard U-Bahnstationen: Zentralschacht (1), Rollstapfen (2), Bahnsteigtunnel (3a bis 3d) und U-Bahntunnel (4) (Colombo et al. 2008)

Die Tunneltrasse verläuft relativ nahe an der Küstenlinie (Abb. 60). Die Gesteinsschichten weisen zwar eine geringe Permeabilität auf, sind aber durch vertikale Klüfte durchzogen. Aufgrund der Nähe zum Meer, wirkt dieses als Vorfluter, so dass der Grundwasserspiegel im Projektbereich bis nahe an die GOK reicht. Daher ist bei den aufzufahrenden Tunnels mit beachtlichen Porenwasserdrücken zu rechnen, allerdings nicht mit einer Grundwasserströmung. Die Herstellung der Zentralschächte erfolgt als offene rückverankerte Baugrube. Aus jedem Schacht werden anschliessend die jeweiligen Bahnsteigtunnels aufgeföhren (Abb. 61). Aufgrund der oben genannten Porenwasserdrücke war zuvor die Abdichtung des Gebirges mittels einer Bauhilfsmassnahme notwendig. Die flächendeckende Verpressung des Untergrundes konnte aufgrund der geringen primären Permeabilität in Verbindung mit den wesentlich durchlässigeren und ungleichmässig verteil-

ten Vertikalklüften nicht gewährleistet werden. Daher kam das Gefrierverfahren für diesen Zweck zum Einsatz.

Die vorliegenden Untersuchungen beziehen sich ausschliesslich auf den Bahnsteigtunnel 3a der U-Bahnstation Università (Abb. 61). Mit den für dieses Projekt durchgeführten rechnerischen Untersuchungen sollte überprüft werden, ob sich das numerische Simulationsmodell zur Eichung der thermischen Eigenschaften eignet und den Gefriervorgang bei einem stark ungleichmässigen Zeitverlauf der Gefrierlanzentemperaturen abzubilden vermag.

8.2.2 Eigenschaften des Untergrundes

Der Baugrund besteht im untersuchten Bereich hauptsächlich aus dem gelben Tuff von Neapel und in den oberen Bereichen gelegentlich aus Puzzolanen. Beide Schichten sind vulkanischen Ursprungs und unterscheiden sich aufgrund ihrer mineralogischen Zusammensetzung bezüglich der thermischen Untersuchungen primär in ihrer Wärmeleitfähigkeit und bezüglich ihres mechanischen Verhaltens in ihrem Zementierungsgrad. Es ist anzumerken, dass keine Materialkennwerte in den vorhandenen Projektunterlagen enthalten waren, so dass diese entweder durch Kalibrierung (Kap. 8.2.5) oder durch Schätzung quantifiziert werden mussten.

Der Tuff ist ein weicher zementierter Vulkanit, der durch die Ablagerung und Abkühlung pyroklastischer Ströme entstanden ist. Diese stammen aus mehrphasigen Eruptionen während den letzten 12'000 Jahren in der Region von Neapel (De Gennaro & Langella 1996). Wesentlicher Bestandteil des Tuffes war ursprünglich vulkanisches Glas. Dieses verwitterte in Wechselwirkung mit alkalischem Wasser mit einer Temperatur zwischen 200 und 300 °C zu Zeolithe. Letztere weisen eine sehr niedrige Temperaturleitfähigkeit aus (Jakubinek et al. 2007, Murashov & White 2002). Sie wurde mit 0.12 W/mK für eine Bodentemperatur von 18 °C (Murashov & White 2002) gemessen. Der Grad der Umwandlung in Zeolithe ist in Neapel sehr ungleichmässig und variiert hauptsächlich zwischen 50 – 70 % (De Gennaro et al. 2005). Der Quarzgehalt des zeolithisch-zementierten Tuffs von Neapel ist gering (Shuaib 1954). Puzzolane sind lose Ablagerungen vorwiegend aus Asche und Bimsstein, wobei gelegentlich auch vulkanische Nebenprodukte anzutreffen sind. Quarz tritt selten in Puzzolanen vulkanischen Ursprungs auf. Daher wurde für die Puzzolane von Neapel kein Quarzgehalt angenommen. In Abwesenheit von Quarz weisen Puzzolane eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit auf. In Tabelle 13 werden die jeweiligen Materialkennwerte aufgelistet. Dabei wurden die thermischen Parameter gemäss Gl. 5 bis Gl. 9 berechnet. Die für den Tuff aufgelisteten Werte basieren auf eine geschätzte Zusammensetzung von 65% Zeolithe, 15% Quarz und 20% sonstigen Mineralien. Für die sonstigen Mineralien wurde eine Wärmeleitfähigkeit von 2.0 W/mK angenommen. Diese Zusammensetzung ergab die besten Ergebnisse der Kalibrierung mittels back-analysis (Kap 8.2.5). Die Durchlässigkeitswerte werden nur der Vollständigkeit halber angegeben, da hier keine Grundwasserströmung vorhanden ist. Die Parameter α und β beschreiben gemäss Gl. 2 den Gehalt an ungefrorenem Wasser im Baugrund. Die hier angegebenen Werte entsprechen denen eines siltigen Bodens.

Tabelle 13 – Materialkennwerte U-Bahn Neapel

Material	γ_d [kN/m ³]	k_f [m/s]	λ_2 [W/mK]	λ_1 [W/mK]	C_2 [MJ/m ³ K]	C_1 [MJ/m ³ K]	α [%]	β [-]
Tuff	12.0	10 ⁻⁵	0.492	1.106	1.74	3.23	0.03	-0.574
Puzzolane	11.5	10 ⁻⁶	0.273	0.578	1.63	3.02	0.03	-0.574

8.2.3 Gefriermassnahme

Als Kühlflüssigkeit für das Gefrierverfahren kamen sowohl flüssiger Stickstoff, als auch eine Sole zum Einsatz (Kap. 2), und zwar für die Schliess- und Wandwachstumsphase bzw. Haltephase (Kap. 2.5). Gemäss den Projektvorgaben sollte die Stärke des Gefrierkörpers (definiert als der Abstand zwischen den Isothermen -10 °C) 1 m betragen. Zu diesem Zweck wurden insgesamt 55 Gefrierlanzen mit einer Länge von 50 m und einem Aussendurchmesser von 76 mm parallel zum geplanten Tunnel installiert. Hierbei wurden 36 dieser Gefrierlanzen im Ulmen- und Firstbereich des Tunnels und die restlichen 19 Gefrierlanzen im Sohlbereich des Tunnels platziert (Abb. 62). Gemäss den Projektanforderungen sollte der Abstand zwischen Gefrierlanzen 0.75 m betragen und die zulässige Abweichungstoleranz 0.5 % nicht überschreiten, d.h. nach 50 m Länge sollte die absolute Abweichung der Lage der Gefrierlanzen kleiner sein als 0.25 m. Um diese Anforderungen zu gewährleisten, wurden die Bohrlöcher mit Hilfe des HDD Verfahren gesteuert (Kap. 2.4) abgeteuft. Nach dem Bohren wurden alle Bohrungen eingemessen. Trotz gesteuerten Bohrungen wurden Abweichungen von bis zu 1.2% festgestellt.

Die Überwachung des Gefrierkörperwachstums erfolgte mittels Temperatursensoren, die entlang von Messketten parallel zu den Gefrierlanzen in dafür eigens abgeteuft Bohrungen platziert wurden. Der Abstand zwischen den Temperatursensoren einer Messkette betrug 5 m. Elf dieser Messketten mit je einer Länge von 50 m wurden im Bereich um den geplanten Tunnel installiert. Sieben von ihnen waren im Ulmen- und Firstbereich und die restlichen vier im Sohlbereich angebracht. Entsprechend der Verteilung der Temperatursensoren in Richtung der Tunnelachse wurden die Messquerschnitte 1 am Gefrierlanzenfuss bis 11 am Gefrierlanzenkopf definiert (Abb. 63). Die Temperaturen wurden automatisch erfasst und alle 30 Minuten aufgezeichnet. Die Aufzeichnung der Temperaturdaten wurde von der Firma Trevi SA durchgeführt.

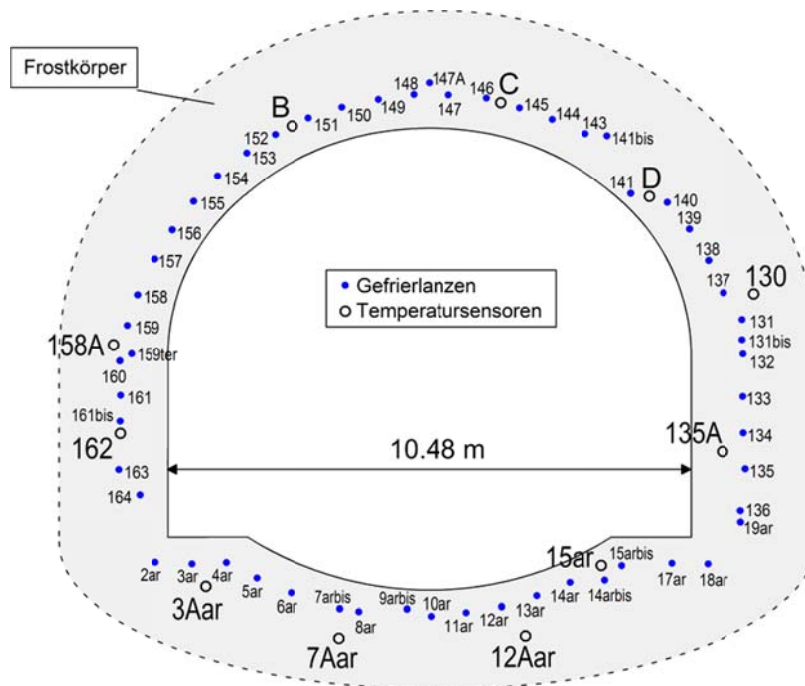


Abb. 62 Istdage der Gefrierlanzen und Temperatursensoren am Messquerschnitt 11 (Abb. 63)

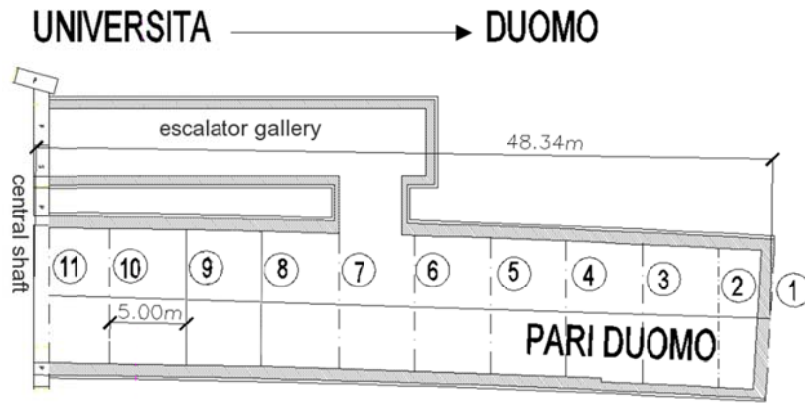


Abb. 63 Draufsicht des untersuchten Bahnsteigtunnels (3a in Abb. 61) mit eingetragenen Messquerschnitten

8.2.4 Numerisches Modell

Die Erstellung der Modelle basiert auf folgende Unterlagen:

- Generalübersicht der Temperaturmessungen. Napoli Toledo – Università Congelamento, Monitoraggio delle Temperature, Trevi S.p.A. – Rodio
- Querschnitte 1 bis 11 im Massstab 1:50 mit Eintragung der Istlage der Gefrierlanzen und der Temperatursonden. Stazione Università – Galleria di Stazione lato Duomo, Perforazioni per posa sonda congelatrici, Sezioni Transversali, Metropolitana Milanese S.p.A., 2007
- Temperaturaufzeichnungen Messkette B. Metropolitana di Napoli – Staz. Università, Congelamento Galleria Pari Duomo, Sonda Termometrica UD-B, Trevi S.p.A. – Rodio, 2007
- Aufzeichnungen der Messsondentemperatur und der Austrittstemperatur der Gefrierlanzen im Parament- und Firstbereich, Koordinaten der Istlage der Gefrierlanzen und Schichtgrenzenverlauf des Tuffgesteins. Trevi S.p.A. – Rodio, 2007

Aus den Projektunterlagen geht hervor, dass der räumliche Schichtenverlauf nicht ausreichend bekannt ist, um eine aufwändige 3D-Modell-Modellierung zu rechtfertigen. Es ist zu vermerken, dass die zwei zu betrachtenden Materialien, d.h. Tuff und Puzzolane sich erheblich in der Wärmeleitfähigkeit unterscheiden (Tabelle 13). Daher wurden nur 2D-Modell-Modelle untersucht und zwar an den Querschnitten, die sich eindeutig in einem homogenen Bereich befanden, d.h. entweder nur im Tuff (Querschnitte 11 und 8) oder nur in den Puzzolanen (Querschnitt 5) (Abb. 63). Der modellierte Bereich für jeden der untersuchten Querschnitte hat Abmessungen B x H von 18.1 m x 16.7 m und wurde mit etwa 1'362'000 finiten Elementen diskretisiert. Mangels Temperaturaufzeichnungen der Gefrierlanzen unterhalb der Tunnelsohle, wurde nur die Gefriermassnahme im Bereich oberhalb der der modelliert. Für alle Querschnitte wurde stets die Istlage der Gefrierlanzen berücksichtigt.

Eine allfällige Sickerströmung wurde vernachlässigt, d.h. es wurden rein thermische Berechnungen durchgeführt. Gemäss den Messungen vor Beginn der Gefriermassnahme betrug die Umgebungstemperatur des Untergrundes 16.1 °C. Da die Sensoren der Temperaturmesskette 135A eine niedrigere Temperatur von 8.3 °C aufwiesen, wurden die Querschnitte mit dieser Anfangstemperatur auch modelliert. Aufgrund ihrer Nähe zum Gefrierlanzenkopf wurden für die Modellierung des Querschnittes 11 die stündlich gemessenen Austrittstemperaturen der Gefrierlanzen als Lanzentemperatur direkt übernommen, und zwar als zeitlich veränderliche Randbedingung. Am Gefrierlanzenfuss wurde stets eine Eintrittstemperatur von -196 °C angesetzt. Für die Querschnitte dazwischen wurde die Temperatur der Gefrierlanzen durch lineare Interpolation zwischen der Ein- und der Austrittstemperatur unter Berücksichtigung der Lage des Querschnittes ermittelt. Als thermische Randbedingung für alle Modellseiten wurde kein Wärmestrom angesetzt, d.h. als adiabatisch betrachtet.

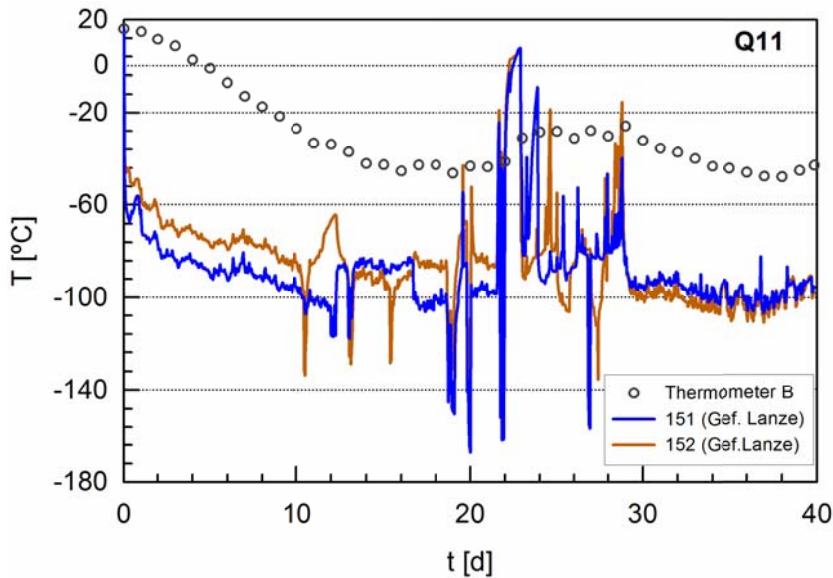


Abb. 64 Zeitlicher Verlauf der Austrittstemperatur der Gefrierlanzen 151 und 152 sowie der Temperatur des Sensors der Messkette B am Querschnitt 11

8.2.5 Simulation und Auswertung

Die rein thermischen Berechnungen wurden mit Zeitschritten zu 3600 s durchgeführt. Modelliert wurde ein Zeitraum von bis zu 40 Tage, d.h. bis zur Bildung eines durchgehend geschlossenen Gefrierkörpers. Für die nachfolgende Haltephase wurde auf Solegefrieren umgestellt. Mangels Temperaturaufzeichnungen konnte diese Phase nicht modelliert werden, d.h. die vorliegenden Berechnungen umfassen nur auf die Schliess- und Frostwandwachstumsphase.

a) Querschnitt 11

Die Interpretation der Temperaturaufzeichnungen basiert auf dem Vergleich mit den Simulationsergebnissen. Hierfür wurden die Messketten B, 135A und 158A, die im First-, rechten Parament- bzw. linken Paramentbereich platziert sind (Abb. 62). Um das Modell zu kalibrieren, wurden Simulationen mit einem moderaten Quarzgehalt von 15%, aber mit unterschiedlichem Zeolithgehalt von 50%, 60% und 65% des Untergrundes durchgeführt, d.h. mit entsprechend unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten. Der Extremfall eines nicht-zeolithisierten Tuffes, d.h. ohne Zeolithgehalt und mit einem relativ hohen Quarzgehalt von 30%, wurde ebenfalls simuliert. Dieser Fall, obwohl nicht realistisch, stellt einen oberen Grenzwert des Gefrierkörperwachstums dar. Für die Kalibrierung wurden die Messwerte des Sensors der Messkette B herangezogen. Nach der Kalibrierung wurden die oben genannten restlichen Sensoren ausgewertet.

Der gemessene Temperaturverlauf des Sensors der Messkette B sowie die an entsprechender Stelle für die vier oben genannten mineralogischen Zusammensetzungen des Untergrundes berechneten Temperaturverlaufs wird in Abb. 65 dargestellt. Die beste Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Temperaturwerten wird mit einem hohen Zeolithgehalt von 65% und einem moderaten Quarzgehalt von 15% erzielt. Die entsprechenden Materialkennwerte werden in Tabelle 13 (Tuff) aufgelistet. In der Umgebung des Sensors der Messkette B schloss sich der Gefrierkörper nach etwa 4 Tagen. Hier konnte eine Frostwandstärke von 1 m bereits nach 11 Tagen erreicht werden.

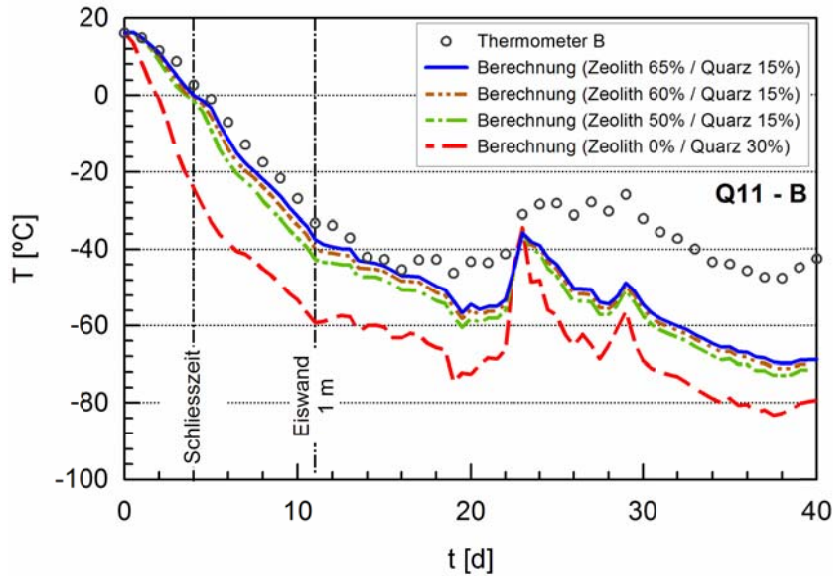


Abb. 65 Querschnitt 11, gemessener und berechneter Temperaturverlauf am Sensor der Messkette B mit unterschiedlichen mineralogischen Zusammensetzungen

Der gemessene Temperaturverlauf der Sensoren der Messketten 135A und 158A sowie die an entsprechender Stelle berechneten Werte werden in Abb. 66 dargestellt. Die Simulationen wurden mit dem kalibrierten Modellmaterial, d.h. mit einem Zeolith- und Quarzgehalt von 65% bzw. 15%. Die Sensoren befinden sich im rechten bzw. linken Parameterbereich. In der Umgebung der Sensoren der Messkette 135A und 158A schloss sich der Gefrierkörper nach etwa 4 bzw. 2.5 Tagen. An diesen Stellen wuchs die Frostwand bereits nach 8 bzw. 11.5 Tagen zu einer Stärke von 1 m. Es ist zu vermerken, dass die Sensoren der Messketten 135A und 158A zum jeweiligen Schliesszeitpunkt Temperaturen oberhalb des Gefrierpunktes ($T_0 = 0\text{ °C}$) anzeigten. Die berechneten Temperaturen an der Stelle des Sensors der Messkette 135A stimmen mit den gemessenen Werten gut überein, während an der Stelle des anderen Sensors (158A) eine Abweichung von etwa 10 °C zu verzeichnen ist.

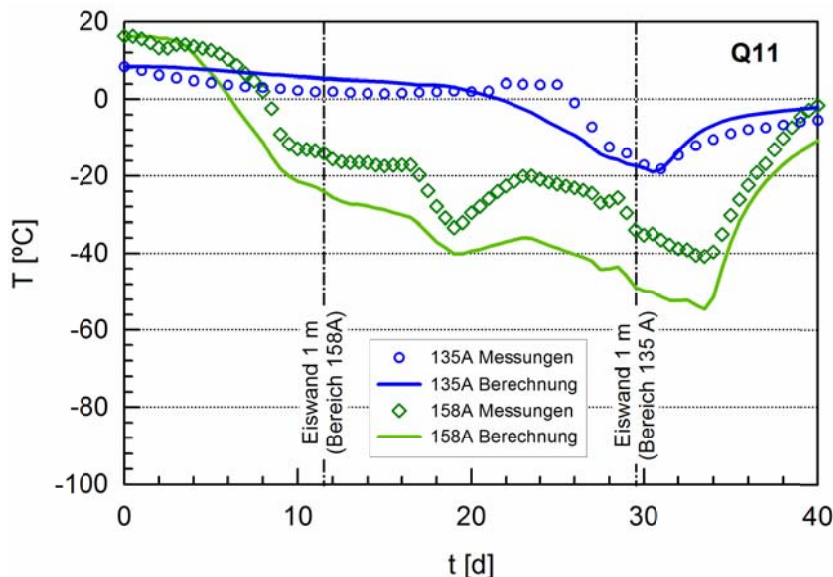


Abb. 66 Querschnitt 11, gemessener und berechneter Temperaturverlauf am Sensor der Messketten 135A und 158A für das kalibrierte Modellmaterial (Zeolith- und Quarzgehalt von 65% bzw. 15%)

b) Querschnitte 5 und 8

Der gemessene Temperaturverlauf der Sensoren der Messkette B an den Querschnitten 5 und 8 sowie die an den entsprechenden Stellen berechneten Werte werden in Abb. 67 dargestellt. Der Querschnitt 8 befindet sich im Tuff und wurde mit dem kalibrierten Modellmaterial simuliert. Der Querschnitt 5 wurde mit den in Tabelle 13 für Puzzolane angegebenen Materialkennwerten berechnet.

In der Umgebung der Sensoren der Messkette B schloss sich der Gefrierkörper im Querschnitt 5 nach etwa 8 Tagen und damit 3.5 Tage später als im Querschnitt 8. Dies ist auf die niedrigere Wärmeleitfähigkeit der Puzzolane gegenüber dem zeolithisierten Tuff zurückzuführen. Deshalb verzögerte sich der Frostwandwachstum entsprechend, so dass an der untersuchten Stelle (Sensor B) des Querschnittes 5 das Erreichen einer Wandstärke von 1 m fünf Tage länger dauerte als im Querschnitt 8 (etwa 11.5 Tage).

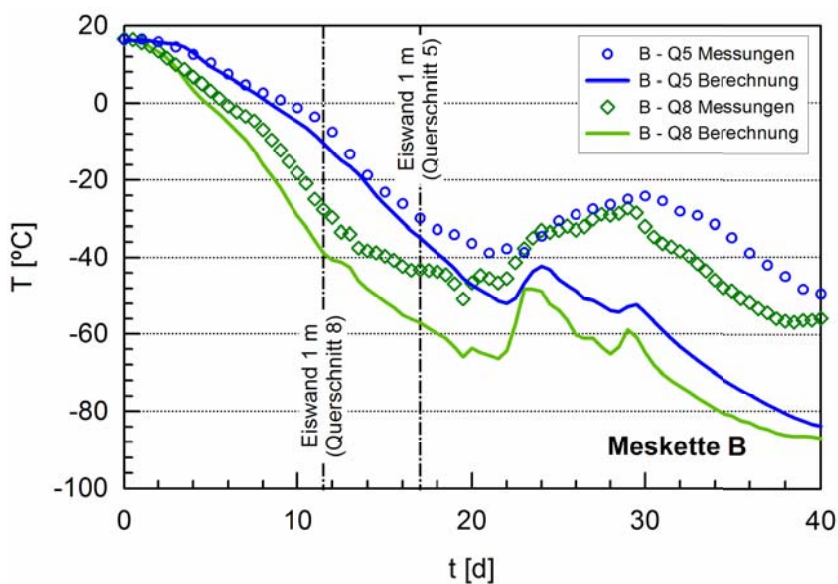


Abb. 67 Querschnitte 5 (Puzzolane) und 8 (Tuff), gemessener und berechneter Temperaturverlauf am Sensor der Messkette B

8.2.6 Schlussfolgerungen

Die untersuchte Gefriermassnahme ist bezüglich des ungleichmässigen Zeitverlaufs der Gefrierlagentemperaturen komplex. Die Wärmeleitfähigkeit ist ein Schlüsselparameter bei thermischen Berechnungen und sollte insbesondere für Materialien, die entweder unbekannt sind oder aufgrund geologischer Prozesse stark abweichen können entsprechend untersucht werden. Die Kalibrierung der Wärmeleitfähigkeit des zeolithisierten Tuffs konnte, einerseits auf plausiblen Annahmen bezüglich ihrer Genese und andererseits auf Temperaturmessungen basierend, ebenfalls mittels Temperaturmessungen erfolgreich überprüft werden. Wesentliche Aspekte und Zustände der Gefriermassnahme sowohl im Tuff als auch in den Puzzolanen konnten rechnerisch nachvollzogen werden. So findet beispielsweise der Gefrierkörperwachstum in den Puzzolanen aufgrund ihrer niedrigeren Wärmeleitfähigkeit langsamer statt als im Tuff. Das TH-Modell hat sich in der Modellierung von Stickstoffvereisung mit ungleichmässigem Zeitverlauf der Gefrierlagentemperaturen bewährt.

8.3 S-Bahn Zürich – Limmatunterquerung

8.3.1 Projektbeschreibung

Die Unterquerung der Limmat durch einen zweispurigen Tunnel bildet einen Teil der 12 km langen S-Bahnlinie zwischen dem Hauptbahnhof Zürich und dem Bahnhof Dietlikon. Eine Besonderheit dieses Bauprojektes war nebst der Unterquerung eines Flusses, die geringe Überdeckung von bereichsweise nur 1.5 m. Als Bauhilfsmassnahme für die Stabilisierung und Abdichtung des Untergrundes in diesem Bereich kamen Gefriermassnahmen zum Einsatz. Dieser Teil des Projektes wurde 1986 erstellt und wird in Egli (2000) und Egli (1990) ausführlich beschrieben. Die Gesamtlänge der Unterquerung von über 70 m untersagte die Anwendung der Gefriermassnahme in einem einzigen Durchgang. Deshalb wurde diese in drei Abschnitte unterteilt, welche jeweils von zwei Schächten aus begonnen wurden (Abb. 68), d.h. einerseits beginnend von Schacht Bahnhofsquai bis in die Hälfte der Strecke zum Schacht Limmat bzw. von Schacht Limmat in umgekehrter Richtung (Limmat West und Ost mit Längen von 32 m bzw. 38.5 m) und andererseits vom Schacht Limmat nach Nord-Osten. Das Gefrierverfahren für die Abschnitte zwischen den beiden Schächten wurde für einen doppelspurigen Tunnel geplant, während der dritte Abschnitt, nordöstlich des Schachtes Limmat, für zwei einspurige Tunnel ausgebildet waren (Achse 200 und Achse 300 in Abb. 68). Zunächst wurde der Teilabschnitt Achse 200 gefroren, ausgehoben und gesichert. Danach wurde der Teilabschnitt Achse 300 gefroren. Während der Haltephase des Gefrierkörpers für den Teilabschnitt Achse 300 wurde das Gefrierverfahren in den Abschnitten Limmat Ost und Limmat West angesetzt. Für alle Abschnitte wurden die Bohrlöcher für die Gefrierlanzen von den zugehörigen Schächten aus gebohrt. Nach der Gefrierphase folgte ein konventioneller Vollausbruch des Tunnels mit Bagger und Bohrhammer.

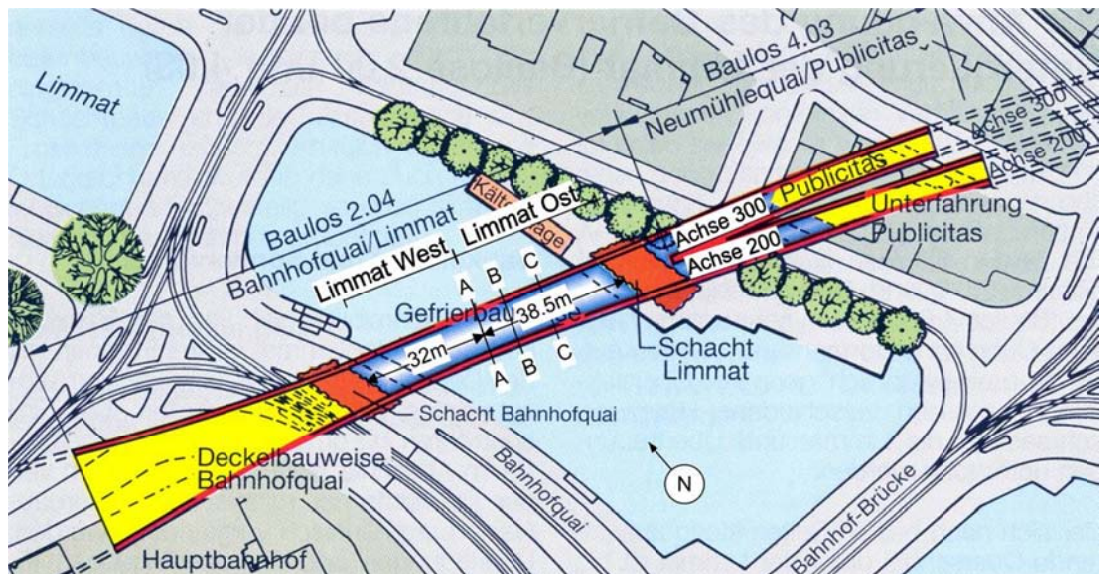


Abb. 68 Lageplan der Gefriermassnahmen (Egli 1990)

Die vorliegende Studie bezieht sich nur auf die Gefriermassnahme entlang des Abschnittes Limmat Ost. Der Gefrierprozess wurde in drei Sektionen untersucht, unterteilt in die Querschnitte A-A, B-B und C-C in Abständen von jeweils 38.5 m, 30 m und 20 m, betrachtet vom Schacht Limmat aus (Abb. 68). Die Gefrierlanzen wurden vom Schacht Limmat bis zum Querschnitt A-A gebohrt. Im Gegensatz zu den Bemessungseinschätzungen waren für den Abschnitt Limmat Ost Gefrierperioden von sieben Monaten anstatt 60 Tagen notwendig, um eine Schliessung des Gefrierkörpers zu erreichen und auch dies nur mit Hilfe von Nothilfsmassnahmen (Injektionen).

8.3.2 Eigenschaften des Untergrundes

Die geologischen Gegebenheiten der Limmat sind charakterisiert durch den oberflächennahen Limmatschotter mit einer hohen Durchlässigkeit, gefolgt von Seeablagerungen und glazialen Moränenablagerungen in Tiefen von mehr als 7 m (Abb. 69). Diese liegen auf einer Schicht harten Molassesandsteins mit einer sehr geringen Durchlässigkeit von 10^{-12} m/s. Aufgrund ihrer Entstehung verläuft die Schichtgrenze zwischen den Seeablagerungen und den glazialen Moränenablagerungen sehr unregelmässig. Der Limmatschotter wird in eine junge und eine alte Schicht unterteilt, der sogenannte «Junge Limmatschotter» bzw. «Limmatschotter». Diese Schichten sind sehr homogen und ändern sich nicht in ihrer Schichtfolge. Die ersten 1.5 m des Jungen Limmatschotters wurden zwecks Reduzierung seiner Durchlässigkeit vor der Anwendung des Gefrierverfahrens verdichtet. Basierend auf die geologischen Daten zweier Erkundungsbohrungen wurde die Stratigraphie für die untersuchten Querschnitte A-A und C-C erstellt (Abb. 70). Die geotechnischen und thermischen Eigenschaften der Bodenschichten wurden aus den Projektdaten entnommen (Berichte Jessberger + Partner, siehe Kap. 8.3.5) (Tabelle 14).

Tabelle 14 – Materialkennwerte S-Bahn Zürich

Material	ρ_d [kg/m ³]	k_f [m/s]	λ_2 [W/mK]	λ_1 [W/mK]	C_2 [MJ/m ³ K]	C_1 [MJ/m ³ K]	α [%]	β [-]
Verdichtete Junge Limmatschotter	1700	10^{-4}	2.1	2.8	2.5	1.8	0.008	0.727
Junge Limmatschotter	1600	6×10^{-4}	2.4	3.0	2.4	1.6	0.008	0.727
Limmatschotter	1500	10^{-4}	2.3	3.0	2.3	1.7	0.008	0.727
Seeablagerungen	1900	8×10^{-5}	1.6	2.8	2.8	2.1	0.030	0.574
Glaziale Ablagerungen	1800	10^{-5}	1.7	2.9	2.7	1.9	0.015	0.699
Molasse	2600	10^{-12}	2.3	3.0	2.5	2.0	-	-

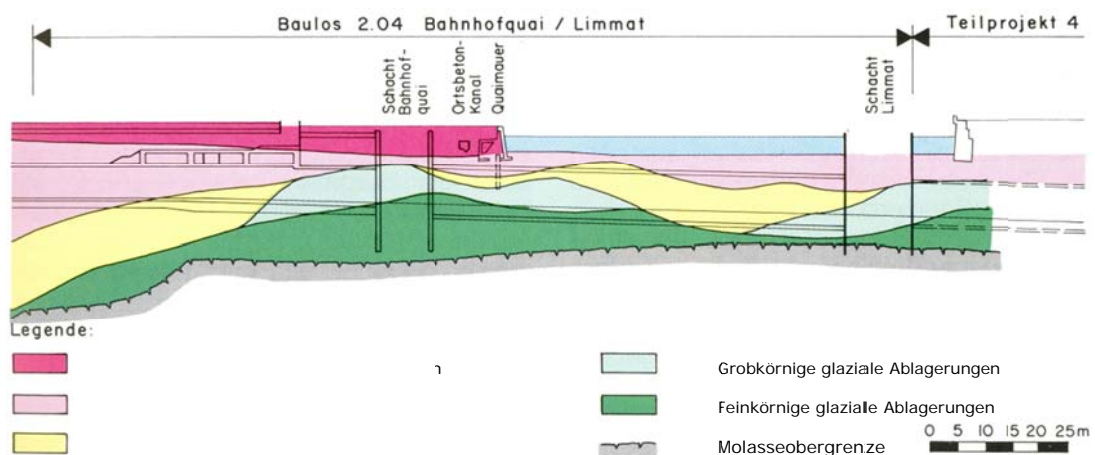


Abb. 69 Längsprofil der Unterquerung Limmat mit aufgeschlossenem geologischem Aufbau (Bosshard 1990, verändert)

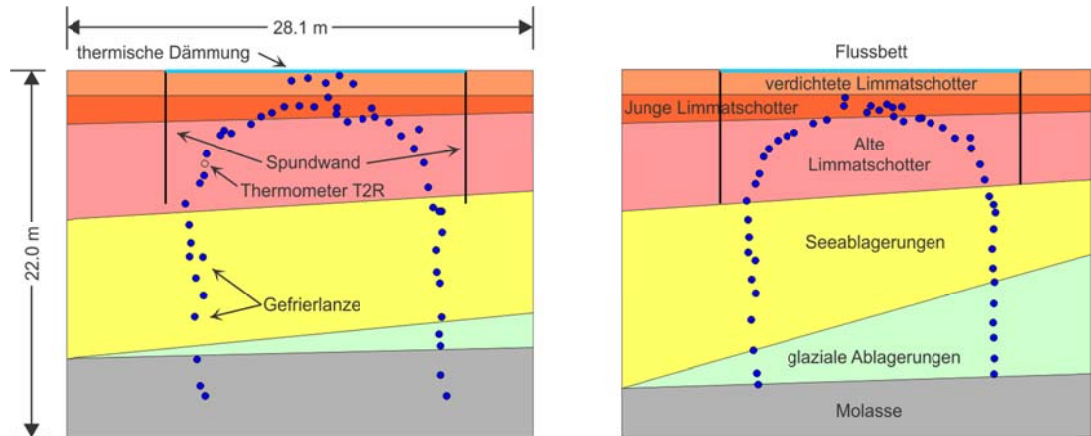


Abb. 70 Schichtenabfolge und Ist-Lage der Gefrierlanzen des Querschnittes A-A (links) und des Querschnittes C-C (rechts)

Bezüglich der Wärmeleitfähigkeit und -kapazität wurde nicht unterschieden zwischen verdichtetem und unverdichtetem Jungem Löss sowie dem Löss. Für den Jungen Löss wurde eine höhere Durchlässigkeit von 6×10^{-4} m/s angenommen. Der ungefrorene Wassergehalt des Bodens in Abhängigkeit von der Temperatur wurde mittels der Parameter α und β nach Gl. 2 beschrieben (Tabelle 14). Die Werte für die Seeablagerung sind typisch für Silt, während die der glazialen Moränenablagerungen siltigen Sanden entsprechen.

8.3.3 Zusätzliche Bauhilfsmassnahmen

Aufgrund der hohen Durchlässigkeit des Jungen Lösses und seiner Nähe zum Flussbett wurde der Bereich oberhalb der Tunnelfirste als problematische Zone für die Anwendung des Gefrierverfahrens identifiziert. Ferner war bekannt, dass eine Grundwasserströmung vorhanden ist, die aber hauptsächlich quer zur Limmat und unterhalb des Bahnhofsquais verläuft. Je nach angenommener Durchlässigkeit der oben genannten Schichten ergaben die Berechnungen der Sickergeschwindigkeit direkt unterhalb der Gründungssohle des Bahnhofsquais zwischen 13 m/d und 268 m/d (Jessberger 1985). Um diese auf einem nach Projektangaben zulässigen Mass von 2 m/d zu reduzieren, und um sogenannte «Wärmebrücken» zwischen der Gefriermassnahme und der Limmat zu verhindern, wurden folgende Bauhilfsmassnahmen durchgeführt:

- Tiefenverdichtung des Jungen Lösses in der Nähe des Flussbettes mittels Rütteldruckverfahren aus einem Schiff heraus, mit dem Ziel der Homogenisierung und der Reduzierung der Durchlässigkeit.
- Aufbringen einer Wärmedämmung auf dem Flussbett bestehend aus einer 6 cm dicken Schicht aus PVC-Hartschaumplatten, Zwecks einer Dämmung des Wärmetransportes von der Limmat.
- Rammen zweier 11 cm starken Spundwände rechts und links seitlich des geplanten Tunnels und parallel zur Tunnelachse bis in die Seeablagerungen, mit dem Ziel die Grundwassersickerströmung im Löss zu hemmen.
- Installation einer zusätzlichen Reihe von Gefrierlanzen im Firstbereich (Abb. 70).

Die Wärmeleitfähigkeit und die volumetrische Wärmekapazität der PVC-Hartschaumplatten und der Spundwände betragen 0.04 W/mK und 1.5 kJ/kgK (Nierobis 2003) bzw. 50 W/mK und 0.47 J/kgK. Beide Bauelemente werden als praktisch wasserundurchlässig berücksichtigt.

8.3.4 Gefriermassnahme

Als Kühlflüssigkeit für das Gefrierverfahren kam eine Sole zum Einsatz. Gemäss den Projektvorgaben sollte die Stärke des Gefrierkörpers (definiert als der Abstand zwischen den Isothermen -3 °C) 1 m betragen. Zu diesem Zweck wurden 53 Gefrierlanzen mit einer Länge von 38.5 m und einem Aussendurchmesser von 101.6 mm horizontal und parallel zur geplanten Tunnelachse installiert. Der Abstand zwischen den Gefrierlanzen sollte zwischen 0.8 m und 0.9 m betragen. Bei Horizontalbohrungen ist bekannt, dass je länger das Bohrloch, umso grösser die Abweichung sein kann. Nach Projektangaben sollte die Abweichung der Ist- von der Solllage der Bohrlöcher für die Gefrierlanzen 1% nicht überschreiten. Es ist anzumerken, dass zur Bauzeit, im Jahre 1985, die Bohrtechnologie noch nicht ausreichend entwickelt war, um diesen Anforderungen zu genügen. Die gesteuerte Bohrtechnologie wurde später entwickelt (Kap. 2.4). Daher kam für diese Zwecke das sogenannte «Doppelkopf-Überlagerungsbohrverfahren» zum Einsatz. Nach dem Abteufen der Bohrungen wurden diese eingemessen. Gemäss den Projektunterlagen wurden am Bohrlochende, nach einer Länge von 38.5 m, Abweichungen von bis zu 2.0 m von der Solllage festgestellt. Demzufolge wurde der geplante Abstand zwischen Gefrierlanzen von 0.9 m an einigen Stellen deutlich überschritten.

Die Überwachung des Gefrierkörperwachstums erfolgte mittels Temperatursensoren, die entlang von Messketten parallel zu den Gefrierlanzen in eigens dafür abgeteufte Bohrungen platziert wurden. Der Abstand zwischen den Temperatursensoren einer Messkette betrug 3 m. Acht dieser Messketten mit je einer Länge von 39 m wurden im Bereich um den geplanten Tunnel installiert. Drei von ihnen waren oberhalb des Tunnels und sehr nahe am Flussbett angebracht. Zusätzlich wurden noch neun vertikale Temperatursensoren vom Flussbett bis zum Grund des geplanten Tunnels eingebaut. Die Temperaturen wurden automatisch erfasst und alle vier Stunden aufgezeichnet.

Die Ist-Lage der Gefrierlanzen sowie der Messketten für die Querschnitte A-A und C-C werden in Abb. 69 dargestellt. In den Bereichen mit grösserem Lanzenabstand wurden nachträglich zusätzliche Lanzen platziert, so dass dieser Bereich keine Probleme mehr bereitet hat. Die Lage der zusätzlichen Lanzen ist allerdings in den heute verfügbaren Unterlagen nicht dokumentiert.

Da man nur über eine einzelne Kühlanlage mit einer Kälteleistung von 230 kW (bei -10 °C) bzw. 500 kW (bei -40 °C) verfügte, wurden während den letzten zwei Monaten der Haltephase des Abschnittes Achse 300 und die Abschnitte Limmat West und Ost planmässig noch vorgekühlt bis gefroren (Jessberger 1985). In diesem Zeitraum variierte die Vorlauftemperatur der Sole von 10 °C in der ersten Stunde über 2.5 °C nach einem Tag und bis zu -20 °C nach zwei Monaten. Nach diesen zwei Monaten war einerseits keine Kälteleistung im Abschnitt Achse 300 mehr erforderlich und andererseits konnte die Gefriermassnahme im Abschnitt Limmat West auf Haltephase umgestellt werden. Dagegen zeigten die Messungen im Abschnitt Limmat Ost nach deutlicher Überschreitung der prognostizierten Schliesszeit von 2 Monaten keinen geschlossenen Gefrierkörper. Im Rahmen der Nothilfsmassnahmen gegen diese unvollständige Schliessung wurde die Leistung der Kühlmaschine auf die Gefriermassnahme dieses Abschnittes verstärkt, so dass die Vorlauftemperatur der Sole eine Temperatur von -35 °C erreichte. Ferner wurden lokal Verpressungen zwecks Reduzierung der Durchlässigkeit des Untergrundes durchgeführt. Besondere Probleme traten in der Nähe des Schachtes Limmat auf, wo unerwarteterweise Horizonte mit Blöcken (glaziale Blockteppiche) extrem hoher Durchlässigkeit (0.01 m/s) angetroffen wurden und die bis zum Fels hinunterreichte (Egli 2000). Ferner gab es eine Stelle, wo die Spundwand versehentlich durchbohrt wurde. Dieser Bereich war ebenfalls problematisch, einerseits weil die Spundwand als Kältebrücke wirkt, andererseits wegen der erhöhten Wasserwegsamkeit im aufgelockerten, anstehenden Bodenbereich. Eine numerische Interpretation der Beobachtungen im oben dargestellten, extrem ungünstigen Bereich (Blockteppich, Spundwanddurchbohrung) konnte mangels hinreichender Dokumentation in den heute noch vorhandenen Unterlagen nicht vorgenommen werden. Wir haben aber den Gefriervorgang unter Berücksichtigung der Istlage der Lanzen (ohne die zusätzlichen, später installierten Lanzen im Bereich der grossen Abweichungen) rechnerisch simuliert. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass bei grösseren Lanzenabständen selbst eine sehr niedrige Strömungsgeschwindigkeit von

0.15 m/d in der oberen durchlässigeren Schicht den Gefriervorgang im relevantem Mass zu beeinträchtigen vermag. Es ist zu vermerken, dass nach Projektbeschreibung eine maximale Fliessgeschwindigkeit von 2 m/d als Grenzwert für den sicheren Aufbau eines Gefrierkörpers vorgesehen war (Egli 2000).

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der Untersuchungen in den Querschnitten A-A und C-C dargestellt. Erste numerische Untersuchungen für die Situation ohne bzw. unter Berücksichtigung einer Sickerströmung wurden von Schneider (2006) bzw. Papakonstantinou et al. (2010) durchgeführt. Da bei den letztgenannten Voruntersuchungen andere Annahmen betreffend Strömungsgeschwindigkeit bzw. der piezometrischen Höhe ($h_w = 3.8$ m, siehe Kap. 0) getroffen wurden, weichen ihre Ergebnisse von den hier dargestellten Berechnungen ab.

8.3.5 Numerisches Modell

Die Erstellung der Modelle basiert auf folgenden Unterlagen:

- Limmat Ost, Limmatquerung, Lage der Bohrzielpunkte, Normalprofil Achse 200 km 1226.000 (1:25) (Dezember 1985)
- Limmatquerung, Lage der Bohrungen, Geologisches Längenprofil Süd Achse Spundwand Süd (1:100) (August 1985)
- Limmatquerung, Drainagebohrungen Nord, Geologisches Längenprofil Nord Achse Spundwand Nord (1:100) (November 1985)
- Umfangreiche Auszüge aus der Dokumentation der Baumassnahmen aus dem Archiv von Basler & Hofmann Ingenieure und Planer mit technischen Berichten, Messprotokollen und weiteren Plänen (1984-1986)
- Auszüge aus Berechnungen und Berichten zur thermischen Dimensionierung der Gefriermassnahme mittels FE-Methode von Prof. Dr.-Ing. Jessberger + Partner (1984-1986)
- Veröffentlichte Berichte zum Bau der S-Bahn Zürich (1979-2000)
- Zürich HB, Durchmesserlinie Altstetten Zürich HB – Oerlikon, Geologische Untersuchungen (Juni 2004)
- Grundwasserkarte Mittelwasserstand (1:25'000) (März 2006)

Aus den Projektunterlagen geht hervor, dass der Untergrund sowie die hydraulischen Bedingungen nicht ausreichend bekannt sind, um eine aufwändige 3D Modellierung zu rechtfertigen. Daher wurden nur 2D Modelle untersucht und zwar an den Querschnitten A-A und C-C (Abb. 68). Hierbei wurde die Stratigrafie gemäss den Erkundungsbohrungen berücksichtigt (Abb. 70). Um den Einfluss der Bohrungenauigkeit auf den Gefrierkörperwachstum zu untersuchen, wurde sowohl die planmässige, als auch die gemessene Lage der Gefrierlanzen berücksichtigt, d.h. die Soll- bzw. die Istlage. Der modellierte Bereich für jeden der untersuchten Querschnitte hat Abmessungen B x H von 28.1 m x 22.0 m und wurde mit etwa 195'000 finiten Elementen diskretisiert.

Gemäss den Projektunterlagen wurde für den betrachteten Zeitintervall von Januar bis Ende Mai die Umgebungstemperatur des Untergrundes zu 10 °C angesetzt. Mangels Aufzeichnungen der Vor- und Rücklauftemperatur der Sole wurden für die Berechnungen die Temperaturverläufe aus der in den Projektunterlagen dargestellten Abschätzung übernommen. Diese berücksichtigen die in Kap. 0 beschriebenen Projektgegebenheiten. Die Rücklauftemperatur der Sole wurde stets als 5 °C wärmer als ihre Vorlauftemperatur angenommen. Für alle Gefrierlanzen eines Querschnittes wurden stets zeitgleich die gleichen Temperaturen angesetzt, es wurde aber zwischen den Querschnitten unterschieden. Im Querschnitt A-A entsprach die Temperatur der Gefrierlanzen der Vorlauftemperatur, während diese im Querschnitt C-C durch lineare Interpolation zwischen der Vor- und der Rücklauftemperatur der Sole unter Berücksichtigung der Lage des Querschnittes ermittelt wurde. In Abb. 71 wird der für die Modellierungen angenommene Temperaturverlauf der Gefrierlanzen dargestellt.

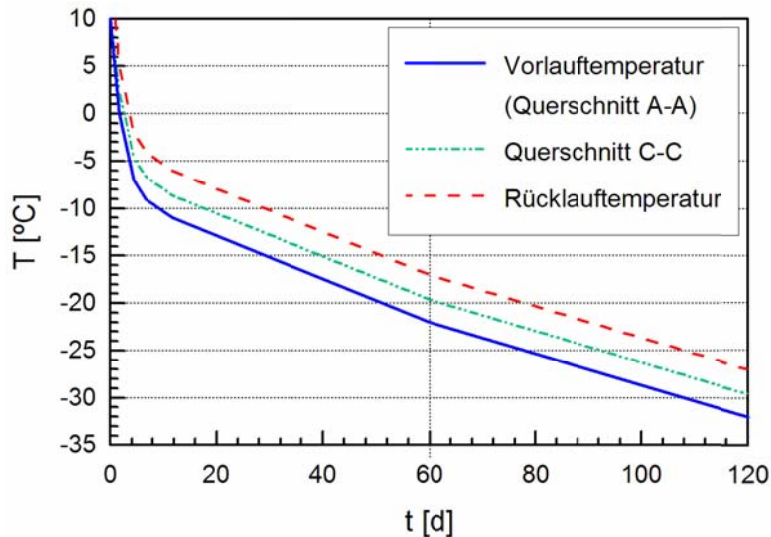


Abb. 71 Temperaturverlauf des Kühlmittels und der Gefrierlanzen

Nach der oben genannten Grundwasserkarte verläuft die Grundwasserströmung hauptsächlich in Längsrichtung der Gefriermassnahmen teilweise aber auch quer dazu und zwar in Strömungsrichtung der Limmat. Es ist zu vermerken, dass aufgrund der Umlenkung der Sickerströmung bei einer Gefriermassnahme, eine Queranströmung wesentlich ungünstiger einzustufen ist als eine Längsanströmung (Kap. 7.4). Für die Modellierungen wurden drei Fälle bezüglich der Grundwasserströmung quer zur Tunnelachse untersucht: ohne, mit einer geringen und mit einer moderaten Sickergeschwindigkeit. Für diese drei Fälle wurden Potentialunterschiede der piezometrischen Höhe zwischen dem rechten und dem linken Rand der Modelle (Abb. 70), d.h. über die Länge von 28.1 m, von 0 m, 0.2 m bzw. 0.33 m angesetzt.

Als thermische Randbedingung wurde sowohl für die anströmende als auch für die obere Seite des Modells eine konstante Temperatur angenommen, entsprechend der Grundwasser- und Bodentemperatur vor Beginn der Gefriermassnahme von 10.0 °C bzw. der Flusswassertemperatur von 9.0 °C. Die restlichen Modellseiten wurden adiabatisch betrachtet. Ferner wurden alle in Kap. 8.3.3 beschriebenen zusätzlichen Bauhilfsmassnahmen, wie die Wärmedämmschicht auf dem Flussbett, die Verdichtung der oberen Schicht des Limmatschotters und die seitlichen Spundwände, in den Modellen berücksichtigt.

8.3.6 Simulationen und Auswertung

Die Berechnungen wurden mit Zeitschritten zu 3600 s durchgeführt. Modelliert wurde ein Zeitraum von bis zu 100 Tagen. Der Beginn der Modellierungszeit entsprach dem Beginn des Gefrierens.

Die Ergebnisse der Simulationen werden in Abb. 72 bis Abb. 77 nach Querschnitt, Lage der Gefrierlanzen und Sickerströmungsbedingungen (ausgedrückt durch die piezometrische Höhendifferenz h_w zwischen 0.6 und 1.0 m) für die Zeitpunkte nach 20, 40, 60 und 100 Tagen Gefrierzeit zusammengefasst. Hierbei werden die Temperaturverteilung, die prognostizierte Ausbreitung des Gefrierkörpers (Isotherme 0 °C) sowie ausgewählte Sickerlinien gezeigt. Auf jedem dieser Bilder werden, zum besseren Vergleich, die Simulationsergebnisse mit der Soll- (links) und mit der Ist-Lage der Gefrierlanzen nebeneinander dargestellt (zum Berechnungsverfahren der Sickerlinien siehe Kap. 8.1.3).

Alle Simulationsergebnisse zeigen, dass der Bereich um die Firste als erster zusammenwächst und stets die grössere Stärke aufweist, dies unabhängig von Bohrgenauigkeit, Sickergeschwindigkeit und Stratigrafie. In alle simulierte Fälle erreicht der Gefrierkörper im Firtsbereich eine ausreichende Stärke nach etwa 60 Tage Gefrierzeit (Abb. 72 bis Abb. 77). Dieses Ergebnis bestätigt die Zweckmässigkeit der durchgeführten Bauhilfsmassnahmen, insbesondere der Spundwände, der zusätzlichen Gefrierlanzenreihe im Firstbereich und der Wärmedämmung.

Der für die Projektplanung massgebende Fall, Solllage der Gefrierlanzen ohne Sickerströmung, zeigt in beiden Fälle (Querschnitt A-A und C-C) ein verspätetes Schliessen und das Erreichen einer ausreichenden Stärke des Gefrierkörpers und zwar nach etwa 60 bzw. 100 Tagen (Abb. 72 links und Abb. 75 links). Eine geringe Sickerströmung ($h_w = 0.6$ m) verzögert den Gefriervorgang um mehrere Wochen (Abb. 73 links und Abb. 76 links). Bei einer moderaten Sickerströmung ($h_w = 1.0$ m) beträgt die Verzögerung weit mehr als einen Monat (Abb. 74 links und Abb. 77 links). Hierbei zeichnet sich der Übergang zwischen Seeablagerungen und glazialen Ablagerungen aufgrund der unterschiedlichen Durchlässigkeit als kritischer Bereich, d.h. aufgrund des schnelleren Gefrierens der glazialen Ablagerungen wird mehr Grundwasser in die Seeablagerungen umgeleitet (Kap. 7.3.2), wodurch letztendlich die Sickergeschwindigkeit lokal zunimmt. Da der Querschnitt A-A gegenüber dem Querschnitt C-C die mächtigere Schicht Seeablagerungen aufweist (Abb. 70) verhält sich dieser bezüglich des Gefrierkörperwachstums trotz niedrigerer Temperatur der Gefrierlanzen ungünstiger.

Die Ergebnisse der Simulationen mit der Istlage der Gefrierlanzen zeigen erwartungsgemäss einen ungünstigeren Verlauf des Gefriervorganges. So wird für den Fall ohne Sickerströmung nach 100 Tagen Simulationszeit bei Querschnitt A-A und C-C kein geschlossener Gefrierkörper bzw. der Schliesszeitpunkt knapp erreicht (Abb. 72 rechts und Abb. 75 rechts). Bei einer geringen bis moderaten Sickerströmungsgeschwindigkeit ist im Querschnitt A-A auch nach mehr als 100 Tagen Simulationszeit kein Schliessen des Gefrierkörpers zu verzeichnen (Abb. 73 rechts und Abb. 74 rechts), während sich dieser Zustand beim Querschnitt C-C nur bei einer geringen Sickerströmung gerade mal andeutet (Abb. 76 rechts und Abb. 77 rechts). Es ist zu vermerken, dass sich sowohl beim Querschnitt A-A als auch beim Querschnitt C-C die grösste Bohrlochabweichung auf der nicht angeströmten Seite im oben genannten kritischen Bereich befindet, d.h. im Übergang zwischen Seeablagerungen und glazialen Ablagerungen. Damit wirkt sich die Bohrlochabweichung noch ungünstiger aus. Vermutlich sind diese Bohrlochabweichungen auf den Schichtenübergang zurückzuführen.

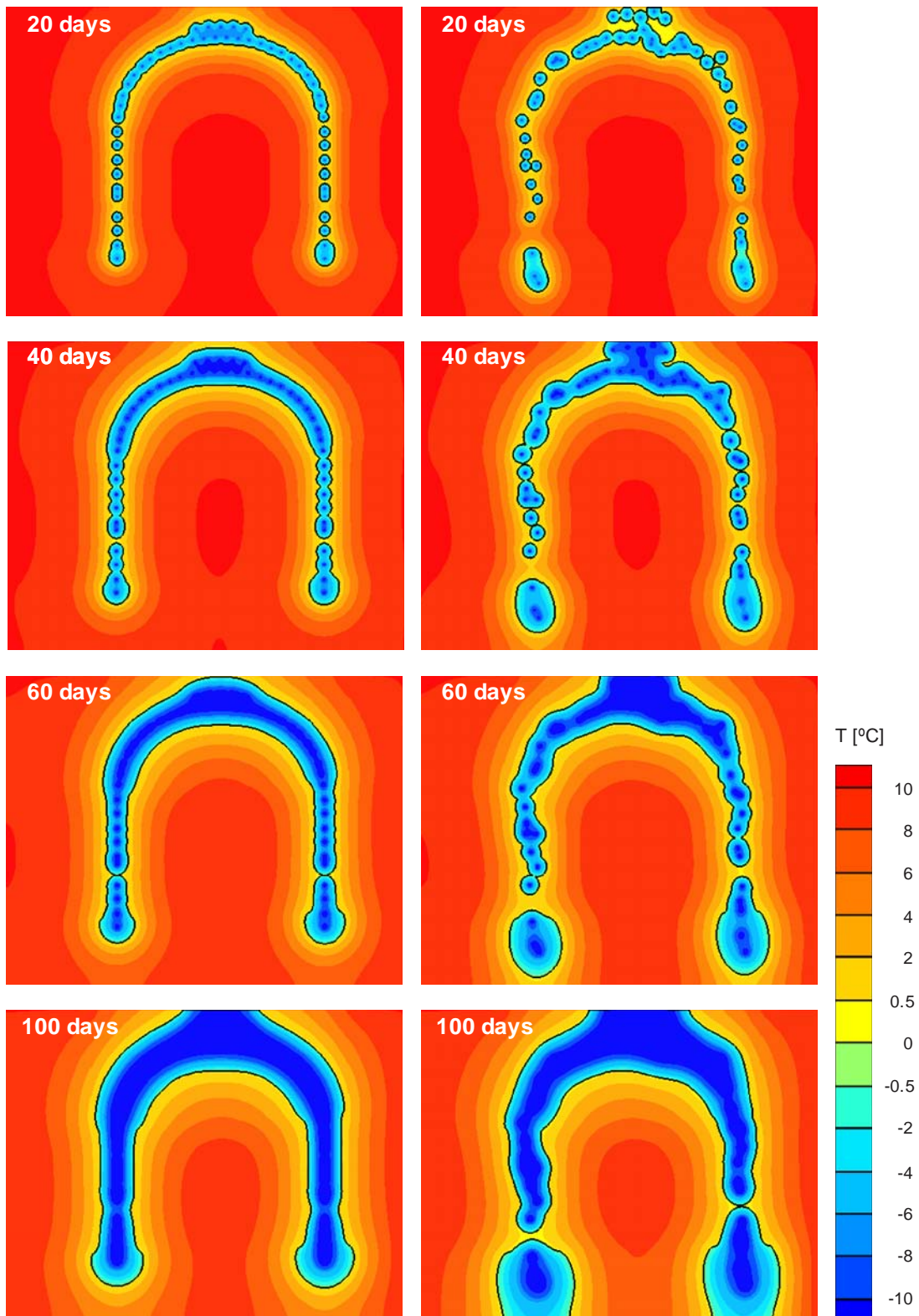


Abb. 72 Querschnitt A-A, $h_w = 0 \text{ m}$ / Soll- (links) Ist-Lage (rechts) der Gefrierlanzen: Simulationsergebnisse nach 20, 40, 60 und 100 Tagen – Temperaturverlauf als Isothermen, Gefrierkörpergrenze (schwarze Linie)

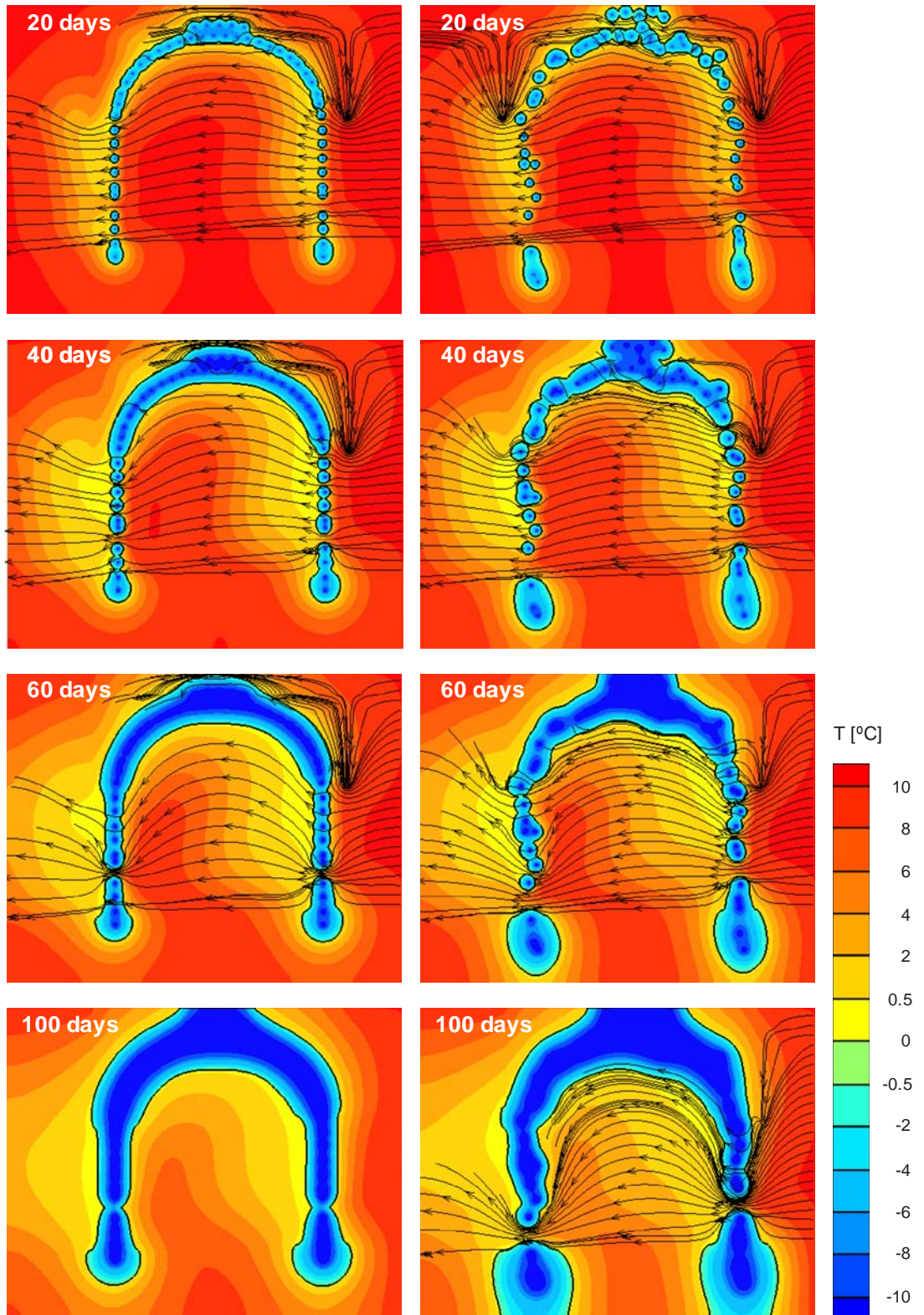


Abb. 73 Querschnitt A-A, $h_w = 0.6 \text{ m}$ / Soll- (links) Istlage (rechts) der Gefrierlanzen: Simulationsergebnisse nach 20, 40, 60 und 100 Tagen – Temperaturverlauf als Isothermen, Gefrierkörpergrenze (schwarze Linie) und ausgewählte Sickerlinien

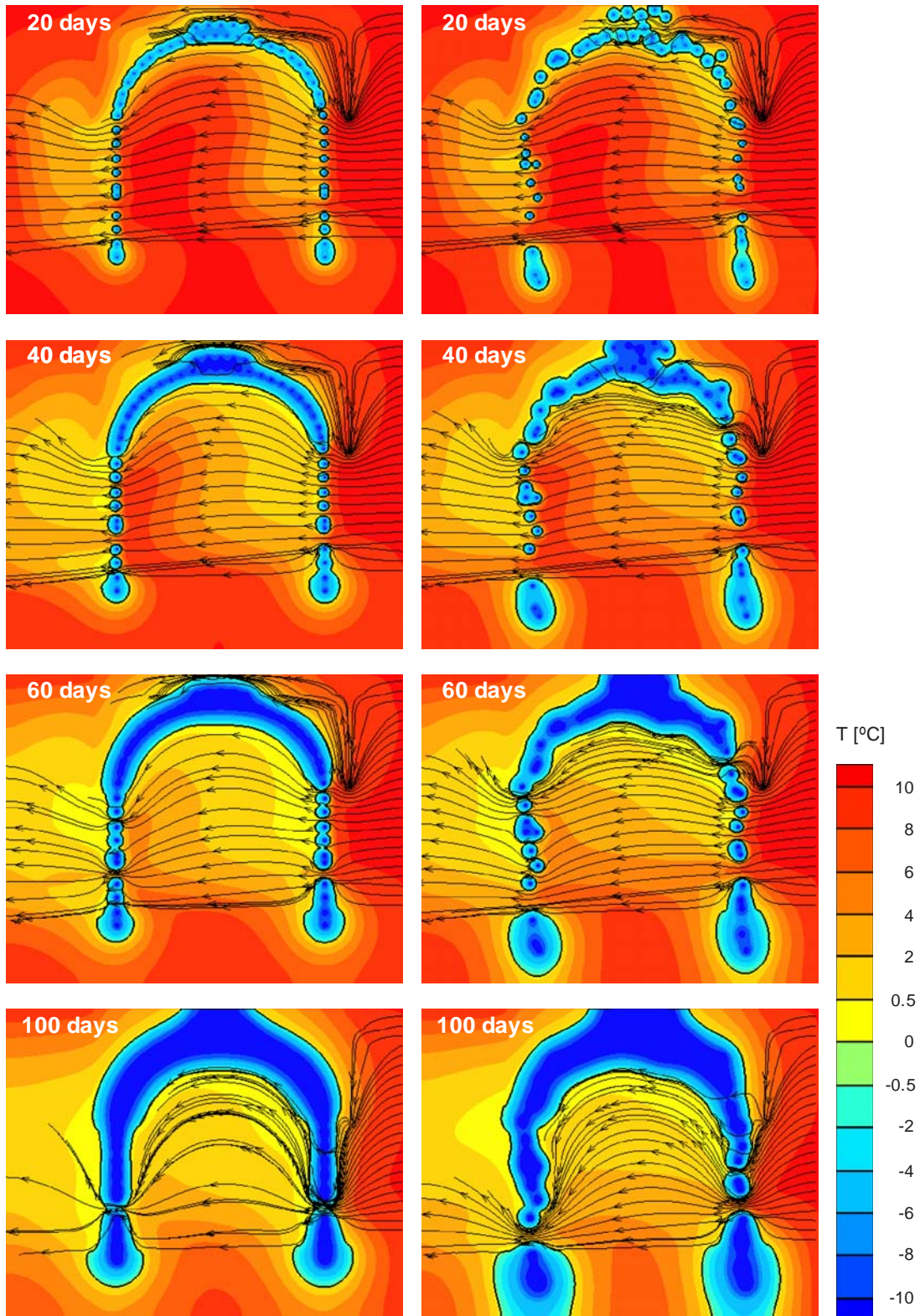


Abb. 74 Querschnitt A-A, $h_w = 1.0 \text{ m}$ / Soll- (links) Istlage (rechts) der Gefrierlanzen: Simulationsergebnisse nach 20, 40, 60 und 100 Tagen – Temperaturverlauf als Isothermen, Gefrierkörpergrenze (schwarze Linie) und ausgewählte Sickerlinien

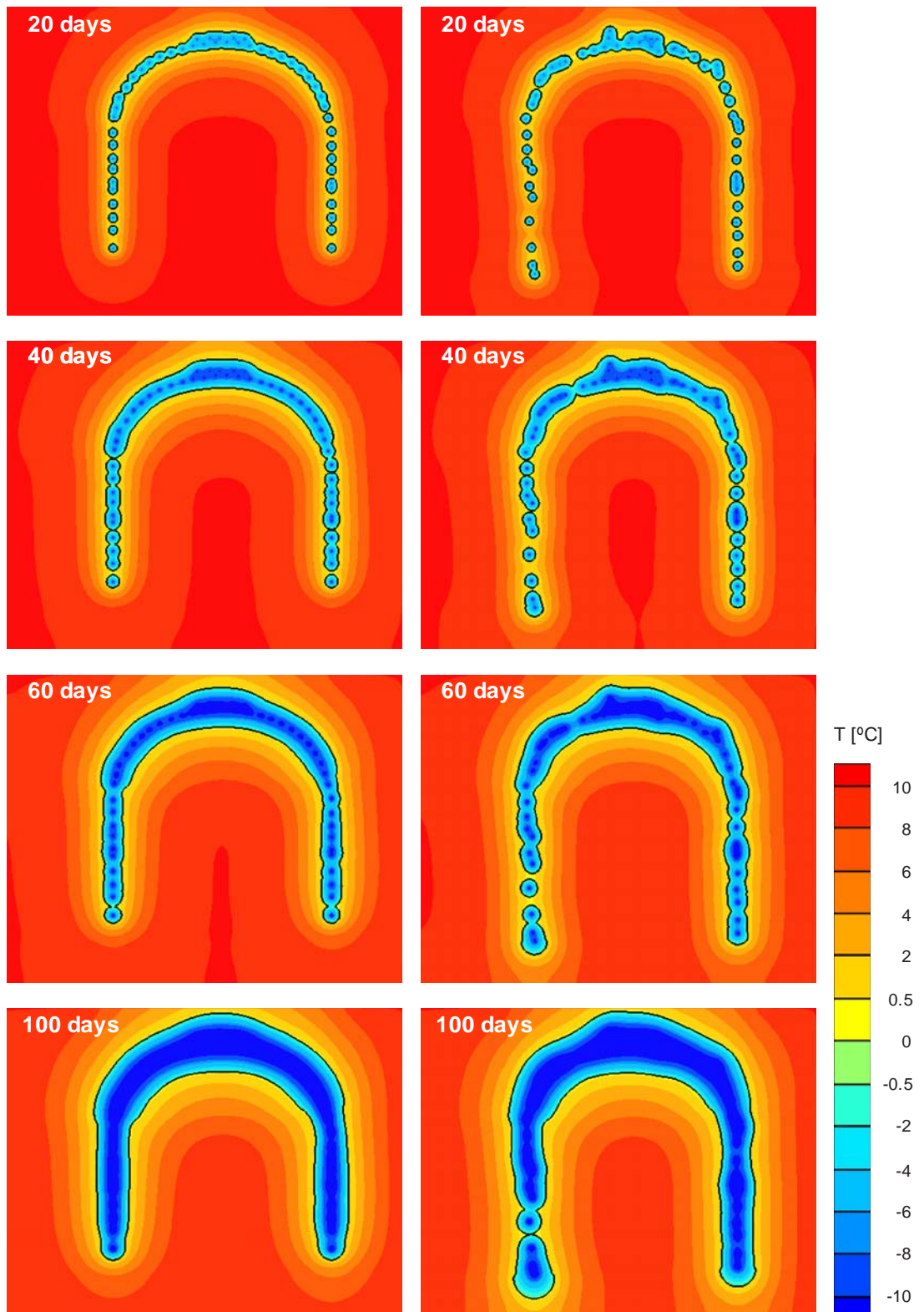


Abb. 75 Querschnitt C-C, $h_w = 0$ m / Soll- (links) Istlage (rechts) der Gefrierlanzen: Simulationsergebnisse nach 20, 40, 60 und 100 Tagen – Temperaturverlauf als Isothermen, Gefrierkörpergrenze (schwarze Linie)

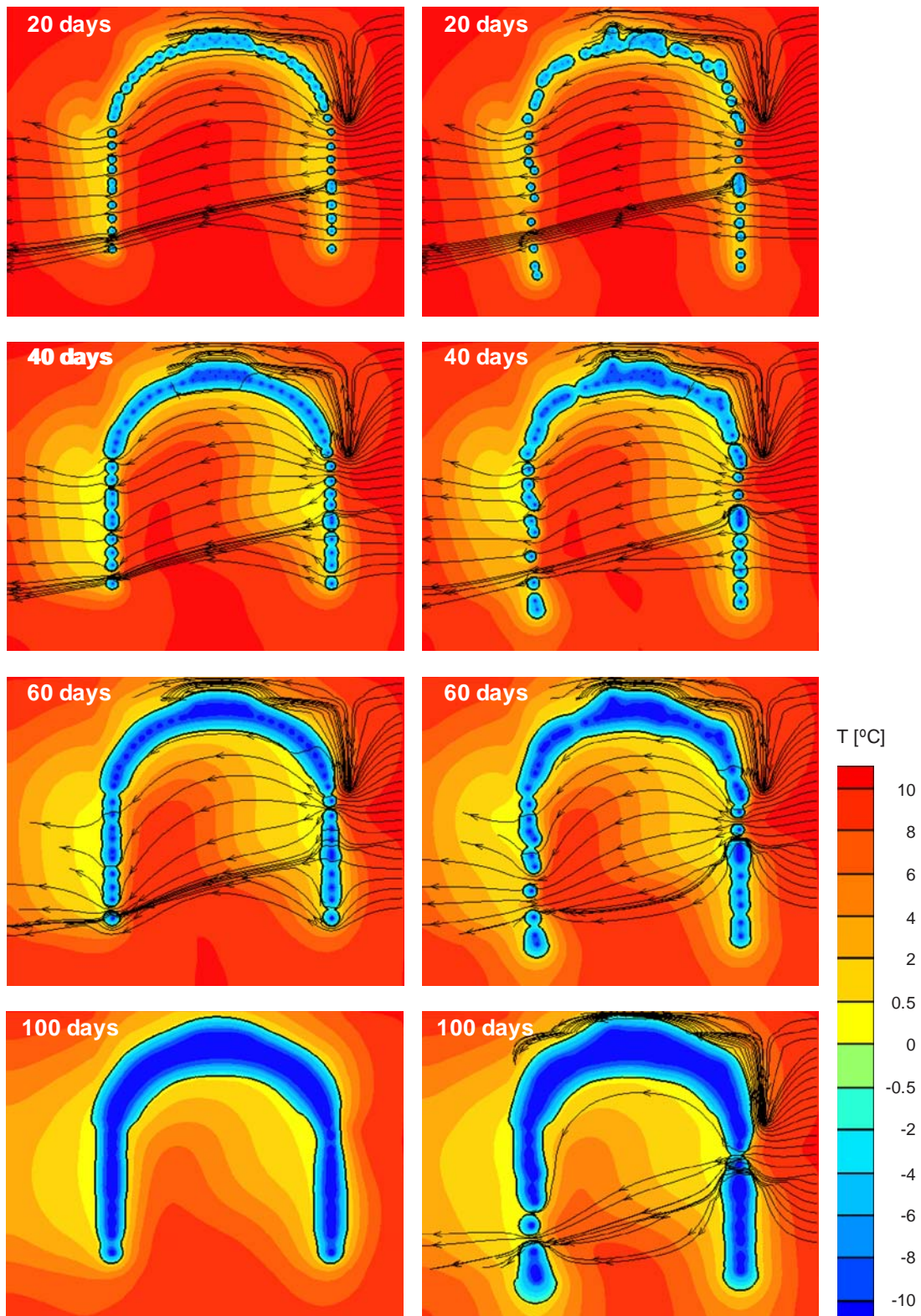


Abb. 76 Querschnitt C-C, $h_w = 0.6 \text{ m}$ / Soll- (links) Istlage (rechts) der Gefrierlanzen: Simulationsergebnisse nach 20, 40, 60 und 100 Tagen – Temperaturverlauf als Isothermen, Gefrierkörpergrenze (schwarze Linie) und ausgewählte Sickerlinien

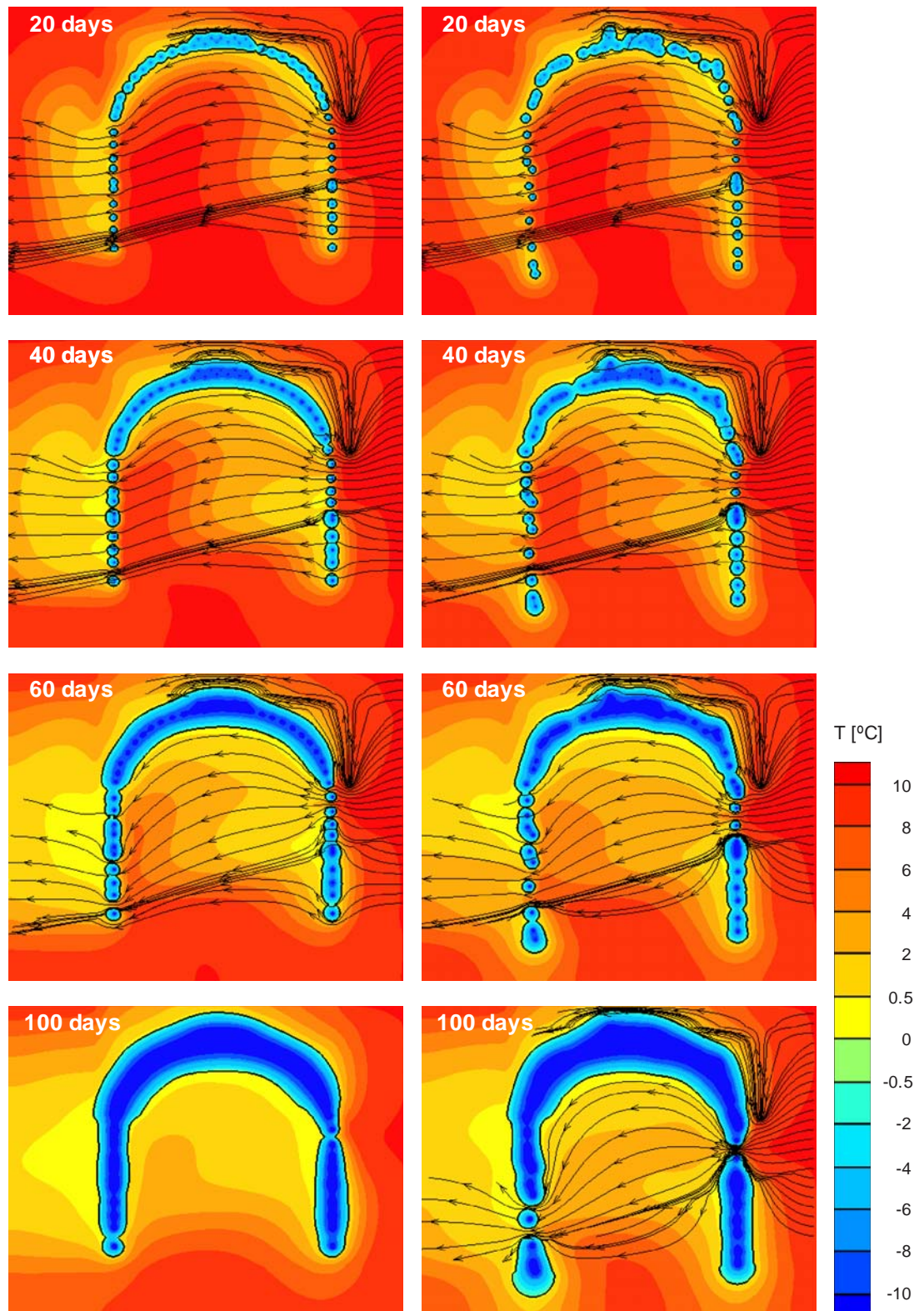


Abb. 77 Querschnitt C-C, $h_w = 1.0 \text{ m}$ / Soll- (links) Istlage (rechts) der Gefrierlanzen: Simulationsergebnisse nach 20, 40, 60 und 100 Tagen – Temperaturverlauf als Isothermen, Gefrierkörpergrenze (schwarze Linie) und ausgewählte Sickerlinien

In den Projektunterlagen finden sich vereinzelte Temperaturmessungen aus den Monaten Februar, April und Mai 1986. Die letztgenannten Messungen, April und Mai, erfolgten während der in Kap. 0 erwähnten Verpressarbeiten. Diese führten Veränderungen des Untergrundes herbei, deren Ausmass, Ausdehnung und Zeitverlauf nicht dokumentiert sind. Deshalb können die oben genannten Temperaturmesswerte nicht mit den Simulationsergebnissen verglichen werden. Lediglich die Temperaturmessungen vor den Notfallsmaßnahmen, Februar 1986, können mit den Simulationsergebnissen für die Fälle ohne und mit moderater Sickerströmung verglichen werden. In Abb. 78 werden die Messungen des Thermometers T2R beim Querschnitt A-A (Lage des Sensors in Abb. 70 links) nach 57, 59 und 62 Tagen dargestellt sowie ihr berechneter Temperaturverlauf für die Istlage der Gefrierlanzen und die betrachteten Fälle ohne und mit Sickerströmung dargestellt. Der aus den genannten Gründen - zeitlich betrachtet - punktuelle Vergleich zwischen Messwerten und Berechnungen ergibt nach zwei Monaten Gefrieren eine sehr gute Übereinstimmung. Es muss beachtet werden, dass die numerischen Berechnungen unter Berücksichtigung der Istlage der Lanzen durchgeführt wurden. Die später zusätzlich installierten Lanzen im Bereich der grossen Ist-Soll-Abweichungen (Kap. 8.3.4) blieben dabei unberücksichtigt. Dennoch ist ein Vergleich der Berechnungsergebnisse mit diesen Messungen zulässig, da der Sensor T2R in einem Bereich liegt, wo die Lanzen auch gemäss der uns zur Verfügung stehenden Pläne von Anfang an nahe beieinander waren und daher beim numerischen Modell richtig erfasst wurden. Ferner sind keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Simulationsergebnissen über die gesamte Simulationszeit zu verzeichnen. D.h. die Rechenergebnisse für diesen Punkt sind von der Stärke der Sickerströmung unabhängig. Dies ist auf die Lage des Temperatursensors T2R zurückzuführen, der sich im durch die Spundwände abgeschotteten Bereich befindet. D.h. dass der Gefrierkörper in diesem Bereich ohne nennenswerten Einfluss der Advektion wachsen konnte.

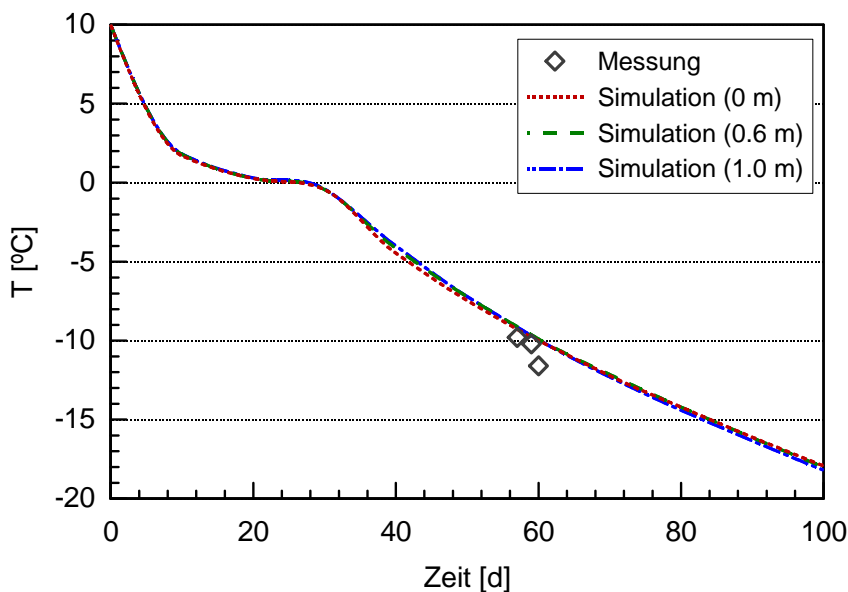


Abb. 78 Zeitlicher Temperaturverlauf des Sensors T2R am Querschnitt A-A

8.3.7 Schlussfolgerungen

Die numerischen Untersuchungen der Gefriermassnahme für den Abschnitt Limmat Ost der Limmatunterquerung ergaben, dass die zusätzlichen Bauhilfsmassnahmen zweckmässig waren und die planmässige Bildung eines Gefrierkörpers im Firstbereich ermöglichten. Dies gilt auch für den Fall einer moderaten Grundwasserströmung. Der vorgesehene Lanzenabstand von 0.8 bis 0.9 m ist zwar üblich, aber das eingesetzte Kälteaggregat wesentlich schwächer als bei späteren Projekten. So wurden beispielsweise bei der U-Bahn Fürth Kälteaggregate mit einer Kühlleistung von 2 x 465 kW für 2000 m³ Gefrierkörper eingesetzt, während bei der Limmatunterquerung 500 kW für zeitweise 7000 m³ Gefrierkörper zum Einsatz kamen. Beim Vorhandensein einer geringen bis moderaten Grundwasserströmung verzögert sich die Schliesszeit gegenüber der ursprünglich geplanten Gefrierzeit von 60 Tagen erheblich. Es ist zu vermerken, dass zur Projektzeit eine gekoppelte thermo-hydraulische Modellierung einer komplexen Gefriermassnahme in einem heterogenen Untergrund nicht möglich war. Daher wurden die Berechnungen für die wärmetechnische Beurteilung der Gefriermassnahmen ohne Berücksichtigung einer Grundwasserströmung durchgeführt.

Die Heterogenität des Untergrundes im strömenden Grundwasser kann sich ungünstig auf den Gefrierkörperwachstum auswirken und den negativen Effekt der Konvektion lokal verstärken. Eine unzureichende Bohrlochgenauigkeit, und damit indirekt ein vergrösserter Abstand zwischen Gefrierlanzen, kann sich ebenfalls negativ auf den Gefrierkörperwachstum auswirken. Im vorliegenden Fall liegt die Vermutung nahe, dass der Schichtübergang die Abweichung nicht gesteuerter Bohrungen verstärkt, mit der Folge, dass an der ungünstigsten Stelle die grösseren Abweichungen der Gefrierlanzen zu verzeichnen sind. Daher müssen horizontale Bohrungen ab einer Tiefe von mehr als 20 m insbesondere im heterogenen Untergrund gesteuert abgeteuft werden, z.B. mittels HDD-Verfahren.

Es ist zu vermerken, dass in den vorliegenden Untersuchungen lokale heterogene glaziale Ablagerungen mit höherer Durchlässigkeit sowie mögliche Hohlräume, die in der Vergangenheit für Wassermühlen ausgehoben wurden, nicht berücksichtigt werden konnten.

TEIL 2

EISLINSENBILDUNG BEIM BODENGEFRIEREN

9 Problematik der Eislinsenbildung

Als frostempfindlich werden diejenigen Böden bezeichnet, welche im gesättigten Zustand beim Gefrieren Hebungen infolge der Bildung von Eislinsen oder Eisschichten erleiden können. Dadurch findet eine Auflockerung statt, so dass es nach der anschliessenden Auftauphase zu grösseren Setzungen und einer Entfestigung kommen kann (Abb. 79). Basierend auf Feldbeobachtungen und Ergebnissen aus Laborversuchen hat das Technical Committee on Frost, TC-8 der International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (International Society of Soil Mechanics and Foundations Engineering ISSMFE TC-8) die Kornverteilung als erstes grobes Klassifikationskriterium zur Einstufung der Frostempfindlichkeit eines Bodens vorgeschlagen (Abb. 80). Demnach gelten siltige Böden als besonders frostempfindlich, dagegen tonige und grobkörnige, d.h. sehr gering durchlässige bzw. gut durchlässige Böden als nicht frostempfindlich. Für eine genauere Einstufung der Frostempfindlichkeit sind Frosthebungsversuche oder Beobachtungen in-situ unerlässlich (ISSMFE TC-8 1989).

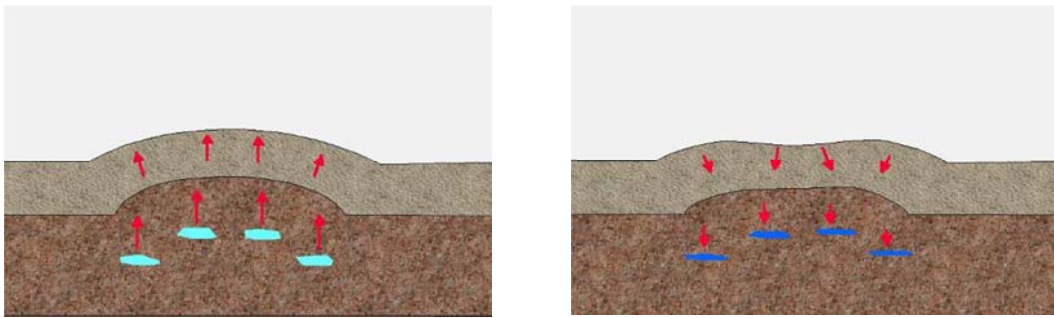


Abb. 79 Schematische Darstellung von Hebungen (links) und Setzungen (rechts) infolge Eislinsenbildung und nachfolgender Auftauphase

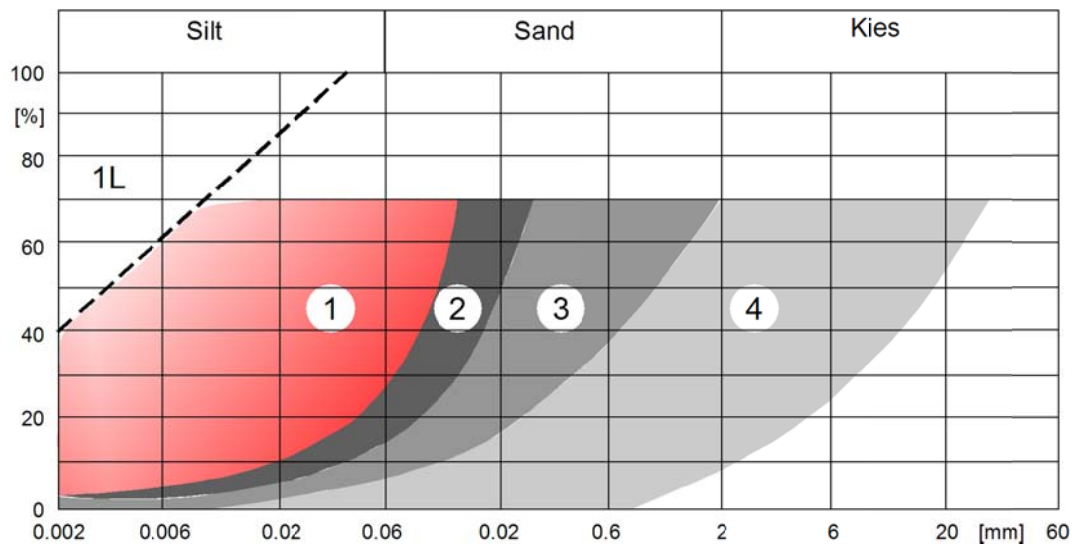


Abb. 80 Frostempfindliche Böden nach ihrer Kornverteilung (TC8 der ISSMFE 1989). Anmerkungen: 1L geringe Frostempfindlichkeit; 1 frostempfindlich; 2, 3 oder 4 nicht frostempfindlich (nur falls die Siebkurve vollständig innerhalb des jeweiligen markierten Bereichs liegend)

Das Problem der Eislinsenbildung im Strassenbau in den entsprechenden Breiteregraden bzw. Höhenlagen ist hinlänglich bekannt und verursacht beachtliche Schäden. Hier sind die Frost- und Tauphasen witterungsbedingt und das Phänomen findet oberflächennah statt, d.h. unter eher geringen Spannungen.

Bei der Anwendung des Gefrierverfahrens wurde dieses Verhalten auch bei tiefer liegenden Tunnels beobachtet, so z.B. beim Milchbuckeltunnel in Zürich (Aerni 1979, Huder 1979, Mettier 1979 und Mettier 1983). Hier wurde, nachdem die Gefrierkörper der ersten Etappe die gewünschten Dimensionen erreicht hatten, trotzdem mit voller Leistung weitergekühlt, um den Gefrierkörper zu erhalten. Das führte dazu, dass der Gefrierkörper weiter wuchs und zu grossen Hebungen (bis 105 mm) führte. In den weiteren Etappen wurde nach der Aufgefrierphase, d.h. während der Haltephase, mit intermittierender Leistung weitergekühlt. Die Kälteanlage wurde so gesteuert, dass im 24 h-Rhythmus Gefrier- und Tauzyklen gefahren wurden. Dadurch konnten die Hebungen deutlich beschränkt werden und zwar bei weitestgehender Konstanthaltung der Geometrie des Gefrierkörpers. Das geringfügige Auftauen und das nochmalige Gefrieren des Gefrierkörpers haben keinen nennenswerten Einfluss auf seine Festigkeit. Im Rahmen der Bahnsteigerweiterung des U-Bahnhofs U6 am Marienplatz in München wurden neben Materialuntersuchungen auch Prognoseberechnungen durchgeführt (Kellner 2008). Zwar erwiesen sich die tertiären tonigen und siltigen Schichten des Untergrundes als frostempfindlich, dennoch konnten – analog zum Milchbuckeltunnel – mögliche Schäden infolge Eislinsenbildung am Rathausgebäude der Stadt München während der Haltephase dank eines intermittierenden Betriebes der Kälteaggregate, in Verbindung mit einem umfangreichen Überwachungsmesssystem, erfolgreich unterbunden werden.

10 Berechnungsmodelle

10.1 Modellvorstellungen

Aufgrund der Anomalie des Wassers und der «porösen» Kristallform des Eises kommt es bei dessen Gefrieren zu einer Volumenzunahme von bis zu 9% (Abb. 81). Bis etwa 1930 wurde dieses Verhalten als Hauptursache für die Eislinsenbildung angenommen. Taber konnte dies eindrucksvoll mit Frosthebungsversuchen im Labor widerlegen (Michalowski & Zhu 2006). Bei diesen Versuchen ersetzte er das Wasser durch Benzol und Nitrobenzol und konnte Frosthebungen erzeugen, obwohl die Dichte dieser Flüssigkeiten beim Gefrieren zunimmt. Es ist zu erwähnen, dass die Ausdehnung des Porenwassers beim Gefrieren immer zu Verformungen führt, allerdings sind diese als gering einzustufen. Dagegen zeigen Bodenproben, bei denen grössere Hebungen während des Gefrierens vorkommen, entweder einen Bereich mit einer Wechsellagerung von dünnen Eisschichten (Mikroeilinsen) und gefrorenem Boden, oder sie lokalisieren eine mächtige Eislinse (Makroeilinse). In Abb. 82 wird der Bereich mit den Mikroeilinsen und einer Makroeilinse an zwei künstlichen Proben nach einem Frosthebungsversuch gezeigt. Beide Proben wurden stets zeitgleich denselben Randbedingungen ausgesetzt. Sie unterscheiden sich geringfügig in ihrer Zusammensetzung (Mischungsverhältnis Sand:Kalkmehl 80:20 bzw. 75:25).

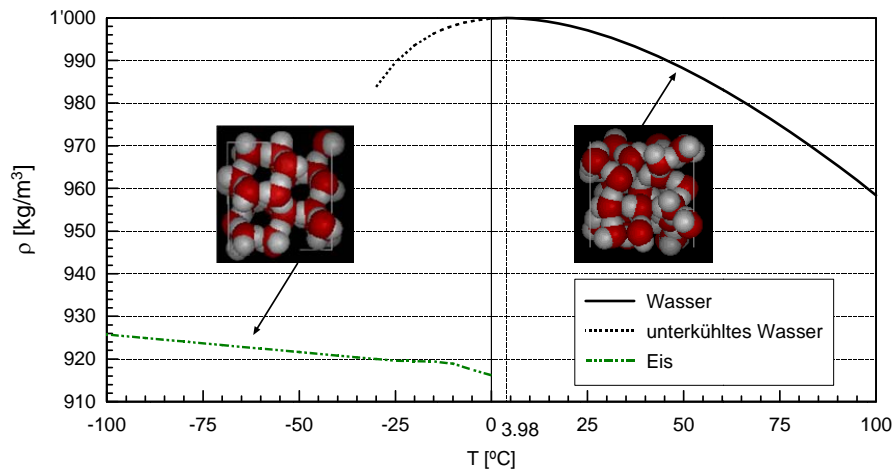


Abb. 81 Dichte von Wasser und Eis in Abhängigkeit von der Temperatur (Quellen: VDI-Wärmeatlas 2006, *engineertoolbox*) und Abbildung der Molekulanordnung von Eis (links) und Wasser (rechts)

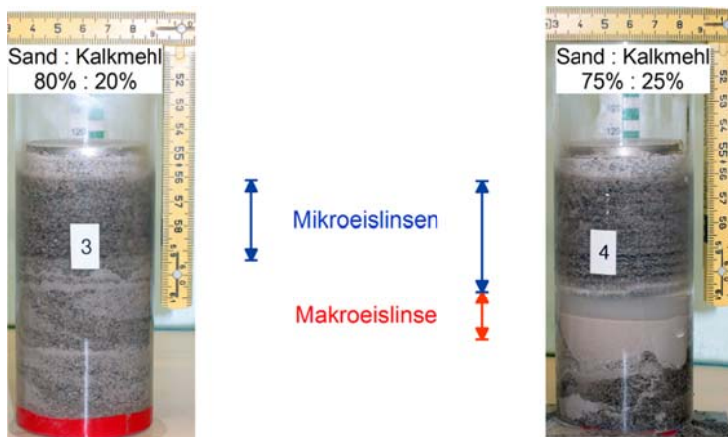


Abb. 82 Proben der eigenen Versuchsserie 4 nach einem Frosthebungsversuch mit einem Bereich von Mikrolinsen und einer Makrolinse. Anmerkung: Ein Auftauen der Makrolinse während des Fotografierens konnte nicht vermieden werden.

Es ist offensichtlich, dass die primären Voraussetzungen für die Eislinnenbildung ein zumindest weitestgehend gesättigter frostempfindlicher Boden mit entsprechend thermischen Randbedingungen sind. Aus Abb. 82 rechts ist leicht erkennbar, dass ausreichend Wasser vorhanden sein muss, welches während der Entstehung der Eislinne nachströmen muss. D.h. es muss sich eine Saugspannung aufbauen, auch bezeichnet als Gefriersog.

Beobachtungen aus Labor- und Feldversuchen bildeten die Grundlage für weitere konzeptionelle Modelle. Einerseits ist bei der Eislinnenbildung von einem Temperaturgradienten auszugehen, der sich infolge eines Wärmetransportes einstellt. Andererseits handelt es sich um ein offenes System, das einen Wassertransport vom ungefrorenen Bereich in Richtung Eislinne zulässt. Wesentliches Merkmal der Böden ist, dass das Porenwasser bei Unterschreitung der Gefrieretemperatur nicht vollständig zu Eis friert (Williams 1976). Aufgrund von Kapillarwirkung und Oberflächenaktivität zwischen Partikel und Wasser stehen Bereiche des Porenwassers unter höherem Druck. Dadurch verschiebt sich lokal der Gefrierpunkt (Kap. 3.1). Demzufolge wird zwar beim Erreichen der Gefrieretemperatur des Wassers T_0 ein wesentlicher Teil des Porenwassers zu Eis frieren, aber nicht alles. Bei einer weiteren leichten Absenkung der Temperatur friert ein Teil des flüssig verbliebenen Wasserfilms zu. Dadurch entsteht ein Wasserdefizit bzw. eine Saugspannung im Porenwasser. Bei entsprechender Durchlässigkeit, Wasserangebot und thermischen Bedingungen wird Wasser aus wärmeren Bereichen nachströmen. Die Eispartikel wachsen, verbinden sich miteinander und bilden so eine Eislinne. Bei weiterem Fortschreiten des Gefrierens wird sich die Gefrierfront in umgekehrter Richtung zum Wärmefluss bewegen. Da das Porenwasser nicht gleichmäßig friert, entsteht ein Bereich mit fingerartigen Gefrierkörperformen, sogenannten «frozen fringes» (Abb. 83). D.h., dass sich die Frostfront bzw. der Bereich, wo die ersten Eiskristalle entstehen, nicht am wärmsten Rande der Eislinne befindet. Die Erstreckung der «frozen fringes» ist u.a. durch den Temperaturgradienten und die Bodenbeschaffenheit begrenzt. Die Zunahme der Tortuosität und der Bindungskräfte zwischen Partikel und Wasserdipolen führen zu einer Abnahme der Durchlässigkeit in Richtung Eislinne (Abb. 83). Es ist zu vermerken, dass der Spannungszustand diese Vorgänge beeinflusst. Grundsätzlich gilt für Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, je höher die Spannung desto höher der ungefrorene Wassergehalt (Williams 1976).

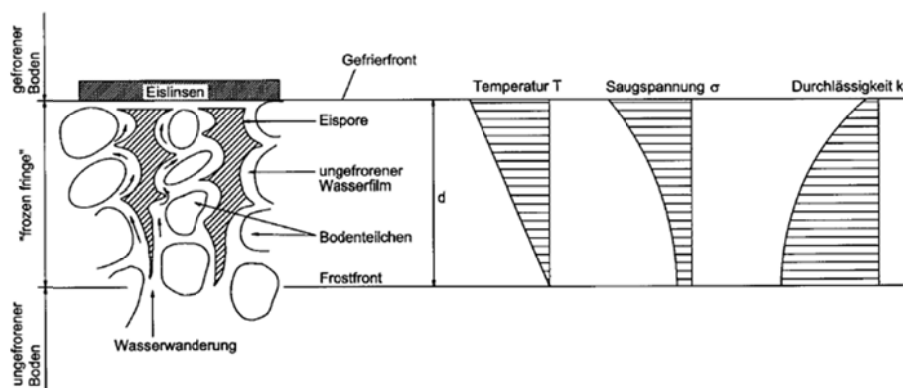


Abb. 83 Schematische Darstellung der «frozen fringes» und ihre Temperatur-, Saugspannung- und Durchlässigkeitsverteilung (Konrad & Morgenstern 1980)

Nach Beginn der Eislinnenbildung kann der weitere Verlauf sehr unterschiedlich stattfinden. Z.B. können Eislinnen wachsen, ohne dass sich dabei die Lage der Frostfront und damit auch die Lage des wärmsten Randes der Eislinnen und der Frostfront verändert, wie z.B. bei einer Makroeislinne (Abb. 82 rechts). Mit fortschreitendem Gefrieren kann sich die Lage der Frostfront dem Wärmefluss entgegen bewegen, so dass das Wachstum einer Eislinne durch Mangel an Wassernachschub jäh gestoppt wird, und sich an einer anderen Stelle eine neue Mikroeislinne bilden kann (Abb. 82 links). Bei entsprechend hohen Temperaturgradienten, wenn sich die Gefrierfront schneller als der Wassernachschub bewegt, kommt es zu einer minimalen oder auch zu gar keiner Eislinnenbildung.

Ferner ist der Einfluss der Spannung zu berücksichtigen. Eine auf die Eislinse wirkende Normalspannung beeinträchtigt die Kristallisation und somit die Eislinnenbildung bzw. verlangsamt sie (Beskow 1935). Basierend auf Ergebnissen aus Frosthebungsversuchen unter Auflast, stellten Penner & Walton (1979) einen exponentiellen Zusammenhang zwischen der Hebungsrage und dem Verhältnis von Auflast zur Gefrieretemperatur fest.

Die Modelle, die alleine auf den oben genannten Mechanismen beruhen, gehören zur Gruppe der Theorie der sogenannten «primären Frosthebung». Die Saugspannungen können mit Hilfe der Kapillartheorie, d.h. mit der Kelvin-Gleichung, beschrieben werden. Experimente zeigten jedoch, dass die beobachteten Hebungsrage grösser waren als diejenigen, die mit Hilfe dieser Theorie berechnet werden konnten, insbesondere bei nicht tonigen Böden (Miller 1972, Loch & Miller 1975).

Ein weiteres Modell zu dieser Gruppe gehörend besagt, dass für die Eislinnenbildung nicht das Kapillarpotenzial, sondern das osmotische Potenzial massgebend ist (Unold 2007). Infolge elektrischer Anziehungskräfte lagern sich Wassermoleküle in einer Hydrathülle dichter und unter höherem Druck an die Bodenpartikel, die sogenannte diffuse Doppelschicht. Durch das partielle Frieren des Wassers in dieser Schicht, analog zum Kapillarbereich, entsteht ein Wasserdefizit und letztlich ein Gefriersog. Es ist zu vermerken, dass nur quellfähige Tonpartikel ausgedehnte Hydrathüllen bilden können, d.h. über ein entsprechendes Quellpotential verfügen. Andere Mineralien würden nur, wenn überhaupt, eine sehr dünne Hydrathülle bilden und die Porenwasserdrücke würden entsprechend gering ausfallen. Unter Umständen würde das schwach gebundene Porenwasser mit dem restlichen Porenwasser gleichzeitig frieren. Hier ist ebenfalls zu erwähnen, dass Watanabe (1999) einerseits Eislinnen mit Mikroglasskugeln als Modellmaterial generieren konnte, und wir andererseits mit einem Gemisch aus Sand und Kalkmehl ebenfalls beachtliche Eislinnen erzeugen konnten (Abb. 82 rechts). Da beide Modellmaterialien über keinem bis zu sehr geringen osmotischen Potenzial verfügen, ist davon auszugehen, dass dieses nicht die massgebende Ursache für die Entstehung von Eislinnen sein kann.

Die sogenannte Theorie der «sekundären Frosthebung» wurde ursprünglich für nicht tonige Böden entwickelt und basiert auf dem Effekt des Wiedergefrierens (thermal regelation). Infolge der Anomalie des Wassers verläuft die Grenzlinie zwischen der flüssigen und der festen Phase im Phasendiagramm mit einer negativen anstatt einer positiven Steigung (Abb. 84). Demzufolge würde ein unter Normalbedingungen gefrorenes Eis bei einer Druckerhöhung schmelzen (Punkte A und B in Abb. 84 links). Nach Abnahme des Druckes ohne Temperaturänderung, würde das vorübergehend aufgetaute Wasser wieder frieren. Dieser Vorgang wird klassischerweise mit dem Eisbalken erläutert, der in der Mitte von einem dünnen Draht umgeben ist, an dem ein Gewicht hängt. Der Draht durchfährt durch den Druck infolge des Gewichtes den Balkenquerschnitt ohne ihn zu trennen. Die im Eis eingeschlossenen Bodenpartikel sind von einer Hydrathülle umgeben. Wenn im Eis ein Temperaturgradient herrscht, verfügt die wärmere Seite der Partikel über mehr ungefrorenes Wasser im Wasserfilm als die kältere Seite. Zum Ausgleich des entstandenen Unterdruckes fliesst Wasser innerhalb der Hydrathülle von der wärmeren zur kälteren Seite. Der Unterdruck ist durch die Clausius-Clapeyron-Gleichung, die das thermodynamische Gleichgewicht zwischen Phasen beschreibt, bei konstantem Temperaturgradienten bestimmbar. Das hat zur Folge, dass auf der warmen Seite eines Bodenpartikels Eis schmilzt und auf seiner kalten Seite wieder gefriert (Regelation). Dadurch wirkt eine resultierende Kraft auf die Bodenpartikel, die dazu führt, dass diese in Richtung warme Seite wandert. Dadurch findet eine Segregation in Form einer Eislinne statt (Michalowski & Zhu 2006). In Abb. 85 links wird schematisch der gefrorene Boden mit «frozen fringe» dargestellt. Das rechte Bild stellt die Segregation während der Eislinnenbildung dar. Die Pfeile zeigen die Bewegungsrichtung des gefrorenen Wassers. Es ist zu beachten, dass sich das Wasser beim Wiedergefrieren ausdehnen wird, bzw. eine Druckerhöhung verursachen wird.

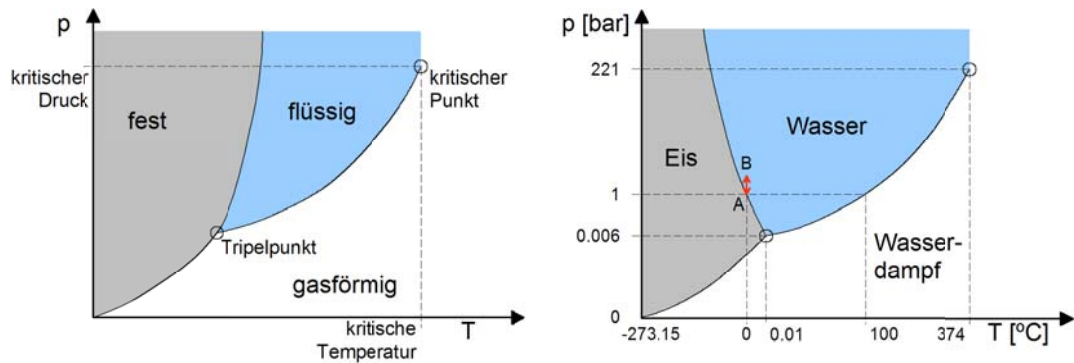


Abb. 84 p - T -Phasendiagramm für einen Stoff ohne Anomalie (links) und für Wasser (rechts)

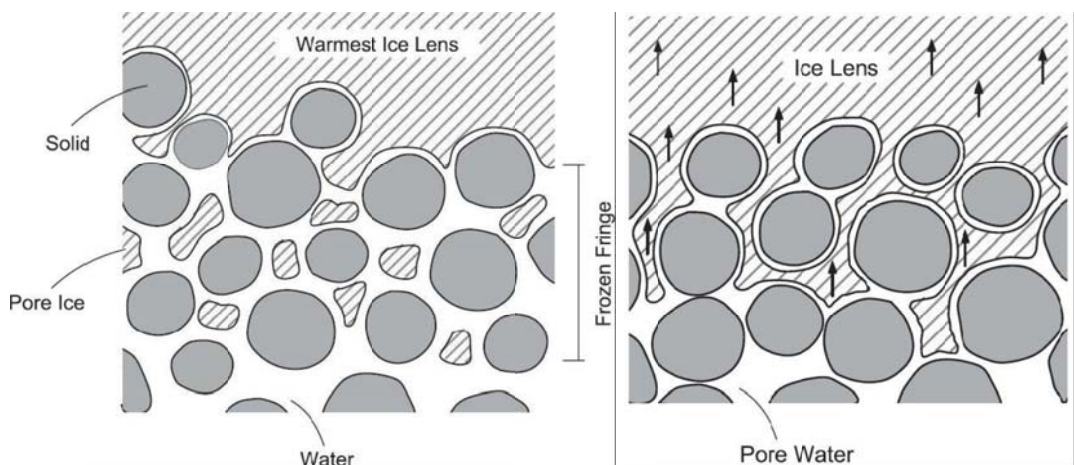


Abb. 85 Schematische Darstellungen: Links des gefrorenen Bodens (Michalowski & Zhu 2006) und rechts der sekundären Frosthebung (O'Neil & Miller 1985)

Aus den oben genannten Ausführungen geht hervor, dass sehr tonige Böden aufgrund der geringen Durchlässigkeit weniger frostempfindlich sind. Bevor Wasser aufgrund des Gefriersoges den Unterdruck ausgleichen kann, frieren die Hydrathüllen vollständig. Sehr grobkörnige Böden bilden kaum Hydrathüllen oder Kapillare, so dass der Temperaturgradient entlang der Partikel nicht ausreicht, um einen entsprechenden Gefriersog zu erzeugen. Siltige Böden stellen eine Bodenmischung zwischen beiden Fällen dar und sind wegen ihrer Hydrathüllen, Kapillaren und Durchlässigkeit sehr frostempfindlich. Bei der Eislinnenbildung können alle genannten Mechanismen aktiviert sein. Allerdings ist bei größeren Hebungen von einem ausgeprägten sekundären Hebungsvorgang auszugehen.

10.2 Numerische Modelle

Einen Überblick der bis Ende 1990 entwickelten Modelle zur theoretischen Untersuchung der Eislinnenbildung findet sich in Kujala (1997). Sie können eingeteilt werden in empirische/semi-empirische, hydrodynamische, «Rigid-Ice», «Segregation Potential» und thermo-hydraulisch-mechanische (THM)--Modelle. Später sind auch thermo-mechanische (TM)-Modell-Modelle vorgeschlagen worden. Nachfolgend werden wesentliche Merkmale der wichtigsten Modelle erläutert.

Die empirischen Modelle basieren auf den Ergebnissen aus Feldmessungen und Laborexperimenten (Arakawa 1966, Knutson 1973). Die semi-empirischen Modelle berücksichtigen zusätzlich einige physikalische Aspekte des Gefrierprozesses (Chen & Wang 1988, Kulieshius 1991). Bei den hydrodynamischen Modellen werden, basierend auf einer Analogie zwischen dem Wassertransport im teilgesättigten und teilweise gefrorenen Boden, der Wärme- und Massentransport gekoppelt (Fukuda 1982). Beim Rigid-Ice-Modell-Modell (Harris 1995, Fowler & Noon 1993) wird der Wärme- und Wassertransport mit Hilfe des Darcy Gesetzes gekoppelt und die Differentialgleichungen werden unter Verwendung des Millers-Kriterium für die Bildung neuer Eislinsen und deren Wachstum ($\sigma_{eff} = 0$) gelöst. Hierbei wird das gebildete Eis starr an die Eislinse angelagert. Das Segregation Potential-Modell von Konrad & Morgenstern (1980, 1981) legt zugrunde, dass der Wasserfluss zur Eislinse und damit die Hebungsrates proportional ist zum Temperaturgradienten im gefrorenen Boden. Der Einfluss von Auflasten auf die Hebungsrates wird durch Multiplikation mit dem exponentialen Ansatz von Penner & Walton (1979) (Kap. 10.1) berücksichtigt (Konrad 1994, 2005).

Die aus theoretischer Sicht fortschrittlichsten Modelle sind die THM-Modell-Modelle, die auf kontinuumsmechanischen und thermodynamischen Grundprinzipien basieren. Hierbei wird das Medium als porös und gesättigt, bestehend aus Korngerüst, Wasser und Eis, angesehen. Die Stoffgesetze werden unter Anwendung der Methode des lokalen thermodynamischen Gleichgewichtes unter Auswahl geeigneter Ansätze für die freie Energie und für das Dissipationspotential abgeleitet. Die THM-Modelle können daher grundsätzlich den Wärme- und Wassertransport, das Frieren, die Bildung von Porenwasserunterdrücken, das Ansaugen des Wassers sowie die Deformation des Korngerüsts beschreiben. De Boer *et al.* (2003) entwickelten und implementierten ein Modell, bei dem das gebundene Wasser allerdings thermodynamisch unberücksichtigt blieb. Ferner wurde die Volumendehnung als Funktion des Wassergehaltes und der Eisbildung ermittelt. Das von Frémond & Mikkola (1991) entwickelte Modell wurde von Mikkola & Hartikainen (2001) überarbeitet und für den 2D Fall numerisch implementiert. Die freie Energie des gebundenen Wassers auf der Oberfläche der Mineralpartikeln wird thermodynamisch beschrieben. In diesem Modell ist diese verantwortlich für den Unterdruck an der Gefrierfront. Beide Modelle betrachten vereinfacht den gefrorenen sowie den ungefrorenen Boden als elastisches Material. Sie wurden durch einen Vergleich mit den Messdaten aus dem Laborexperiment von Smith & Patterson (1989) überprüft. Während das Modell von Frémond & Mikkola eine relativ gute Übereinstimmung zeigte (Mikkola & Hartikainen 2001), waren die Ergebnisse von de Boer *et al.* (2003) nicht zufrieden stellend.

Eine Alternative zu den oben genannten Mikromodellen (THM-Modelle), bei denen die Zielsetzung die exakte Abbildung einzelner Prozesse ist, stellen sogenannte «verschmierte» Makromodelle dar, bei denen ausgewählte Vorgänge bzw. Teilprozesse durch geeignete Stoffgleichungen beschrieben werden können. Aufgrund ihrer relativen Einfachheit sind solche Modelle für ingenieurtechnische Aufgaben von grossem Vorteil gegenüber den Mikromodellen, sofern sie eine ausreichend genaue phänomenologische Beschreibung der Eislinsenbildung liefern. Blanchard & Frémond (1985) schlugen ein thermo-mechanisches (TM)-Modell. Hierbei werden die mikromechanischen Vorgänge bei der Eislinsenbildung in Verbindung mit Frosthebungen über eine Stoffgleichung für die Porositätsrate abgebildet. Die Porositätsratefunktion beschreibt letztendlich die durchschnittliche Volumenzunahme infolge der Eislinsenbildung. Dieses Modell wurde von Michalowski (1993) übernommen, erweitert für einen Fall mit Auflast und später modifiziert (Michalowski & Zhu 2006). Ähnlich zum Segregation Potential Modell wird die Porositätsrate linear vom Temperaturgradienten und exponentiell von der Auflast abhängen. Sie wird nicht nur durch einen Materialkennwert beschrieben, dem sogenannten Segregation Potential, sondern durch die maximale Porositätsrate und durch die Temperatur, unter welcher diese auftritt (Kap. 3.1). Da diese Kennwerte nicht explizit ermittelt werden können, müssen sie durch Kalibrierung auf der Basis von Frosthebungsversuchen bestimmt werden. Dieses Modell wurde implementiert und anhand der Ergebnisse aus den Frosthebungsversuchen von Fukuda *et al.* (1997) kalibriert und überprüft (Michalowski & Zhu 2006). Hierfür wurden Experimente mit konstanten bzw. transienten äusseren Temperaturen herangezogen. Die Modellierungen zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen.

10.3 Modellauswahl

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten vordergründig tunnelbauspezifische Probleme beim Gefrierverfahren im Zusammenhang mit der Eislinsenbildung untersucht werden. Daher sah das Forschungsprogramm die Implementierung eines entsprechenden numerischen Modells vor. Aufgrund der Komplexität der Vorgänge ist zu erwarten, dass einfache Modelle Unzulänglichkeiten ausweisen, während rigorosere Modelle gewiss ihre Vorteile in der Grundlagenforschung haben. Allerdings können sich bei diesen Modellen Nachteile bezüglich ihrer Anwendbarkeit für die praxisorientierte Forschung ergeben. Die nachfolgende Beurteilung der im letzten Kapitel beschriebenen Modelle erfolgt unter Berücksichtigung dieser Aspekte.

Die empirischen und semi-empirischen Modelle berücksichtigen massgebende physikalische Vorgänge nicht oder nicht für den allgemeinen Fall und sind daher nur bedingt einsetzbar. Das hydrodynamische, Rigid Ice und Segregation-Potential-Modell sind eindimensional formuliert worden. Daher ist ihr Einsatzbereich sehr eingeschränkt, Beispiel Strassenbau, und sie scheiden für den mehrdimensionalen Fall des Tunnelbaus aus. Beim Segregation-Potential-Modell wurde der Versuch unternommen den Ansatz für den 3D Fall zu erweitern, jedoch ohne zufrieden stellende Ergebnisse (Nixon 1991, Ishizaki & Nishio 1988).

Die nähere Prüfung des ursprünglich favorisierten THM-Modell von Frémond & Mikola ergab, dass neben der grösseren Schwierigkeit der Bestimmung von unbekanntem Funktionalitäten des ungefrorenen Wassergehaltes und der Durchlässigkeit bezüglich der Temperatur insbesondere im «frozen fringe» Bereich mit weiteren Unklarheiten zu rechnen war, wie dem Zusammenhang zwischen Spannungstensor und Krümmung der Frotsgrenze (Isotherme 0 °C) bezüglich der Wachstumsrichtung der Frostkristalle. Es ist zu erwähnen, dass im Gegensatz zu den im zweiten Teil behandelten Problemen, der Bereich um den Gefrierpunkt eine wesentlich höhere Genauigkeit verlangt. Eine Bestimmung des ungefrorenen Wassergehaltes im «frozen fringe» Bereich wäre mit einer TDR-Sonde nicht mehr möglich, sondern, wenn überhaupt, nur mit aufwändiger Computertomographie. Für die Bestimmung der Durchlässigkeit eines teilweise gefrorenen Bodens gibt es derzeit keine geeignete Versuchstechnik. Aufgrund dieser Probleme wurde die erforderliche Verbesserung des Modells im Hinblick auf die mechanische Interaktion zwischen gefrorenem und ungefrorenem Boden und auf die thermodynamische Beschreibung des Gefriervorganges von gebundenem Wasser als nicht erfolgsversprechend eingestuft. Ferner ist zu erwähnen, dass das THM-Modell für kleine Dehnungen und ein linear elastisches Materialverhalten formuliert wurde und daher je nach Problemfall erweitert werden müsste.

Aufgrund der genannten Probleme wurde das TM Modell von Michalowski & Zhu (2006) für die Implementierung und die anstehenden Modellierungen ausgewählt. Es bildet die Eislinsenbildung unter Berücksichtigung von Auflasten gut nach, zumindest gemessen an den Experimenten von Fukuda et al. (1997). Die Bestimmung der Materialkennwerte ist im Rahmen der Forschungsarbeiten durchführbar. Gegenüber den Mikromodellen ist eine Erweiterung für den 2D Fall wesentlich einfacher. Konkret heisst das, es brauchen hier bezüglich der Bewegungsrichtung von Eislinsen keine Annahmen getroffen werden. Zudem von Vorteil ist, dass es in ein allgemein verfügbares generelles FE Programm implementierbar ist und dadurch aufwändige Programmierarbeiten, wie beim Teil 2 entfallen. Allerdings sind Verbesserungen bezüglich der 2D Implementierung notwendig (Kap. 10.4.3). Die in der Folge beschriebenen Modelle wurden in der Simulationssoftware COMSOL Multiphysics 3.4 implementiert.

10.4 Beschreibung des TM-Modells

10.4.1 Grundlegende Gleichungen

Beim TM-Modell wird das Temperaturfeld durch die Wärmetransportgleichung bestimmt (Gl. 12), in diesem Fall ohne Berücksichtigung der Grundwasserströmungsgeschwindigkeit v_k . Dafür werden die Gleichungen der Spannungsanalyse mitberücksichtigt, durch Terme ergänzt, welche die durch das Eiswachstum bedingten Verformungen erfassen. Diesbezüglich wird die Annahme getroffen, dass sich die Dehnungen im Boden aus einem elastischen Anteil ε_{ij}^e und einem eislinnenbedingten Anteil ε_{ij}^p zusammensetzen:

$$\frac{d\varepsilon_{ij}}{dt} = \frac{d\varepsilon_{ij}^e}{dt} + \frac{d\varepsilon_{ij}^p}{dt} \quad (30)$$

Im Sinne einer ingenieurmässigen Vereinfachung wird angenommen, dass die elastischen Dehnungen linear von den Spannungen abhängen:

$$\frac{d\varepsilon_{ij}^e}{dt} = D_{ijkl} \frac{d\sigma_{kl}}{dt} \quad (31)$$

wobei D_{ijkl} den Elastizitätstensor darstellt. Für die Dehnungen infolge Eislinnenbildung wird angenommen, dass

$$\frac{d\varepsilon_{ij}^p}{dt} = \xi_{ij} \frac{d\varepsilon_{kk}^p}{dt} \quad (32)$$

wobei $d\varepsilon_{kk}^p/dt$ die eislinnenbedingte Volumendehnungsrate ist (d.h. die Geschwindigkeit der Volumenzunahme eines Bodenelementes) und ξ_{ij} den sogenannten Wachstumstensor darstellt. Diese zwei Parameter werden in der Folge besprochen.

10.4.2 Wachstumstensor

Der Wachstumstensor ξ_{ij} steuert die Aufteilung der eislinnenbedingten Dehnungen in den verschiedenen Richtungen. Eislinnen wachsen in der Regel nicht isotrop, d.h. nicht gleichmässig in alle Richtungen, sondern vorwiegend in Richtung des Wärmeflusses bzw. des Temperaturgradienten (kühle Seite). Nur dort, wo sich keine Eislinnen bilden, ist die Volumendehnung isotrop. Dort stammt die Dehnung nur von der Volumendifferenz Wasser-Eis (9% Volumenzunahme). So verhält sich Sand isotrop und je ausgeprägter die Frostempfindlichkeit des Bodens ist, umso grösser ist die Anisotropie (Konrad & Morgenstern 1982, Konrad & Shen 1996). In der Folge betrachten wir alle mathematischen Beziehungen einfachheitshalber in einem Koordinatensystem, welches so definiert ist, dass die x_1 -Richtung parallel zum Temperaturgradient ∇T verläuft. Der Wachstumstensor ist dann folgendermassen definiert:

$$\xi_{ij} = \begin{bmatrix} \xi & & \\ & \frac{1-\xi}{2} & \\ & & \frac{1-\xi}{2} \end{bmatrix} \quad (33)$$

wobei ξ als Anisotropiefaktor bezeichnet wird. Für $\xi = 1$ wächst das Eis nur in Richtung des Temperaturgradienten, d.h. des Wärmeflusses, während für $\xi = 1/3$ der Eiswuchs gleichermassen in alle Richtungen erfolgt (isotropes Verhalten). Mit dem Anisotropiefaktor bzw. dem Wachstumstensor werden die Dehnungen in die drei Raumrichtungen fest vorgegeben. Da Eislinien hauptsächlich in Richtung des Wärmeflusses wachsen, schlagen Michalowski & Zhu (2006) einen Wert von 0.9 vor. Diese Annahme ist zwar plausibel, aber willkürlich. In den numerischen Simulationen (Kap. 11) wurden sowohl Werte von 0.9 als auch 1.0 berücksichtigt.

10.4.3 Die eislinienbedingte Volumendehnungsrate

Die Annahmen betreffend der Rate der Volumenzunahme infolge des Eiswachstums stellen den Kern des Berechnungsmodells dar und basieren auf der ursprünglich von Blanchard & Frémond (1985) vorgeschlagenen und von Michalowski (1993) bzw. Michalowski & Zhu (2006) erweiterten Porositätsratefunktion. In diesen Publikationen wird die Porositätsvergrößerung der Volumenzunahme gleichgesetzt, was nur bei sehr kleiner Porosität n annähernd zutrifft. Deswegen wird hier anstelle der Porositätsrate dn/dt konsequent die Volumendehnungsrate infolge des Porenwachstums $d\varepsilon_{kk}^p/dt$ verwendet und entsprechend die diesbezügliche konstitutive Annahme umgeformt. Der Zusammenhang zwischen Porosität n und Volumendehnung lautet für kleine Dehnungen (lineare Betrachtung):

$$n = \frac{n_0 + \varepsilon_{kk}}{1 + \varepsilon_{kk}} \quad (34)$$

Die Porositätsratefunktion (verwendete Volumendehnungsrate) beschreibt nicht das Wachstum einzelner Eislinien, sondern die Zunahme der Porosität, verursacht durch den Zufluss von Wasser in die Gefrierzone, was zu einem Wachstum von Eis hinter der Gefrierfront führt. Ein solches phänomenologisches Modell muss die wichtigsten physikalischen Prozesse berücksichtigen. Experimente zeigen, dass Eislinien leicht unterhalb der Gefrieretemperatur von Eis stark wachsen, bei sinkender Temperatur nimmt das Wachstum dann ab. Silte zeigen eine hohe Wachstumsrate, allerdings nur in einem engen Temperaturintervall. Tone hingegen zeigen ein schwaches Wachstum in einem breiten Temperaturintervall. Die Temperaturabhängigkeit des Eiswachstums wird mit dem Kern folgendermassen beschrieben:

$$\frac{d\varepsilon_{kk}^p}{dt} = \begin{cases} \frac{d\varepsilon_{kk}^{p,\max}}{dt} \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^2 e^{-\left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^2}, & \text{für } T < T_0 \text{ und } \frac{dT}{dt} < 0, \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \quad (35)$$

wobei T_m die Temperatur bezeichnet, bei welcher die grösste Volumendehnungsrate ($d\varepsilon_{kk}^{p,\max}/dt$) auftritt, und T_0 der Gefrierpunkt des Porenwassers ist. Diese Parameter legen die Temperaturabhängigkeit fest (siehe Abb. 86).

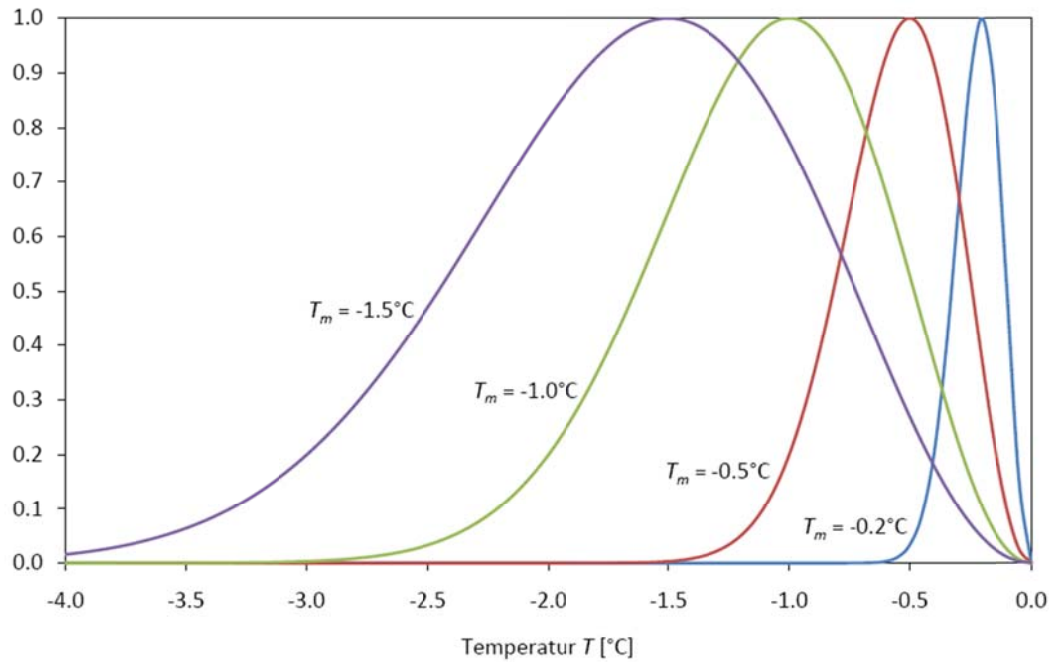


Abb. 86 Einfluss des Parameters T_m auf den Temperaturterm (Hinder 2008)

Nicht nur die Temperatur beeinflusst das Wachstum, auch der Temperaturgradient ∇T , die Porosität n und der Spannungszustand σ_j haben einen massgebenden Einfluss. Diese drei Einflussfaktoren werden bei der maximalen Volumendehnungsrate $d\varepsilon_{kk}^{p,max}/dt$ berücksichtigt:

$$\frac{d\varepsilon_{kk}^{p,max}}{dt} = \dot{n}_m \frac{\nabla T}{g_T} (1-n)^\gamma e^{-\frac{|\sigma|}{\zeta}}. \quad (36)$$

Mit dieser Gleichung wird angenommen, dass die Volumendehnungsrate linear vom Temperaturgradienten ∇T abhängt (\dot{n}_m stellt die unterhalb eines Temperaturgradienten g_T gemessene Volumendehnungsrate dar).

Der vorletzte Term der Gl. 36 bringt den Einfluss der Porosität zum Ausdruck, insbesondere zeigt er, dass die Volumendehnungsrate mit zunehmender Porosität abnimmt (mehr oder weniger rasch je nach Wert der Materialkonstante γ). Erklären kann man diesen Effekt dadurch, dass das Wasser mit wachsendem Abstand der Körner immer schlechter nachfliessen kann. Die Eislinse wächst auf der warmen Seite am stärksten. Dort ist n noch nahezu gleich n_0 . Somit würde die Eislinnenbildung gebremst und schlussendlich gestoppt.

Um eine bessere Übereinstimmung mit Messwerten zu erreichen, haben Michalowski & Zhu (2006) eine alternative Formulierung vorgeschlagen, welche die Existenz einer Grenzporosität n_c postuliert, die das Eislinnenwachstum anstelle des Termes $(1-n)^\gamma$ begrenzt. Bis zum Erreichen der Grenzporosität ist die Volumendehnungsrate positiv und unabhängig von der Porosität. Danach wird sie zu Null gesetzt. Es ist allerdings anzumerken, dass experimentell bislang keine kritische Porosität beobachtet wurde und dass Michalowski & Zhu (2006) für die Nachrechnungen der Experimente von Fukuda *et al.* (1997) einen willkürlichen Wert von $n_c = 0.75$ angenommen haben.

Experimentelle Daten belegen den Einfluss des Spannungszustandes auf die Frosthebung, die verkleinert oder gar verhindert werden kann (Ono 2002). Der Eiskristall wächst in Richtung des geringsten Druckes. Sein Einfluss kann durch den letzten Term der Gl. 36, einem einfachen phänomenologisch hergeleiteten Spannungsfaktor $\exp(-|\sigma|/\zeta)$, berücksichtigt werden (Konrad & Morgenstern 1982, Michalowski 1993, Michalowski & Zhu 2006). Darin stellt ζ eine Materialkonstante dar, während σ eine Vergleichsspannung ist, welche die hemmende Wirkung der Spannungen auf die Eislinnenbildung kontrolliert und gemäss Michaelowski (1993) und Michaelowski & Zhu (2006) als identisch mit dem Mittelwert der Normalspannung angenommen werden darf ($\sigma = \sigma_{kk}/3$). Diese Annahme bedeutet aber, dass der Betrag aller Spannungen zur Hemmung der Eislinnenbildung, unabhängig von deren Richtung bezüglich der Wärmestromrichtung, gleich ist. Dies ist physikalisch wenig plausibel, da beispielsweise hohe transversale Druckspannungen, aber eine geringe normale Druckspannung, nicht wesentlich zur Hemmung der Eislinnenbildung beitragen würden. Dagegen ist im umgekehrten Fall, d.h. bei einer hohen normalen Spannung und relativ geringen transversalen Spannungen, von einer wesentlich stärkeren Hemmung der Eislinnen auszugehen. Um dem Rechnung zu tragen, kann die Vergleichsspannung unter Berücksichtigung der Anisotropie analog zum Wachstumsensor (Kap. 10.4.2) angesetzt werden:

$$\sigma = \eta \sigma_{11} + \frac{1}{2}(1-\eta)(\sigma_{22} + \sigma_{33}), \quad (37)$$

wobei η eine Materialkonstante ist, einfachheitshalber gleich angenommen werden kann wie der Anisotropiefaktor ξ . Für $\eta = 1/3$ erhält man als Sonderfall die Vergleichsspannung nach Michalowski (1993) und Michalowski & Zhu (2006), während $\eta = 1$ das ausgeprägt anisotrope Verhalten bezeichnet.

10.4.4 Sonstige Annahmen

Für den thermischen Teil des Berechnungsmodells werden die Wärmekapazität und -leitfähigkeit des ungefrorenen und des gefrorenen Bodens benötigt. Die spezifische Wärmekapazität wird additiv aus der anteilmässigen Wärmekapazität der Mischungskomponenten errechnet (Gl. 5 und Gl. 6) und die Wärmeleitfähigkeit entsprechend des Ansatzes von Johansen & Frivik (1980) ermittelt (Gl. 7 und Gl. 8). Der für diesen Zweck erforderliche ungefrorene Wassergehalt wird aufgrund des von Blanchard & Frémond (1985) vorgeschlagenen Exponentialansatzes berechnet:

$$w = w_0, \text{ für } T \geq T_0 = 0 \text{ °C}, \quad (38)$$

$$w = w_{res} + (w_0 - w_{res}) e^{\alpha_f (T - T_0)}, \text{ für } T < T_0 = 0 \text{ °C}, \quad (39)$$

wobei α_f und w_{res} von der spezifischen Oberfläche der Bodenpartikel und von der Porengeometrie abhängen. w_{res} bezeichnet den minimalen Wassergehalt, d.h. den residuellen Wassergehalt bei sehr niedrigen Temperaturen und w_0 den maximalen oder anfänglichen Wassergehalt:

$$w_0 = \frac{\rho_w n_0}{\rho_s (1 - n_0)}, \quad (40)$$

wobei n_0 die anfängliche Porosität, ρ_w die Dichte des Wassers und ρ_s die Korndichte sind.

11 Überprüfung des Berechnungsmodells anhand der Versuche von Fukuda

Als Referenz für die Modellüberprüfung wurden die Ergebnisse der Experimente von Fukuda *et al.* (1997) herangezogen, die mit dem sogenannten «TC8 standardisierten Probenmaterial» durchgeführt wurden. Dieses Material besteht zu 60% aus Ton (Fraktion < 0.005 mm) und 37% aus Silt (0.005 – 0.074 mm). Es wurde als Schlamm mit hohem Wassergehalt eingebaut und unter einem Druck von 700 kPa konsolidiert. Der Durchmesser der Proben betrug 100 mm. Ihre Höhe nach der Konsolidation betrug etwa 70 mm. Um einen sogenannten «initial supercooling⁴» zu vermeiden, wurde vor den Frosthebungsversuchen die Temperatur des kälteren Wärmetauschers für 30 min auf -5 °C gesenkt und anschliessend wieder auf die Homogenisierungstemperatur erhöht. Weitere Hinweise auf den Supercooling-Effekt, wie misslungene Experimente ohne Vorgefrieren, Einfluss der Dauer und Temperatur des Vorgefrierens auf misslungene Experimente usw., werden nicht erwähnt.

Bei den Experimenten haben sich zwei Vorgehensweisen als zweckmässig erwiesen, und zwar die sogenannten «Step Freezing» und «Ramped Freezing» Methoden. Der zeitliche Verlauf dieser Versuchsarten wird schematisch in Abb. 87 dargestellt. Im ersten Fall wird die Probe auf einer konstanten Temperatur homogenisiert. Die Temperatur am einen Ende der Probe wird sehr rasch unter den Gefrierpunkt gesenkt und anschliessend konstant gehalten. Die Temperatur am anderen Ende der Probe bleibt während des gesamten Versuches unverändert. Der Versuch wird nach dem Erreichen eines stationären Zustandes oder nach der Überschreitung der versuchsbedingten zulässigen Hebung beendet. Beim Ramped Freezing werden während der Homogenisierung die Temperaturen an beiden Enden der Proben konstant, aber unterschiedlich gehalten, d.h. die Probe weist einen Temperaturgradienten auf. Anschliessend werden die Temperaturen an beiden Enden der Probe mit gleicher Temperaturrate gesenkt, d.h. der Temperaturgradient zwischen beiden Enden bleibt über die gesamte Versuchsdauer konstant. Der Versuch wird spätestens nachdem die gesamte Probe die Gefrieretemperatur erreicht hat beendet.

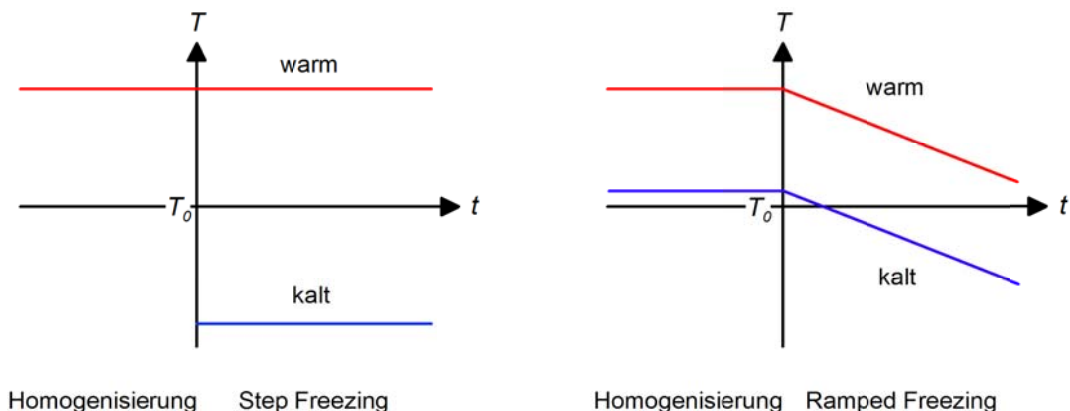


Abb. 87 Verlauf der Temperatur an beiden Enden der Probe beim Step Freezing (links) und beim Ramped Freezing (rechts)

Veröffentlicht wurden die Ergebnisse aus einem Step-Freezing und insgesamt elf Ramped-Freezing Versuche, die als Versuche A bis L bezeichnet werden. Alle Versuche wurden unter einer Auflast durchgeführt, wobei diese zwischen 25 kPa und 600 kPa variierte.

⁴ Unter supercooling versteht man den Effekt der Temperaturabsenkung einer Flüssigkeit unterhalb des Gefrierpunktes, d.h. ohne dass sie zu ihrer festen Phase gefriert.

Die Versuche B bis F wurden unter gleicher Auflast von 25 kPa durchgeführt, aber mit unterschiedlichen Temperaturgradienten. Dagegen wurden die Versuche E und I bis L unter gleichen thermischen Bedingungen, aber unter unterschiedlicher Auflast gefahren. In Tabelle 15 werden die Randbedingungen der Experimente zusammengefasst, hierbei bedeuten T_{warm} und T_{kalt} die Anfangstemperaturen der jeweiligen Wärmetauscher. Bei den Ramped Freezing Experimenten wurde ein konstanter Temperaturgradient von -0.042 °C/h eingestellt. Die Versuche G bis H wurden unter variablen Frostausbreitungsraten durchgeführt, d.h. unter variablen Temperaturgradienten. Diese Experimente werden in den Berechnungen nicht weiter berücksichtigt.

Tabelle 15 Randbedingungen der Experimente von Fukuda et al. (1997)

Experiment	Methode	Auflast [kPa]	T_{warm} / T_{kalt} [°C]
A	Step Freezing	25	5 / -5
B			7 / 0
C			5 / 0
D			4 / 0
E			3 / 0
F			2 / 0
I	Ramped Freezing	150	3 / 0
J		300	
K		400	
L		600	

Ziel der durchgeführten Berechnungen war der Vergleich der Simulationsergebnisse (unter verschiedenen Grundannahmen betreffend Materialverhalten) mit den experimentellen Ergebnissen. Daher wurden das Modell mit veränderter Vergleichsspannung σ_{ξ} (Gl. 37) und das Modell von Michalowski & Zhu (2006), mit der Vergleichsspannung $\sigma_{kk}/3$, unter Berücksichtigung einer kritischen Porosität n_c von 0.75, aber ohne Berücksichtigung des Einflusses der Porosität auf die Porositätsrate (Gl. 36), implementiert. Einfachheit halber werden die Modelle fortan als Modell σ_{ξ} und Modell σ_{kk} bezeichnet. Mangels experimentell gesicherter Erkenntnisse wurde für den Anisotropie-Parameter ξ die einfachste Annahme getroffen: $\eta = \xi = 1$, d.h. das Wachstum der Eislinse findet ausschliesslich in Richtung des Wärmefflusses statt. Für das Modell σ_{kk} wurde auch der Fall mit einem veränderten Anisotropie-Parameter ξ von 0.9 simuliert. Eine ausführliche Beschreibung der Implementierung des Modells sowie der untersuchten Fälle wird in Hinder (2008) dargestellt.

Die Materialkennwerte für das TC8 Material wurden aus Michalowski & Zhu (2006) übernommen. Als Gefriertemperatur T_0 wurde stets 0 °C angesetzt. Das temperaturabhängige E-Modul des gefrorenen Bodens wurde gemäss Ladanyi & Shen (1993) folgendermassen berücksichtigt:

$$E = 11.2 \text{ [MPa]} \quad (\text{für } T > 0^{\circ}\text{C}) \quad (41)$$

$$E = 13.75(-T)^{1.18} \text{ [MPa]} \quad (\text{für } T < -1^{\circ}\text{C}) \quad (42)$$

Im dazwischen liegenden Temperaturbereich, d.h. -1 °C $\leq T \leq 0$ °C, wird der E-Modul durch lineare Interpolation zwischen den Endwerten des Intervalls ermittelt. Eine temperaturunabhängige Querdehnungszahl μ von 0.3 wurde berücksichtigt. Die Porosität n_0 und der Wassergehalt w_0 zu Beginn der Simulation betragen jeweils 0.427 bzw. 0.285. In Tabelle 16 werden die restlichen Materialparameter zusammengefasst. Es ist anzumerken, dass im Gegensatz zum TH-Problem, die Porosität während der Simulation als variabel betrachtet wird. Demzufolge müssen die volumetrischen Anteile der Fraktionen, an

jedem Ort, für jeden Zeitschritt, neu gerechnet werden. Entsprechend müssen gemäss Gl. 8 und Gl. 6 die Wärmeleitfähigkeiten und -kapazitäten je nach Porosität und ungefrorenem Wassergehalt mit der Zeit und Temperatur stets angepasst werden. Die Materialkennwerte w_{res} und α_f zur Beschreibung des ungefrorenem Wassergehaltes gemäss Gl. 39 werden ebenfalls in Tabelle 16 aufgelistet.

Tabelle 16 – Materialkennwerte TC8 Material (nach Michalowski & Zhu 2006)

ρ_s	ρ_{water}	ρ_{ice}	$\lambda_{mineral}$	λ_{water}	λ_{ice}	$C_{mineral}$	C_{water}	C_{ice}	W_f	α_f
	[kg/m ³]			[W/m K]			[J/kg K]		[-]	[°C ⁻¹]
2620	1000	917	1.95	0.56	2.24	900	4180	2100	0.058	0.16

Wie bereits oben erwähnt, wurden drei Modelle berücksichtigt, und zwar das Modell σ_ξ ($\xi = 1$); das Modell σ_{kk} ($\xi = 1$) und das Modell σ_{kk} ($\xi = 0.9$). Bei diesen Modellen müssen die Parameter der maximalen Porositätsrate \dot{n}_m bzw. des Quotienten aus Porositätsrate und Temperaturgradient g_T , die dazugehörige Temperatur T_m sowie der Parameter ζ betreffend des Spannungszustandes durch Kalibrierung bestimmt werden. Diese besteht darin, dass anhand der Ergebnisse eines oder mehrerer Experimente ein Datensatz der genannten Parameter gesucht wird mit denen eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Simulations- und Messergebnissen erzielt werden kann. Die Überprüfung der Kalibrierung erfolgt durch den Vergleich aus Simulationsergebnissen eines anderen Experimentes mit den entsprechenden Messergebnissen. Hierbei müssen die Simulationen mit denselben Parametern gerechnet werden, die mit der Kalibrierung bestimmt wurden. Beim erst genannten Modell muss zusätzlich zu den drei genannten Parametern, der Porositätsparameter $\gamma\beta$ in die Kalibrierung mit einbezogen werden. Die anderen zwei Modelle beinhalten als Vorgabe die kritische Porosität n_c .

Michalowski & Zhu (2006) führten die Kalibrierung des Modells σ_{kk} ($\xi = 0.9$) mit den Messergebnissen eines Ramped Freezing Experimentes durch und zwar das Experiment E. Der Spannungsparameter ζ wurde anschliessend mit Hilfe der Ergebnisse aus den Experimenten I, J, K und L bestimmt. Überprüft wurde die gesamte Kalibrierung anhand der Messwerte der Experimente A (Step Freezing) und B (Ramped Freezing). Die durch Kalibrierung bestimmten Parameter werden in Tabelle 17 zusammengefasst. Die Experimente A, B, E, F und L wurden mit diesem Parametersatz nachgerechnet (Abb. 88).

Tabelle 17 – Kalibrierte Materialkennwerte für die Experimente von Fukuda et al. (1997)

Modell	\dot{n}_m [s ⁻¹]	g_T [°C/m]	T_m [°C]	ζ [MPa]	γ [-]
σ_{kk} ($\xi = 0.9$)*	6.02×10^{-5}	100	-0.87	0.6	-
σ_{kk} ($\xi = 0.9$)**	4.2×10^{-5}	100	-0.75	0.6	-
σ_{kk} ($\xi = 1$)	2.5×10^{-5}	100	-0.6	0.3	-
σ_ξ ($\xi = 1$)	9.5×10^{-3}	100	-1.2	0.25	7.7
* Werte aus Michalowski & Zhu (2006)					
** optimierte Werte					

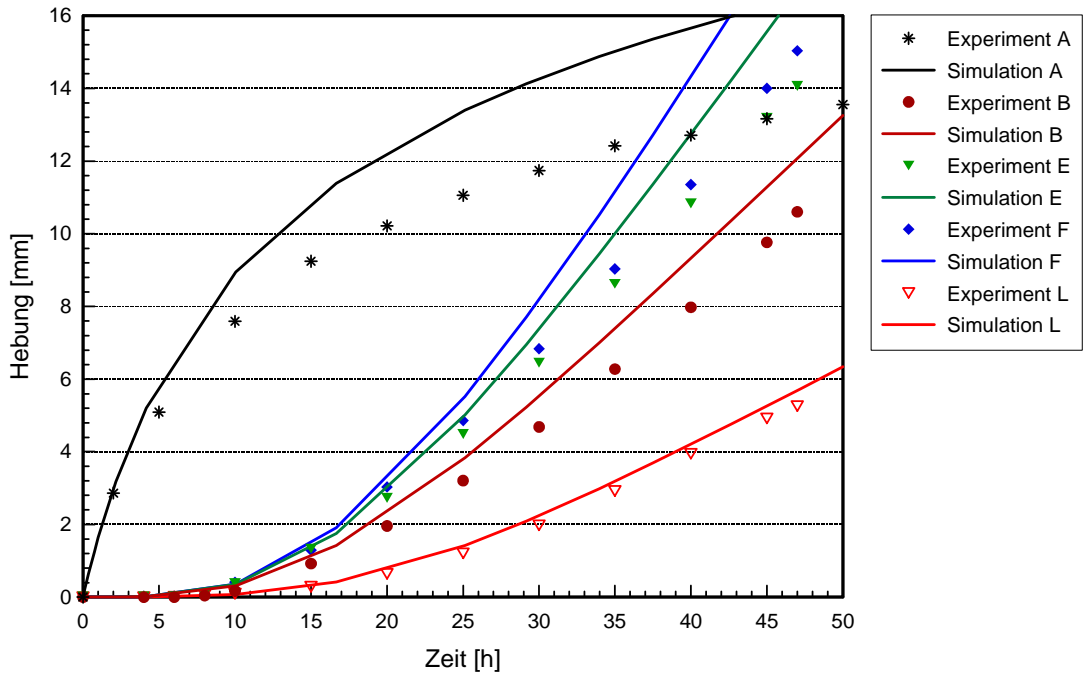


Abb. 88 Modell σ_{kk} ($\xi = 0.9$) – Ergebnisse aus den Experimenten und Simulationen mit Parametern nach Michalowski & Zhu (2006)

Da die Simulationsergebnisse tendenziell die Ergebnisse aus den Experimenten gut wiedergaben, aber nur eine mässige Übereinstimmung aufwiesen, wurde der Parametersatz optimiert, diesmal unter Einbeziehung der Ergebnisse aus dem Experiment A (Tabelle 17). Da die Simulation des Experimentes mit der höchsten Auflast, d.h. Experiment L, die beste Übereinstimmung zeigte, blieb bei der Optimierung der Spannungsparameter ζ unverändert. In Abb. 89 kann eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen den Simulations- und den Messergebnissen festgestellt werden.

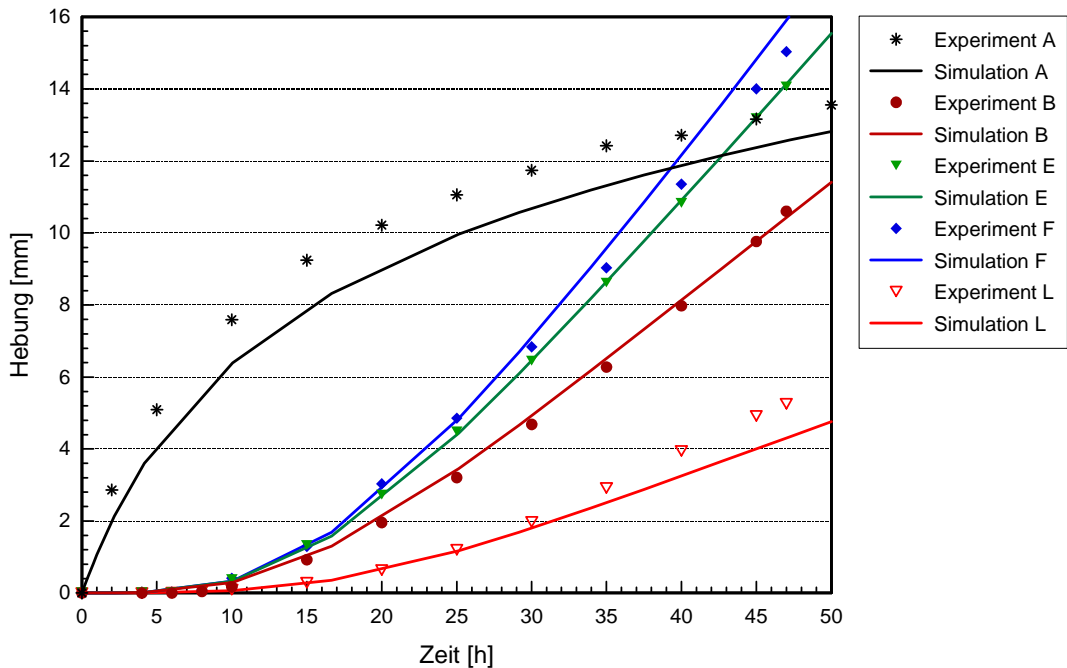


Abb. 89 Modell σ_{kk} ($\xi = 0.9$) – Ergebnisse aus den Experimenten und Simulationen mit optimierten Parametern

Ferner wurde das Modell $\sigma_{kk} (\xi = 1)$, bei dem ein Eiswachstum nur senkrecht zum Wärmestrom stattfinden kann, kalibriert. Die Parameter werden in Tabelle 17 zusammengefasst. Die Ergebnisse der Nachrechnungen der Experimente werden in Abb. 90 dargestellt. Trotz mehrerer Versuche war keine bessere Korrelation als die hier dargestellte möglich. Es ist anzumerken, dass die Simulationsergebnisse der Experimente B, E und F weitestgehend zusammenfallen, d.h. der Einfluss des Temperaturgradienten kann mit dem Anisotropie-Parameter $\xi = 1$ im Zusammenhang mit der Begrenzung der Porosität durch eine kritische Porosität ($n_c = 0.75$) nicht realistisch wiedergegeben werden. Ferner zeigt die Simulation des Experimentes L eine deutliche Überschätzung der hemmenden Wirkung des Spannungszustandes auf die Eislinsenbildung.

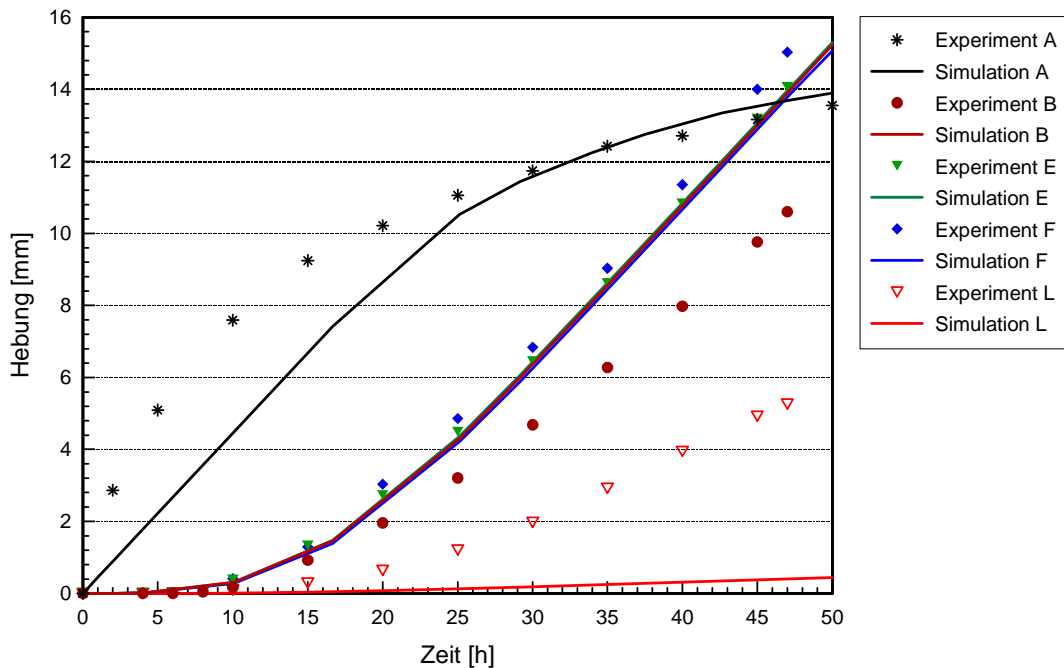


Abb. 90 Modell $\sigma_{kk} (\xi = 1)$ – Ergebnisse aus den Experimenten und Simulationen

Zuletzt wurde das Modell $\sigma_{\xi} (\xi = 1)$ kalibriert. Im Gegensatz zu den zwei vorangegangenen Modellen, wurden hier die Ergebnisse aus dem Step Freezing Experiment, d.h. Experiment A, für die Kalibrierung nicht herangezogen, da dieses für die Validierung des Modells vorgesehen war. Die Parameter werden in Tabelle 17 zusammengefasst. Die Ergebnisse der Nachrechnungen der Experimente mit Ramped Freezing und mit Step Freezing werden in Abb. 91 dargestellt. Alle Simulationen geben den zeitlichen Verlauf aller Experimente tendenziell gut wieder. Bei den Ramped Freezing Experimenten ist eine sehr gute Übereinstimmung erkennbar, während beim Step Freezing die Hebung um etwa die Hälfte überschätzt wird.

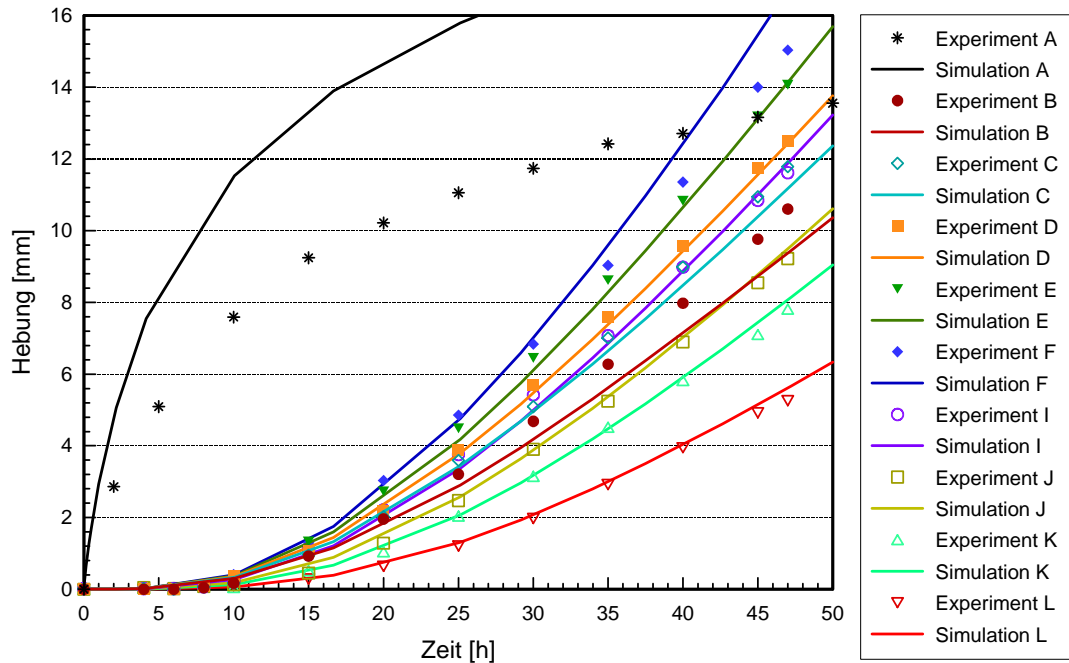


Abb. 91 Modell $\sigma_{\xi} (\eta = \xi = 1)$ – Ergebnisse aus den Experimenten und Simulationen

Aus dem Vergleich der Ergebnisse aus den vier durchgeführten Simulationsserien kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse mit dem Modell $\sigma_{kk} (\xi = 1.0)$, nicht nur die schlechteste Übereinstimmung mit den Messwerten zeigten, sondern wichtige Effekte, wie den Einfluss des Temperaturgradienten oder die hemmende Wirkung des Spannungszustandes gar nicht oder falsch wiedergab. Die Ergebnisse des Modells $\sigma_{kk} (\xi = 0.9)$ mit den von Michalowski & Zhu (2006) vorgeschlagenen Parametern geben grundsätzlich den Verlauf der Hebungen für die simulierten Experimente gut wieder, zeigten aber keine so gute Übereinstimmung, wie sie in der entsprechenden Publikation dargestellt wird (Michalowski & Zhu 2006). Für die mangelnde Reproduzierbarkeit konnte kein Grund gefunden werden. Ein eigens durchgeführte Kalibrierung führte zu einer deutlich besseren Übereinstimmung zwischen Simulation und Messergebnissen, die qualitativ vergleichbar ist mit jener des Modells $\sigma_{\xi} (\xi = 1)$. Da für das letztgenannte Modell die zu berücksichtigende Vergleichsspannung aus physikalischer Sicht plausibler erscheint und dass keine willkürlichen Annahmen bezüglich des Wertes des Anisotropiefaktors oder der kritischen Porosität getroffen werden müssen, wird dieses Modell ($\sigma_{\xi} (\xi = 1)$) als das bestgeeignete für die Modellierung von Hebungen infolge Eislinsenbildung eingestuft.

12 Eigene Versuche zur Eislinsenbildung

12.1 Einleitung

Zusätzlich zur Modellüberprüfung anhand der Daten aus der Literatur sollte die Aussagekraft des Berechnungsmodells aufgrund eigener experimenteller Untersuchungen geprüft werden. Die durchgeführten Untersuchungen werden in diesem Kapitel beschrieben.

Als erstes wurde eine geeignete Bodenmischung als Modellmaterial im Labor ausgesucht (Kap. 12.2). Die Eignung des Modellmaterials wurde anhand von Vorversuchen überprüft (Kap. 12.3). Nach der geotechnischen Charakterisierung des ausgesuchten Modellmaterials wurden eindimensionale Frosthebungsversuche konzipiert und mit dem Ziel durchgeführt, eine Datenbasis für die Kalibrierung und Überprüfung des numerischen Modells an einem Fall mit relativ einfachen Randbedingungen zu erhalten (Kap. 12.4). Allerdings gelang es uns nicht, Eislinsen im Elementversuch zu erzeugen, obwohl die grundsätzliche Eignung und Frostempfindlichkeit des Modellmaterials durch die Vorversuche nachgewiesen wurde. Mangels Eislinsenbildung konnte man auch das Berechnungsmodell nicht überprüfen.

Die experimentellen Arbeiten hätten mit einem 2D Grossversuch abgeschlossen werden sollen. Abb. 92 zeigt schematisch den geplanten Versuch. Ziel dieses Versuches war, die Gewinnung von qualitativen sowie quantitativen Erkenntnissen bezüglich der Eislinsenbildung für einen echt-2D Fall. Es ist zu vermerken, dass bislang in der Literatur keine vergleichbaren Versuche veröffentlicht worden sind. Aufgrund der oben erwähnten und der im Kap. 12.4 näher geschilderten Problematik mit der Bildung von Eislinsen, wurde mangels Erfolgsaussichten auf die Durchführung dieses Grossversuches verzichtet.

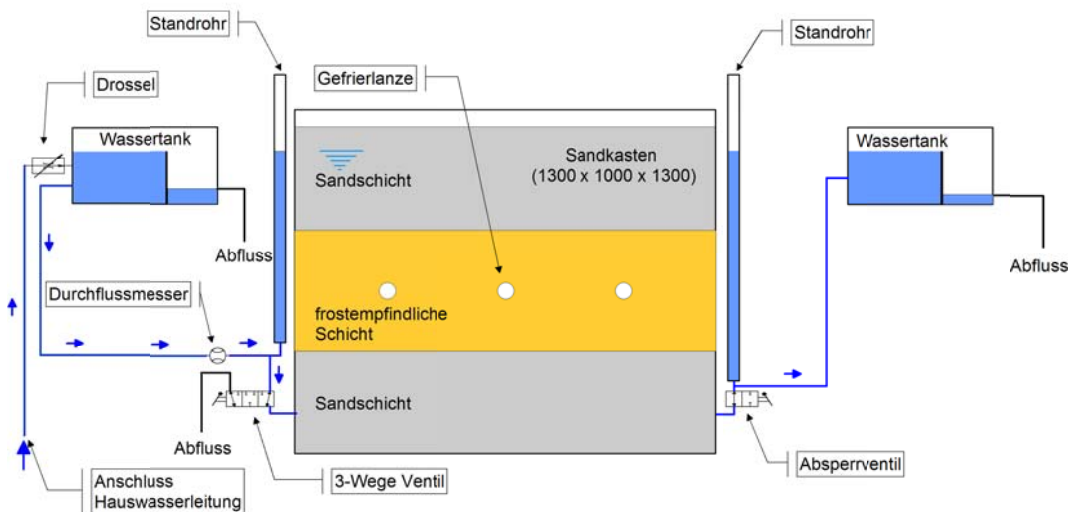


Abb. 92 Prinzipskizze des Grossversuchs für Frosthebungsversuche unter 2D Bedingungen

12.2 Modellmaterial

Bei der Suche nach einem geeignetem Material wurde auf einen natürlichen Boden verzichtet. Eine künstlich hergestellte Mischung, bestehend aus dem Modellmaterial der Untersuchungen in Teil 2 (Weiacher Sand) unter Beimengung von siltigem Feinmaterial wurde bevorzugt, mit dem Vorteil, dass die Kornverteilung einstellbar ist. Im Hinblick auf den Grossversuch war geplant die Mischung im trockenen Zustand einzubauen und mit Hilfe einer vertikalen Durchströmung (von unten nach oben) zu sättigen bzw. damit eine annähernde Sättigung zu erreichen. Damit sollte eine aufwändige Konsolidation eines

feucht eingebauten Materials vermieden werden. Aus diesem Grund sollte kein toniges Feinmaterial beigemischt werden.

Als mögliche Feinmaterialien kamen zwei Gesteinsmehle in Betracht, die in der Landwirtschaft bzw. im Gartenbau eingesetzt werden, und zwar ein Basaltmehl und ein Kalkmehl. Das Basaltmehl trägt die Bezeichnung Eifelgold Urgesteinsmehl und hat einen hohen Quarzgehalt von etwa 41%, während das Kalkmehl der Firma Kalkfabrik Netstal AG als Neckafill 15 bezeichnet wird und zu 95% aus Kalziumkarbonat besteht. Die Kornverteilung – beider siltigen Materialien, des Sandes sowie der untersuchten Mischungen – werden in Abb. 93 bzw. Abb. 94 dargestellt. Die Kornverteilungskurven der Mischungen wurden theoretisch aus den Ergebnissen der Siebanalysen des Sandes und der Gesteinsmehle unter Berücksichtigung der Mischverhältnisse ermittelt.

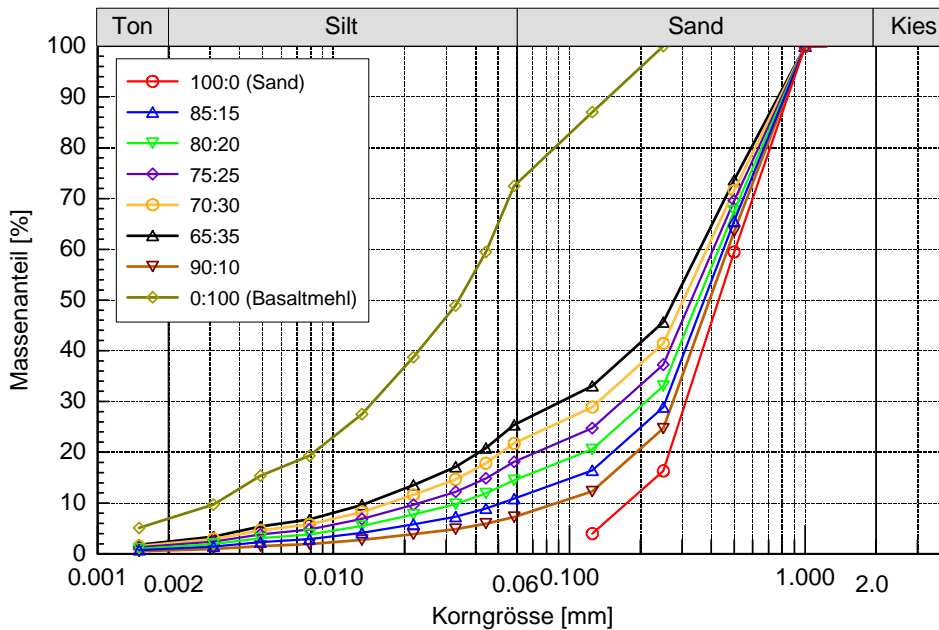


Abb. 93 Kornverteilung der Mischungen aus Sand und Basaltmehl. Die Zahlen geben die Mischverhältnisse in % der Massenanteile wieder

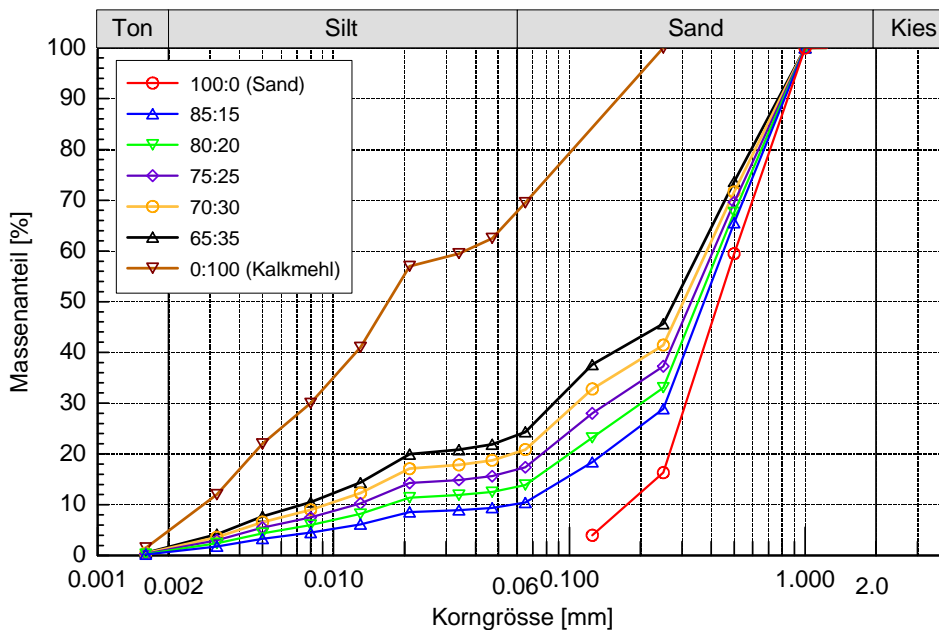


Abb. 94 Kornverteilung der Mischungen aus Sand und Kalkmehl. Die Zahlen geben die Mischverhältnisse in % der Massenanteile wieder

12.3 Vorversuche

12.3.1 Apparatur

Die Vorversuche gehören zur Gruppe der Frosthebungsversuche. Sie dienen in erster Linie der Überprüfung der Frostempfindlichkeit ausgewählter Bodenmischungen und bilden die Grundlage für die Auswahl des Probenmaterials für weitere aufwändigere Versuche wie die Elementversuche und der Grossversuch. Die hierfür verwendete Anlage erlaubt die Durchführung von bis zu sechs Versuchen gleichzeitig. Hierfür werden die Bodenproben in ein Acrylglasrohr mit einem Aussen- und Innendurchmesser von 60 mm bzw. 54 mm eingebaut (Abb. 95 rechts). Die Gesamthöhe des Acrylglasrohres beträgt 160 mm. Auf das obere Ende der Probe wird eine Aluminiumplatte gelegt. Das untere Ende des Rohres ist mit einer Siebplatte aus Kunststoff verschlossen. Die Acrylglasrohre werden seitlich mittels zweier Hartschaumblocke mit Abmessungen 118 mm x 112 mm x 50 mm thermisch isoliert, wobei der untere Block über 30 mm hohe, seitliche Aussparungen verfügt (Abb. 95 links). Diese erlauben den direkten Kontakt des Wassers mit dem Acrylglasrohr im Wasserbad. Die Hartschaumblocke werden mittels einer Boden- und Deckplatte aus PVC und Metallstiften zusammengehalten. Die Bodenplatte ist im Bereich der Aufstandsfläche der Probe siebartig perforiert, um den Wassernachschub in die Probe zu ermöglichen. Das Acrylglasrohr, die Hartschaumblocke und die PVC Platten bilden eine der sechs Versuchseinheiten der Anlage (Abb. 95).

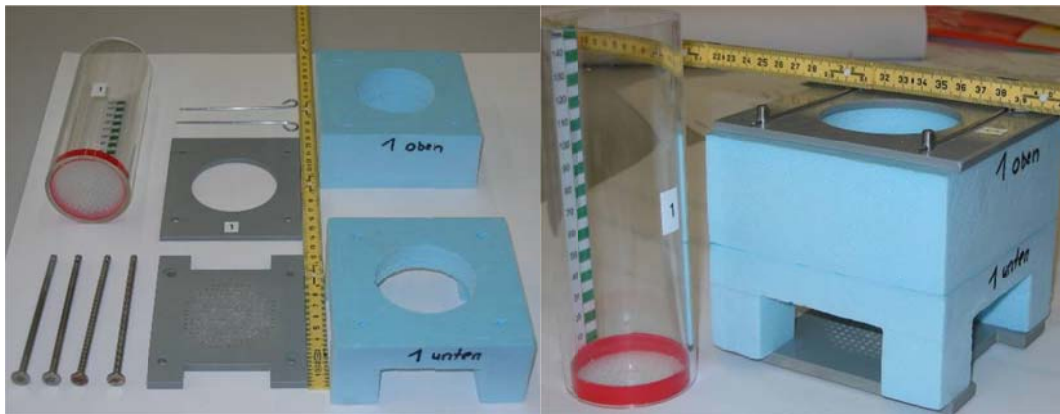


Abb. 95 Zerlegte Versuchseinheit (links) und zusammengebaute (rechts) für die Vorversuche

Die Versuchsanlage ist nach dem Zwei-Kammern-Prinzip konzipiert, d.h. die Proben werden an deren Enden unterschiedlichen thermischen Randbedingungen ausgesetzt. Durch die seitliche thermische Isolierung der Proben sind diese Versuche eindimensional, Wärmestrom und Eiswachstum erfolgen parallel zur Probenachse. Die nachfolgend in Klammern angegebenen Zahlen entsprechen der Nummerierung in Abb. 96. Die Versuchsanlage besteht aus einem thermisch isolierten Aussenrahmen (11). Innerhalb dieser befindet sich ein Wasserbad (4) mit einer Wasserzuleitung (5) und einem Abfluss (7). Die Wassertemperatur und damit die Temperatur am unteren Ende der Proben (1) werden mittels Thermostat und Magnetventil (6) kontrolliert. Der Temperaturfühler des Thermostates befindet sich im Wasserbad. Die Lufttemperatur, und damit die Temperatur am oberen Ende der Proben, wird durch einen Wärmetauscher (9), der an ein Kühlaggregat (8) angeschlossen ist, gekühlt. Dieser wird auch über einen Thermostat geregelt, dessen Temperaturfühler sich im Luftraum der Anlage befindet. Für eine gleichmässige Temperaturverteilung erfolgt die Umwälzung der Luft mit Hilfe eines Lüfters (10). Die Hebungen der Proben werden mit mechanischen Messuhren (2) erfasst. Sie sind an einem Gestell befestigt, deren Messtaster auf die Aluminiumplatte am oberen Ende der Probe drücken. Die Lufttemperatur in der Kammer (12), am oberen (13) und am unteren Ende der Probe (14) wird mittels Temperatursensoren des Typs PT-100 aufgenommen. Der Rahmen wird mit einer Abdeckung mit Doppelglasfenster abgeschlossen, so dass die Ableseung der Messuhren ohne ein Öffnen der Anlage erfolgen kann.

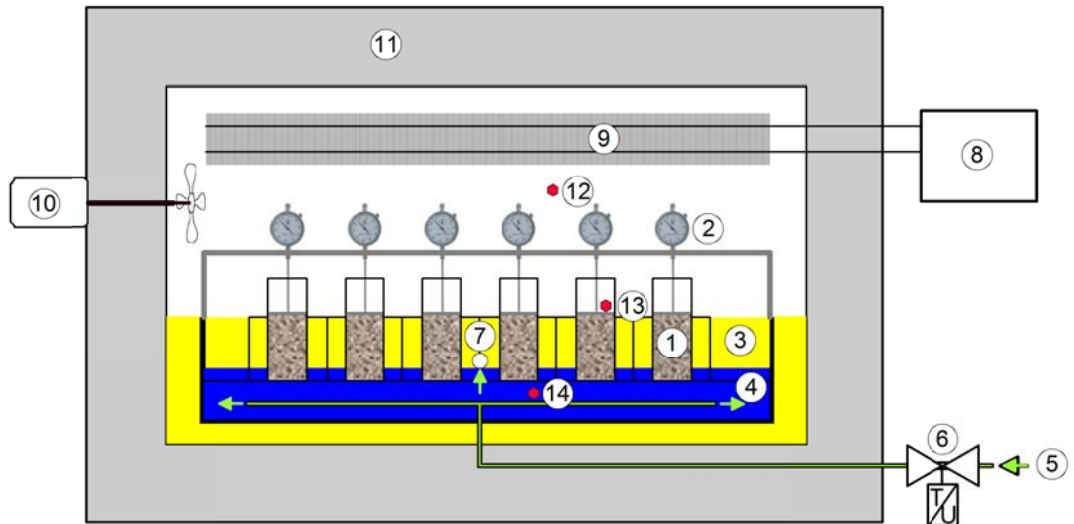


Abb. 96 *Prinzipische Skizze (oben) und Bild (unten) der Versuchsanlage für die Vorversuche: Probe in Versuchseinheit (1), Messuhr an Gestell befestigt (2), Wärmedämmung (3), Wasserbad (4), Wasserzufuhr (5), Magnetventil (6), Wasserabfluss (7), Kühlaggregat (8), Wärmetauscher (9), Lüfter (10), Aussenrahmen und Wärmedämmung (11), Sensor T-Luft (12), Sensor T-Luft-Probe (13) und Sensor T-Wasser (14)*

12.3.2 Ablauf

Das entsprechend der gewünschten Beimengungsverhältnisse trocken und homogen gemischte Probenmaterial wird lagenweise bis zu einer Höhe von 90 bis 100 mm in die Acrylglasrohre gefüllt. Nach jeder Lage wird das Material im Rohr von Hand mit einem Metallstößel verdichtet. Vor dem eigentlichen Frosthebungsversuch sollen die Proben einen hohen Sättigungsgrad aufweisen. Eine Teilsättigung nur durch Kapillarwirkung hat bei Probetests kein zufrieden stellendes Ergebnis geliefert. Daher werden die gefüllten Acrylglasrohre in einem Exsikkator gesättigt. Anschliessend werden die Versuchseinhei-

ten zusammengebaut (Abb. 95) und in der Anlage an der entsprechenden Position platziert (Abb. 96). Nach Positionierung der Messuhren und der Temperatursensoren wird die Versuchsanlage verschlossen. Vor jedem Versuch wird gewartet, bis sich die Temperatur in der Anlage stabilisiert hat. Der Versuch wird durch Einstellung der Sollwerte beider Thermostate und durch Einschalten des Kühlaggregates gestartet. Hierbei wird die Wasserbadtemperatur höher sein und die Lufttemperatur niedriger als die Gefrieretemperatur. Eine Änderung dieser Temperaturen während des Versuches ist nicht vorgesehen. Mit entsprechender Regelmässigkeit werden die Messuhren und die Temperatursensoren abgelesen. Dieser Typus von Frosthebungsversuch entspricht den in Kapitel 11 beschriebenen «Step Freezing», wobei aus versuchstechnischem Grund eine Homogenisierung auf eine konstante Temperatur vor der Gefrierphase nicht möglich war.

12.3.3 Ergebnisse

Zur Auswahl des geeigneten Feinmaterials und des entsprechenden Mischungsverhältnisses wurden fünf Versuchsserien mit jeweils sechs Proben mit Gemischen aus beiden Gesteinsmehlen durchgeführt, wobei in den ersten zwei Serien Basaltmehl und in den letzten drei Kalkmehl beigemischt wurde. In Abb. 97 werden die über die Zeit gemessenen Hebungen und Temperaturen der Serien 1 bis 5 graphisch zusammengefasst. Die Skala der Hebungen wurde auf der linken Achse und die der Temperaturen auf der rechten Achse dargestellt. In der Legende stellen die in Klammern angegebenen Zahlen die Mischverhältnisse (Sand:Silt) der jeweiligen Proben in Massenprozenten dar. Die Bezeichnung der Proben, d.h. P1 bis P6 entspricht der Position der jeweiligen Probe in der Anlage und zwar in Abb. 96 von links nach rechts gesehen. Die Lage der Temperatursensoren T-Wasser, T-Luft und T-Luft Probe ist ebenfalls in Abb. 96 angegeben. Letzteres wurde für die Versuche der ersten Serie zwischen zwei Acrylglasröhren platziert. Bei der Serie 1 betrug die Wasser- und die Lufttemperatur etwa 3 °C bzw. -6 °C und bei den restlichen Serien etwa 9 °C bzw. -10 °C. Die Versuchsdauer lag zwischen 9 und 31 Tagen. Nach Abschluss einer Versuchsserie wurde das Kühlaggregat ausgeschaltet, die Abdeckung der Anlage entfernt, die Proben samt Acrylglasröhren einzeln aus den Schaumblöcken entfernt und fotografiert (Abb. 98 bis Abb. 102). Der letzte Vorgang erwies sich bei den Proben mit Makroeislinen (Abb. 82) als besonders problematisch, da diese sehr rasch auftauten.

Bei den meisten Proben kam es zur Eislinienbildung, allerdings erwartungsgemäss nicht bei den Proben mit geringem Feinanteil, beispielsweise P1 (85:15) und P6 (100:0) in Serie 1, P1 (90:10) und P2 (85:15) in Serie 2, P1 (90:10) und P2 (85:15) in Serie 3, P1 (90:10) in Serie 4. Bei einer Anfangsporosität in der Grössenordnung von 35% wird das Frieren des Porenwassers zu einer Volumendehnung von etwa 3.3% führen. Da die Deformationen eindimensional erfolgen, können bei einer Probenlänge von 100 mm Hebungen bis 3.3 mm auf das Frieren des Porenwassers zurückgeführt werden. Ausser bei den Proben der Serie 1 (Abb. 98) konnten sich bei einigen Proben der restlichen Serien Makroeislinen bilden, und zwar bei P5 (70:30) und P6 (65:35) der Serie 2 (Abb. 99), P4 (75:25) und P5 (70:30) der Serie 3 (Abb. 100), P4 (75:25) und P5 (70:30) der Serie 4 (Abb. 101) und P3 (65:35) der Serie 5 (Abb. 102). Es ist zu vermerken, dass der Temperaturunterschied zwischen beiden Enden der Proben bei der Serie 1 etwa 9 °C betrug, während er bei den anderen Serien etwa doppelt so gross war, d.h. 19 °C. Bei den Proben P5 (70:30) und P6 (65:35) der Serie 2, P5 (70:30) der Serie 3, P4 (75:35) und P5 (70:30) der Serie 4 sowie P2 (70:30) und P3 (65:35) der Serie 5 wurde der Anschlag der Messuhr erreicht und daher werden die Messwerte nach dem Anschlag nicht dargestellt. Entgegen den Erwartungen waren die zwei Proben, die keine nennenswerten Hebungen zeigten, P6 (65:35) der Serie 4 und der Serie 5, solche mit hohem Feinanteil. Bei allen restlichen Proben kam es in unterschiedlichem Mass zur Mikroeislinienbildung. Der zeitliche Verlauf der Hebungsrates war insbesondere bei den Proben, die Makroeislinen bildeten, nahezu konstant, während bei den meisten restlichen Proben eine eher monoton abnehmende Tendenz erkennbar ist.

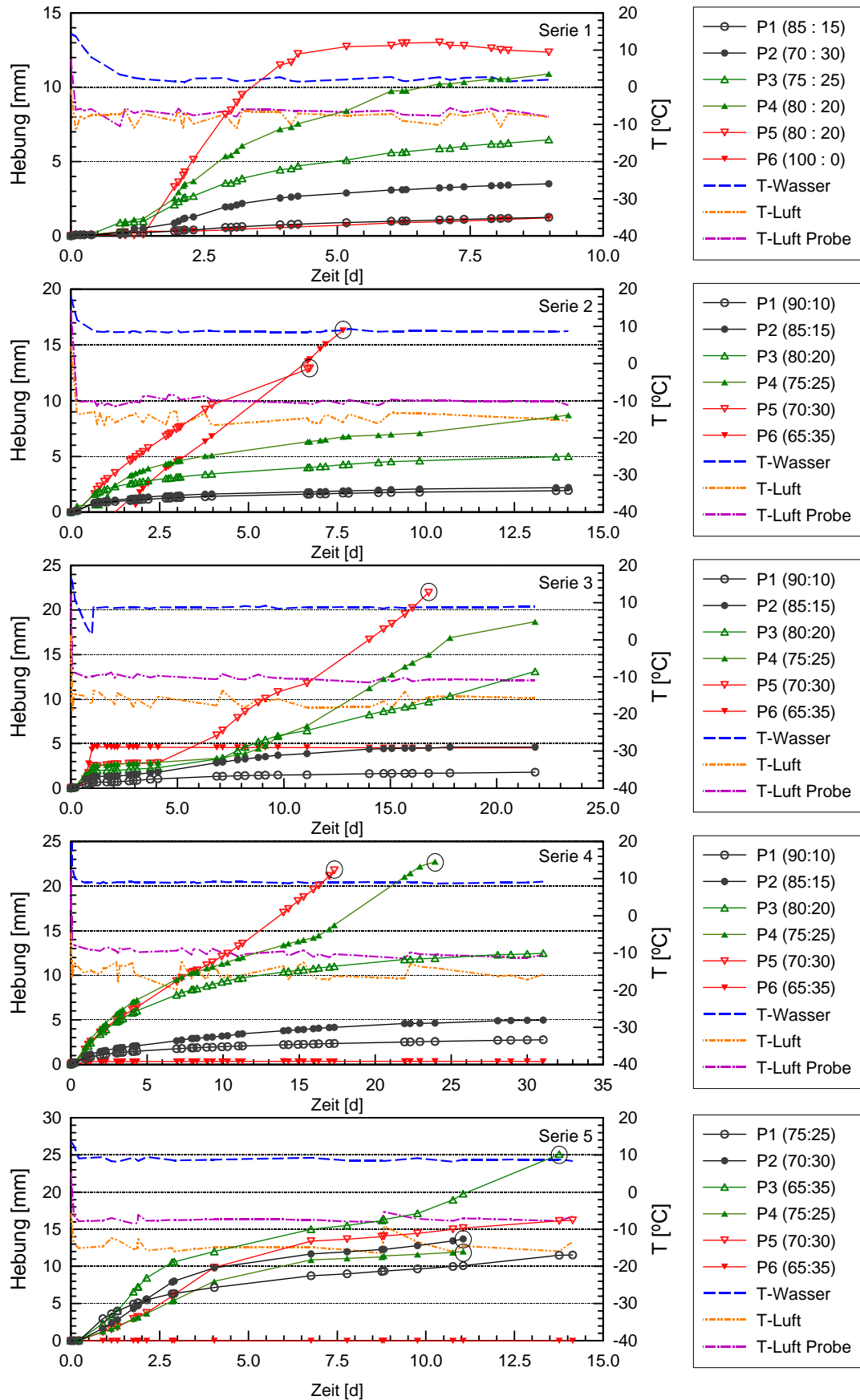


Abb. 97 Vorversuche – Ergebnisse der Serien 1 bis 5. Bei den mit einem Kreissymbol markierten Versuchen fuhr die Messuhr gegen den Anschlag



Abb. 98 Proben der Serie 1 nach dem Frosthebungsversuch (Mischungen aus Sand und Basaltmehl)



Abb. 99 Proben der Serie 2 nach dem Frosthebungsversuch (Mischungen aus Sand und Basaltmehl)



Abb. 100 Proben der Serie 3 nach dem Frosthebungsversuch (Mischungen aus Sand und Kalkmehl)



Abb. 101 Proben der Serie 4 nach dem Frosthebungsversuch (Mischungen Sand und Kalkmehl)



Abb. 102 Proben der Serie 5 nach dem Frosthebungsversuch (Mischungen Sand und Kalkmehl)

Zusammenfassend konnte nach der Durchführung der ersten fünf Serien festgestellt werden, dass beide untersuchten Feinmaterialien für die Frosthebungsversuche grundsätzlich geeignet sind. Die Mischverhältnisse mit einer Zugabe zwischen 20% und 30% Gesteinsmehl führte, ausser bei nur einer Probe der Serie 1 (P2), immer zur Eislinsenbildung. Bei einer geringeren Beimengung ist es erwartungsgemäss unwahrscheinlich und bei der höchsten untersuchten Beimengung von 35% kam es sogar vor, dass nicht einmal Hebungen infolge des Frierens des Porenwassers zu verzeichnen waren. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Verdichtung der Probe in trockenem Zustand nicht ausreichend war. Da die Ergebnisse der Frosthebungsversuche mit beiden Feinmaterialien ähnlich waren, wurde aus hygienischen Gründen, d.h. um die Feinstaubbildung von Quarz zu vermeiden, das Kalkmehl bevorzugt. Eine Beimengung zwischen 25% und 30% wurde für die nachfolgenden Elementversuche als optimal erachtet.

12.4 Elementversuche

12.4.1 Apparatur

Die verwendete Technik und die Anlage bei den Vorversuchen haben zwar den Vorteil, dass man zeitgleich bis sechs Proben testen kann, und dass aufgrund der relativ geringen Abmessungen, die Proben mit wenig Aufwand vorbereitet werden können, aber sie weisen als wesentliche Nachteile die sehr begrenzte Flexibilität bei der Einstellung der Randbedingungen und die moderate Messgenauigkeit auf. So können beispielsweise in der Regel nur konstante Temperaturen an den Enden der Proben eingestellt werden. Eine Messung der Temperatur entlang der Probe ist nicht möglich, ebenso wenig die allfällige Aufbringung von Auflasten. Da das TM-Modell anhand von Versuchsergebnissen kalibriert und überprüft werden soll, musste ein entsprechender Frosthebungsversuch konstruiert werden.

Die Versuchsapparatur für die Elementversuche besteht aus einem Acrylglasrohr mit 150 mm und 140 mm Aussen- bzw. Innendurchmesser. Die nachfolgend in Klammern angegebenen Zahlen entsprechen der Nummerierung in Abb. 103. Das Rohr (1) schliesst wasserdicht unten an einen zylindrischen Aluminiumblock, der als Wärmetauscher ausgebaut ist (4). Dieser Block verfügt ebenfalls über entsprechende Bohrungen und Anschlüsse, die ein Durchströmen der Probe (8) und die Platzierung eines Temperatursensors (11) ermöglichen. Auf diesem liegt eine 5 mm starke Filterplatte (3) aus gesintertem Kupfer. Auf das obere Ende der Probe (2) wird ebenfalls eine Filterplatte (3) aufgelegt, gefolgt von einem zylindrischen Aluminiumblock, der auch zum Wärmetauscher ausgebaut ist (5) und der über eine Bohrung zum Platzieren eines Temperatursensors (12) verfügt. Dieser Aluminiumblock kann sich – im Gegensatz zum unteren – entlang des Acrylglasrohres frei bewegen. Er verfügt über eine seitliche Aussparung zur Aufnahme eines PTFE-Bandes (9) zwecks Minimierung der Reibung zwischen Block und Rohr. Zusätzlich wird der Kontaktbereich zwischen Rohr und Wärmetauscher mit Vaseline eingefettet. Bei einer Probenhöhe von 210 mm ermöglichen die Abmessungen der Apparatur Hebungen von bis zu 40 mm. Der untere Wärmetauscher und das Acrylglasrohr werden mit einer PVC-Platte (6) und einem -Ring (7), mittels drei Metallstangen zusammengehalten.

Das Acrylglasrohr verfügt seitlich über 14 Bohrungen zur Platzierung von Temperatursensoren (10). Die Bohrungen sind gleichmässig auf zwei entgegen gesetzten Geraden der Mantelfläche verteilt, jedoch versetzt (Abb. 104 rechts). Damit ist die Erfassung der Temperatur der Probe entlang ihrer Höhe alle 15 mm möglich. Alle in den Wärmetauschern und im Acrylglasrohr eingesetzten Temperatursensoren sind vom Typ PT-100. Auf dem oberen PVC-Ring wird ein induktiver Wegaufnehmer (13) befestigt, dessen Messtaster auf den oberen Wärmetauscher drückt, um damit die Hebungen der Probe zu erfassen. Der untere Wärmetauscher wird über eine flexible Silikonleitung an eine Mariotteflasche angeschlossen (Abb. 104 links), die auf einer elektronischen Hochpräzisionswaage ruht.

Die Wärmedämmung der Probe besteht aus drei Lagen Neopren (14) mit einer Stärke von je 20 mm, gefolgt von zwei 75 mm starken Lagen Steinwolle (15) (Abb. 104 Mitte). Der Raum innerhalb des Acrylglasrohres und oberhalb des oberen Wärmetauschers wird mit einem Styroporzylinder (16) ausgefüllt. Der restliche Bereich bis zur Oberkante des PVC-Ringes wird mit Steinwolle (17) thermisch isoliert. Zwecks Reduzierung eines radialen Wärmestroms trotz massiver Wärmedämmung (Abb. 103) wird der Elementversuch in einer aus Hartschaumplatten gebauten Klimakammer platziert (Abb. 105). Die Luft in der Kammer wird mittels Kühlaggregat und Lüfter gekühlt und gleichmässig verteilt.

Die Wärmetauscher sind jeweils an ein elektronisch geregeltes und programmierbares Kühlaggregat (18) und (19) angeschlossen. Als Kühlflüssigkeit kommt Ethanol zum Einsatz. Für die Versuche ist vorgesehen, dass der untere bzw. der obere Wärmetauscher stets Temperaturen oberhalb bzw. unterhalb des Gefrierpunktes aufweisen. Die Datenerfassung erfolgte konventionell via PC.

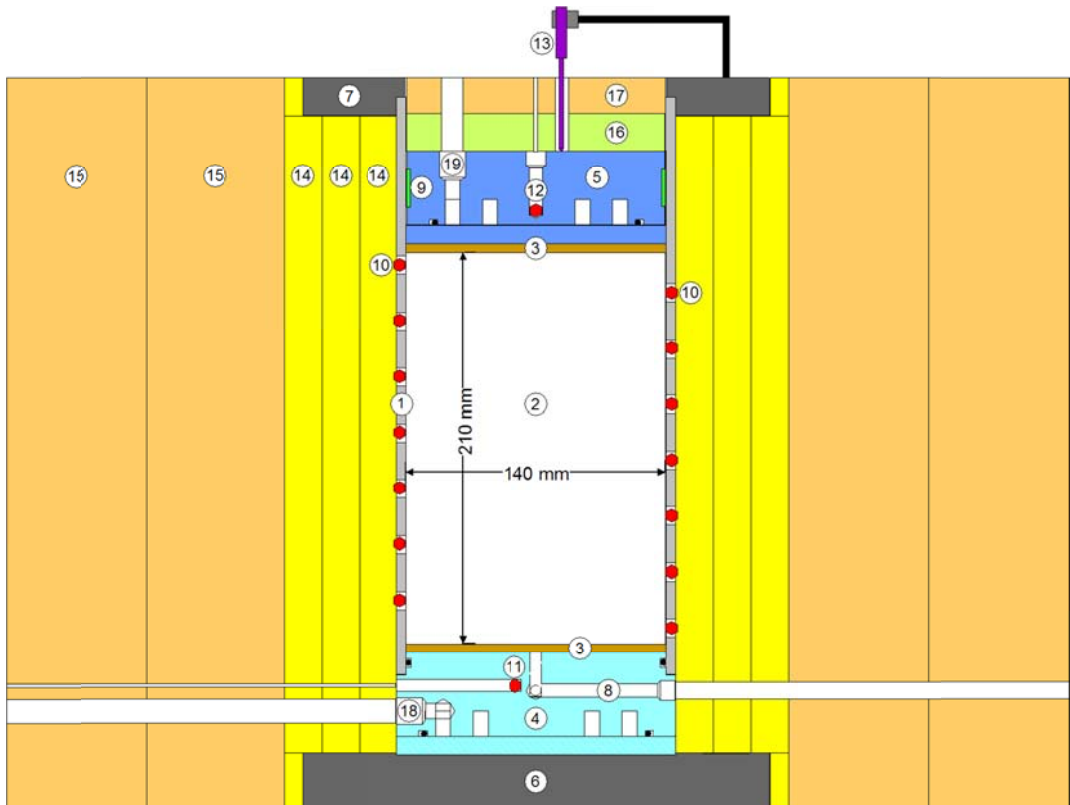


Abb. 103 Masstäbliche Prinzipskizze der Versuchsapparatur für die Elementversuche: Acrylglasrohr (1), Probe (2), Filterplatten (3), Wärmetauscher warm (4), Wärmetauscher kalt (5), PVC-Platte (6), PVC-Ring (7), Wasserleitung (8), PTFE-Band (9), Temperatursensoren (10 bis 12), induktiver Wegaufnehmer (13), Neoprenlagen (14), Lagen aus Steinwolle (15), Styroporplatte (16) und Steinwolle (17)



Abb. 104 Mariotteflasche und Präzisionswaage (links), Elementversuch mit Wärmedämmung in der Klimakammer (Mitte) und Elementversuch ohne Wärmedämmung (rechts)



Abb. 105 Klimakammer und Kühlaggregate

12.4.2 Ablauf

In dem Acrylglasrohr wird, analog zu den Vorversuchen, die trockene Bodenmischung lagenweise eingebaut und von Hand mit einem Holzstößel verdichtet. Zwecks Ermittlung der Gesamtmasse der Probe wird das pro Lage eingebaute Bodenmaterial gewogen. Die Masse der jeweiligen Lagen liegt zwischen 400 und 500 g. Gefüllt wird das Acrylglasrohr bis zu einer Höhe von 210 mm (Abb. 103). Das obere Ende der Probe wird planiert und die obere Filterplatte eingelegt. Nach der Einfettung mit Vaseline des Acrylglasrohres im Bereich oberhalb der Filterplatte folgt die Platzierung des Elementversuches in der Klimakammer. Schliesslich werden die Wasserleitung an die Mariotteflasche, die Wärmetauscher an die jeweiligen Kühlaggregate sowie die Temperatursensoren, Waage und Wegaufnehmer an den PC angeschlossen.

Die Mariotteflasche gewährleistet eine Wasserzufuhr unter konstantem Druck. Sie wird mit demineralisiertem und entlüftetem Wasser gefüllt. Das Druckniveau wird entsprechend der Oberkante der Probe während der Versuche eingestellt. Mittels der Hochpräzisionswaage wird die in die Probe einströmende Wassermenge erfasst. Die Sättigung beginnt mit dem Öffnen des Ventils an der Mariotteflasche und wird via PC protokolliert. Nach dem Abschluss der Sättigung, nachdem keine nennenswerte Wassermenge aufgenommen wird, werden der obere Wärmetauscher und der Styroporblock eingesetzt, der Wegaufnehmer an der Halterung platziert und befestigt, der verbleibende Zwischenraum mit Steinwolle verfüllt und schliesslich die zwei Lagen Steinwolle angebracht. Nach Überprüfung der Waage und aller Sensoren am PC wird die Klimakammer verschlossen.

Um definierte Randbedingungen zu gewährleisten, wird vor jedem Frosthebungsversuch eine Homogenisierungsphase mit dem Ziel gestartet, in der gesamten Probe eine konstante Temperatur zu erreichen. Dafür werden die Kühlaggregate beider Wärmetauscher auf die gleiche Temperatur oberhalb des Gefrierpunktes eingestellt. Es wird solange gewartet bis alle Temperatursensoren an der Probe diesen Wert aufweisen.

Der eigentliche Versuch beginnt mit der Einleitung der Gefrierphase, welche je nach Versuchstyp unterschiedlich erfolgen kann («Step Freezing» bzw. «Ramped Freezing» Methoden, Kap. 11).

12.4.3 Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden drei Elementversuche (Versuche E1 bis E3) durchgeführt und zwar mit Mischungen im Verhältnis 70%:30% (E1 und E2) und 75%:25% (E3). Die Homogenisierungsphase des ersten Versuches E1 wurde mit einer moderaten Wärmedämmung, nur bestehend aus den Neoprenlagen (Abb. 103) und ohne Klimakammer gestartet, d.h. unter einer Raumtemperatur von etwa 21 °C. Die Temperatur der Kühlaggregate beider Wärmetauscher wurde auf 5 °C eingestellt. Nach 16,4 Stunden stellte sich ein stationärer Zustand ein, der allerdings keine konstanten Temperaturen innerhalb der Probe aufwies (Abb. 106). Diese variierten zwischen 10,8 °C in der Mitte und 9,3 °C gegen den Enden der Probe. Nach Aufbringung der ersten Lage Steinwolle (Abb. 103) konnte die Situation zwar verbessert werden, aber ohne ein zufriedenstellendes Ergebnis zu erreichen. Die Temperatur variierte etwa zwischen 7,8 °C in der Mitte und 7,1 °C gegen die Enden der Probe. Die Homogenisierung der Temperaturen durch die Anbringung der zweiten Lage Steinwolle (Abb. 103) fiel moderater aus, so dass auf eine weitere Wärmedämmung verzichtet wurde. Nach etwa 40 Stunden Homogenisierungszeit und vor dem Start der Gefrierphase lagen die Temperaturen der Sensoren in der Probe etwa zwischen 7,1 °C und 6,5 °C. Zwar lagen sie damit nur 0,6 °C auseinander, aber immer etwa 1,5 °C höher als die Temperatur der Wärmetauscher.

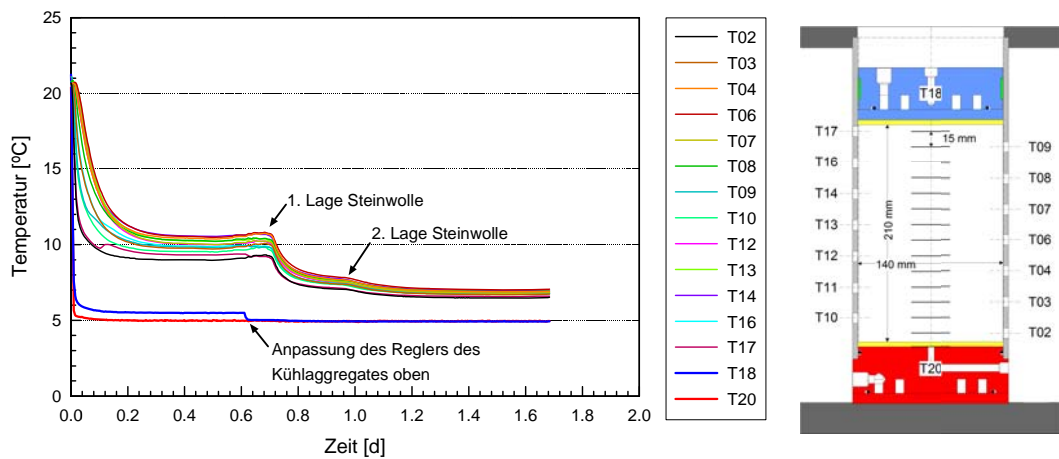


Abb. 106 Elementversuch E1 – Temperaturverlauf während der Homogenisierungsphase (links) und Lage der Temperatursensoren (rechts)

Um den Einfluss der unvollkommenen seitlichen Wärmedämmung zu minimieren, wurde vor der Durchführung des Versuches E2 die in Kap. 12.4.1 beschriebene Klimakammer zusammengebaut. Nach Sättigung der Probe wurde analog zum Versuch E1 die Apparatur für den Versuch in der Klimakammer vorbereitet, einschliesslich der massiven Wärmedämmung bestehend aus den zwei Lagen Steinwolle. Nach Verschliessen der Klimakammer wurde ihre Lufttemperatur auf 7 °C und analog zum Versuch E1 wurde die Temperatur der Kühlaggregate der Wärmetauscher auf 5 °C eingestellt. Der zeitliche Verlauf der Homogenisierungsphase wird in Abb. 107 zusammengefasst. Die günstigere Umgebungstemperatur erlaubt ein gleichmässiges Temperaturfeld. Der grösste Temperaturunterschied betrug nur 0,2 °C und konnte zwischen den Sensoren an den Enden der Probe festgestellt werden und zwar 5,1 °C beim Sensor T2 und 4,9 °C beim Sensor T17.

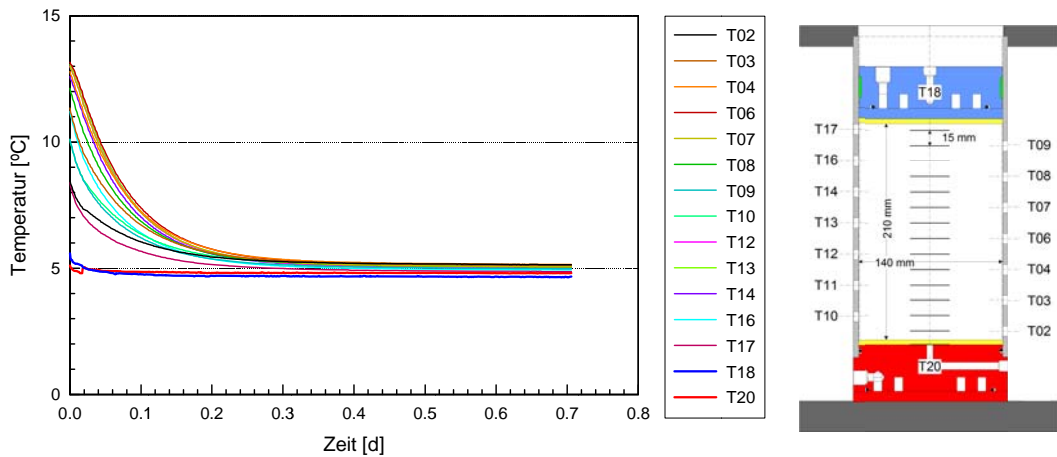


Abb. 107 Elementversuch E2 – Temperaturverlauf während der Homogenisierungsphase (links) und Lage der Temperatursensoren (rechts)

Beim dritten Elementversuch wurde abweichend von den vorangegangenen Versuchen die Sättigungsphase mit der Homogenisierungsphase teilweise zusammengelegt, d.h. etwa nach dem ersten Tag Sättigung wurde die Homogenisierungsphase unter gleichen thermischen Randbedingungen wie beim Versuch E2 gestartet (Abb. 108). Die Sättigungsphase wurde diesmal auch mit dem PC aufgenommen (Abb. 109). Die Probe verzeichnete eine ungewöhnlich hohe Wasseraufnahme. Das Ventil der Mariotteflasche wurde kurzzeitig geschlossen, um ein Leck im Bereich zwischen der Mariotteflasche und der Klimakammer auszuschliessen (Abb. 109). Innerhalb der Klimakammer wurde auf eine Dichtigkeitsprüfung verzichtet. Einerseits nahm die Wasseraufnahme monoton ab, das deutete auf eine Selbstabdichtung und andererseits hätte das Öffnen der Klimakammer die Homogenisierungsphase massiv gestört.

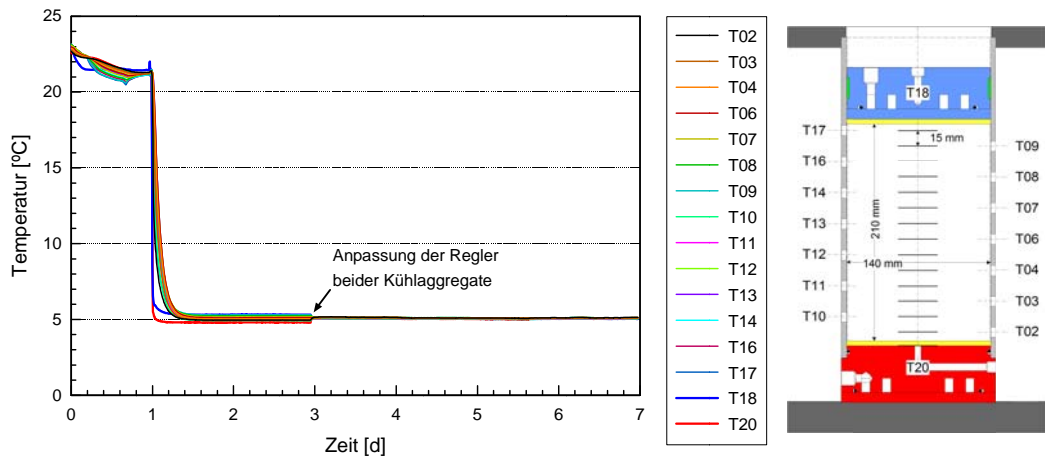


Abb. 108 Elementversuch E3 – Temperaturverlauf während der Homogenisierungsphase (links) und Lage der Temperatursensoren (rechts)

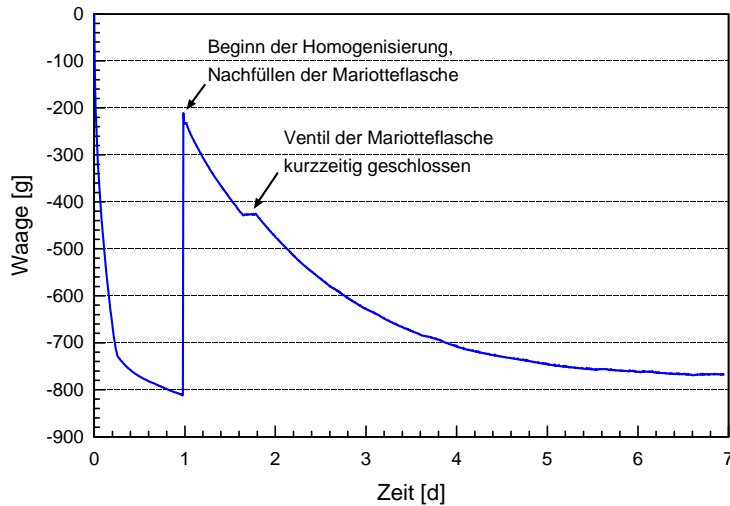


Abb. 109 Elementversuch E3 – zeitlicher Verlauf der Sättigungsphase

Bei diesem Elementversuch betrug der grösste Temperaturunterschied nach zwei Tagen Homogenisierung ebenfalls wie bei Versuch E2 0.2 °C und konnte auch zwischen den Sensoren an den Enden der Probe festgestellt werden und zwar 5.0 °C beim Sensor T2 und 5.2 °C beim Sensor T17. Daraufhin wurde die Temperatur der Regler beider Kühlaggregate angepasst. Nach weiteren vier Tagen Homogenisierung, gegen Ende der Sättigungsphase, betrug die Temperatur an den Sensoren T2 und T17 5.1 °C bzw. 5.0 °C .

Bei den Elementversuchen E1 und E3 wurden die eingebaute Trockenmasse sowie die von der Probe nach der Sättigungsphase aufgenommene Wassermenge gemessen. Die Kornwichte des Sandes betrug 2.67 g/cm^3 und die des Kalkmehles 2.72 g/cm^3 . Aus diesen Daten lassen sich die Porosität n_0 und der Wassergehalt w_0 nach der Sättigungsphase nachrechnen sowie auch der Wassergehalt bei angenommener vollkommener Sättigung $w_{Sr=1}$. Es ist zu vermerken, dass aufgrund des Lecks, der Wassergehalt für E3 nicht repräsentativ ist. Die Kennwerte werden in Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 18 – Bodenkennwerte vor dem Versuch

	Volumen [cm ³]	Trocken- masse [g]	n_0 [-]	$w_{Sr=1}$ [-]	Wasser [g]	w_0 [-]
E1	3248	6122	0.302	0.160	847	0.138
E3	3233	6216	0.288	0.150	1347	0.217

Alle drei Elementversuche wurden nach der Step-Freezing-Methode durchgeführt. Beim Versuch E1 wurde zum Start des Versuches die Temperatur des oberen Wärmetauschers auf -5 °C gesenkt. In Abb. 110 wird der an den Sensoren gemessener Temperaturverlauf während des Versuches E1 zusammengefasst und in Abb. 111 wird der zeitliche Verlauf der von der Probe aufgenommenen Wassermenge und die Probenhebung dargestellt. Ersteres wurde indirekt aus der Massenänderung der Mariotteflasche und Letzteres über den Wegaufnehmer ermittelt. Da sich nach etwa drei Tagen Versuchsdauer ein nahezu stationärer Zustand eingestellt hatte, aber weiterhin keine nennenswerten Hebungen zu verzeichnen waren, wurden die Temperaturen der Wärmetauscher in unterschiedlichem Masse verändert, um eine kurzzeitige Bewegung der Gefrierfront zu erzwingen. D.h. die jeweiligen Temperaturen wurden auf 10 °C bzw. -18 °C eingestellt und nach etwa fünf Stunden auf etwa 20 °C bzw. -20 °C . Durch die letzte Veränderung sollte der höhere Temperaturgradient die Bildung von Makroeislinsen begünstigen (Kap. 10.1), allerdings erfolglos.

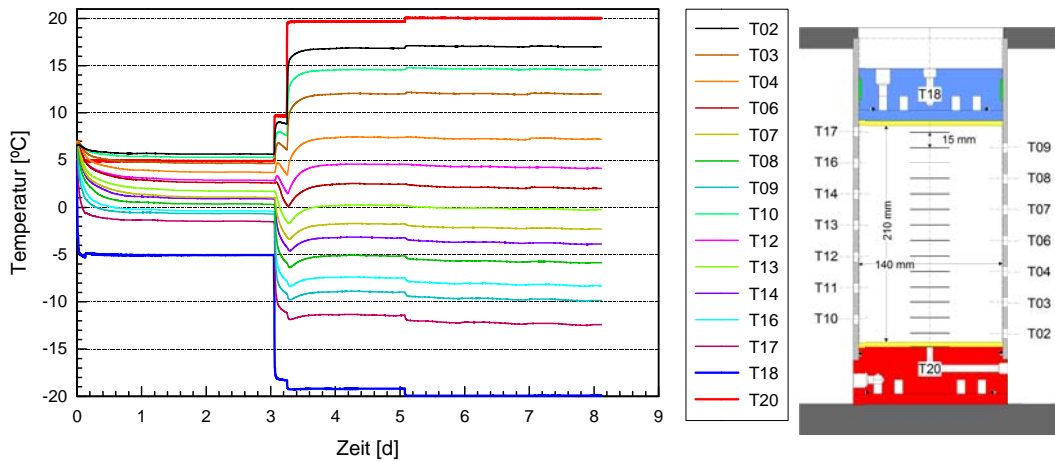


Abb. 110 Elementversuch E1 – Temperaturverlauf während des Frosthebungsversuches (links) und Lage der Temperatursensoren (rechts)

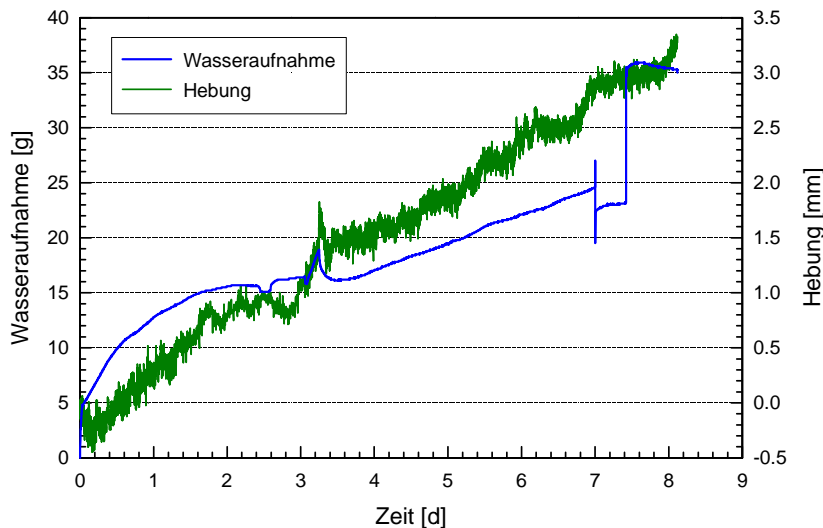


Abb. 111 Elementversuch E1 – zeitlicher Verlauf der aufgenommenen Wassermenge und der Probehebungen während des Frosthebungsversuches

Der Elementversuch E2 wurde unter gleichen Randbedingungen bezüglich der Wärmetauscher wie bei Versuch E1 durchgeführt, allerdings, dank der Klimakammer, mit einer gleichmäßigeren Temperaturverteilung innerhalb der Probe. Die entsprechenden Diagramme mit den Zeitverläufen der Messungen werden in Abb. 112 und Abb. 113 dargestellt. Nach etwa 2,5 Tagen stellten sich nahezu stationäre Zustände ein, dennoch wurde der Versuch fortgesetzt. Nach etwa acht Tagen konnte eine Fehlfunktion des Reglers in der Klimakammer festgestellt werden. Während der Zeit der Fehlfunktion sank die Temperatur in der Klimakammer bis auf -30 °C , mit der Folge, dass die Wasserzuleitung und fast die gesamte Probe gefror. Lediglich der Bereich zwischen Sensor T10 und unterer Wärmetauscher blieben ungefroren (Abb. 112). Nach Behebung des Fehlers wurde der Versuch fortgesetzt. Bis auf einen Wasserverlust von etwa 35 g zeigten alle Sensoren nach etwa einem Tag den gleichen Messwert wie vor der Störung. Nach etwa 18 Tagen, und um eine gleichmäßige Verschiebung des Temperaturfeldes entlang der Probenachse zu erzwingen, wurde die Temperatur beider Wärmetauscher um 3 °C gesenkt. Diese Veränderung blieb hinsichtlich der Bildung von Eislinen erfolglos.

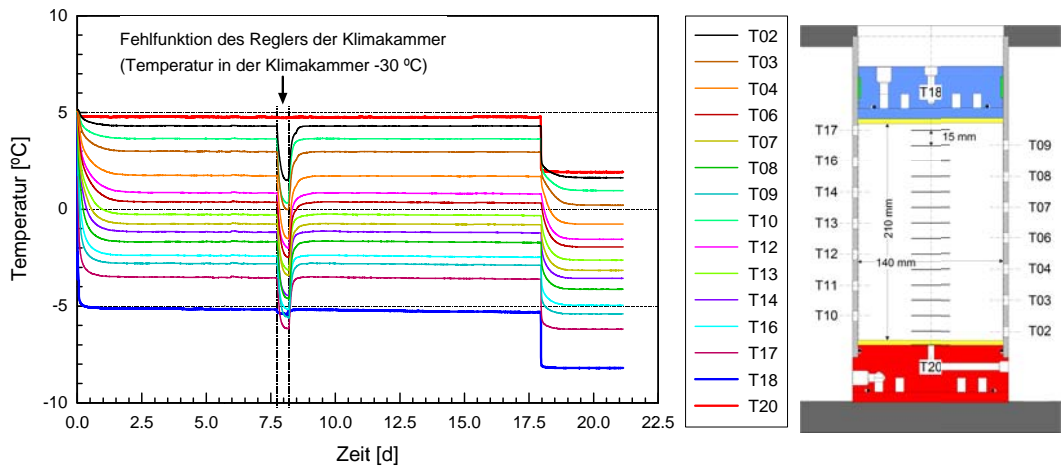


Abb. 112 Elementversuch E2 – Temperaturverlauf während des Frosthebungsversuches (links) und Lage der Temperatursensoren (rechts)

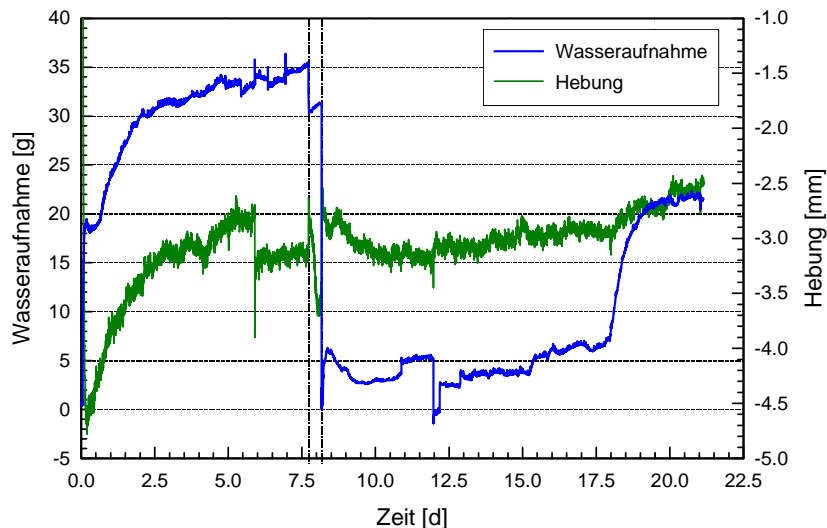


Abb. 113 Elementversuch E2 – zeitlicher Verlauf der aufgenommenen Wassermenge und der Probehebungen während des Frosthebungsversuches

Der letzte Elementversuch diente in erster Linie der Bestätigung der Ergebnisse aus den vorangegangenen Versuchen, allerdings unter Berücksichtigung einer Mischung mit leicht geringerem Feinanteil, d.h. mit einem Mischungsverhältnis Sand zu Kalkmehl von 75%:25%. Es ist zu vermerken, dass es bei allen Vorversuchen mit Proben in diesem Mischungsverhältnis zur Eislinsenbildung kam. In Abb. 114 und Abb. 115 werden die gemessenen Werte über die Zeit aufgetragen. Nach sechs Tagen Versuchsdauer erzielte man erneut einen stationären Zustand, d.h. ohne Bildung von Eislinsen. Anschliessend wurde eine Auftauphase eingeleitet und aufgenommen. Die deutliche Zunahme der Wasseraufnahme kann, analog zur Sättigungsphase, nur mit einem internen Leck erklärt werden.

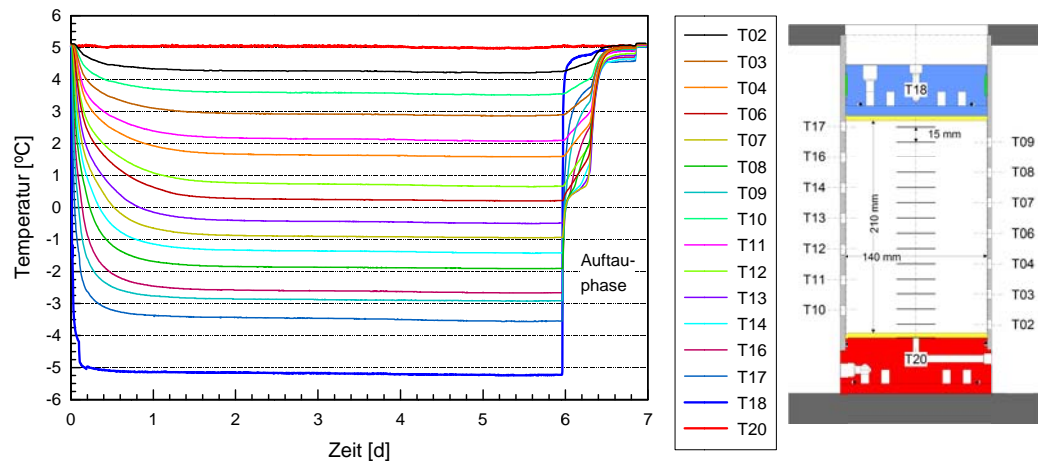


Abb. 114 Elementversuch E3 – Temperaturverlauf während des Frosthebungsversuches (links) und Lage der Temperatursensoren (rechts)

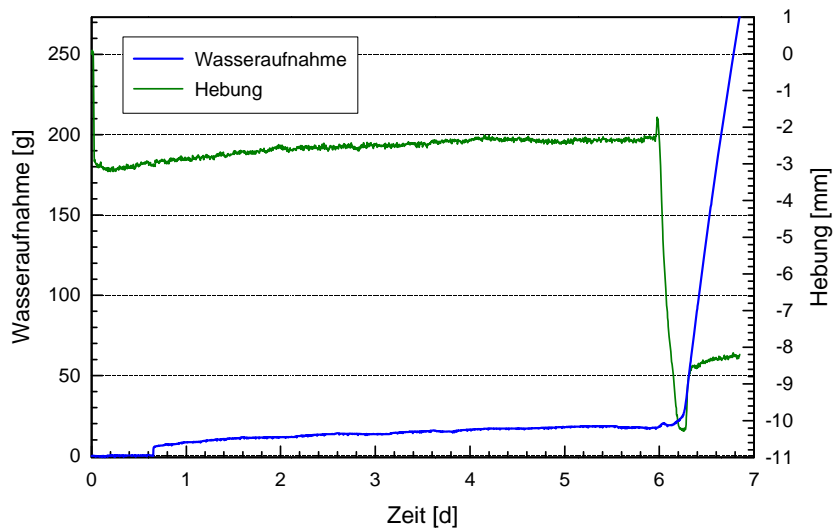


Abb. 115 Elementversuch E3 – zeitlicher Verlauf der aufgenommenen Wassermenge und der Probehebungen während des Frosthebungsversuches

12.4.4 Thermische Berechnungen

Der wesentliche Unterschied zwischen den Elementversuchen E1 und E2 bestand in der Umgebungstemperatur. Sie betrug beim Versuch E1 etwa 21 °C und bei den nachfolgenden Versuchen etwa 7 °C (Kap. 12.4.3). Mit der Modellierung sollte überprüft werden, ob innerhalb der Probe eindimensionale Verhältnisse herrschten und inwiefern der Temperaturgradient eine mögliche Erklärung für die Nicht-Bildung von Eislinsen bei den Elementversuchen sein könnte. Modelliert wurde der Zustand gegen Ende der Homogenisierungsphase. Hierfür wurden axialsymmetrische 2D-Modelle als stationäre Fälle betrachtet, wobei nur der Wärmetransport modelliert wurde. Implementiert wurde die Berücksichtigung von temperaturabhängigen Materialkennwerten bezüglich des Wassergehaltes (Gl. 36 und Gl. 37) sowie der Wärmeleitfähigkeit (Gl. 7 und Gl. 8). Die Geometrie der Apparatur einschliesslich Wärmedämmung wurde massstabstreu berücksichtigt, wobei bei der Diskretisierung unterschieden wurde zwischen den verschiedenen Baumaterialien bezüglich ihrer Wärmeleitfähigkeit. Die im Modell jeweils berücksichtigte Wärmeleitfähigkeit wird in Tabelle 19 zusammengefasst. Für beide Elementversuche wurden die gleichen Bodenparameter berücksichtigt und zwar die vom Elementversuch E1 (Tabelle 18).

Tabelle 19 Wärmeleitfähigkeit der Komponenten der Elementversuche

Material	Acrylglas	PVC	Neopren	Steinwolle	Styropor	Aluminium
λ [W/mK]	0.19	0.16	0.036	0.038	0.08	237

Neben der oben genannten Raumtemperatur wurde die Temperatur an den Enden der Probe als Randbedingung vorgegeben. Diese weichen von den in den Wärmetauscher gemessenen Temperaturen ab, insbesondere beim kälteren Wärmetauscher. Dies ist auf die mit Wasser und teilweise mit Luft gefüllte Filterplatte zurückzuführen, die beim Gefrieren eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit aufweist als der Wärmetauscher. Daher wurden die Temperaturen an den Enden der Probe durch lineare Extrapolation der Messwerte der zwei benachbarten Temperatursensoren ermittelt. Für das obere und untere Ende der Probe wurden hierfür die Messwerte der Sensoren T09 und T17 bzw. T02 und T10 berücksichtigt. Die Lage der Sensoren wird in Abb. 109 rechts dargestellt. Simuliert wurde sowohl das Ende der Homogenisierungs- als auch die Step Freezing Phase.

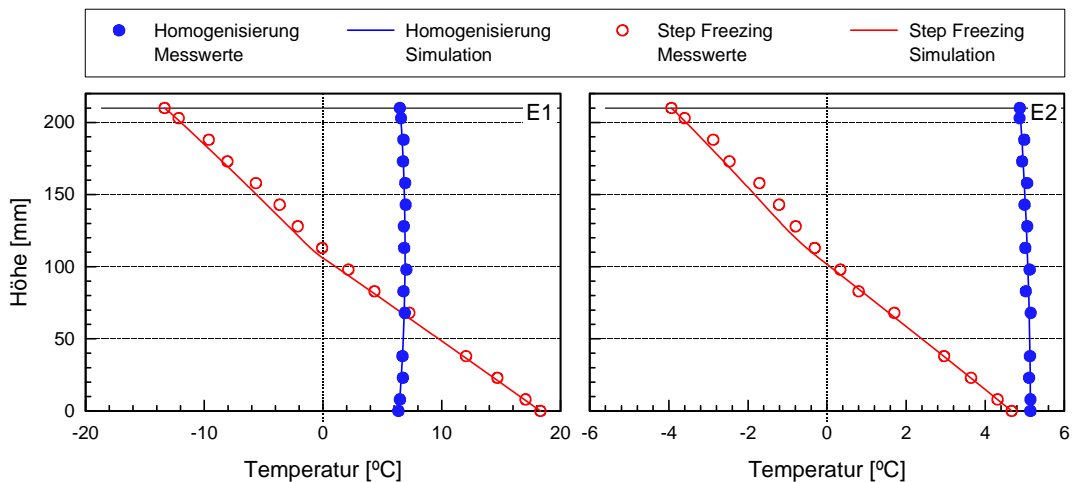


Abb. 116 Gemessene und berechnete Temperaturverteilung entlang der Probe nach den jeweiligen Versuchsphasen für die Elementversuche E1 (links) und E2 (rechts)

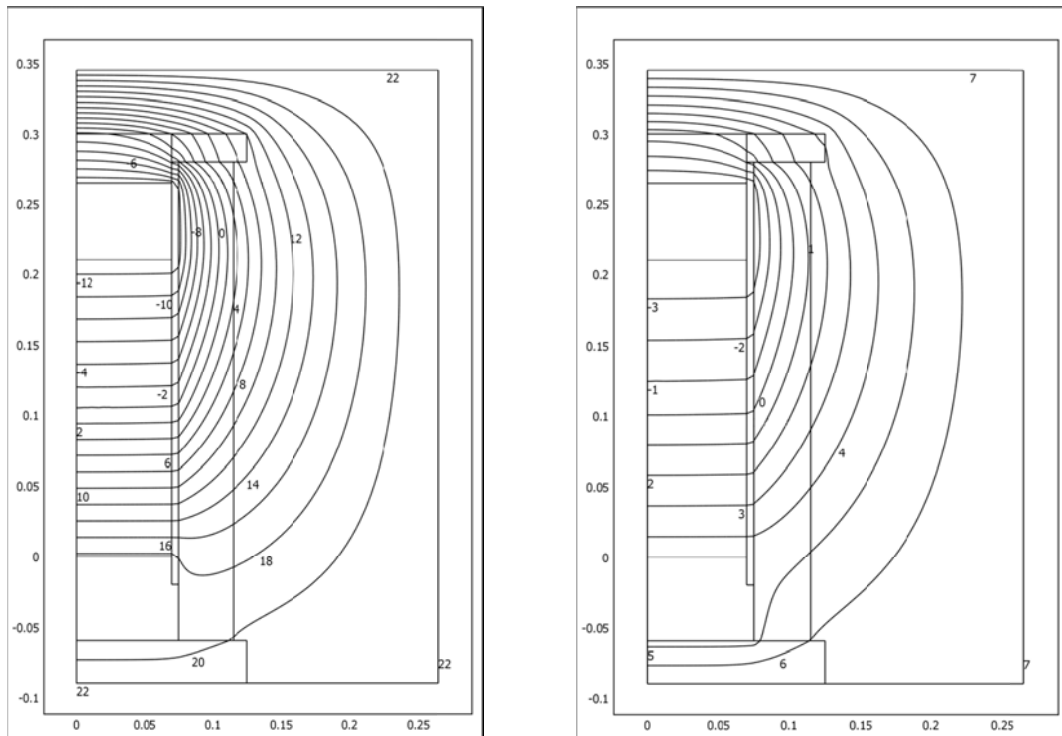


Abb. 117 Berechnetes Temperaturfeld als Isothermen gegen Ende des Step Freezing für die Elementversuche E1 (links) und E2 (rechts). Die Zahlen im Diagramm entsprechen der Temperatur in °C und die Achsenangaben sind in Meter

In Abb. 116 wird die Temperaturverteilung entlang der Probe für beide Elementversuche dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten Temperaturwerten, wodurch die realistische Wahl der Parameter bestätigt wird. Ferner wird in Abb. 117 das berechnete Temperaturfeld nach dem Step Freezing beider Elementversuche in Form von Isothermen dargestellt. In beiden Fällen verlaufen die Isothermen innerhalb der Probe senkrecht zur Probenachse, d.h. sie stellen ein eindimensionales Feld dar, bzw. der radiale Wärmefluss ist von untergeordneter Bedeutung. Diese gleichmäßige Temperaturverteilung liefert keine Hinweise auf Bereiche mit erhöhtem Temperaturgradienten, der die Eislinnenbildung hätte unterbinden können. Weiterhin kann die gewählte seitliche Wärmedämmung als vollkommen ausreichend erachtet werden. Der Einsatz von einer Klimakammer hat Vorteile bei der Homogenisierung der Probe, ist aber nicht zwingend erforderlich für die Einstellung eindimensionaler thermischer Bedingungen.

12.4.5 Zusätzliche Vorversuche

Da es bei keinem der drei Elementversuche zur Eislinsenbildung kam, wurden parallel zum dritten Elementversuch weitere drei Serien von Vorversuchen durchgeführt, mit der Zielsetzung mögliche Ursachen für die Probleme bei den Elementversuchen zu klären bzw. auszuschliessen. So wurde die Serie 6 mit nur drei Proben der Mischung Sand zu Kalkmehl von 70%:30%, die Serie 7 als vollständige Serie, d.h. sechs Proben mit einer Mischung von 75%:25% und die Serie 8 auch mit dieser Mischung, allerdings wurden bei drei Proben künstliche dünne Zwischenschichten von reinem Kalkmehl eingebaut. Bei diesen drei Proben wurden abwechselnd alle 10 mm verdichteter Bodenmischung, eine 1 mm Lage Kalkmehl kompaktiert (Abb. 118). Der Grund für die Prüfung geschichteter Proben war, zu untersuchen, ob sich Eislinsen infolge von lokalen Heterogenitäten leichter bilden, als im homogenen Fall. Die Versuche dieser drei Serien wurden analog zur in Kap. 12.3.2 geschilderten Vorgehensweise durchgeführt.



Abb. 118 Proben der Serie 8 vor der Sättigung: Proben 1 bis 3 sind homogen, während die Proben 4 bis 6 geschichtet verdichtet worden sind

Nach dem Versuch der Serie 6 zeigten alle drei Proben Eislinsen, aber im Gegensatz zu den ersten Serien kam es nicht zur Bildung von Makroeislinsen. Unerklärlich bleibt auch, weshalb es bei der Probe 3 drei Tage verspätet zur Eislinsenbildung kam. Bei den restlichen Proben, d.h. diejenigen aus den Serien 7 und 8 kam es zu keiner Eislinsenbildung.

Abschliessend kann festgestellt werden, dass die Elementversuche messtechnisch qualitativ sehr gute und konsistente Ergebnisse lieferten (siehe hierzu auch Kap. 0). Eine nahezu perfekte Homogenisierung der Probe vor den Frosthebungsversuchen kann nur mit Hilfe einer Klimakammer erreicht werden. Trotz gezielter Änderungen der Randbedingungen, wie z.B. bei den ersten zwei Elementversuchen kam es nicht zur Eislinsenbildung. Es bleibt unerklärlich weshalb es bei den messtechnisch qualitativ schlechteren Vorversuchen mit demselben Bodenmaterial recht häufig, aber eben nicht immer, zur Eislinsenbildung kam. Ursprünglich war auch die Durchführung von Frosthebungsversuchen nach der Ramped Freezing Methode vorgesehen. Aufgrund der geringen Erfolgsaussichten weiterer Versuche mit der hier angewandten Vorbereitungstechnik mit dem ausgewählten Modellmaterial wurde auf solche Versuche verzichtet.

13 Schlussbemerkungen zur Eislinienproblematik

Nach der ausführlichen Auseinandersetzung mit der Problematik der Eislinienbildung kann behauptet werden, dass dieses Phänomen weitgehend bekannt ist, und dass dessen wichtigste Einflussfaktoren bereits identifiziert worden sind. Allerdings gibt es aufgrund der Komplexität der involvierten Vorgänge sowie der Lokalisierung der Eisbildung noch nicht vollständig verstandene Aspekte. So ist noch unklar, unter welchen Bedingungen (Materialzusammenstellung und thermo-hydro-mechanische Randbedingungen) es zur Eislinienbildung kommt, und falls ja, wann genau es zu einer Mikro- oder Makroeislinienbildung kommt. Die im Rahmen des Forschungsprojektes diesbezüglich durchgeführten experimentellen Untersuchungen lieferten widersprüchlichen Ergebnissen, was den Bedarf nach weiterführender Grundlagenforschung begründet.

Die kritische Überprüfung vorgeschlagener Modelle zur Eislinienbildung ergab, dass die rigoroseren THM-Mikromodelle die relevanten Vorgänge grundsätzlich besser erfassen. Jedoch sind derzeit einige wesentliche Funktionalitäten und Zusammenhänge dieser Modelle unbekannt. Deren Erforschung hat ebenfalls einen starken Grundlagencharakter und würde den Rahmen dieses Forschungsprojektes sprengen. Die TM-Makromodelle umgehen diese Problematik mit der Betrachtung eines verschmierten Kontinuums und sind daher einfacher auf 2-D zu erweitern und zu implementieren. Mit dem verbesserten TM-Modell können die eindimensionalen Experimente zwar gut nachgerechnet werden, sie erlauben es allerdings nicht eine quantitative Aussage zu machen zur Steuerung der Kühlaggregate um die Bildung von Eislinien zu unterbinden.

Die beim Bau des Milchbucktunnels eingesetzte Vorgehensweise eines intermitierenden Betriebes während der Haltephase des Gefrierkörpers hat sich bei weiteren Projekten bewährt. Damit kann dieses Problem in Verbindung mit der entsprechenden Messtechnik zur Überwachung kritischer Bauwerke grundsätzlich vermieden werden. Grundsätzlich geht es bei dieser Vorgehensweise um das Erzwingen einer Bewegung der Isotherme 0 °C durch das Ausschalten des Kühlaggregates und des erneuten Einschaltens nach einer gewissen Zeit. Die Dauer der Zyklen können bei der Messung von Hebungen verlängert werden.

Anhänge

I	Symbolverzeichnis.....	173
I.1	Lateinische Symbole	173
I.2	Griechische Symbole	174

I Symbolverzeichnis

I.1 Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
b	[m/m]	Relative Breite der Verengung zwischen den Radii der Gefrierkörper
c_{brine}	[J/m ³ K]	Volumetrische spezifische Wärmekapazität des Kühlmittels
$c_{eff\ soil}$	[J/m ³ K]	Effektive volumetrische spezifische Wärmekapazität des Bodens
c_{ice}	[J/kg K]	Spezifische Wärmekapazität des Eises
$c_{mineral}$	[J/kg K]	Spezifische Wärmekapazität des Feststoffes
c_{soil}	[J/m ³ K]	Volumetrische spezifische Wärmekapazität des Bodens
c_{water}	[J/kg K]	Spezifische Wärmekapazität des Wassers
e	[-]	Porenzahl
g	[m ² /s]	Erdbeschleunigung
g_T	[K/s]	Temperaturgradient
i	[m/m]	Hydraulischer Druckgradient
k_f	[m/s]	Durchlässigkeit
m	[-]	Verhältnis zwischen Abkühlradius und Frostradius
m_{II}	[-]	Verhältnis zwischen Abkühlfront und Frostfront
n	[m ³ /m ³]	Porosität
n_0	[m ³ /m ³]	Anfängliche Porosität
n_c	[m ³ /m ³]	Grenzporosität
\dot{n}_m	[1/s]	Volumendehnungsrate, gemessen unterhalb des Temperaturgradienten g_T
n_{pipe}	[-]	Anzahl der Gefrierlanzen
p	[Pa]	Wasserdruck
r_0	[m]	Radius der Gefrierlanze
r_a	[m]	Abkühlradius
t	[s]	Zeit
t_{close}	[s]	Schliesszeit des Frostkörpers
t_{close0}	[s]	Schliesszeit des Frostkörpers im ruhendem Grundwasser
t_{ref}	[s]	Gefrierzeit
$t_{ref\ total}$	[s]	Gefrierzeit bis zum Erreichen der Sollstärke des Gefrierkörpers
v	[m/s]	Sickergeschwindigkeit
v_{crit}	[m/d]	Kritische Sickergeschwindigkeit
v_k	[m/s]	Vektorielle Sickergeschwindigkeit
w	[kg/kg]	Wassergehalt
w_0	[kg/kg]	Anfänglicher Wassergehalt
w_f	[kg/kg]	Gefrorener Wassergehalt
w_{res}	[kg/kg]	Residueller (ungefrorener) Wassergehalt
w_u	[kg/kg]	Ungefrorener Wassergehalt
z	[m]	Geodätische Höhe
C_1	[J/m ³ K]	Volumetrische spezifische Wärmekapazität des gefrorenen Bodens
C_2	[J/m ³ K]	Volumetrische spezifische Wärmekapazität des ungefrorenen Bodens
C_c	[-]	Krümmungszahl
D_{ijkl}	[Pa]	Elastizitätstensor
D_{max}	[mm]	Grösstkorn des Bodens
E	[Pa]	E-Modul
F	[-]	Korrelationsfaktor zur Bestimmung der Gefrierzeit
H	[m]	Piezometrische Höhe
H_{pipe}	[m]	Länge der Gefrierlanzen
L	[J/kg]	Latente Schmelzwärme des Wassers
L_{wall}	[m]	Länge der Gefrierlanzenreihe
$P_{Experiment}$	[W]	Gemessene Kühlleistung im Experiment
P_{Freeze}	[W]	Gerechnete Kühlleistung in der Simulation
P_{loss}	[W]	Leistungsverlust des Kühlsystems

$P_{S\&S}$	[W]	Gerechente Kühlleistung nach Sanger & Sayles
P_{close}	[W]	Momentane Kühlleistung zum Schliesszeitpunkt
Q_{brine}	[m ³ /s]	Volumenstrom des Kühlmittels
R	[m]	Radius des Gefrierkörpers
S	[m]	Gefrierlanzenabstand
S_r	[-]	Sättigungsgrad
T	[°C]	Temperatur
\dot{T}	[K/s]	Temperaturrate
T^*	[°C]	Extrapoliertes Temperaturfeld
T_0	[°C]	Gefriertemperatur des Wassers
T_{in}	[°C]	Eintrittstemperatur des Kühlmittels
T_m	[°C]	Temperatur, bei der die grösste Volumendehnungsrate auftritt
T^n	[°C]	Temperaturfeld für den Zeitschritt n
T_{out}	[°C]	Austrittstemperatur des Kühlmittels
T_{pipe}	[°C]	Temperatur der Gefrierlanze
T_{ref}	[°C]	Referenztemperatur
T_{soil}	[°C]	Bodentemperatur
T_{soil}^*	[°C]	Reduzierte Bodentemperatur infolge Vorkühleffekt
U	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
W	[m]	Wandstärke des Gefrierkörpers

I.2 Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α	[-]	Parameter zur Abschätzung des ungefrorenen Wassergehaltes
α_f	[-]	Parameter zur Abschätzung des ungefrorenen Wassergehaltes
β	[-]	Parameter zur Abschätzung des ungefrorenen Wassergehaltes
β_j	[-]	Volumetrische Anteile der Mineralien des Bodens
γ	[-]	Porositätsparameter
ε_{ij}	[-]	Gesamtdehnung
ε_{ij}^e	[-]	Elastischer Dehnungsanteil
ε_{ij}^p	[-]	Plastischer Dehnungsanteil
ε_{kk}	[-]	Volumendehnung
ζ	[Pa]	Materialkonstante
η	[-]	Materialparameter
η_{water}	[m/s ²]	Dynamische Viskosität des Wassers
λ_1	[W/m K]	Wärmeleitfähigkeit des gefrorenen Bodens
λ_2	[W/m K]	Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Bodens
λ_{ice}	[W/m K]	Wärmeleitfähigkeit des Eises
$\lambda_{mineral}$	[W/m K]	Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes
λ_{soil}	[W/m K]	Wärmeleitfähigkeit des Bodens
λ_{water}	[W/m K]	Wärmeleitfähigkeit des Wassers
μ	[-]	Querdehnungszahl
ξ	[-]	Anisotropiefaktor
ξ_{ij}	[-]	Wachstumstensor
ρ_{dry}	[kg/m ³]	Trockendichte des Bodens
ρ_s	[kg/m ³]	Korndichte
ρ_w	[kg/m ³]	Wasserdichte
σ	[Pa]	Spannung
σ_{eff}	[Pa]	Effektive Spannung
σ_{ij}	[Pa]	Spannungstensor
σ_{kk}	[Pa]	Mittlere Spannung

Literaturverzeichnis

- Aerni, K. (1979). *Das Gefrierverfahren aus der Sicht des projektierenden Ingenieurs*. Gefrierverfahren im Bauwesen, Studententagung, Zürich.
- Andersland, O.B., Ladanyi, B. (1994). *An introduction to Frozen Ground Engineering*. Chapman & Hall Inc.
- Andersland, O.B., Ladanyi B. (2004). *Frozen ground engineering*. American Society of Civil Engineering, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey.
- Anderson, D.M., Morgenstern, N.R. (1973). *Physic. chemistry and mechanics of frozen ground*. North Am. contribution. 2nd Int. Conference on Permafrost, Yakutsk, USSR, Nat. Academy of Sci., Washington DC.
- Anderson, D.M., Tice, A.R. (1972). *Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements*. Highway Res. Rec. 393: 12-18.
- Anderson, D.M., Tice, A.R. (1973). *The unfrozen interfacial phase in frozen soil water systems*. Ecological Studies, Analysis and Synthesis 4: 107-124.
- Arakawa, K. (1966). *Theoretical studies of ice segregation in soil*. Journ. of Glaciology 6 (No. 44): 225-260.
- Berggren, A. (1979). *Artificial Freezing of Seepage Flow*. Trondheim: Division of Refrigeration Engineering NTH.
- Beskow, G. (1935). *Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads* (translated by J. Osterberg). Northwestern University Tech. Inst., 1947.
- Blanchard, D., Frémond, M. (1985). *Soil frost heaving and thaw settlement*. 4th Int. Symp. Ground Freezing, Sapporo, Balkema.
- Bosshard, M. (1990). *Zur Projektierung des Bauloses 2.04 - Bahnhofquai/Limmat*. Projektierung und Bau der S-Bahn Zürich. R. Fechtig, Glättli, M.: 216-228.
- Chen, X.B., Wang, Y.Q. (1988). *Frost heave prediction for clayely soils*. Cold Region Science and Technology 15(3): 233-238.
- Côté, J., Konrad, J.M. (2005). *A generalized thermal conductivity for soils and construction materials*. Canadian Geotechnical Journal 42: 443-458.
- De Boer, R., Bluhm, J., Wähling, M., Ricken, T. (2003). *Phasenübergänge in porösen Medien*. Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen 98, Universität Duisburg-Essen.
- De Gennaro, R., Cappelletti, P., Cerri, G., De Gennaro, M., Dondi, M., Langella, A. (2005). *Neapolitan Yellow Tuff as raw material for lightweight aggregates in lightweight structural concrete production*. Applied Clay Science 28: 309-319.
- De Gennaro, M., Langella, A. (1996). *Italian zeolitised rocks of technological interest*. Mineralium Deposita 31: 452-472.
- Egli, R. (1990). *Die Anwendung des Gefrierverfahrens bei der Unterquerung der Limmat (Baulose 2.04 und 4.03)*. Projektierung und Bau der S-Bahn Zürich. R. Fechtig, Glättli, M.: 229-241.
- Egli, R. (2000). *Die Anwendung des Gefrierverfahrens bei der Unterquerung der Limmat durch die S-Bahn*. Frost in der Geotechnik, Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik. Mitteilung 141.


- Eicher, L., Bayer, F., Vogt, N. (2005). *Baugrundvereisung zur Verfestigung und Fristsicherung beim Bahnsteig-Erweiterungstunnel U3/U6 in München*. Schriftenreihe des Lehrstuhls und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München Heft 37.
- Farouki, O.T. (1981). *The thermal properties of soils in cold regions*. Cold Regions Science and Technology 5: 67-75.
- Fowler, A.C., Noon, C.G. (1993). *A simplified numerical solution of the Miller model of secondary frost heave*. Cold Regions Science and Technology 21: 327-336.
- Freitag, D.R., McFadden, T.T. (1997). *Introduction to Cold Regions Engineering*. ASCE.
- Fremond, M., Mikkola, M. (1991). *Thermomechanical modelling of freezing soil*. Ground Freezing 91, Balkema.
- Frivik, P.E., Comini, G. (1982). *Seepage and Heat Flow in Soil Freezing*. Journal of Heat Transfer, ASME 104: 323-328.
- Fukuda, M. (1982). *Experimental studies of coupled heat and moisture transfer in soils during freezing*. Contribution no. 2528 from the Institute of Low Temperature Science. Sapporo, Hokkaido University: 35-91.
- Fukuda, M., Kim, H., Kim, Y. (1997). *Preliminary results of frost heave experiments using standard test sample provided by TC8*. Int. Symposium on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Lulea.
- Harris, J.S. (1995). *Ground freezing in practice*. London, Thomas Telford.
- Heijboer, J., van den Hoonaard, J., van de Linde, F.W.J. (2004). *The Westerschelde Tunnel - Approaching Limits*. Lisse, A.A. Balkema Publishers.
- Hiller, P. (2007). *Bodenvereisungsmassnahmen im heterogenen Untergrund unter Berücksichtigung einer Grundwasserströmung*. Bachelorarbeit am Institut für Geotechnik der ETH Zürich.
- Hinder, M. (2008). *Bodenverbesserung durch Vereisung - Auswertung von Modellversuchen*. Bachelorarbeit am Institut für Geotechnik der ETH Zürich.
- Huder, J. (1979). *Geotechnische Untersuchungen*. Gefrierverfahren im Bauwesen, Studientagung, Zürich.
- Ishizaki, T., Nishio, N. (1988). *Experimental study of frost heaving of a saturated soil*. 5th International Symposium on Ground Freezing.
- ISSMFE Technical Committee on Frost, TC-8. (1989). *Work report 1985-1989*. 1st Int. Symp. on Frost in Geotechnical Engineering, Saariselk, Balkema.
- Jakubinek M.B., Zhan. B. Z., White M.A. (2007). *Temperature-dependent thermal conductivity of powdered zeolite NaX*. Microporous and Mesoporous Materials 103: 108-112.
- Jessberger, H.L., Jagow-Klaff, R. (2001). *Bodenvereisung*. Berlin, Verlag Ernst & Sohn.
- Johansen, O., Frivik, E. (1980). *Thermal properties of soils and rock materials*. 2nd international symposium on ground freezing, Trondheim, The Norwegian Institute of Technology.
- Kellner, C. (2008). *Frosthebungsverhalten von Böden infolge tief liegender Vereisungskörper*. Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der TU München. München, TU München: 133.
- Khakimov, K.R. (1963). *Problems in theory and practice of artificial freezing in soil* (translated from the Russian by A. Barouch, edited by H. Heimann, 1966). Jerusalem, Israel Program for Scientific Translations Ltd.
- Knutson, A. (1973). *Frost actions on roads*. OECD Symposium, Paris.

- Konrad, J. M. (1994). *Frost heave in soils: concept and engineering*. Canadian Geotechnical Journal 31(2): 233-245.
- Konrad, J.M. (2005). *Estimation of the segregation potential of fine-grained soils using the frost heave response of two reference soils*. Canadian Geotechnical Journal 42: 38-50.
- Konrad, J.M., Morgenstern, N.R. (1980). *A mechanistic theory of ice formation in fine grained soils*. Canadian Geotechnical Journal 17: 473-486.
- Konrad, J.M., Morgenstern, N.R. (1981). *The segregation potential of freezing soils*. Canadian Geotechnical Journal 18: 482-491.
- Konrad, J.M., Morgenstern, N.R. (1982). *Effect of freezing pressure on freezing soils*. Canadian Geotechnical Journal 19: 494-505.
- Konrad, J.M., Shen, M. (1996). *2-D frost action modeling using the segregation potential of soils*. Cold Region Science and Technology 24: 263-278.
- Kujala, K. (1997). *Estimation of frost heave and thaw weakening by statistical analyses and physical models*. Proc. of the International Symposium on Ground Freezing and Frost Action in Soils, A.A. Balkema.
- Kulieshius, V. (1991). *Frost heave problems in geotechnical engineering*. Vilna, Vilnius Technical University.
- Ladanyi, B., Shen, M. (1993). *Freezing pressure development on a buried chilled pipeline*. Proc. 2nd International Symposium on Frost in Geotechnical Engineering, Anchorage, Alaska.
- Makowski, E. (1986). *Modellierung der künstlichen Bodenvereisung im grundwasser-durchströmten Untergrund mit der Methode der Finiten Elemente*. Schriftenreihe des Instituts für Grundbau, Wasserwesen und Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Serie Grundbau, Heft 10.
- Mettier, K. (1979). *Messungen und Ergebnisse bei der Anwendung des Gefrierverfahrens im Tunnelbau*. Frühjahrstagung 1979, Zürich, Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik.
- Mettier, K. (1983). *Measurements and results fo applying the ground freezing method in tunnelling*. Field Measurements in Geomechanics, Zürich.
- Michalowski, R.L. (1993). *A constitutive model of saturated soils for frost heave simulations*. Cold Regions Science and Technology 22: 47-63.
- Michalowski, R.L., Zhu, M. (2006). *Frost heave modelling using porosity rate function*. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 30: 703-722.
- Mikkola, M., Hartikainen, J. (2001). *Mathematical model of soil freezing and its numerical implementation*. International Journal for numerical methods in engineering Nr. 52: 543-557.
- Murashov, V.V., White, M.A. (2002). *Thermal properties of zeolites: effective thermal conductivity of dehydrated powdered zeolite 4A*. Materials Chemistry and Physics 75: 178-180.
- Neiss, J. (1982). *Numerische Simulation des Wärme- und Feuchttransportes und der Eisbildung in Böden*. Fortschritt - Berichte der VDZ-Zeitschriften, Reihe 3, Nr. 73.
- Neracher, M. (2007). *Bodenverbesserung durch Vereisung für die Erstellung von Tunnelquerschlägen unter Berücksichtigung einer Grundwasserströmung*. Bachelorarbeit am Institut für Geotechnik der ETH Zürich.
- Nixon, J. F. (1991). *Discrete ice lens theory for frost heave in soils*. Canadian Geotechnical Journal 28(6): 843-859.

- O'Neil, K., Miller, R.D. (1985). *Exploration of a rigid ice model of frost heave*. Water Resource Research 21: 1-22.
- Ono, T. (2002). *Lateral deformation of freezing clay under triaxial stress condition using laser-measuring device*. Cold Regions Science and Technology 35: 45-54.
- Orth, W. (2009). Bodenvereisung. Grundbultaschenbuch Teil 2: Geotechnische Verfahren. K. J. Witt, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- Papakonstantinou S., Pimentel E., Anagnostou G. (2010). *Analysis of artificial ground freezing in the Pari-Duomo Plattform Tunnel of the Naples Metro*. 7th European Conference on Numerical Methodes in Geotechnical Engineering, Trondheim, 281-284.
- Papakonstantinou S., Pimentel E., Anagnostou G. (2010). *Artificial ground freezing in the Limmat Project: Assessment of frozen body closure*. International Conference on Underground Constructions 2010, Prague, 771-7.
- Papakonstantinou S., Anagnostou G., Pimentel E. (zur Veröffentlichung akzeptiert, September 2010). *Evaluation of ground freezing data from the Naples subway*. Geotechnical Engineering, Thomas Telford.
- Penner, E., Walton, T. (1979). *Effects of temperature and pressure on frost heaving*. Engineering Geology 13: 29-39.
- Pimentel E., Anagnostou G., Hiller P. (eingereicht Nov. 2010). *Simulation of artificial ground freezing in heterogeneous ground where there is seepage flow*. Proc. 13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Melbourne, 2011.
- Pimentel E., Papakonstantinou S., Anagnostou G. (eingereicht Okt. 2010). *Case studies of artificial ground freezing simulations for urban tunnels*. Proc. ITA and World Tunnel Congress, Helsinki, 2011.
- Pimentel E., Schneider T., Sres A., Anagnostou G. (2009). *Modelling of artificial ground freezing of an urban tunnel*. EURO:TUN, 2nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling, Bochum, Vol. 1, 329-336.
- Pimentel E., Schneider T., Sres A., Anagnostou G. (2010). *Spatial thermal-hydraulic modelling of artificial ground freezing in a twin urban tunnel in Fürth*. Geotechnical Challenges in Megacities, International Geotechnical Conference, Moscow, 712-717.
- Pimentel E., Sres A., Anagnostou, G. (2006). *Numerische FE Simulation in 3D der Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren und der Vergleich zu experimentellen Labormessungen*. 29. Baugrundtagung, Bremen, Vol. 1, 143-150.
- Pimentel E., Sres A., Anagnostou G. (2007). *3D-Modellierung der Frostkörperbildung beim Gefrierverfahren unter Berücksichtigung einer Grundwasserströmung*. 22. Christian Veder Kolloquium, Graz, No. 30, 161-176.
- Pimentel E., Sres A., Anagnostou G. (2010). *Large-scale physical model for the simulation of artificial ground freezing with seepage flow*. 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Zürich, 379-382.
- Pimentel E., Sres A., Anagnostou G. (2007). *Modelling of ground freezing in tunneling*. Underground Space – The 4th Dimension of Metropolises, ITA and World Tunnel Congress, Prague, Vol. 1, 331-336.
- Pimentel E., Sres A., Anagnostou G. (eingereicht Feb. 2010). *Large-scale laboratory tests on artificial ground freezing under seepage conditions*. Géotechnique, Thomas Telford.
- Russel, T.W. F., Robinson A.S. & Wagner, N.J. (2008). *Mass and Heat Transfer: Analysis of Mass Contactors and Heat Exchangers*. Cambridge University Press.

- Sanger, F.J., Sayles, F.H. (1979). *Thermal and rheological computations for artificially frozen ground construction*. Ground Freezing: Developments in Geotechnical Engineering, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Schneider, T. (2006). *Das Gefrierverfahren im Tunnelbau*. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik der ETH Zürich.
- Shuaib, S. M. (1954). *A study of minerals in a sediment core from the gulf of Naples*. Clay minerals 2(12): 170-176.
- Smith, M.W., Patterson, D. E. (1989). *Detailed observations on the nature of frost heaving at a field scale*. Canadian Geotechnical Journal 26: 306-312.
- Sres A., Anagnostou G. (2007). *Numerical modeling and the implementation of artificial ground freezing*. Numerical Models in Geomechanics, NUMOG X, Rhodes, 311-316.
- Sres A., Pimentel E., Anagnostou G. (2007) *Simulations and measurements of ground freezing with seepage flow*. 18th European Young Geotechnical Engineers Conference, Ancona, Vol. 2, 795-800.
- Sres A., Pimentel E., Anagnostou G. (2007). *Measurements and simulations of temperature distribution in freezing soil with seepage flow*. Geotechnical Engineering in Urban Environments, 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, Vol. 2, 795-800.
- Sres A., Pimentel E., Anagnostou G. (2007). *Frostkörperbildung im strömenden Grundwasser*. der bauingenieur, No. 6, 32-34 (re-printed in baublatt, 32, 22-23).
- Sres, A. (2009). *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur künstlichen Bodenvereisung im strömenden Grundwasser*. Dissertation Nr. 18378, ETH Zürich / Mitteilungen des Institutes für Geotechnik (IGT), Vol. 234.
- Ständer, W. (1967). *Mathematische Ansätze zur Berechnung der Frostausbreitung in ruhenden Grundwasser im Vergleich zu Modelluntersuchungen für verschiedene Gefrierrohranordnungen im Schacht- und Grundbau*. Veröffentlichungen des Inst. für Boden- und Felsmechanik der TH Fredericana in Karlsruhe, Heft 28.
- Tice, A.R., Anderson, D.M., Banin, A. (1976). *The Prediction of Unfrozen Water Contents in Frozen Soils from Liquid Limit Determination*. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering.
- Unold, F. (2007). *Der Gefriersog bei der Bodenfrostung und das Kompressionsverhalten des wieder aufgetauten Bodens*. Institut für Bodenmechanik und Grundbau. München, Universität der Bundeswehr München: 171.
- Victor, H. (1969). *Die Frostausbreitung beim künstlichen Gefrieren von Böden unter dem Einfluss strömenden Grundwassers*. Veröffentlichungen des Inst. für Boden- und Felsmechanik der TH Fredericana in Karlsruhe, Heft 42.
- Watanabe, K. (1999). *Ice lensing mechanism during freezing*. Graduate School of Biore-sources, Mie University, Japan.
- Williams, P. J. (1976). *Volume change in frozen soils*. Laurits Bjerrum Memorial Volume, Norwegian Geotech. Inst.

Projektabschluss

 Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

ARAMIS SBT

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am:

Grunddaten

Projekt-Nr.:

Projekttitel:

Enddatum:

Texte:

Zusammenfassung der
Projektresultate:

Ein numerisches Modell in 3-D zur Simulation von Gefriermassnahmen im strömenden Grundwasser wurde implementiert und anhand von Ergebnissen aus Experimenten mit einem eigens dafür gebauten grossmassstäblichen Labormodell erfolgreich überprüft. Um deren Prognosefähigkeit zu beurteilen wurden die bekannten analytischen Lösungen mit diesen Experimentergebnissen verglichen. Für die Dimensionierung einer Gefrierlanzenreihe ohne Grundwasserströmung sind diese Lösungen durchaus geeignet, hingegen können diese Lösungen im Falle von Grundwasserströmung zu einer beachtlichen Unterdimensionierung der Gefriermassnahme führen. Daher wurden – als Ergebnis einer Parameterstudie und Dimensionsanalyse – Formeln zur Schätzung der kritischen Sickergeschwindigkeit sowie der erforderlichen Gefrierzeit bis zum Schliesszeitpunkt abgeleitet. Die Untersuchung des Einflusses von in der Natur üblichen Heterogenitäten des Untergrundes auf das Wachstum des Gefrierkörpers ergab, dass eine Dimensionierung mit kritischen Sickergeschwindigkeiten nahe der in-situ Sickergeschwindigkeit vermieden werden sollte. Die Modellierung von Querschlägen zeigte, dass eine Optimierung der Lanzenanordnung möglich und vorteilhaft ist, und dass potentielle Probleme in den Firsten vorkommen können am Kontaktpunkt zwischen Haupttunnel und Querschlag. Die Praxistauglichkeit des numerischen Modells wurde durch die erfolgreiche Simulation von drei ausgeführten Vortrieben nachgewiesen.

Die Analyse der vorhandenen Modelle zur Beschreibung der Eislinnenbildung ergab, dass die rigorosen thermo-hydraulisch-mechanischen Mikromodelle grundsätzlich am geeignetsten wären, aber den erheblichen Nachteil haben, dass eine Vielzahl von Funktionalitäten und Stoffbeziehungen derzeit noch unbekannt sind und weitergehende Grundlagenforschung erfordern. Für praktische Zwecke kämen eher die relativ einfachen thermo-mechanischen Makromodelle in Frage. Diese Modelle können zwar die

	<p>Eislinnenbildung nachbilden, sind allerdings nicht für detaillierte Untersuchungen, wie z.B. Optimierung der Steuerung von Kühlaggregaten geeignet. Bei unseren experimentellen Untersuchungen ergab sich eine weitere Schwierigkeit. Trotz grösster Sorgfalt bei der Versuchsdurchführung und trotz scheinbar identischen Randbedingungen gelang es uns nicht, reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Dies weist darauf hin, dass es noch nicht ganz verstandene bzw. noch nicht identifizierte Einflussfaktoren betreffend Bildung und Art der Eislinnen gibt, die ebenfalls vertiefte Grundlagenuntersuchungen erfordern. Andererseits reifte während der Durchführung des Forschungsprojektes die Einsicht, dass das Problem der Frosthhebung in der Praxis durch ingenieurmässige Massnahmen, wie intermittierendes Gefrieren, erfolgreich umgangen werden kann, während das Problem der Sickerströmung von grundsätzlicher Natur ist, weil es die Machbarkeit der Gefriermassnahme in Frage stellen kann. Deshalb haben wir dieses Problem im Rahmen des Forschungsprojektes höher gewichtet als ursprünglich geplant.</p>
Zielerreichung:	<p>Betreffend Eislinnenbildung wurden die Ziele des Forschungsprojektes teilweise erreicht. Bezüglich der Problemstellung des Gefrierens im strömenden Grundwasser wurden die Projektziele mehr als erreicht. Diese umfassen die Entwicklung eines numerischen Modells zur quantitativen Prognose des Verhaltens von Gefriermassnahmen sowie die Bereitstellung von Entscheidungshilfen für die Planung. Das numerische Modell wurde erfolgreich überprüft und für die Beantwortung unterschiedlicher Fragestellungen verwendet. Ein Bedarf an Entscheidungshilfen bestand bei der Dimensionierung von einer Reihe von Gefrierlanzen im strömenden Grundwasser. Dieser wurde mit der Ableitung entsprechender Formeln abgedeckt, was eine Verbesserung gegenüber den ursprünglich vorgesehenen Nomogrammen darstellt. Ferner wurden die Grenzen und Möglichkeiten bekannter analytischen Lösungen aufgezeigt. Man kann sagen, dass das Problem des Gefrierens im strömenden Wasser nicht nur qualitativ gut verstanden ist, sondern auch sehr zuverlässig für Planungszwecke quantifiziert werden kann.</p>
Folgerungen und Empfehlungen:	
Publikationen:	<p>Publikationen mit Vortrag:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pimentel E., Sres A., Anagnostou G. (2006) Numerische FE Simulation in 3D der Frostkörperbildung und Frosthhebung beim Gefrierverfahren und der Vergleich zu experimentellen Labormessungen. 29. Baugrundtagung, Bremen, Vol. 1, 143-150 • Pimentel E., Sres A., Anagnostou G. (2007) 3D-Modellierung der Frostkörperbildung beim Gefrierverfahren unter Berücksichtigung einer Grundwasserströmung. 22. Christian Veder Kolloquium, Graz, No. 30, 161-176 • Sres A., Pimentel E., Anagnostou G. (2007) Simulations and measurements of ground freezing with seepage flow. 18th European Young Geotechnical Engineers Conference, Ancona, Vol. 2, 795-800 • Sres A., Anagnostou G. (2007) Numerical modeling and the implementation of artificial ground freezing. Numerical Models in Geomechanics, NUMOG X, Rhodes, 311-316 • Pimentel E., Schneider T., Sres A., Anagnostou G. (2009) Modelling of artificial ground freezing of an urban tunnel. EURO:TUN, 2nd International Conference on Computational Methods in Tunneling, Bochum, Vol. 1, 329-336 • Pimentel E., Sres A., Anagnostou G. (2010) Large-scale physical model for the simulation of artificial ground freezing with seepage flow. 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Zürich, 379-382 • Papakonstantinou S., Pimentel E., Anagnostou G. (2010) Analysis of artificial ground freezing in the Pari-Duomo Plattform Tunnel of the Naples Metro. 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Trondheim, 281-284 • Papakonstantinou S., Pimentel E., Anagnostou G. (2010) Artificial ground freezing in the Limmat Project: Assessment of frozen body closure. International Conference on Underground Constructions 2010, Prague, 771-776 <p>Publikationen (ohne Vortrag)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pimentel E., Sres A., Anagnostou G. (2007) Modelling of ground freezing in tunneling. Underground Space – The 4th Dimension of Metropolises, ITA and World Tunnel Congress, Prague, Vol. 1, 331-336 • Sres A., Pimentel E., Anagnostou G. (2007) Measurements and simulations of temperature distribution in freezing soil with seepage flow. Geotechnical Engineering in Urban Environments, 14th European Conference on Soil Mechanics and



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

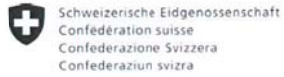
Geotechnical Engineering, Madrid, Vol. 2, 795-800

- Sres A., Pimentel E., Anagnostou G. (2007) Frostkörperbildung im strömenden Grundwasser. der bauingenieur, No. 6, 32-34 (re-printed in baublatt, 32, 22-23)
- Sres A. (2009) Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur künstlichen Bodenvereisung im strömenden Grundwasser. Mitteilungen des Institutes für Geotechnik (IGT), Vol. 234
- Pimentel E., Schneider T., Sres A., Anagnostou G. (2010) Spatial thermal-hydraulic modelling of artificial ground freezing in a twin urban tunnel in Fürth. Geotechnical Challenges in Megacities, International Geotechnical Conference, Moscow, 712-717
- Pimentel E., Sres A., Anagnostou G. (eingereicht Feb. 2010) Large-scale laboratory tests on artificial ground freezing under seepage conditions. Géotechnique, Thomas Telford
- Papakonstantinou S., Anagnostou G., Pimentel E. (zur Veröffentlichung akzeptiert, September 2010) Evaluation of ground freezing data from the Naples subway. Geotechnical Engineering, Thomas Telford
- Pimentel E., Papakonstantinou S., Anagnostou G. (eingereicht Okt. 2010) Case studies of artificial ground freezing simulations for urban tunnels. Proc. ITA and World Tunnel Congress, Helsinki, 2011
- Pimentel E., Anagnostou G., Hiller P. (eingereicht Nov. 2010) Simulation of artificial ground freezing in heterogeneous ground where there is seepage flow. Proc. 13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Melbourne, 2011

Beurteilung der Begleitkommission:

Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

Beurteilung:	<p>Die Forschungsarbeit zeichnet sich durch eine hohe Qualität aus. Die theoretischen und methodischen Überlegungen und Ansätze wurden mit grosser Sorgfalt bearbeitet. Auch die Versuchsvorbereitungen und -durchführungen erfolgten mit grosser Sorgfalt und Kompetenz.</p> <p>Die erarbeiteten Ergebnisse widerspiegeln die Qualität der Forschungsarbeit und sie stellen einen erheblichen Schritt im Verständnis, der Modellierung und der Anwendung des Gefrierfahrens dar.</p>
Umsetzung:	<p>Die erarbeiteten Ergebnisse ermöglichen es, die Vorgänge beim Gefrierverfahren grundsätzlich zu verstehen und aufgabengerecht zu modellieren. Damit ist für die Anwendung dieses Verfahrens in der Praxis (zumindest in der Vordimensionierung) eine qualitativ und quantitativ gute Grundlage gegeben, was die sichere Anwendung des Verfahrens erlaubt. Von erheblicher Bedeutung ist dabei, dass die Forschungsergebnisse auch die Modellierung von vergleichsweise komplexen Fragestellungen erlaubt, was mit den bisherigen Kenntnissen nicht möglich war.</p> <p>Das Phänomen der Eislinnenbildung und der damit verbundenen Hebungen konnte nicht genügend analysiert werden, weil es nicht gelang das Phänomen zu reproduzieren. Der daraus gezogene Schluss in der Forschungsarbeit erlaubt zwar die Handhabung des Verfahrens in der Praxis, doch auf einer letztlich nicht zufrieden stellendem theoretischen Grundlage.</p>
weitergehender Forschungsbedarf:	<p>Das Gefrierverfahren wird auch in der Zukunft in schwierigen und komplexen Bauvorgaben und Baugründen zur Anwendung kommen. In dieser Hinsicht sind die vorliegenden Forschungsarbeiten von grossem Nutzen. Allerdings, und darauf wird auch im Bericht ausführlich eingegangen, konnten nicht alle Ziele erreicht werden. Insbesondere die Phänomene der Eisbildung und Eishebung liessen sich nicht einer Erklärung zuführen. Sie sind in der Praxis aber von erheblicher Bedeutung (Hebungen im Umfeld des Bauvorhabens), weshalb vertieftere Kenntnisse und deren Umsetzung in die Praxis sehr hilfreich wären.</p>



Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Einfluss auf
Normenwerk:

Ein direkter Einfluss auf das Normenwerk ist nicht gegeben.

Präsident Begleitkommission:

Name:

Amberg

Vorname:

Felix

Amt, Firma, Institut:

Amberg Engineering AG

Strasse, Nr.:

Rheinstrasse 4

PLZ:

7320

Email:

amberg@amberg.ch

Ort:

Sargans

Telefon:

041 81 725 31 13

Kanton, Land:

St Gallen

Fax:

041 81 725 31 02

Unterschrift Präsident Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt-Nr.	Titel	Jahr
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten <i>Appréciation et critères d'acceptation des risques dus aux actions extraordinaires pour les ouvrages d'art</i> <i>Assessment of residual risks and acceptance criteria for accidental loading for infrastructural facilities</i>	2009
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung <i>Bases d'une méthode pour une appréciation comparative des risques</i> <i>Methodological basis for comparative risk assessment</i>	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen <i>Efficacité et efficience des interventions</i> <i>Effectiveness and efficiency of interventions</i>	2009
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten <i>Sécurité structurale des ouvrages d'art existants</i> <i>Structural safety of existing highway structures</i>	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten <i>Efficacité et efficience des interventions sur les ouvrages d'art</i> <i>Effectiveness and efficiency of interventions on highway structures</i>	2009
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten <i>Sécurité sur les chantiers d'ouvrages d'art</i> <i>Safety on constructions sites off highway structures</i>	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers <i>Bemessung und Nachweis der Fahrbahnplatten von Strassenbrücken</i> <i>Design and verification of bridge deck slabs for highway bridges</i>	2009
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar <i>Georadar zur Auffindung von Chloriden</i> <i>Detection of chlorides using ground penetrating radar</i>	2009
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 / Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten <i>Components durables des couches bitumineux</i> <i>Durable components in bituminous layers</i>	2009
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz <i>Bases pour eCall en Suisse</i> <i>Technical and organisational basis for eCall in Switzerland</i>	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen <i>Bases de dimensionnement pour le renforcement par géosynthétiques</i> <i>Design of reinforcement with geosynthetics</i>	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion: Résultats et analyse de l'enquête en Suisse <i>Stau auf Strassen: Resultate und Analysen von Untersuchungen in der Schweiz</i> <i>Acceptance of road pricing: results and analysis of surveys carried out in Switzerland</i>	2009
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests <i>Amélioration des informations fournies par l'essai d'orniérage LCPC</i> <i>Improving information on materials behaviour obtained from the LCPC wheel tracking test</i>	2009

Bericht-Nr.	Projekt-Nr.	Titel	Jahr
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert <i>Influences et interactions de l'état de surface et de la portance sur la valeur intrinsèque et la valeur d'usage</i> <i>Influences and interactions of the surface quality and the bearing capaci- ty on the intrinsic value and the user value</i>	2009
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen <i>Exigences à l'équipement routier pour l'utilisation de la bande d'arrêt d'urgence</i> <i>Requirements for road side equipment by hard shoulder usage</i>	2009
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen <i>Facteurs d'influence sur la résistance au feu de structures en béton</i> <i>Influences on the fire resistance of concrete structures</i>	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrsintensiven Einrichtungen (VE) <i>Trafic net des installations générant un trafic important (IGT)</i> <i>Net traffic induction of installations producing high traffic volumes (VE)</i>	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltra- tions sur les talus" – vérification in situ et optimisation <i>Retention der Schadstoffe des Strassenabwassers durch das "über die Schulter Versickerungs-System" – in situ Verifikation und Optimierung</i> <i>Road runoff pollutant retention by infiltration through the roadside slopes – in situ verification and optimization</i>	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in situ des sols <i>Vorfabrizierte, vertikale, thermische Entwässerungsleitungen für die in situ Konsolidierung von Böden</i> <i>Prefabricated thermal vertical drains for in situ consolidation of soils</i>	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit <i>Nouvelles méthodes pour reconnaître et faire respecter la vitesse maxi- male autorisée</i> <i>New methods to identify and enforce the authorized speed limit</i>	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Ver- kehrsüberwachung <i>Exigences de qualité posées au traitement vidéo numérique pour la surveillance du trafic routier</i> <i>Quality requirements for digital video-analysis in traffic surveillance</i>	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen – Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen <i>L'influence de l'aménagement de l'espace de la route sur le trafic</i> <i>La résistance de passage du trafic comme instrument de travail pour la conception urbaine de zone routière</i>	2009
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen – Anforderungen und Auswirkungen <i>Arrêt en cap – exigences et effets</i> <i>Cape stops – requirements and impacts</i>	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserfüh- renden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der messdaten des Lötschberg Basistunnels <i>Test de la méthode "Prédiction indirecte de zones de venue d'eau au moyen de données thermiques" à l'aide des données du tunnel de base du Lötschberg</i> <i>Test of the method "Indirect prediction ahead of water bearing zones with temperatures data" with the measured data from the Lötschberg Base Tunnel</i>	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für be- schleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen <i>Etude de pilote pour l'évaluation d'une machine mobile à vrai grandeur qui permet de simuler le trafic sur les routes dans une manière accélérée</i> <i>Pilot-study for the evaluation of a mobile full-scale accelerated pavement testing equipment</i>	2009

Bericht-Nr.	Projekt-Nr.	Titel	Jahr
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche <i>Caractéristiques de bruit de couches de roulement en comparaison avec des couches d'asphalte coulé (Gussasphalt) avec surface construite</i> <i>Comparison of noise characteristics of wearing courses with mastic asphalt (Gussasphalt) with designed surface</i>	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung <i>Politique de transport: la prise de décision dans la planification des transports</i> <i>Transport-policy decision-making in transport planning</i>	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung) <i>Relation entre les propriétés diélectriques des revêtements routiers et leur condition</i> <i>A relationship between the dielectric properties of asphalt pavements and the present condition of the road</i>	2009
1267	VSS 2007/902	Einsatz modellbasierter Datentransfernormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik <i>Utilisation des standards d'échange de données basés modélisation pour la télématique des transports routiers à l'exemple des données de trafic</i> <i>Use of modal driven data transfer standards in the road transport telematic exemplified by traffic data</i>	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebpartikeln des Strassenverkehrs (APART) <i>PM10 emission factors of abrasion particles from road traffic</i> <i>Facteurs d'émission des particules d'abrasion dues au trafic routiers</i>	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen <i>Evaluation of road restraint systems in central reserves of motorways</i> <i>Évaluation de dispositifs de retenue de véhicule sur le terre-plein central des autoroutes</i>	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse – Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung <i>Interaction route – stabilité des versants: Monitoring et calcul à rebours</i> <i>Road-landslide interactions: Monitoring and inverse stability analysis</i>	2009
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen <i>Entretien des écrans antibruit</i> <i>Maintenance of noise reducing devices</i>	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung <i>Applications des modèles simulations dans le domaine de planification en transport marchandises</i> <i>Application of simulation tools in freight traffic and transport planning</i>	2009
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic urban origin – destination matrix – estimation methodology <i>Méthodologie pour l'estimation de matrices origine-destination dynamiques en réseau urbain</i> <i>Methode zur Ermittlung dynamischer Quell-Ziel-Matrizen für städtische Netzwerke</i>	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit – verkehrstechnischer Teilbericht <i>Influence des systèmes d'information embarqués sur le comportement de conduite et la sécurité routière – rapport partiel d'ingénierie de la circulation</i> <i>Influence of In-Vehicle Information Systems on driver behaviour and road safety – report part of traffic engineering</i>	2009
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisell <i>Capacité des giratoires à deux voies de circulation</i> <i>Capacity of two-lane roundabouts</i>	2009

Bericht-Nr.	Projekt-Nr.	Titel	Jahr
1285	VSS 2002/202	In situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen <i>Mesures in situ des propriétés acoustiques des écrans antibruit</i> <i>In situ measurement of the acoustical properties of noise barriers</i>	2009
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren <i>Procédure analytique d'estimation de la capacité et du niveau de service de carrefours sans feux complexes</i> <i>Analytic procedure to estimate capacity and level of service at complex uncontrolled intersections</i>	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos <i>Estimation du risque pour le réseau</i> <i>Estimation of the network risk</i>	2010
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten <i>Appréciation des risques pour les ouvrages d'art</i> <i>Risk assessment for highway structures</i>	2010
945	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat <i>Bases pour l'utilisation du béton de recyclage en granulats de béton</i> <i>Fundamentals for the use of recycled concrete comprised of concrete material</i>	2010
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme – behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen <i>Aménagement des feux de signalisation pour les personnes à mobilité réduite ou âgées</i> <i>Traffic control systems – handicapped and older people at signalized intersections</i>	2010
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr – Vorstudie <i>Niveaux de service multimodales de la circulation routière – études préliminaires</i> <i>Multimodal level of service of road traffic – preliminary study</i>	2010
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmaßnahmen <i>Coûts supplémentaires engendrés par l'exécution anticipée ou retardée des mesures d'entretien</i> <i>Additional costs caused by bringing forward or delaying of standard interventions for road maintenance</i>	2010