

Martin Ziegler, Benjamin Aulbach, Christian Baier

**Erweiterung des Vereisungsverfahrens
zur umweltverträglichen
Herstellung komplizierter
Untergeschosskonstruktionen bei
strömendem Grundwasser**



F 2744

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2010

ISBN 978-3-8167-8279-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

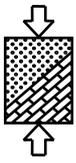
Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



Zeichen:
Zie/Au

Datum:
30.08.09

Abschlussbericht

Aktenkennzeichen: Z6 – 10.08.18.7-07.31

Forschungsthema: „Erweiterung des Vereisungsverfahrens zur umweltverträglichen Herstellung komplizierter Untergeschosskonstruktionen bei strömendem Grundwasser“

Kurztitel: „Erweiterung des Vereisungsverfahrens“

Forschende Stelle: Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen

Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Benjamin Aulbach
Dr.-Ing. Christian Baier

Weitere beteiligte Forschungseinrichtungen:

Geophysica Beratungsgesellschaft mbH
Lütticherstraße 32
52064 Aachen

Phrealog
Hauptstraße 17-19
55120 Mainz

Mitfinanzierende Stelle:

Wayss & Freytag Ingenieurbau AG
Eschborner Landstraße 130-132
60489 Frankfurt

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.

(Aktenkennzeichen: Z6 – 10.08.18.7-07.31 / II 2 – F20-07-042)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Vorwort

Dem vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) zur Beratung der forschenden Stelle eingesetzten Beratergremium gehören

Herr Prof. Dr.-Ing. Dietmar Placzek von der ELE Beratende Ingenieure GmbH Erdbaulaboratorium Essen,

Herr Dr.-Ing. Peter Jordan von der CDM Consult GmbH,

Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Conrad Boley vom Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Universität der Bundeswehr München

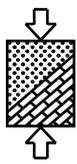
und

Herr Dr.-Ing. Michael Brüggemann vom Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB (i.A. für das BBR)

an. Dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung und den Mitgliedern des Beratergremiums sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

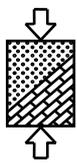
Ebenso gedankt sei den beteiligten Firmen Geophysica Beratungsgesellschaft mbH und Phrealog für die Zusammenarbeit sowie der Firma Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, die das Vorhaben finanziell unterstützte.

Darüberhinaus sei der Arbeitsgemeinschaft Nord-Süd Stadtbahn Köln Los Süd für die Unterstützung im Rahmen der Erkundung der Grundwassersituation und die Bereitstellung von Unterlagen gedankt.



Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Veranlassung	1
1.3	Ziel des Forschungsvorhabens	2
2	Theoretische Grundlagen und numerische Simulation.....	4
2.1	Physik gefrierender Böden	4
2.2	Ungefrorener Wassergehalt.....	7
2.3	Phasenwechselmodell.....	8
2.4	Numerische Umsetzung und Verifikation des Phasenwechselmodells	9
3	Parameterstudie für eine angeströmte Wand	11
3.1	Ausgangssystem	11
3.2	Einfluss des Porenanteils.....	12
3.3	Einfluss des Quarzgehaltes.....	14
3.4	Einfluss der Grundwassertemperatur	15
3.5	Einfluss des Rohrabstands.....	17
3.6	Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit.....	18
3.7	Fazit der Parameterstudie	19
4	Optimierungsmöglichkeiten zur Verkürzung der Aufgefrierzeiten	20
4.1	Optimierung des Aufgefrierprozesses bei einer angeströmten Wand	20
4.1.1	Formanpassung	21
4.1.2	Verdichtung	23
4.1.3	Vorkühlung	25
4.1.4	Zusätzliche Rohre in Wandmitte	26
4.1.5	Fazit Optimierung einer angeströmten Wand	28
4.2	Optimierung geschlossener Formen	29
4.2.1	Optimierung eines quadratischen Systems.....	29
4.2.2	Optimierung rechteckiger Systeme.....	32
4.2.3	Optimierung elliptischer Systeme	34
4.2.4	Fazit Optimierung geschlossener Formen.....	36
4.3	Optimierung bei Düseneffekten durch benachbarte Hindernisse	37



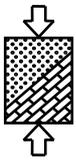
4.3.1	Optimierung bei Düseneffekten infolge Hindernissen auf beiden Seiten des Strömungskanals	37
4.3.2	Optimierung bei Düseneffekten durch ein Hindernis auf einer Seite	41
4.3.3	Fazit Optimierung bei Düseneffekten durch benachbarte Hindernisse.....	44
5	Nachrechnung einer konkreten Baumaßnahme	45
5.1	Vereisungsmaßnahme zur Errichtung der Untergeschosskonstruktion einer Haltestelle	45
5.2	Erkundung der Grundwassersituation	47
5.2.1	Ermittlung der Fließgeschwindigkeit mittels Pegelmessungen und numerischen Simulationen	48
5.2.2	Ermittlung der Fließgeschwindigkeit mit dem GFV-Verfahren	51
5.3	Nachrechnung eines Querschlags ohne GW-Strömung	55
5.4	Nachrechnung der Vereisungsmaßnahme mit GW-Strömung	57
5.5	Fazit Nachrechnung einer konkreten Baumaßnahme.....	60
6	Zusammenfassung und Ausblick	61

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

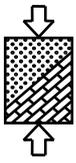
Anhang



Bezeichnungen und Begriffe

Lateinische Buchstaben

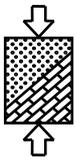
A	Gefrierrohrabstand	m
a, b	Parameter zur Beschreibung des ungefrorenen Wassergehalts	-
c_s	spezifische Wärmekapazität des Bodens	J/(kgK)
c_v	volumetrische Wärmekapazität des Bodens	J/(m ³ K)
$c_{v,i}$	volumetrische Wärmekapazität des Eises	J/(m ³ K)
$c_{v,m}$	volumetrische Wärmekapazität des Feststoffs	J/(m ³ K)
$c_{v,w}$	volumetrische Wärmekapazität des Wassers	J/(m ³ K)
d	Korndurchmesser	m
d_i	Äquivalenzdurchmesser der i-ten Kornklasse	m
E	Impedanzfaktor für die Durchlässigkeit des gefrorenen Bodens	-
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
k	Permeabilität	m ²
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert	m/s
$k_{f,g}$	Durchlässigkeitsbeiwert für den gefrorenen Boden	m/s
$k_{f,u}$	Durchlässigkeitsbeiwert für den ungefrorenen Boden	m/s
L	latente Wärme	J/kg
n	Porenanteil	-
n_i	eisgefüllter Porenanteil	-
n_m	volumetrischer Anteil des Feststoffs	-
n_w	wassergefüllter Porenanteil	-
q	Quarzgehalt	%



S_s	massenbezogene spezifische Oberfläche	m^2/g
T	Temperatur	$^{\circ}C$
T'	Betrag der Temperatur unterhalb der Liquidustemperatur	$^{\circ}C$
T_L	Liquidustemperatur	$^{\circ}C$
T_s	Solidustemperatur	$^{\circ}C$
v	Fließgeschwindigkeit (Filtergeschwindigkeit)	m/s
w	Wassergehalt	%
w_u	ungefrorener Wassergehalt	%

Griechische Buchstaben

η	dynamische Viskosität	Ns/m^2
λ	Wärmeleitfähigkeit des Bodens	$W/(mK)$
λ_i	Wärmeleitfähigkeit von Eis	$W/(mK)$
λ_m	Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs	$W/(mK)$
λ_M	Wärmeleitfähigkeit der restlichen Bodenbestandteile	$W/(mK)$
λ_Q	Wärmeleitfähigkeit von Quarz	$W/(mK)$
λ_w	Wärmeleitfähigkeit von Wasser	$W/(mK)$
ρ	Dichte	kg/m^3
ρ_d	Trockendichte des Bodens	kg/m^3
ρ_f	Fluiddichte	kg/m^3
ρ_s	Korndichte	kg/m^3
ρ_w	Dichte von Wasser	kg/m^3
$\varphi_{m,i}$	Massenanteil der i-ten Kornfraktion	-



1 Einführung

1.1 Allgemeines

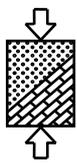
Das Vereisungsverfahren zur Herstellung von künstlich gefrorenem Baugrund stellt eine sichere und umweltverträgliche Bauhilfsmaßnahme für die Bauwerkserstellung unter komplizierten Randbedingungen dar. Im Tunnelbau hat es sich in der Vergangenheit aufgrund seiner Flexibilität, der zuverlässigen Durchführung und Überwachung vielfach bewährt. Vereinzelt wurde es aber auch schon im Hochbau für komplizierte Baugruben oder Unterfangungen im Grundwasser angewendet und zwar insbesondere dann, wenn andere Verfahren versagten (z. B. mangelnde Dichtigkeit bei Düsenstrahlinjektionen).

Der planmäßige Einsatz des Vereisungsverfahrens scheiterte bisher oftmals daran, dass die Kosten für die im Laufe der Maßnahme benötigte Kühlleistung aufgrund mangelnder Kenntnisse und Berücksichtigung vorhandener thermischer Einflüsse falsch bewertet wurden oder aber die Möglichkeit außer Acht gelassen wurde, das Vereisungsverfahren den vorhandenen Einflüssen anzupassen. Dies wird besonders deutlich bei Vorliegen einer Grundwasserströmung, die eine permanente Wärmequelle darstellt, gegen die die Vereisungsfront ankämpfen muss. Untersuchungen zu Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau am Lehrstuhl für Geotechnik haben gezeigt, dass beispielsweise durch eine an die Grundwasserströmung angepasste Veränderung der Rohranordnung wesentlich kürzere Aufgefrierzeiten erzielt werden können und somit auch zu einer Reduzierung der Kosten führen können.

1.2 Veranlassung

Die Anwendung des Gefrierverfahrens als temporäre Bauhilfsmaßnahme vereint viele Vorteile, die sowohl in technischen als auch in umweltrelevanten Aspekten liegen. Diese Vorteile werden mit dem zunehmenden Bedarf an innerstädtischer Bebauung unter komplexen Randbedingungen und strikteren Umweltauflagen noch weiter an Bedeutung gewinnen. Momentan ist vermehrt festzustellen, dass die Bauherren dieses Bauverfahren bereits in der Ausschreibung explizit vorsehen. Vor diesem Hintergrund ist ein sicherer und wirtschaftlicher Einsatz dieses Bauverfahrens in unterschiedlichen Einsatzgebieten erforderlich, um für zukünftige Baumaßnahmen überhaupt wettbewerbsfähig zu sein bzw. Wettbewerbsvorteile realisieren zu können.

Um bereits im Vorfeld von Vereisungsmaßnahmen Optimierungsmöglichkeiten erkennen und die Maßnahme entsprechend planen und umsetzen zu können, bedarf es einer möglichst realistischen Beurteilung der Grundwassersituation, da sie maßgeblich sowohl die Schließzeit als auch den Aufwand bei der Erhaltung des Frostkörpers beeinflusst. Bei sehr hohen Grundwasserströmungen kann u.U. sogar das Zusammenwachsen des Frostkörpers verhindert werden.



Die Erkundung der Grundwasserströmung erfährt jedoch bei einer Vielzahl aktueller Bauprojekte keine ausreichende Berücksichtigung. Oftmals liegen schlichtweg keine Erkenntnisse zur Grundwasserrichtung und -geschwindigkeit vor, da eine Erkundung in dieser Hinsicht nicht stattgefunden hat.

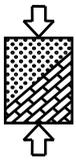
Mit der Grundwasser-Fluss-Visualisierungs (GFV) Methode, die von der mitbeteiligten Stelle Phrealog als kostengünstiges Verfahren angeboten wird, steht ein vom Ansatz vielversprechendes Verfahren zur Messung der Grundwassergeschwindigkeit und -richtung zur Verfügung, das bislang allerdings vorwiegend bei wasserwirtschaftlichen Fragestellungen eingesetzt wurde.

Durch Kenntnis der Grundwassersituation kann dann mit Hilfe von numerischen Simulationen die Sicherheit aber auch das vorhandene Einsparpotential bei der Dimensionierung der Frostkörper und der Durchführung einer Vereisungsmaßnahme herausgestellt und beurteilt werden. Aufgrund der Komplexität des Materialverhaltens gefrorener Böden und der ggf. vorhandenen Strömung bei einer Vereisungsmaßnahme im Grundwasser sind analytische Ansätze für die realitätsnahe Erfassung nur für einfache Sonderfälle verfügbar. Es werden vielmehr numerische Verfahren für die gekoppelten, nichtlinearen thermisch-hydraulischen Berechnungen erforderlich. Eine besondere Schwierigkeit ergibt sich dabei durch die im Zeitablauf sich verschiebende Lage der Frostgrenze, die als sogenannte „moving boundary“ den durchströmbaren Bereich des Modells verändert. Dies stellt gegenüber herkömmlichen Strömungsberechnungen, bei denen zeitlich unveränderliche Strukturen umströmt werden, eine erhebliche Erschwernis dar, so dass die meisten kommerziell verfügbaren Programmsysteme diese Fragestellung nicht zufriedenstellend bzw. praxistauglich lösen können.

Die Anwendung eines Programmpakets aus der Geophysik zur Beschreibung von Permafrostproblemen, angepasst auf die Randbedingungen der Baugrundvereisung, bietet hingegen eine zuverlässige Möglichkeit zur Prognose von Aufgefrierzeiten unter Strömungseinfluss bei sich ändernden Randbedingungen.

1.3 Ziel des Forschungsvorhabens

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, die Bedingungen zu konkretisieren, unter denen sich das Vereisungsverfahren auch für den Bau von Untergeschossen bzw. komplizierten Zugangsbauwerken z. B. bei unterirdischen Haltestellen oder Tiefgaragen anwenden lässt. Besondere Beachtung soll dabei die realitätsnahe Erfassung einer Grundwasserströmung finden, da diese erhebliche Auswirkungen auf die Sicherheit, Dauer und Kosten einer Gefriermaßnahme hat. Dies setzt sowohl eine fundierte Erkundung der Grundwasserverhältnisse, die bei vielen Projekten derzeit völlig unterbleibt, als auch die rechnerische Erfassung der Strömung unter Beachtung des wachsenden Frostkörpers mittels numerischer Simulationen voraus. Als Ergebnis der Untersuchungen sollen Empfehlungen für Vereisungskonzepte im Rahmen der Herstellung von Hochbauten unter Berücksichtigung einer Grundwasserströmung angegeben werden.



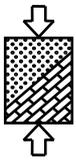
Ein erstes Ziel des Forschungsvorhabens bestand darin, anhand eines Fallbeispiels den Einfluss einer Grundwasserströmung auf das Gefrierverhalten systematisch in Abhängigkeit der wesentlichen Eingangsparameter und dabei insbesondere der Fließgeschwindigkeit zu untersuchen.

Weiterhin sollten für verschiedene Anwendungsbeispiele Optimierungsmöglichkeiten untersucht werden, um daraus Empfehlungen für künftige Vereisungsmaßnahmen abzuleiten.

Schließlich sollte der Gefrierprozess einer konkreten Baumaßnahme in seiner Gesamtheit numerisch simuliert und mit den erhobenen Messdaten verglichen werden. Die dafür erforderliche Datenbasis wurde durch die mitfinanzierende Stelle Wayss & Freytag AG zur Verfügung gestellt.

Da die genaue Kenntnis der Grundwasserverhältnisse Voraussetzung für eine realitätsnahe Simulation der Vereisungsvorgänge ist, diese Daten aber oft gar nicht oder nur unvollständig vorliegen, sollte begleitend untersucht werden, ob mit der Grundwasser-Fluss-Visualisierungsmethode (GFV) der mitbeteiligten Stelle Phrealog dieses Manko bei zukünftigen Projekten behoben werden kann. Mit der GFV-Methode könnten die erforderlichen Grundwasserdaten wesentlich einfacher, schneller und damit auch kostengünstiger erhoben werden als dies mit den herkömmlichen Methoden der Fall ist.

Mit der besseren Kenntnis der Eingangsdaten und einem zugehörigen leistungsstarken Berechnungsinstrument lassen sich Vereisungsmaßnahmen zukünftig zeit- und energieoptimiert auslegen, wodurch sich der Anwendungsbereich insbesondere auch auf den Hochbaubereich erweitert.



2 Theoretische Grundlagen und numerische Simulation

Für die numerischen Simulationen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde das Programm SHEMAT verwendet. Dieses wurde ursprünglich konzipiert, um geophysikalische Fragestellungen zu lösen. Durch die in Zusammenarbeit mit der beteiligten Stelle Geophisica Beratungsgesellschaft mbH vorgenommenen Änderungen und die Implementierung des im Folgenden dargestellten Phasenwechselmodells lässt sich das Programm nun auch für die Simulation von Bodenvereisungsmaßnahmen anwenden.

2.1 Physik gefrierender Böden

Die thermischen und hydraulischen Kennwerte von Böden weisen in dem bei einer Baugrundvereisung relevanten Temperaturspektrum eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit auf. Dies liegt zum einen an den temperaturabhängigen Eigenschaften der einzelnen Bodenbestandteile selbst, insbesondere aber an dem sich verändernden Mengenverhältnis von Wasser und Eis während des Gefrierprozesses. Dieser Vorgang erfolgt nicht isotherm bei einer bestimmten Gefriertemperatur, sondern innerhalb eines Gefrierintervalls. Auch für Temperaturen weit unterhalb des Gefrierpunktes von reinem Wasser ist noch ungefrorenes Wasser im Boden vorhanden. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Volumenanteile von Eis und Wasser in Abhängigkeit der Temperatur zu definieren.

Unabhängig von der Temperatur ergibt sich der gesamte Porenanteil n aus der bekannten Beziehung:

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (1)$$

Der volumetrische Anteil des Feststoffs n_m am Gesamtvolumen ergibt sich daraus als Komplementärgröße:

$$n_m = 1 - n \quad (2)$$

Hier werden nur vollgesättigte Böden betrachtet, so dass gemäß Abbildung 1 für ungefrorene und gefrorene Böden weiterhin gelten muss:

$$\text{ungefroren: } n = n_w \quad (3)$$

$$\text{gefroren: } n = n_w + n_i \quad (4)$$

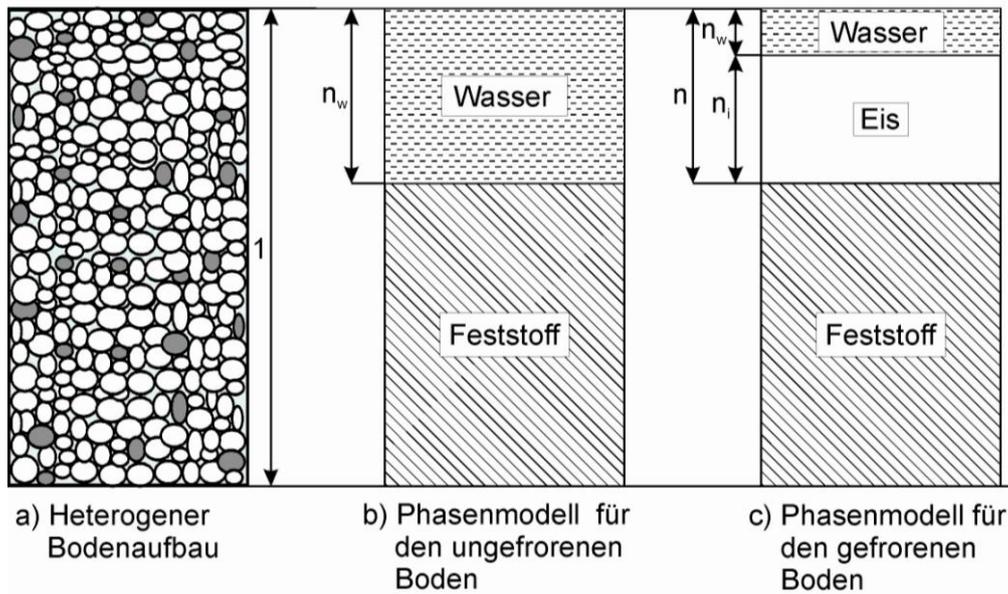
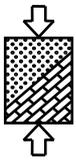


Abbildung 1: Phasenmodell gesättigter Böden

Ist der Verlauf der Volumenanteile in Abhängigkeit von der Temperatur bekannt, so können die temperaturabhängigen Eigenschaften des Gesamtsystems aus Feststoff, Wasser und Eis durch geeignete Mittelbildung der entsprechenden thermischen Parameter der einzelnen Bestandteile berücksichtigt werden. Im Wesentlichen sind dies die Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] und die spezifische Wärmekapazität c_s [J/(kgK)] bzw. die auf das Volumen bezogene volumetrische Wärmekapazität c_v [J/m³K]. Im vollgesättigten Zustand erhält man die Wärmeleitfähigkeit des Bodens durch Mittelbildung nach Johansen und Frivik (1980) über das gewichtete geometrische Mittel der Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Bestandteile. Bei Berücksichtigung der Eisphase im gefrorenen Zustand errechnet sich die Wärmeleitfähigkeit aus folgender Mittelbildung:

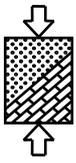
$$\lambda = (\lambda_m)^{1-n} \cdot (\lambda_w)^{n_w} \cdot (\lambda_i)^{n_i} \quad (5)$$

Dieser Ansatz findet auch Eingang in das nachfolgend vorgestellte eigene Berechnungsmodell.

Die Wärmekapazität ermittelt sich aus dem gewichteten arithmetischen Mittel der Einzelbestandteile:

$$c_v = c_{v,m} \cdot n_m + c_{c,w} \cdot n_w + c_{v,i} \cdot n_i \quad (6)$$

Wesentlichen Einfluss auf die Ausbreitung eines Frostkörpers hat zudem die latente Kristallisationswärme, die beim Phasenwechsel des Porenwassers aufgrund einer Umordnung der Atome bei der Eisbildung freigesetzt wird und den Gefrierprozess verzögert. Die latente Wärme beträgt für reines Wasser $L = 333600$ J/kg. Beim Schmelzvorgang sorgt die latente Wärme für die Trägheit von gefrorenen Böden gegenüber zu schnellem Auftauen. Dies bietet einen nicht zu unterschätzenden Sicherheitsaspekt bei kurzfristigen Funktionsstörungen des Gefriersystems.



In Abbildung 2 sind die temperaturabhängigen Verläufe der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität mit Berücksichtigung der latenten Wärme für einen Boden idealisiert dargestellt.

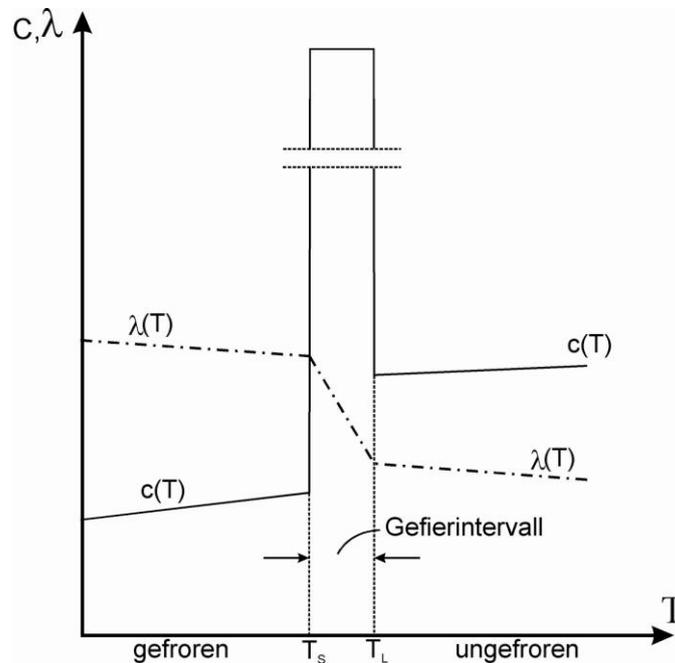


Abbildung 2: Idealisierte Verläufe der Wärmeleitfähigkeit λ und der Wärmekapazität c eines Bodens bei Berücksichtigung der Kristallisationswärme

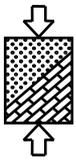
Nach der Methode der äquivalenten Wärmekapazität wird die latente Wärme oft durch eine entsprechende Erhöhung der Wärmekapazität im Gefrierintervall berücksichtigt. Die gesamte volumetrische Wärmekapazität eines Bodens lässt sich so unter Berücksichtigung der latenten Wärme wie folgt ausdrücken:

$$c_v(T) = c_{v,m} \cdot n_m + c_{c,w} \cdot n_w + c_{v,i} \cdot n_i + \rho_w \cdot L \cdot \frac{\partial n_w}{\partial T} \quad (7)$$

Neben den thermischen Kennwerten weist auch die Durchlässigkeit k_f ein temperaturabhängiges Verhalten auf. Die Permeabilität k [m²] eines Bodens hängt im Gegensatz dazu nur von den physikalischen Eigenschaften des Korngerüsts ab. Sie unterliegt keinem merklichen Temperatureinfluss und eignet sich daher als Eingabewert besser als der k_f -Wert für die Simulation von Vereisungsmaßnahmen. Zwischen Permeabilität und Durchlässigkeit besteht über die temperaturabhängigen Fluideigenschaften, Dichte ρ_f und Viskosität η , folgender Zusammenhang:

$$k_f = \frac{k \cdot \rho_f \cdot g}{\eta} \quad (8)$$

Neben der temperaturabhängigen Änderung der Durchlässigkeit infolge Änderung der Dichte und der Viskosität wirkt sich auch der noch zur Verfügung stehende ungefrorene Wasseranteil auf die Durchlässigkeit aus. Die Durchlässigkeit des gefrorenen oder gefrierenden Bodens $k_{f,g}$ lässt sich nach Jame und Norum (1980) durch die Kopplung an die volumetrische Zunahme des Eisanteils aus der Durchlässigkeit des ungefrorenen Bodens $k_{f,u}$ ableiten:



$$k_{f,g} = 10^{-E \cdot n_i} \cdot k_{f,u} \quad (9)$$

In Gleichung (9) bezeichnet E einen Impedanzfaktor, für den sich bis heute keine quantitative Beziehung zu einer Bodeneigenschaft in der Literatur findet. Die aus Erfahrung angegebenen Anhaltswerte belaufen sich für Schluffböden auf ca. $E = 2,5$, für Sandböden auf 5 bis 15 und für Kiesböden auf ca. 20 (Lundin 1990).

2.2 Ungefrorener Wassergehalt

Da wie bereits erwähnt auch weit unterhalb des Gefrierpunktes von reinem Wasser noch ungefrorenes Wasser im Boden vorhanden ist, ist der ungefrorene Wassergehalt w_u die zentrale Größe zur Beschreibung des Zustands eines gefrierenden Bodens, da sich daraus direkt alle volumetrischen Bodenanteile und damit die thermischen und hydraulischen Eigenschaften ableiten lassen. Die Kenntnis des Verlaufs des ungefrorenen Wassergehalts für Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts ist folglich essentiell für zuverlässige Gefrierzeitprognosen.

Die Bestimmung des Verlaufs des ungefrorenen Wassergehalts kann sowohl experimentell, als auch mit theoretischen Modellen erfolgen. Anderson und Tice (1972) untersuchten aufbauend auf den Ergebnissen von Nerseova und Tsytoich (1963) die Einflussgrößen auf den ungefrorenen Wassergehalt im Boden und kamen zu dem Ergebnis, dass lediglich Temperatur und spezifische Oberfläche als relevant für den Verlauf einzustufen sind. Sie formulierten die folgende empirische Beziehung zur Beschreibung des w_u -Verlaufs:

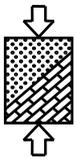
$$\ln(w_u) = 0,2618 + 0,5519 \cdot \ln(S_s) - 1,449 \cdot S_s^{-0,264} \cdot \ln(|T'|) \quad (10)$$

Mittels dieser Gleichung kann der temperaturabhängige Verlauf des ungefrorenen Wassergehalts allein aus der spezifischen Oberfläche S_s der Mineralkörner bestimmt werden. Als maßgebliche Temperatur T' geht die Temperaturdifferenz zwischen Liquidustemperatur T_L und vorhandener Temperatur T ein, die definitionsgemäß die Temperatur unterhalb des Gefrierpunktes darstellt (Civan 2000).

Trägt man den ungefrorenen Wassergehalt für eine bekannte spezifische Oberfläche über der Temperatur auf, so erhält man den für eine Potenzfunktion typischen Verlauf, die mittels Regression durch zwei Parameter a und b gemäß folgender Gleichung sehr gut approximiert werden kann:

$$w_u(T) = a \cdot |T'|^b \quad (11)$$

Der Vorfaktor a ist positiv, der Exponent b ist stets negativ.



2.3 Phasenwechselmodell

Der wesentliche Parameter zur Bestimmung der bodenspezifischen Eingangsparameter für eine Vereisungssimulation mit dem eigenen Phasenwechselmodell ist die spezifische Oberfläche der Bodenkörner. Diese wird vereinfacht über ein Kugelmodell aus der Kornverteilung berechnet und erlaubt dann mittels Gleichung (10) die Ermittlung des w_u -Verlaufs, woraus die vorab beschriebenen thermischen und hydraulischen Bodeneigenschaften abgeleitet werden können.

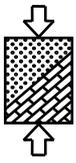
Die spezifische Oberfläche S_s eines Körpers ist definiert als das Verhältnis seiner Oberfläche zu seiner Masse. Mit abnehmendem Durchmesser nehmen bei einer Kugel das Verhältnis aus Oberfläche zu Volumen und damit die spezifische Oberfläche zu. Grobkörnige Böden besitzen daher aus geometrischen Überlegungen immer eine geringere Oberfläche als feinkörnige Böden.

Die vereinfachten rechnerischen Verfahren zur Bestimmung von S_s gründen auf der Annahme, dass der Boden aus unterschiedlich großen, aber ideal-runden Körnern besteht. Die Gesamtoberfläche des Bodens ergibt sich aus der Summe der Einzeloberflächen aller Körner. Die exakte Bestimmung ist nicht möglich. Näherungsweise wird die Körnung daher abschnittsweise in Kornklassen unterteilt. Diese werden jeweils durch einen Äquivalenzdurchmesser d_i und ihren jeweiligen Massenanteil $\varphi_{m,i}$ an der Gesamtkörnung charakterisiert. Die rechnerische Oberfläche einer Körnung wird dann als gewichtetes Mittel über die einzelnen n Kornklassen gemäß Gleichung (12) bestimmt:

$$S_s = \sum_{i=1}^n \frac{6}{d_i \cdot \rho_s} \cdot \varphi_{m,i} \quad (12)$$

Die Wahl des Äquivalenzdurchmessers einer Klasse kann auf vielfältige Weise erfolgen. Mögliche Werte sind beispielsweise der Durchmesser an der oberen oder unteren Klassengrenze bzw. das arithmetische oder das harmonische Mittel aus oberem und unterem Wert. Da die Annahme eines ideal-runden Korns ohne Rauigkeit dessen Oberfläche im Vergleich zur Realität unterschätzt, empfiehlt sich die Wahl des unteren Korndurchmessers einer Kornklasse als Äquivalenzdurchmesser. Dass damit relativ genau die spezifische Oberfläche erhalten wird, wurde durch einen experimentellen Vergleich für verschiedene Sandböden bestätigt. Somit liefert das einfache Kugelmodell ein Verfahren, um mit geringem Aufwand die spezifische Oberfläche als Basis für die Beschreibung des Gefrierverhaltens eines nichtbindigen Bodens zu ermitteln.

Mit der aus dem Kugelmodell erhaltenen spezifischen Oberfläche ist es möglich, den Verlauf des ungefrorenen Wassergehalts nach Anderson und Tice abzubilden. Nahe dem Gefrierpunkt führt die Auswertung der Potenzfunktion allerdings zu unrealistisch hohen Beträgen für den ungefrorenen Wassergehalt. Daher wird eine Deckelfunktion mit dem Wert des im ungefrorenen Zustand vorherrschenden Wassergehalts eingeführt und somit die maximal aufzugefrierende Wassermenge physikalisch



korrekt nach oben begrenzt (siehe Abbildung 3). Würde diese Deckelung nicht vorgenommen werden, ergäben sich unrealistisch große Aufgefrierzeiten aufgrund der deutlich überschätzten latenten Wärme während des Phasenwechsels.

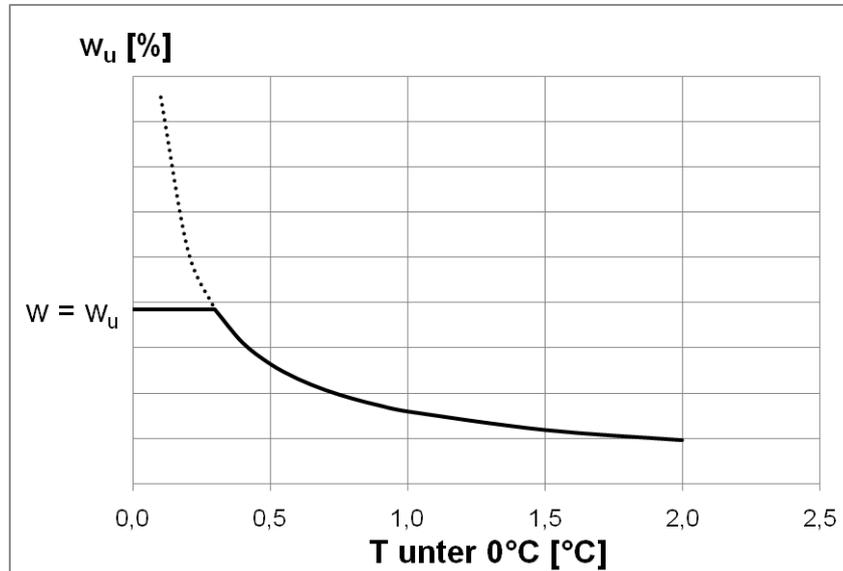


Abbildung 3: Gedeckelter Verlauf des ungefrorenen Wassergehalts für das Phasenwechselmodell

2.4 Numerische Umsetzung und Verifikation des Phasenwechselmodells

Mit dem Finite-Differenzen-Programm SHEMAT (Simulator for Heat and Mass Transport) liegt ein an der RWTH Aachen am Lehrstuhl für Angewandte Geophysik von der Gruppe von Prof. Clauser entwickeltes Programmsystem vor, welches die thermisch-hydraulische Kopplung bei wandernder Frostgrenze bewerkstelligen kann. Das Programm wurde ursprünglich für die Beschreibung geophysikalischer Prozesse bei Tiefengesteinen konzipiert. Es wurde mit Unterstützung der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen für die praxistaugliche Anwendung für Vereisungsmaßnahmen weiterentwickelt. Durch die Implementierung des vorgestellten vereinfachten Phasenwechselmodells ist eine hinreichend genaue Beschreibung des Gefrierhaltens eines Bodens durch die Vorgabe weniger bodenphysikalischer Standardgrößen möglich.

Die Verifikation des Phasenwechselmodells und dessen numerischer Umsetzung erfolgte durch Nachrechnung von Modellversuchen und zwar sowohl ohne als auch mit Berücksichtigung des Einflusses einer Grundwasserströmung. In den folgenden Abbildungen sind die bei Modellversuchen ohne (Makowski 1986) und mit Grundwasserströmung (Frvik und Comini 1982) gemessenen und die mit SHEMAT berechneten Temperaturverläufe dargestellt.

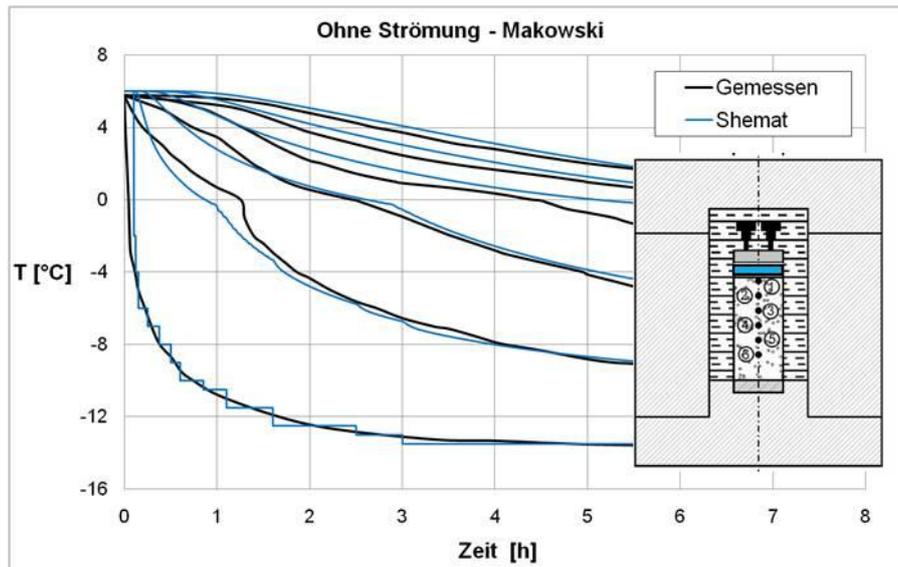
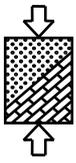


Abbildung 4: Gemessene und mit SHEMAT berechnete Temperaturverläufe eines Modellversuchs ohne Grundwasserströmung

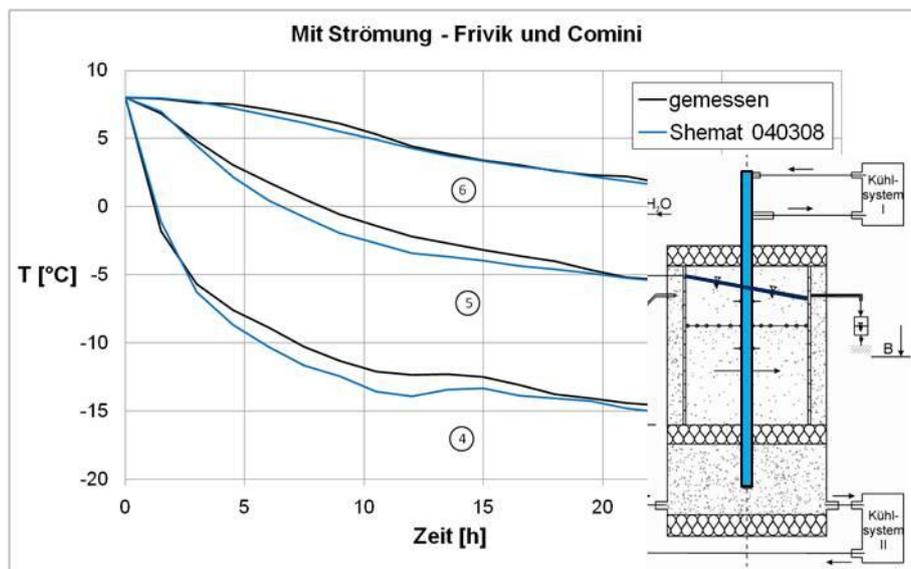
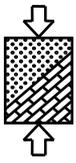


Abbildung 5: Gemessene und mit SHEMAT berechnete Temperaturverläufe eines Modellversuchs mit Grundwasserströmung

Die gute Übereinstimmung zeigt, dass es mit dem in SHEMAT implementierten Phasenwechselmodell möglich ist, das Gefrierverhalten realitätsnah abzubilden.

Durch die Ableitung des ungefrorenen Wassergehalts aus der Kornverteilung des Bodens erübrigt sich die aufwändige Bestimmung thermischer Kennwerte bei einer Vielzahl von Randbedingungen. Es liegt damit ein praxisgerechtes Instrument vor, mit dem sich durch unterschiedliche Anordnungen der Gefrierrohre und Betriebsweisen die Aufgefrierzeiten unter Strömungseinfluss optimieren lassen.



3 Parameterstudie für eine angeströmte Wand

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde zunächst der Einfluss verschiedener Parameter auf das Gefrierverhalten anhand einer aufzufrierenden Wand untersucht. Betrachtet wurden die bodenspezifischen Kennwerte Porenanteil und Quarzgehalt, sowie die Grundwassertemperatur, der Rohrabstand und die Grundwasserfließgeschwindigkeit. Hierbei wurden sowohl Berechnungen ohne als auch mit Grundwasserströmung durchgeführt. Der Vergleich der verschiedenen Systeme erfolgte dabei über den Zeitpunkt des Frostkörperschlusses. Dieser wurde so definiert, dass über die gesamte Wandhöhe (vgl. Abbildung 6) ein durchgängiger Frostkörper mit $T \leq -1 \text{ °C}$ vorhanden sein musste.

3.1 Ausgangssystem

Das der Parameterstudie zugrundeliegende Ausgangssystem einer angeströmten Wand ist in Abbildung 6 dargestellt.

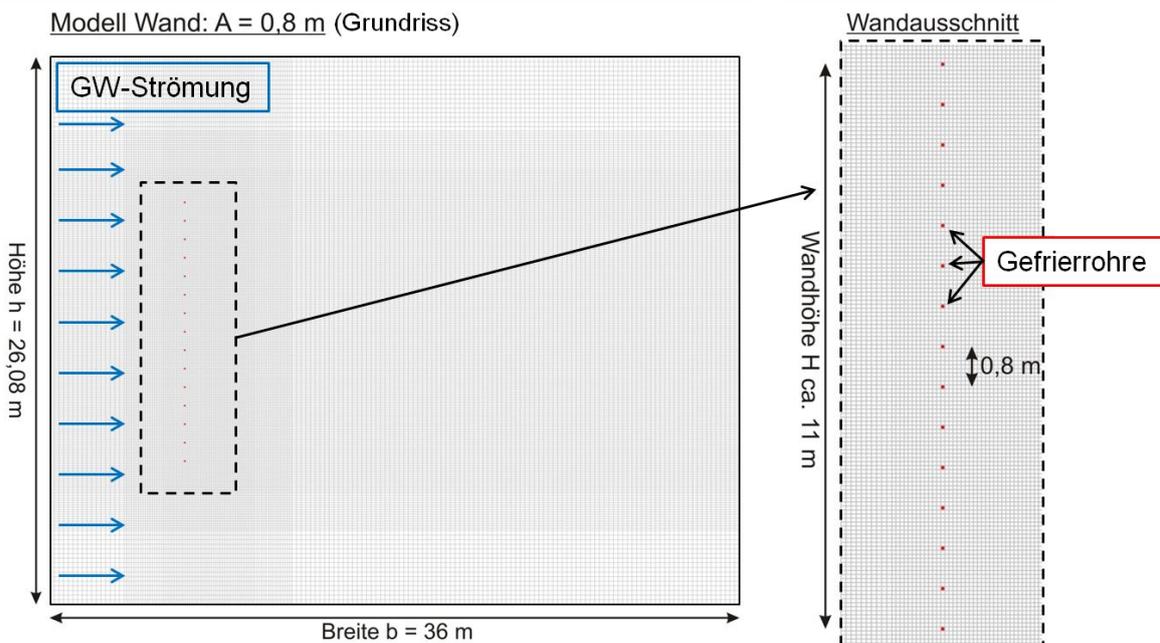
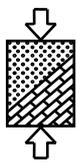


Abbildung 6: Systemskizze angeströmte Wand

Beim Ausgangssystem wird das Aufgefrieren der Wand durch 15 Gefrierrohre realisiert, welche einen Abstand von 0,8 m aufweisen. Für die Untersuchung des Einflusses des Rohrabstands wurde die Wandhöhe beibehalten und der Abstand bzw. die Rohranzahl verändert. Zu Beginn einer jeden Simulation besitzt das gesamte Ausgangssystem eine konstante Temperatur von 10 °C , ehe den Gefrierrohren eine Temperatur von -35 °C , entsprechend der Temperatur bei einer Sohlevereisung, zugewiesen wird. Bei der Betrachtung anderer Grundwassertemperaturen besitzt das jeweilige System zu Beginn die dem Grundwasser entsprechende Temperatur. Im Anstrom wird die Temperatur während der gesamten Simulation weiterhin vorgegeben und somit die Temperatur der den



Frostkörper beanspruchenden Grundwasserströmung aufrechterhalten. Die Grundwasserströmung selbst wird durch verschiedene Potentiale am linken und rechten Modellrand erzeugt. Bei den in den folgenden Ausführungen angegebenen Grundwasserfließgeschwindigkeiten handelt es sich stets um diejenigen Filtergeschwindigkeiten, welche vor dem Aufgefrieren, also noch ohne Querschnittsverengung durch den Frostkörper, vorhanden sind.

Als Boden wurde für das Ausgangssystem der sogenannte Hokksundsand gewählt. Dieser wurde für den in 2.4 angeführten Modellversuch von Frivik und Comini verwendet. Die sich aus diesem Sand ergebenden Ausgangsgrößen und Eingangsparameter sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Parameter		Wert	Einheit
Trockendichte	ρ_d	1600	[kg/m ³]
Porenanteil	n	0,41	[-]
Quarzgehalt	q	35	[%]
Wärmeleitfähigkeit (Feststoff)	λ_m	3,359	[W/(mK)]
Volum. Wärmekapazität (Feststoff)	$c_{v,m}$	$2000000 \cdot (1 + 0,005301 \cdot T)$	[J/(m ³ K)]
Permeabilität	k	$4,4 \cdot 10^{-11}$	[m ²]
Spezifische Oberfläche	S_s	0,0061	[m ² /g]
Freezing Parameter	a	0,071	[-]
	b	-5,46	[-]
	E	10	[-]

Tabelle 1: Eingangsparameter entsprechend Hokksundsand

3.2 Einfluss des Porenanteils

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde nur vollgesättigter Boden betrachtet. Die Menge des aufzufrierenden Wassers ist also direkt proportional zum Porenanteil (vgl. 2.1). Da sich die wärmetechnischen Eigenschaften von Wasser und Eis von denen des Kornanteils wesentlich unterscheiden, muss eine Veränderung des Porenanteils auch eine Änderung des Gefrierverhaltens nach sich ziehen.

Ausgehend von einem Porenanteil von $n = 0,41$ des Hokksundsandes wurden auch Porenanteile von $n = 0,2 / 0,3$ und $0,5$ untersucht. In Abbildung 7 sind die Zeitpunkte des Frostkörperschlusses (FK-Schluss) ohne Grundwasserströmung über den verschiedenen Porenanteilen aufgetragen.

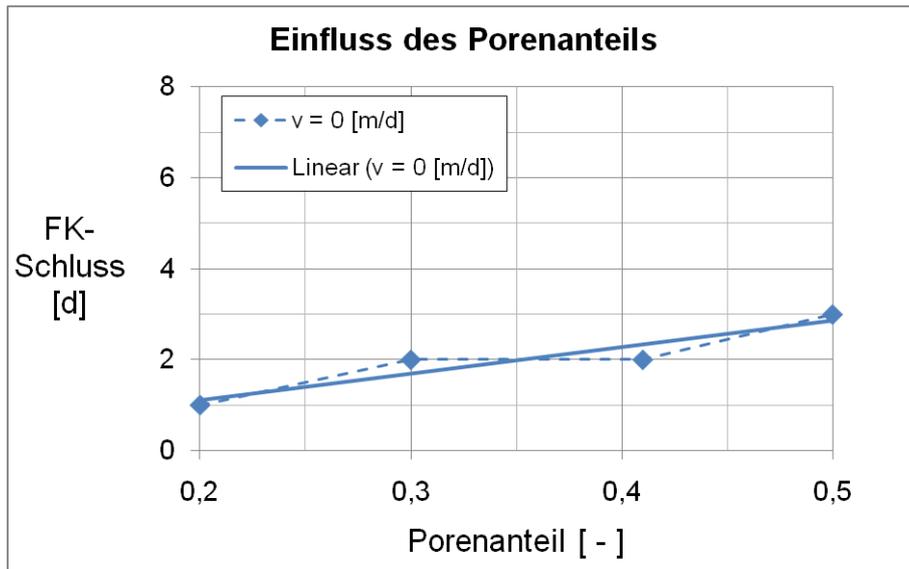
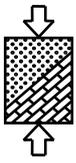


Abbildung 7: Einfluss des Porenanteils auf den Frostkörperschluss ohne Grundwasserströmung

Der gestrichelte Verlauf entspricht hierbei der Auswertung der numerischen Simulationen, die durchgezogene Linie stellt eine lineare Annäherung dar. Man erkennt, dass sich mit steigendem Porenanteil die Aufgefrierdauer verlängert. Dass der Frostkörperschluss für $n = 0,3$ und $n = 0,41$ zum gleichen Zeitpunkt erreicht wird, liegt in der Auswertegenauigkeit begründet. Da eine Auswertung der Berechnungen immer nur nach ganzen Tagen erfolgt, muss beispielsweise für $n = 0,3$ der Frostkörperschluss nicht exakt nach zwei Tagen, sondern könnte auch schon nach eineinhalb Tagen erfolgt sein.

Weiterhin wurden Berechnungen für verschiedene Fließgeschwindigkeiten und unterschiedliche Porenanteile durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abbildung 8 für $v = 0 / 0,5$ und $0,75$ [m/d] dargestellt.

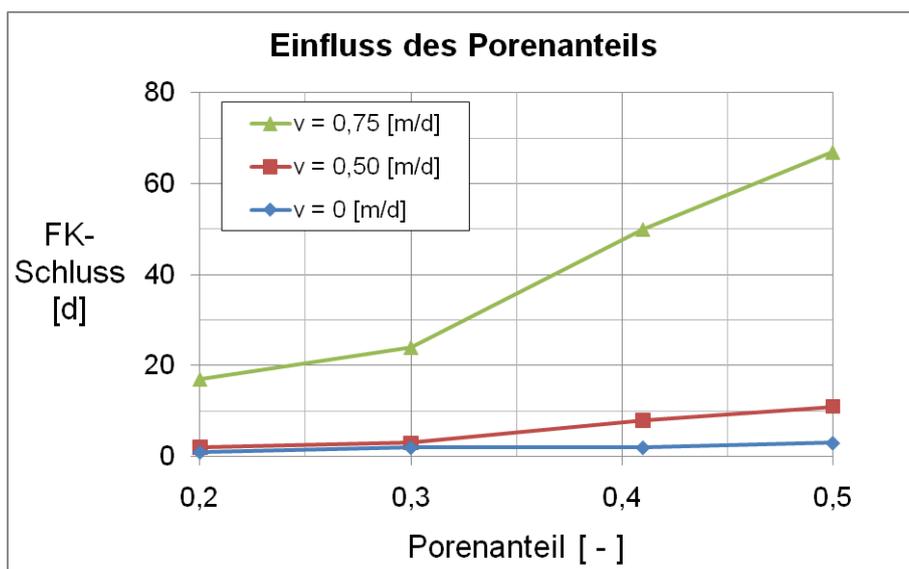
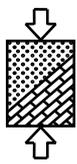


Abbildung 8: Einfluss des Porenanteils für verschieden Fließgeschwindigkeiten



Anhand der Kurven ist deutlich zu erkennen, dass bei erhöhter Fließgeschwindigkeit der Einfluss des Porenanteils zunimmt.

3.3 Einfluss des Quarzgehaltes

Die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs hängt wesentlich von dessen Quarzgehalt ab (z.B. Farouki 1986). Aufgrund der stark ausgeprägten atomaren Bindung der Quarzminerale weist Quarz eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit auf, die in guter Näherung zu $\lambda_Q = 8,8 \text{ W/(mK)}$ angenommen werden kann. Die Wärmeleitfähigkeit der übrigen Feststoffbestandteile λ_M lässt sich aus der Korndichte des Bodens abschätzen. Korndichten bis zu 2700 kg/m^3 weisen auf Glimmer und Feldspat als Hauptkomponenten hin, so dass λ_M zu 2 W/(mK) gewählt werden kann. Für größere Korndichten kann λ_M zu $3,5 \text{ W/(mK)}$ gesetzt werden.

Ist der Quarzgehalt q eines Bodens bekannt, empfehlen Johansen und Frivik (1980) eine geometrische Mittelbildung zur Berechnung der Feststoffwärmeleitfähigkeit gemäß

$$\lambda_m = \lambda_Q^q \cdot \lambda_M^{1-q} \quad (13)$$

Aus diesem Ansatz folgt, dass mit zunehmendem Quarzgehalt die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs und damit auch die des gesamten Bodens zunimmt. Da der für den Hokksundsand vorhandene Quarzgehalt im Vergleich zu sonstigen Sanden als niedrig einzustufen ist (vgl. Koll 2005), wurden weitere Quarzgehalte bis zu $q = 0,75 [\%]$ untersucht. Daraus ergeben sich nach Gleichung (13) Wärmeleitfähigkeiten des Feststoffs von $\lambda_M = 3,359 - 6,076$. Die Ergebnisse hinsichtlich des FK-Schlusses sind in Abbildung 9 dargestellt.

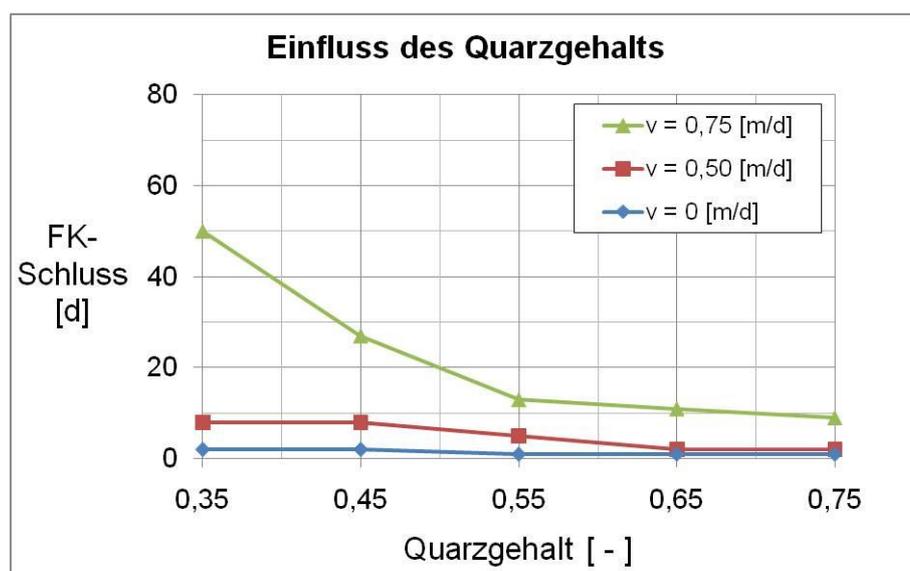
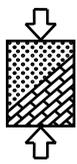


Abbildung 9: Einfluss des Quarzgehaltes für verschieden Fließgeschwindigkeiten



Man sieht, dass sich die Aufgefrierzeit mit zunehmendem Quarzgehalt verringert bzw. bei kleinen Quarzgehalten und damit niedrigeren Wärmeleitfähigkeiten mehr Zeit bis zum Aufgefrieren benötigt wird. Auch hier wird dieser Effekt durch erhöhte Fließgeschwindigkeiten wesentlich verstärkt, wie anhand der grünen Linie für $v = 0,75$ [m/d] zu sehen ist.

3.4 Einfluss der Grundwassertemperatur

Im oberflächennahen Bereich sind die Bodentemperatur und damit auch die Temperatur des Grundwassers gewissen jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. In Abbildung 10 ist beispielhaft für die Stadt Berlin der Temperaturverlauf im Boden über die Tiefe für verschiedene Zeitpunkte dargestellt.

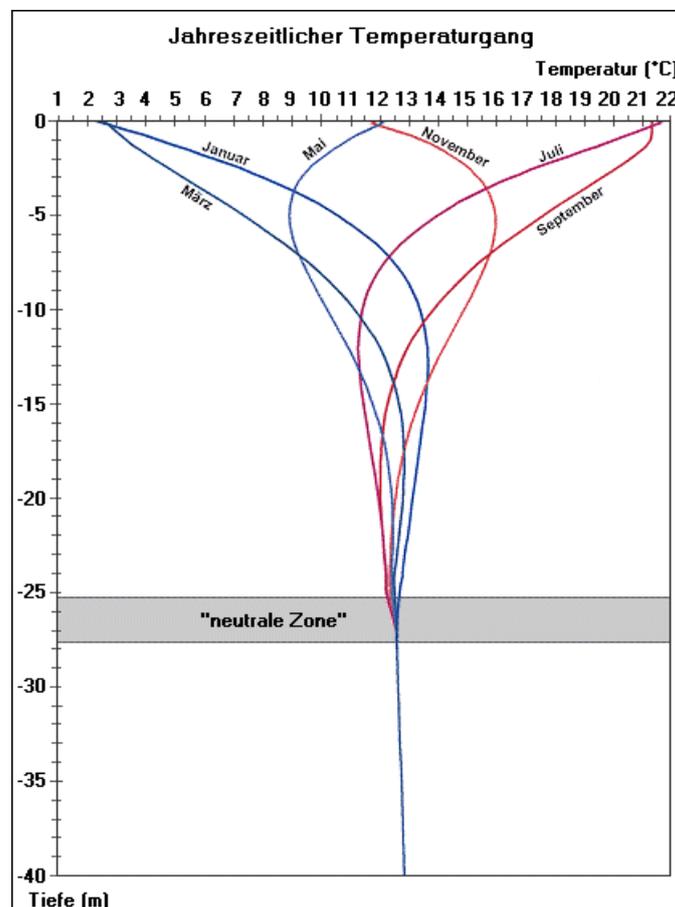


Abbildung 10: Temperaturschwankungen über die Tiefe im Boden in Berlin (Stadt Berlin 1999)

Da die Grundwassertemperatur die Temperaturdifferenz bestimmt, um welche ein Boden bis zum Gefrieren abgekühlt werden muss und bei vorhandener Strömung mit zunehmender Grundwassertemperatur die thermische Belastung für den Frostkörper zunimmt, wurden mehrere Temperaturen von $T = 8-14$ °C untersucht. In Abbildung 11 sind zunächst die Frostkörperschließzeiten ohne Grundwasserströmung aufgetragen.

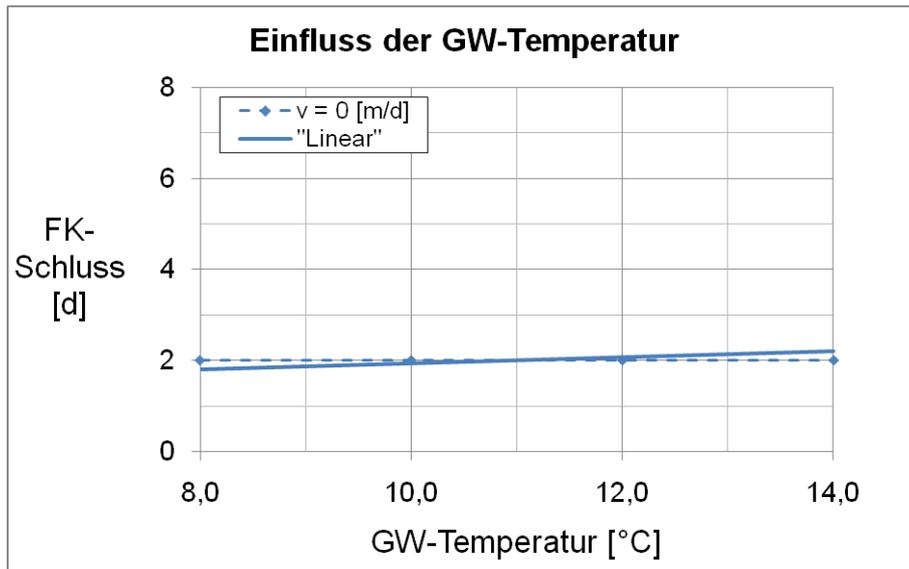
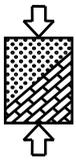


Abbildung 11: Einfluss der Grundwassertemperatur ohne Strömung

Man sieht, dass sich die Grundwassertemperatur bei dem betrachteten System kaum auf die Aufgefrierzeit auswirkt. Dies liegt darin begründet, dass bei höheren Temperaturen zwar eine größere Abkühlung stattfinden muss, ohne Strömung jedoch keine zusätzliche Wärme an die Gefrierrohre herangetragen wird. Ist hingegen eine Grundwasserströmung vorhanden, so steigt die thermische Belastung für den Frostkörper mit erhöhter Temperatur des Grundwassers stark an und die Aufgefrierzeit erhöht sich deutlich, wie in Abbildung 12 zu sehen ist.

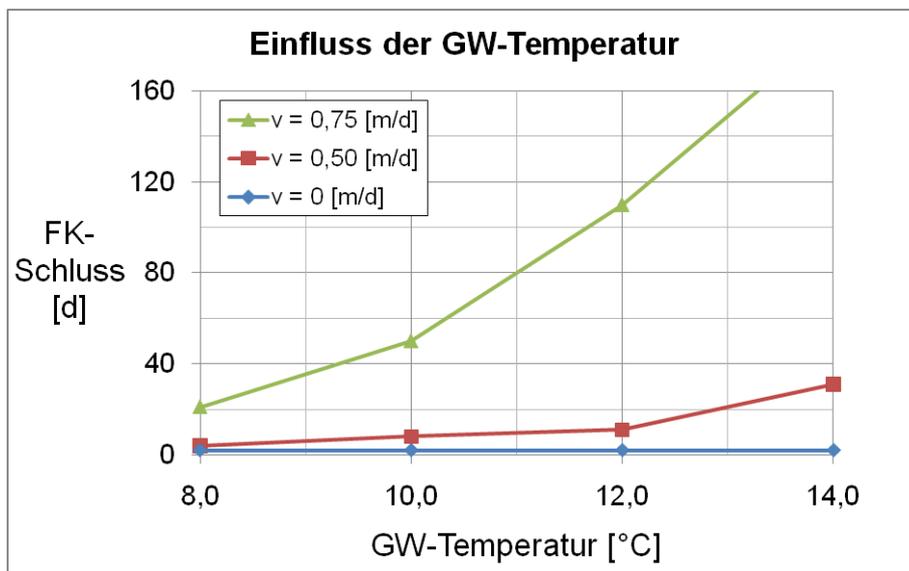
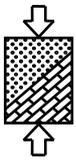


Abbildung 12: Einfluss der Grundwassertemperatur für verschiedene Fließgeschwindigkeiten



3.5 Einfluss des Rohrabstands

Eine weitere Beeinflussung ergibt sich aus dem System selbst. Je größer der Abstand der Gefrierrohre ist, umso mehr Boden muss durch die Kühlleistung jedes einzelnen Gefrierrohres aufgefroren werden. Aus diesem Grund wurde zusätzlich zu den bodenabhängigen Faktoren der Rohrabstand variiert. Untersucht wurden Rohrabstände in einem Bereich von $A = 0,6-1,4$ m.

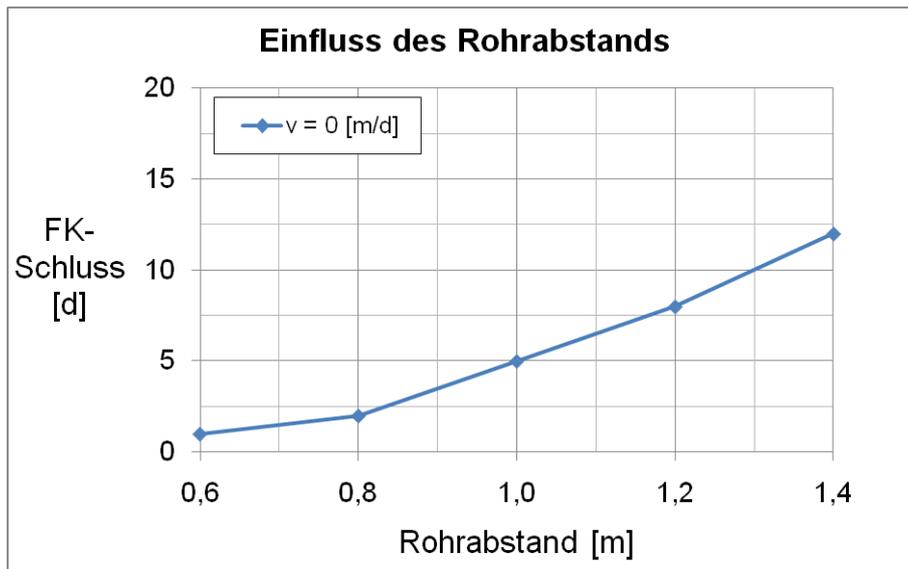


Abbildung 13: Einfluss des Rohrabstands ohne Grundwasserströmung

Anhand von Abbildung 13 sieht man, dass sich die Aufgefrierzeit auch ohne Grundwasserströmung mit zunehmendem Rohrabstand entscheiden vergrößert. Noch größer wird der Einfluss, wenn eine Grundwasserströmung vorhanden ist (vgl. Abbildung 14).

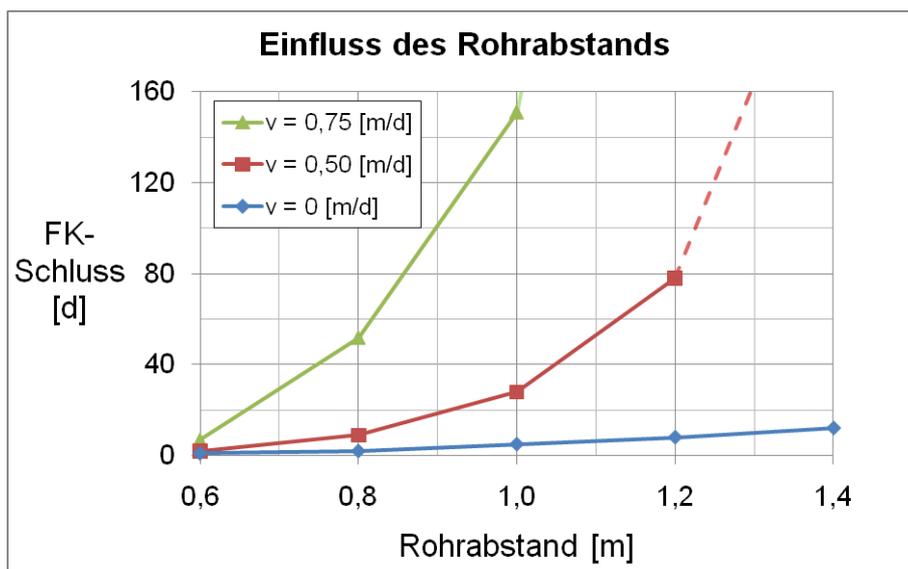
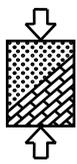


Abbildung 14: Einfluss des Rohrabstands für verschiedenen Fließgeschwindigkeiten



Es ist zu erkennen, dass bei großen Rohrabständen und erhöhten Fließgeschwindigkeiten das Verfahren an seine Grenzen stößt und es, wie bereits in 1.2 erwähnt, nicht mehr zu einem Frostkörperschluss kommt.

3.6 Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Wie sich in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt hat, werden sämtliche untersuchten Einflüsse durch eine Grundwasserströmung verstärkt. In der folgenden Abbildung sind zunächst die Aufgefrierzeiten am Ausgangssystem für verschiedene Fließgeschwindigkeiten aufgetragen.

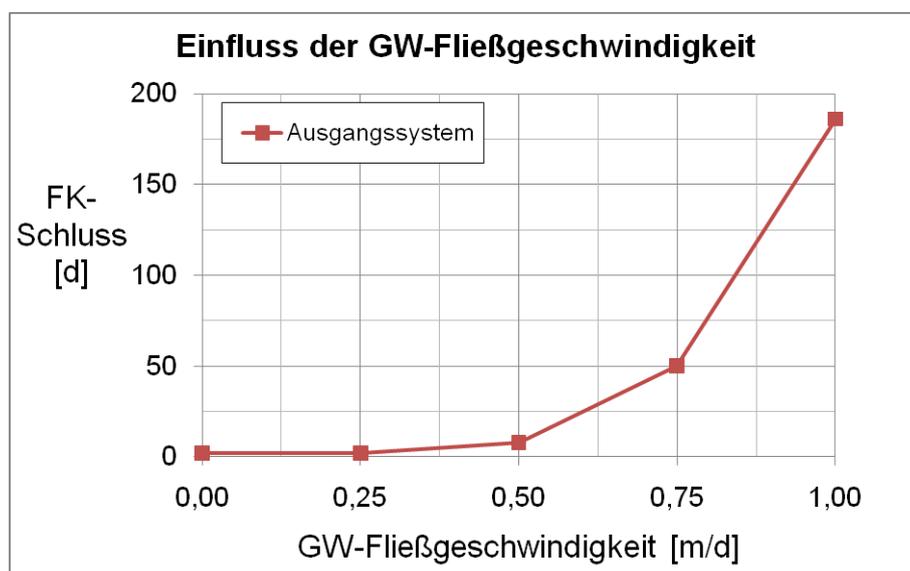
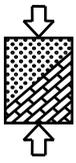


Abbildung 15: Einfluss der GW-Fließgeschwindigkeit

Es ist zu erkennen, dass die Zeitspanne bis zum Frostkörperschluss mit Zunahme der Fließgeschwindigkeit überproportional stark ansteigt und damit die Grundwasserfließgeschwindigkeit einen entscheidenden Einfluss auf Gefriermaßnahmen hat.



3.7 Fazit der Parameterstudie

In Abbildung 16 sind die Ergebnisse der Parameterstudie zusammenfassend dargestellt.

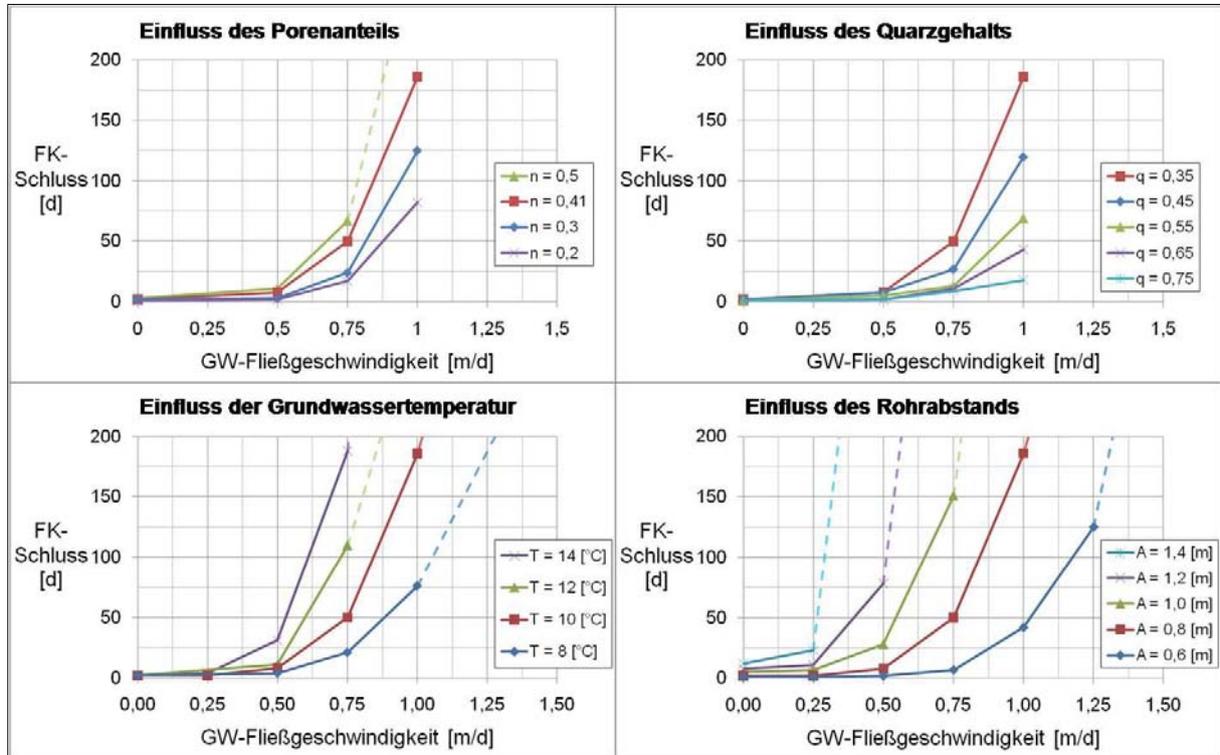
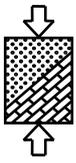


Abbildung 16: Einfluss der untersuchten Parameter in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit

Die rote Kurve innerhalb der einzelnen Diagramme beschreibt jeweils den Verlauf der Aufgefrierzeit über der Fließgeschwindigkeit des Ausgangssystems, die weiteren Kurven den Verlauf mit den variierten Parametern.

Man sieht, dass bei vorhandener Grundwasserströmung der Porenanteil n , der Quarzgehalt q und die Grundwassertemperatur T einen wesentlichen Einfluss auf das Gefrierverhalten haben. Noch deutlicher ist der Einfluss des Rohrabstands A zu sehen. Für Abstände $A > 1,0$ m wird schon für kleine Fließgeschwindigkeiten innerhalb des betrachteten Zeitraums kein Frostkörperschluss mehr erreicht. Weiterhin sieht man, dass sich teilweise ein stationärer Zustand einstellen wird, ohne dass ein Frostkörperschluss erreicht werden kann.

Die angestellten Untersuchungen lassen weiterhin erkennen, dass die größte Beeinflussung des Gefrierhaltens jedoch aus der Grundwasserfließgeschwindigkeit selbst resultiert und das Verfahren bei erhöhten Geschwindigkeiten an seine Grenzen stößt, wohingegen unabhängig von den sonstigen untersuchten Randbedingungen ohne oder mit geringer Fließgeschwindigkeit der Frostkörperschluss immer erreicht wird.



4 Optimierungsmöglichkeiten zur Verkürzung der Aufgefrierzeiten

Die Parameterstudie hat gezeigt, dass die Grundwasserströmung einen immensen Einfluss auf das Gefrierverhalten und damit auf den Erfolg, die Sicherheit und die Wirtschaftlichkeit von Vereisungsmaßnahmen hat. Vorherige Untersuchungen zu Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau am Lehrstuhl für Geotechnik haben gezeigt, dass sich bei vorhandener Grundwasserströmung durch Umpositionierung der Gefrierrohre oder durch zusätzliche Rohre wesentlich kürzere Aufgefrierzeiten erzielen lassen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden deshalb Möglichkeiten untersucht, nicht kreisförmige Querschnitte zu optimieren, um dadurch eine Erweiterung der Anwendung des Gefrierverfahrens auf Hochbaumaßnahmen zu ermöglichen. Die den im Folgenden dargestellten Untersuchungen zugrundeliegenden Eingangsparameter entsprechen den Werten des Hokksundsandes aus Tabelle 1.

4.1 Optimierung des Aufgefrierprozesses bei einer angeströmten Wand

Die Anwendung des Gefrierverfahrens erstreckt sich schon lange nicht mehr nur auf den Schacht- und Tunnelbau. Vielmehr wurde das Gefrierverfahren auch erfolgreich für Baugrubenwände oder Unterfangungen von Hochbaumaßnahmen eingesetzt (vgl. Abbildung 17).



Abbildung 17: links: Vereiste Baugrubenwand (Fa. Bögl)
rechts: Vereiste Unterfangungswand (Fa. Orth GmbH)

Als erstes System wurde daher die in Kapitel 3 für die Parameterstudie betrachtete Wand im Hinblick auf Optimierungsmöglichkeiten untersucht.

In der folgenden Abbildung sind Temperaturplots dieser Wand bei vorhandener Grundwasserströmung mit einer Fließgeschwindigkeit von $v = 0,75 \text{ m/d}$ zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Obwohl die vorhandenen Temperaturen bis -35 °C reichen, wurde die Farbskala bewusst so gewählt, dass alle Bereiche mit Temperaturen $T \leq -1 \text{ °C}$ einheitlich in dunkelblauer Farbe erscheinen, um die Ausbreitung des Frostkörpers besser hervorzuheben.

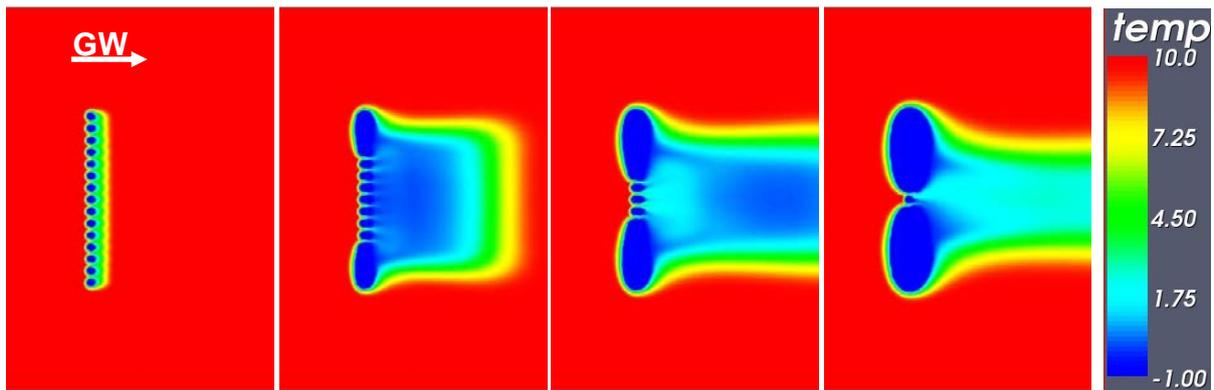
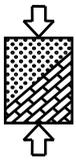


Abbildung 18: Temperaturplot Wand für $v = 0,75$ m/d nach 1, 10, 20 und 40 Tagen

Wie zu erkennen ist, findet der Frostkörperschluss zwischen den einzelnen Gefrierrohren als letztes in der Mitte der Wand statt. Aus dieser Beobachtung heraus wurden mehrere Optimierungsmöglichkeiten untersucht, um die Aufgefrierzeit zu verkürzen. Untersucht wurden die Möglichkeiten, die Wandform der Strömung anzupassen, die Gefrierrohre bei konstanter Rohrzahl zur Mitte hin zu verdichten und den Anstrom durch zusätzliche Rohre vorzukühlen bzw. zusätzliche Rohre innerhalb der Wand anzuordnen.

4.1.1 Formanpassung

In Abbildung 19 sind Temperaturplots von drei der untersuchten Möglichkeiten, die Wandform bei gleichbleibender Rohrzahl der Strömung anzupassen, dargestellt.

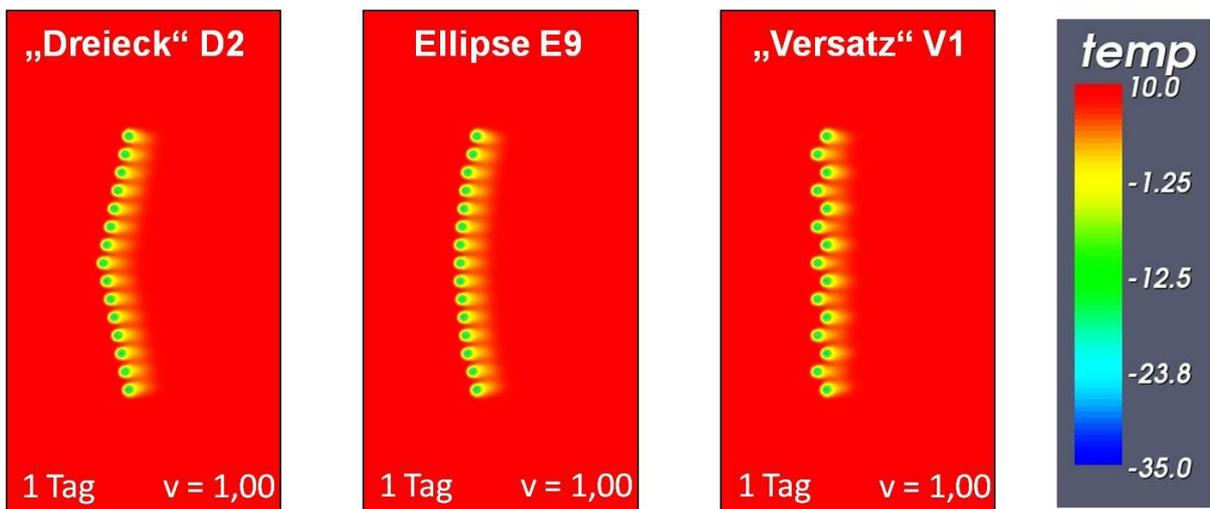


Abbildung 19: Systeme mit veränderter Wandform

Hinter diesen Anordnungen steckt die Idee, dass die dreieckförmigen und die elliptischen Anordnung eine Umlenkung der Strömung und der „Versatz“ eine interne Vorkühlung bewirkt.

Innerhalb einer Gruppe unterscheiden sich die Systeme entsprechend der folgenden Abbildung durch den Öffnungswinkel α (Dreieck), das Verhältnis b/H (Ellipse) und den Abstand in Fließrichtung Δb (Versatz).

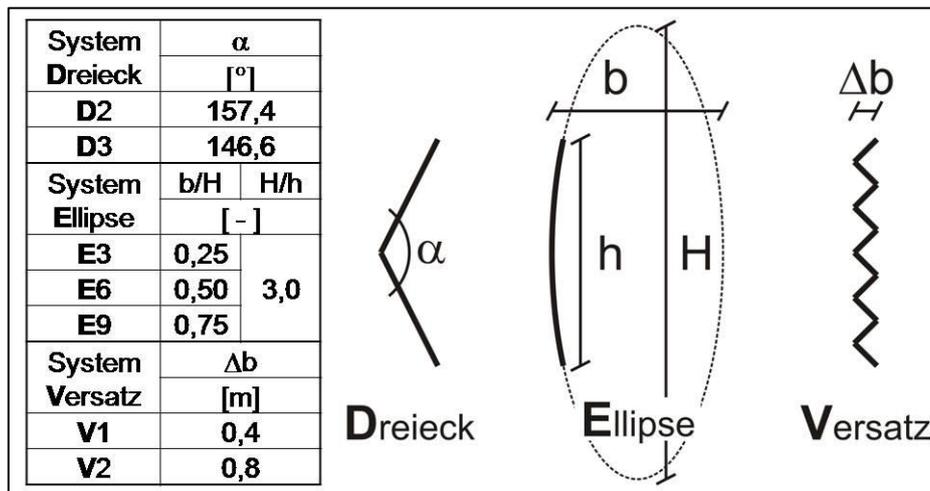
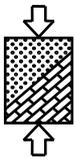


Abbildung 20: Differenzierung verschiedener Wandsysteme

Die Ergebnisse der Berechnungen mit veränderter Wandform sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

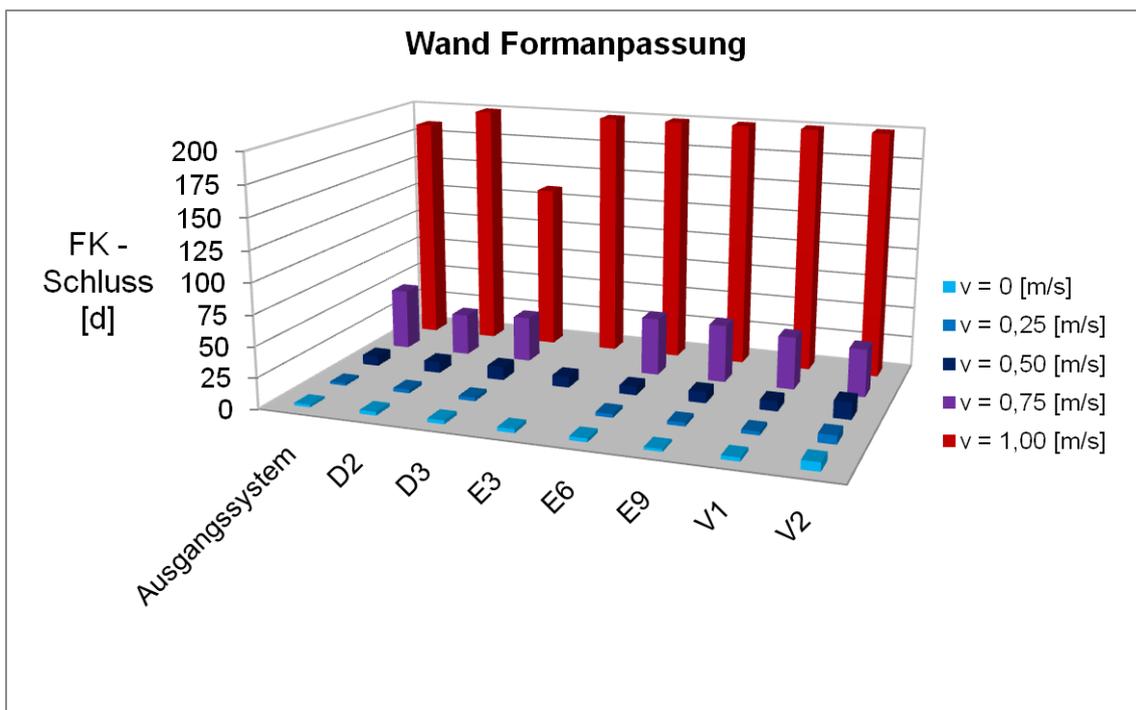
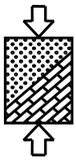


Abbildung 21: Aufgefrierzeiten bei veränderter Wandform

In der Abbildung stehen die Systeme D für eine dreieckförmige und E für eine elliptische Form, sowie V für versetzt angeordnete Rohre (vgl. Abbildung 20). Aufgetragen ist dabei jeweils die Zeit, bis innerhalb der gesamten Wand der Frostkörperschluss stattgefunden hat. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass ohne die Anordnung zusätzlicher Gefrierrohre allein durch eine Änderung der Form und keine wesentliche Verkürzung der Aufgefrierzeit möglich ist bzw. sich für $v = 1,0$ m/d mit Ausnahme von System D3 die Aufgefrierzeit sogar verlängert.



4.1.2 Verdichtung

Außer der Änderung der Wandform wurde auch die Möglichkeit untersucht, die Rohre zur Mitte hin verdichtet anzuordnen ohne zusätzliche Rohre zu installieren. D.h. dass in Wandmitte kleinere und zum Rand hin größere Rohrabstände als beim Ausgangssystem vorliegen (siehe Abbildung 22).

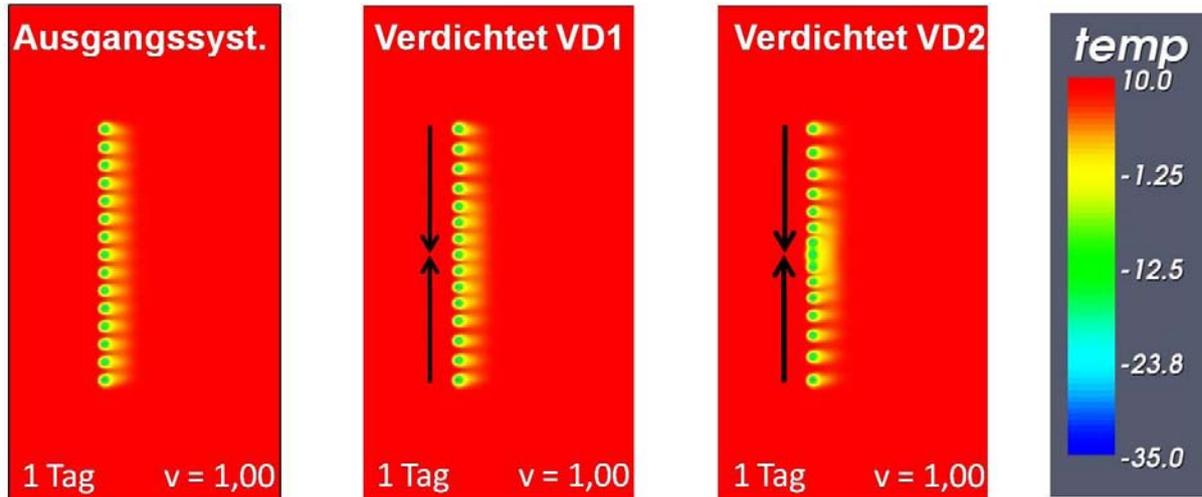


Abbildung 22: Systeme mit Verdichtung der Gefrierrohre in Wandmitte ohne Erhöhung der Anzahl

Beim Ausgangssystem fand der Frostkörperschluss zwischen den einzelnen Rohren in der Wandmitte als letztes statt (vgl. Abbildung 18). Durch die Verdichtung hingegen werden, wie in Abbildung 23 zu sehen ist, die Mitte früher und die Ränder als letztes geschlossen.

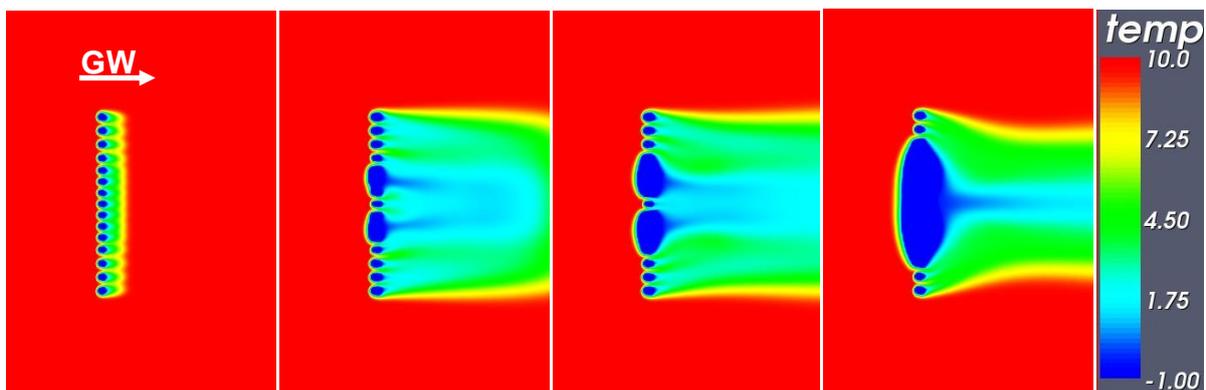


Abbildung 23: Temperaturplot für System VD1 für $v = 1,00$ m/d nach 1, 10, 20 und 40 Tagen

Die Folge ist, dass sich hierdurch die Aufgefrierzeiten bei erhöhten Fließgeschwindigkeiten wesentlich verkürzen lassen.

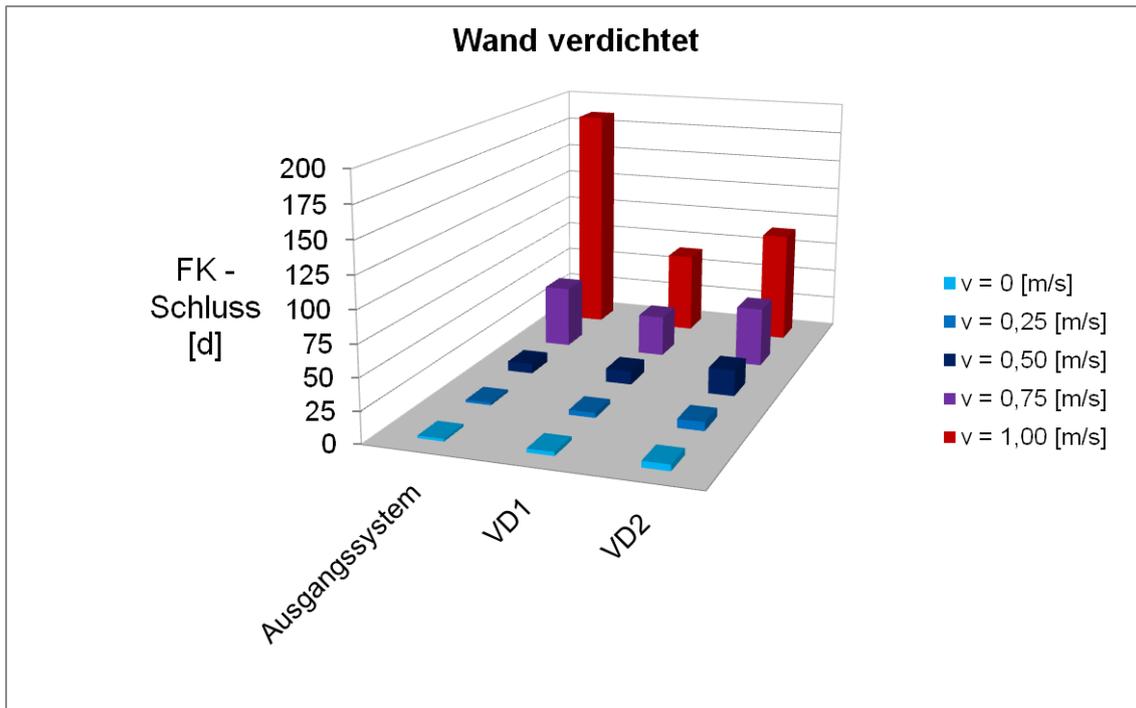
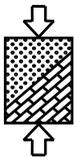
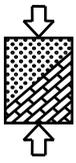


Abbildung 24: Aufgefrierzeiten bei Verdichtung der Gefrierrohre in Wandmitte ohne Erhöhung der Anzahl

Anhand von Abbildung 24 sieht man, dass die Aufgefrierzeit gegenüber dem Ausgangssystem ohne oder mit geringer Grundwasserströmung zwar länger ist, sich bei erhöhten Fließgeschwindigkeiten jedoch enorme Vorteile ergeben und die Aufgefrierzeit mehr als halbiert wird. Weiterhin erkennt man jedoch auch, dass sich die Aufgefrierzeit bei zu starker Verdichtung wieder verlängert. Dies liegt darin begründet, dass dann die Abstände zum Rand hin sehr groß werden (vgl. Abbildung 22) und der Frostkörperschluss hier nur langsam erfolgt.



4.1.3 Vorkühlung

Neben der Änderung der Rohranordnung bei konstanter Rohranzahl wurde auch die Möglichkeit einer Vorkühlung durch ein oder zwei zusätzliche Rohre untersucht. Die betrachteten Systeme sind in Abbildung 25 in Form von Temperaturplots für den Aufgefriervorgang nach einem Tag dargestellt.

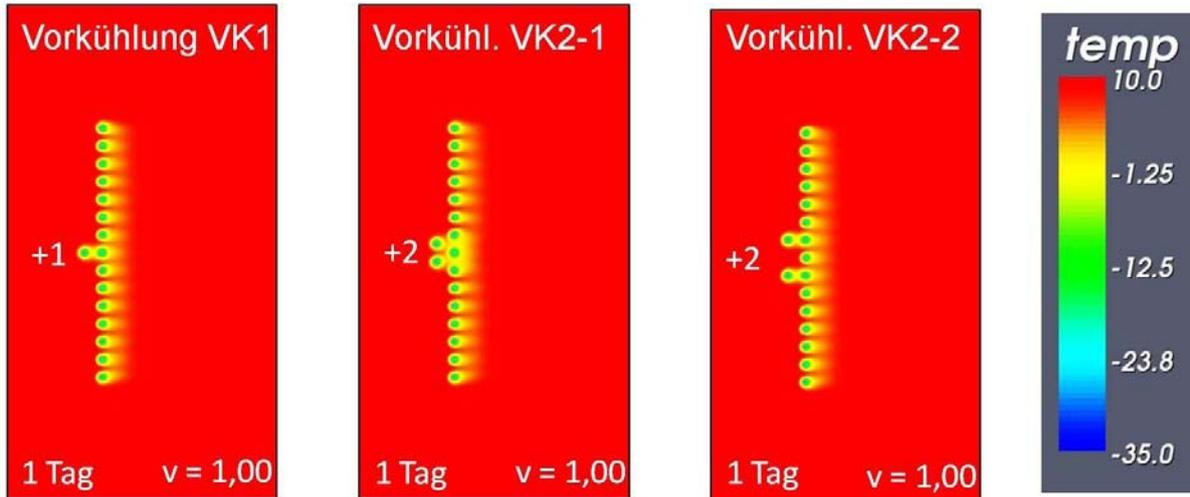


Abbildung 25: Systeme mit Vorkühlung durch zusätzliche Gefrierrohre

Das zusätzliche bzw. die zusätzlichen Rohre wurden im für das Ausgangssystem kritischen Bereich (Wandmitte) vorgeschaltet, um dort einen früheren Frostkörperschluss durch die Vorkühlung zu erreichen. Die Ergebnisse in Abbildung 26 zeigen die erhebliche Reduzierung der Dauer für den Frostkörperschluss bei dem Einsatz einer Vorkühlung gerade bei vorhandener Grundwasserströmung.

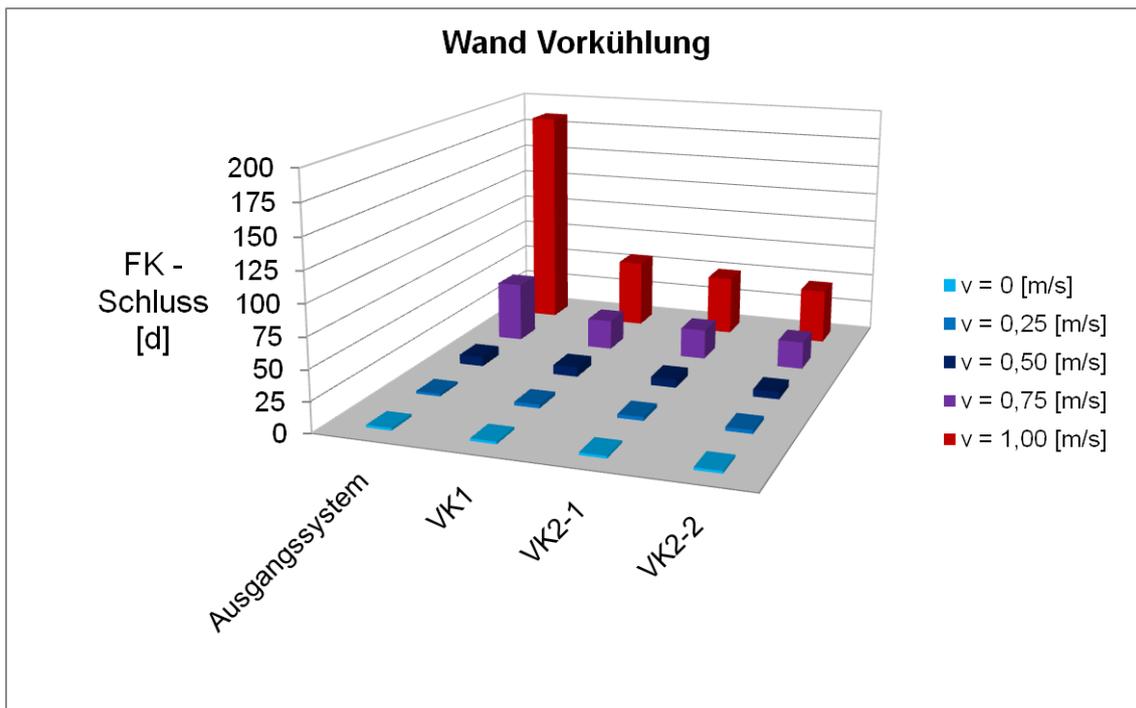
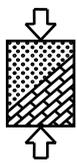


Abbildung 26: Aufgefrierzeiten bei Vorkühlung durch zusätzliche Gefrierrohre



4.1.4 Zusätzliche Rohre in Wandmitte

Als weitere Möglichkeit zur Verkürzung der Aufgefrierzeit wurden ein bzw. zwei zusätzliche Rohre in Wandmitte angeordnet (vgl. Abbildung 27).

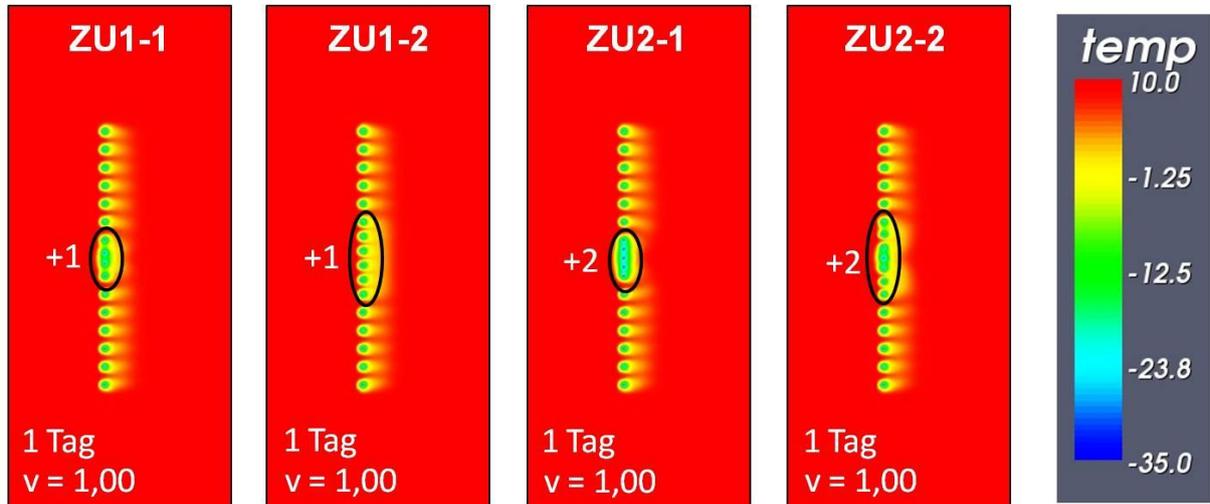


Abbildung 27: Systeme mit zusätzlichen Rohren in Wandmitte

Auch hierbei zeigt sich, dass sich die Aufgefrierzeit gegenüber dem Ausgangssystem wesentlich verkürzen lässt, wie in Abbildung 28 zu sehen ist.

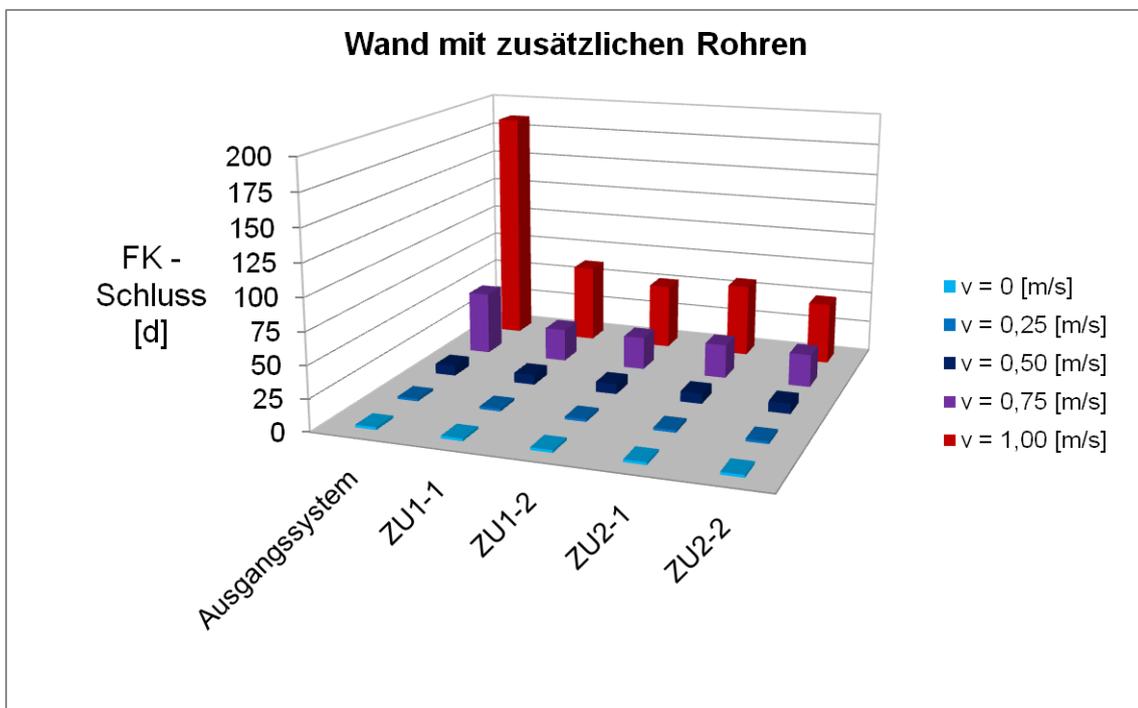
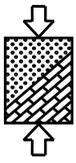


Abbildung 28: Aufgefrierzeiten bei Anordnung zusätzlicher Rohre in Wandmitte



Dass die Reduzierung des Rohrabstands zu kürzeren Aufgefrierzeiten führt, wurde bereits in 3.5 gezeigt. In der folgenden Abbildung sind die Aufgefrierzeiten des Ausgangssystems mit konstantem Rohrabstand $A = 0,8 \text{ m}$, der Systeme mit zusätzlichen Rohren in Wandmitte und des Systems mit verringertem Rohrabstand $A = 0,6 \text{ m}$ gegenübergestellt.

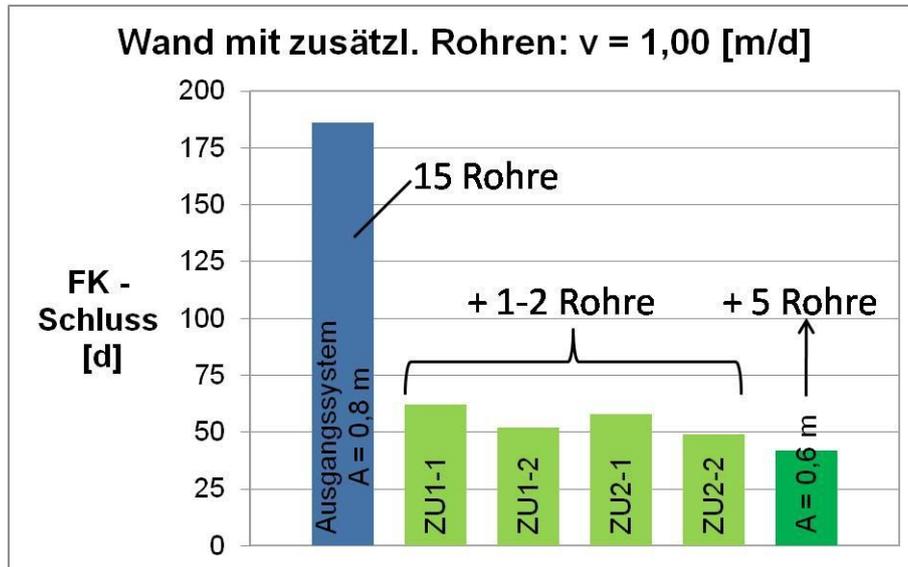
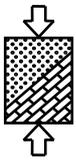


Abbildung 29: Vergleich zusätzliche Rohre und verringert Rohrabstand

Man sieht, dass bereits mit nur einem oder zwei zusätzlichen Rohren in Wandmitte nahezu der gleiche Effekt erzielt wird, wie wenn man fünf zusätzliche Rohre so verteilt, dass ein konstanter kleinerer Abstand zwischen den Rohren erreicht wird.



4.1.5 Fazit Optimierung einer angeströmten Wand

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass für das System „Wand“ nur durch Formänderung keine wesentlichen Vorteile im Hinblick auf die Dauer des Aufgefrierprozesses erzielt werden können. Als effektiv haben sich hingegen die weiteren untersuchten Varianten herausgestellt. In der folgenden Abbildung sind nochmals einige der betrachteten Systeme für eine Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0 \text{ m/d}$ gegenübergestellt.

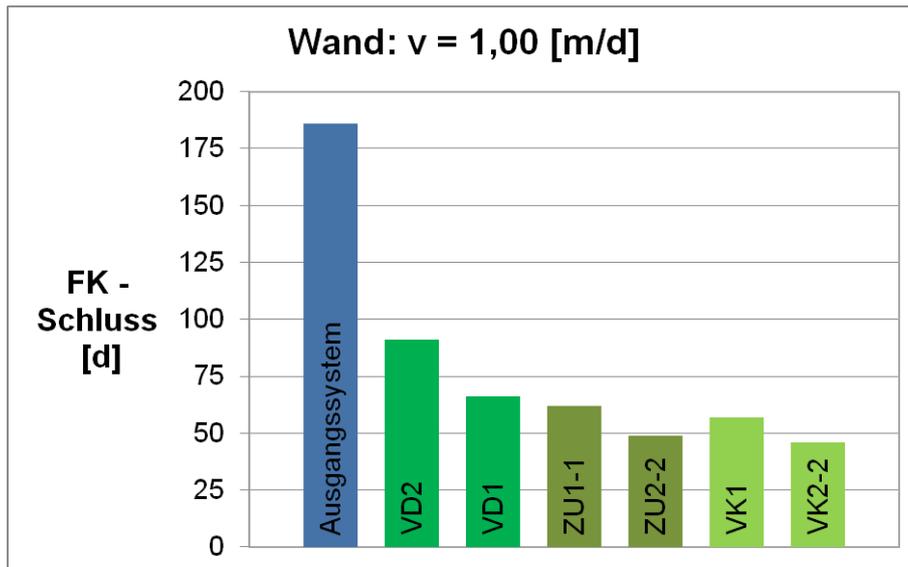
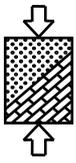


Abbildung 30: Vergleich der Aufgefrierzeiten verschiedener Wandsysteme

Man sieht, dass sich die Aufgefrierzeit für die untersuchte Wand durch nur ein oder zwei zusätzliche Rohre (ZU), aber auch ohne zusätzliche Rohre durch Verdichtung in Wandmitte (VD), wesentlich verringern lässt. Als effektivste Variante hat sich jedoch die Vorkühlung (VK) herausgestellt.



4.2 Optimierung geschlossener Formen

Nach der Betrachtung einer einzelnen Wand wurden geschlossene Formen untersucht, wie sie beispielsweise bei der Herstellung von Baugruben vorkommen können (vgl. Abbildung 31).

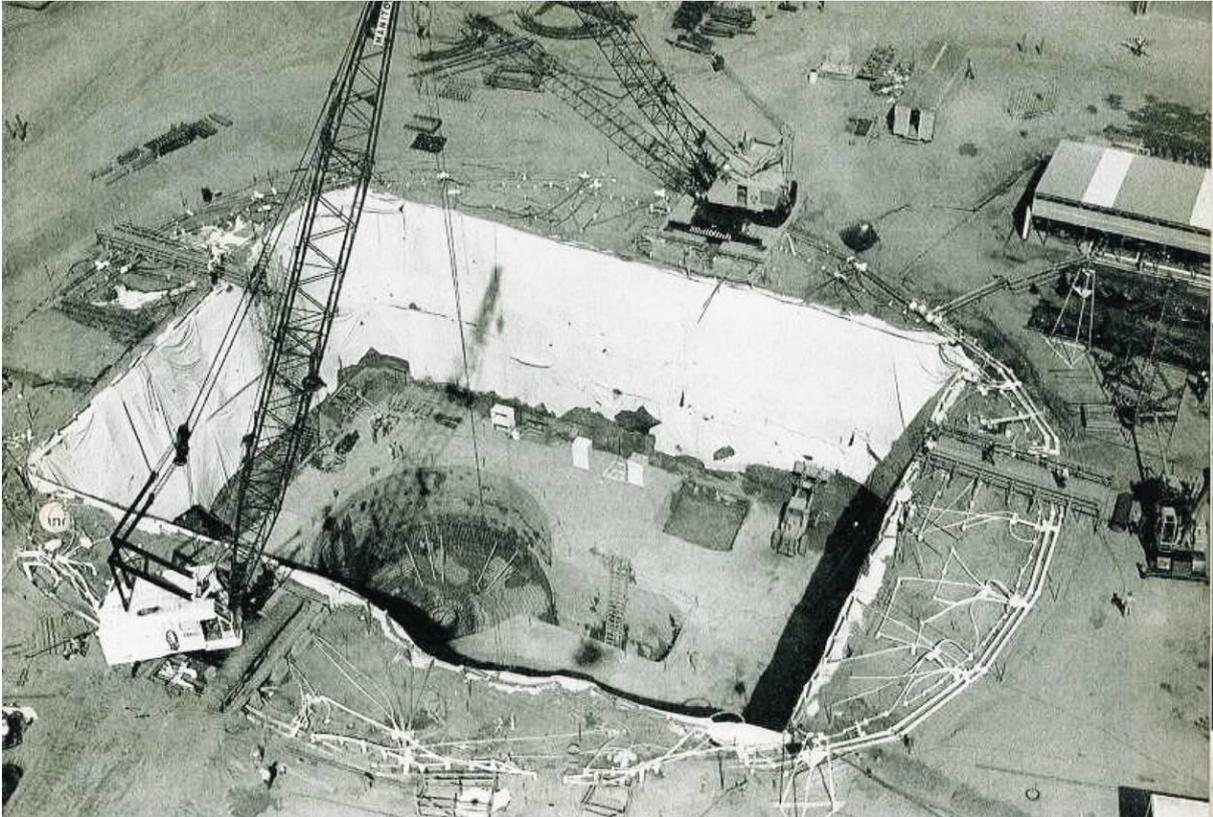


Abbildung 31: Allein durch Vereisung gesicherte Baugrube, Colorado – USA (Braun 1970)

Hierbei wurden sowohl quadratische, rechteckige als auch elliptische Formen, wie sie die in Abbildung 31 zu sehende ausgeführte Baugrube aufweist, betrachtet. Entsprechend den Untersuchungen zur angeströmten Wand weisen die hier betrachteten Ausgangssysteme ebenfalls einen gleichmäßigen Rohrabstand von $A = 0,8 \text{ m}$ auf.

4.2.1 Optimierung eines quadratischen Systems

In der folgenden Abbildung sind für ein quadratisches System die Temperaturverteilungen für verschiedene Geschwindigkeiten dargestellt. Zur besseren Sichtbarkeit des Frostkörpers beginnt die Skala analog zu Abbildung 18 erst bei $T = -1 \text{ °C}$.

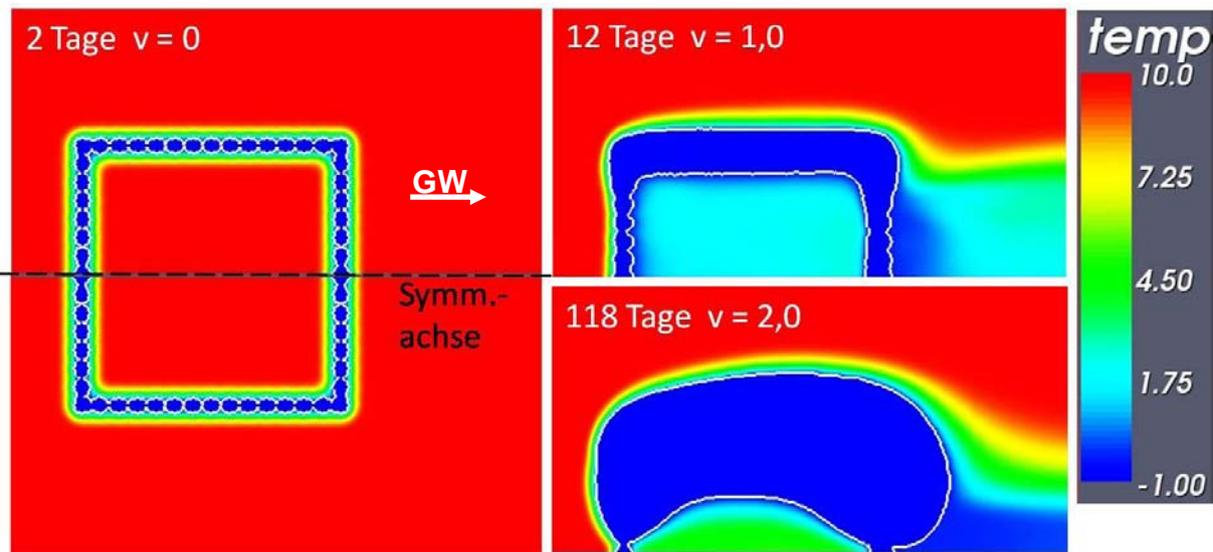
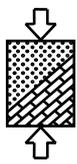


Abbildung 32: Temperaturplot für verschiedene Fließgeschwindigkeiten bei Frostkörperschluss

Zur Reduzierung der Rechenzeiten wurde sowohl für die rechteckigen als auch die elliptischen Systeme für die weiteren Simulationen die Symmetrie ausgenutzt (vgl. Abbildung 32) und nur noch ein halbes System betrachtet. Abbildung 32 macht deutlich, dass bei größeren Fließgeschwindigkeiten die kritischen Stellen in der Mitte der An- und der Abstromseite liegen. Aus diesem Grund wurde versucht, durch entsprechende Umpositionierung von Gefrierrohren ohne Erhöhung ihrer Gesamtanzahl (vgl. Abbildung 33) den Frostkörperschluss zu beschleunigen.

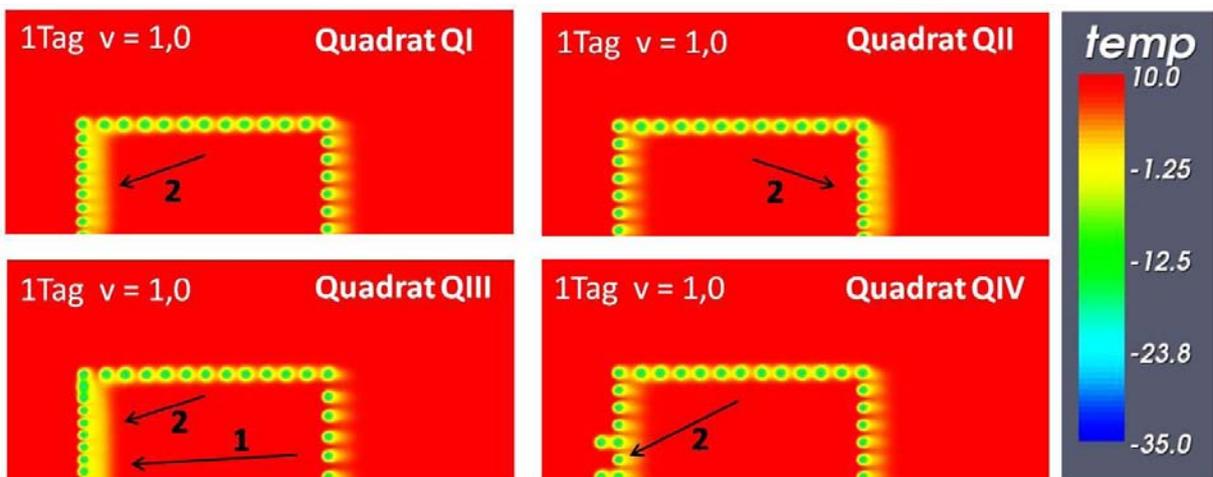


Abbildung 33: Quadratische Systeme

Hierfür wurden Rohre von der strömungsparallelen Seite in die angeströmten Seiten verschoben bzw. zur Vorkühlung verwendet. Weiterhin wurde auch ein System QIII untersucht, bei dem zusätzlich ein Rohr je Systemhälfte aus dem Abstrom in den Anstrom verschoben wurde.

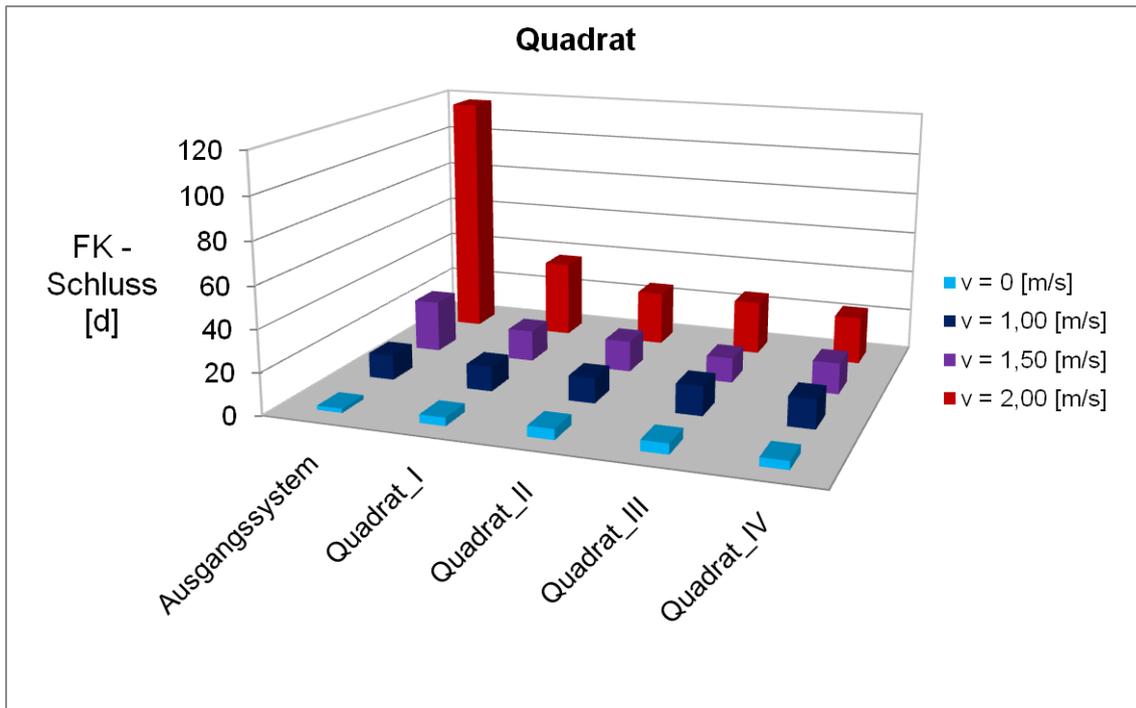
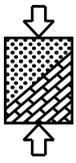


Abbildung 34: Aufgefrierzeiten für verschiedene quadratische Systeme

Die Gegenüberstellung der Aufgefrierzeiten in Abbildung 34 zeigt, dass sich die betrachteten Umpositionierungen erheblich positiv auswirken, sofern größere Fließgeschwindigkeiten auftreten. Zwar treten bei kleiner oder keiner Fließgeschwindigkeit, bedingt durch die größeren Abstände in der strömungsparallelen Seite, längere Aufgefrierzeiten auf, jedoch sind dafür die Aufgefrierzeiten ohnehin sehr kurz und der Zeitverlust vernachlässigbar gering.

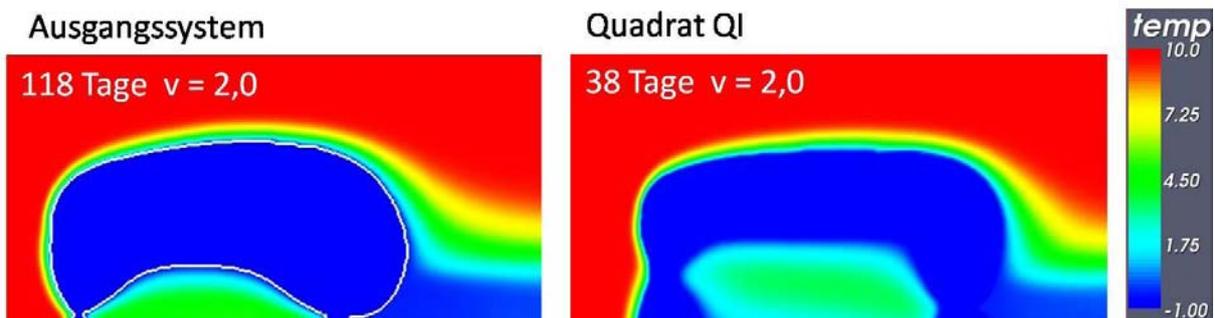
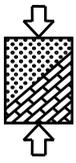


Abbildung 35: Reduziertes Frostkörperwachstum im Inneren beim Quadrat

Neben der kürzeren Aufgefrierzeit bringen die optimierten Systeme einen weiteren Vorteil mit sich. Wie in Abbildung 35 zu sehen ist, reduziert sich das Frostkörperwachstum ins Innere gegenüber dem Ausgangssystem. Dadurch wird der Aushub weniger durch das weder statisch noch als Dichtung erforderliche Eis im Inneren erschwert.



4.2.2 Optimierung rechteckiger Systeme

Analog zu dem vorab vorgestellten quadratischen System wurden auch die in den folgenden beiden Abbildungen dargestellten rechteckigen Systeme betrachtet.

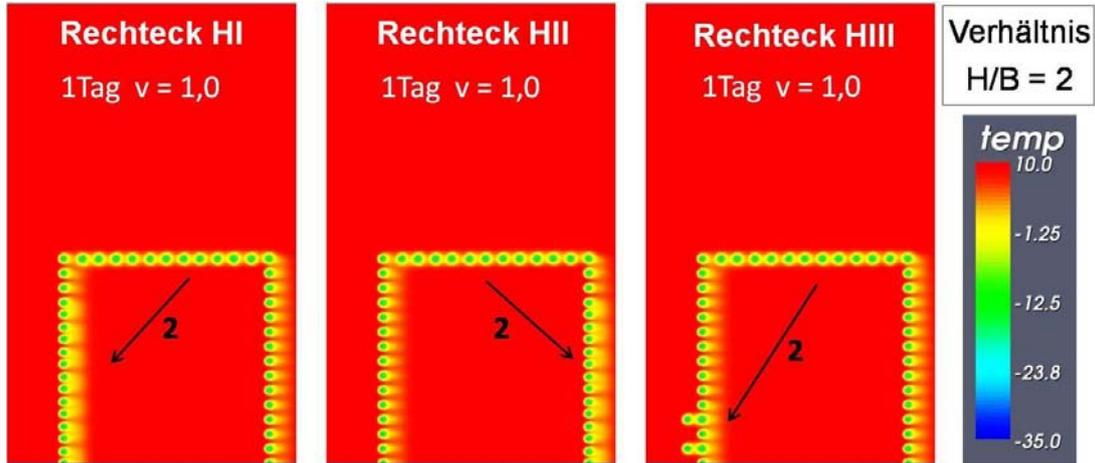


Abbildung 36: Rechteckige Systeme „Hoch“ mit $H/B = 2,0$

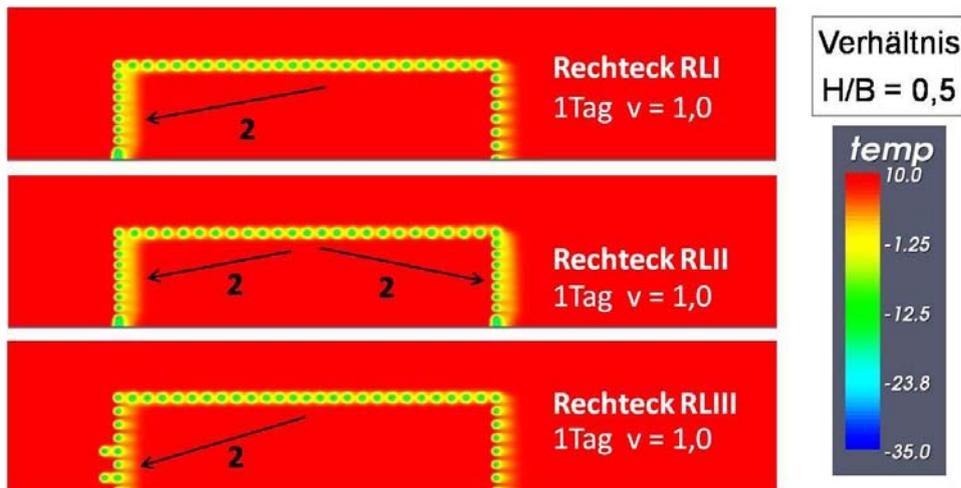


Abbildung 37: Rechteckige Systeme „Lang“ mit $H/B = 0,5$

Auch hier wurden Rohre von der strömungsparallelen Seite entfernt und im An- und Abstrom neu positioniert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen für die Aufgefrierzeiten sind in Abbildung 38 und Abbildung 39 dargestellt.

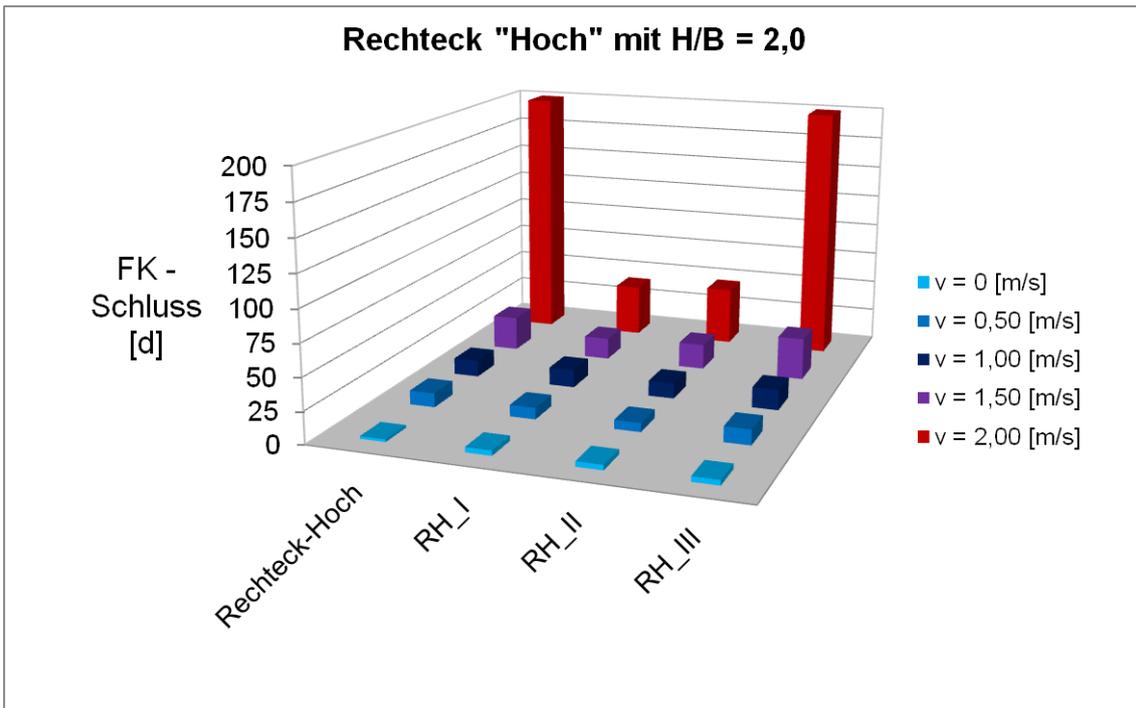
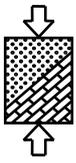


Abbildung 38: Aufgefrierzeiten Rechteck „Hoch“

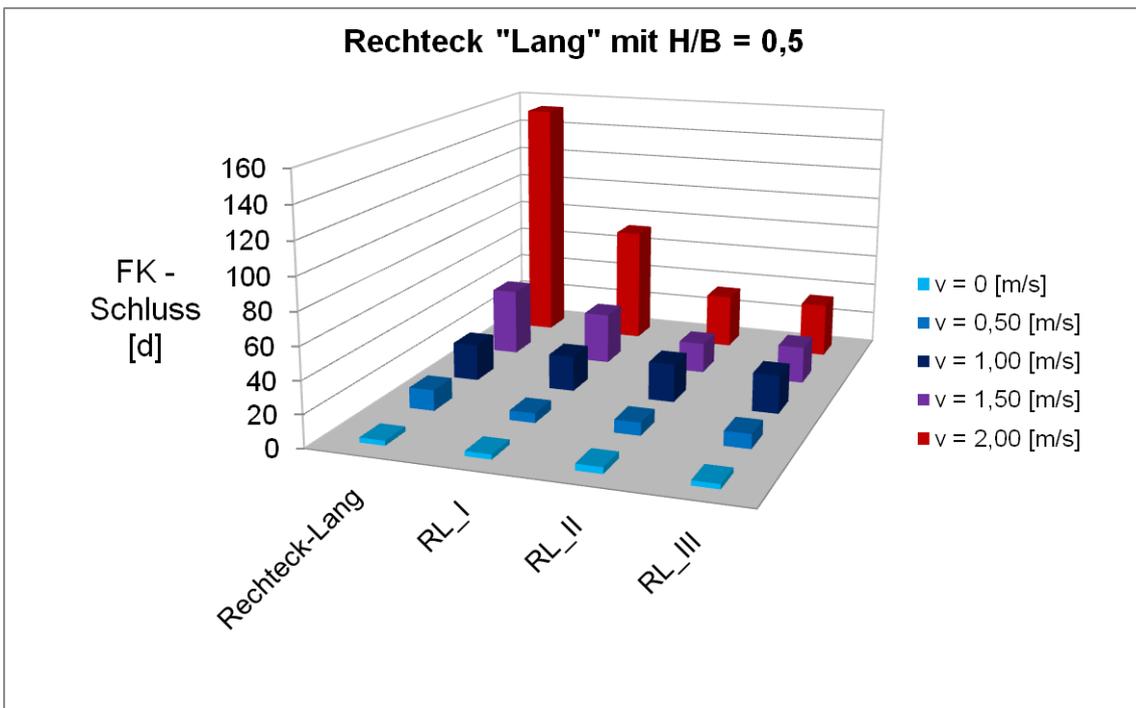
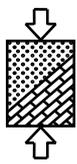


Abbildung 39: Aufgefrierzeiten Rechteck „Lang“

Mit Ausnahme des Systems RH_III lässt sich bei erhöhten Fließgeschwindigkeiten die Aufgefrierzeit deutlich reduzieren. Dass dies bei System RH_III nicht möglich ist, liegt daran, dass zwar im Bereich der Vorkühlung ein Frostkörperschluss zwischen den einzelnen Rohren stattfindet, über die restliche Wand im Anströmungsbereich jedoch wie beim Ausgangssystem (vgl. Abbildung 40, links oben) der Rohrabstand



zu groß ist, um bei $v = 2,0$ m/d überhaupt noch einen Frostkörperschluss zu ermöglichen.

Das Frostkörperwachstum nach innen wird bei der Modifizierung der Rohranordnung analog zum Verhalten bei quadratischen Formen reduziert. Dies ist anhand von Abbildung 40 zu sehen.

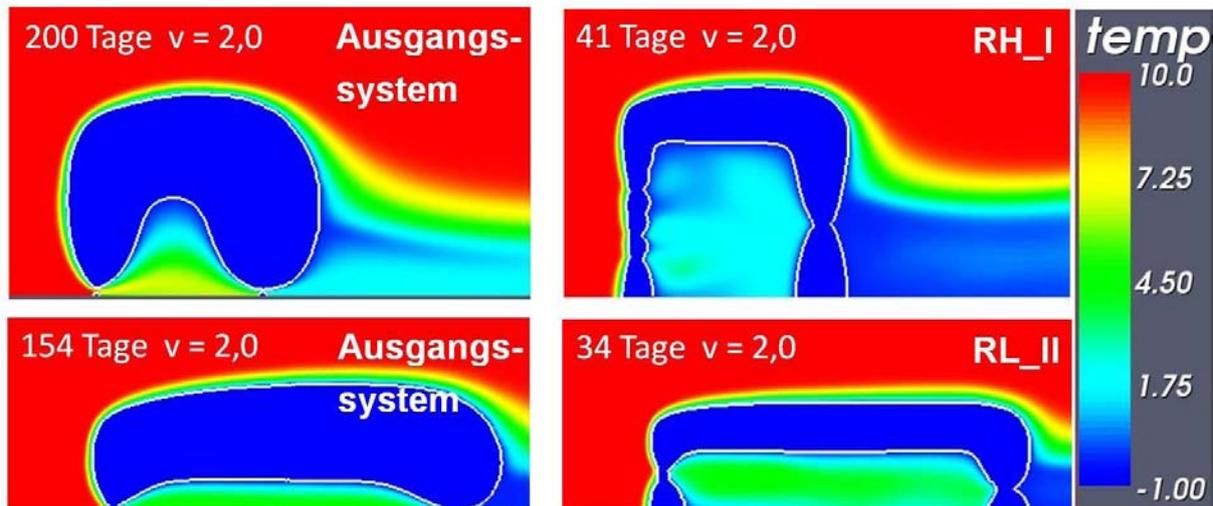


Abbildung 40: Reduziertes Frostkörperwachstum im Inneren beim Rechteck

4.2.3 Optimierung elliptischer Systeme

Die Ausführung einer vereisten Baugrube als Ellipse bietet den Vorteil, dass sich durch die Form die statische Stabilität erhöht und durch die Kräfteabtragung über Druck der Aufwand für zusätzliche Sicherungsmaßnahmen reduziert werden kann. Abschließend wurden daher elliptische Formen untersucht. Die betrachteten Systeme sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

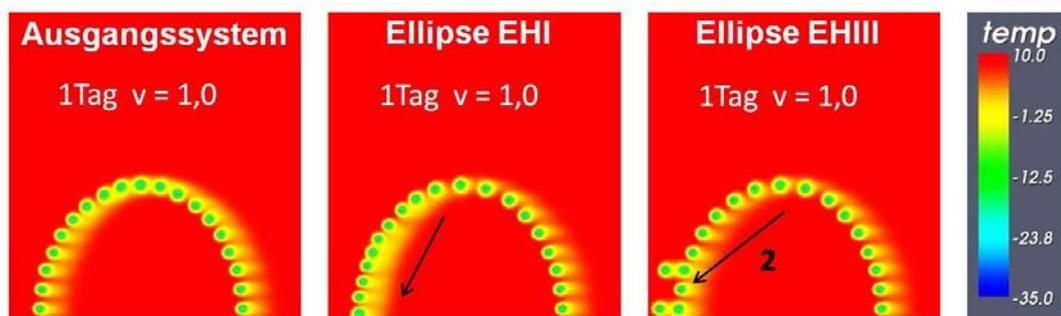


Abbildung 41: Elliptische Systeme „Hoch“

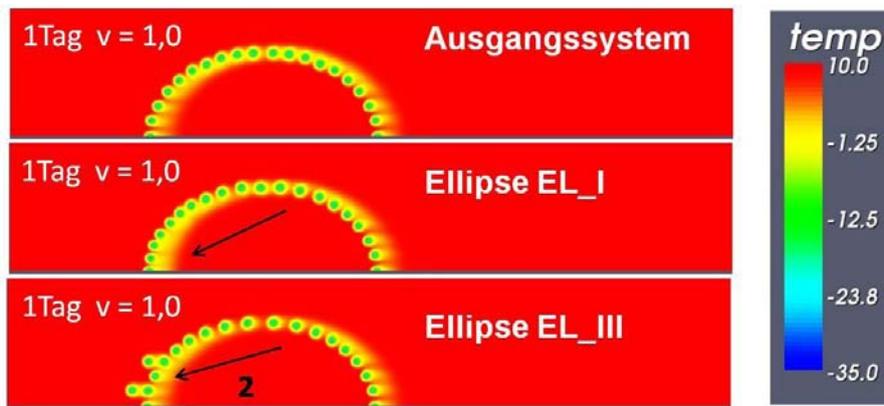
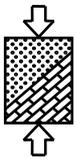


Abbildung 42: Elliptische System „Lang“

Bei den Systemen EH_I und EL_I wurde analog zur Verdichtung in 4.1.2 der Rohrabstand zur Mitte der Anstromseite hin verkleinert und dafür im strömungsparallelen Bereich vergrößert. Bei den Systemen EH_III und EL_III hingegen wurden jeweils zwei Rohre je Systemhälfte von der strömungsparallelen Seite abgezogen und zur Vorkühlung verwendet.

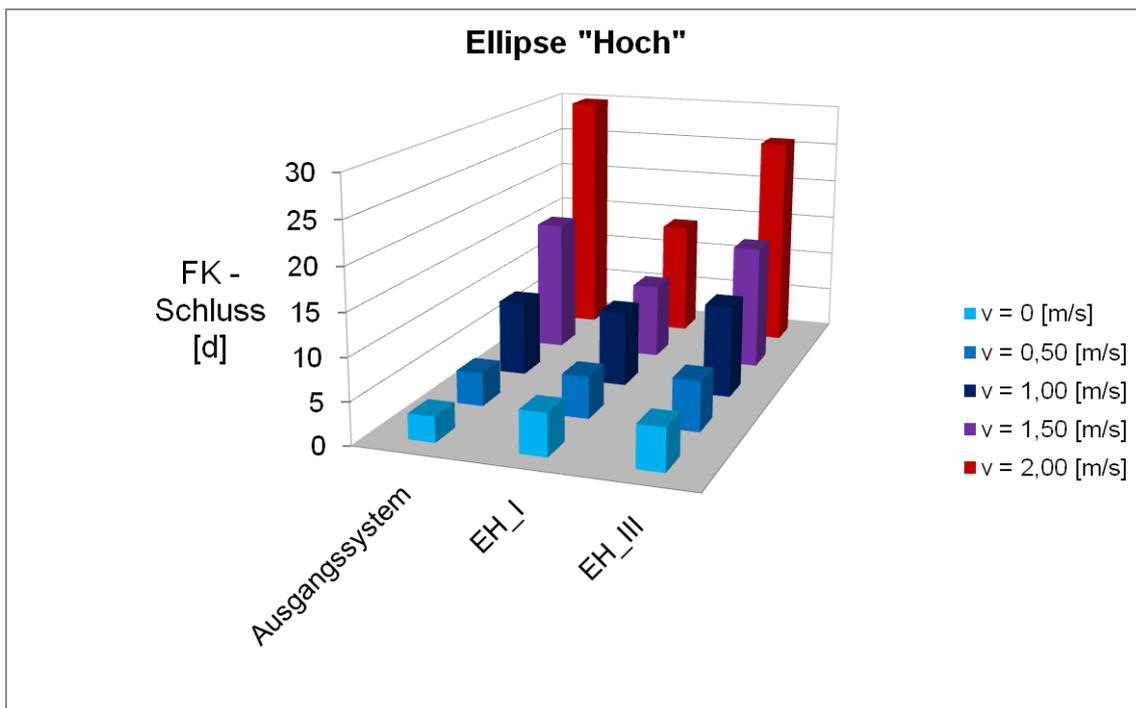


Abbildung 43: Aufgefrierzeiten Ellipse „Hoch“

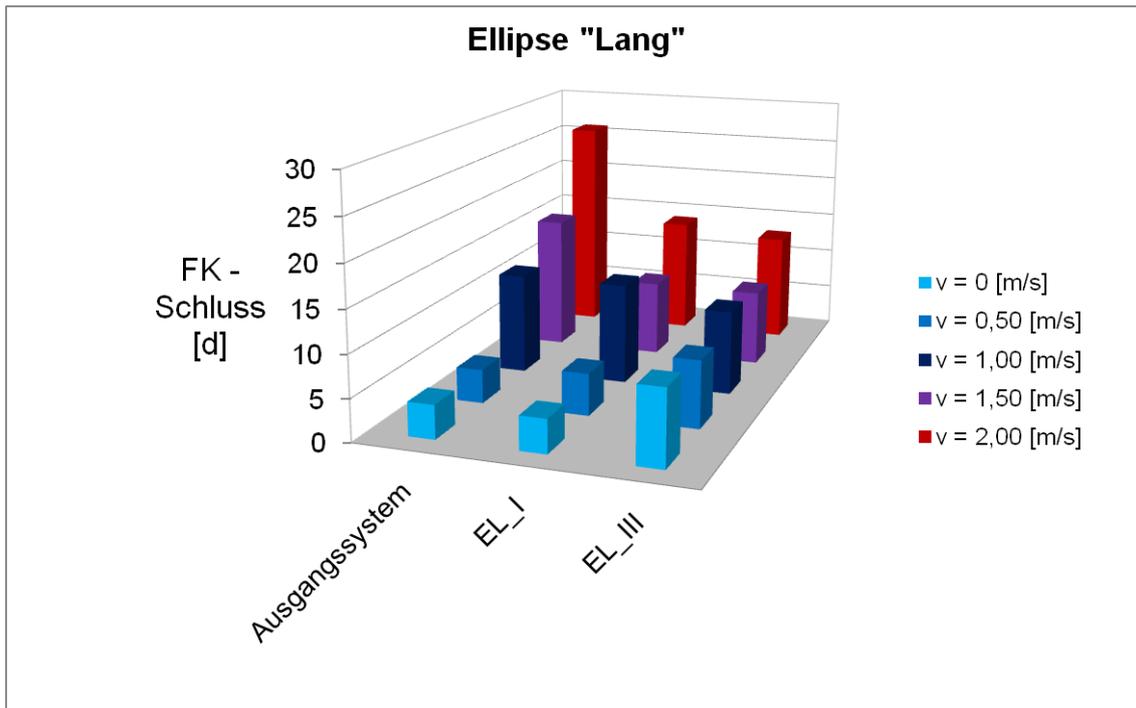
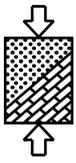
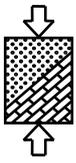


Abbildung 44: Aufgefrierzeiten Ellipse „Lang“

Anhand von Abbildung 43 und Abbildung 44 ist zu erkennen, dass sich die Zeiten bis zum Frostkörperschluss für große Fließgeschwindigkeiten reduzieren lassen. Generell ist jedoch festzustellen, dass das Optimierungspotential bei einer Ellipse im Vergleich zum Quadrat und Rechteck geringer ist. Dies liegt wohl darin begründet, dass die elliptische Form von sich aus schon gut an eine Grundwasserströmung angepasst ist.

4.2.4 Fazit Optimierung geschlossener Formen

Die Untersuchung von Systemen mit geschlossenen Formen hat gezeigt, dass sich durch eine der Strömung angepasste Anordnung der Gefrierrohre teils wesentlich kürzere Aufgefrierzeiten ergeben. Dies kann zum einen durch Vorkühlung und zum anderen durch mehr Rohre im An- oder Abstrom erreicht werden, und zwar auch ohne zusätzliche Rohre, wenn stattdessen die Rohranzahl auf den strömungsparallelen Seiten reduziert wird, da sich das System hier selbst vorkühlt. Weiterhin hat dies zur Folge, dass das Frostkörperwachstum ins Innere reduziert wird und somit der Aushub nicht unnötig erschwert wird.



4.3 Optimierung bei Düseneffekten durch benachbarte Hindernisse

Gerade bei Hochbaumaßnahmen im innerstädtischen Bereich, befinden sich oftmals in unmittelbarer Nachbarschaft weitere Gebäude. Da diese in der Regel selbst mit Untergeschosskonstruktionen, etwa für Tiefgaragen, ausgestattet sind, kann es im durchströmten Baugrund zu Düseneffekten infolge dieser Hindernisse kommen. In Abbildung 45 ist das Ergebnis einer zweidimensionalen Strömungsberechnung in Form von Geschwindigkeitspfeilen dargestellt.

Boden	K_{H1} [L/T]	K_{H2} [L/T]	K_{H3} [L/T]
Yellow	$1.000 \cdot 10^{-11}$	$1.000 \cdot 10^{-11}$	0,20
Grey	$1.000 \cdot 10^{-19}$	$1.000 \cdot 10^{-19}$	0,20

Qualitative Darstellung der GW-Fließgeschwindigkeiten

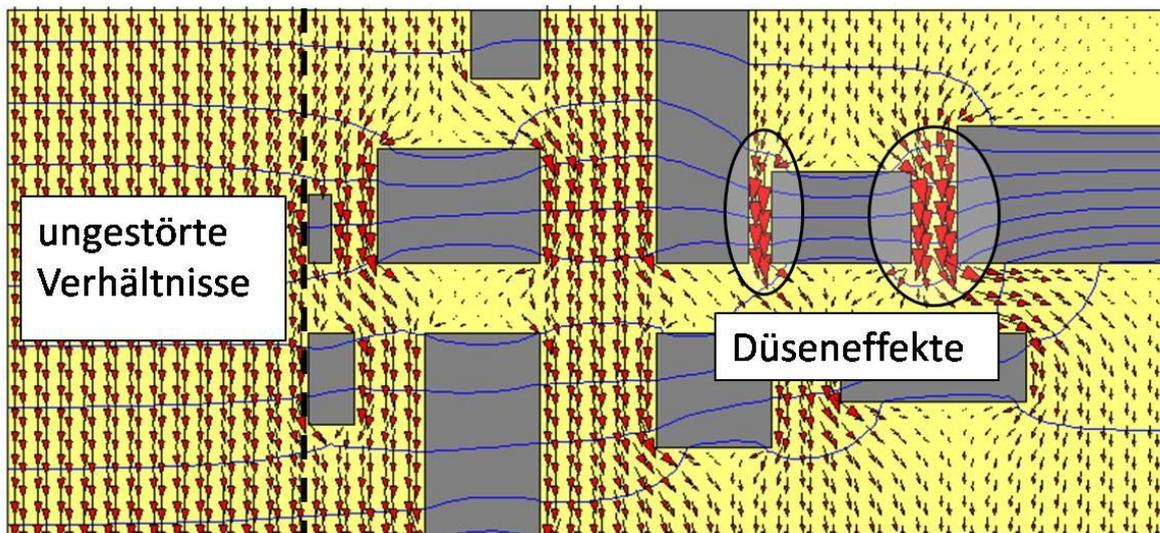


Abbildung 45: Düseneffekte durch vorhandene Bebauung mit Untergeschossen

Während im ungestörten Bereich eine gleichmäßige Strömung stattfindet, schwankt die Fließgeschwindigkeit im bebauten Baugrund sehr stark. Zwischen den grau dargestellten undurchlässigen Hindernissen treten infolge von Düseneffekten wesentlich höhere Fließgeschwindigkeiten auf, die für Vereisungsmaßnahmen eine zusätzliche thermische Belastung darstellen. Aus diesem Grund wurden neben den bereits vorgestellten Systemen weitere Systeme untersucht, bei denen durch Hindernisse Düseneffekte auftreten.

4.3.1 Optimierung bei Düseneffekten infolge Hindernissen auf beiden Seiten des Strömungskanals

In einem ersten Schritt wurde eine Vereisungsmaßnahme betrachtet, welche auf beiden strömungsparallelen Seiten durch benachbarte Untergeschosse begrenzt wird. Ein Modellausschnitt mit als Pfeilen dargestellter Grundwasserströmung ist in Abbildung 46 abgebildet.

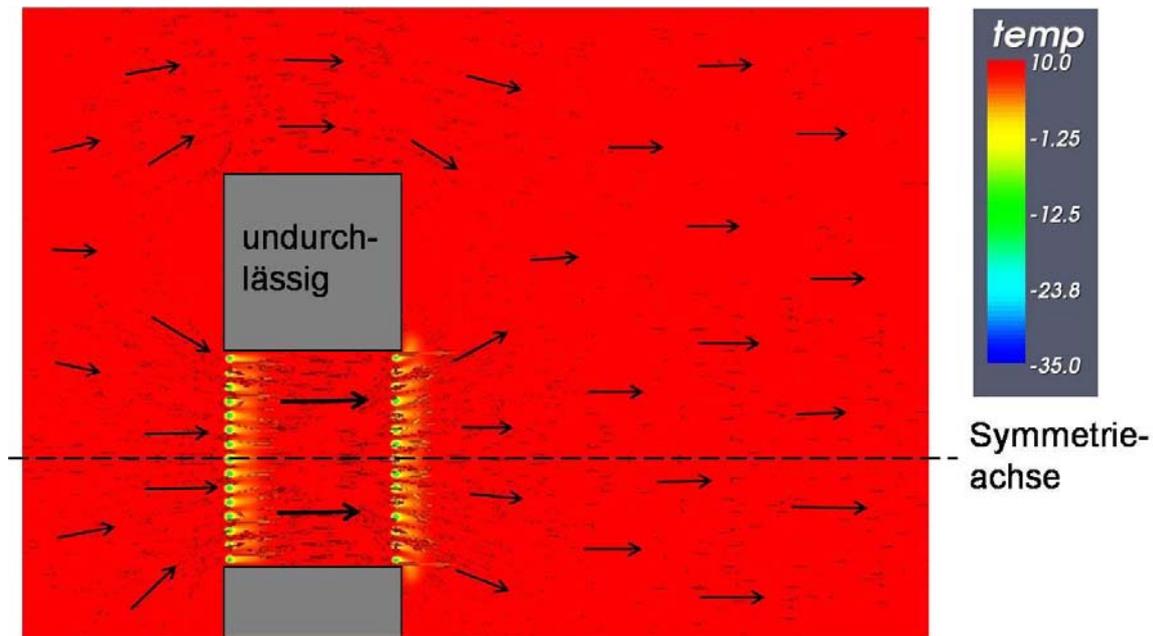
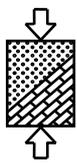


Abbildung 46: Systemausschnitt Modell 1

Analog zu den vorab betrachteten Systemen wurde auch hier die Symmetrie ausgenutzt und jeweils nur eine Systemhälfte in den numerischen Simulationen abgebildet. In Abbildung 47 links oben ist zunächst die Anordnung der Gefrierrohre des Ausgangssystems zu sehen.

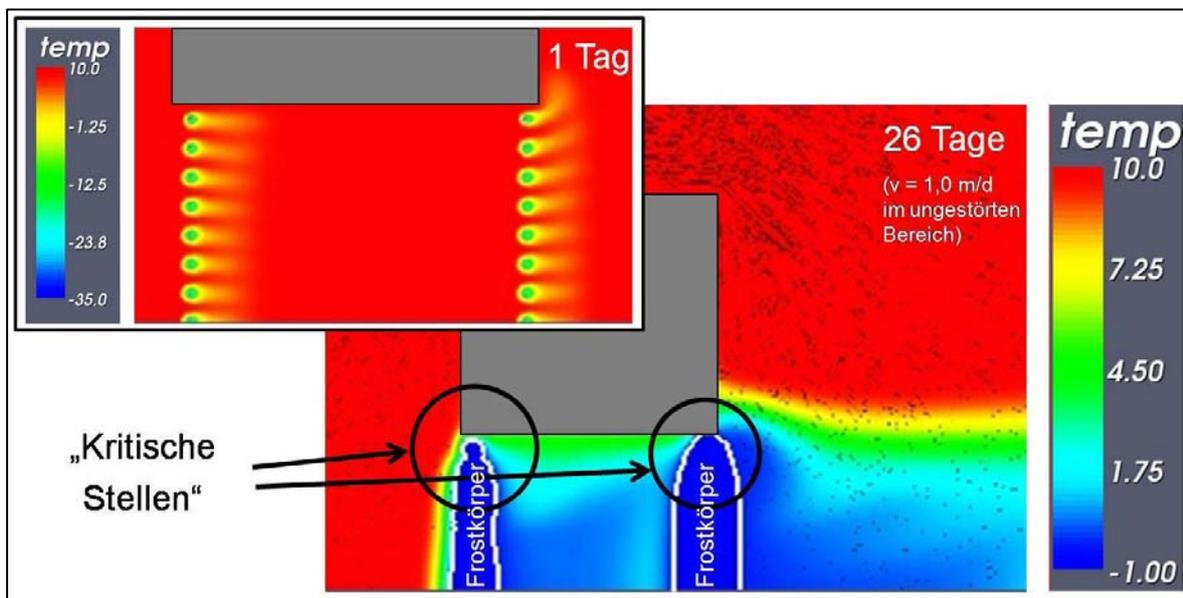
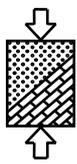


Abbildung 47: Gefrierrohranordnung und Temperaturplot zum Zeitpunkt des Frostkörperschlusses

Weiterhin ist eine Temperaturverteilung dieses Systems zum Zeitpunkt des Frostkörperschlusses nach 26 Tagen gegeben. Darin erkennt man, dass hier im Gegensatz zur angeströmten Wand nach 4.1 der Frostkörperschluss nicht in der Mitte, sondern am Rand als letztes vollzogen wird. Dies liegt daran, dass hier aufgrund des Hindernisses die größte Geschwindigkeit auftritt. Aus diesem Grund wurden im Hinblick auf eine Optimierung zunächst Systeme betrachtet, bei denen die



Rohre zum Hindernis hin verdichtet wurden. Diese Systeme (M1_I bis M1_III) sowie die weiteren untersuchten Systeme können der folgenden Abbildung entnommen werden.

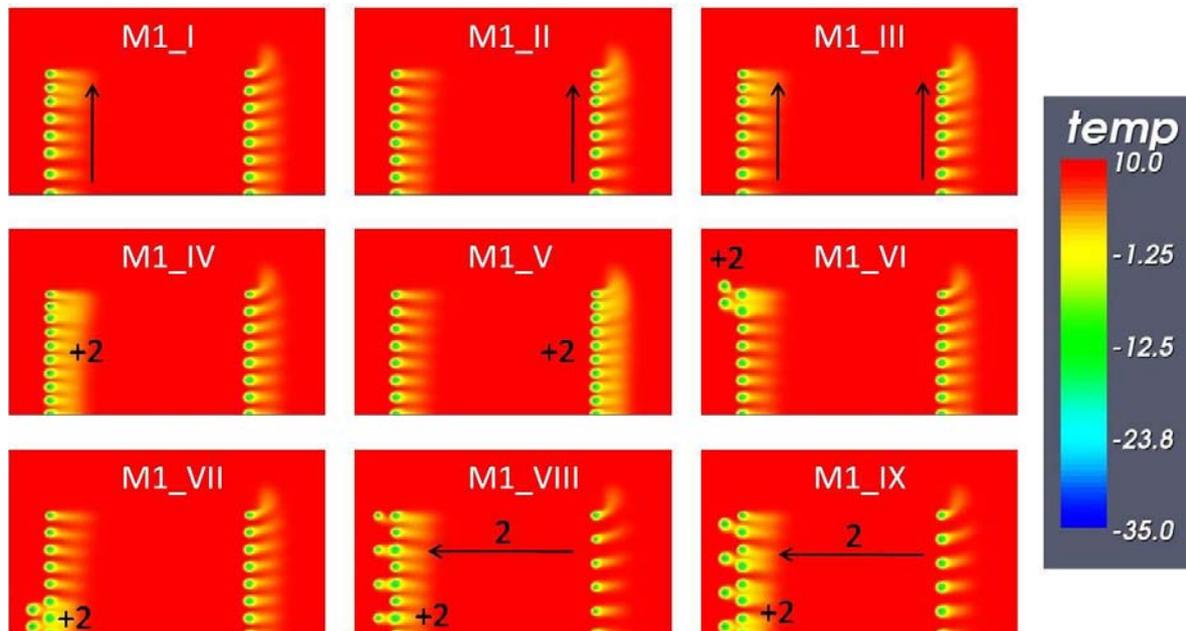


Abbildung 48: Systeme Modell 1

Bei den Systemen M1_IV bis M1_IX wurden zusätzliche Rohre angeordnet, um damit entweder den Rohrabstand innerhalb der Wände zu verkleinern oder aber das System vorzukühlen.

Wie aus Abbildung 49 ersichtlich ist, führen bei vorhandener Grundwasserströmung mit einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0$ m/d im ungestörten Bereich lediglich die Systeme M1_IV, M1_V und M1_VIII zu einer Reduzierung der Aufgefrierzeit. Manche Systeme haben sogar negativen Einfluss auf das Gefrierverhalten und führen zu längeren Aufgefrierzeiten.

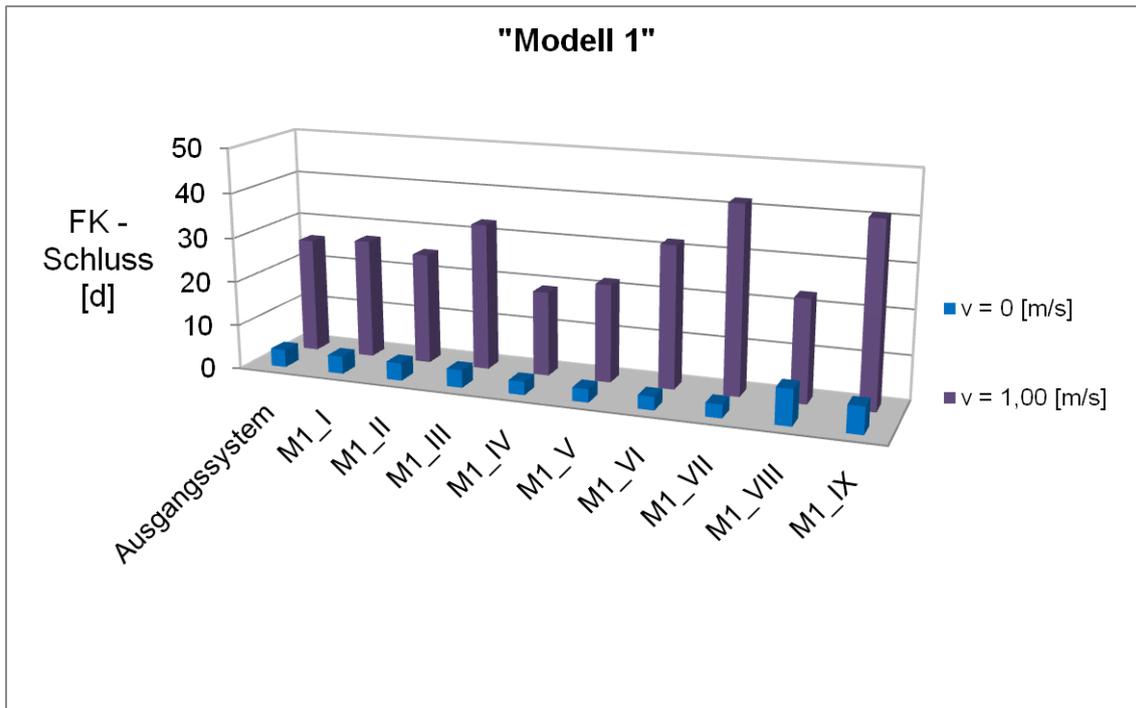
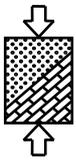


Abbildung 49: Aufgefrierzeiten Modell1

In dem betrachteten Modell 1 entsprach die Breite der Vereisungsmaßnahme exakt der Breite der begrenzenden Hindernisse. Darüberhinaus wurde das in Abbildung 50 dargestellte Modell 2 betrachtet.

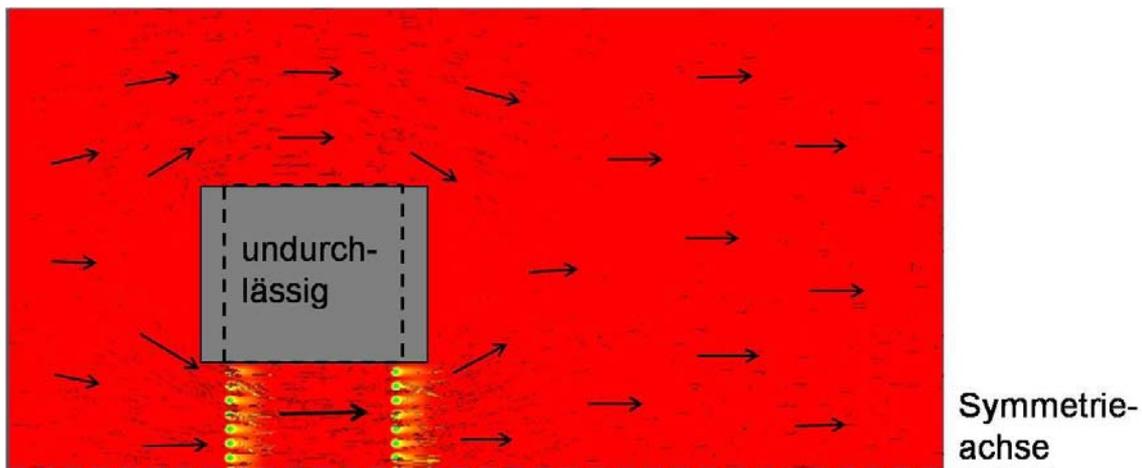


Abbildung 50: Systemausschnitt Modell2

Bei Modell 2 ist das Hindernis breiter als die Vereisungsmaßnahme, so dass die Grundwasserströmung auf Höhe der Gefrierrohre schon wieder etwas ausgeglichener ist. Da sich einige Systeme bei den Untersuchungen zu Modell 1 als ungeeignet herausstellten, wurden im Folgenden nur ausgewählte Varianten der Abbildung 48 betrachtet. Die Ergebnisse der für Modell 2 untersuchten Systeme, die Nummerierung und die entsprechenden Änderungen entsprechen aber weiterhin Abbildung 48, sind in der folgenden Grafik dargestellt.

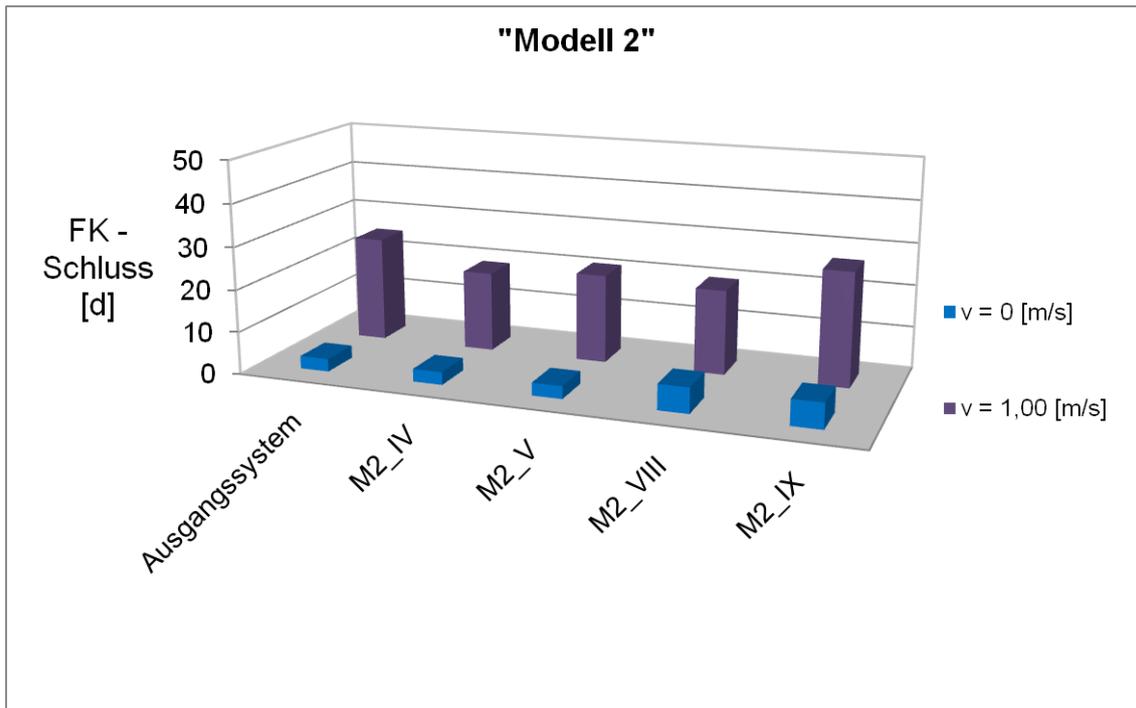
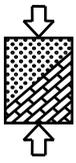


Abbildung 51: Aufgefrierzeiten Modell 2

Man sieht, dass sich aufgrund der veränderten Strömungsverhältnisse die Aufgefrierzeiten gegenüber Modell 1 (vgl. Abbildung 49) etwas verkürzen. Allerdings gilt auch für Modell 2, dass die betrachteten Varianten keine wesentlich positiven Effekte bezüglich der Aufgefrierzeit nach sich ziehen.

4.3.2 Optimierung bei Düseneffekten durch ein Hindernis auf einer Seite

Neben den bereits vorgestellten Modellen 1 und 2 mit Hindernissen auf beiden Seiten der Vereisungsmaßnahmen wurde weiterhin auch das in Abbildung 52 dargestellte Modell 3 untersucht. Hierbei wird die Vereisungsmaßnahme nur auf einer der strömungsparallelen Seiten von einem Hindernis begrenzt.

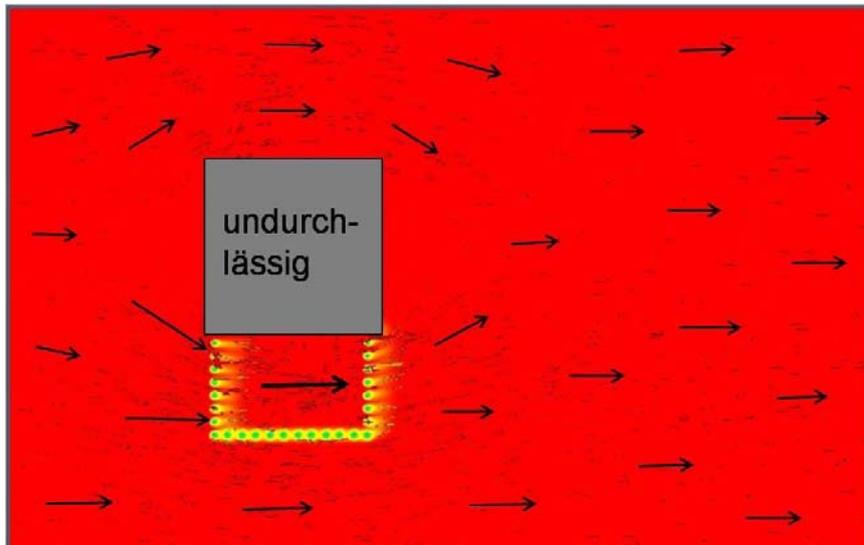
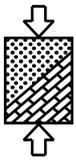


Abbildung 52: Systemausschnitt Modell 3

Dadurch ergibt sich analog zu 4.2 die Möglichkeit, Gefrierrohre von der strömungsparallelen Seite wegzunehmen und im An- oder Abstrom zu ergänzen.

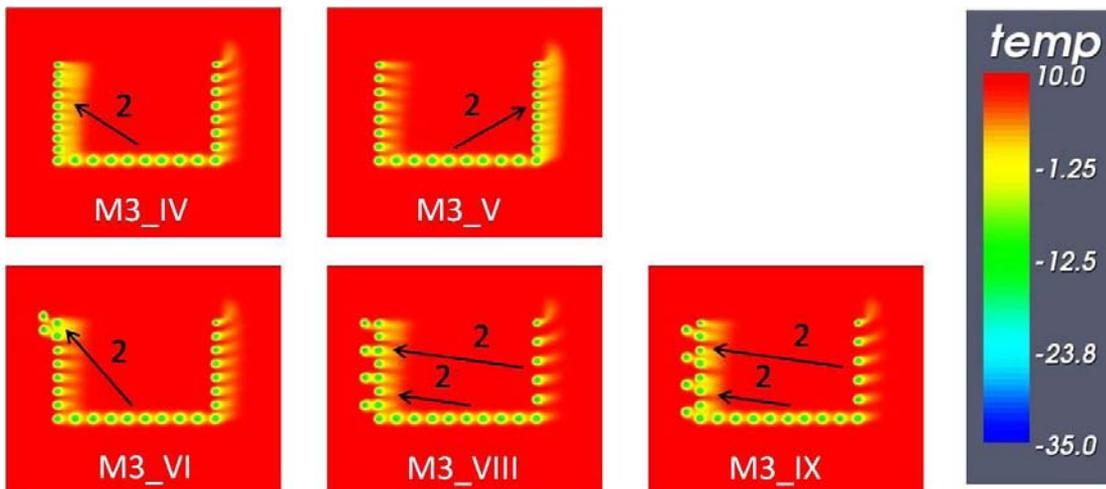


Abbildung 53: Systeme Modell 3

Die für das Modell 3 untersuchten Varianten zeigt Abbildung 53. Allerdings ist auch hier das Optimierungspotential wie bei der zweiseitig begrenzten Vereisungsmaßnahme eher gering, wie die Aufgefrierzeiten in Abbildung 54 zeigen.

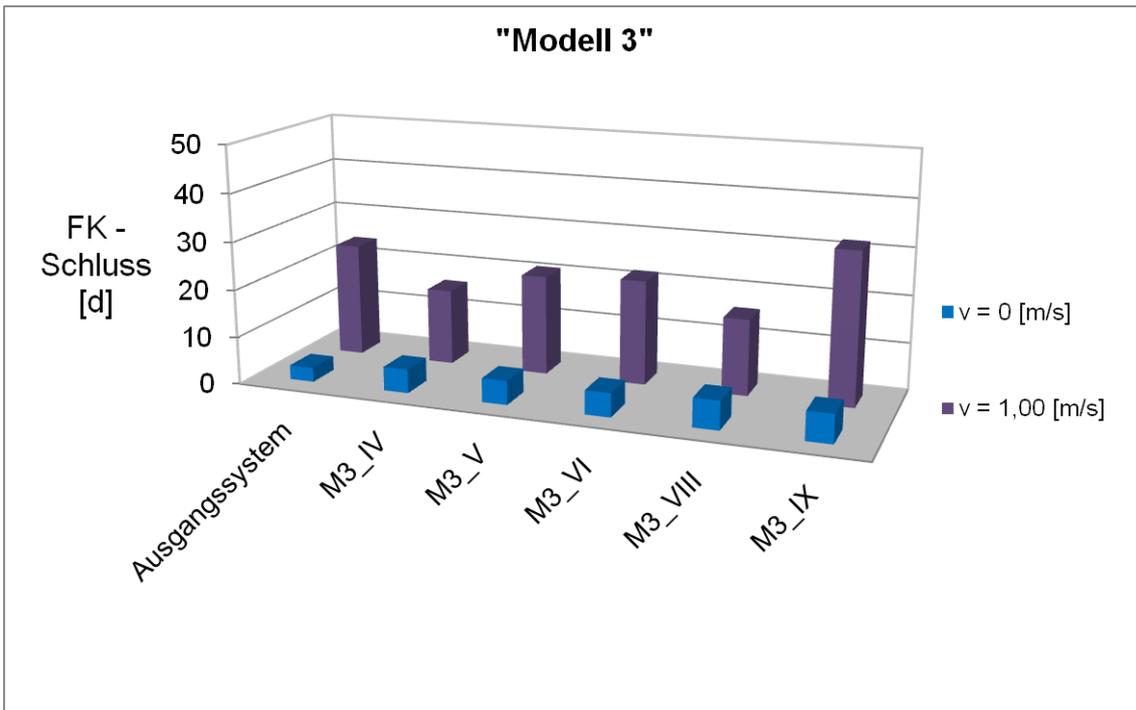
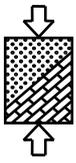


Abbildung 54: Aufgefrierzeiten Modell 3

Analog zu 4.3.1 wurde auch für das einseitig begrenzte System ein weiteres Modell betrachtet, bei dem das Hindernis eine größere Breite als die Vereisungsmaßnahme aufweist (vgl. Abbildung 50). Auch für diesen Fall ergeben sich durch die veränderten Anordnungen lediglich geringe Vorteile bezüglich der Aufgefrierzeit wie Abbildung 55 erkennen lässt.

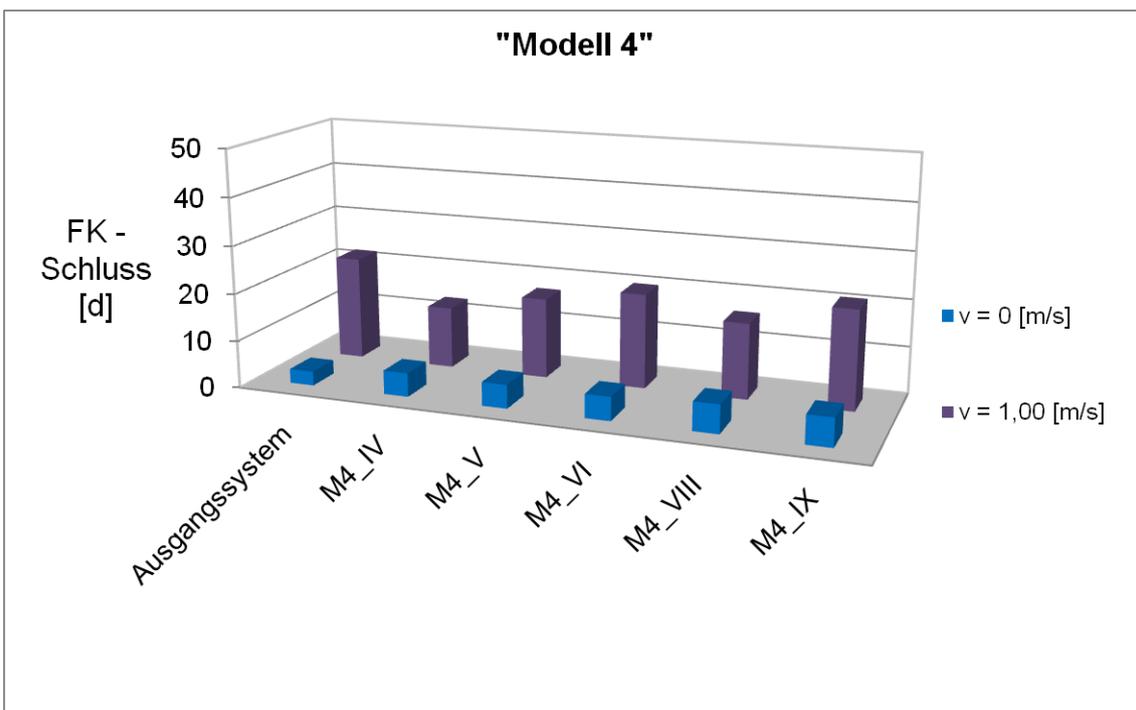
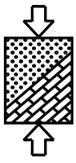
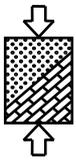


Abbildung 55: Aufgefrierzeiten Modell 4



4.3.3 Fazit Optimierung bei Düseneffekten durch benachbarte Hindernisse

Die vorgestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Aufgefrierzeit nur für manche der untersuchten Varianten und auch dann nur geringfügig verkürzen lässt. Außerdem hat sich gezeigt, dass manche der betrachteten Umpositionierungen auch zu längeren Aufgefrierzeiten führen können. Hieraus lässt sich folgern, dass bei durch Düseneffekte beeinflussten Vereisungsmaßnahmen fast nur durch zusätzliche Rohre eine Verkürzung der Aufgefrierzeit bewirkt werden kann. Auf jeden Fall sollten etwaige Optimierungen aber genau überprüft werden, um nicht durch vermeintliche Optimierungen negative Beeinflussungen hervorzurufen.

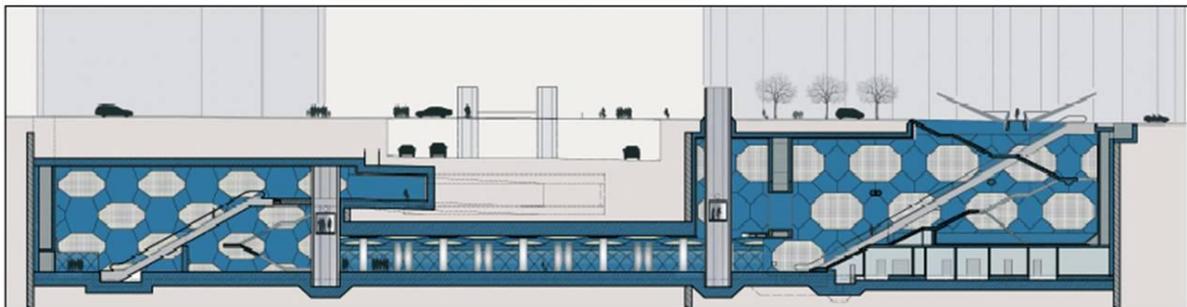


5 Nachrechnung einer konkreten Baumaßnahme

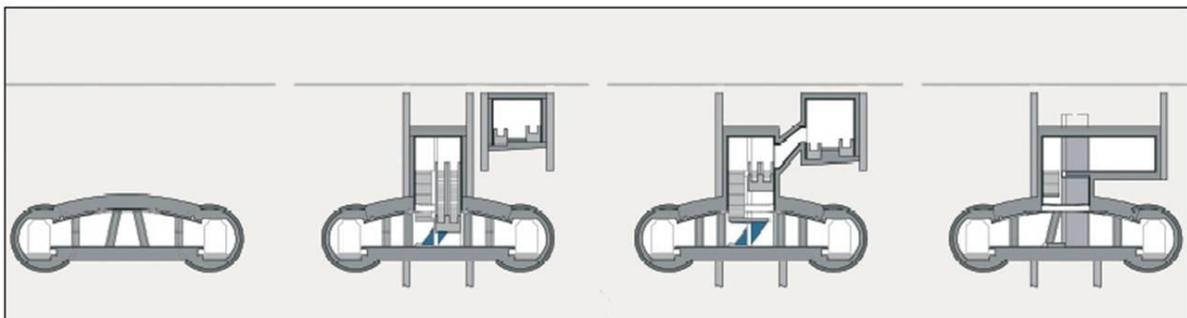
In den vorangegangenen Abschnitten hat sich gezeigt, dass die Grundwasserströmung einen entscheidenden Einfluss auf Vereisungsmaßnahmen hat. Wie bereits erwähnt wird dieser Einfluss jedoch oftmals unterschätzt bzw. aufgrund mangelnder Erkundung unzureichend berücksichtigt. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde daher eine umfassende Erkundung der Grundwassersituation einer konkreten Baumaßnahme vorgenommen. Abschließend wurde unter Berücksichtigung der erkundeten Grundwasserverhältnisse eine Nachrechnung der Vereisungsmaßnahme durchgeführt und den Temperaturmessungen auf der Baustelle gegenübergestellt.

5.1 Vereisungsmaßnahme zur Errichtung der Untergeschosskonstruktion einer Haltestelle

Bei der betrachteten Baumaßnahme handelt es sich um eine Haltestelle mit Zugangsbauwerken für eine U-Bahn-Linie. Hierfür mussten zwischen den im Vorgang maschinell aufgefahrenen Tunnelröhren die Zugangsbauwerke inklusive der Untergeschosskonstruktionen im Grundwasser hergestellt werden. Aufgrund von bestehenden Verkehrsebenen oberhalb der Untergeschosskonstruktion (vgl. Abbildung 56) war es nicht möglich, die gesamte Baumaßnahme im Schutz einer großen Baugrube zu errichten.



Längsschnitt



Querschnitte

Abbildung 56: Entwurfsskizzen der Haltestelle

Aus diesem Grund fand ein Großteil der Arbeiten im Schutz einer wie in Abbildung 57 dargestellten Bodenvereisung statt.

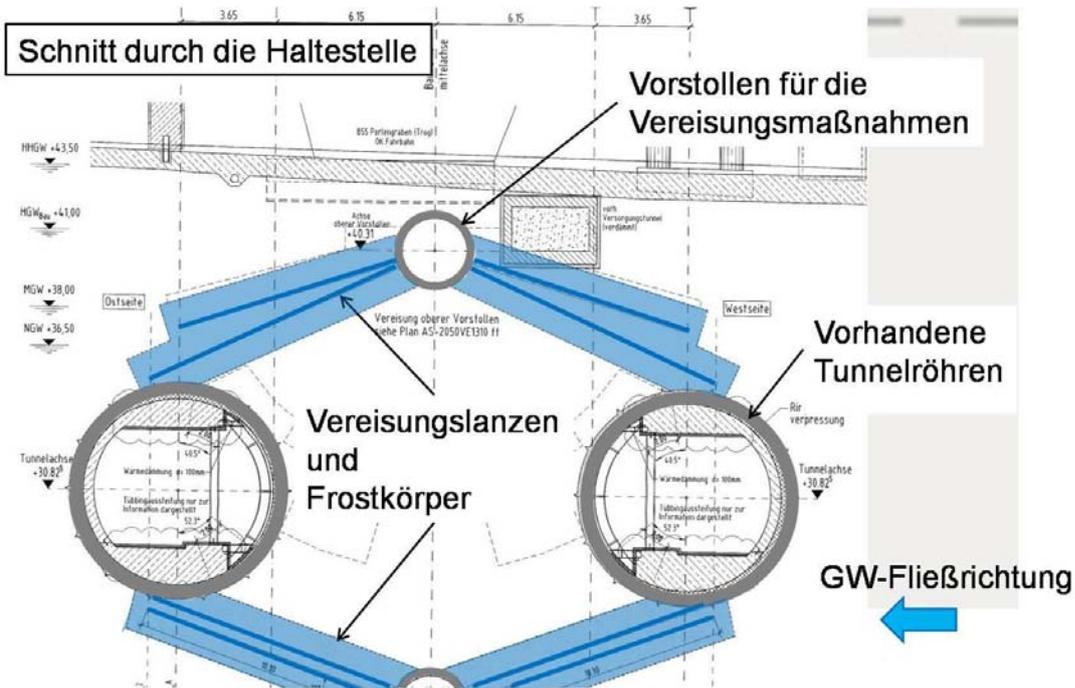
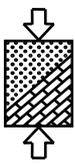


Abbildung 57: Schnitt durch die Haltestelle mit Frostkörper

Hierfür wurden zwischen den Tunnelröhren Vorstollen hergestellt, aus denen heraus die Vereisungslanzen zum Aufgefrieren der Frostkörper gebohrt wurden. Dadurch entstand ein wasserdichter Schirm, innerhalb dessen nach dem Lenzen die Tunnelröhren aufgebrochen und die Haltestelle errichtet werden konnte.

Im Bereich der Vereisungsmaßnahmen stehen relativ durchlässige quartäre Kies-Sand-Gemische an. Diese werden oberhalb des Wasserspiegels von einer geringmächtigen Auffüllung überlagert und etwa 15 m unterhalb der Tunnelachsen durch im Vergleich zum Quartär deutlich geringer durchlässige tertiäre Ablagerungen begrenzt.

In der folgenden Abbildung ist die Baumaßnahme nochmals im Grundriss abgebildet.

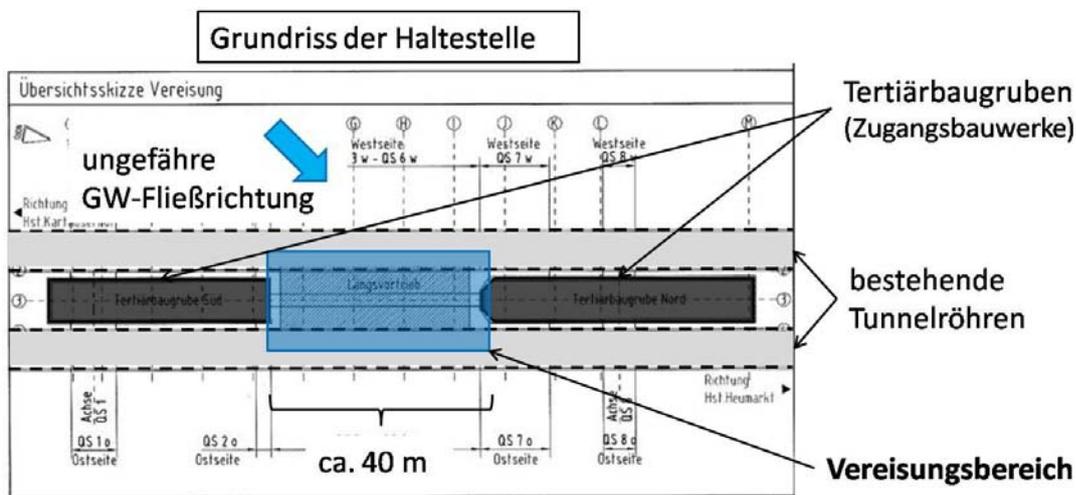
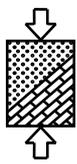


Abbildung 58: Grundriss der Haltestelle



Im Grundriss sind die bestehenden Tunnelröhren der U-Bahn-Linie in hellgrauer und die Tertiärbaugruben, innerhalb derer auch die Zugangsbauwerke untergebracht wurden, in dunkelgrauer Farbe hinterlegt. Die Tertiärbaugruben stellen für den natürlichen Grundwasserfluss eine Barriere dar, da sie in das im Vergleich zum Quartär wesentlich undurchlässigere Tertiär einbinden. Aus diesem Grund ist im Bereich zwischen den Baugruben mit erhöhten Fließgeschwindigkeiten zu rechnen. Blau markiert ist der Bereich der Baumaßnahme, innerhalb dessen die Errichtung der Untergeschosskonstruktionen im Schutze der Vereisungsmaßnahmen stattfand.

5.2 Erkundung der Grundwassersituation

Zur Erkundung der Grundwassersituation wurden sowohl klassische Methoden durch Auswertung von Pegelmessungen in Kombination mit numerischen Berechnungen als auch das Grundwasser-Fluss-Visualisierungsverfahren des Projektpartners Phrealog eingesetzt. Hierfür waren im Vorfeld mehrere Grundwassermessstellen im Bereich der Baumaßnahme zu errichten. Aufgrund der vorhandenen Infrastruktur, konnten die Grundwassermessstellen nicht im unmittelbaren Bereich der Vereisungsmaßnahmen sondern lediglich etwas entfernt davon errichtet werden. Die Lage der Grundwassermessstellen ist in Abbildung 59 dargestellt.

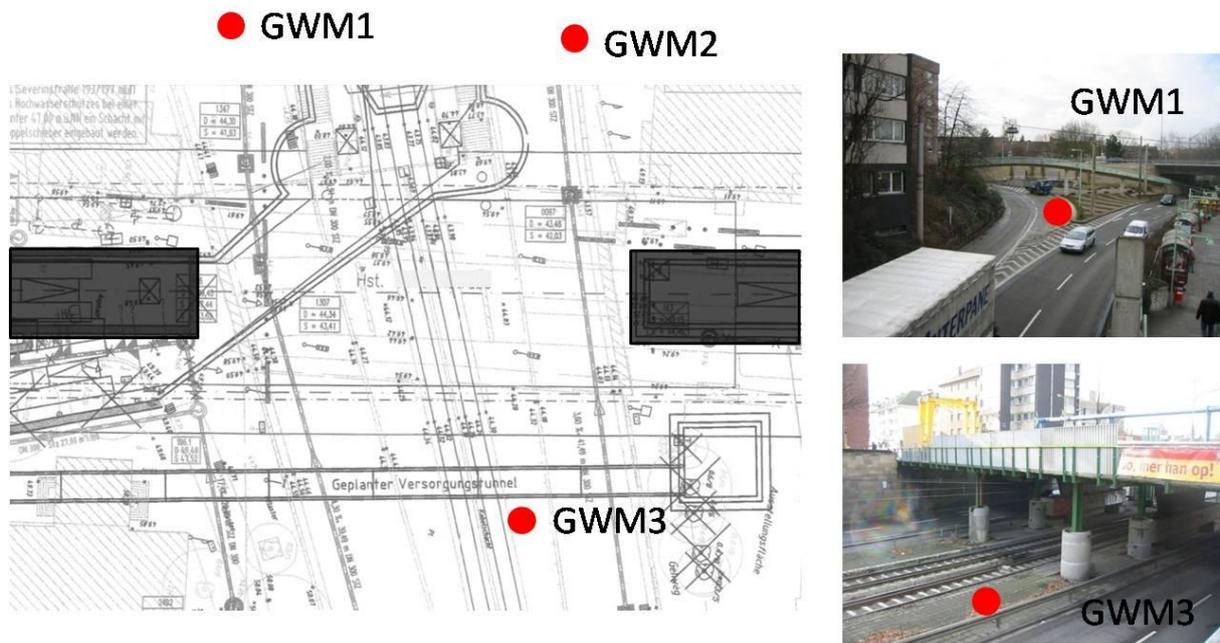


Abbildung 59: Grundwassermessstellen im Bereich der Haltestelle

Neben den Grundwassermessstellen zur Erkundung der Grundwassersituation im Bereich der Haltestelle wurden auf einer Freifläche in unmittelbarer Nachbarschaft ein Brunnen und zwei weitere Pegel zur Durchführung eines Pumpversuchs errichtet. Die Lage des Brunnens und der Pegel kann Abbildung 60 entnommen werden.

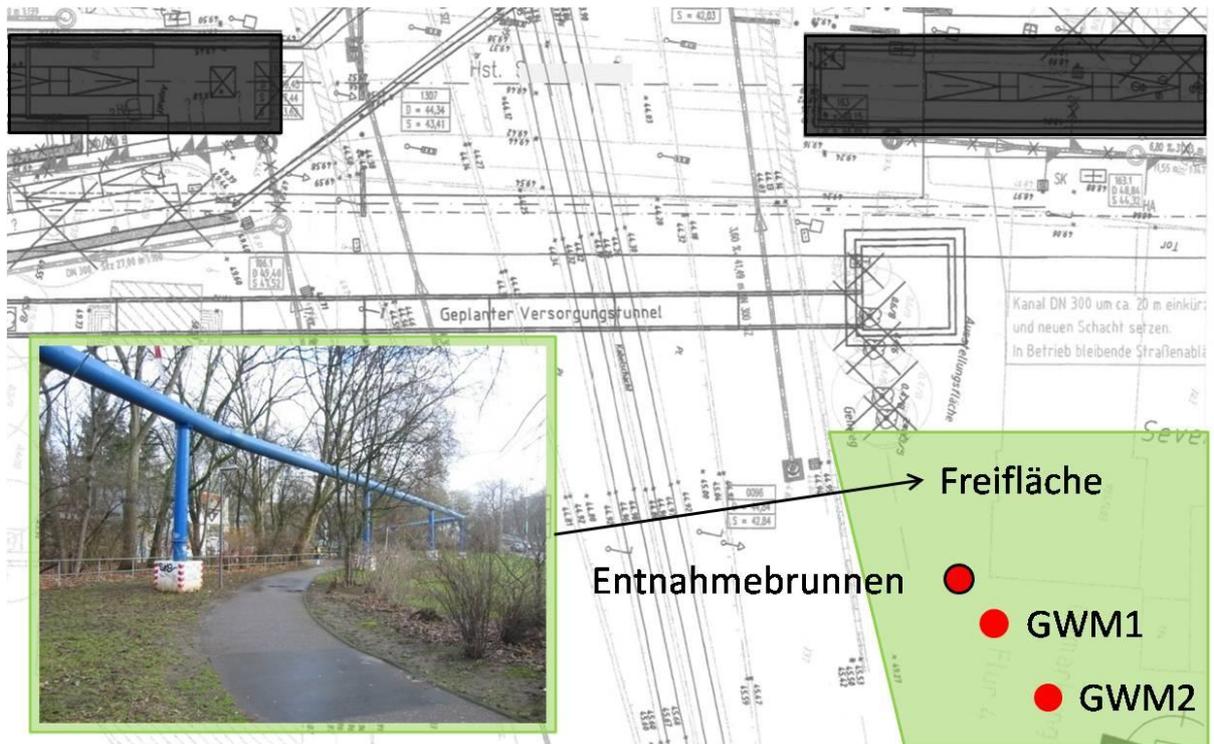
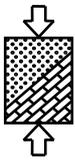


Abbildung 60: Entnahmebrunnen und Pegel für Pumpversuch

Die Auswertung des durchgeführten Pumpversuchs ergab für das Quartär eine Durchlässigkeit von $k_f = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s unter der Annahme homogener Verhältnisse. Diese Durchlässigkeit deckt sich mit der in früheren Baugrundgutachten angegebenen Durchlässigkeit, welche ebenfalls auf der Basis eines Pumpversuchs an anderer Stelle des U-Bahn-Baus für das Quartär ermittelt wurde.

5.2.1 Ermittlung der Fließgeschwindigkeit mittels Pegelmessungen und numerischen Simulationen

Zur Ermittlung der Grundwasserfließgeschwindigkeit im Bereich der Vereisungsmaßnahme wurde ein numerisches 3D-Modell aufgestellt, welches die vorhandenen Einbauten in Form der Tunnelröhren und der Tertiärbaugruben enthält. Die Diskretisierung der mit den Programmsystemen GGU-SS-Flow3D und GGU-3D-Transient durchgeführten Strömungsberechnungen kann Abbildung 61 und Abbildung 62 entnommen werden.

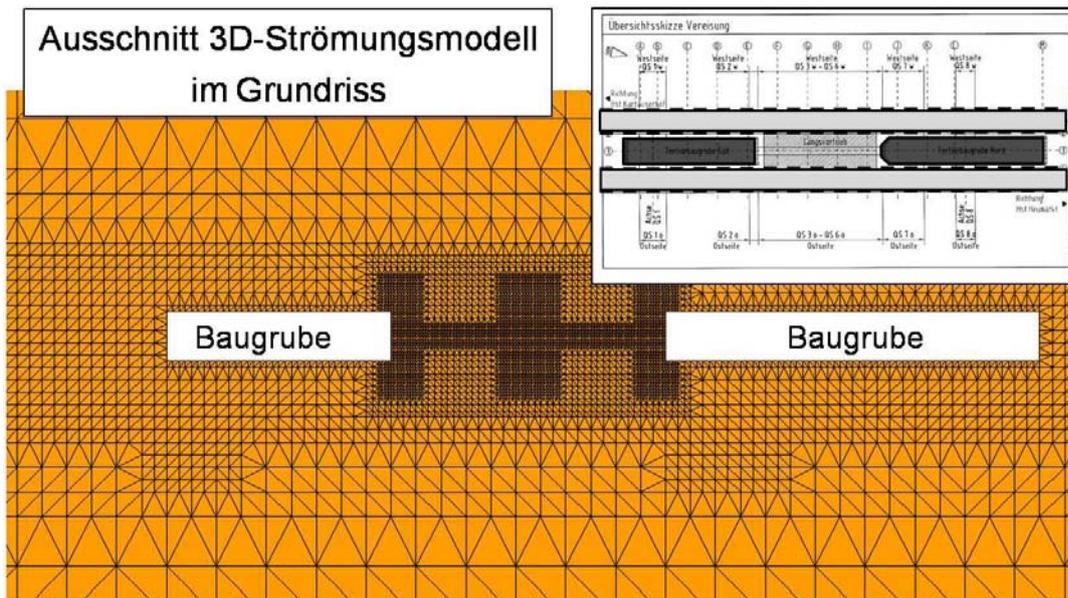
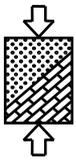


Abbildung 61: Strömungsmodell im Grundriss

Bei den dunkleren Bereichen in Abbildung 61 handelt es sich um feiner diskretisierte Modellausschnitte, die angelegt wurden, um dort eine genauere Auswertung vornehmen zu können.

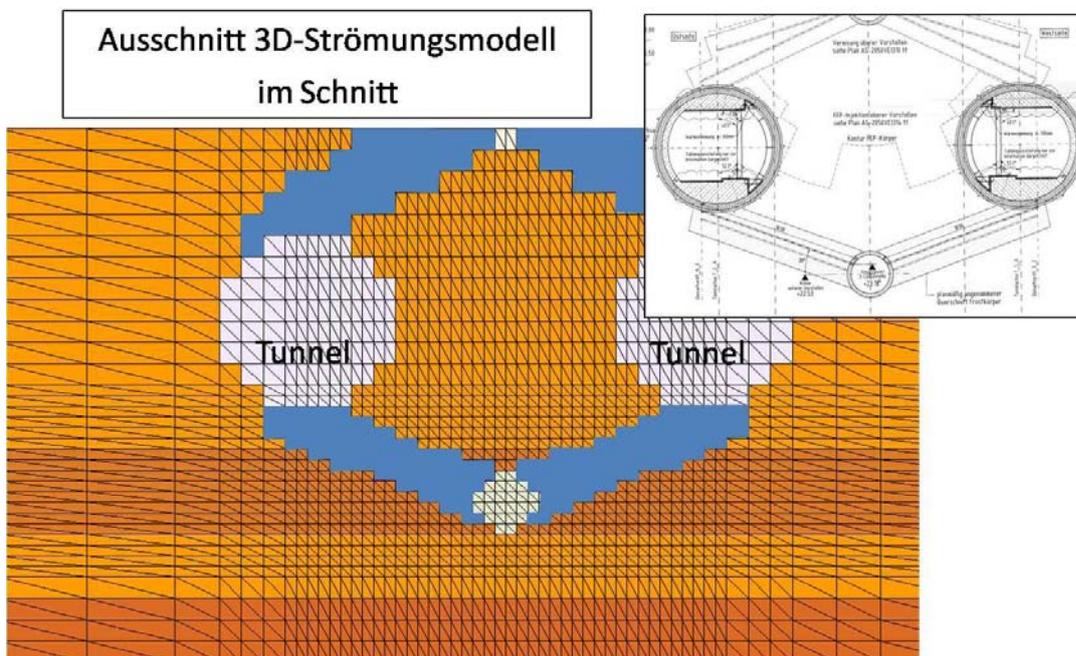
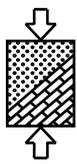


Abbildung 62: Strömungsmodell im Schnitt

Der Boden innerhalb des Modells wurde mit der aus dem Pumpversuch ermittelten Durchlässigkeit von $k_f = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s abgebildet. Da eine Eingabe einer Durchlässigkeit von $k_f = 0$ nicht möglich ist, wurde den im Schnitt zu sehenden Tunnel sowie den Vorstollen eine geringe Durchlässigkeit von $k_f = 1 \cdot 10^{-10}$ m/s zugewiesen, was damit im Vergleich zum Quartär undurchlässigen Bereichen entspricht. Die blau hervorgehobenen Bereiche entsprechen den Frostkörpern, wurden jedoch innerhalb



der rein hydraulischen Berechnungen mit GGU zunächst mit derselben Durchlässigkeit wie der Boden belegt. Als Eingangswerte zur Ermittlung der Fließgeschwindigkeiten im Bereich der Vereisungsmaßnahme dienten täglich durchgeführten Pegelmessungen an den vorab beschriebenen Grundwassermessstellen sowie an einigen weiteren sich in der Umgebung befindlichen Messstellen. Diese korrelieren mit geringer zeitlicher Verzögerung direkt mit dem Wasserstand des nahe vorbeifließenden Flusses.

In der folgenden Abbildung ist die mit dem vorgestellten Modell über die Zeit ermittelte Fließgeschwindigkeit aufgetragen.

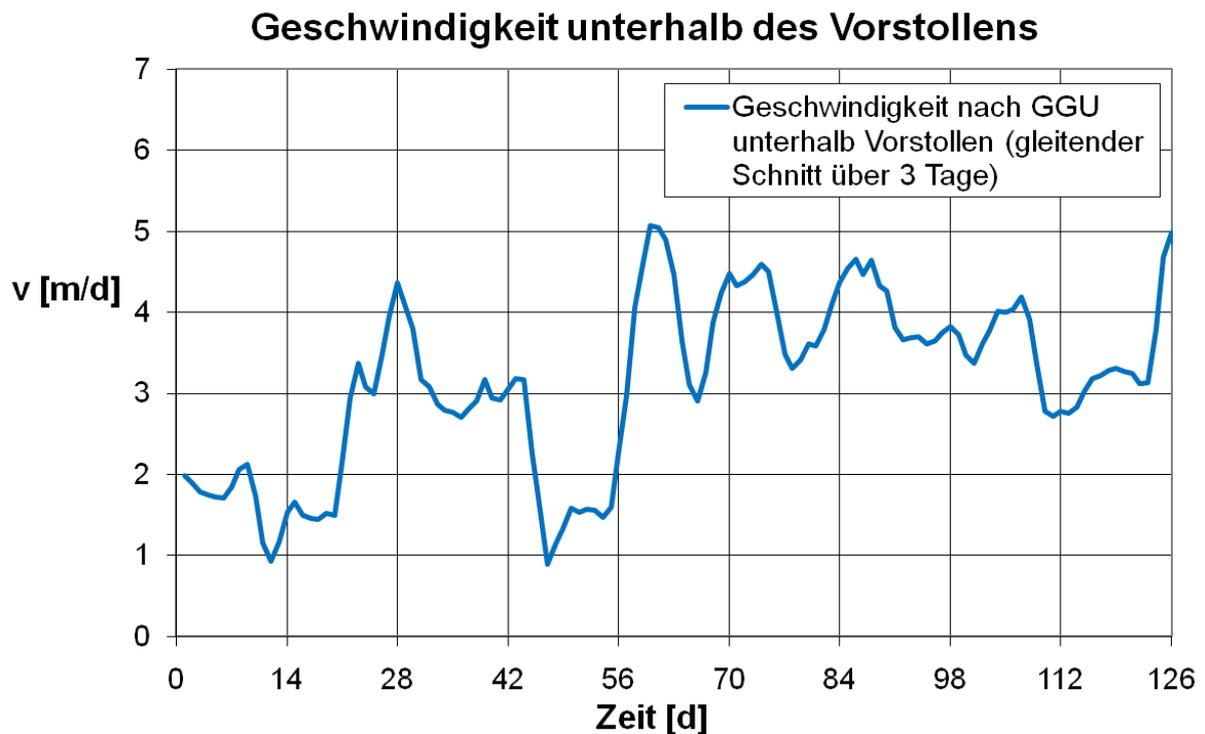
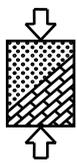


Abbildung 63: Grundwasserfließgeschwindigkeit aus numerischer Berechnung auf Grundlage der Pegelstände

Die aufgetragene Fließgeschwindigkeit wurde hierbei direkt unterhalb des Vorstollens ermittelt.



5.2.2 Ermittlung der Fließgeschwindigkeit mit dem GFV-Verfahren

Bei dem Grundwasser-Fluss-Visualisierungs-Verfahren (GFV-Verfahren) handelt es sich um ein System des Projektpartners Phrealog, bei dem mit einer Kamera der Drift der Schwebeteilchen im Grundwasser aufgenommen wird (vgl. Abbildung 64).

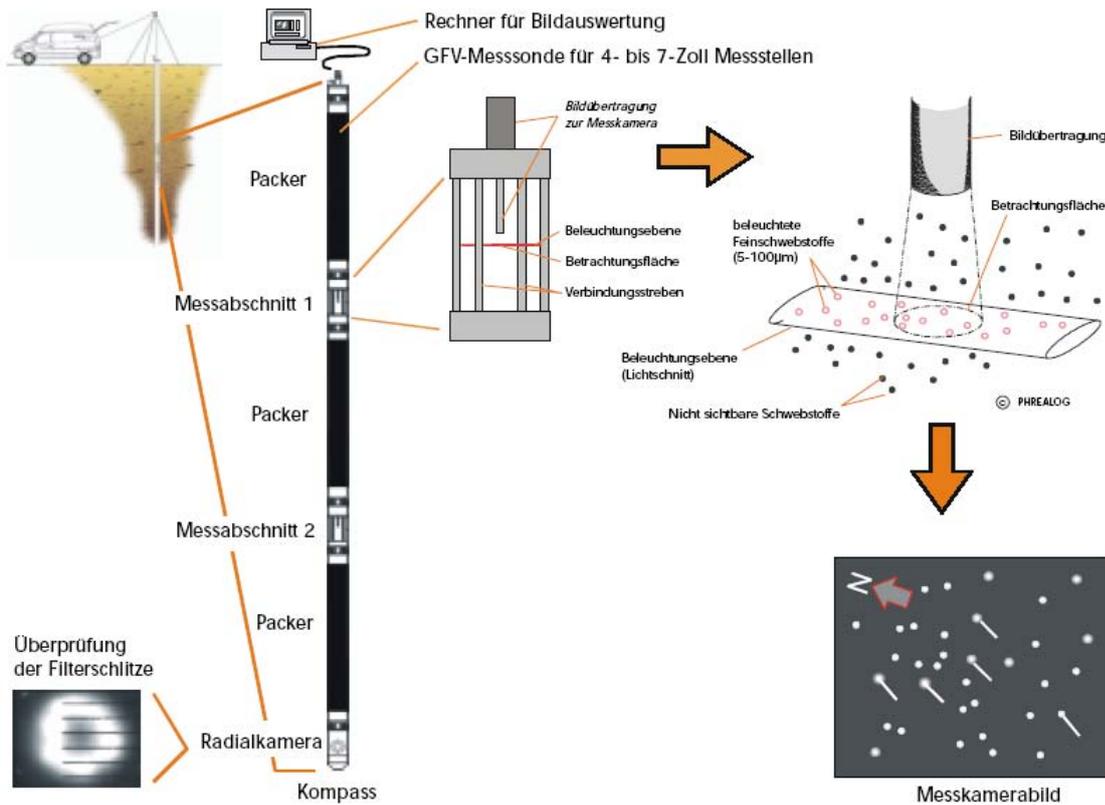
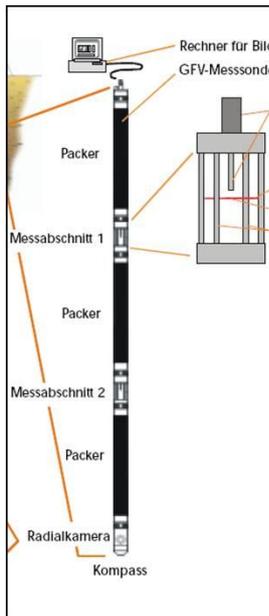
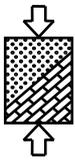


Abbildung 64: Funktionsprinzip des GFV-Verfahrens

Aus dem Drift kann dann die Grundwasserfließgeschwindigkeit und -richtung ermittelt werden. Der Vorteil des Systems liegt darin, dass für die Messungen nur ein Bohrloch vorhanden sein muss und vorhandene Messpegel verwendet werden können. Außerdem ist es durch die vorhandenen zwei Messabschnitte an einer Sonde möglich, zeitgleich in unterschiedlichen Tiefenlagen zu messen. In der folgenden Abbildung sind Fotos vom Einsatz des GFV-Verfahrens zu sehen.



Messabschnitt



Kfz mit Messeinrichtung



Aufbau Sonde

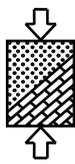


Überwachung in Echtzeit

Abbildung 65: Einsatz GFV-Verfahren

Wie auf den Bildern zu sehen ist, kann der Aufbau der Sonde mit zwei Personen durchgeführt werden und die Messung lässt sich in Echtzeit überwachen. Dadurch lassen sich bereits während der Messungen erste Tendenzen feststellen. Weiterhin ist die Überwachung in Echtzeit notwendig, um festzustellen, wann sich die Grundwasserverhältnisse, welche durch das Einbringen der Sonde gestört werden, wieder beruhigt haben und aussagekräftige Messungen erfolgen können.

In den folgenden Abbildungen sind beispielhaft für einen Pegel die Messergebnisse, welche mit dem GFV-Verfahren erhalten wurden, dargestellt. Die in Abbildung 66 aufgetragenen Messwerte in blauer und in roter Farbe entsprechen der zeitgleichen Messung in unterschiedlicher Tiefenlage.



ProjektNr.: BMBF Az: Z6-10.08.18.7.-07.31
Projekt: Forschungsvorhaben Vereisung



GW-Messstelle BK5
Messdiagramme

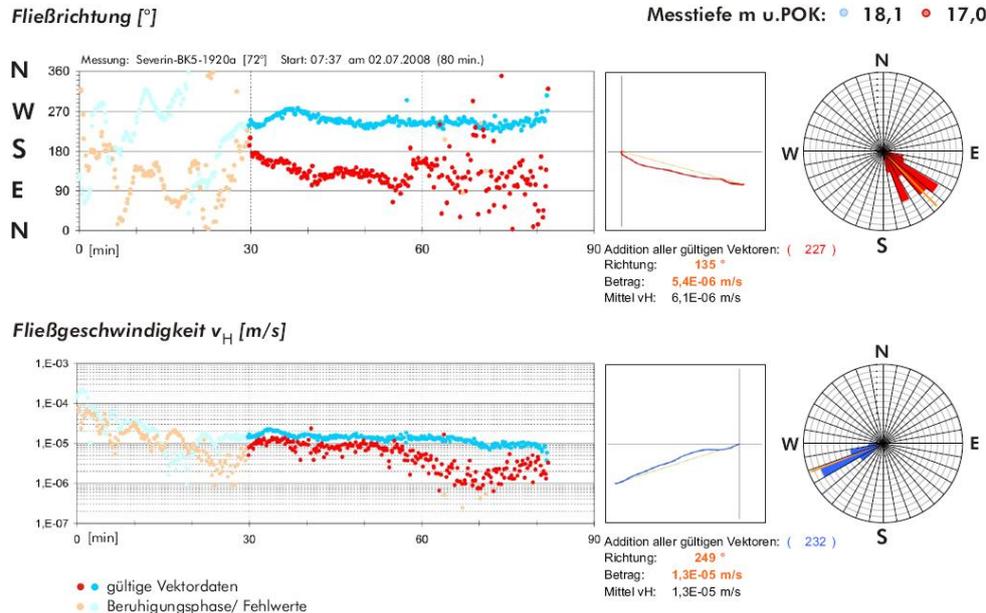


Abbildung 66: Messwerte der Fließrichtung und der –geschwindigkeit mit dem GFV-Verfahren

Neben der Darstellung der einzelnen Messwerte werden die Ergebnisse für jeweils einen Pegel zusammenfassend nochmals in Tabellenform aufbereitet (vgl. Abbildung 67).

Projekt: Forschungsvorhaben Vereisung
ProjektNr.: BMBF Az: Z6-10.08.18.7.-07.31
GFV-Messungen von 01.07.- 02.07.und 09.07.-11.07.2008
Hier: Vorläufige Ergebnisse der GFV-Messungen

Tabelle 1. Messergebnisse

Messstelle	Messtiefe [m u.POK]	Messdauer [min.]	mittlere Fließricht.[°]	Betrag vH (m/s)	Güte * Korrektur [α°γ]	mittlere vf (m/s)	mittlere vf (m/d)
BK5	17,00	80	135	5,40E-06	0,5	10,71	5,0E-07
	17,50	80	26	1,10E-05	0,75	10,71	1,0E-06
	18,10	80	249	1,30E-05	1	10,71	1,2E-06
	18,60	80	217	1,30E-05	0,5	10,71	1,2E-06
	19,70	465	184	1,50E-06	0,25	10,31	1,5E-07
	20,80	465	21	2,60E-06	0,75	9,99	2,6E-07
	23,60	135	229	1,70E-06	0,25	10,31	1,6E-07
	24,70	135	304	1,90E-05	0,75	10,62	1,8E-06
Summe		12:40		8,4E-06	0,59	7,9E-07	0,07

Abbildung 67: Messergebnis der Fließrichtung und der –geschwindigkeit mit dem GFV-Verfahren

Zusätzlich zu den Messungen in den Grundwassermessstellen wurden vom Projektpartner Phrealog auch Messungen in den Pegeln auf der Freifläche während des Pumpversuchs durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

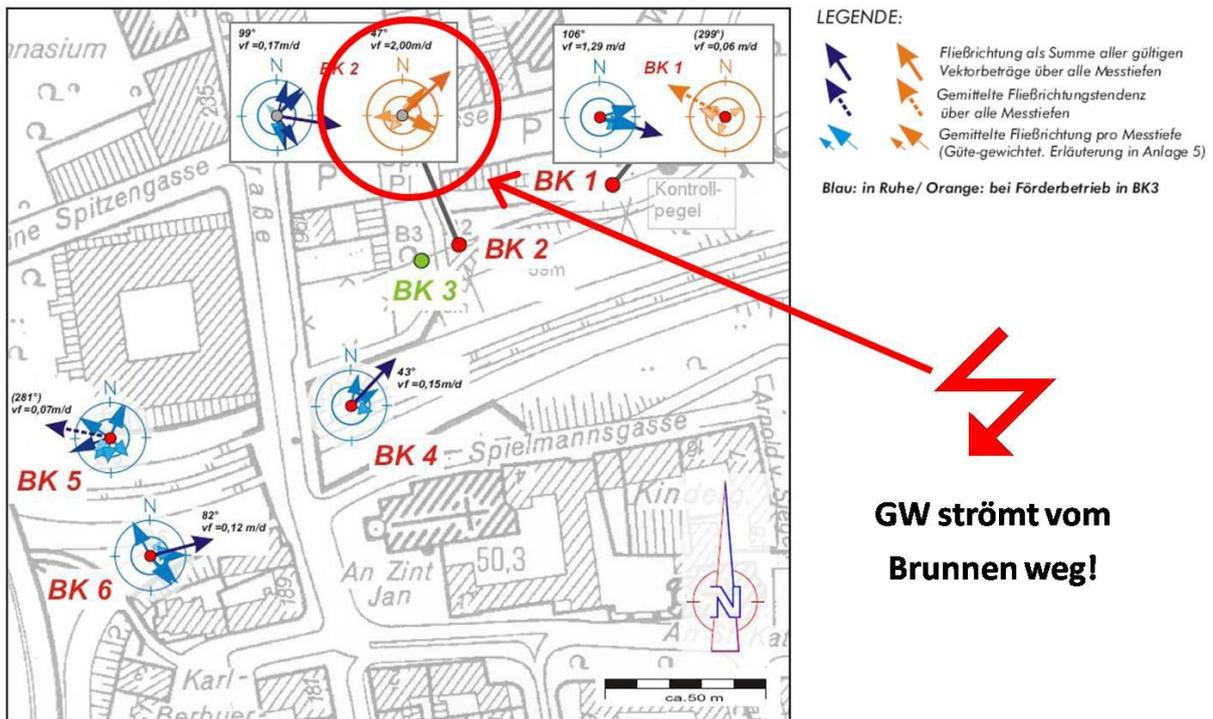
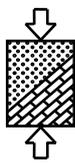
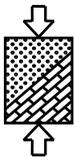


Abbildung 68: GFV-Messungen vor bzw. nach und während des Pumpversuchs

In Abbildung 68 ist der Brunnen mit BK 3 (grüne Farbe) bezeichnet, die Pegel für den Pumpversuch mit BK 1 und BK 2 sowie die Pegel im Bereich der Vereisungsmaßnahme mit BK 4-6. Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen in Ruhe (blaue Farbe), d.h. noch vor dem Pumpversuch und der Inbetriebnahme des Brunnens, weisen tendenziell eine Fließrichtung nach Osten auf. Dies passt zu der Gesamtsituation, da sich ca. 200 m in östlicher Richtung ein Fluss befindet und sich das Grundwasser bei normalem Flusswasserstand zum Fluss hin bewegt. Ungereimtheiten ergaben sich jedoch während des Pumpversuchs, die sich darin zeigten, dass während des Pumpversuchs im Pegel BK 2 weiterhin eine Grundwasserströmung nach Osten, also vom Brunnen weg, gemessen wurde. Der Abstand zwischen dem Brunnen und dem Pegel BK 2 beträgt lediglich 6 m, so dass eine Strömung vom Brunnen weg physikalisch nicht sein kann.

Unabhängig von den Messungen in den Pegeln BK 1 und BK 2 während des Pumpversuchs ergaben die Messungen im Bereich der Vereisungsmaßnahme eine Geschwindigkeit von etwa $v = 0,2$ m/d. Aufgrund der aufgetretenen Streuungen und Diskrepanzen in den Ergebnissen, sollten die Werte aus den GFV-Messungen allerdings nicht ohne Absicherung durch Pegelmessungen verwendet werden.

Der ausführliche Bericht des Projektpartners Phrealog zu allen durchgeführten Messungen ist im Anhang enthalten.



5.3 Nachrechnung eines Querschlags ohne GW-Strömung

Wie in Kapitel 3 gezeigt wurde, beeinflussen nicht nur die Grundwasserströmung sondern auch andere Faktoren das Gefrierverhalten. Aus diesem Grund wurde vorab eine Vereisungsmaßnahme der gleichen Haltestelle ohne Grundwasserströmung nachgerechnet, um mögliche Fehler durch falsch angenommene Eingangsparameter auszuschließen. Hierbei handelt es sich um einen Querschlag zwischen einer der Tertiärbaugruben und der östlichen Tunnelröhre (vgl. Abbildung 58). Da dieser Bereich durch die Tertiärbaugrube quasi im Strömungsschatten liegt, ist die Annahme, dass hier die Fließgeschwindigkeit gleich Null ist, gerechtfertigt. In der folgenden Abbildung ist der nachgerechnete Querschlag in der Ansicht zu sehen.

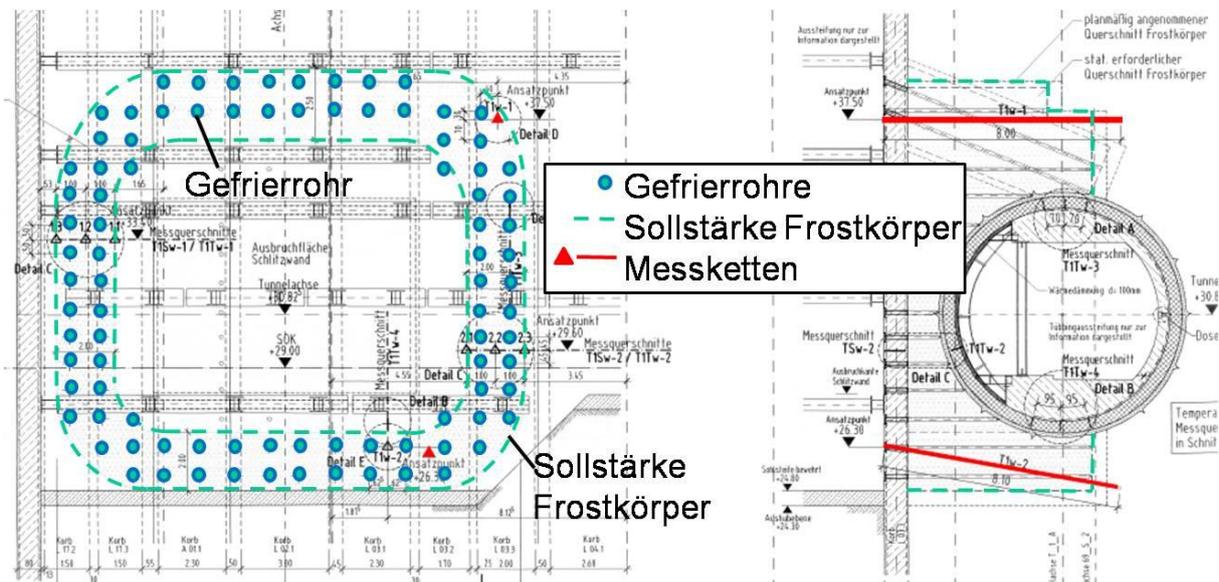
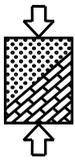


Abbildung 69: Querschlagvereisung

Die für die Nachrechnung des Querschlags verwendeten Eingangsparameter wurden vorhandenen Gutachten, Berechnungen und Untersuchungen entnommen bzw. die Freezing-Parameter gemäß 2.3 aus der Kornverteilung ermittelt. Da die benötigten Eingangsparameter nicht exakt, sondern nur innerhalb gewisser Bereiche angegeben wurden, wurden diese variiert und mehrere Vergleichsrechnungen durchgeführt. Die letztlich auch für die spätere Nachrechnung der Vereisungsmaßnahme mit Strömung verwendeten Werte sind in Tabelle 2 aufgeführt.



Parameter		Wert	Einheit
Porenanteil	n	0,35	[-]
Wärmeleitfähigkeit (Feststoff)	λ_m	3,6	[W/(mK)]
Volum. Wärmekapazität (Feststoff)	$c_{v,m}$	$2000000 \cdot (1 + 0,005301 \cdot T)$	[J/(m ³ K)]
Permeabilität	k	$6,57 \cdot 10^{-10}$	[m ²]
Spezifische Oberfläche	S_s	0,00091	[m ² /g]
Freezing Parameter	a	0,027	[-]
	b	-5,569	[-]
	E	10	[-]

Tabelle 2: Eingangsparmeter Nachrechnung Haltestelle

Unter Verwendung dieser Werte ergibt sich der in der folgenden Abbildung zu sehende berechnete Verlauf der Temperatur über die Zeit (blaue Farbe).

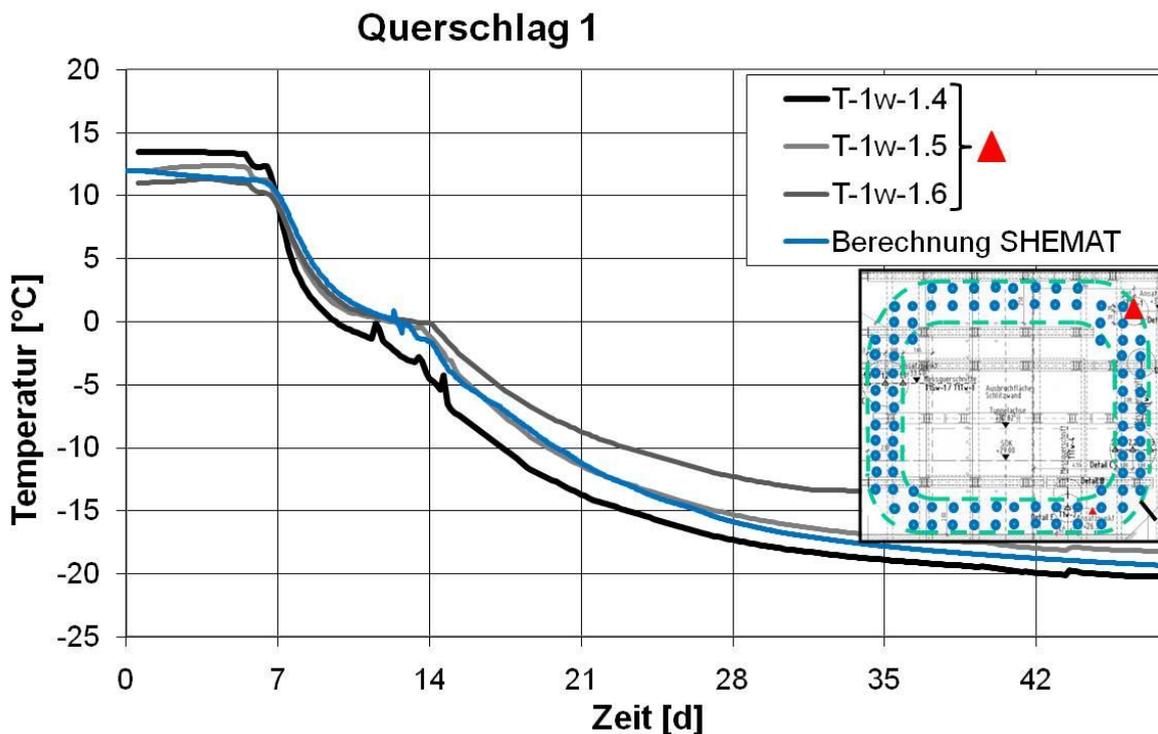
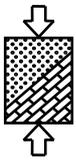


Abbildung 70: Gemessener und berechneter Temperaturverlauf am Querschlag 1

Neben dem mit Shemat berechneten Verlauf sind in Abbildung 70 drei weitere gemessene Verläufe zu sehen. Die zugehörigen Messfühler besitzen in der Ansicht die gleiche Position und unterscheiden sich untereinander lediglich bezüglich der Tiefe. Man sieht, dass die gemessenen und der berechnete Verlauf eine gute Übereinstimmung aufweisen und somit die verwendeten Eingangsparmeter bestätigt wurden.



5.4 Nachrechnung der Vereisungsmaßnahme mit GW-Strömung

Nachdem wie in 5.3 beschrieben ein Querschlag der Baumaßnahme ohne Grundwasserströmung nachgerechnet wurde, wurde im nächsten Schritt der Teil der Baumaßnahme nachgerechnet, der sich zwischen den beiden Tertiärbaugruben befindet (vgl. Abbildung 58) und damit der Grundwasserströmung ausgesetzt ist. In Abbildung 71 ist ein Schnitt durch die Baumaßnahme inklusive der Gefrierrohre und der vorhandenen Messkette zur Überwachung der Temperatur dargestellt.

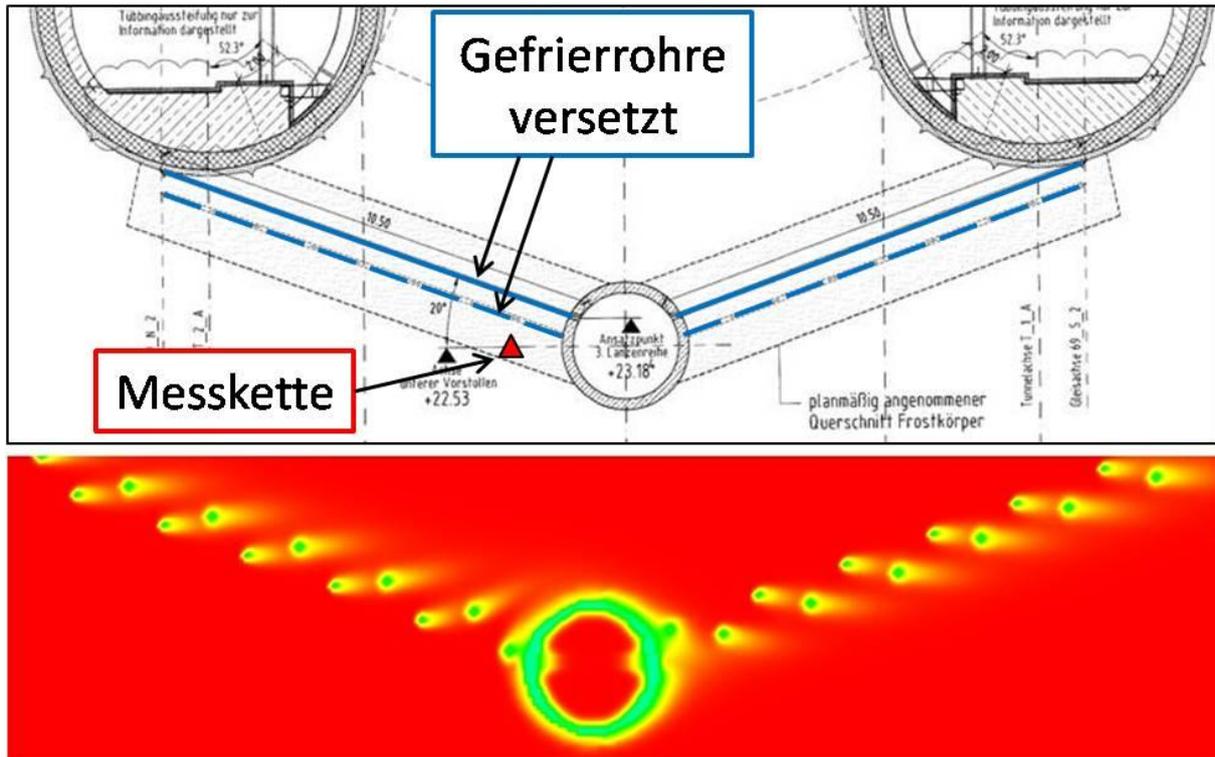
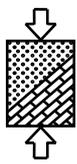


Abbildung 71: Schnitt durch die Haltestelle und Modellausschnitt in SHEMAT

Die Gefrierrohre sind über die Tiefe vertikal versetzt angeordnet. Da es sich bei den SHEMAT-Berechnungen um 2D-Simulationen handelt, hätte eine Abbildung der Gefrierrohre in Schnittrichtung zur Folge, dass der Grundwasserstrom bereits vor dem Aufgefrieren des Bodens durch die undurchlässigen Rohre verhindert wäre. Aus diesem Grund wurden die Gefrierrohre als einzelne Segmente abgebildet, wie in Abbildung 71 unten zu sehen ist. Dadurch kann, wie es in der Realität auch der Fall ist, zu Beginn der Simulation Grundwasser zwischen den Rohren strömen und erst dann wenn der Boden gefroren ist, wird der gesamte Grundwasserstrom durch den verbleibenden Querschnitt zwischen dem unteren Vorstollen und der Tertiäroberkante geleitet.

Vorab wurden mittels Pegelmessungen und numerischer Berechnung sowie mit dem GFV-Verfahren Fließgeschwindigkeiten ermittelt. Für die Nachrechnung der Vereisungsmaßnahme in dem oben dargestellten Schnitt wurden die Potentiale am linken und rechten Modellrand so vorgegeben, dass innerhalb von SHEMAT ohne den Einfluss der zusätzlichen Querschnittsverengung durch das spätere Aufgefrieren



die vorab ermittelten Fließgeschwindigkeiten unterhalb des Vorstollens erhalten wurden.

Die bodenspezifischen Eingangsparameter für die Simulationen entsprechen den aus der Querschlagssimulation erhaltenen Werten in Tabelle 2.

In Abbildung 72 sind der gemessene und die berechneten Temperaturverläufe für die nach 5.2.1 und 5.2.2 erhaltenen Geschwindigkeiten gegenübergestellt.

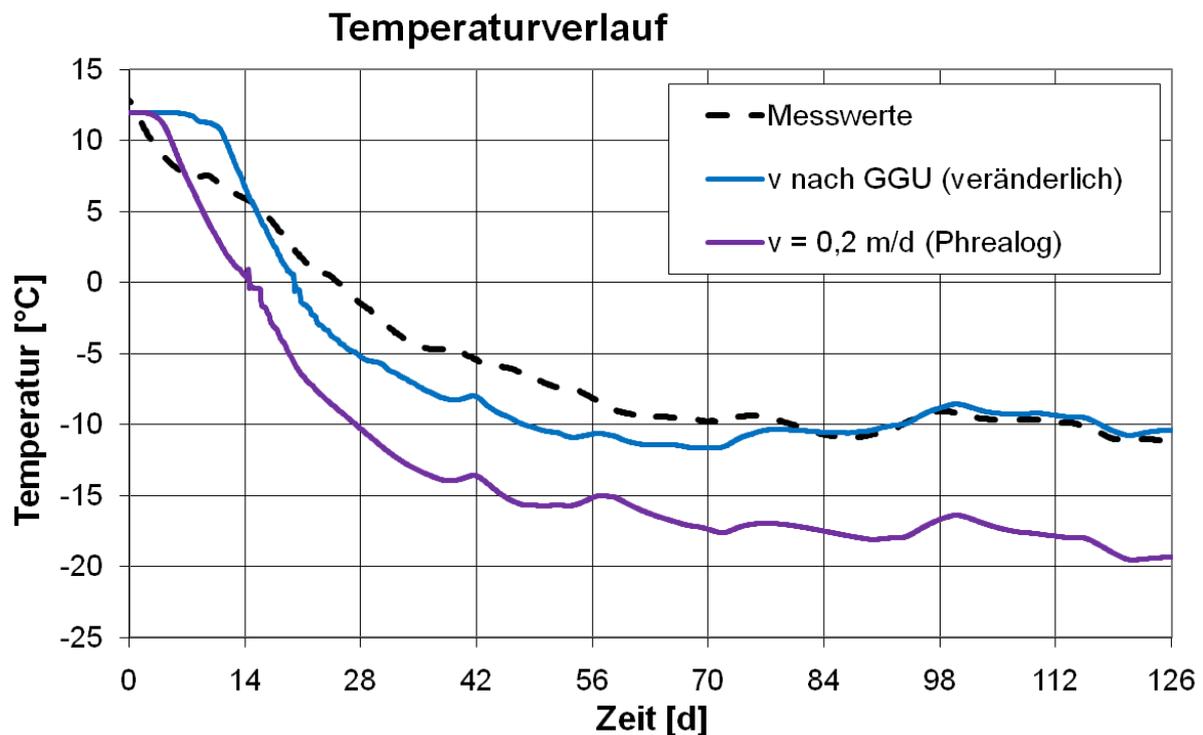


Abbildung 72: Gemessener und berechnete Temperaturverläufe im Schnitt durch die Haltestelle

Man sieht, dass mit den aus den Pegelmessungen und der numerischen Simulation erhaltenen Fließgeschwindigkeiten eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen erzielt wird. Mit der konstanten Fließgeschwindigkeit aus den GFV-Messungen liegen die ermittelten Temperaturen hingegen weit unter den gemessenen. Dies heißt jedoch nicht zwangsläufig, dass die Fließgeschwindigkeit mit dem GFV-Verfahren generell unterschätzt wird. Vielmehr liegt die Ursache für die relativ großen Abweichungen vermutlich darin begründet, dass die Baumaßnahme in unmittelbarer Nähe zu einem Fluss liegt und sich damit aufgrund des schwankenden Flusswasserstands (vgl. Abbildung 73) auch während des betrachteten Zeitraums stark schwankende Fließgeschwindigkeiten im Bereich der Baumaßnahme ergaben.

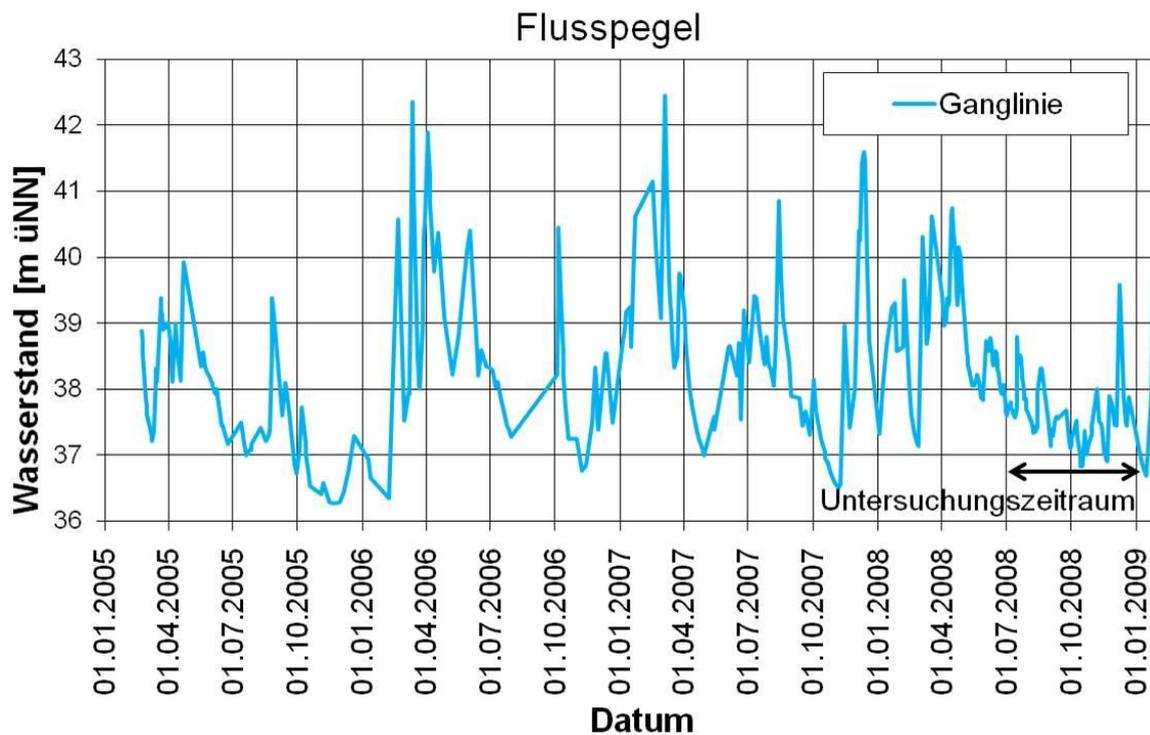
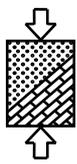


Abbildung 73: Flusspegel

Da mit dem GFV-Verfahren jedoch nur zu einem Zeitpunkt Messungen durchgeführt wurden, konnte hieraus keine Korrelation zwischen dem Flusswasserstand und der Fließgeschwindigkeit aufgestellt und innerhalb der Simulation berücksichtigt werden.

Neben den Simulationen mit den eigens ermittelten Fließgeschwindigkeiten wurden zusätzlich Berechnungen durchgeführt, bei denen die Fließgeschwindigkeit zum einen komplett vernachlässigt wurde und zum anderen diejenigen Geschwindigkeiten angesetzt wurden, mit denen laut Ausschreibung bei normalem Wasserstand (MGW) bzw. bei Hochwasser (HGW) einschließlich der Düseneffekte durch Einbauten zu rechnen sei. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abbildung 74 dargestellt.

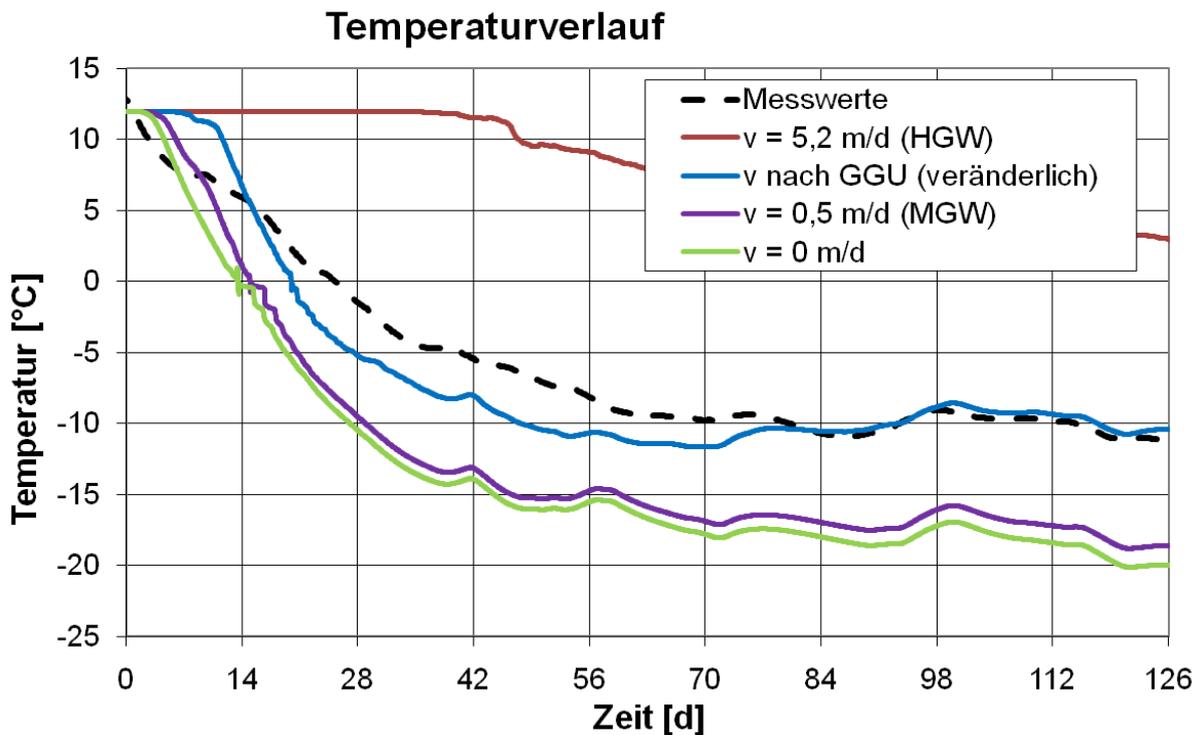
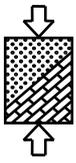
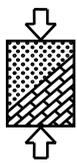


Abbildung 74: Gemessener und für verschiedene Geschwindigkeiten ermittelte Temperaturverläufe

Es ist zu erkennen, dass ohne die Berücksichtigung einer Strömung bzw. für $v = 0,5 \text{ m/d}$ (MGW) analog zu der geringen Fließgeschwindigkeit nach dem GFV-Verfahren Temperaturen berechnet werden, die weit unterhalb der gemessenen Werte liegen. Weiterhin findet beim Ansatz einer konstanten Geschwindigkeit von $5,2 \text{ m/d}$ (HGW) über die ganze Zeit im Gegensatz zur Realität bei der die Geschwindigkeit ständig wechselt im betrachteten Zeitraum noch kein Aufgefrieren im Bereich der Messfühler statt, was ein Indiz dafür ist, dass das Verfahren bei permanenten Fließgeschwindigkeiten in dieser Größenordnung an seine Grenzen stößt.

5.5 Fazit Nachrechnung einer konkreten Baumaßnahme

Die Simulationen haben gezeigt, dass sich mit Hilfe des Programms SHEMAT nicht nur Modellversuche sondern auch konkrete Baumaßnahmen hinreichend genau abbilden lassen. Dies ist sowohl für Maßnahmen ohne Grundwasserströmung (vgl. Abbildung 70) möglich, als auch für solche, die dem Einfluss einer Grundwasserströmung unterliegen (vgl. Abbildung 72). Voraussetzung hierfür ist, dass die benötigten Eingangsparameter bekannt sind und eine vorhandene Grundwasserströmung möglichst realitätsnah berücksichtigt wird. Andernfalls können von der Realität stark abweichende Ergebnisse erhalten werden (vgl. Abbildung 74).



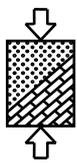
6 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführte Parameterstudie hat gezeigt, dass das Gefrierverhalten von Böden durch viele Faktoren beeinflusst wird. Der größte äußere Einfluss auf das Gefrierverhalten resultiert jedoch aus der Geschwindigkeit der Grundwasserströmung. Wenn diese zu groß wird, stößt das Verfahren an seine Grenzen und es kann passieren, dass das Frostkörperwachstum zum Erliegen kommt, ehe der erforderliche Frostkörper aufgefroren ist.

Um die Anwendung des Vereisungsverfahrens im Rahmen von Hochbaumaßnahmen zu erweitern bzw. im Hinblick auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit zu optimieren, wurden Möglichkeiten untersucht, inwieweit durch strömungsangepasste Entwürfe die Aufgefrierzeit bei vorhandener Grundwasserströmung verkürzt werden kann. Als erstes wurde das System einer angeströmten Wand betrachtet. Hierbei hat sich gezeigt, dass entweder durch zusätzliche Rohre, die zur Vorkühlung oder zur Verringerung des Rohrabstands in Wandmitte herangezogen werden, oder durch eine Verdichtung der Rohre in Wandmitte bei Beibehaltung der Rohranzahl wesentlich kürzere Aufgefrierzeiten erreicht werden können. Darauf aufbauend wurden verschiedene geschlossene Systeme betrachtet. Auch hierfür kann die Aufgefrierzeit entscheidend verkürzt werden, wenn Rohre aus den strömungsparallelen Seiten verschoben und im An- bzw. Abstrom positioniert werden. Weiterhin hat dies den zusätzlichen positiven Effekt, dass sich das für den Aushub ungünstig auswirkende Frostwachstum ins Systeminnere verringert. Darüberhinaus wurden Systeme untersucht, welche dem Einfluss einer Düsenwirkung durch benachbarte Bebauung mit Untergeschosskonstruktionen unterliegen. Hierbei hat sich allerdings gezeigt, dass aufgrund der stark erhöhten Fließgeschwindigkeiten eine Verkürzung der Aufgefrierzeit alleine durch Umpositionierung fast nicht möglich ist, sondern hierfür eine größere Rohranzahl benötigt wird.

Generell lässt sich sagen, dass durch strömungsangepasste Rohranordnungen oder durch zusätzliche Rohre oftmals wesentliche Vorteile bezüglich der Aufgefrierzeit und auch bezüglich des unerwünschten Frostkörperwachstums nach innen erzielt werden können. Hierfür ist jedoch die Kenntnis der vorhandenen Grundwassersituation und der Bodenkennwerte notwendig, um realitätsnahe Voruntersuchungen durchführen zu können.

Abschließend wurde gezeigt, dass mit dem weiterentwickelten Programm SHEMAT konkrete Baumaßnahmen realitätsnah abgebildet werden können und damit ein Instrument zur Verfügung steht, mit dessen Hilfe im Vorfeld Untersuchungen zur Optimierung von Vereisungsmaßnahmen durchgeführt werden können.



Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde darüberhinaus das Grundwasser-Fluss-Visualisierungs-Verfahren eingesetzt. Hierbei wurden jedoch Ungereimtheiten bei den Messergebnissen festgestellt, die eine direkte Übertragung ohne Anbindung an konventionelle Messungen kritisch erscheinen lassen. Dies ist insofern bedauerlich, da mit dem Verfahren in verschiedenen Tiefenlagen gemessen werden kann, wodurch eine Methode zur Verfügung stünde, mit der die Fließgeschwindigkeit auch in eventuell vorhandenen Grobschichten separat ermittelt werden könnte.

Gerade im Quartär werden im Rahmen der Baugrunderkundung oftmals Grobschichten oder Groblinsen mit gegenüber dem restlichen Boden erhöhten Durchlässigkeiten angetroffen (vgl. Abbildung 75).

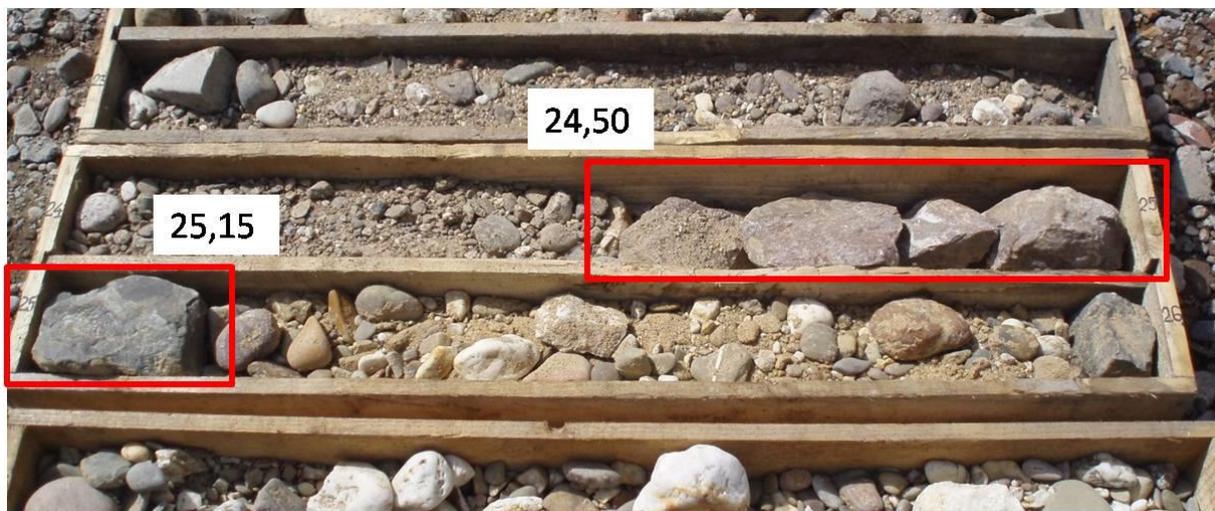
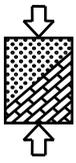


Abbildung 75: Grobschicht

Da solche Grobschichten und Groblinsen in der Realität zu Problemen führen können, ihr tatsächlicher Einfluss auf Vereisungsmaßnahmen bisher jedoch noch nicht genauer untersucht wurde, sollten hierzu unbedingt weiterführende Untersuchungen angestellt werden.

Hierfür wären allerdings dreidimensionale Simulationen erforderlich. Das Programm SHEMAT ermöglicht zwar dreidimensionale Simulationen, allerdings ist der Aufwand für die Modellerstellung sowie die erforderliche Rechenzeit in der jetzigen Version des Programms unverhältnismäßig hoch, so dass auch auf dem Gebiet der Programmweiterentwicklung zusätzlicher Bedarf besteht.

Um nicht nur den Einfluss von Grobschichten und Groblinsen genauer zu untersuchen, sondern generell bodenartspezifische Empfehlungen erarbeiten zu können, erscheint es darüberhinaus notwendig, die numerischen Untersuchungen durch Laborversuche zu ergänzen. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde gezeigt, dass für die betrachteten Böden die Ableitung von Gefrierparametern aus der Kornverteilung eine hinreichend genaue Abbildung des Gefrierprozesses ermöglicht. Für eine generelle Übertragung auf beliebige Bodenarten bedarf es jedoch der weiteren Verifizierung durch Versuche.

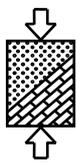


Weiterer Klärungsbedarf besteht auch bei der Frage nach den thermischen Einflüssen, welche sich unmittelbar aus benachbarten Untergeschossen auf Vereisungsmaßnahmen ergeben. Tiefgaragen von Bürohochhäusern etwa können eine nicht zu vernachlässigende Wärmequelle darstellen und eine benachbarte Vereisungsmaßnahme erheblich beeinflussen. Hierbei besteht zum einen Forschungsbedarf bezüglich der Untersuchung des tatsächlichen Einflusses solcher Wärmequellen und zum anderen bezüglich möglicher Maßnahmen zur Reduzierung solcher Einflüsse.

Aachen, den _____

(Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler)

(Dipl.-Ing. Benjamin Aulbach)



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Phasenmodell gesättigter Böden.....	5
Abbildung 2:	Idealisierte Verläufe der Wärmeleitfähigkeit λ und der Wärmekapazität c eines Bodens bei Berücksichtigung der Kristallisationswärme.....	6
Abbildung 3:	Gedeckelter Verlauf des ungefrorenen Wassergehalts für das Phasenwechselmodell.....	9
Abbildung 4:	Gemessene und mit SHEMAT berechnete Temperaturverläufe eines Modellversuchs ohne Grundwasserströmung.....	10
Abbildung 5:	Gemessene und mit SHEMAT berechnete Temperaturverläufe eines Modellversuchs mit Grundwasserströmung.....	10
Abbildung 6:	Systemskizze angeströmte Wand.....	11
Abbildung 7:	Einfluss des Porenanteils auf den Frostkörperschluss ohne Grundwasserströmung.....	13
Abbildung 8:	Einfluss des Porenanteils für verschieden Fließgeschwindigkeiten.....	13
Abbildung 9:	Einfluss des Quarzgehaltes für verschieden Fließgeschwindigkeiten.....	14
Abbildung 10:	Temperaturschwankungen über die Tiefe im Boden in Berlin (Stadt Berlin 1999).....	15
Abbildung 11:	Einfluss der Grundwassertemperatur ohne Strömung.....	16
Abbildung 12:	Einfluss der Grundwassertemperatur für verschiedene Fließgeschwindigkeiten.....	16
Abbildung 13:	Einfluss des Rohrabstands ohne Grundwasserströmung.....	17
Abbildung 14:	Einfluss des Rohrabstands für verschieden Fließgeschwindigkeiten.....	17
Abbildung 15:	Einfluss der GW-Fließgeschwindigkeit.....	18
Abbildung 16:	Einfluss der untersuchten Parameter in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit.....	19

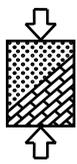


Abbildung 17:	links: Vereiste Baugrubenwand (Fa. Bögl) rechts: Vereiste Unterfangungswand (Fa. Orth GmbH).....	20
Abbildung 18:	Temperaturplot Wand für $v = 0,75$ m/d nach 1, 10, 20 und 40 Tagen.....	21
Abbildung 19:	Systeme mit veränderter Wandform.....	21
Abbildung 20:	Differenzierung verschiedener Wandsysteme.....	22
Abbildung 21:	Aufgefrierzeiten bei veränderter Wandform.....	22
Abbildung 22:	Systeme mit Verdichtung der Gefrierrohre in Wandmitte ohne Erhöhung der Anzahl.....	23
Abbildung 23:	Temperaturplot für System VD1 für $v = 1,00$ m/d nach 1, 10, 20 und 40 Tagen.....	23
Abbildung 24:	Aufgefrierzeiten bei Verdichtung der Gefrierrohre in Wandmitte ohne Erhöhung der Anzahl.....	24
Abbildung 25:	Systeme mit Vorkühlung durch zusätzliche Gefrierrohre.....	25
Abbildung 26:	Aufgefrierzeiten bei Vorkühlung durch zusätzliche Gefrierrohre.....	25
Abbildung 27:	Systeme mit zusätzlichen Rohren in Wandmitte	26
Abbildung 28:	Aufgefrierzeiten bei Anordnung zusätzlicher Rohre in Wandmitte..	26
Abbildung 29:	Vergleich zusätzliche Rohre und verringerter Rohrabstand	27
Abbildung 30:	Vergleich der Aufgefrierzeiten verschiedener Wandsysteme	28
Abbildung 31:	Allein durch Vereisung gesicherte Baugrube, Colorado – USA (Braun 1970)	29
Abbildung 32:	Temperaturplot für verschiedene Fließgeschwindigkeiten bei Frostkörperchluss	30
Abbildung 33:	Quadratische Systeme	30
Abbildung 34:	Aufgefrierzeiten für verschiedene quadratische Systeme	31
Abbildung 35:	Reduziertes Frostkörperwachstum im Inneren beim Quadrat	31
Abbildung 36:	Rechteckige Systeme „Hoch“ mit $H/B = 2,0$	32
Abbildung 37:	Rechteckige Systeme „Lang“ mit $H/B = 0,5$	32

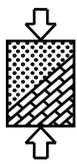


Abbildung 38:	Aufgefrierzeiten Rechteck „Hoch“	33
Abbildung 39:	Aufgefrierzeiten Rechteck „Lang“	33
Abbildung 40:	Reduziertes Frostkörperwachstum im Inneren beim Rechteck	34
Abbildung 41:	Elliptische Systeme „Hoch“	34
Abbildung 42:	Elliptische System „Lang“	35
Abbildung 43:	Aufgefrierzeiten Ellipse „Hoch“	35
Abbildung 44:	Aufgefrierzeiten Ellipse „Lang“	36
Abbildung 45:	Düseneffekte durch vorhandene Bebauung mit Untergeschossen.....	37
Abbildung 46:	Systemausschnitt Modell 1	38
Abbildung 47:	Gefrierrohranordnung und Temperaturplot zum Zeitpunkt des Frostkörperschlusses	38
Abbildung 48:	Systeme Modell 1	39
Abbildung 49:	Aufgefrierzeiten Modell1	40
Abbildung 50:	Systemausschnitt Modell2.....	40
Abbildung 51:	Aufgefrierzeiten Modell 2.....	41
Abbildung 52:	Systemausschnitt Modell 3.....	42
Abbildung 53:	Systeme Modell 3.....	42
Abbildung 54:	Aufgefrierzeiten Modell 3.....	43
Abbildung 55:	Aufgefrierzeiten Modell 4.....	43
Abbildung 56:	Entwurfsskizzen der Haltestelle.....	45
Abbildung 57:	Schnitt durch die Haltestelle mit Frostkörper	46
Abbildung 58:	Grundriss der Haltestelle	46
Abbildung 59:	Grundwassermessstellen im Bereich der Haltestelle	47
Abbildung 60:	Entnahmebrunnen und Pegel für Pumpversuch.....	48
Abbildung 61:	Strömungsmodell im Grundriss	49

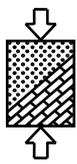
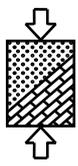


Abbildung 62:	Strömungsmodell im Schnitt.....	49
Abbildung 63:	Grundwasserfließgeschwindigkeit aus numerischer Berechnung auf Grundlage der Pegelstände	50
Abbildung 64:	Funktionsprinzip des GFV-Verfahrens	51
Abbildung 65:	Einsatz GFV-Verfahren	52
Abbildung 66:	Messwerte der Fließrichtung und der –geschwindigkeit mit dem GFV-Verfahren	53
Abbildung 67:	Messergebnis der Fließrichtung und der –geschwindigkeit mit dem GFV-Verfahren	53
Abbildung 68:	GFV-Messungen vor bzw. nach und während des Pumpversuchs.....	54
Abbildung 69:	Querschlagvereisung	55
Abbildung 70:	Gemessener und berechneter Temperaturverlauf am Querschlag 1	56
Abbildung 71:	Schnitt durch die Haltestelle und Modellausschnitt in SHEMAT	57
Abbildung 72:	Gemessener und berechnete Temperaturverläufe im Schnitt durch die Haltestelle	58
Abbildung 73:	Flusspegel.....	59
Abbildung 74:	Gemessener und für verschiedene Geschwindigkeiten ermittelte Temperaturverläufe	60
Abbildung 75:	Grobschicht	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Eingangsparameter entsprechend Hokksundsand	12
Tabelle 2:	Eingangsparameter Nachrechnung Haltestelle.....	56



Literaturverzeichnis

Anderson, D.M.; Tice, A.R. (1972): Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements; Highway Research Record, Vol. 373, pp. 12-18.

Baier, Ch. (2008): Thermisch-hydraulische Simulationen zur Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau unter Einfluss einer Grundwasserströmung. Dissertation, Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen.

Baier, Ch., Ziegler, M., Mottaghy D., Rath V. (2008): Numerische Simulation des Gefrierprozesses bei der Baugrundvereisung im durchströmten Untergrund; Bauingenieur 83, H. 2, S. 49-60.

Braun, B. (1970): Die bisher größte, allein durch Bodenvereisung gesicherte Baugrube. Werkzeitschrift "Unser Betrieb" Fa. Deilmann-Haniel GmbH, Dortmund.

Civan, F. (2000): Unfrozen water in freezing and thawing soils: Kinetics and Correlation, Journal of Cold Regions Engineering, Vol. 14, No. 3; pp. 146-156.

Clauser, C. (2003): Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers – SHEMAT and Processing SHEMAT, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Farouki, O.T. (1986): Thermal Properties of Soils. Trans Tech Publications, Series on Rock and Soil Mechanics, Vol. 11.

Frivik, P.E.; Comini, G. (1982): Seepage and Heat Flow in Soil Freezing, Journal of Heat Transfer, Transaction of the ASME, Vol. 104, p. 323-328.

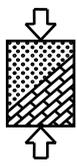
Frivik, P.E.; Thorbergsen, E. (1980): Thermal design of artificial ground freezing systems, Ground Freezing: Proceedings of the International Symposium on Ground Freezing, S. 189-201.

Jame, Y.W.; Norum, D.I. (1980): Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous medium, Water resources research, Vol. 16, No 4; pp. 811-819.

Jessberger, H.L. (1981): Mechanisches Verhalten von gefrorenem Boden. Taschenbuch für den Tunnelbau 1981, Verlag Glückauf GmbH, Essen, pp. 17-49.

Jessberger, H.L. (1990): Frost im Baugrund, Grundbau Taschenbuch, 4. Auflage, Teil 1; S. 513-550.

Jessberger, H.L.; Jagow-Klaff, R. (2001): Bodenvereisung, Grundbau Taschenbuch, 6. Auflage, Teil 2; S. 121-166.



Johansen, O.; Frivik, P.E. (1980): Thermal properties of soils and rock materials; Proceedings of the 2nd International Symposium on Ground Freezing, NTH, Trondheim, Norwegen.

Kersten, M.S. (1949): Thermal Properties of Soils, Bull. No 28, Institute of Technology, Experiment station; University of Minnesota, St. Paul, MN.

Kogler, K.; Perl, C.; Lösch, A. (2008): Besondere geotechnische Maßnahmen durch Bodenvereisung bei der Errichtung des Citytunnels unter dem Hauptbahnhof in Leipzig. Beiträge zum 23. Christian Veder Kolloquium Graz. Hrsg.: M. Dietzel; S. Kieffer; W. Schubert; H. F. Schweiger; S. Semprich, S. 145-154.

Koll, J. (2005): Bodenkundliche Grundlagen von Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten. Beitrag zum Fachgespräch „Rekultivierungs- / Wasserhaushaltsschichten als mögliches Sicherungselement für Deponien“, Landesumweltamt Sachsen-Anhalt.

Lundin, L.C. (1990): Hydraulic properties in an operational model of frozen soil; Journal of Hydrology, Vol. 118, pp. 289-310.

Makowski, E. (1986): Modellierung der künstlichen Bodenvereisung im grundwasserdurchströmten Untergrund mit der Methode der finiten Elemente, 1986, Schriftenreihe des Instituts für Grundbau, Wasserwesen und Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Serie Grundbau, Heft 10.

Max Bögl, Firmenprospekt „Bodengefriertechnik“

Mottaghy, D. (2007): Heat transfer processes in the upper crust: influence of structure, fluid flow, and palaeoclimate.

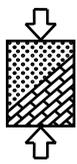
Müller, B.; Orth, W. (2005): Bodenvereisung unter schwierigen Bedingungen: Bahnsteigerweiterung beim U-Bahnhof Marienplatz München, STUVA Forschung und Praxis, 41, S. 111-115.

Nerseova, Z.A.; Tsytoich, V.A. (1963): Unfrozen water in frozen soils, Proc. Permafrost Int. Conf., NAS-NRC Publ., Vol. 1287, pp. 230-234.

Phrealog, Firmenprospekt „Grundwasser-Strömungsmessungen“

Pimentel, E.; Sres, A.; Anagnostou, G. (2007): 3-D Modellierung der Frostkörperbildung beim Gefrierverfahren unter Berücksichtigung einer Grundwasserströmung. Beiträge zum 22. Christian Veder Kolloquium Graz. Hrsg.: M. Dietzel, W. Schubert, H. F. Schweiger; S. Semprich., S. 161-176.

Sanger, F.J.; Sayles F.H. (1978): Thermal and Rheological computations for artificially frozen ground construction, International Symposium on Ground Freezing.



Schneider Bautabellen (2001): Bautabellen für Ingenieure, 14. Auflage, Werner Verlag.

Simmer, K. (1987): Grundbau, Teil 1, Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen. Verlag B. G. Teubner Stuttgart 1987.

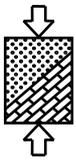
STADT BERLIN (1999): Digitaler Umweltatlas Berlin; Kapitel 02.14: Grundwassertemperatur.

Ständer, W. (1967): Mathematische Ansätze zur Berechnung der Frostausbreitung in ruhendem Grundwasser im Vergleich zu Modelluntersuchungen für verschiedene Gefrierrohranordnungen im Schacht- und Grundbau, Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 28.

Stoss, K. (1976): Die Anwendbarkeit der Bodenvereisung zur Sicherung und Abdichtung von Baugruben. Gesellschaft für Technik und Wirtschaft, Dortmund.

Watanabe, K; Mizoguchi, M. (2002): Amount of unfrozen water in frozen porous media saturated with solution,; Cold Regions Science and Technology, Vol. 34 .pp. 103-110.

Weiler, A.; Willert, L. (1978): Anwendung der Lückenvereisung im Stadtbahnbau bei Kiessandböden mit hohen Filtereigenschaften des Grundwassers. Vorträge der STUVA-Tagung '79 in München.



Anhang

Untersuchungsbericht zu den Grundwasserströmungsmessungen in den Grundwassermessstellen BK1, BK2, BK4, BK5 und BK6 am Standort einer U-Bahn Haltestelle

im Rahmen des Forschungsprojekts
"Erweiterung des Vereisungsverfahrens zur umweltverträglichen Herstellung
komplizierter Untergeschosskonstruktionen bei strömendem Grundwasser"
(BMBF Az: Z6-10.08.18.7-07.31)

Durchführungszeitraum der Messungen: 01.-02.07.2008 und 09.-11.07.2008

INHALTSVERZEICHNIS

1. Veranlassung.....	1
2. GFV-Messungen	2
2.1. Einleitung.....	2
2.2. Messergebnisse	3
2.2.1. Messstelle BK1 und BK 2	3
2.2.2. Messstelle BK4.....	4
2.2.3. Messstelle BK5.....	4
2.2.4. Messstelle BK6.....	4
3. Fazit.....	4

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Messergebnisse – GFV-Messungen

Tabelle 2: Ausbaudaten und resultierende Korrekturfaktoren

ANLAGENVERZEICHNIS

Anlage 1: Lageplan mit Darstellung der ermittelten Fließrichtungen

Anlage 2: Darstellung der Messpositionen und Untersuchungsergebnisse am Bohrprofil

Anlage 3: Diagrammdarstellungen der Messungen

Anlage 4: Erläuterungen zu den GFV-Messungen: Messverfahren/Durchführung/Auswertung

1. Veranlassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden in den Grundwassermessstellen BK1, BK2, BK4, BK5 und BK6 am Standort einer U-Bahn Haltestelle Ein-Bohrloch-Messungen zur direkten Bestimmung der lokalen Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit mit dem GFV-Messverfahren durchgeführt.

Ziel der GFV-Messungen ist es, eine realitätsnahe Erfassung von Grundwasser-Fließparametern für den Bereich der Aufgefrierzone um die Tunnelbauwerke zu erhalten. Die gewonnenen Ergebnisse sollen konventionellen Fließmodellberechnungen gegenüber gestellt werden. Ziel ist es, zu prüfen, in wieweit Ein-Bohrloch-Messungen bei zukünftigen Bauvorhaben als begleitende Maß-

nahme zu Erfassung von Fließbewegungen genutzt, und zur Stützung und Ergänzung von Modellberechnungen herangezogen werden können. Letztendliches Ziel ist es, mit den gewonnenen Erkenntnissen eine Prozessoptimierung der Vereisung herbeizuführen und verlässliche Hinweise zur Schließung des Vereisungskörpers durch Unterbindung der Grundwasserpassage zu erhalten.

GFV-Messungen erfolgten im Zeitraum 01.-02.07.2008 in den Messstellen BK4, BK5 und BK6 sowie vom 09.-11.07.2008 in den Messstellen BK1 und BK2. Die GFV-Messungen in den Messstellen BK1 und BK2 erfolgten während und nach einem Pumpversuch jeweils in den selben Tiefenpositionen. Alle Messtiefenvorgaben erfolgten durch die Projektleitung der RWTH Aachen. Die Messtiefen wurden im Hinblick auf die Durchlässigkeitsverteilung entsprechende der Bohrprofilaufnahme, der Tiefenlage der Bauwerke und der geplanten Vereisungszonen ausgewählt.

2. GFV-Messungen

2.1. Einleitung

Bei den GFV-Messungen handelt es sich um sogenannte Ein-Bohrloch-Messungen, bei denen der horizontale Durchfluss durch das Filterrohr in diskreten Tiefenpositionen einer Grundwassermessstelle ermittelt wird. Die so gemessene Fließrichtung und Geschwindigkeit korrespondiert mit der Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit im umgebenden Aquifer. Da es sich um Punktmessungen handelt ist es erforderlich, mehrfache Messungen im Profil der den Aquifer erschließenden Grundwassermessstelle durchzuführen. Mehrfache Messungen dienen dazu, die Ergebnisse abzusichern und den im Aquifer und Messstellenausbau auftretenden, auf die Fließbewegung einflussnehmenden Heterogenitäten Rechnung zu tragen. Nur so können Ergebnisse gewonnen werden, welche die Fließsituation im umgebenden Aquifer realitätsnah widerspiegeln und auch wichtige Detailinformationen zur Fließdynamik liefern.

Erfahrungsgemäß treten von Messtiefe zu Messtiefe Abweichungen der Fließrichtungs- und Geschwindigkeitsergebnisse auf, die im Wesentlichen auf Heterogenitäten des Messstellenausbaus und der umliegenden anstehenden Formation zurückzuführen sind. Als Heterogenitäten des Messstellenausbaus können beispielsweise unterschiedliche Lagerungsdichten der Filterkiesschüttung, randliche Lage des Filterrohrs in der Bohrung, Kolmationen im Filterkies, ungleichförmiger Verlauf des Bohrdurchmessers genannt werden. Als Heterogenitäten im Porengrundwasserleiter können wechselnde Lagerungsdichten und Korngrößenverteilungen, lokal auskeilende Sedimentpartien und unmittelbar anstehende größere Gerölle und Steine genannt werden. Je nach Abweichung der Ergebnisse im Messtiefenprofil ist eine Erhöhung der Messtiefenanzahl erforderlich, um die Fließsituation zuverlässig einschätzen zu können. Erst die Messwertaufnahmen über mehrere Tiefen spiegeln ein möglichst realitätsnahes Bild der lokalen Fließbewegung im erschlossenen Aquiferprofil wider. Zur Beweissicherung sollten die gewonnenen Ergebnisse mit konventionell erhobenen Daten abgeglichen werden.

Die Fließbewegung in einem Porengrundwasserleiter erfolgt meistens in einem Netzwerk von gut und weniger gut durchlässigen Partien, deren Lagerung und Verzahnung durch die Architektur der Hydrofazies vorgegeben ist und durch die Korngrößenverteilungen und Lagerungsdichte bestimmt wird. Die Hydrofazies kann sich in kleinräumigem Maßstab zwischen mehreren Bohranzatzpunkten ändern, woraus örtliche Abweichungen der Fließgeschwindigkeiten und Richtungen resultieren.

Durch die Verzahnung und das Auskeilen von Partien unterschiedlicher Durchlässigkeiten und Lagerungsdichten sind die im Aquifer auftretenden Fließbewegungen nicht zwangsläufig an einen Wechsel der Korngrößenverteilung gebunden. Wenn im Rahmen eines Pumpversuchs künstlich eine Senke erzeugt wird, wird das Netzwerk gut durchlässiger Partien aktiviert und das Grundwasser vorzugsweise entlag dieser Bereiche zur Senke hin abgeführt. Die Komplexität der Grundwasserbewegung kann sich somit erhöhen.

2.2. Messergebnisse

Insgesamt wurden in den fünf Messstellen 41 tiefenorientierte Messungen mit einer Gesamtdauer von 40 Stunden durchgeführt. Die Ergebnisse der Richtungen über alle Messtiefen der Messstellen stützen sich auf die vektorielle Auswertung aller über das Vertikalprofil gewonnenen gültigen Messdaten. Alle Messergebnisse sind in **Tabelle 1** sowie den **Anlagen 1, 2 und 3** dargestellt. Erläuterungen zur Datenauswertung und -darstellung befinden sich in **Anlage 4**.

2.2.1. Messstelle BK1 und BK 2

In den Messstellen BK1 und BK2 wurden GFV-Messungen während und nach dem Pumpversuch jeweils in denselben Tiefenpositionen durchgeführt. Die Ruhemessungen erfolgten im Anschluss an den Pumpversuch. Ruhe-Messungen wurden in der Messstelle BK1 ca. 3 Stunden nach Beendigung des Pumpversuchs und der Wiederherstellung der ursprünglichen GW-Spiegelhöhen durchgeführt. In der Messstelle BK2 erfolgten die Ruhemessungen ca. 12 Stunden nach Beendigung des Pumpversuchs.

2.2.1.1. Messstelle BK1

In der Messstelle BK1 wurden Messungen in vier Messtiefen während und nach dem Pumpversuch in BK3 durchgeführt.

Die während des Pumpversuchs durchgeführten Messungen weisen eine hohe Streuung der Fließrichtung und -geschwindigkeit auf. Die generelle Fließrichtung als Summe aller gültigen Messwerte über alle Messtiefen beträgt 297° und ist somit nach **W** und in Richtung des Grundwasserförderer in BK3 gerichtet. Als Summe über alle Messtiefen kann eine mittlere Filtergeschwindigkeit v_f von $7,2 \times 10^{-7}$, entsprechend $0,06\text{m/Tag}$ angegeben werden.

Die nach dem Pumpversuch und in Ruhe durchgeführten, tiefenorientierten Messungen weisen im Vergleich zu denen des während des Pumpversuchs durchgeführten Messungen stabilere Durchflussverhältnisse und eindeutig miteinander korrespondierende Ergebnisse auf. Die generelle Fließrichtung als Summe aller gültigen Messwerte über alle Messtiefen beträgt 106° und ist somit nach **E** korrespondierend zum natürlichen Grundwasserabfluss gerichtet. Als Summe über alle Messtiefen kann eine mittlere Filtergeschwindigkeit v_f von $1,5 \times 10^{-5}$, entsprechend $1,29\text{m/Tag}$ angegeben werden.

Die im Messtiefenprofil ermittelten Fließgeschwindigkeiten weichen jeweils deutlich voneinander ab. Die höchsten Fließgeschwindigkeiten wurden in der Ruhephase ermittelt, die geringsten während des Pumpversuchs.

2.2.1.2. Messstelle BK2

In der Messstelle BK2 wurden Messungen in acht Messtiefen während und nach dem Pumpversuch in BK3 durchgeführt.

Die während des Pumpversuchs durchgeführten Messungen weisen eine hohe Streuung der Fließrichtung und -geschwindigkeit auf. Die generelle Fließrichtung als Summe aller gültigen Messwerte über alle Messtiefen beträgt 47° und ist somit nach **NE** und nicht in Richtung West, zur Grundwasserförderung in BK3 gerichtet. Als Summe über alle Messtiefen kann eine mittlere Filtergeschwindigkeit v_f von $2,3 \times 10^{-5}$, entsprechend $2,00\text{m/Tag}$ angegeben werden.

Die nach dem Pumpversuch und in Ruhe durchgeführten, tiefenorientierten Messungen weisen im Vergleich zu denen des während des Pumpversuchs durchgeführten Messungen stabilere Durchflussverhältnisse, aber auch deutlich voneinander abweichende Ergebnisse auf, was auf eine differenzierte Fließverteilung in erschlossenen Aquiferprofil schließen lässt. Die generelle Fließrichtung als Summe aller gültigen Messwerte über alle Messtiefen beträgt 99° und ist somit nach **E** korrespondierend zum natürlichen Grundwasserabfluss gerichtet. Als Summe über alle Messtiefen kann eine mittlere Filtergeschwindigkeit v_f von $2,0 \times 10^{-6}$, entsprechend $0,17\text{m/Tag}$ angegeben werden.

Die im Messtiefenprofil ermittelten Fließgeschwindigkeiten weichen jeweils deutlich korrespondierend um ca. Faktor 10 voneinander ab. Die höchsten Fließgeschwindigkeiten wurden während des Pumpversuchs, und die geringsten Fließgeschwindigkeiten in der Ruhephase ermittelt.

2.2.2. Messstelle BK4

In der Messstelle BK4 konnten aufgrund der Filterrohrstreckenlänge und Baulänge der eingesetzten Messsonde Messungen nur in drei Messtiefen ($27,7$; $28,0$ und $28,4\text{m u.POK}$) durchgeführt werden. Nach einer jeweils ca. 30-minütigen Stabilisierung der hydraulischen Situation konnten in allen drei Messtiefen eindeutige und miteinander korrespondierende Ergebnisse gewonnen werden. Zur Validierung der Ergebnisse wurden die Messungen über einen Zeitraum von $90-115\text{min}$ durchgeführt.

Die generelle Fließrichtung als Summe aller gültigen Messvektoren über alle Messtiefen beträgt 43° und ist somit nach **NE** korrespondierend zum natürlichen Grundwasserabfluss gerichtet. Die geringste Filtergeschwindigkeit wurde in der Messtiefe $28,0\text{m u.POK}$ mit $v_f=0,11\text{m/d}$ angetroffen, die mit $v_f=0,20\text{m/d}$ höchste Filtergeschwindigkeit bei $27,7\text{m u.POK}$. Mit guter Näherung kann als Summe über alle Messtiefen eine mittlere Filtergeschwindigkeit v_f von $1,7 \times 10^{-6}$, entsprechend $0,15\text{m/Tag}$ angegeben werden.

2.2.3. Messstelle BK5

In der Messstelle BK5 wurden Messungen in acht Messtiefen durchgeführt. In zwei Messtiefen ($20,8$ und $19,7\text{m u.POK}$) wurden synchron Langzeitmessungen mit ca. 8 Stunden Messdauer durchgeführt.

Im Profil der Messtiefen zeigen sich deutlich uneinheitliche Fließrichtungen und -geschwindigkeiten. Die Messtiefen, in denen die vergleichsweise höheren Fließgeschwindigkeiten ermittelt wurden, zeigen nach **W** und **N** orientierte Fließrichtungen auf. Die Filtergeschwindigkeiten v_f liegen im Messtiefenprofil zwischen ca. 2×10^{-7} bis $1 \times 10^{-5}\text{m/s}$.

Die am $02.07.08$ zwischen $23:30-7:30\text{Uhr}$ durchgeführten Langzeitmessungen belegen sehr geringe Fließgeschwindigkeiten und im Zeitverlauf wechselnde Fließrichtungen. Während sich in der Messtiefe $20,8\text{m}$ gegenüber der Messtiefe $19,7\text{m u.POK}$ vergleichsweise höhere Fließgeschwindigkeiten mit Fließrichtung nach **NNE** zeigen, belegt der Messverlauf in der Messtiefe $19,7\text{m u.POK}$ eine geringere und instationäre Fließbewegung und umlaufende Fließrichtungen. Insgesamt kann bei der Messstelle BK5 keine einheitliche Fließrichtung angegeben werden. Die resultierenden Fließgeschwindigkeiten korrespondieren jedoch mit denen der Messstelle BK6.

2.2.4. Messstelle BK6

In der Messstelle BK6 wurden Messungen in sechs Messtiefen durchgeführt. In allen Messtiefen konnten eindeutige Ergebnisse gewonnen werden. Zur Validierung der Ergebnisse wurden die Messungen über einen Zeitraum von ca. 100min durchgeführt.

Die generelle Fließrichtung als Summe aller gültigen Messwerte über alle Messtiefen beträgt 75° und ist somit nach **ENE** gerichtet. Die bei $22,8\text{m}$ angetroffene, geringe Fließgeschwindigkeit korrespondiert mit der lithologischen Aufnahmen insofern, dass in dieser Tiefenlage ein vergleichsweise gering durchlässiger Bereich vorliegt. Die geringste Filtergeschwindigkeit wurde in der Messtiefe $22,8\text{m u.POK}$ mit $v_f=0,03\text{m/d}$ angetroffen, die mit $v_f=0,18\text{m/d}$ höchste Filtergeschwindigkeit bei $20,4\text{m u.POK}$. Mit guter Näherung kann als Summe über alle Messtiefen eine mittlere Filtergeschwindigkeit v_f von $1,4 \times 10^{-6}$, entsprechend $0,12\text{m/Tag}$ angegeben werden.

3. Fazit

Nach den vorgenannten Ausführungen ist festzuhalten, dass in allen untersuchten Grundwasser-messstellen horizontale Durchflußmessungen in jeweils 3-8 Messtiefen erfolgreich durchgeführt wurden. In allen Messstellen konnten verlässliche Daten zur Fließrichtung und -geschwindigkeit erhoben werden. Lediglich die Ergebnisse zur Fließrichtung in der Messstelle **BK2** während des Pumpversuchs können nicht abschließend erklärt werden.

In den Messstellen **BK1** und **BK2** ist im Ruhezustand jeweils eine mittlere Fließrichtung nach **E** belegt. In der Messstelle **BK1** zeigt sich während des Pumpversuchs gegenüber den Messungen im Ruhezustand eine deutlich instabilere Fließsituation in den einzelnen Messtiefen. Über alle Messtiefen errechnet sich eine generelle Fließrichtung nach **W** auf den Förderbrunnen **BK3** zu, jedoch

liegen die Fließgeschwindigkeiten deutlich unterhalb der im Ruhezustand ermittelten Fließgeschwindigkeiten: in den Messtiefen 29,4m und 30,5m um bis zu zwei Größenordnungen. Die in allen Messtiefen beobachteten, anhaltend wechselhaften Fließrichtungen und -geschwindigkeiten belegen, das die Messstelle **BK1** im Grenzbereich der Einflusnahme durch die Fördermaßnahme liegt. In **BK1** wurde im Ruhezustand von allen Messstellen die höchste Filtergeschwindigkeit mit $v_f=4 \times 10^{-5}$ m/s ermittelt. Die hohe Fließgeschwindigkeit kann mit der Nähe zum Vorfluter Rhein und der größeren Entfernung zu den Grundwasser aufstauenden Tertiärgruben in Zusammenhang gebracht werden.

Im Messtiefenprofil von **BK2** treten während des Pumpversuchs unterschiedliche, in der Regel jedoch nach E orientierte Fließrichtungen auf, obwohl aufgrund der unmittelbaren Nähe zu Entnahmehrunnen **BK3** die Fließrichtung nach W gerichtet sein müssten. Als Ursache dafür kann folgendes angeführt werden:

1. Im Rahmen des Pumpversuchs war zum Zeitpunkt der Messungen noch kein hydraulischer Beharrungszustand erreicht
2. Die unmittelbare Nähe zum Förderbrunnen **BK3** bedingt eine örtlich komplexe Zuflusssituation (auch bedingt durch die Position der Förderpumpe und der Zuflussverteilung im Profil der Förderbrunnens), die durch die Messwertaufnahme in **BK2** unzureichend erfasst wird und daher nicht näher definiert und abschließend bewertet werden kann.

Signifikant ist jedoch ein klar voneinander abgegrenztes Fließgeschwindigkeitsprofil in der Abfolge der acht Messtiefen. Die während des Pumpversuchs ermittelten Fließgeschwindigkeiten liegen gegenüber den in Ruhe gemessenen Geschwindigkeiten in allen Messtiefen um eine Größenordnung höher.

Im Bereich der „Düse“ zwischen der nördlichen und südlichen Tertiärgrube resultiert aus den Messergebnissen der **BK6** und **BK4** eine Fließrichtung nach NE bis ENE. Auch zeigen sich hier gut miteinander korrespondierende Fließgeschwindigkeiten. In der **BK6** wurde mit 0,27m/Tag die höchste und in der Messstelle **BK5** mit 0,07m/Tag die geringste mittlere Filtergeschwindigkeit v_f ermittelt.

In der Messstelle **BK5** zeigen sich insgesamt uneinheitliche Ergebnisse im Messtiefenprofil. Die Fließrichtungen streuen über die gesamte Richtungsrose, eine Fließrichtungstendenz ist nicht erkennbar. Rechnerisch ergibt sich eine Fließrichtung nach WNW. Im Vergleich zu den mittleren Filtergeschwindigkeiten der Messstellen **BK6** ($v_f=0,12$ m/Tag) und **BK4** ($v_f=0,16$ m/Tag) wurde mit $v_f=0,07$ m/Tag hier die geringste mittlere Filtergeschwindigkeit ermittelt. Die vergleichsweise geringen Fließgeschwindigkeiten und die uneinheitlichen Fließrichtungen könnten mit einem Grundwasser-Rückstau vor der nördlichen Tertiärgrube erklärt werden, da diese Barriere den natürlichen, nach NE gerichteten Grundwasserabfluß verhindert.

Mainz, im August 2008

Diplom-Geologe Dr. Marc Schöttler

Projekt: Forschungsvorhaben Vereisung
Projektnr.: BMBF Az: Z6-10.08.18.7-07.31
GFV-Messungen von 01.07.- 02.07. und 09.07.-11.07.2008
Hier: Vorläufige Ergebnisse der GFV-Messungen

Tabelle 1. Messergebnisse

Messstelle	Messtiefe [m u.POK]	Messdauer [min.]	mittlere Fließricht.[°]	Betrag vH (m/s)	Güte * [α+γ]	Korrektur [α+γ]	mittlere v _f (m/s)	mittlere v _f (m/d)
BK1-Pump	29,40	92	61	3,20E-06	0,25	9,45	3,4E-07	0,03
	30,50	92	197	1,60E-06	0,25	9,45	1,7E-07	0,01
	31,50	125	288	4,30E-06	0,5	9,45	4,6E-07	0,04
	32,60	125	299	1,70E-05	0,25	8,91	1,9E-06	0,16
Summe		03:37		6,5E-06	0,31		7,2E-07	0,06
BK1-Ruhe	29,40	75	106	3,70E-04	0,75	9,45	3,9E-05	3,38
	30,50	75	111	1,60E-04	0,5	9,45	1,7E-05	1,46
	31,50	85	73	1,40E-05	0,75	9,45	1,5E-06	0,13
	32,60	85	101	1,90E-05	0,75	8,91	2,1E-06	0,18
Summe		02:40		1,41E-04	0,69		1,5E-05	1,29
BK2-Pump	22,60	75	218	5,30E-05	0,5	9,99	5,3E-06	0,46
	23,70	75	41	7,20E-04	1	9,99	7,2E-05	6,23
	24,50	91	242	9,00E-05	0	9,99	9,0E-06	0,78
	25,60	91	265	4,10E-04	0,75	10,94	3,7E-05	3,24
	28,80	90	121	1,90E-04	1	10,62	1,8E-05	1,55
	29,90	90	113	1,20E-04	1	9,45	1,3E-05	1,10
	31,70	98	33	1,60E-04	0,25	9,45	1,7E-05	1,46
	32,80	98	39	1,30E-04	1	9,45	1,4E-05	1,19
Summe		05:54		2,3E-04	0,69		2,3E-05	2,00
BK2-Ruhe	22,60	81	49	6,50E-06	1	9,99	6,5E-07	0,06
	23,70	81	166	1,50E-05	1	9,99	1,5E-06	0,13
	24,50	90	169	1,40E-05	0,75	9,99	1,4E-06	0,12
	25,60	90	146	3,80E-05	1	10,94	3,5E-06	0,30
	28,80	90	314	9,60E-06	0,25	10,62	9,0E-07	0,08
	29,90	90	42	4,40E-05	1	9,45	4,7E-06	0,40
	31,70	91	180	1,70E-05	0,5	9,45	1,8E-06	0,16
	32,80	91	15	1,60E-05	1	9,45	1,7E-06	0,15
Summe		05:52		2,0E-05	0,81		2,0E-06	0,17
BK4	27,75	75	13	2,20E-05	0,75	9,45	2,3E-06	0,20
	28,05	105	58	1,20E-05	0,75	9,45	1,3E-06	0,11
	28,45	90	104	1,40E-05	0,5	9,45	1,5E-06	0,13
Summe		04:30		1,6E-05	0,67		1,7E-06	0,15
BK5	17,00	80	135	5,40E-06	0,5	10,71	5,0E-07	0,04
	17,50	80	26	1,10E-05	0,75	10,71	1,0E-06	0,09
	18,10	80	249	1,30E-05	1	10,71	1,2E-06	0,10
	18,60	80	217	1,30E-05	0,5	10,71	1,2E-06	0,10
	19,70	465	184	1,50E-06	0,25	10,31	1,5E-07	0,01
	20,80	465	21	2,60E-06	0,75	9,99	2,6E-07	0,02
	23,60	135	229	1,70E-06	0,25	10,31	1,6E-07	0,01
	24,70	135	304	1,90E-05	0,75	10,62	1,8E-06	0,15
Summe		12:40		8,4E-06	0,59		7,9E-07	0,07
BK6	15,70	101	143	2,00E-05	0,75	10,76	1,9E-06	0,16
	16,80	101	40	1,60E-05	0,25	10,62	1,5E-06	0,13
	19,30	80	89	1,40E-05	0,75	8,28	1,7E-06	0,15
	20,40	80	333	2,20E-05	0,75	10,62	2,1E-06	0,18
	21,70	95	82	1,10E-05	0,5	10,62	1,0E-06	0,09
	22,80	95	134	4,10E-06	0,75	10,85	3,8E-07	0,03
Summe		04:36		1,5E-05	0,63		1,4E-06	0,12

* Güte der Messung (Erläuterung siehe Anhang)

Tabelle 2. Ermittlung der Korrekturfaktoren

Messsstelle	DN [mm]	Filterschlitzweite [mm]*	Filterkies [mm]**	Bohrung [mm]**	Messtiefen [m u. POK]	Lithologie	mittlerer kf [m/s] ****	α -Faktor	γ -Faktor	Korrektur [$\alpha \cdot \gamma$]
BK1	125	1	2 - 3,2	220	29,4/30,6/ 31,9 32,6	G,s'	5,0E-03	2,10	4,5	9,45
						G	7,0E-03	1,98	4,5	8,91
BK2	125	1	2 - 3,2	220	22,6/ 23,7/ 24,5 25,6 28,8 29,9/ 31,7/ 32,8	G,s,x	3,0E-03	2,22	4,5	9,99
						S,fg+,u'	1,0E-04	2,43	4,5	10,94
						G,s+	1,0E-03	2,36	4,5	10,62
						G,s'	5,0E-03	2,10	4,5	9,45
BK4	125	1	2 - 3,2	220	alle	G	5,0E-03	2,10	4,5	9,45
BK5	125	1	2 - 3,2	220	17,0/ 17,5/ 18,1/ 18,6 19,7 20,8 23,6 24,7	G,s+,u'	7,0E-04	2,38	4,5	10,71
						G,x+,s'	2,0E-03	2,29	4,5	10,31
						G,x,s'	3,0E-03	2,22	4,5	9,99
						G,gs	2,0E-03	2,29	4,5	10,31
						G,s'	1,0E-03	2,36	4,5	10,62
BK6	125	0,5	2 - 3,2	220	15,7 16,8/ 20,4/ 21,7 19,3 22,8	S,g,x'	6,0E-04	2,39	4,5	10,76
						G,s'	1,0E-03	2,36	4,5	10,62
						X,g+	1,0E-02	1,84	4,5	8,28
						gS,ms,g'	3,0E-04	2,41	4,5	10,85

* keine Angaben im Bohrprofil, per Kamerabefahrung ermittelt

** BK1, BK2,BK4: keine Angaben im Bohrprofil, Annahme nach Angaben BK5 und BK6

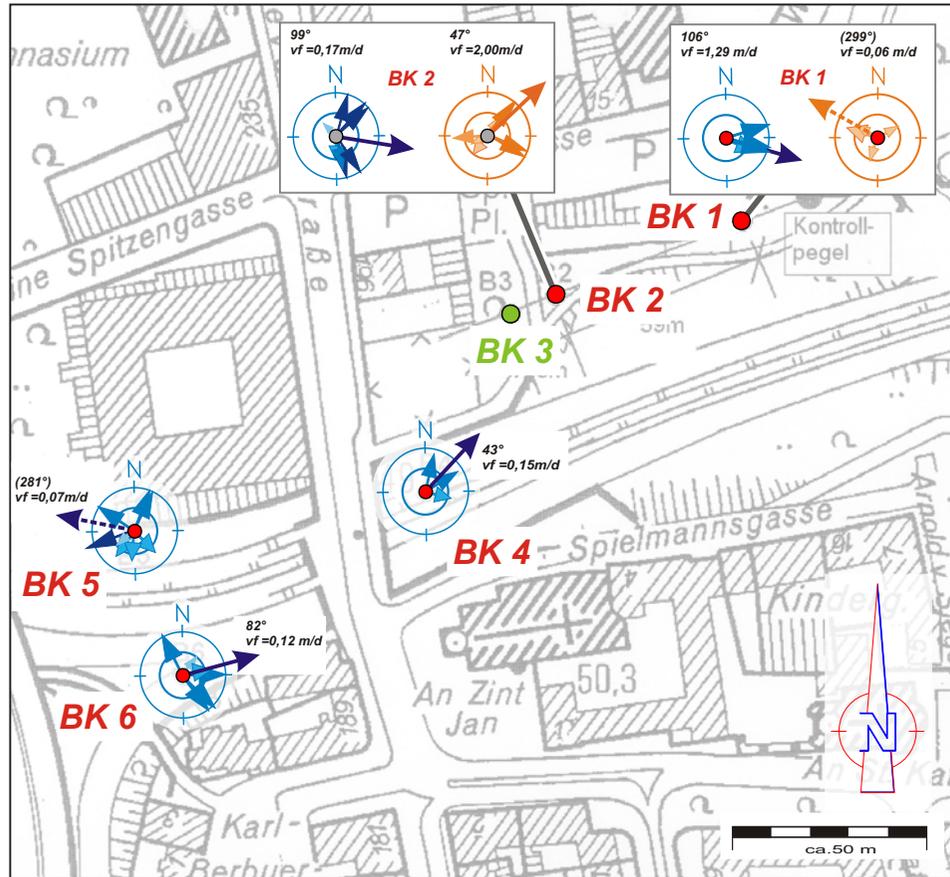
*** BK1, BK2, BK4 und BK5: keine Angaben im Bohrprofil, Annahme von Bohrdurchmesser nach Bohrprofil BK6

**** geschätzt nach HÖLTING (1990)

ANLAGEN

- **Anlage 1:** Lageplan mit Darstellung der ermittelten Fließrichtungen
- **Anlage 2:** Darstellung der Messpositionen und -ergebnisse im Profil der Messstelle
- **Anlage 3:** Zeitreihen-Diagramme der Messungen
- **Anlage 4:** Fotodokumentation der Filterrohre
- **Anlage 5:** Beschreibung der GFV-Messungen: Messverfahren, Durchführung und Auswertung

Lageplan und Darstellung der ermittelten Fließrichtungen



Quelle Kartengrundlage: RWTH Aachen, Inst. für Geotechnik

LEGENDE:

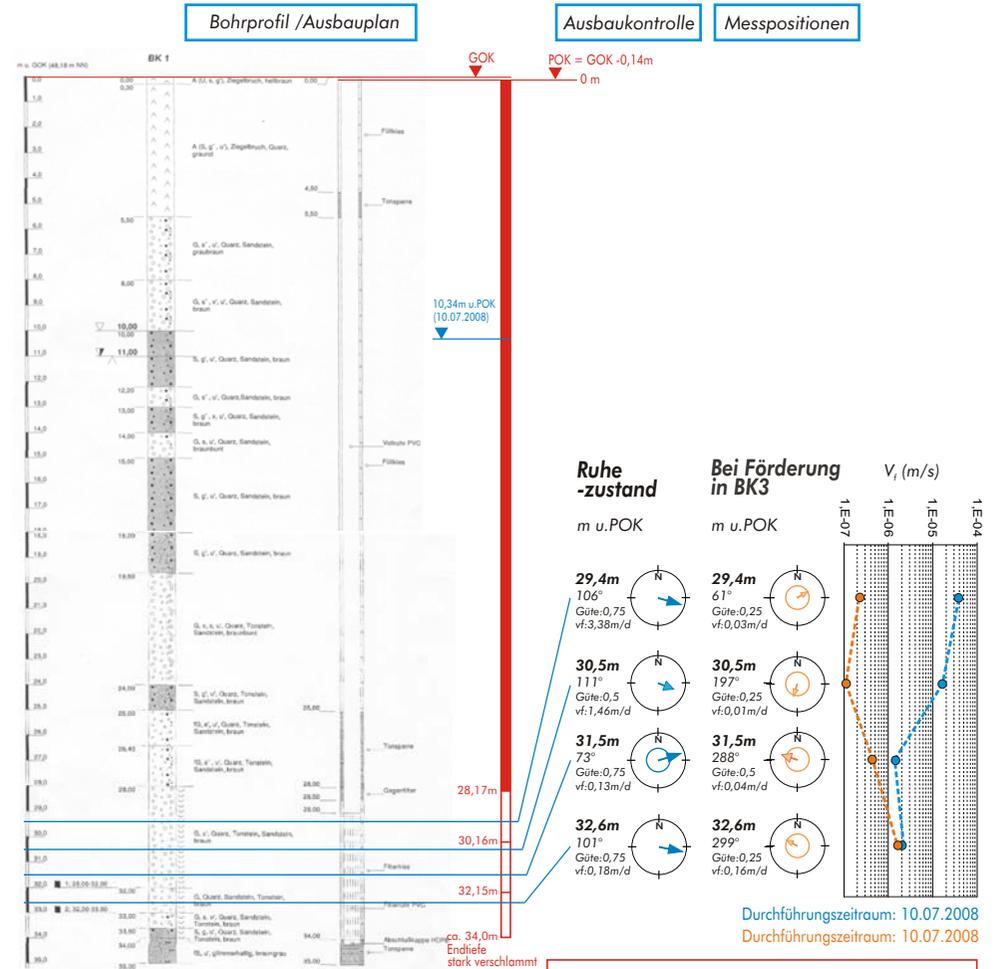
- Fließrichtung als Summe aller gültigen Vektorbeträge über alle Messstiefen
- Gemittelte Fließrichtungstendenz über alle Messstiefen
- Gemittelte Fließrichtung pro Messstiefe (Güte-gewichtet. Erläuterung in Anlage 5)
- wechselnde/drehende Fließrichtung im Messverlauf
- Lage der GW-Messstelle
- Lage des Förderbrunnens BK3

Blau: in Ruhe/ Orange: bei Förderbetrieb in BK3

Durchführungszeitraum der Messungen:
 02.-03.07.2008 (BK4, BK5, BK6) und
 09.-10.07.2008 (BK1, BK2)

Anlage 1

Messstelle BK1 Ausbaugrenze, Messpositionen und Untersuchungsergebnisse



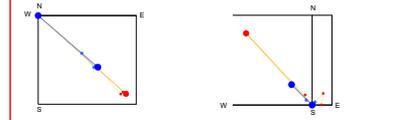
Quelle Ausbauplan: CDM Consult GmbH, 44793 Bochum

Darstellung der Ausbaugrenze und Höhe der Messpositionen im Vertikalmaßstab an Ausbauplan angepasst.

Legende und Erläuterungen zu den Darstellungen siehe Text im Anhang

Bestimmung der Fließrichtung über alle Messstiefen (Summe aller Richtungsvektoren)

Ruhezustand Bei Förderung in BK3



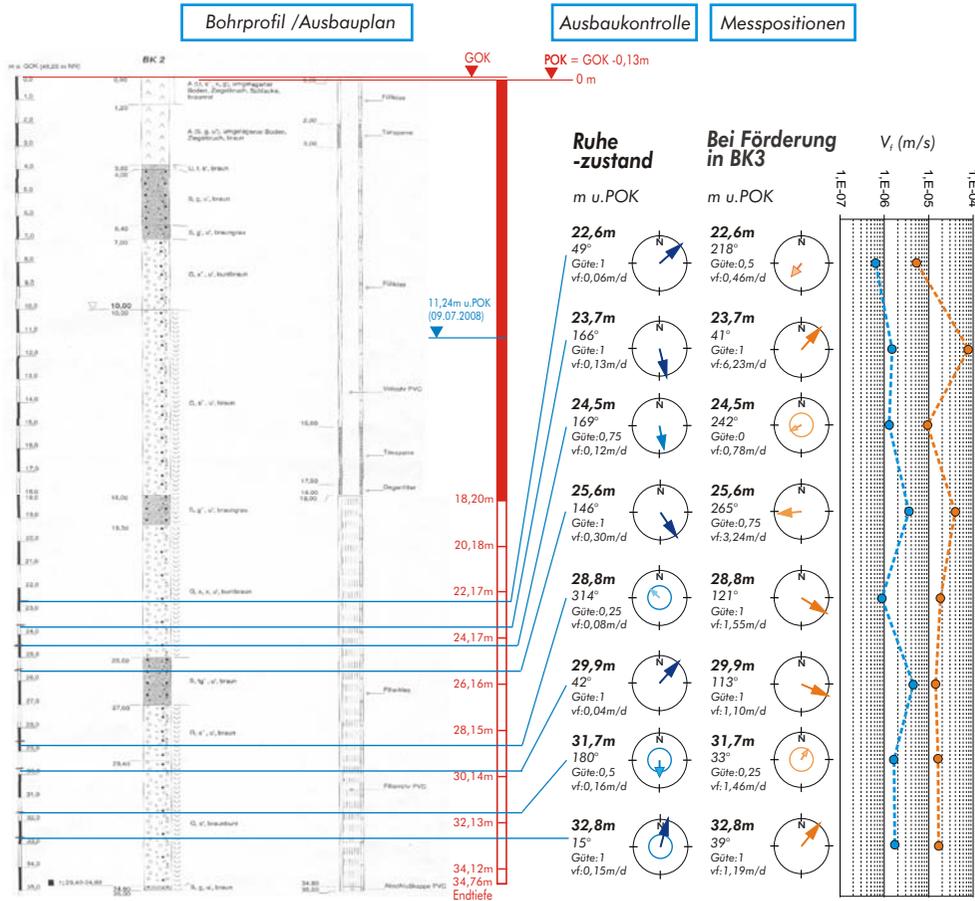
• Betrag v_{Σ} : 106°
 • Betrag v_{Σ} + Güte: 106°

• Betrag v_{Σ} : 299°
 • Betrag v_{Σ} + Güte: 297°

Durchführungszeitraum: 10.07.2008
 Durchführungszeitraum: 10.07.2008

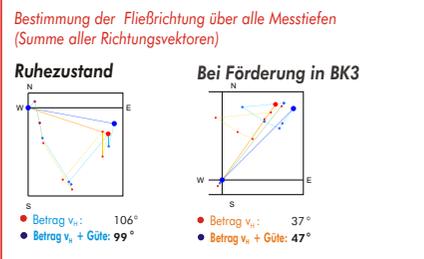
Anlage 2

Messstelle BK2
 Ausbaukontrolle, Messpositionen und Untersuchungsergebnisse



Quelle Ausbauplan: CDM Consult GmbH, 44793 Bochum

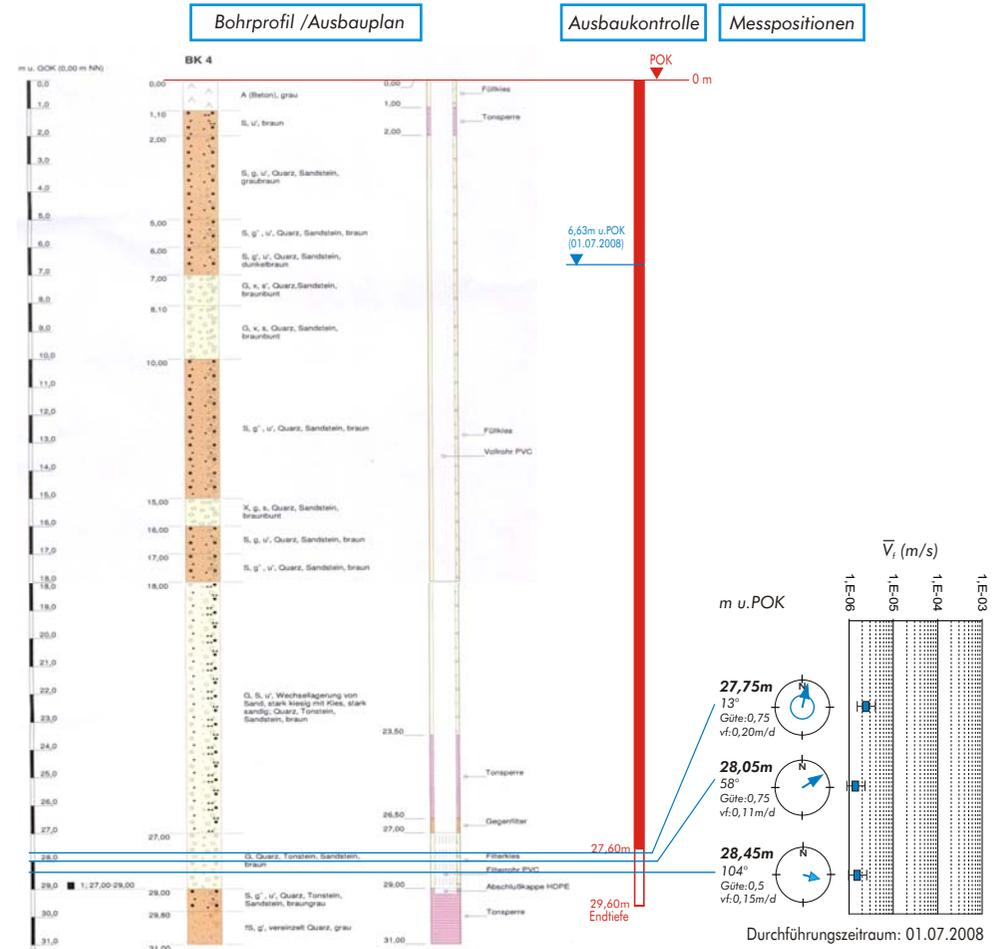
Durchführungszeitraum: 11.07.2008
 Durchführungszeitraum: 09.07.2008



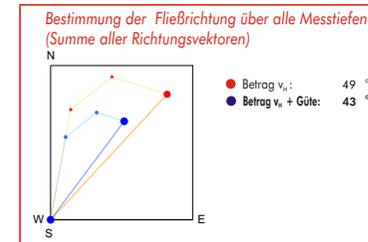
Darstellung der Ausbaukontrolle und Höhe der Messpositionen im Vertikalmaßstab an Ausbauplan angepasst.

Legende und Erläuterungen zu den Darstellungen siehe Text im Anhang

Messstelle BK4
 Ausbaukontrolle, Messpositionen und Untersuchungsergebnisse



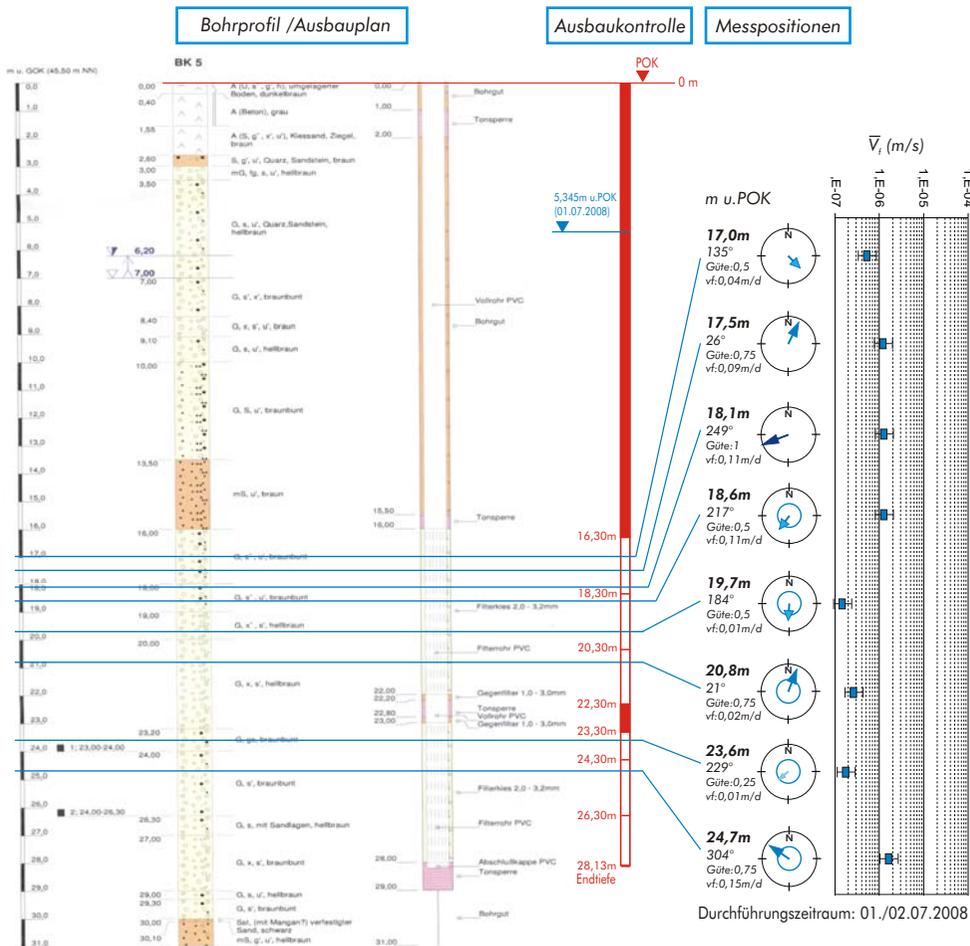
Quelle Ausbauplan: CDM Consult GmbH, 44793 Bochum



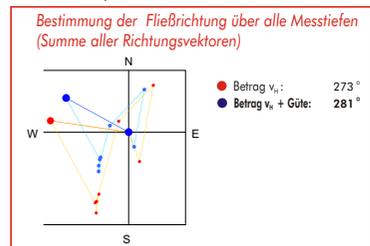
Darstellung der Ausbaukontrolle und Höhe der Messpositionen im Vertikalmaßstab an Ausbauplan angepasst.

Legende und Erläuterungen zu den Darstellungen siehe Text im Anhang

Messstelle BK 5
 Ausbaukontrolle, Messpositionen und Untersuchungsergebnisse



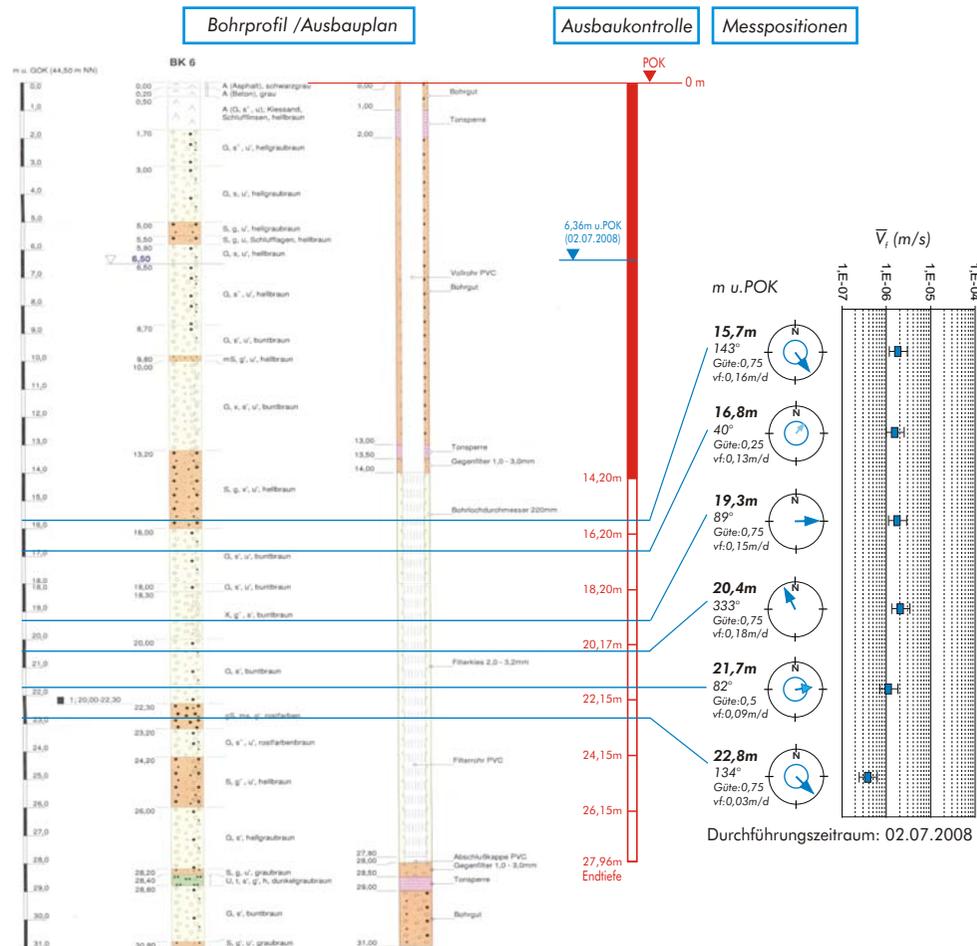
Quelle Ausbauplan: CDM Consult GmbH, 44793 Bochum



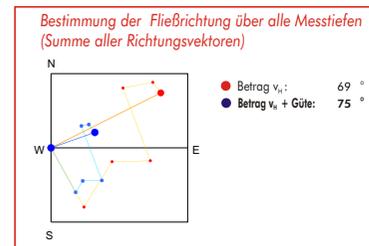
Darstellung der **Ausbaukontrolle** und Höhe der **Messpositionen** im Vertikalmaßstab an **Ausbauplan** angepasst.

Legende und Erläuterungen zu den Darstellungen siehe Text im Anhang

Messstelle BK 6
 Ausbaukontrolle, Messpositionen und Untersuchungsergebnisse



Quelle Ausbauplan: CDM Consult GmbH, 44793 Bochum



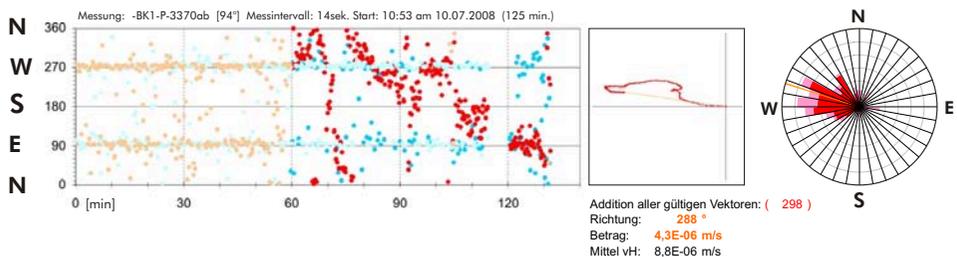
Darstellung der **Ausbaukontrolle** und Höhe der **Messpositionen** im Vertikalmaßstab an **Ausbauplan** angepasst.

Legende und Erläuterungen zu den Darstellungen siehe Text im Anhang

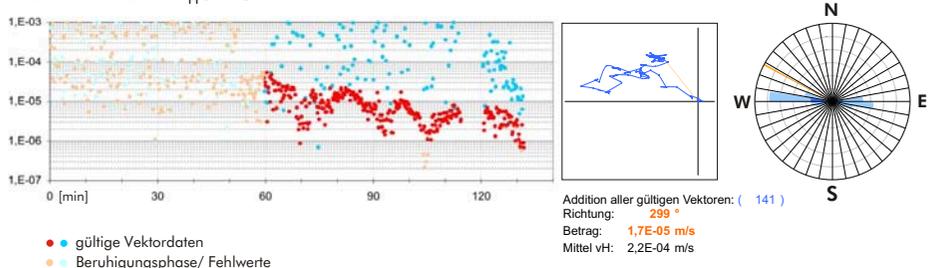
**GW-Messstelle BK1 bei Pumpversuch
 Messdiagramme**

Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 32,60 ● 31,50



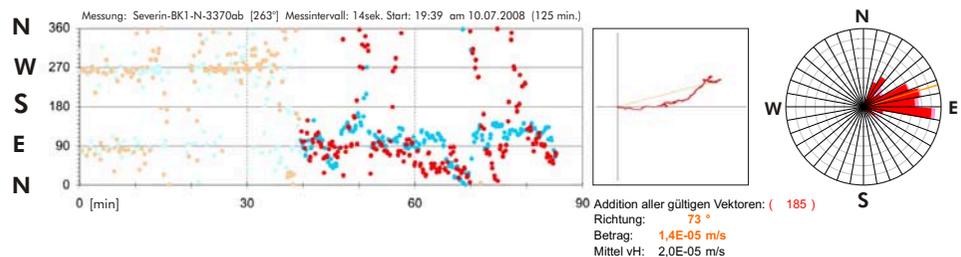
Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]



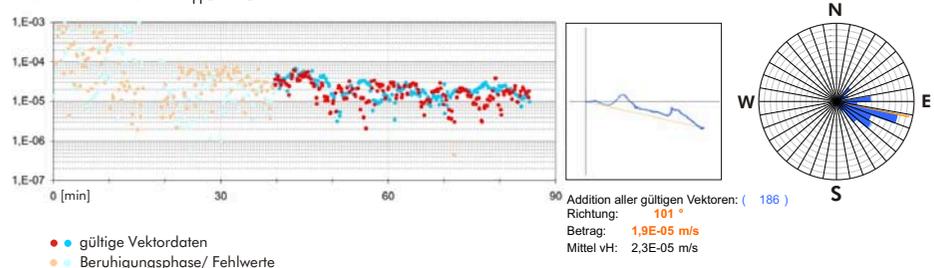
**GW-Messstelle BK1 nach Pumpversuch
 Messdiagramme**

Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 32,60 ● 31,50

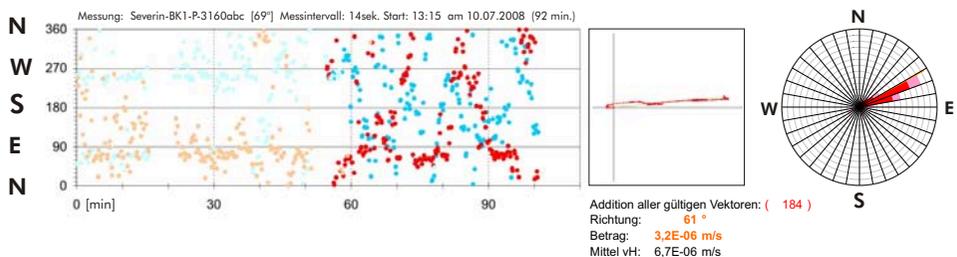


Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]

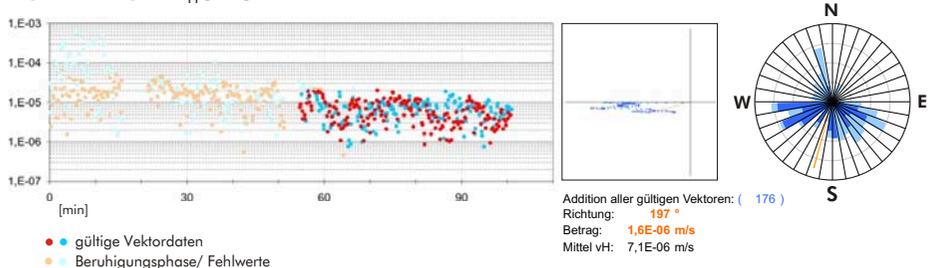


Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 30,50 ● 29,40

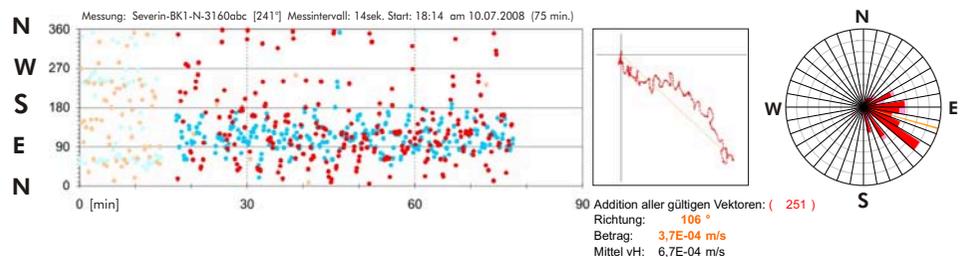


Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]

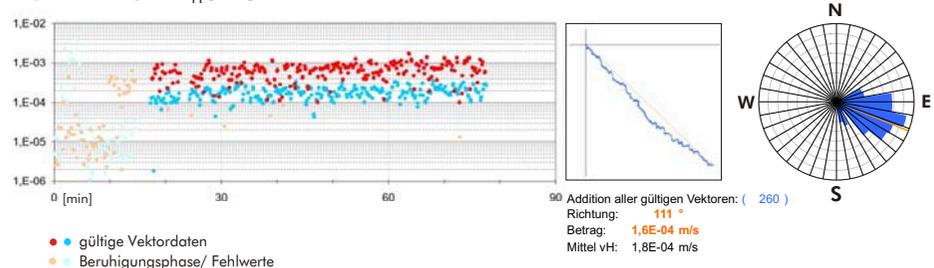


Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 30,50 ● 29,40



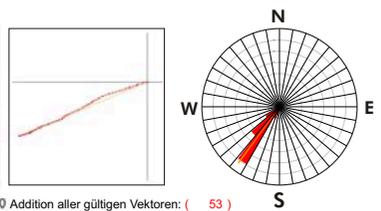
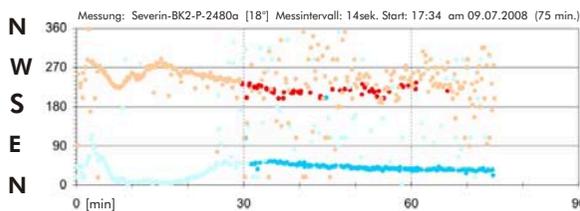
Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]



GW-Messstelle BK2 bei Pumpversuch
 Messdiagramme

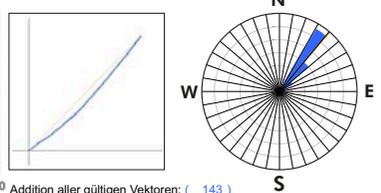
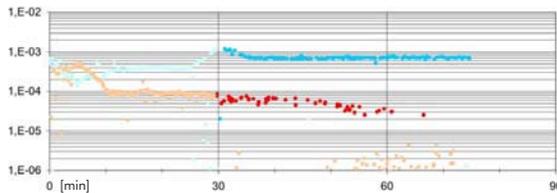
Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 23,70 ● 22,60



90 Addition aller gültigen Vektoren: (53)
 Richtung: 218 °
 Betrag: 5,3E-05 m/s
 Mittel vH: 5,3E-05 m/s

Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]



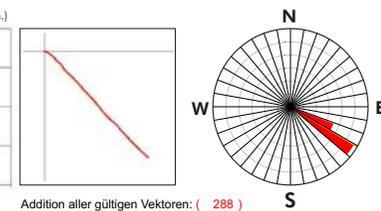
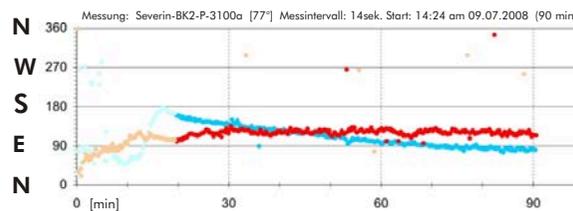
90 Addition aller gültigen Vektoren: (143)
 Richtung: 41 °
 Betrag: 7,2E-04 m/s
 Mittel vH: 7,3E-04 m/s

● gültige Vektordaten
 ● Beruhigungsphase/ Fehlwerte

GW-Messstelle BK2 bei Pumpversuch
 Messdiagramme

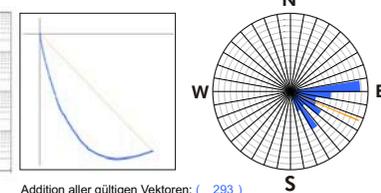
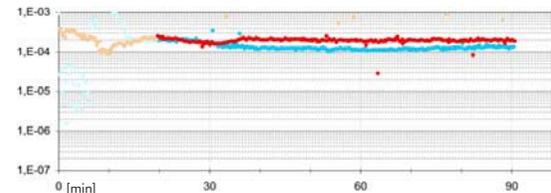
Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 29,90 ● 28,80



90 Addition aller gültigen Vektoren: (288)
 Richtung: 121 °
 Betrag: 1,9E-04 m/s
 Mittel vH: 2,0E-04 m/s

Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]

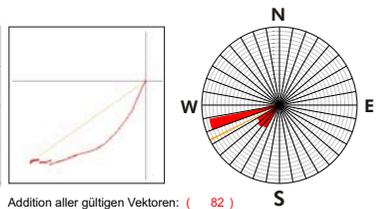
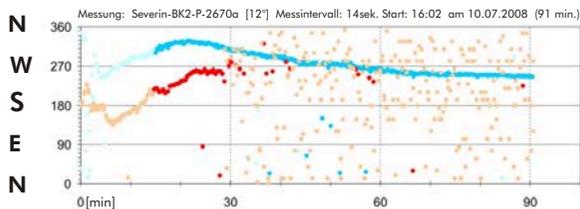


90 Addition aller gültigen Vektoren: (293)
 Richtung: 113 °
 Betrag: 1,2E-04 m/s
 Mittel vH: 1,4E-04 m/s

● gültige Vektordaten
 ● Beruhigungsphase/ Fehlwerte

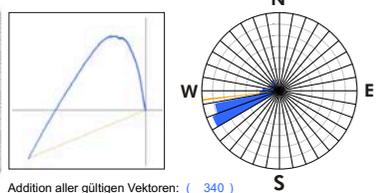
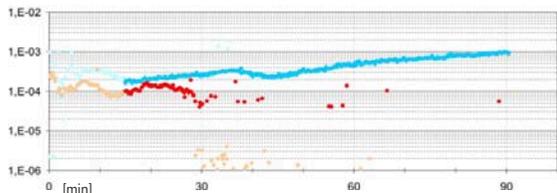
Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 25,60 ● 24,50



90 Addition aller gültigen Vektoren: (82)
 Richtung: 245 °
 Betrag: 9,3E-05 m/s
 Mittel vH: 1,1E-04 m/s

Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]

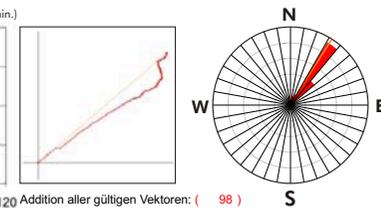
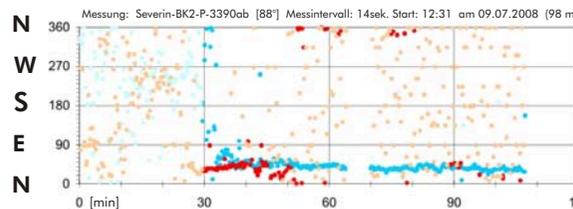


90 Addition aller gültigen Vektoren: (340)
 Richtung: 265 °
 Betrag: 4,1E-04 m/s
 Mittel vH: 4,6E-04 m/s

● gültige Vektordaten
 ● Beruhigungsphase/ Fehlwerte

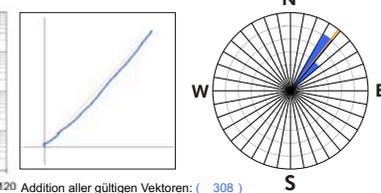
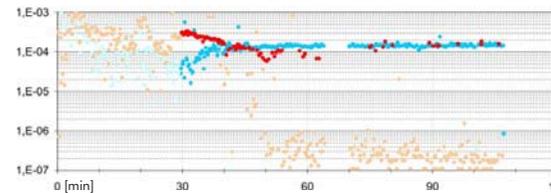
Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 32,80 ● 31,70



120 Addition aller gültigen Vektoren: (98)
 Richtung: 33 °
 Betrag: 1,6E-04 m/s
 Mittel vH: 1,7E-04 m/s

Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]



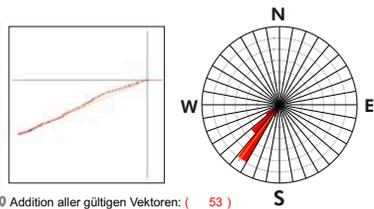
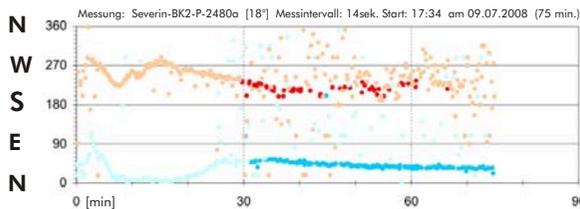
120 Addition aller gültigen Vektoren: (308)
 Richtung: 39 °
 Betrag: 1,3E-04 m/s
 Mittel vH: 1,4E-04 m/s

● gültige Vektordaten
 ● Beruhigungsphase/ Fehlwerte

GW-Messstelle BK2 bei Pumpversuch
 Messdiagramme

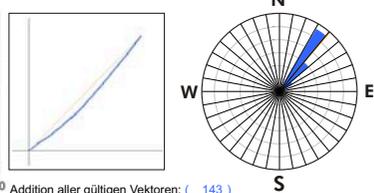
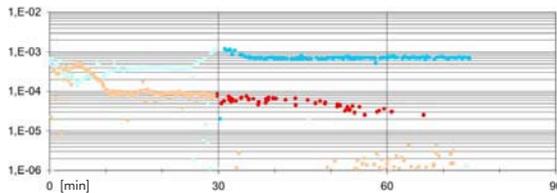
Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 23,70 ● 22,60



Messung: Severin-BK2-P-2480a [18°] Messintervall: 14sek. Start: 17:34 am 09.07.2008 (75 min.)
 Addition aller gültigen Vektoren: (53)
 Richtung: 218 °
 Betrag: 5,3E-05 m/s
 Mittel vH: 5,3E-05 m/s

Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]



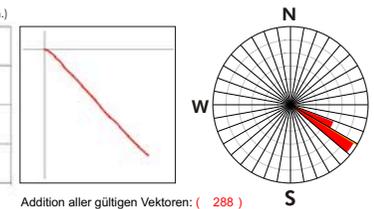
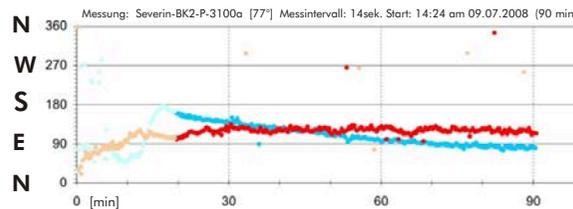
Addition aller gültigen Vektoren: (143)
 Richtung: 41 °
 Betrag: 7,2E-04 m/s
 Mittel vH: 7,3E-04 m/s

● gültige Vektordaten
 ● Beruhigungsphase/ Fehlwerte

GW-Messstelle BK2 bei Pumpversuch
 Messdiagramme

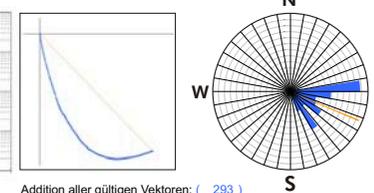
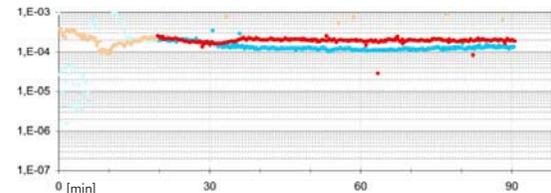
Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 29,90 ● 28,80



Messung: Severin-BK2-P-3100a [77°] Messintervall: 14sek. Start: 14:24 am 09.07.2008 (90 min.)
 Addition aller gültigen Vektoren: (288)
 Richtung: 121 °
 Betrag: 1,9E-04 m/s
 Mittel vH: 2,0E-04 m/s

Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]

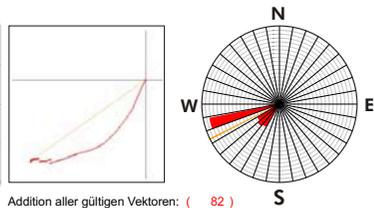
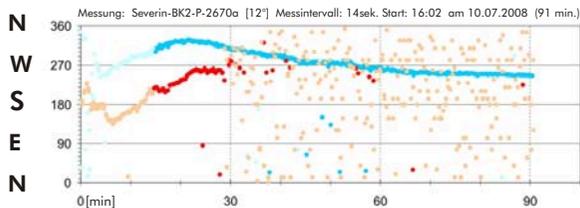


Addition aller gültigen Vektoren: (293)
 Richtung: 113 °
 Betrag: 1,2E-04 m/s
 Mittel vH: 1,4E-04 m/s

● gültige Vektordaten
 ● Beruhigungsphase/ Fehlwerte

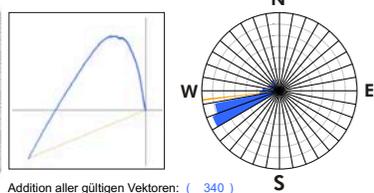
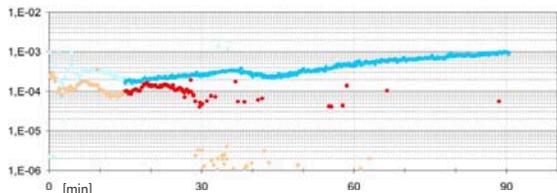
Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 25,60 ● 24,50



Messung: Severin-BK2-P-2670a [12°] Messintervall: 14sek. Start: 16:02 am 10.07.2008 (91 min.)
 Addition aller gültigen Vektoren: (82)
 Richtung: 245 °
 Betrag: 9,3E-05 m/s
 Mittel vH: 1,1E-04 m/s

Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]

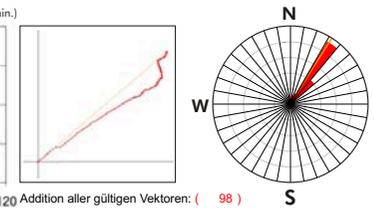
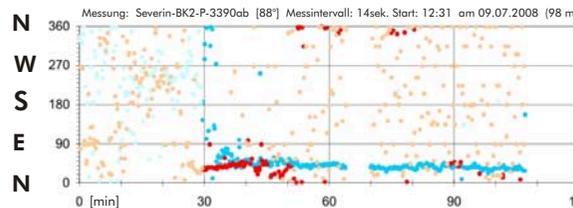


Addition aller gültigen Vektoren: (340)
 Richtung: 265 °
 Betrag: 4,1E-04 m/s
 Mittel vH: 4,6E-04 m/s

● gültige Vektordaten
 ● Beruhigungsphase/ Fehlwerte

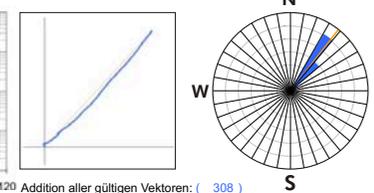
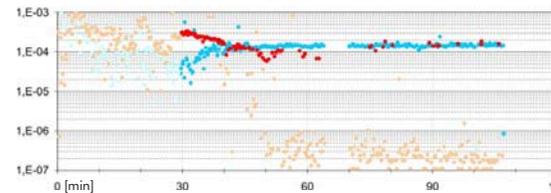
Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 32,80 ● 31,70



Messung: Severin-BK2-P-3390ab [88°] Messintervall: 14sek. Start: 12:31 am 09.07.2008 (98 min.)
 Addition aller gültigen Vektoren: (98)
 Richtung: 33 °
 Betrag: 1,6E-04 m/s
 Mittel vH: 1,7E-04 m/s

Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]



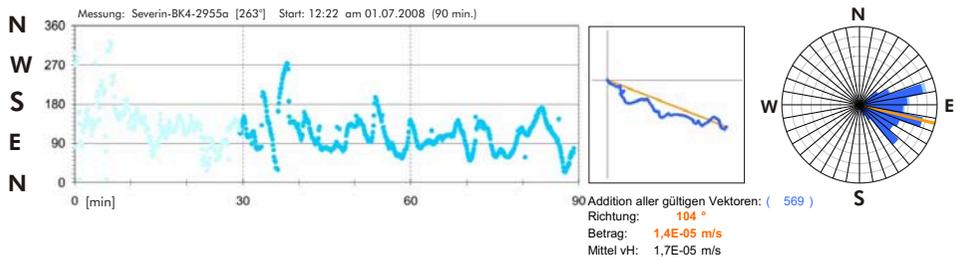
Addition aller gültigen Vektoren: (308)
 Richtung: 39 °
 Betrag: 1,3E-04 m/s
 Mittel vH: 1,4E-04 m/s

● gültige Vektordaten
 ● Beruhigungsphase/ Fehlwerte

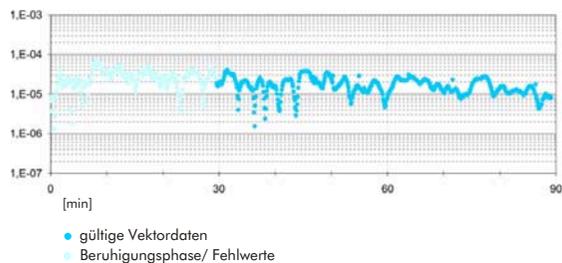
**GW-Messstelle BK4
 Messdiagramme**

Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 28,45

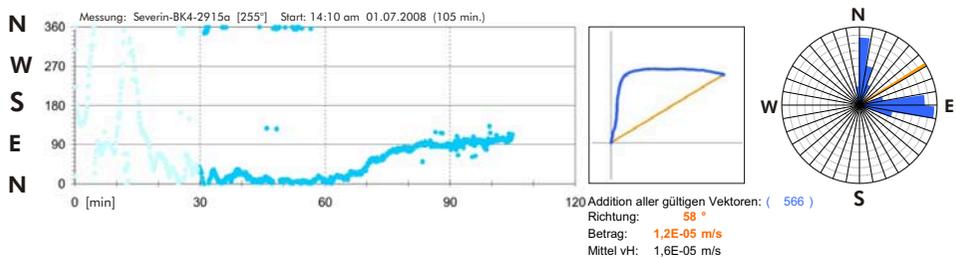


Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]

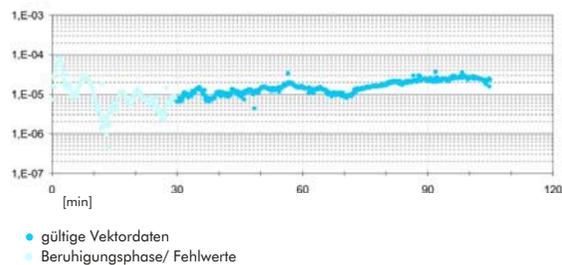


Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 28,05



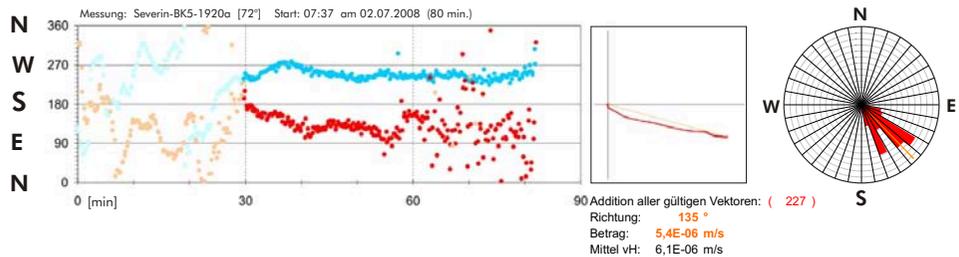
Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]



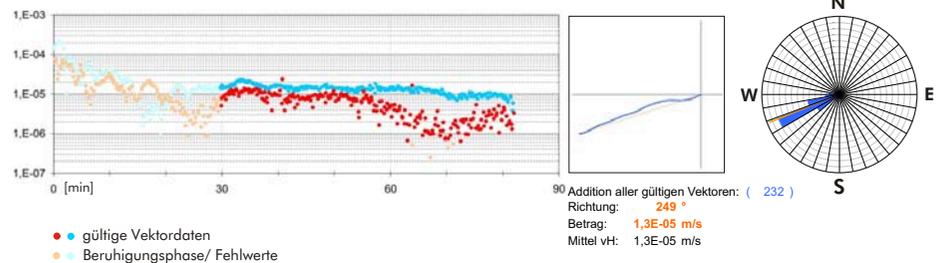
**GW-Messstelle BK5
 Messdiagramme**

Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 18,1 ● 17,0

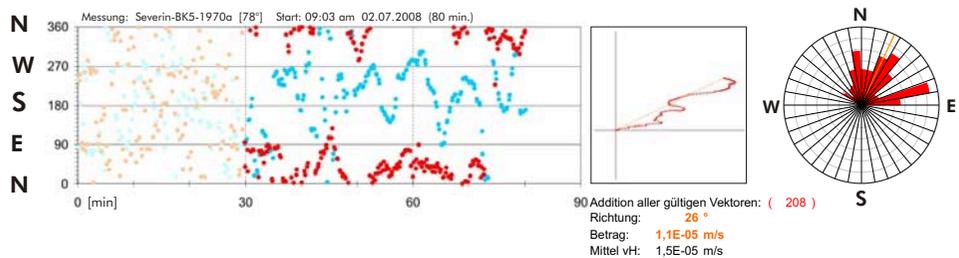


Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]

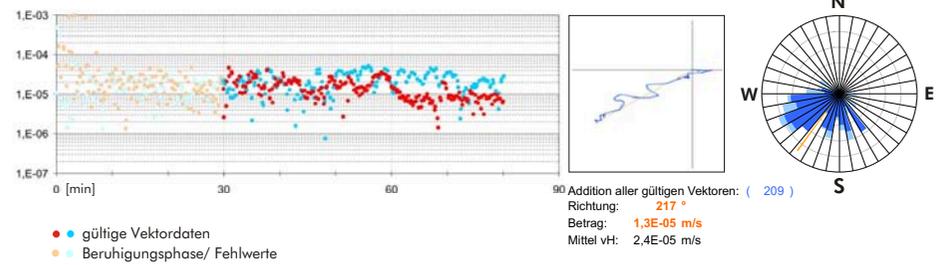


Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 18,6 ● 17,5



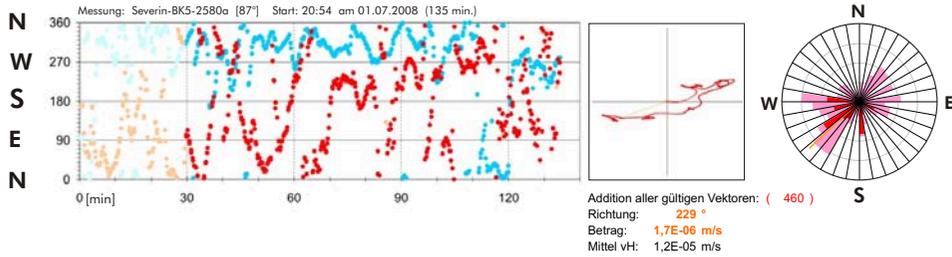
Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]



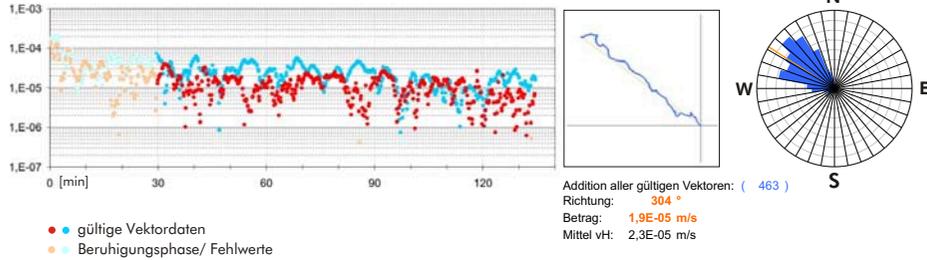
GW-Messstelle BK5
 Messdiagramme

Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 24,7 ● 23,6

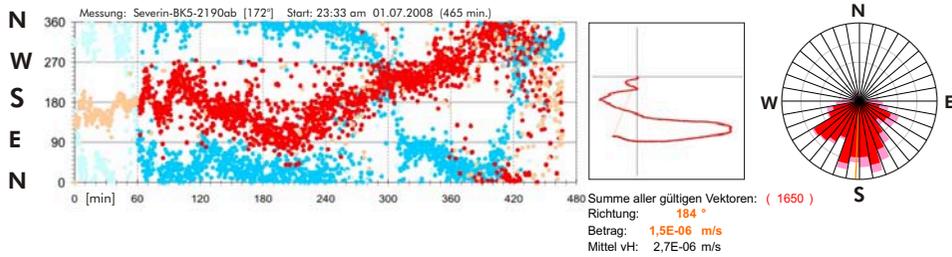


Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]

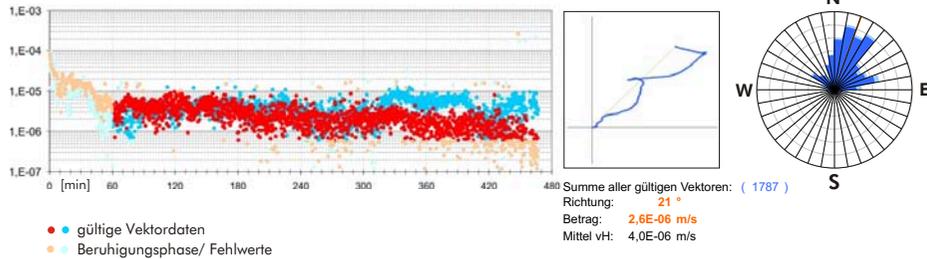


Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 20,8 ● 19,7



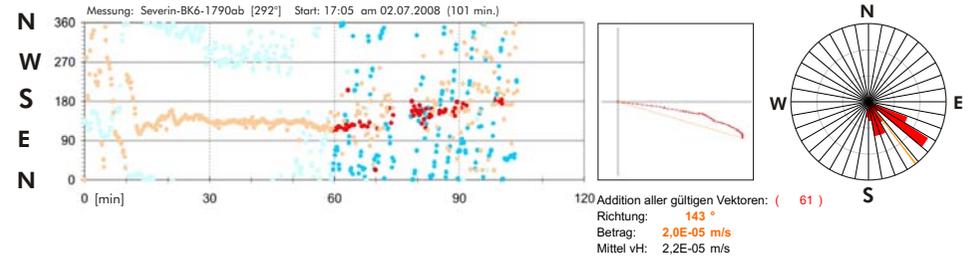
Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]



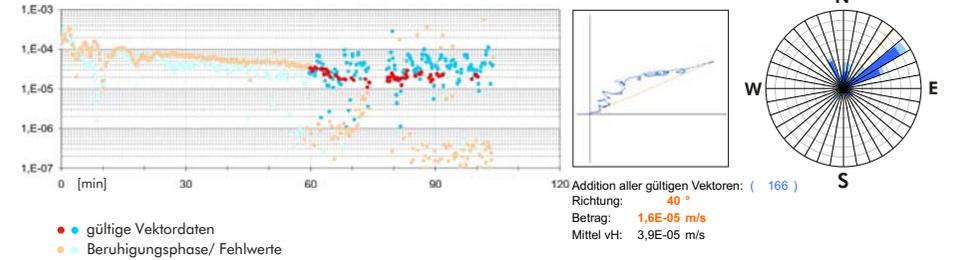
GW-Messstelle BK6
 Messdiagramme

Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 16,8 ● 15,7



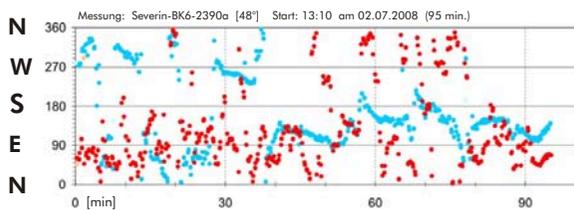
Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]



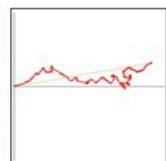
GW-Messstelle BK6
 Messdiagramme

Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 22,8 ● 21,7

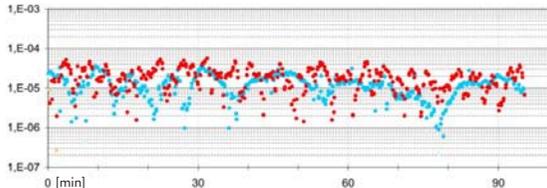


Hydraulische Stabilisierungsphase bei Messstart abgeschlossen.
 Verzögerter Messstart aufgrund hoher Eintrübung nach Packern.
 Dauer der Stabilisierungsphase vor Messbeginn: 45 min.

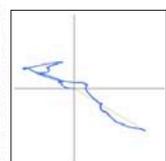


Addition aller gültigen Vektoren: (403)
 Richtung: 82 °
 Betrag: 1,1E-05 m/s
 Mittel v_H: 2,0E-05 m/s

Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]



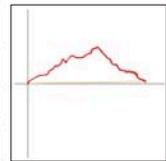
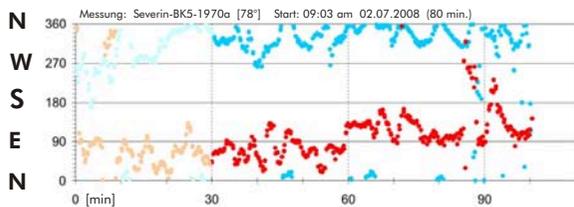
● gültige Vektordaten
 ● Beruhigungsphase/ Fehlwerte



Addition aller gültigen Vektoren: (403)
 Richtung: 134 °
 Betrag: 4,1E-06 m/s
 Mittel v_H: 1,3E-05 m/s

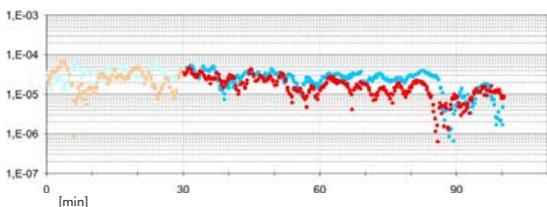
Fließrichtung [°]

Messtiefe m u.POK: ● 20,4 ● 19,3

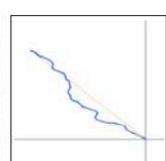


Addition aller gültigen Vektoren: (302)
 Richtung: 89 °
 Betrag: 1,4E-05 m/s
 Mittel v_H: 1,7E-05 m/s

Fließgeschwindigkeit v_H [m/s]



● gültige Vektordaten
 ● Beruhigungsphase/ Fehlwerte



Addition aller gültigen Vektoren: (298)
 Richtung: 333 °
 Betrag: 2,2E-05 m/s
 Mittel v_H: 2,5E-05 m/s

GFV-Messungen: Messverfahren, Durchführung, Auswertung

Messverfahren

Das GFV-Messverfahren (Grundwasser-Fluß-Visualisierung) beruht auf der optischen Erfassung und Vermessung des Driftweges natürlicher Feinschwabstoffe mit der Grundwasserströmung in Grundwassermessstellen. Da hierfür keine Markierungsstoffe in das Grundwasser eingebracht werden, ist für den Einsatz keine wasserrechtliche Genehmigung erforderlich. Gemessen wird die horizontale Grundwasserdurchströmung in Filterrohrabschnitten, die für die Messdauer mit Packern oberhalb und unterhalb isoliert werden. Aufgrund der generell sehr geringen Grundwasserfließbewegung wird das Filterrohr in den Messabschnitten laminar und korrespondierend zur umgebenden Grundwasserbewegung durchströmt.

Die Messung der Strömungsrichtung und horizontalen Durchflussgeschwindigkeit v_H erfolgt in der axialen und vertikalen Mitte des Messabschnitts. In dem nur horizontal durchströmbaren Messabschnitt erfolgt die optische Aufnahme der Schwabstoffe mit einem Kamerasystem. Hierbei werden die Driftbewegungen der vom Grundwasser mitgeführten, natürlichen Schwabstoffe im Messabschnitt von einer Kamera erfasst. Ein in die Messsonde integrierter Kompass nordet die Kamerabilder ein. Aus den Bilddaten werden pro Einzelmessung Schwabstoffmuster definiert, die über eine zeitliche Bildabfolge verfolgt werden. Der Versatz eines Schwabstoffmusters beschreibt den Grundwasserfluß in Richtung und Geschwindigkeit. Einzelmessungen erfolgen im Abstand von wenigen Sekunden so das der Strömungsverlauf zeitaufgelöst dargestellt werden kann.

Zur Qualitätssicherung erfolgt vor der Durchführung von Messungen eine Kamerabefahrung zur Überprüfung von Ausbau und Zustand der Filterrohre.

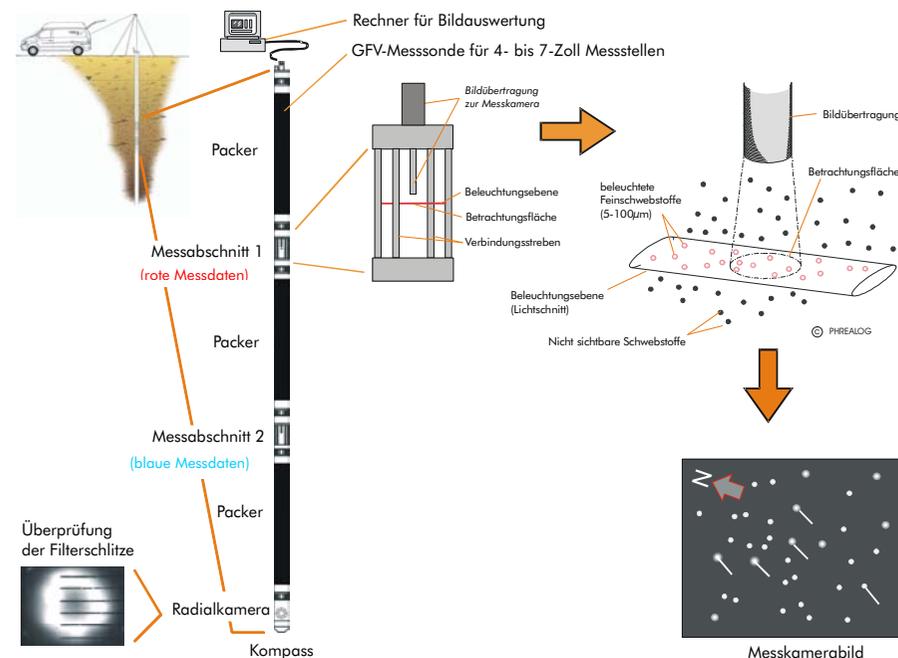


Abb. 1: GFV-Messverfahren

Die wesentlichen praktischen Vorteile von GFV Messungen sind:

1. Es ist nur eine Messstelle erforderlich, um realitätsnahe Daten zur Grundwasserfließbewegung zu erhalten.
2. Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit können im Tiefenprofil des Aquifers dargestellt und Messungen können schichtbezogen durchgeführt werden.
3. Die direkte Messung der Fließbewegung stellt eine von Grundwasserstandsmessungen unabhängige Datenbasis dar.
4. Fließbewegungen können über einen beliebigen Messzeitraum kontinuierlich und automatisch aufgezeichnet werden.
5. Es ist keine Zugabe von Markierungsstoffen erforderlich.

Eingesetzte Messsonden

Das PHREALOG-Messsystem besteht aus GFV-Messsonden, Datenübertragungskabel, Steuerungseinheit und Auswertungsrechner.

Für Messstellen größer DN100 wird eine Messsonde mit zwei Messabschnitten eingesetzt (vgl. Abb.1). Mit dieser Sonde können synchron Messungen in zwei Tiefen durchgeführt werden (Doppelmessung). Diese Ausführung besteht aus drei Packerabschnitten, zwei Messabschnitten für die Strömungsmessungen und einer Radialkamera zur optischen Brunnenkontrolle. Bei dieser Ausführung liegt der unterste Messabschnitt 1,1m oberhalb der Position der Radialkamera und der oberste Messabschnitt 1,1m oberhalb des unteren Messabschnitts. Messungen erfolgen synchron in beiden Messabschnitten. Die Radialkamera dieser Messsonde liefert detaillierte Schwarz-Weiß-Bilder der Rohr-Innenwandung bzw. der Filterschlitz. Zur Einnordung der Kamerabilder wird der mikroprozessorgesteuerte Fluxgate Kompass C100 von KVH Industries, Inc. mit automatischer Kalibrationsroutine eingesetzt. Der Kompass verfügt über eine Ausgabegenauigkeit von $0,1^\circ$ und wird automatisch nach Setzen der Packer mit dem Messbeginn ausgelesen. Die Messdatenvektoren werden somit direkt auf das Erdmagnetfeld orientiert eingelesen.

Für Messstellen DN50-DN80 wird eine Messsonde mit nur einem Messabschnitt eingesetzt. Diese Sonde besteht aus zwei Packerabschnitten, einem Messabschnitt für die Strömungsmessungen und einer Radialkamera zur optischen Brunnenkontrolle. Der Messabschnitt liegt 0,8m oberhalb der Position der Radialkamera. Die Radialkamera dieser Messsonde liefert Farbbilder der Rohr-Innenwandung bzw. der Filterschlitz. Zur Einnordung der Kamerabilder wird hier der mikroprozessorgesteuerte Fluxgate Kompass Vector 2X von Precision Navigation eingesetzt. Der Kompass verfügt über eine Ausgabegenauigkeit von 2° . Der Kompass wird nach dem Setzen der Packer und vor Messbeginn ausgelesen und der Kompasswert über eine Deviationstabelle korrigiert in das Messprogramm eingegeben. Die Messdatenvektoren werden somit direkt orientiert auf das Erdmagnetfeld eingelesen.

In Messstellen DN50-DN 65 werden Packer eingesetzt. In Messstellen $>DN65$ wird die Messsonde mit an den Rohrdurchmesser angepassten Manschetten eingesetzt. Damit ist eine exakte Positionierung des Messabschnitts in der axialen Mitte des Filterrohres gewährleistet sowie eine Vertikalströmung im Filterrohr unterbunden. Der für die Ermittlung der Filtergeschwindigkeit v_f eingesetzte, sondenspezifische Korrekturfaktor γ ändert sich bei der Verwendung von Manschetten gegenüber den Einsatz der Packer nur sehr geringfügig, so dass dies keinen ausschlaggebenden Einfluss auf die Umrechnung hat.

Das gleich gilt für Messstellen $>DN150$ mit dem großen Messsystem.

Durchführung

Während des Einfahrens der GFV-Messsonde in die Messstelle werden mit der Radialkamera die Filterrohrübergänge geortet und der Zustand der Filterrohre und Filterrohrschlitze überprüft. Die Lage der Filterrohrübergänge und der Zustand der Filterrohre wird dokumentiert. Daran schließt sich die Festlegung der Messtiefen anhand der lithologischen Bohrprofilaufnahme sowie der optischen Ausbauprüfung an. Filterrohrübergänge und Filterrohbereiche mit stark verschmutzten Filterschlitz werden für Messungen gemieden. Anschließend wird die Messsonde mit den aufpumpbaren Packern in dem Brunnenrohr bzw. an der Brunnenwandung fixiert. Durch das Abpacken werden störende Vertikalströmungen im Messbereich unterbunden und die horizontale Durchströmung auf die Messabschnitte eingegrenzt. Somit sind definierte Messbedingungen gegeben und es werden repräsentative Messergebnisse erzielt. Gleichzeitig wird die Messsonde präzise in der axialen Mitte der Messstelle fixiert (Symmetriepunkt der Durchströmungsgeometrie) und die Messung kann nicht durch nachträgliche Bewegungen der Messsonde gestört werden.

Unmittelbar nach dem Fixieren der Messsonde wird die Messung gestartet. Durch den unmittelbaren Messbeginn wird auch die Beruhigungsphase aufgezeichnet, während der die Wiederherstellung der natürlichen hydraulischen Verhältnisse und der Temperaturgleich der Messsonde an das Grundwasser erfolgen. So wird der Zeitpunkt einer Stabilisierung der Durchströmung nachgewiesen und dokumentiert. Durch das Einfahren der Messsonde und Setzen der Packer werden initial Partikeldepots in der unmittelbaren Umgebung mobilisiert. Nach Abfluss des partikelerfüllten Volumens aus dem Messbereich zeigt sich die natürliche Partikelfracht im Grundwasser. In Abhängigkeit der lithologischen und hydraulischen Randbedingungen tritt von Messtiefe zu Messtiefe eine unterschiedliche Frachtmenge an Schwebstoffen auf. Die Beruhigungsphase ist nach Erreichen einer gleichförmigen, mittleren Durchströmungsgeschwindigkeit bzw. nach Erreichen eines einheitlichen Strömungsverlaufs abgeschlossen. Sie wird nach Abschluß der Messung bewertet und festgelegt. Üblicherweise werden je Messstelle Messungen in 4-8 Tiefenpositionen angesetzt. Die Dauer einer tiefenbezogenen Messung ist abhängig von:

1. der Dauer zur Wiederherstellung der natürlichen oder künstlichen hydraulischen Verhältnisse nach Einbau der Messsonde
2. der Stabilität der Fließbewegung im Zeitverlauf
3. der angetroffenen Fließgeschwindigkeit

Die Dauer einer Messreihe richtet sich danach, wie schnell sich Fließgeschwindigkeit und -richtung in der Beruhigungsphase stabilisieren und wie gleichförmig die Strömung in der sich anschließenden Messphase verläuft.

Datenerfassung

Die Messdaten werden über die Auswertung der Messkamerabilder generiert. Der Versatz eines mit der Grundwasserströmung mitgeführten Schwebstoffmusters wird über eine Folge von Bildern ermittelt und in einen Strömungsvektor umgerechnet. Dieser wird in Richtung und Geschwindigkeit zerlegt. Die Messabfolge beträgt üblicherweise 2-8 Sekunden. Eine Messreihe kann beliebig lange durchgeführt werden, da kontinuierlich mit der Grundwasserströmung transportierte, natürliche Schwebstoffe in den Beobachtungsbereich eintreten und so ständig neue Schwebstoffmuster generiert werden. So kann die Strömungssituation in zeitlicher Folge und in beliebiger Länge dokumentiert werden. In seltenen Fällen geht die Partikelzahl im Verlauf der Messung stark zurück, so dass auf Grund unzureichender Partikelerfassung keine Messung durchgeführt werden kann. Bei einer sehr hohen Trübe des Grundwassers in der Messstelle kann die Messung je nach Sichtverhältnissen nur sehr eingeschränkt oder nicht durchgeführt werden.

Ein Messablauf gliedert sich in eine Beruhigungsphase und eine Messphase. Die Beruhigungsphase ist im Wesentlichen durch eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit nach Messbeginn gekennzeichnet und ist in nach einer Einregelung auf einen Geschwindigkeitsbereich abgeschlossen (steady-state).

Um bei sehr geringen Fließgeschwindigkeiten eine thermische Einflussnahme (Bildung von Konvektionszellen) auf die Durchströmung des Messabschnitts durch die elektrischen Baueinheiten der Messsonde sowie der Lasereinstrahlung auszuschließen, erfolgt bei Fließgeschwindigkeiten kleiner 1×10^{-5} m/s die Messwertaufnahme in zeitlichen Intervallen. Hierbei werden die Kamera, Laser und elektrische Baueinheiten der Messsonde im Verlauf der Messung zyklisch ein- und ausgeschaltet. Dabei liegt das Verhältnis Messphase/Ruhephase üblicherweise 1:3 (20sek Messphase 40sek. Ruhephase) Bei instationärem Fließverhalten führt dies zu versetzten Abfolgen der Punktlinien in den Messdiagrammen. Die im Verlauf einer Messreihe gewonnene hohe Datenmenge erlaubt es, zur besseren Darstellung in den Messdiagrammen die Zeitpunkte der einzelnen Messungen nicht exakt, sondern gleichmäßig über die Messdauer verteilt auf der Zeitskala darzustellen. Die Auswertung ist aufgrund der Messdauer und der hohen Datendichte pro Messreihe durch die Messwertaufnahme in Intervallen nicht beeinträchtigt.

Strömungsverhalten und Messgenauigkeit

Die Ausbildung einer stabilen Fließrichtung in der Messstelle hängt unmittelbar von einer gleichförmigen Durchströmungsgeschwindigkeit ab. Ein anhaltendes Anschwellen und Abebben der Durchströmungsgeschwindigkeit beeinflusst die Durchströmungsgeometrie und führt damit auch zu einem Wechsel der Fließrichtung im Filterrohr. Die Größe und Häufigkeit der Richtungsänderung korrespondiert teilweise mit der Amplitude und Frequenz der Geschwindigkeitsänderungen. Die im Verlauf einer Messphase gewonnenen Vektordaten zeichnen den Schwankungsbereich nach. Die große Datenmenge, die durch Messen der Fließrichtung und -geschwindigkeit alle sechs Sekunden im Dauerbetrieb bzw. ca. 15 Messwerte pro Minute im Intervallbetrieb akkumuliert wird, ermöglicht mit fortschreitendem Zeitverlauf eine solide statistische Auswertung und gute Eingrenzung der Hauptfließrichtung und -geschwindigkeit. Somit ergibt sich eine hohe Aussageschärfe des Messergebnisses pro Tiefenposition. Bei instationären Strömungsverhalten ist gegenüber stationärem Strömungsverhalten eine längere Messzeit erforderlich um eine gleichwertige Aussageschärfe zu erhalten. Denn das durch die Addition der Strömungsvektoren gewonnene Ergebnis wird um so präziser, je mehr Messdaten vorliegen bzw. je länger die Messung durchgeführt wird.

Lithologische Wechsel, Kluffzonen und hydraulische Kurzschlüsse sowie Einflüsse durch den Messstellenausbau und -zustand können Variationen der Durchflussrichtung und -geschwindigkeit von Messtiefe zu Messtiefe bedingen. Die Messresultate der Messreihen im Vertikalprofil der Messstelle zeigen daher häufig deutlich voneinander abweichende Fließrichtung und -geschwindigkeiten. Um das generelle Fließverhalten im Bereich der Messstelle abzuschätzen, erfolgen daher immer mehrere Messungen in unterschiedlichen Tiefenpositionen. Zur Feststellung der generelle Grundwasserfließbewegung wird die mittlere Fließrichtung und -geschwindigkeit, integriert über alle tiefenabhängigen Messpositionen der jeweiligen Messstelle, berechnet. Diese Berechnung berücksichtigt sowohl Länge und Richtung der einzelnen Fließvektoren als auch die Qualität der Ergebnisse sowie lithologische Wechsel. Zusammenfassend bedeutet dies, dass es zu unterschiedlichen Fließverhalten innerhalb einer Messstelle kommen kann, die berechneten gemittelten Fließvektoren entsprechen jedoch dem entscheidenden Grundwassermassenfluss.

Durch die Streben im Messabschnitt und durch die Beeinflussung der Schlitz-/Steganordnung der Filterrohre ist von einer Richtungsabweichung zwischen der gemessenen Fließrichtung und der Fließrichtung im umgebenden Aquifer von +/- 5° auszugehen. Die Auswirkung auf das Richtungsergebnis ist jedoch auf Grund des allgemein vorhandenen Wechsels der Strömungsrichtung im Verlauf einer Messung sowie der statistischen Auswertung sehr gering.

Störungen der horizontalen Strömung können durch umläufige vertikale Strömungen in der Kieshinterfüllung auftreten. In diesem Fall zeigen sich auch vertikale Strömungskomponenten in den Messbildern. Bei Auftreten von erkennbaren Vertikalströmungen im Messabschnitt wird die Messung nur eingeschränkt gewertet oder verworfen.

Datenauswertung und Darstellung

Die Messdaten werden als zusammenhängende Punktlinien in Richtungs- und Geschwindigkeitsdiagrammen dokumentiert. Die Richtungs- und Geschwindigkeitsergebnisse der jeweiligen Messreihen werden aus den gültigen Vektordaten nach Richtungshäufigkeit, Vektoraddition und der Summe aller Vektorbeiträge pro 10°-Segment statistisch ausgewertet und gewichtet. Die resultierende Fließrichtung für eine Messstelle ergibt sich aus der gewichteten Addition aller pro Messtiefe ermittelten Fließrichtungen.

Fehlwerte zeichnen sich durch einen geringen Bildkorrelationsfaktor aus und können so bei der Auswertung aussortiert werden. Fehlwerte sind auch dadurch deutlich erkennbar, dass sie von angrenzenden, miteinander korrespondierenden Werten stark abweichen. Die Daten der Beruhigungsphase und Fehlwerte werden von der statistischen Gesamtauswertung ausgenommen. Die Messdaten werden im Anhang der Untersuchungsberichte wie folgt dargestellt.

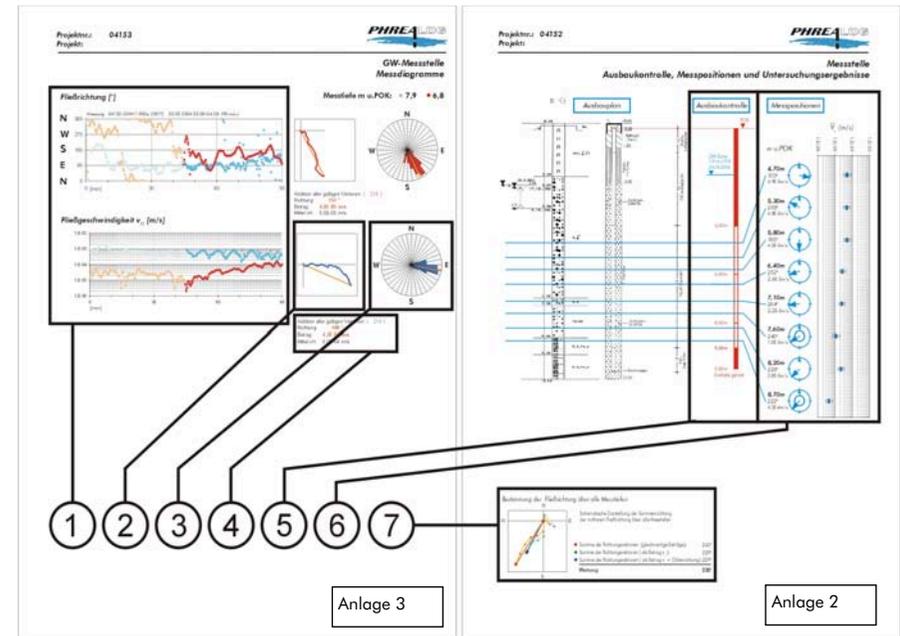


Abb.2: Darstellung der Messdaten

In der Anlage 3 „Messdiagramme“:

- ① Diagramm der Messdatenaufnahme in zeitlicher Abfolge
- ② Polardarstellung des Fließrichtungsverlaufs in der Messphase
- ③ Richtungsrose
- ④ aus der Messreihe resultierende Messergebnisse

In der Anlage 2 „Ausbaukontrolle, Messpositionen und Untersuchungsergebnisse“:

- ⑤ Darstellung des Ausbaus der Messstelle basierend auf der Kamerabefahrung
- ⑥ Darstellung der aus den jeweiligen Messtiefen resultierenden Messergebnisse

Die Darstellungen ⑤ und ⑥ basieren im Vertikalmaßstab auf den des Ausbauplans.
 ⑦ Grafik zur Ermittlung der Hauptfließrichtung aus den Ergebnissen aller Messtiefen

Darstellungen in Anlage 3

Zu Darstellung ①:

Darstellung der Messdaten in der zeitlichen Abfolge in zwei zusammengehörigen Diagrammen:

- Richtungsdiagramm mit Angabe der Fließrichtung bezogen auf mag. N
- Angabe der Fließgeschwindigkeit v_H , (gemessene Fließgeschwindigkeit in der axialen Mitte des Messabschnittes in [m/s]). Zur Ermittlung der hier im Aquifer herrschenden Filtergeschwindigkeit v_f muss die gemessene Geschwindigkeit v_H durch die Korrekturfaktoren α und γ dividiert werden (vgl. „Berechnung der Fließgeschwindigkeit v_f “ im Anhang).

Die hellfarbigen Datenpunkte sind der Beruhigungsphase sowie Fehlwerten zugeordnet. Sie werden nicht für die Auswertung verwendet. Sie belegen die Dauer der Beruhigungsphase nach Messbeginn. Die dunkelfarbigen Datenpunkte sind der Messphase zugeordnet und werden für die statistische Auswertung herangezogen.

Zweifarbige Datenpunktreihen (blau und rot) dokumentieren synchrone Messungen in zwei unterschiedlichen Messtiefen. Hierbei sind die blauen Messwerte der unteren Messzelle zugeordnet, die roten Datenpunkte der oberen Messzelle. Synchrone Doppelmessungen sind nur in Messstellen mit einem Ausbau größer 4 Zoll möglich, in denen das große Messsystem eingesetzt werden kann (Doppelmesssonde).

Über dem Richtungsdiagramm ist der Dateiname der Messung, die Winkelstellung der Messsonde zu mag. N während der Messung, sowie Datum, Uhrzeit des Messbeginns und Dauer der Messung vermerkt.

Zur Darstellung ②:

Schematische Darstellung des Richtungsverlaufes während der Messphase. Diese Darstellung ermöglicht die Beurteilung der Richtungsvarianz im Verlauf der Messphase und damit eine Wichtung der resultierenden Fließrichtung. Dargestellt ist die grafische Addition aller Vektorbeiträge der Messphase (Punktlinie) und der resultierende Richtungsvektor (orange) beginnend im Ursprung des Polarkoordinatenkreuzes (Beginn der Messphase). Bei anhaltend instationären Strömungsverhältnissen erhöht sich die Aussageschärfe mit der Messdauer. Bei Doppelmessungen sind zwei Grafiken für jeweils eine Messtiefe dargestellt (blaue bzw. rote Punktlinie). Diese schematische Darstellung ist maßstabstreu aber nicht winkeltreu.

Zur Darstellung ③:

Die dargestellte Richtungsrose zeigt, dimensionslos, die Streuung der Fließrichtung pro 10°-Segment in Relation zueinander. Für jedes 10° Segment ist dargestellt:

- die Addition (Summenvektor) aller Vektorbeiträge aus der Messphase (hellblau bzw. hellrot)
- die grafische Bilanzierung der gemessenen Vektorbeiträge (Bilanzvektor: dunkelblau bzw. dunkelrot). Der Bilanzvektor resultiert aus dem Summenvektor abzüglich des gegenläufigen (-180°) Summenvektors pro 10°-Segment. In dem Segment mit dem höheren Vektorbetrag erscheint als Resultat der dunkelfarbige Bilanzbetrag. Diese Darstellung dient zur Erfassung und Bewertung von Haupt- und Nebenmaxima der Fließbewegung. Das Messergebnis ist um so präziser, je deutlicher der Bilanzvektor gegenüber dem Summenvektor ist und mehrere benachbarte Segmente umfaßt.
- der resultierende Fließrichtungsvektor (orange, winkeltreu).

Zur Darstellung ④:

Angaben zur Auswertungen der Messdaten:

- Anzahl der für die statistische Auswertung herangezogenen Messwerte der Messphase
- Fließrichtung als Resultat der Vektoraddition
- Bilanzbetrag der Fließgeschwindigkeit/resultierende Fließgeschwindigkeit v_H
- Mittelwert der gemessenen Fließgeschwindigkeiten v_H

Die direkt gemessene Durchströmungsgeschwindigkeit v_H kann nur dann in Bezug zu der Grundwasserbewegung im Aquifer gesetzt werden, wenn die Messstelle einen weitgehend sauberen Zustand aufweist und die Strömung verhältnismäßig richtungsstabil verläuft. Bei wechselnden, umlaufenden Fließrichtungen beziehen sich der Mittelwert der gemessene Durchflussgeschwindigkeit v_H auf die einzelnen Bewegungsabläufe, nicht jedoch auf die Geschwindigkeit der Grundwasserbewegung in die Hauptfließrichtung. Der Bilanzbetrag der Fließgeschwindigkeit v_H hingegen resultiert aus der Addition aller gültigen Vektorbeiträge über die Messzeit und stellen somit den Versatzbetrag des Grundwassers in die Hauptfließrichtung dar (Bilanz), der über den Korrekturfaktor in Bezug zur Filtergeschwindigkeit v_f im Aquifer gesetzt werden kann.

Darstellungen in Anlage 2

Zur Darstellung ⑤:

Darstellung des Brunnenausbaus basierend auf der Kamerabefahrung. Dargestellt sind die Rohrübergänge mit Tiefenangaben, Bereiche mit starker Verschmutzung in denen keine Messungen durchgeführt werden konnten, sowie der gelotete Wasserstand und die Endtiefe vor dem Einbau der Messsonden.

LEGENDE AUSBAUKONTROLLE

- 9,90m □ Tiefe der Rohrübergänge [m u. POK] geortet per Kamera
- Vollrohr
- Filterrohr
- Filterschlitz stark zugesetzt

Zur Darstellung ⑥:

Überblick über die Messtiefen und die jeweils statistisch errechnete Fließrichtung und Bilanzbetrag der Fließgeschwindigkeit/resultierende Fließgeschwindigkeit

LEGENDE MESSPOSITIONEN

- Höhe der Messposition
- ↗ mittlere Fließrichtung
- ↗ Fließrichtungstendenz (T. xx°)
- ↻ wechselnde/drehende Fließrichtung
- mittlere Durchflußgeschwindigkeit \bar{v}
- Durchflußgeschwindigkeitstendenz \bar{v}

Gütekichtung der Fließrichtung

Zur Darstellung ⑦:

Sofern nicht tiefendifferenziert deutlich unterschiedliche GW-Fließverhältnisse angenommen werden oder erkennbar sind, werden zur Ermittlung der in den Lageplänen für jede Messstelle dargestellten generellen Fließrichtung die Summenrichtung aller Messtiefen addiert. Um den unterschiedlichen Geschwindigkeitsbeträgen und den geringer zu bewertenden Richtungstendenzen Rechnung zu tragen, erfolgt eine differenzierte Addition der Vektoren:

- Summe der Richtungsvektoren als Betrag v_H (rot)
- Summe der Richtungsvektoren als Betrag v_H + Gütekichtung (blau).

Die Güteichtung erfolgt durch die Wertung der pro Messtiefe ermittelten Richtung abgestuft als Tendenz (0,25-0,5-0,75) oder als eindeutiges Ergebnis (1,0) und basiert auf der Streuung der Fließrichtung im Messverlauf und Erfahrungswerten zur Gütebeurteilung der Messreihen. Letztere gewichtete Addition (b.) stellt die abschließende Wertung dar, welche die generelle Fließrichtung angibt und in dem Lageplan als Hauptfließrichtung dargestellt wird.

Berechnung der Filtergeschwindigkeit v_f

Jede Grundwassermessstelle stellt eine Anomalie im Strömungsfeld eines Aquifers da. Durch den vom Sediment abweichenden Strömungswiderstand von Filterkies, Filterrohr und frei durchströmbaren Filterrohr-Innenraum erfolgt eine Ablenkung der Strömungslinien (vgl. Abb.3).

Es besteht eine berechenbare Gesetzmäßigkeit, nach der die Ablenkung der Stromlinien auf der horizontalen Ebene von den hydraulischen Widerständen und Radien des Bohrlochausbaus abhängt. Diese Gesetzmäßigkeit wird durch den Faktor α ausgedrückt, der das Verhältnis zwischen Filterrohrinnenradius und Einzugsbreite des den Brunnen anströmenden Grundwassers beschreibt. Die Stromlinienablenkung spiegelt sich im Durchströmungsbild des Brunnenraumes wider. Generell herrscht bei der Grundwasserdurchströmung des Filterrohres laminares Strömen vor, so dass sich Strömungslinien ausbilden. Die gesetzmäßig symmetrische Ausbildung der Durchströmung bedingt eine den Brunnen mittig durchlaufende Strömungslinie (vgl. Abb.2). Ihre Ausrichtung entspricht der Strömungsrichtung des Grundwassers in der Brunnenumgebung.

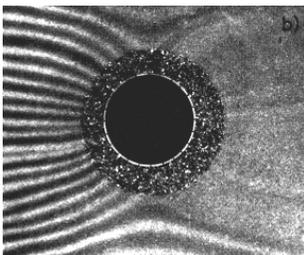
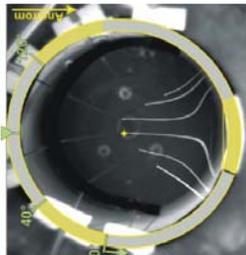


Abb.3: Brunnenquerschnitt Links: Verzerrung der Grundwasserströmungslinien in der Umgebung einer mit Filterkies und Filterrohr ausgebauten Bohrung. Strömungsrichtung von links nach rechts. (Quelle: KLOTZ 1971) Rechts: Durchströmungsverhalten in Brunnenfilterrohren DIN 4925, dargestellt über Injektion eines Farbtacers zur Sichtbarmachung der Stromlinien. Untersuchungen in einem Strömungsmodell (RECH 2000). Hier: Durchströmung in einem Filterrohr DN80 bei einer Filtergeschwindigkeit von 3×10^{-4} m/s.



Die in der axialen Filterrohrmitte anliegende Strömungsrichtung \vec{v}_H korrespondiert mit der Grundwasserströmungsrichtung im umgebenden Aquifer. In Porengrundwasserleitern ist der horizontale Durchfluß im Filterrohr auf Grund der Durchströmungsgeometrie generell höher als im Aquifer ($v_f < v_H$).

BERGMANN (1970) konnte nachweisen, dass die Strömungsgeschwindigkeit v_H entlang der den Brunnen mittig durchlaufenden Strömungslinie über den Faktor α direkt proportional zu der Filtergeschwindigkeit v_f ist.

$$v_f = \frac{v_H}{\alpha}$$

Unter idealen Bedingungen kann die Filtergeschwindigkeit v_f somit aus der ermittelten Strömungsgeschwindigkeit v_H und dem Alpha-Faktor ermittelt werden. Der Alpha-Faktor betrifft lediglich die Fließgeschwindigkeit, nicht jedoch die Strömungsrichtung. Die Strömungsgeschwindigkeitsgröße v_H liegt nur in einem Teilbereich des Brunneninnenraums vor (vgl. Abb.4).

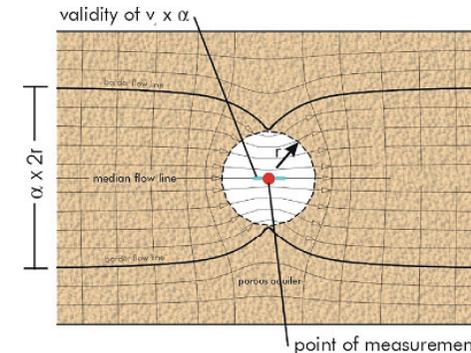


Abb. 4: Schematische Darstellung des α -Wertes, des Messbereichs in dem v_H ermittelt wird. Bedingungen in einem isotropen Aquifer mit einem allseitig durchlässigem Filterrohr (Quelle: SCHÖTTLER 1997)

Zur Berechnung der Filtergeschwindigkeit v_f [m/s] aus der gemessenen horizontalen Filterrohrdurchflussgeschwindigkeit v_H [m/s] werden zwei Korrekturfaktoren eingesetzt: Der Faktor α sowie der Faktor γ

Die gesamte Geschwindigkeitskorrektur resultiert aus der Multiplikation von α - und γ -Faktor (KLOTZ 1977). $\Rightarrow v_f = v_H / (\alpha * \gamma)$.

α -Faktor

Der dimensionslose α -Faktor beschreibt den Einfluss des Brunnenausbaus auf die Strömungsgeometrie am und im Filterrohr und wird aus den Brunnenausbaudaten errechnet (MOSER & RAUERT 1980). Die eingesetzten Daten sind: Filterrohr- und Bohrdurchmesser, die k-Werte des Filterrohres und des Filterkieses sowie der geschätzte Durchlässigkeitsbeiwert k_f der Lithologie der jeweiligen Messtiefe. α -Werte für ausgebaute Bohrungen sind zu einem großen Teil direkt aus Klotz (1978, 1990) zu entnehmen. Zur Berechnung kann auch der Durchlässigkeitswert k_1 für Filterrohre aus KLOTZ (1990) entnommen werden. Die Wichtung des k_f -Wertes bei der Berechnung erlaubt dessen Schätzung anhand der lithologischen Angaben aus den Bohrprotokollen.

α -Werte werden nach folgenden Formeln ermittelt (nach DROST & MOSER in MOSER & RAUERT 1980). Für den Ausbau eines Bohrbrunnens mit Filterrohr und Filterkies gilt:

$$\alpha = \frac{8}{\left(1 + \frac{k_f}{k_2}\right) \times \left\{ 1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{k_2}{k_1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \right] \right\} + \left(1 - \frac{k_f}{k_2}\right) \times \left\{ \left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 + \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2 + \frac{k_2}{k_1} \left[\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 - \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2 \right] \right\}} \quad [C1]$$

Wobei gilt: $0 < \alpha < 8$

Darin bedeutet:

- α = Kontraktionsfaktor; α -Wert [-]
- r_1 = Filterrohrinnenradius [mm]
- r_2 = Filterrohraußenradius [mm]
- r_3 = Bohrlochradius [mm]
- k_1 = Filterrohrdurchlässigkeit [cm/s]
- k_2 = Filterkiesdurchlässigkeit [cm/s]
- k_f = Durchlässigkeitsbeiwert des Grundwasserleiters [cm/s]

Für den Ausbau eines lediglich mit einem Filterrohr ausgebauten Bohrbrunnens ohne Filterkies-schüttung vereinfacht sich [C1] zu:

$$\alpha = \frac{4}{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{k_f}{k_1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]} \quad [C2]$$

Wobei gilt: $0 < \alpha < 4$

Für eine unausgebaute Bohrung folgt aus obiger Gleichung:

$$\alpha = 2 \quad [C3]$$

da $k_1 = k_2 = k_f$ und $r_1 = r_2 = r_3$.

γ -Faktor

Der γ -Faktor berücksichtigt die räumliche Verzerrung des Grundwasserströmungsfeldes durch die Packer sowie der Verstreubungen im Messabschnitt der Messsonde (KLOTZ 1977). Der für die eingesetzten Messsonden verwendete γ -Faktor wurde empirisch in Feldversuchsreihen sowie im Abgleich mit Messergebnissen aus konventionellen Untersuchungsergebnissen (Fluid-logging, Grundwassergleichen, etc.) ermittelt.

Literatur zur Berechnung der Filtergeschwindigkeit:

- BERGMANN, H. (1970): Über die Grundwasserbewegung im Filterrohr.- Diss. tech. Hochschule Graz 1968 - GSF Bericht **R 24**: 211S.; GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, München.
- KLOTZ, D. (1977): Berechnung der Filtergeschwindigkeit einer Grundwasserströmung aus Tracerdünnungsversuchen in einem Filterpegel.- GSF-Bericht **R 149**: 45 S., 24 Abb., 8 Tab.; GSF-Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München.
- (1978): α -Werte ausgebaute Bohrungen.- GSF- Bericht **R 176**: 119S., 12Abb., 100Tab.; GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, München.
- KLOTZ, D. (1991): Berechnete Durchlässigkeiten handelsüblicher Brunnenfilterrohre und Kunststoff-Kiesbelagfilter (Stand 1990) - GSF-Bericht **35/90**: 51 S., 21 Abb., 14 Tab.; GSF-Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München.
- MOSER, H., & RAUERT, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie.- in: Matthes, G. (Hrsg.): Lehrbuch der Hydrogeologie, **8**: 397S., 227 Abb., 32Tab.; Berlin.
- KLOTZ, D. (1971): Untersuchung von Grundwasserströmungen durch Modellversuche im Maßstab 1:1.- Geologia Bavarica **64**: 75-119, 33 Abb., 7 Tab.; München.

Literatur zum GFV-Messsystem:

- SCHÖTTLER, M. (2007): In-Situ-Messungen der horizontalen Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit für die Dimensionierung von Erdwärmesondenfeldern, geothermischen Brunnenanlagen und Wärmespeichern am Beispiel des GFV-Messsystems – In: Tagungsband „Der Geothermiekongress 2007“ 29.-31.Okt. 2007, Bochum Hrsg.: Geotherm.Vereinigung - Bundesverband Geothermie e.V., Geeste; ISBN 10: 3-932570-58-8.
- (2007): Ein neues Verfahren – Die Grundwasser-Fluss-Visualisierung (GFV). – energie | wasser-praxis 12/2007 – DVGW Jahresrevue – Hrsg.: DVGW e.V.; S. 32-37; 6 Abb.; wvgw Wirtschafts- und Verlagsges. Gas und Wasser mbH; Bonn.

FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): H GeoMess - Hinweise zur Anwendung geotechnischer und geophysikalischer Messverfahren im Straßenbau.- FGSV-Nr. **558**, Ausgabe 2007, 50 S., ISBN 978-3-939715-20-7, FGSV Verlag, Köln.

SCHÖTTLER, M. (2004): Erfassung der Grundwasserströmung mittels des GFV-Messsystems.- geotechnik **27** (2004) Nr.1; Deutsche Ges. f. Geotechnik; S.41-45; 8 Abb.; Verlag Glückauf, Essen.

- (1997): Meßbarkeit der Grundwasserbewegung durch Visualisierung der Strömung in Bohrbrunnen.- Diss. Univ. Köln; 119 S.; Shaker Verlag, Aachen.