

Martin Ziegler, Rebecca Schüller

**Energetische Einsparpotentiale
bei der Herstellung komplizierter
Untergeschosskonstruktionen mit
Hilfe des Vereisungsverfahrens**

F 2887

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

2014

ISBN 978-3-8167-9153-9

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

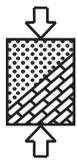
Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



Abschlussbericht

Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-11.5

Forschungsthema: „Energetische Einsparpotentiale bei der Herstellung komplizierter Untergeschosskonstruktionen mit Hilfe des Vereisungsverfahrens“

Kurztitel: Energetische Einsparpotentiale beim Vereisungsverfahren

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

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

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Rebecca Schüller

Weitere beteiligte Forschungseinrichtungen:

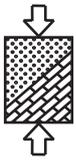
Geophysica Beratungsgesellschaft mbH
Lütticher Str. 32
52064 Aachen

Mitfinanzierende Stellen:

Wayss & Freytag Ingenieurbau AG
Bereich Mitte
Wiesenstraße 21 A II
40549 Düsseldorf

Züblin Spezialtiefbau GmbH
Bereich Nord
Bessemersstraße 42b
12103 Berlin

Deilmann-Haniel Shaft Sinking GmbH
Haustenbecke 1
44319 Dortmund



Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7-11.5 / II 3-F20-10-1-143)

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 Smith Consult GmbH,

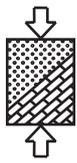
Herr Dipl.-Ing. Roland Jörger der Bilfinger Construction GmbH

und

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

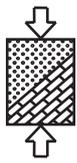
an. Dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung und den Mitgliedern des Beratergremiums sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Ebenso gedankt sei der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH für die programm-technische Unterstützung und Weiterentwicklung. Weiterhin sei der Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, der Züblin Spezialtiefbau GmbH für die finanzielle Unterstützung gedankt. Der Deilmann-Haniel GmbH sei an dieser Stelle sowohl für die finanzielle Unterstützung als auch für die Unterstützung mit Messdaten zum Projekt des Statentunnels in Rotterdam herzlich gedankt.

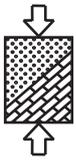


Inhaltsverzeichnis

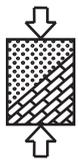
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vii
Symbolverzeichnis	viii
1 Einleitung	1
1.1 Veranlassung	1
1.2 Ziel des Forschungsvorhabens	1
2 Status Quo - Kühlleistung bei Vereisungsmaßnahmen	3
2.1 Richtwerte und Berechnungsansätze	3
2.2 Auswertung aktueller Bauprojekte	5
3 Theoretische Grundlagen zur Kühlleistungsermittlung	10
3.1 Grundlagen der Fluidmechanik	11
3.1.1 Laminare Rohrströmung	12
3.1.2 Turbulente Rohrströmung	12
3.1.3 Hydrodynamisch bzw. thermisch ausgebildete Rohrströmung	13
3.2 Grundlagen der Wärmeübertragung	15
3.2.1 Konduktion	15
3.2.2 Konvektion	15
3.2.3 Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten nach dem Prinzip der Ähnlichkeitstheorie	17
4 Berechnung der Nusselt-Zahl	19
4.1 Nusselt-Zahl bei der Rohrströmung	21
4.1.1 Laminare Strömung	21
4.1.2 Turbulente Strömung	21
4.1.3 Übergangsbereich der Strömung	22
4.2 Nusselt-Zahl bei der Strömung durch einen Ringspalt	22
4.2.1 Laminare Strömung	24
4.2.2 Turbulente Strömung	24
4.2.3 Übergangsbereich der Strömung	25
5 Numerisches Lösungsmodell	26
5.1 Das Programmsystem SHEMAT	26
5.2 Weiterentwicklungen im „freezing“- Modul	27



5.2.1	Vereinfachte Kühlleistungsermittlung	27
5.2.2	Betriebsvarianten der Erhaltungsphase	28
5.3	Weiterentwicklung von SHEMAT: „freezrefcap“- Modul	29
5.3.1	Grundlagen des numerischen Modells	29
5.3.2	Numerische Berechnung der Wärmeströme	31
6	Verifikation der Programmsysteme	36
6.1	Nachrechnung eines Modellversuchs	36
6.1.1	Versuchsaufbau und Eingangsparameter	36
6.1.2	Ergebnisse der Simulation mit dem „freezing“- Modul	39
6.1.3	Ergebnisse der Simulation mit dem „freezrefcap“- Modul	42
6.2	Nachrechnung eines realen Bauprojekts	46
7	Parameterstudie.....	54
7.1	Ausgangsmodell und –parameter	54
7.2	Einfluss der Bodenparameter	57
7.2.1	Einfluss der Grundwasserströmung	57
7.2.2	Einfluss des Porenanteils	58
7.2.3	Einfluss des Quarzgehalts.....	59
7.2.4	Einfluss der Grundwassertemperatur	60
7.3	Einfluss der Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteträgerkreislaufs	61
7.3.1	Einfluss der Geometrie des koaxialen Gefrierrohrs.....	61
7.3.2	Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Steigrohrs	62
7.3.3	Einfluss der Länge des Gefrierrohrs.....	62
7.3.4	Einfluss der Calciumchloridsole.....	63
7.3.5	Einfluss der Vorlauftemperatur	64
7.3.6	Einfluss des Durchflusses	64
7.4	Fazit der Parameterstudie.....	65
8	Energetische Optimierung von Vereisungsmaßnahmen.....	67
8.1	Ausgangsmodell und –parameter	67
8.2	Optimierung der Aufgefrierphase	68
8.3	Optimierung der Erhaltungsphase	72
8.3.1	Betrieb ohne Anpassung	72
8.3.2	Betrieb mit erhöhter Vorlauftemperatur	74
8.3.3	Intermittierender Betrieb	78
8.3.4	Bewertung der Ergebnisse	83



8.4	Vereinfachte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	84
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	91
10	Literaturverzeichnis.....	94



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	Schematische Darstellung einer Solevereisung (Buja 2004).....	3
Abbildung 2.2	Lageplan der Erweiterung und projektierte Gefrierkörper der U-Bahn Fürth (Pimentel und Anagnostou 2012).....	6
Abbildung 2.3	Baugrund und Vereisung am Hauptbahnhof Leipzig (Städling und Franz 2009)	7
Abbildung 2.4	Vergleich der mittleren erforderlichen Kühlleistungen in der Aufgefrierphase	8
Abbildung 2.5	Vergleich der mittleren erforderlichen Kühlleistungen in der Erhaltungsphase	8
Abbildung 3.1	Detail Gefrierrohr mit Rohrströmung	10
Abbildung 3.2	Eingebautes Gefrierrohr der Baustelle Wehrhahnlinie in Düsseldorf.....	10
Abbildung 3.3	Querschnitt des Geschwindigkeitsprofils einer laminaren Strömung (nach Truckenbrodt 1996).....	12
Abbildung 3.4	Querschnitt des Geschwindigkeitsprofils einer turbulenten Strömung (nach Truckenbrodt 1996).....	13
Abbildung 3.5	Hydrodynamischer Anlauf einer laminaren Strömung (nach Sigloch 2012) ..	14
Abbildung 3.6	Temperaturprofil im strömenden Fluid und Quotient λ_F/α (nach Baehr und Stephan 2006)	16
Abbildung 4.1	Definition der Rohrdurchmesser zur Berechnung des hydraulischen Durchmessers.....	23
Abbildung 4.2	Übersicht der Varianten der Wärmeübertragung im Ringspalt (nach Gnielinski 2006).....	23
Abbildung 5.1	Wärmestromdichten einer Zelle	27
Abbildung 5.2	Kopplung zwischen dem "freezrefcap"-Modul und SHEMAT	29
Abbildung 5.3	Gefrierrohrgeometrie und thermische Widerstände im „freezrefcap“-Modul (nach Mottaghy und Dijkshoorn 2012)	30
Abbildung 5.4	Grundlage des "freezrefcap"-Moduls im Fall „Flow“ (nach Mottaghy und Dijkshoorn 2012)	32
Abbildung 5.5	Schematische Darstellung der Bewegung der Temperaturpunkte im Rohr ..	33
Abbildung 5.6	Grundlage des "freezrefcap"-Moduls im Fall „No Flow“ (nach Mottaghy und Dijkshoorn 2012)	34
Abbildung 6.1	Aufbau und Geometrie des Großversuchs nach Sres (2010).....	37
Abbildung 6.2	Vergleich der gemessenen Kühlleistung dreier Versuche von Sres (2010) ..	38
Abbildung 6.3	Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 2) ohne Strömung.....	39
Abbildung 6.4	Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 1) ohne Strömung.....	40

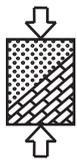


Abbildung 6.5	Vergleich der gemessenen und simulierten Kühlleistung ohne Strömung	40
Abbildung 6.6	Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 2) für $v = 1,5$ m/d	41
Abbildung 6.7	Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 1) für $v = 1,5$ m/d	41
Abbildung 6.8	Vergleich der gemessenen und simulierten Kühlleistung für $v = 1,5$ m/d.....	42
Abbildung 6.9	Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 2) ohne Strömung („freezrefcap“-Modul)	43
Abbildung 6.10	Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 1) ohne Strömung („freezrefcap“-Modul)	43
Abbildung 6.11	Vergleich der gemessenen und simulierten Kühlleistungen ohne Strömung	44
Abbildung 6.12	Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 2) für $v = 1,5$ m/d („freezrefcap“-Modul)	44
Abbildung 6.13	Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 1) für $v = 1,5$ m/d („freezrefcap“-Modul)	45
Abbildung 6.14	Vergleich der gemessenen und simulierten Kühlleistungen für $v = 1,5$ m/d..	45
Abbildung 6.15	Lage Statentunnel zwischen Start- und Endstation (Wenke und Willner 2008)	46
Abbildung 6.16	Dreidimensionale Darstellung des Frostkörpers mit Gefrierrohrnummern (nach Wenke und Willner 2008).....	47
Abbildung 6.17	Querschlagvereisung mit mobilen Kühlaggregat (Wenke und Willner 2008)	48
Abbildung 6.18	Übersicht der Lage der Gefrierrohre und Temperaturmessfühler im Modell	49
Abbildung 6.19	Vergleich der Temperaturverteilung im Boden in vertikaler Richtung (T_1)	50
Abbildung 6.20	Vergleich der Temperaturverteilung im Boden in horizontaler Richtung (T_4)	51
Abbildung 6.21	Vergleich der gemessenen und simulierten Kühlleistung des Querschlags 2	52
Abbildung 6.22	Vergleich der gemessenen und simulierten Kühlleistung des Querschlags 2 in Abhängigkeit der Gefrierrohrlänge	53
Abbildung 7.1	Querschnitt des Basissystem des Modells der Baugrubenwand (Wand).....	54
Abbildung 7.2	Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Aufgefrierzeit und die mittlere Kühlenergie	57
Abbildung 7.3	Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer bezogen auf ein System ohne Grundwasserströmung.....	58
Abbildung 7.4	Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer bezüglich des Ausgangssystems für $v = 0$ m/d in Abhängigkeit des Porenanteils.....	58
Abbildung 7.5	Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer bezüglich des Ausgangssystems für $v = 0$ m/d in Abhängigkeit des Quarzgehalts	59

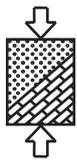


Abbildung 7.6	Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer bzgl. des Ausgangssystems für $v = 0$ m/d in Abhängigkeit der Grundwassertemperatur	60
Abbildung 7.7	Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer bezüglich des Ausgangssystems für $v = 0$ m/d in Abhängigkeit der Gefrierrohrgeometrie ..	61
Abbildung 7.8	Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer bzgl. des Ausgangssystems für $v = 0$ m/d in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Steigrohrs	62
Abbildung 7.9	Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer bzgl. des Ausgangssystems für $v = 0$ m/d in Abhängigkeit der Länge des Gefrierrohrs	63
Abbildung 7.10	Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer bzgl. des Ausgangssystems für $v = 0$ m/d in Abhängigkeit der verwendeten CaCl_2 -Sole	63
Abbildung 7.11	Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer bezüglich des Ausgangssystems für $v = 0$ m/d in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur.....	64
Abbildung 7.12	Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer bezüglich des Ausgangssystems für $v = 0$ m/d in Abhängigkeit des Durchflusses	65
Abbildung 8.1	Basissystem des Modells der Baugrubenwand zur optimierten Kühlleistungsermittlung	68
Abbildung 8.2	Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Aufgefrierzeit und die mittlere Kühlenergie	68
Abbildung 8.3	Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer bezogen auf ein System ohne Grundwasserströmung	69
Abbildung 8.4	Frostkörperentwicklung des Basissystems unter Einfluss von $v = 0,5$ m/d ...	69
Abbildung 8.5	Übersicht der untersuchten Optimierungsvarianten der Vorkühlung.....	70
Abbildung 8.6	Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Aufgefrierzeit verschiedener Optimierungssysteme	71
Abbildung 8.7	Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Gesamtkühlenergie der Aufgefrierdauer verschiedener Optimierungssysteme.....	71
Abbildung 8.8	Übersicht der Gefrierrohre und Sensorpunkte des numerischen Modells	73
Abbildung 8.9	Normierte Kühlenergie der Erhaltungsphase für die verschiedenen Optimierungsvarianten	73
Abbildung 8.10	Normierte Kühlenergie der Erhaltungsphase für die verschiedenen Optimierungsvarianten inklusive Deaktivierung der Vorkühlungsrohre	74
Abbildung 8.11	Temperaturverlauf des Sensorpunkts 1 (LUV) des Basissystems für unterschiedliche Vorlauftemperaturen in der Erhaltungsphase ($v = 0,5$ m/d)75	
Abbildung 8.12	Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Kühlleistung für einen Betrieb ohne Anpassung und mit einer erhöhten Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase 76	
Abbildung 8.13	Normierte Kühlleistung für eine Erhöhung der Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase für das Basissystem	77

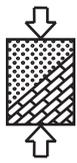


Abbildung 8.14 Normierte Kühlenergie der Optimierungsvarianten in der Erhaltungsphase für eine erhöhte Vorlauftemperatur bezogen auf einen unangepassten Betrieb 77

Abbildung 8.15 Zuordnung der Gefrierrohre und Sensorpunkte zu einer Rohrgruppe79

Abbildung 8.16 Temperaturverlauf des Sensorpunkts 1 im intermittierenden Betrieb für unterschiedliche minimale Grenztemperaturen und $v = 0$ m/d.....79

Abbildung 8.17 Einsparungen der Kühlenergie in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit und der minimalen Grenztemperatur im Vergleich zum Ausgangssystem.....80

Abbildung 8.18 Zuordnung der Gefrierrohre und Sensorpunkte zu Rohrgruppen81

Abbildung 8.19 Einsparungen der Kühlenergie in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit und der Rohrgruppenzuordnung im Vergleich zum Ausgangssystem82

Abbildung 8.20 Normierte Kühlenergie der Optimierungsvarianten in der Erhaltungsphase für den intermittierenden Betrieb bezogen auf einen unangepassten Betrieb....82

Abbildung 8.21 Energieeinsparungen verschiedener Betriebsvarianten in der Erhaltungsphase für das Basissystem in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit84

Abbildung 8.22 Entwicklung der variable Kosten während der Aufgefrierphase des Basissystems für verschiedene Fließgeschwindigkeiten86

Abbildung 8.23 Kosten der Aufgefrierphase für die verschiedenen Optimierungsvarianten ..87

Abbildung 8.25 Variable Kosten der Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Betriebsvarianten für die verschiedenen Optimierungsvarianten für $v = 0,75$ m/d.....89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6.1 Eingangswerte der Bodeneigenschaften des Modellversuchs für SHEMAT .37

Tabelle 6.2 Eingangswerte der Bodeneigenschaften der Querschlagvereisung des Statentunnels in Rotterdam für SHEMAT48

Tabelle 7.1 Eingangsparameter des Hokksundsands.....55

Tabelle 7.2 Eingangsparameter des Gefrierrohrs56

Tabelle 7.3 Eingangsparameter des Kältemittelkreislaufs56

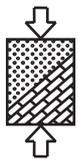
Tabelle 7.4 Geometrien der beiden verwendeten Gefrierrohre61

Tabelle 8.1 Optimale Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit.....76

Tabelle 8.2 Vergleich der Kühlenergie von Aufgefrier- und Erhaltungsphase für das Basissystem in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit.....83

Tabelle 8.3 Fixkosten der Teilleistungen für einen vereinfachten Kostenvergleich85

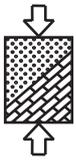
Tabelle 8.4 Variable Kosten der Teilleistungen für einen vereinfachten Kostenvergleich85



Symbolverzeichnis

Lateinischen Zeichen

A	[m ²]	Fläche
a	[m ² /s]	Temperaturleitfähigkeit
a, b	[-]	Parameter zur Beschreibung des ungefrorenen Wassergehalts
Co	[-]	Courant-Zahl
c _{v,F}	[J/(kgK)]	volumetrische Wärmekapazität des Fluids
c _{v,m}	[J/(m ³ K)]	volumetrische Wärmekapazität des Feststoffs
c _{v,w}	[J/(m ³ K)]	volumetrische Wärmekapazität des Wassers
d	[m]	Durchmesser
d _{A,a}	[m]	Außendurchmesser des Außenrohres
d _{A,i}	[m]	Innendurchmesser des Außenrohres
d _{i,a}	[m]	Außendurchmesser des Innenrohres
d _{i,i}	[m]	Innendurchmesser des Innenrohres
d _h	[m]	hydraulischer Durchmesser
d _z	[m]	vertikale Gitternetzweite
E	[-]	Impedanzfaktor für die Durchlässigkeit des gefrorenen Bodens
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung (g = 9,81 m/s ²)
grad T	[K]	Temperaturgradient
i, j, k	[-]	Zellindex
k	[m ²]	Permeabilität
k _f	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
L ₀	[m]	charakteristische Rohrlänge
Nu	[-]	Nusselt-Zahl
Nu _m	[-]	mittlere Nusselt-Zahl
Nu _x	[-]	lokale Nusselt-Zahl
n	[-]	Porenanteil
P	[W]	Kühlleistung
Pe	[-]	Péclet-Zahl
Pr	[-]	Prandtl-Zahl
Q	[m ³ /h]	Durchfluss
Q _F /q _F	[m ³ /h]	Durchfluss des Fluids



\dot{Q}	[W]	Wärmestrom
\dot{Q}_d	[W]	Wärmestrom im Vorlauf
\dot{Q}_e	[W]	Wärmestrom zwischen Steig- und Fallrohr
$\dot{Q}_{\text{Konduktion}}$	[W]	Wärmestrom infolge Wärmeleitung
\dot{Q}_s	[W]	Wärmestrom zwischen Boden und Steigrohr
\dot{Q}_u	[W]	Wärmestrom im Rücklauf
q	[%]	Quarzgehalt
\dot{q}_t	[W/m ³]	volumetrischer Wärmestrom
q_v	[kWh/m ³]	volumetrischer Kühlenergiebedarf
\dot{q}	[W/m ²]	Wärmestromdichte
R	[K/W]	thermischer Widerstand
R_{innen}	[K/W]	thermischer Gesamtwiderstand
$R_{\text{außen}}$	[K/W]	thermischer Gesamtwiderstand
$R_{\text{konv,außen}}$	[K/W]	konvektiver Teilwiderstand an der Innenseite des Steigrohres
$R_{\text{konv,innen}}$	[K/W]	konvektiver Teilwiderstand an der Innenseite des Fallrohres
$R_{\text{konv,innen}'}$	[K/W]	konvektiver Teilwiderstand an der Außenseite des Fallrohres
$R_{\text{kond,außen}}$	[K/W]	konduktiver Teilwiderstand des Steigrohres
$R_{\text{kond,innen}}$	[K/W]	konduktiver Teilwiderstand des Fallrohres
Re	[-]	Reynolds-Zahl
Re_{krit}	[-]	kritische Reynolds-Zahl
r	[m]	Radius
$r_{\text{außen}}$	[m]	Innenradius des Außenrohrs
$r_{\text{außen}'}$	[m]	Außenradius des Außenrohrs
r_b	[m]	Bohrlochradius
r_{innen}	[m]	Innenradius des Innenrohrs
$r_{\text{innen}'}$	[m]	Außenradius des Innenrohrs
S_s	[m ² /g]	massenbezogene spezifische Oberfläche
T	[°C]	Temperatur
T_B	[°C]	Bodentemperatur
T_F	[°C]	Fluidtemperatur
$T_{F,m}$	[°C]	mittlere Fluidtemperatur
$T_{F,RL}$	[°C]	Fluidtemperatur im Rücklauf
$T_{F,VL}$	[°C]	Fluidtemperatur im Vorlauf



T_w	[°C]	Wandtemperatur
ΔT	[K]	Temperaturdifferenz
t	[s]	Zeit
v	[m/s]	Geschwindigkeit
v_f	[m/s]	Filtergeschwindigkeit nach Darcy
w	[-]	Wassergehalt
w_u	[-]	ungefrorener Wassergehalt
x	[m]	Koordinate in x-Richtung
x_e	[m]	Einlaufstrecke
y	[m]	Koordinate in y-Richtung
z	[m]	Koordinate in z-Richtung

Griechische Zeichen

α	[W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient
α_s	[Pa ⁻¹]	Kompressibilität des Gesteins
γ	[-]	Interpolationsbeiwert
η	[Ns/m ²]	dynamische Viskosität
λ	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit des Bodens
λ_F	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit des Fluids
λ_s	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs
λ_q	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit von Quarz
λ_M	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit der restlichen Bodenbestandteile
ξ	[-]	Druckverlustbeiwert
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ρ_d	[kg/m ³]	Trockendichte des Bodens
ρ_s	[kg/m ³]	Korndichte
ρ_w	[kg/m ³]	Dichte von Wasser
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität



1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Das Vereisungsverfahren im Allgemeinen ist eine Bauhilfsmaßnahme, die die Herstellung eines Frostkörpers mit statisch tragender und abdichtender Funktion unter komplizierten geologischen sowie hydrologischen Randbedingungen ermöglicht. Dabei ist nicht nur die Flexibilität und Reversibilität des Verfahrens als Vorteil zu betrachten, sondern auch die zuverlässige Durchführung und Überwachung. Daher wird das Vereisungsverfahren mittlerweile nicht mehr nur im Bereich des Tunnelbaus, sondern auch bei der Sicherung von komplizierten Baugruben für Hoch- und Ingenieurbauwerke eingesetzt. Im Allgemeinen wird in Abhängigkeit des Kältemittels zwischen der Solevereisung mit einer Calciumchloridlösung und der Stickstoffvereisung mit flüssigem Stickstoff unterschieden. Die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojekts konzentrieren sich auf die Solevereisung.

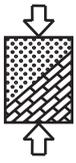
Ein Ausschlusskriterium für den planmäßigen Einsatz stellen oftmals der falsch eingeschätzte Energieverbrauch und die damit verbundenen Kosten für die gesamte Vereisungsmaßnahme dar, die oftmals insbesondere bei einer vorhandenen Grundwasserströmung überschätzt wird. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Erweiterung des Vereisungsverfahrens zur umweltverträglichen Herstellung komplizierter Untergeschosskonstruktionen bei strömendem Grundwasser“ (Ziegler et al. 2010) konnte bereits gezeigt werden, dass durch eine strömungsangepasste Gefrierrohranordnung deutliche Verringerungen der Aufgefrierzeit erreicht werden können. Eine direkte Übertragung der Ergebnisse auf den Energieverbrauch ist damit aber noch nicht möglich, da die Erhaltungsphase bislang vernachlässigt wurde. Für eine realistische Vorhersage des Energieverbrauchs ist aber insbesondere die Erhaltungsphase von Bedeutung, da diese einen Großteil des Gesamtenergieverbrauchs ausmacht.

1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Das Ziel dieses Forschungsprojekts ist die zeitliche und energetische Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Vorfeld der Ausführung, um den planmäßigen Einsatz durch eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu steigern. Dazu ist die erforderliche Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme nicht nur für die Aufgefrierphase sondern vor allem für die Erhaltungsphase zu bestimmen. Da die erforderliche Kühlleistung in der Aufgefrierphase ihren Maximalwert erreicht, muss damit die Gefrieranlage bzw. das Kühlaggregat dimensioniert werden. Die erforderliche Kühlleistung in der Haltephase ist hingegen wichtig für die Vorhersage des gesamten Energieverbrauchs einer Vereisungsmaßnahme.

In einem ersten Schritt wurden die bisherigen Methoden, Richtwerte und Berechnungsansätze zur Abschätzung der erforderlichen Kühlleistung bzw. des Energieverbrauchs einer Vereisungsmaßnahme zusammengefasst.

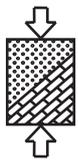
Darauf aufbauend wurden numerische Lösungsmodelle zur Bestimmung der Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme erarbeitet und in das vorhandene Programmsystem (SHEMAT)



implementiert. Zur Verifizierung der Lösungsmodelle wurde sowohl ein Modellversuch als auch ein reales Baustellenprojekt nachgerechnet.

Im Anschluss wurden die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Aufgefrierzeit und die Kühlleistung im Rahmen einer Parameterstudie ermittelt. Weiterhin wurden Optimierungsvarianten für das System der Vereisung einer Baugrubenwand simuliert und die Kühlleistung sowohl für die Aufgefrier- als auch für die Erhaltungsphase bestimmt. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Steuerungsvarianten in der Erhaltungsphase untersucht und abschließend bewertet.

Mit dem vorliegenden Programmsystem ist es somit möglich, Vereisungsmaßnahmen im Vorfeld der Ausführung nicht nur im Hinblick auf die Aufgefrierzeit, sondern auch auf den Energieverbrauch zu simulieren und zu optimieren.



2 Status Quo - Kühlleistung bei Vereisungsmaßnahmen

Die Wirtschaftlichkeit einer Vereisungsmaßnahme hängt maßgeblich von der erforderlichen Kühlleistung während der Aufgefrier- und der Erhaltungsphase ab. Denn auf dieser Grundlage wird die Gefrieranlage dimensioniert und ermöglicht somit eine fundierte Kostenermittlung für die gesamte Maßnahme mit verlässlichen Werten. Die Kühlleistung hängt von vielen Einflussfaktoren, wie beispielsweise den thermischen und physikalischen Bodeneigenschaften, dem eingesetzten Kälteüberträger sowie den Grundwasserverhältnissen, ab. Dass der Einfluss dieser Parameter im Einzelnen nicht bekannt ist, stellt in diesem Zusammenhang ein Problem dar.

Das gesamte Kühlsystem, das bei einer Solevereisung zum Einsatz kommt, besteht aus drei miteinander verbundenen Kreisläufen, dem Kälteüberträgerkreislauf, dem Kältemittelkreislauf und dem Kühlwasserkreislauf (s. Abbildung 2.1).

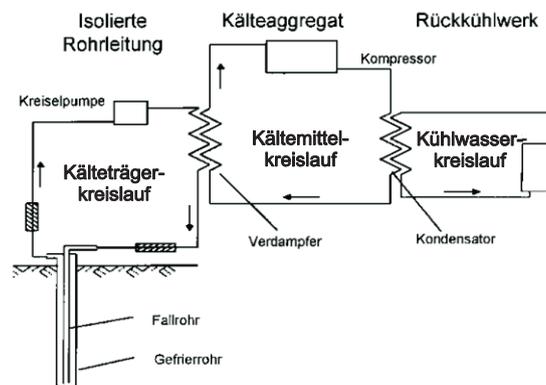


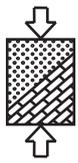
Abbildung 2.1 Schematische Darstellung einer Solevereisung (nach Buja 2004)

Die im Kälteüberträgerkreislauf in isolierten Rohrleitungen zirkulierende Sole wird im Verdampfer durch Kontakt mit dem Kältemittelkreislauf im Kühlaggregat gekühlt. In den Aggregaten werden vorwiegend Ammoniak oder Kohlendioxid als Kältemittel eingesetzt. Die während der Kühlung der Sole freiwerdende Wärme wird Rückkühlwerken mit Wasser- oder Luftkühlung zugeführt. Da die Kälteaggregate als Wärmepumpen fungieren, entspricht die Kühlleistung einer Solevereisung unter Berücksichtigung der technischen Verluste in etwa der elektrischen Leistung der Kältemaschine (Orth 2009; Buja 2004).

2.1 Richtwerte und Berechnungsansätze

In der Literatur sind verschiedene meist aus dem Gefrierschachtbau stammende Richtwerte und Ansätze zur Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme dokumentiert. Die angegebenen Richtwerte geben nur die wirkliche Gefrierleistung an, also die Wärmemenge, die dem Boden zum Gefrieren entzogen werden muss. Eine Berücksichtigung der Verluste innerhalb des Gefrieraggregats bzw. der Rohrleitungslängen außerhalb des Bodens findet nicht statt. Im Folgenden sind einige Richtwerte verschiedener Autoren zusammengestellt.

Harris (1995) gibt für eine gebräuchliche Soletemperatur von -30°C eine erforderliche Kühlleistung von bis zu 400 kcal/h pro laufenden Meter Gefrierrohr an. Dies entspricht in



etwa einer Leistung von 0,464 kW/m. Andersland und Ladanyi (2004) geben ebenfalls für eine Soletemperatur von -30°C hingegen einen Wert von 0,1 kW/m bis 0,23 kW/m an.

Zur fachgerechten Dimensionierung einer Gefrieranlage ist nach Braun et al. (1979) für eine Soletemperatur von -23°C mindestens eine Kühlleistung von 165 kcal/h pro Quadratmeter Gefrierrohrfläche anzusetzen. Für einen üblichen Außendurchmesser eines Gefrierrohrs von 108 mm entspricht dies in etwa einer Kühlleistung von 0,065 kW/m. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass aus der Erfahrung eine mehr als doppelt so hohe Kühlleistung erforderlich sein kann. Dies würde zu Werten von 0,130 kW/m und größer führen.

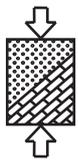
Ständer (1967) gibt für eine Soletemperatur von -25°C einen Wert von 100 bis 160 kcal/h pro laufenden Meter Gefrierrohr als Kühlleistung an. Dies entspricht in etwa einer Kühlleistung von 0,116 kW/m bis 0,186 kW/m. Er geht dabei zunächst von einem stationären Zustand aus und berücksichtigt aber als einziger der genannten Autoren eine mögliche Grundwasserströmung über einen aus empirischen Werten gewonnenen Zuschlag.

Neben den vorgestellten Richtwerten, die lediglich für eine bestimmte Soletemperatur gelten, existieren allgemein gehaltene Ansätze zur Bestimmung der Kühlleistung, die über eine Volumenberechnung des zu gefrierenden Bodens zumindest zum Teil örtliche Gegebenheiten berücksichtigen. Beispielsweise berücksichtigt Huder (1979) bei der vereinfachten Ermittlung der erforderlichen Kühlleistung die Wärmekapazitäten der verschiedenen Bodenphasen sowie die freiwerdende latente Schmelzwärme. Weiterhin gibt er aber auch eine Faustformel zur Abschätzung der Kühlleistung an, die allein vom Wassergehalt des Bodens abhängt. Die ursprüngliche von Huder (1979) aufgestellte Gleichung ermittelt den Kühlleistungsbedarf in der Einheit kcal/dm³. Durch eine Umrechnung in SI-Einheiten ergibt sich Gleichung (2-1).

$$q_v \text{ [kWh/m}^3\text{]} = (2,56 \sim 3,26) \cdot w \text{ [%]} \quad (2-1)$$

Die Berechnung der erforderlichen Kühlleistung wurde auch bereits von Cudmani und Nagelsdiek (2006) mittels FE-Berechnungen durchgeführt, um das Kälteaggregat zu dimensionieren. Dabei wurden jedoch lediglich Verhältnisse ohne Grundwasserströmung betrachtet.

Die zu Anfang bereits beschriebene Vielzahl an Einflussfaktoren auf die erforderliche Kühlleistung deutet bereits auf die Komplexität des Problems bei einer einfachen Abschätzung hin. Die aufgeführten Richtwerte und Berechnungsansätze vernachlässigen einen Großteil dieser Einflussfaktoren. Außerdem streuen die empfohlenen Werte für die Kühlleistung stark in einem Bereich von 0,065 kW/m bis 0,464 kW/m. Ein Bezug zur betrachteten Phase der Vereisungsmaßnahme ist ebenfalls nicht zu finden. Unter diesen Voraussetzungen eignen sich die angegebenen Richtwerte und Berechnungsansätze nicht für eine konkrete Abschätzung der erforderlichen Kühlleistung. Die aus dem Schachtbau stammenden Richtwerte können nicht ohne eine Anpassung auf Vereisungsmaßnahmen im Bereich des Tunnel- oder Hochbaus übertragen werden, da die betrachteten Gefrierrohrängen und Einsatzzeiträume sich deutlich unterscheiden. Dies wird auch beim Vergleich des Richtwerts von Harris (1995), der eher dem Tunnelbau zuzuordnen ist, mit den Richtwerten der anderen genannten Autoren deutlich. Generell ist damit zu rechnen, dass die Richtwerte für den Tunnelbau deutlich über denen für den Schachtbau liegen.



2.2 Auswertung aktueller Bauprojekte

Die Auswertung der Daten aktueller Bauprojekte bietet eine weitere Möglichkeit, um Anhaltswerte für die erforderliche Kühlleistung von Vereisungsmaßnahmen abzuschätzen. Anhand der installierten Kühlleistung und der Randbedingungen einer Vereisungsmaßnahme können Rückschlüsse auf die Kühlleistung gezogen werden.

Im Folgenden wird zunächst eine Auswahl der betrachteten Projekte kurz vorgestellt und die Kühlleistungsermittlung erläutert. Im Anschluss werden die Ergebnisse aller Projekte zusammenfassend bewertet.

Modellversuch der ETH Zürich (Sres°2010)

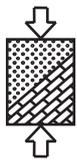
Im Rahmen der Arbeit von Sres (2010) wurde zur Überprüfung eines numerischen Modells zur dreidimensionalen thermo-hydraulischen Modellierung einer Vereisung unter Einfluss einer Grundwasserströmung ein Modellversuch entwickelt, der in Kapitel 6.1 näher erläutert wird. In dem durchgeführten Großversuch wurde ein homogener Sandboden in eine wasserdichte und thermisch isolierte PVC-Wanne mit Abmessungen von 1,3x1,0x1,3 [m³] eingebracht. Die installierte Kälteanlage konnte bei einer angestrebten Vorlauftemperatur von -30°C eine maximale Leistung von 2,1 kW aufbringen. Insgesamt waren drei Gefrierrohre mit einer Länge von jeweils 1,3 m über einen Sammelblock mit den Verteilerleitungen und dem Kälteaggregat verbunden.

Aus der Anlagendimensionierung ergibt sich bei einer Gesamtgefrierrohlänge von 3,9 m eine mittlere Kühlleistung von 0,538 kW/m. Aus der in den Versuchen ermittelten Kühlleistung von ca. 1 kW nach Abzug der Verluste von ca. 36% eine mittlere Kühlleistung von 0,256 kW/m. Diese Differenz, die sich zum Teil aus den Verlusten ergibt, zeigt, dass die gesamte Kapazität einer Gefrieranlage nicht immer automatisch genutzt wird.

Nord-Süd Stadtbahn Köln

Im Rahmen des Baus der Nord-Süd Stadtbahn in Köln wurde zum einen ein Stationsbauwerk im Schutze zweier Vereisungskörper bergmännisch aufgefahren. Zum anderen wurden 4 Querschläge mit Hilfe des Vereisungsverfahrens hergestellt. Das gesamte Stationsbauwerk wurde im Bereich quartärer mitteldicht bis dicht gelagerter Sande und Kiese mit einer Mächtigkeit von 40 m errichtet, die von tertiären Sanden und Feinsanden unterlagert werden. Während der Baumaßnahme kamen gleichzeitig bis zu drei Kälteaggregate mit einer Gesamtleistung von 1000 kW zum Einsatz, die eine 30-prozentige CaCl₂-Sole auf eine Vorlauftemperatur von -35°C kühlten.

Aus der thermischen Berechnung konnten die Netto-Installationsleistungen sowohl für die Aufgefrier- als auch die Erhaltungsphase ermittelt werden. Durch einen Sicherheitsaufschlag von 30% zur Berücksichtigung einer Grundwasserströmung wurden die Kühlleistungen pauschal in Bruttoinstallationsleistungen umgerechnet. Für die Querschläge ergaben sich somit für die Aufgefrierphase mittlere Kühlleistungen von 0,156 kW/m bis 0,282 kW/m. In der Erhaltungsphase lagen die Werte deutlich niedriger im Bereich von 0,052 kW/m bis 0,166 kW/m. Für die beiden Längsvortriebe wurden mittlere Kühlleistungen von 0,372 kW/m und 0,364 kW/m ermittelt. In der Erhaltungsphase wurden Werte von 0,139 kW/m und 0,198 kW/m berechnet.



Bauabschnitt 3.1.1 der U-Bahn in Fürth

Der Anschluss zwischen dem bergmännischen Vortrieb bis zur Haltestelle „Klinikum“ und dem Ende des in offener Bauweise hergestellten Tunnels in Form einer Kaverne im Bereich hinter der Haltestelle „Stadthalle“ wurde mit Hilfe einer Vereisung von Kappen über den Ausbruchquerschnitt verbunden (s. Abbildung 2.2).

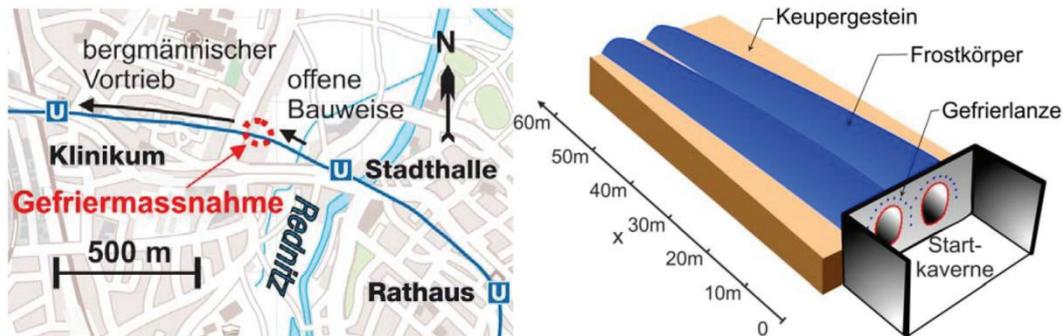


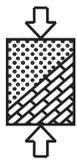
Abbildung 2.2 Lageplan der Erweiterung und projektierte Gefrierkörper der U-Bahn Fürth (Pimentel und Anagnostou 2012)

Das für den Tunnelvortrieb relevante Gestein wird durch fein- bis mittelkörnige Sandsteine unterschiedlicher Festigkeit gebildet. Eine für die neue Tunneltrasse relevante Ausnahme bildet das westlich der Haltestelle „Stadthalle“ gelegene Rednitztal. Vom westlichen Talrand fällt der Sandstein schnell bis auf eine Tiefe von 15 m unterhalb der GOK im Talgrund ab. Überlagert wird der Sandstein an dieser Stelle von enggestuften quartären Sand- und Sand-Kiesablagerungen mit einem Feinkornanteil von 5 %, die lokal Schluffschlieren aufweisen. Im Übergangsbereich zum Sandstein finden sich vermehrt größere Einlagerungen in der sandigen Matrix. Die Grundwasserfließgeschwindigkeiten vor der Bauausführung lagen Messungen zufolge im Bereich von 0,14 m/d und 1,25 m/d. Der Frostkörper wurde mit 23 Gefrierrohrbohrungen mit einer maximalen Länge von 56 m und einem Abstand von 1 m hergestellt. Es kamen zwei Gefrieraggregate mit einer Kühlleistung von jeweils 465 kW zum Einsatz, die eine 30-prozentige CaCl_2 -Sole auf eine Vorlauftemperatur von -40°C abkühlten. In der Erhaltungsphase wurden sowohl ein intermittierender Betrieb als auch eine Drosselung der Leistung vorgenommen (Bayer 2002; Sieler und Pirkl 2002; Pimentel und Anagnostou 2012).

Allein aus der Anlagendimensionierung ergibt sich eine mittlere Kühlleistung von 0,722 kW/m. Die Ergebnisse der thermischen Berechnungen weisen nach Sieler und Pirkl (2002) hingegen deutliche Unterschiede zur installierten Kühlleistung auf. Mit einer Kühlleistung von 355 kW in der Aufgefrierphase ergibt sich eine mittlere Kühlleistung von 0,276 kW/m. Eine Kühlleistung von 175 kW in der Erhaltungsphase führt zu einer mittleren Kühlleistung von 0,136 kW/m. Die Unterschiede zwischen installierter und berechneter Leistung sind möglicherweise unter anderem durch Sicherheitsreserven aufgrund der schwankenden Grundwasserströmung zu begründen.

Unterquerung des Hauptbahnhofs am City-Tunnel Leipzig

Beim Bau der zweiröhrigen Tunnelstrecke zur Verbindung der beiden Kopfbahnhöfe „Bayerischer Bahnhof“ im Süden und „Hauptbahnhof Leipzig“ im Norden der Stadt war die Unterquerung des historischen Gebäudes des Leipziger Hauptbahnhofs eine große



Herausforderung. Zur Sicherung des Gebäudes und zur Aufrechterhaltung eines störungsfreien Schienenverkehrs sowie Geschäftsbetriebs wurde ein Teilstück des Stationsbauwerks bergmännisch im Schutze einer Bodenvereisung mit einer Wasserhaltung hergestellt (s. Abbildung 2.3).

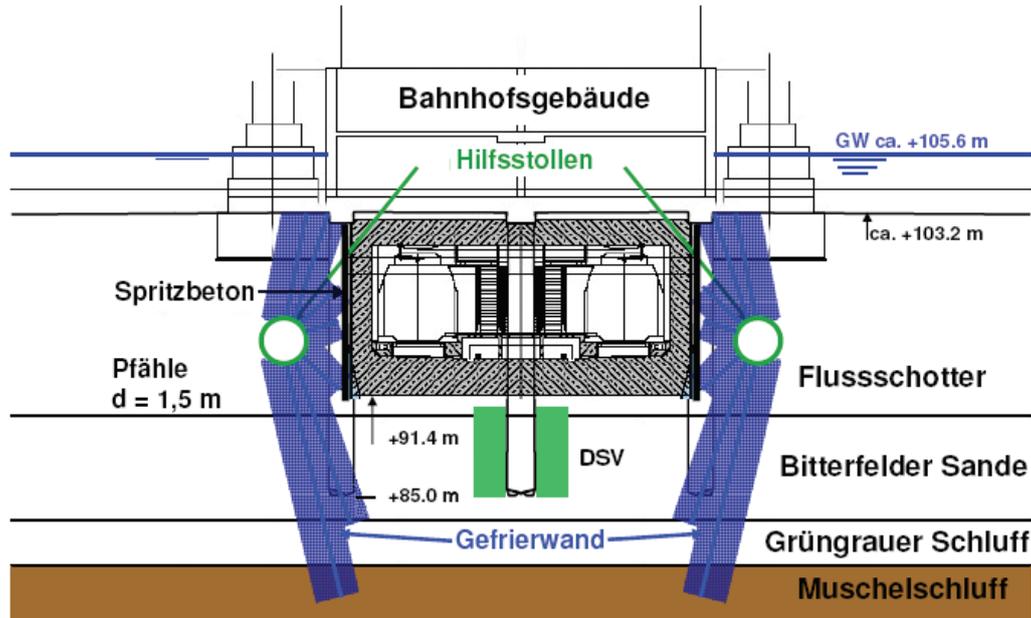


Abbildung 2.3 Baugrund und Vereisung am Hauptbahnhof Leipzig (Städling und Franz 2009)

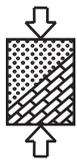
Der Untergrund besteht aus mitteldicht bis dicht gelagerten Kiesen, die als Flusssschotter bezeichnet werden. Darunter schließen sich die sogenannten Bitterfelder Sande an, die ebenfalls mitteldicht bis dicht gelagert sind. Diese werden von zwei Schluffschichten unterlagert, wobei die untere Schicht des Muschelschluffs als Grundwasserstauer wirkt.

Der Großteil des Frostkörpers lag im Bereich der Schichten aus Flusssschotter und Bitterfelder Sanden. Die insgesamt 1.071 Gefrierrohrbohrungen wurden aus zwei Hilfsstollen abgeteuft. Insgesamt wurde mit drei Kühlaggregaten mit einer Leistung von jeweils 360 kW die Vorlauftemperatur auf -35°C abgekühlt. Um die maximale Gefrierleistung zu begrenzen, wurden die Aufgefrierphasen der beiden Stollen zeitlich versetzt. Die maximal mögliche mittlere Kühlleistung während der Aufgefrierphase beträgt somit $0,262 \text{ kW/m}$. In der Erhaltungsphase lag die mittlere Kühlleistung bei voller Leistung hingegen bei $0,131 \text{ kW/m}$ (Bruns et al. 2010; Städling und Franz 2009).

Zusammenfassung und Auswertung der Ergebnisse

Die aus den Projektdaten bestimmten mittleren Kühlleistungen werden getrennt nach Aufgefrier- und Erhaltungsphase bewertet. Bei Projekten, die aufgrund der geringen Datenbasis keine Unterscheidung der beiden Phasen ermöglichen und bei denen die Kühlleistung auf Basis der gesamten installierten Leistung angesetzt wurde, werden die ermittelten mittleren Kühlleistungen der Aufgefrierphase zugeordnet.

Abbildung 2.4 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse der mittleren Kühlleistungen während der Aufgefrierphase. Es wird deutlich, dass nahezu alle Ergebnisse im Bereich zwischen $0,2 \text{ kW/m}$ und $0,4 \text{ kW/m}$ liegen. Der Mittelwert liegt bei $0,29 \text{ kW/m}$. Der aus der Literatur bestimmte Streubereich kann somit näher eingegrenzt werden. Eine klare Abhängigkeit



der mittleren Kühlleistung von spezifischen Kenngrößen, wie der Bodenart oder einer vorhandenen Grundwasserströmung, ist auf Grundlage der Datenbasis leider nicht zu erkennen. Weiterhin ergibt sich der Mittelwert durch eine arithmetische Mittelwertbildung. Eine Gewichtung der verschiedenen Maßnahmen über die Bauzeit wurde nicht durchgeführt.

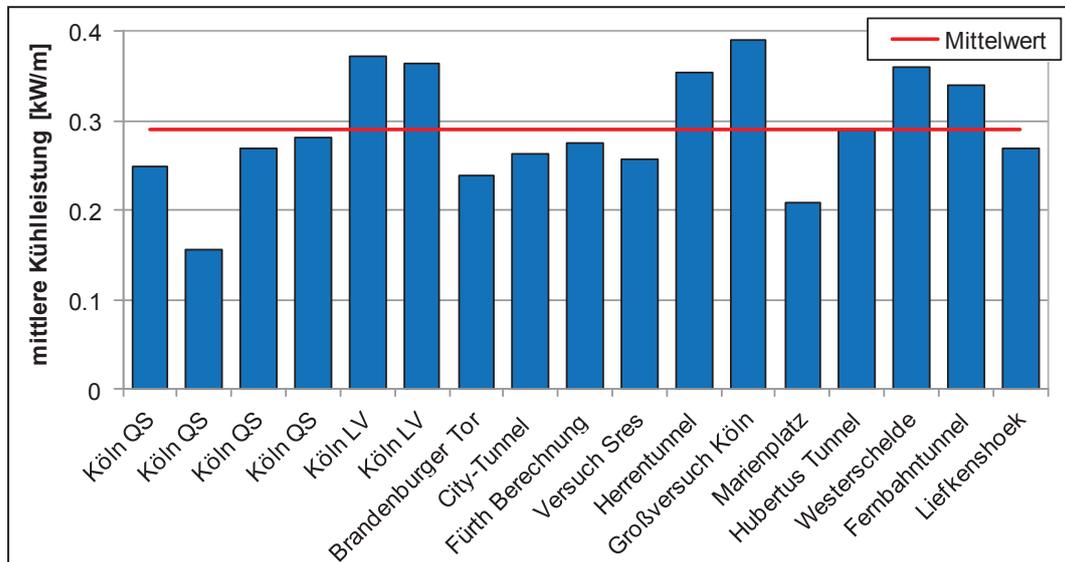


Abbildung 2.4 Vergleich der mittleren erforderlichen Kühlleistungen in der Aufgefrierphase

Die Auswertung der mittleren Kühlleistungen der Erhaltungsphase ergibt niedrigere Werte (s. Abbildung 2.5), die unter anderem durch Betriebsvarianten, wie den intermittierenden Betrieb, entstehen können. Die mittlere Kühlleistung der Erhaltungsphase liegt somit bei 0,13 kW/m und entspricht in etwa 45% der mittleren Kühlleistung der Aufgefrierphase.

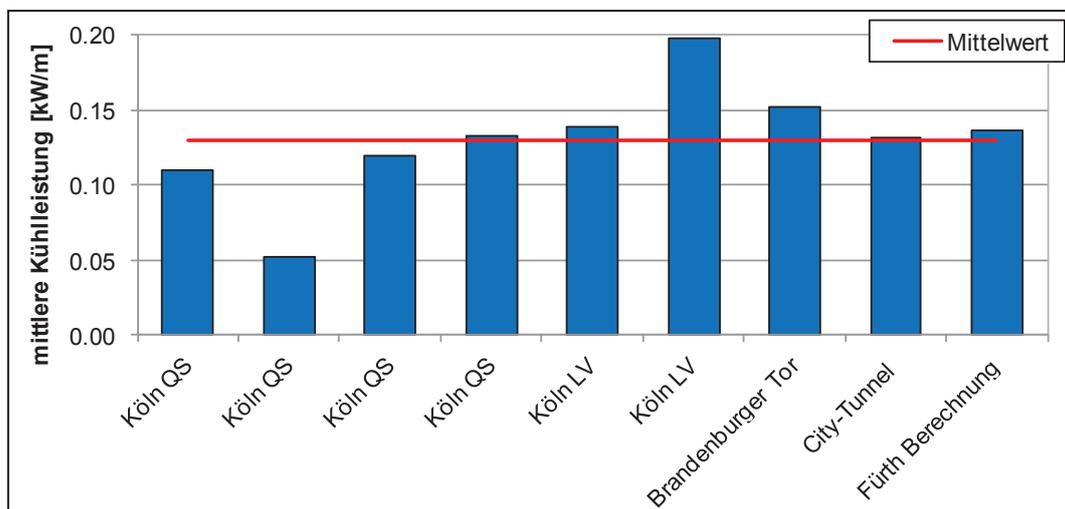
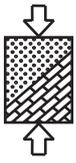


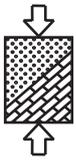
Abbildung 2.5 Vergleich der mittleren erforderlichen Kühlleistungen in der Erhaltungsphase

Die Beispiele des Modellversuchs von Sres und des Projekts der U-Bahnlinie in Fürth haben bereits gezeigt, dass die gesamt installierte Leistung nicht immer vollständig genutzt wird. Grund hierfür sind zum einen Sicherheitsreserven, die zur Deckung der Verluste in den Rohrleitungen dienen, die nach Makowski (1986) bis zu 35% des Gesamtenergieverbrauchs betragen können. Zum anderen werden Kälteaggregate nicht für eine bestimmte Maßnahme angeschafft, sondern kommen mehrfach zum Einsatz und sind daher oft überdimensioniert.



Bei zu großen Kälteleistungen pendeln sich die Kälteaggregate im Betrieb selbstständig ein (Ständer 1967). In wie weit sich dies auf den Wirkungsgrad des Kälteaggregats auswirkt, ist bislang nicht quantifiziert.

Vorhandene Mehrinstallationen durch überdimensionierte Gefrieranlagen konnten in der Auswertung der Projekte nicht berücksichtigt werden, so dass die Wertebereiche für die mittlere Kühlleistung für die Aufgefrierphase von 0,2 kW/m bis 0,4 kW/m und für die Erhaltungsphase von 0,05 kW/m bis 0,2 kW/m nur als grobe Anhaltswerte herangezogen werden dürfen. Eine detaillierte und realitätsnahe Ermittlung der Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme erfordert somit eine analytische bzw. numerische Betrachtung.



3 Theoretische Grundlagen zur Kühlleistungsermittlung

Für eine realitätsnahe Ermittlung der erforderlichen Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme müssen die Wärmetransportprozesse innerhalb eines Gefrierrohrs und zwischen Gefrierrohr und umgebendem Medium betrachtet werden.

Der Aufbau eines Gefrierrohrs für eine Solevereisung ist exemplarisch in Abbildung 3.1 dargestellt. Im Allgemeinen bestehen Gefrierrohre aus zwei koaxial angeordneten Rohren, einem äußeren Steigrohr aus Stahl und einem inneren, etwas kürzeren Fallrohr aus Polyethylen (PE). Der Zulauf des Kälteträgers erfolgt durch das innere Fallrohr. Im Ringraum strömt der Kälteträger wieder zurück, entzieht dem anstehenden Boden kontinuierlich Wärme und wird somit erwärmt.

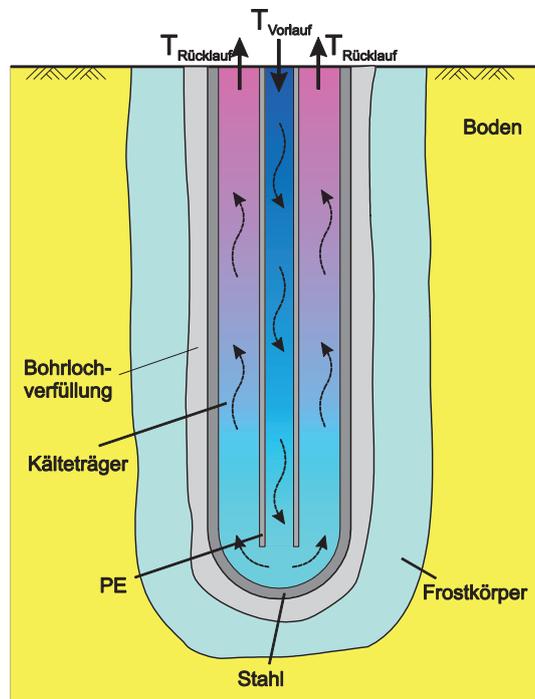


Abbildung 3.1 Detail Gefrierrohr mit Rohrströmung

Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft die Anschlüsse eines Gefrierrohrs an die Gefrieranlage über die Vor- und Rücklaufleitungen.

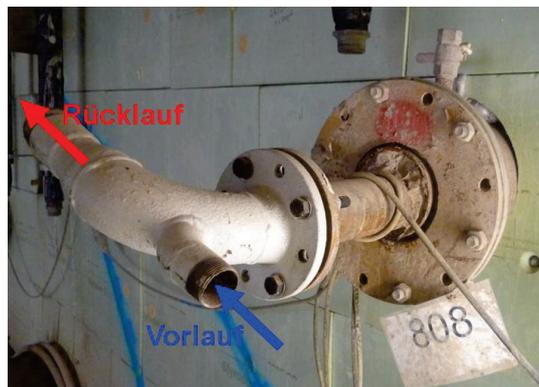
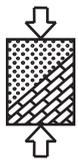


Abbildung 3.2 Eingebautes Gefrierrohr der Baustelle Wehrhahnlinie in Düsseldorf



Um die Wärmetransportprozesse im Bereich des Gefrierrohrs realistisch abbilden zu können, sind zum einen die Grundlagen der Fluidmechanik zur Beschreibung der Strömungsprozesse im Gefrierrohr relevant. Zum anderen sind zur Beschreibung des Wärmeentzugs durch das Gefrierrohr die Grundlagen der Wärmeübertragung von Bedeutung.

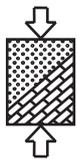
3.1 Grundlagen der Fluidmechanik

Im Fall der hier betrachteten Bodenvereisung, wie auch in vielen weiteren technischen Anwendungen, fließt ein Fluid durch Rohrleitungen. Dabei handelt es sich um eine reale, also eine reibungsbehaftete, Strömung, zu deren Aufrechterhaltung eine bestimmte Energie aufgebracht werden muss, die von der Viskosität des Fluids abhängig ist.

Die Viskosität beschreibt die Eigenschaft eines fließfähigen Stoffes, in Abhängigkeit der Verformungsgeschwindigkeit Spannungen aufzunehmen. Sie ist damit ein Maß für die durch innere Reibung bestimmte Verschiebbarkeit der Fluidteilchen gegeneinander. Im Allgemeinen ist die Viskosität eine von Druck und Temperatur abhängige Stoffgröße. Bei Flüssigkeiten ist die Abhängigkeit vom Druck im Gegensatz zu einer starken Abhängigkeit von der Temperatur allerdings vernachlässigbar klein. Zunehmende Temperaturen führen gewöhnlich zu einer Verringerung der Viskosität eines Fluids. Erklärt werden kann dies durch die Reduzierung der Kohäsionskräfte zwischen den Fluidteilchen und der damit verbundenen geringeren Bewegungsbehinderung in Strömungsvorgängen (Truckenbrodt 1996; Sigloch 2012).

Bei einer Rohrströmung kommt es im Grenzbereich zwischen strömendem Fluid und starrer Wand zu einem Anhaften angrenzender Fluidschichten an die Wand, da die Fluidschicht abgebremst wird. Diese Erscheinung als Folge der Adhäsion wird Haftbedingung genannt. Diese Anhaftung tritt nur in einem geringen Abstand zur Wand auf, in einem größeren Abstand liegt wieder eine annähernd reibungsfreie Strömung vor. Der Bereich zwischen Wand und reibungsfreier Strömung wird Grenzschicht genannt. Diese Grenzschicht teilt die Strömung im Rohr in zwei Bereiche, die unbeeinflusste, reibungsfreie und nahezu konstante Kernströmung und die Strömung in der Grenzschicht. In der Grenzschicht ergibt sich ein deutlicher Geschwindigkeitsgradient zwischen ruhendem Fluid an der Wand und reibungsfreier Kernströmung. Die genaue Grenzschichtdicke ist praktisch nahezu bedeutungslos, da bereits in einem sehr kleinen Abstand zur Wand die Geschwindigkeit in der Grenzschicht bereits nahezu der Geschwindigkeit der Kernströmung entspricht (Sigloch 2012).

Beim Eintritt einer Strömung in einen Rohrquerschnitt kommt es zu der vorab beschriebenen Strömung in der Grenzschicht aufgrund der Haftbedingung. Aus Kontinuitätsgründen wird das Fluid im Restquerschnitt beschleunigt und es kommt zu einem über den Querschnitt veränderlichen Geschwindigkeitsprofil. Das entstehende Geschwindigkeitsprofil hängt dabei von der Strömungsform des Fluids ab. Dabei werden laminare und turbulente Strömungen unterschieden, die im Wesentlichen von der Strömungsgeschwindigkeit und der Viskosität abhängen. Der Strömungszustand wird durch die Reynoldszahl bestimmt, die das Verhältnis von Trägheits- und inneren Reibungskräften abbildet. Diese ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit v , der charakteristischen Länge L und der kinematischen Viskosität ν :



$$Re = \frac{v \cdot L_0}{\nu} \quad (3-1)$$

Unterhalb der kritischen Reynolds-Zahl von $Re_{krit} = 2.300$ liegt stets eine laminare Rohrströmung vor. Turbulente Strömungsverhältnisse liegen stets ab einer Reynolds-Zahl von 10.000 vor (Truckenbrodt 1996; Sigloch 2012). Der Bereich zwischen der kritischen Reynolds-Zahl und einer Reynolds-Zahl von 10.000 wird als Übergangsbereich beschrieben, der durch einen schnellen und stetigen Wechsel zwischen laminaren und turbulenten Strömungsverhältnissen gekennzeichnet ist. Neben den aufgeführten Grenzen, die von einem Großteil der Autoren (z.B. Gnielinski 1995/2006; Marek und Nitsche 2012) vertreten werden, sind in der Literatur auch andere Grenzwerte zu finden, die aber im Verlauf dieses Forschungsprojekts nicht betrachtet werden.

Im Folgenden werden die Unterschiede zwischen laminarer und turbulenter Strömung erläutert und die Bedeutung einer thermisch und hydraulisch ausgebildeten Rohrströmung beschrieben.

3.1.1 Laminare Rohrströmung

Laminare Strömungen liegen vor allem bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten vor und sind durch eine geordnete, auf voneinander getrennten Bahnen laufende, Fluidbewegung gekennzeichnet. Die Bewegung der Fluidteilchen erfolgt in allen Schichten in Richtung der Hauptströmung (Sigloch 2012).

Im Fall einer laminaren Rohrströmung ergibt sich, wie in Abbildung 3.3 dargestellt, eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung. Da die Grenzschichtdicke dann dem Rohrradius entspricht, liegt eine reine Grenzschichtströmung vor (Baehr und Stephan 2006). Die mittlere Geschwindigkeit einer laminaren Rohrströmung entspricht nur etwa 50% der maximalen Strömungsgeschwindigkeit (Sigloch 2012).

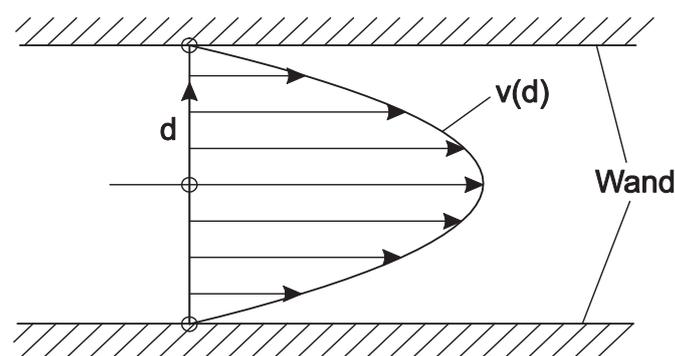


Abbildung 3.3 Querschnitt des Geschwindigkeitsprofils einer laminaren Strömung (nach Truckenbrodt 1996)

3.1.2 Turbulente Rohrströmung

Im Gegensatz zur der in hohem Maße geordneten laminaren Strömung bewegt sich eine turbulente Strömung nicht mehr in geordneten, abgegrenzten Schichten, sondern ist durch zeitlich und räumlich zufallsbedingte Turbulenzbewegungen in der Form von Längs- und Querbewegungen gekennzeichnet. Aufgrund dieser Turbulenzbewegungen findet eine intensive Durchmischung des Fluids statt, wodurch der Austausch von Masse, Impuls und



Energie insbesondere quer zur Hauptströmungsrichtung begünstigt wird (Truckenbrodt 1996; Sigloch 2012).

Aufgrund der komplexen Durchmischungsbewegungen einer turbulenten Strömung ist eine rein theoretische Betrachtung nicht möglich. Daher basieren die Beschreibungen des Geschwindigkeitsprofils auf Modellansätzen und experimentellen Untersuchungen. Die Geschwindigkeitsverteilung ist aufgrund der Turbulenzbewegung gleichmäßiger und das Geschwindigkeitsprofil insgesamt flacher (s. Abbildung 3.4). Ebenso wie die laminare Strömung ist die turbulente immer noch eine reine Grenzschichtströmung, wobei sich schon ein deutlich steilerer Anstieg der Geschwindigkeit in der laminaren Unterschicht, die sich direkt an der Rohrwand befindet, vollzieht. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit einer turbulenten Strömung beträgt in etwa 83% der maximalen Strömungsgeschwindigkeit (Truckenbrodt 1996; Sigloch 2012).

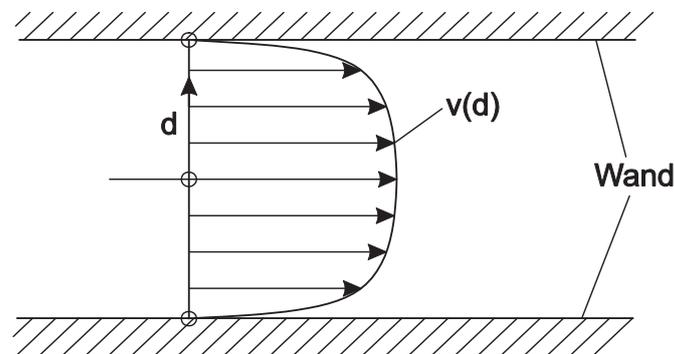


Abbildung 3.4 Querschnitt des Geschwindigkeitsprofils einer turbulenten Strömung (nach Truckenbrodt 1996)

3.1.3 Hydrodynamisch bzw. thermisch ausgebildete Rohrströmung

Die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Geschwindigkeitsprofile gelten lediglich für hydrodynamisch ausgebildete Rohrströmungen. Diese liegen erst dann vor, wenn sich das Geschwindigkeitsprofil innerhalb eines konstanten Querschnitts längs der Achse nicht mehr verändert.

Tritt ein Fluid mit einer konstanten Geschwindigkeit in ein Kreisrohr ein, bleibt die Strömungsgeschwindigkeit im Fall eines gut ausgebildeten Einlaufs über den ganzen Eintrittsquerschnitt konstant (s. Abbildung 3.5). Aufgrund der Haftbedingung bildet sich das typische parabelförmige Geschwindigkeitsprofil für laminare Rohrströmungen aus, das sich erst nach Ende der Anlaufstrecke aufgrund eines Gleichgewichtszustands nicht weiter verändert. Als Ende der Anlaufstrecke gilt die Stelle an der das Geschwindigkeitsprofil nur noch 1% vom endgültigen Zustand abweicht. Die Unterteilung der Strömung in Anlaufströmung und voll ausgebildete Strömung ist in Abbildung 3.5 exemplarisch für eine laminare Strömung dargestellt.

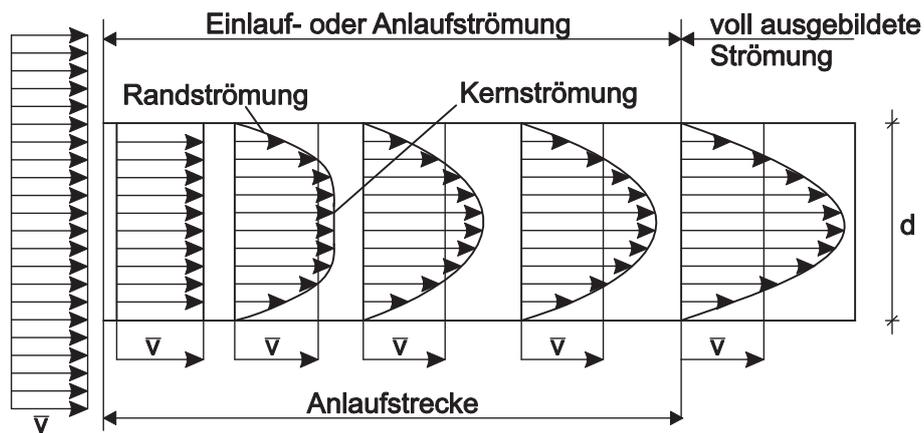


Abbildung 3.5 Hydrodynamischer Anlauf einer laminaren Strömung (nach Sigloch 2012)

Eine Abschätzung der Einlaufänge kann nach Baehr und Stephan (2006) mit folgender Gleichung in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl Re und des Rohrinneendurchmessers d geschehen.

$$x_e = 0,065 \cdot Re \cdot d \quad (3-2)$$

Das voll ausgebildete Geschwindigkeitsprofil einer turbulenten Strömung wird bereits nach einer deutlich geringeren Einlaufänge erreicht. Nach Baehr und Stephan (2006) kann dieser die Länge über

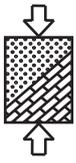
$$x_e \approx 10 \cdot d \quad (3-3)$$

abgeschätzt werden. Nach dieser Einlaufänge ist der Gleichgewichtszustand nahezu erreicht und etwaige Abweichungen sind vernachlässigbar.

Im Fall einer Vereisungsmaßnahme kann es in den Rohrleitungen der Gefrierrohre nicht nur zu einem Bereich hydrodynamisch nicht voll ausgebildeter Rohrströmung kommen, sondern auch zu einer thermisch nicht voll ausgebildeten Rohrströmung.

Liegt beim Eintritt eines Fluids in ein Kreisrohr eine von der Wandtemperatur unterschiedliche Fluidtemperatur vor, so wird das Fluid entweder erwärmt oder abgekühlt. Es bildet sich eine Temperaturgrenzschicht aus, die stromabwärts maximal bis zur Rohrachse anwächst. Bei Erreichen der Rohrachse durch die Temperaturgrenzschicht wird von einer thermisch ausgebildeten Rohrströmung gesprochen. Durch die Veränderung der Fluidtemperatur bildet sich, vergleichbar mit dem Geschwindigkeitsprofil, ein Temperaturprofil aus. Aufgrund der lokal unterschiedlichen Temperaturen ergeben sich unterschiedliche Werte der Fluidviskosität, die damit wiederum eine Veränderung des Geschwindigkeitsprofils bewirken. Dies macht deutlich, dass das Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil einer Rohrströmung gekoppelt ist und dass diese sich gegenseitig stets beeinflussen (Baehr und Stephan 2006; Sigloch 2012).

Im Gegensatz zur laminaren Rohrströmung ist die turbulente Rohrströmung wegen des intensiveren Impulsaustauschs aufgrund der Turbulenzbewegungen bereits nach einer sehr kurzen Anlaufänge sowohl hydrodynamisch als auch thermisch voll ausgebildet (Baehr und Stephan 2006).



3.2 Grundlagen der Wärmeübertragung

In der Thermodynamik wird der Transport von Energie über eine Systemgrenze in Folge einer Temperaturdifferenz als Wärmeübergang bezeichnet. Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik fließt die Wärme dabei stets in Richtung fallender Temperaturen, also von warm nach kalt. Die physikalische Größe der Wärmeübertragung ist der Wärmestrom \dot{Q} [W]. Durch eine Beziehung auf einen bestimmten Querschnitt ergibt sich die Wärmestromdichte \dot{q} [W/m²]. Der Wärmestrom \dot{Q} kann über den Quotient aus Temperaturdifferenz ΔT und thermischem Widerstand R allgemein bestimmt werden.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} \quad (3-4)$$

Generell werden zwei Mechanismen des Wärmetransports unterschieden, die für die betrachteten Fälle von Bedeutung sind: Wärmeleitung und Konvektion (Baehr und Stephan 2006). Da die folgenden Abschnitte sich auf die Wärmeübergänge im Gefrierrohr konzentrieren, sei an dieser Stelle für nähere Informationen zur Wärmeübertragung im Boden auf ältere Arbeiten des Lehrstuhls für Geotechnik im Bauwesen verwiesen (z.B. Baier 2009; Ziegler et al. 2010).

3.2.1 Konduktion

Bei der Wärmeleitung handelt es sich um den Transport thermischer Energie zwischen benachbarten Molekülen aufgrund eines vorhandenen Temperaturgradienten ohne einen Transport von Masse. Die allgemeine Beschreibung nach dem Gesetz von Fourier ist in Gleichung (3-5) zu finden.

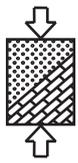
$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (3-5)$$

Vor allem in Festkörpern stellt die Wärmeleitung den maßgebenden Wärmetransportmechanismus dar, in Fluiden spielt sie hingegen nur eine untergeordnete Rolle. Bei der Beschreibung der Wärmeübergänge im Gefrierrohr sind die Wärmeströme infolge Wärmeleitung im inneren Fallrohr und im äußeren Steigrohr zu beachten. Für die in einem Gefrierrohr vorliegende Zylindergeometrie für n -Schichten ergibt sich der Wärmestrom infolge Wärmeleitung nach Gleichung (3-6) (Baehr und Stephan 2006).

$$\dot{Q}_{\text{Konduktion}} = \sum_i^n 2\pi \cdot \lambda_i \frac{T_{\text{außen}} - T_{\text{innen}}}{\ln\left(\frac{r_{\text{außen}}}{r_{\text{innen}}}\right)} \quad (3-6)$$

3.2.2 Konvektion

Die Konvektion beschreibt den Transport thermischer Energie durch eine Teilchenbewegung innerhalb eines strömenden Mediums, der stets von einer untergeordneten Wärmeleitung begleitet wird. Als konvektiver Wärmeübergang wird die Überlagerung von Wärmeleitung und Konvektion im strömenden Fluid bezeichnet.



Allgemein kann je nach Antriebsart zwischen natürlicher bzw. freier und erzwungener Konvektion unterschieden werden. Die Ursache für eine freie Konvektion liegt in durch Temperaturänderungen hervorgerufenen Dichteunterschieden. Im Fall einer erzwungenen Konvektion wird durch äußere Einwirkungen eine Teilchenbewegung hervorgerufen. Bei der erzwungenen Konvektion kann im Vergleich zur freien Konvektion ein höherer Wärmeübergang erzielt werden (Marek und Nitsche 2010).

Im Fall einer Bodenvereisung ist für den Wärmeübergang im Gefrierrohr die erzwungene Konvektion zwischen strömendem Fluid und starrer Wand von Bedeutung. Der Wärmetransport infolge Konvektion ist proportional zum Temperaturgradienten zwischen Fluid und Rohrwand (s. Gleichung (3-7)).

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \alpha \cdot (T_F - T_W) \quad (3-7)$$

Die Proportionalitätskonstante α [W/(m²K)] ist der vom Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil des Fluids abhängige Wärmeübergangskoeffizient. Um den Wärmeübergangskoeffizient mit dem Temperaturfeld zu verknüpfen, werden die Vorgänge in unmittelbarer Nähe zur Wand betrachtet. Aufgrund der Haftbedingung des Fluids direkt an der Wand, liegt hier keine Strömung vor und der Wärmetransport findet ausschließlich durch Wärmeleitung statt. Somit kann Gleichung (3-7) wie folgt erweitert werden:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \alpha \cdot (T_F - T_W) = -\lambda_F \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3-8)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient ergibt sich somit zu (Baehr und Stephan 2006):

$$\alpha = -\lambda_F \cdot \frac{\frac{\partial T}{\partial x}}{T_F - T_W} \quad (3-9)$$

Somit ist α abhängig von der Steigung des Temperaturprofils an der Wand und der Differenz zwischen Wand- und Fluidtemperatur (s. Abbildung 3.6).

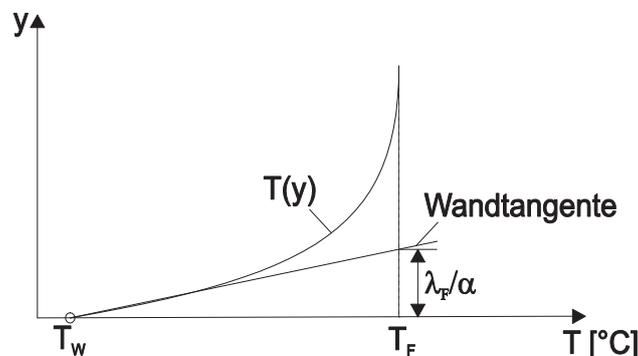
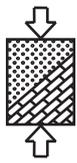


Abbildung 3.6 Temperaturprofil im strömenden Fluid und Quotient λ_F/α
(nach Baehr und Stephan 2006)



Es wird deutlich, dass die Wärmestromdichte von der Steigung des Temperaturprofils ($T_F - T_W$) in der Grenzschicht abhängt. Die Grenzschichtdicke entspricht in etwa dem Verhältnis λ_F / α (Baehr und Stephan 2006).

Folglich werden in dünnen Grenzschichten größere Wärmeübergangskoeffizienten erzielt und damit ein entsprechend günstigerer Wärmeübergang. Aus diesem Grund weisen turbulente Strömungsverhältnisse bessere Wärmeübergangsverhältnisse auf als laminare. Ein weiterer positiver Aspekt liegt in dem aufgrund der Durchmischung gesteigerten Energieaustausch.

Eine exakte Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten nach dem vorgestellten Vorgehen ist in der Praxis meist nicht möglich, da weder das Geschwindigkeitsprofil noch die Grenzschichtdicke genau bekannt ist. Eine näherungsweise Berechnung mit empirischen Korrelationen beruhend auf Modellvorstellungen und physikalischen Ähnlichkeitsprinzipien ist jedoch mit einer ausreichenden Genauigkeit möglich (z.B. Marek und Nitsche 2010; Böckh und Wetzel 2011; Baehr und Stephan 2006).

3.2.3 Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten nach dem Prinzip der Ähnlichkeitstheorie

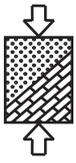
Nach dem Prinzip der Ähnlichkeitstheorie kann von dem Grundsatz ausgegangen werden, dass physikalische Zusammenhänge, wie beispielweise die Geschwindigkeits- und Temperaturprofile, durch dimensionslose Kennwerte ausgedrückt werden können. Somit kann durch eine Maßstabsunabhängigkeit die Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten erleichtert werden. Die maßgeblichen physikalischen Größen werden mit Hilfe dimensionsloser Ähnlichkeitsgrößen, den sogenannten Kennzahlen, in Proportionalität gebracht. Sind die dimensionslosen Kennzahlen zweier Vorgänge identisch, gelten diese als ähnlich. Somit ist der Wärmeübergang in ähnlichen Geometrien unterschiedlicher Größe gleich, solange die dimensionslosen Kennzahlen gleich sind (Baehr und Stephan 2006; Marek und Nitsche 2010).

Für den konvektiven Wärmeübergang ist die Nusselt-Zahl die maßgebende dimensionslose Kennzahl. Diese setzt den Wärmeübergangskoeffizienten α , die charakteristische Länge L_0 und die Wärmeleitfähigkeit des Fluid λ_F in Zusammenhang.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L_0}{\lambda_F} \quad (3-10)$$

Die Nusselt-Zahl ist die dimensionslose Kennzahl des Wärmeübergangskoeffizienten und selbst abhängig vom Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil, die beide ebenfalls durch dimensionslose Kennzahlen beschrieben werden können. Bei der erzwungenen Konvektion kommen dafür die Reynolds-Zahl, die Prandtl-Zahl und teilweise die Péclet-Zahl zum Einsatz.

Wie bereits in Kapitel 3.1 erläutert, wird der Strömungszustand und damit das Geschwindigkeitsprofil durch die Reynolds-Zahl nach Gleichung (3-1) gekennzeichnet. Eine Verbindung zwischen Geschwindigkeits- und Temperaturprofil ist mit Hilfe der Prandtl-Zahl möglich. Die Prandtl-Zahl charakterisiert die Stoffeigenschaften des Fluids und ist definiert



als das Verhältnis von kinematischer Viskosität ν [m^2/s] und Temperaturleitfähigkeit a [m^2/s]. Die Temperaturleitfähigkeit lässt sich weiter als Quotient aus Wärmeleitfähigkeit (λ_F) und Wärmekapazität (c_F) des Fluids darstellen.

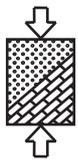
$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot c_{v,F}}{\lambda_F} \quad (3-11)$$

Die Péclet-Zahl, die dem Produkt von Reynolds- und Prandtl-Zahl entspricht, kann zur Berücksichtigung des Verhältnisses von Konvektion und Wärmeleitung angesetzt werden.

$$\text{Pe} = \text{Re} \cdot \text{Pr} \quad (3-12)$$

Mit Hilfe der beschriebenen dimensionslosen Kennzahlen und geometrischer Kenngrößen lässt sich das Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil und somit auch die Nusselt-Zahl bestimmen. Die Art der Abhängigkeit zwischen der Nusselt-Zahl und den anderen Kennzahlen ist jedoch je nach behandeltem Problem unterschiedlich. Deswegen muss die Nusselt-Zahl durch die Theorie oder auf der Grundlage von Experimenten bestimmt werden.

Die Zusammenhänge zwischen der Nusselt-Zahl und anderen Kennzahlen wurden in den letzten Jahren auf der Grundlage unterschiedlicher experimenteller Untersuchungen von mehreren Autoren erforscht. Die für die numerische Umsetzung verwendeten Zusammenhänge und Korrelationen werden im folgenden Kapitel detailliert betrachtet.



4 Berechnung der Nusselt-Zahl

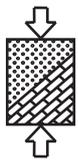
In den letzten Jahren haben sich zahlreiche Autoren mit der Bestimmung der Nusselt-Zahl in Abhängigkeit anderer dimensionsloser Kennzahlen beschäftigt. Die ermittelten Korrelationen stützen sich alle auf die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen, wurden stetig verbessert und an neue Versuchsdaten angepasst. Somit stehen heute eine Vielzahl an Korrelationen für verschiedene Problemstellungen und Randbedingungen zur Verfügung.

Die Korrelationen basieren zum Großteil auf Versuchsergebnissen an Wärmeüberträgern, bei denen zwischen der Randbedingung einer konstanten Wärmestromdichte oder einer konstanten Wandtemperatur unterschieden wird. Eine konstante Wärmestromdichte liegt im Fall eines in einem Rohr elektrisch erwärmten Fluids vor, da die Temperaturgradienten zwischen beheizter Oberfläche und Fluid konstant sind. Eine konstante Wandtemperatur als Randbedingung kann in Gegenstromwärmetauschern erreicht werden, in denen der Wärmeübergangskoeffizient der beiden Fluide entweder ungefähr gleich ist oder sehr stark voneinander abweicht. In diesem Fall kann die Wandtemperatur näherungsweise als konstant angesehen werden (Hallquist 2012).

Die beschriebenen Randbedingungen treffen beide nicht uneingeschränkt auf die Verhältnisse innerhalb eines Vereisungsrohrs zu. Die Temperatur im Boden kann zu Beginn einer Vereisungsmaßnahme nahezu als konstant angenommen werden. Innerhalb des Gefrierrohrs steigt die Temperatur vom Vorlauf ausgehend immer weiter an, so dass sich ein gleichmäßiger Temperaturverlauf einstellt. Als Folge verändern sich auch die Wandtemperaturen, so dass die Forderung einer konstanten Wandtemperatur nicht erfüllt werden kann. Da sich aufgrund des Temperaturverlaufs im Fluid ebenfalls ein Temperaturverlauf an der Wandfläche, also der Kontaktfläche zum Boden, ergibt, können die Verhältnisse am ehesten durch die Annahme einer konstanten Wärmestromdichte wiedergegeben werden. Aus diesem Grund beschränken sich die in dieser Arbeit vorgestellten und verwendeten Korrelationen auf die Randbedingung der konstanten Wärmestromdichte.

Die Abhängigkeit der Wärmeübertragung von den Strömungsverhältnissen wird bei der Bestimmung der Nusselt-Zahl durch eine Unterscheidung der Berechnung zwischen laminarer, turbulenter und einer Strömung im Übergangsbereich berücksichtigt. Durch die Möglichkeit der Variation von Durchfluss und Kälteträger, sind sowohl laminare und turbulente Strömungen, als auch Strömungen im Übergangsbereich im Gefrierrohr möglich. Somit müssen die unterschiedlichen Strömungszustände betrachtet werden. Eine Unterscheidung der Strömungsentwicklung inkludiert den Einfluss des Geschwindigkeits- und Temperaturprofils. Dabei kann zwischen den in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Arten der hydrodynamischen und thermischen Strömungsbildung unterschieden werden. Für die Strömungsverhältnisse in einem Gefrierrohr müssen aber nicht alle Fälle der Strömungsbildung betrachtet werden.

Das in Gefrieranlagen auf die gewünschte Temperatur abgekühlte Fluid strömt durch isolierte Rohrleitungen in das Fallrohr. Unter der Annahme eines gleichen Querschnitts von Fallrohr und Rohrleitung kann aufgrund der langen vorliegenden Rohrleitungsstrecke im Fallrohr von einer hydrodynamisch ausgebildeten Strömung ausgegangen werden. Durch



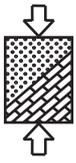
den Eintritt des Fluids in das Fallrohr verändern sich Wand- und Umgebungstemperatur des Rohres, so dass ein neues Temperaturprofil entsteht. Folglich handelt es sich bei der Strömung im Fallrohr um eine hydrodynamisch ausgebildete Strömung mit thermischem Anlauf.

Der Rücklauf des Kühlmittels findet im Ringraum des Gefrierrohrs statt und bedarf aufgrund der Querschnittsveränderung einer gesonderten Betrachtung. Aus Gründen der Kontinuität führt eine Querschnittsveränderung zu einer Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit, wodurch das Geschwindigkeitsprofil maßgeblich beeinflusst wird. Zusätzlich weichen die Wandtemperaturen des Fall- und Steigsrohrs sowie des Fluids voneinander ab. Folglich müssen sich sowohl das Geschwindigkeit- als auch das Temperaturprofil im Ringraum neu ausbilden. Innerhalb des Ringraums handelt es sich deshalb um eine Strömung mit gleichzeitigem hydrodynamischen und thermischen Anlauf.

Wie bereits erwähnt sind viele Ansätze zur Bestimmung der Nusselt-Zahl in der Literatur dokumentiert, die sich teilweise mehr oder weniger unterscheiden, da es sich bei allen Korrelationen immer um die Beschreibung von Versuchsdaten handelt. In Voruntersuchungen wurden die Ansätze von Baehr und Stepahn (2006), Churchill (1977), Glück (2007) und Gnielinski (2006) untersucht und abschließend bewertet. Auf eine detaillierte Erläuterung wird an dieser Stelle verzichtet. Die unterschiedlichen Ansätze für die Rohrströmung weisen doch größere Abweichungen auf. Die von Gnielinski (2006) aufgestellten Gleichungen insbesondere für den turbulenten Bereich und den Übergangsbereich, in dem die meisten Anwendungen liegen, werden in der Literatur (z.B. VDI-Wärmeatlas) jedoch empfohlen. Außerdem haben beispielsweise Huber und Walter (2010) eine gute Übereinstimmung zwischen Messwerten und dem Ansatz von Gnielinski (2006) für den Übergangsbereich gefunden. Für den turbulenten Bereich gibt der Ansatz von Gnielinski (2006) nach Böckh und Wetzel (2011) die Messwerte nach heutigen Kenntnissen sogar am besten wieder. Für die Berechnung der Nusselt-Zahl im Ringspalt liegen deutlich weniger Ansätze vor, so dass hier der Empfehlung des anerkannten technischen Regelwerks des VDI-Wärmeatlasses gefolgt wird und ebenfalls ein Ansatz von Gnielinski (2006) gewählt wird.

Im Folgenden werden deshalb nur die verwendeten Ansätze von Gnielinski (2006) zur Bestimmung der Nusselt-Zahl für die vorab beschriebenen Fälle der Strömungsentwicklung vorgestellt.

In weiteren Voruntersuchungen wurde die Verwendung einer mittleren Fluidtemperatur sowie einer mittleren Nusselt-Zahl überprüft. Die Untersuchungen haben für Fluidtemperaturen im Bereich einer Vereisungsmaßnahme nahezu keine Abweichungen der Nusselt-Zahl ergeben. Generell gibt es bei der Bestimmung der Nusselt-Zahl die Möglichkeit, diese einmalig gemittelt über das gesamte Gefrierrohr zu bestimmen oder lokal an mehreren definierten Stellen des Rohres. Der Vergleich der mittleren und lokalen Nusselt-Zahlen hat lediglich in einem kleinen Bereich am Rohranfang größere Abweichungen ergeben, auf der restlichen Rohrlänge wurden nur geringe Abweichungen ermittelt. Somit wird im Weiteren vereinfachend die mittlere Nusselt-Zahl mit einer mittleren Fluidtemperatur ermittelt.



4.1 Nusselt-Zahl bei der Rohrströmung

Bei der Bestimmung der Nusselt-Zahl nach Gleichung (3-10) in einem Rohr ist die charakteristische Länge L_0 eindeutig durch den Rohrinne Durchmesser d_i beschrieben. In der Berechnung benötigte Stoffwerte werden auf die mittlere Fluidtemperatur bezogen, die bei einer Vereisungsmaßnahme als Mittelwert der Vor- und Rücklauftemperatur angesetzt werden kann.

$$T_{F,m} = \frac{(T_{F,VL} + T_{F,RL})}{2} \quad (4-1)$$

Die folgenden Korrelationen zur Bestimmung der Nusselt-Zahl im Fallrohr gelten für eine hydrodynamisch ausgebildete Strömung mit thermischem Anlauf.

4.1.1 Laminare Strömung

Im Fall einer hydrodynamisch und thermisch ausgebildeten laminaren Rohrströmung strebt die Nusselt-Zahl mit zunehmender Lauflänge asymptotisch gegen einen unteren Grenzwert. Dieser untere Grenzwert kann eindeutig hergeleitet werden und ergibt sich nach Gnielinski (2006), Baehr und Stephan (2006) und Churchill (1977) zu:

$$Nu_1 = 4,364 \quad (4-2)$$

Im vorliegenden Fall einer hydrodynamisch ausgebildeten Strömung mit thermischem Anlauf ist die Nusselt-Zahl am Beginn des thermischen Anlaufs größer. Für diese Strömung existiert nach Gnielinski (2006) für die mittlere Nusselt-Zahl in einem Rohr der Länge L folgende obere Asymptote:

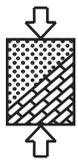
$$Nu_{m,2} = 1,953 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{L} \right)^{1/3} \quad (4-3)$$

Die Bestimmung der mittleren Nusselt-Zahl zwischen den Asymptoten (thermischer Anlauf und thermisch voll ausgebildete Strömung) kann im gesamten Bereich nach Gnielinski (2006) mit Gleichung (4-4) erfolgen.

$$Nu_m = \left[Nu_1^3 + 0,6^3 + (Nu_{m,2} - 0,6)^3 \right]^{1/3} \quad (4-4)$$

4.1.2 Turbulente Strömung

Der Wärmeübergang bei einer turbulenten Strömung kann nicht mehr wie bei einer laminaren Strömung ausschließlich auf analytische Weise bestimmt werden. Deswegen stützen sich die Nusselt-Korrelationen allein auf experimentelle Ergebnisse. Da eine turbulente Strömung aufgrund ihrer intensiven Durchmischung bereits nach einer kurzen Lauflänge hydrodynamisch und thermisch ausgebildet ist, entfällt eine Unterscheidung der Strömungsentwicklung.



Für die Ermittlung der mittleren Nusselt-Zahl einer turbulenten Strömung hat Gnielinski (1995) eine ursprünglich von Petukhov und Kirilov (1958) aufgestellt Korrelation erweitert. Dabei fügte er einen von Hausen (1959) vorgeschlagenen Term zur Beschreibung der Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten von der Rohrlänge hinzu, die bei konstanten Durchmesser d jedoch nur bei kleinen Rohrlängen besteht. Die von Gnielinski (1995) formulierte Gleichung lautet:

$$Nu_m = \frac{(\xi/8) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\xi/8} (Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{2/3} \right] \quad (4-5)$$

$$\text{mit } \xi = (1,8 \cdot \log(Re) - 1,5)^{-2} \quad (4-6)$$

Gleichung (4-5) gilt im Bereich von $10^4 < Re < 10^6$ und $0,1 < Pr \leq 1.000$. Gleichung (4-6) ist eine von Konakov (1946) angegebene Beziehung zur Berechnung des Druckverlustbeiwerts ξ . Die Randbedingungen einer konstanten Wandtemperatur oder einer konstanten Wärmestromdichte ergeben für turbulente Strömungsverhältnisse praktisch die gleichen Nusselt-Zahlen, so dass nach Gnielinski (2006) keine Unterscheidung erforderlich ist.

4.1.3 Übergangsbereich der Strömung

Im Übergangsbereich zwischen turbulenter und laminarer Strömung dominieren in der Literatur nach Gnielinski (1995) stark abfallende Werte der Nusselt-Zahl. Aus diesem Grund empfiehlt er in diesem Bereich eine lineare Interpolation nach Gleichung (4-7).

$$Nu_m = (1 - \gamma) \cdot Nu_{m, Re=2.300} + \gamma \cdot Nu_{m, Re=10.000} \quad (4-7)$$

$$\text{mit } \gamma = \frac{Re - 2300}{7.700} \text{ und } 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (4-8)$$

Mit $\gamma = 1$ würde sich eine dauernd turbulente Strömung und mit $\gamma = 0$ eine dauernd laminare Strömung ergeben. Die Nusselt-Zahl $Nu_{m, Re=2.300}$ ist die mit Gleichung (4-4) berechnete mittlere Nusselt-Zahl der laminaren Strömung bei einer Reynolds-Zahl von 2.300. $Nu_{m, Re=10.000}$ ist entsprechend die mit Gleichung (4-5) berechnete mittlere Nusselt-Zahl einer turbulenten Strömung.

4.2 Nusselt-Zahl bei der Strömung durch einen Ringspalt

Im Fall eines Gefrierrohrs strömt das Fluid im Rücklauf durch den Ringraum zurück. Der konvektive Wärmeübergang findet dort zwischen dem strömenden Fluid und der Innen- sowie Außenwand des Gefrierrohrs statt. Die charakteristische geometrische Größe des Ringspalts stellt der hydraulische Durchmesser d_h dar. Dieser wird durch die Differenz des Innendurchmessers des Außenrohrs und des Außendurchmessers des Innenrohres nach Gleichung (4-9) bestimmt (s. Abbildung 4.1).

$$d_h = d_{A,i} - d_{I,a} \quad (4-9)$$

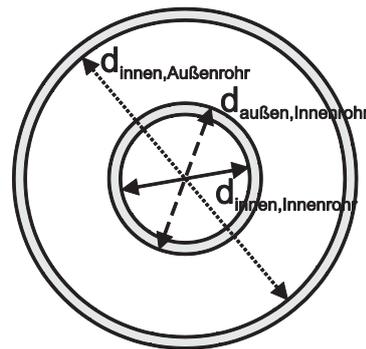
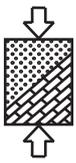


Abbildung 4.1 Definition der Rohrdurchmesser zur Berechnung des hydraulischen Durchmessers

Für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten sind in der Literatur nur Ansätze für die Randbedingung einer konstanten Wandtemperatur dokumentiert. Somit wird im Weiteren für die Berechnung der Nusselt-Zahl zwischen den drei in Abbildung 4.2 dargestellten Varianten nach Gnielinski (2006) unterschieden.

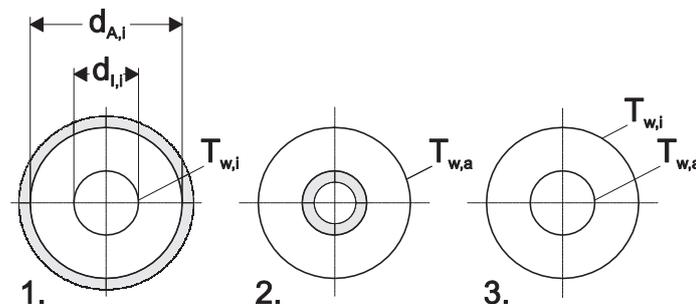
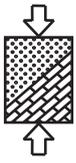


Abbildung 4.2 Übersicht der Varianten der Wärmeübertragung im Ringspalt (nach Gnielinski 2006)

Im ersten Fall wird ein Wärmestrom durch das Innenrohr ermöglicht, wobei das Außenrohr als wärmegeleitet angenommen wird. Der gegenteilige Fall eines gedämmten Innenrohrs und eines Wärmestroms durch das Außenrohr stellt Variante 2 dar. Bei der dritten Variante liegt ein Wärmestrom sowohl durch das Außen- als auch durch das Innenrohr vor, wobei hier eine gleiche Wandtemperatur der Rohrwände vorausgesetzt wird (Gnielinski 2006). In Voruntersuchungen wurden die Varianten zwei und drei verglichen, da diese mögliche Szenarien darstellen. Durch die verwendeten PE-Rohre als Fallrohr könnte eine Wärmedämmung des Innenrohrs angenommen werden. Die Voruntersuchungen haben gezeigt, dass Unterschiede der Ergebnisse zwischen den beiden Ansätzen sehr gering sind. Da innerhalb des Gefrierrohrs die Wärmeübertragung sowohl im Fall- als auch im Steigrohr stattfindet und auch von annähernd gleichen Wandtemperaturen ausgegangen werden kann, findet die dritte Variante Verwendung.

Die folgenden Korrelationen zur Berechnung der Nusselt-Zahl im Ringspalt werden, wie bereits erwähnt, für eine Strömung mit gleichzeitigem hydrodynamischen und thermischen Anlauf benötigt, um die Verhältnisse im Ringraum eines Gefrierrohrs wieder zu geben.



4.2.1 Laminare Strömung

Für eine hydrodynamisch und thermisch ausgebildete Strömung empfiehlt Gnielinski (2006) eine von Martin (1990) aufgestellte Näherungsgleichung in Abhängigkeit des Verhältnisses der Durchmesser.

$$Nu_{m,1} = 3,66 + \left(4 - \frac{0,102}{(d_{I,a}/d_{A,i}) + 0,02} \right) \cdot \left(\frac{d_{I,a}}{d_{A,i}} \right)^{0,04} \quad (4-10)$$

Stephan (1962) hat folgende Näherungsgleichung zur Bestimmung der mittleren Nusselt-Zahl bei hydrodynamisch ausgebildeter Strömung mit thermischem Anlauf hergeleitet.

$$Nu_{m,2} = 1,615 \cdot \left(1 + 0,14 \cdot (d_{I,a}/d_{A,i})^{0,1} \right) \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d_h}{L} \right)^{1/3} \quad (4-11)$$

Zur Bestimmung der mittleren Nusselt-Zahl im Ringspalt bei gleichzeitig hydrodynamischem und thermischem Anlauf gibt Gnielinski (2006) folgende zusätzliche Gleichung als Asymptote an.

$$Nu_{m,3} = \left(\frac{2}{1 + 22 \cdot Pr} \right)^{1/6} \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d_h}{L} \right)^{1/2} \quad (4-12)$$

In Anlehnung an die Berechnung einer Strömung im Rohr empfiehlt Gnielinski (2006) die Berechnung der mittleren Nusselt-Zahl mit Gleichung (4-13) nach einem Vorschlag von Martin (1990).

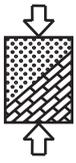
$$Nu_m = \left(Nu_{m,1}^3 + Nu_{m,2}^3 + Nu_{m,3}^3 \right)^{1/3} \quad (4-13)$$

4.2.2 Turbulente Strömung

Zur Berechnung der mittleren Nusselt-Zahl für turbulente Strömungen werden von Gnielinski (2006) Modifikationen der in Kapitel 4.1.2 angegebenen Gleichung empfohlen. In Abhängigkeit des Verhältnisses von Außen- und Innenrohrdurchmesser kann die mittlere Nusselt-Zahl nach einer Korrelation von Stephan (1962) wie folgt bestimmt werden:

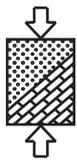
$$Nu_{m,b} = \frac{0,86 \cdot (d_{I,a}/d_{A,i})^{0,84} + \left(1 - 0,14 \cdot (d_{I,a}/d_{A,i})^{0,6} \right)}{1 + (d_{I,a}/d_{A,i})} \cdot Nu_{m,Rohr} \quad (4-14)$$

$Nu_{m,Rohr}$ wird dabei nach Gleichung (4-5) bestimmt, wobei der Durchmesser d durch den hydraulischen Durchmesser d_h des konzentrischen Ringspalts zu ersetzen ist. Gleichung (4-14) gilt für $10^4 < Re < 10^6$ und $0,6 < Pr < 1.000$.



4.2.3 Übergangsbereich der Strömung

Die Berechnung der mittleren Nusselt-Zahlen im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung im konzentrischen Ringspalt erfolgt analog zur Berechnung in einer Rohrströmung, wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben. Für die Berechnung der mittleren Nusselt-Zahlen bei Reynolds-Zahlen von 2.300 und 10.000 in Gleichung (4-7) werden lediglich die in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 angegebenen Gleichungen für den Ringspalt zugrunde gelegt.



5 Numerisches Lösungsmodell

Am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen wurden in den letzten Jahren bereits umfangreiche numerische Simulationen zur Optimierung von Vereisungsmaßnahmen unter Einfluss einer Grundwasserströmung mit dem Programm SHEMAT (Simulator for Heat and Mass Transport) durchgeführt.

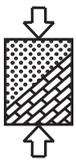
5.1 Das Programmsystem SHEMAT

Das Finite-Differenzen-Programm SHEMAT (Clauser 2003) wurde ursprünglich am Lehrstuhl für Angewandte Geophysik von einer Gruppe um Prof. Clauser entwickelt, um geothermale Transportvorgänge im Tiefengestein unter hohen Drücken abzubilden. Mottaghy und Rath (2006) implementierten ein Phasenwechselmodell, das den Effekt der latenten Wärme beim Gefrieren und Auftauen von Porenwasser berücksichtigte. Außerdem wurden temperaturabhängige thermische Eigenschaften der Bodenbestandteile eingeführt. Im Rahmen der Dissertation von Baier (2009) wurde das Programmsystem an die Verhältnisse von Vereisungsmaßnahmen im Lockergestein angepasst. In diesem Zusammenhang wurde das „freezing“-Modul entwickelt, welches eine Reihe weiterer thermischer und hydraulischer Bodeneigenschaften und deren Temperaturabhängigkeit berücksichtigt. Weiterhin wurde das Phasenwechselmodell erweitert, so dass die Beschreibung des Gefrierprozesses auf Grundlage des Verlaufs des ungefrorenen Wassergehalts anstelle einer Gefrierfunktion erfolgt. Für detaillierte Informationen bezüglich des Phasenwechselmodells und der Gefriereigenschaften sei an dieser Stelle auf Literaturstellen des Lehrstuhls für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen verwiesen (z.B. Baier 2009; Ziegler et al. 2010).

Die Verifikation des Phasenwechselmodells sowie dessen numerische Umsetzung im „freezing“-Modul von SHEMAT erfolgten durch die Nachrechnung zweier Modellversuche, mit und ohne Einfluss einer Grundwasserströmung (Baier 2009). Die gute Übereinstimmung zwischen Simulations- und Messwerten zeigt, dass der Gefrierprozess mit dem „freezing“-Modul des Programms SHEMAT realitätsnah abgebildet werden kann.

Weiterhin haben die zahlreichen numerischen Berechnungen gezeigt, dass es möglich ist, die Wirksamkeit strömungsangepasster Gefrierrohranordnungen zur Verkürzung der Aufgefrierdauer mit dem Programm SHEMAT zu ermitteln (Ziegler et al. 2010). Um die erforderliche Kühlleistung und den daraus resultierenden Energieverbrauch einer Vereisungsmaßnahme bestimmen zu können, bedarf es einer Erweiterung der Betrachtung auch auf die Erhaltungsphase.

Für die realitätsnahe Ermittlung der Kühlleistung mit numerischen Berechnungen mit dem Programm SHEMAT müssen einige Anpassungen vorgenommen werden. Da der Quellcode von SHEMAT modular aufgebaut ist, lassen sich Änderungen zielgerichtet für spezielle Anwendungsbereiche durchführen. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben, ist es für die realitätsnahe Bestimmung der Kühlleistung erforderlich, die Wärmetransportvorgänge im Gefrierrohr abzubilden. Um dies zu ermöglichen, wurde ein neues Modul „freezrefcap“ in SHEMAT implementiert, welches die Kühlleistung detailliert



ermittelt. Da die Forderung einer wirtschaftlichen Berechnung ohne eine enorme Steigerung der Rechenzeit und Speicherkapazität für die praktische Anwendung des numerischen Modells von großer Bedeutung ist, wurde zusätzlich eine vereinfachte Ermittlung der Kühlleistung in das „freezing“-Modul implementiert. Somit kann durch eine Kombination der beiden Berechnungsmodule eine wirtschaftliche numerische Berechnung erzielt werden.

Die Weiterentwicklungen im „freezing“-Modul sowie das neue Modul zur detaillierten Kühlleistungsermittlung „freezrefcap“ werden im Folgenden beschrieben.

5.2 Weiterentwicklungen im „freezing“- Modul

Um eine Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung mit dem „freezing“-Modul zu ermöglichen, wurde eine vereinfachte Kühlleistungsermittlung implementiert. Weiterhin wurden zur Ermöglichung der Simulation der unterschiedlichen Schaltungsvarianten in der Erhaltungsphase zwei Unterprogramme geschrieben, um den intermittierenden Gefrierbetrieb und das Aktivieren bzw. Deaktivieren bestimmter Gefrierrohre abzubilden.

5.2.1 Vereinfachte Kühlleistungsermittlung

Bei der Simulation von Vereisungsmaßnahmen mit dem „freezing“-Modul wird die Soletemperatur des Gefrierrohrs über eine Dirichlet-Randbedingung vorgegeben. Somit wird einer bestimmten Zelle eine festgelegte Temperatur zugeordnet, die jedoch auch zeitabhängig definiert werden kann. Eine Möglichkeit zur vereinfachten Ermittlung der Kühlleistung im „freezing“-Modul stellt somit das Aufsummieren der in die Gefrierrohrzelle eingetragenen Wärmeströme dar. Diese Möglichkeit vernachlässigt allerdings die im Gefrierrohr ablaufenden Wärmeübergänge, wie sie in Kapitel 3 beschrieben wurden.

Die Leistung kann somit vereinfacht durch das Aufsummieren der in Abbildung 5.1 dargestellten Wärmestromdichten q_i multipliziert mit der Übertragungsfläche A_i bestimmt werden. Da die Wärmestromdichten in SHEMAT automatisch bestimmt werden, wird die Rechenzeit oder die Speicherkapazität durch die vereinfachte Leistungsbestimmung nahezu nicht beeinflusst.

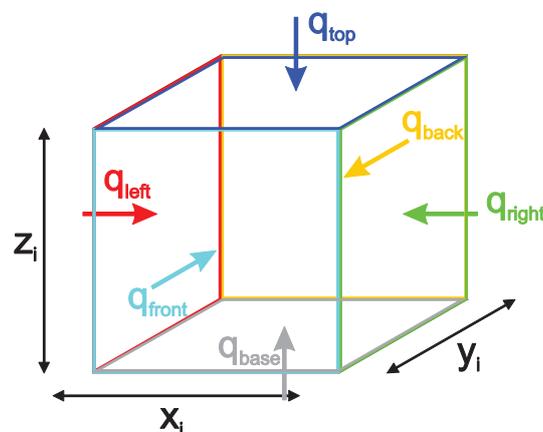
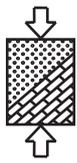


Abbildung 5.1 Wärmestromdichten einer Zelle

Numerisch ist die vereinfachte Ermittlung so umgesetzt, dass diese nur durchgeführt wird, wenn die zusätzliche Input-Datei „capacity.par“ gefunden wird. Über die Angabe einer Start- und Endzelle durch die jeweiligen Zellkoordinaten (i,j,k) wird die Kühlleistung in diesem



Bereich bestimmt. Die Anzahl der Bestimmungsbereiche kann beliebig gewählt werden. Im Fall einer Vereisungsmaßnahme kann somit die Kühlleistung in jedem Gefrierrohr bestimmt werden. Dabei wird für jedes Gefrierrohr eine Ausgabedatei erzeugt, die den Verlauf der Kühlleistung über die Zeit enthält.

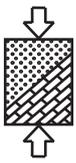
5.2.2 Betriebsvarianten der Erhaltungsphase

Zur Bestimmung des Gesamtenergiebedarfs einer Vereisungsmaßnahme ist die Betrachtung der Erhaltungsphase von enormer Bedeutung, da diese einen großen Anteil am Gesamtenergiebedarf ausmacht. In der Praxis werden in dieser Phase oftmals zur Reduzierung der Frostkörperkubatur im Boden und zur Verringerung der Hebungen angepasste Steuerungsvarianten der Gefrieranlage genutzt, wie der intermittierende Betrieb oder die Verringerung der Kühlleistung. Innerhalb des „freezing“-Moduls war es bislang lediglich möglich die Temperatur der Gefrierrohre zeitabhängig zu steuern, eine gezielte Deaktivierung und Aktivierung war aber nicht implementiert.

Diese Deaktivierung und Aktivierung der Gefrierrohre, die als Dirichlet-Randbedingung angegeben werden, wurde in Abhängigkeit der Zeit implementiert. Liegt die Datei „pipecontrol.par“ vor, so werden die darin enthaltenen Informationen verarbeitet. In der Datei ist zunächst wieder die Anzahl der Gefrierrohre anzugeben. Dann ist das jeweilige Gefrierrohr über die Zeilennummer aus dem Feld *# temp, bcd*, in dem in der Modelldatei die Dirichlet-Randbedingung definiert wird, eindeutig zu bestimmen. Durch Angabe des zweiten Wertes kann das Gefrierrohr aktiviert (1) oder deaktiviert (0) werden und der Zeitpunkt der Ausführung der Aktion wird als dritter Wert angegeben. Dabei ist die simulierte Gesamtzeit in der gewählten Zeiteinheit anzugeben.

Die Möglichkeit Gefrierrohre zu aktivieren bzw. zu deaktivieren reicht zur Simulation eines intermittierenden Betriebs jedoch noch nicht aus. Beim intermittierenden Betrieb sollen die Gefrierrohre zeitweise ausgeschaltet werden, wenn der Frostkörper die statisch erforderliche Kubatur überschreitet. Dies wird durch ein Überschreiten der Grenztemperatur gesteuert. Ein erneutes Einschalten ist dann erforderlich, wenn die Frostkubatur einen bestimmten Grenzwert unterschreitet, der durch eine bestimmte Temperatur definiert wird. Diese Funktion des intermittierenden Betriebs wurde numerisch so umgesetzt, dass eine temperaturgesteuerte Funktion der Randbedingungen implementiert wurde.

Zu Anfang sind eine maximale und eine minimale Grenztemperatur zu definieren. An ausgewählten Sensorpunkten, die über die Zellkoordinaten *i, j* und *k* festgelegt werden, werden die Grenztemperaturen in jedem Zeitschritt überprüft. Sobald an allen Sensorpunkten die minimale Temperatur festgestellt wird, erfolgt die Deaktivierung der Randbedingungen. Die Gefrierrohrzellen werden ab diesem Zeitpunkt nicht mehr mit einer vorgegebenen Temperatur belegt, sondern können die Temperatur verändern. Wird im anderen Fall an lediglich einem Sensorpunkt die maximale Grenztemperatur festgestellt, so erfolgt automatisch die Reaktivierung aller Randbedingungen einer Rohrgruppe. Um den temperaturgesteuerten intermittierenden Betrieb wirtschaftlich zu machen, werden, wie in der Praxis auch üblich, Rohrgruppen eingeführt. Die in der Modelldatei definierten Gefrierrohre (*# temp, bcd*) können alleine oder in Kombination einer beliebigen Anzahl an Rohrgruppen zugeordnet werden. Um die Aktivierung und Deaktivierung der Rohrgruppen zu steuern, ist es erforderlich, die Sensorpunkte bestimmten Rohrgruppen zuzuordnen. Somit können die



Rohrgruppen getrennt voneinander aktiviert bzw. deaktiviert werden. Der intermittierende Betrieb wird bei Vorhandensein der zusätzlichen Input-Datei „intermittend.par“, in der die Grenztemperaturen, die Sensorpunkte und die Rohrgruppen definiert werden, ausgeführt.

Die Möglichkeit der Steuerung eines intermittierenden Betriebs wurde in gleicher Weise auch im „freezrefcap“-Modul, das im folgenden Abschnitt erläutert wird, implementiert.

5.3 Weiterentwicklung von SHEMAT: „freezrefcap“- Modul

Eine detaillierte Ermittlung der erforderlichen Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme kann nur durch die realitätsnahe Abbildung der Strömungs- und Wärmetransportprozesse innerhalb des Gefrierrohrs mit Hilfe numerischer Simulationen erreicht werden. Da die exakte Abbildung der Geometrie der Gefrierrohre sowie der Interaktion zwischen Fluid, Gefrierrohr und Boden eine sehr feine räumliche und damit auch zeitliche Diskretisierung erfordern würde, wurden diese Zusammenhänge in einem separaten Modul in Zusammenarbeit mit der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH entkoppelt. Somit können enorme Modellgrößen, Rechenzeiten und Speicherkapazitäten verhindert werden.

5.3.1 Grundlagen des numerischen Modells

Zur Abbildung der Wärmetransportprozesse wurde das separate „freezrefcap“-Modul entwickelt. Dieses basiert auf einer von Mottaghy und Dijkshoorn (2012) entwickelten Finite-Differenzen-Formulierung zur Simulation von Erdwärmesonden und wurde auf die Verhältnisse einer Vereisungsmaßnahme angepasst und erweitert.

Basierend auf der Kelvin'schen Linienquellentheorie wird das Gefrierrohr als eindimensionale Linienquelle in SHEMAT abgebildet. Die Berechnung der horizontalen Wärmetransportprozesse im Gefrierrohr wird über das Konzept der thermischen Widerstände nach Hellström (1991) im „freezrefcap“-Modul realisiert. Bei der beschriebenen Kopplung gibt es genau zwei Schnittstellen (s. Abbildung 5.2).

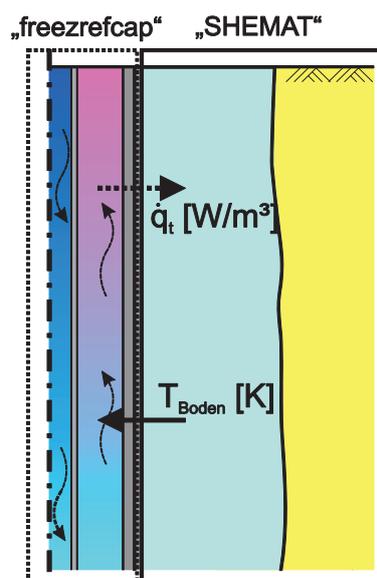
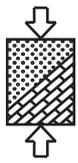


Abbildung 5.2 Kopplung zwischen dem „freezrefcap“-Modul und SHEMAT

Zum einen wird in jedem Zeitschritt die in SHEMAT berechnete Bodentemperatur als Dirichlet-Randbedingung an das „freezrefcap“-Modul übergeben. Damit werden im Modul die



Wärmeübergänge im Gefrierrohr und daraus folgend ein volumetrischer Wärmestrom \dot{q}_t berechnet. Dieser Wärmestrom wird nach der Berechnung des „freezrefcap“-Moduls eines Zeitschritts wieder an die Linienquelle in SHEMAT übergeben und führt dort wiederum zu einer Veränderung der Bodentemperatur.

Innerhalb der numerischen Berechnung im „freezrefcap“-Modul wird das Gefrierrohr in zwei Zellstapel unterteilt, von denen der erste Zellstapel das innere Fallrohr und der zweite Zellstapel das äußere Steigrohr repräsentiert. Die Verbindung der beiden Zellstapel bzw. der Rohre findet über thermische Widerstände statt. Eine Übersicht der für die Berechnung erforderlichen thermischen Widerstände und relevanten Rohrgeometrien gibt Abbildung 5.3.

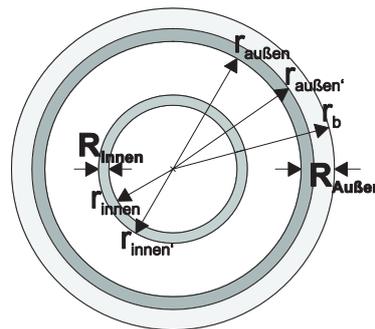


Abbildung 5.3 Gefrierrohrgeometrie und thermische Widerstände im „freezrefcap“-Modul (nach Mottaghy und Dijkshoorn 2012)

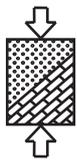
Unter der Annahme eines stationären Zustands wird innerhalb eines Zeitschritts unter Erfüllung der Wärmebilanzgleichung die Temperatur im Innen- und im Außenrohr in jeder Gitterzelle bestimmt. Die vereinfachte Annahme eines stationären Zustands stellt aufgrund relativ hoher Durchflussraten und geringer Gefrierrohrängen eine gerechtfertigte Näherung dar. Die Kühlleistung wird anschließend mit der Temperaturdifferenz von Vor- und Rücklauf der jeweils obersten Zellen des Gefrierrohrs ($T_{F,VL} - T_{F,RL}$), dem Durchfluss Q_F und der temperaturabhängig berechneten volumetrischen Wärmekapazität des Fluids $c_{v,F}$ bestimmt.

$$P = c_{v,F} \cdot Q_F \cdot (T_{F,VL} - T_{F,RL}) \quad (5-1)$$

Die berechnete Kühlleistung wird für jedes Gefrierrohr in einer separaten Datei für jeden Zeitschritt dokumentiert.

Neben der Modelldatei für SHEMAT sind zwei weitere Input-Dateien erforderlich, die die zusätzlichen Eingangsparameter festlegen. Zum einen müssen die maßgeblichen Gefrierrohrparameter definiert werden. Dazu gehören die in Abbildung 5.3 angegebenen Radien des Fall- und Steigrohrs sowie des Bohrlochs, die Wärmeleitfähigkeit des Fall- und Steigrohrs sowie des Verfüllmaterials des Bohrlochs und die Länge des Gefrierrohrs. In der aktuellen Version des „freezrefcap“-Moduls gelten diese Parameter für alle Gefrierrohre und können nicht individuell angepasst werden. Weiterhin ist die Lage der Gefrierrohre im Modellgitter über die Koordinaten i und j anzugeben. Die vertikale Zelleinteilung innerhalb des Gefrierrohrs und der Abstand von der Oberkante sind weitere Eingangsparameter.

Im Rahmen des Projekts wurden die temperaturabhängigen Materialeigenschaften mehrerer üblicher Kälteträger implementiert, die in der Input-Datei über spezifische Zahlenwerte angegeben werden können. Klassischerweise werden Calciumchloridlösungen mit



unterschiedlichen CaCl_2 -Konzentrationen von 29,9%, 27,4% und 28,57% eingesetzt. Die CaCl_2 -Konzentrationen ergeben sich aufgrund des erforderlichen Gefrierpunkts der Sole, der bei 29,9% bei -54°C , bei 28,57% bei -45°C und bei 27,4% bei -38°C liegt. Weiterhin kann zwischen dem Kälteträger Pekasol 2000 und Antifrogen 52% gewählt werden. Die Implementierung weiterer Kälteträger über die temperaturabhängigen Materialeigenschaften ist ohne großen Aufwand möglich.

In einer zweiten Datei sind Informationen zum Gefrierrohrbetrieb einzugeben. Da das „freezrefcap“-Modul die Möglichkeit bietet entweder einen Betrieb mit konstanter Vorlauftemperatur oder mit konstanter Kühlleistung zu simulieren, muss dies zunächst angegeben werden. Die Simulation kann zeitlich in unterschiedliche Perioden unterteilt werden, um zum Beispiel unterschiedliche Durchflüsse zu simulieren. Somit ist die Anzahl der Perioden festzulegen, welche dann auch näher zu definieren sind. Dabei sind neben der Dauer der Periode, die Vorlauftemperatur bzw. die Kühlleistung und der Durchfluss anzugeben. Da das „freezrefcap“-Modul die Simulation eines zirkulierenden und eines stehenden Fluids ermöglicht, ist dies ebenfalls für die jeweilige Periode zu definieren.

Da im Rahmen von numerischen Simulationen ein Herunterkühlen des Kälteträgers im Gefrierrohr nicht immer beachtet wird, wurde ein zusätzlicher Eingangsparameter `# temp_start` eingeführt. Da die Gefrierrohrzellen am Anfang der Berechnung mit der Ausgangsbodentemperatur belegt sind, entsteht bei einer Vernachlässigung des Herunterkühlens ein großer Temperaturgradient, der zu einer Instabilität der Berechnung aufgrund von Oszillationen führen kann. Dieses Problem kann durch die variable Vorgabe einer Starttemperatur im Gefrierrohr beherrscht werden.

5.3.2 Numerische Berechnung der Wärmeströme

Das „freezrefcap“-Modul ermöglicht die Simulation eines zirkulierenden oder eines stehenden Fluids. Diese unterschiedlichen Strömungsbedingungen innerhalb des Gefrierrohrs erfordern verschiedene Ansätze zur Berechnung der thermischen Widerstände, da andere Wärmetransportmechanismen maßgebend werden. Aus diesem Grund unterscheidet das Modul die Berechnung im Fall „Flow“ oder „No Flow“.

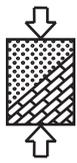
Berechnung im Fall „Flow“

Zirkuliert das Fluid im Gefrierrohr setzen sich die thermischen Widerstände nach Abbildung 5.3 sowohl aus konduktiven als auch aus konvektiven Anteilen zusammen. Der thermische Gesamtwiderstand des Fallrohrs R_{innen} besteht aus zwei konvektiven Teilwiderständen, jeweils an der Innen- und Außenseite des Fallrohrs $R_{\text{konv,innen}}$ und $R_{\text{konv,innen}'}$ sowie einem konduktiven Widerstand des Fallrohrs $R_{\text{kond,innen}}$ und wird mit Gleichung (5-2) berechnet.

$$R_{\text{innen}} = R_{\text{konv,innen}} + R_{\text{konv,innen}'} + R_{\text{kond,innen}} \quad (5-2)$$

Im Steigrohr setzt sich der thermische Gesamtwiderstand $R_{\text{außen}}$ aus lediglich einem konvektiven Anteil an der Innenseite des Außenrohrs $R_{\text{konv,außen}}$ und einem konduktiven Anteil des Steigrohrs $R_{\text{kond,außen}}$ zusammen.

$$R_{\text{außen}} = R_{\text{konv,außen}} + R_{\text{kond,außen}} \quad (5-3)$$



Die einzelnen Teilwiderstände werden basierend auf den in Kapitel 3.2 angegebenen Gleichungen bestimmt.

Die Berechnung der thermischen Widerstände ebenso wie die darauf folgende Berechnung der Wärmeströme eines Zeitschritts t erfolgt auf Grundlage der Temperaturen des vorherigen Zeitschritts $(t-1)$. Abbildung 5.4 zeigt eine schematische Übersicht der Berechnungsgrundlage der Wärmeströme und Temperaturen im „freezrefcap“-Modul. Der Bezugshorizont des Gitternetzes liegt im Fall „Flow“ auf Höhe der Bodentemperatur T_B aus SHEMAT und somit in Zellmitte.

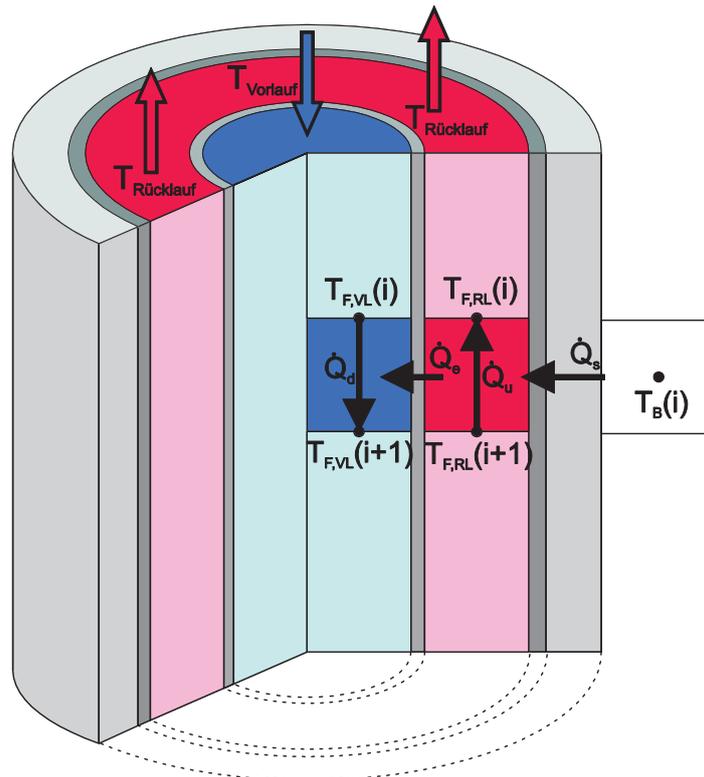


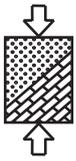
Abbildung 5.4 Grundlage des „freezrefcap“-Moduls im Fall „Flow“
(nach Mottaghy und Dijkshoorn 2012)

Aufgrund der Strömungsbewegung innerhalb des Gefrierrohres müssen bei der Berechnung der Wärmeströme verschiedene Zellschichten i betrachtet werden. Der Wärmestrom \dot{Q}_s zwischen Boden und Steigrohr wird nach Gleichung (5-4) mit der Temperatur des Bodens und der Fluidtemperatur des Rücklaufs berechnet.

$$\dot{Q}_s = \frac{T_B(i) - T_{F,RL}^{t-1}(i+1)}{R_{\text{außen}}} \quad (5-4)$$

Die Berechnung des Wärmestroms \dot{Q}_e zwischen Vor- und Rücklauf erfolgt aufgrund des strömenden Fluids auf versetzten Zellschichten nach Gleichung (5-5).

$$\dot{Q}_e = \frac{T_{F,RL}^{t-1}(i+1) - T_{F,VL}^{t-1}(i)}{R_{\text{innen}}} \quad (5-5)$$



Der Grund für die Berechnung des Wärmestroms zwischen versetzten Zelllagen liegt in Beibehaltung des Zellabstands, der in Abbildung 5.5 veranschaulicht wird. Im linken Teilbild ist die Grundlage für die Berechnung des Wärmestroms \dot{Q}_e auf versetzten Zelllagen zu erkennen. In beiden Zeitschritten ist der Abstand der betrachteten Temperaturpunkte gleich groß. Das rechte Teilbild hingegen zeigt die Bewegung der Temperaturpunkte, wenn die gleiche Lage betrachtet würde. Hier ergibt sich ein doppelt so großer Abstand aufgrund der entgegengesetzten Fließbewegung von Vor- und Rücklauf.

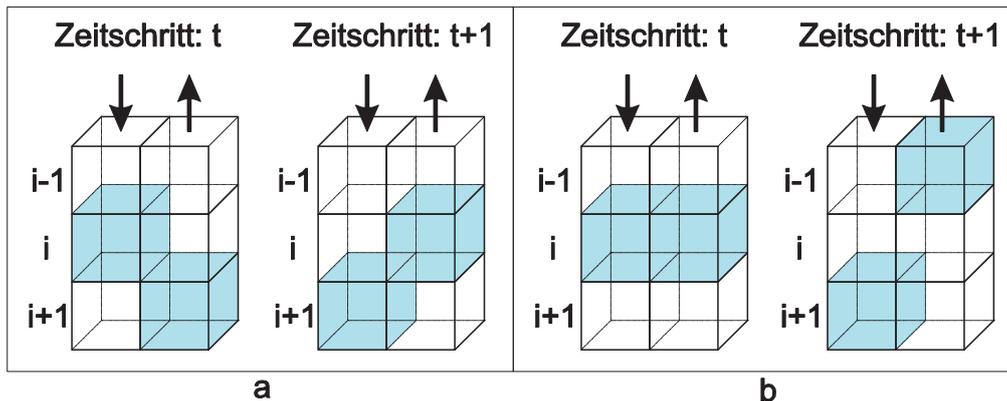


Abbildung 5.5 Schematische Darstellung der Bewegung der Temperaturpunkte im Rohr

Die aus den Wärmeströmen \dot{Q}_s und \dot{Q}_e resultierenden Temperaturänderungen im Vor- und Rücklauf werden zusätzlich unter Berücksichtigung der Bewegung des Fluids berechnet. Die Temperatur einer Zelle i im Vorlauf wird im Zeitschritt t auf Grundlage der Temperatur der darüber liegenden Zelle $(i-1)$ des vorherigen Zeitschritts $(t-1)$ berechnet.

$$T_{F,VL}^t(i) = T_{F,VL}^{t-1}(i-1) + \frac{\dot{Q}_e}{q_F \cdot c_{v,F}} \quad (5-6)$$

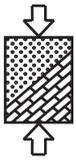
Im Rücklauf wird die Temperatur einer Zelle i im Zeitschritt t auf Grundlage der Temperatur der darunter liegenden Zelle $(i+1)$ des vorherigen Zeitschritts $(t-1)$ bestimmt.

$$T_{F,RL}^t(i) = T_{F,RL}^{t-1}(i+1) + \frac{-\dot{Q}_e + \dot{Q}_s}{q_F \cdot c_{v,F}} \quad (5-7)$$

Die vorgestellten Berechnungsschritte werden nacheinander für jede Zelle i zuerst des Vorlaufs und anschließend auch nochmal des Rücklaufs durchgeführt. Um alle Temperaturänderungen innerhalb des Gefrierrohrs in einem Zeitschritt zu erfassen, werden die zum Zeitpunkt t berechneten Temperaturen der jeweiligen Zellen i direkt auf den Zeitpunkt $(t-1)$ gesetzt. Somit kann sich die Temperatur in Bewegungsrichtung entsprechend den Gleichungen (5-6) und (5-7) innerhalb eines Zeitschritts fortpflanzen.

Berechnung im Fall „No Flow“

Durch eine Deaktivierung der Gefrierrohre kommt das vorher zirkulierende Fluid zum Stehen und die thermischen Widerstände verändern sich, da die Anteile aus Konvektion entfallen. Es findet demnach nur noch Konduktion statt, diese aber nicht nur in radialer Richtung, wie im Fall „Flow“, sondern auch in vertikaler Richtung. Aufgrund des Temperaturverlaufs



innerhalb des Gefrierrohrs entstehen auf- bzw. abwärts gerichtete Wärmeströme im stehenden Fluid infolge Wärmeleitung. Somit müssen nicht nur die thermischen Widerstände $R_{\text{kond,innen}}$ und $R_{\text{kond,außen}}$ berücksichtigt werden, sondern ebenfalls vertikale thermische Widerstände $R_{\text{kond,VL}}$ und $R_{\text{kond,RL}}$, die Basis der Zusammenhänge in Kapitel 3.2 bestimmt werden.

Für die Berechnung der Wärmeströme im Fall „No Flow“ wird ein neuer Bezugshorizont eingeführt, so dass die Wärmeströme nun auf den Zellrändern der Zellen in SHEMAT liegen (s. Abbildung 5.6).

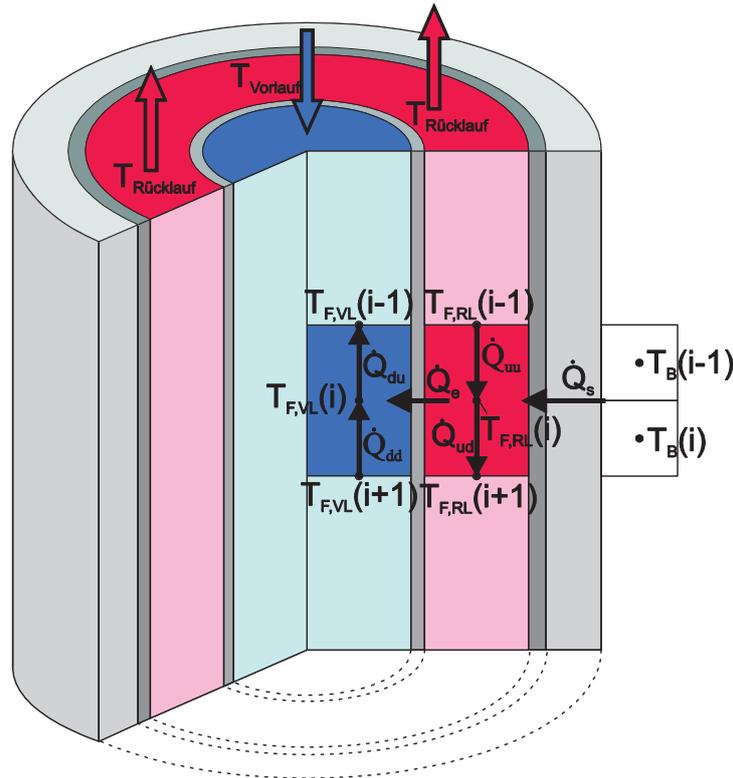


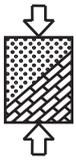
Abbildung 5.6 Grundlage des „freezrefcap“-Moduls im Fall „No Flow“ (nach Mottaghy und Dijkshoorn 2012)

Zur Berechnung des Wärmestroms \dot{Q}_s müssen die Bodentemperaturen der Lagen i und $(i+1)$ aufgrund der unterschiedlichen Lage der Temperaturen im „freezrefcap“-Modul und in SHEMAT gemittelt werden. Für die Berechnung von \dot{Q}_e bedarf es hingegen keiner Mittelung, da die Temperaturen auf einem Bezugshorizont liegen.

$$\dot{Q}_s = \frac{\left(\frac{T_B(i) + T_B(i-1)}{2}\right) - T_{F,RL}^{t-1}(i)}{R_{\text{außen}}} \quad (5-8)$$

$$\dot{Q}_e = \frac{T_{F,RL}^{t-1}(i) - T_{F,VL}^{t-1}(i)}{R_{\text{innen}}} \quad (5-9)$$

Die aufwärts und abwärts gerichteten Wärmeströme im Vor- (\dot{Q}_{du} und \dot{Q}_{dd}) und Rücklauf (\dot{Q}_{ud} und \dot{Q}_{uu}) fallen aufgrund der geringen Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf an



der Gefrieranlage meistens gering aus. Die Berechnung erfolgt nach Gleichungen (5-10) bis (5-13).

$$\dot{Q}_{du} = \frac{T_{F,VL}^{t-1}(i) - T_{F,VL}^{t-1}(i-1)}{R_{kond, VL}} \quad (5-10)$$

$$\dot{Q}_{dd} = \frac{T_{F,VL}^{t-1}(i+1) - T_{F,VL}^{t-1}(i)}{R_{kond, VL}} \quad (5-11)$$

$$\dot{Q}_{ud} = \frac{T_{F,RL}^{t-1}(i+1) - T_{F,RL}^{t-1}(i)}{R_{kond, RL}} \quad (5-12)$$

$$\dot{Q}_{uu} = \frac{T_{F,RL}^{t-1}(i) - T_{F,RL}^{t-1}(i-1)}{R_{kond, RL}} \quad (5-13)$$

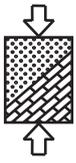
Die Fluidtemperaturen des Zeitschritts t werden auf Grundlage der Temperaturen des Zeitschritts $(t-1)$ in der gleichen Lage i berechnet, da sich das Fluid in Ruhe befindet.

$$T_{F,VL}^t(i) = T_{F,VL}^{t-1}(i) + \frac{\Delta t}{dz \cdot c_{v,F} \cdot \pi \cdot r_{innen}^2} \cdot (\dot{Q}_e - \dot{Q}_{dd} - \dot{Q}_{du}) \quad (5-14)$$

$$T_{F,RL}^t(i) = T_{F,RL}^{t-1}(i) + \frac{\Delta t}{dz \cdot c_{v,F} \cdot \pi \cdot (r_{au\beta en}^2 - r_{innen'}^2)} \cdot (\dot{Q}_s - \dot{Q}_e - \dot{Q}_{ud} - \dot{Q}_{uu}) \quad (5-15)$$

In den Berechnungen nach Gleichung (5-14) und (5-15) wird deutlich, dass eine Abhängigkeit des Ergebnisses vom Zeitschritt Δt vorliegt. Im Fall kleiner Zeitschrittweiten stellt dies kein Problem dar, da die Änderung ebenfalls klein ist. Werden zur Reduzierung der Rechenzeit unter der Einhaltung der Stabilitätskriterien größere Zeitschritte verwendet, kann dies zu unrealistisch hohen Temperaturänderungen führen. Um dies zu beherrschen, wurde eine Kontrollfunktion eingeführt, die die berechnete Temperaturänderung ΔT mit der maximal möglichen Temperaturänderung ΔT_{max} vergleicht. Die maximal mögliche Temperatur ΔT_{max} entspricht in diesem Fall der Temperaturdifferenz, die den Wärmestrom verursacht. Somit wird eine aufgrund des Zeitschritts Δt berechnete, zu große Änderung abgefangen und durch ΔT_{max} ersetzt. Trotz dieser Kontrollfunktion empfiehlt es sich, eine möglichst kleine Zeitschrittweite zu wählen.

Im Fall „No Flow“ entfällt die abschließende Berechnung der Kühlleistung, da diese zu Null gesetzt werden kann. An der Schnittstelle zwischen SHEMAT und dem „freezrefcap“-Modul wird für diesen Fall ein volumetrischer Wärmestrom von $q_t = 0$ übergeben. Die Bodentemperatur und die Temperatur im Gefrierrohr können sich somit in Abhängigkeit der vorhandenen Verhältnisse im Untergrund frei einstellen.



6 Verifikation der Programmsysteme

Im vorliegenden Kapitel soll zum einen die neu implementierte vereinfachte Kühlleistungsermittlung des „freezing“-Moduls verifiziert werden, da das ursprüngliche „freezing“-Modul bereits von Baier (2009) verifiziert wurde. Zum anderen soll das neu erstellte „freezrefcap“-Modul zur detaillierten Bestimmung der Kühlleistung durch eine genaue Abbildung der Gefrierrohre verifiziert werden. In einem ersten Schritt wird dazu ein Modellversuch der ETH-Zürich (Sres 2010) nachgerechnet, der über eine ausreichende Datenbasis verfügt. Im Anschluss wird der Versuch unternommen, eine reale Vereisungsmaßnahme zur Herstellung von Querschlägen im Zuge des Baus des Statentunnels in Rotterdam mit dem detaillierten „freezrefcap“-Modul nachzurechnen. Daraus lässt sich weiterer Optimierungsbedarf für das Lösungsmodell ableiten.

6.1 Nachrechnung eines Modellversuchs

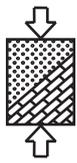
Als Modellversuch wurde ein an der ETH-Zürich von Herrn Dr.-Ing. Anton Sres (Sres 2010; Pimentel et al. 2012) durchgeführter Großversuch ausgewählt, da bei diesem Modellversuch zur Frostkörperausbreitung unter Strömungseinfluss sowohl die Temperaturverteilung im Bodenkörper als auch die Vor- und Rücklauftemperatur sowie der Durchfluss der Gefrieranlage aufgezeichnet wurde. Andere, in der Literatur zu findende, Modellversuche verfügen nicht über eine entsprechende Datenbasis. Für die Bereitstellung der Messdaten sei an dieser Stelle Herrn Dr. Pimentel und Herrn Prof. Anagnostou von der ETH-Zürich herzlich gedankt.

6.1.1 Versuchsaufbau und Eingangsparameter

Für die Konstruktion dieses Großversuchs wurde eine 1,3 m x 1,0 m x 1,3 m große wasserdichte PVC-Wanne verwendet. Um die Randeinflüsse gering zu halten, wurden alle Kontaktflächen thermisch isoliert. Zur Überprüfung der Isolation wurden mit Hilfe einer Infrarot-Kamera Wärmebilder des Versuchsaufbaus im Betrieb aufgenommen, die auf eine gute Isolation hinwiesen. Außerdem wurde die gesamte PVC-Wanne mit Holzträgern und Ankern ausgesteift, um mögliche Verformungen zu minimieren (Sres 2010).

Der Aufbau des Modellversuchs im Inneren der PVC-Wanne ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Insgesamt wurden drei Gefrierlanzen mit einem Durchmesser von 41 mm und einem Abstand untereinander von 322 mm eingebaut. Der Randabstand in y-Richtung betrug 178 mm. Die Gefrierlanzen können durch eine Strömung in x-Richtung beeinflusst werden, die durch zwei höhenverstellbare Wasserbehälter an den jeweiligen Seiten eingestellt werden kann. Zum Deckel hin wurde der Bodenkörper noch von einer 10 cm dicken Luftschicht überlagert (Sres 2010).

Die Diskretisierung des numerischen Modells erfolgte unter Einhaltung der Stabilitätskriterien (s. Kapitel 7.1) und der Lage der Temperaturmesspunkt. Als Modellboden wurde ein enggestufter Sand, bezeichnet als Weiacher Sand, aus einer Kiesgrube in der Nähe von Zürich verwendet. Die Bestimmung der Trockendichte ρ_d , des Quarzgehaltes q , der Körnungslinie und der Kornwichte ρ_s des Weiacher Sands erfolgte durch Laborversuche



(Sres 2010). Auf dieser Grundlage konnten die für SHEMAT notwendigen Eingangsparameter des Bodens (s. Baier 2009) bestimmt werden (Tabelle 6.1).

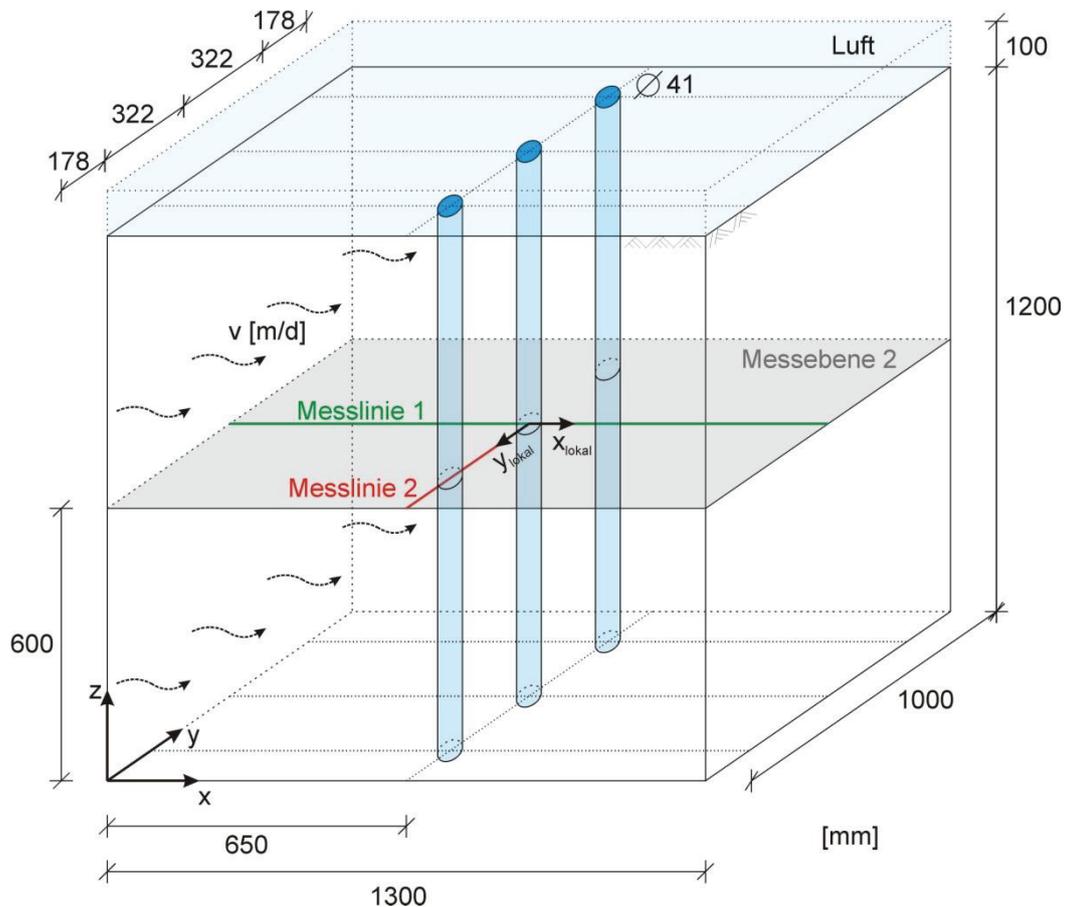
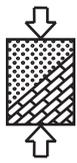


Abbildung 6.1 Aufbau und Geometrie des Großversuchs nach Sres (2010)

Tabelle 6.1 Eingangswerte der Bodeneigenschaften des Modellversuchs für SHEMAT

Parameter SHEMAT	Bestimmung bzw. Abschätzung	Wert	Einheit
Trockendichte ρ_d	Versuch (Sres)	1571	kg/m ³
Korndichte ρ_s	Versuch (Sres)	2665	kg/m ³
Porosität n	$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$	0,41	-
Quarzgehalt q	Versuch (Sres)	0,446	-
Wärmeleitfähigkeit λ_s nach Johansen & Frivik (1980)	$\lambda_s = \lambda_q^q \cdot \lambda_M^{(1-q)} = 8,8^q \cdot 2,0^{(1-q)}$	3,873	W/(mK)
Permeabilität k	$k = \frac{v(T)}{\rho_w(T) \cdot g} \cdot k_f(T) \rightarrow k_f$ Versuch (Sres)	$1,1886E^{-11}$	m ²
Parameter a und b des ungefrorenen Wassergehalts (w_u -Verlauf nach Anderson & Tice (1972))	über Körnungslinie (Sres 2010) Regression: $w_u = a \cdot T ^b$	a = 0,0825 b = -5,417	-
Kompressibilität des Gesteins α_s	Literaturwerte	$1,00E^{-08}$	Pa ⁻¹
Impedanzfaktor E	Literaturwert (Sand: 5-15)	10	-

Der gesamte Modellboden war mit einer Reihe von Temperaturfühlern versehen. Ein Großteil diente der Bestimmung der Frostausbreitung und wurde deshalb auf der Messlinie 2



unter Ausnutzung der Symmetrie zwischen den Gefrierrohren, also quer zur Strömung, und der Messlinie 1 im An- und Abstrom, also parallel zur Strömung, angeordnet. Beide Messlinien liegen in der Messebene 2, die sich in der Mitte des Modellversuchs befindet. Weitere Temperaturfühler wurden beispielsweise zur Bestimmung der Temperaturen an den Modellrändern angeordnet. Es wurden mehrere Versuche mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten in zwei Versuchsreihen durchgeführt. Aufgrund eines Montagefehlers in der ersten Versuchsreihe war die Leistung der mittleren Gefrierlanze geringer als die der beiden äußeren Gefrierlanzen. Dieser Fehler konnte in einer zweiten Versuchsreihe behoben werden, so dass die Leistung auf alle Gefrierlanzen gleichmäßig verteilt wurde (Sres 2010).

Für die Verifikation der Module wurden letztlich zwei Versuche ausgewählt. Zum einen ein Versuch ohne Einfluss einer Grundwasserströmung und zum anderen ein Versuch mit einer Grundwasserströmung von $v = 1,5$ m/d. In ersten Überlegungen war angedacht, auch einen Versuch mit einer größeren Strömungsgeschwindigkeit von $v = 2,1$ m/d zu untersuchen. Bei einem Vergleich der Messdaten der Kühlleistungen der drei Versuche (s. Abbildung 6.2) zeigte sich allerdings, dass die Kühlleistung für $v = 1,5$ m/d und $v = 2,1$ m/d nahezu identisch verliefen. Allgemein wäre eine Erhöhung der erforderlichen Kühlleistung zu erwarten gewesen, da der eingetragene Wärmestrom größer ist und das Frostkörperwachstum langsamer verläuft. Da die Messwerte diese Erwartungen nicht belegten, könnte eine Veränderung des Bodens im Modellversuch stattgefunden haben. Darauf deutet auch die Übersicht der Versuche in den Aufzeichnungen von Sres (2010) hin, die Schwankungen in der Durchlässigkeit und den Schließzeiten der verschiedenen Versuche zeigt.

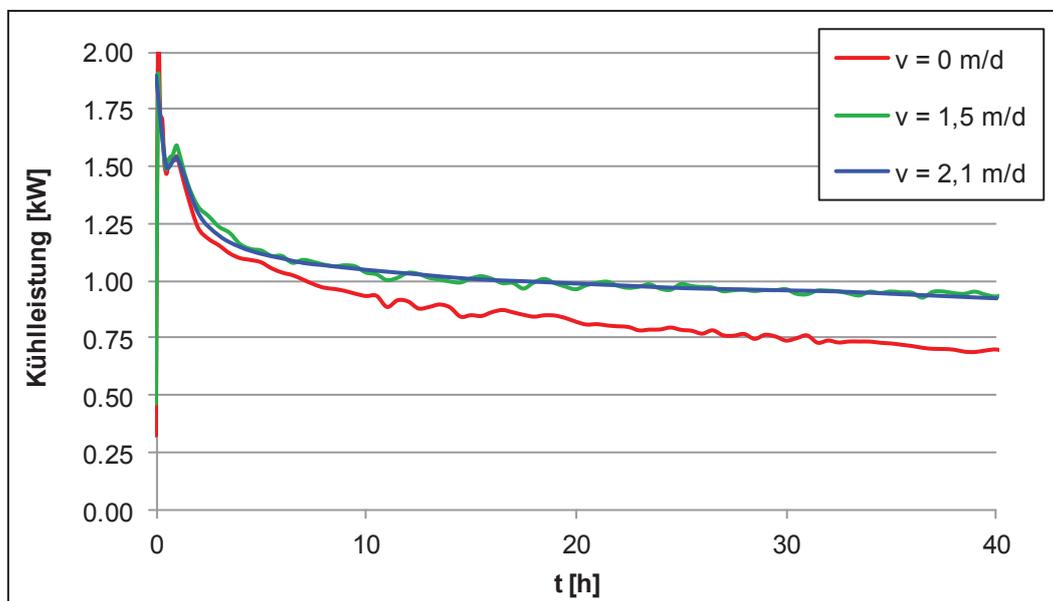
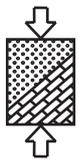


Abbildung 6.2 Vergleich der gemessenen Kühlleistung dreier Versuche von Sres (2010)

Eine Ursache für die Veränderung des Bodens im Modellversuch könnte in dem fehlenden Aus- und Wiedereinbau zwischen den einzelnen Versuchen liegen. In den einzelnen Versuchen wurde der Gefrierprozess unter Einfluss großer Strömungsgeschwindigkeiten untersucht. Durch die großen Strömungsgeschwindigkeiten können sich Erosionskanäle gebildet haben, die eine gleichmäßige Strömungsverteilung in einem folgenden Versuch



verhinderten. Als weitere Folge könnten Veränderungen in den Porenkanälen aufgetreten sein, die den Frostkörperfortschritt signifikant beeinflussen können.

6.1.2 Ergebnisse der Simulation mit dem „freezing“- Modul

Das „freezing“-Modul im Allgemeinen wurde bereits von Baier (2009) durch die Nachrechnung zweier Modellversuche, von Makowski (1986) ohne Strömung und von Frivik und Comini (1982) mit Strömung verifiziert. Durch die Nachrechnung des Modellversuchs von Sres (2010) soll nun die vereinfachte Kühlleistungsermittlung verifiziert werden.

Für die Simulationen mit dem „freezing“-Modul wurden sowohl zwei- als auch dreidimensionale Berechnungen durchgeführt, deren Ergebnisse nahezu identisch sind. Aufgrund der Lage der Temperaturfühler wurden die Ergebnisse stets in Messebene 2 (s. Abbildung 6.1) mit den Messwerten verglichen. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse der dreidimensionalen Berechnungen dargestellt. Da im „freezing“-Modul die Gefrierrohre i.d.R. über Dirichlet-Randbedingungen modelliert werden, musste der Temperaturverlauf in den Gefrierrohren über die Vor- und Rücklauftemperatur sowie Temperaturmesspunkte an der Oberfläche der Gefrierrohre im Boden angenähert werden. Neben der Vorgabe der Gefrierrohrtemperatur wurden auch die System-Ränder mit aus den Messdaten abgeleiteten Temperatur-Randbedingungen zur Abbildung der Randeinflüsse belegt. In SHEMAT wurden die Temperaturrandbedingungen jeweils über einen zeitabhängigen Verlauf in Form einer Treppenfunktion angenähert.

Zu Anfang wurde der Modellversuch ohne Strömung simuliert, bei dem sich der Frostkörper annähernd rotationssymmetrisch ausbildet. In Abbildung 6.3 ist die Temperaturverteilung infolge der Messwerte und der numerischen Simulation zwischen dem rechten und dem mittleren Gefrierrohr (Messlinie 2 in Abbildung 6.1) vergleichend dargestellt. Die Gefrierrohre sind der Übersicht halber in Form von grauen Balken kenntlich gemacht. Der Verlauf der im Versuch gemessenen Werte ist durch quadratische Messpunkte gekennzeichnet. Die Temperaturverläufe der Simulation sind als durchgezogene Linien zu erkennen.

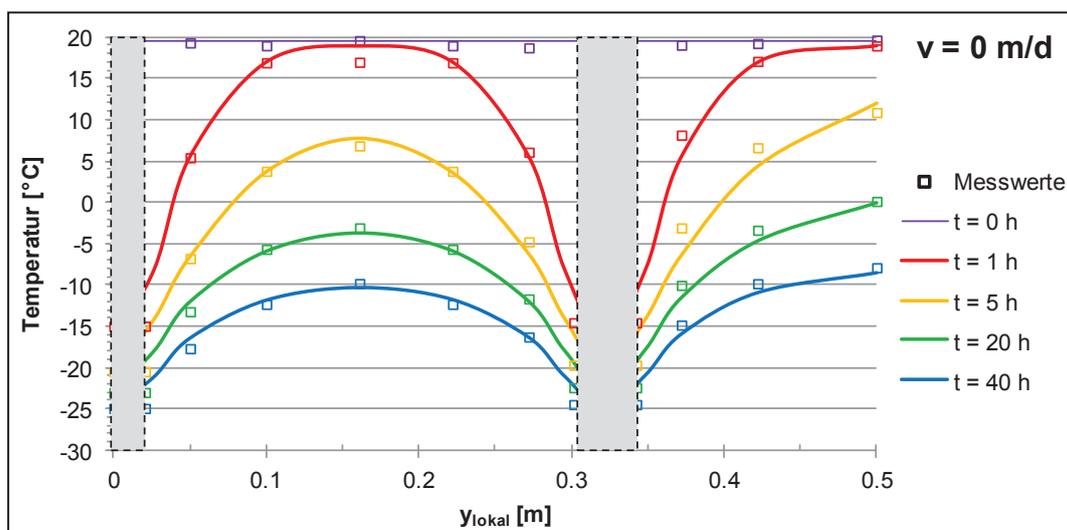


Abbildung 6.3 Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 2) ohne Strömung

Abbildung 6.4 zeigt die Temperaturverteilung im Boden in der Messlinie 1 – also im Schnitt durch das mittlere Gefrierrohr.

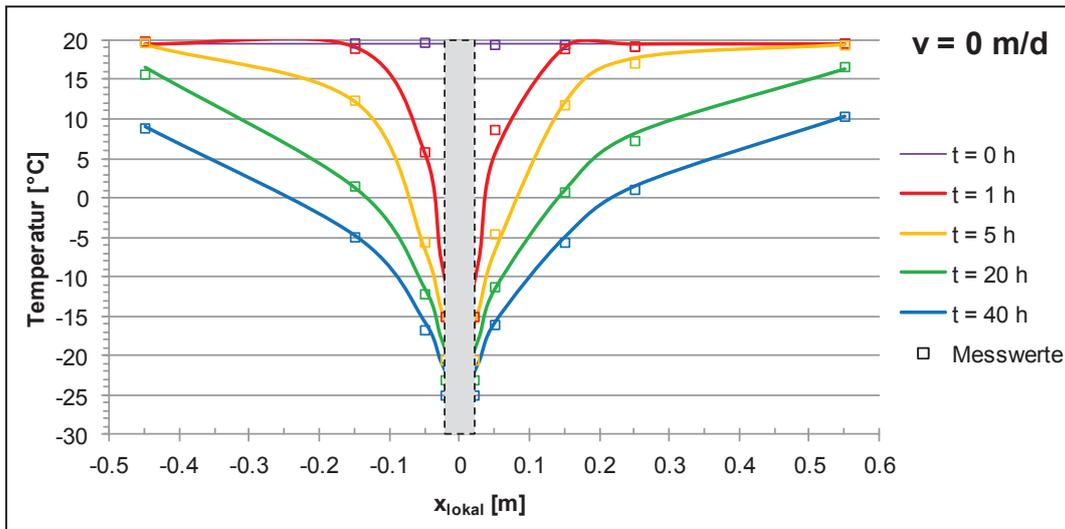
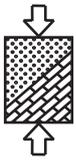


Abbildung 6.4 Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 1) ohne Strömung

Die Simulationsergebnisse zeigen sowohl in Messlinie 1 als auch in Messlinie 2 eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten des Versuchs. Es wird also deutlich, dass die Temperaturverläufe im Boden ohne Strömungseinfluss (reine Wärmeleitung) mit dem „freezing“-Modul hinreichend genau abgebildet werden können.

In Abbildung 6.5 ist die gemessene Kühlleistung im Modellversuch (rot) dem Verlauf der Kühlleistung der Simulation (blau) gegenübergestellt. Der Verlauf der gemessenen Kühlleistung aus dem Modellversuch stellt einen um die Verluste der Gefrieranlage korrigierten Verlauf dar. Diese Systemverluste wurden von Sres (2010) durch einen Nullversuch ermittelt, bei dem die Kühlleistung der Anlage für mit Isolationsmaterial umwickelte Gefrierlansen gemessen wurde. Der gezackte Verlauf der Kühlleistung in der Simulation ergibt sich aufgrund der treppenförmigen Abbildung der Gefrierrohrtemperatur.

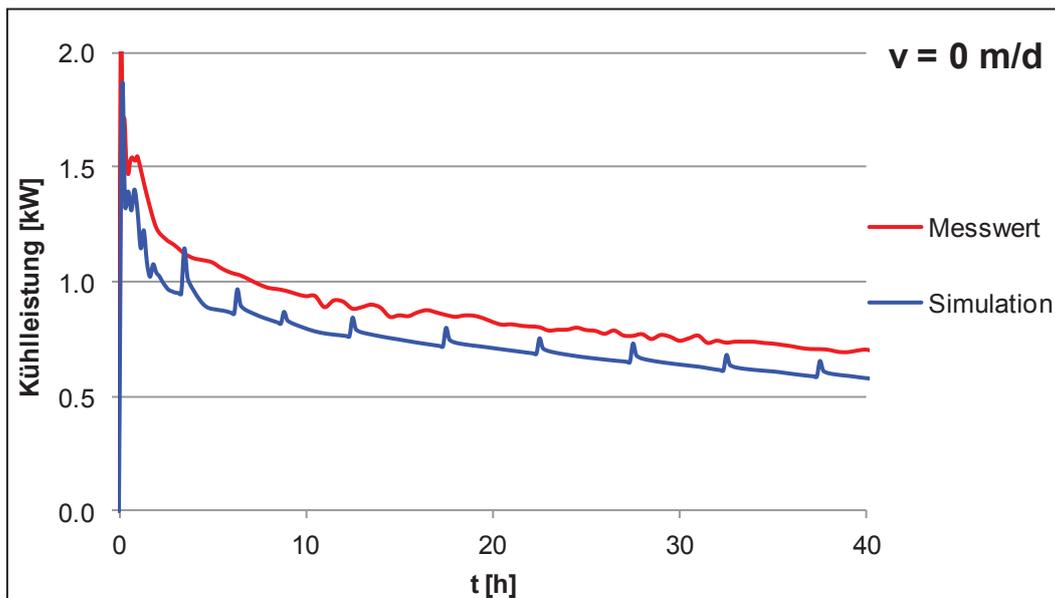
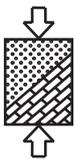


Abbildung 6.5 Vergleich der gemessenen und simulierten Kühlleistung ohne Strömung

Der Vergleich zwischen simulierter und gemessener Kühlleistung zeigt bereits zufriedenstellende Ergebnisse. Der Verlauf der Kühlleistung und die Entwicklung über die



Zeit können gut abgebildet werden. Die Kühlleistung der Simulation weicht lediglich um eine nahezu konstante Differenz von der gemessenen Kühlleistung ab, die in etwa bei 14% liegt.

In einem nächsten Schritt wurde ein Versuch mit einer Strömungsgeschwindigkeit von $v = 1,5 \text{ m/d}$ nachgerechnet. Die Ergebnisse der Temperaturverläufe quer zur Strömungsrichtung sind in Abbildung 6.6 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Verläufe mit einer guten Genauigkeit, vor allem zwischen den Gefrierrohren, abgebildet werden können. Die Temperaturverläufe im Randbereich hingegen werden in der Simulation tendenziell unterschätzt. Grund hierfür könnte eventuell eine Veränderung des Strömungszustands in diesem Bereich sein, der aus der bereits erwähnten Porenraumänderung und überlagerten Düseneffekten in diesem Bereich infolge des geringen Randabstands von 17,8 cm resultiert.

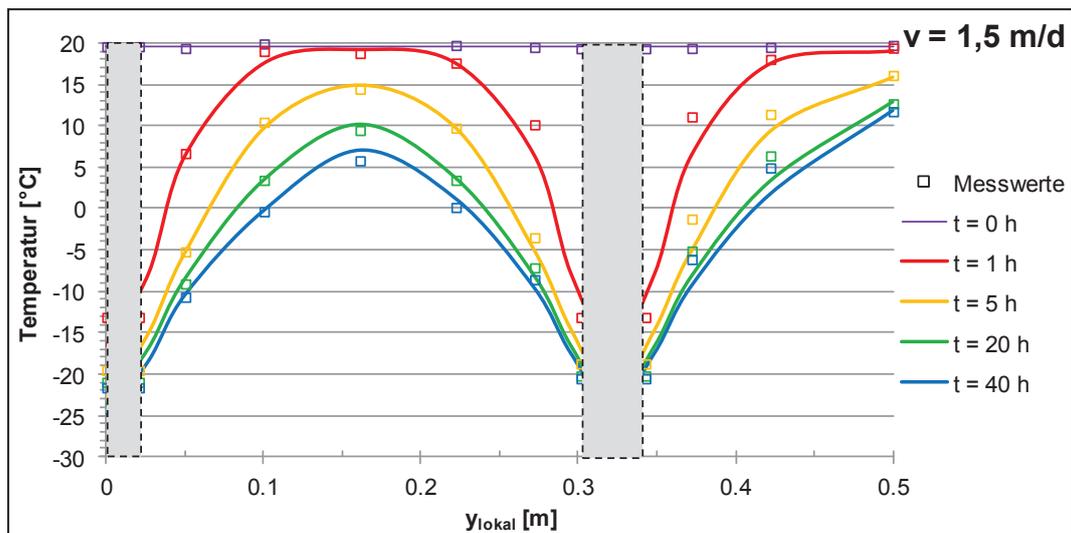


Abbildung 6.6 Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 2) für $v = 1,5 \text{ m/d}$

Die Temperaturverläufe im An- und Abstrom für eine Strömungsgeschwindigkeit von $v = 1,5 \text{ m/d}$ in Abbildung 6.7 zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den Ergebnissen der Simulation.

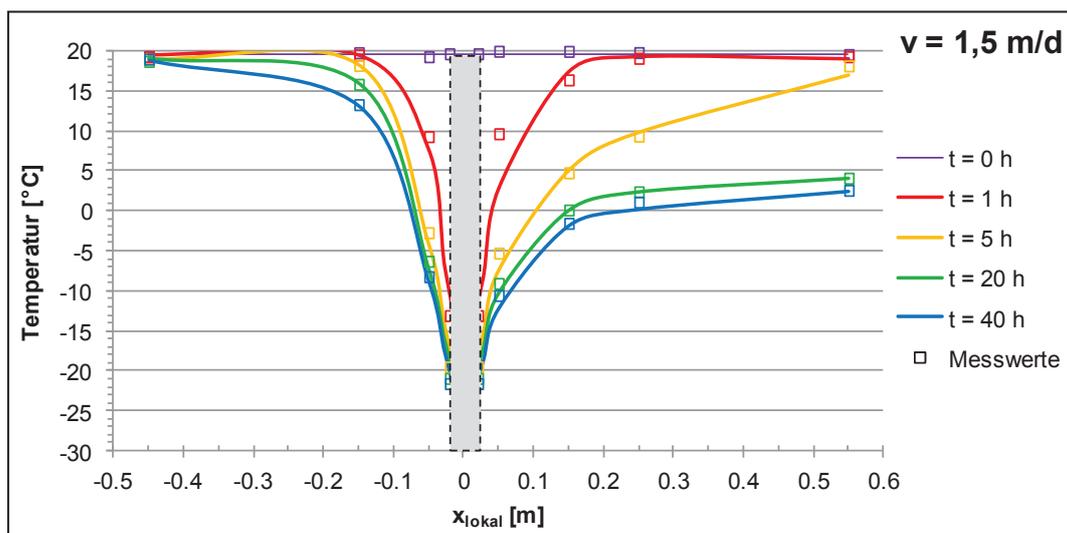
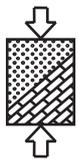


Abbildung 6.7 Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 1) für $v = 1,5 \text{ m/d}$



Im Allgemeinen zeigen die Ergebnisse des Versuchs mit einer Strömung von $v = 1,5 \text{ m/d}$ eine Verzögerung des Aufgefrierprozesses im Vergleich zum Versuch ohne Strömung. Ebenfalls sind die sich ergebenden Temperaturfahnen im Abstrom zu erkennen.

Die im Versuch gemessene Kühlleistung ist in Abbildung 6.8 der Kühlleistung der Simulation für eine Fließgeschwindigkeit von $v = 1,5 \text{ m/d}$ gegenübergestellt und zeigt eine gute Übereinstimmung. Wie bei dem in Abbildung 6.5 dargestellten Vergleich der Kühlleistungen für den Versuch ohne Strömung ist auch in diesem Fall eine annähernd konstante Differenz der Kühlleistung zwischen Versuch und Simulation zu erkennen, die aber nur bei etwa 4% liegt. Der Verlauf und die Entwicklung der Kühlleistung werden gut abgebildet.

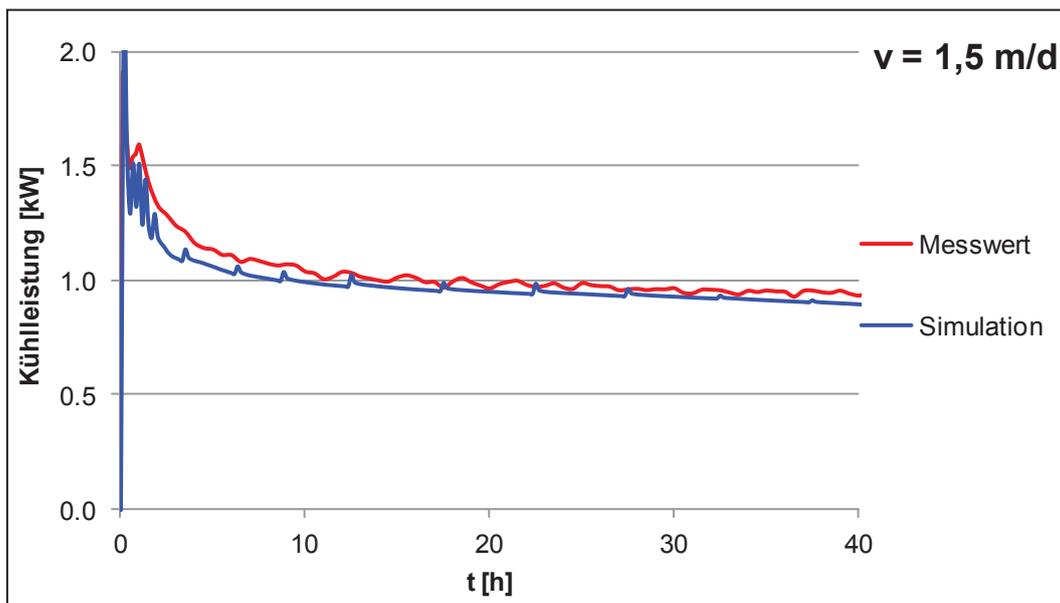


Abbildung 6.8 Vergleich der gemessenen und simulierten Kühlleistung für $v = 1,5 \text{ m/d}$

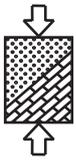
Die Abweichungen zwischen der simulierten und der gemessenen Kühlleistung sind sowohl für die Verläufe der Kühlleistung für einen Versuch ohne als auch mit Strömung zu erkennen. In beiden Fällen wurde die erforderliche Kühlleistung, die jeweils einer reinen Gefrierleistung entspricht, unterschätzt. Der Grund für die Unterschätzung könnte in der Vernachlässigung der Wärmetransportvorgänge im Gefrierrohr liegen, die mit dem vereinfachten „freezing“-Modul nicht berücksichtigt werden.

Eine numerische Simulation der Modellversuche mit dem detaillierten „freezrefcap“-Modul, das die Wärmeübergänge berücksichtigt, müsste die Kurve der erforderlichen Kühlleistung dementsprechend nach oben verschieben.

6.1.3 Ergebnisse der Simulation mit dem „freezrefcap“-Modul

Für die Verifikation des neuen, detaillierten „freezrefcap“-Moduls wurde das grundlegende, numerische Modell der Versuche der Nachrechnung mit dem „freezing“-Modul verwendet. Anstelle der Vorgabe der Gefrierrohrtemperatur über eine Dirichlet-Randbedingung („freezing“-Modul) wurde nun der zeitabhängige Verlauf der Vorlauftemperatur und des Durchflusses als Treppenfunktion über die zusätzlichen Input-Dateien abgebildet

Die Temperaturverteilungen im Bodenkörper des Versuchs ohne Strömung mit den beschriebenen Eingangsparametern sind in Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10 dargestellt. Es



ist gut zu erkennen, dass eine gute Übereinstimmung zwischen Messwerten und Simulationsergebnissen besteht. Die Ergebnisse sind quasi identisch mit denen des „freezing“-Moduls.

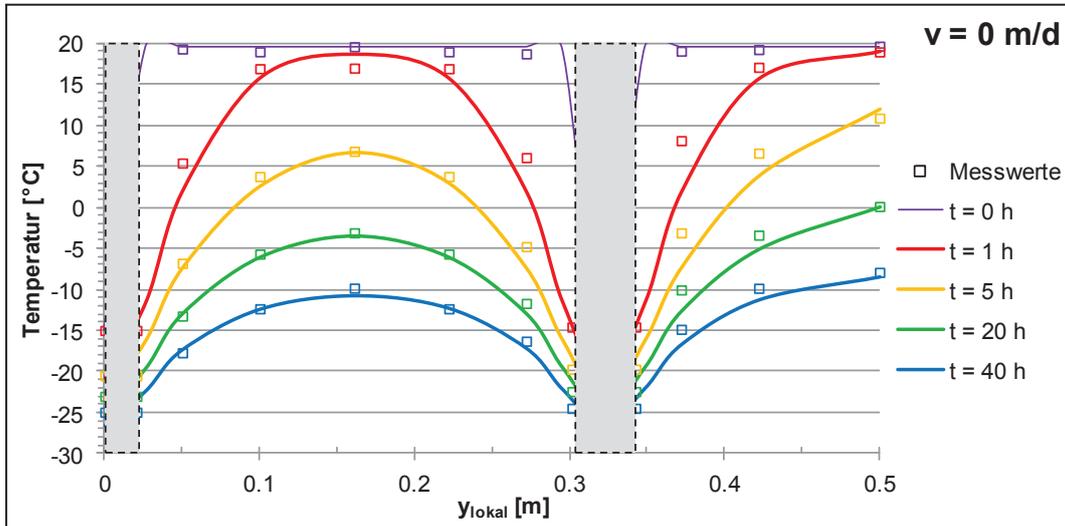


Abbildung 6.9 Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 2) ohne Strömung („freezrefcap“-Modul)

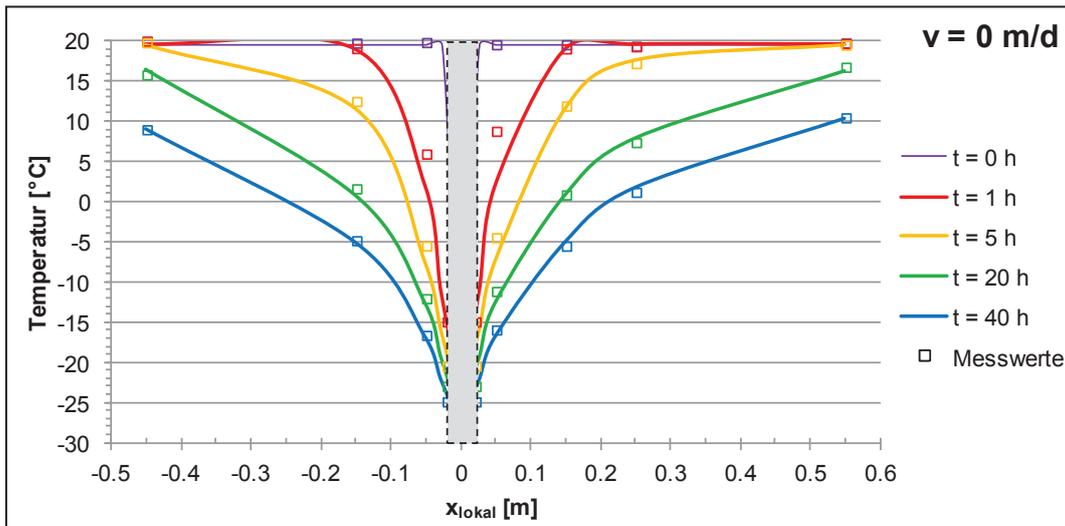


Abbildung 6.10 Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 1) ohne Strömung („freezrefcap“-Modul)

Neben den Temperaturverläufen wurde auch in diesem Fall die Kühlleistung bestimmt. Abbildung 6.11 zeigt die Ergebnisse der Simulation des Modellversuchs ohne Strömung mit dem detaillierten „freezrefcap“-Modul. Die Messwerte (rot) werden direkt sowohl mit der vereinfachten Kühlleistung des „freezing“-Moduls (blau) als auch mit der detaillierten Kühlleistung des „freezrefcap“-Moduls (grün) verglichen. Es ist gut zu erkennen, dass die mit dem „freezrefcap“-Modul bestimmte Kühlleistung nahezu identisch mit den Messwerten des Versuchs verläuft. Die konstante Differenz, die zwischen Messwerten und Kühlleistung des „freezing“-Moduls vorlag, entfällt bei der Simulation mit dem „freezrefcap“-Modul. Die erwartete Verschiebung der Kühlleistungskurve nach oben durch die zusätzliche Berücksichtigung der Wärmeübergänge innerhalb des Gefrierrohrs wurde bestätigt.

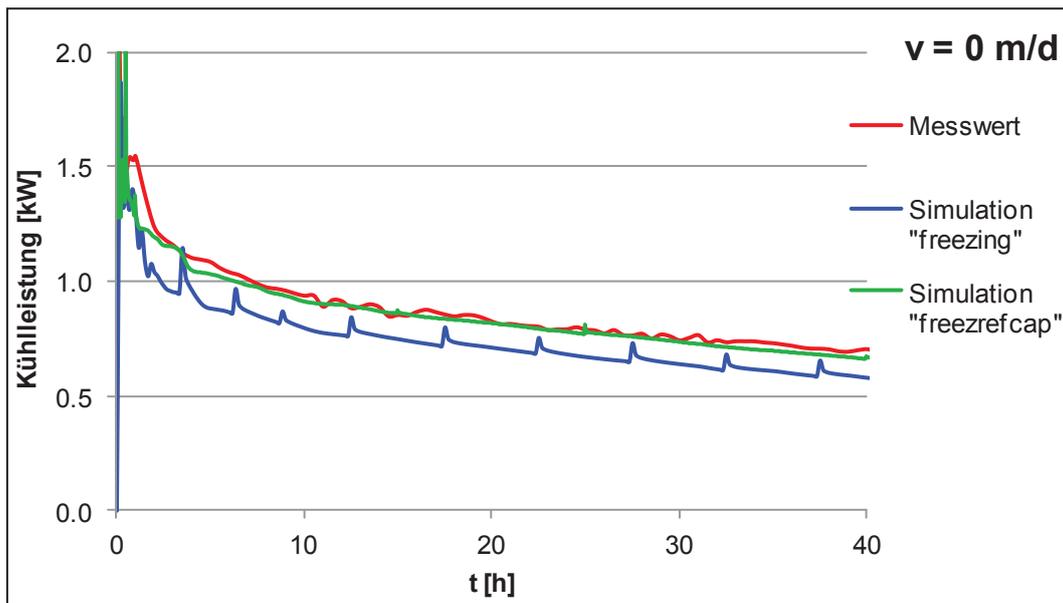
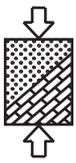


Abbildung 6.11 Vergleich der gemessenen und simulierten Kühlleistungen ohne Strömung

Die Differenz zwischen der detaillierten und der vereinfachten Kühlleistungsermittlung wird insbesondere für diesen Modellversuch deutlich, da sich die Strömung im Fallrohr sowie im Ringspalt durch einen relativ geringen Durchfluss von ca. $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ stets im laminaren Bereich befand. Durch eine laminare Strömung entsteht ein höherer Widerstand, der den Wärmeübergang des Gefrierrohrs verschlechtert. Dies resultiert in einem höheren Verlust innerhalb des Gefrierrohrs, der zu einer Erhöhung der Kühlleistung führt.

Durch die Nachrechnung des Versuchs mit einer Strömung von $v = 1,5 \text{ m/d}$ soll das „freezrefcap“-Modul für den Einsatz bei strömendem Grundwasser verifiziert werden. Die Ergebnisse der Temperaturverteilung sind in Abbildung 6.12 und Abbildung 6.13 dargestellt.

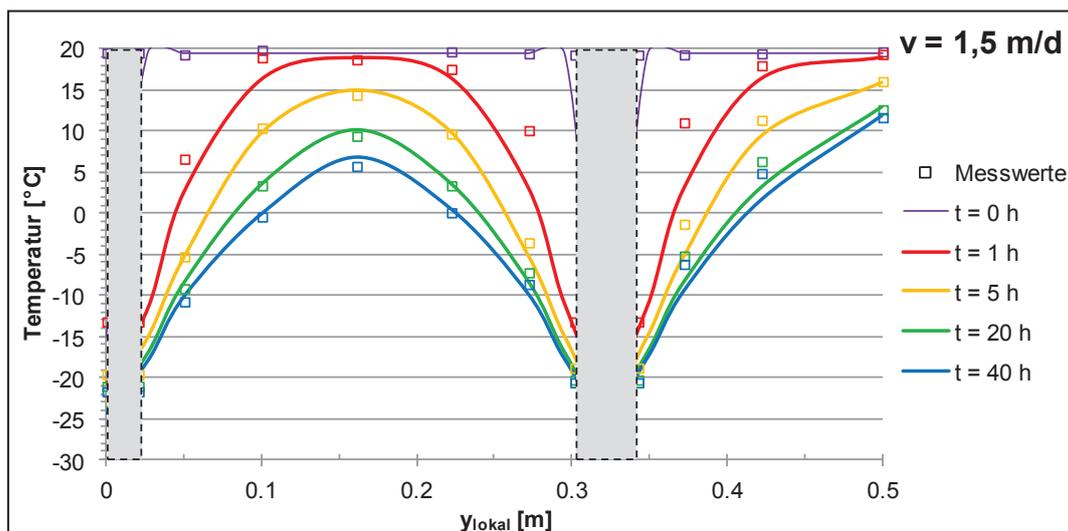


Abbildung 6.12 Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 2) für $v = 1,5 \text{ m/d}$ („freezrefcap“-Modul)

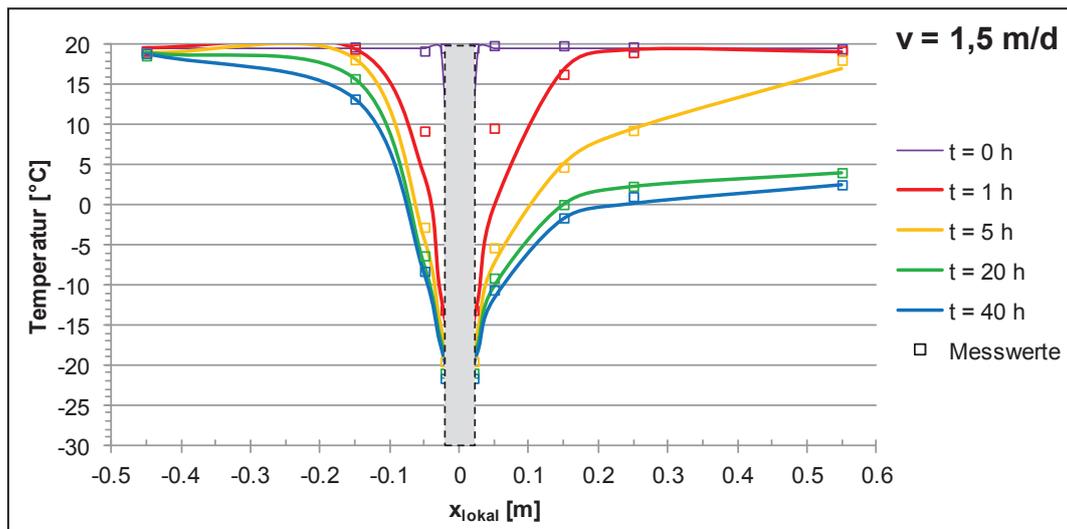
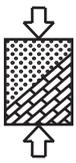


Abbildung 6.13 Temperaturverteilung im Bodenkörper (Messlinie 1) für $v = 1,5 \text{ m/d}$ („freezrefcap“-Modul)

Die berechnete Temperaturverteilung im Boden unter Einfluss einer Grundwasserströmung zeigt eine gute Übereinstimmung mit den im Versuch gemessenen Werten. Die Unterschiede in der Temperaturverteilung im Boden für Simulationen mit dem „freezing“- und dem „freezrefcap“-Modul sind gering. Die in Abbildung 6.14 dargestellte Kühlleistung unterscheidet sich hingegen etwas. Wie im Versuch ohne Strömung, wird hier ebenfalls deutlich, dass die detaillierte Kühlleistungsermittlung die Messwerte besser widerspiegelt als die vereinfachte Kühlleistungsermittlung mit dem „freezing“-Modul.

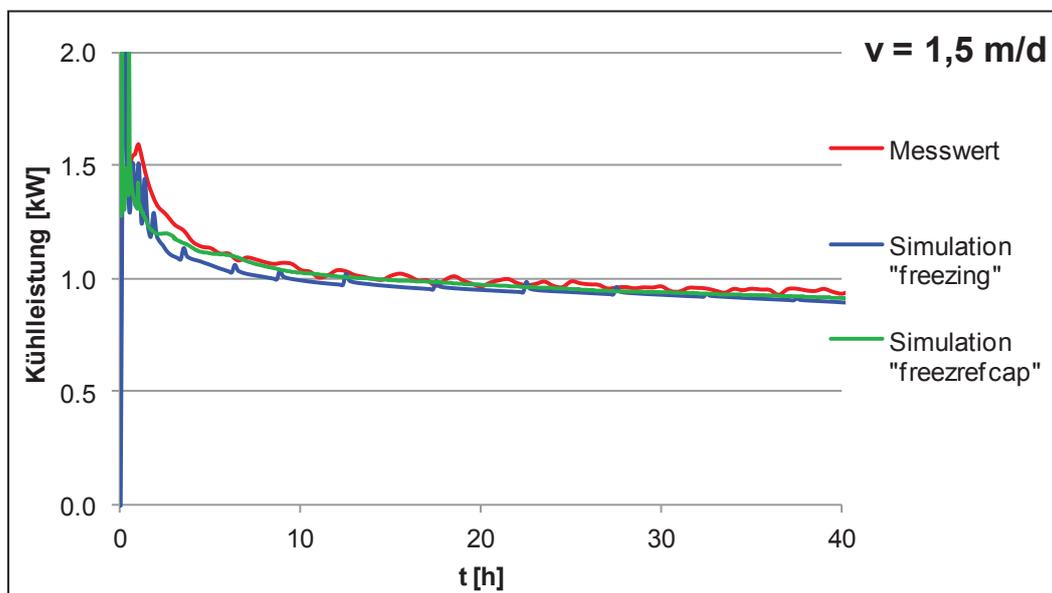
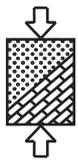


Abbildung 6.14 Vergleich der gemessenen und simulierten Kühlleistungen für $v = 1,5 \text{ m/d}$

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Temperaturverteilung im Boden sowohl mit dem „freezing“- als auch mit dem „freezrefcap“-Modul hinreichend genau abgebildet werden kann. Die Ermittlung der Kühlleistung hat gezeigt, dass der Verlauf der Kühlleistung mit dem „freezing“-Modul zwar abgebildet werden kann, aber eine Unterschätzung um einen konstanten Differenzbetrag stattfindet. Die Ermittlung der Kühlleistung mit dem „freezrefcap“-Modul zeigte eine hinreichend genaue Abbildung der Messwerte.



Das Programm SHEMAT ermöglicht somit mit den beiden Modulen „freezing“ und „freezrefcap“ eine realitätsnahe Abbildung des Gefrierhaltens im Boden sowie eine hinreichend genaue Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung. Eine Kombination der beiden Module bei der Simulation von Vereisungsmaßnahmen im Vorfeld einer Baumaßnahme zur Verringerung der Rechenzeiten ist möglich und sinnvoll.

6.2 Nachrechnung eines realen Bauprojekts

Aufbauend auf den guten Ergebnissen der Nachrechnung des Modellversuchs wurde in einem nächsten Schritt eine reale Baumaßnahme mit dem detaillierten „freezrefcap“-Modul simuliert. Um eine Vergleichbarkeit zwischen der Kühlleistung der Simulation und den Messwerten herstellen zu können, ist eine genaue Zuordnung der Kühlleistung des Kälteaggregats zu einer bestimmten Vereisungsmaßnahme notwendig. Da bei großen Vereisungsmaßnahmen, wie beispielsweise im Rahmen des Baus der Nord-Süd-Stadtbahn in Köln, oftmals mehrere Vereisungsmaßnahmen parallel stattfinden (z.B. ein paralleles Aufgefrieren mehrerer Querschläge), die über ein Kälteaggregat gekoppelt sind, ist in diesen Fällen keine genaue Zuordnung der Kühlleistung möglich. Durch diese Forderung nach einer genauen Zuordnung einer einzelnen Vereisungsmaßnahme zur gemessenen Kühlleistung und der Notwendigkeit einer ausreichenden Datenbasis, war das Auffinden eines geeigneten Bauprojekts schwierig.

Basierend auf einer weitreichenden Recherche wurde die Vereisung der Querschläge beim Bau des Statentunnels in Rotterdam als geeignete Maßnahme identifiziert. Durch den Kontakt zur Deilmann-Haniel GmbH, die dieses Forschungsprojekt mit finanziert, konnte eine ausreichende Datenbasis für die Vereisung der Querschläge zur Verfügung gestellt werden. Für die Bereitstellung dieser Datenbasis sowie die umfassende und ausführliche Unterstützung sei an dieser Stelle der Deilmann-Haniel GmbH und dabei insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Ahlbrecht sehr herzlich gedankt.

Im Folgenden wird zunächst das Projekt des Statentunnels in Rotterdam und dabei insbesondere die Herstellung der Querschläge im Solereisungsverfahren näher beschrieben. Diese Beschreibung stützt sich weitestgehend auf die Veröffentlichung von Wenke und Willner (2008) sowie auf die durch die Deilmann-Haniel GmbH zur Verfügung gestellten Daten. Im Anschluss werden die numerische Modellierung und Simulation sowie die Ergebnisse im Vergleich mit den Messwerten vorgestellt und diskutiert.

Beim Projekt des Statentunnels in Rotterdam wurde ein zweiröhriger Tunnel mit einer TBM aufgefahren und mit Tübbing ausgekleidet. Der Tunnel verbindet mit einer Gesamtlänge von ca. 2.400 m die Station Sint Franciscus Driehoek (SFD) über eine Zwischenstation Statenweg mit der Station Conradstraat (Rotterdam Central) (s. Abbildung 6.15).

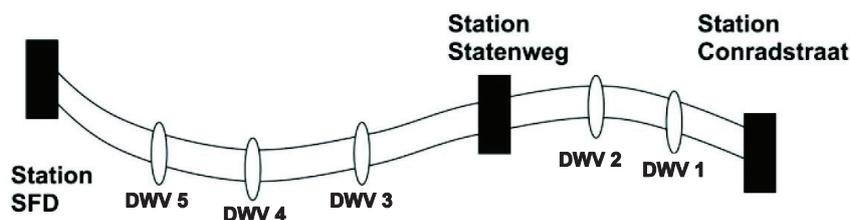
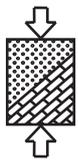


Abbildung 6.15 Lage Statentunnel zwischen Start- und Endstation (Wenke und Willner 2008)



Aus Sicherheitsgründen mussten die Tunnelröhren in einem Abstand von ungefähr je 300 m durch Querschläge miteinander verbunden werden. Insgesamt mussten somit 5 Querschläge hergestellt werden, die aufgrund der schwierigen geologischen Verhältnisse und einer starken Bebauung im Schutz einer Baugrundvereisung bergmännisch aufgebrochen wurden.

Die Vereisung der Querschläge wurde in pleistozänen Sandschichten mit teilweise kiesigen Anteilen in einer Tiefe von 18 bis 30 m unter der Geländeoberkante unterhalb des Grundwasserspiegels durchgeführt. Aus Gründen des Lärmschutzes und zur Vermeidung langer Gefrierrohrzuleitungen wurde ein mobiles Kühlaggregat in unmittelbarer Nähe zum zu vereisenden Querschlag innerhalb des Tunnels aufgebaut. Aus diesem Grund wurden die Querschläge auch zeitlich versetzt aufgeföhren. Für die spätere Simulation der Kühlleistung stellt die Verwendung dieser mobilen Kühlaggregate einen enormen Vorteil dar. Als Kälteträger wurde eine 30-prozentige CaCl_2 -Lösung verwendet.

Die herzustellenden Querschläge sollten einen Innendurchmesser von 2,60 m mit einer Wandstärke von 0,35 m aufweisen. Somit wurden für den Frostkörper ein Innendurchmesser von 3,9 m und ein Außendurchmesser von 6,9 m gefordert. Die Vereisungsbohrungen wurden mit einem Durchmesser von 88,9 mm prinzipiell ringförmig um den Ausbruchquerschnitt, ausgehend von der Weströhre des Tunnels hergestellt. Insgesamt wurden 24 Vereisungsbohrungen über den Querschnitt verteilt hergestellt, der eine doppelte Symmetrie aufweist. Die Gefrierrohre hatten somit einen Abstand von ca. 80 cm untereinander. Abbildung 6.16 zeigt eine dreidimensionale Visualisierung des Frostkörpers, der sich um die Gefrierrohre bildet. Es wird deutlich, dass die einzelnen Gefrierrohre deutliche Unterschiede in der Länge aufweisen (3 m bis 9 m) und teilweise geneigt sind. Zur Kontrolle des Frostkörperfortschritts wurden insgesamt 4 Temperaturmessbohrungen ausgeführt. Diese wurden nahezu auf den beiden Symmetrieachsen, jeweils links und rechts sowie oberhalb und unterhalb des Querschlagquerschnitts, angeordnet. Die Temperaturmessbohrungen wurden alle schräg nach außen, also vom Querschlag weg, geführt, um durch den geplanten Eiskörper zu verlaufen. In den Temperaturbohrungen wurden jeweils im Abstand von 1,0 m Temperaturfühler angebracht.

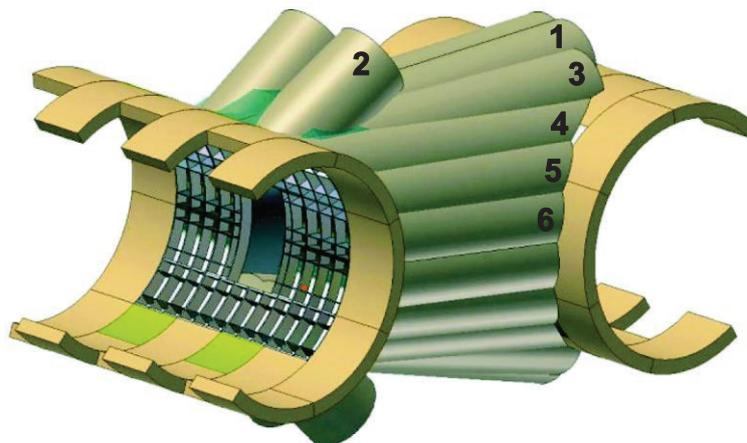
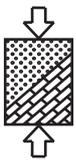


Abbildung 6.16 Dreidimensionale Darstellung des Frostkörpers mit Gefrierrohrnummern (nach Wenke und Willner 2008)

Die Aufstellung der Kühlaggregate erfolgte jeweils in unmittelbarer Nähe zum herzustellenden Querschlag (s. Abbildung 6.17). In der Weströhre wurde zur Unterstützung



des Frostkörperaufbaus eine Wärmedämmung mit Styropor mit einer Dicke von 10 cm angebracht. Zur Unterstützung des Angefrierens des Frostkörpers an die Tunneltübbinge der Oströhre wurde dort eine aktive Oberflächenkühlung eingebracht.



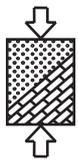
Abbildung 6.17 Querschlagvereisung mit mobilen Kühlaggregat (Wenke und Willner 2008)

Im Rahmen der Bildung des numerischen Modells mussten einige Vereinfachungen getroffen werden. Die Modellbildung wird im Folgenden zusammenfassend beschrieben.

Die Eingangsparameter der Bodeneigenschaften konnten aus den geotechnischen Laboruntersuchungen und den thermischen Berechnungen hergeleitet werden und sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst. Eine Grundwasserströmung war laut den vorliegenden Unterlagen nicht vorhanden. Eine Recherche in der Grundwasserpegel-Datenbank der Stadt Rotterdam, in der die Pegelstände vieler Messstellen über die letzten Jahrzehnte dokumentiert sind, ergab ebenfalls keine nennenswerte Grundwasserströmung.

Tabelle 6.2 Eingangswerte der Bodeneigenschaften der Querschlagvereisung des Statentunnels in Rotterdam für SHEMAT

Parameter SHEMAT	Bestimmung bzw. Abschätzung	Wert	Einheit
Trockendichte ρ_d	Versuch	1600	kg/m ³
Korndichte ρ_s	$\rho_s = \frac{\rho_d}{(1 - n)}$	2556	kg/m ³
Porosität n	Versuch	0,374	-
Wärmeleitfähigkeit λ_s	Rückrechnung $\lambda_{\text{gefroren}}/\lambda_{\text{ungefroren}}$	4,3105	W/(mK)
Permeabilität k	$k = \frac{v(T)}{\rho_w(T) \cdot g} \cdot k_f(T) \rightarrow k_f$ Versuch	9,1813E ⁻¹¹	m ²
Parameter a und b des ungefrorenen Wassergehalts (w_u -Verlauf nach Andreson & Tice (1972))	über Körnungslinie Regression: $w_u = a \cdot T ^b$	a = 0,1041 b = -4,846	-
Kompressibilität des Gesteins α_s	Literaturwerte	1,00E ⁻⁰⁸	Pa ⁻¹
Impedanzfaktor E	Literaturwert (Sand: 5-15)	10	-



Die räumliche und zeitliche Diskretisierung des dreidimensionalen numerischen Modells erfolgte unter Einhaltung der Stabilitätskriterien (s. Kapitel 7.1) und der Lage der Temperaturmesspunkte. Aufgrund der Symmetrie des Querschlagquerschnitts und der deutlich geringeren Rechenzeit wurde lediglich das halbe System modelliert. Für die Kühlleistung der Simulation bedeutet dies, dass die Werte aufgrund der Symmetrie und der nicht vorhandenen Grundwasserströmung in guter Näherung verdoppelt werden können.

Die Modellierung der dreidimensionalen Gefrierrohre stellt für das „freezrefcap“-Modul in seiner aktuellen Form das größte Problem dar. Mit der derzeitigen Version ist es nicht möglich, unterschiedliche Längen der Gefrierrohre sowie eine Neigung der Gefrierrohre abzubilden. Aus diesem Grund mussten bei der Modellierung der Gefrierrohre deutliche Vereinfachungen getroffen werden. Zum einen musste eine konstante Gesamtlänge der Gefrierrohre vorgegeben werden, die eigentlich zwischen 3 m und 9 m variiert. Zum besseren Verständnis der Vereinfachungen wurde die dreidimensionale Darstellung des Frostkörpers in Abbildung 6.16 um Gefrierrohrnummern ergänzt. Unter Vernachlässigung der kurzen Gefrierrohre (Nr.2) wurde eine gemittelte Gefrierrohrlänge aller Gefrierrohre von 7,5 m angenommen. Die beiden kurzen Gefrierrohre (Nr.2) wurden lediglich als konstante Temperatur-Randbedingungen simuliert, um das Frostkörperwachstum nicht zu weit zu verfälschen. Durch diese Vereinfachung trugen die vernachlässigten Gefrierrohre aber auch nicht zur Kühlleistung bei.

Eine weitere Vereinfachung musste für die Gefrierrohre mit den Nummern 3 und 4 getroffen werden, da diese eine Neigung von 6° bzw. 8° haben. Diese wurden ebenfalls mit einer Gefrierrohrlänge von 7,5 m simuliert und in der mittleren Höhe des geneigten Gefrierrohrs vereinfachend als horizontal angesetzt. Eine Übersicht der Lage der Gefrierrohre und der Temperaturmessfühler im Modell ist in Abbildung 6.18 gegeben. Der Temperaturfühler T_1 liefert die Daten zur Ausbreitung des Frostkörpers in vertikaler Richtung, der Temperaturfühler T_4 die in horizontaler Richtung. Die Neigung der beiden Temperaturfühler um 12° konnte durch den Einsatz von Monitoring Points berücksichtigt werden.

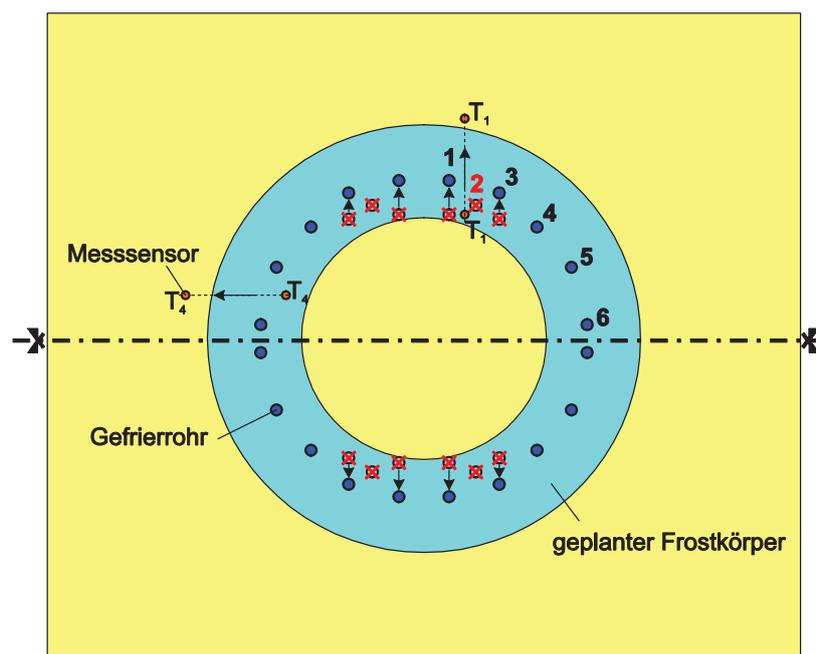
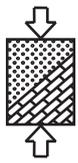


Abbildung 6.18 Übersicht der Lage der Gefrierrohre und Temperaturmessfühler im Modell



Da die Datenbasis des Querschlags DWV 2 nahezu lückenlose Aufzeichnungen enthielt, wurde dieser Querschlag für die Nachrechnung der realen Baumaßnahme gewählt. Neben den Messdaten der Temperaturfühler enthielt die Datenbasis ebenfalls Messungen der Temperaturen in der aktiven Oberflächenkühlung. Diese wurden über Treppenfunktionen als Temperaturrandbedingungen zeitabhängig definiert und somit in der Simulation berücksichtigt. Weiterhin wurde die Vor- und Rücklauftemperatur der Kältemaschine sowie deren Durchfluss aufgezeichnet. Somit konnten der Durchfluss und die Vorlauftemperatur ebenfalls über Treppenfunktionen im „freezrefcap“-Modul abgebildet werden. Die Kühlleistung der Kältemaschine konnte nach Gleichung (5-1) unter Ansatz des temperaturabhängigen Verlaufs der Wärmekapazität der 30-prozentigen CaCl_2 -Sole berechnet werden.

Im Weiteren werden nun die Ergebnisse der numerischen Simulation vorgestellt. Dabei werden zunächst die Temperaturverläufe entlang der beiden Temperaturmessungen T_1 und T_4 vorgestellt. Abschließend wird dann auf die ermittelte Kühlleistung eingegangen.

Aufgrund der getroffenen Vereinfachungen werden die Temperaturverläufe der Temperatursensoren, die direkt am Rand der Ost- bzw. Weströhre des Tunnels liegen, nicht mit dargestellt. Der Vergleich der Ergebnisse der simulierten und gemessenen Werte für den Temperaturfühler T_1 , also die Frostausbreitung in vertikaler Richtung, ist in Abbildung 6.19 dargestellt. Die Temperaturverläufe der Messdaten sind mit durchgezogenen Linien dargestellt, die Verläufe der Simulation hingegen sind als gestrichelte Linie erkennbar. Es wird deutlich, dass für die Temperaturverläufe im Anfangsbereich der Gefrierrohre, also nahe der Weströhre, noch eine hinreichende Übereinstimmung zwischen Messwert und Simulation vorliegt. Je näher die Temperatursensoren aber an der Oströhre liegen, dem Bereich in dem die Aufspreizung der Gefrierrohre am größten ist, desto größer werden die Abweichungen zwischen Messwerten und Simulationsergebnissen.

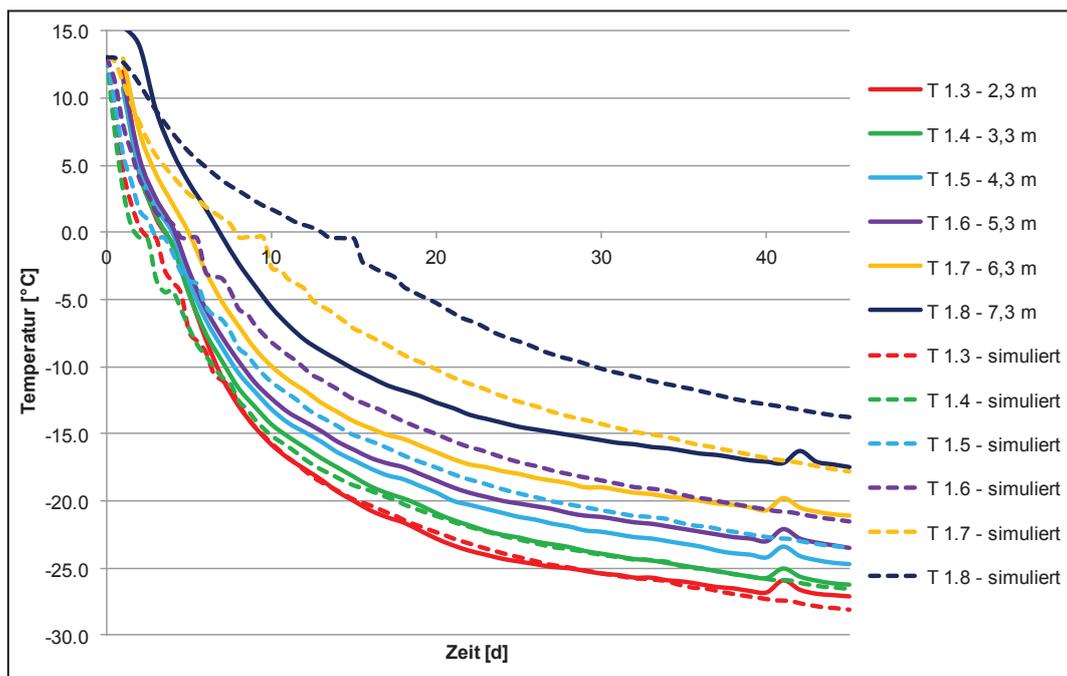
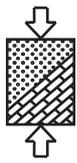


Abbildung 6.19 Vergleich der Temperaturverteilung im Boden in vertikaler Richtung (T_1)



Als möglicher Grund für diese deutlichen Abweichungen, die im Bereich der Oströhre vorliegen, kann in der Vereinfachung des horizontalen Verlaufs der Gefrierrohre Nr.1 und Nr.3 liegen. Denn genau in diesem Bereich nahe der Oströhre liegen die beiden Gefrierrohre eigentlich zu niedrig und der Temperaturmesspunkt hat damit an diesem Punkt eine deutlich größere Entfernung in der Simulation als in der Realität (s. Abbildung 6.18). Durch diese größere Entfernung ergeben sich konsequenterweise zu hohe Temperaturen in der Simulation.

Im Bereich der Weströhre hingegen zeigen die Temperaturverläufe eine gute Übereinstimmung, obwohl die Gefrierrohre dort eigentlich zu hoch liegen. Dies lässt sich aber durch den geringeren Abstand der Temperatursensoren in diesem Bereich zu den umliegenden Gefrierrohren begründen (s. Abbildung 6.18). Außerdem wurde das kurze, sehr stark geneigte Gefrierrohr Nr.2 mit einer Temperaturrandbedingung ersetzt und trägt somit zu realistischen Frostkörperentwicklung in diesem Bereich bei.

Abbildung 6.20 zeigt die Ergebnisse der Simulation im Vergleich mit den Messwerten für den Temperaturfühler T_4 , also für eine Frostausbreitung in horizontaler Richtung. Es ist gut zu erkennen, dass die Temperaturverläufe eine bessere Übereinstimmung zwischen Messwerten und Simulationsergebnissen zeigen als für den Temperaturfühler T_1 . Die Temperaturverläufe im mittleren Bereich stimmen sogar sehr gut überein. Die beiden Temperaturverläufe im Bereich der Ost- bzw. Weströhre hingegen zeigen eine größere Abweichung, wobei in diesem Fall die Simulation eher zu geringe Temperaturen ergibt. Der Grund für diese Abweichungen kann in den angesetzten Randbedingungen liegen. Im Bereich der Oströhre wurde die aktive Oberflächenkühlung angesetzt, wobei zur Erfassung der Temperaturverteilung über den Querschnitt lediglich 6 Messungen zur Verfügung standen. Aufgrund dieser geringen Anzahl an Messpunkten mussten die Vorliegenden über den Querschnitt verschmiert angesetzt werden, so dass dies zu einer Unterschätzung der Temperatur im Randbereich führen kann.

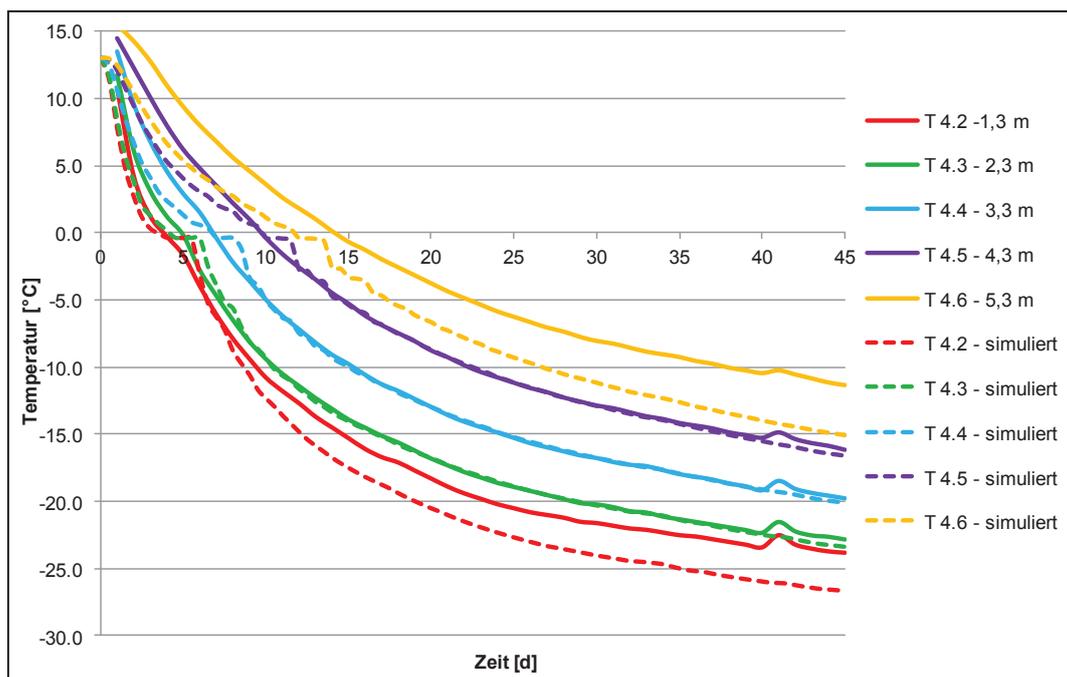
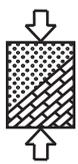


Abbildung 6.20 Vergleich der Temperaturverteilung im Boden in horizontaler Richtung (T_4)



Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Temperaturverläufe in horizontaler Richtung mit den numerischen Simulationen mit einer ausreichenden Genauigkeit abgebildet werden können. Bei den Temperaturverläufen in vertikaler Richtung sind vor allem im Bereich der Aufspreizung der Gefrierrohre deutlichere Abweichungen zwischen Messwerten und Simulationsergebnissen zu erkennen, die aber durch die Notwendigkeit einer vereinfachten Modellierung erklärt werden können.

Das Hauptziel der Nachrechnung einer realen Baumaßnahme war die Verifizierung der Berechnung der erforderlichen Kühlleistung mit dem detaillierten „freezrefcap“-Modul. Aus der gemessenen Vor- und Rücklauftemperatur und dem Durchfluss des Kälteaggregats wurde unter Ansatz der volumetrischen Wärmekapazität einer 30-prozentige CaCl_2 -Sole die Kühlleistung des Kühlaggregats bestimmt. Bei der Berechnung der temperaturabhängigen volumetrischen Wärmekapazität wurde als Referenztemperatur der Mittelwert aus Vor- und Rücklauftemperatur angesetzt. Der sich ergebende Verlauf der Kühlleistung über die Zeit beinhaltet Verluste innerhalb des Kühlaggregats und der Rohrleitungen bis zum Eintritt in das Gefrierrohr. Da bei den numerischen Simulationen eine reine Kühlleistung berechnet wird, muss die gemessene Kühlleistung für einen realistischen Vergleich um die Verluste vermindert werden. In Anlehnung an die Angaben von Makowski (1986) und die Verluste des Modellversuchs von Sres (2010) wurden in diesem Fall Verluste in einer Höhe von 40% angesetzt. Ob die von Makowski (1986) angegebene Größenordnung der Verluste aus dem Gefrierschachtbau in der heutigen Zeit aufgrund einer Verbesserung der Dämmung der Rohrleitungen noch realistisch ist, wurde in diesem Zusammenhang nicht untersucht.

Der Vergleich der aus den Simulationen ermittelten Kühlleistung mit der gemessenen Gesamtkühlleistung sowie der um die Verluste korrigierten gemessenen Kühlleistung ist in Abbildung 6.21 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Ergebnisse der Simulation am Anfang der Berechnung die Größenordnung der gemessenen Kühlleistung gut abbilden. Mit zunehmender Gefrierzeit hingegen weicht die in der Simulation ermittelte Kühlleistung aber immer stärker von den Messwerten ab.

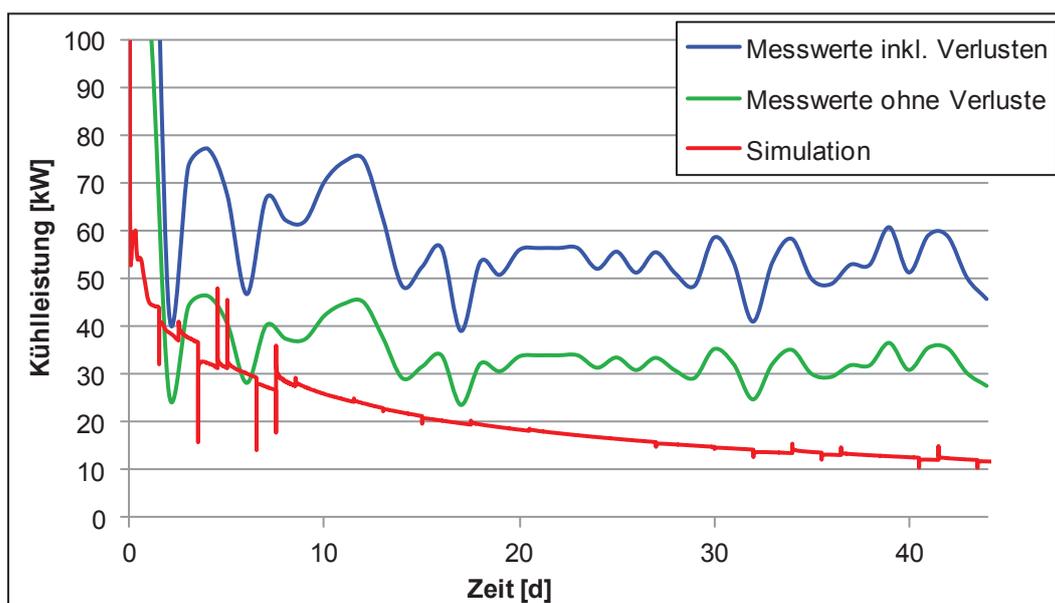


Abbildung 6.21 Vergleich der gemessenen und simulierten Kühlleistung des Querschlags 2



Der Grund für diese Abweichungen in der Kühlleistung zwischen Messwerten und Simulationsergebnissen liegt hauptsächlich an den notwendigen Vereinfachungen im Hinblick auf den Ansatz einer konstanten Gefrierrohrlänge und der horizontalen Idealisierung geneigter Gefrierrohre. Die aktuelle Version des „freezrefcap“-Moduls erfordert diese Vereinfachungen, die bei der Nachrechnung des Modellversuchs, dessen Ergebnisse sehr gut sind, keine Auswirkungen hatten. Die in dem Verlauf der Kühlleistung der Simulation erkennbaren Ausschläge sind das Resultat von Veränderungen der Vorlauftemperatur bzw. des Durchflusses, die beide über eine Treppenfunktion abgebildet werden.

Um den Einfluss der Gefrierrohrlänge auf die erforderliche Kühlleistung deutlich zu machen, wurde diese in einer Simulation exemplarisch von 7,5 m auf 9,0 m erhöht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.22 dargestellt.

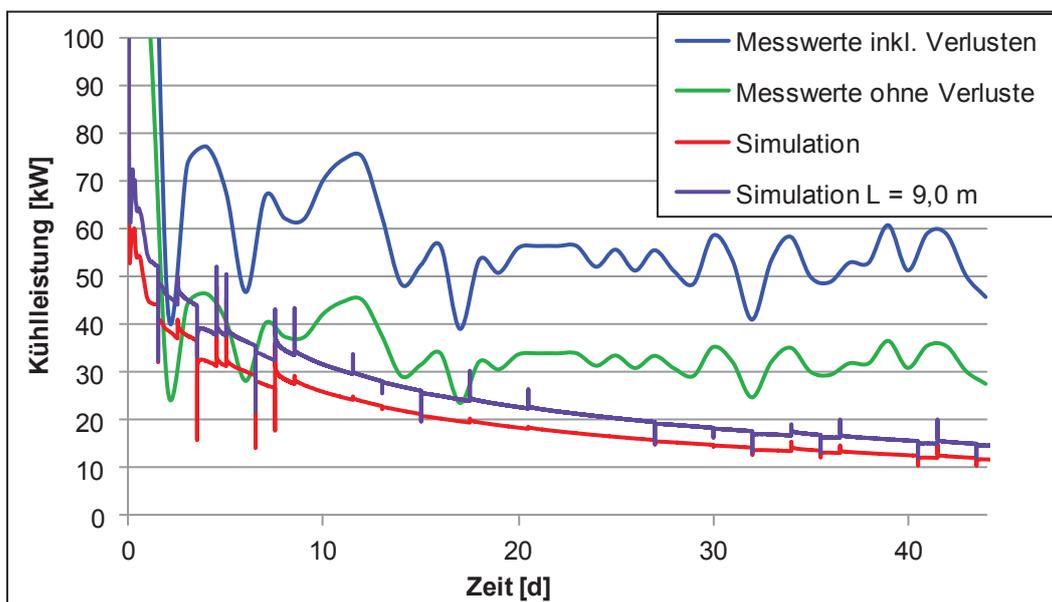
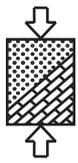


Abbildung 6.22 Vergleich der gemessenen und simulierten Kühlleistung des Querschlags 2 in Abhängigkeit der Gefrierrohrlänge

Der deutliche Anstieg der Kühlleistung bei einer Erhöhung der Gefrierrohrlänge um lediglich 1,5 m zeigt, wie sensitiv die Kühlleistung auf die Gefrierrohrlänge reagiert. Somit wird klar, dass eine exakte Abbildung der Gefrierrohrlänge von großer Bedeutung für die Ermittlung der Kühlleistung einer realen Baumaßnahme ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Kühlleistung einer realen Baumaßnahme mit dem vorliegenden Lösungsmodell bei einer optimierten Wahl der Gefrierrohrlänge näherungsweise abgeschätzt werden kann. Um die Kühlleistung mit einer hinreichenden Genauigkeit abbilden zu können, besteht noch Optimierungsbedarf für das Lösungsmodell. Dieses muss insbesondere um die Eingabe einer variablen Gefrierrohrlänge für jedes Gefrierrohr erweitert werden. Außerdem sollte die Modellierung geneigter Gefrierrohre implementiert werden, die in der Praxis den Regelfall darstellen.



7 Parameterstudie

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine Parameterstudie zur Ermittlung der maßgebenden Einflussfaktoren auf die Aufgefrierzeit und insbesondere auf die Kühlleistung bzw. den Energieverbrauch einer Vereisungsmaßnahme durchgeführt. Dabei ermöglichte das neue „freezrefcap“-Modul nicht nur die Variation relevanter Bodenparameter, sondern darüber hinaus auch die Variation von Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kältekreislaufs.

7.1 Ausgangsmodell und –parameter

Das Ausgangsmodell der Parameterstudie bestand in dem System einer aufzugefrierenden, angeströmten Wand, wie sie beispielsweise für die Sicherung von Baugruben eingesetzt werden kann (s. Abbildung 7.1). Zur Ermittlung der maßgebenden Einflussparameter wurde lediglich eine aus 5 Gefrierrohren bestehende Wand ausgewählt, um die Rechenzeiten zu verringern. Die Gefrierrohre wurden in einem Abstand von 0,8 m angeordnet. Der herzustellende Frostkörper sollte 3,2 m breit und 10 m tief sein. Das dreidimensionale Basismodell hatte Abmessungen von 19,5 m x 15,2 m x 15 m, durch welche mögliche Einflüsse aus Randbedingungen ausgeschlossen werden konnten.

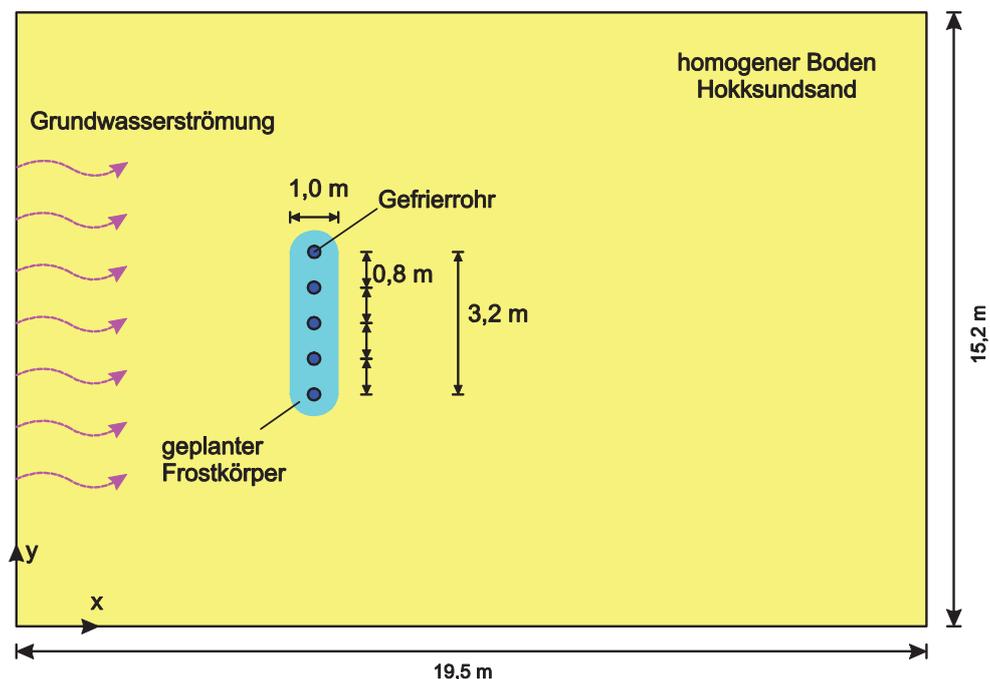
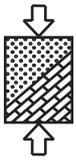


Abbildung 7.1 Querschnitt des Basissystems des Modells der Baugrubenwand (Wand)

Um die numerische Stabilität und damit auch die Genauigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, ist neben der Wahl eines voll impliziten Berechnungsverfahrens die Modellerstellung bestimmten Stabilitätskriterien unterworfen. So ergibt sich die maximale Zellweite aus der Péclet-Zahl. Diese stellt ein Maß für die räumliche Diskretisierung dar und soll einen Wert kleiner als 2 aufweisen (Kinzelbach 1987). Zur Bestimmung werden die maximale, simulierte Anfangsfließgeschwindigkeit und die Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Bodens herangezogen:



$$\Delta x = \frac{2 \cdot \lambda}{v_f \cdot c_{v,w}} = \frac{2 \cdot 1,63}{8,681 \cdot 10^{-6} \cdot 4.200.000} = 0,089 \text{ m} \quad (7-1)$$

Da die Stabilitätskriterien eine sehr feine Diskretisierung erfordern, wird im Bereich der Vereisungsrohre eine Netzweite von maximal 8,5 cm gewählt. Zum Modellrand hin wird das Netz zuerst aufgeweitet und anschließend wieder verfeinert, um den Einfluss der Randbedingungen auf die numerische Stabilität zu verringern.

Die Zeitschrittweite ergibt sich aus der gewählten kleinsten Zellweite Δx und dem Courant-Kriterium ($Co < 1$) zur Vermeidung von Oszillationen (Kinzelsbach 1987):

$$\Delta t = \frac{\Delta x \cdot n}{v_f} = \frac{0,085 \cdot 0,41}{8,681 \cdot 10^{-6}} = 4015 \text{ s} = 67 \text{ min} \quad (7-2)$$

Aufgrund der Sensibilität des „freezrefcap“-Moduls im Hinblick auf die erforderliche Zeitschrittweite wird die nach den Stabilitätskriterien minimal erforderliche Zeitschrittweite deutlich unterschritten. Zu Beginn der Simulation wurde ein Zeitschritt von 2 min gewählt, der dann auf 4 min vergrößert wurde.

Als Baugrund wird dem Basismodell ein Hokksundsand mit einer Ausgangstemperatur von $T = 10^\circ\text{C}$ zugrunde gelegt, der bereits zur Verifizierung des numerischen Modells für die Solevereisung nach Baier (2009) verwendet wurde. Ein Vorteil dieses Sandes ist, dass seine thermischen Eigenschaften aus Laborversuchen eindeutig bekannt sind (Frivik und Comini 1982). Die sich ergebenden Eingangsgrößen sind in Tabelle 7.1 aufgeführt.

Tabelle 7.1 Eingangsparameter des Hokksundsands

Parameter des Bodens		Wert	Einheit
Porenanteil	n	0,41	[-]
Permeabilität	k	$4,4 \cdot 10^{-11}$	[m ²]
Quarzgehalt	q	35	[%]
Wärmeleitfähigkeit Feststoff	λ_s	3,359	[W/(mK)]
Trockendichte	ρ_d	1600	[kg/m ³]
Spezifische Oberfläche	S_s	0,0061	[m ² /g]
Freezing Parameter	a	0,078	[-]
	b	-5,565	[-]
	E	10	[-]

Neben den Eigenschaften des Bodens sind auch die Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kältekreislaufs als Parameter des Ausgangssystems zu nennen. Als Gefrierrohre wurden Koaxialrohre bestehend aus einem Polyethylen-Fallrohr und einem Steigrohr aus Stahl angesetzt. Die genauen Eingangsparameter des Gefrierrohrs sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst. Die Gefrierrohrgeometrie wurde von der Meijden (2003) entnommen und entspricht den bei der Vereisung des Westerscheldetunnels eingesetzten Gefrierrohren.

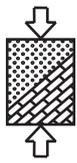


Tabelle 7.2 Eingangsparmeter des Gefrierrohrs

Parameter des Gefrierrohrs		Wert	Einheit
Innendurchmesser des Fallrohrs	$d_{i,i}$	51	[mm]
Außendurchmesser des Fallrohrs	$d_{i,a}$	55	[mm]
Innendurchmesser des Steigrohrs	$d_{A,i}$	104	[mm]
Außendurchmesser des Steigrohrs	$d_{A,a}$	108	[mm]
Länge	L	10	[m]
Wärmeleitfähigkeit des Fallrohrs	λ_{PE}	0,35	[W/(mK)]
Wärmeleitfähigkeit des Steigrohrs	λ_{Stahl}	50	[W/(mK)]

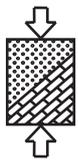
Die Eigenschaften des Ausgangssystems des Kälteträgerkreislaufs sind in Tabelle 7.3 aufgelistet.

Tabelle 7.3 Eingangsparmeter des Kälteträgerkreislaufs

Parameter des Kältekreislaufs		Wert	Einheit
Durchfluss	Q	20	[m ³ /h]
Vorlauftemperatur	T_{VL}	-35	[°C]
Sole	CaCl ₂ -Konzentration	29,9	[%]
	Gefrierpunkt	-54	[°C]

Zur Bestimmung der maßgebenden Einflussparameter auf die erforderliche Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme in der Aufgefrierzeit wurden nicht nur Bodeneigenschaften, sondern auch Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteträgerkreislaufs variiert. Bei den Bodeneigenschaften wurden der Porenanteil, der Quarzgehalt, die Grundwassertemperatur und die Grundwasserfließgeschwindigkeit verändert. Wenn im weiteren Verlauf von Grundwassertemperatur gesprochen wird, ist diese der Bodentemperatur gleichzusetzen. Die Gefrierrohreigenschaften wurden im Hinblick auf die Wärmeleitfähigkeit des Steigrohrs, die Länge des Gefrierrohrs und die Geometrie des Koaxialrohrs angepasst. Neben der in Tabelle 7.2 angegebenen Abmessung der Gefrierrohre nach van der Meijden (2003) wurden Gefrierrohre untersucht, deren Abmessungen den beim Bau der Nord-Süd-Stadtbahn in Köln eingesetzten Gefrierrohren entsprechen. Auf eine Variation der Wärmeleitfähigkeit des Fallrohrs, das aus gering leitfähigem Polyethylen besteht, wurde verzichtet. Weitere Variationen wurden für den Kälteträgerkreislauf vorgenommen. Dabei wurde neben der Vorlauftemperatur und der verwendeten Calciumchloridsole auch der Durchfluss verändert, mit dem Ziel, unterschiedliche Strömungszustände im Gefrierrohr zu erreichen und deren Auswirkung auf das Gefrierverhalten und die Kühlleistung bestimmen zu können.

Generell wurden alle Parametervariationen für Systeme ohne und mit Grundwasserströmung untersucht. Um den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Aufgefrierzeit und die erforderliche Kühlleistung bis zur Aufgefrierzeit zu bestimmen, wurde die Aufgefrierphase als beendet angesehen, wenn der in Abbildung 7.1 dargestellte Frostkörper eine gewählte, statisch erforderliche Dicke von 1,0 m erreichte. Das Erreichen dieser fiktiven Dicke wurde über die gesamte Wandhöhe über Monitoring-Punkte kontrolliert, die nach Definition bei einer Temperatur von $T \leq -1^\circ\text{C}$ als gefroren angesehen wurden. Zum Vergleich der Kühlleistungen wurde die bis zu diesem Zeitpunkt des Aufgefrierens erforderliche Kühlenergie [kWh] bestimmt und auf eine mittlere Kühlenergie [kWh/m] bezogen auf die



summierte Gefrierrohrlänge umgerechnet. Diese mittlere Kühlenergie eignet sich besser als Vergleichswert als die mittlere Kühlleistung [kW/m], da diese den kombinierten Einfluss von Aufgefrierzeit und Kühlleistung ermöglicht.

7.2 Einfluss der Bodenparameter

7.2.1 Einfluss der Grundwasserströmung

Der enorme Einfluss der Grundwasserströmung auf die Schließ- bzw. die Aufgefrierzeit wurde bereits von Baier (2009) und Ziegler et al. (2010) beschrieben. Eine Steigerung der Grundwasserströmung bewirkt eine Vergrößerung des eingetragenen Wärmestroms und führt somit zu einer Verzögerung des Frostkörperfortschritts. In manchen Fällen kommt es sogar zur Ausbildung eines stationären Zustands, da die eingetragene Wärmemenge durch das Grundwasser der Kühlleistung der Gefrierrohre entspricht und somit ein weiteres Gefrieren verhindert wird.

Die numerischen Simulationen des Wandsystems bestätigten diesen Zusammenhang. Bei einer steigenden Fließgeschwindigkeit kommt es zu einem überproportionalen Anstieg der Aufgefrierzeit (s. Abbildung 7.2). Die Kühlenergie wächst ebenso überproportional an.

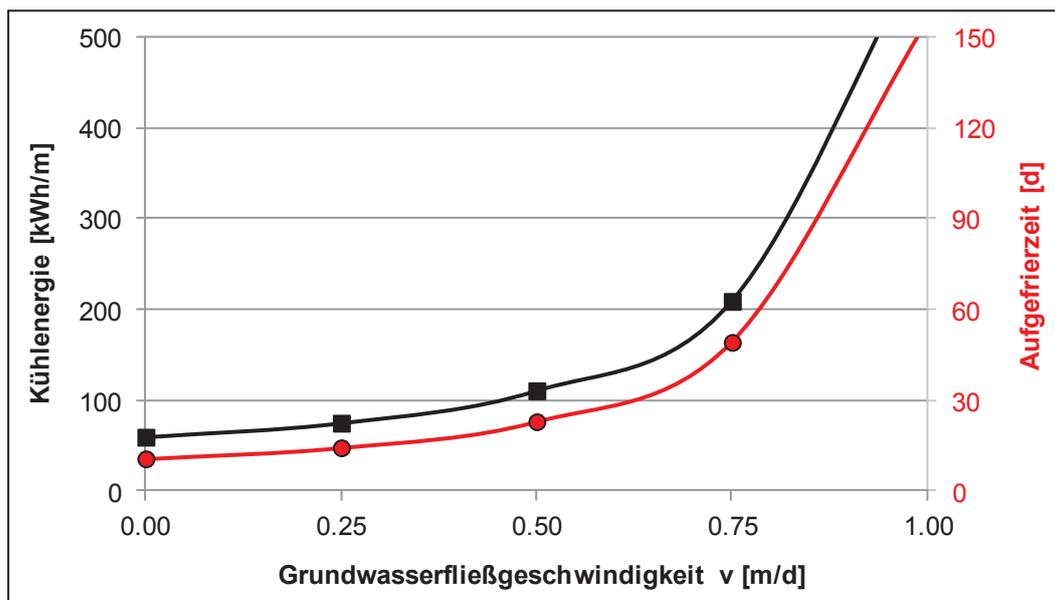


Abbildung 7.2 Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Aufgefrierzeit und die mittlere Kühlenergie

Um die Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierzeit bezogen auf den Ausgangszustand eines Systems ohne Grundwasserströmung zu bestimmen, wurden die Ergebnisse normiert dargestellt (s. Abbildung 7.3). Es wird deutlich, dass der Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Aufgefrierdauer nochmals stärker ist als auf die Kühlenergie. Generell ist aber der entscheidende Einfluss der Grundwasserströmung auf die Aufgefrierdauer und die Kühlenergie zu erkennen.

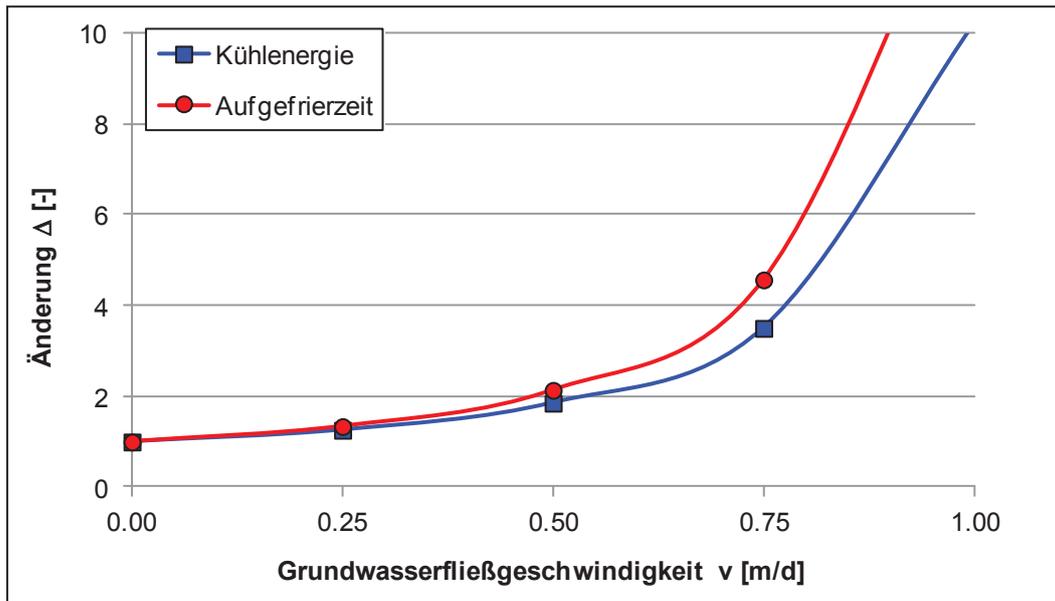
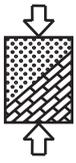


Abbildung 7.3 Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer bezogen auf ein System ohne Grundwasserströmung

7.2.2 Einfluss des Porenanteils

Ein Parameter, der den Gefrierprozess stark beeinflussen kann, ist der Porenanteil, da die Menge des zu gefrierenden Wassers bei einer Vollsättigung direkt proportional zum Porenanteil ist. Ausgehend von einem Porenanteil von $n = 0,41$ des zugrunde gelegten Hokksundsands wurden Porenanteile von $n = 0,2 / 0,3$ und $0,5$ untersucht. Abbildung 7.4 zeigt die Änderung der Aufgefrierzeit sowie der Kühlenergie in Abhängigkeit des Porenanteils für eine Grundwasserfließgeschwindigkeit von $v = 0$ und $v = 0,5$ m/d. Bezogen sind die Ergebnisse stets auf das beschriebene Ausgangssystem ohne Grundwasserströmung.

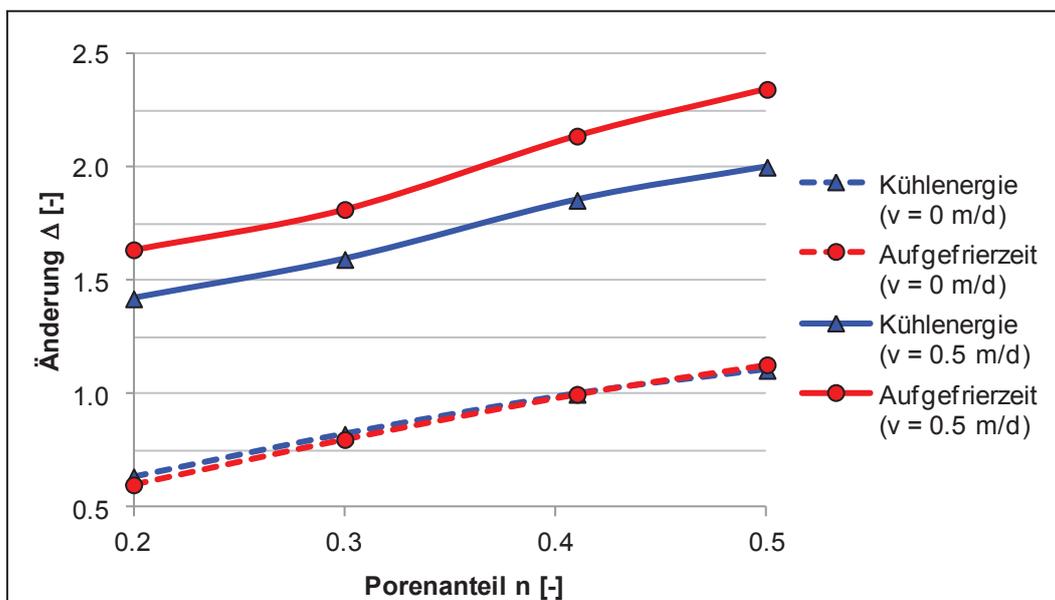
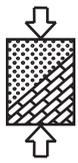


Abbildung 7.4 Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer in Abhängigkeit des Porenanteils bezüglich des Ausgangssystems für $v = 0$ m/d und $n = 0,41$



Generell wird deutlich, dass ein verringerter Porenanteil sowohl eine Verringerung der Aufgefrierdauer als auch der Kühlenergie zur Folge hat. Entsprechend erhöhen sich Aufgefrierdauer und Kühlenergie bei einer Erhöhung des Porenanteils. Die Änderung der Aufgefrierzeit und der Kühlleistung ist dabei sowohl für den Fall ohne Grundwasserströmung als auch mit einer Strömung von $v = 0,5 \text{ m/d}$ nahezu identisch. Es wird jedoch deutlich, dass die Aufgefrierzeit bei einer Grundwasserströmung von $v = 0,5 \text{ m/d}$ stärker beeinflusst wird, als die Kühlenergie.

7.2.3 Einfluss des Quarzgehalts

Mehrere Untersuchungen haben ergeben, dass die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes maßgeblich vom Quarzgehalt abhängt und mit steigendem Quarzgehalt zunimmt (z.B. Farouki 1986). Die genauen Zusammenhänge können der jeweiligen Fachliteratur entnommen werden, eine zusammenfassende Erläuterung liefern Baier (2009) oder Ziegler et al. (2010). Im Rahmen der Parameterstudie wurden drei Quarzgehalte von $q = 35\%$ (Ausgangsparameter des Hokksundsands) bis $0,75\%$ untersucht. Diese ergeben Wärmeleitfähigkeiten des Feststoffs von $\lambda_s = 3,359$ bis $6,076 \text{ W/(mK)}$. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.5 dargestellt.

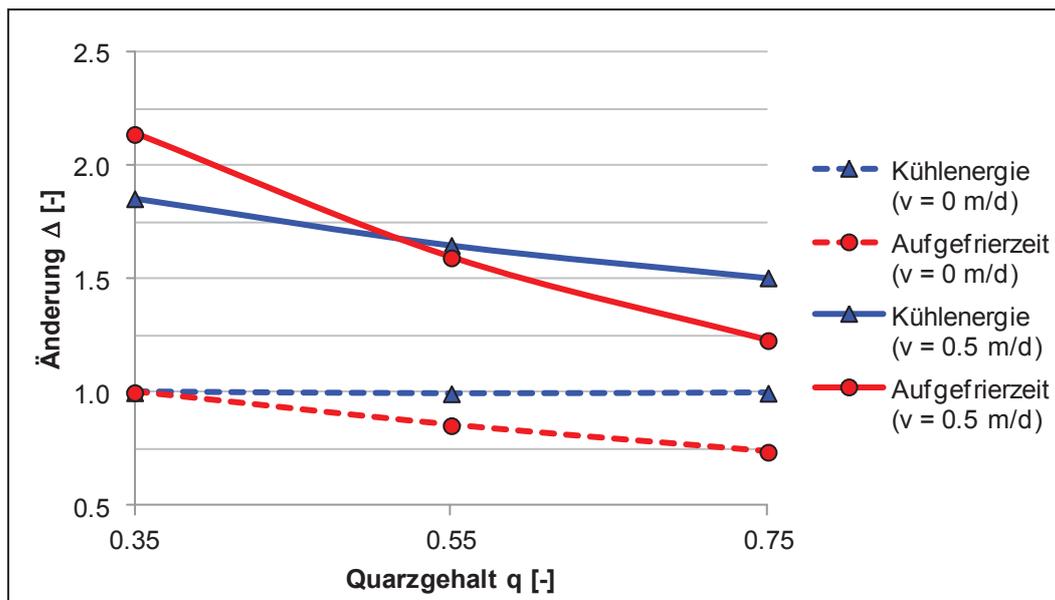
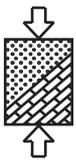


Abbildung 7.5 Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer in Abhängigkeit des Quarzgehalts bezüglich des Ausgangssystems für $v = 0 \text{ m/d}$ und $q = 0,35$

Es wird deutlich, dass eine Erhöhung des Quarzgehalts in jedem Fall zu einer Verringerung der Aufgefrierdauer führt. Hierbei ist zu erkennen, dass der Effekt für eine erhöhte Fließgeschwindigkeit nochmals deutlicher verstärkt wird. Die Kühlenergie hingegen zeigt ein anderes Verhalten. Für den Fall ohne Grundwasserströmung findet nahezu keine Änderung der Kühlenergie statt. Da keine Grundwasserströmung vorliegt, muss lediglich ein bestimmtes Volumen des Bodens aufgefroren werden. Dieses Bodenvolumen ist konstant und unabhängig vom Quarzgehalt. Somit bleibt die Kühlenergie konstant, weil das Volumen zwar in einer kürzeren Zeit aufgefroren wird, aber nicht weniger Energie notwendig wird. Liegt eine Grundwasserströmung vor, so verringert sich die erforderliche Kühlenergie bei steigendem Quarzgehalt, aber nicht in gleichem Maß wie die Aufgefrierzeit. In diesem Fall



spielt der zusätzliche Wärmestrom des Grundwassers die entscheidende Rolle. Auch im Fall einer Grundwasserströmung ist das zu gefrierende Bodenvolumen konstant. Durch die Verringerung der Aufgefrierdauer infolge der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit wirkt der zusätzliche Wärmestrom nur über einen geringeren Zeitraum. Somit wird die Kühlenergie im Fall einer Grundwasserströmung insgesamt durch eine Steigerung des Quarzgehalts verringert.

7.2.4 Einfluss der Grundwassertemperatur

Die Grundwassertemperatur ist an die Bodentemperatur gekoppelt und somit gewissen regionalen und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Da die Grundwassertemperatur die mit einer Vereisung abzukühlende Temperaturdifferenz bestimmt, wurden Temperaturen von $T = 8$ bis 14°C untersucht. Vor allem bei Vereisungsmaßnahmen im innerstädtischen Bereich ist 14°C eine gängige Grundwassertemperatur. Bei einer vorliegenden Grundwasserströmung bestimmt sie die zusätzlich eingetragene Wärmemenge. Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen sind in Abbildung 7.6 dargestellt.

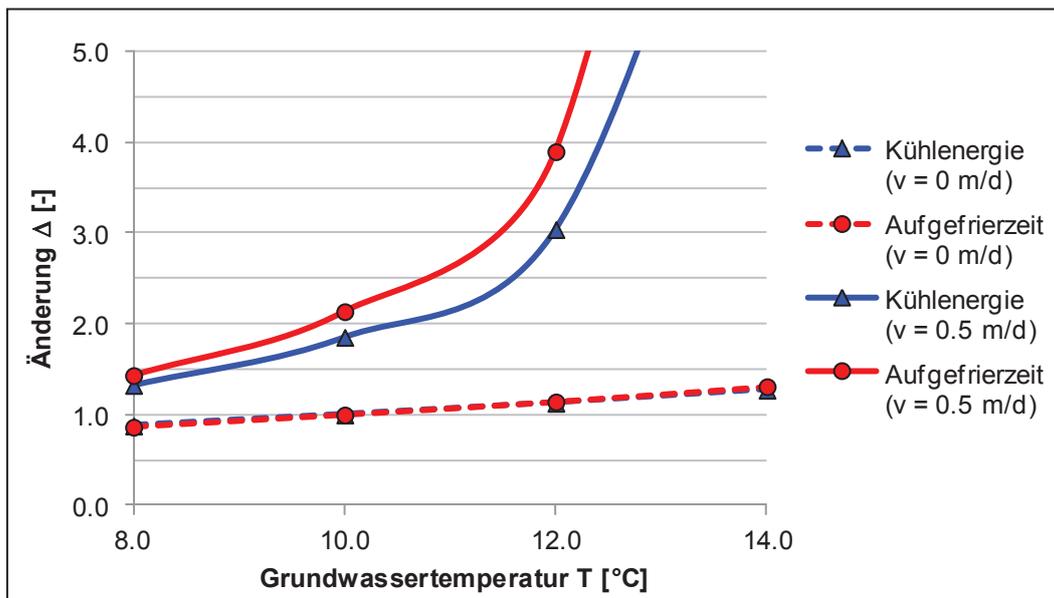
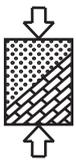


Abbildung 7.6 Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer in Abhängigkeit der Grundwassertemperatur bzgl. des Ausgangssystems für $v = 0$ m/d & $T = 10^\circ\text{C}$

Liegt keine Grundwasserströmung vor, so erhöht sich die Aufgefrierzeit mit steigender Grundwassertemperatur in gleichem Maß wie die Kühlleistung. Dies liegt darin begründet, dass eine größere Temperaturdifferenz abgekühlt werden muss, was zum einen länger dauert und zum anderen eine größere Leistung erfordert. Da die Kühlleistung und damit auch die Kühlenergie nach Gleichung (5-1) proportional zur Temperaturdifferenz ist, findet ein proportionaler Anstieg zwischen Aufgefrierzeit und Kühlenergie statt.

Aufgrund der zusätzlichen thermischen Belastung durch den eingetragenen Wärmestrom wirkt sich die Erhöhung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie im Fall einer Grundwasserströmung überproportional stark aus. Für eine Grundwassertemperatur von 14°C konnte für eine Strömung von $v = 0,5$ m/d die erforderliche Frostkörperdicke rechnerisch nicht mehr erreicht werden.



7.3 Einfluss der Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteträgerkreislaufs

7.3.1 Einfluss der Geometrie des koaxialen Gefrierrohrs

Im Rahmen dieser Parameterstudie wurden zwei unterschiedliche Rohrgeometrien (s. Tabelle 7.4) untersucht, die beide bei Vereisungsprojekten zum Einsatz kamen. Aufgrund der vorliegenden Rohrabmessungen konnte in diesem Fall nicht lediglich ein Parameter geändert werden, der die ursächliche Zuordnung der Ergebnisse eindeutig machen würde.

Tabelle 7.4 Geometrien der beiden verwendeten Gefrierrohre

Parameter des Gefrierrohrs		Ø 108	Ø 88,9	Einheit
Innendurchmesser des Fallrohrs	$d_{i,i}$	51	45	[mm]
Außendurchmesser des Fallrohrs	$d_{i,a}$	55	50	[mm]
Innendurchmesser des Steigrohrs	$d_{A,i}$	104	68,9	[mm]
Außendurchmesser des Steigrohrs	$d_{A,a}$	108	88,9	[mm]

Durch die unterschiedlichen Durchmesser der Rohre und die damit verbundenen unterschiedlichen Wandstärken ändern sich die thermischen Widerstände. Durch eine Veränderung des Strömungszustands im Rohr ergibt sich eine Veränderung des konvektiven thermischen Widerstands. Der konduktive Widerstand wird aufgrund der Veränderung der Wandstärke ebenfalls modifiziert. Die Ergebnisse der numerischen Simulationen sind in Abbildung 7.7 zusammengefasst.

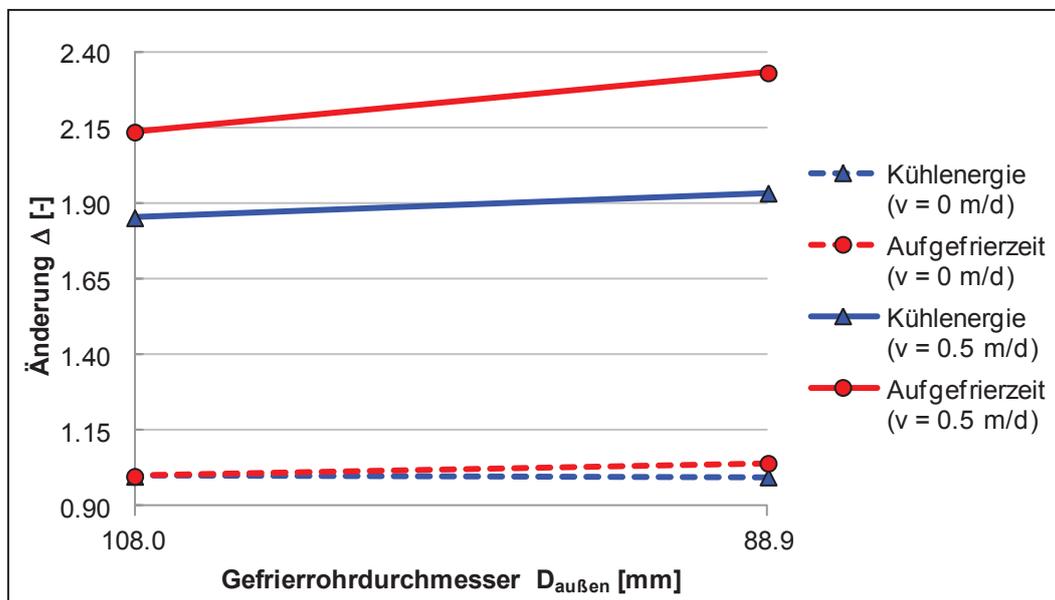
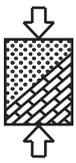


Abbildung 7.7 Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer in Abhängigkeit der Gefrierrohrgeometrie bzgl. des Ausgangssystems für $v = 0$ m/d $D_{\text{au.}} = 108$ mm

Liegt keine Grundwasserströmung vor, so kommt es zu einer leichten Erhöhung der Aufgefrierzeit bei dem kleineren Rohrdurchmesser. Die Kühlenergie wird aber nur gering beeinflusst. Der Hauptgrund für die Änderungen der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie ist für diesen Vergleich nicht in der Änderung der thermischen Widerstände zu sehen, sondern in der Änderung der wärmeübertragenden Mantelfläche, die sich um ca. 20% unterscheidet.



Der Grund für die gleichbleibende Kühlenergie im Fall ohne Grundwasserströmung liegt, wie beim Quarzgehalt, in dem gleichbleibenden zu gefrierenden Bodenvolumen begründet. Trotz einer Erhöhung der Aufgefrierzeit wird für $v = 0$ deshalb keine Vergrößerung der Kühlenergie notwendig. Bei einer Grundwasserströmung von $v = 0,5$ m/d hingegen ist sowohl eine deutliche Erhöhung der Aufgefrierzeit als auch der Kühlenergie zu verzeichnen. Durch die geringere Mantelfläche wird eine längere Aufgefrierdauer nötig, die einen absolut betrachtet größeren eingetragenen Wärmestrom durch das Grundwasser bedeutet und somit zu einer Erhöhung der Kühlenergie führt.

7.3.2 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Steigrohrs

Die Wärmeleitfähigkeit des Steigrohrs, das in direktem Kontakt zum umgebenden Boden steht, wurde in einer Spannweite zwischen 50 und 400 W/(mK) untersucht. Die beiden Werte decken somit die möglichen Maximalwerte von Stahl und Kupfer als Steigrohr ab. Die Ergebnisse in Abbildung 7.8 zeigen, dass der generelle Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Steigrohrs lediglich im Bereich von 5% liegt und damit gering ist. Eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führt in jedem Fall zu einer Verringerung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie, wobei diese für eine vorhandene Grundwasserströmung deutlicher ausfällt.

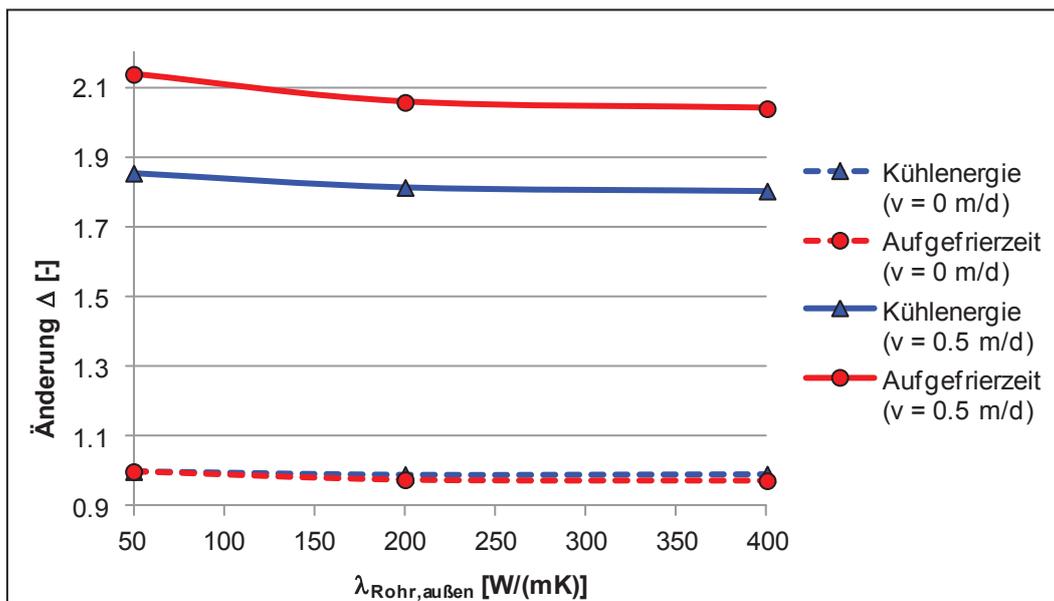


Abbildung 7.8 Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Steigrohrs bzgl. des Ausgangssystems für $v = 0$ m/d und $\lambda_{\text{Rohr,außen}} = 50$ W/(mK)

7.3.3 Einfluss der Länge des Gefrierrohrs

Als weiterer Parameter wurden Gefrierrohre mit verschiedenen Längen von $L = 5 / 10$ und 15 m untersucht. Abbildung 7.9 zeigt die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen. Generell steigt die Aufgefrierzeit für eine zunehmende Gefrierrohrlänge kaum an, die Kühlenergie hingegen deutlich. Der Grund dafür liegt in der größeren Rücklauftemperatur bei längeren Gefrierrohren aufgrund der größeren Wärmeübertragungsfläche. Dadurch wird die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf erhöht und somit steigt die Kühlenergie maßgeblich an.



Die Erhöhung der Kühlenergie bei steigender Gefrierrohrlänge wird für eine Grundwasserströmung von $v = 0,5 \text{ m/d}$ nochmal deutlicher. Die Änderung der Aufgefrierdauer hingegen ist sowohl für den Fall ohne als auch mit einer Grundwasserströmung gering.

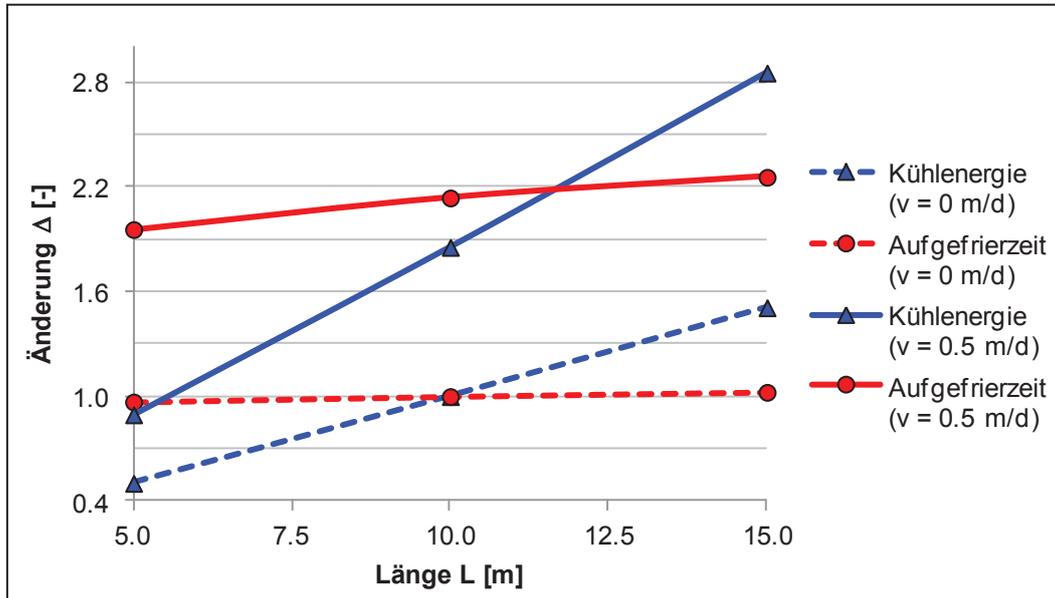


Abbildung 7.9 Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer in Abhängigkeit der Länge des Gefrierrohrs bzgl. des Ausgangssystems für $v = 0 \text{ m/d}$ & $L = 10 \text{ m}$

7.3.4 Einfluss der Calciumchloridsole

Bei Vereisungsmaßnahmen wird als Kälte Träger meistens eine Calciumchloridlösung verwendet. Diese ist in verschiedenen handelsüblichen Konzentrationen erhältlich, die sich aufgrund eines bestimmten Gefrierpunkts ergeben. In diesem Fall wurden 29,9-prozentige ($T_{\text{Gefrieren}} = -54^\circ\text{C}$), 28,57-prozentige ($T_{\text{Gefrieren}} = -45^\circ\text{C}$) und 27,4-prozentige ($T_{\text{Gefrieren}} = -38^\circ\text{C}$) Calciumchloridlösungen untersucht. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 7.10.

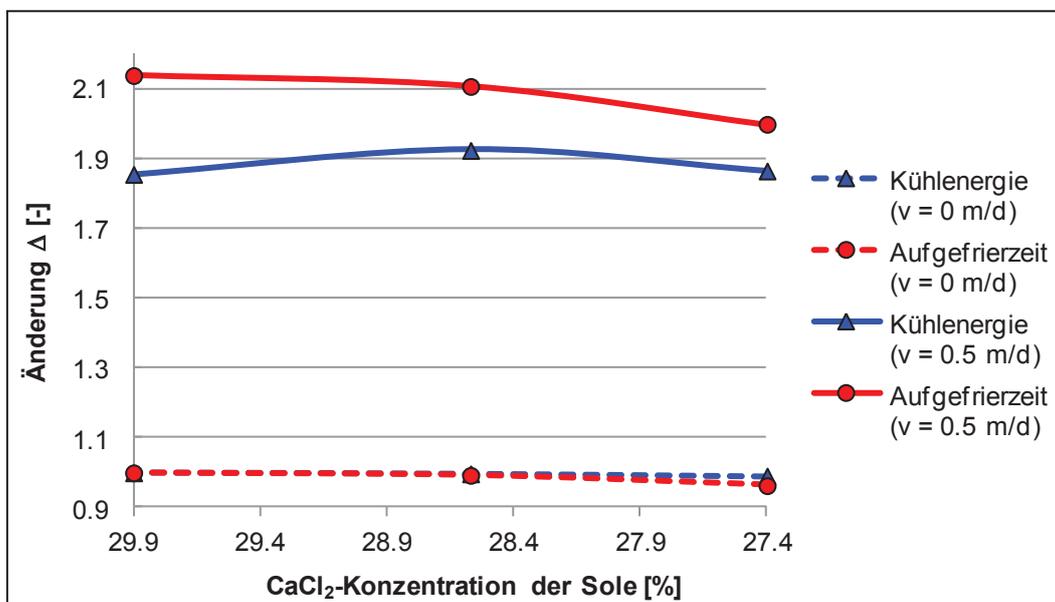
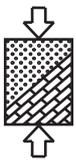


Abbildung 7.10 Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer in Abhängigkeit der CaCl₂-Sole bzgl. des Ausgangssystems für $v = 0 \text{ m/d}$ und 29,9%-CaCl₂-Sole



Die Ergebnisse zeigen, dass die Aufgefrierzeit mit der Verwendung einer geringeren CaCl_2 -Konzentration leicht abnimmt. Dies ist für eine Grundwasserströmung von $v = 0,5 \text{ m/d}$ nochmal deutlicher als für $v = 0$. Die Kühlenergie hingegen verhält sich nicht einheitlich. Liegt keine Grundwasserströmung vor, so bleibt sie nahezu gleich. Bei Vorliegen einer Grundwasserströmung von $v = 0,5 \text{ m/d}$ ist ein Anstieg der Kühlenergie für eine Konzentration von 28,57% zu verzeichnen.

Eine Verringerung der Konzentration der CaCl_2 -Sole bewirkt eine Verringerung der dynamischen Viskosität und damit der zu überwindenden Newton'schen Fluidreibung. Dadurch können Pumpleistungen verringert werden, was aber in dem „freezrefcap“-Modul nicht betrachtet wird.

7.3.5 Einfluss der Vorlauftemperatur

Ein wichtiger Faktor bei einer Vereisungsmaßnahme ist die gewählte Vorlauftemperatur. Darum wurde diese im Bereich von $T_{VL} = -30^\circ\text{C}$ und $T_{VL} = -40^\circ\text{C}$ variiert. Die Ergebnisse in Abbildung 7.11 zeigen, dass eine Verringerung der Vorlauftemperatur eine Verringerung der Aufgefrierdauer ergibt, die im Fall einer Grundwasserströmung nochmals verstärkt wird. Die Kühlleistung zeigt ein ähnliches Verhalten, wobei die Änderungen nicht so deutlich ausfallen. Der Grund für dieses Verhalten liegt in der erhöhten „wirksamen“ Temperaturdifferenz zwischen Boden und Gefrierrohr, wodurch eben nicht nur die Aufgefrierzeit, sondern auch die Kühlenergie abnimmt.

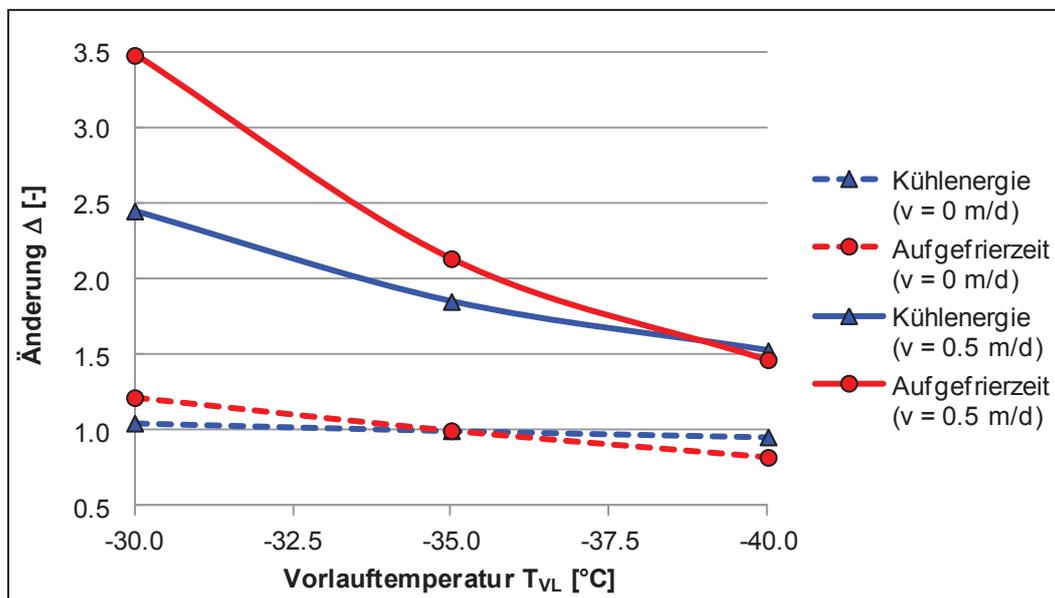


Abbildung 7.11 Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur bzgl. des Ausgangssystems für $v = 0 \text{ m/d}$ und $T = -35^\circ\text{C}$

7.3.6 Einfluss des Durchflusses

Mit dem Ziel der Änderung der Strömungseigenschaften im Gefrierrohr wurden unterschiedliche Durchflüsse untersucht. Dabei wurde ein Durchfluss von $Q = 5 \text{ m}^3/\text{h}$ untersucht, der eine laminare Strömung im Fall- und im Steigrohr hervorruft. Mit dem Durchfluss des Ausgangssystems von $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ wurde im Steigrohr noch eine laminare Strömung erreicht und im Fallrohr bereits eine Strömung im Übergangsbereich zwischen



laminar und turbulent. Ein Durchfluss von $Q = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ erzielte eine Strömung im Übergangsbereich im Fall- und Steigrohr. Um eine turbulente Strömung hervorzurufen, wären deutlich höhere Durchflüsse erforderlich gewesen, die aber keine realistischen Eingangswerte mehr darstellen. Abbildung 7.12 zeigt die Simulationsergebnisse.

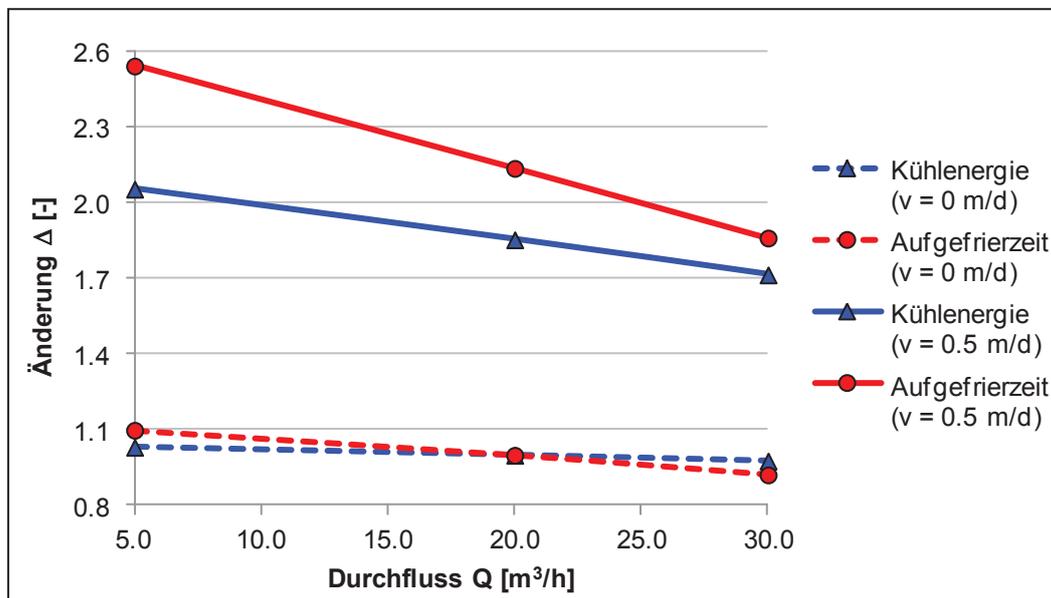


Abbildung 7.12 Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer in Abhängigkeit des Durchflusses bezüglich des Ausgangssystems für $v = 0 \text{ m/d}$ und $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$

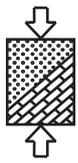
Der deutliche Einfluss des Durchflusses auf die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie ist gut zu erkennen, der bei Vorliegen einer Grundwasserströmung auch nochmals gesteigert wird. Für einen Durchfluss von $Q = 5 \text{ m}^3/\text{h}$, der laminare Strömungsverhältnisse im gesamten Gefrierrohr hervorruft, kann deutlich die Erhöhung der Aufgefrierzeit erkannt werden, die sich aufgrund des schlechten Wärmeübergangskoeffizienten einstellt. Für eine Erhöhung des Durchflusses zeigt sich das entsprechende Verhalten in umgekehrter Weise. Die Kühlenergie wird ebenfalls in gleicher Weise beeinflusst, wobei die Änderungen nicht so stark ausfallen. Dies liegt an der sich verändernden Temperaturdifferenz aufgrund des besseren bzw. schlechteren Wärmeübergangs, die in Kombination mit dem Durchfluss die Kühlleistung nach Gleichung (5-1) ergibt.

Eine Erhöhung bzw. Verringerung der Pumpleistung im Kälteträgerkreislauf durch einen erhöhten oder verminderten Durchfluss konnte in den Simulationen mit dem „freezrefcap“-Modul nicht berücksichtigt werden.

7.4 Fazit der Parameterstudie

Im Rahmen der Parameterstudie wurde eine große Zahl an unterschiedlichen Parametern und deren Einfluss auf die Aufgefrierzeit und die mittlere Kühlenergie bis zum Ende der Aufgefrierzeit untersucht.

Den größten Einfluss auf die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie hat die Grundwasserfließgeschwindigkeit. Durch eine Steigerung der Strömung auf $v = 0,5 \text{ m/d}$ verdoppeln sich die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie. Bei einer weiteren Steigerung der Fließgeschwindigkeit steigen die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie überproportional an.

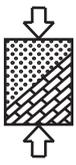


Die weiteren untersuchten Bodenparameter, wie die Grundwassertemperatur, der Porenanteil und der Quarzgehalt zeigen alle ebenfalls eine deutliche Beeinflussung der Aufgefrierzeit. Eine Steigerung der Grundwassertemperatur um 4°C resultiert in einer rund 30% höheren Aufgefrierzeit und erforderlichen Kühlenergie. Für eine Grundwasserströmung wird dieser Effekt noch deutlicher. Beim Porenanteil ist der Einfluss ähnlich deutlich. Liegt ein Porenanteil vor, der nur der Hälfte des Porenanteils des Ausgangssystems entspricht, reduzieren sich die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie bei einer Grundwasserströmung um bis zu 40%. Liegt ein im Vergleich zum Ausgangssystem doppelt so hoher Quarzgehalt vor, der maßgeblich die Wärmeleitfähigkeit des Festgesteins bestimmt, so vermindert sich die Aufgefrierzeit bei einer Strömung von $v = 0,5$ m/d um 45%. Die Kühlleistung erfährt lediglich eine Ersparnis von 20% und wird somit nicht so stark beeinflusst.

Die untersuchten Eigenschaften des Gefrierrohrs haben einen geringeren Einfluss auf die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie. Die untersuchte Änderung der Gefrierrohrgeometrie hat eine Verringerung der wärmeübertragenden Mantelfläche von ca. 20% zur Folge, die in einer maximalen Erhöhung der Aufgefrierzeit von 9% resultiert. Die Kühlenergie wird sogar nur um 4,5% erhöht. Der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit liegt mit einem Wert unter 5% so niedrig, dass die Kostenerhöhung durch den Einsatz eines Werkstoffes mit besserer Wärmeleitfähigkeit nicht gerechtfertigt ist. Eine Änderung der Länge des Gefrierrohrs hat zwar nur eine geringe Beeinflussung der Aufgefrierzeit sogar unter Strömungseinfluss zur Folge, die Kühlenergie wird aber bei einer Vergrößerung der Länge um 50% um max. 54% gesteigert.

Bei der Untersuchung der Eigenschaften des Kälteträgerkreislaufs hat sich ergeben, dass der Einsatz einer CaCl_2 -Sole mit einer veränderten Konzentration nahezu keinen Einfluss auf die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie hat. Eine Änderung des Durchflusses im Gefrierrohr, der in einer Veränderung des Wärmeübergangs resultiert, kann hingegen deutliche Auswirkungen haben. Eine Verschlechterung des Wärmeübergangs aufgrund einer laminaren Strömung kann bei einer Grundwasserströmung von $v = 0,5$ m/d zu einer Vergrößerung der Aufgefrierzeit um 19% führen, wobei die Kühlenergie lediglich um 10% steigt. Einen sehr deutlichen Einfluss auf die Aufgefrierzeit hat weiterhin die Vorlauftemperatur, die bei -30°C und einer Grundwasserströmung von $v = 0,5$ m/d um 63% steigt. Die Kühlenergie steigt weniger stark um lediglich 32% an. Ein zusätzlicher Energieverbrauch der Pumpe und des Kälteaggregats durch die beschriebenen Anpassungen wurde dabei nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die größte Beeinflussung des Gefrierhaltens und der erforderlichen Kühlenergie in jedem Fall aus der vorliegenden Grundwasserströmung resultiert. Generell zeigen alle Bodenparameter eine deutliche Beeinflussung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie. Dabei ist aber zu beachten, dass diese Bodenparameter in der Realität nicht beeinflussbar sind, aber zur realistischen Planung der Vereisungsmaßnahme unbedingt zutreffend zu ermitteln sind. Die untersuchten Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteträgerkreislaufs hingegen können aktiv gesteuert werden und bieten somit trotz ihrer geringeren Beeinflussung im Vergleich mit den Bodenparametern gute Einsparpotentiale. Die größten Einsparungen im Hinblick auf die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie können dabei durch die richtige Wahl der Vorlauftemperatur und des Durchflusses erzielt werden.



8 Energetische Optimierung von Vereisungsmaßnahmen

Die Ergebnisse der Parameterstudie haben gezeigt, dass die Grundwasserfließgeschwindigkeit nicht nur die Aufgefrierzeit sondern auch die erforderliche Kühlenergie einer Vereisungsmaßnahme maßgeblich beeinflusst. Sowohl Baier (2009) als auch Ziegler et al. (2010) haben bereits strömungsangepasste Gefrierrohranordnungen untersucht, die eine deutliche Verkürzung der Aufgefrierzeit zur Folge haben. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die maßgeblichen Systeme aus Ziegler et al. (2010) im Hinblick auf die erforderliche Kühlenergie in der Aufgefrierphase untersucht. Außerdem wurden die Untersuchungen der Kühlenergie auf die Erhaltungsphase erweitert. Für diese wurden unterschiedliche Steuerungsvarianten und deren Auswirkung auf die Kühlleistung untersucht.

8.1 Ausgangsmodell und –parameter

Im Hinblick auf die ganzheitliche Simulation einer Vereisungsmaßnahme, bestehend aus Aufgefrier- und Erhaltungsphase, ist es erforderlich, eine lange Frostkörpererhaltung zu simulieren. Die erforderliche kleine Zeitschrittweite im „freezrefcap“-Modul und die aufwändigere Berechnung würden in diesem Fall zu enormen Rechenzeiten führen. Um diese Rechenzeiten zu minimieren, wurden die im Folgenden dargestellten Simulationen mit dem „freezing“-Modul und der damit verbundenen vereinfachten Kühlleistungsberechnung durchgeführt. Die Nachrechnung des Modellversuchs hat gezeigt, dass die Kühlleistung in guter Näherung durch diese vereinfachte Berechnung bestimmt werden kann. Mögliche Abweichungen zur tatsächlichen Kühlleistung sind im Rahmen dieser Berechnungen vernachlässigbar, da es sich lediglich um relative Vergleiche handelt. Weiterhin können somit zweidimensionale Modelle verwendet werden, die in guter Übereinstimmung auf dreidimensionale Modelle extrapoliert werden können, wie frühere Vergleichsrechnungen gezeigt haben. Dies führt zu einer weiteren deutlichen Reduktion der Rechenzeit.

Für das Basismodell wurde das im Rahmen der Parameterstudie verwendete Modell etwas vergrößert (s. Abbildung 8.1). Insgesamt wurde eine 6,4 m lange, zu gefrierende Wand simuliert, die mit insgesamt 9 Gefrierrohren erstellt werden sollte. Der Abstand der Gefrierrohre lag in diesem Fall wieder bei 0,8 m. Die Gefrierrohre wurden als Dirichlet-Randbedingung modelliert und mit einer konstanten Temperatur von $T = -35^{\circ}\text{C}$ belegt. Die Abmessungen des zweidimensionalen Basismodells wurden zu 30,0 m x 24,3 m gewählt. Die erforderliche Frostkörperdicke wurde für diese numerischen Untersuchungen zu $d = 1,5$ m festgelegt. Die Kontrolle wurde, wie bereits in Kapitel 7.1 beschrieben, über die Temperatur der in diesem Abstand angeordneten Monitoring Points realisiert, die nach der Definition für einen gefrorenen Boden bei $T = -1^{\circ}\text{C}$ liegen musste. Die Zellweite wurde entsprechend den Stabilitätskriterien nach Kapitel 7.1 gewählt. Der Zeitschritt wurde in Übereinstimmung mit den Stabilitätskriterien zu 15 min gewählt. Als Baugrund wurde diesen Untersuchungen der bereits bei der Parameterstudie verwendete Hokksundsand mit einer Ausgangstemperatur von $T = 10^{\circ}\text{C}$ zugrunde gelegt. Die sich ergebenden Eingangsgrößen sind in Tabelle 7.1 aufgeführt. Das Basissystem ist in Abbildung 8.1 dargestellt.

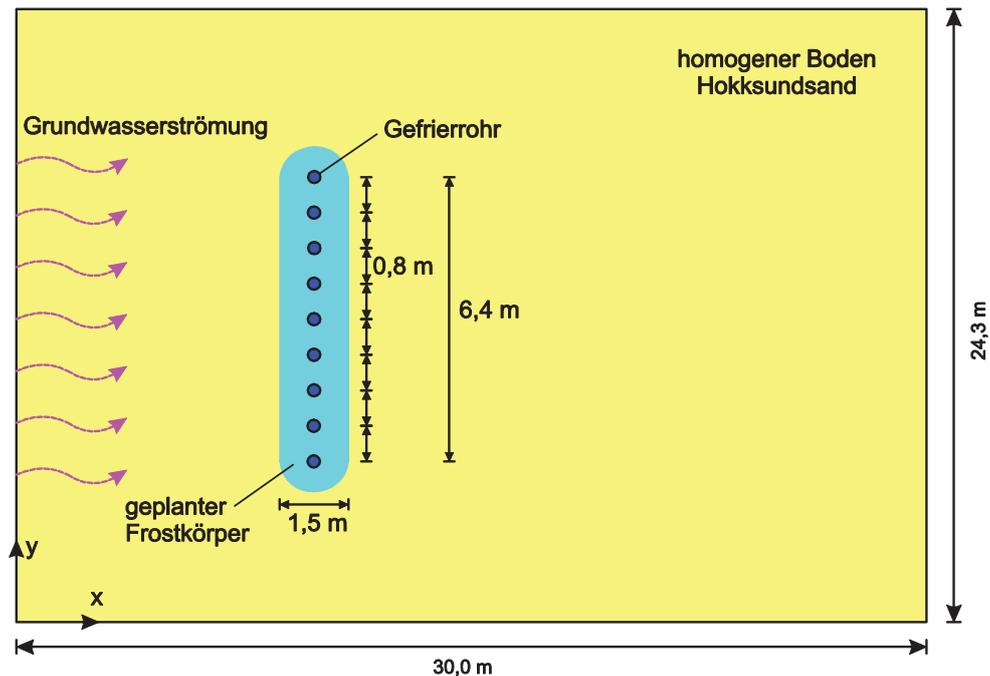
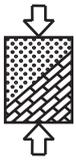


Abbildung 8.1 Basissystem des Modells der Baugrubenwand zur optimierten Kühlleistungsermittlung

8.2 Optimierung der Aufgefrierphase

In einem ersten Schritt wurde auch für dieses System der Einfluss einer Grundwasserströmung auf die Aufgefrierzeit und die erforderliche Kühlenergie bestimmt. Wie bereits erwähnt, wird der Frostkörperfortschritt auch in diesem Fall durch eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit überproportional verzögert. Die Kühlenergie weist ebenso eine überproportionale Steigerung auf (s. Abbildung 8.2).

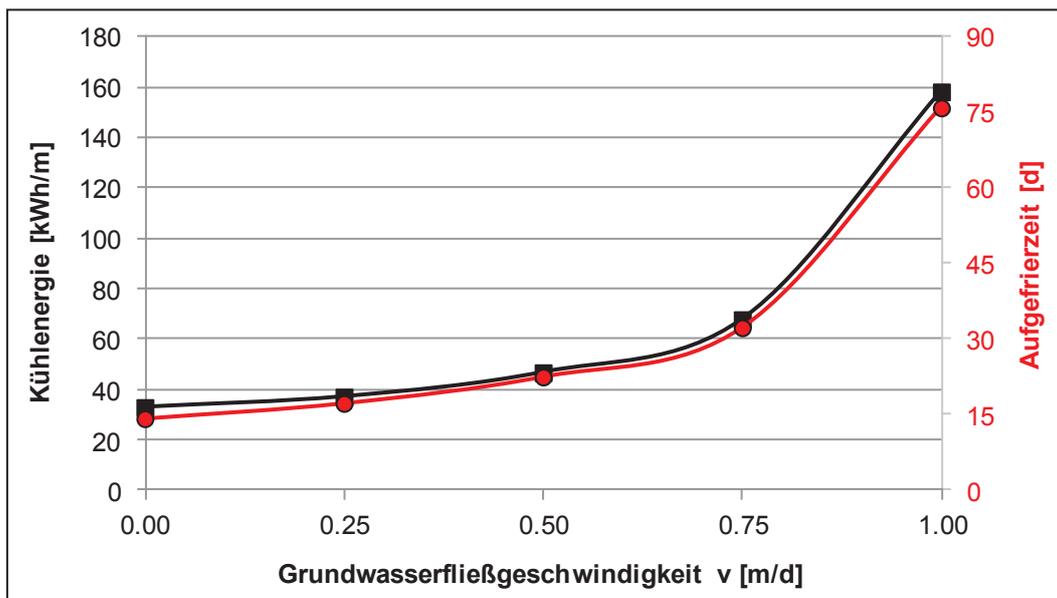
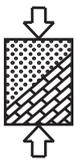


Abbildung 8.2 Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Aufgefrierzeit und die mittlere Kühlenergie



Die auf den Ausgangszustand des Systems ohne Grundwasserströmung normierte Darstellung der Ergebnisse macht nochmal deutlich, dass die Aufgefrierzeit stärker von der Fließgeschwindigkeit beeinflusst wird als die Kühlenergie (s. Abbildung 8.3).

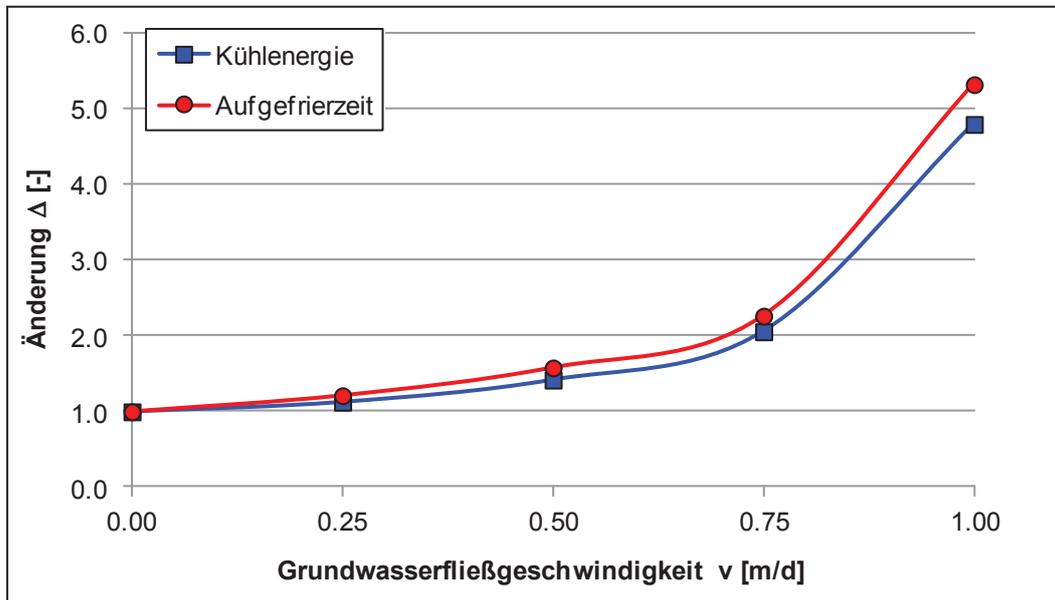


Abbildung 8.3 Änderung der Kühlenergie bzw. der Aufgefrierdauer bezogen auf ein System ohne Grundwasserströmung

Die Verzögerung und Verlagerung des eigentlich radialen Frostkörperfortschritts wird in den Temperatur-Plots in Abbildung 8.4 deutlich. Der kritische Bereich des Schließens des Frostkörpers liegt in der Mitte des Wandsystems, da dort die Fließgeschwindigkeit beschleunigt wird. Ist der Frostkörper geschlossen, so wird die Strömung abgelenkt und es entsteht direkt mittig vor dem Frostkörper ein Strömungsschatten. Somit verlagert sich der kritische Bereich für das Aufgefrieren und vor allem für die anschließende Erhaltungsphase hin zu den Systemrändern.

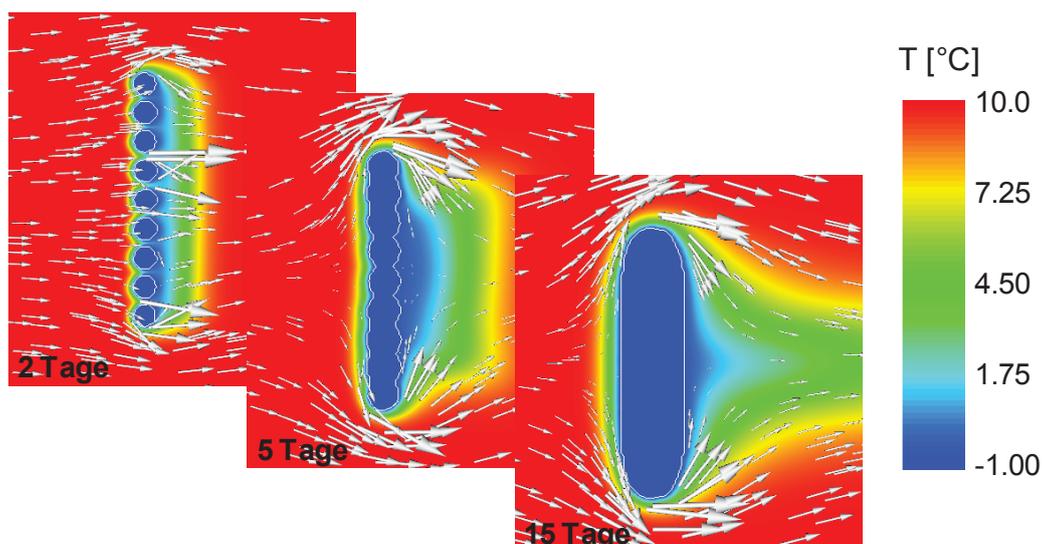
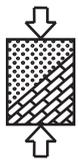


Abbildung 8.4 Frostkörperentwicklung des Basissystems unter Einfluss von $v = 0,5$ m/d

Im Rahmen des Forschungsprojekts von Ziegler et al. (2010) wurden bereits numerische Untersuchungen zur Optimierung der Aufgefrierzeit durch eine strömungsangepasste



Gefrierrohranordnung für ein Wandsystem sowie für geschlossene Systeme einer Baugrubenwand durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Systeme untersucht, die zum einen lediglich eine reine Formänderung, wie beispielsweise eine elliptische Anordnung der Gefrierrohre betrachteten. Zum anderen wurden Systeme untersucht, bei denen vorhandene Gefrierrohre umgeordnet und teilweise zusätzliche Gefrierrohre angeordnet wurden. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass eine reine Formänderung keine nennenswerte Verringerung der Aufgefrierdauer zur Folge hat. Eine Verdichtung der Gefrierrohre sowohl ohne als auch mit zusätzlich angeordneten Gefrierrohren ergab hingegen deutliche Einsparungen. Die effektivste Variante lag in der Vorkühlung der ursprünglichen Kontur durch zusätzliche, im Anstrom angeordnete Gefrierrohre.

Die Vorkühlung, die sich als effektivste Variante der strömungsangepassten Gefrierrohranordnung herausgestellt hat, wurde nun auch im Hinblick auf die erforderliche Kühlleistung und die damit verbundene Kühlenergie untersucht. Dazu wurden im Anstrom des Basissystems bis zu drei zusätzliche Gefrierrohre in einem Abstand von einem Meter von den ursprünglichen Gefrierrohren angeordnet (s. Abbildung 8.5). Generell wurde die Anordnung so gewählt, dass der im Aufgefrieren kritische Bereich der Mitte positiv beeinflusst wird. Bei der Variante mit drei Gefrierrohren zur Vorkühlung wurden die äußeren beiden Rohre etwas weiter zum Rand hin gesetzt, um die Verlagerung des kritischen Bereichs nach dem Schließen zum Rand hin positiv zu beeinflussen.

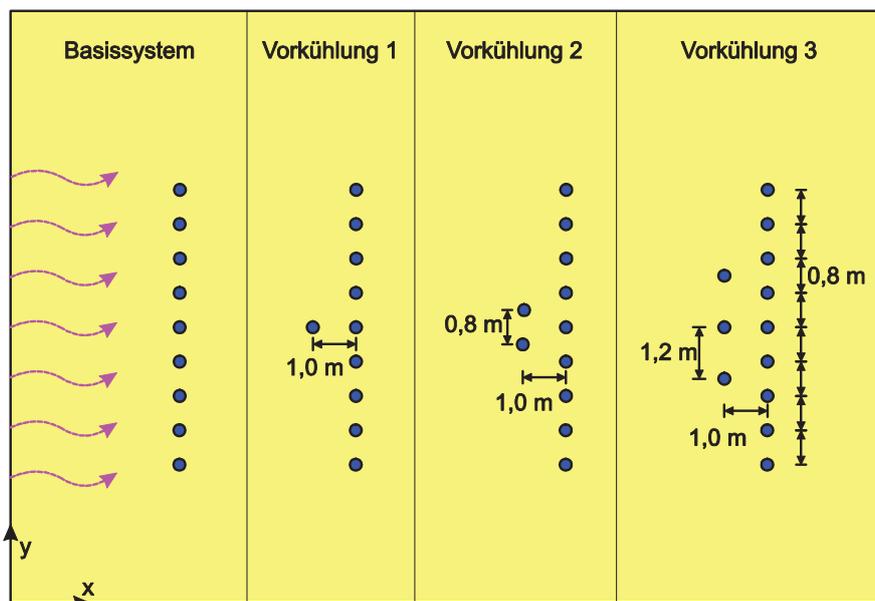


Abbildung 8.5 Übersicht der untersuchten Optimierungsvarianten der Vorkühlung

Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen sind in Abbildung 8.6 für die Aufgefrierzeit und in Abbildung 8.7 für die Gesamtkühlenergie bis zur Aufgefrierzeit dargestellt. In diesem Fall wird die Gesamtkühlenergie betrachtet, da durch die unterschiedliche Anzahl der Gefrierrohre die mittlere Kühlenergie verzerrte Ergebnisse liefert. Im Vergleich der Optimierungsvarianten mit dem Basissystem ist deutlich zu erkennen, dass die Aufgefrierzeit der Optimierungsvarianten mit steigender Fließgeschwindigkeit weitaus geringer steigt. Generell kann die Aufgefrierzeit für alle Optimierungsvarianten verringert werden, wobei diese aber erst ab Geschwindigkeiten von $v = 0,5 \text{ m/d}$ nennenswert sind. Weiterhin ergibt sich der Grundsatz: Je mehr zusätzliche Gefrierrohre, desto geringer die Aufgefrierdauer.

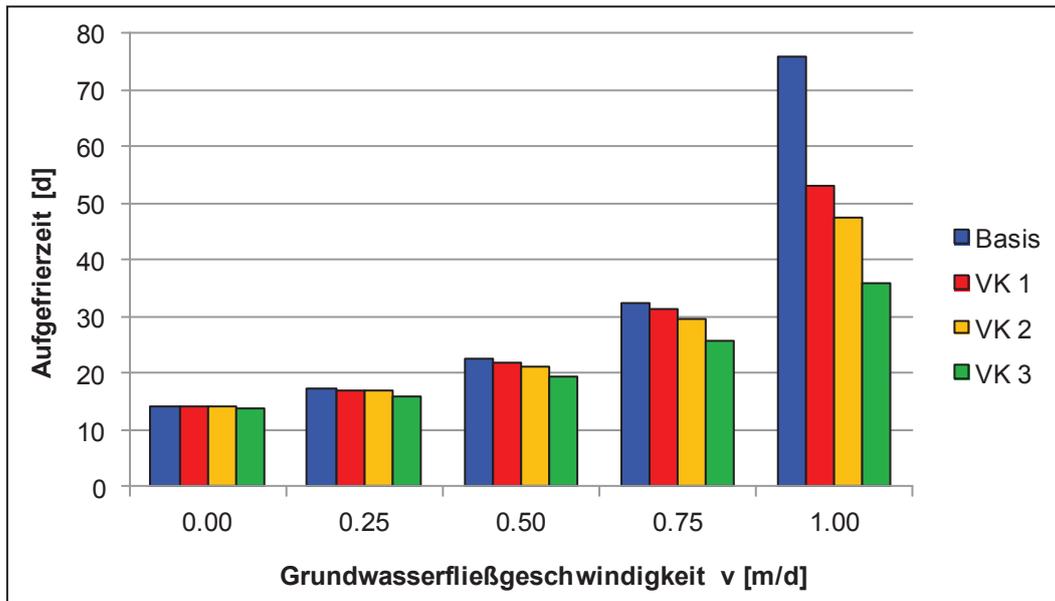
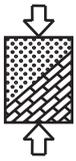


Abbildung 8.6 Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Aufgefrierzeit verschiedener Optimierungssysteme

Dieser Zusammenhang ist im Vergleich der Kühlenergie bis zum Erreichen der Aufgefrierzeit nicht mehr zu erkennen. Durch die zusätzlichen Gefrierrohre ergibt sich vor allem bei kleinen Fließgeschwindigkeiten von beispielsweise $v = 0,25$ m/d eine erhöhte Kühlenergie für VK 3, da die Verringerung der Aufgefrierdauer die zusätzliche Leistung der drei Gefrierrohre nicht aufwiegt. Bei einer Fließgeschwindigkeit von $v = 0,75$ m/d wird deutlich, dass das System der Vorkühlung mit zwei Gefrierrohren einen geringeren Kühlenergiebedarf hat als das System mit drei Rohren zur Vorkühlung. Erst bei einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0$ m/d erreicht das System mit drei Gefrierrohren als Vorkühlung eine geringere Kühlenergie als die beiden anderen Varianten, da dann die Aufgefrierzeit auch deutlich reduziert ist.

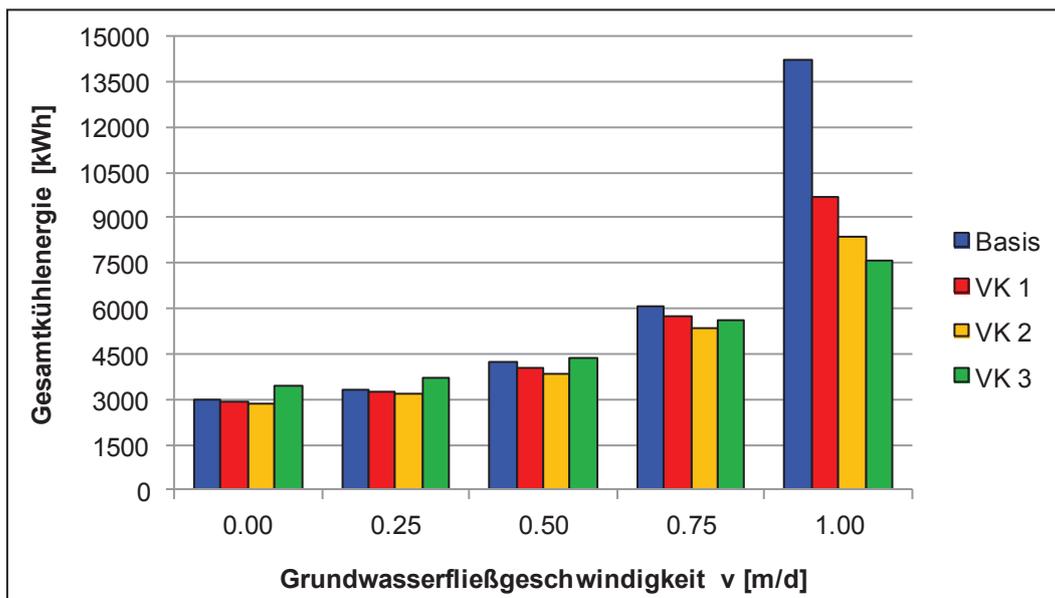
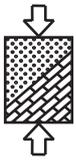


Abbildung 8.7 Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Gesamtkühlenergie der Aufgefrierdauer verschiedener Optimierungssysteme



Es bleibt somit festzuhalten, dass mit dem System der Vorkühlung deutliche Einsparungen bei der Aufgefrierzeit erreicht werden können. Diese Einsparungen korrelieren in allen Fällen mit der Anzahl der zusätzlich eingebrachten Gefrierrohre. Im Hinblick auf die Kühlenergie ist dieser Zusammenhang hingegen nicht mehr eindeutig. In dem untersuchten Fall ist das System der Vorkühlung mit zwei zusätzlichen Gefrierrohren bis zu einer Fließgeschwindigkeit von $v = 0,75$ m/d das optimale System. Erst ab einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0$ m/d erfordert das System der Vorkühlung mit drei Gefrierrohren eine geringere Kühlenergie. Somit kann für die Kühlenergie keine eindeutige Tendenz angegeben werden, sondern diese ist stets durch systemspezifische numerische Untersuchungen zu bestimmen.

8.3 Optimierung der Erhaltungsphase

Das Hauptziel in der Erhaltungsphase einer Vereisungsmaßnahme ist die Erhaltung des statisch erforderlichen Frostkörpers unter möglichst geringem Energieeinsatz. Darüber hinaus soll ein weiteres unnötiges Anwachsen des Frostkörpers weitgehend verhindert werden, um schädliche Frosthebungen zu verhindern bzw. zu reduzieren. Um den Frostkörper unter Berücksichtigung der genannten Ziele zu erhalten, stehen unterschiedliche Betriebsvarianten zur Verfügung. Dazu zählen zum einen der Ansatz einer höheren Vorlauftemperatur, der mit einer verminderten Kühlleistung gleichzusetzen ist, und zum anderen der intermittierende Betrieb des Kälteaggregats.

In den numerischen Simulationen zur Optimierung der Erhaltungsphase wurde der Einfluss der unterschiedlichen Betriebsvarianten für das Basissystem und die drei Optimierungsvarianten einer Vorkühlung auf die erforderliche Kühlleistung hin untersucht.

8.3.1 Betrieb ohne Anpassung

Als Ausgangsbasis wurde zunächst die Kühlleistung in der Erhaltungsphase für einen Betrieb ohne Anpassung für alle Systeme unter dem Einfluss einer Grundwasserströmung bestimmt. Dabei wurde eine Erhaltungsphase von 5 Monaten, die einen realistischen Wert darstellt, im Anschluss an die Aufgefrierphase simuliert. Die Gefrierrohre wurden währenddessen mit einer konstanten Temperatur von $T = -35^\circ\text{C}$ betrieben. Aufgrund der Rechenzeiten wurden in der Erhaltungsphase nur Strömungen von $v = 0 / 0,25 / 0,5$ und $0,75$ m/d betrachtet.

Die Frostkörperüberwachung erfolgte, wie zuvor in der Aufgefrierphase, über die Kontrolle der Temperatur an den Monitoring Points. Im Folgenden werden diese Punkte in der Erhaltungsphase als Sensorpunkte bezeichnet. Eine Übersicht der Lage aller Sensorpunkte zur Frostkörperüberwachung ist in Abbildung 8.8 dargestellt. Um einen Frostkörper mit einer statisch erforderlichen Dicke von $1,5$ m zu erhalten, wurden die Sensorpunkte in einem Abstand von $0,75$ m jeweils auf der LUV- und der LEE-Seite des Frostkörpers angeordnet. Insgesamt wurde die maximal erlaubte Temperatur am Rand des Frostkörpers von $T = -1^\circ\text{C}$ an 34 Sensorpunkten überprüft.

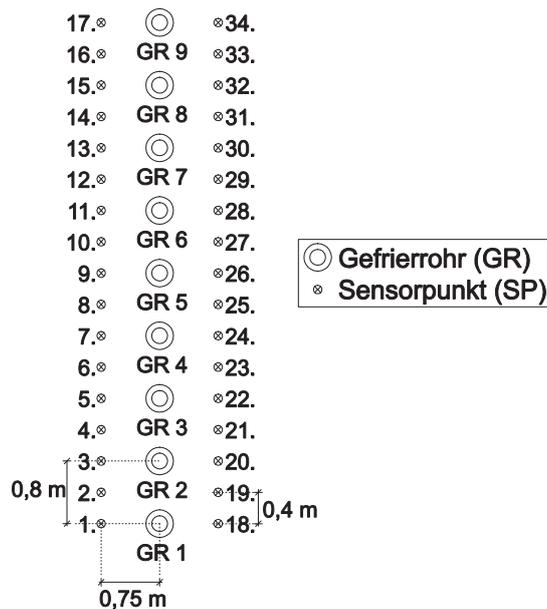
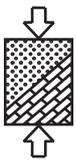


Abbildung 8.8 Übersicht der Gefrierrohre und Sensorpunkte des numerischen Modells

In einem ersten Schritt wurde ein Betrieb ohne Anpassung in der Erhaltungsphase simuliert, bei dem alle Gefrierrohre und damit auch die zusätzlichen Gefrierrohre der Vorkühlungssysteme mit einer konstanten Temperatur von $T = -35^\circ\text{C}$ betrieben wurden. Die Ergebnisse werden weiterhin, wie auch bei der Aufgefrierphase in der Form der mittleren Kühlenergie [kWh/m] oder der Gesamtkühlenergie [kWh] dargestellt, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. In der Erhaltungsphase wäre aber aufgrund der definierten Zeitspanne ein Vergleich über die mittlere Kühlleistung [kW/m] ebenfalls möglich. Die Ergebnisse der erforderlichen Kühlleistung sind normiert auf die Kühlenergie des Basissystems ohne Grundwasserströmung in Abbildung 8.9 dargestellt.

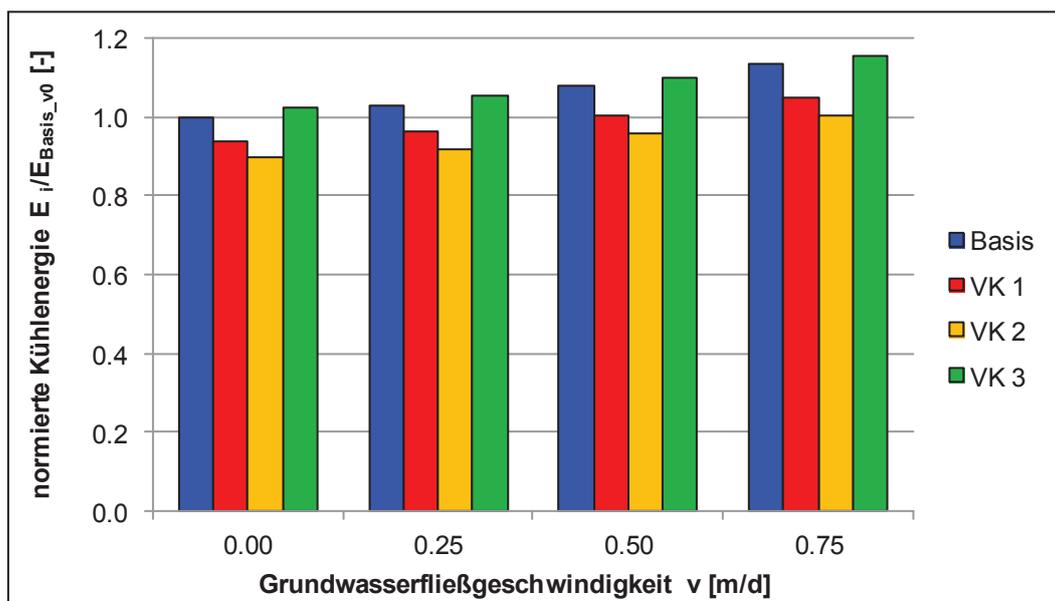
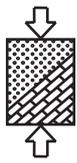


Abbildung 8.9 Normierte Kühlenergie der Erhaltungsphase für die verschiedenen Optimierungsvarianten

Es wird deutlich, dass die Kühlleistung nicht, wie zunächst erwartet, durch eine Erhöhung der Anzahl der Gefrierrohre steigt, sondern dass diese sich um bis zu 10 % für das System VK 2



verringern kann. Durch eine erhöhte Gefrierrohranzahl muss das einzelne Gefrierrohr weniger Kühlleistung bereitstellen, so dass sich in der Summe eine Verringerung der Kühlleistung ergibt. Wird die Anzahl der Gefrierrohre aber zu hoch, bzw. ist deren Abstand, wie bei dem System VK 3 deutlich größer, so steigt die Kühlleistung an, da die Gefrierrohre sich untereinander nicht mehr im gleichen Maße unterstützen können.

Aus wirtschaftlichen Gründen wurde weiterhin untersucht, wie sich die Kühlleistung verändert, wenn die zusätzlichen Gefrierrohre zur Vorkühlung nach der Aufgefrierphase deaktiviert werden. In diesem Fall müssen die ursprünglichen Gefrierrohre des Basissystems die Frostkörpererhaltung alleine gewährleisten. Der Unterschied zwischen dem Basissystem und den Systemen, die in der Aufgefrierphase vorgekühlt wurden, liegt für die Erhaltungsphase somit lediglich in der anderen Temperaturverteilung zu deren Beginn. Die Simulationsergebnisse sind in Kombination mit den Systemen, bei denen die Vorkühlung über den ganzen Zeitraum aktiv blieb, in Abbildung 8.10 dargestellt.

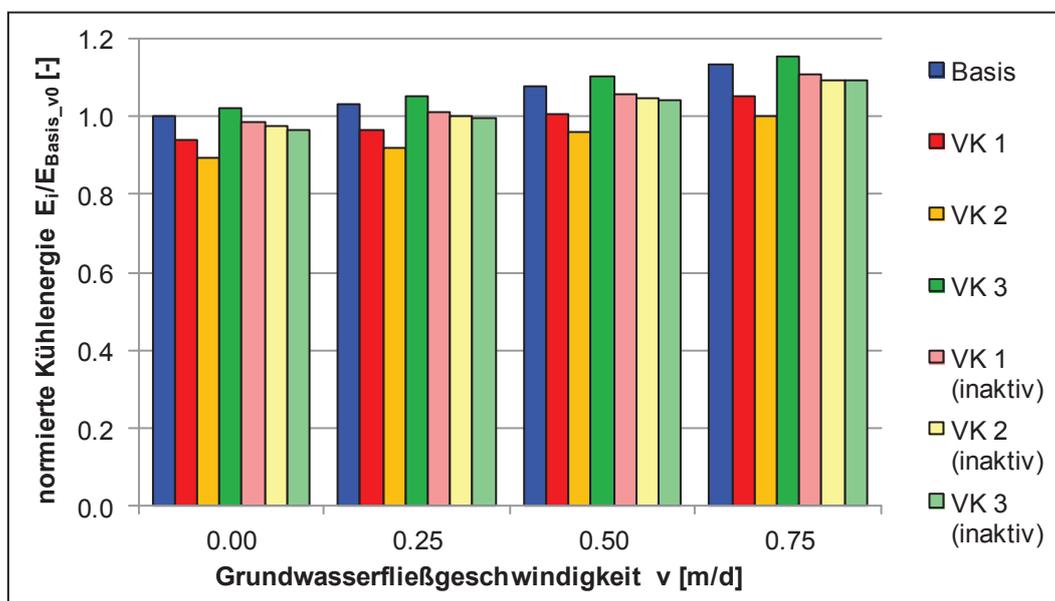


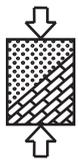
Abbildung 8.10 Normierte Kühlenergie der Erhaltungsphase für die verschiedenen Optimierungsvarianten inklusive Deaktivierung der Vorkühlungsrohre

Die Ergebnisse zeigen, dass die beiden Systeme mit einem oder zwei Gefrierrohren zur Vorkühlung weniger Kühlenergie benötigen, wenn die Rohre zur Vorkühlung aktiv bleiben und nicht deaktiviert werden. Für das System mit einer Vorkühlung durch drei Gefrierrohre ist dies umgekehrt, erst durch eine Deaktivierung der zusätzlichen Rohre in der Erhaltungsphase kann Kühlenergie auch im Vergleich zum Ausgangssystem eingespart werden.

Trotz der geringeren Einsparungen der Kühlenergie wurden für einen ersten Vergleich der optimierten Schaltungsvarianten in der Erhaltungsphase die Systeme mit einer Deaktivierung der Gefrierrohre zu Vorkühlung herangezogen.

8.3.2 Betrieb mit erhöhter Vorlaufemperatur

Eine Möglichkeit der Steuerung der Gefrierrohre in der Erhaltungsphase ist der Betrieb mit einer erhöhten Vorlaufemperatur, der im Resultat einer verringerten Kühlleistung entspricht. Durch eine Erhöhung der Vorlaufemperatur wird folglich das Frostkörperwachstum reduziert.



In den numerischen Simulationen wurde die Temperaturrandbedingung der Gefrierrohre zeitabhängig um eine bestimmte Temperaturdifferenz erhöht. Da das Hauptziel der Erhaltungsphase die Erhaltung des Frostkörpers in seiner statisch erforderlichen Dicke ist, wird die Vorlauftemperatur erst erhöht, wenn alle Sensorpunkte eine Temperatur von -3°C unterschritten haben. Um die maßgebende Temperaturerhöhung zu bestimmen, wurden mehrere Temperaturdifferenzen untersucht, die in einem Intervall von jeweils $2,5\text{ K}$ erhöht wurden. Wie im vorherigen Kapitel erläutert, werden für die Optimierungsvarianten die Gefrierrohre der Vorkühlung in der Erhaltungsphase aus Gründen der Wirtschaftlichkeit deaktiviert, so dass die neun Gefrierrohre des Basissystems den Frostkörper erhalten müssen.

Zunächst werden das Vorgehen bei der Auswertung und das Ergebnis der Simulationen des Basissystems in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit vorgestellt. Der Temperaturverlauf der Monitoring Points der äußeren Gefrierrohre, also am Rand des Frostkörpers, auf der strömungszugewandten Seite ist in Abhängigkeit der erhöhten Vorlauftemperatur und einer Fließgeschwindigkeit von $v = 0,5\text{ m/d}$ in Abbildung 8.11 dargestellt.

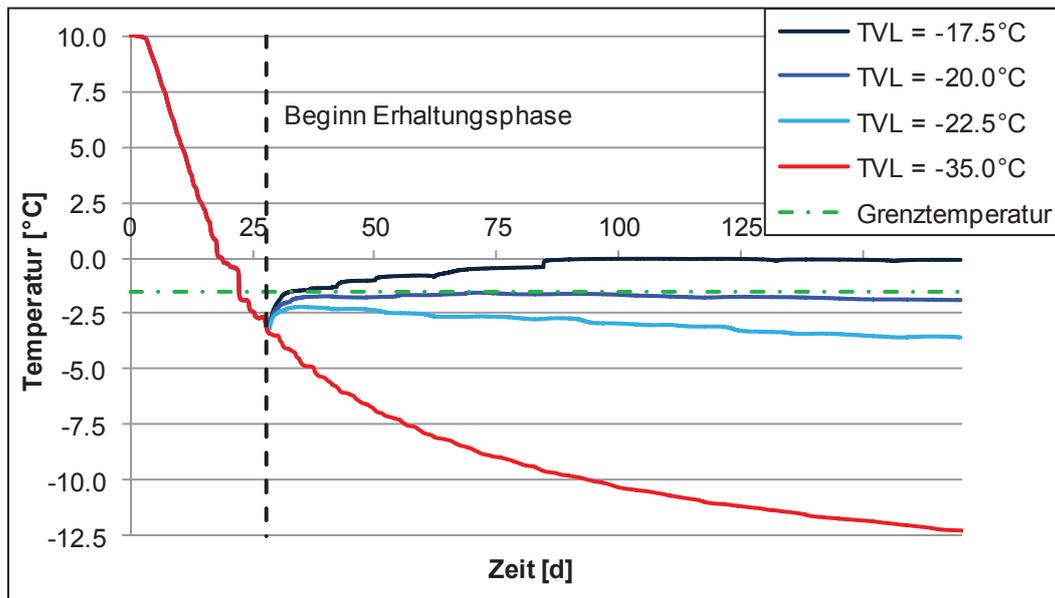
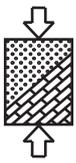


Abbildung 8.11 Temperaturverlauf des Sensorpunkts 1 (LUV) des Basissystems für unterschiedliche Vorlauftemperaturen in der Erhaltungsphase ($v = 0,5\text{ m/d}$)

Nachdem alle Sensorpunkte eine Temperatur von $T = -3^{\circ}\text{C}$ erreicht haben, wird die Vorlauftemperatur je nach Variante erhöht und die Temperatur steigt zunächst in allen Fällen an. Es wird deutlich, dass die Erhöhung auf eine Vorlauftemperatur von $T_{\text{VL}} = -17,5^{\circ}\text{C}$ den Frostkörper nicht erhalten kann, sondern dass dieser auftaut. Bei einer Vorlauftemperatur von $T_{\text{VL}} = -22,5^{\circ}\text{C}$ hingegen wird dem Boden weiterhin mehr Wärme entzogen, wodurch eine Verringerung der Temperatur und ein weiteres Frostkörperwachstum stattfindet. Somit ist in diesem Fall die Erhöhung der Vorlauftemperatur auf $T_{\text{VL}} = -20,0^{\circ}\text{C}$ die optimale Variante, bei der der Frostkörper die Grenztemperatur nicht überschreitet, aber auch nicht ungewollt weiter anwächst. Auf diese Weise wurde für alle Fließgeschwindigkeiten und ebenso für alle Optimierungsvarianten der Gefrierrohranordnung eine optimale Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase ermittelt. Da in der Erhaltungsphase alle Systeme nur noch mit den neun Gefrierrohren des Basissystems betrieben werden, fallen die Ergebnisse gleich aus, so dass



sich lediglich eine Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit ergibt. Die optimalen Vorlauftemperaturen in der Erhaltungsphase für einen Betrieb mit neun Gefrierrohren sind in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit in Tabelle 8.1 zusammengefasst.

Tabelle 8.1 Optimale Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit

Grundwasser-fließgeschwindigkeit	Optimale Vorlauftemperatur
$v = 0,00 \text{ m/d}$	$-10,0^\circ\text{C}$
$v = 0,25 \text{ m/d}$	$-15,0^\circ\text{C}$
$v = 0,50 \text{ m/d}$	$-20,0^\circ\text{C}$
$v = 0,75 \text{ m/d}$	$-25,0^\circ\text{C}$

Der zeitliche Verlauf der Kühlleistung des Basissystems für einen Betrieb ohne Anpassung und einen Betrieb mit einer erhöhten Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase ist in Abbildung 8.12 exemplarisch für den Fall ohne Grundwasserströmung und mit einer Strömung von $v = 0,75 \text{ m/d}$ dargestellt. Es wird deutlich, dass im Fall ohne Grundwasserströmung deutlich mehr Kühlleistung eingespart werden kann als bei einer höheren Fließgeschwindigkeit. Der Grund hierfür liegt in der niedrigeren Vorlauftemperatur, die sich durch den zusätzlichen Wärmestrom aufgrund des vorbeiströmenden Grundwassers ergibt.

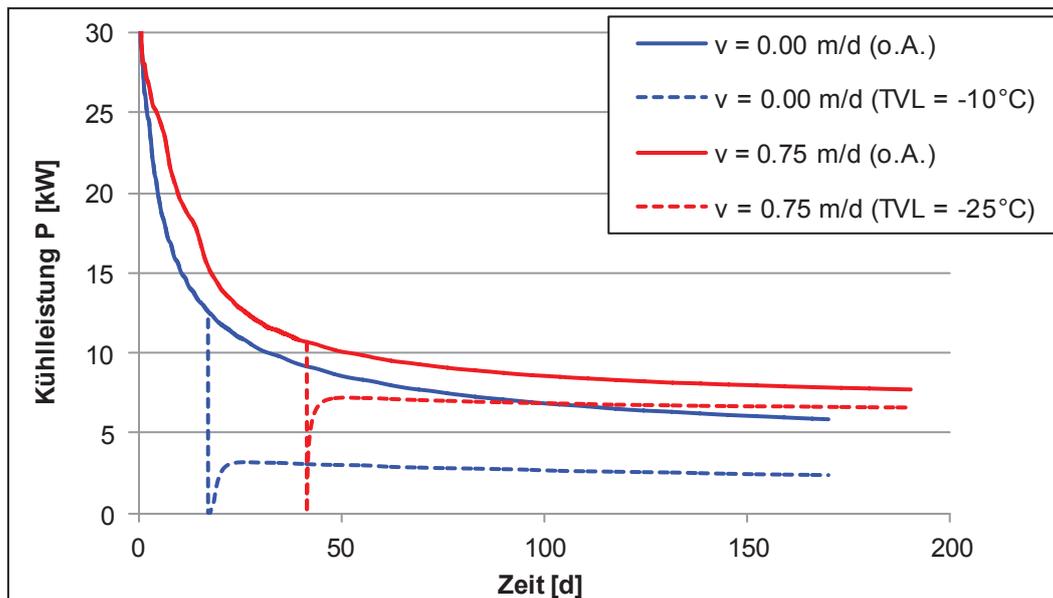


Abbildung 8.12 Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Kühlleistung für einen Betrieb ohne Anpassung und mit einer erhöhten Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase

Um die möglichen Einsparungen der Variante „Erhöhung der Vorlauftemperatur“ im Vergleich zum Ausgangssystem ohne Anpassung in der Erhaltungsphase bewerten zu können, werden die Kühlleistungen nun normiert auf den äquivalenten Strömungszustand des Ausgangssystems bezogen. Abbildung 8.13 zeigt diese normierte Kühlleistung in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit für die in Tabelle 8.1 zusammengefassten optimalen Vorlauftemperaturen in der Erhaltungsphase für das Basissystem.

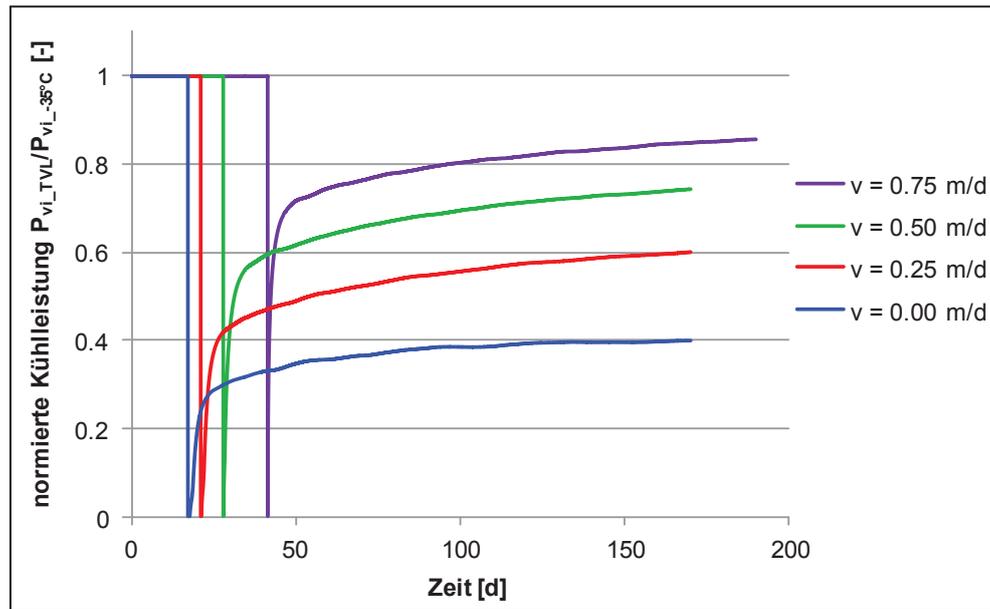
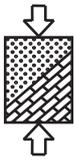


Abbildung 8.13 Normierte Kühlleistung für eine Erhöhung der Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase für das Basissystem

Es wird deutlich, dass durch die Erhöhung der Vorlauftemperatur im Fall des Basissystems Einsparungen im Bereich von 15% bis 60% in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit erzielt werden können. Der konstante Anstieg der normierten Kühlleistung weist trotzdem auf ein fortschreitendes Frostkörperwachstum hin, das jedoch deutlich reduziert ist.

Eine Erhöhung der Vorlauftemperatur wurde ebenfalls für die Optimierungsvarianten mit einer Vorkühlung durch ein bis drei zusätzliche Gefrierrohre untersucht. Dabei wurden die zusätzlichen Gefrierrohre zur Vorkühlung deaktiviert und somit ändert sich lediglich der Ausgangszustand der Temperaturverteilung nach der Aufgefrierphase. Die Ergebnisse der Kühlenergie der numerischen Simulationen sind in Abbildung 8.14 bezogen auf die Kühlenergie des jeweiligen Systems ohne Anpassung in der Erhaltungsphase dargestellt.

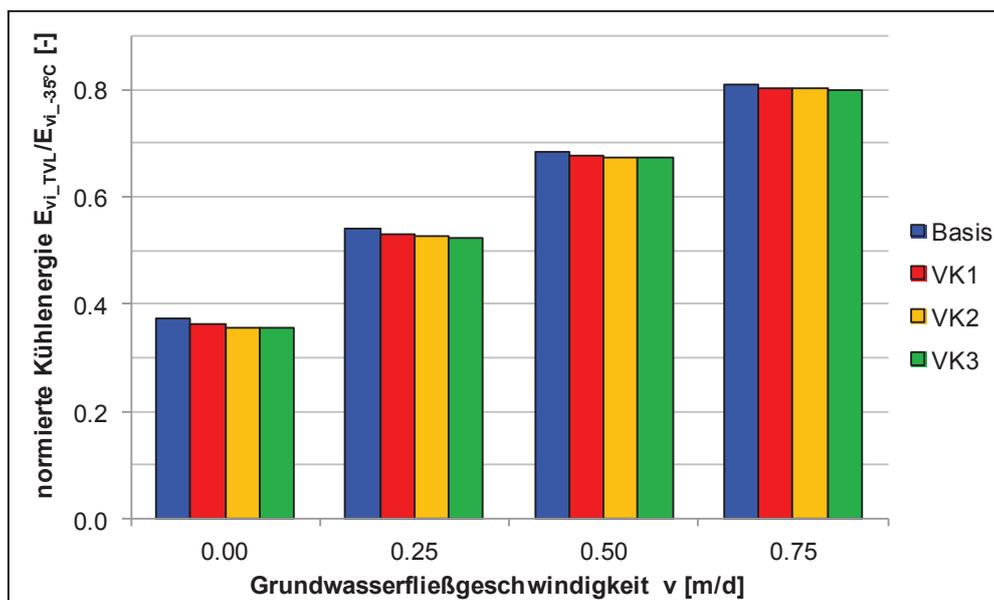
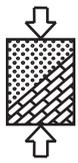


Abbildung 8.14 Normierte Kühlenergie der Optimierungsvarianten in der Erhaltungsphase für eine erhöhte Vorlauftemperatur bezogen auf einen unangepassten Betrieb



Es wird deutlich, dass durch die verschiedenen Optimierungsvarianten keine nennenswerten weiteren Einsparungen möglich sind. Die Einsparungen liegen maximal im Bereich von 2% und sind somit vernachlässigbar.

Allgemein bleibt zusammenfassend festzuhalten, dass durch eine Erhöhung der Vorlauftemperatur der Gefrierrohre in der Erhaltungsphase deutliche Einsparungen der Kühlenergie von 15% bis 60% in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit realisiert werden können. Aufgrund des zusätzlichen, eingetragenen Wärmestroms bei vorliegenden Grundwasserströmungen wird das Einsparungspotential geringer, je größer die Fließgeschwindigkeit ist.

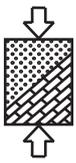
8.3.3 Intermittierender Betrieb

Der intermittierende Betrieb stellt eine Betriebsvariante in der Erhaltungsphase dar, die in der Praxis oftmals zur Anwendung kommt, und mit der die Ziele der Frostkörpererhaltung und Minimierung der Frosthebungen und der Beschränkung des weiteren Wachstums des Frostkörpers bestmöglich erreicht werden können.

Durch die in Kapitel 5.2 beschriebene Anpassung des „freezing“-Moduls ist es mit dem vorliegenden Programmsystem möglich, einen temperaturgesteuerten intermittierenden Betrieb zu simulieren. In der Simulation sind mehrere Parameter variabel einstellbar. Dazu zählen zum einen die maximale und minimale Grenztemperatur und zum anderen die Anzahl der Rohrgruppen und die jeweilige Zuordnung der Sensorpunkte. Da in der Erhaltungsphase sowohl das Basissystem als auch die Optimierungsvarianten mit einer Vorkühlung in der Aufgefrierphase lediglich durch die neun Gefrierrohre des Basissystems erhalten werden müssen, wurde am Basissystem zunächst eine Variation der Grenztemperatur und der Rohrgruppen durchgeführt. Somit konnte die maßgebende Grenztemperatur und Rohrgruppe bestimmt werden, die am wenigsten Kühlenergie benötigen. Die maßgebende Kombination wurde dann auf die Optimierungsvarianten übertragen und untersucht.

Variation der Grenztemperatur

Während die maximale Grenztemperatur den Erhalt des statisch erforderlichen Frostkörpers sichert, begrenzt die minimale Grenztemperatur das Frostkörperwachstum. Bei der Untersuchung der Grenztemperatur wurde lediglich die minimale Grenztemperatur variiert, bei deren Erreichen die Gefrierrohre deaktiviert werden. Die maximale Grenztemperatur wurde nicht variiert, da diese durch die zu erhaltende Frostkörperkubatur gegeben ist. Als maximale Grenztemperatur wurde in den Simulationen jedoch nicht eine Temperatur von $T = -1^{\circ}\text{C}$ gewählt, wie bei der Definition des Erreichens des erforderlichen Frostkörpers. Der Grund hierfür ist die mögliche Reaktionszeit des Systems beim Einschalten. Um bei einer leichten Verzögerung eine Erhöhung der Temperatur im statisch erforderlichen Frostkörper zu verhindern, wurde die maximale Grenztemperatur zu $T = -1,5^{\circ}\text{C}$ gewählt. Aufgrund dieses geringen Puffers wird die Temperatur der Randbereiche des Frostkörpers nie unter $T = -1^{\circ}\text{C}$ fallen. Die minimale Grenztemperatur wurde in einem Bereich von -3°C und -6°C variiert. Vereinfachend wurde diese Variation lediglich für eine Rohrgruppe durchgeführt, der alle Gefrierrohre und Sensorpunkte zugeordnet waren (s. Abbildung 8.15). Somit werden alle Gefrierrohre automatisch wieder aktiviert, wenn nur ein Sensorpunkt eine Temperatur von $T = -1,5^{\circ}\text{C}$ anzeigt.



- 1. Rohrgruppe
- ⊙ Gefrierrohr
- ⊙ Sensorpunkt

Abbildung 8.15 Zuordnung der Gefrierrohre und Sensorpunkte zu einer Rohrgruppe

Eine niedrigere Grenztemperatur verlängert die Betriebsphasen des Kälteaggregats und somit ebenfalls die Haltephasen (s. Abbildung 8.16). Außerdem führt das Herabsetzen der minimalen Grenztemperatur zu einem verzögerten Beginn der Erhaltungsphase.

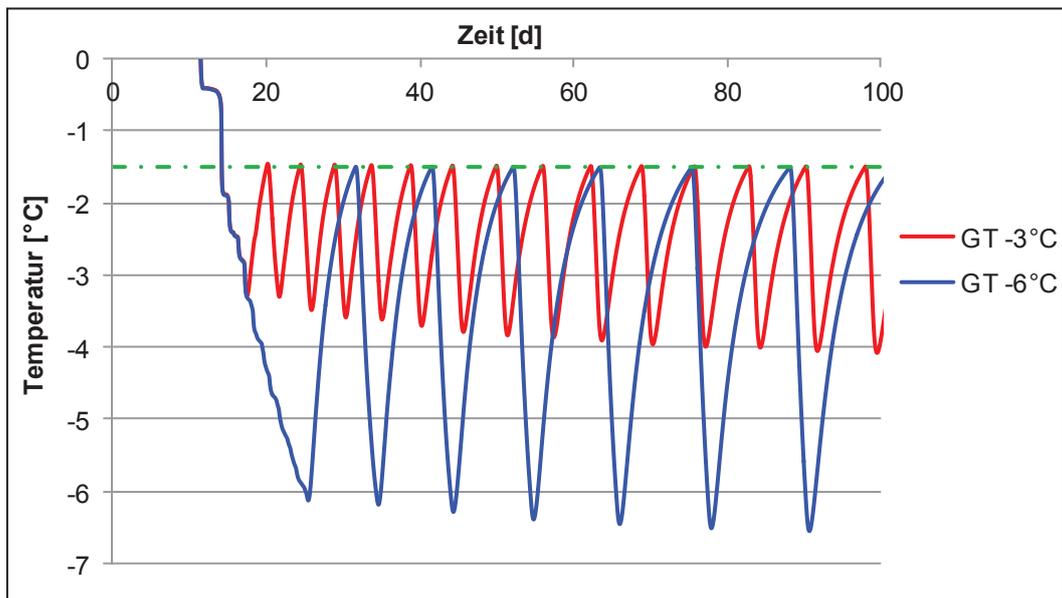
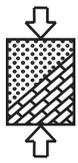


Abbildung 8.16 Temperaturverlauf des Sensorpunkts 1 im intermittierenden Betrieb für unterschiedliche minimale Grenztemperaturen und $v = 0$ m/d

Weiterhin wird deutlich, dass die Aktivierung der Gefrierrohre bei Erreichen der maximalen Grenztemperatur direkt erfolgt, so dass diese Grenztemperatur am Rand des Frostkörpers eingehalten wird. Bei Erreichen der minimalen Grenztemperatur erfolgt ebenfalls direkt die Deaktivierung der Gefrierrohre. Trotzdem fällt die Temperatur des Monitoring Points unter die minimale Grenztemperatur. Der Grund für diese weitere Abnahme der Temperatur liegt in dem schützenden Frostkörper, der den Sensorpunkt umgibt. Nach der Deaktivierung der Gefrierrohre wird der Boden im Bereich des Sensorpunkts zunächst von der niedrigen Umgebungstemperatur des Frostkörpers beeinflusst, bevor der Frostkörper langsam auftaut



und somit die Temperatur des Sensorpunkts ebenfalls steigt. Mit einer zunehmenden Fließgeschwindigkeit des Grundwassers verringert sich der Einfluss dieses Nachkühleffekts, da der Frostkörper durch den konvektiven Wärmeeintrag des Grundwassers schneller auftauft.

Die Verlängerung der Betriebs- und Haltephasen durch eine Abminderung der minimalen Grenztemperatur führt zu einer Erhöhung der erforderlichen Kühlenergie in der Erhaltungsphase. Auf die möglichen Einsparungen der Kühlenergie übertragen, bedeutet dies, dass durch eine geringere minimale Grenztemperatur weniger Einsparungen möglich sind als mit einer höheren minimalen Grenztemperatur. Die Ergebnisse der numerischen Simulationen in Abbildung 8.17 zeigen genau diesen Zusammenhang. Insgesamt liegen die realisierbaren Einsparungen mit 12% bis 60% im Bereich der Einsparungen, die auch mit einer verringerten Vorlauftemperatur erreicht werden können.

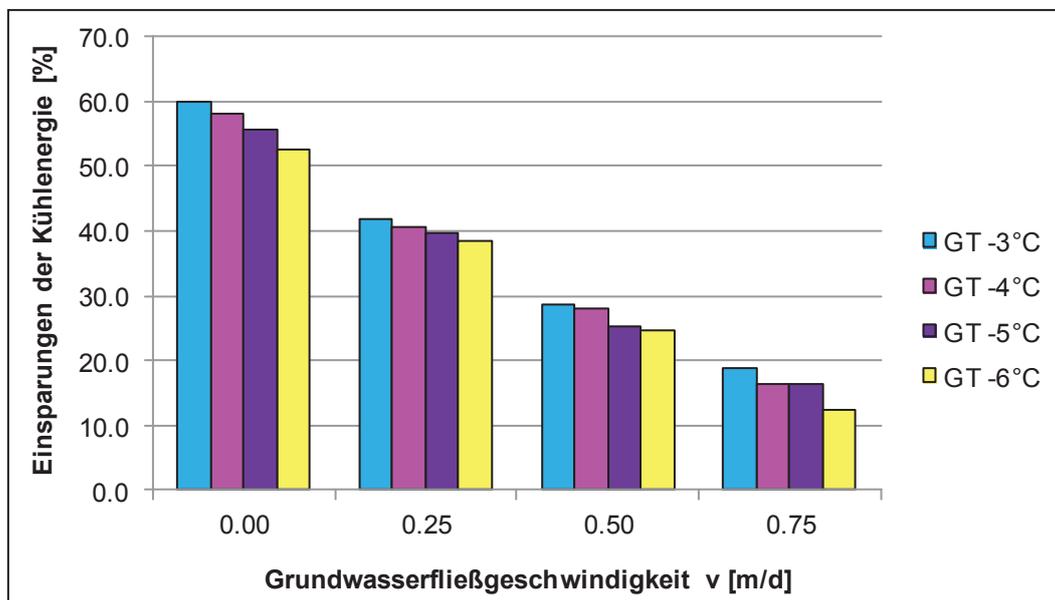
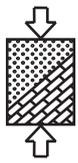


Abbildung 8.17 Einsparungen der Kühlenergie in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit und der minimalen Grenztemperatur im Vergleich zum Ausgangssystem

Wichtig ist aber, die minimale Grenztemperatur nicht allein zu betrachten. Insgesamt muss die Temperaturdifferenz zwischen minimaler und maximaler Grenztemperatur betrachtet werden. Ist diese Temperaturdifferenz gering, so ist auch die erforderliche Kühlenergie geringer und die Einsparungen sind dementsprechend größer. Für das vorliegende Beispiel einer maximalen Grenztemperatur von $T_{\max} = -1,5^{\circ}\text{C}$ wird für alle weiteren Berechnungen eine minimale Grenztemperatur von $T_{\min} = -3,0^{\circ}\text{C}$ angesetzt.

Variation der Rohrgruppen

Da das Hauptziel des intermittierenden Betriebs die Verringerung der erforderlichen Kühlleistung ist, sollte die erforderliche Kühlleistung des einzelnen Gefrierrohrs bei der Zuordnung der Gefrierrohre zu den verschiedenen Rohrgruppen berücksichtigt werden. Numerische Simulationen haben gezeigt, dass die Kühlleistung der einzelnen Gefrierrohre in der Erhaltungsphase zum Rand hin zunimmt. Das äußere Gefrierrohr benötigt die größte Kühlleistung, da die Kontaktfläche zum umgebenden und zu gefrierenden Boden größer ist und es beim Vorliegen einer Grundwasserströmung zusätzlich direkt durch den konvektiven



Wärmeeintrag beeinflusst wird. Die Gefrierrohre in der Mitte des Frostkörpers hingegen schützen sich nicht nur untereinander, sondern liegen bei einer Grundwasserströmung in der Erhaltungsphase aufgrund der Ablenkung des Grundwassers auch noch im Strömungsschatten und werden daher nur unwesentlich beeinflusst (s. Schüller et al. 2013).

Aus diesem Grund erscheint die Zuordnung aller Gefrierrohre zu einer Rohrgruppe energetisch betrachtet als nicht sinnvoll. Daher wurden unterschiedliche Zuordnungen der Gefrierrohre und der Sensorpunkte zu Rohrgruppen untersucht, die dann temperaturabhängig zu verschiedenen Zeitpunkten aktiviert werden. Eine Übersicht der untersuchten Varianten zeigt Abbildung 8.18. Insgesamt wurden drei Systeme mit jeweils zwei Rohrgruppen untersucht, bei denen immer eine unterschiedliche Anzahl von Gefrierrohren der äußeren Rohrgruppe zugeordnet wurde (b bis d). Weiterhin wurde ein System mit drei Rohrgruppen simuliert (e). Aufgrund des symmetrischen Systems der Baugrubenwand sind alle Rohrgruppen ebenfalls symmetrisch verknüpft.

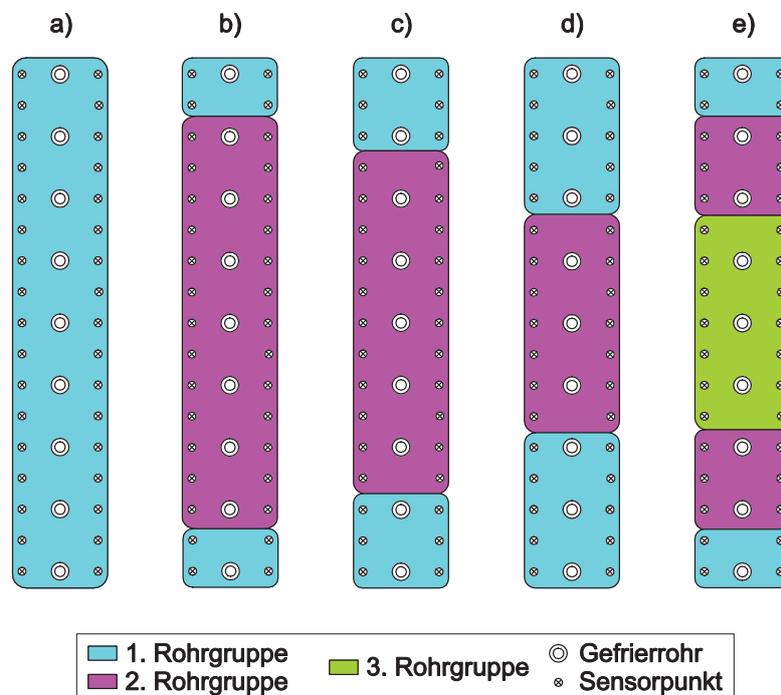


Abbildung 8.18 Zuordnung der Gefrierrohre und Sensorpunkte zu Rohrgruppen

Die möglichen Einsparungen der Kühlenergie bezogen auf das Basissystem ohne angepassten Betrieb sind in Abbildung 8.19 in Abhängigkeit der untersuchten Varianten der unterschiedlichen Rohrgruppen und der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers dargestellt.

Es wird deutlich, dass die Zuordnung aller Gefrierrohre zu einer Rohrgruppe die geringsten Einsparungen ermöglicht. Die verschiedenen Varianten mit zwei Rohrgruppen zeigen ebenfalls deutliche Unterschiede im Einsparpotential der Kühlenergie. Dabei zeigt sich, dass die Zuordnung des äußeren Gefrierrohrs zu einer separaten Rohrgruppe effektiv ist, da dieses Gefrierrohr die größte Kühlleistung aufbringen muss. Aus diesem Grund wurde eine detailliertere Zuordnung der Gefrierrohre im mittleren Bereich untersucht (Variante e) mit 3 Rohrgruppen). Durch diese Zuordnung können die Energieeinsparungen nochmal erhöht werden. Letztlich kann die Kühlenergie in der Erhaltungsphase im Vergleich zum Ausgangssystem somit um bis zu 68% für stationäre Grundwasserverhältnisse verringert werden.

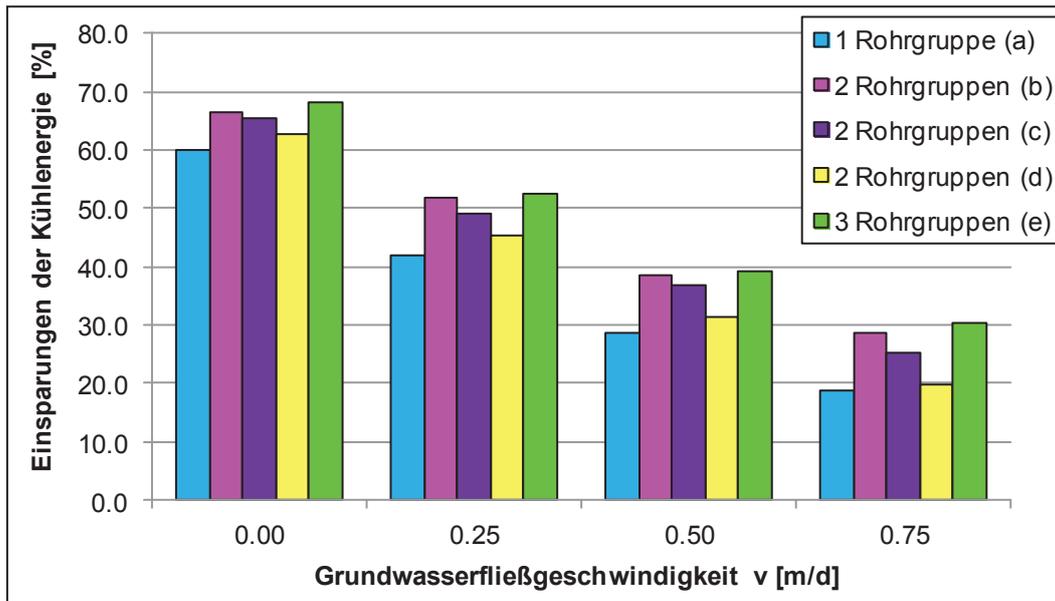
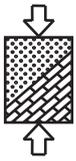


Abbildung 8.19 Einsparungen der Kühlenergie in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit und der Rohrgruppenzuordnung im Vergleich zum Ausgangssystem

Im Vergleich zu dem Betrieb mit einer verringerten Vorlauftemperatur sind die Einsparungen für einen intermittierenden Betrieb, wenn dieser durch die Wahl der Grenztemperatur und der Rohrgruppenzuordnung optimiert wird, mit einem Bereich von 30% bis 68% nochmal größer.

Übertragung der Ergebnisse auf die Optimierungsvarianten

Die maßgebende Variante des intermittierenden Betriebs mit einer minimalen Grenztemperatur von $T_{\min} = -3^{\circ}\text{C}$ und einer Zuordnung der Gefrierrohre zu drei Rohrgruppen wurde den numerischen Simulationen der drei Optimierungsvarianten zugrunde gelegt. Die Ergebnisse in Abbildung 8.20 zeigen, dass die Kühlenergie der Optimierungsvarianten im Vergleich zum Basissystem nochmal minimiert wird.

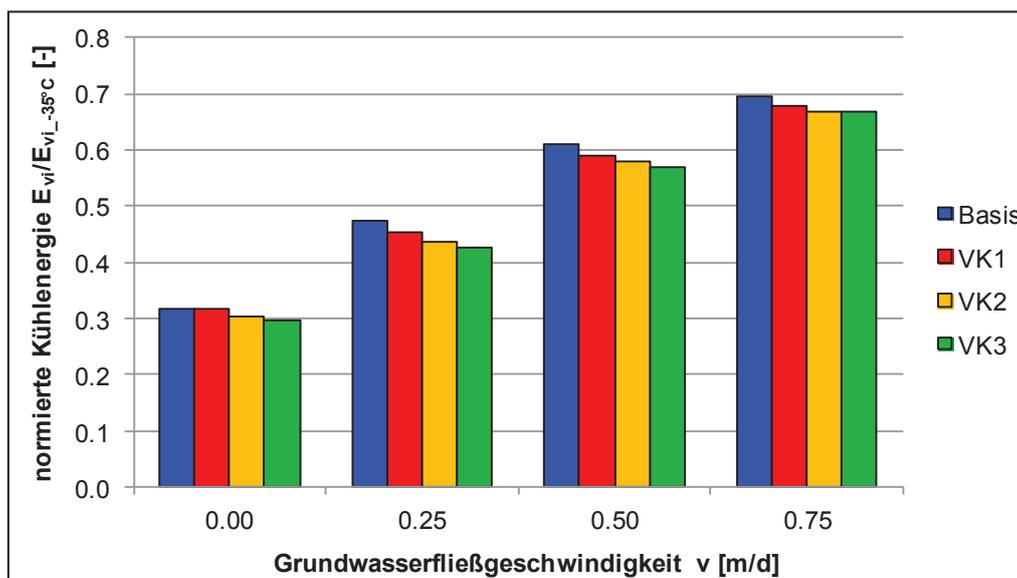
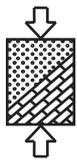


Abbildung 8.20 Normierte Kühlenergie der Optimierungsvarianten in der Erhaltungsphase für den intermittierenden Betrieb bezogen auf einen unangepassten Betrieb



Auch bei diesen Untersuchungen wurden lediglich die neun Gefrierrohre des Basissystems zur Erhaltung des Frostkörpers angesetzt, so dass unterschiedliche Frostkörpergrößen als Ausgangspunkt für die Optimierung in der Erhaltungsphase vorliegen. Die weiteren Einsparungen durch die Optimierungsvarianten liegen hier zwar nur noch im Bereich von bis zu maximal 5%, sind damit aber doppelt so hoch wie die weiteren Einsparungen bei einer Erhöhung der Vorlauftemperatur.

Insgesamt zeigt das System mit der Vorkühlung durch drei zusätzliche Gefrierrohre das größte Einsparpotential. Dies darf aber nicht losgelöst von der Kühlenergie in der Aufgefrierphase betrachtet werden, bei der die Vorkühlung mit drei Gefrierrohren erst für Fließgeschwindigkeiten ab $v = 0,75$ m/d Einsparungen erzielen konnte.

8.3.4 Bewertung der Ergebnisse

Die Erhaltungsphase stellt den längsten Abschnitt einer Vereisungsmaßnahme dar und ist maßgeblich für den Gesamtenergieverbrauch verantwortlich. Die Bedeutung der Erhaltungsphase kann mit einem Vergleich der erforderlichen Kühlenergie für Aufgefrier- und Erhaltungsphase dieser Simulationen herausgestellt werden (s. Tabelle 8.2).

Tabelle 8.2 Vergleich der Kühlenergie von Aufgefrier- und Erhaltungsphase für das Basissystem in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit

Grundwasser- fließgeschwindigkeit	Aufgefrierphase A		Erhaltungsphase E		A/E	
	Zeit [d]	Energie [kWh]	Zeit [d]	Energie [kWh]	Zeit [%]	Energie [%]
$v = 0,00$ m/d	14,3	2966	150	12676	9,5	23,4
$v = 0,25$ m/d	17,3	3341		13061	11,5	25,6
$v = 0,50$ m/d	22,5	4208		13677	15,0	30,8
$v = 0,75$ m/d	32,3	6102		14401	21,5	42,4

Für die hier simulierte Erhaltungsphase von 5 Monaten ist der Energieverbrauch in der Erhaltungsphase mehr als 4 mal so groß wie der in der Aufgefrierphase. Dieses Verhältnis der beiden Phasen wird mit steigender Fließgeschwindigkeit zwar kleiner, liegt dann in dem untersuchten Fall aber immer noch bei mehr als dem Doppelten. Der Grund hierfür liegt vor allem in der verlängerten Aufgefrierdauer durch den starken konvektiven Wärmeeintrag des Grundwassers. Auf Basis dieser Vergleichsdaten ist eine energetische Optimierung der Erhaltungsphase durch unterschiedliche Betriebsvarianten sinnvoll. Die verschiedenen untersuchten Varianten haben alle große realisierbare Einsparpotentiale aufgezeigt.

Eine zusammenfassende Übersicht der maßgebenden Betriebsvarianten für das Basissystem ist in Abbildung 8.21 dargestellt. Mit geeigneten Betriebsvarianten lässt sich der Energieverbrauch bei stationären Grundwasserverhältnissen um bis zu 68% reduzieren. Durch den konvektiven Wärmeeintrag bei steigender Fließgeschwindigkeit sinken die Einsparpotentiale, betragen bei $v = 0,75$ m/d aber immer noch bis zu 30%.

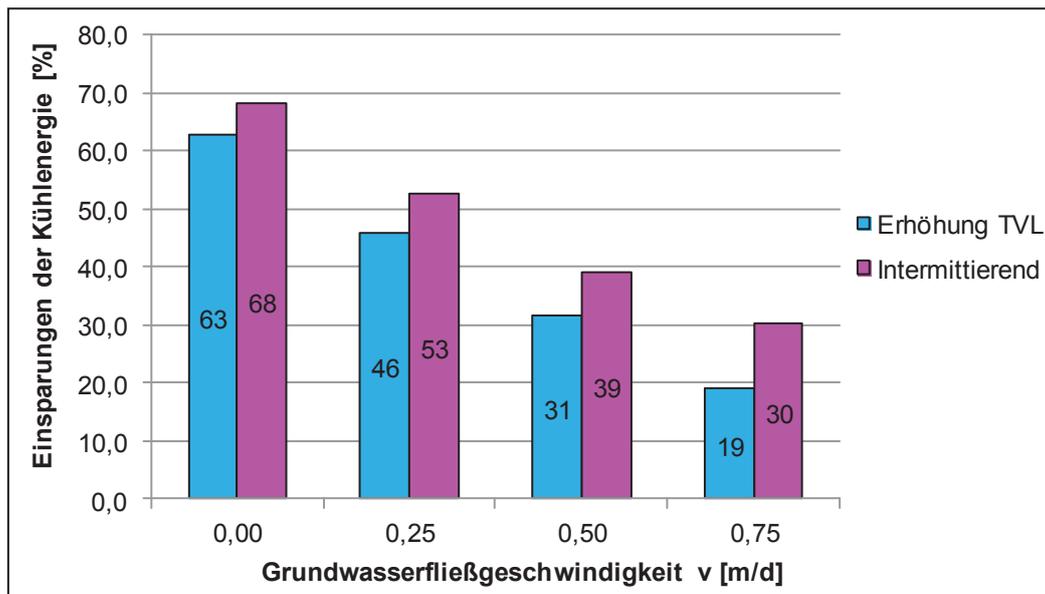
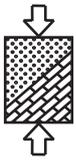
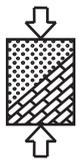


Abbildung 8.21 Energieeinsparungen verschiedener Betriebsvarianten in der Erhaltungsphase für das Basissystem in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit

Der Vergleich der beiden Betriebsvarianten „Erhöhung der Vorlauftemperatur“ und „Intermittierender Betrieb“ zeigt, dass mit beiden Varianten deutliche Einsparungen der Kühlenergie erreicht werden können, wobei der intermittierende Betrieb effektiver ist. Der Vorteil des intermittierenden Betriebs liegt in der gezielten Steuerung einzelner Rohrgruppen, die den Schwachstellen des Systems angepasst werden können. Bereits für das betrachtete System einer Baugrubenwand mit einer geringen Abmessung von 6,4 m konnten durch die Wahl mehrerer Rohrgruppen die Einsparungen erhöht werden. In der Praxis, in der mit inhomogenen Böden und einer asymmetrischen Frostkörperentwicklung sowie mit lokal erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten zu rechnen ist, können die Einsparpotentiale durch eine gezielte Zuordnung der Rohrgruppen weiter optimiert werden. Ein zusätzlicher Vorteil des intermittierenden Betriebs ist die Kontrolle des Frostkörperwachstums, die mit dieser Variante besser gesteuert werden kann, als mit der Erhöhung der Vorlauftemperatur, bei der das Wachstum nicht gänzlich verhindert werden kann. Die Auswirkungen der verschiedenen Betriebsvarianten auf die abdichtende bzw. statisch tragende Funktion des Frostkörpers wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht und sind im Fall einer praktischen Anwendung unbedingt zusätzlich zu betrachten. Für eine umfassende Beurteilung der Energieeinsparungen müsste die Betrachtung auf den gesamten Kälteträger- sowie Kältemittelkreislauf erweitert werden, um mögliche weitere Energieeinsparungen durch eine höhere Vorlauftemperatur quantifizieren zu können.

8.4 Vereinfachte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Abschließend sollen die unterschiedlichen Optimierungsvarianten der Gefrierrohranordnung in der Aufgefrierphase und die Betriebsvarianten in der Erhaltungsphase hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet werden. Dazu wird eine vereinfachte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt, deren Ziel keine exakte Preisermittlung ist, sondern vielmehr eine Ermittlung von Größenordnungen, um diese vergleichen zu können.



Zur Ermittlung der Gesamtkosten werden als variable Eingangsgrößen die Anzahl der Gefrierrohre und die erforderliche Aufgefrierdauer angesetzt. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass eine Veränderung der Gefrierrohrposition im Vergleich zum Ausgangssystem keine zusätzlichen Kosten verursacht. Ein identisches Monitoring-System wird ebenfalls für alle Varianten vorausgesetzt und kann somit in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vernachlässigt werden.

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird zwischen Fixkosten und variablen Kosten unterschieden. Die Fixkosten, die durch die Anzahl der Gefrierrohre bestimmt werden, beinhalten die Bohr- und Einbaukosten für die Gefrierrohre, die Kosten für Installationsarbeiten für die Gefrierköpfe sowie das Rohrleitungssystem (s. Tabelle 8.3). Die variablen Kosten setzen sich aus den Personalkosten zur Frostkörperherstellung, den Vorhaltekosten für das Kälteaggregat und den Energiekosten der Kühlleistung zusammen (s. Tabelle 8.4). Die Kostenansätze wurden aus Baier (2009) übernommen. Die variablen Kosten für das Personal und das Gerät (Pos. 5a und 5b) wurden von Baier (2009) für eine Querschlagvereisung mit 2000 €/d angegeben. Aufgrund der hier betrachteten kleineren Vereisungsmaßnahme, die die Verwendung eines kleineren Kälteaggregats und ein einfacheres Handling ermöglicht, wurden die variablen Kosten vereinfachend zu 1200 €/d angenommen. In der Erhaltungsphase wurden lediglich 50% des Wertes der Aufgefrierphase angesetzt.

Tabelle 8.3 Fixkosten der Teilleistungen für einen vereinfachten Kostenvergleich

		Sole	
Pos. 1	Bohrarbeiten	280	[€/m]
Pos. 2	Liefern und Einbauen	190	[€/m]
Pos. 3	Installation & Deinstallation Gefrierköpfe	200	[€/Rohr]
Pos. 4	Installation & Deinstallation Rohrleitungssystem	1500	[€/Rohr]

Tabelle 8.4 Variable Kosten der Teilleistungen für einen vereinfachten Kostenvergleich

		Sole	
Pos. 5a	Personal & Gerät für Frostkörpererstellung	1200	[€/d]
Pos. 5b	Personal & Gerät für Frostkörpererhaltung	600	[€/d]
Pos. 6	Energiepreis	0,25	[€/kWh]

Als Gefrierrohrlänge wurde in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 15 m angesetzt. Da in den Werten der ermittelten Kühlenergie noch keine Verluste des Kälteaggregats und der Rohrleitungen berücksichtigt sind, wurden diese in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Anlehnung an Kapitel 2 vereinfachend zu 40% angenommen.

Abbildung 8.22 zeigt zunächst den Verlauf der variablen Kosten der Aufgefrierphase des Basissystems für verschiedene Fließgeschwindigkeiten. Da die Fixkosten des Basissystems aufgrund der identischen Anzahl der Gefrierrohre gleich sind, können diese in der Betrachtung der Kosten vernachlässigt werden. Es wird deutlich, dass die Verlängerung der Aufgefrierzeit und die gleichzeitige Erhöhung der erforderlichen Kühlenergie zu einer Steigerung der Kosten führen, die jedoch nicht das gleiche Ausmaß aufweist wie die Erhöhung der Aufgefrierzeit (s. Abbildung 8.2 bzw. Abbildung 8.3).

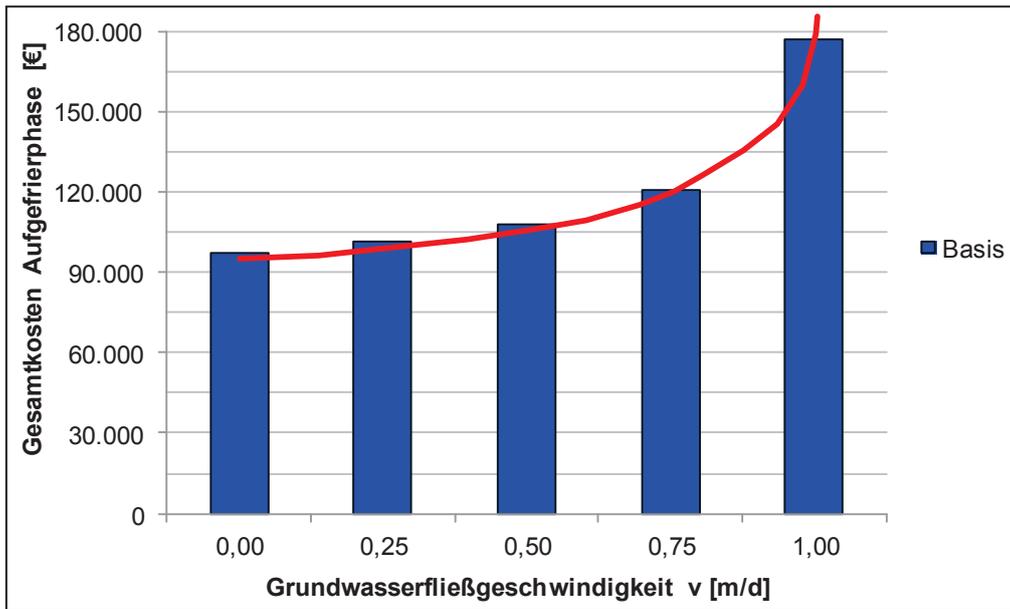


Abbildung 8.22 Entwicklung der variable Kosten während der Aufgefrierphase des Basissystems für verschiedene Fließgeschwindigkeiten

Da es sich bei dem Simulationsbeispiel um eine vergleichsweise kleine Vereisungsmaßnahme handelt und die zugrunde gelegten Kostenansätze von Baier (2009) für eine größere Maßnahme angesetzt wurden, soll Abbildung 8.23 den Einfluss einer Veränderung einzelner Kostenansätze für die Aufgefrierphase des Basissystems verdeutlichen.

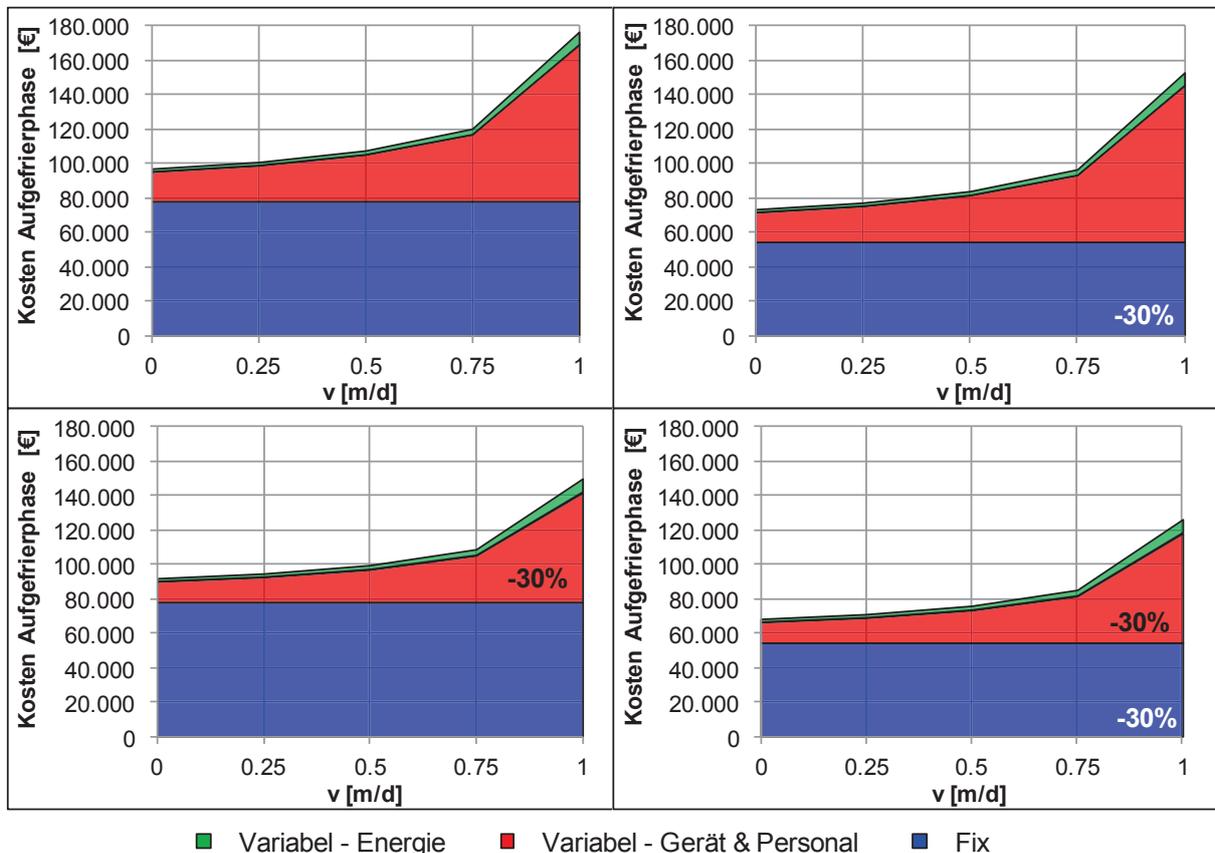
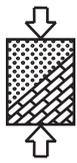


Abbildung 8.23 Zusammensetzung der Kosten während der Aufgefrierphase des Basissystems für verschiedene Fließgeschwindigkeiten und Kostenansätze



In Abbildung 8.23 ist zunächst (links oben) die Aufteilung zwischen Fixkosten und variablen Kosten, die noch in Energiekosten und Kosten für Gerät und Personal unterschieden werden, für die Kostenansätze nach Tabelle 8.3 und Tabelle 8.4 in Abhängigkeit der untersuchten Fließgeschwindigkeit dargestellt. Es wird deutlich, dass der Anteil der Fixkosten, vor allem für kleine Grundwasserfließgeschwindigkeiten, bei bis zu 80% liegen kann. Außerdem ist zu erkennen, dass der Anteil der Energiekosten an den variablen Kosten nur gering ist. Die weiteren Diagramme zeigen die Auswirkung einer Verringerung der Kostenansätze um einen fiktiven Anteil von 30% für die Fixkosten und die variablen Geräte- und Personalkosten. Durch eine Verringerung der Fixkosten erhöht sich der Anteil sowohl der variablen Kosten für Gerät und Personal als auch für Energie. Durch eine Verringerung der Fixkosten sowie der Kosten für Gerät und Personal steigt der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten. Diese Abhängigkeiten zeigen, dass die zugrunde gelegten Kostenansätze die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung maßgeblich beeinflussen.

In einem nächsten Schritt wurden die Kosten während der Aufgefrierphase für die verschiedenen Optimierungsvarianten ermittelt. Diese sind in Abbildung 8.24 dargestellt, wobei lediglich die Änderung der Fixkosten zwischen den einzelnen Optimierungsvarianten durch zusätzliche Gefrierrohre sowie die variablen Kosten berücksichtigt wurden.

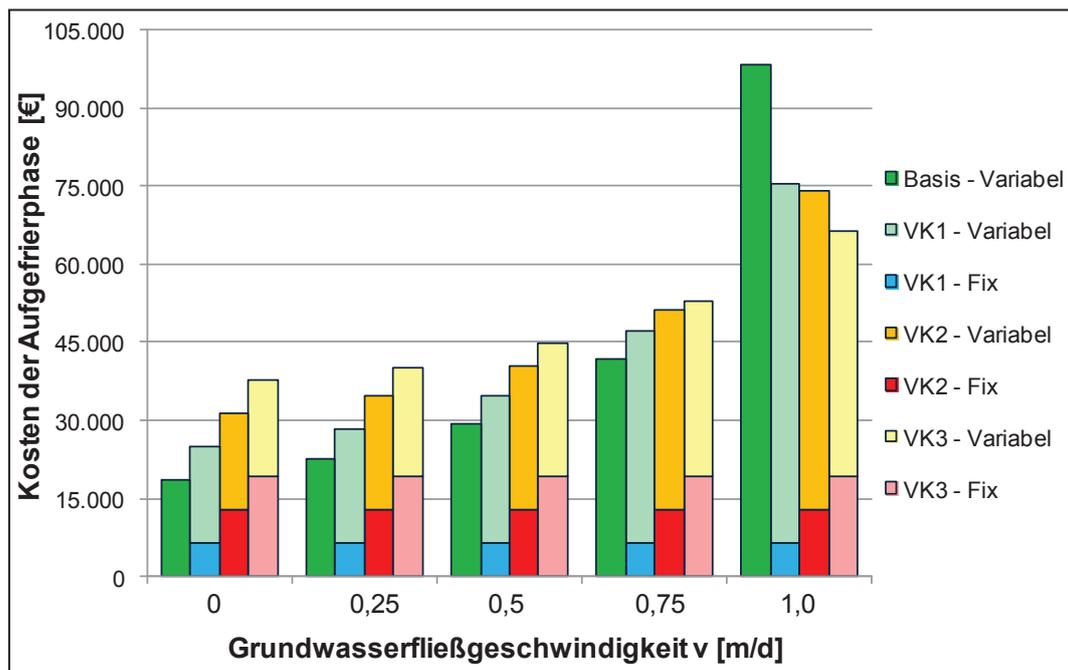
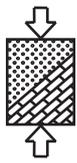
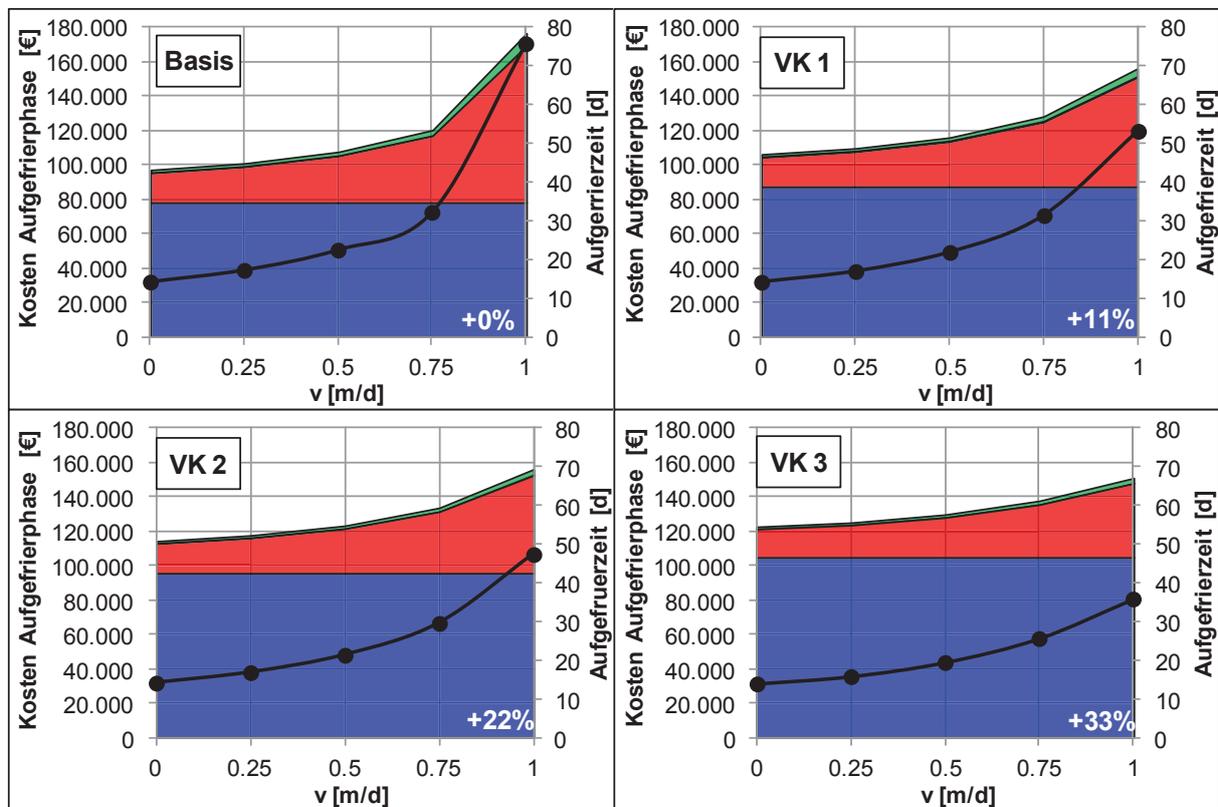


Abbildung 8.24 Variable Kosten und Änderung der Fixkosten im Vergleich zum Basissystem der Aufgefrierphase für die verschiedenen Optimierungsvarianten

Es wird deutlich, dass für das untersuchte System erst ab einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0$ m/d die Systeme mit einer Vorkühlung wirtschaftlich werden. Die Ursache hierfür liegt in dem hohen Anteil der Fixkosten im Vergleich zu den variablen Kosten, die die Energiekosten enthalten. Abbildung 8.25 macht dies nochmal deutlich. Durch die zusätzlichen Gefrierrohre werden die Fixkosten zwischen 11% und 33% (VK1 bzw. VK3) erhöht. Der Anteil der variablen Kosten ist im Vergleich für kleine Fließgeschwindigkeiten aber zu gering, um die starke Erhöhung der Fixkosten durch eine Verringerung der variablen



Kosten kompensieren zu können. Die Einsparungen der variablen Kosten übersteigen die Zusatzkosten für die Gefrierrohre erst für eine Fließgeschwindigkeit von 1,0 m/d.

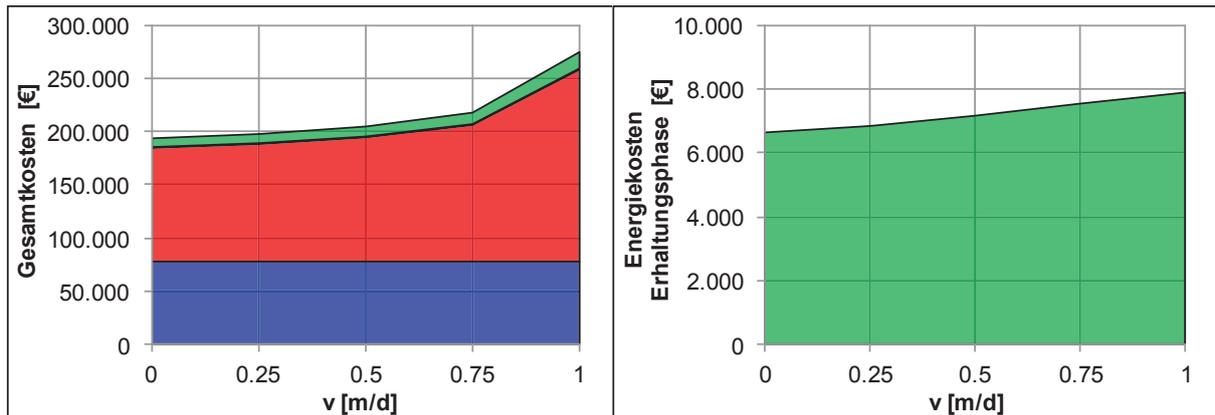
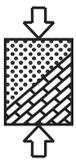


■ Variabel - Energie ■ Variabel - Gerät & Personal ■ Fix —●— Aufgefrierzeit

Abbildung 8.25 Zusammensetzung der Kosten während der Aufgefrierphase und Aufgefrierzeit der Optimierungssysteme für verschiedene Fließgeschwindigkeiten

Die Ursache für diese Ergebnisse liegt vor allem in dem hier betrachteten Simulationsbeispiel, das eine eher kleine Vereisungsmaßnahme darstellt. Die Ergebnisse lassen sich daher nicht auf größere Vereisungsmaßnahmen übertragen. Die Untersuchungen sollten aber auf größere Maßnahmen, bei denen zu erwarten ist, dass der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten steigt, erweitert werden, um die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung besser einschätzen zu können.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde auf die Erhaltungsphase ausgeweitet, da diese aufgrund des großen Erhaltungszeitraums einen maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtkosten hat. Der maßgebliche Einfluss der Erhaltungsphase für das Basissystem wird in Abbildung 8.26 deutlich. Durch die Erhaltungsphase von 5 Monaten, die einem realistischen Wert entspricht, steigt der Anteil der variablen Kosten an den Gesamtkosten deutlich an, so dass die Fixkosten nur noch bis zu 40% der Gesamtkosten ausmachen. Aber auch in dieser Betrachtung wird deutlich, dass der Anteil der Energiekosten an den variablen Kosten gering ist. Aufgrund der festgelegten Zeitspanne von 5 Monaten für die Erhaltungsphase sind nicht nur die Fixkosten sondern auch die variablen Kosten für Personal und Gerät, die lediglich von der betrachteten Zeit abhängen, in der Erhaltungsphase für alle Fließgeschwindigkeiten konstant. Die Energiekosten in der Erhaltungsphase steigen in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit an.



■ Variabel - Energie ■ Variabel - Gerät & Personal ■ Fix

Abbildung 8.26 Zusammensetzung der Gesamtkosten des Basissystems, unterschieden zw. Aufgefrier- und Erhaltungsphase, für verschiedene Fließgeschwindigkeiten

Die Ergebnisse der vereinfachten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Erhaltungsphase sind für die einzelnen Optimierungsvarianten der Gefrierrohranordnung und die untersuchten Betriebsvarianten nur exemplarisch für die variablen Kosten bei einer Fließgeschwindigkeit von $v = 0,75 \text{ m/d}$ in Abbildung 8.27 dargestellt.

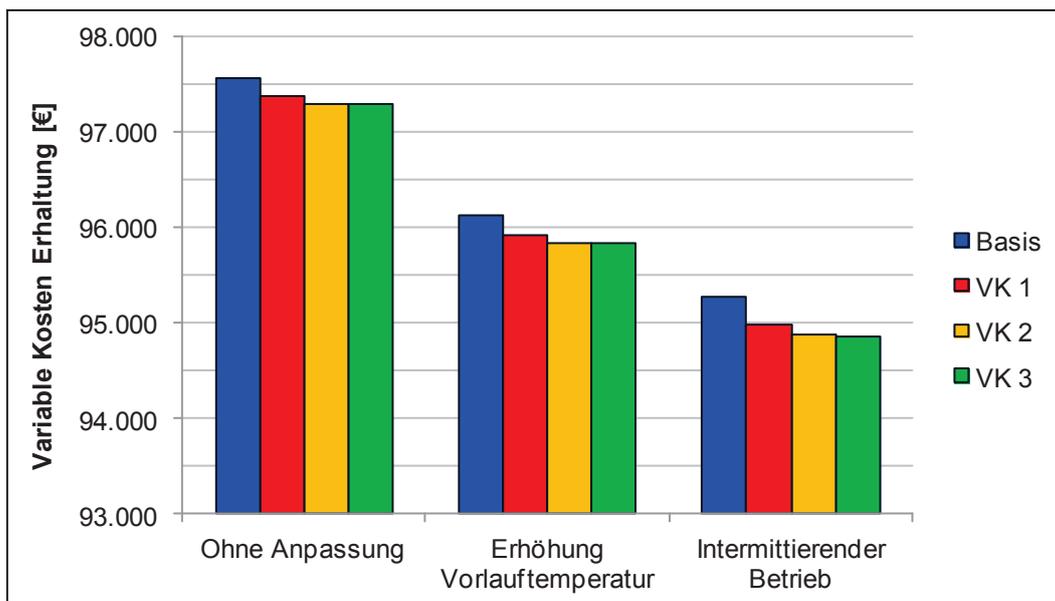
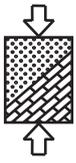


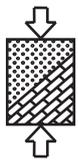
Abbildung 8.27 Variable Kosten der Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Betriebsvarianten für die verschiedenen Optimierungsvarianten für $v = 0,75 \text{ m/d}$

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Wahl der Betriebsvariante in der Erhaltungsphase Kosten eingespart werden können. Die großen realisierbaren Einsparpotentiale der Kühlenergie, die sich in den vorherigen Kapiteln ergeben haben, können aber nicht direkt auf die Kosten übertragen werden. Die verschiedenen Optimierungsvarianten zur Vorkühlung durch zusätzliche Gefrierrohre wirken sich in der Erhaltungsphase ebenfalls nur gering auf die Entwicklung der Kosten aus.

Da die Kostenansätze von Baier (2009) übernommen und auf die vorliegende Vereisungsmaßnahme übertragen wurden, die nur vergleichsweise geringe Ausmaße hat, sind die Ergebnisse der vereinfachten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bezüglich der



tatsächlichen anzusetzenden Kosten zu hinterfragen. Für die genaue Bestimmung der anzusetzenden variablen Geräte- und Personalkosten in Abhängigkeit der Größe der Vereisungsmaßnahme wäre eine vertiefte Untersuchung notwendig. Eine Erweiterung der Untersuchungen auf größere Vereisungsmaßnahmen ist daher zur realistischen Einordnung der Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erforderlich.



9 Zusammenfassung und Ausblick

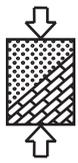
Das Ziel des Forschungsvorhabens war die zeitliche und energetische Optimierung von Vereisungsmaßnahmen mit Sole im Vorfeld der Ausführung mit Hilfe numerischer Simulationen zu ermöglichen. Dazu musste die erforderliche Kühlleistung nicht nur in der Aufgefrierphase sondern auch in der Erhaltungsphase bestimmt werden.

Zunächst wurden im Rahmen einer Literaturrecherche Richtwerte zur Abschätzung der erforderlichen Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme zusammengefasst und durch die Auswertung aktueller Bauprojekte ergänzt. Im Ergebnis zeigte sich, dass die ermittelten Werte der erforderlichen Kühlleistung lediglich als grobe Anhaltswerte angesehen werden können, da die Vielzahl der Einflussfaktoren auf die Kühlleistung keine Berücksichtigung findet.

Um eine detaillierte und realitätsnahe Ermittlung der erforderlichen Kühlleistung zu ermöglichen, sind analytische bzw. numerische Simulationen notwendig. Aus diesem Grund wurden numerische Lösungsmodelle zur Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme in das Programmsystem SHEMAT implementiert. Dabei wurde zunächst das „freezing“-Modul um eine vereinfachte Ermittlung der Kühlleistung erweitert, bei der eine Summierung der in die Gefrierrohrzellen eingetragenen Wärmeströme stattfindet. Zur detaillierten Ermittlung der Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme wurde weiterhin das neue „freezrefcap“-Modul in SHEMAT implementiert, das die Kühlleistung unter Abbildung der Strömungs- und Wärmetransportprozesse innerhalb des Gefrierrohrs ermittelt. Um die unterschiedlichen Betriebsvarianten in der Erhaltungsphase realistisch abbilden zu können, wurden beide Module um die Simulation eines temperaturgesteuerten intermittierenden Betriebs erweitert.

Die Lösungsmodelle zur Ermittlung der Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme wurden zunächst durch die Nachrechnung eines an der ETH-Zürich durchgeführten Modellversuchs verifiziert. Die Ergebnisse der Nachrechnung haben gezeigt, dass die vereinfachte Ermittlung der Kühlleistung mit dem „freezing“-Modul gute Ergebnisse liefert und somit eine Abschätzung mit ausreichender Genauigkeit möglich ist. Bei der Ermittlung der Kühlleistung mit dem detaillierten „freezrefcap“-Modul ergab sich im Vergleich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messwerten und Simulationsergebnissen. Somit sind eine realitätsnahe Abbildung des Gefrierhaltens im Boden sowie eine hinreichend genaue Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung mit beiden Modulen möglich. Durch eine Kombination der beiden Module bei Simulationen von Vereisungsmaßnahmen im Vorfeld einer Baumaßnahme können die Rechenzeiten erheblich verringert werden.

Mit dem detaillierten „freezrefcap“-Modul wurde weiterhin der Versuch unternommen, die Kühlleistung einer realen Baumaßnahme zu simulieren. Als Projekt wurde die Querschlagvereisung am Statentunnel in Rotterdam gewählt, für das durch die DEILMANN-HANIEL GMBH eine ausreichende Datenbasis zur Verfügung gestellt werden konnte. Die Ergebnisse der Nachrechnung haben weiteres Entwicklungspotential des „freezrefcap“-Moduls aufgezeigt, welches bei der Nachrechnung des Modellversuchs nicht ersichtlich wurde. Dabei ist insbesondere die Möglichkeit der variablen Definition der Gefrierrohrlänge der einzelnen Gefrierrohre zu nennen, die die Kühlleistung erheblich beeinflusst.



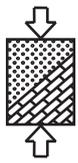
Im Rahmen einer Parameterstudie wurden die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Aufgefrierdauer und die erforderliche Kühlenergie einer Vereisungsmaßnahme ermittelt. Die größte Beeinflussung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie findet durch die vorhandene Grundwasserströmung statt, die ein überproportionales Ansteigen beider Parameter zur Folge hat. Generell zeigen alle untersuchten Bodeneigenschaften, wie der Porenanteil, der Quarzgehalt und die Grundwassertemperatur, eine deutliche Beeinflussung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie, die aber als passiv angesehen werden können, da sie nicht beeinflussbar sind. Ihre Kenntnis ist jedoch für eine zuverlässige und realistische Planung unerlässlich. Die Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteüberträgerkreislaufs, bei denen die Vorlauftemperatur und der Durchfluss die maßgebenden Parameter darstellen, können hingegen aktiv gesteuert werden und bieten somit Optimierungspotential.

Die Untersuchung von strömungsangepassten Gefrierrohranordnungen haben gezeigt, dass durch eine Vorkühlung des Grundwassers mit zusätzlichen Gefrierrohren im Anstrombereich deutliche Verringerungen der Aufgefrierzeit erreicht werden können. Diese Einsparungen erhöhen sich mit der Anzahl der eingebrachten Gefrierrohre zur Vorkühlung. Die Kühlenergie kann ebenfalls durch eine Vorkühlung deutlich verringert werden. Für die Ermittlung der maßgebenden Gefrierrohranordnung sind hier aber noch weitere numerische Untersuchungen erforderlich, da bislang keine eindeutige Tendenz angegeben werden kann.

Die numerischen Simulationen zu einer Optimierung der Betriebsvarianten in der Erhaltungsphase haben deutliche Einsparpotentiale ergeben. Sowohl durch eine Erhöhung der Vorlauftemperatur als auch durch einen intermittierenden Betrieb können in der Erhaltungsphase deutliche Einsparungen der Kühlenergie erreicht werden. Insgesamt ist der intermittierende Betrieb aber effektiver und ermöglicht Einsparungen für die untersuchten Systeme von bis zu 68% bei stationären Grundwasserverhältnissen. Diese Einsparpotentiale sinken bei steigender Fließgeschwindigkeit des Grundwassers aufgrund des konvektiven Wärmeeintrags. Der Vorteil des intermittierenden Betriebs liegt bei allen Systemen insbesondere in der gezielten Steuerung einzelner Rohrgruppen, die eine Anpassung an die Schwachstellen des Systems ermöglichen. Einen zusätzlichen Vorteil des intermittierenden Betriebs stellt die Kontrolle des Frostkörperwachstums in der Erhaltungsphase dar, die eine Verminderung der Hebungsproblematik zur Folge hat.

Die im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Weiterentwicklungen des Programmsystems SHEMAT ermöglichen somit prinzipiell die numerische Simulation von Vereisungsmaßnahmen im Vorfeld einer Baumaßnahme und deren zeitliche und energetische Optimierung sowohl für die Aufgefrier- als auch für die Erhaltungsphase. Dabei ist es mit dem detaillierten Programmsystem möglich, die Vereisungsmaßnahme durch die Wahl verschiedener Parameter des Gefrierrohrs oder des Kälteaggregats zu optimieren.

Um reale Baumaßnahmen mit komplizierteren geometrischen Randbedingungen dreidimensional simulieren zu können, bedarf es einer Weiterentwicklung des Lösungsmodells, um unterschiedliche Gefrierrohrängen und geneigte Gefrierrohre abbilden zu können. Außerdem sollten weitere Simulationen realer Bauprojekte durchgeführt werden, um eine gesicherte Ermittlung der erforderlichen Kühlleistung unter verschiedenen Randbedingungen und dabei insbesondere unter dem Einfluss einer vorhandenen Grundwasserströmung zu erreichen. Dabei wäre eine Erweiterung der Betrachtung auf die Verluste durch das Kühlaggregat und die Rohrleitungen im Zu- und Rücklauf sinnvoll, um



eine gesicherte Abschätzung der Größenordnung der Verluste zu gewährleisten. Im Zusammenhang mit den Verlusten besteht weiterer Forschungsbedarf im Hinblick auf die Auswirkungen von Veränderungen im Kälteträger- bzw. Kältemittelkreislauf, wie beispielsweise der Pumpleistung

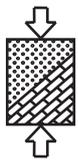
Weiterhin sollte der im Rahmen der Parameterstudie ermittelte Einfluss der Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteträgerkreislaufs durch Modellversuche verifiziert werden. Die Beeinflussung der erforderlichen Kühlenergie durch die Bodeneigenschaften sollte in diesem Zusammenhang ebenfalls mit Hilfe von Modellversuchen verifiziert werden, um eine Übertragung der Zusammenhänge auf beliebige Bodenarten zu ermöglichen.

Da die durchgeführten numerischen Untersuchungen zur Optimierung der Erhaltungsphase gezeigt haben, dass durch aktive, zusätzliche Gefrierrohre zur Vorkühlung in der Erhaltungsphase Einsparungen möglich sind, sollten weiterführende numerische Untersuchungen in diesem Bereich durchgeführt werden. Eine Übertragung auf die Betriebsvarianten des intermittierenden Betriebs oder der Erhöhung der Vorlauftemperatur kann somit möglicherweise zu weiteren Einsparungen führen.

Aachen, den 15.10.2013

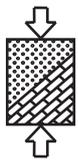
(Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler)

(Dipl.-Ing. Rebecca Schüller)

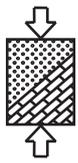


10 Literaturverzeichnis

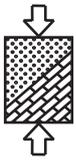
- Andersland, O.B.; Ladanyi, B. (2004): Frozen Ground Engineering. American Society of Civil Engineers, John Wiley & Sons.
- Anderson, D.M.; Tice, A.R. (1972): Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements. Highway Research Record, Vol. 373, pp. 12-18.
- Baehr, H.D.; Stephan, K. (2006): Wärme- und Stoffübertragung. 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- Baier, Ch. (2009): Thermisch-hydraulische Simulationen zur Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau unter Einfluss einer Grundwasserströmung. Dissertation, Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen.
- Bayer, F. (2002): Baugrundvereisung beim Bau der U-Bahn Fürth. Tunnel Nr. 7/2002, pp. 20-28, Bauverlag.
- Böckh P., Wetzel T. (2011): Wärmeübertragung – Grundlagen und Praxis. 4. bearb. Aufl., Springer, Heidelberg.
- Braun, B.; Shuster, J.; Burnham, E. (1979): Ground freezing for Support of Open Excavations. Engineering Geology 13, pp. 429-453.
- Bruns, B.; Kuhn, C.; Gattermann, J.; Stahlmann, J.; Perl, C. (2010): Qualitätssicherung bei umfangreichen Vereisungsmaßnahmen am Beispiel des City-Tunnels in Leipzig. Bauen in Boden und Fels 7. Kolloquium, Esslingen.
- Buja, H. O. (2004): Der Spezialtiefbau – Aktueller Stand der Geräte- und Verfahrenstechnik. Bautechnik 81, pp. 25-109, Ernst & Sohn, Berlin.
- Churchill, S. W. (1977): Comprehensive Correlating Equations for Heat, Mass and Momentum Transfer in fully developed Flow in Smooth Tubes. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, Vol. 16, No. 1, pp. 109-116.
- Clauser, C. (2003): Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers – SHEMAT and Processing SHEMAT. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Cudmani, R.; Nagelsdiek, S. (2006): Wärmetechnische Analyse von Bodenvereisungsmaßnahmen im Tunnelbau mit der Finiten Elemente Methode. 5. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, Ostfildern, pp. 293-299
- Frivik, P.E.; Comini, G. (1982): Seepage and Heat Flow in Soil Freezing. Journal of Heat Transfer, Transaction of ASME, Vol.104, p. 323-328.
- Glück, B. (2007): Simulationsmodell Erdwärmesonden zur wärmetechnischen Beurteilung von Wärmequellen, Wärmesenken und Wärme-/Kältespeichern – 1. Ergänzung: Koaxialsonden. E-Book.



- Gnielinski, V. (1995): Ein neues Berechnungsverfahren für die Wärmeübertragung im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Rohrströmung. *Forschung im Ingenieurwesen – Engineering Research*, Band 61, Nr. 9, pp. 240 – 248.
- Gnielinski, V. (2006): Wärmeübertragung bei der Strömung durch Rohre, Wärmeübertragung im konzentrischen Ringspalt und im ebenen Spalt. *VDI-Wärmeatlas*, 10 Auflage 2006, pp. Ga1-Gb10. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg.
- Hallquist, M. (2011): Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of smooth Tubes at a constant Heat Flux in the Transitional Flow Regime. Masterthesis, University of Pretoria.
- Harris, J. S. (1995): *Ground freezing in practice*. Thomas Telford, London.
- Hausen, H. (1959): Neue Gleichungen für die Wärmeübertragung bei freier und erzwungener Strömung. *Allgemeine Wärmetechnik* 9, pp. 75-79.
- Hellström, G. (1991): *Ground heat Storage - Thermal Analyses of Duct Storage Systems*. Ph.D. thesis; Theory. Dep. Of Mathematical Physics, University of Lund.
- Huber, D.; Walter, H. (2010): Forced convection heat transfer in the transition region between laminar und turbulent flow for a vertical circular tube. *International Conference on Fluid Mechanics and Heat & Mass Transfer*, pp. 132-136.
- Huder, J. (1979): *Technologie des gefrorenen Bodens*. Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, Nr. 100.
- 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.
- Kinzelbach, W. (1987): *Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser*. Schriftenreihe gwf Wasser-Abwasser, Band 21, R. Oldenburg Verlag, München.
- Konakov, P. K. (1946): Eine neue Formel für den Reibungskoeffizienten glatter Rohre (Orig. Russisch). *Berichte der Akademie der Wissenschaften der UDSSR* Band 51, pp. 503-506.
- Makowski, E. (1986): *Modellierung der künstlichen Bodenvereisung im grundwasserdurchströmten Untergrund mit der Methode der finiten Elemente*. Schriftenreihe des Instituts für Grundbau, Wasserwesen und Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Serie Grundbau, Heft 10.
- Marek, R.; Nitsche, K. (2010): *Praxis der Wärmeübertragung Grundlagen – Anwendungen - Übungsaufgaben*. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag GmbH und Co. KG, München.
- Martin, H. (1990): *Vorlesung Wärmeübertragung II*. Universität Karlsruhe TH.



- Mottaghy, D.; Rath, V. (2006): Latent heat effects in subsurface modelling and their impact on palaeotemperature reconstructions. *Geophysical Journal International* 164, pp. 234-245.
- Mottaghy, D.; Dijkshoorn, L. (2012): Implementing an effective finite difference formulation for borehole heat exchangers into a heat and mass transport code. *Renewable Energy* 45, pp. 59-71.
- Orth, W. (2009): Bodenvereisung. *Grundbau Taschenbuch Teil 2: Geotechnische Verfahren*, pp. 233-300, Ernst und Sohn, Berlin.
- Petukhov, B. S.; Kirillov, V. V. (1958): Zur Frage des Wärmeübergangs bei turbulenter Strömung von Flüssigkeiten in Rohren (Orig. Russisch). *Teploenergetika* 4, Nr. 4, pp. 63-68.
- Pimentel, E.; Anagnostou, G. (2012): Modellierung der Frostkörperbildung beim Gefrierverfahren im strömenden Grundwasser. *Baugrundverbesserung in der Geotechnik, 2. Symposium, Wien*, pp. 353-368.
- Pimentel, E.; Sres, A.; Anagnostou, G. (2012): Large-scale laboratory tests on artificial ground freezing under seepage-flow conditions. *Géotechnique*, Vol. 62, No. 3, pp. 227-241.
- Schüller, R.; Ziegler, M.; Mottaghy, D. (2013): Energetische Einsparpotentiale beim Vereisungsverfahren unter Einfluss einer Grundwasserströmung. 9. Österreichische Geotechniktagung mit „Vienna-Terzaghi Lecture“. *Tagungsbeiträge*, pp. 313-324. Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Wien 2013.
- Sieler, U.; Pirkl, M. (2002): Innovative Bauverfahren bei der Vereisung U-Bahn Fürth. *Vorträge der Baugrundtagung 2002 in Mainz*, pp 123-128, Glückauf Verlag 2002.
- Sigloch, H. (2012): *Technische Fluidmechanik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Sres, A. (2010): Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur künstlichen Bodenvereisung im strömenden Grundwasser. *Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik (IGT) der ETH Zürich*, Band 234.
- Städling, A.; Franz, S. (2009): City-Tunnel Leipzig: Unterfahrung des Hauptbahnhofs im Schutze einer Baugrundvereisung. *Forschung und Praxis, U-Verkehr und unterirdisches Bauen* 43, STUVA-Tagung 2009 in Hamburg, pp. 99-103, Bauverlag.
- Ständer, W. (1967): *Das Gefrierverfahren im Schacht-, Grund- und Tunnelbau*. Handbuch der Kältetechnik, Band 12, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York.
- Stephan, K. (1962): Wärmeübergang bei turbulenter und bei laminarer Strömung in Ringspalten. *Chemie Ingenieur Technik* 34, Nr. 3, pp.207-212.



- Truckenbrodt, E. A. (1996): Fluidmechanik: Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide. Vierte, ergänzte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Van der Meijden, V.P. (2003): Thermisch rekenmodel voor cilindrische vrieslichamen voor de bouw van dwarsverbindingen tussen tunnelconstructies. Eindrapport, TU Delft.
- Wenke, M.; Willner, M. (2008): Statentunnel in Rotterdam – Ausführungserfahrungen von Vereisungsbohrungen und der Vereisung von Querschlägen, Geomechanik und Tunnelbau, Nr.1/2008, pp.504-511.
- Ziegler, M.; Aulbach, B.; Baier, Ch. (2010): Erweiterung des Vereisungsverfahrens zur umweltverträglichen Herstellung komplizierter Untergeschosskonstruktionen bei strömendem Grundwasser. Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart.