

Energetische Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Rebecca Schüller

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Vogt

Tag der mündlichen Prüfung: 24.04.2015

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XIII
Symbolverzeichnis	XV
Kurzfassung	XXI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit.....	2
2 Das Gefrierverfahren	4
2.1 Prinzip	4
2.2 Technologie der Kälteerzeugung	5
2.3 Phasen einer Vereisungsmaßnahme	7
3 Status Quo – Kühlleistung bei Vereisungsmaßnahmen	8
3.1 Bisherige Lösungsansätze und Richtwerte.....	8
3.2 Auswertung aktueller Bauprojekte.....	11
3.2.1 Nord-Süd Stadtbahn Köln.....	11
3.2.2 Bauabschnitt 3.1.1 der U-Bahn in Fürth.....	12
3.2.3 Unterquerung des Hauptbahnhofs am City-Tunnel in Leipzig.....	13
3.2.4 Zusammenfassung und Bewertung.....	14
4 Theoretische Grundlagen des Wärmetransports	17
4.1 Wärmetransport im Boden	17
4.1.1 Konduktion	19
4.1.2 Konvektion	19
4.1.3 Wärmetransportgleichung.....	21
4.2 Wärmetransport in den Gefrierrohren.....	21
4.2.1 Fluidmechanische Grundlagen	22
4.2.2 Konduktion	26
4.2.3 Konvektion	27
4.2.4 Nusselt-Zahl zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten.....	28
4.3 Materialeigenschaften	35

4.3.1	Thermische Eigenschaften gefrierender Böden.....	35
4.3.2	Physikalische Eigenschaften von Kälteträgern	40
5	Numerische Lösungsmodelle	44
5.1	Das Programm SHEMAT-Suite	44
5.2	Vereinfachte Kühlleistungsermittlung im „freezing“-Modul	45
5.3	Detaillierte Kühlleistungsermittlung – Entwicklung des „freezrefcap“-Moduls.....	47
5.3.1	Grundlagen und programmtechnische Umsetzung des numerischen Berechnungsmodells.....	47
5.3.2	Kopplung mit SHEMAT-Suite.....	54
5.3.3	Erforderliche Eingabeparameter und weitere Adaptionen	55
5.4	Betriebsvarianten der Erhaltungsphase.....	57
6	Überprüfung der numerischen Lösungsmodelle	60
6.1	Nachrechnung eines Modellversuchs	60
6.1.1	Versuchsaufbau und Eingangsparameter	61
6.1.2	Ergebnisse der Simulation mit dem „freezing“-Modul	63
6.1.3	Ergebnisse der Simulation mit dem „freezrefcap“-Modul	68
6.1.4	Bewertung der Simulationsergebnisse	72
6.2	Nachrechnung eines realen Vereisungsprojekts	73
6.2.1	Projektbeschreibung „Statentunnel Rotterdam“	74
6.2.2	Modellerstellung und Eingangsparameter	76
6.2.3	Simulationsergebnisse	79
7	Einflussfaktoren auf die Kühlleistung und die Aufgefrierzeit	83
7.1	Basismodell und Eingangsparameter	83
7.2	Einfluss der Grundwasserströmung	87
7.3	Einfluss der Bodenparameter	89
7.3.1	Einfluss des Porenanteils	90
7.3.2	Einfluss des Quarzgehalts.....	91
7.3.3	Einfluss der Grundwassertemperatur	92
7.4	Einfluss der Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälte­träger­kreis­laufs.....	94
7.4.1	Einfluss der Geometrie des koaxialen Gefrierrohrs	94
7.4.2	Einfluss der Länge des Gefrierrohrs.....	96
7.4.3	Einfluss der Vorlauf­temperatur	97
7.4.4	Einfluss des Durchflusses.....	98
7.4.5	Einfluss der Calciumchlorid-Konzentration der Sole.....	100
7.5	Beurteilung der maßgebenden Einflussfaktoren.....	101

8	Ansätze zur energetischen Optimierung von Vereisungsmaßnahmen	104
8.1	Vergleich der Lösungsmodelle	104
8.2	Optimierung der Aufgefrierphase	107
8.3	Optimierung der Erhaltungsphase	113
8.3.1	Durchlaufender Betrieb ohne Anpassung	113
8.3.2	Betrieb mit erhöhter Vorlauftemperatur	118
8.3.3	Intermittierender Betrieb	124
8.3.4	Bewertung der Betriebsvarianten der Erhaltungsphase	131
8.4	Bewertung der Ansätze zur energetischen Optimierung	134
9	Zusammenfassung und Ausblick	146
	Literaturverzeichnis	152
	Vorveröffentlichungen	158
	Anlagen	160

Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1	Kühlsystem einer Stickstoffvereisung (nach Max Bögl)	5
Bild 2.2	Kühlsystem einer Solevereisung (nach Max Bögl).....	6
Bild 2.3	Zeitliche Abfolge der Phasen eines Frostkörpers (nach Baier 2008).....	7
Bild 3.1	Lageplan der Erweiterung und projektiertes Gefrierkörper der U-Bahn Fürth (Pimentel & Anagnostou 2012)	12
Bild 3.2	Baugrund und Vereisung am Hauptbahnhof in Leipzig (Städling & Franz 2009).....	14
Bild 3.3	Vergleich der Kühlleistungen pro Meter Gefrierrohr in der Aufgefrierphase	15
Bild 3.4	Vergleich der ermittelten Kühlleistungen in der Aufgefrier- und Erhaltungsphase.....	15
Bild 4.1	Mehrphasenmodell eines vollgesättigten Bodens (nach Baier 2008)	17
Bild 4.2	Mechanismen des Wärmetransports im Boden (nach Farouki 1986)	18
Bild 4.3	Detailaufbau eines Gefrierrohrs mit Rohrströmung.....	22
Bild 4.4	Geschwindigkeitsprofile einer laminaren und turbulenten Strömung (nach Truckenbrodt 1996)	24
Bild 4.5	Geschwindigkeits- und Temperaturprofil mit Einlaufänge bei laminarer Rohrströmung (nach Marek & Nitsche 2012).....	25
Bild 4.6	Temperaturverlauf im strömenden Fluid als Funktion des Wandabstands (nach Beahr & Stephan 2006).....	27
Bild 4.7	Hydraulischer Durchmesser eines Ringspalts.....	32
Bild 4.8	Randbedingungen der Wärmeübertragung im Ringspalt (nach Gnielinski 2013)	33
Bild 4.9	Nusselt-Zahlen für die zweite und die dritte Randbedingung der Wärmeübertragung im Ringspalt (Koppmann 2013).....	33
Bild 4.10	Spezifische Wärmekapazität der unterschiedlichen Bodenkomponten (nach Baier 2008 bzw. Jessberger 1996)	37
Bild 4.11	Dichte, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit von Wasser, Eis und unterkühltem Wasser im relevanten Temperaturspektrum (nach Baier 2008).....	38
Bild 4.12	Verlauf des ungefrorenen Wassergehalts für verschiedene Bodenarten (nach Baier 2008 bzw. Jessberger 1990).....	40
Bild 4.13	Eigenschaften von CaCl ₂ -Solen mit verschiedenen CaCl ₂ -Konzentrationen.....	41
Bild 4.14	HTEF der CaCl ₂ -Solen mit verschiedenen CaCl ₂ -Konzentrationen	43
Bild 5.1	Vereinfachte Kühlleistungsermittlung im „freezing“-Modul	46
Bild 5.2	Gefrierrohrgeometrie und thermische Widerstände im „freezrefcap“-Modul (nach Mottaghy & Dijkshoorn 2012).....	48
Bild 5.3	Schematischer Berechnungsquerschnitt im Fall „Flow“ (nach Mottaghy & Dijkshoorn 2012).....	49
Bild 5.4	Schematische Darstellung der Bewegung der Temperaturpunkte im Vor- und Rücklauf für die Bestimmung des betreffenden Wärmestroms	50
Bild 5.5	Schematischer Berechnungsquerschnitt im Fall „No Flow“ (nach Mottaghy & Dijkshoorn 2012).....	52

Bild 5.6	Kopplung zwischen dem „freezrefcap“-Modul und SHEMAT-Suite	54
Bild 5.7	Vergleich der Zellbelegung eines vertikalen und eines geneigten Gefrierrohrs	57
Bild 6.1	Aufbau und Geometrie des Großversuchs (nach Sres 2009)	61
Bild 6.2	Vergleich der um die Verluste korrigierten, gemessenen Kühlleistungen der beiden Modellversuche	63
Bild 6.3	Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 2) für $v_f = 0$ m/d („freezing“-Modul)	64
Bild 6.4	Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 1) für $v_f = 0$ m/d („freezing“-Modul)	65
Bild 6.5	Zeitlicher Verlauf der Kühlleistung für $v_f = 0$ m/d („freezing“-Modul)	65
Bild 6.6	Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 2) für $v_f = 1,5$ m/d („freezing“-Modul)	66
Bild 6.7	Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 1) für $v_f = 1,5$ m/d („freezing“-Modul)	67
Bild 6.8	Zeitlicher Verlauf der Kühlleistung für $v_f = 1,5$ m/d („freezing“-Modul)	67
Bild 6.9	Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 2) für $v_f = 0$ m/d („freezrefcap“-Modul)	69
Bild 6.10	Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 1) für $v_f = 0$ m/d („freezrefcap“-Modul)	69
Bild 6.11	Zeitlicher Verlauf der Kühlleistung für $v_f = 0$ m/d („freezrefcap“-Modul)	70
Bild 6.12	Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 2) für $v_f = 1,5$ m/d („freezrefcap“-Modul)	71
Bild 6.13	Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 1) für $v_f = 1,5$ m/d („freezrefcap“-Modul)	71
Bild 6.14	Zeitlicher Verlauf der Kühlleistung für $v_f = 1,5$ m/d („freezrefcap“-Modul)	72
Bild 6.15	Verlauf Statentunnel mit Querschlägen (nach Wenke & Willner 2008)	74
Bild 6.16	Querschlagvereisung mit mobilen Kühlaggregaten (Wenke & Willner 2008)	75
Bild 6.17	Dreidimensionale Darstellung des Frostkörpers mit Gefrierrohrnummern (nach Wenke & Willner 2008)	75
Bild 6.18	Lage der Gefrierrohre und Temperaturfühler in der x-y-Ebene des Modells	77
Bild 6.19	Lage der Gefrierrohre und Temperaturfühler zwischen den beiden Tunnelröhren im Westen und Osten in der y-z- und x-z-Ebene im Modell	78
Bild 6.20	Temperaturverteilung im Boden für Temperaturfühler T_1	79
Bild 6.21	Temperaturverteilung im Boden für Temperaturfühler T_4	80
Bild 6.22	Kühlleistung des Querschlags DWV 2 („freezrefcap“-Modul)	81
Bild 7.1	Grundriss des Basis- bzw. Referenzsystems des Querschlagmodells	84
Bild 7.2	Frostkörperfortschritt nach 20 Tagen für verschiedene Fließgeschwindigkeiten	88
Bild 7.3	Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Kühlenergie in der Aufgefrierphase und die Aufgefrierzeit	88
Bild 7.4	Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d	89

Bild 7.5	Einfluss des Porenanteils auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $n = 0,41$	90
Bild 7.6	Einfluss des Quarzgehalts auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $q = 0,35$	92
Bild 7.7	Einfluss der Grundwassertemperatur auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $T_{GW} = 10^\circ\text{C}$	93
Bild 7.8	Einfluss der Gefrierrohrgeometrie auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $d_{A,a} = 108^\circ\text{mm}$	95
Bild 7.9	Einfluss der Länge des Gefrierrohrs auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $L_{GR} = 10$ m	96
Bild 7.10	Einfluss der Vorlauftemperatur des Kälte-trägers auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $T_{F,VL} = -35^\circ\text{C}$	97
Bild 7.11	Einfluss des Durchflusses des Kälte-trägers auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $Q_F = 20$ m ³ /h	99
Bild 7.12	Einfluss der CaCl ₂ -Konzentration des Kälte-trägers auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und eine CaCl ₂ -Konzentration von 29,9 %	100
Bild 7.13	Prozentualer Einflussbereich der variierten Parameter für die Aufgefrierzeit	101
Bild 7.14	Prozentualer Einflussbereich der variierten Parameter für die Kühlenergie	102
Bild 8.1	Aufgefrierzeit in Abhängigkeit der Grundwasserströmung - Vergleich der Lösungsmodelle für verschiedene Gefrierrohrbedingungen	106
Bild 8.2	Frostkörperausbreitung in axialer Richtung nach 20 Tagen für $v_f = 0,5$ m/d	107
Bild 8.3	Aufgefrierzeit und Kühlenergie in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d	108
Bild 8.4	Aufgefrierphase des Basissystems für eine Grundwasserfließgeschwindigkeit von $v_f = 0,75$ m/d	108
Bild 8.5	Kühlleistung der einzelnen Gefrierrohre in der Aufgefrierphase für $v_f = 0,75$ m/d	109
Bild 8.6	Übersicht der untersuchten Optimierungssysteme der Vorkühlung	110
Bild 8.7	Aufgefrierzeit in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit und der Optimierungssysteme der Vorkühlung – normiert auf $v_f = 0$ m/d	111
Bild 8.8	Kühlenergie in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit und der Optimierungssysteme der Vorkühlung – normiert auf $v_f = 0$ m/d	111
Bild 8.9	Aufgefrierzeit und Kühlenergie in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit und der Optimierungssysteme der Vorkühlung	112
Bild 8.10	Basissystem des Querschlagmodells mit Gefrierrohren und Sensorpunkten	114
Bild 8.11	Kühlenergie der Erhaltungs- und Aufgefrierphase sowie Aufgefrierzeit in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d	114
Bild 8.12	Frostkörperausbreitung des Basissystems zu Beginn der Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit	115
Bild 8.13	-1°C-Isotherme des Frostkörpers zu Beginn und zum Ende der Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit	116
Bild 8.14	Zeitlicher Verlauf der Kühlleistung in der Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit	116

Bild 8.15	Einfluss der aktiven bzw. inaktiven Gefrierrohre zur Vorkühlung auf die Kühlenergie der Erhaltungsphase.....	117
Bild 8.16	Kühlenergie der Erhaltungsphase für einen durchlaufenden Betrieb des Kühlaggregats in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit.....	118
Bild 8.17	Temperaturverlauf des Sensorpunktes 1 (Luv) des Basissystems für unterschiedliche Vorlaufemperaturen in der Erhaltungsphase ($v_f = 0,25$ m/d).....	119
Bild 8.18	Kühlleistung des Basissystems für einen durchlaufenden Betrieb ($T_{VL} = -35^\circ\text{C}$) und einen Betrieb mit erhöhter Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase.....	120
Bild 8.19	Einfluss der Grundwasserströmung auf die Einsparungen der Kühlenergie der Erhaltungsphase durch eine Erhöhung der Vorlauftemperatur (Basissystem).....	121
Bild 8.20	Frostkörperausbreitung zu Beginn der Erhaltungsphase für das Basissystem und das Optimierungssystem VK 3 für $v_f = 1,00$ m/d.....	122
Bild 8.21	Einsparungen der Kühlenergie der Erhaltungsphase durch eine Erhöhung der Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit.....	123
Bild 8.22	Temperaturverlauf des Sensorpunktes 1 des Basissystems für verschiedene minimale Grenztemperaturen des intermittierenden Betriebs ($v_f = 0,25$ m/d).....	125
Bild 8.23	Einfluss der minimalen Grenztemperatur auf die Einsparungen der Kühlenergie der Erhaltungsphase für das Basissystem in Abhängigkeit der Strömung.....	126
Bild 8.24	Kühlleistung der einzelnen Gefrierrohre in der Erhaltungsphase für $v_f = 0,75$ m/d.....	127
Bild 8.25	Varianten der Rohrgruppen – Zuordnung der Gefrierrohre und Sensorpunkte.....	127
Bild 8.26	Einfluss der Variation der Rohrgruppen auf die Einsparungen der Kühlenergie der Erhaltungsphase für das Basissystem in Abhängigkeit der Strömung.....	128
Bild 8.27	Einsparungen der Kühlenergie der Erhaltungsphase durch den intermittierenden Betrieb in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit.....	130
Bild 8.28	Frostkörperausbreitung zu Beginn der Erhaltungsphase für das Basissystem und das Optimierungssystem VK 4 für $v_f = 1,25$ m/d.....	131
Bild 8.29	Einsparungen der Kühlenergie der Erhaltungsphase für das Basissystem in Abhängigkeit der Betriebsvariante und der Grundwasserfließgeschwindigkeit.....	132
Bild 8.30	Frostkörperausbreitung zum Ende der Erhaltungsphase für die verschiedenen Betriebsvarianten in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit.....	133
Bild 8.31	Kühlenergie und Aufgefrierzeit des Basissystems für einen durchlaufenden Betrieb in der Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit.....	135
Bild 8.32	Gesamtkühlenergie der Optimierungskombinationen aus Aufgefrier- und Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit.....	136
Bild 8.33	Einsparungen der Gesamtkühlenergie der maßgebenden energetischen Optimierungskombination für die jeweilige Grundwasserfließgeschwindigkeit.....	137
Bild 8.34	Zusammensetzung der Gesamtkosten des Basissystems in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit.....	139
Bild 8.35	Anteil der einzelnen Kostenbestandteile an den Gesamtkosten des Basissystems in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit.....	140
Bild 8.36	Gesamtkosten und Gesamtkühlenergie des Basissystems in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d.....	140

Bild 8.37	Gesamtkosten der Optimierungskombinationen aus Aufgefrier- und Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit	142
Bild 8.38	Zusammensetzung der Gesamtkosten der jeweiligen Optimierungskombination für eine Grundwasserfließgeschwindigkeit von $v_f = 0,75$ m/d.....	143
Bild 8.39	Einsparungen der Gesamtkosten der maßgebenden wirtschaftlichen Optimierungskombination für die jeweilige Grundwasserfließgeschwindigkeit	144
Bild 8.40	Gesamtkosten der maßgebenden wirtschaftlichen Optimierungskombination für die jeweilige Grundwasserfließgeschwindigkeit	145

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1	Richtwerte der Kühlleistung bei Vereisungsmaßnahmen	9
Tabelle 6.1	Eingangswerte der Bodeneigenschaften des Weiacher Sands für SHEMAT-Suite	62
Tabelle 6.2	Eingangswerte der Bodeneigenschaften des vorliegenden Baugrunds (kiesiger Sand) für SHEMAT-Suite.....	76
Tabelle 7.1	Eingangswerte der Bodeneigenschaften des Hokksundsands für SHEMAT-Suite	85
Tabelle 7.2	Eingangswerte des Gefrierrohrs für das „freezrefcap“-Modul.....	86
Tabelle 7.3	Eingangswerte des Kälteträgerkreislaufs für das „freezrefcap“-Modul.....	86
Tabelle 7.4	Eingangswerte der Geometrie der beiden verwendeten Gefrierrohre	94
Tabelle 7.5	Reynolds-Zahlen innerhalb des Gefrierrohrs für verschiedene Durchflüsse	98
Tabelle 8.1	Maximale Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase für das Basissystem in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit	120
Tabelle 8.2	Maximale Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase für das Basissystem sowie die Optimierungssysteme in Abhängigkeit der Grundwasserströmung.....	122
Tabelle 8.3	Maßgebende Variante der Rohrgruppen für das Basissystem und die Optimierungssysteme in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit.....	130
Tabelle 8.4	Energetisch maßgebende Optimierungskombinationen aus Aufgefrier- und Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit.....	136
Tabelle 8.5	Einzelkosten der Teilleistungen für einen vereinfachten Kostenvergleich	138
Tabelle 8.6	Vergleich der wirtschaftlich und energetisch maßgebenden Optimierungskombinationen aus Aufgefrier- und Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit	142

Symbolverzeichnis

Lateinische Zeichen

A	[m ²]	Fläche
a,b	[-]	Parameter zur Beschreibung des Verlaufs des ungefrorenen Wassergehalts
a _{T,F}	[m ² /s]	Temperaturleitfähigkeit des Fluids
Co	[-]	Courant-Zahl
c _s	[J/(kgK)]	spezifische Wärmekapazität
c _{s,F}	[J/(kgK)]	spezifische Wärmekapazität des Fluids
c _{s,s}	[J/(kgK)]	spezifische Wärmekapazität des Feststoffs
c _{s,w}	[J/(kgK)]	spezifische Wärmekapazität des Wassers
c _v	[J/(m ³ K)]	volumetrische Wärmekapazität
c _{v,app}	[J/(m ³ K)]	zusätzliche, scheinbare volumetrische Wärmekapazität aus latenter Wärme
c _{v,B}	[J/(m ³ K)]	volumetrische Wärmekapazität des Bodengemischs
c _{v,F}	[J/(m ³ K)]	volumetrische Wärmekapazität des Fluids
c _{v,i}	[J/(m ³ K)]	volumetrische Wärmekapazität von Eis
c _{v,s}	[J/(m ³ K)]	volumetrische Wärmekapazität des Feststoffs
c _{v,w}	[J/(m ³ K)]	volumetrische Wärmekapazität des Wassers
d _{A,a}	[m]	Außendurchmesser des Außen- bzw. Steigrohrs
d _{A,i}	[m]	Innendurchmesser des Außen- bzw. Steigrohrs
d _h	[m]	hydraulischer Durchmesser
d _{I,a}	[m]	Außendurchmesser des Innen- bzw. Fallrohrs
d _{I,i}	[m]	Innendurchmesser des Innen- bzw. Fallrohrs
d _i	[m]	Rohrinnendurchmesser
d _w	[m]	wirksamer Korndurchmesser
dz	[m]	vertikale Gitternetzweite
E	[kWh]	Kühlenergie
E _I	[-]	Impedanzfaktor für die Durchlässigkeit des gefrorenen Bodens
g	[m/s]	Erdbeschleunigung (g = 9,81 m/s)
h	[m]	hydraulische Höhe
i	[-]	hydraulischer Gradient

i,j,k	[-]	Zellindex
K	[€]	Kosten
k	[m ²]	Permeabilität
k_f	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
L	[J/kg]	latente Wärme
L_{GR}	[m]	Länge des Gefrierrohrs
L_0	[m]	charakteristische Länge
Nu	[-]	Nusselt-Zahl
Nu_m	[-]	mittlere Nusselt-Zahl
n	[-]	Porenanteil
n_{eff}	[-]	effektiver Porenanteil
n_w	[-]	mit Wasser gefüllter Porenanteil
n_i	[-]	mit Eis gefüllter Porenanteil
P	[W]	Kühlleistung
Pe	[-]	Péclet-Zahl
Pr	[-]	Prandtl-Zahl
P_I	[W/m]	Kühlleistung der Phase I nach Sanger & Sayles (1978)
P_{II}	[W/m ²]	Kühlleistung der Phase II nach Sanger & Sayles (1978)
Q_F	[m ³ /h]	Durchfluss des Fluids
\dot{Q}	[W]	Wärmestrom
\dot{Q}_d	[W]	Wärmestrom im Vorlauf (Fallrohr)
\dot{Q}_e	[W]	Wärmestrom zwischen Fall- und Steigrohr
\dot{Q}_s	[W]	Wärmestrom zwischen Boden und Steigrohr
\dot{Q}_u	[W]	Wärmestrom im Rücklauf (Ringraum zwischen Fall- und Steigrohr)
q	[%]	Quarzgehalt
\dot{q}	[W/m ²]	Wärmestromdichte
\dot{q}_t	[W/m ³]	volumetrischer Wärmestrom
\dot{q}_w	[W/m ²]	Wärmestromdichte der Wand
q_v	[kWh/m ³]	volumetrischer Kühlenergiebedarf
R	[K/W]	thermischer Widerstand
$R_{außen}$	[K/W]	thermischer Gesamtwiderstand des Außenrohrs

R_{innen}	[K/W]	thermischer Gesamtwiderstand des Innenrohrs
$R_{\text{kond.,au\ss en}}$	[K/W]	konduktiver Teilwiderstand des Au\ss en- bzw. Steigrohrs
$R_{\text{kond.,innen}}$	[K/W]	konduktiver Teilwiderstand des Innen- bzw. Fallrohrs
$R_{\text{kond.,RL}}$	[K/W]	konduktiver thermischer Widerstand des Fluids im R\ss cklauf
$R_{\text{kond.,VL}}$	[K/W]	konduktiver thermischer Widerstand des Fluids im Vorlauf
$R_{\text{konv.,A,i}}$	[K/W]	konvektiver Teilwiderstand an der Innenseite des Steigrohrs
$R_{\text{konv.,La}}$	[K/W]	konvektiver Teilwiderstand an der Au\ss enseite des Fallrohrs
$R_{\text{konv.,Li}}$	[K/W]	konvektiver Teilwiderstand an der Innenseite des Fallrohrs
Re	[-]	Reynold-Zahl
R_I	[m]	Radius bis zur Grenzfl\ss che von gefrorenem und ungefrorenem Boden nach Sanger & Sayles (1978)
r	[m]	Radius
r_a	[m]	Au\ss enradius
r_b	[m]	Bohrlochradius
r_i	[m]	Innenradius
$r_{A,a}$	[m]	Au\ss enradius des Au\ss enrohrs
$r_{A,i}$	[m]	Innenradius des Au\ss enrohrs
$r_{I,a}$	[m]	Au\ss enradius des Innenrohrs
$r_{I,i}$	[m]	Innenradius des Innenrohrs
r_0	[m]	Gefrierrohrradius nach Sanger & Sayles (1978)
S_s	[m ² /g]	massenbezogene spezifische Oberfl\ss che
T	[°C]	Temperatur
T_a	[°C]	Au\ss entemperatur
T_i	[°C]	Innentemperatur
T_B	[°C]	Bodentemperatur
T_F	[°C]	Fluidtemperatur
$T_{F,RL}$	[°C]	Fluidtemperatur im R\ss cklauf
$T_{F,VL}$	[°C]	Fluidtemperatur im Vorlauf
$T_{F,0}$	[°C]	Fluidtemperatur beim Einlauf in den Rohrquerschnitt
T_{GR}	[°C]	Gefrierrohrtemperatur
T_{GW}	[°C]	Grundwassertemperatur
T_{max}	[°C]	maximale Grenztemperatur f\ss r den intermittierenden Betrieb

T_{\min}	[°C]	minimale Grenztemperatur für den intermittierenden Betrieb
T_S	[°C]	Temperatur der Gefrierrohroberfläche nach Sanger & Sayles (1978)
T_W	[°C]	Wandtemperatur
$T_{W,a}$	[°C]	Temperatur der Außenrohrwand
$T_{W,i}$	[°C]	Temperatur der Innenrohrwand
$T_{0,W}$	[°C]	Gefriertemperatur von Wasser nach Sanger & Sayles (1978)
ΔT	[K]	Temperaturdifferenz
t	[s]	Zeit
v	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
v_a	[m/s]	Abstandsgeschwindigkeit
v_f	[m/s]	Filtergeschwindigkeit nach Darcy
v_0	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit beim Einlauf in den Rohrquerschnitt
W	[m]	zu gefrierende Wandstärke nach Sanger & Sayles (1978)
w	[%]	Wassergehalt
w_u	[%]	ungefrorener Wassergehalt
x	[-]	Koordinate in x-Richtung
x_e	[m]	Einlauflänge
$x_{e,hydr.}$	[m]	hydrodynamische Einlauflänge
$x_{e,therm.}$	[m]	thermische Einlauflänge
y	[-]	Koordinate in y-Richtung
z	[-]	Koordinate in z-Richtung

Griechische Zeichen

α	[W/(m ² K)]	Wärmeübergangskoeffizient
α_s	[Pa ⁻¹]	Kompressibilität des Feststoffs (Gesteins)
γ	[-]	Interpolationsbeiwert
η_F	[Pa·s]	dynamische Viskosität des Fluids
λ	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit
λ_B	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit des Bodengemischs
$\lambda_{B,g}$	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit des Bodengemischs im gefrorenen Zustand
$\lambda_{B,u}$	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit des Bodengemischs im ungefrorenen Zustand

λ_F	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit des Fluids
λ_i	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit von Eis
λ_g	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit des gefrorenen Bodens
λ_M	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit des restlichen Bodenbestandteile
λ_Q	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit von Quarz
λ_s	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs
λ_w	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit von Wasser
ν_w	[m ² /s]	kinematische Viskosität des Wassers
ν_F	[m ² /s]	kinematische Viskosität des Fluids
ξ	[-]	Druckverlustbeiwert
ρ	[kg/(m ³)]	Dichte
ρ_d	[kg/(m ³)]	Trockendichte des Bodens
ρ_F	[kg/(m ³)]	Dichte des Fluids
ρ_s	[kg/(m ³)]	Korndichte (Feststoffdichte) des Bodens
ρ_w	[kg/(m ³)]	Dichte von Wasser

Häufige Abkürzungen

CaCl ₂	Calciumchlorid
GOK	Geländeoberkante
HTEF	Heat Transfer Efficiency Factor
PE	Polyethylen

Kurzfassung

Das Vereisungsverfahren wird in den letzten Jahren vermehrt als Bauhilfsmaßnahme im Tunnelbau zur Erschließung geologisch und hydrologisch schwieriger Baugrundverhältnisse eingesetzt. Der wesentliche Vorteil des Vereisungsverfahrens liegt dabei in den Funktionen des entstehenden Frostkörpers, der sowohl statisch tragend als auch abdichtend gegen anstehendes Grundwasser wirkt. Trotz der zahlreichen Vorteile des Vereisungsverfahrens wird beim planmäßigen Einsatz des Verfahrens in der Praxis oftmals gezögert, da der Energieverbrauch aufgrund fehlender effektiver und zuverlässiger Berechnungsansätze falsch eingeschätzt wird. Weiterhin ermöglichen diese vorhandenen Berechnungsansätze zumeist nur eine unzureichende Berücksichtigung thermischer Einflüsse, wie beispielsweise einer Grundwasserströmung, wodurch sich weitere Unsicherheiten und Kostenrisiken ergeben.

In früheren Forschungsarbeiten am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen wurde bereits die Optimierung der Aufgefrierzeit von Vereisungsmaßnahmen in Abhängigkeit von der Grundwasserströmung untersucht. Um den planmäßigen Einsatz des Vereisungsverfahrens in der Praxis zu erhöhen, muss zusätzlich zur Aufgefrierzeit auch die erforderliche Kühlleistung und der damit verbundene Energieverbrauch betrachtet sowie optimiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher eine ganzheitliche Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Hinblick auf die Aufgefrierzeit und insbesondere den Energieverbrauch unter Berücksichtigung der Aufgefrier- und Erhaltungsphase durchgeführt.

Um eine realistische Bestimmung der Kühlleistung zu gewährleisten, müssen alle am Gefrierprozess beteiligten Komponenten (Boden, Grundwasser, Gefrierrohr) sowie deren Interaktion betrachtet werden. Dies erfordert eine numerische Betrachtung. Da geeignete Ansätze zur Bestimmung der Kühlleistung für Vereisungsmaßnahmen bislang aber fehlen, wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei numerische Lösungsmodelle zur Bestimmung der Kühlleistung von Vereisungsmaßnahmen entwickelt. Beide Ansätze wurden in das Finite-Differenzen-Programm SHEMAT-Suite implementiert, das die gekoppelte Simulation von Wärmetransport- und Strömungsprozessen im Boden ermöglicht und bereits auf die Simulation von Vereisungsmaßnahmen angepasst wurde. Die entwickelten numerischen Lösungsmodelle unterscheiden einen vereinfachten und einen detaillierten Ansatz zur Bestimmung der Kühlleistung. Der vereinfachte Ansatz erfasst dabei lediglich den Einfluss des umgebenden Bodens auf die Kühlleistung. Der detaillierte Ansatz hingegen berücksichtigt sowohl den Gefrierrohraufbau und die Wärmetransport- und Strömungsprozesse innerhalb des Gefrierrohrs als auch die Kopplung mit dem umgebenden Boden. Der detaillierte Ansatz zur Bestimmung der Kühlleistung basiert auf der Theorie der thermischen Widerstände und wurde in Zusammenarbeit mit der Geophisica Beratungsgesellschaft mbH entwickelt. Die mathematische Berechnungsgrundlage sowie die numerische Umsetzung wurden zunächst für beide Lösungsmodelle verifiziert. Darauf aufbauend wurden beide Lösungsmodelle durch die Nachrechnung eines Modellversuchs der ETH Zürich validiert. Die Ergebnisse der Nachrechnung haben gezeigt, dass sowohl die Temperaturverteilung im Boden als auch die Kühlleistung mit beiden Lösungsmodellen mit

guter Genauigkeit abgebildet werden kann. Zur Verdeutlichung der Praxistauglichkeit des detaillierten Lösungsmodells wurde weiterhin ein reales Vereisungsprojekt nachgerechnet. Die Ergebnisse dieser Simulation sind insbesondere vor dem Hintergrund der in der Praxis vorliegenden schwierigen Randbedingungen und deren oftmals unzureichender Erfassung als sehr vielversprechend zu bewerten.

Aufbauend auf der Validierung der numerischen Lösungsmodelle wurden die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Aufgefrierzeit und die Kühlleistung während der Aufgefrierphase für eine Querschlagvereisung unter Verwendung des detaillierten Lösungsmodells ermittelt. Dabei konnte die Grundwasserströmung als maßgeblicher Einflussparameter sowohl für die Aufgefrierzeit als auch die Kühlenergie identifiziert werden. Die untersuchten Bodeneigenschaften, wie z.B. der Porenanteil, zeigen ebenfalls eine deutliche Beeinflussung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie, wodurch die Notwendigkeit einer zuverlässigen Baugrunderkundung unterstrichen wird. Obwohl der Einfluss der Eigenschaften des Gefrierrohrs sowie des Kälteträgers, wie z.B. die Vorlauftemperatur, vergleichsweise gering ist, bieten diese die Möglichkeit einer Optimierung im Vorfeld der Vereisungsmaßnahme und damit nutzbare Einsparpotentiale.

Abschließend wurden verschiedene Ansätze zur energetischen Optimierung von Vereisungsmaßnahmen für die Aufgefrier- und Erhaltungsphase in umfangreichen numerischen Simulationen untersucht und bewertet. Für die Aufgefrierphase konnte gezeigt werden, dass das Einbringen zusätzlicher Gefrierrohre zur Vorkühlung im Anstrom des herzustellenden Frostkörpers zu einer deutlichen Verringerung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie führen kann. Zur energetischen Optimierung der Erhaltungsphase wurden verschiedene Betriebsvarianten, ein Betrieb mit einer erhöhten Vorlauftemperatur sowie ein intermittierender Betrieb, untersucht. Die zur Simulation des intermittierenden Betriebs erforderlichen Anpassungen des Programmcodes von SHEMAT-Suite wurden ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit realisiert. Für die Erhaltungsphase konnte somit gezeigt werden, dass mit beiden Betriebsvarianten deutliche Einsparungen der Kühlenergie erreicht werden können. Die effektivste Betriebsvariante in der Erhaltungsphase stellt aber der intermittierende Betrieb dar, weil dieser aufgrund der individuellen Anpassung der zu definierenden Rohrgruppen an die kritischen Bereiche des Frostkörpers nicht nur die größten Energieeinsparungen erzielen kann, sondern auch das weitere Frostkörperwachstum wirksam begrenzt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden numerische Lösungsmodelle zur realistischen Bestimmung der Kühlenergie von Vereisungsmaßnahmen entwickelt, die eine Berücksichtigung aller Wärmetransport- und Strömungsprozesse im Gefrierrohr sowie im Boden ermöglichen. Mit Hilfe des vorliegenden, validierten Planungsinstruments wird somit eine ganzheitliche Optimierung von Vereisungsmaßnahmen in der Planungsphase möglich, die die Aufgefrierzeit und den Energieverbrauch einschließt. Durch numerische Simulationen in der Planungsphase der Vereisungsmaßnahme können folglich Optimierungskombinationen für die Aufgefrier- und die Erhaltungsphase ermittelt werden, die zu deutlichen Zeit-, Energie- und Kosteneinsparungen führen. Letztlich kann somit nicht nur die Wirtschaftlichkeit des Vereisungsverfahrens erhöht, sondern auch der planmäßige Einsatz des Vereisungsverfahrens in der Praxis gesteigert werden.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der stetig wachsende Bedarf an leistungsfähigen Infrastruktureinrichtungen und die dichte Besiedlung im innerstädtischen Bereich erfordern zunehmend die Erschließung unterirdischer Verkehrswege in hydrologisch und geologisch schwierigen Baugrundverhältnissen. Die stete Weiterentwicklung und Verbesserung des maschinellen Tunnelvortriebs in den letzten Jahren ermöglicht heute eine weitestgehend risikoarme Herstellung von unterirdischen Tunneln. Aufgrund erhöhter Sicherheitsanforderungen werden diese Tunnel mit einer Vielzahl an Rettungs- und Fluchtwegen, oftmals in Form von Querschlägen zwischen zwei Tunnelröhren, ausgestattet. Die kurzen Streckenlängen der Querschläge machen zumeist eine bergmännische Herstellung erforderlich. In diesem Zusammenhang kommt das Gefrierverfahren in den letzten Jahren vermehrt zum Einsatz, da es im Gegensatz zu anderen Bodenverbesserungs- bzw. Bauhilfsmaßnahmen die Anforderungen einer Verfestigung sowie einer gleichzeitigen Abdichtung des Baugrunds gegen anstehendes Grundwasser erfüllt. Der anstehende Boden um das geplante Ausbruchprofil wird durch den künstlichen Wärmeentzug temporär gefroren, verfestigt und abgedichtet. Neben dem Vorteil eines zugleich statisch tragfähigen und wasserdichten Frostkörpers wird der umgebende Boden genauso wie das Grundwasser aufgrund der Reversibilität des Gefrierverfahrens nicht nachhaltig beeinflusst. In der Praxis wird beim planmäßigen Einsatz des Gefrierverfahrens trotzdem oftmals gezögert, da der Energieverbrauch aufgrund fehlender Berechnungsansätze nur grob abgeschätzt werden kann und damit Unsicherheiten bei den Kosten für die über einen langen Zeitraum bereitzustellende Kühlleistung entstehen. Das Vorliegen einer Grundwasserströmung verstärkt diesen Energiekosteneffekt noch zusätzlich, da die Kalkulation von Vereisungsmaßnahmen auf vereinfachten Rechenmodellen beruht. Diese Rechenmodelle berücksichtigen die thermischen Einflüsse aus Grundwasserströmungen auf den Frostkörper meist nur unzureichend durch Zuschlagsfaktoren.

Frühere Forschungsarbeiten am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen von Baier (2008) und Ziegler et al. (2010) haben sich hauptsächlich mit dem Einfluss der Grundwasserströmung auf die Aufgefrierzeit beschäftigt. Dabei wurde ein numerisches Lösungsmodell zur Beschreibung des Frostkörperwachstums in nichtbindigen Böden unter Strömungseinfluss entwickelt, das das gekoppelte Wärmetransport- und Grundwasserströmungsproblem löst. Auf Basis dieses an Modellversuchen kalibrierten Lösungsmodells wurden Optimierungsansätze zur Verkürzung der Aufgefrierzeit untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass durch strömungsangepasste Gefrierrohranordnungen deutliche Verringerungen der Aufgefrierzeit erreicht werden können. Um den planmäßigen und wirtschaftlichen Einsatz des Gefrierverfahrens in der Praxis zu steigern, reicht die alleinige Betrachtung und Optimierung der Aufgefrierzeit in der

Aufgefrierphase allerdings nicht aus. Das Ziel einer ganzheitlichen Optimierung des Gefrierverfahrens kann nur erreicht werden, wenn neben der Aufgefrierzeit auch der Energieverbrauch in der Aufgefrier- und insbesondere der Erhaltungsphase analysiert wird. Der Energieverbrauch in der Erhaltungsphase hat, aufgrund der langen Einsatzdauern beim Verfahren der Solevereisung, einen erheblichen Anteil am Gesamtenergieverbrauch einer Vereisungsmaßnahme.

Die Bestimmung der Kühlleistung und damit des Energieverbrauchs beim Gefrierverfahren wurde bislang oftmals vernachlässigt, da die thermisch-hydraulische Kopplung zur Beschreibung des Gefrierfortschritts im Boden im Vordergrund stand. Dadurch fehlen für das Gefrierverfahren Ansätze zur Bestimmung der Kühlleistung, die alle beteiligten Komponenten (Boden, Grundwasser, Gefrierrohr) sowie deren Interaktion beinhalten.

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung von Lösungsmodellen für die Bestimmung des Energieverbrauchs, die eine ganzheitliche Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Hinblick auf die Aufgefrierzeit und den Energieverbrauch bereits in der Planungsphase ermöglichen. Mit Hilfe der entwickelten Planungsinstrumente können im Vorfeld von Vereisungsmaßnahmen Optimierungsvarianten abgeleitet werden, die durch Zeit- und Energieeinsparungen die Wirtschaftlichkeit des Gefrierverfahrens erhöhen. Diese Arbeit soll zeigen, dass durch eine detaillierte Planung von Vereisungsmaßnahmen der planmäßige und wirtschaftliche Einsatz in der Praxis möglich ist.

Die Grundlagen des Gefrierverfahrens werden zunächst in Kapitel 2 beschrieben. Dabei wird sowohl auf das Prinzip und die Technologie des Gefrierverfahrens als auch auf dessen Einsatzbereiche kurz eingegangen.

In Kapitel 3 werden die bisherigen Lösungsansätze und Richtwerte zur Bestimmung bzw. Abschätzung der Kühlleistung zusammengefasst und bewertet. Weiterhin werden Anhaltswerte zur Abschätzung der erforderlichen Kühlleistung von Vereisungsmaßnahmen vorgestellt und bewertet, die durch die Auswertung aktueller Bauprojekte ermittelt wurden.

Die theoretischen Grundlagen des Wärmetransports stellen die Basis für numerische Simulationen von Vereisungsmaßnahmen dar und werden in Kapitel 4 beschrieben. Dabei wird zwischen dem Wärmetransport im Boden und in den Gefrierrohren unterschieden und auf die Interaktion zwischen Boden und Gefrierrohr eingegangen. Weiterhin werden die grundlegenden thermischen Eigenschaften gefrierender Böden sowie die physikalischen Materialeigenschaften von Kälteträgern kurz zusammengefasst.

Auf die Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung mit Hilfe numerischer Simulationen wird in Kapitel 5 eingegangen. Dazu wird zunächst das verwendete Finite-Differenzen-Programm SHEMAT-Suite (Simulator for **H**eat and **M**ass **T**ransfer) vorgestellt. Im Anschluss werden die entwickelten Lösungsmodelle zur Bestimmung bzw. Abschätzung der Kühlleistung von Vereisungsmaßnahmen erläutert. Diese unterscheiden zwischen einem vereinfachten und einem

detaillierten Ansatz, der auf dem Prinzip der thermischen Widerstände basiert. Abschließend werden Weiterentwicklungen des Programms SHEMAT-Suite dargestellt, die eine Simulation verschiedener Betriebsvarianten in der Erhaltungsphase ermöglichen.

Die Überprüfung der numerischen Lösungsmodelle wird in Kapitel 6 beschrieben. Dazu werden sowohl ein Modellversuch als auch ein reales Vereisungsprojekt nachgerechnet und die Ergebnisse vor allem im Hinblick auf die Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung bewertet.

Aufbauend auf der Validierung der Lösungsmodelle werden die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Aufgefrierzeit und insbesondere die Kühlleistung in der Aufgefrierphase für eine fiktive Vereisungsmaßnahme in Kapitel 7 ermittelt. Die numerischen Untersuchungen im Rahmen dieser umfangreichen Parameterstudie werden mit dem detaillierten Lösungsmodell durchgeführt. Dieses ermöglicht die Bestimmung der Einflüsse aus den Bodenparametern sowie aus den Eigenschaften der Gefrierrohre und des Kälteübertragungsstroms.

In Kapitel 8 werden schließlich Ansätze zur Optimierung des Energieverbrauchs der in Kapitel 7 untersuchten fiktiven Vereisungsmaßnahme vorgestellt. Dabei wird zwischen der Aufgefrier- und der Erhaltungsphase unterschieden. Der Schwerpunkt liegt aber auf der Optimierung der Erhaltungsphase, für die verschiedene Betriebsvarianten untersucht und vergleichend bewertet werden. Das Kapitel endet mit einer Bewertung der untersuchten Ansätze zur Optimierung des Energieverbrauchs auf der Basis einer vereinfachten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse sowie einem Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.

2 Das Gefrierverfahren

2.1 Prinzip

Das Verfahren der künstlichen Baugrundvereisung wurde zum ersten Mal im Jahr 1862 bei einem Bergwerksschacht in South Wales eingesetzt (Sanger & Sayles 1978). Im Jahr 1883 wurde das Verfahren schließlich von Friedrich Hermann Poetsch für den Gefrierschachtbau patentiert (Poetsch 1883). Die Hauptanwendung lag zu diesem Zeitpunkt in der Herstellung gewölbartiger Frostkörper, die mit einfachen Rechenmodellen zuverlässig, aber nicht besonders wirtschaftlich bemessen werden konnten. Eine intensive Grundlagenforschung setzte erst ab dem Jahr 1970 ein und führte zu einer enormen Erweiterung der Kenntnisse über gefrorene Böden (Orth 2009).

Das Grundprinzip der künstlichen Bodenvereisung liegt darin, das im ungefrorenen Bodengemisch, bestehend aus Mineralkorn, Wasser und Luft, vorhandene freie Porenwasser durch den künstlichen Wärmeentzug in Eis umzuwandeln. Der entstandene gefrorene Boden kann durch die temporäre Veränderung seiner Eigenschaften sowohl eine statische als auch eine abdichtende Funktion übernehmen. Nach der Fertigstellung des dauerhaften Bauwerks im Schutze des entstandenen Frostkörpers kann der Kühlprozess beendet werden, so dass das im Boden vorhandene Eis wieder auftauen kann.

Im Vergleich mit anderen konventionellen Bauhilfsmaßnahmen weist das Gefrierverfahren bedeutsame Vorteile auf, die es zu einem sicheren und zuverlässigen Verfahren machen. Das Gefrierverfahren kann in nahezu allen Bodenarten angewendet werden, wodurch auch Schichtgrenzen oder Inhomogenitäten im Baugrund keine Beschränkungen darstellen. Der Boden und das Grundwasser werden durch das Verfahren nicht nachhaltig belastet, da der Frostkörper sich rückstandsfrei zurückbildet und die in den Boden eingebrachten Gefrierrohre wieder entfernt werden können. Außerdem weist der Frostkörper eine zusätzliche Schutzfunktion auf, da er auch bei einem Ausfall des Kühlaggregats aufgrund der latenten Wärme nicht direkt auftaut. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Flexibilität des Gefrierverfahrens, die eine Anpassung an unterschiedliche Geometrien ermöglicht. Die Kontrolle der Frostkörperausbreitung im Boden kann dabei während der Maßnahme durch einfache Temperaturmessungen im Boden erfolgen, die ein sicheres und zuverlässiges Monitoring ermöglichen. Außerdem ermöglicht diese ständige Überwachung der Maßnahme eine schnelle Anpassung, so dass auf kritische Bereiche im Frostkörper effektiv reagiert werden kann (Orth 2009). Neben seinen vielfältigen Vorteilen gibt es jedoch auch beim Gefrierverfahren einschränkende Faktoren, wie eine vorliegende Grundwasserströmung oder einen zu geringen Wassergehalt. Eine Vernachlässigung dieser Faktoren kann Probleme bei der Vereisungsmaßnahme zur Folge haben und somit letztlich den wirtschaftlichen Einsatz gefährden. Durch eine sachgemäße und

frühzeitige Berücksichtigung dieser kritischen Faktoren in der Planungsphase der Vereisungsmaßnahme und gezielte Anpassungen können Vereisungsmaßnahmen aber auch in schwierigen Baugrund- und Strömungsverhältnissen erfolgreich und wirtschaftlich durchgeführt werden.

Aufgrund der vielfältigen Vorteile des Gefrierverfahrens haben sich dessen Einsatzbereiche in den letzten Jahren deutlich vergrößert. Neben der ursprünglichen Anwendung im Schacht- bzw. Bergbau wird das Verfahren zunehmend im Bereich von Baugrubensicherungen, Unterfangungen und im Tunnelbau eingesetzt. Im Tunnelbau stellen insbesondere die Herstellung von Querschlägen, die Aufweitung unterirdischer Haltestellen und die Firstsicherung im Anfahrbereich von Tunnelbohrmaschinen aktuelle Einsatzbereiche dar.

2.2 Technologie der Kälteerzeugung

Um das Porenwasser im Boden zu gefrieren und einen statisch tragenden Frostkörper zu erzeugen, muss dem Boden Wärme entzogen werden. Dazu werden doppelwandige koaxiale Gefrierrohre in den Boden eingebracht, in denen ein Kälteflüssigkeit mit negativen Temperaturen zirkuliert. Der Kälteflüssigkeit wird durch das innere Fallrohr eingeleitet und strömt dann im Ringraum zwischen Fall- und Steigrohr wieder zurück. Dabei entzieht der Kälteflüssigkeit dem Boden kontinuierlich Wärme und wird dadurch selbst erwärmt. Generell können zwei Verfahren in Abhängigkeit des verwendeten Kälteflüssigkeit unterschieden werden, die Baugrubensicherung mit Sole und mit flüssigem Stickstoff.

Bei der Stickstoffvereisung wird flüssiger Stickstoff direkt aus einem auf der Baustelle vorhandenen Silo, das mittels Tankwagen befüllt wird, in die Gefrierrohre geleitet (s. Bild 2.1). Dabei verdampft der flüssige Stickstoff bei einer Temperatur von -196°C , strömt gasförmig im Ringraum zurück und wird an die Atmosphäre abgegeben (offener Kreislauf). Die Menge des zugegebenen flüssigen Stickstoffs wird über die gemessene Abgastemperatur gesteuert, die zwischen -70°C und -130°C liegen kann (z.B.: Jessberger & Jagow-Klaff 2001).

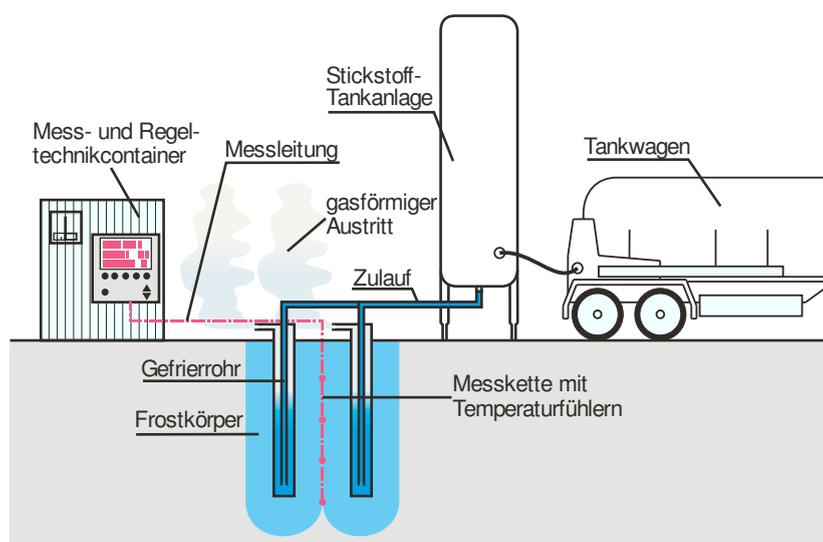


Bild 2.1 Kühlsystem einer Stickstoffvereisung (nach Max Bögl)

Anders als die Stickstoffvereisung besteht die Solevereisung aus einem geschlossenen Kühlsystem, das drei untereinander verbundene Kreisläufe beinhaltet (s. Bild 2.2). Im Kälte-trägerkreislauf zirkuliert meistens eine Calciumchlorid-Sole (CaCl_2 -Sole), die auf bis zu -40°C abgekühlt werden kann. Diese CaCl_2 -Sole wird im Kühlaggregat durch den Kontakt mit dem Kältemittel im Verdampfer abgekühlt. Dazu wird zunächst das gasförmige Kältemittel, meist Ammoniak oder Kohlendioxid, im Kompressor verdichtet. Im Kondensator wird das gasförmige Kältemittel unter konstantem Druck in Kontakt mit dem Kühlwasserkreislauf abgekühlt und dabei verflüssigt. Im Verdampfer wird der Kälte-träger, die CaCl_2 -Sole, dann schließlich durch das Entziehen der Verdampfungswärme bei Kontakt mit dem flüssigen Kältemittel abgekühlt.

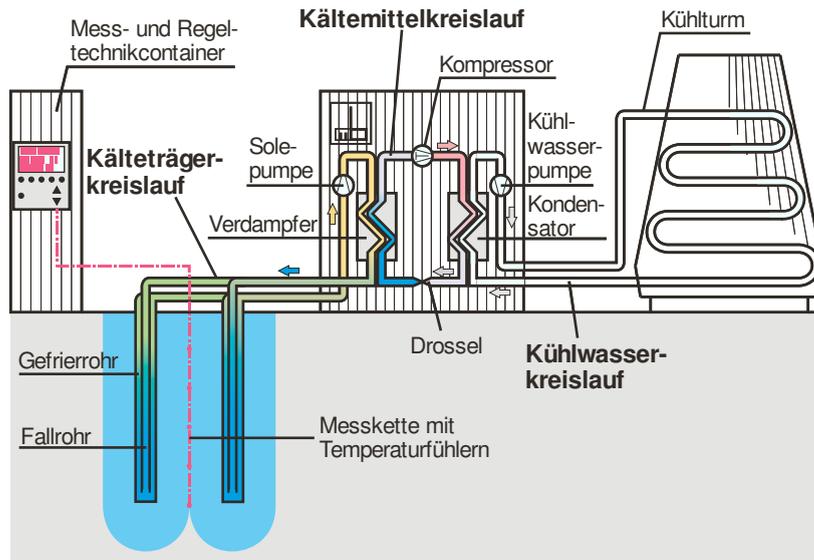


Bild 2.2 Kühlsystem einer Solevereisung (nach Max Bögl)

Im Vergleich zur Stickstoffvereisung erfordert die Solevereisung eine erheblich aufwendigere Baustelleneinrichtung mit einem erhöhten Platzbedarf. Außerdem sind die erreichbaren Temperaturgradienten deutlich geringer als bei der Stickstoffvereisung, die durch das sogenannte „Schockgefrieren“ gekennzeichnet ist. Der wesentliche Vorteil der Solevereisung liegt aber in den vergleichsweise geringen spezifischen Betriebskosten für die Kühlung, die sich hauptsächlich aus den Energiekosten für das Kühlaggregat ergeben. Deshalb kommt die Solevereisung vor allem bei großen und langfristigen Vereisungsmaßnahmen zum Einsatz. Die Stickstoffvereisung wird hingegen aufgrund der hohen Betriebskosten für den verbrauchten Stickstoff nur bei kurzen Haltezeiten und als Notfallmaßnahme eingesetzt, um beispielsweise eine aufgetretene Undichtigkeit kurzfristig zu schließen oder unerwartet hohe Grundwasserströmungen beherrschen zu können. Teilweise kommen auch Kombinationen von Sole- und Stickstoffvereisung zum Einsatz, wie zum Beispiel beim Bau der U-Bahn in Wien (Martak et al. 2005). Die Vorteile einer solchen Kombination wurden bereits am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes mit der Linde AG untersucht. Für detaillierte Ausführungen zu diesen Untersuchungen sei an dieser Stelle auf die Veröffentlichungen von Schmand et al. (2014) und Ziegler et al. (2014) verwiesen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich das Verfahren der Solevereisung behandelt, da diese aufgrund der langen Einsatzdauern ein deutliches Optimierungspotential im Hinblick auf die Aufgefrierzeit und den Energieverbrauch liefert. Außerdem sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Temperaturen im Rahmen dieser Arbeit im Sinne einer baupraktischen Anwendung nicht in der SI-Basiseinheit Kelvin [K], sondern in Grad Celsius [°C] angegeben werden.

2.3 Phasen einer Vereisungsmaßnahme

Grundsätzlich können bei einer Vereisungsmaßnahme drei Phasen unterschieden werden: die Aufgefrierphase, die Erhaltungsphase und die Phase des Abtauens des Frostkörpers. Die Aufgefrierphase, in der das eigentliche Frostkörperwachstum stattfindet, kann weiterhin in zwei Stadien unterteilt werden. Zunächst wächst der Frostkörper um jedes einzelne Gefrierrohr so lange an, bis sich die benachbarten Frostkörper berühren. Dieses Erreichen eines geschlossenen Frostkörpers wird als Schließzeit bezeichnet. Anschließend wächst der Frostkörper bis auf die statisch erforderliche Frostkörperdicke hin an. Die Aufgefrierphase ist also beendet, wenn der Frostkörper sein statisch erforderliches Sollprofil erreicht hat (s. Bild 2.3). Nach dem Erreichen der statisch erforderlichen Frostkörperdicke setzt die sogenannte Erhaltungsphase bzw. Haltephase mit einer deutlich reduzierten Kühlleistung ein. In der Erhaltungsphase soll lediglich der statisch erforderliche Frostkörper mit minimalem Energieeinsatz aufrechterhalten werden. Außerdem gilt es, ein weiteres unnötiges Anwachsen des Frostkörpers zu verhindern. Die Erhaltungsphase endet mit der Fertigstellung und Sicherung des Ausbruchquerschnitts. Im Anschluss folgt das Abschalten des Kühlaggregats, wodurch es zum Auftauen des Frostkörpers kommt. Der Frostkörper taut langsam auf, wobei sich die Frostkörpertemperatur in der Regel aufgrund der Umgebungswärme um ca. 0,5°C bis 0,8°C pro Tag erhöht (Sres 2009).

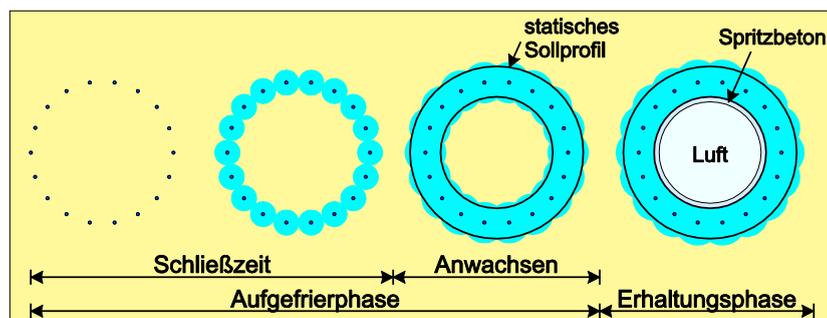


Bild 2.3 Zeitliche Abfolge der Phasen eines Frostkörpers (nach Baier 2008)

Die Betriebsweisen des Kühlaggregats in der Aufgefrier- und Erhaltungsphase unterscheiden sich grundsätzlich. In der Aufgefrierphase wird die volle Gefrierleistung des Kühlaggregats genutzt, um den Frostkörper möglichst schnell aufzufrieren. In der Erhaltungsphase hingegen wird die Gefrierleistung deutlich verringert, da lediglich die herbeigeführte Wärmemenge, z.B. durch strömendes Grundwasser, kompensiert werden muss. Dabei wird zwischen einem intermittierenden Betrieb, der durch ein temperaturabhängiges Ein- und Ausschalten von Gefrierrohren oder des gesamten Kühlaggregats gekennzeichnet ist, und einem durchlaufenden Betrieb mit einer verringerten Kühlleistung bzw. einer erhöhten Vorlauftemperatur unterschieden.

3 Status Quo – Kühlleistung bei Vereisungsmaßnahmen

Um den Energieverbrauch von Vereisungsmaßnahmen bestimmen zu können, muss zunächst die erforderliche Kühlleistung bekannt sein. Die Kühlleistung gibt in diesem Zusammenhang an, welche Wärmemenge dem Boden pro Zeiteinheit entzogen werden kann. Während des Gefrierprozesses nimmt die Kühlleistung mit der Zeit ab, da die Vorlauftemperatur im Kühlaggregat konstant bleibt, der Temperaturgradient zwischen gefrorenem Boden und Gefrierrohr aber immer geringer wird.

Im Allgemeinen wird die Kühlleistung von Vereisungsmaßnahmen von einer Vielzahl an Parametern beeinflusst, so dass ein komplexer Zusammenhang entsteht. Zu diesen Einflussparametern zählen nicht nur die Bodeneigenschaften und die Grundwasserverhältnisse, sondern auch die Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteträgers. Außerdem ergibt sich ein erheblicher Einfluss aus den verschiedenen Phasen der Vereisungsmaßnahme. Aufgrund der großen vorliegenden Temperaturgradienten erreicht die Kühlleistung ihren Maximalwert in der Aufgefrierphase. Folglich muss das Kühlaggregat auf dieser Grundlage dimensioniert werden. Die Kühlleistung in der Erhaltungsphase ist hingegen wegen des langen Vorhaltezeitraums vor allem für den Gesamtenergieverbrauch der Vereisungsmaßnahme von Bedeutung.

In einem ersten Schritt werden die bisherigen in der Literatur vorhandenen Lösungsansätze und Richtwerte zusammengefasst, die zwar eine Abschätzung der Kühlleistung ermöglichen, jedoch nicht alle maßgeblichen Einflussparameter berücksichtigen. Darauf aufbauend werden in einem nächsten Schritt weitere Anhaltswerte durch die Auswertung aktueller Bauprojekte ermittelt.

3.1 Bisherige Lösungsansätze und Richtwerte

In der Literatur finden sich zumeist aus dem Gefrierschachtbau stammende Richtwerte oder vereinfachte Lösungsansätze, die eine Abschätzung der Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme ermöglichen sollen. In allen Fällen wird die Gefrierleistung angegeben, die zum Gefrieren des Bodens aufgebracht werden muss. Verluste innerhalb des Kühlaggregats werden nicht berücksichtigt. Eine zusammenfassende Übersicht der in verschiedenen Literaturquellen zu findenden Richtwerte ist in Tabelle 3.1 gegeben. Die Richtwerte von Ständer (1967), Braun et al. (1979) und Andersland & Ladanyi (2004) entstammen dem Schachtbau. Lediglich der Richtwert von Harris (1995) kann dem Tunnelbau zugeordnet werden. Da die Autoren keine Unterscheidung zwischen der Aufgefrier- und der Erhaltungsphase vornehmen, gelten die angegebenen Richtwerte lediglich für die Aufgefrierphase.

Tabelle 3.1 Richtwerte der Kühlleistung bei Vereisungsmaßnahmen

Quelle	Sole- temperatur	Kühlleistung pro Meter Gefrierrohr	Kühlleistung pro Gefrierrohroberfläche
	[°C]	[W/m]	[W/m ²]
Ständer (1967)	-25	116 – 186 ¹⁾	-
Braun et al. (1979)	-23	Min. 65 (Ø 108 mm) ¹⁾ Allg. 130 (Ø 108 mm) ¹⁾	Mindestens 192 ¹⁾ Allgemein ≥ 384 ¹⁾
Harris (1995)	-30	465 ²⁾	-
Andersland & Ladanyi (2004)	-30	100 – 230 ¹⁾	-

¹⁾ Werte aus Schachtbau ²⁾ Werte aus Tunnelbau

Braun et al. (1979) geben als einzige Richtwerte für die Kühlleistung in Watt pro Quadratmeter Gefrierrohroberfläche an. Um eine direkte Vergleichbarkeit der verschiedenen Richtwerte zu erzielen, wurden die Richtwerte von Braun et al. (1979) exemplarisch für ein Gefrierrohr mit einem Außendurchmesser von 108 mm (van der Meijden 2003) umgerechnet. Somit ergibt sich ein Mindestwert für die Kühlleistung pro Meter Gefrierrohr von 65 W/m. Die Autoren weisen aber darauf hin, dass sich die Annahme einer mehr als doppelt so hohen Kühlleistung in der Praxis als eine gute Verfahrensweise bewährt hat. Dies führt zu Richtwerten für die Kühlleistung, die größer als 130 W/m sein können.

Die Richtwerte weisen alle lediglich eine Abhängigkeit von der Soletemperatur auf ohne jedoch den Temperaturgradienten zwischen Boden und Sole anzugeben und vernachlässigen weitere Einflussfaktoren. Ein Vergleich der Richtwerte zeigt, dass die aus dem Schachtbau stammenden Richtwerte einen großen Streubereich von 65 W/m bis 230 W/m aufweisen. Der von Harris (1995) stammende Wert für den Tunnelbau von 465 W/m weicht im Vergleich zu den Werten aus dem Schachtbau deutlich nach oben ab. Die aus dem Schachtbau stammenden Richtwerte können folglich nicht ohne Anpassung auf Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau übertragen werden, da die äußeren Randbedingungen, wie die Gefrierrohrängen und Einsatzzeiträume, sich deutlich unterscheiden. Diese Randbedingungen sowie weitere vielfältige Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Bodeneigenschaften, finden in den Richtwerten aus der Literatur aber keinen Eingang. Folglich eignen sich die angegebenen Richtwerte nicht für eine konkrete und möglichst realistische Abschätzung der erforderlichen Kühlleistung für Vereisungsmaßnahmen im Tunnel- und Ingenieurbau.

Neben den oben genannten Richtwerten, die lediglich die Soletemperatur als Variationswert aufweisen, finden sich in der Literatur auch vereinfachte Lösungsansätze zur rechnerischen Abschätzung der Kühlleistung. Dabei ist der Ansatz von Huder (1979) zu nennen, der eine Berechnung der erforderlichen Kühlleistung auf Basis der Wärmekapazitäten des ungefrorenen und gefrorenen Bodens sowie der beim Gefriervorgang frei werdenden latenten Schmelzwärme vorgeschlägt. Zur Vereinfachung dieser Betrachtung gibt er zusätzlich eine Faustformel zur Abschätz-

ung des Kühlenergiebedarfs q_v [kWh/m] an, die nur noch vom Wassergehalt w des Bodens abhängt (s. Gleichung (3.1)). Im Gegensatz zu den Richtwerten ist der Ansatz von Huder (1979) lediglich abhängig von Bodeneigenschaften, berücksichtigt aber keine Einflüsse aus den Gefrierrohren oder dem Kühlaggregat, wie beispielsweise die Soletemperatur.

$$q_v = (2,56 \div 3,26) \cdot w \quad (3.1)$$

Eine weitere bekannte Näherungslösung von Sanger & Sayles (1978) zur Bestimmung der Frostausbreitung im Boden enthält neben Formeln für die Schließ- und Aufgefrierzeit auch einen Ansatz zur Bestimmung der Kühlleistung für eine Frostwand. Der Gefrierprozess wird dafür in zwei Phasen aufgeteilt. Die erste Phase beschreibt das radial-symmetrische Ausbreiten des Frostkörpers um ein Einzelrohr bis sich benachbarte Frostkörper berühren, also die Schließzeit erreicht ist. In der zweiten Phase wird das Anwachsen des Frostkörpers bis auf eine definierte Dicke betrachtet. Die Kühlleistung P_I [W/m] in der ersten Phase bestimmt sich nach Gleichung (3.2) aus der Wärmeleitfähigkeit des gefrorenen Bodens λ_g , der Temperaturdifferenz zwischen der Gefrierrohroberfläche T_S und dem Gefrierpunkt von Wasser $T_{0,w}$, sowie aus dem Gefrierrohrradius r_0 und dem Radius bis zur Grenzfläche von gefrorenem und ungefrorenem Boden R_I .

$$P_I = \frac{2 \pi \lambda_g (T_S - T_{0,w})}{\ln\left(\frac{R_I}{r_0}\right)} \quad (3.2)$$

In der zweiten Phase, dem Anwachsen des geschlossenen Frostkörpers, wird die Kühlleistung P_{II} [W/m²] nach Gleichung (3.3) bestimmt, wobei hier die zu gefrierende Wandstärke W eingeht und nicht mehr das Verhältnis der Radien, wie bei Gleichung (3.2).

$$P_{II} = \frac{2 \lambda_g (T_S - T_{0,w})}{0,5 \cdot W} \quad (3.3)$$

Die beiden Formeln beziehen anders als der Ansatz von Huder (1979) nicht nur Bodeneigenschaften, sondern auch Temperaturen im Boden und am Gefrierrohr mit ein. Die Auswertung der Formeln erfordert aber noch eine Integration über den Radius R_I bzw. die Wandstärke W um die Kühlleistung in Summe bestimmen zu können.

Es wird deutlich, dass die vereinfachten analytischen Lösungsansätze von Huder (1979) sowie von Sanger & Sayles (1978) zur Bestimmung der Kühlleistung andere Einflussfaktoren berücksichtigen als die zuvor vorgestellten Richtwerte. Faktoren, wie die Grundwasserströmung, deren enorme Bedeutung bereits von vielen Autoren (z.B. Baier 2008) nachgewiesen wurde, werden jedoch in allen Fällen vernachlässigt. Letztlich kann die Vielzahl und Vielfalt an Einflussfaktoren, bestehend aus den Komponenten Boden, Gefrierrohr und Grundwasser, mit analytischen Ansätzen noch nicht zufriedenstellend abgedeckt werden. Die Komplexität der Einflussfaktoren auf die Kühlleistung von Vereisungsmaßnahmen erfordert vielmehr eine numerische Betrachtung.

Von Cudmani & Nagelsdiek (2006) wurden bereits FE-Berechnungen am Beispiel der Nord-Süd Stadtbahn in Köln mit dem Programm TOCHNOG durchgeführt, um das Kühlaggregat zu dimensionieren. Trotz der Verwendung der FE-Methode konnten die Temperaturabhängigkeit der thermischen Bodeneigenschaften sowie der Einfluss einer Grundwasserströmung in diesem Fall nicht berücksichtigt werden.

Die Literaturrecherche hat somit gezeigt, dass die Kühlleistung bislang weder durch Richtwerte noch durch analytische und numerische Ansätze zufriedenstellend bestimmt werden kann. Es besteht somit weiterer Forschungsbedarf, um die vielfältigen Einflussfaktoren auf die Kühlleistung numerisch abbilden zu können (s. Kapitel 5).

3.2 Auswertung aktueller Bauprojekte

Die Zusammenfassung der Richtwerte aus der Literatur hat bereits gezeigt, dass diese einen erheblichen Streubereich aufweisen und meist aus dem Gefrierschachtbau stammen. Um diesen Streubereich näher eingrenzen zu können und die Richtwerte stärker auf den Tunnelbau zu beziehen, werden weitere Anhaltswerte für die Kühlleistung durch die Auswertung aktueller Bauprojekte abgeschätzt. Außerdem kann mit Hilfe dieser Projektauswertung eine Differenzierung zwischen der Kühlleistung in der Aufgefrier- und Erhaltungsphase erreicht werden, die bislang nicht berücksichtigt wurde. Die Auswertung basiert zumeist auf Projektberichten und –datenblättern und nicht auf Messdaten. Lagen keine Messdaten über die erforderliche Kühlleistung vor, so wurde die auf der Baustelle installierte Gesamtkühlleistung auf die vorhandene gesamte Gefrierrohrlänge bezogen. Aus diesem Vorgehen ergeben sich somit lediglich grobe Richtwerte, da die installierte Leistung der Kühlaggregate nicht der genutzten bzw. erforderlichen Kühlleistung entspricht. Aufgrund der Vielzahl der ausgewerteten Projekte kann über eine abschließende Mittelwertbildung aber trotzdem eine grobe Abschätzung der erforderlichen Kühlleistung ermöglicht werden. Teile dieser Auswertung wurden von Koppmann (2013) erstellt.

Im Folgenden werden zunächst exemplarisch drei der betrachteten Projekte kurz vorgestellt und die Abschätzung der Kühlleistung erläutert. Abschließend werden die Ergebnisse aller ausgewerteten Bauprojekte zusammengefasst und bewertet.

3.2.1 Nord-Süd Stadtbahn Köln

Im Rahmen des Baus der Nord-Süd Stadtbahn in Köln wurden mehrere Teilprojekte mit Hilfe des Vereisungsverfahrens erstellt. Dazu zählt unter anderem die Erstellung eines Stationsbauwerks im Schutze zweier Vereisungskörper. Im Rahmen der Erstellung dieses Stationsbauwerks wurden neben dem Längsvortrieb noch 4 Querschläge mit Hilfe einer Baugrundvereisung hergestellt. Der vorliegende Baugrund in diesem Bereich besteht aus quartären mitteldicht bis dicht gelagerten Sanden mit einer Mächtigkeit von bis zu 40 m, die von tertiären Sanden und Feinsanden unterlagert werden. Durch den nahegelegenen Rhein ist der

örtliche Grundwasserstand Schwankungen unterworfen, die zu unterschiedlich großen Grundwasserströmungen und wechselnden Strömungsrichtungen führen.

Während der Baumaßnahme wurden teilweise bis zu drei Kühlaggregate mit einer Gesamtleistung von ca. 1000 kW gleichzeitig eingesetzt, um eine 30-prozentige Calciumchlorid-Sole (CaCl_2 -Sole) auf eine Vorlauftemperatur von -35°C abzukühlen. Im Rahmen der thermischen und statischen Berechnungen zu diesem Projekt wurden zunächst die Netto-Installationsleistungen ermittelt. Diese wurden dann durch einen Sicherheitszuschlag von 30 %, der unter anderem zur Berücksichtigung der vorhandenen Grundwasserströmung dienen sollte, auf Brutto-Installationsleistungen erhöht. Im Rahmen dieser Arbeit werden zur Bestimmung der Kühlleistung pro Meter Gefrierrohr die Brutto-Installationsleistungen schließlich auf die gesamte Gefrierrohlänge bezogen. Da die thermischen Berechnungen sowohl für die Aufgefrier- als auch für die Erhaltungsphase durchgeführt wurden, konnte in der Auswertung dieses Projekts eine Differenzierung zwischen den beiden Phasen stattfinden. Für die Querschläge ergeben sich somit für die Aufgefrierphase Kühlleistungen von 156 W/m bis 282 W/m. Die Erhaltungsphase benötigt deutlich geringere Kühlleistungen von 52 W/m bis 133 W/m. Die beiden Längsvortriebe weisen im Vergleich zu den Querschlägen höhere Kühlleistungen in der Aufgefrierphase von 364 W/m und 372 W/m sowie in der Erhaltungsphase von 139 W/m und 198 W/m auf.

3.2.2 Bauabschnitt 3.1.1 der U-Bahn in Fürth

Der Bauabschnitt 3.1.1 der U-Bahn in Fürth beinhaltet die Verbindung des Bahnhofs „Stadthalle“ mit den westlich gelegenen Bahnhöfen „Klinikum“ und „Hardhöhe“ (s. Bild 3.1). Der Tunnelvortrieb erfolgte in bergmännischer Bauweise von Ost nach West. Der Untergrund innerhalb des Baugebiets wird durch fein- bis mittelkörnige Sandsteine unterschiedlicher Festigkeiten dominiert. Eine Ausnahme bildet lediglich das westlich des Bahnhofs „Stadthalle“ gelegene Rednitztal. In diesem Bereich fällt der anstehende Keupersandstein schnell von Westen aus bis in eine Tiefe von 15 m unterhalb der GOK ab. Überlagert wird der Keupersandstein von in der Regel enggestuften quartären Sand- und Sand-Kies-Ablagerungen mit einem Feinkornanteil von 5 %. Das Grundwasser im Rednitztal steht unmittelbar unterhalb der GOK an, so dass es im Hochwasserfall zu einer Überschwemmung kommt. Messungen der Grundwasserströmungen im Vorfeld der Ausführung haben Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,14 m/d und 1,25 m/d ergeben (Bayer 2002, Sieler & Pirkl 2002, Pimentel & Anagnostou 2012).

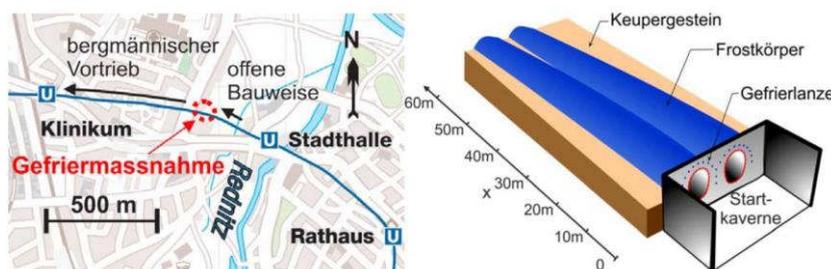


Bild 3.1 Lageplan der Erweiterung und projektierte Gefrierkörper der U-Bahn Fürth (Pimentel & Anagnostou 2012)

Um diese geologischen und hydrologischen Randbedingungen zu beherrschen, wurde der Einsatz einer Baugrundvereisung zur Herstellung von Vereisungskappen für den Ausbruchquerschnitt mit einer Einbindung in den Keupersandstein beschlossen. Der Frostkörper wurde mit 23 Gefrierrohren mit einem Abstand von 1 m und einer maximalen Länge von 56 m aufgefroren. Dabei wurden zwei Kühlaggregate mit einer Leistung von jeweils 465 kW eingesetzt, die eine 30-prozentige CaCl_2 -Sole auf eine Vorlauftemperatur von -40°C abkühlten. In der Erhaltungsphase wurde die Kühlleistung nicht nur gedrosselt, sondern temporär zusätzlich abgeschaltet, um ein weiteres Anwachsen des Frostkörpers zu verhindern (Sieler & Pirkl 2002).

Die Auswertung der installierten Kühlleistung ohne eine Unterscheidung von Aufgefrier- und Erhaltungsphase ergibt eine Kühlleistung pro Meter Gefrierrohr von 722 W/m. Sieler & Pirkl (2002) geben neben der installierten Kühlleistung noch die Ergebnisse der statischen und thermischen Berechnungen für die erforderlichen Kühlleistungen während der Aufgefrier- und Erhaltungsphase an. Diese weichen mit 355 kW für die Aufgefrierphase und 175 kW für die Erhaltungsphase deutlich von der installierten Kühlleistung mit 930 kW ab. Auf Basis dieser Eingangswerte ergeben sich demnach Kühlleistungen pro Meter Gefrierrohr von 276 W/m für die Aufgefrierphase und 136 W/m für die Erhaltungsphase. Die erheblichen Unterschiede zwischen der installierten und der berechneten Kühlleistung ergeben sich möglicherweise dadurch, dass kein Kühlaggregat mit einer kleineren Leistung verfügbar war oder zusätzliche Sicherheitsreserven eingeplant wurden, um die stark schwankende Grundwasserströmung beherrschen zu können.

3.2.3 Unterquerung des Hauptbahnhofs am City-Tunnel in Leipzig

Ein Kernstück des City-Tunnels Leipzig ist die Verbindung der beiden Kopfbahnhöfe „Bayerischer Bahnhof“ im Süden und „Hauptbahnhof Leipzig“ im Norden über zwei schildvorgetriebene Tunnelröhren. Die Unterquerung des historischen Gebäudes des Leipziger Hauptbahnhofs stellte dabei eine besondere Herausforderung dar, weil nicht nur der Betrieb des Schienenverkehrs, sondern auch des Geschäftsbereichs störungsfrei gewährleistet werden musste. Aufgrund dieser und weiterer technischer Randbedingungen wurde ein Teilstück des Stationsbauwerks bergmännisch im Schutz einer Bodenvereisung mit einer Wasserhaltung hergestellt (s. Bild 3.2).

Der Baugrund im Bereich des Hauptbahnhofs besteht aus mitteldicht bis dicht gelagerten Kiesen, die als Flussschotter bezeichnet werden. Unterhalb stehen Fein- und Mittelsande (Bitterfelder Sande) an, die ebenfalls mitteldicht bis dicht gelagert sind. Darunter schließen sich zwei Schluffschichten an, von denen die untere Schicht aus Muschelschluff als Grundwasserstauer wirkt. Das Grundwasser steht im Bereich des Bahnhofs etwa 2 - 4 m unterhalb der GOK an, so dass die Bahnhofssohle im Grundwasser liegt. Insgesamt wurden 1.071 Gefrierrohrbohrungen aus den dargestellten Hilfsstollen abgeteuft. Auf der Baustelle wurden drei Kühlaggregate mit einer Leistung von jeweils 360 kW installiert, um die CaCl_2 -Sole auf eine Vorlauftemperatur von -35°C abzukühlen (Städig & Franz 2009, Bruns et al. 2010).

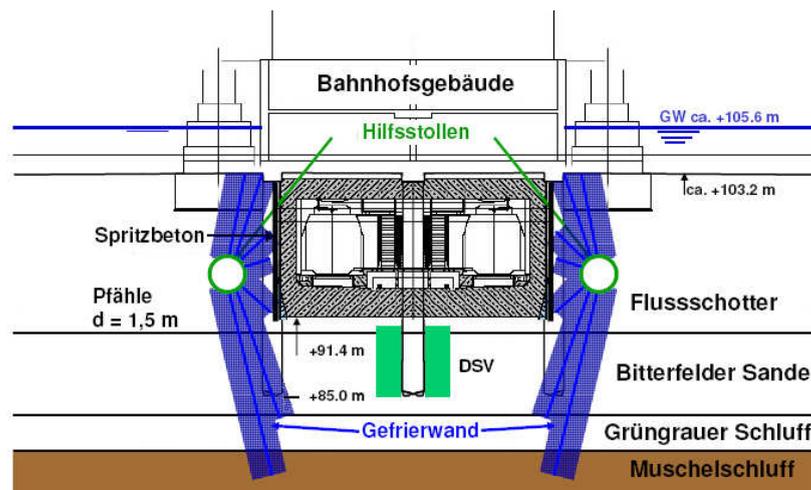


Bild 3.2 Baugrund und Vereisung am Hauptbahnhof in Leipzig (Städling & Franz 2009)

Da die beiden Wände zeitlich versetzt aufgefroren wurden, konnte die maximale Kühlleistung begrenzt werden. Somit ergibt sich die maximal mögliche Kühlleistung pro Meter Gefrierrohr während der Aufgefrierphase unter Ansatz der installierten Leistung zu 262 W/m. Die beiden Frostkörper mussten in der Erhaltungsphase parallel aufrechterhalten werden, so dass sich unter dem Ansatz der vollen installierten Leistung eine Kühlleistung von 131 W/m ergibt. Nach Angaben von Bruns et al. (2010) wurde in der Erhaltungsphase lediglich eine verminderte Kühlleistung genutzt, die aber nicht näher spezifiziert wurde und somit für diese Abschätzung der Anhaltswerte nicht verwendet werden konnte.

3.2.4 Zusammenfassung und Bewertung

Die Auswertung der Projektdaten hat gezeigt, dass teilweise eine Unterscheidung zwischen der Aufgefrier- und der Erhaltungsphase möglich ist, wenn die entsprechende Datenbasis in der Literatur zugänglich ist. Bei Projekten, bei denen keine Unterscheidung zwischen den beiden Phasen möglich war, wurde die Kühlleistung pro Meter Gefrierrohr auf Basis der gesamten installierten Kühlleistung ermittelt und dann der Aufgefrierphase zugeordnet. Die Bewertung dieser Kühlleistungen erfolgt dementsprechend getrennt nach Aufgefrier- und Erhaltungsphase.

Die Ergebnisse der Kühlleistung pro Meter Gefrierrohr während der Aufgefrierphase sind zusammenfassend für alle betrachteten Projekte in Bild 3.3 dargestellt. Es wird deutlich, dass der Großteil der Projekte eine Kühlleistung im Bereich von 200 W/m bis 400 W/m aufweist. Das arithmetische Mittel aller Projekte liegt bei einer Kühlleistung von 290 W/m. Im Vergleich mit den in Kapitel 3.1 erläuterten Richtwerten zeigt sich, dass die aus dem Schachtbau stammenden Richtwerte, die im Bereich von 65 W/m bis 230 W/m liegen, für Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau zu gering sind.

Eine quantitative Abhängigkeit der Kühlleistung von spezifischen Einflussparametern, wie der Bodenart oder der Grundwasserströmung, konnte aufgrund der generellen Streubreite der Ergebnisse nicht ermittelt werden.

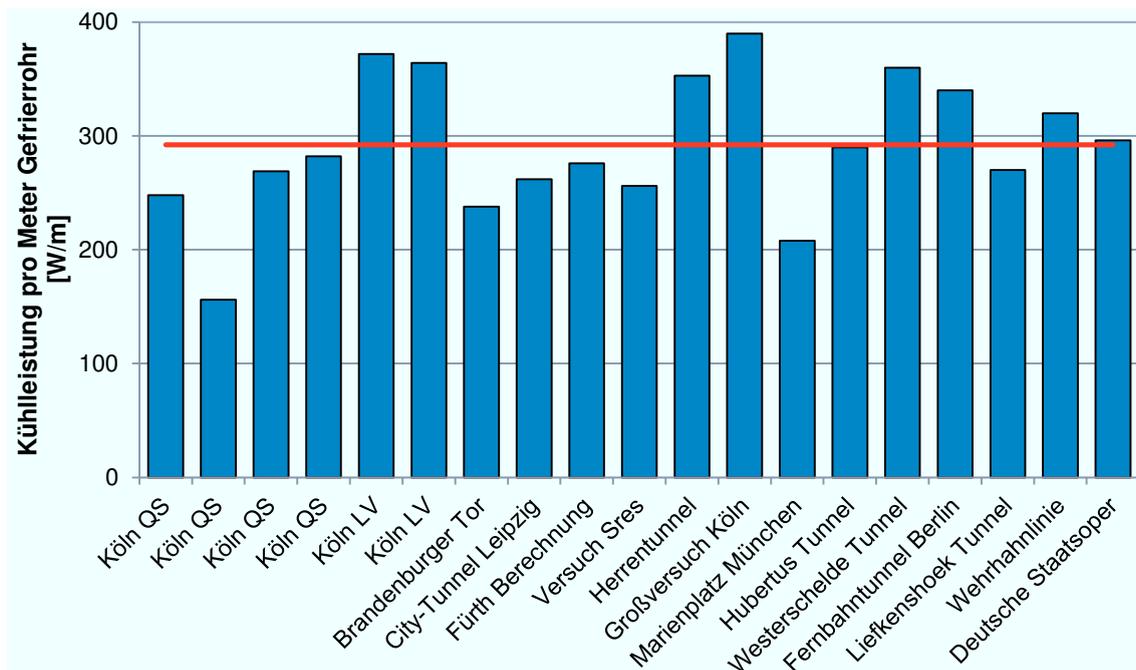


Bild 3.3 Vergleich der Kühlleistungen pro Meter Gefrierrohr in der Aufgefrierphase

Für die Bewertung der Kühlleistung pro Meter Gefrierrohr in der Erhaltungsphase standen wegen der geringen Datenbasis deutlich weniger Projekte zur Verfügung (s. Bild 3.4). Der Mittelwert der Kühlleistung pro Meter Gefrierrohr in der Erhaltungsphase liegt mit 130 W/m deutlich unter dem Mittelwert der Aufgefrierphase mit 290 W/m. Die Gründe hierfür liegen zum einen in den deutlich geringeren Temperaturgradienten in der Erhaltungsphase und zum anderen an dem Einsatz angepasster Betriebsweisen in der Erhaltungsphase, die zu einer weiteren Verringerung der Kühlleistung führen. Ein Vergleich zwischen den ermittelten Anhaltswerten der Aufgefrier- und Erhaltungsphase zeigt, dass die mittlere Kühlleistung in der Erhaltungsphase nur etwa 45 % der mittleren Kühlleistung der Aufgefrierphase entspricht.

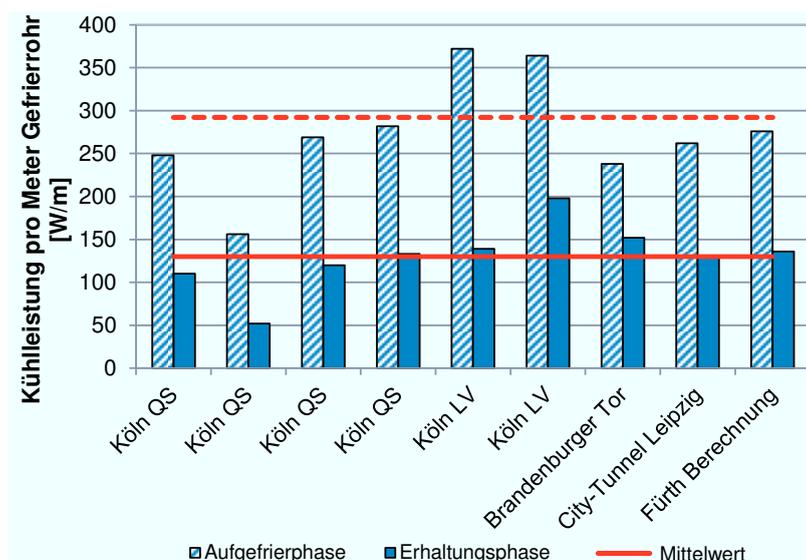


Bild 3.4 Vergleich der ermittelten Kühlleistungen in der Aufgefrier- und Erhaltungsphase

Abschließend ist festzuhalten, dass die Auswertung aktueller Vereisungsprojekte eine Differenzierung zwischen der Kühlleistung in der Aufgefrier- und der Erhaltungsphase ermöglicht, die ansonsten weder mit Richtwerten aus der Literatur noch mit vereinfachten Berechnungsansätzen erzielt werden kann. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die aus dem Schachtbau stammenden Richtwerte nicht auf Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau übertragen werden können, da sie eine zu geringe Kühlleistung angeben. Diese geringere Kühlleistung im Schachtbau resultiert zumeist aus sehr langen Einsatzzeiträumen und einem geringeren Zeitdruck.

Die ermittelten mittleren Kühlleistungen für die Aufgefrierzeit von 290 W/m und für die Erhaltungsphase von 130 W/m sind trotzdem lediglich als grobe Richtwerte zu verstehen, da die Auswertung zum einen die Vielzahl an Einflussparametern nicht detailliert berücksichtigt und zum anderen durch die Auswertung der installierten und nicht der tatsächlich genutzten Kühlleistung Verzerrungen auftreten. Durch diese Art der Auswertung ist es folglich nicht möglich bei eventuell überdimensionierten Kühlaggregaten auf die tatsächlich erforderliche Kühlleistung zu schließen. Wie zum Beispiel das Projekt der U-Bahn in Fürth gezeigt hat, bei dem die installierte Leistung der Kühlaggregate über der theoretisch erforderlichen Kühlleistung liegt. Zu den Gründen zählen zum einen die Einplanung von Sicherheitsreserven und zum anderen die Abdeckung von Verlusten in den Gefrierrohrleitungen sowie den Kühlaggregaten. Außerdem werden Kühlaggregate meist nicht für eine bestimmte Vereisungsmaßnahme angeschafft, sondern kommen mehrfach zum Einsatz. Diese Praxis birgt zunächst auch keine Nachteile, da die Kühlaggregate sich im Betrieb selbst einregeln (Ständer 1967). Die Auswirkung auf den Wirkungsgrad des Kühlaggregats ist bislang aber nicht quantifiziert.

Die Literaturrecherche zu den bisherigen Lösungsansätzen und die Auswertungen der Vereisungsprojekte im Rahmen dieses Kapitels haben letztlich gezeigt, dass die Vielzahl an Einflussfaktoren auf die Kühlleistung weder durch Richtwerte noch durch rein analytische Ansätze oder bislang vorhandene vereinfachte numerische Ansätze berücksichtigt werden kann. Aufgrund der Komplexität des Problems muss die Kühlleistung von Vereisungsmaßnahmen daher mit Hilfe numerischer Berechnungen bestimmt werden, die es ermöglichen alle beteiligten Komponenten (Boden, Grundwasser, Gefrierrohr) sowie deren Interaktion zu berücksichtigen. Erst damit kann eine realistische und verlässliche Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Vereisungsmaßnahmen erzielt werden.

4 Theoretische Grundlagen des Wärmetransports

Um die Frostausbreitung im Boden sowie die bei vorgegebenen Randbedingungen erforderliche Kühlleistung bei der künstlichen Bodenvereisung numerisch simulieren und bestimmen zu können, müssen verschiedene Wärmetransportvorgänge gekoppelt betrachtet werden. Zum einen findet ein Wärmetransport im Boden statt, der bei Vorliegen einer Grundwasserströmung mit dem Wassertransport im Boden gekoppelt werden muss. Zum anderen findet ein Wärmetransport in den Gefrierrohren statt, der zusätzlich mit den Vorgängen im Boden zu koppeln ist. Der Wärmetransport findet dabei stets in Richtung der niedrigeren Temperaturbereiche statt. Als Grundlage für die Bestimmung der Kühlleistung mittels numerischer Simulationen in den folgenden Kapiteln werden in diesem Kapitel zunächst die verschiedenen Wärmetransportmechanismen im Boden und im Gefrierrohr erläutert. Außerdem wird ein kurzer Überblick über die grundlegenden thermischen Eigenschaften gefrierender Böden sowie die physikalischen Materialeigenschaften von Kälteträgern gegeben.

4.1 Wärmetransport im Boden

Die Beschreibung des Wärmetransports im Boden erfordert die Abbildung des Bodens als Mehrphasengemisch, bestehend aus verschiedenen Bodenkomponenten mit unterschiedlichen temperaturabhängigen Eigenschaften. Ein natürlich gewachsener, ungefrorener Boden setzt sich aus den Komponenten Feststoff, Wasser und Luft zusammen und kann somit als Dreiphasen-Modell angesehen werden. Da im Hinblick auf Vereisungsmaßnahmen zumeist eine Voll-sättigung des Bodens vorliegt, wird im ungefrorenen Fall ein Zweiphasen-Modell bestehend aus Boden und Wasser angenommen (s. Bild 4.1).

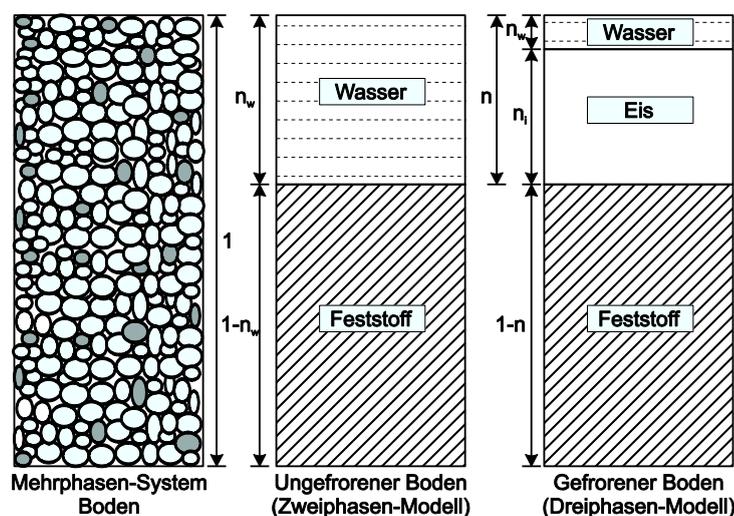


Bild 4.1 Mehrphasenmodell eines vollgesättigten Bodens (nach Baier 2008)

Im Verlauf des Gefrierprozesses reduziert sich der Anteil des Wassers und der Anteil des Eises nimmt zu. Aufgrund von Kapillar- und Adsorptionskräften bleibt aber auch für Temperaturen weit unterhalb des Gefrierpunktes noch ungefrorenes Wasser im Boden zurück, so dass für den gefrorenen Boden drei Phasen zu berücksichtigen sind. Der Anteil des ungefrorenen Wassers wird maßgeblich von der Bodenart beeinflusst und ist vor allem in bindigen Böden aufgrund der größeren spezifischen Oberfläche ausgeprägt (Baier 2008).

Die volumetrischen Anteile der Wasser- und Eisphase am Gesamtvolumen des Bodens werden über den Porenanteil n bestimmt. Dieser ergibt sich nach Gleichung (4.1) aus der Trockendichte ρ_d und der Korndichte ρ_s des Bodens.

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (4.1)$$

Dieser Gesamtporenanteil lässt sich in Abhängigkeit des Zustands des Bodens (gefroren oder ungefroren) unter der Annahme einer bei Vereisungsmaßnahmen vorliegenden Vollsättigung auf die Wasser- und die Eisphase, n_w und n_i , nach Gleichung (4.2) & (4.3) aufteilen.

$$\text{ungefroren: } n = n_w \quad (4.2)$$

$$\text{gefroren: } n = n_w + n_i \quad (4.3)$$

Wärme wird im Boden im Wesentlichen durch die Wärmeleitung, die Konvektion und die Wärmestrahlung transportiert. Eine Übersicht der dominierenden Wärmetransportmechanismen im Boden in Abhängigkeit der Bodenart und des Sättigungsgrads, wenn keine Grundwasserströmung vorhanden ist, liefert Bild 4.2 (Farouki 1986).

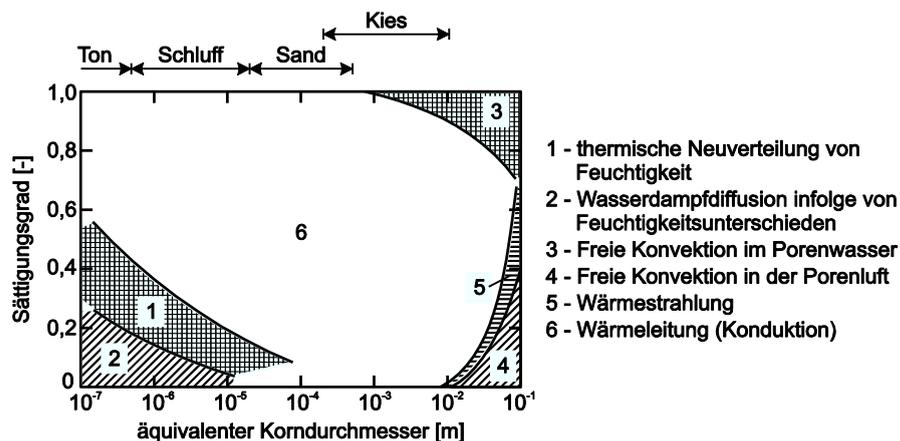


Bild 4.2 Mechanismen des Wärmetransports im Boden (nach Farouki 1986)

Es wird deutlich, dass die Wärmeleitung der vorherrschende Wärmetransportmechanismus in Böden mit hohem Sättigungsgrad ist, wenn keine Grundwasserströmung vorliegt. In sehr groben Böden wird die freie Konvektion im Porenwasser hingegen maßgebend. Der Einfluss weiterer Mechanismen, wie beispielsweise der Wärmestrahlung, wird mit zunehmendem Sättigungsgrad stetig geringer. Im Fall einer Grundwasserströmung ist zusätzlich der Wärmetransport durch die

Strömung in Form von erzwungener Konvektion zu berücksichtigen (Freeze & Cherry 1979). Somit bleibt festzuhalten, dass im Rahmen von Vereisungsmaßnahmen in nichtbindigen Böden die Wärmetransportmechanismen der Konduktion sowie der Konvektion zu betrachten sind.

4.1.1 Konduktion

Die Wärmeleitung bzw. Konduktion, die in allen Bodenkomponenten stattfindet, beschreibt den Wärme- bzw. Energietransport zwischen benachbarten Molekülen aufgrund eines Temperaturgradienten. Bei der Wärmeleitung findet kein Transport von Masse statt.

Das Fouriersche Gesetz beschreibt den Wärmetransport durch Wärmeleitung mathematisch (s. Gleichung (4.4)). Die Wärmeübertragung wird physikalisch durch den Wärmestrom \dot{Q} [W] oder die auf einen bestimmten Querschnitt bezogene Wärmestromdichte \dot{q} [W/m²] beschrieben. Diese ist proportional zur vorhandenen Temperaturdifferenz. Die Proportionalitätskonstante ist die Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)].

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (4.4)$$

Das negative Vorzeichen wird mathematisch zur Erzeugung eines positiven Wärmestroms benötigt, da nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik die Wärmeströmung in Richtung der kälteren Temperaturen stattfindet und somit eine negative Temperaturdifferenz vorliegt.

4.1.2 Konvektion

Die Konvektion beschreibt den Transport thermischer Energie durch eine Teilchenbewegung innerhalb eines strömenden Mediums. Allgemein ist in Abhängigkeit der Antriebsart zwischen natürlicher bzw. freier und erzwungener Konvektion zu unterscheiden. Die Ursache für eine freie Konvektion im Bodenwasser liegt in Dichteunterschieden, die durch Temperaturdifferenzen hervorgerufen werden. Die freie Konvektion kann beispielsweise durch aufwärts gerichtete Dichteströmungen (Auftrieb) des Bodenwassers berücksichtigt werden (Clauser 2003). Für Vereisungsmaßnahmen sind diese Strömungen aber vernachlässigbar im Vergleich zum Einfluss aus erzwungener Konvektion (Freeze & Cherry 1979) und werden deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Die erzwungene Konvektion hingegen wird durch äußere Einflüsse, wie z.B. Druck- oder Potentialunterschiede, hervorgerufen. Die Grundwasserströmung im Boden ist ein typischer Fall einer erzwungenen Konvektion.

Die Beschreibung der erzwungenen Konvektion infolge einer Grundwasserströmung erfordert die Bestimmung der Fließgeschwindigkeit im Boden. Dazu stehen entweder die Abstandsgeschwindigkeit v_a oder die Filtergeschwindigkeit v_f , auch Darcy-Geschwindigkeit genannt, zur Verfügung, die über die effektive Porosität n_{eff} zusammenhängen:

$$v_f = n_{\text{eff}} \cdot v_a \quad (4.5)$$

Die effektive Porosität gibt den Porenanteil an, der tatsächlich zum Wassertransport beiträgt. Demnach sind so genannte „dead-end“ Poren oder Bereiche des Porenraums, in denen Wasser kapillar oder adhäsiv gehalten wird, nicht berücksichtigt. Die effektive Porosität ist stark von der Bodenart abhängig. Bindige Böden weisen im Vergleich zum Gesamtporenraum aufgrund der großen spezifischen Oberfläche deutlich geringere effektive Porositäten auf. Für grobkörnige Böden hingegen ist der Unterschied zwischen effektiver und gesamter Porosität in der Regel vernachlässigbar (Bear 1972).

Für die Beschreibung der erzwungenen Konvektion infolge einer Grundwasserströmung wird die über das gesamte Bodenvolumen gemittelte Filtergeschwindigkeit v_f verwendet. Die Wärmestromdichte infolge erzwungener Konvektion in dreidimensionaler Form ergibt sich zu:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = c_{v,w} \cdot \text{div}(v_f \cdot T) \quad (4.6)$$

Die Filtergeschwindigkeit v_f ergibt sich aus dem Gesetz von Darcy über das Produkt aus dem vorliegenden hydraulischen Gefälle i und dem Durchlässigkeitsbeiwert k_f des Bodens:

$$v_f = k_f \cdot i = \frac{k \cdot g}{v_w} \cdot \text{grad}(h) \quad (4.7)$$

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der kinematischen Viskosität von Wasser v_w [m²/s] ist auch der Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens temperaturabhängig und somit im Gegensatz zur Permeabilität k [m²] keine Bodenkonstante. Das hydraulische Gefälle ergibt sich aus dem Potentialunterschied $\text{grad}(h)$ und beschreibt damit die Ursache der Strömung.

Das Gesetz von Darcy besitzt keine Allgemeingültigkeit, sondern gilt lediglich für laminare Grundwasserströmungen. Für Reynolds-Zahlen Re zwischen 1 und 10 liegen nach Baer (1979) laminare Grundwasserverhältnisse vor. Die Reynolds-Zahl kann für Grundwasserströmungen über den wirksamen Korndurchmesser d_w bestimmt werden und nimmt für natürliche Grundwasserströmungen üblicherweise keine Werte größer als 1 an (Bear 1979).

$$Re = \frac{v_f \cdot d_w}{v_w} \quad (4.8)$$

Bei Vereisungsmaßnahmen können räumlich und zeitlich begrenzte Überschreitungen der für laminare Strömungsverhältnisse maximalen Reynolds-Zahl auftreten, da durch den wachsenden Frostkörper Querschnittsverengungen entstehen, die kurzfristig zu einer lokal begrenzten Erhöhung der Fließgeschwindigkeit führen. Die entstehenden Ungenauigkeiten sind aber vernachlässigbar (Makowski 1986), so dass die Gültigkeit des Gesetzes von Darcy für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit vorausgesetzt werden kann.

4.1.3 Wärmetransportgleichung

Der Wärmetransport im Boden infolge von Wärmeleitung und erzwungener Konvektion kann aus der Energiebilanz an einem Kontrollvolumen, einem Bodenelement, hergeleitet werden. Effekte aus Wärmestrahlung und freier Konvektion werden für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Vereisungsmaßnahmen vernachlässigt. Eine detaillierte Herleitung unter Beschreibung aller getroffenen Annahmen kann Baier (2008) entnommen werden.

Die instationäre Wärmetransportgleichung im Boden lässt sich letztlich unter der Annahme eines isotropen, porösen Mediums und einer laminaren Grundwasserströmung in dreidimensionaler Form durch die folgende Vektorgleichung beschreiben:

$$c_{v,B} \frac{\partial T}{\partial t} = \{\nabla\}^T \cdot (\lambda_B \cdot \{\nabla\}T) - \rho_w \cdot c_{s,w} \cdot \{\nabla\}^T \cdot (T \cdot \{v_f\}) + \dot{q}_t \quad (4.9)$$

Der Term auf der linken Seite der Gleichung beschreibt die zeitliche Änderung des Energieinhalts des betrachteten Kontrollvolumens bzw. Bodenelements. Mit dem ersten Term auf der rechten Seite wird der Wärmestrom infolge von Wärmeleitung berücksichtigt, mit dem zweiten Term der Wärmestrom infolge von Konvektion. Mit dem Quellterm \dot{q}_t [W/m³] können im Boden vorhandene Wärmequellen und -senken berücksichtigt werden. Die Temperaturabhängigkeit der thermischen Bodeneigenschaften ist bei der Bestimmung der Eigenschaften des Bodengemischs zu berücksichtigen (s. Kapitel 4.3.1).

Die Besonderheiten bei der Berechnung von Vereisungsmaßnahmen liegen in der erforderlichen Kopplung zwischen dem Temperatur- und Strömungsfeld, um die Beeinflussung der Randbedingung der Durchlässigkeit für das Strömungsfeld infolge der wandernden Frostgrenze abbilden zu können. Dafür ist die instationäre Wärmetransportgleichung mit der instationären Sickerströmungsgleichung zu koppeln. Dieses Problem wurde bereits im Rahmen der Dissertation von Baier (2008) detailliert behandelt und gelöst. Da mit der aktuellen Version des Programms SHEMAT-Suite demnach eine Beschreibung des gekoppelten Wärmetransport- und Grundwasserströmungsproblems (vgl. Kapitel 5.1) möglich ist, wird SHEMAT-Suite auch für die weiteren Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit genutzt.

4.2 Wärmetransport in den Gefrierrohren

Neben dem Wärmetransport im Boden müssen für eine realistische Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung der Wärmetransport in den Gefrierrohren und im Kontakt mit dem umgebenden Boden betrachtet werden. Die Kopplung der Vorgänge zwischen Gefrierrohr und umgebenden Boden kann über Temperaturen sowie Wärmeströme realisiert werden und wird in Kapitel 5 näher erläutert.

Um den Wärmetransport innerhalb des Gefrierrohrs genau beschreiben zu können, wird der Aufbau eines Gefrierrohrs zunächst noch einmal im Detail betrachtet (s. Bild 4.3). Im Allgemeinen bestehen Gefrierrohre aus zwei koaxial angeordneten Rohren, dem äußeren, geschlossenen Steigrohr aus Stahl, das oftmals als eigentliches Gefrierrohr bezeichnet wird, und einem inneren,

unten offenen Fallrohr aus Polyethylen (PE), das in das Steigrohr eingestellt wird. In Abhängigkeit des eingesetzten Bohrverfahrens wird der äußere Ringraum zwischen Steigrohr und Bohrlochwand gegebenenfalls verfüllt. Der Kälteträger bzw. das Fluid strömt durch das innere Fallrohr mit einer am Rohrbeginn definierten Vorlauftemperatur $T_{F,VL}$ bis zum Boden des Gefrierrohrs. Im äußeren Ringraum strömt das Fluid wieder zurück zum Kühlaggregat, wobei es im Kontakt mit dem Boden erwärmt wird und selbigen dabei abkühlt. Die Rücklaufstemperatur $T_{F,RL}$ ist folglich wärmer als die Vorlauftemperatur des Kälteträgers bzw. Fluids ($T_{F,RL} > T_{F,VL}$).

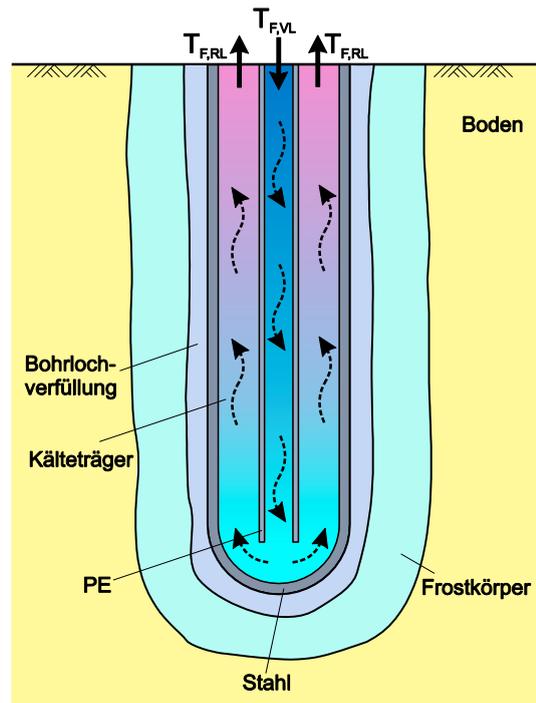


Bild 4.3 Detailaufbau eines Gefrierrohrs mit Rohrströmung

Der Wärmetransport innerhalb der Gefrierrohre setzt sich folglich aus einem Anteil der Konduktion bzw. Wärmeleitung in den Gefrierrohrwänden und ggf. der Bohrlochverfüllung sowie einem Anteil aus erzwungener Konvektion infolge der Rohrströmung des Fluids zusammen. Im Fall eines stehenden Fluids, wie beim intermittierenden Betrieb, ist zusätzlich die Wärmeleitung im Fluid von Bedeutung. Um alle Prozesse des Wärmetransports im Gefrierrohr gekoppelt beschreiben zu können, müssen sowohl die Grundlagen der Fluidmechanik als auch die Grundlagen der Wärmeübertragung beachtet werden.

4.2.1 Fluidmechanische Grundlagen

Bei der Rohrströmung innerhalb der Gefrierrohre handelt es sich um eine reibungsbehaftete Strömung, zu deren Aufrechterhaltung eine bestimmte Energie aufgebracht werden muss, die maßgeblich von der Viskosität des Fluids abhängig ist. Die Viskosität eines Stoffes beschreibt die Verschiebbarkeit der Fluidteilchen durch innere Reibung gegeneinander. Die Viskosität ist, wie auch die weiteren Eigenschaften des Fluids, eine stark temperaturabhängige Stoffgröße. Die Abhängigkeit vom Druck ist im Vergleich dazu vernachlässigbar klein (Sigloch 2012).

Da viele Strömungsprobleme analytisch nicht exakt gelöst werden können, basiert die Beschreibung von Strömungsvorgängen auf der Ähnlichkeitstheorie der Fluid- und Thermodynamik. Die Ähnlichkeitstheorie bedient sich dabei dimensionsloser Kennzahlen. Zwei Strömungsvorgänge können somit als ähnlich angesehen werden, wenn die charakterisierenden geometrischen und physikalischen Kennzahlen an einer vergleichenden Stelle im Strömungsfeld und zu einer entsprechenden Zeit gleich sind (z.B. Truckenbrodt 1996, Sigloch 2012).

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Fluideigenschaften sind auch die dimensionslosen Kennzahlen oftmals temperaturabhängig. Innerhalb eines Gefrierrohrs sind die Temperaturen weder über die Länge noch über den Querschnitt konstant (s. Bild 4.3). Da die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf aber gering ist, konnte in Voruntersuchungen gezeigt werden, dass die Bestimmung der physikalischen Eigenschaften des Fluids sowie der dimensionslosen Kennzahlen mit einer mittleren Fluidtemperatur $T_{F,m}$ nach Gleichung (4.10) lediglich vernachlässigbar geringe Abweichungen ergibt. Somit erfolgt die Bestimmung der Fluideigenschaften sowie der Kennzahlen im weiteren Verlauf vereinfachend mit der mittleren Fluidtemperatur.

$$T_{F,m} = \frac{T_{F,VL} + T_{F,RL}}{2} \quad (4.10)$$

Die wichtigste Kennzahl der Fluidmechanik ist die Reynolds-Zahl Re , da diese die Strömungsform in Abhängigkeit von der Trägheit und der Viskosität des Fluids bestimmt. Diese kann allgemein nach Gleichung (4.11) mit der Strömungsgeschwindigkeit des Fluids v , der kinematischen Viskosität des Fluids ν_F und der charakteristischen Länge L_0 bestimmt werden. Die charakteristische Länge entspricht bei Kreisquerschnitten dem Innendurchmesser d_i .

$$Re = \frac{v \cdot L_0}{\nu_F} = \frac{v \cdot d_i}{\nu_F} \quad (4.11)$$

In Abhängigkeit der Reynolds-Zahl lassen sich drei verschiedene Strömungsformen im Rohr unterscheiden:

- $Re < 2.300$ laminare Strömung
- $2.300 < Re < 10.000$ Übergangsbereich zwischen laminarer & turbulenter Strömung
- $Re > 10.000$ turbulente Strömung

Laminare Strömungen liegen vor allem bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten vor. Die Fluidteilchen bewegen sich dabei auf parallelen, voneinander getrennten Bahnen, ohne dass eine Durchmischung in Querrichtung stattfindet. Die laminare Strömung ist somit durch einen hohen Grad an Ordnung gekennzeichnet. Im Gegensatz dazu findet bei einer turbulenten Strömung eine Überlagerung der Hauptströmungsbewegung mit zeitlich und räumlich ungeordneten zufallsbedingten Längs- und Querbewegungen statt. Die turbulente Strömung ist demnach durch eine intensive Durchmischung gekennzeichnet (Sigloch 2012, Truckenbrodt 1996). Im Übergangsbereich zwischen reiner laminarer und turbulenter Strömung liegt eine instabile laminare Strömung vor, die bereits durch kleine Störungen in eine zeitweise turbulente Strömung umschlagen kann (Marek & Nitsche 2012).

Eine Verbindung zwischen dem Geschwindigkeitsfeld, das über die Reynolds-Zahl charakterisiert wird, und dem Temperaturfeld im strömenden Fluid kann mit Hilfe der Prandtl-Zahl Pr hergestellt werden. Die Prandtl-Zahl ist eine reine Stoffgröße, die sich aus dem Quotient von kinematischer Viskosität ν_F und Temperaturleitfähigkeit $a_{T,F}$ des Fluids ergibt (s. Gleichung (4.12)). Die Temperaturleitfähigkeit lässt sich dabei als Verhältnis von Wärmeleitfähigkeit λ_F und volumetrischer Wärmekapazität $c_{v,F}$ des Fluids darstellen.

$$Pr = \frac{\nu_F}{a_{T,F}} = \frac{\nu_F \cdot c_{v,F}}{\lambda_F} \quad (4.12)$$

Die Péclet-Zahl Pe beschreibt das Verhältnis von konvektivem zu konduktivem Wärmetransport und wird aus dem Produkt der Reynolds- und der Prandtl-Zahl gebildet:

$$Pe = Re \cdot Pr \quad (4.13)$$

Zur Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs dient die Nusselt-Zahl Nu . Diese setzt den Wärmeübergangskoeffizienten α [$W/(m^2K)$], die charakteristische Länge L_0 und die Wärmeleitfähigkeit des Fluids λ_F in Beziehung:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L_0}{\lambda_F} \quad (4.14)$$

Die Nusselt-Zahl ist die dimensionslose Kennzahl des Wärmeübergangskoeffizienten und selbst abhängig vom Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil innerhalb des Rohrs. Das Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil eines strömenden Fluids in einem Rohr infolge erzwungener Konvektion kann mit den erläuterten dimensionslosen Kennzahlen (Re , Pr & Pe) beschrieben werden (Marek & Nitsche 2012). In Kapitel 4.2.4 wird die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten auf Basis der Nusselt-Zahl und der weiteren dimensionslosen Kennzahlen detailliert erläutert.

Die verschiedenen Strömungsformen, laminar und turbulent, führen im Rohr zu unterschiedlichen, voll ausgebildeten Geschwindigkeitsprofilen (s. Bild 4.4). Im Grenzbereich zwischen strömendem Fluid und starrer Wand wird das Fluid durch den Reibungseinfluss abgebremst. Aufgrund der Kontinuität wird die Kernströmung entsprechend beschleunigt. Es entsteht eine Grenzschicht mit einem deutlichen Geschwindigkeitsgradienten zwischen dem ruhenden Fluid an der Rohrwand und der Kernströmung (Truckenbrodt 1996, Sigloch 2012).

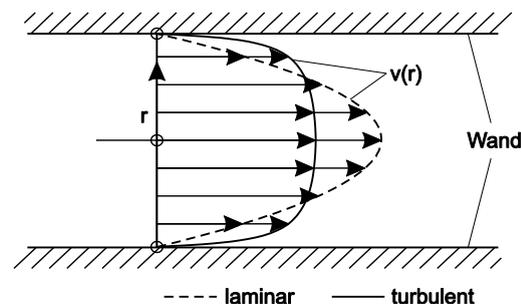


Bild 4.4 Geschwindigkeitsprofile einer laminaren und turbulenten Strömung (nach Truckenbrodt 1996)

Sowohl die laminare als auch die turbulente Strömung weisen parabolische Geschwindigkeitsverteilungen auf. Für die laminare Strömung zeigt sich eine deutliche Veränderung des Geschwindigkeitsprofils über den Rohrquerschnitt aufgrund des Grenzschichteinflusses. Die Geschwindigkeitsverteilung einer turbulenten Strömung ist aufgrund der Turbulenzbewegung über den Querschnitt gleichmäßiger und das Geschwindigkeitsprofil insgesamt flacher. Die mittlere Geschwindigkeit einer laminaren Rohrströmung entspricht nur etwa 50 % der maximalen Strömungsgeschwindigkeit, bei der turbulenten Strömung liegt der Wert hingegen bei etwa 83 % (Truckenbrodt 1996, Baehr & Stephan 2006).

Beim Einströmen eines Fluids in ein Rohr ergibt sich im Einlaufbereich zunächst ein konstantes Temperatur- bzw. Geschwindigkeitsprofil. Mit zunehmendem Abstand vom Einlaufbereich verändert sich das Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil aufgrund des Reibungseinflusses an der Rohrwand stetig bis die Grenzschicht den gesamten Rohrquerschnitt einnimmt (s. Bild 4.5). Ab dieser Stelle liegt dann eine thermisch und hydrodynamisch vollständig ausgebildete Rohrströmung vor (Marek & Nitsche 2012, Baehr & Stephan 2006).

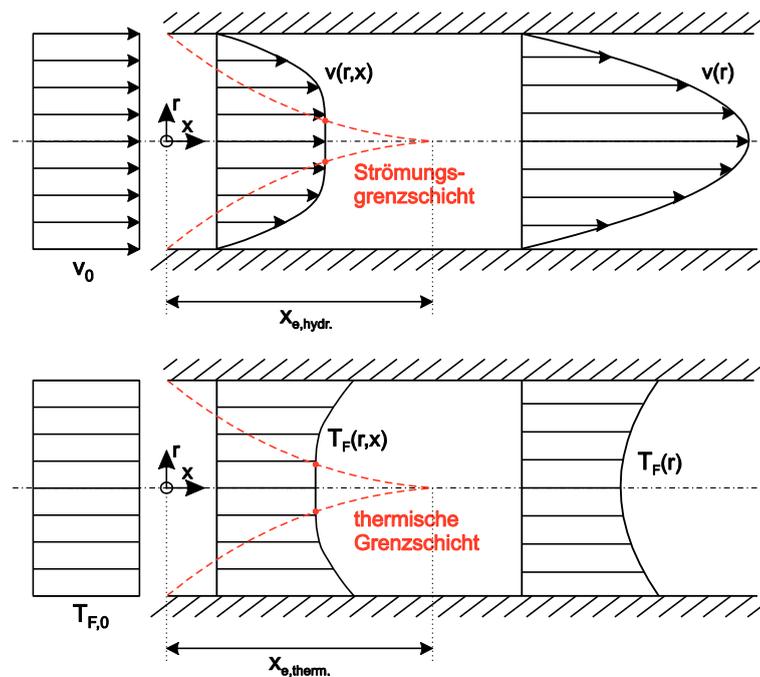


Bild 4.5 Geschwindigkeits- und Temperaturprofil mit Einlaufänge bei laminarer Rohrströmung (nach Marek & Nitsche 2012)

Die thermische sowie hydrodynamische Einlaufänge, die zur vollständigen Ausbildung des Temperatur- bzw. Geschwindigkeitsprofils benötigt wird, ist abhängig von der vorliegenden Strömungsform. Für eine laminare Strömung kann die hydrodynamische Einlaufänge $x_{e,hydr.}$ nach Stephan (1959) mit Gleichung (4.15) abgeschätzt werden. Die thermische Einlaufänge $x_{e,therm.}$ ergibt sich nach Marek & Nitsche (2012) für die Randbedingung einer konstanten Wandtemperatur T_w nach Gleichung (4.16) und für die Randbedingung einer konstanten Wärmestromdichte \dot{q}_w nach Gleichung (4.17).

$$x_{e,\text{hydr.}} \approx 0,065 \cdot \text{Re} \cdot d_i \quad (4.15)$$

$$x_{e,\text{therm.}} = 0,0335 \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot d_i \quad (T_w = \text{const.}) \quad (4.16)$$

$$x_{e,\text{therm.}} = 0,043 \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot d_i \quad (\dot{q}_w = \text{const.}) \quad (4.17)$$

Eine turbulente Strömung ist wegen des intensiven Impulsaustausches infolge der Querbewegungen der Fluidteilchen bereits nach einer sehr kurzen Einlaufänge x_e sowohl hydrodynamisch als auch thermisch vollständig ausgebildet und bestimmt sich nach (Baehr & Stephan 2006) zu:

$$x_e \approx 10 \cdot d_i \quad (4.18)$$

4.2.2 Konduktion

Die Wärmeleitung bzw. Konduktion stellt vor allem in Festkörpern den maßgebenden Wärmetransportmechanismus dar. In strömenden Fluiden hingegen überwiegt der konvektive Wärmetransport, so dass die Wärmeleitung vernachlässigt werden kann (Baehr & Stephan 2006). Lediglich im Fall eines stehenden Fluids, wie es beim intermittierenden Betrieb zeitweise vorliegt, ist die Wärmeleitung im Fluid von Bedeutung.

Der Wärmestrom in radialer Richtung infolge von Konduktion in einem Gefrierrohr der Länge L_{GR} ergibt sich für die vorliegende Zylindergeometrie für n -Schichten nach Gleichung (4.19).

$$\dot{Q}_{\text{Konduktion,radial}} = \sum_j^n 2\pi \cdot \lambda_j \cdot \frac{T_{aj} - T_{ij}}{\ln\left(\frac{r_{aj}}{r_{ij}}\right)} \cdot L_{GR} \quad (4.19)$$

Hierin beschreibt λ_j die Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Schichten des Gefrierrohrs, bestehend aus Fall- und Steigrohr und ggf. Bohrlochverfüllung. T_{aj} und T_{ij} kennzeichnen die Außen- und Innentemperaturen sowie r_{aj} und r_{ij} den Außen- und Innenradius der jeweiligen Schicht.

Die Wärmeleitung kann auch über den thermischen Widerstand R [K/W] dargestellt werden, der sich als Quotient aus der Temperaturdifferenz ΔT und dem Wärmestrom \dot{Q} ergibt. Gleichung (4.20) gibt den thermischen Widerstand infolge von Wärmeleitung beispielhaft für das äußere Steigrohr des Gefrierrohrs aus Stahl an:

$$R_{\text{Konduktion,radial}} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}{2\pi \cdot \lambda_{\text{Stahl}} \cdot L_{GR}} \quad (4.20)$$

Im stehenden Fluid berechnet sich die Wärmeleitung in axialer Richtung für eine kreisförmige Grundfläche wie folgt:

$$\dot{Q}_{\text{Konduktion,axial}} = \pi \cdot r_i^2 \cdot \lambda_F \cdot \frac{\Delta T}{L_{GR}} \quad (4.21)$$

Der daraus resultierende thermische Widerstand ergibt sich schließlich zu:

$$R = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{L_{GR}}{\pi \cdot r_i^2 \cdot \lambda_F} \quad (4.22)$$

4.2.3 Konvektion

Bei Rohrströmungen ist, genau wie im Boden, sowohl ein Wärmetransport infolge freier als auch erzwungener Konvektion möglich. Der Einfluss der freien Konvektion kann im Rahmen von Vereisungsmaßnahmen vernachlässigt werden, da in Gefrierrohren Reynolds-Zahlen erreicht werden, die weit über der kritischen Reynolds-Zahl von 100 liegen, unterhalb derer eine Berücksichtigung erforderlich wäre (Hellström 1991). Der Wärmetransport in radialer Richtung infolge erzwungener Konvektion ist proportional zum Temperaturgradienten zwischen Rohrwand- und Fluidtemperatur ($T_W - T_F$) und ergibt sich zu:

$$\dot{Q}_{\text{Konvektion,radial}} = \alpha \cdot (T_W - T_F) \cdot A \quad (4.23)$$

Die Proportionalitätskonstante ist der Wärmeübergangskoeffizient α , der vom Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil des Fluids abhängt, das wiederum mit Hilfe der dimensionslosen Kennzahlen beschrieben werden kann. Um den Wärmeübergangskoeffizienten mit dem Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil zu verknüpfen, werden die Vorgänge in unmittelbarer Wandnähe betrachtet. Direkt an der Rohrwand liegt aufgrund der Haftbedingung des Fluids keine Strömung vor. Der Wärmetransport findet dort also ausschließlich durch Wärmeleitung statt. Folglich kann Gleichung (4.23) wie folgt erweitert werden:

$$\dot{Q}_{\text{Konvektion,radial}} = \alpha \cdot (T_W - T_F) \cdot A = -\lambda_F \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot A \quad (4.24)$$

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

$$\alpha = -\lambda_F \cdot \frac{\frac{\partial T}{\partial x}}{(T_W - T_F)} \quad (4.25)$$

Demnach wird der Wärmeübergangskoeffizient durch die Steigung des Temperaturprofils an der Rohrwand und aus der Differenz zwischen Wand- und Fluidtemperatur bestimmt (s. Bild 4.6).

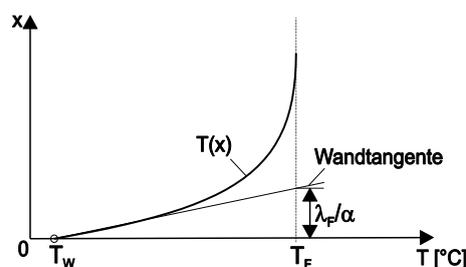


Bild 4.6 Temperaturverlauf im strömenden Fluid als Funktion des Wandabstands (nach Baehr & Stephan 2006).

Die grafische Darstellung verdeutlicht, dass der Wärmestrom infolge von Konvektion maßgeblich von der Steigung des Temperaturprofils in der Grenzschicht abhängt. Die Dicke der Grenzschicht entspricht dabei in etwa dem Verhältnis λ_F/α (Baehr & Stephan 2006). Demnach werden in dünnen Grenzschichten aufgrund eines steileren Temperaturanstiegs in der Grenzschicht größere Wärmeübergangskoeffizienten und somit auch ein besserer Wärmeübergang erzielt. Folglich weisen turbulente Strömungsverhältnisse einen besseren Wärmeübergang auf als laminare Strömungsverhältnisse (vgl. Bild 4.4).

Eine exakte Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten mittels des vorgestellten Vorgehens ist in der Praxis aufgrund der zumeist fehlenden Kenntnis des Geschwindigkeitsprofils und der Grenzschichtdicke nicht möglich. Eine näherungsweise Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten kann aber mit Hilfe der dimensionslosen Nusselt-Zahl (Gleichung (4.14)) erfolgen. Somit kann der Wärmetransport infolge von erzwungener Konvektion aufbauend auf Gleichung (4.23) wie folgt berechnet werden:

$$\dot{Q}_{\text{Konvektion}} = \alpha \cdot (T_W - T_F) \cdot A = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_F}{d_i} \cdot (T_W - T_F) \cdot 2\pi \cdot r_i \cdot L_{\text{GR}} \quad (4.26)$$

Der thermische Widerstand aus Konvektion beträgt somit:

$$R_{\text{Konvektion}} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{1}{\pi \cdot \lambda_F \cdot \text{Nu} \cdot L_{\text{GR}}} \quad (4.27)$$

Die Nusselt-Zahl, die selbst sowohl vom Temperatur- als auch vom Geschwindigkeitsprofil abhängig ist, stellt somit die wesentliche Kenngröße zur Bestimmung des konvektiven Wärmetransports dar. Die Zusammenhänge zwischen der Nusselt-Zahl und den weiteren dimensionslosen Kennzahlen zur Beschreibung einer Rohrströmung wurden in den letzten Jahren von zahlreichen Autoren auf Basis unterschiedlicher experimenteller Untersuchungen erforscht. Die erforderlichen Zusammenhänge und Korrelationen zur Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs innerhalb eines Gefrierrohrs werden im folgenden Kapitel detailliert behandelt.

4.2.4 Nusselt-Zahl zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten

Für die Ermittlung der dimensionslosen Nusselt-Zahl steht mittlerweile aufgrund der Forschung der letzten Jahre eine Vielzahl an Korrelationen für verschiedene Problemstellungen und Randbedingungen zur Verfügung. Diese Korrelationen wurden hauptsächlich durch den Vergleich mit Versuchsdaten ermittelt. Zunächst werden die Randbedingungen der verschiedenen Korrelationen diskutiert und auf Vereisungsmaßnahmen übertragen. Im Anschluss werden die im Fall von Vereisungsmaßnahmen maßgebenden Korrelationen vorgestellt.

Die bei Vereisungsmaßnahmen eingesetzten Gefrierrohre bestehen, wie bereits erläutert, aus einem inneren Fallrohr aus PE und einem äußeren Steigrohr aus Stahl. Folglich sind zwei Strömungsvorgänge im Gefrierrohr zu unterscheiden, eine Rohrströmung durch das innere

Fallrohr und eine Strömung im konzentrischen Ringspalt zwischen Fall- und Steigrohr. In der Literatur finden sich Korrelationen zur Berechnung der Nusselt-Zahl, die zwischen einer Rohrströmung und einer Strömung im konzentrischen Ringspalt unterscheiden.

Da der konvektive Wärmetransport von den Strömungsverhältnissen abhängig ist, differenzieren alle Korrelationen zur Bestimmung der Nusselt-Zahl zwischen laminarer und turbulenter Strömung sowie einer Strömung im Übergangsbereich. Innerhalb eines Gefrierrohrs können aufgrund der Einstellung und Variation des Durchflusses alle Strömungsformen erreicht werden, so dass eine Unterscheidung der Nusselt-Zahl in Abhängigkeit der Strömungsform für Gefrierrohre notwendig wird. Neben der Strömungsform hat weiterhin die Ausbildung des Geschwindigkeits- und Temperaturprofils einen Einfluss auf den konvektiven Wärmetransport und somit auch auf die Bestimmung der Nusselt-Zahl. Dabei ist zwischen den in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Arten der hydrodynamischen und thermischen Strömungsbildung zu unterscheiden. Welche Fälle innerhalb eines Gefrierrohrs zu berücksichtigen sind, wird im Folgenden erläutert.

Das im Kühlaggregat heruntergekühlte Fluid strömt durch isolierte Rohrleitungen in das Fallrohr. Unter der Annahme eines gleichen Querschnitts von Zuleitungsrohren und Fallrohr kann aufgrund der zurückgelegten Strecke in den Zuleitungsrohren im Fallrohr von einer hydrodynamisch ausgebildeten Rohrströmung ausgegangen werden. Beim Eintritt des Fluids in das Fallrohr verändert sich das Temperaturfeld in der Umgebung, so dass sich das Temperaturprofil im Fluid neu einstellen muss. Im Fallrohr des Gefrierrohrs kann folglich von einer hydrodynamisch ausgebildeten Rohrströmung mit thermischem Anlauf ausgegangen werden.

Das Fluid strömt dann vom Fallrohr in den Ringraum zwischen Fall- und Steigrohr und bedarf aufgrund der Querschnittsveränderung einer gesonderten Betrachtung. Die vorliegende Querschnittsveränderung beim Übergang vom Fallrohr in den Ringraum führt aus Kontinuitätsgründen zu einer Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit. Außerdem weichen die Temperaturen zwischen Fluid und Steigrohr beim Eintritt des Fluids in den Ringraum voneinander ab. Folglich müssen sich sowohl das Geschwindigkeits- als auch das Temperaturprofil im Ringraum neu ausbilden. Bei der Strömung im konzentrischen Ringspalt, handelt es sich demnach um eine Strömung mit gleichzeitigem hydrodynamischen und thermischen Anlauf.

In der Literatur finden sich eine Vielzahl von Ansätzen zur Berechnung der Nusselt-Zahl für eine Rohrströmung, die alle auf Versuchsdaten basieren, teilweise aber deutlich abweichende Ergebnisse liefern. Im Rahmen einer Vorstudie (Koppmann 2013) wurden verschiedene Ansätze zur Berechnung der Nusselt-Zahl von Churchill (1997), Baehr & Stephan (2006), Glück (2007) und Gnielinski (2013) untersucht und vergleichend bewertet. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die Ansätze deutlich unterschiedliche Nusselt-Zahlen ergeben, sich diese Unterschiede aber nur geringfügig auf die Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme auswirken. Die Ansätze von Gnielinski (2013) aus dem VDI-Wärmeatlas, die auf früheren Forschungsergebnissen von Gnielinski beruhen (z.B. Gnielinski 1995), werden in der Literatur empfohlen und zeigen sehr gute Übereinstimmungen mit Messwerten (Huber & Walter 2010, Böckh & Wetzel 2011). Für die Bestimmung der Nusselt-Zahl im konzentrischen Ringspalt

liegen deutlich weniger Ansätze vor, so dass hier den Empfehlungen des anerkannten technischen Regelwerks des VDI-Wärmeatlasses gefolgt wird und ebenfalls ein Ansatz von Gnielinski (2013) gewählt wird.

In weiteren Voruntersuchungen (u.a. Koppmann 2013) wurde die Verwendung einer mittleren Nusselt-Zahl im Vergleich zu einer lokalen Nusselt-Zahl überprüft. Die mittlere Nusselt-Zahl wird einmalig für das gesamte Gefrierrohr bestimmt, die lokale Nusselt-Zahl hingegen wird an mehreren definierten Stellen ermittelt. Die Ergebnisse zeigen lediglich in einem kleinen Bereich am Rohranfang größere Abweichungen, auf der restlichen Rohrlänge werden hingegen nur geringe Abweichungen ermittelt. Im Rahmen dieser Arbeit werden folglich vereinfachend nur zwei mittlere Nusselt-Zahlen, jeweils für das Fallrohr und den Ringraum, betrachtet, deren Ermittlung auf einer mittleren Fluidtemperatur nach Gleichung (4.10) basiert. Weiterhin sei an dieser Stelle erwähnt, dass eine radiale Wärmeübertragung innerhalb des Fluid aufgrund eines Temperaturgradienten zwischen Rohrwand und Rohrachse (Gnielinski 2013) im Rahmen von Vereisungsmaßnahmen aufgrund eines sehr geringen Temperaturgradienten vernachlässigt werden kann.

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Ansätze von Gnielinski (2013) aus dem VDI-Wärmeatlas sowohl für eine Rohrströmung als auch für eine Strömung im konzentrischen Ringspalt in Abhängigkeit der Strömungsform (laminar, turbulent, Übergangsbereich) und der Randbedingungen der Strömungsentwicklung (hydrodynamischer und / oder thermischer Anlauf, vollständig ausgebildete Strömung) vorgestellt.

4.2.4.1 Nusselt-Zahl bei der Rohrströmung

Die Korrelationen zur Bestimmung der Nusselt-Zahl für eine Rohrströmung basieren großteils auf Versuchsergebnissen an Wärmeüberträgern, die zwischen der Randbedingung einer konstanten Wärmestromdichte und einer konstanten Wandtemperatur unterscheiden. Eine konstante Wärmestromdichte liegt vor, wenn beispielsweise ein Fluid innerhalb eines Rohres elektrisch erwärmt wird. Dabei bleibt der Temperaturgradient zwischen Wand und Fluid über die gesamte Rohrlänge konstant, so dass die Wärmestromdichte ebenfalls konstant bleibt. Die Randbedingung einer konstanten Wandtemperatur kann zum Beispiel in Gegenstromwärmetauschern erreicht werden, in denen die Wärmeübergangskoeffizienten der beiden Fluide entweder ungefähr gleich groß sind oder sehr stark voneinander abweichen. In diesem Fall kann näherungsweise von einer konstanten Wandtemperatur ausgegangen werden (Hallquist 2011).

Die Verhältnisse im Fallrohr eines Gefrierrohrs können mit beiden Randbedingungen nicht uneingeschränkt wiedergegeben werden. Zu Beginn einer Vereisungsmaßnahme kann die Bodentemperatur als nahezu konstant angesehen werden. Im Zuge der Vereisung wird der Boden aber stetig abgekühlt. Die Fluidtemperatur innerhalb des Gefrierrohres steigt dementsprechend vom Zulauf bis zum Rücklauf stetig an. Folglich verändert sich auch die Wandtemperatur im Fallrohr, so dass die Forderung einer konstanten Wandtemperatur nicht erfüllt wird. Aufgrund des Temperaturverlaufs im Fluid ändern sich auch die Temperaturen in der inneren Rohrwand, die die Kontaktfläche zwischen dem Fluid im Fallrohr und im Ringraum darstellt. Damit kann

die vereinfachte Annahme getroffen werden, dass innerhalb der Rohrwand, für jede beliebige Stelle, ein annähernd konstanter Temperaturgradient vor. Die Verhältnisse innerhalb des Fallrohrs können somit am ehesten mit der Randbedingung der konstanten Wärmestromdichte beschrieben werden.

Die folgenden Korrelationen nach Gnielinski (2013) für die mittlere Nusselt-Zahl im Fallrohr gelten für eine hydrodynamisch ausgebildete Strömung mit thermischem Anlauf für die Randbedingung einer konstanten Wärmestromdichte.

Laminare Rohrströmung

Bei einer thermisch und hydrodynamisch ausgebildeten laminaren Rohrströmung strebt die Nusselt-Zahl mit zunehmender Lauflänge gegen einen unteren Grenzwert. Dieser Grenzwert kann anhand des eindeutig beschriebenen Temperatur- und Geschwindigkeitsprofils hergeleitet werden und ergibt sich zu (Gnielinski 2013, Baehr & Stephan 2006, Churchill 1977):

$$\text{Nu}_1 = 4,364 \quad (4.28)$$

Für den Fall einer hydrodynamisch ausgebildeten Rohrströmung mit thermischem Anlauf existiert ein oberer asymptotischer Grenzwert der mittleren Nusselt-Zahl:

$$\text{Nu}_{m,2} = 1,953 \cdot \left(\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{d_i}{L_{GR}} \right)^{1/3} \quad (4.29)$$

Die mittlere Nusselt-Zahl Nu_m kann im gesamten Bereich zwischen den beiden Asymptoten wie folgt bestimmt werden:

$$\text{Nu}_m = \left[\text{Nu}_1^3 + 0,6^3 + (\text{Nu}_{m,2} - 0,6)^3 \right]^{1/3} \quad (4.30)$$

Turbulente Rohrströmung

Aufgrund der starken Durchmischung bei einer turbulenten Strömung ist der Einfluss der Einlaufänge deutlich geringer als bei einer laminaren Strömung, so dass nur Korrelationen zur Bestimmung der Nusselt-Zahl für eine vollständig ausgebildete Rohrströmung vorliegen. Die mittlere Nusselt-Zahl ergibt sich dann zu:

$$\text{Nu}_m = \frac{(\xi/8) \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr}}{1 + 12,7 \sqrt{\xi/8} (\text{Pr}^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d_i}{L_{GR}} \right)^{2/3} \right] \quad (4.31)$$

mit:

$$\xi = (1,8 \cdot \log(\text{Re}) - 1,5)^{-2} \quad (4.32)$$

Gleichung (4.31) gilt für Reynolds-Zahlen von $10^4 < \text{Re} < 10^6$ und Prandtl-Zahlen von $0,1 < \text{Pr} < 1000$ sowie für lange Rohre mit $d_i/L_{GR} < 1$.

Übergangsbereich der Rohrströmung

Im Übergangsbereich zwischen laminarer ($Re < 2.300$) und turbulenter Strömung ($Re > 10.000$) liegt eine instabile laminare Strömung mit ersten Verwirbelungen vor. Die Nusselt-Zahl kann im Übergangsbereich der Rohrströmung mit hinreichender Genauigkeit aus einer linearen Interpolation nach Gleichung (4.33) ermittelt werden.

$$Nu_m = (1 - \gamma) \cdot Nu_{m,Re=2.300} + \gamma \cdot Nu_{m,Re=10.000} \quad (4.33)$$

mit:

$$\gamma = \frac{Re - 2.300}{10.000 - 2.300} \quad (4.34)$$

Gleichung (4.33) ermöglicht eine durchgehende Berechnung der Nusselt-Zahl vom laminaren Bereich ($\gamma = 0$) bis zum turbulenten Bereich ($\gamma = 1$).

4.2.4.2 Nusselt-Zahl bei der Strömung durch einen konzentrischen Ringspalt

Am Ende des Fallrohrs tritt das Fluid in den Ringraum zwischen Fall- und Steigrohr ein und strömt somit innerhalb eines konzentrischen Ringspalts zurück zum Kühlaggregat. Der konvektive Wärmeübergang findet dabei zwischen dem Fluid und der Innenwand des Steigrohrs sowie der Außenwand des Fallrohrs statt. Die charakteristische geometrische Größe zur Berechnung dimensionsloser Kennzahlen beim Ringspalt ist der hydraulische Durchmesser d_h . Dieser bestimmt sich aus der Differenz des Innendurchmessers des Außenrohrs $d_{A,i}$ (Steigrohr) und des Außendurchmessers des Innenrohrs $d_{I,a}$ (Fallrohr) nach Gleichung (4.35) (s. Bild 4.7).

$$d_h = d_{A,i} - d_{I,a} \quad (4.35)$$

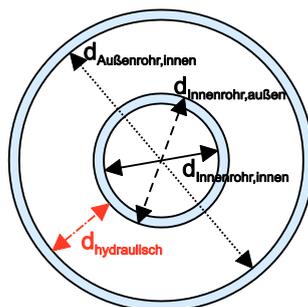


Bild 4.7 Hydraulischer Durchmesser eines Ringspalts

In der Literatur sind Korrelationen zur Bestimmung der Nusselt-Zahl im konzentrischen Ringspalt dokumentiert, die drei verschiedene Varianten der Randbedingung einer konstanten Wandtemperatur unterscheiden. Diese drei möglichen Varianten der Randbedingung einer konstanten Wandtemperatur sind in Bild 4.8 zusammenfassend gegenübergestellt.

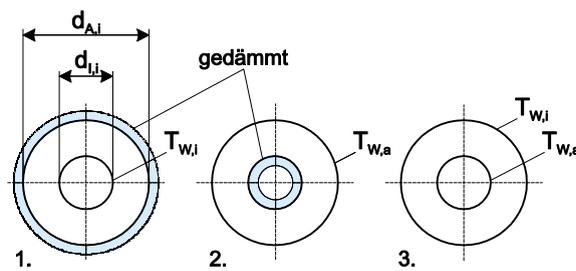


Bild 4.8 Randbedingungen der Wärmeübertragung im Ringspalt (nach Gnielinski 2013)

Die erste Randbedingung ermöglicht nur eine Wärmeübertragung über das Innenrohr, da das Außenrohr als wärmegeämmt angenommen wird. Der gegenteilige Fall eines gedämmtten Innenrohres und einer alleinigen Wärmeübertragung über das Außenrohr wird durch die zweite Randbedingung dargestellt. Bei der dritten Randbedingung wird die Wärmeübertragung sowohl durch das Innen- als auch das Außenrohr ermöglicht, wobei die Wandtemperaturen in diesem Fall gleich sein müssen. Wie bei der Rohrströmung im Fallrohr können die drei möglichen Randbedingungen die Verhältnisse im Ringraum eines Gefrierrohrs nur eingeschränkt wiedergeben. Die erste Variante eines gedämmtten Außenrohrs entfällt bei der Betrachtung eines Gefrierrohrs, da das Außenrohr aus Stahl die Kontaktfläche für die Wärmeübertragung zum umgebenden Boden darstellt und eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist. Die zweite Randbedingung eines gedämmtten Innenrohrs trifft nicht vollständig zu, da trotz der dämmenden Eigenschaften des PE-Rohrs ein Wärmeentzug stattfindet. Bei der dritten Randbedingung findet zwar eine Wärmeübertragung an beiden Rohren statt. Die weitere Forderung gleicher Wandtemperaturen des Innen- und Außenrohrs trifft hingegen innerhalb eines Gefrierrohrs nur eingeschränkt zu, da die Wandtemperatur im Steigrohr aufgrund der Wärmeübertragung zum umgebenden Boden höher ist als die Wandtemperatur im Fallrohr. Aus diesem Grund wurden die Auswirkungen der zweiten und dritten Randbedingung auf die Nusselt-Zahl in einer Vorstudie untersucht (Koppmann 2013). Die Ergebnisse sind in Bild 4.9 für Reynold-Zahlen von 100 bis 15.000 dargestellt.

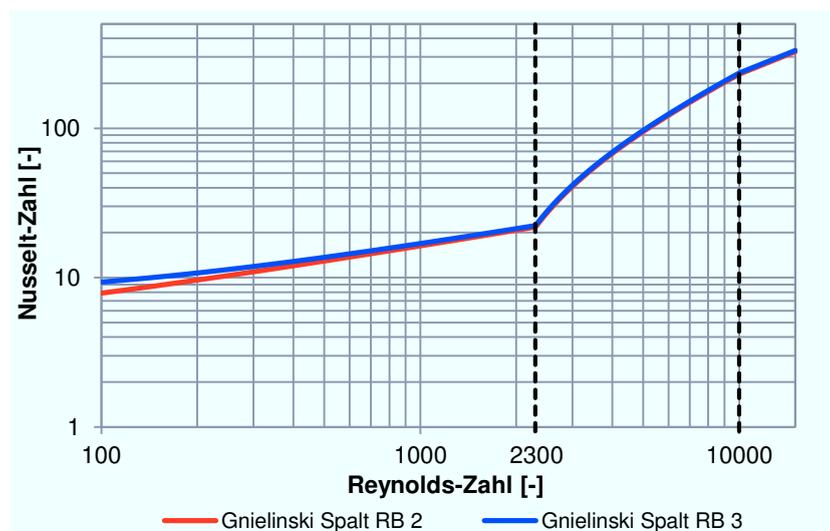


Bild 4.9 Nusselt-Zahlen für die zweite und die dritte Randbedingung der Wärmeübertragung im Ringspalt (Koppmann 2013)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Unterschiede in der Nusselt-Zahlen für beide Randbedingungen sehr gering ausfallen. Lediglich für kleine Reynolds-Zahlen im Bereich einer laminaren Strömung sind Abweichungen zu erkennen. Diese Abweichungen sind aber vernachlässigbar, da bei Vereisungsmaßnahmen zur Erzielung einer guten Wärmeübertragung Strömungen im Übergangsbereich oder sogar turbulente Strömungen angestrebt werden. Aufgrund der geringen Unterschiede der beiden Randbedingungen wird schließlich die dritte Randbedingung mit einer Wärmeübertragung an beiden Rohren für die Bestimmung der Nusselt-Zahl im Ringspalt des Gefrierrohrs gewählt.

Die Ansätze zur Bestimmung der Nusselt-Zahl für die gewählte Randbedingung sind im Folgenden für alle Strömungsformen zusammengefasst. Die Korrelationen zur Bestimmung der mittleren Nusselt-Zahl im Ringraum nach Gnielinski (2013) gelten dabei für eine Strömung mit gleichzeitigem hydrodynamischem und thermischem Anlauf für die Randbedingung einer Wärmeübertragung an beiden Rohrwänden mit gleicher Wandtemperatur.

Laminare Strömung im Ringspalt

Für eine hydrodynamisch und thermisch ausgebildete Strömung im Ringspalt kann die mittlere Nusselt-Zahl in Abhängigkeit des Verhältnisses der Rohrdurchmesser nach einer Näherungslösung von Martin (1990) wie folgt bestimmt werden:

$$Nu_{m,1} = 3,66 + \left[4 - \frac{0,102}{(d_{I,a}/d_{A,i} + 0,02)} \right] \cdot \left(\frac{d_{I,a}}{d_{A,i}} \right)^{0,04} \quad (4.36)$$

Eine weitere Näherungslösung zur Bestimmung der mittleren Nusselt-Zahl für eine hydrodynamisch ausgebildete Strömung im Ringspalt mit thermischem Anlauf wurde von Stephan (1962) hergeleitet:

$$Nu_{m,2} = 1,615 \cdot \left(1 + 0,14 \cdot \left(\frac{d_{I,a}}{d_{A,i}} \right)^{0,1} \right) \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d_h}{L_{GR}} \right)^{1/3} \quad (4.37)$$

Zur Berücksichtigung eines gleichzeitigen hydrodynamischen und thermischen Anlaufs muss zusätzlich Gleichung (4.38) beachtet werden:

$$Nu_{m,3} = \left(\frac{2}{1+22 \cdot Pr} \right)^{1/6} \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d_h}{L_{GR}} \right)^{1/2} \quad (4.38)$$

Die Korrelation zur Bestimmung der mittleren Nusselt-Zahl im Ringspalt bei laminarer Strömung mit gleichzeitig hydrodynamischem und thermischem Anlauf kann nach Martin (1990) mit Gleichung (4.39) angegeben werden.

$$Nu_m = \left(Nu_{m,1}^3 + Nu_{m,2}^3 + Nu_{m,3}^3 \right)^{1/3} \quad (4.39)$$

Turbulente Strömung im Ringspalt

Für die Berechnung der mittleren Nusselt-Zahlen für turbulente Strömungen im Ringspalt empfiehlt Gnielinski (2013) eine Modifikation der Gleichung für eine Rohrströmung. Die mittlere Nusselt-Zahl im Ringspalt kann nach einer Korrelation von Stephan (1962) in Abhängigkeit des Verhältnisses $d_{I,a}/d_{A,i}$ bestimmt werden:

$$\text{Nu}_{m,\text{Ringspalt}} = \frac{0,86 \cdot (d_{I,a}/d_{A,i})^{0,84} + [1 - 0,14 \cdot (d_{I,a}/d_{A,i})^{0,6}]}{1 + (d_{I,a}/d_{A,i})} \cdot \text{Nu}_{m,\text{Rohr}} \quad (4.40)$$

$\text{Nu}_{m,\text{Rohr}}$ wird nach Gleichung (4.31) bestimmt, wobei der Durchmesser d_i des Innenrohrs durch den hydraulischen Durchmesser d_h des konzentrischen Ringspalts zu ersetzen ist. Gleichung (4.40) gilt für Reynolds-Zahlen von $10^4 < \text{Re} < 10^6$ und Prandtl-Zahlen von $0,6 < \text{Pr} < 1000$ sowie für lange Rohre mit $0 < d_h/L_{GR} < 1$.

Übergangsbereich der Strömung im Ringspalt

Die Bestimmung der mittleren Nusselt-Zahl im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung im konzentrischen Ringspalt erfolgt analog zur Berechnung für eine Rohrströmung nach Gleichung (4.33). Lediglich die Ausgangswerte für die lineare Interpolation, die Nusselt-Zahl für Reynolds-Zahlen von 2.300 und 10.000 ($\text{Nu}_{m,\text{Re}=2.300}$ und $\text{Nu}_{m,\text{Re}=10.000}$), werden mit den gegebenen Gleichungen (4.36) bis (4.40) für den konzentrischen Ringspalt bestimmt.

4.3 Materialeigenschaften

Um den Wärmetransport im Boden und im Gefrierrohr richtig abbilden zu können, müssen neben den Wärmetransportmechanismen auch die Materialeigenschaften der beteiligten Komponenten betrachtet werden. Für den Wärmetransport im Boden sind dabei die Temperaturabhängigkeit der thermischen Bodeneigenschaften sowie die Veränderung der volumenmäßigen Zusammensetzung der Bodenkomponenten während des Gefrierprozesses von besonderer Bedeutung. Der Wärmetransport im Gefrierrohr wird ebenfalls durch die Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften der verwendeten Kälteträger beeinflusst.

4.3.1 Thermische Eigenschaften gefrierender Böden

Die Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der thermischen Bodeneigenschaften sowie der Ansätze zur Mischungsberechnung wurden im Rahmen der Dissertation von Baier (2008) detailliert behandelt. Dabei wurde der für Vereisungsmaßnahmen relevante Temperaturbereich von maximal 20°C bis ca. -40°C zugrunde gelegt. Auf eine Berücksichtigung der Druckabhängigkeit der Bodeneigenschaften wurde verzichtet, da das Druckniveau im oberflächennahen Tunnelbau in einem Bereich liegt, der noch keine Kornzertrümmerung aufweist. Im Rahmen dieser Arbeit werden die relevanten Zusammenhänge lediglich kurz zusammengefasst.

Für eine detaillierte Beschreibung des Verhaltens gefrierender Böden sei an dieser Stelle auf Baier (2008) sowie auf die im Folgenden genannte weitere fachspezifische Literatur verwiesen.

Das Mehrphasensystem Boden setzt sich im gefrorenen Zustand aus den Komponenten Feststoff, Eis und (ungefrorenem) Wasser zusammen. Im ungefrorenen Zustand fehlt die Eisphase. Mit Hilfe einer Mischungsberechnung in Abhängigkeit der Volumenanteile der verschiedenen Bodenkomponenten können die thermischen Bodeneigenschaften für das Mehrphasensystem bestimmt werden. Die volumetrische Wichtung erfolgt dabei über die Porosität (s. Gleichung (4.1)).

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit des Bodengemischs ist eine richtungsabhängige Größe, zu deren Bestimmung eine Vielzahl von Ansätzen in der Literatur existiert. Umfassende Vergleichsstudien (z.B.: Coté & Konrad 2005, Farouki 1986) haben gezeigt, dass eine möglichst reale Abbildung der Wärmeleitfähigkeit von Böden mit dem Ansatz von Johansen & Frivik (1980) erzielt werden kann. Dieser Ansatz verwendet ein gewichtetes geometrisches Mittel der einzelnen Bodenkomponenten zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Bodengemischs. Im ungefrorenen Zustand ergibt sich die Wärmeleitfähigkeit zu:

$$\lambda_{B,u} = \lambda_s^{(1-n)} \cdot \lambda_w^n \quad (4.41)$$

Im gefrorenen Zustand wird die Wärmeleitfähigkeit für ein Dreiphasen-Modell aus Feststoff, Wasser und Eis wie folgt bestimmt:

$$\lambda_{B,g} = \lambda_s^{(1-n)} \cdot \lambda_w^{n_w} \cdot \lambda_i^{n_i} \quad (4.42)$$

Dabei kann die Wärmeleitfähigkeit von Wasser nach Kestin (1978) und die Wärmeleitfähigkeit von Eis nach Fukusako (1990) jeweils in Abhängigkeit der Temperatur beschrieben werden. Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser nimmt mit steigender Temperatur für das relevante Temperaturspektrum (0 bis 20°C) um etwa 10 % zu (Baier 2008). Die Wärmeleitfähigkeit von Eis hingegen nimmt im Temperaturbereich von 0 bis -40°C um etwa 20 % zu.

Die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs hängt maßgeblich vom Quarzgehalt des Bodens ab (z.B. Farouki 1986) und weist aus diesem Grund auch nahezu keine Temperaturabhängigkeit auf. Johansen & Frivik (1980) empfehlen die Bestimmung der Feststoffwärmeleitfähigkeit durch das geometrische Mittel nach Gleichung (4.43).

$$\lambda_s = \lambda_Q^q \cdot \lambda_M^{1-q} \quad (4.43)$$

Dabei ist λ_Q die Wärmeleitfähigkeit von Quarz, die in etwa bei 7,7 W/(mK) bis 8,8 W/(mK) liegt, und λ_M die Wärmeleitfähigkeit der übrigen Bodenbestandteile. Die Wärmeleitfähigkeit der übrigen Bodenbestandteile, die für Feldspat und Glimmer bei 2,0 W/(mK) und für Tonstein bei 3,5 W/(mK) liegt, ist somit deutlich niedriger als die Wärmeleitfähigkeit von Quarz (Johansen & Frivik 1980).

Wärmekapazität

Im Gegensatz zur Wärmeleitfähigkeit ist die Wärmekapazität des Bodens nicht richtungsabhängig, da sie das Energiespeichervermögen des Bodens beschreibt. Sie ist ebenfalls von der volumenmäßigen Zusammensetzungen der einzelnen Bodenkomponenten abhängig und lässt sich mathematisch über eine gewichtete arithmetische Mittelwertbildung nach Gleichung (4.44) bestimmen (z.B. de Vries 1963).

$$c_{v,B} = c_{v,s} \cdot (1 - n) + c_{v,w} \cdot n_w + c_{v,i} \cdot (n - n_w) \quad (4.44)$$

Die Mittelwertbildung erfolgt über die volumetrischen Wärmekapazitäten c_v der einzelnen Bodenkomponenten. Diese ergibt sich aus der spezifischen Wärmekapazität c_s multipliziert mit der Dichte ρ der jeweiligen Komponente:

$$c_v = c_s \cdot \rho \quad (4.45)$$

Die Wärmekapazität des Bodengemischs ist wesentlich von der Wärmekapazität des Wassers abhängig, da diese deutlich größer ist als die Wärmekapazität von Eis und Feststoff (s. Bild 4.10).

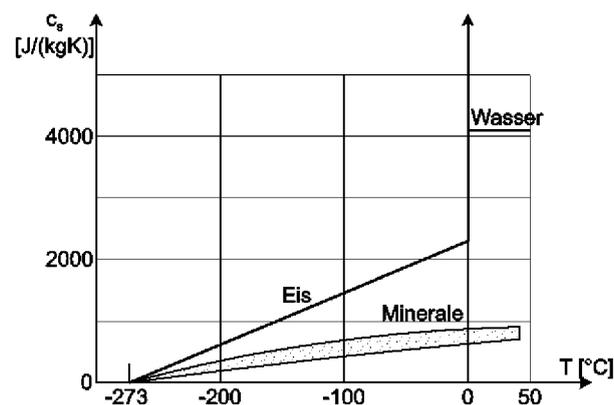


Bild 4.10 Spezifische Wärmekapazität der unterschiedlichen Bodenkomponenten (nach Baier 2008 bzw. Jessberger 1996)

Die spezifischen Wärmekapazitäten aller Bodenkomponenten sind temperaturabhängig. Die spezifische Wärmekapazität von Wasser und Eis kann nach Marsh (1987) und Fukusako (1990) ermittelt werden. Für die Wasser- und Eisphase ist zusätzlich die Temperaturabhängigkeit der Dichte zu beachten. Die Korndichte des Feststoffs hingegen ist temperaturunabhängig.

Zahlreiche Untersuchungen verschiedener Autoren haben gezeigt, dass die Wärmekapazität des Feststoffs unabhängig von der mineralogischen Zusammensetzung der Gesteinskörnung ist (z.B. Winter & Saari 1968, Dehner 2007). Auf Basis von Messwerten vieler Autoren entwickelten Winter & Saari (1968) eine empirische Formel zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität des Feststoffs (s. Gleichung (4.46)). Der Gültigkeitsbereich dieser Formel liegt bei Temperaturen von 130°C bis -250°C .

$$c_{s,s} = -34 \cdot (T + 273,15)^{0,5} + 8 \cdot (T + 273,15) - 0,2 \cdot (T + 273,15)^{1,5} \quad (4.46)$$

Unterkühltes Wasser

Im Verlauf des Gefrierprozess wird der Anteil des Wasser zwar reduziert, aber auch für Temperaturen unterhalb von 0°C liegt weiterhin ungefrorenes Wasser im Boden vor (s. Kapitel 4.1). Dieses ungefrorene oder unterkühlte Wasser besitzt andere Eigenschaften als Wasser bei positiven Temperaturen und andere Eigenschaften als Eis. Die abweichenden Eigenschaften unterkühlten Wassers müssen bei der Bestimmung der thermischen Eigenschaften des Bodengemischs berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere für bindige Böden, bei denen der Anteil des ungefrorenen Wasser aufgrund der größeren spezifischen Oberfläche ausgeprägt ist.

Die grundlegenden Zusammenhänge für die Bestimmung der Verläufe der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität von unterkühltem Wasser wurden von Speedy (1987) ermittelt. Die von Baier (2008) auf dieser Basis bestimmten Verläufe der Dichte, der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität von Wasser und Eis sind in Bild 4.11 dargestellt. Da in der Literatur für die Wärmeleitfähigkeit von unterkühltem Wasser keine Zusammenhänge vorhanden sind, wird diese unterhalb des Gefrierpunkts konstant zu $\lambda_w = 0,56 \text{ W}/(\text{mK})$ angenommen.

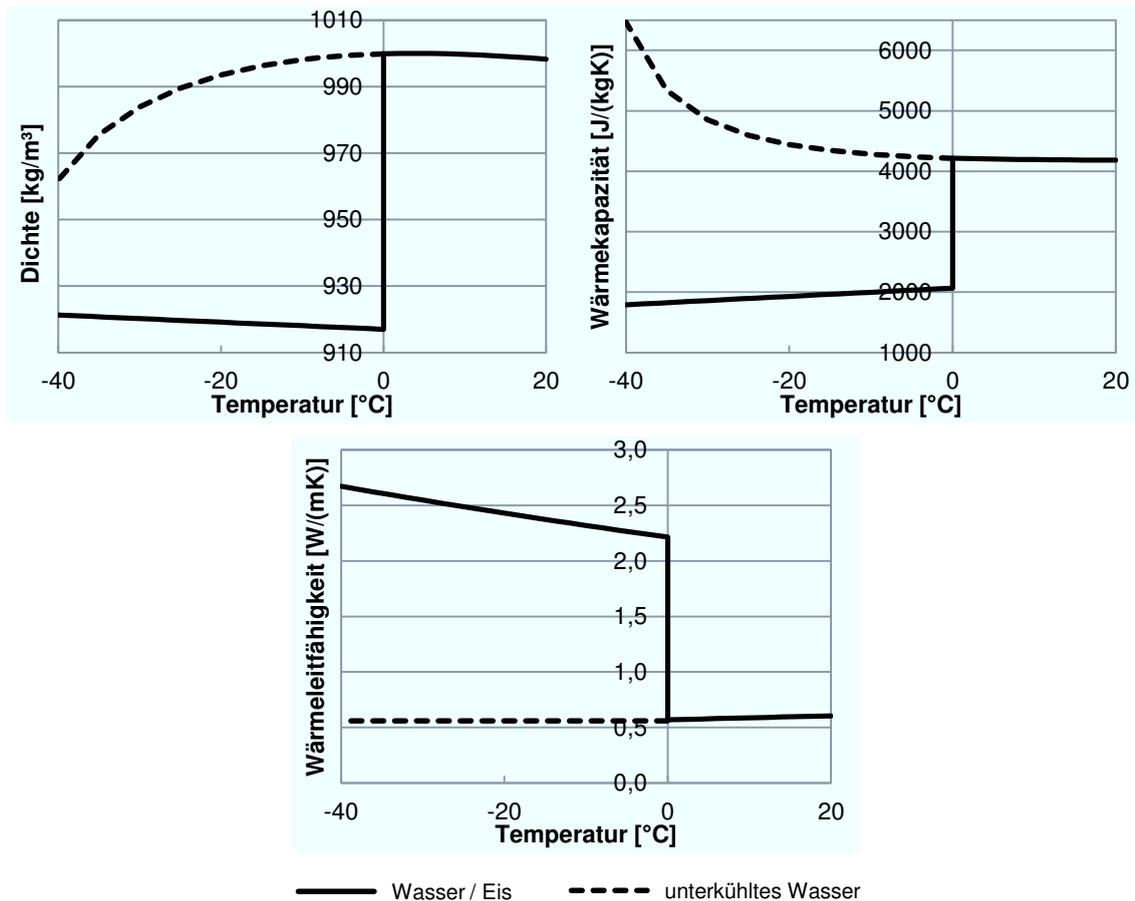


Bild 4.11 Dichte, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit von Wasser, Eis und unterkühltem Wasser im relevanten Temperaturspektrum (nach Baier 2008)

Latente Wärme

Die Umordnung der Atome beim Phasenwechsel von Wasser zu Eis bewirkt das Freiwerden einer großen Energiemenge, die als latente Wärme bezeichnet wird. Für reines Wasser beträgt die latente Wärme $L = 333.600 \text{ J/kg}$. Der Phasenwechsel findet nicht schlagartig statt, sondern innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs, der über die Solidus- und Liquidustemperatur definiert wird. Die latente Wärme wird somit kontinuierlich in diesem Temperaturbereich abgegeben. Beim Gefrieren führt die latente Wärme zu einer Verzögerung des Gefrierprozesses und damit zu einer Erhöhung der Aufgefrierzeit. Beim Auftauen hingegen bietet die latente Wärme eine nicht zu unterschätzende zusätzliche Sicherheit, da diese zunächst kompensiert werden muss, bevor die Temperatur des Eiskörpers zunehmen kann.

Die latente Wärme ist proportional zum Wassergehalt des Bodens bzw. zum wassergefüllten Porenanteil. In den meisten Fällen wird sie über eine zusätzliche, scheinbare Wärmekapazität $c_{v,app}$ (apparent heat capacity) berücksichtigt. Da die Angabe eines konstanten Werts für das gesamte Temperaturintervall zu ungenau ist, wird die latente Wärme in einem infinitesimalen Temperaturintervall über die Ableitung des wassergefüllten Porenanteils nach der Temperatur beschrieben (s. Gleichung (4.47)).

$$c_{v,B}(T) = c_{v,s} \cdot (1 - n) + c_{v,w} \cdot n_w + c_{v,i} \cdot (n - n_w) + \rho_w \cdot L \cdot \frac{\partial n_w}{\partial T} \quad (4.47)$$

Ungefrorener Wassergehalt

Der ungefrorene Wassergehalt ist die zentrale Größe zur Beschreibung des Gefrierprozesses. Ist der ungefrorene Wassergehalt bekannt, ist auch die volumetrische Zusammensetzung der einzelnen Bodenkomponenten bekannt. Folglich lassen sich die thermischen Eigenschaften des Bodengemischs direkt ableiten. Außerdem erübrigt sich die Vorgabe eines festen Gefrierintervalls, da der Gefrierprozess direkt über den Verlauf des ungefrorenen Wassergehalts in Abhängigkeit des vorliegenden Bodens bestimmt werden kann.

Die physikalische Ursache für die Existenz von Porenwasser unterhalb des Gefrierpunktes liegt in der eingeschränkten Bewegungsmöglichkeit der Wassermoleküle durch beispielsweise Kapillar- und Adsorptionskräfte, die die Eisbildung behindern. Das ungefrorene Wasser ist letztlich als Wasserfilm direkt um die Kornpartikel angeordnet (Andersland & Ladanyi 2004). Somit weisen feinkörnige Böden aufgrund ihrer größeren spezifischen Oberfläche einen deutlich höheren ungefrorenen Wassergehalt auf als grobkörnige Böden (s. Bild 4.12).

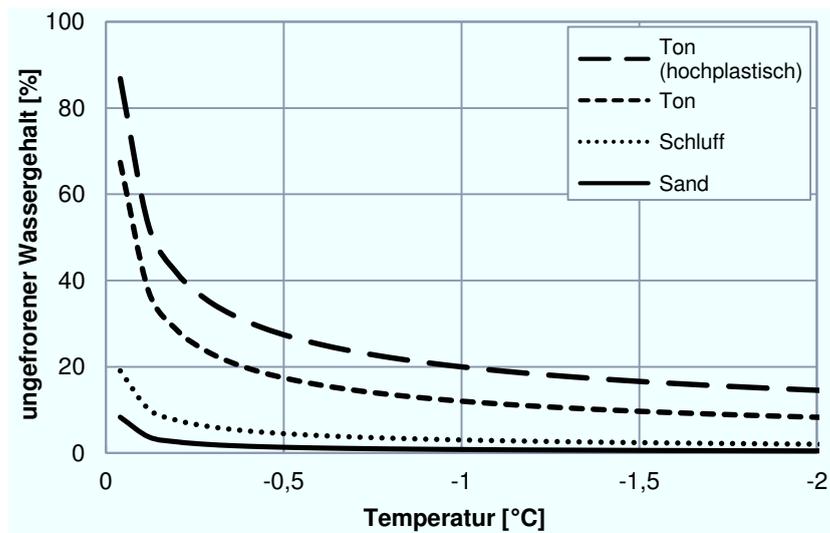


Bild 4.12 Verlauf des ungefrorenen Wassergehalts für verschiedene Bodenarten (nach Baier 2008 bzw. Jessberger 1990)

Der ungefrorene Wassergehalt wird als Verlauf über die Temperatur abgebildet, so dass der Phasenwechsel als beendet angesehen werden kann, wenn der ungefrorene Wassergehalt einen konstanten Wert angenommen hat. Der temperaturabhängige Verlauf des ungefrorenen Wassergehalts lässt sich mathematisch nach Anderson & Tice (1972) allein in Abhängigkeit der spezifischen Oberfläche nach Gleichung (4.48) bestimmen.

$$\ln(w_u) = 0,2618 + 0,5519 \cdot \ln(S_s) - 1,449 \cdot S_s^{-0,264} \cdot \ln(|T|) \quad (4.48)$$

Durch eine Regression des temperaturabhängigen Verlaufs des ungefrorenen Wassergehalts nach Gleichung (4.48) ist eine Beschreibung mittels einer Potenzfunktion mit lediglich zwei Parametern a und b möglich:

$$w_u(T) = a \cdot |T|^b \quad (4.49)$$

4.3.2 Physikalische Eigenschaften von Kälteträgern

Als Kälteträger für die Vereisung mit Sole werden zumeist Calciumchlorid-Solen verwendet, die durch eine Mischung von Calciumchlorid (CaCl_2) und Wasser hergestellt werden. Dabei können verschiedene CaCl_2 -Konzentrationen eingestellt werden. Neben den Hauptbestandteilen Calciumchlorid und Wasser enthalten diese Kälteträger weitere Zusatzstoffe wie beispielsweise Inhibitoren zur Verbesserung des Korrosionsschutzes.

Unterschiede in der CaCl_2 -Konzentration der Sole haben einen direkten Einfluss auf den Gefrierpunkt des Kälteträgers sowie auf seine physikalischen Eigenschaften. Üblicherweise wird eine CaCl_2 -Sole mit einem Massenanteil des Calciumchlorids von 29,9 % verwendet, deren Gefrierpunkt bei etwa -54°C liegt. Eine Verringerung der CaCl_2 -Konzentration führt zu einer Erhöhung des Gefrierpunktes der Sole. Durch eine Verringerung der CaCl_2 -Konzentration auf 28,57 %

erhöht sich der Gefrierpunkt bereits auf -45°C , für 27,4 % CaCl_2 liegt er sogar nur noch bei -38°C . Es zeigt sich, dass eine Verringerung der CaCl_2 -Konzentration um 2,5 % in diesem Fall zu einer Erhöhung der Gefriertemperatur der Sole um 16°C führt. Die CaCl_2 -Konzentration hat somit einen gravierenden Einfluss auf den Gefrierpunkt der Sole. Um die erforderliche Gefriertemperatur aus den Planungsvorgaben gewährleisten zu können, muss dieser Zusammenhang unbedingt beachtet und die CaCl_2 -Konzentration mit höchster Genauigkeit eingestellt werden.

Die CaCl_2 -Konzentration wirkt sich nicht nur auf den Gefrierpunkt der Sole, sondern auch auf deren physikalische Eigenschaften aus. Zu diesen physikalischen Eigenschaften zählen die Dichte, die kinematische sowie die dynamische Viskosität, die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität, die alle eine Temperaturabhängigkeit aufweisen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die drei genannten CaCl_2 -Solen mit 29,9 %, 28,57 % und 27,4 % CaCl_2 ausgewählt, da diese aufgrund des Gefrierpunktes die Einstellung einer Vorlauftemperatur von bis zu -35°C erlauben. Die Eigenschaften der CaCl_2 -Solen sind in Bild 4.13 in Abhängigkeit der Temperatur und der CaCl_2 -Konzentrationen dargestellt. Die Eingangsdaten für die Sole-Eigenschaften sind dem Programm SecCool (IPU) entnommen, das auf den technischen Daten verschiedener Solehersteller und ingenieurtechnischer Nachschlagewerke, wie dem VDI-Wärmeatlas, basiert. Die in dieser Arbeit verwendeten Eigenschaften der verschiedenen CaCl_2 -Solen basieren auf den Zusammenhängen aus dem VDI-Wärmeatlas (Glück & Hunold 2006).

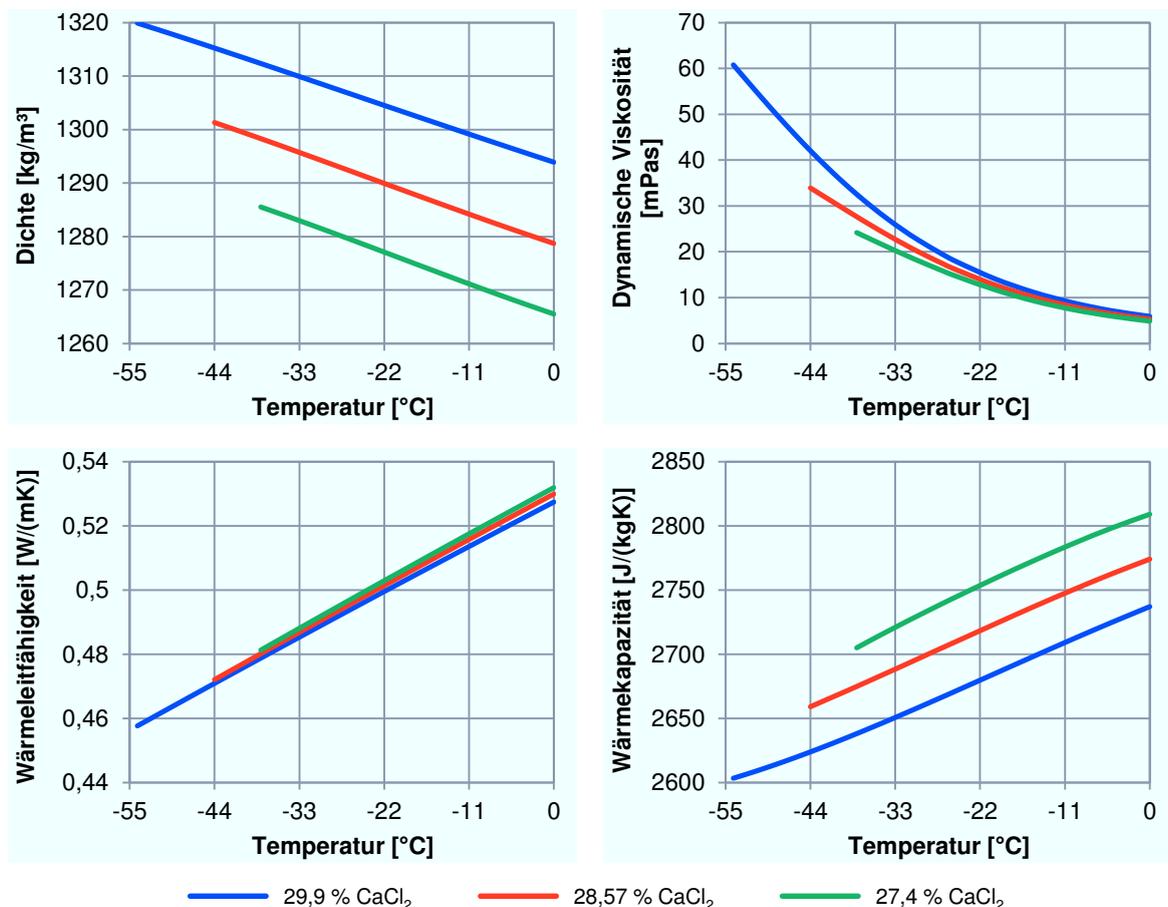


Bild 4.13 Eigenschaften von CaCl_2 -Solen mit verschiedenen CaCl_2 -Konzentrationen

Bild 4.13 zeigt, dass eine höhere CaCl_2 -Konzentration sowohl zu einer Erhöhung der Dichte als auch der dynamischen Viskosität führt. Daraus ergibt sich folglich eine Verringerung der Fließfähigkeit des Fluids, wodurch eine größere Pumpenleistung erforderlich wird. Dieser Zusammenhang verstärkt sich zusätzlich bei abnehmender Temperatur. Ein Vergleich mit der dynamischen Viskosität von reinem Wasser, die für 0°C bei $1,792 \text{ mPas}$ liegt, ermöglicht eine bessere Einschätzung der dynamischen Viskosität der CaCl_2 -Solen, die bereits bei 0°C mehr als das Dreifache beträgt. Im Gegensatz zur Dichte und dynamischen Viskosität nehmen die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität der Solen hingegen mit steigender CaCl_2 -Konzentration ab. Dieser Zusammenhang wird ebenfalls mit abnehmender Temperatur verstärkt. Aus thermischer Sicht sollten niedrigere CaCl_2 -Konzentrationen folglich eine bessere Wärmeübertragung ermöglichen.

Um die Eignung eines Kälteträgers zur Wärmeübertragung besser bewerten zu können, wurde von Skovrup (2005) im Rahmen des SecCool Properties Programms der Heat Transfer Efficiency Faktor (HTEF) als Richtwert eingeführt. Der HTEF beschreibt das Verhältnis aus Wärmeübergangskoeffizient und der zur Überwindung der Reibungsverluste erforderlichen Pumpleistung. Die Bestimmung des HTEF basiert auf einigen Annahmen, wie beispielsweise einer turbulenten Rohrströmung, die bei Vereisungsmaßnahmen nur selten erreicht wird. Nach Skovrup (2005) ergibt der HTEF aber auch für den laminaren Strömungsbereich sowie den Übergangsbereich sinnvolle Werte. Auf Basis des HTEF kann somit eine Vorauswahl geeigneter Fluide getroffen werden, die im Anschluss über detaillierte Berechnung und die Einbeziehung weiterer Einflüsse, wie Anschaffungskosten und Korrosionsgefahr, näher eingegrenzt werden müssen (Skovrup 2005).

Die Näherungsgleichung zur Bestimmung des HTEF nach Skovrup (2005) ist in Gleichung (4.50) normiert auf die Eigenschaften von Wasser bei einer Temperatur von 10°C dargestellt.

$$\text{HTEF} = \frac{c_{s,F}^{0,33} \cdot \lambda_F^{0,67} \cdot \rho_F^{0,57} \cdot \eta_F^{-0,52}}{176,74} \quad (4.50)$$

Die Gleichung enthält alle relevanten physikalischen Fluideigenschaften, wie die spezifische Wärmekapazität $c_{s,F}$, die Wärmeleitfähigkeit λ_F , die Dichte ρ_F und die dynamische Viskosität η_F . Die Ergebnisse des HTEF sind in Bild 4.14 für die drei verwendeten CaCl_2 -Solen mit den unterschiedlichen CaCl_2 -Konzentrationen in Abhängigkeit der Fluidtemperatur dargestellt.

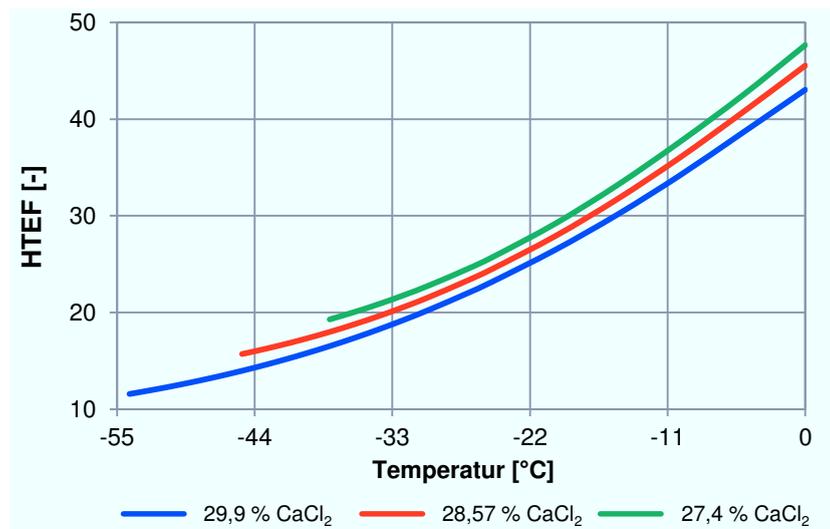


Bild 4.14 HTEF der CaCl₂-Solen mit verschiedenen CaCl₂-Konzentrationen

Die Ergebnisse des HTEF bestätigen die bereits prognostizierte bessere Wärmeübertragung für CaCl₂-Solen mit niedrigerer CaCl₂-Konzentration. Eine Überprüfung dieser Prognose durch die Bestimmung des Einflusses dieser drei unterschiedlichen CaCl₂-Solen auf die Aufgefrierzeit und die Kühlleistung bei Vereisungsmaßnahmen wird in Kapitel 7.4 vorgestellt.

5 Numerische Lösungsmodelle

Die Ergebnisse der Analyse des Status Quo zur Kühlleistungsbestimmung bei Vereisungsmaßnahmen haben gezeigt, dass numerische Betrachtungen erforderlich sind, um eine realistische Bestimmung der während der Vereisungsmaßnahme erforderlichen Kühlleistung zu erzielen. Die Umsetzung der numerischen Kühlleistungsermittlung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit mit dem Finite-Differenzen-Programm SHEMAT-Suite, das bereits in früheren Arbeiten am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen verwendet wurde und sich dabei bewährt hat. In diesem Kapitel wird das Programm SHEMAT-Suite kurz vorgestellt und dann auf die neuen numerischen Lösungsmodelle eingegangen, die zur Abschätzung der Kühlleistung entwickelt wurden. Außerdem werden Weiterentwicklungen des Programms SHEMAT-Suite zur Simulation verschiedener Betriebsvarianten in der Erhaltungsphase vorgestellt.

5.1 Das Programm SHEMAT-Suite

Das Finite-Differenzen-Programm SHEMAT bzw. Processing SHEMAT wurde ursprünglich von einer Gruppe um Prof. Clauser am Lehrstuhl für Angewandte Geophysik der RWTH Aachen entwickelt (Clauser 2003). Im Rahmen einiger tiefgreifender Erneuerungen entstand das Programm SHEMAT-Suite, das seitdem einer steten Weiterentwicklung unterliegt. Die ursprüngliche Anwendung lag in der Simulation geothermaler Transportvorgänge im Tiefengestein unter dem Einfluss hoher Drücke. Mottaghy & Rath (2006) entwickelten schließlich ein Phasenwechselmodell zur Berücksichtigung der latenten Wärme beim Gefrier- und Auftauprozess, das für die Simulation von Vereisungsmaßnahmen essentiell war. Außerdem wurde von Mottaghy (2007) die Beschreibung einer wandernden Frostgrenze infolge des Strömungseinflusses implementiert, wodurch eine gekoppelte Simulation von Wärmetransport- und Strömungsprozessen im Boden möglich wurde. Weiterhin beherrscht SHEMAT-Suite die Simulation dreidimensionaler stationärer und instationärer Zustände. Dabei erfolgt die Bestimmung der maßgeblichen physikalischen Bodeneigenschaften temperaturabhängig. Im Rahmen der Dissertation von Baier (2008) wurden in Zusammenarbeit mit dem Entwicklerteam von SHEMAT-Suite weitere Anpassungen vorgenommen, um Vereisungsmaßnahmen im Lockergestein simulieren zu können. Aufgrund des modularen Aufbaus des Programmcodes von SHEMAT-Suite konnten diese Anpassungen in einem eigenen Modul, dem sogenannten „freezing“-Modul, umgesetzt werden. Es wurden eine Reihe weiterer thermischer und hydraulischer Eigenschaften der verschiedenen Bodenkomponenten, wie z.B. die Wärmeleitfähigkeit des Bodengemischs (vgl. Kapitel 4.3.1), sowie deren Temperaturabhängigkeit hinzugefügt. Außerdem wurde ein neues Phasenwechselmodell implementiert, das die Beschreibung des Gefrierprozesses auf Grundlage des Verlaufs des ungefrorenen Wassergehalts beinhaltet und

somit die Vorgabe einer festen Gefrierfunktion ersetzt. Bisher ermöglicht SHEMAT-Suite allerdings nur die Simulation von Vereisungsmaßnahmen in nichtbindigen Böden. Detaillierte Erläuterungen zu den genannten Anpassungen können Baier (2008) entnommen werden.

Das im Rahmen der Dissertation von Baier (2008) entwickelte „freezing“-Modul wurde durch die Nachrechnung eines Modellversuchs ohne Grundwasserströmung (Makowski 1986) sowie eines Modellversuchs mit Grundwasserströmung (Frivik & Comini 1982) kalibriert. Aufgrund der guten Übereinstimmung der gemessenen Temperaturverläufe im Boden mit den Simulationsergebnissen für beide Modellversuche kann der Gefrierprozess im Boden mit dem „freezing“-Modul von Baier (2008) folglich realitätsnah abgebildet werden.

Die Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme wurde von Baier (2008) nicht behandelt, so dass das Programm SHEMAT-Suite sowie das „freezing“-Modul bislang keinen Berechnungsansatz zur Kühlleistungsermittlung enthalten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher zwei Lösungsmodelle entwickelt, die eine numerische Bestimmung der Kühlleistung und damit des Energieverbrauchs einer Vereisungsmaßnahme ermöglichen.

5.2 Vereinfachte Kühlleistungsermittlung im „freezing“-Modul

In einem ersten Schritt wurde eine vereinfachte Kühlleistungsermittlung in das vorhandene „freezing“-Modul implementiert, die sich an der bisherigen Simulation von Vereisungsmaßnahmen orientiert. Im Simulationsmodell werden bestimmte Zellen als Gefrierrohre definiert. Im zweidimensionalen Fall wird jedes Gefrierrohr durch eine Zelle definiert, im dreidimensionalen Fall hingegen wird das Gefrierrohr durch mehrere, in einer Linie angeordnete Zellen definiert. Diesen Gefrierrohrzellen werden zum einen die Eigenschaften eines Stahlrohrs und zum anderen eine Temperaturreandbedingung in Form einer Dirichlet-Randbedingung zugewiesen. Diese Temperaturreandbedingung kann dabei über die Gefrierrohrlänge variabel definiert werden, wird aber im Rahmen dieser Arbeit zumeist vereinfachend mit einer konstanten Temperatur belegt. Weiterhin bietet SHEMAT-Suite die Möglichkeit jede Temperaturreandbedingung zeitabhängig zu definieren, wodurch das in der Praxis vorhandene Herunterkühlen der CaCl_2 -Sole berücksichtigt werden kann.

Für ein aus mehreren Zellen bestehendes Gefrierrohr mit den Eigenschaften eines Stahlrohrs und einer definierten Temperaturreandbedingung kann die Kühlleistung vereinfacht über die Summe der in die Gefrierrohrzellen eingetragenen Wärmeströme bestimmt werden (s. Bild 5.1). Dieser Ansatz vernachlässigt allerdings nicht nur den Aufbau des Gefrierrohrs, sondern auch die innerhalb des Gefrierrohrs stattfindenden Wärmetransport- und Strömungsvorgänge (s. Kapitel 4.2).

Bild 5.1 veranschaulicht exemplarisch das als Zellstapel definierte Gefrierrohr mit einer konstanten Temperaturreandbedingung über die Gefrierrohrlänge sowie die in eine Gefrierrohrzelle eingetragenen Wärmestromdichten \dot{q}_{in} . Der Gefrierrohrdurchmesser ist dabei im Vergleich zur Gefrierrohrlänge aus Gründen der Anschaulichkeit deutlich überhöht dargestellt. Die erforderliche Kühlleistung ermittelt sich aus der Summe der in die Gefrierrohrzellen n eingetragenen Wärmestromdichten \dot{q}_{in} multipliziert mit der jeweiligen Übertragungsfläche A_{in} nach

Gleichung (5.1). Im Fall einer konstanten Temperaturrandbedingung über die Gefrierrohlänge treten im Gefrierrohr aufgrund der fehlenden Temperaturdifferenz keine Wärmeströme auf. Lediglich am Anfang und am Ende des Gefrierrohrs sind folglich die beiden axialen Wärmeströme $\dot{q}_{\text{oben},n}$ und $\dot{q}_{\text{unten},n}$ vorhanden. Ihr Anteil an der erforderlichen Kühlleistung ist aber vergleichsweise gering, da der Gefrierrohrdurchmesser und die damit verbundene Wärmeübertragungsfläche im Vergleich zur Gefrierrohlänge klein sind.

$$P = \sum_n \left(\sum_{i=1}^6 \dot{q}_{\text{in},i} \cdot A_{\text{in},i} \right) \quad (5.1)$$

$$= \sum_n \left((\dot{q}_{\text{links},n} + \dot{q}_{\text{rechts},n}) \cdot y_n \cdot z_n + (\dot{q}_{\text{vorne},n} + \dot{q}_{\text{hinten},n}) \cdot x_n \cdot z_n + (\dot{q}_{\text{oben},n} + \dot{q}_{\text{unten},n}) \cdot x_n \cdot y_n \right)$$

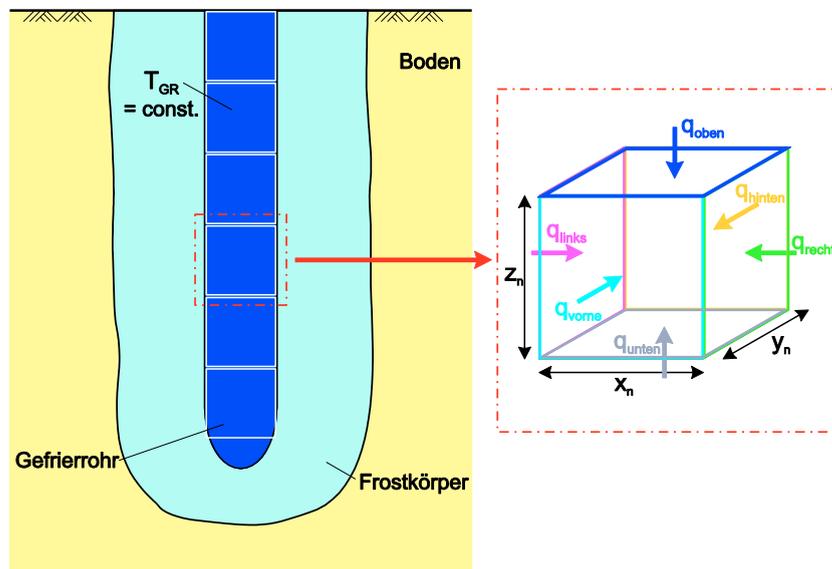


Bild 5.1 Vereinfachte Kühlleistungsermittlung im „freezing“-Modul

Die vereinfachte Kühlleistungsermittlung mit dem „freezing“-Modul erfordert keine Berechnung zusätzlicher Größen während der Simulation, da die Wärmestromdichten ohnehin programmintern in jedem Zeitschritt ermittelt werden. Demzufolge hat die Bestimmung der Kühlleistung mit diesem Ansatz nahezu keinen Einfluss auf die Rechenzeit und die Speicherkapazität.

Die programmtechnische Umsetzung der vereinfachten Kühlleistungsermittlung sieht eine Ausführung der Berechnung vor, wenn beim allgemeinen Einlesevorgang die zusätzlich erforderliche Input-Datei mit dem Namen „capacity.par“ gefunden wird. Diese Input-Datei enthält Angaben zu den Zellbereichen, in denen die Kühlleistung ermittelt werden soll (s. Anlage A). Dabei wird in jeder Zeile der Input-Datei ein neuer Bereich über die Angabe der Start- und Endzelle mittels der jeweiligen Zellkoordinaten (i, j, k) definiert. Für jede Zeile der Input-Datei und den dort definierten Zellbereich wird eine eigene Ausgabedatei erstellt, die den Verlauf der Kühlleistung über die Zeit enthält. Somit kann die Kühlleistung jedes einzelnen Gefrierrohrs, sowohl für zwei- als auch für dreidimensionale Modelle, separat bestimmt werden.

5.3 Detaillierte Kühlleistungsermittlung – Entwicklung des „freezrefcap“-Moduls

Eine detaillierte Kühlleistungsermittlung erfordert nicht nur den Einsatz numerischer Simulationen, sondern auch die Berücksichtigung des Gefrierrohraufbaus sowie der Wärmetransport- und Strömungsprozesse innerhalb des Gefrierrohrs. Darüber hinaus müssen diese Prozesse mit dem umgebenden Boden gekoppelt werden. Eine exakte Abbildung der Geometrie des Gefrierrohrs sowie der Interaktion zwischen strömendem Fluid, Gefrierrohrwandungen und umgebendem Boden erfordert eine sehr feine Diskretisierung in radialer Richtung. Infolgedessen ist außerdem zur Gewährleistung der Stabilität der numerischen Lösung (s. Kapitel 7.1) ein sehr kleiner Zeitschritt zu wählen. In Kombination würde beides zu einer enormen Steigerung der Rechenzeit und der Speicherkapazität führen, wodurch die numerischen Simulationen letztlich nicht mehr praktikabel wären. Zur Reduzierung der Rechenzeit und der Speicherkapazität wurde SHEMAT-Suite deshalb um das neu entwickelte „freezrefcap“-Modul erweitert, das eine detaillierte Bestimmung der Kühlleistung ermöglicht. Innerhalb des „freezrefcap“-Moduls erfolgt die Ermittlung der Wärmetransportvorgänge in radialer Richtung auf Basis der Theorie der thermischen Widerstände (s. Kapitel 4.2), so dass die sehr feine Diskretisierung entfallen kann. Das „freezrefcap“-Modul sowie dessen Kopplung mit SHEMAT-Suite wurde in Zusammenarbeit mit der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH entwickelt. Die grundlegenden Berechnungsabläufe, die programmtechnische Umsetzung und die Kopplung des „freezrefcap“-Moduls mit SHEMAT-Suite werden im Folgenden näher erläutert.

5.3.1 Grundlagen und programmtechnische Umsetzung des numerischen Berechnungsmodells

Bei dem Berechnungsansatz zur Bestimmung der Kühlleistung handelt es sich um eine semi-analytische Finite-Differenzen-Formulierung, die auf einem von Mottaghy & Dijkshoorn (2012) entwickelten Ansatz zur Simulation von Erdwärmesonden basiert. Dieser ursprüngliche Ansatz wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf Vereisungsmaßnahmen angepasst. Dazu mussten nicht nur der Temperaturbereich sowie die Materialeigenschaften, sondern auch die Strömungsrichtung sowie die verwendeten Fluide verändert werden. Außerdem waren Weiterentwicklungen nötig, um die Randbedingungen einer Vereisungsmaßnahme abbilden zu können.

Das „freezrefcap“-Modul ermöglicht die Simulation eines strömenden sowie eines stehenden Fluids, da beide Fälle zeitweise bei einem intermittierenden Betriebs der Gefrieranlage vorliegen. Aufgrund der unterschiedlichen Strömungsbedingungen und der abweichenden maßgebenden Wärmetransportmechanismen wird innerhalb des Berechnungsansatzes zwischen den Fällen „Flow“ und „No Flow“ unterschieden.

Der Berechnungsansatz des „freezrefcap“-Moduls basiert auf der Theorie der thermischen Widerstände nach Hellström (1991), wodurch eine detaillierte Berücksichtigung des Gefrierrohraufbaus (s. Bild 4.3) und der Strömung innerhalb des Gefrierrohrs möglich wird. Der Wärmetransport zwischen dem Fallrohr und dem Ringraum des Gefrierrohrs sowie zwischen dem Ring-

raum und dem umgebenden Boden wird über die jeweiligen thermischen Gesamtwiderstände R_{innen} und $R_{\text{außen}}$ berücksichtigt (s. Bild 5.2). Durch die Berücksichtigung des Wärmetransports über thermische Widerstände kann das Gefrierrohr für die Berechnung im „freezrefcap“-Modul in zwei Zellstapel unterteilt werden. Diese repräsentieren zum einen den Bereich des inneren Fallrohrs und zum anderen den Bereich des Ringraums zwischen Fall- und Steigrohr.

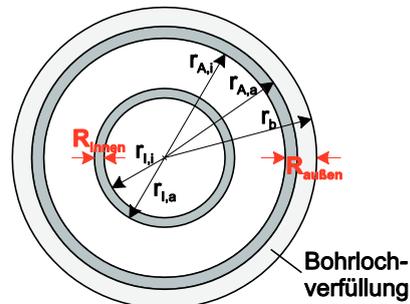


Bild 5.2 Gefrierrohrgeometrie und thermische Widerstände im „freezrefcap“-Modul (nach Mottaghy & Dijkshoorn 2012)

Da im Fall von Vereisungsmaßnahmen hohe Durchflussraten sowie vergleichsweise geringe Gefrierrohrängen vorliegen, legt ein Wasserteilchen der Rohrströmung den gesamten Weg durch das Gefrierrohr innerhalb eines Zeitschritts zurück. Dies rechtfertigt zum einen die Abbildung der Rohrströmung über die Theorie der thermischen Widerstände. Zum anderen kann somit innerhalb eines Zeitschritts die Temperatur im Innen- und Außenrohr in jeder Gitterzelle bestimmt werden. Die Bestimmung der Temperaturen erfolgt dabei im Rahmen einer Vorwärtsintegration unter Einhaltung der Wärmebilanzgleichung. Zur Gewährleistung der numerischen Stabilität dieser Vorwärtsintegration innerhalb des „freezrefcap“-Moduls wird in jedem Zeitschritt das Courant-Kriterium (s. Kapitel 7.1) überprüft.

Die Kühlleistung bestimmt sich letztlich aus der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf der jeweils obersten Gitterzelle ($T_{F,VL} - T_{F,RL}$), dem Durchfluss Q_F und der temperaturabhängigen volumetrischen Wärmekapazität des Fluids $c_{v,F}$:

$$P = c_{v,F} \cdot Q_F \cdot (T_{F,VL} - T_{F,RL}) \quad (5.2)$$

Der Ablauf der Berechnung der Temperaturen im Innen- und Außenrohr sowie der dazugehörigen Wärmeströme und thermischen Widerstände wird im Folgenden, exemplarisch für einen Zeitschritt, getrennt für die beiden Fälle „Flow“ und „No Flow“ erläutert.

Berechnung im Fall „Flow“

Die Aufteilung des Gefrierrohrs in die beiden Zellstapel wird in Bild 5.3 verdeutlicht. Dabei sind die Gefrierrohrwände mit dargestellt, die in der Berechnung aber nur über thermische Widerstände berücksichtigt werden. Im „freezrefcap“-Modul sind die Temperaturen im Innen- und Außenrohr an den Zellrändern definiert, die Bodentemperaturen in SHEMAT-Suite hingegen in Zellmitte. Die Wärmeströme sowie die Materialeigenschaften des Gefrierrohrs sind ebenfalls in Zellmitte definiert. Diese Definitionen sind die Grundlage für die weiteren Berechnungsschritte.

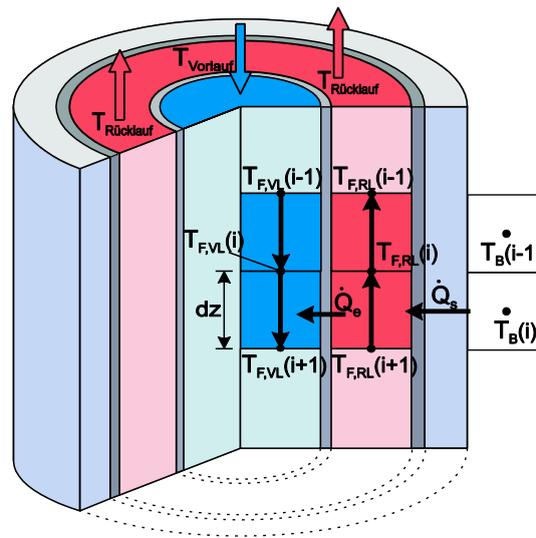


Bild 5.3 Schematischer Berechnungsquerschnitt im Fall „Flow“
(nach Mottaghy & Dijkshoorn 2012)

Die Berechnung der Temperaturen in den Zellen i im Vor- und Rücklauf für einen Zeitschritt t erfolgt auf Grundlage der Temperaturen des vorherigen Zeitschritts ($t-1$). Die erforderlichen temperaturabhängigen Eingangsparameter dieser Berechnung, wie Wärmeströme, Materialeigenschaften und thermische Widerstände, werden daher auch für die Temperaturen des vorherigen Zeitschritts T^{t-1} bestimmt. Außerdem wird die Strömungsrichtung des Fluids berücksichtigt. Die Temperatur der ersten Zelle im Vorlauf entspricht dabei stets der als Randbedingung festgesetzten Vorlauftemperatur. Die Temperatur der weiteren Zellen ($i+1$) im Vorlauf bestimmt sich dann aufgrund der Strömung in Richtung des Gefrierrohrfußes auf der Grundlage der Temperatur der darüber liegenden Zelle (i) und des Wärmestroms \dot{Q}_e zwischen Innen- und Außenrohr.

$$T_{F,VL}^t(i+1) = T_{F,VL}^{t-1}(i) + \frac{\dot{Q}_e(i)}{Q_F \cdot c_{v,F}} \quad (5.3)$$

Im Rücklauf bestimmt sich die Temperatur einer Zelle i aufgrund der Strömung in Richtung des Gefrierrohranfangs auf der Grundlage der Temperatur der darunter liegenden Zelle ($i+1$). Die Summe der Wärmeströme ergibt sich dabei aus dem austretenden Wärmestrom \dot{Q}_e und dem eintretenden Wärmestrom \dot{Q}_s zwischen Außenrohr und umgebendem Boden.

$$T_{F,RL}^t(i) = T_{F,RL}^{t-1}(i+1) + \frac{-\dot{Q}_e(i) + \dot{Q}_s(i)}{Q_F \cdot c_{v,F}} \quad (5.4)$$

Die vorgestellten Berechnungsschritte für die Bestimmung der Vor- und Rücklauftemperaturen werden zunächst für alle Zellen i vom Gefrierrohranfang bis zum Gefrierrohrfuß zum Zeitpunkt t durchgeführt. Dabei wird am Ende des Berechnungsschritts für die jeweilige Zelle i die zum Zeitpunkt t berechnete Temperatur dieser Zelle dem Zeitschritt ($t-1$) zugewiesen. Dadurch wird die im ersten Berechnungsschritt ermittelte, veränderte Temperatur der Zelle i im nächsten

Berechnungsschritt für die darunterliegende Zelle ($i+1$) berücksichtigt. In einem weiteren Iterationsschritt über alle Zellen i werden ausgehend vom Gefrierrohrfuß bis zum Gefrierrohranfang die Rücklauftemperaturen im Außenrohr nochmals auf Basis des gerade beschriebenen Berechnungsablaufs im Zeitschritt t bestimmt. Dieses Vorgehen gewährleistet eine Ausbreitung der Vorlauftemperatur über das gesamte Gefrierrohr in Strömungsrichtung innerhalb eines Zeitschritts t . Da sich die Rücklauftemperatur im Zeitschritt t dabei ein zweites Mal ändert, wurde auf eine explizite Darstellung des Zeitschritts in Bild 5.3 verzichtet.

Die für die Berechnung der Temperaturverteilung im Gefrierrohr notwendigen Wärmeströme können auf Basis der Temperaturdifferenz und der thermischen Widerstände bestimmt werden. Der Wärmestrom \dot{Q}_s zwischen Außenrohr und umgebendem Boden wird in Abhängigkeit des thermischen Widerstands $R_{\text{außen}}$ und der Temperaturdifferenz zwischen Fluidtemperatur im Rücklauf und der Bodentemperatur bestimmt (s. Gleichung (5.5)). Aufgrund der Strömung in Richtung des Gefrierrohranfangs wird die Temperatur im Fluid an der Zellunterkante gewählt.

$$\dot{Q}_s(i) = \frac{T_B^t(i) - T_{F,RL}^{t-1}(i+1)}{R_{\text{außen}}} \quad (5.5)$$

Der Wärmestrom \dot{Q}_e zwischen Innen- und Außenrohr resultiert aus dem thermischen Widerstand R_{innen} und der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf. Der Wärmestrom \dot{Q}_e darf wegen des zum Gefrierrohrfuß strömenden Fluids nicht mit den Vor- und Rücklauftemperaturen gegenüberliegender Zellen i berechnet werden, sondern bestimmt sich nach Gleichung (5.6) mit den Temperaturen versetzter Zellen.

$$\dot{Q}_e(i) = \frac{T_{F,RL}^{t-1}(i+1) - T_{F,VL}^{t-1}(i)}{R_{\text{innen}}} \quad (5.6)$$

Die Problematik der Temperaturzuordnung bei der Bestimmung des Wärmestroms \dot{Q}_e wird in Bild 5.4 deutlich. Durch die Wahl gegenüberliegender Temperaturpunkte in den Zellen i für den Zeitpunkt ($t-1$) wären diese Temperaturpunkte zum betrachteten Zeitpunkt t bereits zwei Zellen voneinander entfernt (Bild 5.4 - links). Bei der Wahl versetzter Temperaturpunkte in den Zellen i und ($i+1$) zum Zeitpunkt ($t-1$) hingegen bleibt der Abstand der Temperaturpunkte für den betrachteten Zeitpunkt t gleich (Bild 5.4 - rechts). Zur Berücksichtigung der Strömungsrichtung des Fluids ist dieser Fall für die Berechnung des Wärmestroms \dot{Q}_e in der Zelle i maßgebend.

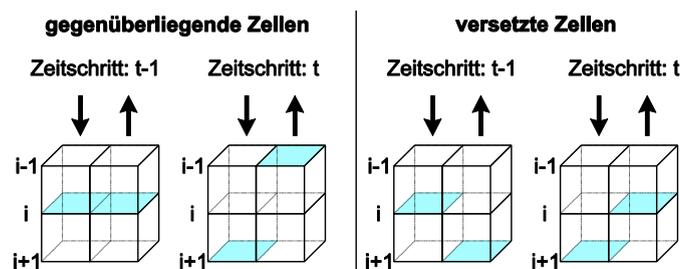


Bild 5.4 Schematische Darstellung der Bewegung der Temperaturpunkte im Vor- und Rücklauf für die Bestimmung des betreffenden Wärmestroms

Im Fall eines strömenden Fluids beinhalten die thermischen Gesamtwiderstände des Innen- und des Außenrohrs sowohl konduktive als auch konvektive Anteile. Der Gesamtwiderstand R_{innen} des Fallrohrs ergibt sich aufgrund der Konduktion über das PE-Rohr ($R_{\text{kond.,innen}}$) und der Konvektion an der Innenseite des Fallrohrs ($R_{\text{konv.,I,i}}$) und an der Außenseite des Fallrohrs ($R_{\text{konv.,I,a}}$):

$$R_{\text{innen}} = R_{\text{konv.,I,i}} + R_{\text{kond.,innen}} + R_{\text{konv.,I,a}} \quad (5.7)$$

Im Außenrohr setzt sich der thermische Gesamtwiderstand $R_{\text{außen}}$ nur aus einem konduktiven Anteil über das Stahlrohr und ggf. die Bohrlochverfüllung ($R_{\text{kond.,außen}}$) sowie einem konvektiven Anteil durch das strömende Fluid an der Innenseite des Außenrohrs ($R_{\text{konv.,A,i}}$) zusammen:

$$R_{\text{außen}} = R_{\text{konv.,A,i}} + R_{\text{kond.,außen}} \quad (5.8)$$

Die konduktiven thermischen Widerstände werden nach Gleichung (4.20) bestimmt. Die konvektiven Widerstände bestimmen sich nach Gleichung (4.27) unter Einbeziehung der jeweils erforderlichen Bestimmungsgleichungen für die Nusselt-Zahl bei einer Rohrströmung und einer Strömung durch den Ringspalt nach Kapitel 4.2.4.

Da für den Fall eines strömenden Fluids der Wärmetransport in Strömungsrichtung von der erzwungenen Konvektion dominiert wird, kann der Anteil aus Wärmeleitung im Fluid in Strömungsrichtung in der vorgestellten Berechnung vernachlässigt werden.

Berechnung im Fall „No Flow“

Bei Vereisungsmaßnahmen wird in der Erhaltungsphase oftmals der intermittierende Gefrierbetrieb eingesetzt, der durch ein zeitweises Ausschalten der Gefrierrohre gekennzeichnet ist. Die Kühlleistungsermittlung ist in diesem Fall nicht von besonderer Bedeutung, da die Kühlleistung einfach zu Null gesetzt werden kann. Trotzdem verändert sich während dieser Phase der Deaktivierung das Temperaturfeld im Gefrierrohr, das beim erneuten Aktivieren der Gefrierrohre dann als Ausgangstemperaturfeld bekannt sein muss. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, einen Ansatz zur Berechnung der Temperaturentwicklung in deaktivierten Gefrierrohren in das „freezrefcap“-Modul zu integrieren.

Im Fall eines stehenden Fluids ändern sich die thermischen Widerstände, da die Anteile aus Konvektion entfallen. Außerdem tritt in diesem Fall nicht nur Konduktion in radialer Richtung, sondern auch in Längsrichtung des Gefrierrohrs auf, die bei einem stehenden Fluid nicht mehr vernachlässigt werden kann. Die Wärmeströme in Längsrichtung entstehen aufgrund einer zwischen Gefrierrohranfang und – fuß vorliegenden Temperaturdifferenz.

Die Berechnungen im Fall „No Flow“ erfordern die Definition eines neuen Bezugshorizonts, so dass die Wärmeströme \dot{Q}_s und \dot{Q}_e nicht mehr in der Zellmitte liegen, sondern auf den Zellrändern (s. Bild 5.5).

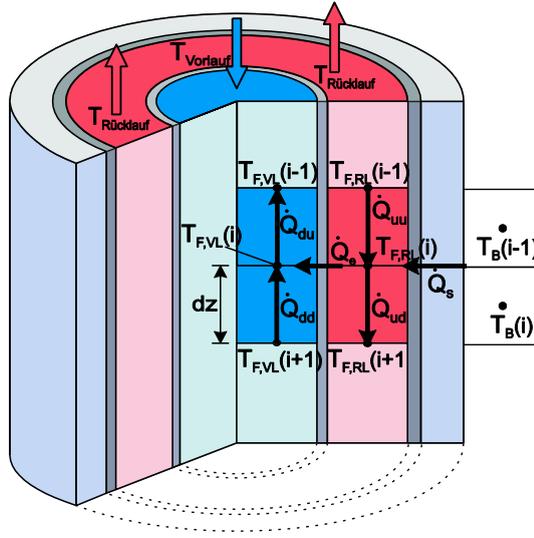


Bild 5.5 Schematischer Berechnungsquerschnitt im Fall „No Flow“ (nach Mottaghy & Dijkshoorn 2012)

Die Temperaturen des Fluids im Innen- und Außenrohr werden trotz des stehenden Fluids weiterhin mit Vor- und Rücklauf bezeichnet. Die Berechnung der Temperaturen im Innen- und Außenrohr erfolgt auch im Fall „No Flow“ für den Zeitschritt t auf der Grundlage der Temperaturen des vorherigen Zeitschritts ($t-1$). Aufgrund des stehenden Fluids ist im Gegensatz zum Fall „Flow“ keine Unterscheidung der Zelllage i vorzunehmen, so dass stets gegenüberliegende Zellen i betrachtet werden.

Die Temperatur einer Zelle i im Vorlauf ergibt sich auf Basis der Temperatur des vorherigen Zeitschritts ($t-1$) dieser Zelle i und der Wärmeströme, die sich aus dem radialen Wärmestrom \dot{Q}_e und den axialen Wärmeströmen \dot{Q}_{dd} und \dot{Q}_{du} zusammensetzen:

$$T_{F,VL}^t(i) = T_{F,VL}^{t-1}(i) + \frac{\Delta t}{dz \cdot c_{v,F} \cdot \pi \cdot r_{I,i}^2} \cdot (\dot{Q}_e + \dot{Q}_{dd} - \dot{Q}_{du}) \quad (5.9)$$

Die Berechnung der Temperaturen im Rücklauf erfolgt quasi analog zum Vorlauf, wobei im Rücklauf zusätzlich noch der Wärmestrom \dot{Q}_s zu betrachten ist und die Bezugsfläche über den Ringraumquerschnitt ermittelt wird.

$$T_{F,RL}^t(i) = T_{F,RL}^{t-1}(i) + \frac{\Delta t}{dz \cdot c_{v,F} \cdot \pi \cdot (r_{A,i}^2 - r_{I,a}^2)} \cdot (\dot{Q}_s - \dot{Q}_e - \dot{Q}_{ud} + \dot{Q}_{uu}) \quad (5.10)$$

Die Formeln zur Berechnung der Temperaturen im Vor- und Rücklauf für den Fall eines stehenden Fluids weisen eine Abhängigkeit von der Zeitschrittweite Δt auf. Im Fall kleiner Zeitschrittweiten, die zumeist wegen der Einhaltung der Stabilitätskriterien vorliegen, stellt dies kein Problem dar. Ein kleiner Zeitschritt führt in diesem Fall zu einer kleinen und damit verträglichen Temperaturänderung. Sollten unter der Einhaltung der Stabilitätskriterien trotzdem größere Zeitschrittweiten verwendet werden, kann dies unrealistisch große Temperaturänderungen zur Folge

haben. Zur Beherrschung dieses Problems wurde eine Kontrollfunktion integriert, die die berechnete Temperaturänderung mit der maximal möglichen Temperaturänderung vergleicht. Die maximal mögliche Temperaturdifferenz entspricht dabei der Temperaturdifferenz, die den jeweiligen Wärmestrom verursacht. Die Kontrollfunktion kann somit unrealistische Temperaturänderungen abfangen und durch die maximal mögliche Temperaturänderung ersetzen. Trotz dieser Kontrollfunktion ist aber generell zu empfehlen, stets eine geringe Zeitschrittweite zu wählen.

Die Bestimmung der Temperaturänderungen im Vor- und Rücklauf erfordert im Fall eines stehenden Fluids eine Berechnung aller Wärmeströme in radialer und axialer Richtung. Der Wärmestrom \dot{Q}_s zwischen Außenrohr und umgebenden Boden berechnet sich in Abhängigkeit des thermischen Widerstands $R_{\text{außen}}$ und der Temperaturdifferenz zwischen der Fluidtemperatur im Rücklauf und der Bodentemperatur nach Gleichung (5.11). Die Bodentemperatur ist dabei aufgrund der unterschiedlichen Bezugshorizonte im „freezrefcap“-Modul und in SHEMAT-Suite zu mitteln. Der thermische Widerstand $R_{\text{außen}}$ entspricht in diesem Fall dem konduktiven thermischen Widerstand $R_{\text{kond.,außen}}$ des Außenrohrs und ggf. der Bohrlochverfüllung.

$$\dot{Q}_s(i) = \frac{\left(\frac{T_B^t(i) + T_B^t(i-1)}{2}\right) - T_{F,RL}^{t-1}(i)}{R_{\text{außen}}} \quad (5.11)$$

Der Wärmestrom \dot{Q}_e zwischen Innen- und Außenrohr resultiert aus dem thermischen Widerstand R_{innen} , der dem konduktiven thermischen Widerstand des Fallrohrs $R_{\text{kond.,innen}}$ entspricht, und der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf:

$$\dot{Q}_e(i) = \frac{T_{F,RL}^{t-1}(i) - T_{F,VL}^{t-1}(i)}{R_{\text{innen}}} \quad (5.12)$$

Für die Berechnungen der axialen Wärmeströme im Innenrohr \dot{Q}_{dd} und \dot{Q}_{du} sowie im Außenrohr \dot{Q}_{ud} und \dot{Q}_{uu} (s. Gleichungen (5.13) bis (5.16)) werden die vorliegenden Temperaturdifferenzen der benachbarten Zellen i und der konduktive thermische Widerstand des Fluids benötigt (s. Gleichung (4.22)). Diese axialen Wärmeströme fallen aufgrund der vergleichsweise geringen Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf bei Vereisungsmaßnahmen meist gering aus.

$$\dot{Q}_{du}(i) = \frac{T_{F,VL}^{t-1}(i) - T_{F,VL}^{t-1}(i-1)}{R_{\text{kond.,VL}}} \quad (5.13)$$

$$\dot{Q}_{dd}(i) = \frac{T_{F,VL}^{t-1}(i+1) - T_{F,VL}^{t-1}(i)}{R_{\text{kond.,VL}}} \quad (5.14)$$

$$\dot{Q}_{ud}(i) = \frac{T_{F,RL}^{t-1}(i) - T_{F,RL}^{t-1}(i+1)}{R_{\text{kond.,RL}}} \quad (5.15)$$

$$\dot{Q}_{uu}(i) = \frac{T_{F,RL}^{t-1}(i-1) - T_{F,RL}^{t-1}(i)}{R_{\text{kond.,RL}}} \quad (5.16)$$

5.3.2 Kopplung mit SHEMAT-Suite

In SHEMAT-Suite wird das Gefrierrohr basierend auf der Kelvin'schen Linienquellentheorie als eindimensionale Linienquelle abgebildet. Durch Zuweisung der entsprechenden Gefrierrohereigenschaften wird eine Zellreihe somit als Gefrierrohr definiert. Zur Gewährleistung einer korrekten Wärmeübertragung in SHEMAT-Suite sind die Abmessungen der Gefrierrohrzellen so zu wählen, dass die Oberfläche der Gefrierrohrzelle in etwa der in der Realität vorhandenen wärmeübertragenden Gefrierrohroberfläche entspricht.

Die Berechnung der Wärmeströme sowie der Temperaturverteilung im Gefrierrohr, bestehend aus Vor- und Rücklauf, wird im „freezrefcap“-Modul realisiert. Dabei liegt eine Finite-Differenzen-Formulierung zugrunde, die eine Berücksichtigung der Wärmetransport- und Strömungsprozesse in axialer Richtung ermöglicht. Die radialen Wärmetransportprozesse werden in dieser Formulierung über das Konzept der thermischen Widerstände nach Hellström (1991) berücksichtigt.

Die Kopplung zwischen dem „freezrefcap“-Modul zur Berechnung der Wärmeströme und Temperaturen innerhalb des Gefrierrohrs und SHEMAT-Suite zur Berechnung der Temperaturentwicklung im Boden wird durch zwei Schnittstellen realisiert (s. Bild 5.6).

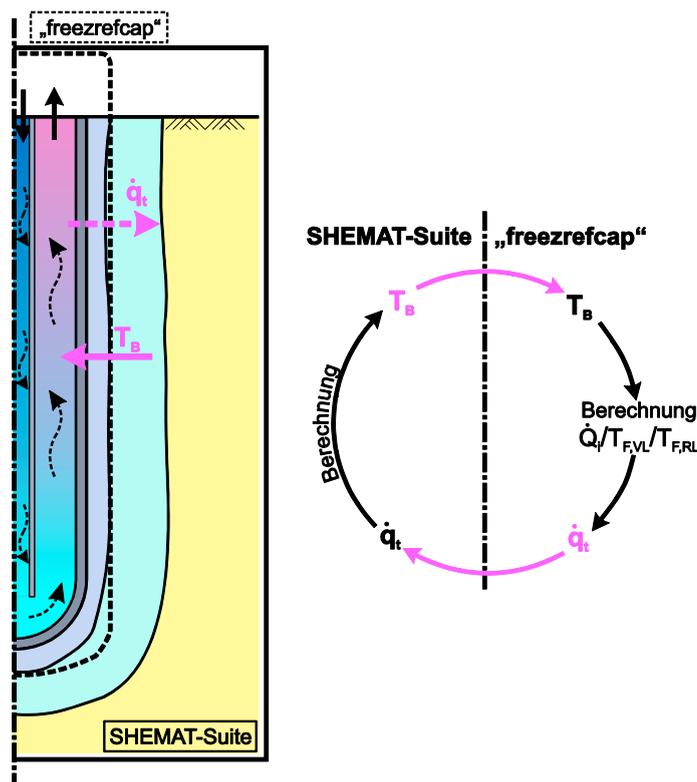


Bild 5.6 Kopplung zwischen dem „freezrefcap“-Modul und SHEMAT-Suite

In SHEMAT-Suite wird die Bodentemperatur T_B in jedem Zeitschritt berechnet und als Dirichlet-Randbedingung an das „freezrefcap“-Modul übergeben wird. Auf Basis dieser Temperaturrandbedingung T_B werden im „freezrefcap“-Modul die auftretenden Wärmeströme

und letztlich die Temperaturverteilung im Gefrierrohr berechnet. Am Ende der Berechnungen innerhalb des „freezrefcap“-Moduls für einen Zeitschritt wird ein volumetrischer Wärmestrom \dot{q}_t aus dem Wärmestrom \dot{Q}_s zwischen Außenrohr und umgebenden Boden bestimmt. Dieser Wärmestrom \dot{q}_t wird an die Linienquelle in SHEMAT-Suite übergeben und führt dort wiederum zu einer Veränderung der Bodentemperatur T_B . Diese veränderte Bodentemperatur T_B wird in der Berechnung des nächsten Zeitschritts dann wieder innerhalb des „freezrefcap“-Moduls berücksichtigt.

5.3.3 Erforderliche Eingabeparameter und weitere Adaptionen

Die detaillierte Kühlleistungsermittlung erfordert die Eingabe einer Reihe weiterer Parameter. Diese werden in zwei Input-Dateien mit den Namen „freezrefcap.par“ und „freezrefcap.ini“ definiert, die zusätzlich zur eigentlichen Modell-Datei für SHEMAT-Suite erstellt werden müssen (s. Anlage A).

Die „freezrefcap.par“-Datei enthält Angaben zu den Gefrierrohrparametern. Zunächst sind die Radien des Fall- und Steigrohrs sowie der Bohrlochverfüllung und die Wärmeleitfähigkeiten der verwendeten Materialien anzugeben. Außerdem sind die Länge des Gefrierrohrs sowie der Abstand des Gefrierrohrs zum Modellrand in axialer Richtung einzugeben. In der zunächst in SHEMAT-Suite umgesetzten ursprünglichen Formulierung des Erdwärmesondenmoduls nach Mottaghy & Dijkshoorn (2012) konnten die genannten Parameter nur global für alle Gefrierrohre definiert werden. Das größte Problem stellte dabei die Definition einer globalen Gefrierrohrlänge sowie eines globalen Modellrandabstands dar, die beide in der Praxis nur in den seltensten Fällen vorliegen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit die variable Eingabe der Gefrierrohrparameter und dabei vor allem der Gefrierrohrlänge und des Modellrandabstands durch eine Weiterentwicklung des Moduls realisiert. Somit können mit dem vorliegenden „freezrefcap“-Modul auch reale Vereisungsmaßnahmen mit unterschiedlichen Gefrierrohrgeometrien und -längen sowie unterschiedlichen Ansatzpunkten der Gefrierrohre simuliert werden. Als weiterer Eingabeparameter ist in dieser Input-Datei die Lage der Gefrierrohre im Modellgitter von SHEMAT-Suite über die Koordinaten i und j festzulegen. Die Koordinaten des Gefrierrohrs in k - bzw. z -Richtung werden im „freezrefcap“-Modul auf Basis der eingegebenen Gefrierrohrlänge sowie des Modellrandabstands bestimmt. Dazu ist die vertikale Zelleinteilung des Gitternetzes innerhalb des „freezrefcap“-Moduls unter Einhaltung der Stabilitätskriterien zu definieren.

Neben der Gefrierrohrgeometrie muss auch der verwendete Kälteträger angegeben werden. Dies geschieht über spezifische Zahlenwerte, die den jeweiligen Kälteträger charakterisieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die temperaturabhängigen Materialeigenschaften verschiedener Kälteträger (s. Kapitel 4.3.2) implementiert. Dazu zählen unter anderem die drei bereits beschriebenen CaCl_2 -Solen mit den CaCl_2 -Konzentrationen von 29,9 %, 28,57 % und 27,4 %. Außerdem wurde der Kälteträger Antifrogen 52 % implementiert, der bei dem Modellversuch der ETH Zürich verwendet wurde (s. Kapitel 6.1). Eine Implementierung weiterer Kälteträger

über deren temperaturabhängige Materialeigenschaften ist ohne großen programmiertechnischen Aufwand möglich.

Die zweite zusätzliche Input-Datei „freezrefcap.ini“ enthält Angaben zum Kühlbetrieb des Kühlaggregats. Aufgrund seines Ursprungs als Erdwärmesonden-Modul bietet auch das „freezrefcap“-Modul die Möglichkeit entweder einen Betrieb mit konstanter Vorlauftemperatur oder mit konstanter Leistung zu simulieren. Diese Unterscheidung wird in der Input-Datei zunächst definiert, wobei im Rahmen von Vereisungsmaßnahmen in den meisten Fällen eine konstante Vorlauftemperatur gewählt wird. Die Simulation kann zeitlich gesehen in unterschiedliche Perioden eingeteilt werden. Dies ermöglicht zum Beispiel die Simulation unterschiedlicher Durchflussraten oder Schwankungen in der Vorlauftemperatur. Die Anzahl der Perioden ist in der Input-Datei anzugeben und dann näher zu spezifizieren. Dafür sind neben der Dauer der Periode die Vorlauftemperatur bzw. die Kühlleistung und der Durchfluss anzugeben. Außerdem ist zwischen den beiden möglichen Varianten „Flow“ und „No Flow“ zu unterscheiden. Dies erfordert die Angabe einer Kennzahl in der jeweiligen Periode, die ein stehendes (0) oder ein zirkulierendes (1) Fluid definiert.

Zu Beginn der numerischen Simulation werden die Gefrierrohrzellen in SHEMAT-Suite und somit auch innerhalb des „freezrefcap“-Moduls meist der Bodentemperatur gleichgesetzt. Wird in der Simulation ein Herunterkühlen der CaCl_2 -Sole vernachlässigt, so entstehen in diesem Fall zu Beginn der Simulation große Temperaturgradienten, die zu Oszillationen und damit zu einer Instabilität der gesamten numerischen Simulation führen können. Zur Beherrschung dieses Problems wurde als weiterer Eingabeparameter die Starttemperatur im Gefrierrohr gewählt, die in der „freezrefcap.ini“-Datei für alle Gefrierrohre global definiert werden kann.

Ein weiteres Problem der ursprünglichen Formulierung des Erdwärmesondenmoduls nach Mottaghy & Dijkshoorn (2012) stellte die Definition der Lage der Gefrierrohre dar. Mit diesem ursprünglichen Programm konnten lediglich horizontale oder vertikale Gefrierrohre, aber keine geneigten Gefrierrohre simuliert werden. Da die Definition geneigter Gefrierrohre für die realistische Simulation realer Baumaßnahmen essentiell ist, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine vereinfachte Abbildung geneigter Gefrierrohre implementiert.

Bei SHEMAT-Suite handelt es sich um ein Finite-Differenzen-Programm, das lediglich die Definition eines Rechteckrasters ermöglicht. Aufgrund dieser geometrischen Inflexibilität konnte die Gefrierrohrneigung nur durch eine Auslenkung der als Gefrierrohr definierten Zellen in SHEMAT-Suite realisiert werden (s. Bild 5.7). Die Berechnung der Wärmeströme und Temperaturen innerhalb des Gefrierrohrs im „freezrefcap“-Modul wurde im Rahmen dieser vereinfachten Formulierung zunächst nicht angepasst. Die Kopplung des „freezrefcap“-Moduls mit SHEMAT-Suite hingegen musste adaptiert werden. Dabei wurde die Übergabe der beiden Parameter, Bodentemperatur T_B und Wärmestrom \dot{q}_t , an die jeweiligen Gefrierrohrzellen verändert. Um die Zellen des geneigten Gefrierrohrs programmintern zu bestimmen, muss die Auslenkung der Gefrierrohre in der „freezrefcap.par“-Datei über die Angabe zusätzlicher Parameter definiert werden. Zu diesen zusätzlichen Parameter zählt z.B. die Angabe der Zellanzahl, um die die Gefrierrohrzellen ausgelenkt werden sollen.

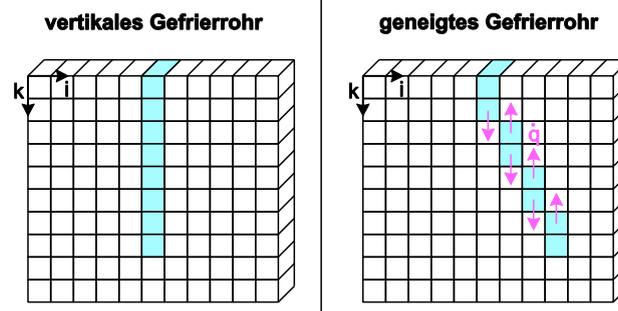


Bild 5.7 Vergleich der Zellbelegung eines vertikalen und eines geneigten Gefrierrohrs

Durch die Auslenkung der Gefrierrohrzellen ergibt sich allerdings ein Problem mit der Wärmeübertragungsfläche, wie Bild 5.7 verdeutlicht. Es entstehen zusätzliche Kontaktstellen zwischen Gefrierrohr und Boden in vertikaler Richtung, an denen Wärme übertragen wird. Diese Wärmeübertragung kann durch die Definition einer anisotropen Wärmeleitfähigkeit der betroffenen Kontaktzellen in SHEMAT-Suite beherrscht werden. Dabei wird den jeweiligen Kontaktzellen eine geringe Wärmeleitfähigkeit in vertikaler Richtung zugewiesen. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass mit diesem Vorgehen die Wärmeübertragung in vertikaler Richtung verhindert werden kann und somit realistische Ergebnisse der Frostkörperausbreitung erhalten werden.

Diese Weiterentwicklung des „freezrefcap“-Moduls ermöglicht schließlich die vereinfachte Simulation geneigter Gefrierrohre, die wiederum eine wichtige Voraussetzung für die Simulation realer Vereisungsmaßnahmen darstellt.

5.4 Betriebsvarianten der Erhaltungsphase

Die energetische Optimierung von Vereisungsmaßnahmen erfordert unbedingt die Betrachtung der Erhaltungsphase, da diese einen großen Anteil am Gesamtenergiebedarf einer Vereisungsmaßnahme ausmacht. In der Praxis werden aufgrund der langen Dauer der Erhaltungsphase oftmals Betriebsvarianten des Kühlaggregats eingesetzt. Diese erhalten die statisch erforderliche Frostkörperkubatur unter möglichst geringem Energieeinsatz und verringern dabei das weitere Anwachsen des Frostkörpers sowie die ggf. daraus folgenden schädlichen Hebungen. Diese Betriebsvarianten sind durch eine Reduzierung der Kühlenergie gekennzeichnet, die entweder mit Hilfe eines intermittierenden Betriebs oder einer erhöhten Vorlauftemperatur bzw. verringerten Kühlleistung realisiert werden kann.

Die Simulation der Betriebsvariante mit erhöhter Vorlauftemperatur erfordert keine weiteren Anpassungen des Programmcodes, da SHEMAT-Suite bereits eine zeitabhängige Steuerung von Temperaturrandbedingungen (als Dirichlet-Randbedingung) ermöglicht. Die Simulation des intermittierenden Betriebs hingegen war bislang mit dem Programm SHEMAT-Suite nicht möglich, wurde aber im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und sowohl für das „freezing“- als auch das „freezrefcap“-Modul implementiert.

Die Grundlage für die Simulation des intermittierenden Betriebs stellt die Möglichkeit des Deaktivierens und Aktivierens der Temperaturreandbedingung dar, über die das Gefrierrohr simuliert wird. Im „freezrefcap“-Modul mussten dafür keine zusätzlichen Erweiterungen vorgenommen werden, da eine zeitabhängige Deaktivierung bereits vorgesehen war und somit bei der Programmierung auf dieses Deaktivierungselement zurückgegriffen werden konnte. Im „freezing“-Modul war solch eine zeitabhängige Deaktivierung bislang nicht implementiert. Deswegen wurde im Rahmen dieser Arbeit eine zeitabhängige Aktivierung und Deaktivierung der Dirichlet-Randbedingung ergänzt.

Darauf aufbauend wurden dann zwei Varianten des intermittierenden Betriebs implementiert, die eine zeitabhängige sowie eine temperaturabhängige Steuerung der Gefrierrohre ermöglichen. Die zeitabhängige Steuerung der Gefrierrohre ist nicht nur für die Simulation des intermittierenden Betriebs einsetzbar, sondern bietet die Möglichkeit, einzelne Gefrierrohre nach einer bestimmten Zeit abzuschalten. Dies kann zum Beispiel auch bei der Simulation einer kombinierten Sole- und Stickstoffvereisung genutzt werden, bei der die hohe Kühlleistung der Stickstoffrohre lediglich während der Aufgefrierphase genutzt wird und die Stickstoffrohre in der Erhaltungsphase im Gegensatz zu den restlichen Solerohren deaktiviert werden. Die zeitabhängige Deaktivierung bzw. Aktivierung der Gefrierrohre wird in der Simulation über die zusätzliche Input-Datei „pipecontrol.par“ (s. Anlage A) definiert. In der „pipecontrol.par“-Datei muss zunächst allgemein die Anzahl der Schaltvorgänge, unabhängig ob Ein- oder Ausschalten, angegeben werden. Darauf folgen der Anzahl der Schaltvorgänge entsprechende Zeilen, die die genaue zeitabhängige Steuerung charakterisieren. Dabei ist das jeweilige Gefrierrohr über die Zeilennummer der Temperaturreandbedingung (# temp bcd) aus der Modell-Datei für SHEMAT-Suite (s. Anlage A) und die auszuführende Aktion, Aktivierung bzw. Deaktivierung, zu definieren. Außerdem ist der Zeitpunkt der auszuführenden Aktion als simulierte Gesamtzeit anzugeben.

Die temperaturabhängige Steuerungsvariante des intermittierenden Betriebs wurde in gleicher Weise sowohl in das „freezing- als auch das „freezrefcap“-Modul implementiert. Die Grundidee des temperaturgesteuerten intermittierenden Betriebs sieht folgenden Steuerungsablauf vor. Die Gefrierrohre sollen zeitweise deaktiviert werden, wenn der Frostkörper die statisch erforderliche Frostkörperkubatur überschreitet. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass ein Aktivieren der Gefrierrohre erfolgen muss, wenn die Frostkörperkubatur gerade erreicht ist bzw. fast unterschritten wird. Die Frostkörperkubatur stellt also die Randbedingung für die Steuerung des temperaturabhängigen intermittierenden Betriebs dar. Im Programm wurde diese Randbedingung über eine Kontrolle der Temperaturen am Frostkörpertrand realisiert, die in Abhängigkeit der vorliegenden Temperatur zu einer Aktivierung bzw. Deaktivierung der Gefrierrohre führen.

Die numerische Umsetzung basiert dabei auf der Definition einer maximalen und einer minimalen Grenztemperatur zur Kontrolle des Frostkörperwachstums. Die Grenztemperaturen werden in jedem Zeitschritt an Sensorpunkten kontrolliert, deren genaue Lage über die Zellkoordinaten i , j und k festgelegt wird. Ist die minimale Grenztemperatur an allen Sensorpunkten erreicht und der Frostkörper somit größer als notwendig, werden die Gefrierrohre deaktiviert. Die Gefrierrohrzellen werden ab diesem Zeitpunkt nicht mehr mit einer konstanten

Temperatur („freezing“) oder mit einem volumetrischen Wärmestrom („freezrefcap“) belegt, sondern unterliegen einer Temperaturveränderung, die von dem umgebenden Temperaturfeld bestimmt wird. Dieser Zustand bleibt so lange bestehen bis die maximale Grenztemperatur an nur einem Sensorpunkt festgestellt wird. Der Frostkörper droht demzufolge, an mindestens einer Stelle die statisch erforderliche Frostkörperdicke zu unterschreiten. Dies führt automatisch zu einer erneuten Aktivierung aller Gefrierrohre, wodurch es direkt zu einer aktiven Kühlung kommt und der Frostkörper wieder wächst.

Um eine individuelle Anpassung der intermittierenden Steuerungsvariante an die bei einer Vereisungsmaßnahme vorliegenden Verhältnisse zu ermöglichen, wurde weiterhin die Möglichkeit der Definition von Rohrgruppen eingeführt. Mit dieser in der Praxis gängigen Vorgehensweise kann eine weitere Reduzierung der Kühlleistung und somit eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Dazu ist zunächst die Anzahl der Rohrgruppen zu definieren und darauf aufbauend die Zuordnung der jeweiligen Gefrierrohre zu diesen Rohrgruppen zu bestimmen. Die Zuordnung wird wieder über die Angabe der Zeilennummer des entsprechenden Gefrierrohrs (# temp bcd) aus der Modell-Datei für SHEMAT-Suite realisiert. Dabei können den Rohrgruppen beliebig viele Gefrierrohre zugeordnet werden. Um die Aktivierung bzw. Deaktivierung der Rohrgruppen in Abhängigkeit der Temperaturen der umgebenden Frostkörpers zu steuern, wird weiterhin eine Zuordnung der Sensorpunkte zu den Rohrgruppen notwendig. Dazu wird bei der Definition der Sensorpunkte neben den Zellkoordinaten i, j und k auch die Nummer der Rohrgruppe angegeben. Dies ermöglicht die individuelle, voneinander unabhängige Aktivierung bzw. Deaktivierung der einzelnen Rohrgruppen. Die Grenztemperaturen, die Sensorpunkte sowie die Rohrgruppen inklusive der Gefrierrohr- und Sensorpunktzuordnung werden in der zusätzlichen Input-Datei „intermittent.par“ definiert (s. Anlage A).

Beide Betriebsvarianten wurden sowohl in das „freezing“- als auch das „freezrefcap“-Modul implementiert, so dass mit beiden Modulen sowohl die Beeinflussung des Frostkörperwachstums, als auch die Auswirkung auf die erforderliche Kühlleistung bestimmt werden kann.

6 Überprüfung der numerischen Lösungsmodelle

Um sicherzustellen, dass die beiden in Kapitel 5 vorgestellten numerischen Lösungsmodelle zur Bestimmung der Kühlleistung bei Vereisungsmaßnahmen die Realität richtig beschreiben, bedarf es einer Überprüfung der numerischen Lösungsmodelle. Die Überprüfung setzt sich dabei maßgeblich aus der Verifikation und der Validierung zusammen. Die Verifikation kontrolliert den numerischen Fehler und die Validierung kontrolliert den Modellfehler durch den Vergleich mit Experimenten (Laurien & Oertel 2013).

Zunächst sind die beiden numerischen Lösungsmodelle zu verifizieren, indem überprüft wird, ob die zugrunde liegenden Gleichungen mathematisch richtig gelöst werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf eine Verifikation bereits implementierter Differentialgleichungen und Gleichungslöser in SHEMAT-Suite verzichtet. Nur die neu implementierten Gleichungen sowie Berechnungsabläufe der beiden numerischen Lösungsmodelle wurden überprüft, indem während der Simulation sämtliche Zwischenergebnisse ausgegeben und anschließend für mehrere Zeitschritte mit einer Handrechnung verglichen wurden. Die Verifizierung der numerischen Lösungsmodelle hat damit letztlich gezeigt, dass die berechneten Simulationsergebnisse der implementierten Theorie entsprechen. Im Anschluss an die Verifizierung folgt die Validierung der numerischen Lösungsmodelle, um sicherzustellen, dass die Realität mit einer den Anforderungen entsprechenden Genauigkeit richtig beschrieben wird. Dazu werden die beiden numerischen Lösungsmodelle im Folgenden zunächst durch die Nachrechnung eines Modellversuchs überprüft, der sowohl ohne als auch mit Grundwasserströmungseinfluss durchgeführt wurde. Abschließend wird eine reale Vereisungsmaßnahme zur Herstellung von Querschlägen mit dem detaillierten Lösungsmodell („freezrefcap“) nachgerechnet, um die Praxistauglichkeit des Lösungsmodells zu verdeutlichen.

6.1 Nachrechnung eines Modellversuchs

Die beiden numerischen Lösungsmodelle zur Ermittlung der Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme werden zunächst durch die Nachrechnung eines Modellversuchs überprüft, da Modellversuche den Vorteil klar definierter Randbedingungen aufweisen. In der Literatur finden sich jedoch nur wenige Modellversuche, die den Anforderungen einer Nachrechnung genügen und über eine ausreichende Datenbasis verfügen. Ein Modellversuch, der diese Anforderungen erfüllt, wurde von Dr.-Ing. Sres und Dr.-Ing. Pimentel am Institut für Geotechnik der ETH Zürich unter der Leitung von Prof. Dr. Anagnostou durchgeführt (Sres 2009, Pimentel et al. 2012). Bei diesem Großversuch zur Frostkörperausbreitung im Boden unter Strömungseinfluss wurden neben der Temperaturverteilung im Boden auch die Vor- und Rücklauftemperatur sowie der Durchfluss durch das Kühlaggregats aufgezeichnet. Dieser

Modellversuch wurde für die Überprüfung der beiden entwickelten numerischen Lösungsmodelle ausgewählt, da er einen Vergleich zwischen der gemessenen Kühlleistung und den Ergebnissen der Simulation ermöglicht. Ein Teil der Messdaten wurde hierzu dankenswerter Weise von Herrn Dr.-Ing. Pimentel und Herrn Prof. Dr. Anagnostou zur Verfügung gestellt.

6.1.1 Versuchsaufbau und Eingangsparameter

Die folgende kurze Erläuterung der Konstruktion des Modellversuchs stützt sich maßgeblich auf die Ausführungen von Sres (2009) und Pimentel et al. (2012). Der Großversuch wurde in einer wasserdichten PVC-Wanne mit Innenabmessungen von 1,3 m x 1,0 m x 1,3 m installiert. Die PVC-Wanne wurde mit Holzträgern und vorgespannten Ankern ausgesteift, um mögliche Verformungen zu minimieren. Zur Reduzierung der thermischen Randeinflüsse wurden alle äußeren Kontaktflächen sorgfältig thermisch isoliert und der Modellversuch zusätzlich in einer Klimakammer durchgeführt. Zur Überprüfung der Isolation wurde eine Infrarotkamera eingesetzt, die Wärmebilder des Versuchsaufbaus am Ende eines laufenden Versuchs und damit zum Zeitpunkt der größten Temperaturdifferenz aufgenommen hat. Die Ergebnisse wiesen auf eine gute Isolation des Großversuchs hin.

Der Aufbau des Großversuchs im Inneren der PVC-Wanne ist in Bild 6.1 dargestellt. Es wurden insgesamt drei Gefrierlanzen mit einem Außendurchmesser des Steigrohrs von 41 mm und einem Außendurchmesser des Fallrohrs von 21 mm eingebaut, deren Abstand untereinander 322 mm betrug. Der Randabstand in y-Richtung betrug 178 mm. Durch zwei höhenverstellbare Wasserbehälter an den beiden Seiten der PVC-Wanne konnten Druckgradienten von bis zu 1 m/m eingestellt werden. Somit konnte die PVC-Wanne in x-Richtung mit unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten durchströmt werden. Zwischen dem isolierten Deckel der PVC-Wanne und dem Modellboden befand sich eine 10 cm dicke Luftschicht, die sich im Verlauf des Versuchs abkühlte und deren Temperaturverlauf im Versuch ebenfalls erfasst wurde.

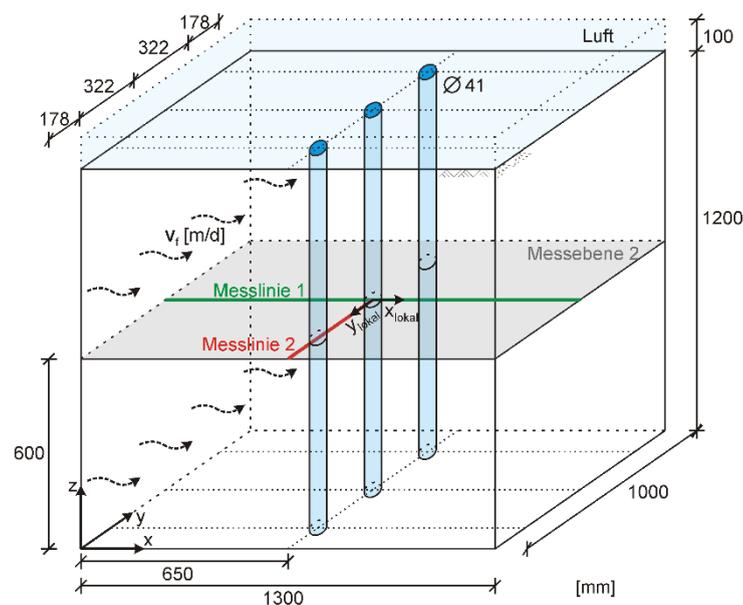


Bild 6.1 Aufbau und Geometrie des Großversuchs (nach Sres 2009)

Der Versuchsaufbau umfasste weiterhin ein umfangreiches Messkonzept, um die Temperatursausbreitung im Modellboden und alle veränderlichen Randbedingungen zu erfassen. Ein Großteil der Temperatursensoren wurde in der mittleren Messebene 2 und dabei insbesondere auf der Messlinie 1 (parallel zur Strömung) und der Messlinie 2 (senkrecht zur Strömung) angeordnet. Bei der Verteilung der Temperatursensoren senkrecht zur Strömungsrichtung wurde die Symmetrie des gesamten Versuchsaufbaus konsequent ausgenutzt.

Als Modellboden wurde ein mittelfeiner, enggestufter Sand aus einer Kiesgrube in der Nähe von Zürich verwendet, der als Weiacher Sand bezeichnet wird. Die geotechnischen und thermischen Parameter des Modellbodens wurden in Laborversuchen bestimmt, um eine genaue numerische Abbildung des Modellbodens gewährleisten zu können. Aus den Ergebnissen der Laborversuche konnten die notwendigen Eingangswerte der Bodeneigenschaften für die numerische Simulation des Modellbodens der Großversuche mit SHEMAT-Suite abgeleitet werden (s. Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1 Eingangswerte der Bodeneigenschaften des Weiacher Sands für SHEMAT-Suite

Parameter SHEMAT-Suite	Quelle	Wert	Einheit
Trockendichte ρ_d	Versuch (Sres 2009)	1571	kg/m ³
Korndichte ρ_s	Versuch (Sres 2009)	2665	kg/m ³
Porosität n	s. Gleichung (4.1)	0,41	-
Quarzgehalt q	Versuch (Sres 2009)	0,446	-
Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs λ_s	s. Gleichung (4.43)	3,873	W/(mK)
Permeabilität k	s. Gleichung (4.7) mit k_f aus Versuch (Sres 2009)	1,1886E ⁻¹¹	m ²
Parameter a und b des Verlaufs des ungefrorenen Wassergehalts	s. Gleichung (4.49) mit Körnungslinie (Sres 2009)	$a = 0,0825$ $b = -5,417$	-
Kompressibilität des Feststoffs α_s	Literaturwert (z.B. Freeze & Cherry 1979)	1,00E ⁻⁰⁸	Pa ⁻¹
Impedanzfaktor E_i	Literaturwert (z.B. Lundin 1990)	10	-

Insgesamt wurden zwei Versuchsreihen mit mehreren Versuchen und unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten durchgeführt, wobei auf einen Aus- und Wiedereinbau des Bodens zwischen den jeweiligen Versuchen verzichtet wurde. In der ersten Versuchsreihe war die Kühlleistung der mittleren Gefrierlanze aufgrund eines Montagefehlers geringer. Da die Vorlauftemperatur und der Durchfluss für Simulationen mit dem „freezrefcap“-Modul nur global eingestellt werden können, kamen für die Nachrechnung im Rahmen dieser Arbeit lediglich Versuche der zweiten Versuchsreihe in Frage, bei der eine gleichmäßige Verteilung der Kühlleistung auf alle Gefrierlanzen vorlag.

Für die Validierung der numerischen Lösungsmodelle wurden schließlich ein Versuch ohne Grundwasserströmung und ein Versuch mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 1,5 m/d herangezogen. Um die Simulationsergebnisse der Kühlleistung durch einen Vergleich mit der gemessenen Kühlleistung überprüfen zu können, müssen die Messwerte um die Verluste der gesamten Gefrieranlage korrigiert werden. Dafür wurde von Sres (2009) im Rahmen des Versuchskonzepts ein Nullversuch durchgeführt, bei dem die Kühlleistung der Gefrieranlage für mit Isolationsmaterial umwickelte Gefrierlanzen gemessen wurde. Um diesen Korrekturwert von im Mittel 0,56 kW wurde die Kühlleistung jedes Versuchs reduziert. Die Verluste der Gefrieranlage lagen demnach im Bereich von bis zu 45 % der Gesamtkühlleistung.

Der zeitliche Verlauf der um die Verluste korrigierten, gemessenen Kühlleistung des Versuchs ohne Grundwasserströmung sowie des Versuchs mit einer Grundwasserströmung von 1,5 m/d ist in Bild 6.2 dargestellt. Die Versuchsergebnisse zeigen deutlich, dass die Kühlleistung für einen Versuch mit einer Grundwasserströmung größer ist als die Kühlleistung für einen Versuch ohne Grundwasserströmung. Der Grund hierfür ist der zusätzlich eingetragene Wärmestrom durch das Grundwasser, der beim Gefrieren des Bodens kompensiert werden muss.

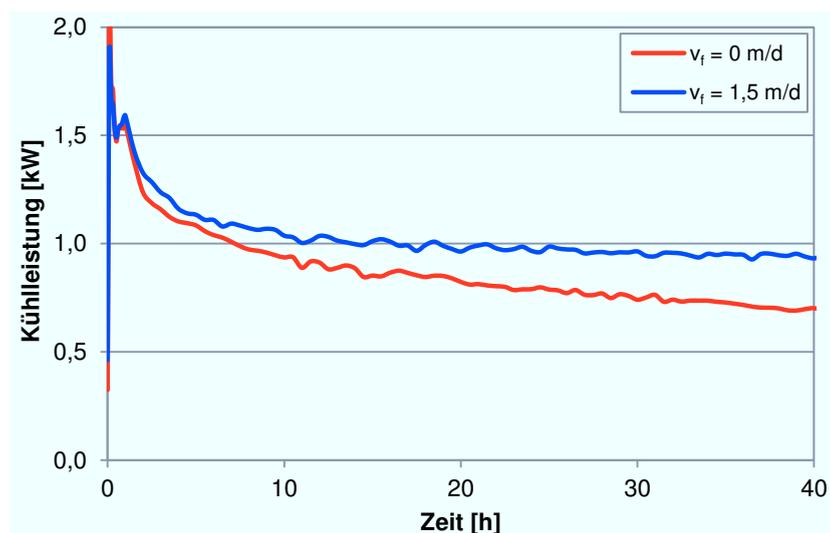


Bild 6.2 Vergleich der um die Verluste korrigierten, gemessenen Kühlleistungen der beiden Modellversuche

6.1.2 Ergebnisse der Simulation mit dem „freezing“-Modul

In einem ersten Schritt wird die vereinfachte Kühlleistungsermittlung des „freezing“-Moduls durch die Nachrechnung der beiden Modellversuche validiert. Die Simulation der Frostausbreitung im Boden mit Hilfe des „freezing“-Moduls wurde bereits von Baier (2008) durch die Nachrechnung zweier Modellversuche von Makowski (1986) und Frivik & Comini (1982) überprüft. Da die richtige Abbildung des Temperaturverlaufs im Boden die Grundvoraussetzung für eine korrekte Kühlleistungsermittlung ist, werden im Folgenden sowohl die Simulationsergebnisse der Temperaturverteilung als auch der Kühlleistung den Messwerten gegenübergestellt.

Die vereinfachte Kühlleistungsermittlung mit dem „freezing“-Modul kann sowohl bei der Simulation zwei- als auch dreidimensionaler Systeme eingesetzt werden. Die beiden Modellversuche werden dem Versuchsaufbau entsprechend dreidimensional simuliert. Die Gefrierrohrtemperatur wird im „freezing“-Modul über eine Dirichlet-Randbedingung modelliert. Dabei wird keine konstante Temperatur über die gesamte Länge des Gefrierrohrs simuliert, sondern der im Modellversuch vorliegende Temperaturverlauf über die Länge des Gefrierrohrs auf Basis der Vor- und Rücklauftemperatur des Kühlaggregats sowie der Temperaturmesspunkte an der Gefrierrohroberfläche im Boden angenähert. Neben der zeitabhängigen Abbildung der Gefrierrohrtemperatur sind weitere zeitabhängige Temperaturrandbedingungen an den Systemrändern erforderlich, die aus den Messdaten bestimmt werden können. Die Definition des zeitabhängigen Temperaturverlaufs erfordert in SHEMAT-Suite stets eine näherungsweise Formulierung als Treppenfunktion.

Modellversuch ohne Grundwasserströmung

Zunächst wird der Modellversuch ohne Grundwasserströmung simuliert, bei dem eine rotations-symmetrische Frostausbreitung im Boden zu erwarten ist. Bild 6.3 zeigt die Temperaturverteilung im Boden in Messlinie 2 zwischen dem inneren und dem rechten Gefrierrohr. Die Temperaturverteilung im Boden in Messlinie 1, also parallel zur gegebenenfalls vorhandenen Strömungsrichtung, ist in Bild 6.4 dargestellt.

Die Gefrierrohre sind zur Verdeutlichung der Lage mit Hilfe der grauen Balken kenntlich gemacht. Die Messwerte aus den Versuchen sind als quadratische Messpunkte dargestellt und der zeitliche Verlauf der Temperaturausbreitung ist über die Farbskalierung gekennzeichnet. Die Simulationsergebnisse der Temperaturausbreitung sind als durchgezogene Linien abgebildet. Der zeitliche Verlauf ist ebenfalls über die bereits erwähnte Farbskalierung gekennzeichnet.

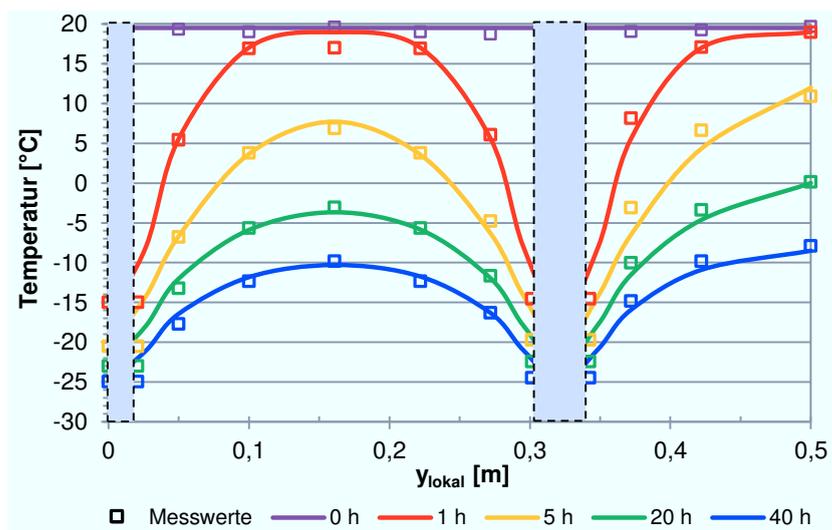


Bild 6.3 Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 2) für $v_f = 0$ m/d („freezing“-Modul)

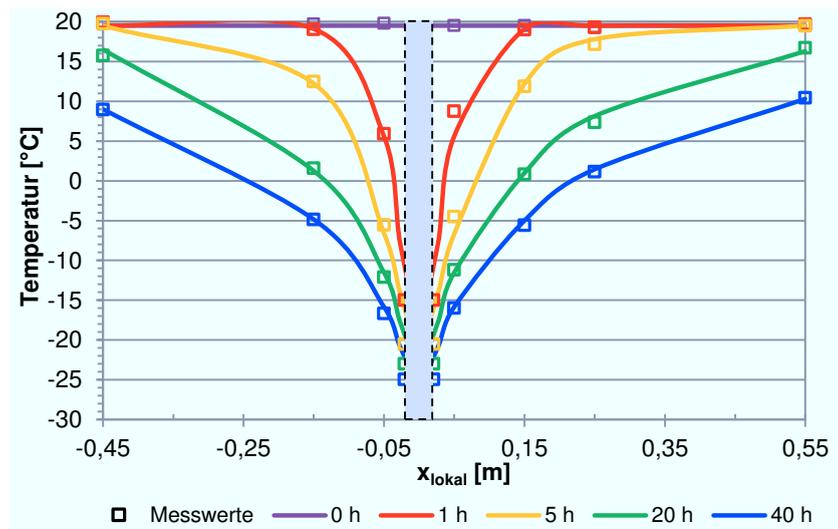


Bild 6.4 Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 1) für $v_f = 0$ m/d („freezing“-Modul)

Die Simulationsergebnisse der Temperaturverläufe im Boden zeigen sowohl senkrecht als auch parallel zur Strömungsrichtung eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten des Modellversuchs ohne Strömungseinfluss. Diese Ergebnisse bestätigen die bereits von Baier (2008) gezeigte gute Abbildung der Temperatursausbreitung im Boden ohne Strömungseinfluss, also nur infolge von reiner Wärmeleitung, mit dem „freezing“-Modul.

Das Ziel der Nachrechnung der Modellversuche ist in erster Linie die Validierung der vereinfachten Kühlleistungsermittlung mit dem „freezing“-Modul. Die Simulationsergebnisse der Kühlleistung sind in Bild 6.5 dem Verlauf der gemessenen Kühlleistung gegenübergestellt. Dabei ist zu beachten, dass die dargestellte gemessene Kühlleistung bereits der um die Verluste der Gefrieranlage korrigierten Kühlleistung entspricht.

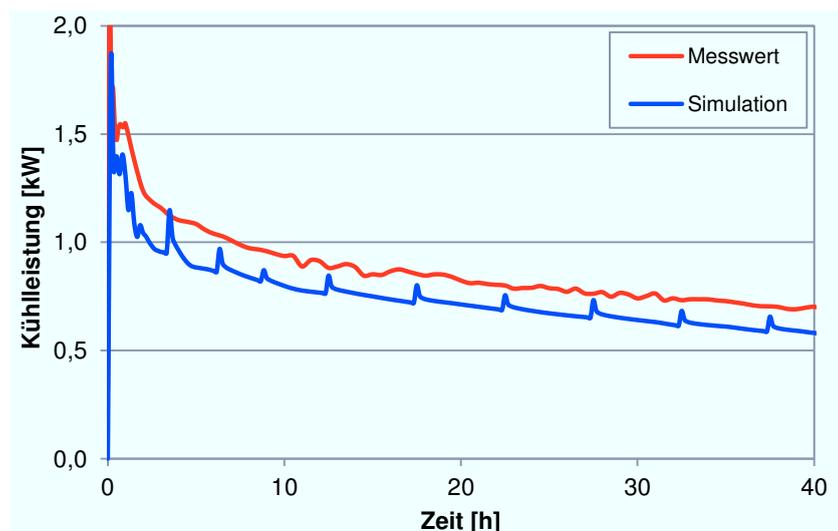


Bild 6.5 Zeitlicher Verlauf der Kühlleistung für $v_f = 0$ m/d („freezing“-Modul)

Der gezackte Verlauf der Kühlleistung der Simulation ergibt sich aufgrund der erwähnten treppenförmigen Abbildung des zeitlichen Verlaufs der Gefrierrohrtemperatur und der daraus resultierenden plötzlichen Änderungen der vorliegenden Temperaturgradienten.

Der Vergleich der gemessenen Kühlleistung und der Simulationsergebnisse mit dem „freezing“-Modul zeigt, dass der zeitliche Verlauf und die Entwicklung der erforderlichen Kühlleistung mit der vereinfachten Kühlleistungsermittlung gut abgebildet werden können. Allerdings werden die Messwerte um eine nahezu konstante Differenz über die gesamte Versuchszeit unterschätzt. Diese Abweichung liegt in etwa bei 14 %.

Modellversuch mit einer Grundwasserströmung von $v_f = 1,5$ m/d

Für den Modellversuch mit einer Grundwasserströmung von 1,5 m/d wird zunächst ebenfalls die Temperaturverteilung im Boden betrachtet. In Bild 6.6 ist die Temperaturverteilung im Boden senkrecht zur Strömungsrichtung dargestellt. Der nahezu symmetrische Temperaturverlauf zwischen dem mittleren und dem rechten Gefrierrohr kann in der Simulation mit guter Genauigkeit abgebildet werden. Im Randbereich hingegen werden die gemessenen Temperaturen im Rahmen der Simulation tendenziell eher unterschätzt. Ein möglicher Grund könnten Veränderungen der Porenstruktur des Bodens verursacht durch einen fehlenden Aus- und Wiedereinbau zwischen den einzelnen Versuchen sein. Dadurch könnten letztlich Düsen- und Erosionseffekte auftreten, die zu einer Veränderung des Strömungszustands und damit möglicherweise zu einer lokalen Erhöhung der Fließgeschwindigkeit in diesem engen Randbereich von lediglich 17,8 cm führen können.

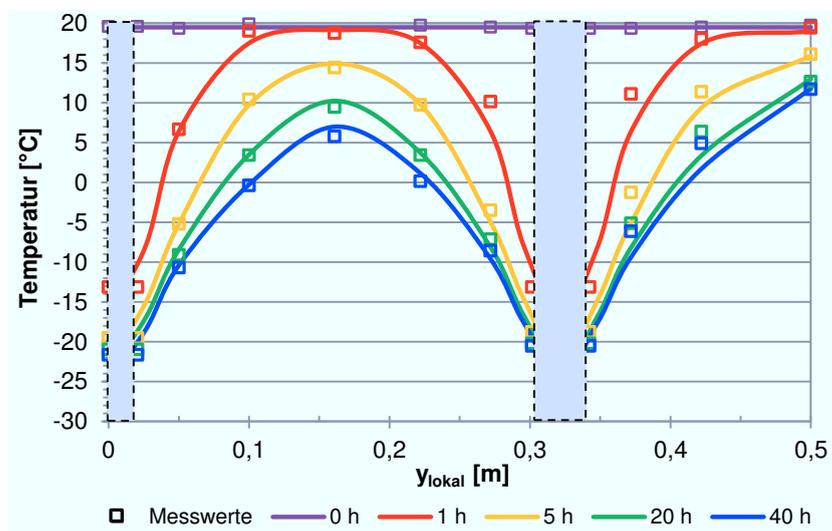


Bild 6.6 Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 2) für $v_f = 1,5$ m/d („freezing“-Modul)

Die Temperaturverteilung parallel zur Strömungsrichtung, also im An- und Abstrom, ist in Bild 6.7 dargestellt. Im Anstrom liegen aufgrund des konvektiven Wärmeeintrags höhere Temperaturen vor als im Abstrom. Die Simulationsergebnisse des „freezing“-Moduls zeigen wieder eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten im gesamten Bodenbereich.

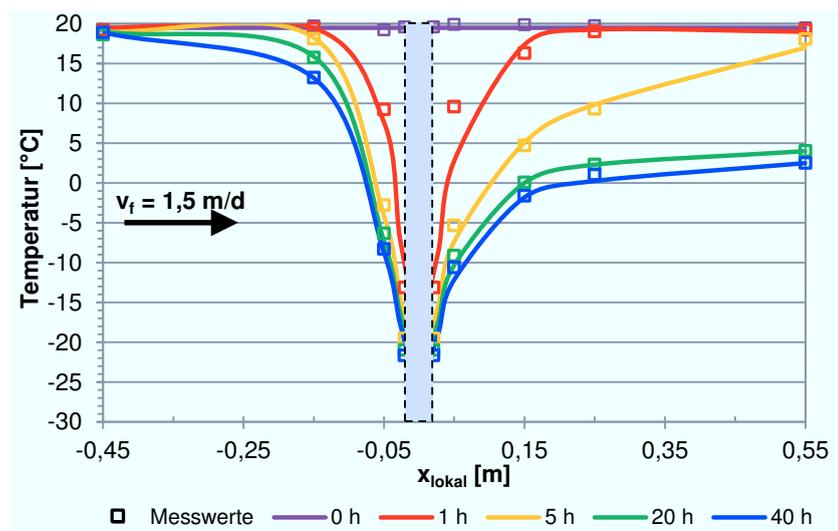


Bild 6.7 Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 1) für $v_f = 1,5 \text{ m/d}$ („freezing“-Modul)

Die Simulationsergebnisse der Temperaturverläufe im Boden für den Versuch mit Grundwasserströmung zeigen sowohl senkrecht als auch parallel zur Strömungsrichtung eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Die Eignung des „freezing“-Moduls zur Abbildung der Temperatursausbreitung im Boden unter Strömungseinfluss, die bereits von Baier (2008) gezeigt wurde, kann somit erneut bestätigt werden.

Zur Validierung der vereinfachten Kühlleistungsermittlung mit dem „freezing“-Modul sind die Simulationsergebnisse der gemessenen und um die Verluste der Gefrieranlage korrigierten Kühlleistung in Bild 6.8 gegenübergestellt. Der zeitliche Verlauf der Kühlleistung kann mit der vereinfachten Kühlleistungsermittlung gut abgebildet werden. Wie schon beim Modellversuch ohne Strömung wird auch in diesem Fall die gemessene Kühlleistung leicht unterschätzt, wobei die Unterschätzung in diesem Fall geringer ausfällt.

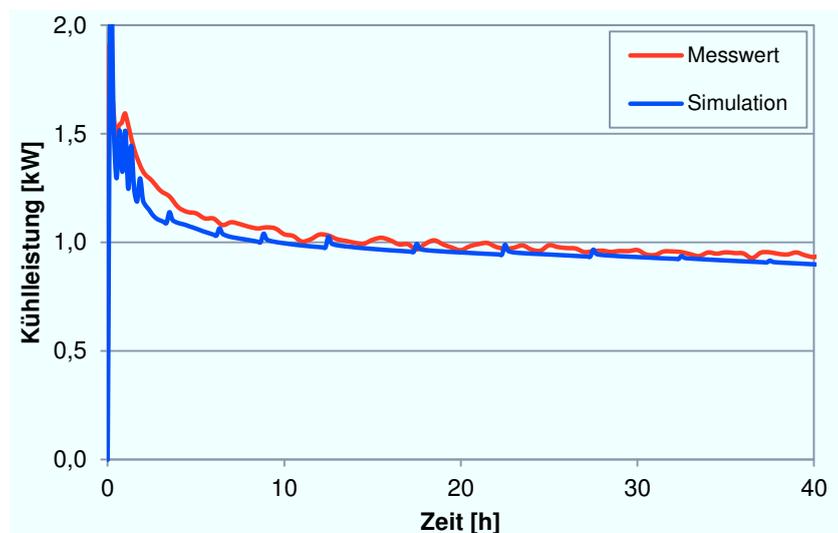


Bild 6.8 Zeitlicher Verlauf der Kühlleistung für $v_f = 1,5 \text{ m/d}$ („freezing“-Modul)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Simulationsergebnisse der Kühlleistung die Messwerte sowohl für den Modellversuch ohne Strömung als auch mit Strömung unterschätzen. Wie das folgende Kapitel zeigen wird, liegt diese Unterschätzung in der Vernachlässigung der Wärmetransport- und Strömungsprozesse im Gefrierrohr begründet, die bei der vereinfachten Kühlleistungsermittlung mit dem „freezing“-Modul nicht berücksichtigt werden. Die Ursache für die Unterschätzung der Kühlleistung kann erst aufbauend auf den Simulationsergebnissen mit dem „freezrefcap“-Modul im folgenden Kapitel abschließend bestimmt werden. Aufgrund der Berücksichtigung der Wärmetransport- und Strömungsprozesse im Gefrierrohr ist aber in der folgenden Nachrechnung mit dem „freezrefcap“-Modul eine Erhöhung der erforderlichen Kühlleistung zu erwarten.

6.1.3 Ergebnisse der Simulation mit dem „freezrefcap“-Modul

Die Validierung der detaillierten Kühlleistungsermittlung mit dem „freezrefcap“-Modul erfolgt ebenfalls durch die Nachrechnung der beiden bereits beschriebenen Modellversuche. Dabei wird das in den Simulationen mit dem „freezing“-Modul verwendete dreidimensionale Modell für die Simulationen mit dem „freezrefcap“-Modul zugrunde gelegt. Anstelle der Vorgabe einer zeitabhängigen Dirichlet-Randbedingung für die Gefrierrohrtemperatur können jedoch im „freezrefcap“-Modul der zeitabhängige Verlauf der Vorlauftemperatur und des Durchflusses als Treppenfunktion abgebildet werden. Diese detaillierte Berechnung erfordert neben den bereits genannten Eingangsparametern weiterhin die Angabe des verwendeten Fluids. Im Rahmen der Modellversuche wurde als Kälte­träger Antifrogen 52 % eingesetzt (s. Kapitel 5.3.3).

Wie schon bei der Validierung des „freezing“-Moduls werden im Folgenden die Simulationsergebnisse getrennt für den Modellversuch ohne und mit Grundwasserströmung erläutert. Dabei wird die Temperaturverteilung im Boden der Übersicht halber lediglich kurz vorgestellt und auf die im Vordergrund stehende Kühlleistung näher eingegangen.

Modellversuch ohne Grundwasserströmung

Die zeitabhängigen Temperaturverteilungen im Boden sowohl senkrecht zur Strömungsrichtung (Messlinie 2) als auch parallel dazu (Messlinie 1) sind in Bild 6.9 und Bild 6.10 für den Modellversuch ohne Strömung dargestellt.

Die Simulationsergebnisse des „freezrefcap“-Moduls zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten des Versuchs. Ein Vergleich der Simulationsergebnisse der Temperaturverteilung mit dem „freezrefcap“- und dem „freezing“-Modul zeigt weiterhin, dass die Ergebnisse der Temperaturverteilung im Boden mit beiden numerischen Lösungsmodellen nahezu identisch sind.

Die Ergebnisse der Nachrechnung des Modellversuchs bestätigen somit, dass die Temperaturverteilung im Boden ohne Strömungseinfluss auch mit dem „freezrefcap“-Modul mit einer guten Genauigkeit bestimmt werden kann.

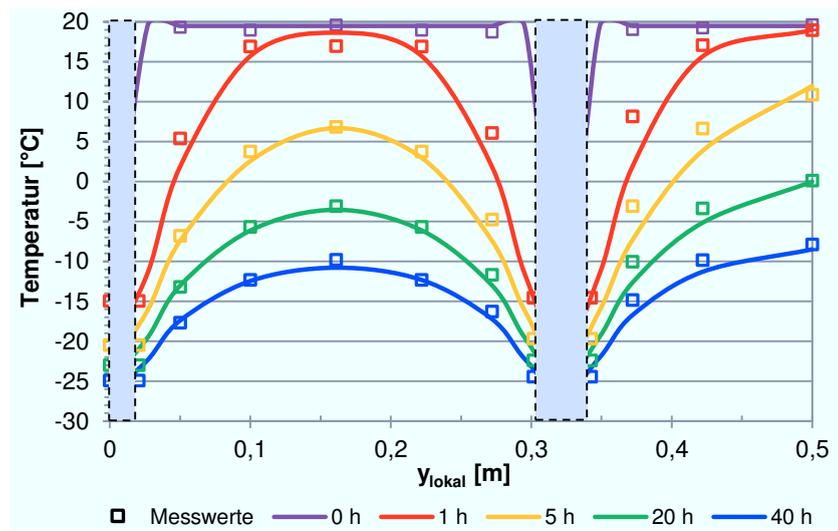


Bild 6.9 Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 2) für $v_f = 0$ m/d („freezrefcap“-Modul)

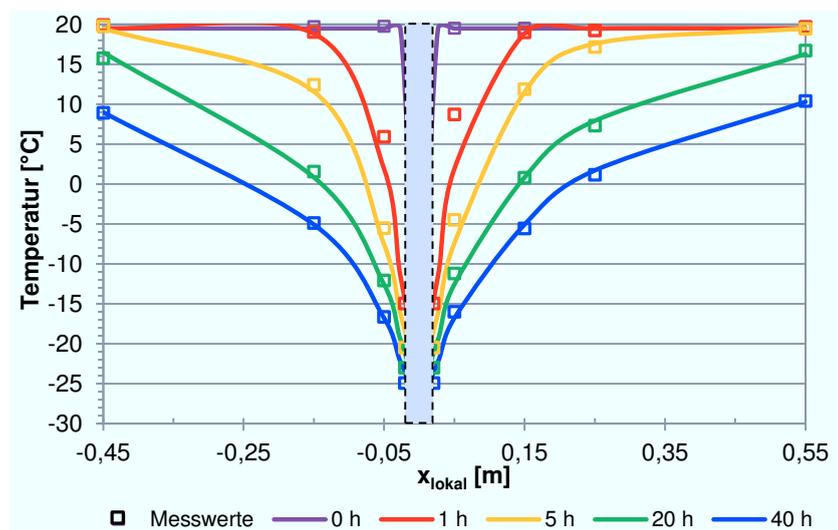


Bild 6.10 Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 1) für $v_f = 0$ m/d („freezrefcap“-Modul)

Aufbauend auf der guten Übereinstimmung zwischen gemessenen Temperaturen im Boden und den Simulationsergebnissen zur Temperaturverteilung wird nun die detaillierte Kühlleistungsberechnung des „freezrefcap“-Moduls überprüft. In Bild 6.11 ist die gemessene Kühlleistung den Simulationsergebnissen des „freezing“- und des „freezrefcap“-Moduls gegenübergestellt. Die mit dem „freezrefcap“-Modul bestimmte Kühlleistung ist nahezu identisch mit der gemessenen Kühlleistung. Dieses Ergebnis bestätigt die Theorie, dass die nahezu konstante Abweichung der mit dem „freezing“-Modul vereinfacht ermittelten Kühlleistung von den Messwerten auf die Vernachlässigung der Wärmetransport- und Strömungsprozesse im Gefrierrohr zurückzuführen ist. Aufgrund der annähernd gleichen Gefrierrohrtemperaturen im „freezing“- und „freezrefcap“-Modul führt die Berücksichtigung der Wärmetransport- und Strömungsprozesse im Gefrierrohr zu einer Erhöhung der erforderlichen Kühlleistung.

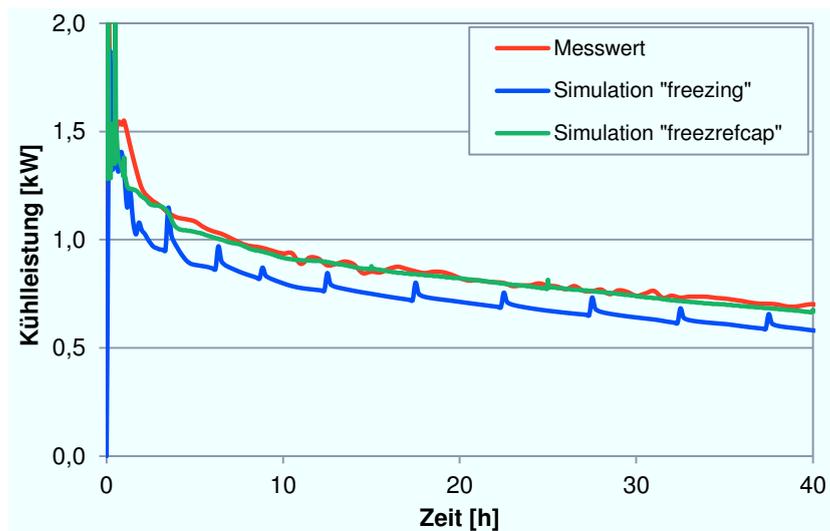


Bild 6.11 Zeitlicher Verlauf der Kühlleistung für $v_f = 0$ m/d („freezrefcap“-Modul)

Die Daten der Versuchsdurchführung zeigen, dass lediglich ein Durchfluss von $0,5$ m³/h erzielt werden konnte, was zur Ausbildung einer laminaren Strömung im Fallrohr sowie im Ringspalt führte. Wie bereits in Kapitel 4.2 erläutert, führt eine laminare Strömung zu einer Verschlechterung des Wärmeübergangs und damit zu einer Erhöhung des thermischen Widerstands. Dies resultiert dann letztlich in einer Erhöhung der Kühlleistung aufgrund größerer Verluste innerhalb des Gefrierrohrs. Auf die Ergebnisse der Kühlleistung übertragen bedeutet dies, dass die Differenz zwischen der Kühlleistung des „freezing“- und des „freezrefcap“-Moduls in diesem Fall auch aufgrund der vorliegenden laminaren Strömungsverhältnisse so deutlich ausfällt.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die mit dem „freezrefcap“-Modul ermittelte Kühlleistung die Messwerte aufgrund der Berücksichtigung der Wärmetransport- und Strömungsprozesse innerhalb des Gefrierrohrs besser abbildet als die mit dem vereinfachten „freezing“-Modul ermittelte Kühlleistung.

Modellversuch mit einer Grundwasserströmung von $v_f = 1,5$ m/d

Um den Einsatz des „freezrefcap“-Moduls zur Simulation von Vereisungsmaßnahmen unter Strömungseinfluss zu überprüfen, wird im nächsten Schritt der Modellversuch mit einer Grundwasserströmung von $1,5$ m/d nachgerechnet.

Die Ergebnisse der Temperaturverteilung im Boden sowohl senkrecht als auch parallel zur Strömung sind in Bild 6.12 und Bild 6.13 dargestellt. Auch für den Modellversuch mit einer Strömung von $1,5$ m/d zeigt sich, dass die mit dem „freezrefcap“-Modul ermittelte Temperaturverteilung im Boden eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Temperaturen aufweist. Die Unterschiede der Temperaturverteilung im Boden zwischen der Simulation mit dem „freezing“- und dem „freezrefcap“-Modul sind auch für diesen Versuch gering.

Die Ergebnisse der Nachrechnung dieses Versuchs bestätigen somit weiterhin die Eignung des „freezrefcap“-Moduls zur Abbildung der Frostausbreitung im Boden unter Strömungseinfluss.

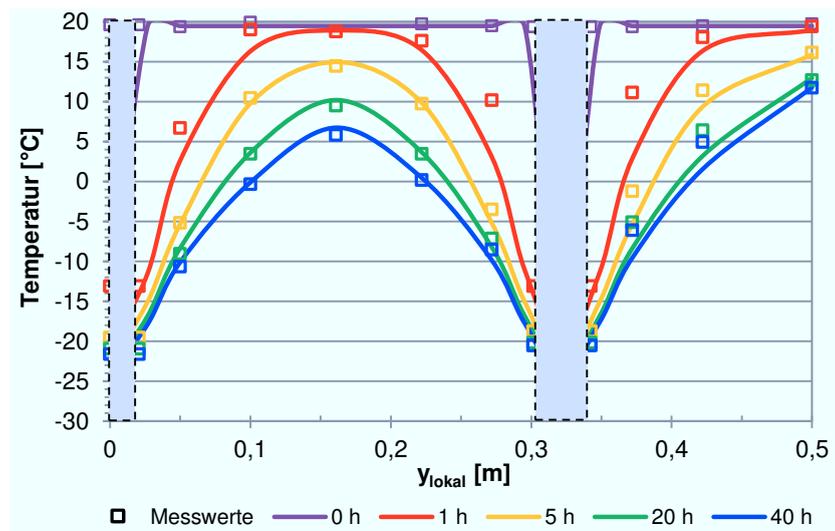


Bild 6.12 Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 2) für $v_f = 1,5 \text{ m/d}$ („freezrefcap“-Modul)

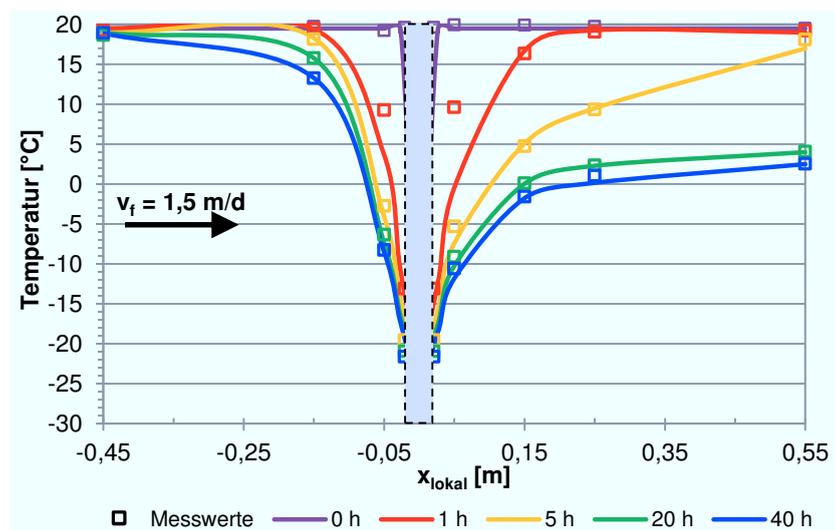


Bild 6.13 Zeitabhängige Temperaturverteilung im Boden (Messlinie 1) für $v_f = 1,5 \text{ m/d}$ („freezrefcap“-Modul)

Zur Validierung der detaillierten Kühlleistungsermittlung mit dem „freezrefcap“-Modul werden die Simulationsergebnisse der Kühlleistung mit den Messwerten verglichen (s. Bild 6.14). Wie schon bei dem Modellversuch ohne Strömung wird der Vergleich um die mit dem „freezing“-Modul vereinfacht ermittelte Kühlleistung ergänzt. Es wird deutlich, dass die Ergebnisse der detaillierten Kühlleistungsermittlung die gemessene Kühlleistung besser abbilden als die Ergebnisse der vereinfachten Kühlleistungsermittlung. Wie beim Modellversuch ohne Strömung erhöht sich die Kühlleistung aufgrund der Berücksichtigung der Wärmetransport- und Strömungsprozesse. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen des „freezing“- und des „freezrefcap“-Moduls fallen allerdings deutlich geringer aus als bei dem Modellversuch ohne Strömung. Der Grund hierfür liegt in dem Einfluss der Grundwasserströmung, der die Effekte aus der Berücksichtigung der Wärmetransport- und Strömungsprozesse innerhalb des Gefrierrohrs übersteigt.

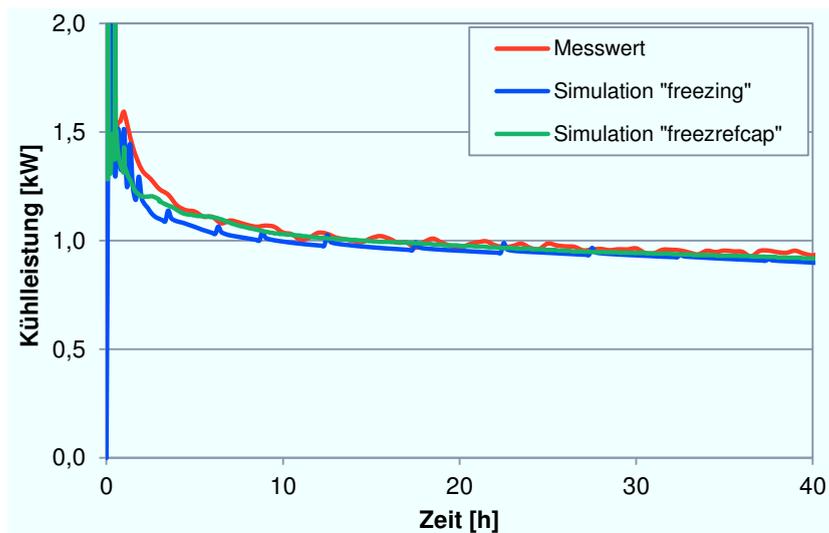


Bild 6.14 Zeitlicher Verlauf der Kühlleistung für $v_f = 1,5 \text{ m/d}$ („freezrefcap“-Modul)

6.1.4 Bewertung der Simulationsergebnisse

Abschließend werden die Ergebnisse der Validierung der beiden numerischen Lösungsmodelle anhand des Modellversuchs der ETH Zürich kurz zusammengefasst. Außerdem werden die beiden entwickelten numerischen Lösungsmodelle zur Kühlleistungsermittlung bewertet.

Die Nachrechnungen des Modellversuchs ohne und mit Strömungseinfluss haben gezeigt, dass die Temperaturverteilung im Boden sowohl mit dem „freezing“- als auch mit dem „freezrefcap“-Modul mit einer guten Genauigkeit abgebildet werden kann. Die beiden numerischen Lösungsmodelle liefern für annähernd gleiche Gefrierrohrtemperaturen in der Simulation nahezu identische Temperaturverteilungen im Boden.

Die Ergebnisse der Kühlleistung hingegen zeigen teilweise deutliche Unterschiede zwischen dem „freezing“- und dem „freezrefcap“-Modul. Die vereinfachte Kühlleistungsermittlung bildet zwar den zeitlichen Verlauf der Kühlleistung gut ab, unterschätzt jedoch die gemessene Kühlleistung sowohl für den Versuch ohne Grundwasserströmung als auch für den Versuch mit Grundwasserströmung. Die detaillierte Kühlleistungsermittlung unter Berücksichtigung der Wärmetransport- und Strömungsprozesse im Gefrierrohr hingegen zeigt für beide Versuche eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnissen und Messwerten.

Das Programm SHEMAT-Suite ermöglicht folglich mit den beiden Modulen „freezing“ und „freezrefcap“ eine realitätsnahe Abbildung der Frostausbreitung im Boden sowie eine hinreichend genaue Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung. Auf Grundlage dieser guten Validierungsergebnisse lässt sich als Empfehlung für die Praxis ableiten, dass insbesondere die kombinierte Nutzung der beiden Module zur Planung von Vereisungsmaßnahmen sinnvoll und wirtschaftlich ist. Die Simulationen mit dem detaillierten „freezrefcap“-Modul erfordern neben einer dreidimensionalen Betrachtung auch eine geringe Zeitschrittweite, um die numerischen Stabilitätskriterien einzuhalten. Daraus ergeben sich ein deutlich größerer Simulationsaufwand sowie längere Rechenzeiten im Vergleich zu Simulationen mit dem „freezing“-Modul. Die

vereinfachte Kühlleistungsermittlung des „freezing“-Moduls hingegen ermöglicht zwei-dimensionale Simulationen mit einer deutlich größeren Zeitschrittweite, wodurch die Rechenzeiten vergleichsweise gering gehalten werden können. Daher sollte die Vorplanung der Vereisungsmaßnahme ohne großen numerischen Simulationsaufwand mit dem „freezing“-Modul und der implementierten vereinfachten Kühlleistungsermittlung erfolgen. Außerdem ist in diesem Stadium keine exakte Ermittlung der Kühlleistung erforderlich. Erst die Detailplanung kann dann im Anschluss mit dem „freezrefcap“-Modul und mit aufwändigeren numerischen Simulationen durchgeführt werden. Dabei kann nicht nur die erforderliche Kühlleistung des Kühlaggregats detailliert bestimmt werden, sondern es können auch weitere Detailfragen, wie die Durchflussrate oder die CaCl_2 -Konzentration der Sole, untersucht werden.

6.2 Nachrechnung eines realen Vereisungsprojekts

Die beiden entwickelten numerischen Lösungsmodelle zur Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung bei Vereisungsmaßnahmen konnten durch die Nachrechnung des Modellversuchs der ETH Zürich validiert werden. Darauf aufbauend wird nun zusätzlich ein reales Vereisungsprojekt nachgerechnet, um die Praxistauglichkeit der numerischen Lösungsmodelle zu verdeutlichen. Aufgrund der Ergebnisse der Nachrechnung des Modellversuchs wird für die Simulation des realen Vereisungsprojekts nur das detaillierte Lösungsmodell („freezrefcap“-Modul) eingesetzt.

Um die Kühlleistung eines realen Vereisungsprojekts nachrechnen und letztlich mit der gemessenen Kühlleistung auf der Baustelle vergleichen zu können, ist eine eindeutige Zuordnung der auf der Baustelle gemessenen Kühlleistung zu einer bestimmten Vereisungsmaßnahme erforderlich. Im Rahmen großer Vereisungsprojekte wird das vorhandene Kühlaggregat oftmals parallel für mehrere Vereisungsmaßnahmen genutzt. Dabei können zum Beispiel mehrere Querschläge zeitgleich aufgefahren werden oder die Vereisung kann zusätzlich außerplanmäßig zur Abdichtung aufgetretener Schwachstellen eingesetzt werden. Dadurch wird jedoch eine eindeutige Zuordnung der Kühlleistung zu einer bestimmten Vereisungsmaßnahme unmöglich. Die Forderung einer eindeutigen Zuordnung der gemessenen Kühlleistung zu einer einzelnen Vereisungsmaßnahme und die Notwendigkeit einer ausreichenden Datenbasis stellen eine große Schwierigkeit bei der Suche nach einer geeigneten Maßnahme dar.

Im Rahmen einer weitreichenden Recherche konnte die Vereisung fünf baugleicher Querschläge als Teilprojekt des Baus des Statentunnels in Rotterdam als geeignete Vereisungsmaßnahme identifiziert werden. Ausschlaggebend dafür war die Verwendung mobiler Kühlaggregate, wodurch die geforderte eindeutige Zuordnung der gemessenen Kühlleistung zu der jeweiligen Querschlagvereisung garantiert werden konnte. Die erforderliche Datenbasis wurde dankenswerterweise von der Deilmann-Haniel GmbH zur Verfügung gestellt.

Im Folgenden wird zunächst das Gesamtprojekt des Statentunnels in Rotterdam kurz erläutert und dann insbesondere auf die Herstellung der Querschläge mit Hilfe des Vereisungsverfahrens näher eingegangen. Diese Beschreibung stützt sich weitestgehend auf die Veröffentlichung von

Wenke & Willner (2008) sowie die von der Deilmann-Haniel GmbH zur Verfügung gestellten Planungsunterlagen. Darauf aufbauend werden die Erstellung des numerischen Modells sowie die erforderlichen Eingangsparameter erläutert. Abschließend erfolgt die Vorstellung und Diskussion der Simulationsergebnisse im Vergleich mit den Messwerten.

6.2.1 Projektbeschreibung „Statentunnel Rotterdam“

Der Statentunnel in Rotterdam wurde im Auftrag der Rotterdams Electric Tram (RET) erbaut, um die Infrastruktur für Pendler aus dem Umland von Rotterdam deutlich zu verbessern. Das Projekt umfasste die Erstellung eines zweiröhrigen Tunnels, der mittels einer Tunnelbohrmaschine aufgeföhren und mit Tübbingen ausgekleidet wurde. Der Tunnel verbindet dabei mit einer Gesamtlänge von ca. 2.400 m die Station Sint Franciscus Driehoek (SFD) über die Zwischenstation Statenweg mit der Endstation Conradstraat (Rotterdam Central) (s. Bild 6.15). Aus Gründen der Sicherheit mussten die beiden Tunnelröhren jeweils in einem Abstand von ungefähr 300 m durch Querschläge miteinander verbunden werden. Somit wurden auf der Gesamtlänge des Statentunnels fünf Querschläge erforderlich. Aufgrund der schwierigen geologischen Verhältnisse und einer an der Geländeoberkante anstehenden starken Bebauung sowie empfindlicher Infrastruktur wurde das Vereisungsverfahren zur Herstellung der Querschläge gewählt. Der Auftrag über diese Vereisungsmaßnahmen wurde an das Joint Venture der Firmen Insond & Deilmann-Haniel-Shaft-Sinking vergeben.

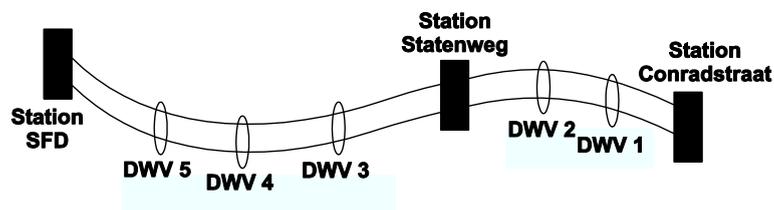


Bild 6.15 Verlauf Statentunnel mit Querschlägen (nach Wenke & Willner 2008)

Der vorliegende Baugrund bestand aus pleistozänen Sandschichten mit teilweise kiesigen Anteilen, die in einer Tiefe von 18 bis 30 m unterhalb der Geländeoberkante anstanden. Der Grundwasserspiegel lag annähernd auf Geländeniveau. Da sowohl der Start- als auch der Zielschacht innerhalb städtischer Wohngebiete lagen, wurde die Vereisung aus Gründen des Lärmschutzes und zur Vermeidung langer Zubringerleitungen mit Hilfe mobiler Kühlaggregate realisiert. Diese mobilen Kühlaggregate mit einer maximalen Kühlleistung von 96 kW wurden in unmittelbarer Nähe des jeweils zu gefrierenden Querschlags innerhalb des Tunnels aufgebaut (s. Bild 6.16). Als Kälte-träger kam eine 30-prozentige CaCl_2 -Sole zum Einsatz. Wie in Bild 6.16 zu erkennen ist, wurde in der Weströhre eine Wärmedämmung aus Styropor mit einer Dicke von ca. 10 cm angebracht, um den Frostkörperaufbau zu unterstützen und Einflüsse aus der Lufttemperatur im Tunnel zu minimieren. In der Oströhre hingegen wurde zur Unterstützung des Angefrierens des Frostkörpers an die Tunneltübbinge eine aktive Oberflächenkühlung installiert.



Bild 6.16 Querschlagvereisung mit mobilen Kühlaggregaten (Wenke & Willner 2008)

Aus den Anforderungen an die Querschläge, die einen Innendurchmesser von 2,60 m und eine Wandstärke von 0,35 m aufweisen mussten, ergaben sich die Abmessungen der herzustellenden Frostkörper. Der Innendurchmesser des Frostkörpers musste bei 3,90 m und der Außendurchmesser bei 6,90 m liegen. Die Vereisungsbohrungen mit einem Außendurchmesser von 8,89 cm wurden, ausgehend von der Weströhre des Tunnels, ringförmig um den Ausbruchquerschnitt hergestellt. Es wurden insgesamt 24 Gefrierrohrbohrungen nach dem Prinzip der „verlorenen Bohrröhre“ hergestellt, so dass das ursprüngliche Bohrröhr später als Steigrohr des Gefrierrohrs genutzt werden konnte. Bild 6.17 zeigt eine dreidimensionale Visualisierung der um die Gefrierrohre entstehenden Frostkörper, wobei die Gefrierrohre unter Ausnutzung der doppelten Symmetrie des gesamten Systems nummeriert wurden. Es wird deutlich, dass die Gefrierrohre deutlich unterschiedliche Längen aufweisen, die von ungefähr 2,5 m bis 9 m reichen. Um die Herstellung eines dichten Frostkörpers zu gewährleisten, die ein komplettes Aneisen des Frostkörpers an die Oströhre erfordert, wurden die Gefrierrohre teilweise geneigt ausgeführt.

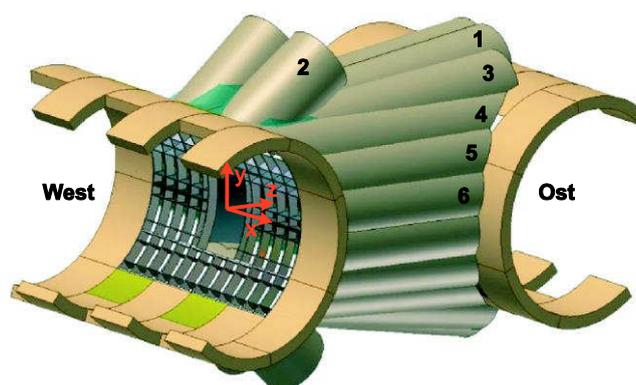


Bild 6.17 Dreidimensionale Darstellung des Frostkörpers mit Gefrierrohrnummern (nach Wenke & Willner 2008)

Die Kontrolle des Frostkörperfortschritts erfolgte über vier Temperaturmessrohre, die nahezu auf den beiden Symmetrieachsen, jeweils rechts und links sowie oberhalb und unterhalb des Querschlagsmittelpunkts, positioniert wurden. Die Temperaturmessrohre wurden alle von innen

nach außen durch den Frostkörper gebohrt, um die Temperatur über den gesamten Querschnitt des Frostkörpers zu erfassen. In die Temperaturmessrohre wurden Temperaturfühler eingebracht, die Temperatursensoren mit einem Abstand von jeweils 1,0 m enthalten.

6.2.2 Modellerstellung und Eingangsparameter

Die erforderlichen Eingangsparameter der Bodeneigenschaften für die Simulation mit SHEMAT-Suite können aus den geotechnischen Laboruntersuchungen und den vorliegenden thermischen Berechnungen hergeleitet werden. Tabelle 6.2 fasst die Eingangsparameter des kiesigen Sandes zusammen. Laut dem geotechnischen Bericht sowie den thermischen Berechnungen war das Aufgefrieren der Querschläge nicht durch eine Grundwasserströmung beeinflusst. Zur Sicherstellung dieser wichtigen Randbedingung wurde eine Recherche in der Grundwasserpegel-Datenbank der Stadt Rotterdam durchgeführt, in der die Pegelstände an vielen in der Stadt verteilten Messstellen über die letzten Jahrzehnte dokumentiert sind. Da auch im Rahmen dieser Recherche keine nennenswerte Grundwasserströmung ermittelt werden konnte, werden die numerischen Simulationen der Querschlagvereisung ohne Grundwasserströmung durchgeführt.

Tabelle 6.2 Eingangswerte der Bodeneigenschaften des vorliegenden Baugrunds (kiesiger Sand) für SHEMAT-Suite

Parameter SHEMAT-Suite	Quelle	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 des Feststoffs λ_s	Rückrechnung über $\lambda_{\text{gefroren}}$ & $\lambda_{\text{ungefroren}}$	4,3105	W/(mK)
Permeabilität k	s. Gleichung (4.7) mit k_f aus Versuch	9,1813E ⁻¹¹	m ²
Parameter a und b des Verlaufs des ungefrorenen Wassergehalts	s. Gleichung (4.49) mit Körnungslinie	a = 0,1041 b = -4,846	-
Kompressibilität des Feststoffs α_s	Literaturwert (z.B. Freeze & Cherry 1979)	1,00E ⁻⁰⁸	Pa ⁻¹
Impedanzfaktor E_i	Literaturwert (z.B. Lundin 1990)	10	-

Ein weiterer Punkt bei der Modellerstellung ist die realistische Abbildung der vorhandenen äußeren Temperaturrandbedingungen. Dabei kann auf die während des Vereisungsprojekts aufgezeichnete Datenbasis zurückgegriffen werden. Beim Projekt des Statentunnels wird der

Querschlag DWV 2 (s. Bild 6.15) für die Nachrechnung gewählt, da bei diesem eine nahezu lückenlose Aufzeichnung aller Messdaten vorlag. Die Datenbasis enthält eine Vielzahl an Messdaten in Temperaturfühlern, die sowohl im Boden als auch in der aktiven Oberflächenkühlung sowie in den Vor- und Rücklaufleitungen des Kühlaggregats angebracht waren. Die Temperaturrandbedingung der aktiven Oberflächenkühlung kann somit im numerischen Modell über eine Treppenfunktion als zeitabhängige Dirichlet-Randbedingung definiert und in der Simulation berücksichtigt werden. Außerdem kann die im „freezrefcap“-Modul erforderliche zeitabhängige Definition der Vorlauftemperatur und des Durchflusses ebenfalls über Treppenfunktionen realisiert werden. Da neben den Temperaturen auch der Durchfluss innerhalb der Gefrierrohre im Rahmen des Vereisungsprojekts gemessen wurde, kann die erforderliche Kühlleistung nach Gleichung (5.2) unter Ansatz der temperaturabhängigen Wärmekapazität einer 30-prozentigen CaCl_2 -Sole bestimmt werden.

Um eine realitätsnahe Simulation dieses Vereisungsprojekts zu gewährleisten, muss bei der Erstellung des numerischen Modells insbesondere die realistische Abbildung der vorliegenden Geometrie beachtet werden. Dabei ist die Berücksichtigung der unterschiedlichen Gefrierrohr-längen und Neigungen der Gefrierrohre (s. Bild 6.17) erst durch die in Kapitel 5.3.3 beschriebenen weiteren Adaptionen des „freezrefcap“-Moduls möglich.

Bei diesem numerischen Modell wird zunächst die Symmetrie des Querschlags ausgenutzt, wobei aufgrund der Lage der Temperaturfühler und der Oberflächenkühlung nicht nur ein Viertel des Systems, sondern das halbe System modelliert wird (s. Bild 6.18). Somit kann die Rechenzeit des erforderlichen dreidimensionalen Modells erheblich reduziert werden. Die Kontrolle der Frostausbreitung in vertikaler und horizontaler Richtung kann wie üblich über die gemessenen Temperaturen in den beiden Temperaturfühlern durchgeführt werden. Um die gemessene Kühlleistung letztlich mit der in der Simulation ermittelten Kühlleistung vergleichen zu können, ist das Simulationsergebnis der Kühlleistung zu verdoppeln. Diese Verdopplung des Simulationsergebnisses der Kühlleistung stellt dabei aufgrund der vorliegenden Symmetrie und der fehlenden Grundwasserströmung eine gute Näherung dar.

Bild 6.18 zeigt die Modellierung der Geometrie des gesamten Querschlags, wobei neben der Lage der Gefrierrohre auch die Lage der Temperaturfühler in der x-y-Ebene dargestellt ist. Die Gefrierrohre und Temperaturfühler, die eine Neigung aufweisen, sind jeweils mit ihrem Start- und Endpunkt angegeben. Die Gefrierrohre sind dabei genau wie der Temperaturfühler T_1 im Firstbereich des Querschlags in y-Richtung ausgelenkt, lediglich der Temperaturfühler T_4 nahe der horizontalen Symmetrieachse ist in x-Richtung ausgelenkt.

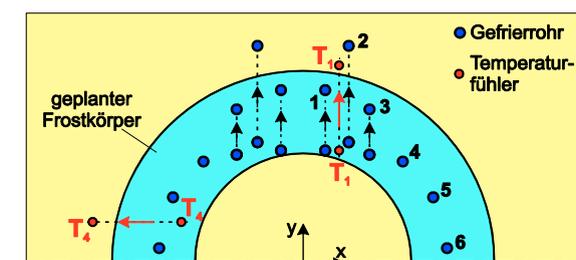


Bild 6.18 Lage der Gefrierrohre und Temperaturfühler in der x-y-Ebene des Modells

Zur Verdeutlichung der dreidimensionalen Modellierung des gesamten Querschlags inklusive der Gefrierrohre und Temperaturfühler sind in Bild 6.19 zusätzlich zwei Schnitte durch das dreidimensionale Modell in der y-z-Ebene und der x-z-Ebene dargestellt. Beide Schnitte zeigen den Bereich zwischen den beiden Tunnelröhren im Westen und Osten, in dem der Querschlag hergestellt werden muss. Der Schnitt in der y-z-Ebene verdeutlicht die Neigung der oberen drei Gefrierrohre anschaulich. Die Gefrierrohre Nr. 1 und Nr. 3 haben einen geringen Neigungswinkel von 8° bzw. 6° , das Gefrierrohr Nr. 2 hingegen ist um 38° geneigt. Neben der Gefrierrohrneigung werden aber vor allem die unterschiedlichen Gefrierrohrängen sowie Ansatzpunkte der Gefrierrohre veranschaulicht. Die unterschiedlichen Ansatzpunkte ergeben sich aufgrund der kreisförmigen Tunnelröhre, woraus letztlich auch die unterschiedlichen Gefrierrohrängen resultieren. Zusätzlich ist der Verlauf der Temperaturfühler zur Kontrolle des Frostkörperwachstums zu erkennen. Die Lage der einzelnen Temperatursensoren im Temperaturfühler ist ebenfalls markiert. Dabei steht die Bezeichnung T 1.4 beispielsweise für den vierten Temperatursensor im Temperaturfühler T₁. Es sind lediglich die Temperatursensoren markiert, die auch im weiteren Verlauf der Simulation verwendet werden. Der Schnitt in der x-z-Ebene zeigt dabei neben den unterschiedlichen Gefrierrohrängen und Ansatzpunkten der Gefrierrohre vor allem den Verlauf des Temperaturfühlers T₄, der den Frostkörper von innen nach außen durchläuft.

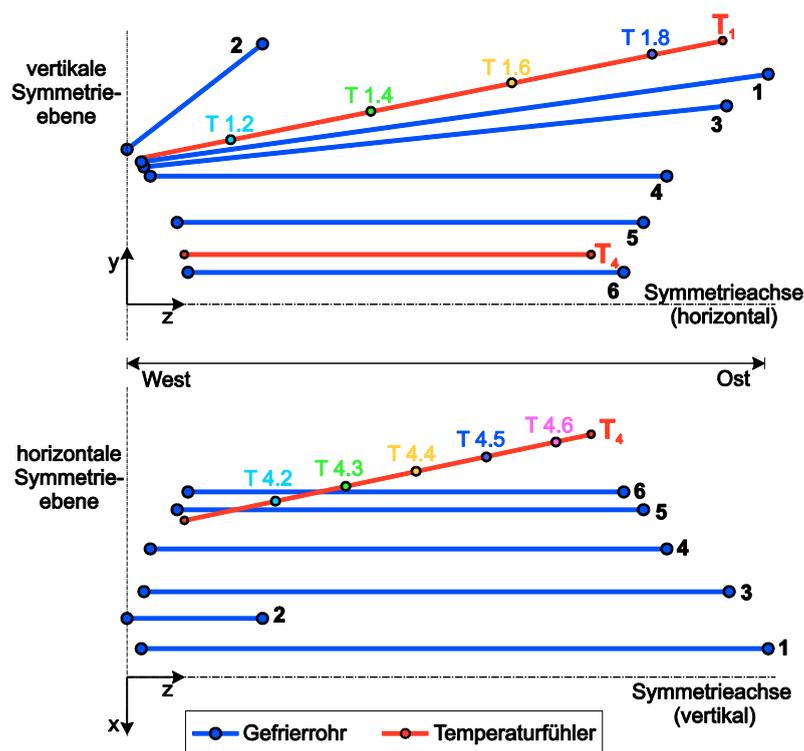


Bild 6.19 Lage der Gefrierrohre und Temperaturfühler zwischen den beiden Tunnelröhren im Westen und Osten in der y-z- und x-z-Ebene im Modell

6.2.3 Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der numerischen Simulation der Querschlagvereisung beim Bau des Statentunnels mit dem detaillierten „freezrefcap“-Modul werden im Folgenden für das vorab beschriebene numerische Modell vorgestellt. Dabei werden zunächst wieder die gemessenen Temperaturverläufe entlang der beiden Temperaturfühler T_1 und T_4 mit den Temperaturverläufen der Simulation verglichen. Im nächsten Schritt wird schließlich auf die Ergebnisse der Kühlleistungsermittlung eingegangen.

Der Temperaturfühler T_1 liegt im Firstbereich des Querschlags (s. Bild 6.18 bzw. Bild 6.19). Aufgrund der Steigung von etwa 12° führt er von der westlichen Tunnelröhre durch den gesamten Frostkörper bis über die östliche Tunnelröhre. Die Simulationsergebnisse der Temperaturverteilung im Boden mit dem „freezrefcap“-Modul sind in Bild 6.20 im Vergleich mit den Messwerten dargestellt. Darin sind die Temperaturverläufe der Messdaten als durchgezogene Linien, die Verläufe der Simulationsergebnisse hingegen als gestrichelte Linien erkennbar. Die dargestellten Temperatursensoren entsprechen denen in Bild 6.19. Die Temperaturverläufe der Messsensoren zeigen, dass die Temperatur mit größer werdender Entfernung vom westlichen Tunnel stetig zunimmt, was auch durch den größer werdenden vertikalen Abstand zu den umgebenden Gefrierrohren begründet werden kann. Generell zeigen die Simulationsergebnisse für alle Temperatursensoren eine hinreichend genaue Übereinstimmung mit den Messwerten. Lediglich die Temperatur des Temperatursensors $T_{1.2}$, der sehr nah an der westlichen Tunnelröhre im Bereich zwischen den Gefrierrohren Nr. 1 und Nr. 2 liegt, ist am Ende des Aufgefrierens in der Simulation geringer als der eigentliche Messwert. Wobei der Grund für den plötzlichen Temperaturanstieg der Messwerte dieses Temperatursensors nicht klar ist und auch auf Grundlage der Projektunterlagen nicht erklärt werden kann.

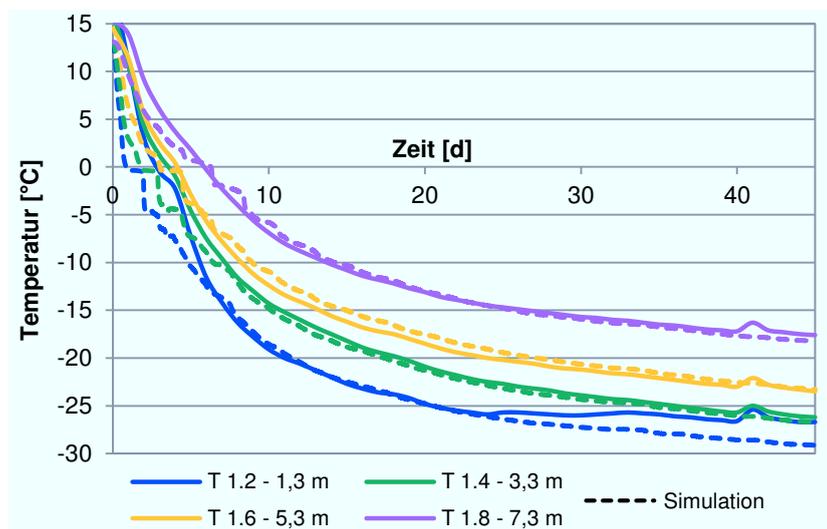


Bild 6.20 Temperaturverteilung im Boden für Temperaturfühler T_1

Der Temperaturfühler T_4 liegt auf der linken Seite des Querschlags in der Nähe der horizontalen Symmetrieachse und verläuft schräg nach außen durch den Frostkörper (s. Bild 6.18 bzw. Bild 6.19). Somit kann mit diesen Temperatursensoren die horizontale Frostkörperausbreitung

überwacht werden. Die mit dem Temperaturfühler T₄ gemessene Temperaturverteilung im Boden ist in Bild 6.21 im Vergleich mit den Simulationsergebnissen des „freezrefcap“-Moduls dargestellt. Die Ergebnisse der Simulation sind wieder als gestrichelte und die Messdaten als durchgezogene Linien dargestellt. Es wird deutlich, dass die Simulation die gemessenen Temperaturen auch für diesen Temperaturfühler mit einer guten Genauigkeit abbilden kann. Allgemein ist auch an diesem Temperaturfühler zu erkennen, dass in größerer Entfernung zur westlichen Tunnelröhre höhere Bodentemperaturen vorliegen. Dies resultiert aus der zunehmenden Entfernung zu den Gefrierrohren und der damit einhergehenden geringeren Abkühlung des Bodens.

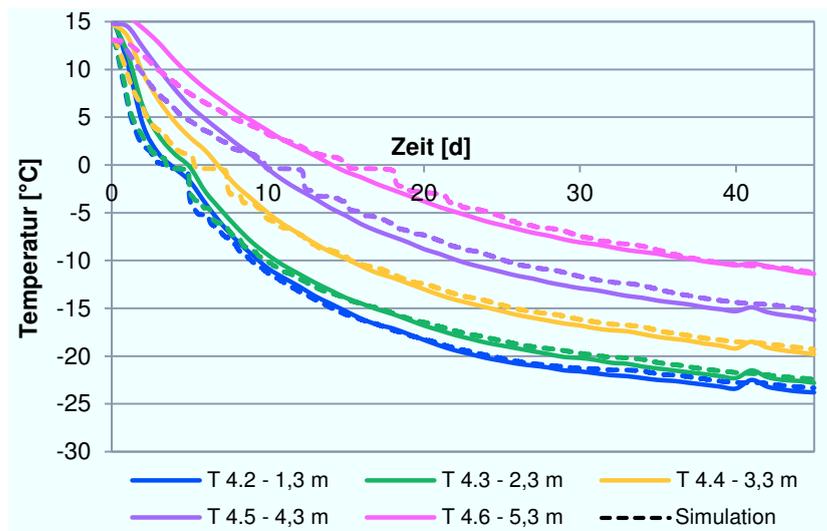


Bild 6.21 Temperaturverteilung im Boden für Temperaturfühler T₄

Als Zwischenfazit kann festgehalten werden, dass die Temperaturverteilung im Boden für dieses reale Vereisungsprojekt sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung mit dem detaillierten „freezrefcap“-Modul mit einer guten Genauigkeit abgebildet werden kann.

Abschließend wird nun die Kühlleistungsermittlung mit dem detaillierten Ansatz des „freezrefcap“-Moduls überprüft und bewertet. Der Messwert der Kühlleistung während des Aufgefrierens kann aus den gemessenen Vor- und Rücklauftemperaturen und dem Durchfluss unter Ansatz einer temperaturabhängigen Wärmekapazität der verwendeten 30-prozentigen CaCl₂-Sole bestimmt werden. Dabei wird die Wärmekapazität für jeden Zeitschritt für eine Referenztemperatur bestimmt, die dem Mittelwert aus Vor- und Rücklauftemperatur entspricht. Der resultierende Verlauf der gemessenen Kühlleistung über die Zeit beinhaltet alle Verluste, die sich beispielsweise innerhalb des Kühlaggregats oder über die Rohrzuleitungsstrecke zum Gefrierrohr ergeben. Da es sich bei dem Ergebnis der Simulation immer um eine reine Gefrierleistung handelt, muss die gemessene Kühlleistung für einen realistischen Vergleich um die Verluste vermindert werden. In diesem Zusammenhang stellt die realistische Abschätzung der Verluste eine große Schwierigkeit dar, da in der Literatur dazu nur wenige Angaben zu finden sind. Makowski (1986) bezieht sich auf das Beispiel einer Gefrierschachtvereisung nach Werner (1960), bei der lediglich 65 % der erzeugten Wärmeentzugsleistung tatsächlich für die

Abkühlung des Bodens genutzt werden konnten. Somit lagen in diesem Beispiel Verluste von 35 % im oberirdischen Zirkulationssystem vor, die ursächlich auf den großen Temperaturunterschied zwischen Kälteträger und Umgebungsluft sowie die Wärmeabgabe der Umwälzpumpe zurückgeführt werden konnten. Ob diese Größenordnung der Verluste auch in der heutigen Zeit aufgrund einer verbesserten Wärmedämmung der Gefrierrohrzuleitungen noch einen realistischen Wert darstellt, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht. Eine weitere Angabe zu möglichen Verlusten liefert der Modellversuch der ETH Zürich (Sres 2009). Dort wurden Verluste der Gefrieranlage in der Größenordnung von bis zu 45 % der Gesamtkühlleistung ermittelt (s. Kapitel 6.1.1). Auf Basis dieser beiden Quellen werden zur Überprüfung der mit dem „freezrefcap“-Modul ermittelten Kühlleistung die Messwerte der Kühlleistung um Verluste von näherungsweise 40% reduziert. Aufgrund des erheblichen Einflusses der Verluste auf die Kühlleistung müssen diese unbedingt berücksichtigt werden. Um die Größenordnung der Verluste in der Praxis zu bestimmen, wäre eine erste Empfehlung, neben den Vor- und Rücklauftemperaturen im Kühlaggregat auch die Temperaturen am Anfang und Ende des Gefrierrohrs zu messen. Über die jeweiligen Temperaturdifferenzen wäre somit eine Abschätzung der Verluste innerhalb der Rohrleitungen möglich.

In Bild 6.22 ist die mit dem detaillierten „freezrefcap“-Modul ermittelte Kühlleistung der gemessenen Kühlleistung sowie der um die Verluste korrigierten Kühlleistung gegenübergestellt. Die im Verlauf der Kühlleistung der Simulation erkennbaren Ausschläge sind numerische Phänomene. Durch eine Veränderung der Vorlauftemperatur oder des Durchflusses, die in SHEMAT-Suite lediglich über eine Treppenfunktion abgebildet werden können, ergeben sich Sprünge zwischen zwei Zeitschritten, die zu diesen Ausschlägen der Kühlleistung führen.

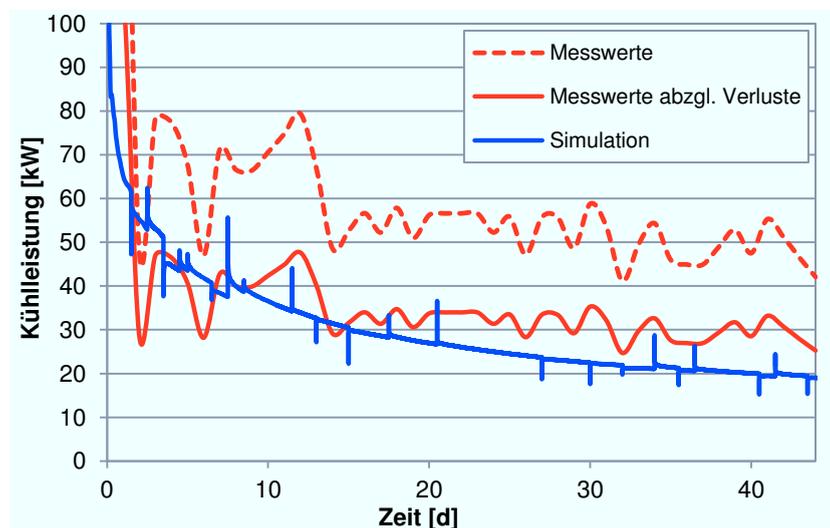


Bild 6.22 Kühlleistung des Querschlags DWV 2 („freezrefcap“-Modul)

Der Vergleich der Messwerte und der Simulationsergebnisse zeigt, dass die Kühlleistung der Simulation die gemessene Kühlleistung zu Beginn des Gefrierprozesses gut abbildet und zum Ende hin leicht unterschätzt. In diesem Zusammenhang ist der Verlauf der gemessenen Kühlleistung kritisch zu hinterfragen, da sich ein nahezu konstanter Wert einstellt bevor der

Aufgefrierprozess nach 43 Tagen überhaupt beendet ist. Aufgrund des stetig wachsenden Frostkörpers in der Aufgefrierphase müsste die Kühlleistung eigentlich abfallen, so wie es sich in der Simulation ergibt. Die Ursache für diesen annähernd konstanten Messwert liegt wahrscheinlich in einer geringen Genauigkeit der Temperaturfühler. Die Genauigkeit der im Rahmen von Vereisungsmaßnahmen verwendeten Temperaturfühler liegt oftmals bei maximal $0,5^{\circ}\text{C}$. Dadurch können Änderungen der Rücklauftemperatur bzw. der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur, die unterhalb dieser Genauigkeit liegen, nicht mehr richtig erfasst werden und führen somit auch nicht zu einer weiteren Verringerung der Kühlleistung. Da es sich bei den Querschlagvereisungen beim Statentunnel um vergleichsweise kleine Vereisungsmaßnahmen handelt, liegt die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf bereits nach ca. 20 Tagen nur noch bei etwa 1,2 K. Die auftretenden Änderungen dieser Temperaturdifferenz sind dann so gering, dass sie nicht mehr zuverlässig erfasst werden können. Somit kann der Verlauf der gemessenen Kühlleistung nach ca. 20 Tagen nicht zwangsläufig als realistisch angesehen werden. Daher sind die Abweichungen zwischen der Kühlleistung der Simulation und der gemessenen Kühlleistung zum Ende der Vereisungsmaßnahme nicht als kritisch anzusehen. Folglich kann der zeitliche Verlauf der Kühlleistung mit ausreichender Genauigkeit durch die Ergebnisse der numerischen Simulation mit dem „freezrefcap“-Modul abgebildet werden.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Nachrechnung des realen Vereisungsprojekts, der Querschlagvereisung beim Statentunnel in Rotterdam, mit dem „freezrefcap“-Modul hinreichende Übereinstimmungen zwischen Messwerten und Simulationsergebnissen sowohl für die Temperaturverteilung im Boden als auch für die erforderliche Kühlleistung ergeben hat. Insbesondere vor dem Hintergrund der in der Praxis vorliegenden schwierigen Randbedingungen und vielseitigen Randeinflüsse, die oftmals nur unzureichend erfasst werden, sind die erzielten Ergebnisse als vielversprechend zu bewerten. Die Nachrechnung verdeutlicht die Praxistauglichkeit des Programms SHEMAT-Suite sowie des entwickelten detaillierten Lösungsmodells zur Kühlleistungsermittlung „freezrefcap“. Es konnte somit gezeigt werden, dass ein Einsatz des Programms SHEMAT-Suite für numerische Simulationen in der Planungsphase realer Vereisungsprojekte möglich und aufgrund der guten Prognosegenauigkeit auch sinnvoll und wirtschaftlich ist.

7 Einflussfaktoren auf die Kühlleistung und die Aufgefrierzeit

Aufbauend auf der Validierung der beiden Lösungsmodelle werden nun die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Aufgefrierzeit und insbesondere auf die Kühlleistung für eine fiktive Vereisungsmaßnahme ermittelt. Dazu wird die Vereisung eines Querschlags im Tunnelbau als fiktive Vereisungsmaßnahme gewählt. Die numerischen Untersuchungen im Rahmen dieser umfangreichen Parameterstudie werden mit dem detaillierten Lösungsmodell („freezrefcap“) zur Bestimmung der Kühlleistung durchgeführt. Dadurch wird es möglich, nicht nur die Einflüsse aus den relevanten Bodenparametern, sondern darüber hinaus auch die Einflüsse aus den Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälte-trägerkreislaufs zu bestimmen.

Im Folgenden werden zunächst das dreidimensionale Ausgangsmodell und die für die Simulationen erforderlichen Eingangsparmeter vorgestellt. Im Anschluss wird der Einfluss einer Grundwasserströmung erläutert, die bereits von Baier (2008) als maßgebender Einflussparameter für die Aufgefrierzeit identifiziert wurde. Im weiteren Verlauf werden die Einflüsse aus den Bodenparametern sowie den Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälte-trägerkreislaufs, jeweils für variierende Grundwasserströmungsgeschwindigkeiten, vorgestellt. Abschließend erfolgt eine vergleichende Bewertung aller untersuchten Einflussfaktoren.

7.1 Basismodell und Eingangsparmeter

Sicherheitsvorgaben im Tunnelbau erfordern den Einbau zahlreicher Querschläge, die oftmals mit Hilfe des Vereisungsverfahrens hergestellt werden und folglich ein maßgebendes Einsatzgebiet des Vereisungsverfahrens darstellen. Daher wird als Modell für die numerischen Simulationen im Rahmen der Parameterstudie und der in Kapitel 8 folgenden energetischen Optimierung von Vereisungsmaßnahmen die Vereisung eines fiktiven Querschlags im Tunnelbau gewählt.

Die detaillierte Simulation der Vereisung eines Querschlags mit dem „freezrefcap“-Modul erfordert ein dreidimensionales Modell des Querschlags, wobei sich die Abmessungen der fiktiven Querschlagvereisung an denen einer typischen Querschlagvereisung in der Praxis orientieren. Das Ausbruchprofil soll einen Innendurchmesser von 5,5 m und eine erforderliche Frostkörperdicke von 1,5 m aufweisen. Das sogenannte Basissystem, das den Referenzfall für die Einflussfaktoren der Parameterstudie darstellt, besteht aus 16 symmetrisch angeordneten Gefrierrohren (s. Bild 7.1). Die Gefrierrohre sind gleichmäßig über den Kreisumfang verteilt und haben einen gegenseitigen Abstand von ca. 1,37 m bzw. jeweils $22,5^\circ$. Alle Gefrierrohre des Referenzsystems weisen in diesem fiktiven Beispiel eine einheitliche Länge von 10 m auf.

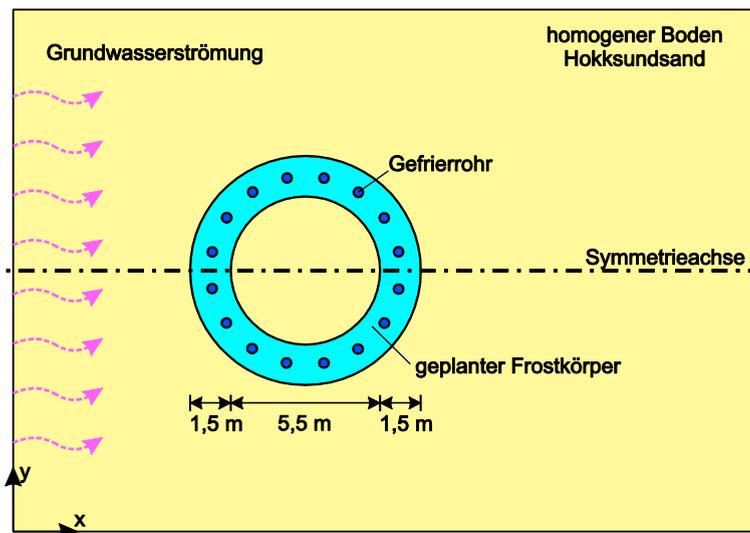


Bild 7.1 Grundriss des Basis- bzw. Referenzsystems des Querschlagmodells

Die Abmessungen des gesamten Basissystems werden so groß gewählt, dass Randeinflüsse ausgeschlossen werden können. Die Problematik des Aneisens des entstehenden Frostkörpers an die beiden bereits bestehenden Tunnelröhren wird in dieser Parameterstudie nicht näher betrachtet.

Die Modellerstellung bei der Finite-Differenzen-Methode erfordert die Einhaltung bestimmter Stabilitätskriterien, um die numerische Stabilität und damit auch die Genauigkeit der Simulationsergebnisse zu gewährleisten. Abweichungen von den Stabilitätskriterien für die räumliche oder zeitliche Diskretisierung können zu Oszillationen und numerischer Dispersion führen (Kinzelbach 1987). Zur Vermeidung von Stabilitätsproblemen ist es zum einen sinnvoll ein voll implizites Berechnungsverfahren zu wählen. Zum anderen müssen die Kriterien der Courant- und Pécelet-Zahl eingehalten werden. Dabei stellt die Pécelet-Zahl ein Maß für die räumliche Diskretisierung dar und soll zur Kontrolle der numerischen Dispersion einen Wert kleiner als 2 aufweisen (Kinzelbach 1987). Die maximale Zellweite Δx wird dann aus der Pécelet-Zahl auf Basis der simulierten Anfangsfließgeschwindigkeit, der Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Bodens und der volumetrischen Wärmekapazität des Wassers nach Gleichung (7.1) bestimmt.

$$\Delta x = \frac{2 \cdot \lambda_{B,u}}{v_f \cdot c_{v,w}} = \frac{2 \cdot 1,63}{8,681 \cdot 10^{-6} \cdot 4.200.000} = 0,089 \text{ m} \quad (7.1)$$

Die Zellweiten der Gefrierrohre unterliegen zusätzlich noch der Bedingung, dass der im Modell abgebildete Umfang der Gefrierrohrzelle nahezu der Mantelfläche des coaxialen Gefrierrohrs entsprechen sollte. Für die beiden typischen Gefrierrohrabmessungen mit Außendurchmessern von 10,8 cm und 8,89 cm ergeben sich dadurch Zellweiten von 8,5 cm und 7 cm. Im Bereich der Vereisung des aufzugefrierenden Querschlags wird diese geringe Zellweite von 8,5 cm bzw. 7 cm gewählt. Zum Modellrand hin kann eine Aufweitung des Netzes zur Reduzierung der Gesamtzellenanzahl und der damit verbundenen Rechenzeit vorgenommen werden. Um den Einfluss der Randbedingungen auf die numerische Stabilität zu verringern, wird der Modellrand selbst wieder fein diskretisiert.

Die Courant-Zahl stellt die Bedingung für die Zeitschrittweite dar, die nach Kinzelbach (1987) zur Vermeidung von Oszillationen kleiner als 1 sein sollte. Die maximale Zeitschrittweite Δt ergibt sich unter Ansatz der minimalen Zellweite sowie des vorliegenden Porenanteils zu:

$$\Delta t = \frac{\Delta x \cdot n}{v_f} = \frac{0,07 \cdot 0,41}{8,681 \cdot 10^{-6}} = 3306 \text{ s} = 55 \text{ min} \quad (7.2)$$

Aufgrund der Sensibilität des „freezrefcap“-Moduls im Hinblick auf die erforderliche Zeitschrittweite muss die nach den allgemeinen Stabilitätskriterien erforderliche Zeitschrittweite deutlich unterschritten werden. Mit Hilfe von Sensitivitätsrechnungen konnte für das vorliegende Randwertproblem ermittelt werden, dass Oszillationen vermieden werden können, wenn Zu Beginn der Simulation ein Zeitschritt von 2 min gewählt wird, der aber im Verlauf der Simulation auf 4 min vergrößert werden kann.

Als Baugrund wird der sogenannte Hokksundsand nach Frivik & Comini (1982) gewählt, dessen thermische und geotechnische Bodeneigenschaften aus Laborversuchen eindeutig bekannt sind. Der Hokksundsand wurde außerdem bereits von Baier (2008) im Rahmen der Kalibrierung des „freezing“-Moduls durch die Nachrechnung des Modellversuchs von Frivik & Comini (1982) verwendet. Die erforderlichen Eingangswerte der Bodeneigenschaften für die Simulation mit SHEMAT-Suite sind in Tabelle 7.1 aufgeführt.

Tabelle 7.1 Eingangswerte der Bodeneigenschaften des Hokksundsands für SHEMAT-Suite

Parameter des Bodens		Wert	Einheit
Trockendichte	ρ_d	1600	kg/m ³
Korndichte	ρ_s	2665	kg/m ³
Porosität	n	0,41	-
Quarzgehalt	q	0,35	-
Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs	λ_s	3,359	W/(mK)
Permeabilität	k	4,4E ⁻¹¹	m ²
Parameter des Verlaufs des ungefrorenen Wassergehalts	a	0,078	-
	b	-5,565	-
Kompressibilität des Feststoffs	α_s	1,00E ⁻⁰⁸	Pa ⁻¹
Impedanzfaktor	E_I	10	-

Weitere für die Simulation mit dem „freezrefcap“-Modul erforderliche Eingangsparameter sind neben den Bodeneigenschaften die Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteträgerkreislaufs. Für die Vereisung dieses Querschlags werden typische koaxiale Gefrierrohre mit einem Fallrohr aus Polyethylen und einem Steigrohr aus Stahl angesetzt. Eine Bohrlochverfüllung kann

vernachlässigt werden, da angenommen wird, dass die eingebrachten Bohrröhre als Steigrohre des Gefrierrohrs verwendet werden. Die Geometrie der Gefrierrohre mit einem Außendurchmesser von 10,8 cm wird von van der Meijden (2003) übernommen und entspricht den Gefrierrohren, die bei dem Projekt des Westerscheldetunnels eingesetzt wurden (s. Tabelle 7.2).

Tabelle 7.2 Eingangswerte des Gefrierrohrs für das „freezrefcap“-Modul

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

Die erforderlichen Eingangsparameter des Kälteträgerkreislaufs für eine Simulation mit dem „freezrefcap“-Modul sind in Tabelle 7.3 aufgelistet.

Tabelle 7.3 Eingangswerte des Kälteträgerkreislaufs für das „freezrefcap“-Modul

Parameter des Kälteträgerkreislaufs		Wert	Einheit
Durchfluss	Q_F	20	m ³ /h
Vorlauftemperatur	$T_{F,VL}$	-35	°C
Sole	CaCl ₂ -Konzentration	29,9	%
	Gefrierpunkt	-54	°C

Um die maßgebenden Einflussparameter auf die Aufgefrierzeit und insbesondere die erforderliche Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme zu bestimmen, werden die relevanten Bodeneigenschaften sowie einige Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteträgerkreislaufs variiert. Zunächst wird aber der Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit separat untersucht. Die Simulation der weiteren Variationsparameter wird anschließend jeweils für unterschiedliche Grundwasserfließgeschwindigkeiten von 0,0 m/d bis 0,75 m/d durchgeführt, um die Auswirkung einer Überlagerung des Variationsparameters mit einer Grundwasserströmung auf die Aufgefrierdauer und die Kühlleistung quantifizieren zu können.

Im Hinblick auf die Bodeneigenschaften wird eine Variation des Porenanteils, des Quarzgehalts sowie der damit einhergehenden Wärmeleitfähigkeit und der Grundwassertemperatur vorgenommen. Die Grundwassertemperatur entspricht dabei der Bodentemperatur, die für das

Basissystem zu 10°C angenommen wird. Bei den Gefrierrohreigenschaften werden lediglich die Länge des Gefrierrohrs und die Geometrie des Koaxialrohrs variiert. Auf eine Variation der Wärmeleitfähigkeiten des Fall- und Steigrohrs wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da das Fallrohr aus gering leitfähigem Polyethylen besteht und der geringe Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Steigrohrs bereits im Rahmen eines Forschungsprojekts bestätigt wurde (vgl. Ziegler & Schüller 2014). Für den Kälteträgerkreislauf werden der Durchfluss, die Vorlauftemperatur und die CaCl₂-Konzentration der Sole variiert.

Um den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Aufgefrierzeit und die Kühlleistung in der Aufgefrierphase zu bestimmen, wird die Aufgefrierzeit über Temperaturmesspunkte kontrolliert. Diese Temperaturmesspunkte sind an den Außenkonturen des statisch erforderlichen Frostkörpers angeordnet. Der Frostkörper kann per Definition als aufgefroren angesehen werden, wenn alle Temperaturmesspunkte eine Temperatur von $T \leq -1^\circ\text{C}$ aufweisen. Für den Vergleich der Kühlleistung wird die gesamte Kühlenergie in der Aufgefrierphase bestimmt und auf die summierte Gefrierrohrlänge bezogen. Somit ergibt sich als Vergleichswert eine mittlere Kühlenergie pro Meter Gefrierrohr [kWh/m].

7.2 Einfluss der Grundwasserströmung

Der enorme Einfluss einer Grundwasserströmung auf die Schließ- und Aufgefrierzeit von Vereisungsmaßnahmen wurde bereits von Baier (2008) und Ziegler et al. (2010) ausführlich beschrieben. Liegt keine Grundwasserströmung vor, so kann sich der Frostkörper radial um die Gefrierrohre ausbilden und es entsteht ein gleichmäßiger, rotationssymmetrischer Frostkörper. Beim Vorliegen einer Grundwasserströmung hingegen verzögert sich der Frostkörperfortschritt aufgrund des konvektiven Wärmeeintrags und es bildet sich ein stark unsymmetrisches Temperaturfeld aus. Dabei wird die Verzögerung des Frostkörperwachstums insbesondere auf der strömungszugewandten Seite deutlich. In Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit kann es sogar zur Ausbildung eines stationären Zustands kommen, wenn die durch das Grundwasser eingetragene Wärmemenge der Kühlleistung der Gefrierrohre entspricht. Das Frostkörperwachstum kommt in diesem Fall gänzlich zum Erliegen.

Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Querschlagvereisung ist die Frostkörperausbreitung für verschiedene Grundwasserfließgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt nach 20 Tagen in Bild 7.2 gegenübergestellt. Der Farbbereich der Temperaturskala von 10°C (rot) bis -1°C (blau) gilt in gleicher Weise für alle folgenden Temperaturbilder. Außerdem sind jeweils die statisch erforderliche Frostkörperdicke und die -1°C-Isotherme des Frostkörpers eingetragen. Im Fall ohne Grundwasserströmung ergibt sich das zu erwartende radial symmetrische Temperaturfeld und der Frostkörper ist nach 20 Tagen fast aufgefroren. Mit steigender Grundwasserfließgeschwindigkeit zeigt sich eine deutliche Verringerung der Frostkörperausbreitung. Diese führt letztlich zu einer Erhöhung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie aufgrund des eingetragenen Wärmestroms durch das Grundwasser. Die strömungszugewandte Seite stellt dabei den kritischen Bereich dar.

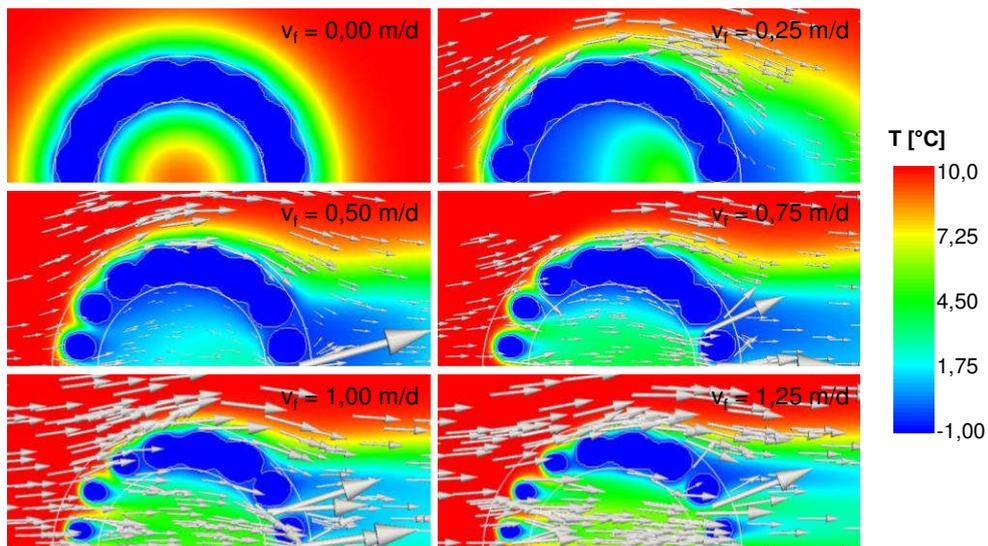


Bild 7.2 Frostkörperfortschritt nach 20 Tagen für verschiedene Fließgeschwindigkeiten

In Bild 7.3 sind sowohl die Aufgefrierzeit als auch die erforderliche Kühlenergie in der Aufgefrierphase in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit dargestellt. Mit steigender Grundwasserfließgeschwindigkeit kommt es zu einem überproportionalen Anstieg der Aufgefrierzeit. Diese Beobachtung entspricht den Ergebnissen von Baier (2008). Die mit dem „freezrefcap“-Modul ermittelte detaillierte Kühlleistung bzw. Kühlenergie steigt ebenfalls mit steigender Grundwasserfließgeschwindigkeit überproportional an.

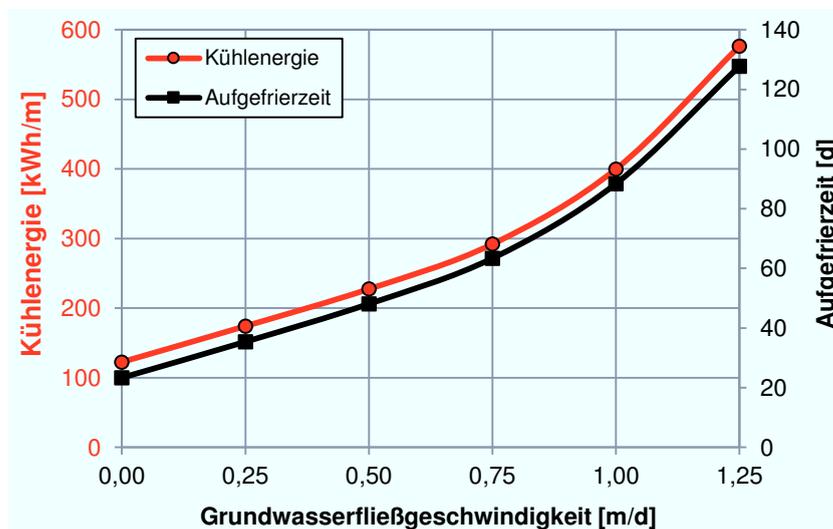


Bild 7.3 Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Kühlenergie in der Aufgefrierphase und die Aufgefrierzeit

Bild 7.4 enthält zusätzlich eine normierte Darstellung der Aufgefrierzeit und Kühlenergie, bei der die Ergebnisse der verschiedenen Fließgeschwindigkeiten auf das Ergebnis des Systems ohne Grundwasserströmung bezogen sind. Diese normierte Darstellung ermöglicht eine anschauliche Beurteilung der Änderung sowie des Verhältnisses der Kühlenergie und Aufgefrierzeit in

Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit. Diese Art der normierten Darstellung wird auch im Folgenden zur Verdeutlichung der Einflüsse der Bodeneigenschaften sowie der Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteträgerkreislaufs verwendet. Für den Einflussparameter der Grundwasserfließgeschwindigkeit zeigt Bild 7.4, dass die Aufgefrierzeit stärker beeinflusst wird als die Kühlenergie. Im Vergleich zum Ausgangssystem ohne Grundwasserströmung sind bei der Aufgefrierzeit Steigerungen von bis zu 550 % möglich, bei der Kühlenergie ist die Steigerung geringer, liegt aber immer noch bei beachtlichen 470 %.

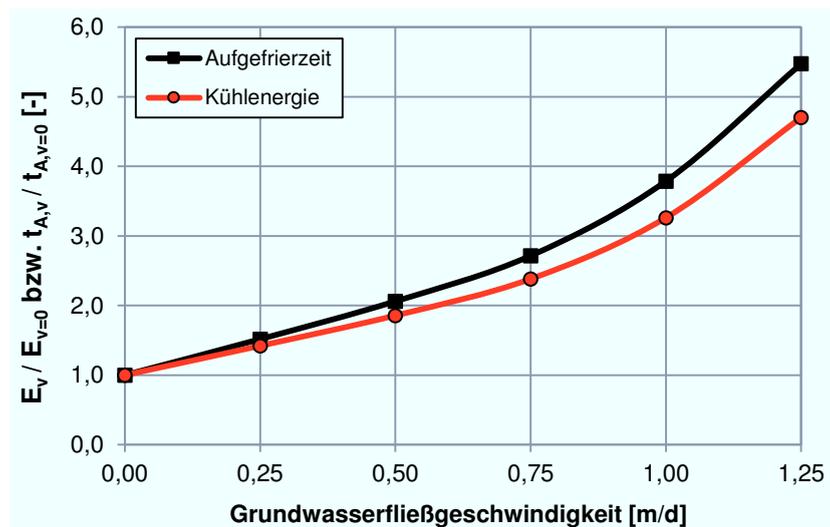


Bild 7.4 Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d

Der bereits von Baier (2008) aufgezeigte enorme Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Aufgefrierzeit kann mit den Simulationen dieser fiktiven Querschlagvereisung bestätigt werden. Außerdem wird deutlich, dass neben der Aufgefrierzeit auch die Kühlenergie überproportional beeinflusst wird. Der Einfluss der weiteren Variationsparameter wird im Folgenden in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit untersucht, um eine daraus folgende Verstärkung der auftretenden Effekte bestimmen zu können. Dabei werden die weiteren Variationsparameter nur für Grundwasserfließgeschwindigkeiten von 0,0 m/d bis 0,75 m/d untersucht, da der Einfluss der Grundwasserströmung auf die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie bereits für diese Fließgeschwindigkeiten deutlich wird. Außerdem können die Rechenzeiten, die mit steigender Grundwasserfließgeschwindigkeiten deutlich zunehmen, somit in einem annehmbaren Rahmen gehalten werden.

7.3 Einfluss der Bodenparameter

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss von drei in Voruntersuchungen ermittelten relevanten Bodenparametern vorgestellt. Dazu zählen der Porenanteil des Bodens, der Quarzgehalt des Bodens, der mit der Feststoffwärmeleitfähigkeit korreliert und damit die Wärmeleitfähigkeit des Bodengemischs beeinflusst, und die Grundwassertemperatur, die starken Schwankungen unterworfen ist.

7.3.1 Einfluss des Porenanteils

Der Porenanteil eines Bodens bestimmt im Fall von Vereisungsmaßnahmen, bei denen eine Vollsättigung des Bodens angenommen wird, den Anteil des zu gefrierenden Wassers im Boden. Der Ausgangsparameter des Porenanteils des Hokksundsands liegt bei 41 %. Im Rahmen der Parameterstudie werden weiterhin Porenanteile von 20 %, 30 % und 50 % untersucht, die in nichtbindigen Böden vorliegen können. Der Einfluss einer Veränderung des Porenanteils auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit ist in Bild 7.5 zusammengefasst.

Bevor die Ergebnisse des Einflusses des Porenanteils im Detail diskutiert werden, wird zunächst die Darstellungsweise im Diagramm kurz erläutert. Es handelt sich um eine normierte Darstellung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie. Dabei sind die Ergebnisse für die jeweilige Grundwasserfließgeschwindigkeit bzw. den jeweiligen Variationsparameter auf die Ergebnisse des Ausgangssystems ohne Grundwasserströmung ($v_f = 0$ m/d) und mit dem Ausgangswert des Variationsparameters bezogen. In diesem Fall stellt der Porenanteil von 41 % den Ausgangs- bzw. Referenzwert des Variationsparameters dar. In der Darstellung ist der Variationsparameter stets auf der x-Achse zu finden und die verschiedenen Grundwasserfließgeschwindigkeiten bilden die Linienschar. Der Verlauf der Aufgefrierzeit in Abhängigkeit des untersuchten Variationsparameters ist jeweils über die durchgezogene Linie und der Verlauf der Kühlenergie über die gestrichelte Linie gekennzeichnet. Die Farbgebung der verschiedenen Linien korreliert mit der vorliegenden Grundwasserfließgeschwindigkeit und bleibt in allen folgenden Diagrammen identisch. Die blauen Linien geben somit stets die Ergebnisse der Parametervariation für ein System ohne Grundwasserströmung wieder. Zusätzlich sind die Ergebnisse des Referenzwerts des Variationsparameters stets mit einer schwarz gepunkteten Linie markiert. Da diese Darstellungsweise allen folgenden Diagrammen zugrunde liegt, ist der Einfluss des Variationsparameters direkt erkennbar und eine einheitliche Bewertung wird möglich. In Anlage B findet sich ergänzend für alle Variationsparameter eine weitere Darstellungsweise, mit der die jeweilige Abhängigkeit von der Grundwasserfließgeschwindigkeit unterstrichen wird.

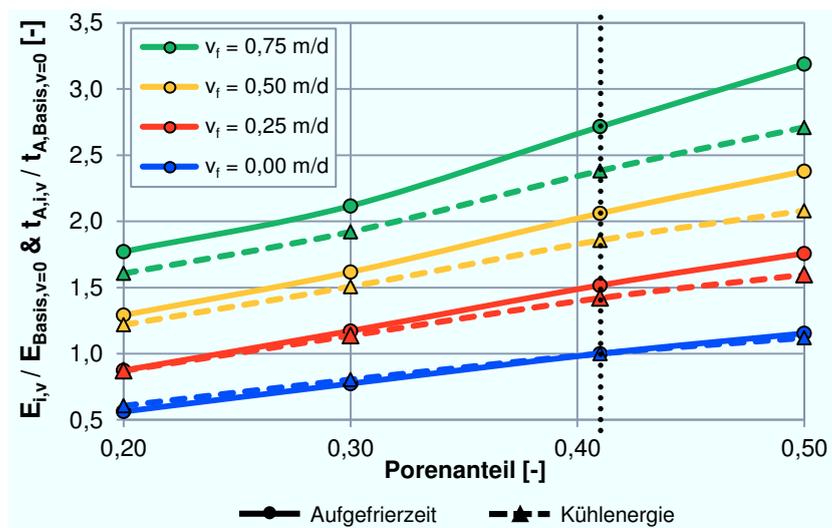


Bild 7.5 Einfluss des Porenanteils auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $n = 0,41$

Die Ergebnisse der Variation des Porenanteils zeigen, dass ein geringerer Porenanteil generell zu einer Verringerung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie führt. Ein größerer Porenanteil hingegen hat eine Erhöhung der Aufgefrierzeit sowie der Kühlenergie zur Folge. Durch die Überlagerung mit der Grundwasserströmung ergeben sich weitere Erkenntnisse. Im Fall ohne Grundwasserströmung liegen die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit für den jeweiligen Porenanteil sehr nah beieinander. Eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit führt zu einer Aufspreizung zwischen der Kühlenergie und der Aufgefrierzeit, da die Aufgefrierzeit mit steigender Grundwasserströmung stärker anwächst als die Kühlenergie. Dies wird insbesondere für größere Porenanteile deutlich. Liegen die normierte Kühlenergie und die normierte Aufgefrierzeit für $n = 0,2$ und $v_f = 0,5$ m/d noch relativ nah beieinander, so liegt die normierte Aufgefrierzeit für einen Porenanteil von $n = 0,5$ deutlich über der normierten Kühlenergie.

Die Ursache für die Verringerung der Aufgefrierzeit sowie der Kühlenergie für geringere Porenanteile liegt zum einen in dem geringeren Anteil des zu gefrierenden Wassers, der sowohl schneller als auch mit geringerem Energieaufwand gefroren werden kann. Zum anderen verändern sich durch eine Änderung des Porenanteils in der Folge die thermischen Eigenschaften des Bodengemischs, da der Porenanteil in die Mischungsberechnung eingeht. Die Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Bodens beispielsweise nimmt mit abnehmendem Porenanteil zu, da die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs größer ist als die des Wassers. Dies führt folglich zu einer weiteren Begünstigung des Frostkörperfortschritts, die sich im Fall einer vorliegenden Grundwasserströmung auch auf die erforderliche Kühlenergie auswirkt (vgl. Kapitel 7.3.2).

7.3.2 Einfluss des Quarzgehalts

Der Quarzgehalt beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs und damit folglich auch die des Bodengemischs maßgeblich (s. Kapitel 4.3.1). Eine Erhöhung des Quarzgehalts führt nach Gleichung (4.43) zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs.

Da der Quarzgehalt des Hokksundsands mit 35 % als eher niedrig anzusehen ist, werden weiterhin Quarzgehalte von 55 % und 75 % untersucht. Der hohe Quarzanteil von 75 % reicht dabei nahezu an Quarzgehalte reiner Quarzsande heran, die mindestens 80 % betragen müssen. Die drei gewählten Quarzgehalte ergeben Feststoffwärmeleitfähigkeiten von 3,359 W/(mK), 4,519 W/(mK) und 6,076 W/(mK).

Die Ergebnisse der Simulationen zur Bestimmung des Einflusses des Quarzgehalts auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit sind in Bild 7.6 dargestellt. Wird zunächst nur die Aufgefrierzeit betrachtet, zeigen die Ergebnisse, dass ein erhöhter Quarzgehalt für alle Grundwasserfließgeschwindigkeiten zu einer deutlichen Verringerung der erforderlichen Aufgefrierzeit führt. Die Kühlenergie hingegen verringert sich für einen höheren Quarzgehalt nur, wenn eine Grundwasserströmung vorhanden ist.

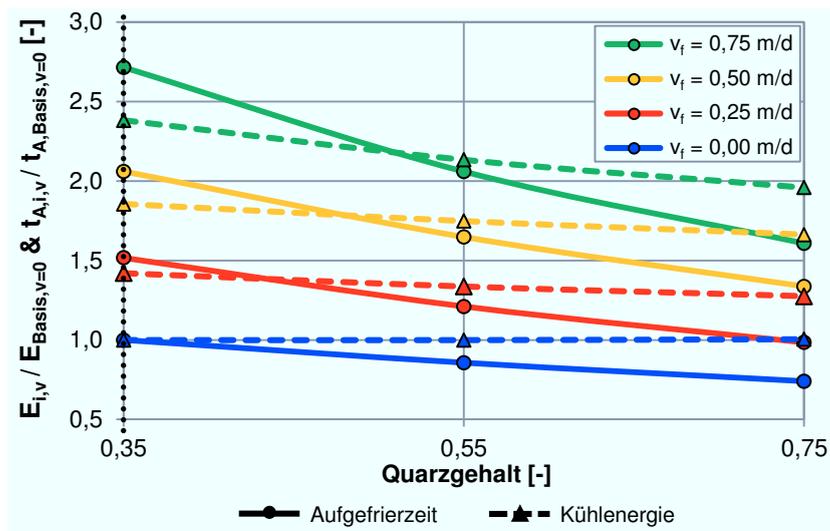


Bild 7.6 Einfluss des Quarzgehalts auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $q = 0,35$

Liegt keine Grundwasserströmung vor, ist die Kühlenergie für alle Quarzgehalte nahezu identisch, obwohl die Aufgefrierzeiten mit steigendem Quarzgehalt deutlich abnehmen. Der Grund für diesen Effekt liegt in der Wärmemenge, die zum Aufgefrieren des Bodens abgeführt werden muss und die damit die Kühlenergie bestimmt. Diese ist im Fall ohne Grundwasserströmung konstant, da sie unabhängig vom Quarzgehalt und der daraus resultierenden Wärmeleitfähigkeit des Bodengemischs ist. Aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit des Bodens kann die Wärmemenge zwar schneller abgeführt und der Boden damit schneller aufgefroren werden, die erforderliche Kühlenergie bleibt aber identisch.

Für den Fall einer vorliegenden Grundwasserströmung gilt dieser Zusammenhang nicht mehr. Allgemein erhöht sich die zum Aufgefrieren des Frostkörpers erforderliche Kühlenergie mit steigender Fließgeschwindigkeit, da die abzuführende Wärmemenge durch den zusätzlich eingetragenen Wärmestrom infolge der Grundwasserströmung zunimmt. Eine Erhöhung des Quarzgehalts führt dabei aber für jede Fließgeschwindigkeit zu einer Verringerung der Kühlenergie, da die kürzeren Aufgefrierzeiten die Kühlenergie positiv beeinflussen. Der zusätzlich eingetragene Wärmestrom aus der Grundwasserströmung wirkt sich nur über einen kürzeren Zeitraum auf die Kühlenergie aus, so dass die Kühlenergie in diesen Fällen mit steigendem Quarzgehalt abnimmt. Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Beeinflussung der Kühlenergie durch den Quarzgehalt weitaus geringer ausfällt als die Beeinflussung der Aufgefrierzeit.

7.3.3 Einfluss der Grundwassertemperatur

Die Grundwassertemperatur entspricht der Bodentemperatur und ist durch regionale und jahreszeitliche Schwankungen gekennzeichnet. Die jahreszeitlichen Schwankungen wirken sich auf Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau aufgrund der Tiefenlage meist nur geringfügig aus und sind damit zu vernachlässigen (vgl. Baier 2008). Regionale Schwankungen sind hingegen unbedingt zu beachten. Im innerstädtischen Bereich sind die Grundwassertemperaturen aufgrund

der vielfältigen Einflüsse im Boden meist deutlich höher als in eher ländlichen Regionen. Da die Grundwasser bzw. Bodentemperaturen im innerstädtischen Bereich aufgrund des Wärmeeintrags durch die enge Bebauung oftmals im Bereich von 14°C liegen, wird ein Einflussbereich der Grundwassertemperaturen von 8°C bis 14°C untersucht.

Bild 7.7 zeigt die Ergebnisse der numerischen Simulationen zum Einfluss der Grundwassertemperatur auf die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie. Generell wird deutlich, dass eine Erhöhung bzw. Verringerung der Grundwassertemperatur sowohl zu einer Erhöhung bzw. Verringerung der Aufgefrierzeit als auch der Kühlenergie führt. Eine Erhöhung der Grundwasserfließgeschwindigkeit bewirkt, wie bei dem Parameter des Porenanteils, eine Aufspreizung zwischen der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie, die sich für höhere Grundwassertemperaturen nochmals verstärkt. Nur im Fall ohne Grundwasserströmung werden die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie in gleichem Maß von einer Änderung der Grundwassertemperatur beeinflusst. Liegt hingegen eine Grundwasserströmung vor, so wird die Aufgefrierzeit stärker beeinflusst als die Kühlenergie.

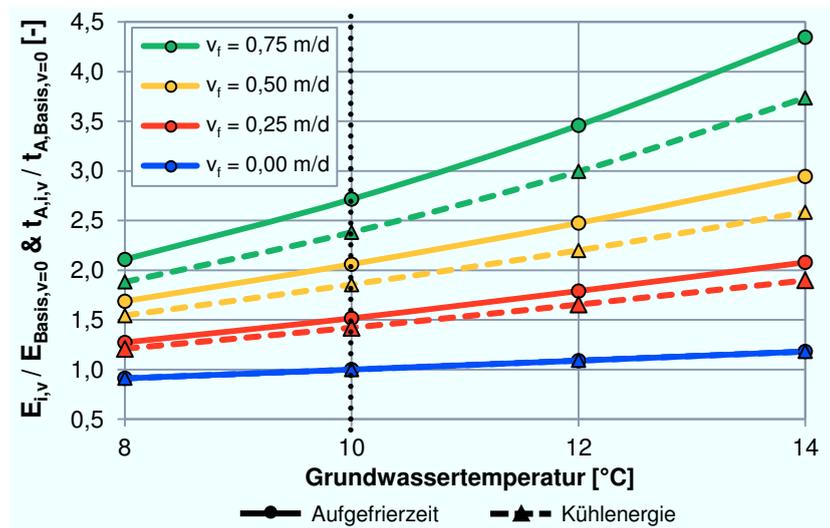


Bild 7.7 Einfluss der Grundwassertemperatur auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $T_{GW} = 10^\circ\text{C}$

Bei einer konstanten Vorlauftemperatur der Gefrierrohre bestimmt die Grundwassertemperatur direkt die abzukühlende Temperaturdifferenz bzw. die Wärmemenge, die zum Aufgefrieren des Frostkörpers abgeführt werden muss. Liegt keine Grundwasserströmung vor, erhöhen sich demnach die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie proportional mit steigender Grundwassertemperatur. Die überproportionale Zunahme der Aufgefrierzeit sowie der Kühlenergie für steigende Grundwasserfließgeschwindigkeiten resultiert aus dem eingetragenen Wärmestrom, der sich mit steigender Grundwassertemperatur aufgrund der größeren Temperaturdifferenz weiter erhöht.

7.4 Einfluss der Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälte­träger­kreis­laufs

Die Entwicklung des detaillierten Lösungsmodells („freezrefcap“) zur Bestimmung der Kühlenergie ermöglicht die Untersuchung der Einflüsse von Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälte­träger­kreis­laufs. Die Einflüsse dieser Parameter auf die Aufgefrierzeit und die Kühlleistung konnten bislang aufgrund fehlender Berechnungsansätze nicht quantifiziert werden. Im Rahmen dieser Parameterstudie werden daher die Einflüsse der folgenden Parameter untersucht:

- Gefrierrohr:
 - Geometrie des koaxialen Gefrierrohrs
 - Länge
- Kälte­träger:
 - Vorlauf­temperatur
 - Durchfluss
 - CaCl₂-Konzentration

7.4.1 Einfluss der Geometrie des koaxialen Gefrierrohrs

Um den Einfluss der Geometrie des Gefrierrohrs zu ermitteln, werden zwei typische Gefrierrohrgeometrien untersucht, die beide bei Vereisungsprojekten zum Einsatz kommen. Dabei handelt es sich zum einen um das bereits beschriebene Ausgangsgefrierrohr mit einem Außendurchmesser von 10,8 cm, das z.B. bei der Vereisung des Westerscheldetunnels zum Einsatz kam (van der Meijden 2003). Zum anderen wird ein oft verwendetes Gefrierrohr mit einem Außendurchmesser von 8,89 cm untersucht, wie es beispielsweise bei den Vereisungsmaßnahmen beim Bau der Nord-Süd-Stadtbahn in Köln zum Einsatz kam. Die Eingangswerte der beiden unterschiedlichen Gefrierrohre sind in Tabelle 7.4 zusammengefasst.

Tabelle 7.4 Eingangswerte der Geometrie der beiden verwendeten Gefrierrohre

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

Der Einfluss einer Veränderung der Gefrierrohrgeometrie, für die spezifizierten Gefrierrohre, auf die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie in der Aufgefrierphase ist in Bild 7.8 dargestellt. Generell wird deutlich, dass die Verwendung des kleineren Gefrierrohrquerschnitts zu einer Erhöhung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie führt, wobei die Aufgefrierzeit deutlich stärker beeinflusst wird als die Kühlenergie. Mit steigender Grundwasserströmung verstärkt sich dieser Effekt.

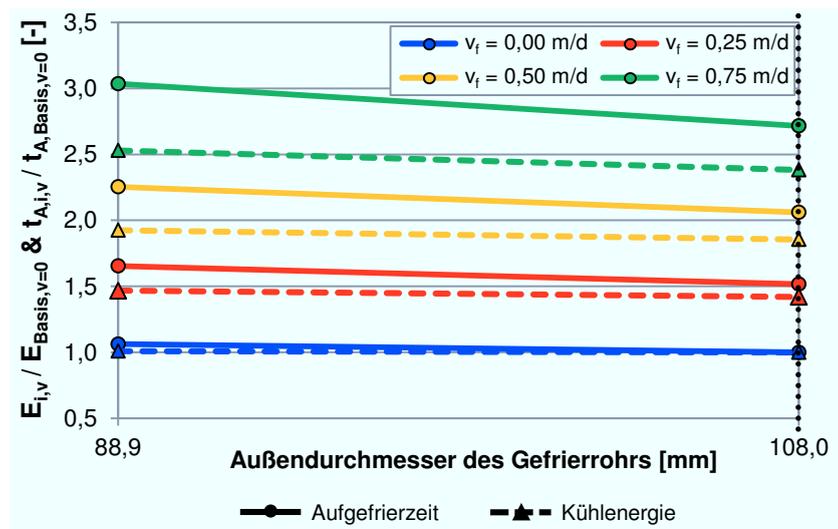


Bild 7.8 Einfluss der Gefrierrohrgeometrie auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $d_{A,a} = 108$ mm

Die Änderung der Gefrierrohrgeometrie hat nicht nur eine Veränderung der wärmeübertragenden Mantelfläche zur Folge, sondern auch eine Änderung des thermischen Widerstands des Gefrierrohrs aufgrund veränderter Wärmetransport- und Strömungsprozesse im Gefrierrohr. Um die Ursache für die Erhöhung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie für einen kleineren Gefrierrohrquerschnitt zu bestimmen, sind diese beiden Aspekte in Kombination zu betrachten.

Infolge der Veränderung des Außendurchmessers wird die Zellgröße der Gefrierrohre in den Simulationen verändert (s. Kapitel 7.1). Für das Gefrierrohr mit einem Außendurchmesser von 88,9 mm verringert sich die wärmeübertragende Mantelfläche folglich um ca. 20 % im Vergleich zu dem Gefrierrohr mit einem Außendurchmesser von 108 mm. Damit einhergehend verringert sich aber auch der gesamte thermische Widerstand für das Gefrierrohr mit einem Außendurchmesser von 88,9 mm. Der Grund hierfür sind zum einen die veränderte Wandstärke und zum anderen die Querschnittsveränderung im Ringraum, wodurch sowohl der konduktive als auch der konvektive Widerstand verringert werden.

Obwohl das Gefrierrohr mit einem Außendurchmesser von 88,9 mm bessere thermische Eigenschaften und damit einen geringeren thermischen Widerstand aufweist, erhöhen sich die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie. Dies begründet sich aus dem Einfluss der geringeren wärmeübertragenden Mantelfläche, die den positiven Effekt des verbesserten Wärmeübergangs übersteigt.

Abschließend ist festzuhalten, dass die wärmeübertragende Mantelfläche des Gefrierrohrs einen größeren Einfluss auf die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie hat als der Wärmeübergang des Gefrierrohrs. Folglich ist die Wahl eines größeren Gefrierrohrdurchmessers von Vorteil, da sowohl die Aufgefrierzeit als auch die Kühlenergie verringert werden können. Da die Untersuchung des Einflusses der Gefrierrohrgeometrie nur für einen Durchfluss von 20 m³/h durchgeführt wurde, gilt dieser Zusammenhang lediglich für Rohrströmungen im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung.

7.4.2 Einfluss der Länge des Gefrierrohrs

Da Vereisungsmaßnahmen stets individuell geplant werden müssen, ergeben sich oftmals aufgrund der vorliegenden geometrischen Randbedingungen, wie dem Abstand der durch einen Querschlag zu verbindenden Tunnelröhren, unterschiedliche Gefrierrohlängen. Um den Einfluss der Länge der Gefrierrohre auf die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie zu bestimmen, werden deshalb zusätzlich zum Ausgangssystem mit einer Gefrierrohlänge von 10 m zwei weitere Gefrierrohlängen von 5 m und 15 m untersucht. Um diese Gefrierrohlängen simulieren zu können, musste die Modellgröße angepasst werden, wobei dies jeweils unter Beibehaltung des gleichen Randabstands geschah. Die Ergebnisse der numerischen Simulationen zur Bestimmung der Beeinflussung der Aufgefrierzeit sowie der Kühlenergie durch eine Veränderung der Gefrierrohlänge sind in Bild 7.9 dargestellt.

Es wird deutlich, dass die Aufgefrierzeit von der Länge nahezu unabhängig ist. Dies gilt sowohl für den Fall ohne als auch mit Grundwasserströmung. Die Kühlenergie hingegen wird deutlich durch eine Änderung der Gefrierrohlänge beeinflusst. Bei größeren Vereisungsmaßnahmen mit längeren Gefrierrohren erhöht sich das zu gefrierende Bodenvolumen proportional mit der Wärmeübertragungsfläche. Aufgrund dieser vergrößerten Wärmeübertragungsfläche erhöht sich somit die Rücklauftemperatur der Sole. Da die Kühlenergie proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur ist, steigt diese folglich auch proportional an. Damit erklärt sich, dass für den Fall ohne Grundwasserströmung eine 50 % größere Gefrierrohlänge zu einer Erhöhung der Kühlenergie um ebenfalls 50 % führt. Für eine geringere Gefrierrohlänge ist entsprechend weniger Kühlenergie erforderlich. Dieser proportionale Zusammenhang zwischen Gefrierrohlänge und Kühlenergie bleibt auch für steigende Fließgeschwindigkeiten bestehen, da der zusätzliche Wärmestrom durch das Grundwasser alle Systeme, unabhängig von der Gefrierrohlänge, in gleichem Maß beeinflusst.

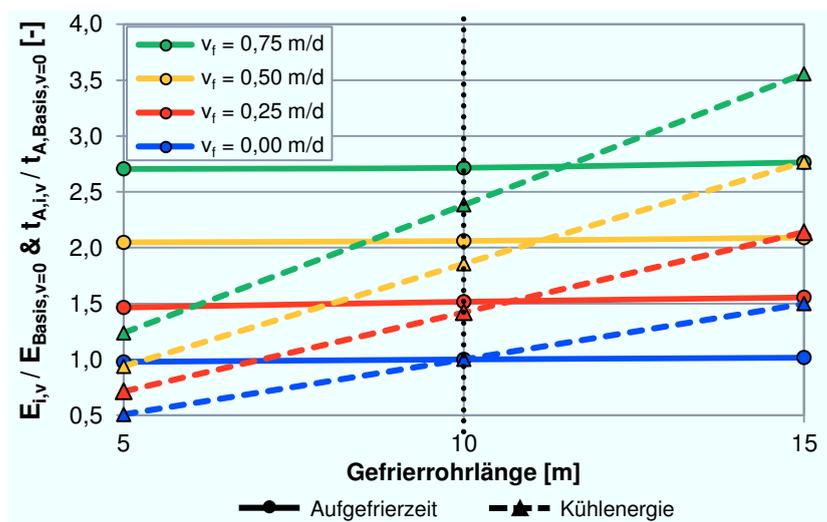


Bild 7.9 Einfluss der Länge des Gefrierrohrs auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $L_{GR} = 10$ m

7.4.3 Einfluss der Vorlauftemperatur

Bei Vereisungsmaßnahmen kommt der Wahl der Vorlauftemperatur eine entscheidende Bedeutung zu. Beim Einsatz einer 29,9-prozentigen CaCl_2 -Sole kommen üblicherweise Vorlauftemperaturen von minimal -40°C zum Einsatz. Obwohl der Gefrierpunkt dieser CaCl_2 -Sole von -54°C geringere Vorlauftemperaturen ermöglichen würde, sind diese aufgrund des erheblichen Anstiegs der dynamischen Viskosität und der damit einhergehenden Erhöhung der erforderlichen Pumpleistung unwirtschaftlich. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Parameterstudie Abweichungen der Vorlauftemperatur um $\pm 5^\circ\text{C}$ vom Referenzwert der Vorlauftemperatur von -35°C untersucht.

Bild 7.10 zeigt die Ergebnisse der Parametervariation der Vorlauftemperatur des Kälteträgers. Eine Erhöhung der Vorlauftemperatur auf -30°C bewirkt eine deutliche Erhöhung der Aufgefrierzeit. Eine Verringerung der Vorlauftemperatur auf -40°C führt entsprechend zu einer Verringerung der Aufgefrierzeit. Die Ergebnisse zeigen eine überproportionale Zunahme der Aufgefrierzeit mit steigender Grundwasserströmung sowie einer erhöhten Vorlauftemperatur. Die Kühlenergie weist prinzipiell zwar die gleichen Zusammenhänge auf, die Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur ist im Vergleich zur Aufgefrierzeit aber deutlich geringer ausgeprägt.

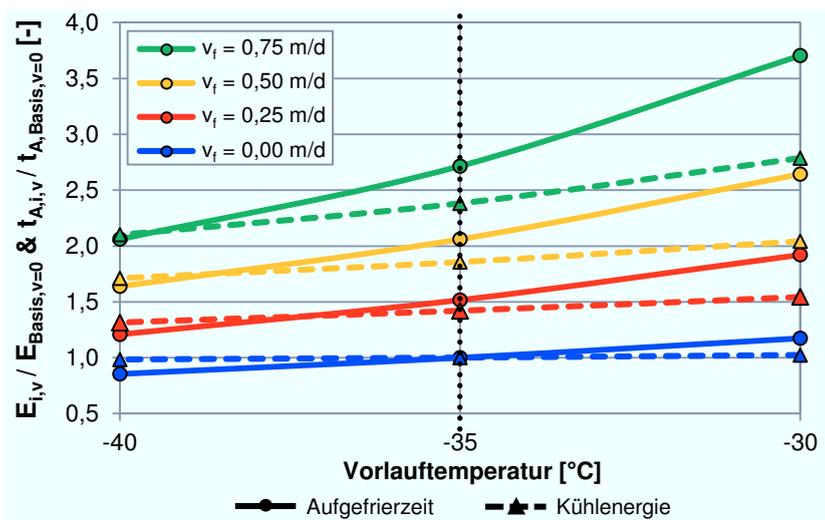


Bild 7.10 Einfluss der Vorlauftemperatur des Kälteträgers auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $T_{F,VL} = -35^\circ\text{C}$

Die Ursache für die überproportionale Erhöhung der Aufgefrierzeit bei einer steigenden Grundwasserströmung sowie einer erhöhten Vorlauftemperatur liegt zum einen in der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Boden und Gefrierrohr. Dadurch wird dem Boden weniger Wärme entzogen und die Aufgefrierzeit nimmt zu. Zum anderen wird durch die Grundwasserströmung ein zusätzlicher Wärmestrom eingetragen, der eine konstante Größe aufweist und unabhängig von der Vorlauftemperatur ist. Da die Temperaturdifferenz zwischen Boden und Gefrierrohr für eine erhöhte Vorlauftemperatur aber geringer ist, wird mehr Zeit benötigt, um diesen konstanten, zusätzlichen Wärmestrom abzuführen. Die überproportionale Erhöhung der Aufgefrierzeit für eine Erhöhung der Vorlauftemperatur auf -30°C ergibt sich

demzufolge aufgrund der Überlagerung der beiden Effekte. Die Erhöhung bzw. Verringerung der Kühlenergie ergibt sich schließlich nur als Folge der Erhöhung bzw. Verringerung der Aufgefrierzeit, wodurch auch die geringere Beeinflussung der Kühlenergie durch die Vorlauf-temperatur erklärt werden kann.

Abschließend ist festzuhalten, dass im Rahmen von Vereisungsmaßnahmen möglichst geringe Vorlauf-temperaturen gewählt werden sollten, um die Aufgefrierzeit sowie die Kühlenergie möglichst gering zu halten.

7.4.4 Einfluss des Durchflusses

Eine Veränderung des Durchflusses im Gefrierrohr wirkt sich nicht nur auf die Strömungs-geschwindigkeit im Gefrierrohr aus, sondern kann auch zu einer Veränderung der Strömungs-form im Gefrierrohr führen. Um in dieser Parameterstudie beide Effekte zu erfassen, werden neben dem Ausgangswert des Durchflusses von 20 m³/h weiterhin jeweils ein Durchfluss von 5 m³/h und 35 m³/h untersucht. Für das Gefrierrohr $d_{A,a} = 108$ mm werden mit den angegebenen Durchflüssen die in Tabelle 7.5 zusammengefassten Reynolds-Zahlen im Fallrohr sowie im Ringraum zwischen Fall- und Steigrohr erreicht. Für einen Durchfluss von 5 m³/h liegt somit im gesamten Gefrierrohr eine laminare Strömung ($Re < 2.300$) vor. Mit dem Referenzwert des Durchflusses von 20 m³/h werden eine laminare Strömung im Ringraum und eine Strömung im Übergangsbereich im Fallrohr ($2.300 < Re < 10.000$) erreicht. Ein Durchfluss von 35 m³/h führt zu einer turbulenten Strömung ($Re > 10.000$) im Fallrohr, im Ringraum liegt weiterhin eine Strömung im Übergangsbereich vor. Eine turbulente Strömung im Ringraum wird nicht untersucht, da dafür ein unrealistischer Durchfluss von 98 m³/h erforderlich würde.

Tabelle 7.5 Reynolds-Zahlen innerhalb des Gefrierrohrs für verschiedene Durchflüsse

Q_F [m ³ /h]	Re_{Fallrohr} [-]	Re_{Ringraum} [-]
5	1598	513
20	6393	2051
35	11.188	3589

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen zum Einfluss des Durchflusses auf die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie sind in Bild 7.11 dargestellt. Eine Verringerung des Durchflusses bewirkt eine Erhöhung der Aufgefrierzeit bzw. der Kühlenergie, eine Erhöhung des Durchflusses führt entsprechend zu einer Verringerung der Aufgefrierzeit bzw. der Kühlenergie. Für die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie zeigen sich zwar die gleichen Abhängigkeiten, die Abhängigkeit der Kühlenergie vom Durchfluss ist im Vergleich zur Aufgefrierzeit aber nicht so stark ausgeprägt.

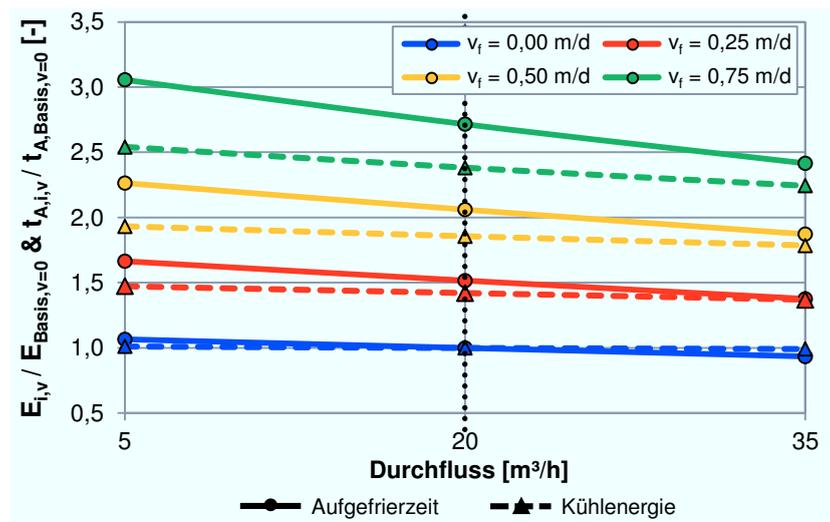


Bild 7.11 Einfluss des Durchflusses des Kälteträgers auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $Q_F = 20$ m³/h

Die Aufgefrierzeit erhöht bzw. verringert sich infolge einer Verringerung bzw. Erhöhung des Durchflusses, da diese Veränderung des Durchflusses zu einer Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit der CaCl_2 -Sole im Gefrierrohr führt. Durch eine Verringerung des Durchflusses auf 5 m³/h wird die Kontaktzeit von Sole und Gefrierrohrwand erhöht. Damit erhöht sich die Temperatur der CaCl_2 -Sole, der Wärmeentzug aus dem Boden wird aufgrund der kleineren Temperaturdifferenz geringer und die Aufgefrierzeit nimmt letztlich zu. Außerdem wird die Strömungsform und damit einhergehend der Wärmeübergang verändert. Bei einem Durchfluss von 5 m³/h wird lediglich eine laminare Strömung erreicht, so dass sich der Wärmeübergang im Vergleich zum Referenzwert verschlechtert und es somit zu einer weiteren Verlängerung des Aufgefrierprozesses kommt. Die beschriebenen Effekte potenzieren sich mit steigender Grundwasserfließgeschwindigkeit, so dass die Unterschiede in der Aufgefrierzeit immer deutlicher werden.

Neben der Aufgefrierzeit verringert bzw. erhöht sich die Kühlenergie ebenfalls infolge einer Verringerung bzw. Erhöhung des Durchflusses. Um diese auftretenden Effekte zu erklären, ist zu beachten, dass die Kühlenergie sowohl von der veränderten Strömungsform im Gefrierrohr als auch linear vom Wert des Durchflusses und der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklaufstemperatur nach Gleichung (5.2) abhängt. Entgegen den Simulationsergebnissen müsste eine Verringerung des Durchflusses auf 5 m³/h aufgrund des linearen Zusammenhangs nach Gleichung (5.2) auf den ersten Blick zu einer Verringerung der Kühlenergie führen. Die Verringerung des Durchflusses bewirkt aber gleichzeitig eine Verschlechterung des Wärmeübergangs aufgrund der laminaren Strömungsverhältnisse. Somit treten größere thermische Verluste auf, die zu einer Erhöhung der Rücklaufstemperatur und damit zu einer erhöhten Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf führen (s. Anlage B). Die Erhöhung der Temperaturdifferenz wirkt sich in diesem Fall stärker aus als die Verringerung des Durchflusses. Die Überlagerung dieser beiden Effekte sowie die erhöhte Aufgefrierzeit führen insgesamt zu einer Erhöhung der Kühlenergie.

Die Ergebnisse der Simulationen zum Einfluss des Durchflusses haben gezeigt, dass zahlreiche Effekte gleichzeitig auftreten und sich teilweise gegenseitig bedingen. Folglich ist für eine abschließende Bewertung stets eine Überlagerung aller Effekte zu beachten und die Ursache genau zu hinterfragen. Weiterhin ist zu erwähnen, dass die Simulationen zum Einfluss des Durchflusses im Rahmen dieser Parameterstudie Veränderungen der erforderlichen Pumpleistung sowie daraus resultierende Auswirkungen im Kälteträgerkreislauf vernachlässigen, da der Berechnungsansatz des „freezrefcap“-Moduls diese nicht berücksichtigen kann.

7.4.5 Einfluss der Calciumchlorid-Konzentration der Sole

Die bei Vereisungsmaßnahmen oftmals verwendeten CaCl_2 -Solen können mit verschiedenen CaCl_2 -Konzentrationen hergestellt werden. Unterschiedliche CaCl_2 -Konzentrationen der Solen führen zu einer Veränderung der Materialeigenschaften und des Gefrierpunkts. Im Rahmen dieser Parameterstudie werden die drei in Kapitel 4.3.1 vorgestellten CaCl_2 -Solen mit CaCl_2 -Konzentrationen von 29,9 %, 28,57 % und 27,4 % untersucht, da die jeweiligen Gefrierpunkte alle die Einstellung des Referenzwerts der Vorlauftemperatur von -35°C ermöglichen.

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen in Bild 7.12 zeigen, dass der Einfluss einer Veränderung der CaCl_2 -Konzentration auf die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie eher gering ist. Bei genauer Betrachtung der Ergebnisse, insbesondere für größere Grundwasserströmungen, wird deutlich, dass eine Verringerung der CaCl_2 -Konzentration zu einer Verringerung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie führt. Der Grund für die Vorteile einer niedrigen CaCl_2 -Konzentration ist der aus thermischer Sicht bessere Wärmeübergang, der sich bereits in der Diskussion der temperaturabhängigen Eigenschaften sowie der Bestimmung des HTFE in Kapitel 4.3.2 ergeben hat.

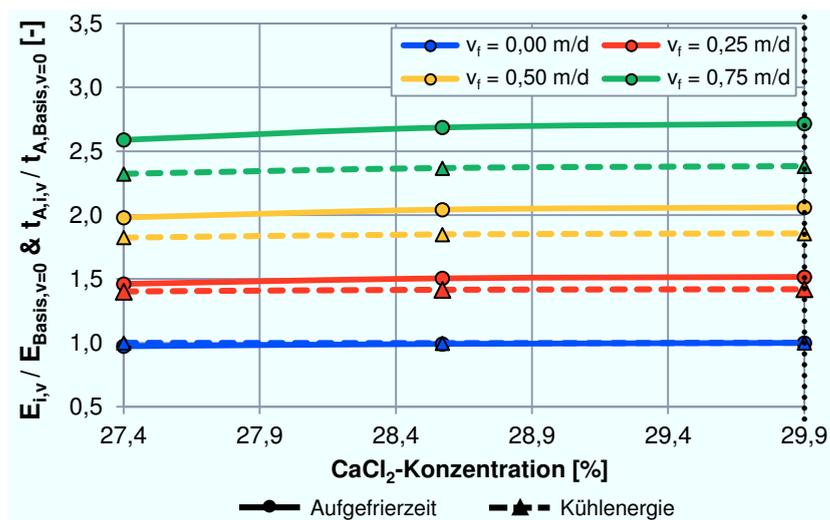


Bild 7.12 Einfluss der CaCl_2 -Konzentration des Kälteträgers auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und eine CaCl_2 -Konzentration von 29,9 %

7.5 Beurteilung der maßgebenden Einflussfaktoren

Im Rahmen dieser Parameterstudie wurde der Einfluss zahlreicher Parameter auf die Aufgefrierzeit und die Kühlleistung in der Aufgefrierphase untersucht. Um die maßgeblichen Einflussfaktoren abschließend bewerten zu können, werden die verschiedenen Bodeneigenschaften sowie die Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteträgerkreislaufs gegenübergestellt.

Der im Vergleich zu allen anderen untersuchten Parametern beherrschende Einflussparameter ist die vorliegende Grundwasserfließgeschwindigkeit. Diese beeinflusst nicht nur die Aufgefrierzeit, sondern auch die Kühlenergie maßgeblich. Eine Steigerung der Grundwasserströmung von $v_f = 0$ m/d auf $v_f = 1,25$ m/d führt zu einer Erhöhung der Aufgefrierzeit um etwa 550 % und der Kühlleistung um etwa 470 % (s. Bild 7.4).

Als Grundlage für die abschließende Beurteilung der maßgebenden Einflussfaktoren sind die Auswirkungen der untersuchten Parameter auf die Aufgefrierzeit in Bild 7.13 und auf die Kühlenergie in Bild 7.14 zusammenfassend dargestellt. Die Balken in dieser Darstellung geben direkt den Einflussbereich des untersuchten Parameters in Prozent an, der sich aber nur auf den im Rahmen dieser Parameterstudie untersuchten Variationsbereich des jeweiligen Parameters bezieht. Dabei ergeben sich sowohl positive als auch negative Abweichungen vom Ausgangs- bzw. Referenzsystem, da einige Parameter sowohl erhöht als auch verringert wurden. Dazu zählt beispielsweise die Grundwassertemperatur T_{GW} , die im Bereich von 8°C bis 14°C variiert wurde und deren Referenzwert bei 10°C liegt. Die Einflussbereiche der Parameter sind für alle untersuchten Grundwasserfließgeschwindigkeiten angegeben. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Ergebnisse in Bild 7.13 und in Bild 7.14 zur Bestimmung des prozentualen Einflusses auf das Basis- bzw. Referenzsystem der jeweiligen Fließgeschwindigkeit bezogen sind und nicht auf das Basissystem ohne Grundwasserströmung. Dadurch wird direkt die prozentuale Änderung der Aufgefrierzeit bzw. der Kühlenergie durch die variierten Parameter ersichtlich. Hat ein Parameter nur eine geringe oder gar keine Auswirkung auf die Aufgefrierzeit bzw. die Kühlenergie, fällt die Größe des jeweiligen Balkens gering aus oder der Balken fehlt vollständig.

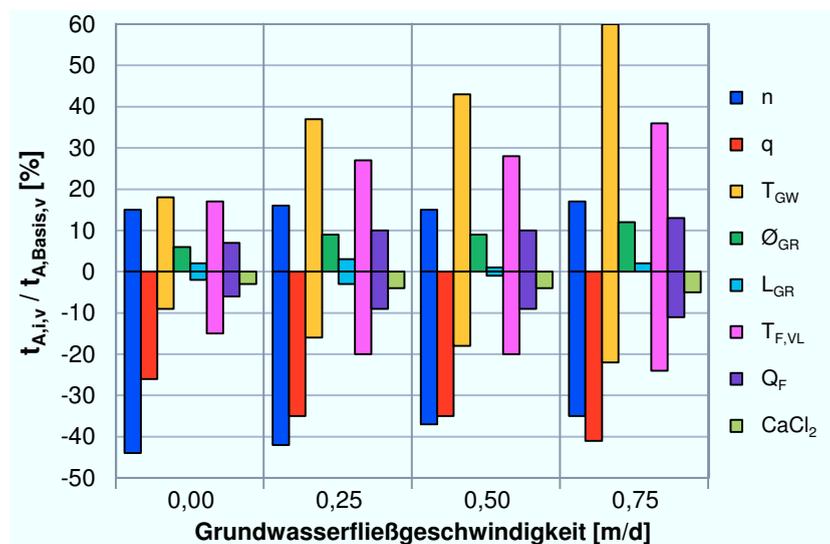


Bild 7.13 Prozentualer Einflussbereich der variierten Parameter für die Aufgefrierzeit

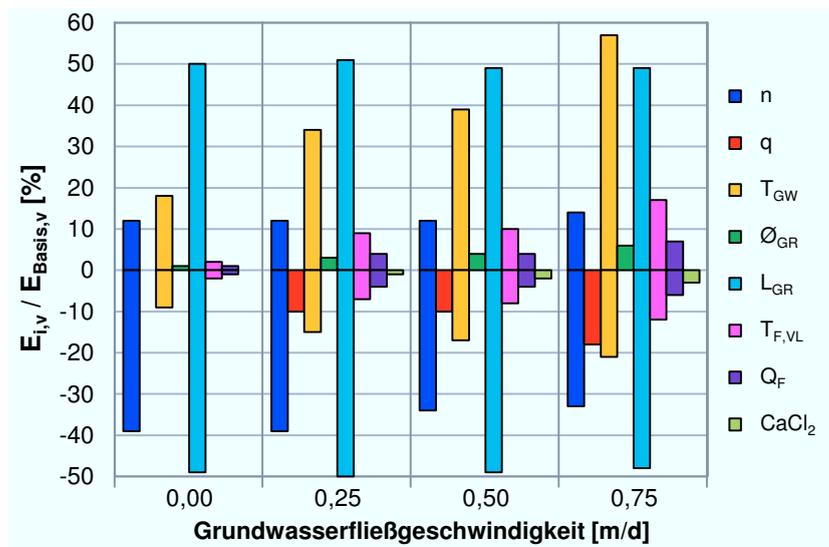


Bild 7.14 Prozentualer Einflussbereich der variierten Parameter für die Kühlenergie

Die drei untersuchten Bodenparameter, Porenanteil, Quarzgehalt bzw. Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs und Grundwasser- bzw. Bodentemperatur, beeinflussen sowohl die Aufgefrierzeit als auch die Kühlenergie deutlich und weisen deshalb auch ausgeprägte Einflussbereiche auf. Der Einflussbereich des Porenanteils liegt dabei für alle Grundwasserströmungen bei etwa 55 % für die Aufgefrierzeit und bei etwa 49 % für die Kühlenergie. Der Einflussbereich des Quarzgehalts steigt mit zunehmender Grundwasserströmung deutlich an und liegt für die Aufgefrierzeit bei bis zu 41 %, für die Kühlenergie hingegen nur bei bis zu 18 %. Die Grundwassertemperatur zeigt den größten Einfluss der untersuchten Bodeneigenschaften. Ihr Einfluss auf die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie nimmt mit steigender Grundwasserströmung deutlich zu. Im Maximum liegt der Einflussbereich für die Aufgefrierzeit bei 88 % und für die Kühlenergie bei 78 %.

Die untersuchten Eigenschaften des Gefrierrohrs, wie die Gefrierrohrgeometrie und die Länge, zeigen im Hinblick auf die Aufgefrierzeit jeweils nur einen geringen Einfluss. Die Wahl der Gefrierrohrgeometrie beeinflusst die Aufgefrierzeit für $v_f = 0,75$ m/d maximal im Bereich von 12 %. Der Einfluss auf die Kühlleistung fällt sogar noch geringer aus. Im Gegensatz dazu beeinflusst insbesondere die Länge des Gefrierrohrs die Kühlenergie maßgeblich in einem Bereich von etwa 99 %. Eine Abhängigkeit von der Grundwasserströmung ist dabei nicht auszumachen.

Der Einflussbereich der CaCl₂-Konzentration liegt für die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie unter 5 %. Folglich stellt die CaCl₂-Konzentration keinen relevanten Einflussparameter dar. Die Vorlauftemperaturen des Kälteträgers hingegen beeinflussen die Aufgefrierzeit in einem Bereich von 30 % bis 60 %, der mit steigender Grundwasserströmung zunimmt. Die Kühlenergie wird weniger deutlich beeinflusst, wobei der maximale Einflussbereich hier auch bei knapp 30 % liegt. Der Durchfluss des Kälteträgers hat aufgrund der Verschlechterung bzw. Verbesserung des Wärmeübergangs hauptsächlich Einfluss auf die Aufgefrierzeit, die Beeinflussung der Kühlenergie ist mit maximal 13 % eher gering. Für die Aufgefrierzeit hingegen vergrößert sich der Einflussbereich des Durchflusses mit steigender Grundwasserströmung deutlich und liegt bei bis zu 24 %.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die größte Beeinflussung des Gefrierhaltens und der erforderlichen Kühlenergie aus der vorliegenden Grundwasserströmung resultiert. Weiterhin zeigen aber auch die Bodeneigenschaften eine deutliche Beeinflussung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie. Dabei ist jedoch zu beachten, dass weder die untersuchten Bodeneigenschaften noch die vorliegende Grundwasserströmung mit Hilfe von Bodenverbesserungsmaßnahmen rentabel verändert werden können. Aus diesem Grund ist es unbedingt erforderlich, diese Parameter im Rahmen einer ausführlichen und um zusätzliche Messungen ergänzten Baugrund-erkundung zu ermitteln und bereits in der Planungsphase der Vereisungsmaßnahme zu berücksichtigen. Sind diese Parameter bekannt, kann die Vereisungsmaßnahme effektiv und zuverlässig geplant werden. Verzögerungen des Gefrierprozesses und Erhöhungen der Energiekosten aufgrund unspezifischer und damit mangelhafter Kalkulationen können damit zuverlässig verhindert werden.

Die Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteträgerkreislaufs weisen geringere Beeinflussungen der Aufgefrierzeit und der erforderlichen Kühlenergie auf. Sie bieten aber die Möglichkeit einer aktiven Steuerung, da es sich um veränderliche Eigenschaften handelt. Folglich können diese Parameter im Rahmen von numerischen Simulationen bereits in der Planungsphase so optimiert werden, dass deutliche Einsparungen der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie erreicht werden können. Dabei können zusätzlich Synergieeffekte genutzt werden, indem mehrere Eigenschaften optimiert werden. Durch die Kombination der geringen Einsparungen der einzelnen Parameter können die Gesamteinsparungen letztlich erhöht werden.

8 Ansätze zur energetischen Optimierung von Vereisungsmaßnahmen

Aufbauend auf den Ergebnissen der Parameterstudie werden in diesem Kapitel Ansätze zur Optimierung des Energieverbrauchs der in Kapitel 7 untersuchten fiktiven Vereisungsmaßnahme eines Querschlags untersucht. Dabei wird zwischen der Aufgefrier- und der Erhaltungsphase unterschieden. In der Aufgefrierphase wird in diesem Zusammenhang sowohl eine energetische als auch eine zeitliche Optimierung durch strömungsangepasste Gefrierrohranordnungen in Anlehnung an die Dissertation von Baier (2008) untersucht. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt aber auf der energetischen Optimierung der Erhaltungsphase, die in bisherigen Untersuchungen nicht betrachtet wurde, den Gesamtenergieverbrauch einer Vereisungsmaßnahme aber maßgeblich bestimmt. In der Erhaltungsphase wird schwerpunktmäßig der Einsatz verschiedener Betriebsvarianten im Hinblick auf deren energetische Einsparpotentiale untersucht und optimiert. Abschließend werden die Optimierungsvarianten der Aufgefrier- und Erhaltungsphase in ihrer Gesamtheit zunächst im Hinblick auf die erzielbaren, energetischen Einsparpotentiale bewertet. Darauf aufbauend erfolgt eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit auf Basis einer vereinfachten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

8.1 Vergleich der Lösungsmodelle

Die energetische Optimierung im Rahmen dieses Kapitels wird für die fiktive Vereisung eines Querschlags durchgeführt. Das Basismodell des Querschlags wurde bereits in Kapitel 7.1 vorgestellt, so dass die Geometrie des herzustellenden Frostkörpers sowie die Gefrierrohranordnung Bild 7.1 entnommen werden kann. Die Eingangsparameter der Bodeneigenschaften des verwendeten Hokksundsands für SHEMAT-Suite entsprechen den in Tabelle 7.1 angegebenen Werten.

Um neben der Aufgefrierphase auch die Erhaltungsphase zu optimieren und somit eine ganzheitliche Optimierung der Vereisungsmaßnahme zu erhalten, muss eine lange Frostkörpererhaltung simuliert werden. Der Einsatz des detaillierten Lösungsmodells „freezrefcap“ zur Bestimmung der Kühlleistung würde in diesem Fall zu enormen Rechenzeiten führen, da die Simulationen kleine Zeitschrittweiten von in diesem Fall maximal 4 Minuten sowie eine dreidimensionale Berechnung erfordern. Da die Optimierungsansätze im Rahmen dieses Kapitels untereinander vergleichend bewertet werden und es sich somit um eine relative Betrachtung handelt, sind geringe Abweichungen zur tatsächlichen Kühlleistung vernachlässigbar solange es sich um annähernd konstante Beträge handelt. Auf eine detaillierte Ermittlung der Kühlleistung kann folglich verzichtet werden. Außerdem hat die Nachrechnung des Modellversuchs (s. Kapitel 6.1) bereits gezeigt, dass der Verlauf der Kühlleistung sowohl mit dem „freezing“-Modul als auch mit dem „freezrefcap“-Modul gut abgebildet werden kann und lediglich geringe,

konstante Abweichungen auftreten. Die Kühlleistung kann demzufolge in guter Näherung mit dem vereinfachten Ansatz des „freezing“-Moduls ermittelt werden.

Die Simulationen zur energetischen Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Rahmen dieses Kapitels werden folglich mit dem „freezing“-Modul durchgeführt. Durch die mögliche Erhöhung des Zeitschritts unter Einhaltung der Stabilitätskriterien auf 15 Minuten und die Anwendung zweidimensionaler Simulationen kann die erforderliche Rechenzeit erheblich reduziert werden.

Obwohl in Kapitel 7 und Kapitel 8 das gleiche Modell des Querschlags verwendet wird, ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen verwendeten Lösungsmodelle Abweichungen in der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie. Diese Abweichungen werden zunächst anhand von Vergleichsrechnungen für das Basismodell des Querschlags vorgestellt sowie deren Ursachen erläutert. In den folgenden Kapiteln wird dann auf die Ergebnisse der Untersuchungen zur Optimierung der Aufgefrierphase und der Erhaltungsphase eingegangen.

Um die Abweichungen zwischen dem Ergebnis der dreidimensionalen Simulationen mit dem „freezrefcap“-Modul und dem Ergebnis der zweidimensionalen Simulationen mit dem „freezing“-Modul detailliert begründen zu können, wurden zwei weitere Systeme untersucht. Bei den dreidimensionalen Simulationen mit dem „freezrefcap“-Modul wird eine konstante Vorlauf-temperatur von -35°C angesetzt. Die Gefrierrohrtemperatur im Boden stellt sich somit zeitabhängig und in Abhängigkeit der weiteren Rand- und Eingangsbedingungen ein. Um nur die Auswirkung durch eine Änderung des Lösungsmodells zu bestimmen, wurde eine dreidimensionale Simulation mit dem „freezing“-Modul durchgeführt. Dabei wurden die Ergebnisse für die Gefrierrohrtemperatur im Boden aus der Simulation mit dem „freezrefcap“-Modul als zeitabhängige Treppenfunktion definiert und an die Gefrierrohrzellen übergeben. Somit sind die Gefrierrohrtemperaturen im Boden für diese beiden dreidimensionalen Simulationen nahezu gleich.

Da im Rahmen dieses Kapitels vereinfacht konstante Gefrierrohrtemperaturen von -35°C simuliert werden, ist weiterhin nur der Einfluss dieser Änderung der Gefrierrohrtemperatur auf die Ergebnisse der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie zu bestimmen. Dazu wurde eine dreidimensionale Simulation mit dem „freezing“-Modul mit einer Gefrierrohrtemperatur von -35°C durchgeführt. Damit wird auch die Bestimmung der Abweichung zu der im Rahmen dieses Kapitels stets durchgeführten zweidimensionalen Simulationen mit dem „freezing“-Modul und einer konstanten Gefrierrohrtemperatur von -35°C möglich.

In Bild 8.1 sind beispielhaft die Aufgefrierzeiten für die vier beschriebenen Systeme in Abhängigkeit von der Grundwasserfließgeschwindigkeit dargestellt. Ein Vergleich der Aufgefrierzeiten für die Simulation mit dem „freezrefcap“-Modul (blau) und dem „freezing“-Modul mit der variablen Gefrierrohrtemperatur (grün) zeigt, dass diese nahezu gleich sind. Der Grund hierfür sind die annähernd gleichen Gefrierrohrtemperaturen in beiden Simulationen. Die Aufgefrierzeit für die dreidimensionale Simulation mit dem „freezing“-Modul mit einer konstanten Gefrierrohrtemperatur von -35°C (rot) ist im Vergleich zu den beiden anderen Systemen (blau & grün) deutlich geringer. Diese Verringerung der Aufgefrierzeit erklärt sich durch die geringere Gefrierrohrtemperatur von -35°C im Vergleich zu den Systemen mit einer

zeitabhängigen Gefrierrohrtemperatur (blau & grün), die nur Temperaturen von $-33,4^{\circ}\text{C}$ im Gefrierrohr erreichen. Mit steigender Grundwasserfließgeschwindigkeit wird die Verringerung der Aufgefrierzeit deutlicher, da der zusätzlich eingetragene Wärmestrom effektiver abgeführt werden kann. Die Aufgefrierzeit für die im Folgenden verwendeten zweidimensionalen Simulationen mit dem „freezing“-Modul und einer konstanten Gefrierrohrtemperatur von -35°C (gelb) reduziert sich nochmals im Vergleich zu der Aufgefrierzeit der dreidimensionalen Simulation (rot).

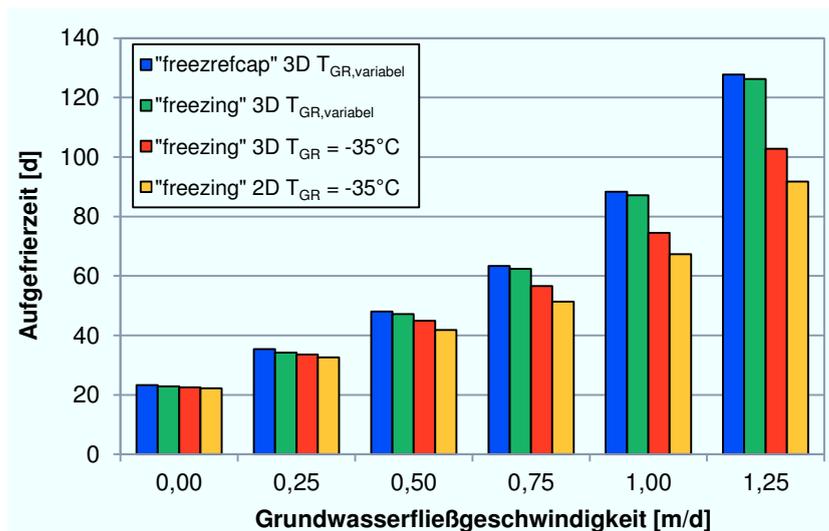


Bild 8.1 Aufgefrierzeit in Abhängigkeit der Grundwasserströmung - Vergleich der Lösungsmodelle für verschiedene Gefrierrohrbedingungen

Der Grund für die weitere Verringerung der Aufgefrierzeit für eine zweidimensionale Simulation liegt in der Vernachlässigung der dreidimensionalen Frostausbreitung, die nicht nur in radialer sondern auch in axialer Richtung, also in Richtung der Gefrierrohre, stattfindet. Bei einem dreidimensionalen Modell wird der Frostkörper in axialer Richtung vor allem am Anfang und am Ende der Gefrierrohre durch den Kontakt mit dem Boden bzw. dem Beton des Tunnels beeinflusst und es entsteht ein elliptischer Frostkörper (s. Bild 8.2). In der Mitte des Frostkörpers hingegen kann dieser radial wachsen, da in axialer Richtung nahezu keine Temperaturdifferenz vorliegt. Die Frostkörperausbreitung in der Mitte des dreidimensionalen Modells entspricht in etwa der Frostkörperausbreitung für ein zweidimensionales Modell. Dieser Unterschied zwischen der Frostkörperausbreitung in der Mitte und am Ende des Frostkörpers ist in Bild 8.2 beispielhaft für eine Grundwasserströmung von $0,5\text{ m/d}$ nach 20 Tagen dargestellt. Die Temperaturplots zeigen, dass der Frostkörper in der Mitte weiter fortgeschritten ist als am Rand. Dies wird durch die Ausbreitung der -1°C -Isotherme (weiße Linie) verdeutlicht. Folglich sind die Aufgefrierzeiten bei zweidimensionalen Systemen geringer als bei dreidimensionalen Systemen, die den Randeinfluss berücksichtigen.

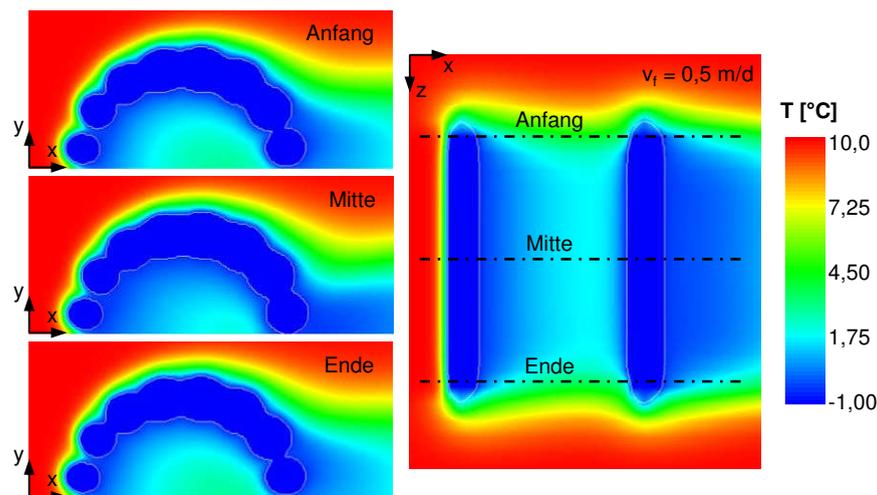


Bild 8.2 Frostkörperausbreitung in axialer Richtung nach 20 Tagen für $v_f = 0,5 \text{ m/d}$

Die Abweichungen zwischen dem Ergebnis der dreidimensionalen Simulationen mit dem „freerefcap“-Modul und dem Ergebnis der zweidimensionalen Simulationen mit dem „freezing“-Modul resultieren zum einen aus der geringeren Gefrierrohrtemperatur und zum anderen aus der Vernachlässigung der dreidimensionalen Frostkörperausbreitung. Beide Effekte sind zur Bewertung der Einsparpotentiale der verschiedenen Optimierungsansätze für die Aufgefrierphase und die Erhaltungsphase nicht erforderlich. Abschließend bleibt somit festzuhalten, dass im Rahmen dieses Kapitels nur zweidimensionale Modelle mit einer konstanten Gefrierrohrtemperatur von -35°C mit dem „freezing“-Modul simuliert werden, da die Rechenzeiten somit trotz großer Simulationszeiträume in einem annehmbaren Rahmen gehalten werden können.

8.2 Optimierung der Aufgefrierphase

In der Aufgefrierphase muss der statisch erforderliche Frostkörper möglichst schnell und mit geringem Energieaufwand aufgefroren werden. Bei der Optimierung der Aufgefrierphase sind die Aufgefrierzeit und die erforderliche Kühlleistung in Kombination zu betrachten. Die Optimierung ist dabei schwerpunktmäßig durch eine Verringerung der Aufgefrierzeit gekennzeichnet, die durch strömungsangepasste Gefrierrohranordnungen erreicht werden kann. Die energetischen Einsparpotentiale der verschiedenen Optimierungssysteme in der Aufgefrierphase werden durch einen Vergleich der jeweils erforderlichen Kühlenergie mit dem Basissystem bestimmt und abschließend bewertet.

Zunächst werden die mit dem „freezing“-Modul für das Basissystem ermittelten Ergebnisse der numerischen Simulationen des Modells der Querschlagvereisung (s. Bild 7.1) vorgestellt, die als Referenz für die weiteren Optimierungsvarianten dienen. Die Änderung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie in Abhängigkeit von der Grundwasserströmung ist in Bild 8.3 dargestellt. Die Ergebnisse der jeweiligen Fließgeschwindigkeit wurden dazu auf das Ergebnis des Basissystems ohne Grundwasserströmung normiert. Der überproportionale Anstieg der Aufgefrierzeit sowie der Kühlenergie mit steigender Grundwasserfließgeschwindigkeit ist deutlich zu erkennen.

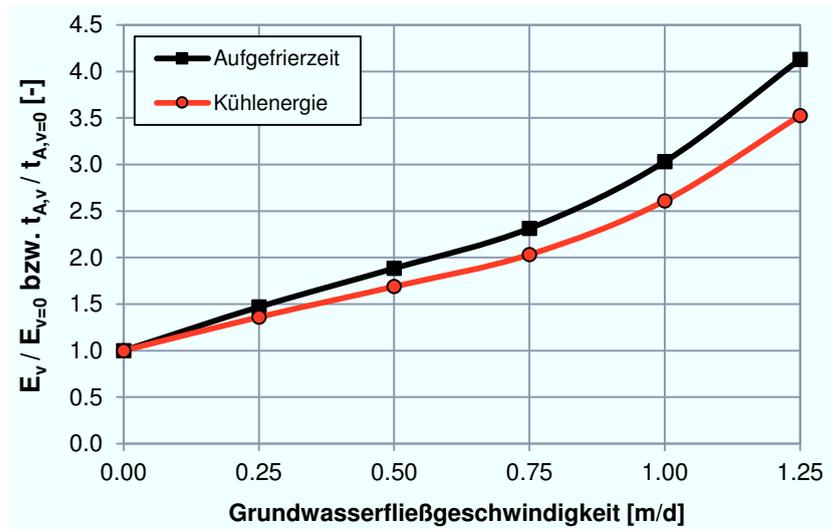


Bild 8.3 Aufgefrierzeit und Kühlenergie in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d

Um die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie durch strömungsangepasste Gefrierrohranordnungen effektiv optimieren zu können, müssen die kritischen Bereiche der Frostkörperentwicklung während der Aufgefrierphase bekannt sein. Dafür ist das Frostkörperwachstum in Bild 8.4 zu verschiedenen Zeitpunkten für eine Fließgeschwindigkeit von 0,75 m/d dargestellt. Es wird deutlich, dass der Frostkörper sich zunächst im Firstbereich schließt, da dort eine Abschirmung der in Strömungsrichtung angeordneten Gefrierrohre vorliegt. Danach findet der Frostkörperschluss auf der strömungsabgewandten Seite (Lee) statt. Auf der strömungszugewandten Seite (Luv) schließt der Frostkörper sich erst nach 30 Tagen. Die statisch erforderliche Frostkörperdicke wird schließlich nach ca. 51 Tagen erreicht.

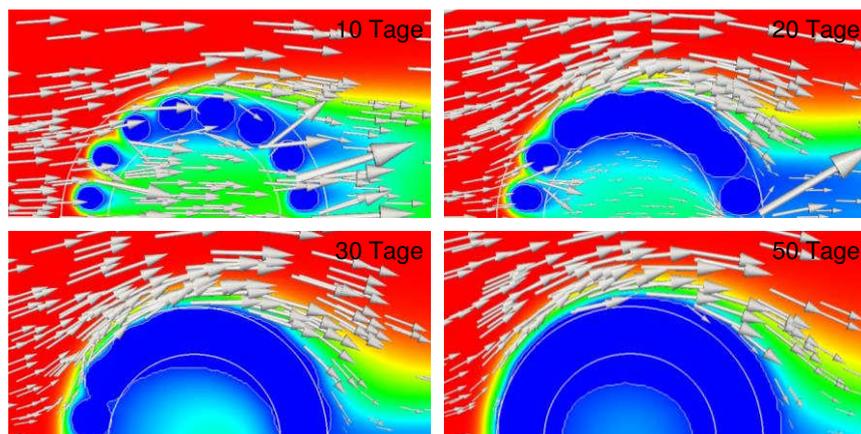


Bild 8.4 Aufgefrierphase des Basissystems für eine Grundwasserfließgeschwindigkeit von $v_f = 0,75$ m/d

Die kritischen Bereiche der Vereisung eines Querschlags liegen bis zum Schließen des Frostkörpers schwerpunktmäßig im Luv-Bereich. Der Firstbereich hingegen ist bis zum Schließen als unkritisch zu betrachten. Nachdem der gesamte Frostkörper geschlossen ist und

nur noch auf die erforderliche Stärke anwachsen muss, kann allein der Luv-Bereich als kritischer Bereich identifiziert werden. Der Firstbereich wird während des Anwachsens des Frostkörpers aufgrund der Umlenkung der Strömung auch wieder stärker beeinflusst. Der Lee-Bereich hingegen ist in dieser Phase als unkritisch anzusehen. Diese Zusammenhänge werden durch die in Bild 8.5 dargestellten Kühlleistungen der einzelnen Gefrierrohre während der Aufgefrierphase bestätigt. Die Kühlleistung eines Gefrierrohrs gibt dabei die bei einer konstanten Gefrierrohrtemperatur von -35°C abgegebene Energiemenge an. Die Gefrierrohre auf der Luv-Seite (GR 1 – 3) weisen die höchste Kühlleistung auf. Im Lee-Bereich (GR 7 – 8) ist die Kühlleistung lediglich zu Beginn der Vereisung erhöht, fällt aber nach dem Frostkörperschluss deutlich ab. Die Kühlleistung der Gefrierrohre im First (GR 4 - 6) ist während der gesamten Aufgefrierphase gering.

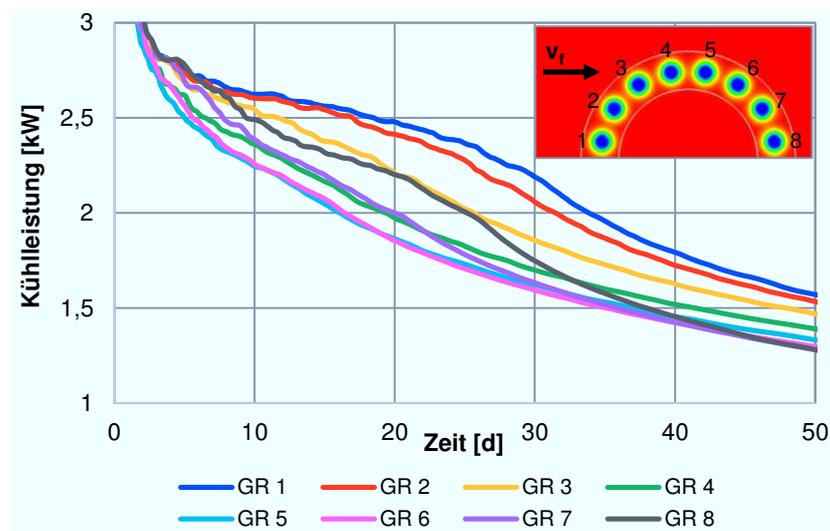


Bild 8.5 Kühlleistung der einzelnen Gefrierrohre in der Aufgefrierphase für $v_f = 0,75 \text{ m/d}$

In früheren Untersuchungen von Baier (2008) und Ziegler et al. (2010) wurden bereits unterschiedliche Ansätze zur Optimierung der Aufgefrierzeit für die Vereisung eines Querschlags sowie einer Baugrubenwand untersucht. Dabei wurden zum einen Systeme untersucht, bei denen die vorhandenen Gefrierrohre lediglich umgeordnet wurden. Zum anderen wurden Systeme simuliert, die durch die Anordnung zusätzlicher Gefrierrohre optimiert wurden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sowohl für die Vereisung eines Querschlags als auch einer Baugrubenwand die Anordnung zusätzlicher Gefrierrohre vor den kritischen Frostkörperbereichen, also im Anstrom, die effektivste Variante zur Verringerung der Aufgefrierzeit darstellt. Diese zusätzlichen Gefrierrohre bewirken eine Vorkühlung der auf dem Basisquerschnitt angeordneten, ursprünglichen Gefrierrohre. Auf Grundlage dieser früheren Forschungsergebnisse werden zur Optimierung der Aufgefrierphase im Rahmen dieser Arbeit nur verschiedene Systeme zur Vorkühlung hinsichtlich der Aufgefrierzeit und insbesondere der erforderlichen Kühlenergie untersucht.

Insgesamt werden vier Varianten bzw. Systeme der Vorkühlung untersucht, bei denen ein bis vier zusätzliche Gefrierrohre in unterschiedlichen Abständen zum Basisquerschnitt im Anstrom angeordnet werden. Diese Optimierungssysteme sind in Bild 8.6 dargestellt, wobei aufgrund der Symmetrie nur das halbe System dargestellt wird und damit maximal zwei zusätzliche

Gefrierrohre zu sehen sind. Für das Vorkühlungssystem mit einem zusätzlichen Gefrierrohr wird dieses auf der Symmetrieachse angeordnet. Bei zwei zusätzlichen Gefrierrohren werden diese auf der Höhe des ersten Gefrierrohrs im Basisquerschnitt platziert. Um eine Vorkühlung mit drei Gefrierrohren zu untersuchen, wird das System „Vorkühlung 1“ (VK 1) um zwei weitere Gefrierrohre jeweils auf der mittleren Höhe zwischen dem ersten und zweiten Gefrierrohr des Basisquerschnitts erweitert. Für das System mit vier Gefrierrohren wird dementsprechend das System VK 2 um zwei weitere Gefrierrohre auf Höhe des zweiten Gefrierrohrs im Basisquerschnitt ergänzt.

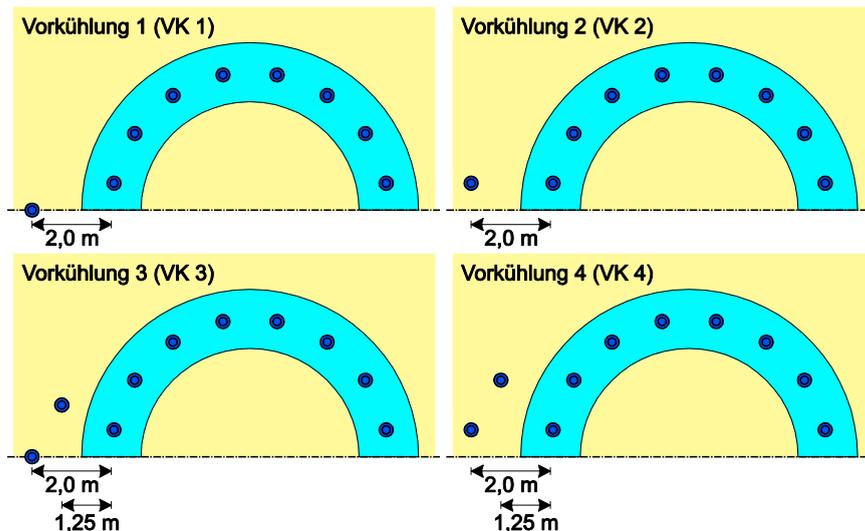


Bild 8.6 Übersicht der untersuchten Optimierungssysteme der Vorkühlung

Die Aufgefrierzeiten für die verschiedenen Optimierungssysteme in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit sind in Bild 8.7 normiert auf die Aufgefrierzeit des Basissystems ohne Grundwasserströmung dargestellt. Mit dieser Darstellung wird sowohl die Abhängigkeit von der Grundwasserströmung als auch die Veränderung infolge der Optimierungssysteme verdeutlicht. Für den Fall ohne Grundwasserströmung liegt keine Verringerung der Aufgefrierzeit vor, da es sich um strömungsangepasste Optimierungssysteme handelt, die sich nur partiell, nämlich auf der Luv-Seite, positiv auswirken. Aus Gründen der Vollständigkeit werden die Ergebnisse für die Vorkühlungssysteme für den Fall ohne Grundwasserströmung im Folgenden stets mit angegeben, haben aber keine Relevanz in Bezug auf die Optimierungen.

Die weiteren Ergebnisse zeigen, dass die Aufgefrierzeit mit Hilfe der Optimierungssysteme für jede Fließgeschwindigkeit verringert werden kann. Dabei wird die geringste Aufgefrierzeit stets mit dem System VK 4 erreicht, bei dem vier zusätzliche Gefrierrohre im Anstrom angeordnet werden. Außerdem wird deutlich, dass die Einsparungen der Aufgefrierzeit mit steigender Fließgeschwindigkeit zunehmen. Für eine Fließgeschwindigkeit von 0,5 m/d wird die Aufgefrierzeit für das System VK 4 um ca. 28 % verringert, für eine Fließgeschwindigkeit von 1,25 m/d sind es bereits 58 %. Generell lässt sich festhalten, dass die untersuchten Vorkühlungssysteme zu einer deutlichen Verringerung der Aufgefrierzeit führen. Außerdem wird die Zunahme der Aufgefrierzeit in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit erheblich reduziert.

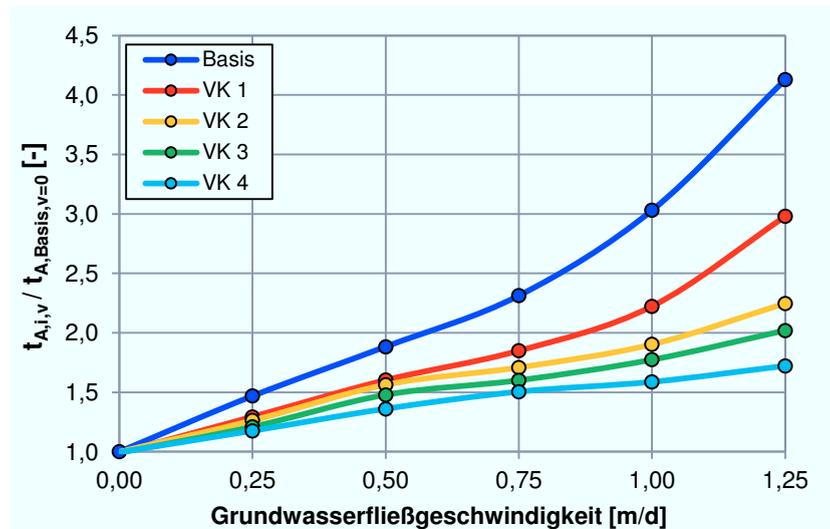


Bild 8.7 Aufgefrierzeit in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit und der Optimierungssysteme der Vorkühlung – normiert auf $v_f = 0$ m/d

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen haben gezeigt, dass die Aufgefrierzeit mit steigender Anzahl der zusätzlichen Gefrierrohre im Anstrom verringert wird. Dieser Zusammenhang lässt sich aber nicht auf die Kühlenergie übertragen (s. Bild 8.8). Für geringe Fließgeschwindigkeiten von z.B. 0,25 m/d ist für mehrere Vorkühlungssysteme eine Erhöhung der Kühlenergie im Vergleich zum Basissystem zu verzeichnen. Der Grund hierfür ist die lediglich geringe Reduktion der Aufgefrierzeit, wodurch die zusätzliche Kühlleistung der Gefrierrohre zur Vorkühlung nicht kompensiert werden kann. Daher ist es nicht möglich, ein für alle Fließgeschwindigkeiten einheitliches Optimierungssystem anzugeben, das stets die geringste Kühlenergie erzielt. Weiterhin wird deutlich, dass die möglichen prozentualen Einsparungen bei der Kühlenergie geringer ausfallen als bei der Aufgefrierzeit. Für eine Fließgeschwindigkeit von 1,25 m/d kann die Aufgefrierzeit mit dem System VK 4 um 58 %, die Kühlenergie aber nur um 40 % verringert werden.

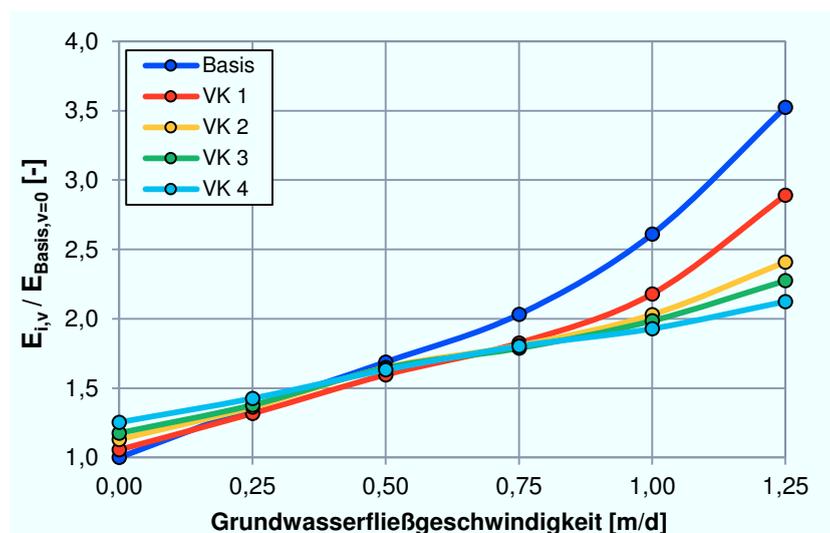


Bild 8.8 Kühlenergie in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit und der Optimierungssysteme der Vorkühlung – normiert auf $v_f = 0$ m/d

Abschließend sind die erforderliche Kühlenergie sowie die Aufgefrierzeit als Absolutwerte für die verschiedenen Optimierungssysteme in Bild 8.9 zusammengefasst. Die farbigen Balken geben die Kühlenergie an und die Punkte die dazugehörigen Aufgefrierzeiten. Es wird deutlich, dass die Einsparungen der Aufgefrierzeit mit der Anzahl der zusätzlich eingebrachten Gefrierrohre im Luv-Bereich korrelieren. Die geringste Aufgefrierzeit wird für die untersuchten Optimierungssysteme stets mit dem Vorkühlungssystem mit vier zusätzlichen Gefrierrohren erreicht. Für die Kühlenergie lässt sich kein einheitliches Optimierungssystem für alle Fließgeschwindigkeiten als effektivstes System identifizieren, da sich sowohl die Verringerung der Aufgefrierzeit als auch die zusätzliche Kühlleistung der Vorkühlungsrohre auf die Kühlenergie auswirken. Generell zeigen die Ergebnisse, dass aus rein energetischen Gesichtspunkten eine Optimierung mit zusätzlichen Gefrierrohren im Anstrom ab einer zu erwartenden Fließgeschwindigkeit von 0,5 m/d sinnvoll ist. Für eine abschließende Bewertung der Optimierungssysteme sind aber zusätzlich die Installationsmehrkosten im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu betrachten (s. Kapitel 8.4).

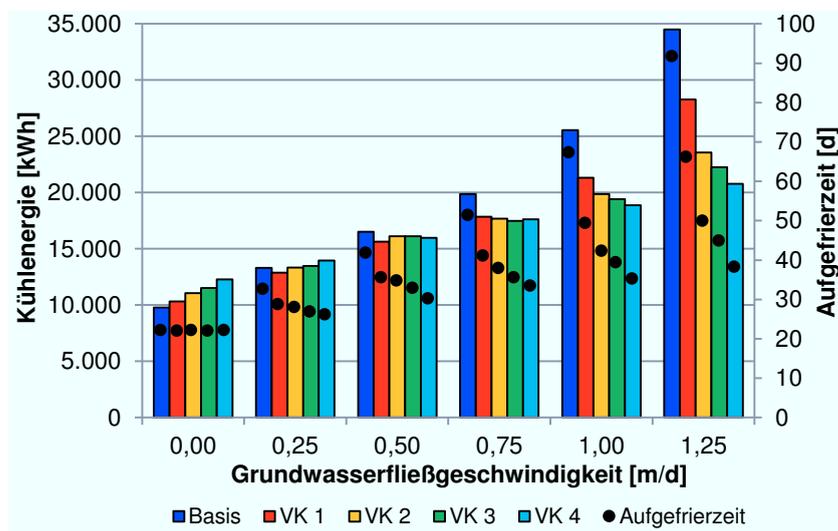


Bild 8.9 Aufgefrierzeit und Kühlenergie in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit und der Optimierungssysteme der Vorkühlung

Die Untersuchungen zur Optimierung der Aufgefrierphase haben gezeigt, dass mit Vorkühlungssystemen, die sich in früheren Untersuchungen als optimale strömungsangepasste Gefrierrohranordnung ergeben haben, deutliche Verringerungen der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie erreicht werden können. Für die Aufgefrierzeit lässt sich aus den Simulationsergebnissen der Grundsatz ableiten, dass eine größere Anzahl an Gefrierrohren zur Vorkühlung stets zu einer weiteren Verringerung der Aufgefrierzeit führt. Dieser Zusammenhang kann aber nicht auf die Kühlenergie übertragen werden, die sowohl von der Aufgefrierzeit als auch der zusätzlichen Kühlleistung der Gefrierrohre zur Vorkühlung bestimmt wird. Die energetisch effektivste Optimierungsvariante kann folglich nicht allgemein bestimmt oder über einen Grundsatz angegeben werden, sondern ist stets durch systemspezifische numerische Simulationen zu ermitteln.

8.3 Optimierung der Erhaltungsphase

Um Vereisungsmaßnahmen in ihrer Gesamtheit energetisch zu optimieren, muss neben der Aufgefrierphase unbedingt auch die Erhaltungsphase betrachtet werden, da diese einen erheblichen Anteil am Gesamtenergieverbrauch einer Vereisungsmaßnahme ausmacht. Das Hauptziel in der Erhaltungsphase ist die Bewahrung 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. Bei der Optimierung der Erhaltungsphase steht anders als bei der Aufgefrierphase allein die Kühlenergie im Vordergrund, da ein fest definierter Zeitraum betrachtet wird. Um die Kühlenergie unter Einhaltung der Ziele der Erhaltungsphase zu verringern, werden in der Praxis verschiedene Betriebsvarianten eingesetzt. Dabei wird zwischen der Variante mit einer Erhöhung der Vorlauftemperatur, die einer verminderten Kühlleistung entspricht, und der Variante mit einem intermittierenden Betrieb des Kühlaggregats unterschieden. Beiden Betriebsvarianten werden im Rahmen dieser Arbeit sowohl für das Basis- bzw. Referenzsystem als auch für die Optimierungssysteme der Vorkühlung aus der Aufgefrierphase (s. Kapitel 8.2) untersucht und weiter optimiert. Als Vergleichsgrundlage wird ein durchlaufender Betrieb des Kühlaggregats, ohne jegliche Anpassung, in der Erhaltungsphase angenommen. Auf dieser Basis werden die verschiedenen Betriebsvarianten abschließend hinsichtlich ihrer energetischen Einsparpotentiale bewertet.

8.3.1 Durchlaufender Betrieb ohne Anpassung

Der durchlaufende Betrieb des Kühlaggregats ohne jegliche Anpassung dient als Vergleichsgrundlage zur Bewertung der Energieeinsparpotentiale der verschiedenen Betriebsvarianten. Für die fiktive Vereisung eines Querschlags wird eine Erhaltungsphase von 5 Monaten gewählt, die einen realistischen Anhaltswert darstellt. In den numerischen Simulationen wird angenommen, dass die Erhaltungsphase direkt nach Beendigung der Aufgefrierphase beginnt. Folglich ergeben sich unterschiedliche Startzeitpunkte in Abhängigkeit von der vorliegenden Grundwasserfließgeschwindigkeit. In der Praxis finden während der Erhaltungsphase der Ausbruch des Querschnitts und die Erstellung des eigentlichen Bauwerks statt, wodurch sich zahlreiche weitere Einflüsse auf den Frostkörper ergeben. Diese zusätzlichen Einflüsse werden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet, da das primäre Ziel zunächst in der Bestimmung der energetischen Einsparpotentiale verschiedener Betriebsvarianten in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit liegt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die erforderliche Kühlleistung in der Erhaltungsphase für den durchlaufenden Betrieb ohne Anpassung ermittelt, indem die Temperatur der Gefrierrohre konstant bei -35°C gehalten wird. Die Überwachung des statisch erforderlichen Frostkörpers wird, wie in der Aufgefrierphase, über die Kontrolle der Frostkörpertemperaturen an definierten Sensorpunkten realisiert. Die Lage der insgesamt 34 Sensorpunkte ist für das Basissystem in Bild 8.10 dargestellt. Laut Definition gilt der Boden ab einer Temperatur von -1°C als gefroren. Um ein Auftauen des statisch erforderlichen Frostkörpers in der Erhaltungsphase zu verhindern,

wird eine Temperatur von $-1,5^{\circ}\text{C}$ am Rand des Frostkörpers gefordert und über die Sensorpunkte kontrolliert.

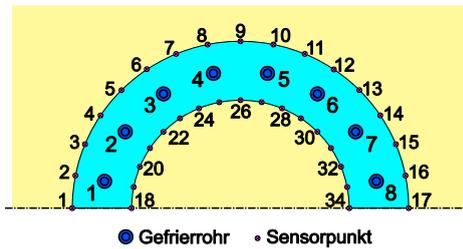


Bild 8.10 Basissystem des Querschlagmodells mit Gefrierrohren und Sensorpunkten

Die erforderliche Kühlenergie des Basissystems in der Erhaltungsphase ist in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit in Bild 8.11 normiert dargestellt. Zum Vergleich sind weiterhin die Verläufe der Kühlenergie in der Aufgefrierphase sowie der Aufgefrierzeit angegeben. Als Bezug für die Normierung wurde die Kühlenergie des Basissystems ohne Grundwasserströmung während der Aufgefrierphase gewählt. Es wird deutlich, dass die Kühlenergie in der Erhaltungsphase bei konstanter Gefrierrohrtemperatur nur geringfügig von der Grundwasserfließgeschwindigkeit beeinflusst wird. Dies führt dazu, dass der Anteil der Kühlenergie der Erhaltungsphase an der Gesamtkühlenergie für das System ohne Grundwasserströmung bei fast 75 % liegt. Dieser Anteil verringert sich mit steigender Grundwasserfließgeschwindigkeit und liegt für diese fiktive Querschlagvereisung bei einer Fließgeschwindigkeit von 1,25 m/d nur noch bei ca. 45 %.

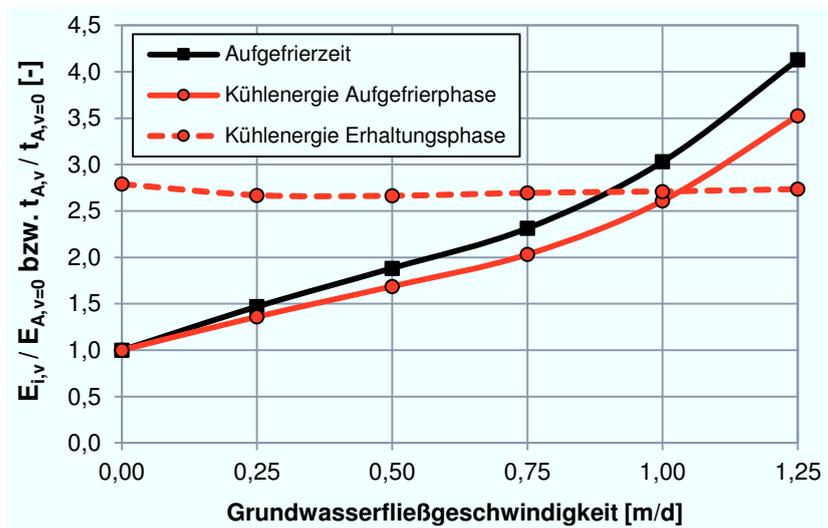


Bild 8.11 Kühlenergie der Erhaltungs- und Aufgefrierphase sowie Aufgefrierzeit in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d

Bei genauer Betrachtung des Verlaufs der Kühlenergie in der Erhaltungsphase wird deutlich, dass die Kühlenergie bei Vorliegen einer Grundwasserströmung für alle Fließgeschwindigkeiten sogar etwas geringer ist als die Kühlenergie für das Basissystem ohne Grundwasserströmung. Dieser Effekt erscheint zunächst nicht direkt plausibel, da der zusätzliche Wärmestrom infolge des eingetragenen Grundwassers in der Aufgefrierphase zu einer erhöhten Kühlenergie führt. Die

Verringerung der Kühlenergie in der Erhaltungsphase lässt sich aber mit Hilfe der Frostkörperausbreitung im Boden erklären. Dazu sind in Bild 8.12 zunächst die Frostkörper des Basissystems nach Beendigung der Aufgefrierphase, entsprechend dem Beginn der Erhaltungsphase, für alle Fließgeschwindigkeiten dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass der Beginn der Erhaltungsphase zu unterschiedlichen Zeitpunkten stattfindet, da die Aufgefrierzeit, die das Erreichen der statisch erforderlichen Frostkörperdicke angibt, mit steigender Grundwasserfließgeschwindigkeit zunimmt (s. Bild 8.3). Mit Hilfe der als weiße Konturen dargestellten -1°C -Isothermen wird der gefrorene Frostkörper vom ungefrorenen Boden abgegrenzt. Die Temperaturbilder machen deutlich, dass die Frostkörperausbreitung stark in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit schwankt. Der Frostkörper im Fall ohne Grundwasserströmung ist weitaus geringer als der Frostkörper für eine Strömung von 1,25 m/d.

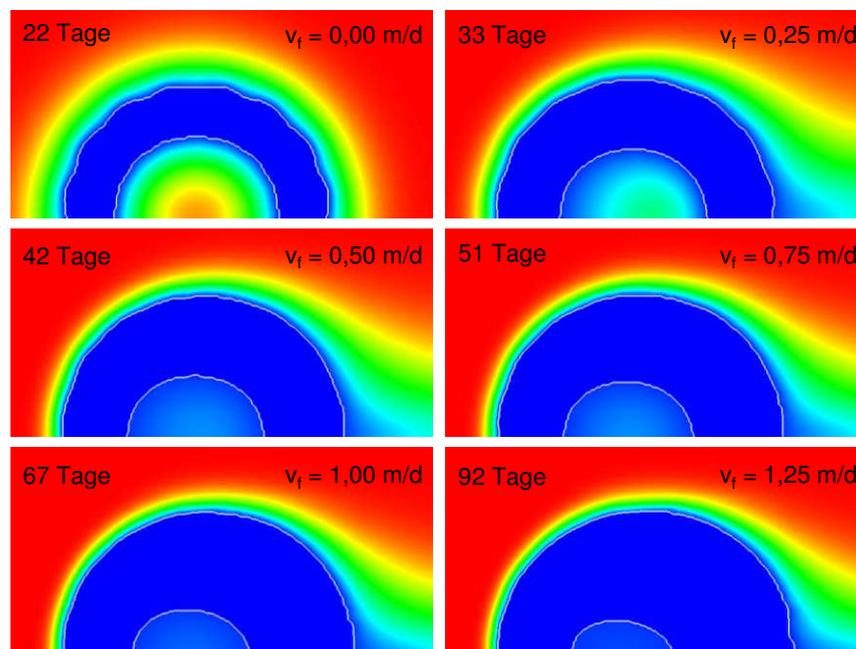


Bild 8.12 Frostkörperausbreitung des Basissystems zu Beginn der Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Um die Frostkörperausbreitung für die unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten im direkten Vergleich zueinander bewerten zu können, sind die -1°C -Isothermen in Bild 8.13 für alle Grundwasserfließgeschwindigkeiten sowohl zu Beginn als auch zum Ende der Erhaltungsphase dargestellt. Außerdem ist der zeitliche Verlauf der Kühlleistung während der Erhaltungsphase in Bild 8.14 für die verschiedenen Grundwasserfließgeschwindigkeiten dargestellt.

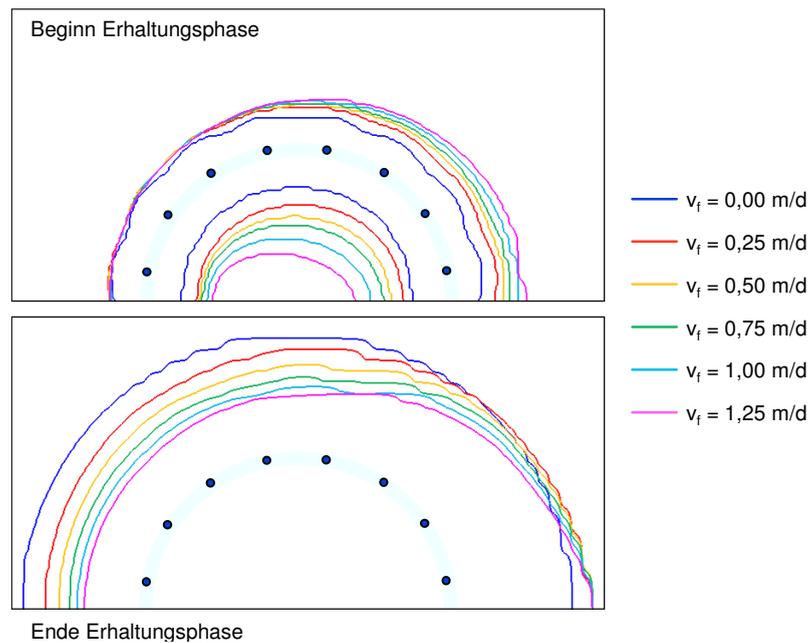


Bild 8.13 -1°C -Isotherme des Frostkörpers zu Beginn und zum Ende der Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Das Basissystem ohne Grundwasserströmung weist zu Beginn der Erhaltungsphase die geringste Frostkörperausbreitung auf, so dass die Temperaturen im umgebenden, ungefrorenen Boden höher sind als die der Systeme mit Grundwasserströmung. Aufgrund dieser höheren Temperaturen im umgebenden Boden und der daraus resultierenden größeren abzukühlenden Temperaturdifferenz ist die Kühlleistung des Systems ohne Grundwasserströmung zu Beginn der Erhaltungsphase deutlich größer als die der Systeme mit Grundwasserströmung. Zum Ende der Erhaltungsphase hingegen liegt im Fall ohne Grundwasserströmung aufgrund des stetigen, radialen Frostkörperwachstums während der Erhaltungsphase der größte Frostkörper vor. Die Kühlleistung ist dementsprechend geringer als die der Systeme mit Grundwasserströmung.

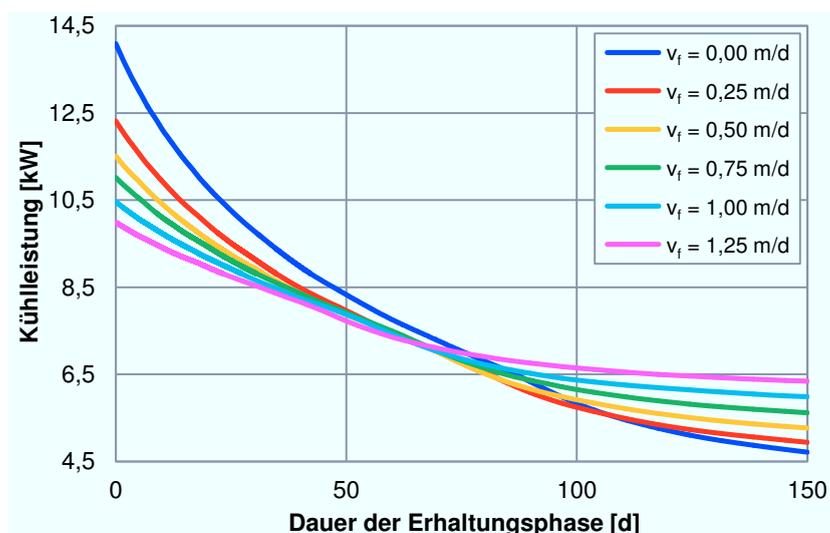


Bild 8.14 Zeitlicher Verlauf der Kühlleistung in der Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Demnach ergibt sich für das System ohne Grundwasserströmung die größte Kühlenergie, da diese als Integral der Kühlleistung über die Zeit gebildet wird und die Kühlleistung zu Beginn aufgrund des bis dahin geringen Frostkörperwachstums am größten ist.

Aufbauend auf der Kühlenergie des Basissystems in der Erhaltungsphase wird die Kühlenergie der vier Optimierungssysteme aus der Aufgefrierphase für den Fall eines durchlaufenden Betriebs des Kühlaggregats untersucht. Das primäre Ziel der zusätzlichen Gefrierrohre zur Vorkühlung liegt eigentlich in der Unterstützung des Gefrierprozesses in der Aufgefrierphase. Da für die abschließende Bewertung der Optimierungsansätze die Gesamtkühlenergie zu betrachten ist, werden die Vorkühlungssysteme auch in der Erhaltungsphase für alle Betriebsvarianten mit untersucht. Für die Erhaltungsphase ist in diesem Zusammenhang zu untersuchen, ob die zusätzlichen Gefrierrohre zur Vorkühlung aktiviert oder deaktiviert werden müssen, um die geringste erforderliche Kühlenergie zu erreichen. Die Ergebnisse der Kühlenergie für die vier Vorkühlungssysteme, sowohl mit aktiven als auch inaktiven Gefrierrohren zur Vorkühlung, sind in Bild 8.15 gegenübergestellt. Die Kühlenergie für aktive Vorkühlungsrohre ist als gestrichelte Linie gekennzeichnet, die Kühlenergie für inaktive Vorkühlungsrohre als durchgezogene Linie. Die Ergebnisse zeigen, dass die erforderliche Kühlenergie in der Erhaltungsphase geringer ist, wenn die Vorkühlungsrohre nach der Aufgefrierphase deaktiviert werden. Dies gilt für alle vier Optimierungssysteme. Die Ergebnisse für inaktive Vorkühlungsrohre in der Erhaltungsphase zeigen, wie das Basissystem, zunächst eine Abnahme der erforderlichen Kühlenergie mit steigender Fließgeschwindigkeit. Im Gegensatz zum Basissystem ergeben sich für große Fließgeschwindigkeiten aber für alle Optimierungssysteme größere Kühlenergien als für das jeweilige Vorkühlungssystem ohne Grundwasserströmung. Außerdem wird deutlich, dass alle Vorkühlungssysteme für große Fließgeschwindigkeiten mehr Kühlenergie benötigen als das Basissystem für die jeweilige Fließgeschwindigkeit. Dies ist wieder mit dem geringeren Frostkörperfortschritt der Optimierungssysteme zu Beginn der Erhaltungsphase zu begründen. Dadurch nehmen die zu kühlende Temperaturdifferenz und folglich auch die Kühlenergie zu.

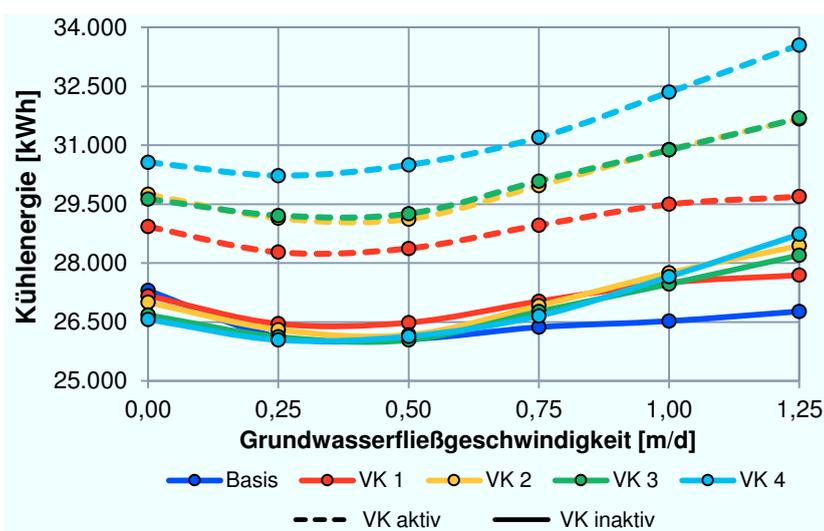


Bild 8.15 Einfluss der aktiven bzw. inaktiven Gefrierrohre zur Vorkühlung auf die Kühlenergie der Erhaltungsphase

Zusammenfassend zeigt Bild 8.16 die erforderliche Kühlenergie in der Erhaltungsphase für das Basissystem und die Optimierungssysteme mit inaktiven Vorkühlungsrohren in der Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit. Wie schon in der Aufgefrierphase kann auch in der Erhaltungsphase kein maßgebendes Optimierungssystem angegeben werden, mit dem für alle Grundwasserfließgeschwindigkeiten die geringste Kühlenergie erreicht wird. Aus diesem Grund werden alle Optimierungssysteme zur Vorkühlung für die beiden Betriebsvarianten in der Erhaltungsphase untersucht. Die Werte der Kühlenergie für einen durchlaufenden Betrieb des Kühlaggregats, ohne jegliche Anpassung, in Bild 8.16 dienen als Vergleichsgrundlage für die Beurteilung der energetischen Einsparpotentiale der im Folgenden untersuchten, verschiedenen Betriebsvarianten.

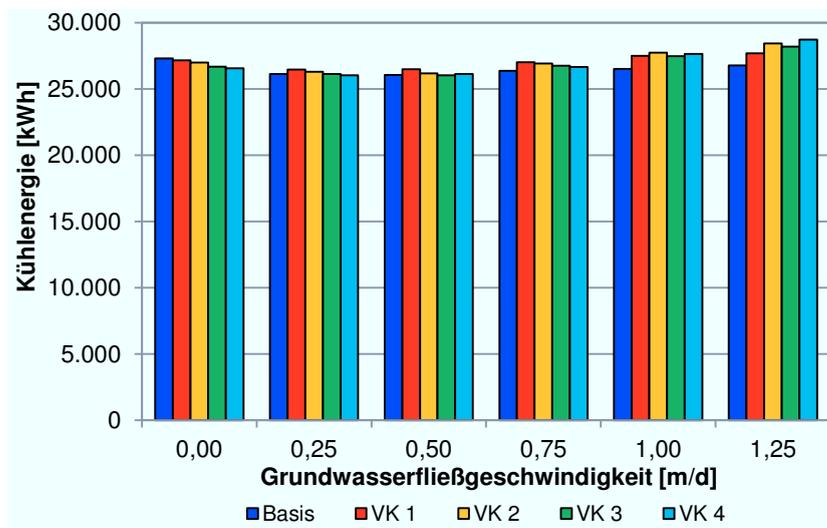


Bild 8.16 Kühlenergie der Erhaltungsphase für einen durchlaufenden Betrieb des Kühlaggregats in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit

8.3.2 Betrieb mit erhöhter Vorlauftemperatur

Eine mögliche Betriebsvariante in der Erhaltungsphase zur Verringerung der erforderlichen Kühlenergie stellt der Betrieb mit einer erhöhten Vorlauftemperatur dar. Eine erhöhte Vorlauftemperatur entspricht dabei einer verminderten Kühlleistung, so dass die Kühlenergie und das Frostkörperwachstum in der Erhaltungsphase verringert werden können. Da die Vorlauftemperatur im Kühlaggregat eingestellt wird, ist die Steuerung lokal kritischer Bereiche des Frostkörpers nicht möglich, da die Vorlauftemperatur global für alle Gefrierrohre gleich eingestellt wird. Folglich ist die Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase so zu wählen, dass der statisch erforderliche Frostkörper erhalten bleibt. Die erzielbare Verringerung der Kühlenergie hängt somit direkt mit der möglichen Erhöhung der Vorlauftemperatur zusammen. Im Folgenden wird zunächst die Bestimmung der maßgebenden Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase und die damit verbundene mögliche Verringerung der Kühlenergie für das Basissystem vorgestellt. Danach werden die möglichen Einsparungen durch einen Betrieb mit erhöhter Vorlauftemperatur für die verschiedenen Optimierungssysteme mit Gefrierrohren zur Vorkühlung erläutert.

In einem ersten Schritt ist die maximal mögliche Erhöhung der Vorlauftemperatur für das jeweilige System in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit zu bestimmen. Die Erhaltung des statisch erforderlichen Frostkörpers, die über die in Bild 8.10 dargestellten Sensorpunkte kontrolliert wird, ist das primäre Ziel in der Erhaltungsphase. Daher wird die Vorlauftemperatur in den numerischen Simulationen erst erhöht, sobald alle Sensorpunkte eine Temperatur von -3°C unterschritten haben. Die als zeitabhängige Dirichlet-Randbedingung definierte Gefrierrohrtemperatur wird zu diesem Zeitpunkt global um eine bestimmte Temperaturdifferenz erhöht. Zur Bestimmung der maßgebenden Temperaturerhöhung wird die Vorlauftemperatur in Schritten von $2,5^{\circ}\text{C}$ variiert. Die maximale Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase ergibt sich aus der Betrachtung des Temperaturverlaufs des jeweils kritischen Sensorpunkts, der die maximale Temperatur am Frostkörpertrand (T_{max}) von $-1,5^{\circ}\text{C}$ nicht überschreiten darf.

Die Ermittlung der maximalen Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase ist in Bild 8.17 beispielhaft für das Basissystem unter Einfluss einer Grundwasserströmung von $0,25\text{ m/d}$ dargestellt. Der in diesem Fall kritische Sensorpunkt 1 liegt auf der strömungszugewandten Seite (s. Bild 8.10). Weisen alle Sensorpunkte eine Temperatur von weniger als -3°C auf, beginnt die Erhaltungsphase und die Vorlauftemperatur der Gefrierrohre von -35°C in der Aufgefrierphase wird erhöht. In diesem Beispiel werden Erhöhungen der Vorlauftemperaturen auf -10°C , $-12,5^{\circ}\text{C}$ und -15°C untersucht. Die daraus ermittelten Temperaturverläufe des Sensorpunktes 1 sind im Vergleich mit dem Temperaturverlauf für eine konstante Vorlauftemperatur von -35°C dargestellt. Aufgrund der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Gefrierrohr und Boden steigt die Temperatur des Sensorpunktes direkt nach Beginn der Erhaltungsphase für alle drei Vorlauftemperaturen an. Die erhöhte Vorlauftemperatur von -10°C führt sogar zu einem Auftauen des Frostkörpers. Für eine Vorlauftemperatur von -15°C hingegen wächst der Frostkörper weiter an. Die Erhöhung der Vorlauftemperatur auf $-12,5^{\circ}\text{C}$ stellt in diesem Fall die maximale mögliche Vorlauftemperatur dar, bei der die maximale Grenztemperatur nicht überschritten wird und der Frostkörper nur geringfügig weiter anwächst.

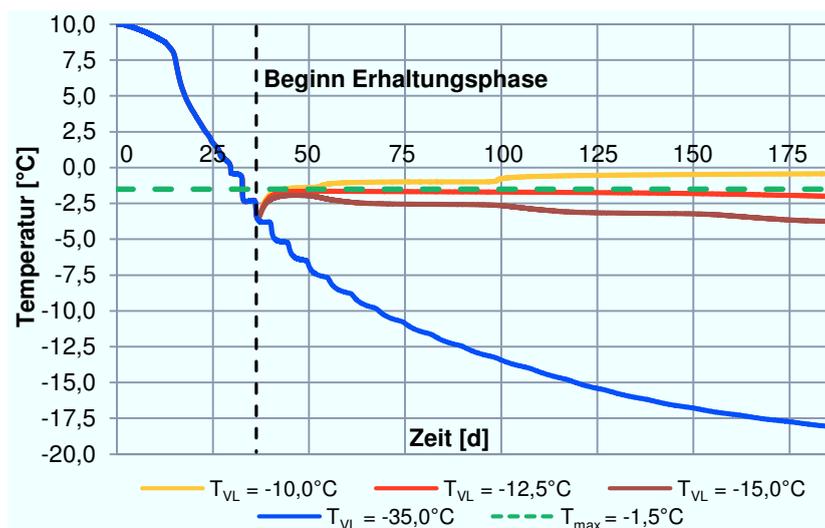


Bild 8.17 Temperaturverlauf des Sensorpunktes 1 (Luv) des Basissystems für unterschiedliche Vorlauftemperaturen in der Erhaltungsphase ($v_f = 0,25\text{ m/d}$)

Dieses Vorgehen zur Bestimmung der maximal möglichen Vorlauftemperatur wurde für alle im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Systeme angewendet. Um den statisch erforderlichen Frostkörper zu erhalten, muss aufgrund der gewählten Temperaturschrittweite von $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ oftmals ein geringes, weiteres Frostkörperwachstum hingenommen werden. Die maximal möglichen Vorlauftemperaturen in der Erhaltungsphase für das Basissystem sind in Tabelle 8.1 in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit angegeben. Es wird deutlich, dass die maximal möglichen Vorlauftemperaturen mit steigender Grundwasserfließgeschwindigkeit aufgrund des zusätzlich zu kompensierenden Wärmestroms durch das Grundwasser abnehmen.

Tabelle 8.1 Maximale Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase für das Basissystem in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit

		Basissystem					
Grundwasserfließgeschwindigkeit	[m/d]	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
Maximale Vorlauftemperatur	[$^{\circ}\text{C}$]	-12,5	-12,5	-17,5	-20,0	-22,5	-25,0

Die zeitlichen Verläufe der Kühlleistung für einen Betrieb mit einer erhöhten Vorlauftemperatur sowie einen Betrieb mit einer konstanten Vorlauftemperatur von -35°C in der Erhaltungsphase sind in Bild 8.18 exemplarisch für den Fall ohne Grundwasserströmung und für den Fall mit einer Grundwasserströmung von $1,25\text{ m/d}$ dargestellt. Zu Beginn der Erhaltungsphase fällt die Kühlleistung in beiden Fällen ab, da es durch die Erhöhung der Vorlauftemperatur zu einer schlagartigen Verringerung der Temperaturdifferenz und damit zu einer Umkehr des Wärmestroms in der numerischen Simulation kommt. Weiterhin wird deutlich, dass die wesentlich höhere maximale Vorlauftemperatur im Fall ohne Grundwasserströmung dazu führt, dass die Kühlleistung deutlich stärker verringert werden kann als für eine Strömung von $1,25\text{ m/d}$.

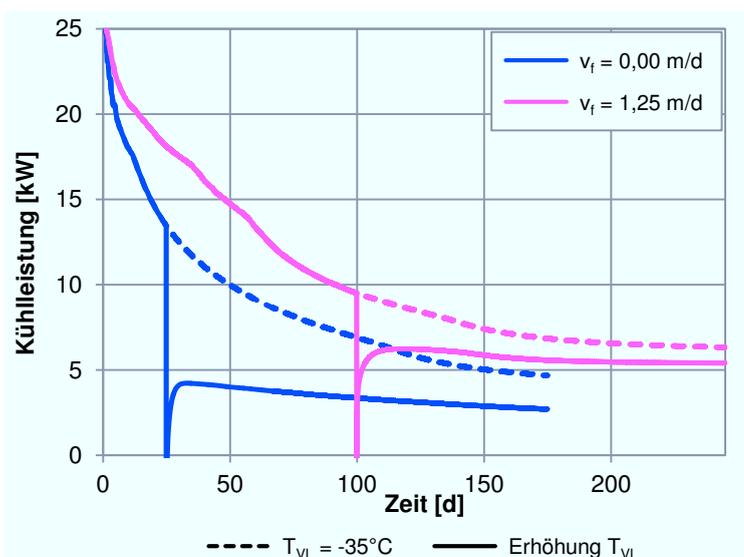


Bild 8.18 Kühlleistung des Basissystems für einen durchlaufenden Betrieb ($T_{VL} = -35^{\circ}\text{C}$) und einen Betrieb mit erhöhter Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase

Die Verringerung der Kühlleistung spiegelt sich folglich auch in der erforderlichen Kühlenergie wieder. Um die möglichen Einsparungen der Kühlenergie durch die Betriebsvariante mit einer erhöhten Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase zu bestimmen, wird diese Kühlenergie auf die Kühlenergie für einen durchlaufenden Betrieb (s. Kapitel 8.3.1) bezogen. Anders als in den vorherigen Kapiteln wird die Kühlenergie nicht mehr auf den Fall ohne Grundwasserströmung bezogen, sondern auf den jeweils vorliegenden Strömungszustand. Somit können die Einsparungen in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit direkt bestimmt werden. Für das Basissystem sind die Einsparungen der Kühlenergie in Bild 8.19 abschließend zusammengefasst. Die Abnahme der möglichen Einsparungen mit steigender Fließgeschwindigkeit aufgrund des größeren Wärmestroms wird bestätigt. Für eine Grundwasserströmung von 1,25 m/d liegen die Einsparungen nur noch bei 20 % der Kühlenergie eines durchlaufenden Betriebs in der Erhaltungsphase.

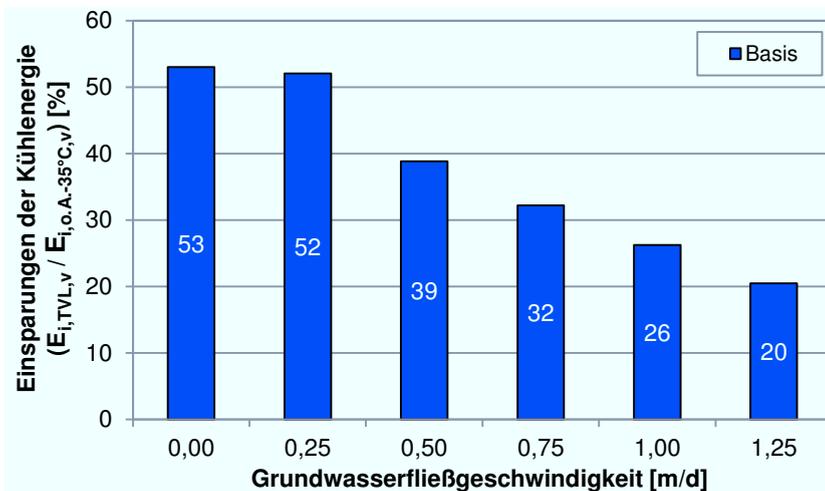


Bild 8.19 Einfluss der Grundwasserströmung auf die Einsparungen der Kühlenergie der Erhaltungsphase durch eine Erhöhung der Vorlauftemperatur (Basissystem)

In einem nächsten Schritt werden mögliche Einsparungen durch einen Betrieb mit erhöhter Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase für die Optimierungssysteme aus der Aufgefrierphase untersucht. Wie schon bei den Untersuchungen zum durchlaufenden Betrieb, ist dabei zwischen aktiven und inaktiven Gefrierrohren zur Vorkühlung in der Erhaltungsphase zu unterscheiden. Die Ergebnisse des durchlaufenden Betriebs haben gezeigt, dass die Kühlenergie für inaktive Vorkühlungsrohre geringer ist. Dies kann jedoch nicht direkt auf die Betriebsvariante der erhöhten Vorlauftemperatur übertragen werden, sondern erfordert eine separate Betrachtung. Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden die Varianten mit aktiven und inaktiven Vorkühlungsrohren in der Erhaltungsphase im Hinblick auf die möglichen Energieeinsparungen untersucht. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass aktive Vorkühlungsrohre in der Erhaltungsphase höhere maximale Vorlauftemperaturen ermöglichen. Trotz der geringeren erforderlichen Kühlenergie des einzelnen Gefrierrohrs liegt die Kühlenergie in Summe wegen der zusätzlichen Gefrierrohre zur Vorkühlung trotzdem meist über der Kühlenergie, die mit inaktiven Vorkühlungsrohren und einer entsprechend geringeren maximalen Vorlauftemperatur erforderlich wird. Lediglich in zwei Fällen konnten weitere Einsparungen der Kühlenergie der Erhaltungsphase von maximal

2 % ermittelt werden. Aufgrund dieses geringen Einflusses werden im Folgenden nur die Ergebnisse für inaktive Vorkühlungsrohre in der Erhaltungsphase vorgestellt. Die Optimierungssysteme mit inaktiven Vorkühlungsrohren unterscheiden sich während der Erhaltungsphase nur durch die Temperaturverteilung im Boden zu Beginn der Erhaltungsphase vom Basissystem. Zur Verdeutlichung dieses Unterschieds ist die Frostkörperausbreitung im Boden zu Beginn der Erhaltungsphase beispielhaft für das Basissystem und das Optimierungssystem VK 3 für eine Grundwasserfließgeschwindigkeit von 1,00 m/d in Bild 8.20 gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass sich durch die zusätzlichen Vorkühlungsrohre ein großer Frostkörper im Anstrombereich entwickelt hat. Dieser Bereich wird in der Erhaltungsphase aufgrund der inaktiven Vorkühlungsrohre zwar nicht mehr weiter gekühlt, bewirkt aber eine Umlenkung der Strömung bis er aufgetaut ist. Folglich verschieben sich die kritischen Bereiche und ermöglichen in einigen Fällen eine weitere Erhöhung der maximalen Vorlauftemperatur im Vergleich zum Basissystem.

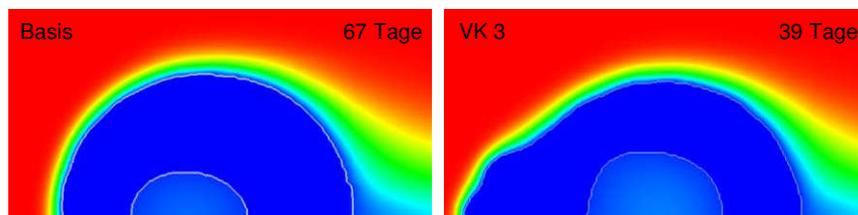


Bild 8.20 Frostkörperausbreitung zu Beginn der Erhaltungsphase für das Basissystem und das Optimierungssystem VK 3 für $v_f = 1,00$ m/d

Die maximal möglichen Vorlauftemperaturen für das Basissystem sowie die verschiedenen Optimierungssysteme sind in Tabelle 8.2 zusammengefasst. Für größere Fließgeschwindigkeiten können die maximalen Vorlauftemperaturen für einige Optimierungssysteme im Vergleich zum Basissystem weiter reduziert werden. Der Grund hierfür liegt in der beschriebenen Verschiebung der kritischen Bereiche, die für die Optimierungssysteme, aufgrund der Umlenkung der Strömung durch den ausgedehnten Frostkörper im Luv-Bereich, weiter in Richtung First rücken.

Tabelle 8.2 Maximale Vorlauftemperatur in der Erhaltungsphase für das Basissystem sowie die Optimierungssysteme in Abhängigkeit der Grundwasserströmung

Grundwasserfließgeschwindigkeit [m/d]	Maximale Vorlauftemperatur [°C]				
	Basis	VK 1	VK 2	VK 3	VK 4
0,00	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5
0,25	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5
0,50	-17,5	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0
0,75	-20,0	-20,0	-17,5	-17,5	-17,5
1,00	-22,5	-22,5	-22,5	-20,0	-20,0
1,25	-25,0	-25,0	-25,0	-25,0	-25,0

Die möglichen Einsparungen der Kühlenergie durch den Betrieb mit einer erhöhten Vorlauf-temperatur bezogen auf einen durchlaufenden Betrieb ohne Anpassung sind in Bild 8.21 für das Basissystem und die Optimierungssysteme in Abhängigkeit der Grundwasserfließ-geschwindigkeit dargestellt. Dabei sind die Ergebnisse des jeweiligen Systems auf die Kühl-energie eben dieses Systems für einen durchlaufenden Betrieb bezogen worden. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass diese Darstellung keine Ermittlung der effektivsten Optimierungs-variante für die jeweilige Fließgeschwindigkeit ermöglicht, da die Bezugsgrundlage nicht identisch ist. Trotzdem lässt die Darstellung in Bild 8.21 relative Aussagen zu den erzielbaren Einsparungen der Optimierungssysteme zu. Es wird deutlich, dass die Einsparungen für alle Systeme ohne Grundwasserströmung am größten ausfallen und dann mit steigender Fließgeschwindigkeit stetig abnehmen. Ob ein Optimierungssystem größere Einsparungen der Kühlenergie erreicht als das Basissystem, hängt maßgeblich davon ab, ob die maximale Vorlauf-temperatur für das jeweilige Optimierungssystem im Vergleich zum Basissystem weiter erhöht werden kann (s. Tabelle 8.2). Mit den Optimierungssystemen VK 3 und VK 4 können für eine Fließgeschwindigkeit von 1,0 m/d größere Einsparungen als für das Basissystem erreicht werden, da die maximale Vorlauf-temperatur auf -20°C erhöht werden kann. Für eine Fließgeschwindigkeit von 1,25 m/d hingegen sind die Einsparungen der Optimierungssysteme geringer als die des Basissystems. Dies wird zum einen durch die für alle Systeme gleiche maximale Vorlauf-temperatur und zum anderen durch den größeren Wärmestrom begründet, der das Frostkörperwachstum in der Aufgefrier- und der Erhaltungsphase beeinflusst.

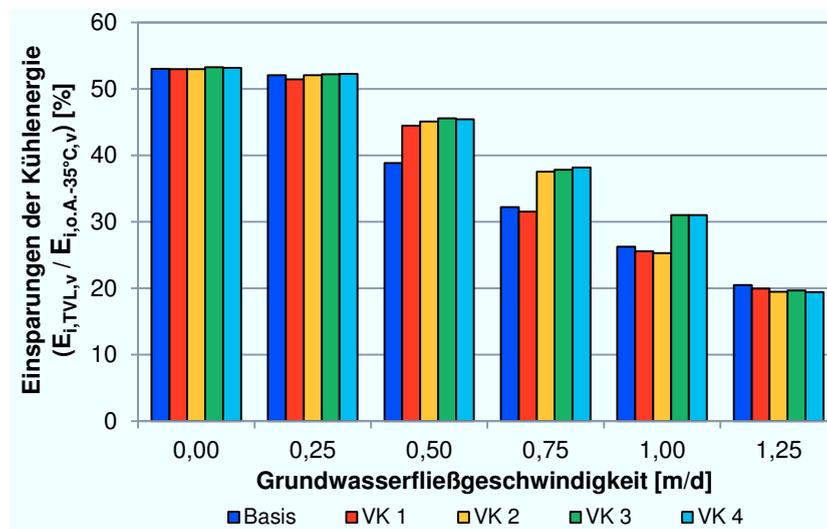


Bild 8.21 Einsparungen der Kühlenergie der Erhaltungsphase durch eine Erhöhung der Vorlauf-temperatur in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Für die Betriebsvariante mit erhöhter Vorlauf-temperatur bleibt abschließend festzuhalten, dass die maximal möglichen Vorlauf-temperaturen mit steigender Fließgeschwindigkeit aufgrund des zusätzlichen Wärmestroms deutlich abnehmen. Dementsprechend nehmen die Einsparungen der Kühlenergie ebenfalls mit steigender Fließgeschwindigkeit ab. Letztlich können aber etwa 20 % ($v_f = 1,25$ m/d) bis 53 % ($v_f = 0,00$ m/d) der in der Erhaltungsphase erforderlichen Kühlenergie durch eine globale Anpassung der Vorlauf-temperatur im Kühlaggregat eingespart werden.

8.3.3 Intermittierender Betrieb

Eine in der Praxis oftmals angewandte Betriebsvariante in der Erhaltungsphase stellt der intermittierende Betrieb dar, bei dem das gesamte Kühlaggregat oder vorab definierte Gefrierrohrgruppen zeit- oder temperaturgesteuert aktiviert bzw. deaktiviert werden können. Dieses zeitweise Abschalten des Kühlaggregats oder einzelner Gefrierrohrgruppen führt nicht nur zu einer Verringerung der erforderlichen Kühlenergie, sondern vermindert auch das weitere Frostkörperwachstum. Durch die individuelle Definition von Gefrierrohrgruppen ermöglicht der intermittierende Betrieb außerdem eine Anpassung an kritische Bereiche des Frostkörpers.

Die in Kapitel 5.4 beschriebenen Anpassungen des Programms SHEMAT-Suite und beider numerischer Lösungsmodelle ermöglichen die Simulation eines sowohl zeit- als auch temperaturgesteuerten intermittierenden Betriebs. In Voruntersuchungen (u.a. Koppmann 2013) konnte gezeigt werden, dass die erzielbaren Einsparungen der Kühlenergie für einen temperaturgesteuerten intermittierenden Betrieb größer ausfallen, da das An- und Ausschalten der Gefrierrohre variabel über die Temperatur und nicht starr über die Zeit gesteuert wird. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit nur die Auswirkung des temperaturgesteuerten intermittierenden Betriebs auf die erforderliche Kühlenergie in der Erhaltungsphase bestimmt. Die Simulation des temperaturgesteuerten intermittierenden Betriebs erfordert dabei die Definition zusätzlicher Eingangsparameter in SHEMAT-Suite (s. Anlage A). Zur Überwachung des Frostkörperwachstums müssen die maximale und minimale Grenztemperatur definiert werden, die an ebenfalls zu definierenden Sensorpunkten kontrolliert werden. Weiterhin sind die Anzahl der Rohrgruppen und die Zuordnung der Gefrierrohre zu den jeweiligen Rohrgruppen zu definieren. Außerdem müssen die bereits definierten Sensorpunkte den Rohrgruppen zugeordnet werden, um letztlich die Aktivierung bzw. Deaktivierung der Rohrgruppen steuern zu können. Im Folgenden werden zunächst die maßgebenden Grenztemperaturen sowie die maßgebende Definition der Rohrgruppen vorgestellt, mit der für das Basissystem die geringste Kühlenergie erforderlich wird. Im Anschluss wird auf die erzielbaren Einsparungen der Kühlenergie durch einen intermittierenden Betrieb für die verschiedenen Optimierungssysteme mit Gefrierrohren zur Vorkühlung eingegangen.

Für das Basissystem sind zunächst die maßgebende minimale sowie die maßgebende maximale Grenztemperatur zu bestimmen. Die maximale Grenztemperatur steuert dabei die Aktivierung der Gefrierrohre. Wird diese überschritten, droht der Frostkörper die statisch erforderliche Frostkörperdicke zu unterschreiten. Aufgrund der Definition, dass Boden ab einer Temperatur von -1°C als gefroren gilt, wird die maximale Grenztemperatur nicht variiert, sondern, wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln, auf $-1,5^{\circ}\text{C}$ festgesetzt. Die minimale Grenztemperatur hingegen steuert die Deaktivierung der Gefrierrohre und begrenzt damit das weitere, über die statisch erforderliche Frostkörperdicke hinausgehende Frostkörperwachstum. Die minimale Grenztemperatur wird in einem Bereich von -3°C bis -6°C variiert, um die Auswirkung auf die erforderliche Kühlenergie in der Erhaltungsphase zu bestimmen. Dabei wird für alle Variationen der minimalen Grenztemperatur stets eine Zuordnung aller Gefrierrohre zu einer Rohrgruppe

zugrunde gelegt, um zunächst ausschließlich den Einfluss der minimalen Grenztemperatur auf die Kühlenergie zu erfassen.

Die Auswirkungen des intermittierenden Betriebs und der zeitweisen Aktivierung bzw. Deaktivierung der Gefrierrohre auf den Temperaturverlauf des kritischen Sensorpunktes 1 des Basissystems, der auf der strömungszugewandten Seite liegt (s. Bild 8.10), ist in Bild 8.22 dargestellt. Dabei sind beispielhaft nur die Ergebnisse der minimalen Grenztemperaturen von -3°C und -6°C für das Basissystem unter Einfluss einer Grundwasserströmung von $0,25\text{ m/d}$ abgebildet. Bei einer minimalen Grenztemperatur von -3°C kann die erste Deaktivierung der Gefrierrohre deutlich früher erfolgen als bei einer minimalen Grenztemperatur von -6°C . Außerdem sind die für den intermittierenden Betrieb typischen Zyklen, die sich auf den Temperaturverlauf übertragen lassen, aufgrund der größeren Temperaturdifferenz für geringere minimale Grenztemperaturen deutlich länger. Bei einer höheren minimalen Grenztemperatur werden die Gefrierrohre deutlich häufiger an- bzw. ausgeschaltet und die Zyklen sind entsprechend kürzer.

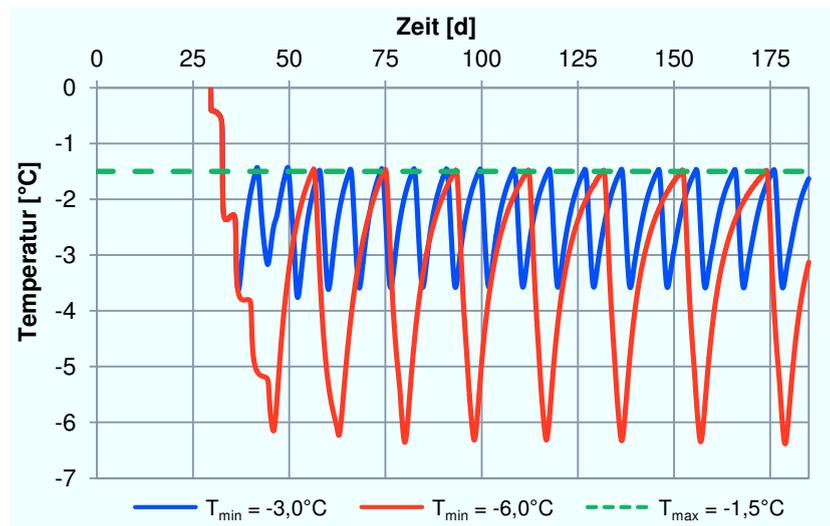


Bild 8.22 Temperaturverlauf des Sensorpunktes 1 des Basissystems für verschiedene minimale Grenztemperaturen des intermittierenden Betriebs ($v_f = 0,25\text{ m/d}$)

Die Darstellung zeigt, dass die maximale Grenztemperatur im Frostkörper, wie zur Einhaltung der statischen Frostkörperdicke gefordert, nicht überschritten wird. Bei Erreichen der maximalen Grenztemperatur werden die Gefrierrohre wieder aktiviert, so dass die Temperatur am kritischen Sensorpunkt fällt. Die Deaktivierung der Gefrierrohre bei Erreichen der jeweiligen minimalen Grenztemperatur funktioniert ebenfalls, wobei die Temperaturen trotz der deaktivierten Gefrierrohre unter die minimale Grenztemperatur fallen. Der Grund hierfür ist die Temperatur im Gefrierrohr, die auch nach der Deaktivierung zunächst geringer ist als die Temperatur im umgebenden Frostkörper. Diese führt zu einer weiteren geringfügigen Abkühlung des Frostkörpers, die an dem betrachteten Sensorpunkt registriert wird. Mit zunehmender Fließgeschwindigkeit des Grundwassers verringert sich dieser Nachkühleffekt aufgrund des größeren konvektiven Wärmeeintrags, der die Erwärmung des Frostkörpers begünstigt.

Der Einfluss der minimalen Grenztemperaturen und der damit verbundenen unterschiedlich langen Betriebs- und Haltephasen auf die Kühlenergie der Erhaltungsphase wird in Bild 8.23 deutlich. Dort sind die Einsparungen der Kühlenergie bezogen auf einen durchlaufenden Betrieb in der Erhaltungsphase in Abhängigkeit von der Grundwasserfließgeschwindigkeit und der minimalen Grenztemperatur dargestellt. Es wird deutlich, dass mit einer minimalen Grenztemperatur von -3°C für alle Fließgeschwindigkeiten die größten Einsparungen der Kühlenergie erzielt werden können. An dieser Stelle ist es wichtig zu erwähnen, dass die minimale Grenztemperatur allein nicht aussagekräftig ist, sondern stets die Temperaturdifferenz zwischen minimaler und maximaler Grenztemperatur betrachtet werden muss. Die größten Einsparungen der Kühlenergie können demzufolge für diese fiktive Querschlagvereisung durch die Kombination einer minimalen Grenztemperatur von -3°C und einer maximalen Grenztemperatur von $-1,5^{\circ}\text{C}$ erreicht werden.

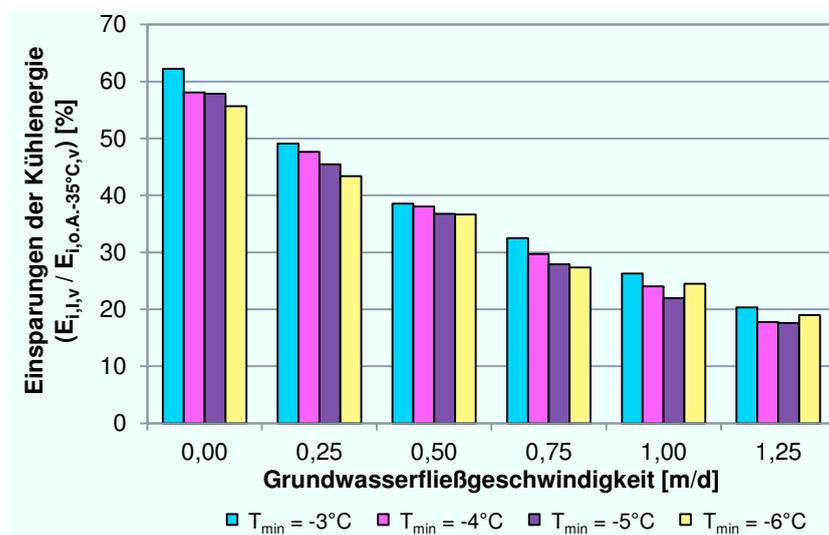


Bild 8.23 Einfluss der minimalen Grenztemperatur auf die Einsparungen der Kühlenergie der Erhaltungsphase für das Basissystem in Abhängigkeit der Strömung

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen haben gezeigt, dass mit einer geringen Temperaturdifferenz zwischen der minimalen und der maximalen Grenztemperatur, von in diesem Fall 1,5 K, aufgrund kurzer Betriebs- und Haltephasen die größten Einsparungen der Kühlenergie realisiert werden können. Aus diesem Grund werden für die folgenden Untersuchungen des intermittierenden Betriebs, sowohl für das Basissystem als auch für die Optimierungssysteme, Grenztemperaturen von maximal $-1,5^{\circ}\text{C}$ und minimal $-3,0^{\circ}\text{C}$ angesetzt.

Aufbauend auf der Variation der minimalen Grenztemperatur für lediglich eine Rohrgruppe, der alle Gefrierrohre zugeordnet sind, wird im Weiteren sowohl die Anzahl der Rohrgruppen als auch die jeweilige Zuordnung der Gefrierrohre zu den Rohrgruppen für das Basissystem variiert. Um das Ziel einer möglichst geringen, erforderlichen Kühlenergie in der Erhaltungsphase zu erreichen, sind bei der Wahl der Rohrgruppen und der Zuordnung der Gefrierrohre die kritischen Bereiche des Frostkörpers in der Erhaltungsphase zu beachten. Zur Identifizierung der kritischen Bereiche sind in Bild 8.24 die Kühlleistungen der einzelnen Gefrierrohre in der Erhaltungsphase

aufgetragen. Der kritische Bereich in der Erhaltungsphase liegt auf der strömungszugewandten Seite des Frostkörpers, wodurch die Gefrierrohre (GR 1 – 3) die größte Kühlleistung aufweisen. Die Kühlleistung nimmt über den Firstbereich und zur strömungsabgewandten Seite ab. Die geringste Kühlleistung muss durch das Gefrierrohr 8 aufgebracht werden, da dieses im Strömungsschatten liegt.

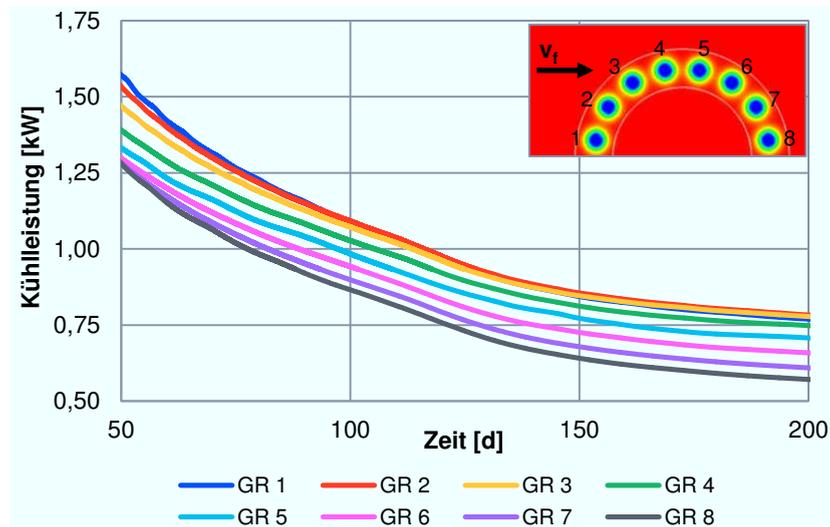


Bild 8.24 Kühlleistung der einzelnen Gefrierrohre in der Erhaltungsphase für $v_f = 0,75$ m/d

Auf der Grundlage der Kühlleistung der einzelnen Gefrierrohre werden neben der Zuordnung aller Gefrierrohre zu einer Rohrgruppe drei weitere Definitionen und Zuordnungen von Rohrgruppen untersucht, mit denen eine individuelle Anpassung an die kritischen Bereiche realisiert werden soll. Bild 8.25 zeigt eine Übersicht aller untersuchten Varianten der Rohrgruppen.

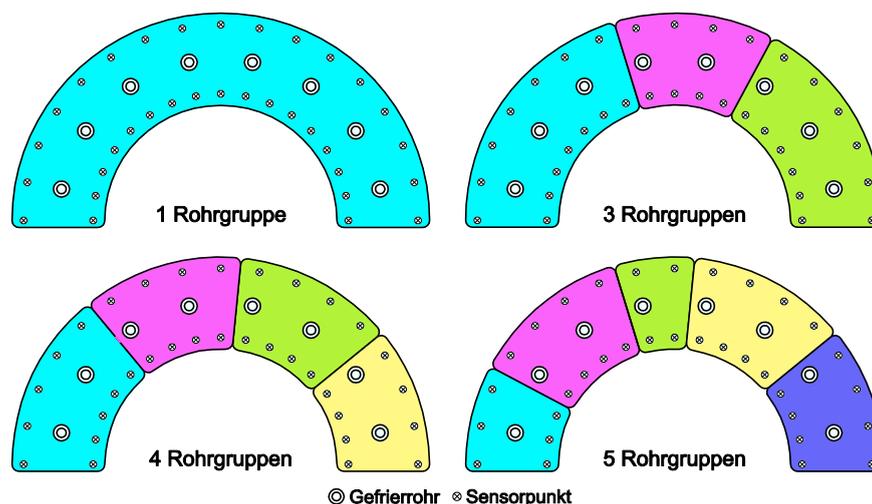


Bild 8.25 Varianten der Rohrgruppen – Zuordnung der Gefrierrohre und Sensorpunkte

Zunächst wird eine Unterteilung in drei Rohrgruppen vorgenommen, bei der die drei Gefrierrohre im Anstrom, die beiden Gefrierrohre im First und die Gefrierrohre im Abstrom jeweils einer Rohrgruppe zugeordnet sind. Außerdem wird eine Unterteilung in vier Rohrgruppen

gewählt, bei der die Zuordnung der Gefrierrohre im Firstbereich zu einer Rohrgruppe, im Gegensatz zu der Variante mit drei Rohrgruppen, entfällt. Stattdessen werden jeweils zwei Rohrgruppen im An- und Abstrom angeordnet. Abschließend werden die Gefrierrohre fünf Rohrgruppen zugeordnet, um zu bestimmen, ob die Einsparungen der Kühlenergie durch eine weitere Unterteilung überhaupt noch erhöht werden können. Dabei werden die ersten vier Gefrierrohre auf drei Rohrgruppen aufgeteilt, um eine möglichst individuelle Steuerung dieser Gefrierrohre zu erzielen, die sich im kritischen Anstrombereich befinden.

Die Rohrgruppenaufteilung der beiden Varianten mit drei und vier Rohrgruppen ist im Gegensatz zur Variante mit fünf Rohrgruppen annähernd symmetrisch. Dadurch haben diese beiden Varianten den Vorteil, dass sie auch in Fällen eingesetzt werden können, in denen mit einer Umkehr der Strömungsverhältnisse zu rechnen ist (z.B. in der Nähe von Flüssen).

Die möglichen Einsparungen der Kühlenergie in der Erhaltungsphase mit den verschiedenen Rohrgruppen sind in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit in Bild 8.26 bezogen auf einen durchlaufenden Betrieb des Kühlaggregats dargestellt. Es wird deutlich, dass durch die Definition mehrerer Rohrgruppen für alle Fließgeschwindigkeiten höhere Einsparungen erzielt werden können als mit nur einer Rohrgruppe. Der Vorteil der individuellen Anpassung der Rohrgruppen an die kritischen Bereiche wird dabei insbesondere mit steigender Fließgeschwindigkeit deutlich. Für eine Fließgeschwindigkeit von 1,25 m/d können mit der Variante mit fünf Rohrgruppen bis zu 38 % der Kühlenergie eingespart werden, mit einer Rohrgruppe sind es nur 20 %.

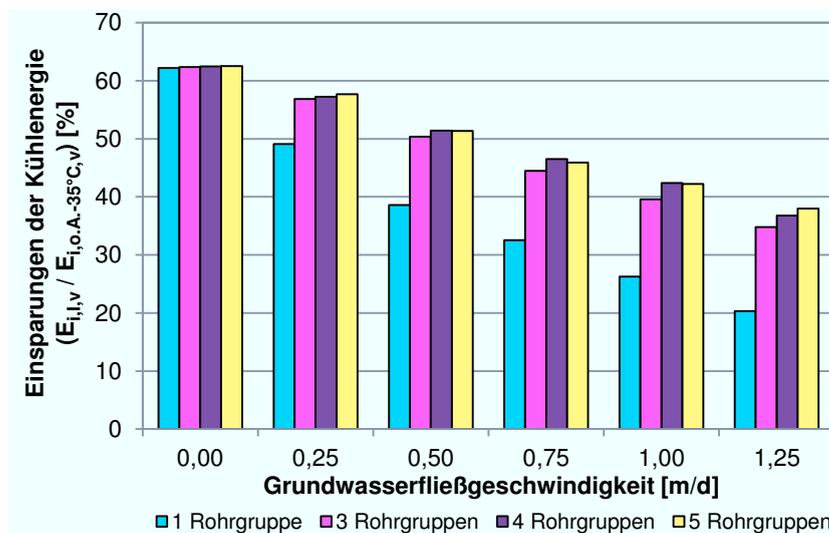


Bild 8.26 Einfluss der Variation der Rohrgruppen auf die Einsparungen der Kühlenergie der Erhaltungsphase für das Basissystem in Abhängigkeit der Strömung

Die Ergebnisse machen aber auch deutlich, dass die Angabe einer für alle Fließgeschwindigkeiten einheitlichen, maßgebenden Variante der Rohrgruppen nicht möglich ist, da das Strömungsfeld sich mit steigender Strömungsgeschwindigkeit verändert. Für die untersuchte fiktive Querschlagvereisung wird die Variante mit vier Rohrgruppen zwar für eine Strömung von 0,75 m/d und 1,0 m/d maßgebend, für eine Strömung von 1,25 m/d hingegen die Variante mit fünf Rohrgruppen. In der Praxis können die Rohrgruppen nicht nur auf Basis der geringsten

erforderlichen Kühlenergie gewählt werden, sondern es sind weitere Randbedingungen zu beachten. Dazu zählen zum einen die bereits beschriebene, mögliche Strömungsumkehr und zum anderen die technische und logistische Umsetzung der Zusammenfassung verschiedener Gefrierrohre zu Rohrgruppen auf der Baustelle. Diese weiteren Randbedingungen können im Rahmen dieser Arbeit nicht beachtet werden, so dass die maßgebende Rohrgruppenvariante hier lediglich auf Basis der geringsten Kühlenergie bestimmt wird.

Aufbauend auf den Ergebnissen für das Basissystem werden in einem nächsten Schritt die möglichen Einsparungen der Kühlenergie durch einen intermittierenden Betrieb in der Erhaltungsphase für die Optimierungssysteme mit einer Vorkühlung aus der Aufgefrierphase untersucht. Aufgrund der Ergebnisse des Basissystems wird auf die Variation der Grenztemperaturen verzichtet und nur die Variation der Rohrgruppen betrachtet. Bei der Variation der Rohrgruppen werden in diesem Fall nur die beiden für das Basissystem maßgebenden Varianten mit vier und fünf Rohrgruppen sowie die Variante mit einer Rohrgruppe als Referenz untersucht.

Wie bei den Untersuchungen der Optimierungssysteme in den vorherigen Kapiteln, ist auch für den intermittierenden Betrieb die Unterscheidung zwischen aktiven und inaktiven Gefrierrohren zur Vorkühlung in der Erhaltungsphase zu beachten. Bei aktiven Vorkühlungsrohren in der Erhaltungsphase wurden diese jeweils an die Rohrgruppe im Anstrombereich gekoppelt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass lediglich für die Variante mit fünf Rohrgruppen für einige Fälle eine geringe Erhöhung der Einsparungen der Kühlenergie zu verzeichnen ist, die aber stets weniger als 1 % beträgt. Daher werden im Folgenden nur die Ergebnisse der Untersuchungen mit inaktiven Gefrierrohren zur Vorkühlung in der Erhaltungsphase vorgestellt.

Die Optimierungssysteme mit inaktiven Vorkühlungsrohren in der Erhaltungsphase unterscheiden sich vom Basissystem hauptsächlich durch die Frostkörperausbreitung im Boden zu Beginn der Erhaltungsphase. Die Optimierungsvarianten weisen alle einen im Luv-Bereich deutlich größeren Frostkörper auf (s. Bild 8.20), der zu unterschiedlichen maßgebenden Rohrgruppen führen kann. In Tabelle 8.3 sind die maßgebenden Varianten der Rohrgruppen, mit denen die geringsten Kühlenergien in der Erhaltungsphase erzielt werden, sowohl für das Basissystem als auch für die Optimierungssysteme in Abhängigkeit von der Grundwasserfließgeschwindigkeit zusammengefasst. Während für das Basissystem keine einheitliche, maßgebende Variante der Rohrgruppen angegeben werden kann, wird mit der Variante mit fünf Rohrgruppen für die beiden Optimierungssysteme VK 3 und VK 4 stets die geringste Kühlenergie erreicht. Der Grund hierfür ist die separate Steuerung des ersten Gefrierrohrs im Anstrombereich.

Tabelle 8.3 Maßgebende Variante der Rohrgruppen für das Basissystem und die Optimierungssysteme in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Grundwasserfließgeschwindigkeit [m/d]	Maßgebende Variante der Rohrgruppen				
	Basis	VK 1	VK 2	VK 3	VK 4
0,00	5	5	4	5	5
0,25	5	5	5	5	5
0,50	4	5	5	5	5
0,75	4	5	5	5	5
1,00	4	5	5	5	5
1,25	5	4	5	5	5

Die erzielbaren Einsparungen der Kühlenergie der Erhaltungsphase durch einen intermittierenden Betrieb mit der jeweils maßgebenden Rohrgruppenvariante (s. Tabelle 8.3) sind in Bild 8.27 bezogen auf einen durchlaufenden Betrieb mit einer konstanten Vorlauftemperatur von -35°C in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit dargestellt. Wie in Kapitel 8.3.2 erläutert, lässt diese Darstellung die direkte Bestimmung der maßgebenden Optimierungsvariante nicht zu, da die Bezugsgrundlage nicht identisch ist. Generell ist anhand der Ergebnisse aber zu erkennen, dass die Einsparungen durch den intermittierenden Betrieb in der Erhaltungsphase für alle untersuchten Systeme mit zunehmender Fließgeschwindigkeit geringer werden, da der konvektive Wärmeeintrag ansteigt.

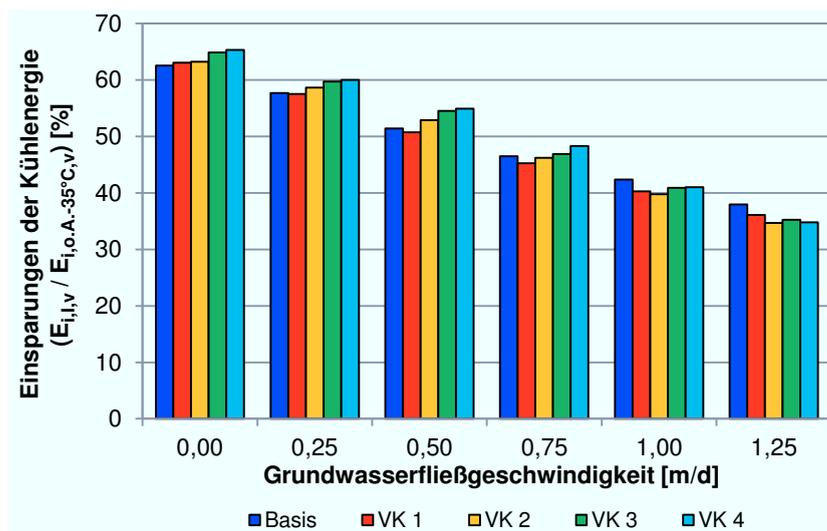


Bild 8.27 Einsparungen der Kühlenergie der Erhaltungsphase durch den intermittierenden Betrieb in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Für Fließgeschwindigkeiten bis 0,75 m/d wird deutlich, dass die Einsparungen der Optimierungssysteme mit Vorkühlung teilweise größer sind als die des Basissystems. Ab einer Fließgeschwindigkeit von 1,0 m/d hingegen sind die Einsparungen für das Basissystem größer. Der Grund hierfür liegt in dem geringeren Frostkörpervolumen, das zu Beginn der Erhaltungsphase vorliegt (s. Bild 8.28). Durch die Vorkühlungsrohre ist der Frostkörper im Anstrom zwar größer, insgesamt ist der gefrorene Bereich aber deutlich geringer, so dass die einzelnen Gefrierrohre in der Erhaltungsphase mehr Kühlenergie benötigen, um die statisch erforderliche Dicke des Frostkörpers zu erhalten.

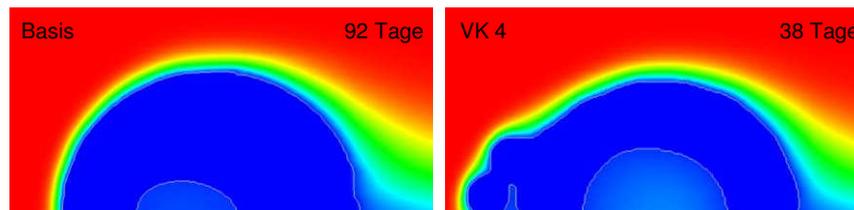


Bild 8.28 Frostkörperausbreitung zu Beginn der Erhaltungsphase für das Basissystem und das Optimierungssystem VK 4 für $v_f = 1,25$ m/d

Abschließend kann festgehalten werden, dass mit der Betriebsvariante des intermittierenden Betriebs eine individuelle Kontrolle der kritischen Bereiche des Frostkörpers in der Erhaltungsphase durch die Definition von Rohrgruppen möglich ist. Die Angabe einer für alle Fließgeschwindigkeiten maßgebenden Rohrgruppenanzahl sowie Gefrierrohrzuordnung ist nicht möglich, sondern Bedarf stets einer systemspezifischen numerischen Betrachtung. Die numerischen Simulationen haben aber gezeigt, dass die Definition mehrerer Rohrgruppen stets zu weiteren Einsparungen im Vergleich zu lediglich einer Rohrgruppe führt. In Bezug auf die Temperaturdifferenz zwischen minimaler und maximaler Grenztemperatur bleibt festzuhalten, dass diese möglichst gering gewählt werden sollte, um kurze Betriebs- und Haltephasen und damit eine insgesamt geringe Kühlenergie zu erzielen. Aufgrund des höheren Wärmeeintrags nehmen die erzielbaren Einsparungen der Kühlenergie auch für diese Betriebsvariante mit steigender Fließgeschwindigkeit ab. Durch die individuelle Kontrolle der kritischen Bereiche des Frostkörpers mit der Variante des intermittierenden Betriebs können für diese Querschlagvereisung aber Einsparungen der Kühlenergie in der Erhaltungsphase von 35 % ($v_f = 1,25$ m/d) bis 65 % ($v_f = 0,00$ m/d) erzielt werden.

8.3.4 Bewertung der Betriebsvarianten der Erhaltungsphase

Abschließend werden die beiden untersuchten Betriebsvarianten der Erhöhung der Vorlauf-temperatur und des intermittierenden Betriebs in der Erhaltungsphase bewertet. Dabei sind als Kriterien die Ziele der Erhaltungsphase anzusetzen, die sich aus der Bewahrung des statisch erforderlichen Frostkörpers unter möglichst geringem Energieeinsatz und der weitestgehenden Verhinderung eines unnötigen Frostkörperwachstums zusammensetzen.

Zur Beurteilung der energetisch maßgebenden Betriebsvariante sind die Einsparungen der Kühlenergie beider Betriebsvarianten beispielhaft für das Basissystem in Bild 8.29 in Abhängigkeit

von der Grundwasserfließgeschwindigkeit gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen generell, dass mit beiden Betriebsvarianten eine deutliche Verringerung der Kühlenergie erreicht werden kann. Mit steigender Fließgeschwindigkeit sinken die realisierbaren Einsparpotentiale jedoch aufgrund des konvektiven Wärmeeintrags durch das Grundwasser. Der Vergleich der beiden Betriebsvarianten macht weiterhin deutlich, dass der intermittierende Betrieb energetisch gesehen effektiver ist, da weniger Kühlenergie benötigt wird und somit größere Einsparungen erzielt werden können. Für den Fall ohne Grundwasserströmung können mit dem intermittierenden Betrieb bis zu 63 % der Kühlenergie eines durchlaufenden Betriebs des Kühlaggregats eingespart werden. Für eine Fließgeschwindigkeit von 1,25 m/d liegen die Einsparungen immer noch bei ca. 38 % der Kühlenergie. Dieser Wert ist fast doppelt so hoch wie die realisierbaren Einsparungen eines Betriebs mit erhöhter Vorlauftemperatur, die bei 20 % liegen. Dieser Vergleich zeigt noch einmal, dass der Vorteil des intermittierenden Betriebs, der in der individuellen Anpassung an die kritischen Bereiche des Frostkörpers liegt, insbesondere bei steigenden Fließgeschwindigkeiten zum Tragen kommt. Aufgrund des erhöhten konvektiven Wärmeeintrags ist in diesem Fall die individuelle Anpassung an die durch das Grundwasser stark beeinflussten und damit kritischen Bereich von besonderer Bedeutung.

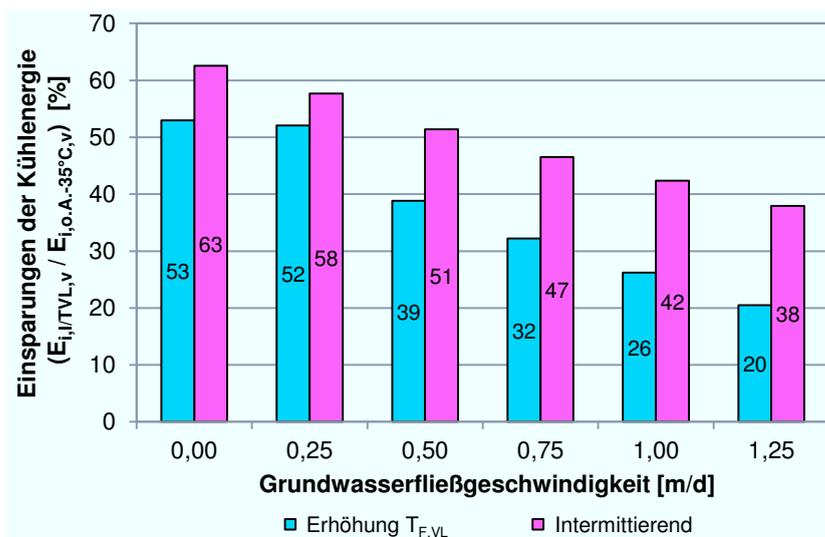


Bild 8.29 Einsparungen der Kühlenergie der Erhaltungsphase für das Basissystem in Abhängigkeit der Betriebsvariante und der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Neben der Verringerung der Kühlenergie soll in der Erhaltungsphase ebenfalls das weitere Frostkörperwachstum begrenzt werden. Um die Auswirkung der beiden Betriebsvarianten auf das Frostkörperwachstum zu bestimmen, wird die Frostkörperausbreitung der Systeme verglichen, die für beide Betriebsvarianten jeweils zu den größten Einsparungen der Kühlenergie geführt haben. In Bild 8.30 ist die Ausbreitung des Frostkörpers für beide Betriebsvarianten zum Ende der Erhaltungsphase exemplarisch für das Basissystem und drei untersuchte Fließgeschwindigkeiten dargestellt. Um die Frostkörperausbreitung der beiden Betriebsvarianten anschaulich vergleichen zu können, sind die -1°C -Isothermen sowohl für den Betrieb mit einer Erhöhung der Vorlauftemperatur (rote Linie) als auch für den intermittierenden Betrieb (hellgraue Linie) in allen Bildern eingetragen

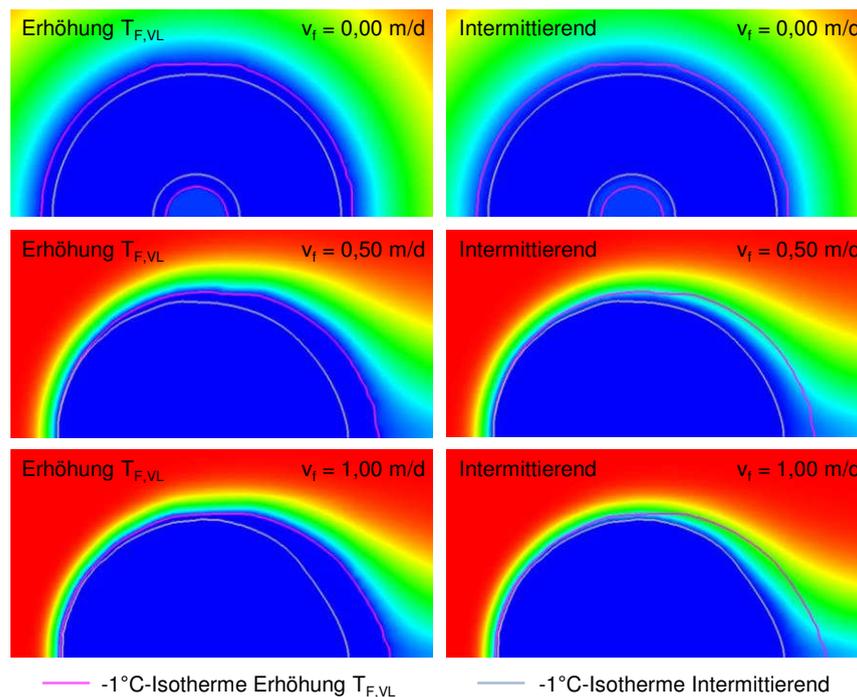


Bild 8.30 Frostkörperausbreitung zum Ende der Erhaltungsphase für die verschiedenen Betriebsvarianten in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Der Vergleich der Temperaturverteilungen im Boden macht deutlich, dass das über die erforderliche Dicke hinausgehende Frostkörperwachstum mit dem intermittierenden Betrieb für alle Fließgeschwindigkeiten besser begrenzt werden kann und demzufolge geringer ist als für den Betrieb mit einer erhöhten Vorlauftemperatur. Aufgrund der individuellen Steuerung einzelner zu definierender Rohrgruppen ermöglicht der intermittierende Betrieb eine effektive Kontrolle des Frostkörperwachstums, wodurch das Auftreten schädlicher Frosthebungen verhindert bzw. verringert werden kann. In diesem Zusammenhang bietet der intermittierende Betrieb weiterhin den Vorteil, dass er die Bildung von Eislinen in frostempfindlichen, meist bindigen Böden deutlich reduziert (z.B. Kellner 2007). Dieser Aspekt wurde aber im Rahmen dieser Arbeit, die sich auf Vereisungsmaßnahmen in nichtbindigen Böden beschränkt, nicht näher betrachtet.

Die Bewertung der maßgebenden Betriebsvariante in der Erhaltungsphase wurde beispielhaft nur für das Basissystem vorgestellt, da sich für die untersuchten Optimierungssysteme der Aufgefrierphase die gleichen Zusammenhänge ergeben. Letztlich kann festgehalten werden, dass die Variante des intermittierenden Betriebs mit mehreren Rohrgruppen nicht nur die geringste Kühlenergie benötigt und damit die größten Energieeinsparungen in der Erhaltungsphase erzielen kann, sondern auch die effektivste Variante zur Begrenzung eines unnötigen Frostkörperwachstums in der Erhaltungsphase darstellt.

8.4 Bewertung der Ansätze zur energetischen Optimierung

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen zur Optimierung der Aufgefrier- und der Erhaltungsphase einer fiktiven Querschlagvereisung haben gezeigt, dass in beiden Phasen durch verschiedene Optimierungsansätze deutliche Einsparungen der Kühlenergie erreicht werden können.

In der Aufgefrierphase werden sowohl die Aufgefrierzeit als auch die erforderliche Kühlenergie maßgeblich durch eine vorliegende Grundwasserströmung beeinflusst. Die mit steigender Grundwasserfließgeschwindigkeit überproportionale Zunahme der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie kann durch die strömungsangepasste Anordnung einiger zusätzlicher Gefrierrohre im Luv-Bereich deutlich verringert werden. Eine Erhöhung der Anzahl der Gefrierrohre zur Vorkühlung im Anstrom führt dabei stets zu einer Verringerung der Aufgefrierzeit. Auf die erforderliche Kühlenergie in der Aufgefrierphase lässt sich dieser Zusammenhang aber nicht direkt übertragen, da diese sowohl von der Verringerung der Aufgefrierzeit als auch von der Erhöhung der Kühlenergie infolge einer insgesamt größeren Anzahl an Gefrierrohren beeinflusst wird. Zur Bestimmung der effektivsten Optimierungsvariante für die Kühlenergie in der Aufgefrierphase sind demnach stets systemspezifische numerische Simulationen erforderlich.

In der Erhaltungsphase ist die Abhängigkeit der Kühlenergie von der Grundwasserströmung für einen durchlaufenden Betrieb des Kühlaggregats mit einer konstanten Vorlauftemperatur von -35°C sehr gering. Das Ziel der Erhaltungsphase, den Forstkörper mit möglichst geringem Energieaufwand in seiner statisch erforderlichen Dicke zu erhalten, kann durch den Einsatz verschiedener Betriebsvarianten erreicht werden. Die Ergebnisse der numerischen Simulationen haben abschließend gezeigt, dass der intermittierende Betrieb mit an die kritischen Frostkörperbereiche angepassten Rohrgruppen die größten Energieeinsparungen erzielen kann. Außerdem kann mit dem intermittierenden Betrieb gleichzeitig ein unnötiges, über die statisch erforderliche Frostkörperdicke hinausgehendes Frostkörperwachstum effektiv begrenzt werden.

Abschließend wird die Optimierung der fiktiven Querschlagvereisung nun in ihrer Gesamtheit bestehend aus Aufgefrier- und Erhaltungsphase bewertet. Zunächst wird eine rein energetische Bewertung anhand der Gesamtkühlenergie vorgenommen, auf deren Basis die energetisch maßgebende Optimierungskombination für die Aufgefrier- und die Erhaltungsphase bestimmt werden kann. Im Anschluss an die energetische Bewertung wird eine vereinfachte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der gesamten Vereisungsmaßnahme durchgeführt. Dabei werden die wirtschaftlichen Auswirkungen der erzielbaren energetischen Einsparungen bestimmt, indem die durch die Optimierungen in der Aufgefrier- und der Erhaltungsphase erzielbaren Kosteneinsparungen etwaigen Zusatzkosten für beispielsweise weitere Gefrierrohre gegenübergestellt werden. Dies ermöglicht eine abschließende wirtschaftliche Einordnung der untersuchten Optimierungsansätze in der Aufgefrier- und der Erhaltungsphase sowie die Bestimmung der wirtschaftlich maßgebenden Optimierungskombination für die untersuchte Querschlagvereisung. Weiterhin können generelle Aussagen zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Vereisungsmaßnahmen getroffen werden.

Als Grundlage für die Bestimmung der energetisch maßgebenden Optimierungskombination der gesamten Vereisungsmaßnahme dient die Gesamtkühlenergie des Basissystems, das weder für die Aufgefrierphase noch die Erhaltungsphase optimiert wurde. Die Gesamtkühlenergie bestimmt sich allgemein als Summe der Kühlenergie der Aufgefrierphase und der Kühlenergie der Erhaltungsphase. Der Referenzwert der Gesamtkühlenergie wird aus der Kühlenergie des Basissystems in der Aufgefrierphase und der Kühlenergie des durchlaufenden Betriebs des Kühlaggregats ohne jegliche Anpassung in der Erhaltungsphase berechnet. Die Kühlenergie für die verschiedenen Phasen sowie die Aufgefrierzeit für das Basissystem sind in Bild 8.31 in Abhängigkeit von der Grundwasserfließgeschwindigkeit dargestellt.

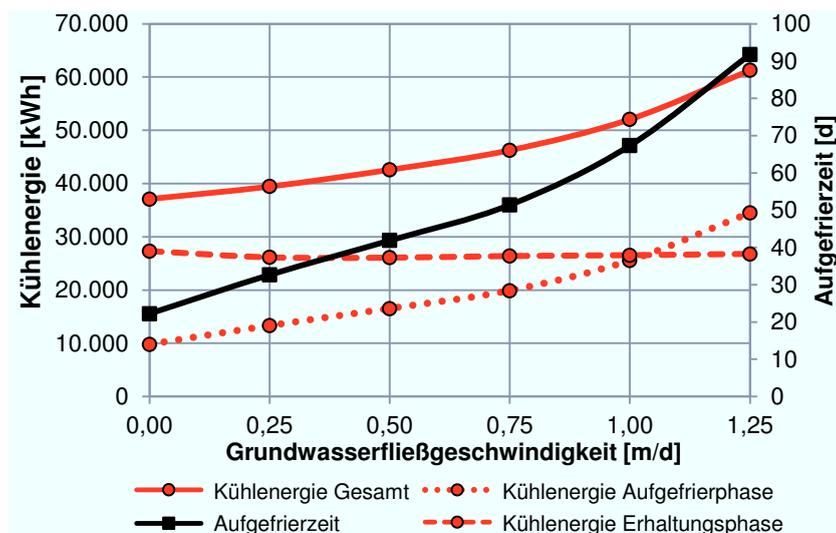


Bild 8.31 Kühlenergie und Aufgefrierzeit des Basissystems für einen durchlaufenden Betrieb in der Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit

Die numerischen Untersuchungen der Erhaltungsphase in Kapitel 8.3 haben eindeutig gezeigt, dass der intermittierende Betrieb mit deaktivierten Vorkühlungsrohren für alle untersuchten Systeme die geringste Kühlenergie benötigt und somit maßgebend ist. Für die Optimierungssysteme aus der Aufgefrierphase hingegen kann kein einheitlich maßgebendes System definiert werden. Zur Bestimmung der maßgebenden Optimierungskombination wird folglich die Gesamtkühlenergie für alle untersuchten Optimierungssysteme mit Vorkühlung gegenübergestellt. Die Gesamtkühlenergie des jeweiligen Optimierungssystems wird dabei als Summe der Kühlenergie der Aufgefrierphase und der Kühlenergie des intermittierenden Betriebs für die jeweils maßgebende Rohrgruppe nach Tabelle 8.3 bestimmt. Bild 8.32 zeigt die Gesamtkühlenergie der Optimierungskombinationen in Abhängigkeit von der Grundwasserfließgeschwindigkeit als Balken. Die Gesamtkühlenergie des Basissystems für einen durchlaufenden Betrieb in der Erhaltungsphase, die als Vergleichsgrundlage dient, ist zusätzlich für jede Fließgeschwindigkeit angegeben (schwarz gestrichelte Linie). Die Aufgefrierzeit ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht mit dargestellt. Diese nimmt aber für jede Fließgeschwindigkeit mit steigender Anzahl an Gefrierrohren zur Vorkühlung ab.

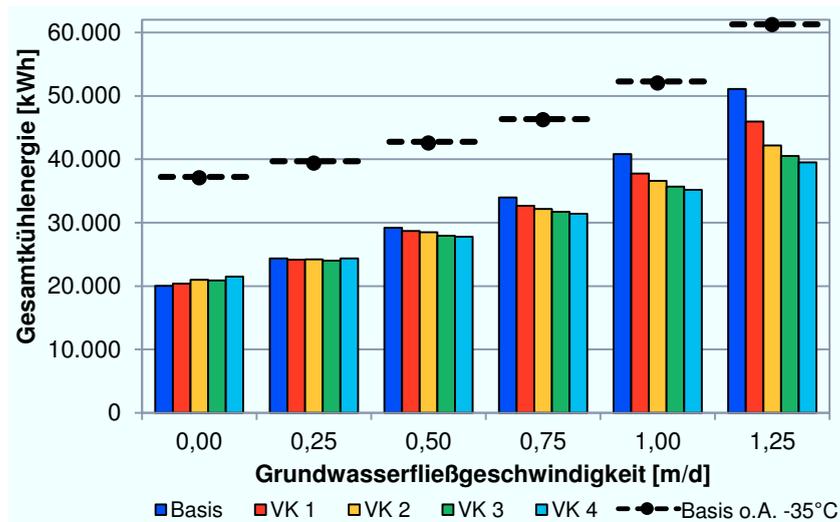


Bild 8.32 Gesamtkühlenergie der Optimierungskombinationen aus Aufgefrier- und Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit

Die Darstellung der Gesamtkühlenergie zeigt, dass für alle Optimierungskombinationen deutlich weniger Gesamtkühlenergie erforderlich wird als für das Referenzsystem ohne jegliche Optimierung. Außerdem wird deutlich, dass ab einer Fließgeschwindigkeit von 0,5 m/d weitere Einsparungen der Gesamtkühlenergie erreicht werden können, indem anstelle des Basissystems ein Optimierungssystem mit Vorkühlung gewählt wird.

Weiterhin wird die Angabe einer für jede Grundwasserfließgeschwindigkeit maßgebenden Optimierungskombination möglich, durch deren Einsatz die geringste Gesamtkühlenergie für die fiktive Querschlagvereisung erzielt wird. Die maßgebenden Optimierungskombinationen sind in Tabelle 8.4 in Abhängigkeit von der Grundwasserfließgeschwindigkeit aufgelistet.

Tabelle 8.4 Energetisch maßgebende Optimierungskombinationen aus Aufgefrier- und Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Grundwasserfließgeschwindigkeit [m/d]	Maßgebende Optimierungskombination	
	Aufgefrierphase	Erhaltungsphase
0,00	Basis	Intermittierend - 5 Rohrgruppen
0,25	VK 3	Intermittierend - 5 Rohrgruppen
0,50	VK 4	Intermittierend - 5 Rohrgruppen
0,75	VK 4	Intermittierend - 5 Rohrgruppen
1,00	VK 4	Intermittierend - 5 Rohrgruppen
1,25	VK 4	Intermittierend - 5 Rohrgruppen

Für Grundwasserfließgeschwindigkeiten ab 0,5 m/d wird die geringste Gesamtkühlenergie für die untersuchte Querschlagvereisung mit dem System mit vier Vorkühlungsrohren und einem intermittierenden Betrieb mit fünf Rohrgruppen erreicht. Für die maßgebenden Optimierungskombinationen können die erzielbaren prozentualen Einsparungen der Gesamtkühlenergie in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit angegeben werden (s. Bild 8.33). Die Einsparungen durch diese Optimierungskombinationen liegen bei ca. 32 % bis 46 % im Vergleich zu der Gesamtkühlenergie des Basissystems für einen durchlaufenen Betrieb ohne Anpassung in der Erhaltungsphase.

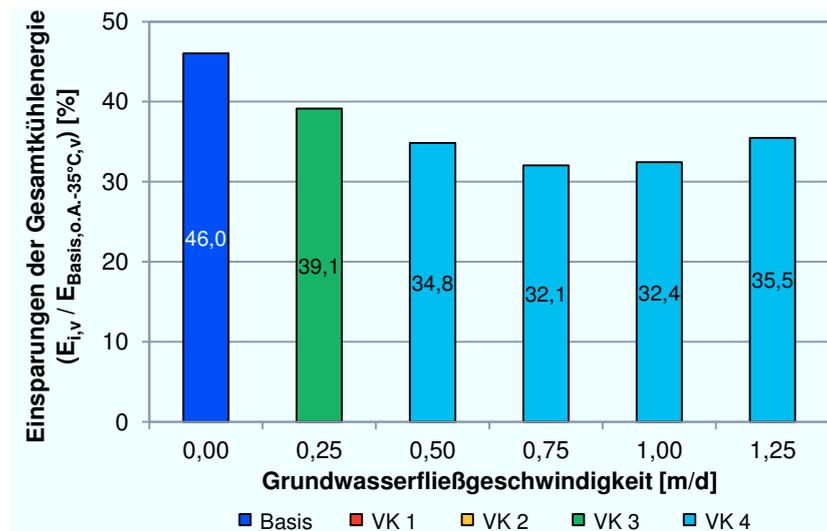


Bild 8.33 Einsparungen der Gesamtkühlenergie der maßgebenden energetischen Optimierungskombination für die jeweilige Grundwasserfließgeschwindigkeit

Aufbauend auf der Bewertung der energetisch maßgebenden Kombination der Optimierungsansätze der Aufgefrier- und der Erhaltungsphase wird im Folgenden die Ergebnisse einer vereinfachten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dieser fiktiven Querschlagvereisung und der untersuchten Optimierungskombinationen vorgestellt. Mit Hilfe dieser vereinfachten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kann zum einen die Zusammensetzung der Gesamtkosten einer Vereisungsmaßnahme verdeutlicht werden. Zum anderen können die Ergebnisse der energetischen Optimierung auf die Gesamtkosten übertragen werden, um generelle Aussagen zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit zu formulieren und die wirtschaftlich maßgebende Optimierungskombination für die fiktive Querschlagvereisung zu bestimmen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich eine vereinfachte Kostenermittlung vorgenommen. Eine exakte Preisermittlung der untersuchten Vereisungsmaßnahme ist nicht möglich, da diese die Kenntnis projektspezifischer Rahmenbedingungen erfordert, wie beispielsweise die Gesamtanzahl der auszuführenden Querschläge und die notwendige Baustelleneinrichtung. Die im Folgenden ermittelten Kosten stellen demzufolge eine Größenordnung dar, auf Grundlage derer die erzielbaren Einsparungen vergleichend bewertet werden können. Die Eingangsgrößen dieser vereinfachten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung basieren auf Werten von Baier (2008) und Erfahrungswerten von Herrn Hofmann (Züblin) und Herrn Müller (Max Bögl) aus der Praxis. In

Tabelle 8.5 sind die Eingangswerte der einzelnen Teilleistungen aufgeteilt nach Fixkosten und variablen Kosten dargestellt. Die einzelnen Positionen der Fixkosten werden entweder auf das Gefrierrohr an sich oder auf die Länge des Gefrierrohrs bezogen angegeben. Damit wird eine Unterscheidung zwischen den unterschiedlichen Optimierungssystemen möglich, die jeweils eine unterschiedliche Gesamtanzahl der Gefrierrohre aufweisen. Die Fixkosten einer Vereisungsmaßnahme beinhalten Kosten für die Bohr- und Einbauarbeiten der Gefrierrohre sowie die Installation und Deinstallation der Gefrierköpfe und des Rohrleitungssystems. Der Kostenpunkt des Rohrleitungssystems schließt die Kosten für die erforderliche Baustelleneinrichtung mit ein. Die variablen Kosten setzen sich aus Personal- und Gerätekosten zur Frostkörpererstellung und Frostkörpererhaltung sowie den Energiekosten für die erforderliche Kühlleistung zusammen. Die Gerätekosten beinhalten dabei beispielsweise die Vorhaltekosten für das Kühlaggregat. Die Unterscheidung zwischen der Frostkörpererstellung und -erhaltung kann mit dem geringeren erforderlichen Aufwand begründet werden.

Tabelle 8.5 Einzelkosten der Teilleistungen für einen vereinfachten Kostenvergleich

Fixkosten			
Pos. 1	Bohrarbeiten	300	[€/m]
Pos. 2	Liefern und Einbauen	190	[€/m]
Pos. 3	Installation und Deinstallation Gefrierköpfe	400	[€/Rohr]
Pos. 4	Installation und Deinstallation Rohrleitungssystem inkl. Baustelleneinrichtung	1500	[€/Rohr]
Variable Kosten			
Pos. 5a	Personal und Gerät für Frostkörpererstellung	1200	[€/d]
Pos. 5b	Personal und Gerät für Frostkörpererhaltung	600	[€/d]
Pos. 6	Energiepreis	0,25	[€/kWh]

Für die Ermittlung der Fixkosten auf Basis der Kostenansätze der Positionen 1 bis 4 sind die Gesamtanzahl der Gefrierrohre des jeweiligen Systems sowie die Gefrierrohrlänge von 10 m anzusetzen. Die Summe der variablen Kosten ergibt sich anhand der Positionen 5 und 6 unter Ansatz der erforderlichen Aufgefrierzeit, der Dauer der Erhaltungsphase von 150 Tagen und der in den numerischen Simulationen ermittelten erforderlichen Kühlenergie des jeweiligen Systems. Da die Kühlenergie aus Symmetriegründen nur für den halben Querschlag ermittelt wurde, sind die Werte der Kühlenergie zur Bestimmung der Energiekosten zu verdoppeln. Weiterhin ist die ermittelte Kühlenergie zu erhöhen, da in den numerischen Simulationen eine reine Gefrierleistung ermittelt wurde, die Verluste über die Rohrleitungsstrecke sowie innerhalb des Kühlaggregats nicht berücksichtigt. Auf Basis der Ausführungen zu den möglichen auftretenden Verlusten bei Vereisungsmaßnahmen in Kapitel 6.2.3 werden für dieses Beispiel pauschal Verluste der Kühlenergie in Höhe von 35 % angesetzt. Um die Gesamtkosten der fiktiven

Querschlagvereisung vereinfacht bestimmen zu können, wird weiterhin angenommen, dass eine Veränderung der Gefrierrohrposition im Vergleich zur Gefrierrohranordnung des Basissystems keine zusätzlichen Kosten verursacht. Außerdem wird vorausgesetzt, dass das eingesetzte Monitoring sowie die notwendigen Drainagevorrichtungen für alle untersuchten Systeme identisch sind und somit bei dieser vereinfachten Kostenermittlung vernachlässigt werden können.

Als Vergleichsgrundlage für die Abschätzung der möglichen Kosteneinsparungen der verschiedenen Optimierungskombinationen dienen die erforderlichen Gesamtkosten für das Basissystem für einen durchlaufenden Betrieb ohne Anpassung in der Erhaltungsphase. Neben den Gesamtkosten für die Vereisung dieses Referenzsystems ist in Bild 8.34 die Zusammensetzung der Kosten, aufgeteilt nach Fixkosten, variablen Kosten für Personal und Gerät sowie den variablen Energiekosten, in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit dargestellt. Die Fixkosten sind in diesem Beispiel konstant, da für das Basissystem eine unveränderte Gesamtzahl von 16 Gefrierrohren zum Einsatz kommt. Die variablen Kosten für Personal und Gerät steigen mit zunehmender Grundwasserfließgeschwindigkeit an, da sie direkt von der Aufgefrierzeit abhängen. Die variablen Energiekosten basieren auf der erforderlichen Gesamtkühlenergie, so dass ebenfalls eine Zunahme mit steigender Grundwasserströmung zu verzeichnen ist.

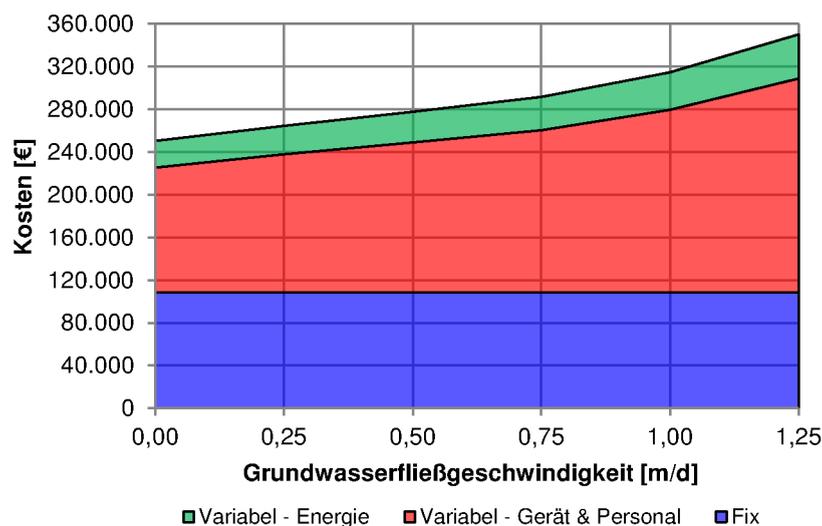


Bild 8.34 Zusammensetzung der Gesamtkosten des Basissystems in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Die Zusammensetzung der Gesamtkosten dieser Vereisungsmaßnahme zeigt deutlich, dass der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten einer Vereisungsmaßnahme eher gering ist. Um die genauen Anteile der einzelnen Kostenbestandteile an den Gesamtkosten zu bestimmen, sind die jeweiligen Kostenbestandteile für eine bestimmte Fließgeschwindigkeit auf die Gesamtkosten für dieselbe Fließgeschwindigkeit bezogen worden (s. Bild 8.35). Die Verbindungslinien der Punkte sind nur gestrichelt dargestellt, da sich für jede Fließgeschwindigkeit der Bezugs- bzw. Normierungsparameter ändert und die Verläufe zwischen den Fließgeschwindigkeiten deshalb nicht mathematisch korrekt bestimmt sind. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten des Basissystems nahezu gleich

bleibt und immer im Bereich von ca. 11 % liegt. Der prozentuale Anteil der Fixkosten liegt im Fall ohne Grundwasserströmung bei ca. 43 % und nimmt dann aufgrund der steigenden Gesamtkosten und der gleichbleibenden Fixkosten stetig ab. Für eine Fließgeschwindigkeit von 1,25 m/d beträgt der Anteil der Fixkosten schließlich nur noch 31 %. Der prozentuale Anteil der variablen Kosten für Personal und Gerät nimmt dementsprechend mit steigender Fließgeschwindigkeit auf bis zu 57 % zu, da die Aufgefrierzeit überproportional ansteigt.

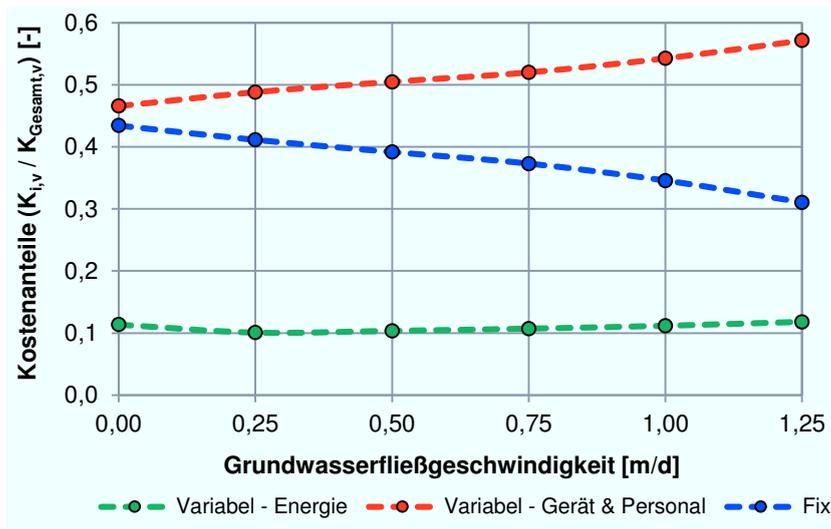


Bild 8.35 Anteil der einzelnen Kostenbestandteile an den Gesamtkosten des Basissystems in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Der Verlauf der Gesamtkosten des Basissystems in Bild 8.34 verdeutlicht bereits, dass der überproportionale Anstieg der Aufgefrierzeit mit steigender Grundwasserfließgeschwindigkeit sich nicht in gleichem Ausmaß auf die Gesamtkosten überträgt. Um die Unterschiede genau beurteilen können, ist der Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Aufgefrierzeit, die Gesamtkühlenergie und die Gesamtkosten des Basissystems in Bild 8.36 zusammengefasst.

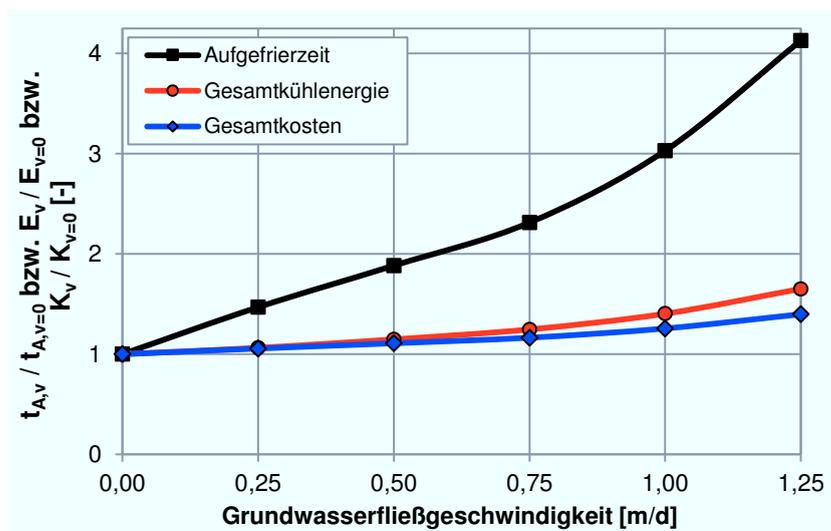


Bild 8.36 Gesamtkosten und Gesamtkühlenergie des Basissystems in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d

Für die Aufgefrierzeit sind im Vergleich zum Basissystem ohne Grundwasserströmung Steigerungen von mehr als 400 % möglich. Die Gesamtkühlenergie weist bereits eine deutlich verringerte Steigerung von lediglich bis zu 65 % auf. Dies resultiert zum einen daraus, dass die Kühlenergie in der Aufgefrierphase weniger stark von der Grundwasserströmung beeinflusst wird als die Aufgefrierzeit. Zum anderen ist die Kühlenergie in der Erhaltungsphase nahezu unabhängig von der Grundwasserströmung, wodurch die Steigerung der Gesamtkühlenergie weiter verringert wird. Der Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Gesamtkosten des Basissystems ist im Vergleich zu der Aufgefrierzeit und der Gesamtkühlenergie eher gering, liegt aber immer noch bei bis zu 40 %.

Der Anstieg der Gesamtkosten in Abhängigkeit von der Grundwasserfließgeschwindigkeit macht deutlich, dass eine gewissenhafte Baugrunderkundung und Ermittlung der Grundwasserfließgeschwindigkeit im Vorfeld der Planung von Vereisungsmaßnahmen unbedingt erforderlich ist. Wird eine Grundwasserströmung in der Planungsphase vernachlässigt, führt dies nicht nur zu einer Verzögerung des Aufgefrierprozesses und damit zu einer Verlängerung der gesamten Bauzeit, sondern auch zu einer erheblichen Erhöhung der Gesamtkosten der Vereisungsmaßnahme.

Aufbauend auf den erläuterten Zusammenhängen für die Gesamtkosten des Basissystems werden in einem nächsten Schritt die möglichen Kosteneinsparungen durch die untersuchten Optimierungskombinationen bestimmt. Außerdem wird die wirtschaftlich maßgebende Optimierungskombination für jede Fließgeschwindigkeit bestimmt und mit der jeweiligen energetisch maßgebenden Optimierungskombination verglichen.

Der intermittierende Betrieb stellt auch für die wirtschaftliche Betrachtung die maßgebende Betriebsvariante in der Erhaltungsphase dar, da die variablen Kosten aufgrund des fest definierten Zeitraums der Erhaltungsphase lediglich von der erforderlichen Kühlenergie abhängen. Um die Wirtschaftlichkeit der Optimierungssysteme mit einer Vorkühlung abschließend zu bestimmen, werden die Gesamtkosten für alle untersuchten Optimierungssysteme sowie den jeweils maßgebenden intermittierenden Betrieb in der Erhaltungsphase ermittelt. Die Gesamtkosten der Optimierungskombinationen sind in Bild 8.37 in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit als Balken dargestellt. Die Gesamtkosten des Basissystems für einen durchlaufenden Betrieb in der Erhaltungsphase dienen als Vergleichsgrundlage und sind zusätzlich für jede Fließgeschwindigkeit dargestellt (schwarz gestrichelte Linie).

Für das Basissystem mit einem intermittierenden Betrieb in der Erhaltungsphase können für alle Fließgeschwindigkeiten im Vergleich zum Referenzsystem ohne jegliche Optimierung Gesamtkosten eingespart werden. Die Gesamtkosten einiger Optimierungssysteme mit Vorkühlung liegen für Fließgeschwindigkeiten bis 0,5 m/d hingegen über denen des Referenzsystems, obwohl die Gesamtkühlenergie deutliche Einsparungen aufgezeigt hat (vgl. Bild 8.32). In diesen Fällen übersteigen die Installationsmehrkosten für die zusätzlichen Gefrierrohre die Kosteneinsparungen durch eine Verringerung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie. Erst für Fließgeschwindigkeiten oberhalb von 0,75 m/d werden mit allen Optimierungssystemen mit Vorkühlung weitere Einsparungen der Gesamtkosten im Vergleich zum Basissystem mit einem intermittierenden Betrieb in der Erhaltungsphase erreicht.

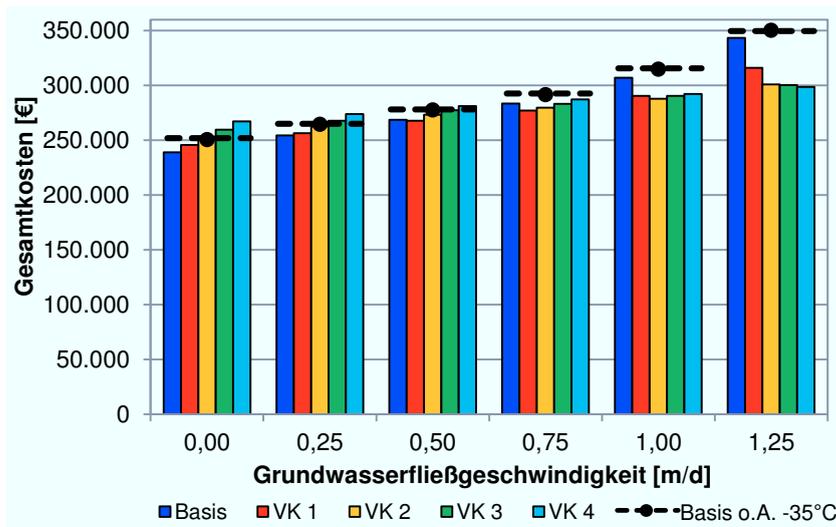


Bild 8.37 Gesamtkosten der Optimierungskombinationen aus Aufgefrier- und Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit

Die wirtschaftlich maßgebenden Optimierungskombinationen mit den geringsten Gesamtkosten sind in Tabelle 8.6 für jede Grundwasserfließgeschwindigkeit zusammengefasst. Die energetisch maßgebenden Optimierungssysteme aus der Aufgefrierphase sind zum direkten Vergleich mit angegeben. Die energetisch maßgebenden Betriebsvarianten sind nicht zusätzlich mit aufgeführt, da sie den wirtschaftlich maßgebenden Betriebsvarianten entsprechen.

Tabelle 8.6 Vergleich der wirtschaftlich und energetisch maßgebenden Optimierungskombinationen aus Aufgefrier- und Erhaltungsphase in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Grundwasserfließgeschwindigkeit [m/d]	Wirtschaftlich maßgebende Optimierungskombination		Energetisch maßgebende Optimierungssysteme
	Aufgefrierphase	Erhaltungsphase	Aufgefrierphase
0,00	Basis	Intermittierend – 5 Rohrgruppen	Basis
0,25	Basis	Intermittierend - 5 Rohrgruppen	VK 3
0,50	VK 1	Intermittierend - 5 Rohrgruppen	VK 4
0,75	VK 1	Intermittierend - 5 Rohrgruppen	VK 4
1,00	VK 2	Intermittierend - 5 Rohrgruppen	VK 4
1,25	VK 4	Intermittierend - 5 Rohrgruppen	VK 4

Der Vergleich mit den energetisch maßgebenden Optimierungskombinationen zeigt deutliche Unterschiede. Ab einer Fließgeschwindigkeit von 0,5 m/d stellt das Optimierungssystem mit vier Gefrierrohren zur Vorkühlung die energetisch maßgebende Variante dar. Die wirtschaftliche Betrachtung hingegen zeigt, dass dieses Optimierungssystem erst für eine Fließgeschwindigkeit von 1,25 m/d maßgebend wird. Für geringere Fließgeschwindigkeiten erzielen die Optimierungssysteme mit einem oder zwei zusätzlichen Gefrierrohren im Anstrom geringere Gesamtkosten.

Der Grund für diese deutlichen Unterschiede zwischen den energetisch und den wirtschaftlich maßgebenden Optimierungskombinationen liegt in den Zusatzkosten für die Gefrierrohre im Anstrom. Zur Verdeutlichung dieses Einflusses ist die Zusammensetzung der Gesamtkosten in Bild 8.38 exemplarisch für eine Grundwasserfließgeschwindigkeit von 0,75 m/d für die untersuchten Optimierungskombinationen angegeben. Die Zunahme der Fixkosten aufgrund der Erhöhung der Anzahl der Gefrierrohre ist deutlich zu erkennen. Diese Erhöhung der Fixkosten wird zwar von einer sichtbaren Verringerung der variablen Kosten für Personal und Gerät und einer weniger deutlichen Verringerung der Energiekosten begleitet, kann aber nicht in allen Fällen durch die Kostenreduktion nicht gänzlich kompensiert werden. In diesem Fall wird somit die Optimierungskombination mit einem Vorkühlungsrohr und einem intermittierenden Betrieb in der Erhaltungsphase maßgebend. Für diese Optimierungskombination können die geringen Erhöhungen der Fixkosten durch die Einsparungen der variablen Kosten ausgeglichen werden.

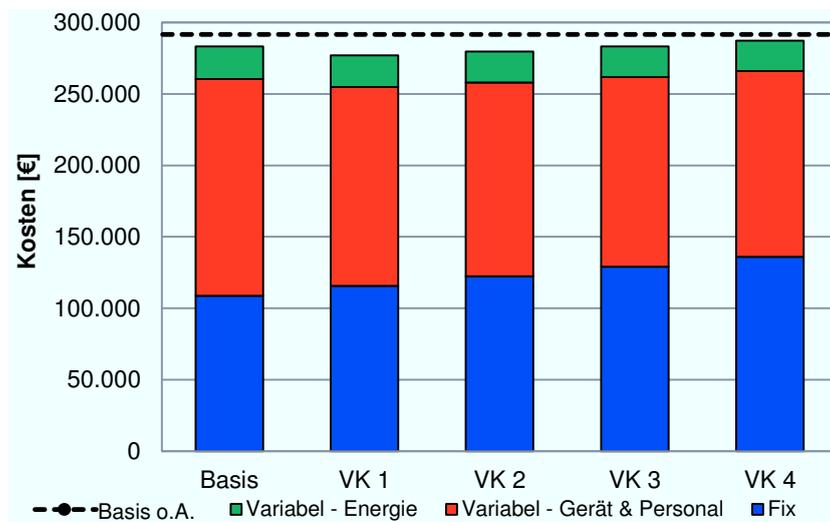


Bild 8.38 Zusammensetzung der Gesamtkosten der jeweiligen Optimierungskombination für eine Grundwasserfließgeschwindigkeit von $v_f = 0,75$ m/d

Für die wirtschaftliche Bewertung der Optimierungen der Querschlagvereisung sind die prozentualen Einsparungen der Gesamtkosten der als maßgebend ermittelten Optimierungskombinationen im Vergleich zu den Gesamtkosten des Referenzsystems ohne jegliche Optimierungen in Bild 8.39 dargestellt. Es wird deutlich, dass für höhere Fließgeschwindigkeiten mehr Kosten eingespart werden können als für ein System ohne Grundwasserströmung. Die Kosteneinsparungen für eine Fließgeschwindigkeit von 1,25 m/d liegen bei nahezu 15 %, wohingegen im Fall ohne Grundwasserströmung nur ca. 5 % eingespart werden können.

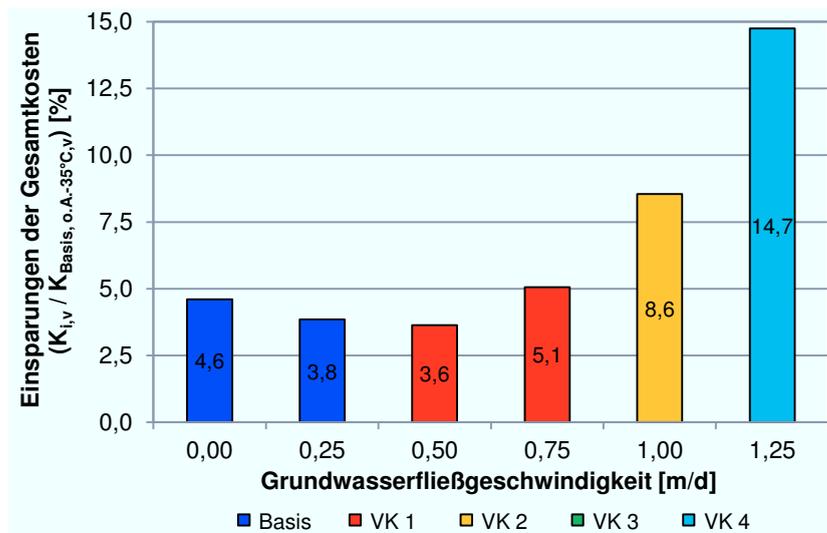


Bild 8.39 Einsparungen der Gesamtkosten der maßgebenden wirtschaftlichen Optimierungskombination für die jeweilige Grundwasserfließgeschwindigkeit

Im Rahmen der Bewertung der untersuchten Ansätze zur energetischen Optimierung hat sich gezeigt, dass die Optimierungskombinationen deutliche Einsparungen der Gesamtkühlenergie von bis zu 46 % erreichen können. Diese lassen sich aber nicht in gleichem Maß auf die Einsparungen der Gesamtkosten übertragen, da der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten für diese fiktive Querschlagvereisung insgesamt gering ist und nur etwa 11 % beträgt. Außerdem entstehen infolge der zusätzlichen Gefrierrohre zur Vorkühlung entsprechend zusätzliche Fixkosten, die nicht für alle Optimierungskombinationen durch die Einsparungen der Kühlenergie und der Aufgefrierzeit kompensiert werden können. Somit liegen die möglichen Einsparungen der Gesamtkosten für die untersuchten Optimierungskombinationen für die Vereisung des fiktiven Querschlags nur bei maximal 15 %.

Abschließend sind noch einmal die Gesamtkosten für die maßgebenden wirtschaftlichen Optimierungskombinationen in Bild 8.40 den Gesamtkosten des Basissystems für einen durchlaufenden Betrieb ohne Anpassung in der Erhaltungsphase gegenübergestellt. Dadurch wird deutlich, dass nicht nur die Gesamtkosten mit Hilfe der Optimierungskombinationen reduziert werden können, sondern auch die Zunahme der Gesamtkosten mit steigender Fließgeschwindigkeit verringert wird. Für das Basissystem ohne jegliche Optimierung liegt der Einfluss der Grundwasserströmung auf die Gesamtkosten noch bei bis zu 40 %. Für die maßgebenden wirtschaftlichen Optimierungskombinationen kann dieser Einfluss deutlich verringert werden und liegt nur noch bei maximal 25 %.

An dieser Stelle ist nochmals darauf hinzuweisen, dass die Kosten auf Basis vereinfachter Kostenansätze bestimmt wurden, die nicht alle Einflüsse und Rahmenbedingungen einer Vereisungsmaßnahme berücksichtigen. Außerdem weisen diese Kostenansätze die Problematik auf, dass sie bei kleinen Vereisungsmaßnahmen mit vergleichsweise wenigen Gefrierrohren und einem geringen Überwachungsaufwand, zu denen die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte

fiktive Querschlagvereisung gezählt werden kann, zu einer Überschätzung der Gesamtkosten führen können.

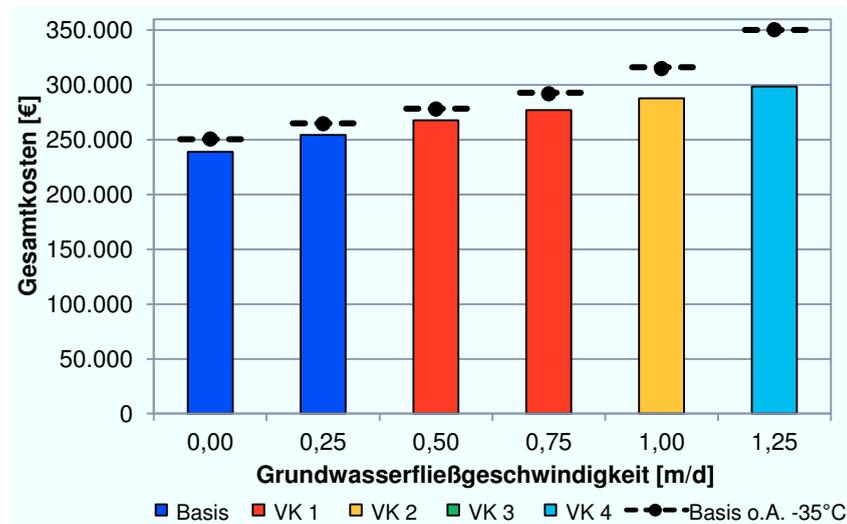


Bild 8.40 Gesamtkosten der maßgebenden wirtschaftlichen Optimierungskombination für die jeweilige Grundwasserfließgeschwindigkeit

Als abschließendes Fazit kann festgehalten werden, dass die zeitliche und energetische Optimierung von Vereisungsmaßnahmen mit der Hilfe numerischer Simulationen bereits in der Planungsphase sinnvoll und wirtschaftlich ist. Eine detaillierte Planung kann Kostenerhöhungen durch die Vernachlässigung einer vorliegenden Grundwasserströmung zuverlässig verhindern. Durch eine Optimierung der Aufgefrier- und Erhaltungsphase auf Basis numerischer Untersuchungen können sowohl Einsparungen der Aufgefrierzeit als auch der Kühlenergie erzielt werden, die zu einer Verringerung der Gesamtkosten der Vereisungsmaßnahme führen und diese somit wirtschaftlicher machen. Außerdem kann durch eine Verringerung der Aufgefrierzeit zusätzlich die Bauzeit des gesamten Bauprojekts reduziert werden. Diese Reduktion der Bauzeit kann zu weiteren Kosteneinsparungen in anderen Gewerken des Bauprojekts führen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Das Vereisungsverfahren ermöglicht die Erstellung eines statisch tragenden und zugleich abdichtenden Frostköpers und wird aufgrund seiner zahlreichen Vorteile in den letzten Jahren vermehrt, vor allem in geologisch und hydrologisch schwierigen Baugrundverhältnissen, eingesetzt. Zu den zahlreichen Vorteilen des Vereisungsverfahrens zählen unter anderem das breite Einsatzspektrum, da eine Anwendung in nahezu allen Bodenarten möglich ist, und die Reversibilität, wodurch der umgebende Boden sowie das Grundwasser nicht nachhaltig beeinflusst werden. In der Praxis wird beim planmäßigen Einsatz des Gefrierverfahrens trotzdem oftmals gezögert, da der Energieverbrauch aufgrund fehlender Berechnungsansätze nur mit einer unzureichenden Genauigkeit abgeschätzt werden kann und weitere Unsicherheiten sowie damit verbundene Kostenrisiken vorliegen, die aus einer unzureichenden Berücksichtigung thermischer Einflüsse, wie beispielsweise einer Grundwasserströmung, resultieren können.

In diesem Zusammenhang haben sich bereits frühere Forschungsarbeiten am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen von Baier (2008) und Ziegler et al. (2010) mit der Optimierung der Aufgefrierzeit in Abhängigkeit von der Grundwasserströmung, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Aufgefrierzeit hat, beschäftigt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde darauf aufbauend eine ganzheitliche Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Hinblick auf die Aufgefrierzeit und den Energieverbrauch unter Berücksichtigung der Aufgefrier- und Erhaltungsphase durchgeführt. Dazu wurden zunächst die bisherigen in der Literatur vorhandenen Lösungsansätze und Richtwerte zur Abschätzung der Kühlleistung zusammengefasst und durch eigene Anhaltswerte ergänzt, die durch die Auswertung aktueller Bauprojekte ermittelt wurden. Die vorliegenden Ansätze und Richtwerte reichen jedoch nicht aus, um die Vielzahl an Einflussfaktoren auf die Kühlleistung zu erfassen. Der Anspruch einer realistischen Bestimmung der Kühlleistung erfordert daher eine numerische Betrachtung des komplexen Problems.

Aus diesem Grund wurden im Zuge der vorliegenden Arbeit zwei numerische Lösungsmodelle zur Bestimmung bzw. Abschätzung der Kühlleistung von Vereisungsmaßnahmen entwickelt. Diese wurden in das Finite-Differenzen-Programm SHEMAT-Suite implementiert, das bereits die gekoppelte Simulation von Wärmetransport- und Strömungsprozessen in nichtbindigen Böden ermöglicht. Die numerischen Lösungsmodelle unterscheiden einen vereinfachten sowie einen detaillierten Ansatz zur Bestimmung der Kühlleistung. Der vereinfachte Ansatz basiert auf einer Summierung der in die Gefrierrohrzellen eingetragenen Wärmeströme. Die Gefrierrohrzellen sind dabei über eine Dirichlet-Randbedingung definiert, wobei der Aufbau des Gefrierrohrs sowie die innerhalb des Gefrierrohrs stattfindenden Wärmetransport- und Strömungsprozesse vernachlässigt werden.

Um allerdings eine detaillierte Kühlleistungsermittlung zu ermöglichen, müssen der Gefrierrohraufbau und die Wärmetransport- und Strömungsprozesse innerhalb des Gefrierrohrs sowie deren Kopplung mit dem umgebenden Boden unbedingt berücksichtigt werden. Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH das „freezrefcap“-Modul entwickelt, das auf der Theorie der thermischen Widerstände basiert. Dadurch kann eine detaillierte Berücksichtigung des Gefrierrohraufbaus erreicht werden, ohne dass eine sehr feine Diskretisierung und damit verbundene geringe Zeitschrittweiten nötig werden, die zu enormen Rechenzeiten führen. Innerhalb des „freezrefcap“-Moduls werden die Vor- und Rücklauftemperaturen sowie die Wärmeströme innerhalb des Gefrierrohrs und damit letztlich die erforderliche Kühlleistung berechnet.

Die Ermittlung des Gesamtenergieverbrauchs einer Vereisungsmaßnahme erfordert die Bestimmung der Kühlleistung sowohl in der Aufgefrier- als auch in der Erhaltungsphase. Deshalb wurden beide Module zur Ermittlung der erforderlichen Kühlleistung um die Simulation eines zeit- sowie temperaturgesteuerten intermittierenden Betriebs, wie er in der Praxis oftmals in der Erhaltungsphase eingesetzt wird, erweitert.

Die beiden Lösungsmodelle zur Bestimmung der Kühlleistung wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zunächst durch die Nachrechnung eines Modellversuchs der ETH Zürich überprüft. Aufgrund der detaillierten Datenbasis des Modellversuchs konnte die Kühlleistung sowohl anhand eines Versuchs ohne Grundwasserströmung als auch eines Versuchs mit Grundwasserströmung validiert werden. Die Validierung der beiden Lösungsmodelle hat gezeigt, dass die Temperaturverteilung im Boden mit beiden Lösungsmodellen hinreichend genau abgebildet werden kann. Die Kühlleistung kann ebenfalls mit guter Genauigkeit abgebildet werden, wobei die vereinfachte Kühlleistungsermittlung mit dem „freezing“-Modul die gemessene Kühlleistung geringfügig unterschätzt. Die detaillierte Kühlleistungsermittlung mit dem „freezrefcap“-Modul hingegen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den Simulationsergebnissen. Eine kombinierte Nutzung der beiden Lösungsmodelle zur Planung von Vereisungsmaßnahmen in der Praxis ist demnach sinnvoll. Die Vorplanung kann mit dem „freezing“-Modul und der vereinfachten Kühlleistungsermittlung mit einem geringen numerischen Simulationsaufwand erfolgen. Die anschließende Detailplanung kann dann mit dem „freezrefcap“-Modul durchgeführt werden, um die zur Dimensionierung des Kühlaggregats erforderliche Kühlleistung detailliert zu ermitteln und Detailfragen in Bezug auf Eingangsparameter des Kühlaggregats zu klären. Um die Praxistauglichkeit des detaillierten „freezrefcap“-Moduls zu verdeutlichen, wurde zusätzlich ein reales Vereisungsprojekt nachgerechnet. Hierzu wurde die Vereisung eines Querschlags beim Projekt des Statentunnels in Rotterdam gewählt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sowohl die Temperaturverteilung im Boden als auch die erforderliche Kühlleistung mit hinreichender Genauigkeit abgebildet werden können. Die Ergebnisse sind vor allem vor dem Hintergrund der in der Praxis vorliegenden schwierigen Randbedingung und deren oftmals unzureichender Erfassung als vielversprechend zu bewerten und verdeutlichen die Praxistauglichkeit des detaillierten Lösungsmodells.

Aufbauend auf der Validierung der beiden numerischen Lösungsmodelle wurden schließlich die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Aufgefrierzeit und insbesondere die erforderliche Kühlleistung während der Aufgefrierphase für die fiktive Querschlagvereisung unter Verwendung des detaillierten „freezrefcap“-Moduls ermittelt. Die Verwendung des detaillierten Lösungsmodells ermöglichte dabei nicht nur die Bestimmung der Einflüsse aus den relevanten Bodenparametern, sondern darüber hinaus auch der Einflüsse aus den Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteträgerkreislaufs. Die Grundwasserströmung konnte dabei als maßgeblicher Einflussparameter sowohl für die Aufgefrierzeit als auch für die erforderliche Kühlenergie während der Aufgefrierphase ermittelt werden. Die Bodeneigenschaften zeigen aber auch eine deutliche Beeinflussung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer zuverlässigen Baugrunderkundung, die neben Angaben zu den vorliegenden Bodenarten ebenfalls Angaben zur Größe und Richtung einer möglichen Grundwasserströmung liefern sollte. Sind diese Angaben nicht oder nur unzureichend vorhanden, kann dies zu einer Verzögerung des Gefrierprozesses und weiterhin zu einer deutlichen Erhöhung der Kühlenergie führen. Der Einfluss der Eigenschaften des Gefrierrohrbaus und des Kälteträgerkreislaufs ist im Vergleich zu den Bodenparametern und der Grundwasserfließgeschwindigkeit deutlich geringer. Der Vorteil dieser Eigenschaften liegt aber in der Möglichkeit, diese aktiv steuern zu können. Folglich können die Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteträgerkreislaufs im Rahmen numerischer Simulationen in der Planungsphase einer Vereisungsmaßnahme optimiert werden und bieten somit weitere Einsparpotentiale in Bezug auf die Aufgefrierzeit und die Kühlenergie.

In einem nächsten Schritt wurden verschiedene Ansätze zur energetischen Optimierung von Vereisungsmaßnahmen für die Aufgefrier- und die Erhaltungsphase untersucht und abschließend bewertet. Dabei wurde zunächst die Aufgefrierphase sowohl zeitlich als auch energetisch durch Optimierungssysteme mit Gefrierrohren zur Vorkühlung im Anstrom optimiert. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass durch das Einbringen zusätzlicher Gefrierrohre zur Vorkühlung im kritischen Anstrombereich des Frostkörpers eine deutliche Verringerung der Aufgefrierzeit sowie der Kühlenergie erreicht werden kann. Für alle Grundwasserfließgeschwindigkeiten ist mit steigender Anzahl der Gefrierrohre zur Vorkühlung stets eine Verringerung der Aufgefrierzeit zu verzeichnen. Für die Kühlenergie ist die Angabe eines allgemeinen Zusammenhangs nicht möglich, da diese stets eine genaue Ermittlung mit systemspezifischen, numerischen Simulationen erfordert.

Bei der energetischen Optimierung der Erhaltungsphase sind die Ziele der Erhaltungsphase zu beachten, die sich aus der Bewahrung des statisch erforderlichen Frostkörpers unter möglichst geringem Energieeinsatz und der weitestgehenden Verhinderung eines über die statisch erforderliche Frostkörperdicke hinausgehenden Frostkörperwachstums zusammensetzen. Zur Einhaltung dieser Ziele kommen in der Praxis entweder der Betrieb mit einer erhöhten Vorlauftemperatur oder der intermittierende Betrieb zum Einsatz, die beide im Hinblick auf die erzielbaren Energieeinsparungen untersucht wurden. Als Vergleichsgrundlage diente für beide Betriebsvarianten ein durchlaufender Betrieb in der Erhaltungsphase, bei dem keine Anpassungen vorgenommen wurden, so dass die Vorlauftemperatur konstant bei -35°C lag. Die

Ergebnisse der numerischen Simulationen haben gezeigt, dass mit beiden Betriebsvarianten deutliche Einsparungen der Kühlenergie erreicht werden können. Diese erzielbaren Einsparungen der Kühlenergie nehmen in beiden Fällen mit steigender Grundwasserströmung ab, da der konvektive Wärmeeintrag durch das Grundwasser deutlich zunimmt. Außerdem wurde deutlich, dass die erzielbaren Energieeinsparungen mit dem intermittierenden Betrieb, insbesondere für größere Grundwasserströmung, deutlich höher sind als für den Betrieb mit einer erhöhten Vorlauftemperatur. Der Vorteil des intermittierenden Betriebs liegt folglich in der Möglichkeit der individuellen Anpassung zu definierender Rohrgruppen an kritische Bereiche eines Frostkörpers. Die Erhöhung der Vorlauftemperatur kann hingegen nur global für alle Gefrierrohre gleich gesteuert werden und bietet somit nicht die Möglichkeit einer individuellen Kontrolle kritischer Frostkörperbereiche. Abschließend konnte somit gezeigt werden, dass der intermittierende Betrieb die größten Energieeinsparungen erzielen kann und damit die effektivste Betriebsvariante zur Verringerung bzw. Begrenzung des unnötigen Frostkörperwachstums in der Erhaltungsphase darstellt.

Die untersuchten Ansätze zur energetischen Optimierung von Vereisungsmaßnahmen in der Aufgefrier- und der Erhaltungsphase wurden abschließend in ihrer Gesamtheit, sowohl in energetischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht, bewertet. Dabei konnte gezeigt werden, dass mit den verschiedenen Optimierungsansätzen für die Aufgefrier- und die Erhaltungsphase erhebliche Einsparungen der Gesamtkühlenergie erreicht werden können. Diese Einsparungen der Gesamtkühlenergie von bis zu 46 % lassen sich aber nicht auf die erzielbaren Kosteneinsparungen übertragen. Dies begründet sich aus dem insgesamt eher geringen Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten dieser Vereisungsmaßnahme sowie den Mehrkosten durch zusätzliche Gefrierrohre zur Vorkühlung, die zur Realisierung von Kosteneinsparungen zunächst kompensiert werden müssen. Trotzdem hat die vereinfachte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergeben, dass mit den vorgestellten Optimierungen der Vereisungsmaßnahme in der Aufgefrier- und Erhaltungsphase die Gesamtkosten um bis zu 15 % reduziert werden können.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass im Rahmen der vorliegenden Arbeit numerische Lösungsmodelle zur realistischen Bestimmung der Kühlleistung von Vereisungsmaßnahmen entwickelt wurden, die eine ganzheitliche Optimierung von Vereisungsmaßnahmen in Bezug auf die Aufgefrierzeit, den Energieverbrauch und die Gesamtkosten in der Planungsphase ermöglichen. Mit Hilfe der beiden validierten Planungsinstrumente können Optimierungskombinationen für die Aufgefrier- und die Erhaltungsphase ermittelt werden, die durch Zeit-, Energie- und Kosteneinsparungen die Wirtschaftlichkeit des Vereisungsverfahrens erhöhen. Letztlich kann somit der planmäßige Einsatz des Vereisungsverfahrens in der Praxis gesteigert werden.

In der Erhaltungsphase wurden im Rahmen dieser Arbeit schwerpunktmäßig die energetischen Einsparpotentiale der verschiedenen Betriebsvarianten in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit untersucht. Dabei wurden weitere thermische Einflüsse infolge des während der Erhaltungsphase stattfindenden Ausbruchs des Querschnitts sowie infolge der Erstellung des späteren Bauwerks zunächst vernachlässigt. In Zukunft sollten im Rahmen weiterer numerischer Simulationen unbedingt die thermischen Einflüsse beim Ausbruch des Querschnitts, wie die Abwärme von Geräten oder die Hydratationswärme des Spritzbetons, in der Erhaltungsphase betrachtet werden, da sie eine vor allem für die Praxis äußerst relevante Fragestellung darstellen. Die Berücksichtigung dieser Einflussparameter kann zu einer Verlagerung der kritischen Bereiche des Frostkörpers in der Erhaltungsphase auf die Innenseite des Frostkörpers führen, die damit auch andere maßgebende Rohrgruppendefinitionen zur Folge haben können. Die Berücksichtigung dieser weiteren thermischen Einflüsse in numerischen Simulationen erfordert eine zeitabhängige Veränderung der im Innenbereich vorhandenen Zellen sowie deren Eigenschaften. In der Aufgefrierphase bestehen diese Zellen im Inneren zunächst aus Boden, der teilweise mit gefroren wird. Im Laufe der Erhaltungsphase müssen diese Zellen dann die Eigenschaften von Beton und Luft zugewiesen bekommen. Diese zeitabhängige Veränderung der Eigenschaften von Zellen ist momentan mit SHEMAT-Suite noch nicht möglich, sondern Bedarf einer programmtechnischen Anpassung. Die zeitabhängige Aktivierung thermischer Randbedingungen hingegen ist aufgrund der Weiterentwicklungen von SHEMAT-Suite im Rahmen dieser Arbeit möglich.

Weiterer Forschungsbedarf besteht auch auf dem Gebiet des intermittierenden Betriebs, der durch die vorgenommenen Weiterentwicklungen von SHEMAT-Suite im Zuge dieser Arbeit simuliert werden kann. Die bisherigen numerischen Simulationen zum intermittierenden Betrieb haben gezeigt, dass er nicht nur die effektivste Betriebsvariante zur Verringerung der Kühlenergie darstellt, sondern auch das Frostkörperwachstum durch die individuelle Steuerung effektiv begrenzen und kontrollieren kann. Die Begrenzung des Frostkörperwachstums verringert auch das Auftreten schädlicher Frosthebungen. Außerdem bietet der intermittierende Betrieb den Vorteil, dass er die Bildung von Eislinsen in frostempfindlichen Böden deutlich reduziert. Dieser Zusammenhang wird bereits in der Praxis genutzt und konnte auch schon im Rahmen von Frosthebungsversuchen (z.B. Kellner 2007) beschrieben werden. Bislang fehlt jedoch ein Ansatz zur Berechnung der Frosthebungen infolge der Eislinsenbildung. Da die Begrenzung der Frosthebungen ein in der Praxis wichtiger Aspekt ist, sollte die Entwicklung eines numerischen Modells zur Beschreibung der Frosthebungen und die Kopplung mit dem vorliegenden Modell zur Simulation des intermittierenden Betriebs im Rahmen der weiteren Forschung betrachtet werden. In diesem Zusammenhang ist eine weitere Anpassung von SHEMAT-Suite zur Abbildung bindiger Böden erforderlich, da momentan nur die Frostausbreitung in nichtbindigen Böden beschrieben werden kann.

Weiterhin liegt beim intermittierenden Betrieb in der Erhaltungsphase eine zyklische Belastung des Frostkörpers im Randbereich vor, da der Boden dort in teilweise kurzen Zeitabständen auftaut und dann wieder gefriert. Diese zyklische Belastung wurde in der vorliegenden Arbeit vernachlässigt, da sie lediglich in einem geringen Randbereich stattfindet. Im Rahmen weiterer

Untersuchungen sollten die Auswirkungen dieser zyklischen Belastungen auf die thermischen und physikalischen Eigenschaften des Bodens aber unbedingt quantifiziert werden. Beispielsweise wurde die Durchlässigkeit von einigen Autoren in Laborversuchen unter Frost-Tau-Wechseln untersucht (z.B. Chamberlain & Gow 1979, Eigenbrod 1996). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen einen Anstieg der Durchlässigkeit mit steigender Anzahl an Frost-Tau-Wechseln. In Abhängigkeit der Auswirkungen dieser zyklischen Belastung sind möglicherweise programmtechnische Anpassungen vorzunehmen, um die Bodeneigenschaften im zyklisch beeinflussten Randbereich richtig abzubilden. Bevor weitreichende programmtechnische Anpassungen vorgenommen werden, sollte jedoch zunächst im Rahmen von Voruntersuchungen der Einfluss möglicher Veränderungen der thermischen oder physikalischen Bodeneigenschaften in diesem geringen Randbereich auf das weitere Gefrierverhalten des Bodens bestimmt werden. Ergeben sich lediglich geringe Einflüsse, ist abzuwägen, ob eine programmtechnische Anpassung sinnvoll und im Rahmen der erzielbaren Genauigkeit notwendig ist.

Literaturverzeichnis

- Andersland, O.B., Ladanyi, B. (2004):** Frozen Ground Engineering – Second edition. American Society of Civil Engineers & John Wiley & Sons, Inc, ISBN 0-471-61549-8.
- Anderson, D.M., Tice, A.R. (1972):** Predicting unfrozen water content in frozen soils from surface area measurements. Highway Research Record, Vol. 373, S. 12-18.
- Baehr, H.D., Stephan, K. (2006):** Wärme- und Stoffübertragung. 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Baier, Ch. (2008):** Thermisch-hydraulische Simulationen zur Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau unter Einfluss einer Grundwasserströmung. Dissertation, Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen.
- Bayer, F. (2002):** Baugrundvereisung beim Bau der U-Bahn Fürth. Tunnel Nr.7/2002, Bauverlag, S. 20-28.
- Bear, J. (1972):** Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier publishing company, 1. Auflage, New York.
- Bear, J. (1979):** Hydraulics of groundwater. McGraw-Hill International Book Co., New York.
- Böckh, P., Wetzel, T. (2011):** Wärmeübertragung – Grundlagen und Praxis. 4. bearb. Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Braun, B., Shuster, J., Burnham, E. (1979):** Ground Freezing for Support of Open Excavations. Engineering Geology 13, S. 429-453.
- Bruns, B., Kuhn, C., Gattermann, J., Stahlmann, J., Perl, C. (2010):** Qualitätssicherung bei umfangreichen Vereisungsmaßnahmen am Beispiel des City-Tunnels in Leipzig. 7. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, Ostfildern, S. 487-497, ISBN 3-924813-81-7.
- Chamberlain, E.J., Gow, A.J. (1979):** Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. Engineering Geology, Vol. 13, S. 73-92.
- 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, S. 109-116.

- Clauser, C. (2003):** Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers –SHEMAT and Processing SHEMAT. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Coté, J., Konrad, J.-M. (2005):** A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 42, S. 443-458.
- 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, S. 293-299.
- De Vries, D.A. (1963):** Thermal properties of soils. In R.W. van Wijk: Physics of plant Environment, North-Holland Company, Amsterdam, S. 210-235.
- Dehner, U. (2007):** Bestimmung der thermischen Eigenschaften von Böden als Grundlage für die Erdwärmenutzung. Mainzer geowissenschaftliche Mitteilungen, Band 35.
- Eigenbrod, K.D. (1996):** Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, No. 4, S. 529-537.
- Farouki, O.T. (1986):** Thermal Properties of Soils. Traas Tech Publications, Series on Rock and Soil MEchanics, Vol. 11.
- Freeze, A.R., Cherry, J.A. (1979):** Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Frivik, P.E., Comini, G. (1982):** Seepage and Heat Flow in Soil Freezing. Journal of Heat Transfer, Transaction of the ASME, Vol. 104, S. 323-328.
- Fukusako, S. (1990):** Thermal properties of Ice, Snow and Sea Ice. International Journal of Thermophysics, Vol. 11, No. 2, S. 353-372.
- Glück, B. (2007):** Simulationsmodell Erdwärmesonden zur wärmetechnischen Beurteilung von Wärmequellen, Wärmesenken und Wärme-/Kältespeichern- 1. Ergänzung: Koaxialsonden. E-Book, www.berndglueck.de.
- Glück, A., Hunold, D. (2006):** Stoffwerte von technischen Wärmeträgern. VDI-Wärmeatlas, 10. Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, S. Dd1-Dd64.
- 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, S. 240-248.
- Gnielinski, V. (2013):** Wärmeübertragung bei erzwungener Konvektion (Teil G): Durchströmte Rohre (G1), Wärmeübertragung im konzentrischen Ringspalt und im ebenen Spalt (G2). VDI-Wärmeatlas, 11. Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, S. 785-800.

- Hallquist, M. (2011):** Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of smooth Tubes at a constant Heat Flux in Transitional Flow Regime. Masterthesis, University of Pretoria.
- Harris, J.S. (1995):** Ground freezing in practice. Thomas Telford, London, ISBN 0-7277-1995-5.
- Hellström, G. (1991):** Ground Heat Storage – Thermal Analyses of Duct Storage Systems. Ph.D. thesis, Department of Mathematical Physics, University of Lund.
- Huber, D., Walter, H. (2010):** Forced convection heat transfer in the transition region between laminar and turbulent flow for a vertical circular tube. International Conference on Fluid Mechanics and Heat & Mass Transfer, S. 132-136, ISBN 978-960-474-211-0.
- Huder, J. (1979):** Technologie des gefrorenen Bodens. Mitteilung der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, Nr. 100, Frühjahrstagung 1979, 15.-16. Juni, S. 23-30.
- IPU:** Software SecCool. IPU Technology Development – Refrigeration and Energy Technology, <http://en.ipu.dk/Indhold/refrigeration-and-energy-technology/seccool.aspx>.
- Jessberger, H.L. (1990):** Frost im Baugrund. In: Smolczyk, U. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch, Teil 1, 4. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, S. 513-550.
- Jessberger, H.L. (1996):** Bodenvereisung. In: Smolczyk, U. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch, Teil 2, 5. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, S. 109-136.
- Jessberger, H.L., Jagow-Klaff, R. (2001):** Bodenvereisung. In: Smolczyk, U. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch, Teil 2, 6. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, S. 121-166.
- Johansen, O., Frivik, P.E. (1980):** Thermal properties of soils and rock materials. Proceedings of the 2nd International Symposium on Ground Freezing, The Norwegian Institute of Technologie, Trondheim, Norwegen, S. 427-441.
- Kestin, J. (1978):** Thermal conductivity of water and steam. Journal of Mechanical Engineering, Vol. 100, No. 8, S. 46-48.
- Kellner, Ch. (2007):** Frosthebungsverhalten von Böden infolge tief liegender Vereisungskörper. Dissertation, Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität München.
- Kinzelbach, W. (1987):** Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser. Schriftenreihe gwf Wasser-Abwasser, Band 21, R. Oldenburg Verlag, München.

- Koppmann, D. (2013):** Numerische Simulationen zur Kühlleistung bei Vereisungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Wärmeübergänge im Gefrierrohr. Masterarbeit am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen, unveröffentlicht.
- Laurien, E., Oertel, H. (2013):** Numerische Strömungsmechanik: Grundgleichungen und Modelle – Lösungsmethoden – Qualität und Genauigkeit. 5. überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 978-3-658-03145-9 (eBook).
- Lundin, L.C. (1990):** Hydraulic properties in an operational model of frozen soil. *Journal of Hydrology*, Vol. 118, S. 289-310.
- 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. (2012):** Praxis der Wärmeübertragung – Grundlagen – Anwendungen – Übungsaufgaben. 3. aktualisierte Auflage. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München.
- Marsh, K.N. (1987):** Recommended Reference Materials for the Realization of Physicochemical Properties. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Martak, L., Haberland, C., Wolf, W., Weigl, H. (2005):** U-Bahn Wien/A: Bergmännischer Vortrieb unter dem Donaukanal im Schutz einer Baugrundvereisung mit kombinierter Stickstoff- und Solemethode. In: *STUVA Forschung und Praxis*, Heft 41, S. 116-122.
- Martin, H. (1990):** Lecture on Heat Transfer II. Universität Karlsruhe (TH).
- Max Bögl:** Firmenprospekt „Infrastruktur Bodengefrieretechnik“
- Mottaghy, D. (2007):** Heat transfer processes in the upper crust: influence of structure, fluid flow, and palaeoclimate. Dissertation, RWTH Aachen.
- 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, S. 59-71.
- Mottaghy, D., Rath, V. (2006):** Latent heat effects in subsurface modelling and their impact on palaeotemperature reconstructions. *Geophysical Journal International* 164, S. 234-245.
- Orth, W. (2009):** Bodenvereisung. In: Witt, K.J. (Hrsg.): *Grundbau-Taschenbuch*, Teil 2, 7. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, S. 233-302.

- Pimentel, E., Anagnostou, G. (2012):** Modellierung der Frostkörperentwicklung beim Gefrierverfahren im strömenden Grundwasser. Baugrundverbesserung in der Geotechnik, 2. Symposium, Wien, S. 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, S. 227-241.
- Poetsch, H.F. (1883):** Verfahren zur Abteufung von Schächten in schwimmendem Gebirge. Patentschrift Nr. 25015 vom 27. Februar 1883.
- Sanger, F.J., Sayles, F.H. (1978):** Thermal and Rheological computations for artificially frozen ground construction. International Symposium on Ground Freezing, Band 2, Bochum.
- Schmand, R., Heninger, R., Ziegler, M., Schüller, R. (2014):** Optimierung des Vereisungsverfahrens durch eine Kombination von Sole- und Stickstoffvereisung. In: 33. Baugrundtagung: Vorträge; Estrel Convention Center Berlin, 23.-26. September 2014 / Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Essen, DGGT, 2014, S. 135-141, ISBN 978-3-9813953-8-9.
- Sieler, U., Pirkl, M. (2002):** Innovative Bauverfahren bei der Vereisung U-Bahn Fürth. Vorträge der Baugrundtagung 2002 in Mainz, 25. -28. September 2002, Hrsg: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Glückauf Verlag, S. 123-128, ISBN 3-7739-5968-0.
- Sigloch, H. (2012):** Technische Fluidmechanik. 8. Überprüfte und aktualisierte Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Skovrup, M.J. (2005):** SecCool Properties – User Manuel. IPU Refrigeration and Energy Engineering.
- Speedy, R.J. (1987):** Properties of Supercooled Water at 1 atm. Journal of Physical Chemistry, Vol. 91, Issue 12, S. 3354-3358.
- Sres, A. (2009):** Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur künstlichen Bodenvereisung im strömenden Grundwasser. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik (IGT) der ETH Zürich, Band 234, ISBN 978-3-7281-3307-6..
- Städling, A., Franz, S. (2009):** City-Tunnel Leipzig. Unterfahrung des Hauptbahnhofs im Schutz einer Baugrundvereisung. Forschung und Praxis, U-Verkehr und unterirdisches Bauen, Nr. 43, STUVA-Tagung 2009 in Hamburg, Bauverlag, S. 99-103, ISBN 978-3-7625-3636-9.
- Ständer, W. (1967):** Das Gefrierverfahren im Schacht-, Grund- und Tunnelbau. In: Handbuch der Kältetechnik. Band 12, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, S. 173-227.

- Stephan, K. (1959):** Wärmeübergang und Druckabfall laminarer Strömungen im Einlauf von Rohren und ebenen Spalten. Dissertation Technische Hochschule Karlsruhe.
- Stephan, K. (1962):** Wärmeübergang bei turbulenter und laminarer Strömung in Ringspalten. Chemie Ingenieur Technik 34, Nr. 3, S. 207-212.
- Truckenbrodt, E. (1996):** Fluidmechanik – Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide. 4. ergänzte Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- van der Meijden, V.P. (2003):** Thermisch rekenmodel vppr cilindrische vrieslichamen voor de bouw van dwarsverbindingen tussen tunnelconstructies. Eindrapport, TU Delft.
- Wenke, Willner (2008):** Statentunnel in Rotterdam – Ausführungserfahrungen von Vereisungsbohrungen und der Vereisung von Querschlägen. Geomechanik und Tunnelbau, Nr.1/2008. S. 504-511.
- Werner, K. (1960):** Temperatur- und Dehnungsmessungen in einem Gefrierschacht. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 782, Hrsg. Kultusministerium NRW, Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen.
- Winter, D.F., Saari, J.M. (1969):** A particulate thermophysical model of lunar soil. The Astrophysical Journal, Vol. 156, No. 3, S. 1135-1151.
- Ziegler, M., Aulbach, B., Baier, Ch. (2010):** Erweiterung des Vereisungsverfahrens zur umweltverträglichen Herstellung komplizierter Untergeschosskonstruktionen bei strömenden Grundwasser. Abschlussbericht, Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart, 2010 (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 2744), ISBN 978-3-8167-8279-7.
- Ziegler, M., Schüller, R., Heninger, R., Schmand, R. (2014):** Optimization of Conventional Brine Freezing in Combination with Liquid Nitrogen Freezing. In: Tunnels for a better life: proceedings of the World Tunnel Congress 2014; Iguassu Falls, Brazil, May 9th – 15th, 2014 / Ed. by Arsenio Negro; Carlísio Oliveira Cecílio Jr.; Werner Bilfinger - Sao Paulo, CBT/ABMS, 2014. S. 1-9, ISBN: 978-85-67950-00-6.

Vorveröffentlichungen

Teilergebnisse aus dieser Arbeit wurden in den im Folgenden aufgelisteten Publikationen und Forschungsberichten vorab veröffentlicht.

Entsprechend § 5 Abs. 4 der Promotionsordnung der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen in der Fassung vom 19.07.2012 geschah dies im Einvernehmen mit dem Betreuer Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler und wurde der Fakultät für Bauingenieurwesen mit Schreiben vom 14.04.2014 und 07.10.2014 angezeigt.

Schüller, R. (2014): Optimierung des Energieverbrauchs von Vereisungsmaßnahmen unter Einfluss einer Grundwasserströmung. In: 33. Baugrundtagung: Forum für junge Geotechnik-Ingenieure, Beiträge der Spezialsitzung, Estrel Convention Center Berlin, 23.-26. September 2014 / Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Essen, 2014, S. 159-166, ISBN 978-3-9813953-8-9.

Schüller, R., Ziegler, M. (2014): Energetische Optimierung von Vereisungsmaßnahmen. In: Vorträge zum 21. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 20. März 2014 / Zsgest. von Sebastian Fischer, Darmstadt, 2014, S. 141-152 (Mitteilungen des Instituts und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, 93), ISBN 978-3-942068-08-6.

Schüller, R., Ziegler, M. (2014): Energy Saving Potential of Artificial Ground Freezing Applications. In: Geotechnics for roads and railways: Proceedings of the 15th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, 9.-11. September 2014, Vienna Univ. of Technology, Austria / Eds.: Heinz Brandl ..., Wien, ÖIAV, Vol. 1, 2014, S. 579-584, ISBN 978-3-902593-01-6.

Schüller, R., Ziegler, M., Mottaghy, D. (2013): Energetische Einsparpotentiale beim Vereisungsverfahren unter Einfluss einer Grundwasserströmung. In: Österreichische Geotechniktagung mit „Vienna-Terzaghi Lecture“, 24. und 25. Jänner 2013: Tagungsbeiträge / Hrsg.: Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Wien, 2013, S. 313-324, ISBN 978-3-902450-02-9.

Ziegler, M., Schüller, R. (2014): Energetische Einsparpotentiale bei der Herstellung komplizierter Untergeschosskonstruktionen mit Hilfe des Vereisungsverfahrens. Abschlussbericht, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2014 (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 2887), ISBN 978-3-8167-9153-9.

Ziegler, M., Schüller, R. (2014): Energy Saving Potential of Artificial Ground Freezing Applications for the Construction of Complicated Basement Stories. In: Kurzberichte aus der Bauforschung = Building research summaries – 55 (2014), H. 3/4, S. 87-91, ISSN 0177-3550.

Ziegler, M., Schüller, R., Mottaghy, D. (2013): Numerical Simulation of Energy Consumption of Artificial Ground Freezing Applications Subject to Water Seepage. In: Challenges and Innovations in Geotechnics: Proceedings of the 18th International Conference in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2013 (Ed. by Pierre Delage ..., Paris, Presses des Ponts, 2013, Vol. 4, S. 2985-2988, ISBN 978-2-85978-477-5.

Anlagen

A	Input-Dateien für SHEMAT-Suite	161
	Modell-Datei SHEMAT-Suite	161
	„freezrefcap.par“	164
	„freezrefcap.ini“	164
	„capacity.par“	165
	„pipecontrol.par“	165
	„intermittent.par“	166
B	Parameterstudie	167

A Input-Dateien für SHEMAT-Suite

Modell-Datei SHEMAT-Suite

```
Tunnel_0085_V10Montag, 15. Dezember 2014 10:32
1  !=====>>>> INFO
2  # title
3  Tunnel_0085_V10
4
5  # linfo
6  1 0 1 2
7  # runmode
8  0
9  # PROPS=freezing
10 # USER=freezing_calc
11
12 !=====>>>> TIME STEP
13 # timestep control
14 1
15     1.0  1.0  1.0  0.0
16 ! thetaf thetat thetac simtime
17
18 # tunit
19 86400.d0
20
21 # time periods, records=1
22 0.0  220.0  21120  1
23
24 # bc time periods, records=1
25 1 1
26     0.0  0.0  1
27
28 !index period, number of changes
29 !time, alpha, beta: start*beta+alpha
30
31 # monitor, records=35, new=p
32 56 1 1 1
33 57 12 1 1
34 60 22 1 1
35 65 31 1 1
36 71 39 1 1
37 79 45 1 1
38 88 50 1 1
39 98 53 1 1
40 109 54 1 1
41 119 53 1 1
42 129 50 1 1
43 138 45 1 1
44 146 39 1 1
45 152 31 1 1
46 157 22 1 1
47 160 12 1 1
48 161 1 1 1
49 74 1 1 1
50 75 8 1 1
51 77 15 1 1
52 80 21 1 1
53 84 26 1 1
54 89 30 1 1
55 95 33 1 1
56 102 35 1 1
```

-1-

```

Tunnel_0085_V10
Montag, 15. Dezember 2014 10:32

57      109 36 1 1
58      115 35 1 1
59      122 33 1 1
60      128 30 1 1
61      133 26 1 1
62      137 21 1 1
63      140 15 1 1
64      142 8 1 1
65      143 1 1 1
66      15 15 1 1
67
68      # output times, records=17
69      1 10 20 30 40 41 42 43 44 45 50 75 100 125 150 175 200
70
71      # file output: vtk
72
73      !=====>>>>>>> MESH
74      # grid
75      217 86 1
76      # delx
77      2*0.08 2*0.14 25*0.25 2*0.14 8*0.08 1*0.085 9*0.08 1*0.085 14*0.08 1*0.08 1*0.085
5*0.08 1*0.085 11*0.08 1*0.085 15*0.08 1*0.085 16*0.08 1*0.085 15*0.08 1*0.085
11*0.08 1*0.085 5*0.08 1*0.085 1*0.08 14*0.08 2*0.14 45*0.25 2*0.14 2*0.08
78      # dely
79      1*0.0425 1*0.0575 1*0.06 6*0.08 1*0.085 3*0.08 1*0.0775 3*0.08 1*0.085 3*0.08
1*0.0775 3*0.08 1*0.085 11*0.08 1*0.085 5*0.08 1*0.085 14*0.08 2*0.14 22*0.25
2*0.14 2*0.08
80      # delz
81      1*0.1
82
83      !=====>>>>>>> NONLINEAR SOLVER
84      # nlsolve
85      20 0
86
87      !=====>>>>>>> FLOW
88      # lsolvef (linear solver control)
89      1.d-8 64 500
90      # nliterf (nonlinear iteration control)
91      1.0d-6 0.5
92
93      # head bcd, simple=left
94      86*13.5360d0
95      # head bcd, simple=right
96      86*12.5d0
97
98      !=====>>>>>>> TEMPERATURE
99      # lsolvef (linear solver control)
100     1.d-4 64 500
101     # nliterf (nonlinear iteration control)
102     1.0d-02 0.5
103
104     # temp bcd, simple=left
105     86*10.0d0
106     # temp bcd, simple=right
107     86*10.0d0
108

```

```

Tunnel_0085_V10
Montag, 15. Dezember 2014 10:32
109  =====>>>> EPOT
110  # lsolvee (linear solver control)
111  1.d-10 64 500
112  # nlitere (nonlinear iteration control)
113  1.0d-06 1.0
114
115  !=====>>>> UNIT DESCRIPTION
116  # uindex
117  2018*1 1*2 84*1 1*2 3392*1 1*2 72*1 1*2 2542*1 1*2 48*1 1*2 1268*1
118  1*2 16*1 1*2 9214*1
119
120  # units
121  0.41 1.0d 1.0d 4.4D-11 1.0d-8 1.0d 1.0d 3.359 0.000000D-6 2000000.0
122  10.d0 0.0 0.0
123  1.00D-30 1.0d 1.0d 1.0D-30 1.0d-8 1.0d 1.0d 50.000 0.000000D-6 3611000.0
124  10.d0 0.0 0.0
125  0.41 1.0d 1.0d 1.0D-30 1.0d-8 1.0d 1.0d 3.359 0.000000D-6 2000000.0
126  10.d0 0.0 0.0
127  1.00D-30 1.0d 1.0d 1.0D-30 1.0d-8 1.0d 1.0d 380.000 0.000000D-6
128  3449600.0 10.d0 0.0 0.0
129
130  !=====>>>> INITIAL VALUES
131  # head init, TXT=Tunnel_0085_V10_stst_final.txt
132  # temp init, TXT=Tunnel_0085_V10_stst_final.txt
133  # pres init, TXT=Tunnel_0085_V10_stst_final.txt
134
135  !=====>>>> GENERAL
136  # grav
137  9.80665
138  # rhocm
139  2000000.0 1.000 0.005301 0.0000
140  # liq init
141  2018*-0.04d0 1*-50.0d0 84*-0.04d0 1*-50.0d0 3392*-0.04d0 1*-50.0d0
142  72*-0.04d0 1*-50.0d0 2542*-0.04d0 1*-50.0d0 48*-0.04d0 1*-50.0d0
143  1268*-0.04d0 1*-50.0d0 16*-0.04d0 1*-50.0d0 9214*-0.04d0
144
145  # rhod
146  18662*1600.d0
147  # freeze_a
148  18662*0.078d0
149  # freeze_b
150  18662*-5.565d0
151  # k_freeze
152  18662*10
153  # rhocm_freeze
154  1.000 0.005301 0.0000
155  1.000 5500.000 0.0000
156  1.000 2000.000 -17.0000
157  # temp bcd, records=8
158  66 10 1 -35.d0 1
159  72 26 1 -35.d0 1
160  84 38 1 -35.d0 1
161  100 44 1 -35.d0 1
162  117 44 1 -35.d0 1
163  133 38 1 -35.d0 1
164  145 26 1 -35.d0 1
165  151 10 1 -35.d0 1

```

„freezrefcap.par“

```

Tunnel_0085_V10                                freezrefcap.par
1  # npipe
2  8
3
4  ! Radius Innenrohr (innen), Radius Innenrohr (außen), Radius Außenrohr (innen),
5  ! Radius Außenrohr (außen), Bohrlochradius,
6  ! WLF Innenrohr, WLF Außenrohr, WLF Hinterfüllung, Tiefe
7  # pipe_values
8  0.0255 0.0275 0.052 0.054 0.054 0.35 50 50 10
9
10 ! Lage des Gefrierrohrs (n) im Gitter (ipipe jpipe)
11 # pipe_location
12 42 9
13 48 25
14 60 37
15 76 43
16 93 43
17 109 37
18 121 25
19 127 9
20
21 # pipe_grid_dz
22 0.625
23
24 # z_oben
25 3.125
26
27 # fluid_type
28 29

```

„freezrefcap.ini“

```

Tunnel_0085_V10                                freezrefcap.ini
1  ! modtype: 1- Vorlauftemperatur fest, 2- Kühlleistung fest
2  # modswitch
3  1
4
5  ! Anzahl der Perioden
6  # iper
7  2
8
9  # temp_start
10 -30
11
12 ! Dauer der Periode (h); Flag: 1 an, 0 aus;
13 ! Vorlauftemp. (°C), Leistung (kW); Durchfluss (m^3/h)
14 # data
15 96.0 1 -35 20.0
16 2304.0 1 -35 20.0

```

„capacity.par“

Tunnel_0085_V10	capacity.par
1	# cap, records=8
2	66 10 1 66 10 1
3	72 26 1 72 26 1
4	84 38 1 84 38 1
5	100 44 1 100 44 1
6	117 44 1 117 44 1
7	133 38 1 133 38 1
8	145 26 1 145 26 1
9	151 10 1 151 10 1

„pipecontrol.par“

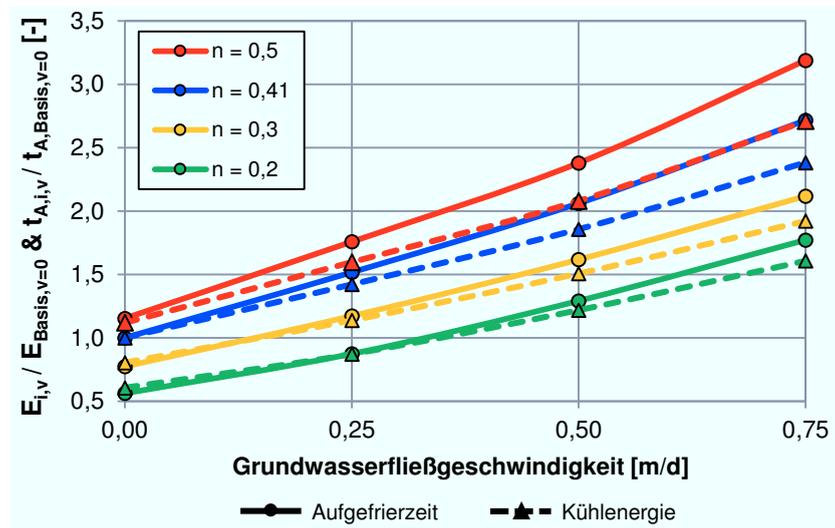
Tunnel_0085_VK1_V10	pipecontrol.par
1	! Zeile der "#temp bcd"; 0 oder 1 für inaktiv oder aktiv; Gesamtzeit
2	# pipecontrol, records=9
3	1 1 0
4	2 1 0
5	3 1 0
6	4 1 0
7	5 1 0
8	6 1 0
9	7 1 0
10	8 1 0
11	9 0 53.844

„intermittent.par“

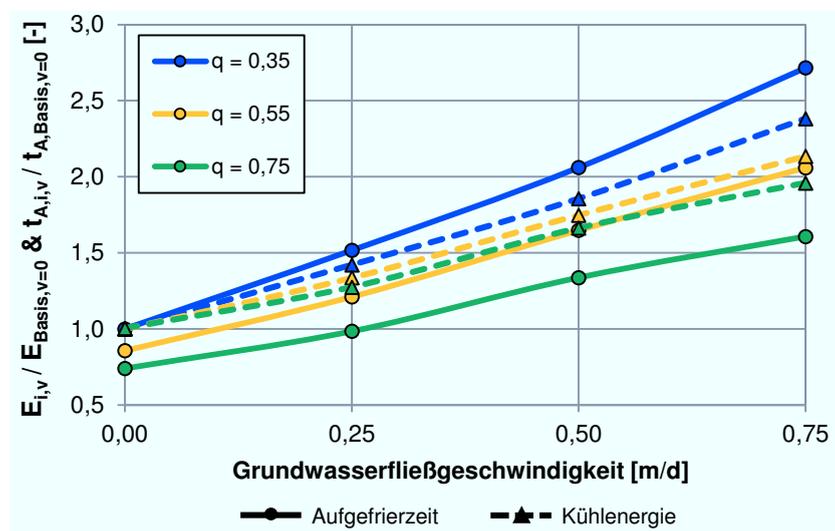
```
Tunnel_0085_V10                                intermittent.par
1  # min_max_temp
2  -3.0D0 -1.5D0
3
4  # sensors, records=34
5  56 1 1 1
6  57 12 1 1
7  60 22 1 1
8  65 31 1 2
9  71 39 1 2
10 79 45 1 2
11 88 50 1 2
12 98 53 1 3
13 109 54 1 3
14 119 53 1 4
15 129 50 1 4
16 138 45 1 4
17 146 39 1 4
18 152 31 1 5
19 157 22 1 5
20 160 12 1 5
21 161 1 1 5
22 74 1 1 1
23 75 8 1 1
24 77 15 1 1
25 80 21 1 2
26 84 26 1 2
27 89 30 1 2
28 95 33 1 2
29 102 35 1 3
30 109 36 1 3
31 115 35 1 4
32 122 33 1 4
33 128 30 1 4
34 133 26 1 4
35 137 21 1 5
36 140 15 1 5
37 142 8 1 5
38 143 1 1 5
39
40 # pipegroups, records=5
41 1 1
42 2 3
43 4 4
44 5 6
45 7 8
```

B Parameterstudie

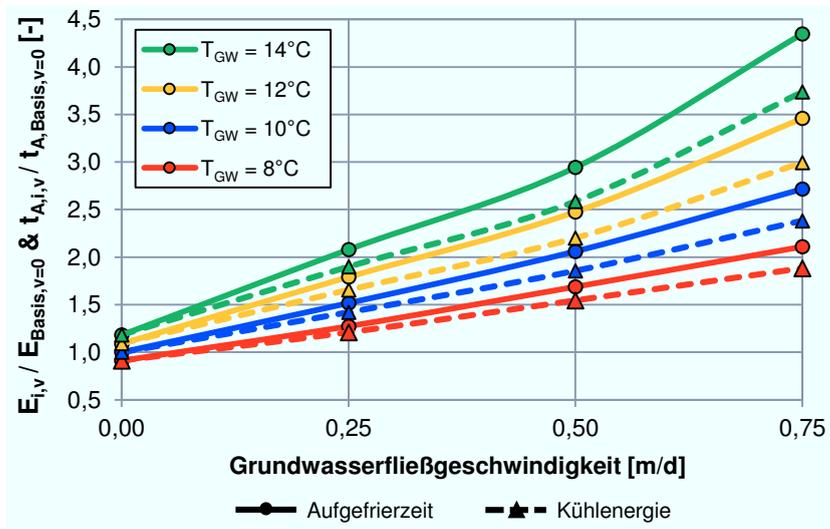
Einfluss des Porenanteils auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $n = 0,41$.



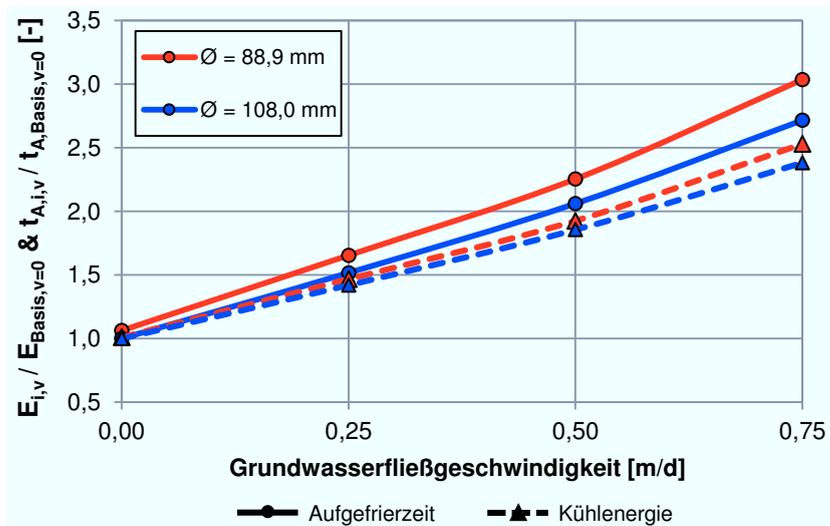
Einfluss des Quarzgehalts auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $q = 0,35$.



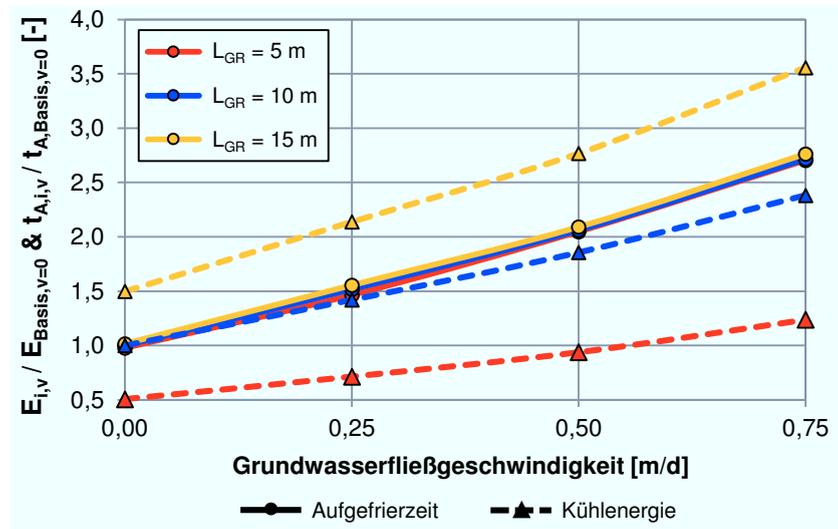
Einfluss der Grundwassertemperatur auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $T_{GW} = 10^\circ\text{C}$.



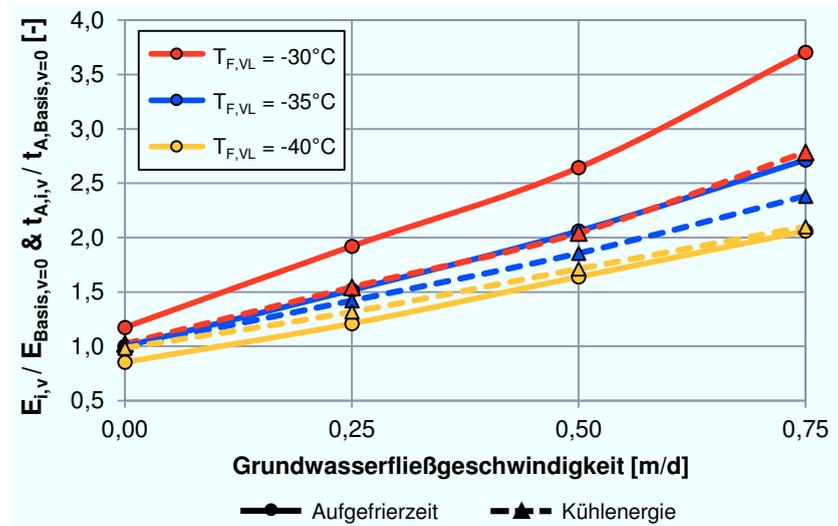
Einfluss der Gefrierrohrgeometrie auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $d_{A,a} = 108$ mm.



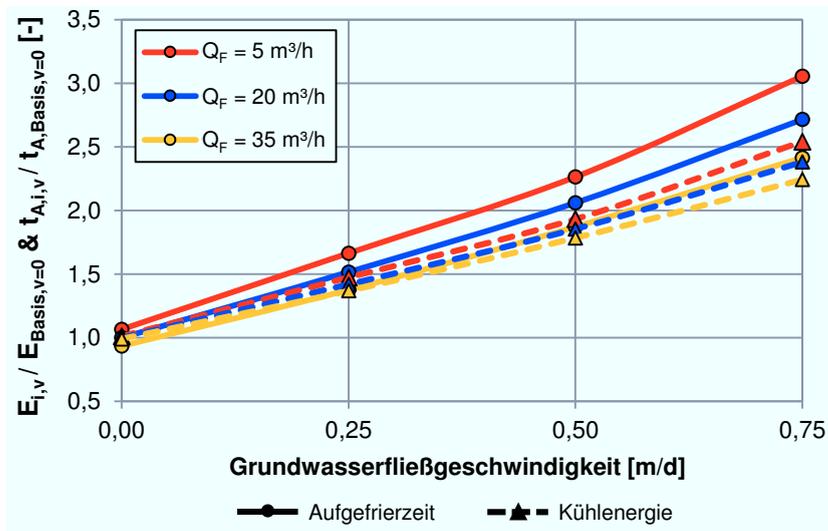
Einfluss der Länge des Gefrierrohrs auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $L_{GR} = 10$ m.



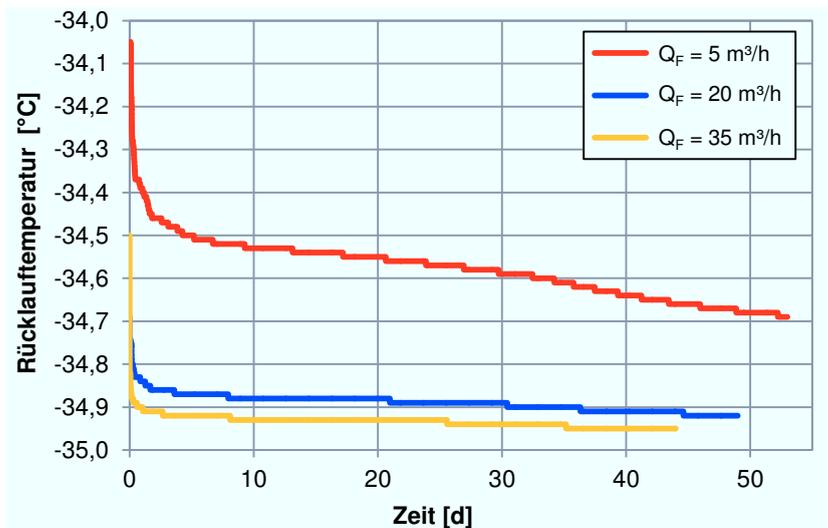
Einfluss der Vorlauftemperatur auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $T_{F,VL} = -35^\circ\text{C}$.



Einfluss des Durchflusses auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0$ m/d und $Q_F = 20$ m³/h.



Rücklauftemperatur in Abhängigkeit des Durchflusses für eine Grundwasserfließgeschwindigkeit von $v_f = 0,5$ m/d.



Einfluss des CaCl_2 -Konzentration des Kälteträgers auf die Kühlenergie und die Aufgefrierzeit – normiert auf $v_f = 0 \text{ m/d}$ und eine CaCl_2 -Konzentration von 29,9 %

