

## Kurzbericht

Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-11.5

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

Kurztitel: „Energetische Einsparpotentiale beim Vereisungsverfahren“

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

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

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Rebecca Schüller

Weitere beteiligte Forschungseinrichtungen:

Geophysica Beratungsgesellschaft mbH  
Lütticher Str. 32  
52064 Aachen

Mitfinanzierende Stellen:

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

Züblin Spezialtiefbau GmbH  
Bereich Nord  
Bessemersstraße 42b  
12103 Berlin

Deilmann-Haniel Shaft Sinking GmbH  
Haustenbecke 1  
44319 Dortmund

Projektdaten:

Gesamtkosten: 99.600,- Euro  
Anteil Bundeszuschuss: 62.600,- Euro  
Projektlaufzeit: 01.08.2011 – 15.09.2013

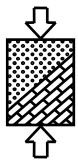
Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

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

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor

---

Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen und Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau



## **1 Ziel der Forschungsaufgabe**

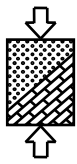
Das Vereisungsverfahren im Allgemeinen ist eine Bauhilfsmaßnahme, die die Herstellung eines Frostkörpers mit statisch tragender und abdichtender Funktion unter komplizierten geologischen sowie hydrologischen Randbedingungen ermöglicht. Dabei sind nicht nur die Flexibilität und Reversibilität des Verfahrens als Vorteile zu betrachten, sondern auch die zuverlässige Durchführung und Überwachung. Daher wird das Vereisungsverfahren mit Sole als Kälteträger mittlerweile nicht mehr nur im Bereich des Tunnelbaus, sondern auch bei der Sicherung von komplizierten Baugruben für Hoch- und Ingenieurbauwerke eingesetzt. Ein Ausschlusskriterium für den planmäßigen Einsatz stellen trotzdem oftmals der falsch eingeschätzte Energieverbrauch und die damit verbundenen Kosten für die gesamte Vereisungsmaßnahme dar, die oftmals insbesondere bei einer vorhandenen Grundwasserströmung überschätzt wird.

Das Ziel dieses Forschungsprojekts ist die zeitliche und energetische Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Vorfeld der Ausführung, um den planmäßigen Einsatz durch eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu steigern. Dazu ist die erforderliche Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme nicht nur für die Aufgefrierphase sondern vor allem für die Erhaltungsphase zu bestimmen, da diese einen Großteil des Gesamtenergieverbrauchs ausmacht. Da die erforderliche Kühlleistung in der Aufgefrierphase ihren Maximalwert erreicht, muss die Gefrieranlage bzw. das Kühlaggregat für diese Kühlleistung dimensioniert werden. Die erforderliche Kühlleistung in der Haltephase ist hingegen wichtig für die Vorhersage des gesamten Energieverbrauchs einer Vereisungsmaßnahme. Als Ergebnis des Forschungsprojekts soll es möglich sein, Vereisungsmaßnahmen im Vorfeld der Ausführung nicht nur im Hinblick auf die Aufgefrierzeit, sondern auch auf den Energieverbrauch zu simulieren und zu optimieren.

## **2 Durchführung der Forschungsaufgabe**

Zur Abschätzung der erforderlichen Kühlleistung während der Aufgefrier- und Erhaltungsphase wurde in einem ersten Schritt eine Analyse des Status Quo durchgeführt. Dabei wurden die bisherigen Richtwerte und Berechnungsansätze zur Abschätzung der erforderlichen Kühlleistung bzw. des Energieverbrauchs einer Vereisungsmaßnahme zusammengefasst. Außerdem wurde diese Analyse durch eine Auswertung aktueller Bauprojekte ergänzt, die ebenfalls grobe Anhaltswerte für die erforderliche Kühlleistung lieferte.

Um die erforderliche Kühlleistung während der Aufgefrier- und Erhaltungsphase realitätsnah bestimmen zu können, wurde das vorhandene Programmsystem SHEMAT erweitert. Es wurden ein vereinfachtes und ein detailliertes numerisches Lösungsmodell zur Bestimmung der Kühlleistung erarbeitet und in das vorhandene Programmsystem implementiert. Die Entwicklung des detaillierten Lösungsmodells wurde in Zusammenarbeit mit der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH durchgeführt. Außerdem wurden die beiden Lösungsmodelle so erweitert, dass eine Simulation unterschiedlicher Betriebsvarianten, wie beispielsweise des intermittierenden Betriebs, in der Erhaltungsphase möglich ist. Zur Verifizierung der beiden



Lösungsmodelle wurden sowohl ein Modellversuch, der an der ETH-Zürich durchgeführt wurde, als auch ein reales Baustellenprojekt, die Querschlagvereisung am Statentunnel in Rotterdam, nachgerechnet.

Darauf aufbauend wurden die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Aufgefrierzeit und die Kühlleistung im Rahmen einer Parameterstudie ermittelt. Weiterhin wurden Optimierungsvarianten für die Vereisung einer fiktiven Baugrubenwand simuliert und die Kühlleistung sowohl für die Aufgefrier- als auch für die Erhaltungsphase bestimmt. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Betriebsvarianten in der Erhaltungsphase im Hinblick auf die Einsparungen der erforderlichen Kühlenergie untersucht und bewertet. Abschließend wurden die Optimierungsvarianten in der Aufgefrier- und Erhaltungsphase im Rahmen einer vereinfachten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bewertet.

### 3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten zusammenfassend dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung sämtlicher Untersuchungen und eine umfassende Aufbereitung der Ergebnisse kann dem Abschlussbericht entnommen werden.

#### 3.1 Status Quo – Kühlleistung bei Vereisungsmaßnahmen

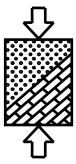
Die Kühlleistung hängt von vielen Einflussfaktoren wie beispielsweise den thermischen und physikalischen Bodeneigenschaften, dem eingesetzten Kältemittel sowie den Grundwasserverhältnissen ab. In der Literatur sind verschiedene meist aus dem Gefrierschachtbau stammende Richtwerte und Ansätze zur Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme dokumentiert. In Tabelle 3.1 sind beispielhaft einige Richtwerte verschiedener Autoren zusammengefasst.

**Tabelle 3.1 Zusammenfassung der Richtwerte der erforderlichen Kühlleistung**

Quelle	Soletemperatur [°C]	Kühlleistung pro Meter Gefrierrohr [kW/m]	Kühlleistung pro Gefrierrohroberfläche [kW/m²]
Ständer (1967)	-25	0,116 – 0,186	
Braun et al. (1979)	-23	~ 0,065 (Ø 10,8 cm) bis zu ~0,13	mind. 0,192 bis zu 0,384
Andersland & Ladanyi (2004)	-30	0,1 – 0,23	
Harris (1995)	-30	0,464	

Die Richtwerte vernachlässigen einen Großteil der beschriebenen Einflussfaktoren und streuen zudem noch stark in einem Bereich von 0,065 kW/m bis 0,464 kW/m. Es wird aber deutlich, dass die aus dem Schachtbau stammenden Richtwerte der ersten drei Autoren deutlich geringere Werte aufweisen als der Richtwert von Harris (1995) aus dem Tunnelbau. Eine Übertragung der Richtwerte aus dem Schachtbau auf Vereisungsmaßnahmen im Bereich des Hoch- und Tunnelbaus ist folglich nicht möglich.

Auch durch eine Auswertung aktueller Bauprojekte kann keine klare Abhängigkeit von spezifischen Kenngrößen wie der Bodenart oder einer Grundwasserströmung ermittelt werden. Abbildung 3.1 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse der mittleren Kühlleistungen



während der Aufgefrierphase. Bei der Auswertung wurde eine arithmetische Mittelwertbildung ohne eine Gewichtung der verschiedenen Maßnahmen über die Bauzeit zugrunde gelegt. Der Mittelwert der Kühlleistung liegt hier bei 0,29 kW/m.

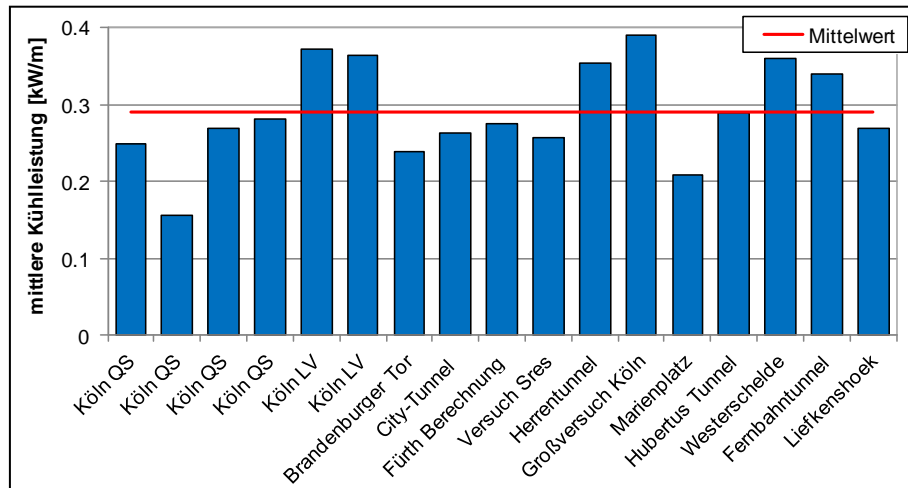


Abbildung 3.1 Vergleich der mittleren erforderlichen Kühlleistungen in der Aufgefrierphase

### 3.2 Numerische Lösungsmodelle zur Bestimmung der Kühlleistung

Das Finite-Differenzen-Programm SHEMAT (Clauser 2003) wurde ursprünglich am Lehrstuhl für Angewandte Geophysik von einer Gruppe um Prof. Clauser entwickelt, um geothermale Transportvorgänge im Tiefengestein unter hohen Drücken abzubilden. Durch Anpassungen von Mottaghy und Rath (2006) und Baier (2009) wurde das „freezing“-Modul entwickelt, mit dem der Gefrierprozess von Vereisungsmaßnahmen realitätsnah ermittelt werden kann.

Zur realitätsnahen Ermittlung der erforderlichen Kühlleistung während der Aufgefrier- und Erhaltungsphase wurde das Programmsystem SHEMAT um zwei numerische Lösungsmodelle erweitert. Zunächst wurde eine vereinfachte Kühlleistungsermittlung in das „freezing“-Modul implementiert, bei der die in die Gefrierrohrzellen eingetragenen Wärmeströme aufsummiert werden. Das Gefrierrohr wird dabei als Dirichlet-Randbedingung mit festgelegter Temperatur definiert.

Für eine detaillierte Ermittlung der erforderlichen Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme bedarf es einer realitätsnahen Abbildung der Strömungs- und Wärmetransportprozesse innerhalb des Gefrierrohrs mit Hilfe numerischer Simulationen. Um enorme Modellgrößen und Rechenzeiten zu verhindern, wurde das separate „freezrefcap“-Modul zur Abbildung der Wärmetransportprozesse innerhalb des Gefrierrohrs in Zusammenarbeit mit der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH entwickelt. Basierend auf der Kelvin'schen Linienquellentheorie wird das Gefrierrohr als eindimensionale Linienquelle in SHEMAT abgebildet. Die Berechnung der horizontalen Wärmetransportprozesse im Gefrierrohr wird über das Konzept der thermischen Widerstände nach Hellström (1991) im „freezrefcap“-Modul realisiert. Die beiden Berechnungen sind an zwei Schnittstellen gekoppelt (s. Abbildung 3.2). Zum einen wird die in SHEMAT berechnete Bodentemperatur als Dirichlet-Randbedingung an das „freezrefcap“-Modul übergeben. Auf dieser Grundlage wird im „freezrefcap“-Modul ein volumetrischer Wärmestrom  $\dot{q}_t$  berechnet, der an die Linienquelle in SHEMAT übergeben wird und dort wiederum zu einer Veränderung der Bodentemperatur führt.

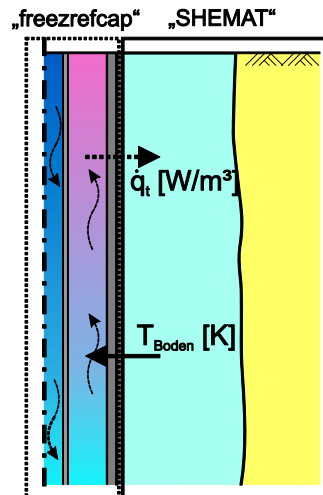
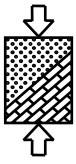


Abbildung 3.2 Kopplung zwischen dem „freezrefcap“-Modul und SHEMAT

Die Kühlleistung wird letztlich im „freezrefcap“-Modul aus der ermittelten Temperaturdifferenz von Vor- und Rücklauf des Kälte-trägers ( $T_{F,VL} - T_{F,RL}$ ), dem Durchfluss  $Q_F$  und der temperaturabhängigen berechneten volumetrischen Wärmekapazität des Fluids  $c_{v,F}$  bestimmt.

$$P = c_{v,F} \cdot Q_F \cdot (T_{F,VL} - T_{F,RL}) \quad (3-1)$$

Die Erweiterung der beiden Lösungsmodelle um die Simulation eines temperaturgesteuerten intermittierenden Betriebs in der Erhaltungsphase wurde ebenfalls realisiert.

### 3.3 Verifikation der Programmsysteme

Durch die Nachrechnung eines Modellversuchs der ETH-Zürich wurden die beiden Lösungsmodelle zur Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung verifiziert. Bei dem Modellversuch wurden drei Gefrierlanzen in eine wasserdichte und isolierte PVC-Wanne eingebaut. Bei dem Versuch konnten unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten eingestellt werden (Sres 2010).

Die Ergebnisse der Nachrechnung zweier Versuche, mit und ohne Grundwasserströmung, mit beiden Modulen haben eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Temperaturen im Boden und den Ergebnissen der Simulation gezeigt. Die Ergebnisse der Kühlleistung sind in Abbildung 3.3 exemplarisch für einen Versuch ohne Grundwasserströmung dargestellt. Die Messwerte (rot) werden direkt sowohl mit der vereinfachten Kühlleistung des „freezing“-Moduls (blau) als auch mit der detaillierten Kühlleistung des „freezrefcap“-Moduls (grün) verglichen. Es ist gut zu erkennen, dass die mit dem „freezrefcap“-Modul bestimmte Kühlleistung nahezu identisch mit den Messwerten des Versuchs verläuft. Die Kühlleistung des „freezing“-Moduls unterschätzt die Messwerte um eine nahezu konstante Differenz. Der Grund für diese Unterschätzung bzw. für die Differenz zwischen den beiden Modulen liegt in der Vernachlässigung der Wärmeübergänge innerhalb des Gefrierrohrs im „freezing“-Modul.

Folglich sind eine realitätsnahe Abbildung des Gefrierverhaltens im Boden sowie eine hinreichend genaue Bestimmung der notwendigen Kühlleistung mit beiden Modulen möglich.

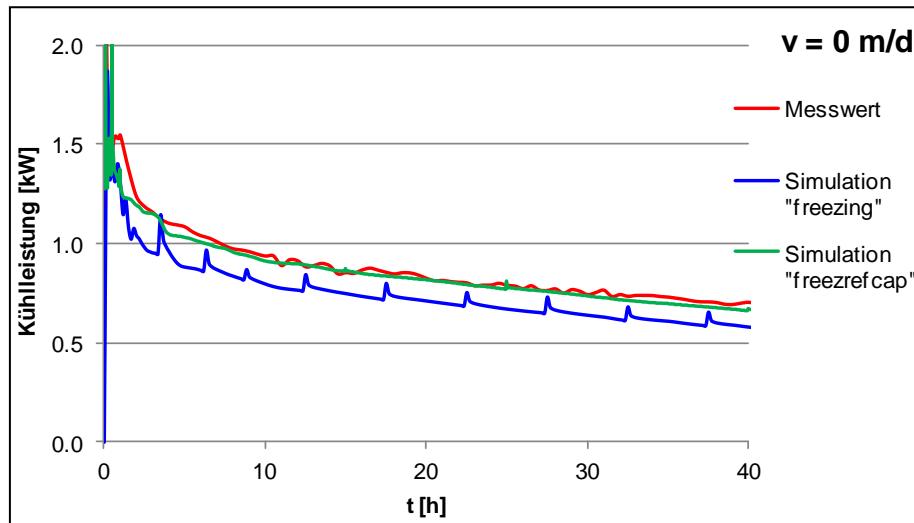
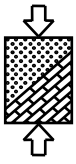


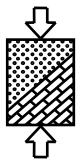
Abbildung 3.3 Vergleich der gemessenen und simulierten Kühlleistungen ohne Strömung

Weiterhin wurde der Versuch unternommen, eine reale Baumaßnahme zur Herstellung von Querschlägen im Zuge des Baus des Statentunnels in Rotterdam mit dem detaillierten „freezrefcap“-Modul nachzurechnen. Die Ergebnisse zeigten, dass noch Optimierungsbedarf für das Lösungsmodell besteht. Dieses muss insbesondere um die Eingabe einer variablen Gefrierrohrlänge für jedes Gefrierrohr erweitert werden. Außerdem sollte die Modellierung geneigter Gefrierrohre implementiert werden, die in der Praxis den Regelfall darstellen.

### 3.4 Parameterstudie für eine angeströmten Baugrubenwand

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine Parameterstudie zur Ermittlung der maßgebenden Einflussfaktoren auf die Aufgefrierzeit und insbesondere auf die Kühlleistung einer Vereisungsmaßnahme durchgeführt. Dabei ermöglichte das „freezrefcap“-Modul nicht nur die Variation relevanter Bodenparameter, sondern darüber hinaus auch die Variation von Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kältekreislaufs. Für das System einer mit 5 Gefrierrohren aufzugefrierenden, angeströmten Baugrubenwand wurden der Porenanteil, der Quarzgehalt, die Grundwassertemperatur und die Grundwasserfließgeschwindigkeit als Bodenparameter variiert. Bei den Gefrierrohreigenschaften wurden die Wärmeleitfähigkeit des Steigrohrs, die Länge und die Geometrie des Gefrierrohrs variiert. Weiterhin wurden Parameter des Kälte-trägerkreislaufs wie die Vorlauftemperatur, die verwendete Calciumchloridsole und der Durchfluss variiert.

Die numerischen Simulationen haben gezeigt, dass die größte Beeinflussung des Gefrierverhaltens und der erforderlichen Kühlenergie in jedem Fall aus der vorliegenden Grundwasserströmung resultiert. Generell zeigen alle Bodenparameter eine deutliche Beeinflussung der Aufgefrierzeit und der Kühlenergie. Dabei ist aber zu beachten, dass diese Bodenparameter in der Realität nicht beeinflussbar sind, aber zur realistischen Planung der Vereisungsmaßnahme unbedingt zutreffend zu ermitteln sind. Die Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälte-trägerkreislaufs weisen eine deutlich geringere Beeinflussung der Aufgefrierzeit und Kühlenergie als die Bodenparameter auf. Im Gegensatz zu den Bodenparametern können diese aber aktiv gesteuert werden und bieten somit trotzdem gute Einsparpotentiale. Die größten Einsparungen im Hinblick auf die Aufgefrierzeit



und die Kühlenergie können dabei durch die richtige Wahl der Vorlauftemperatur und des Durchflusses erzielt werden.

### 3.5 Energetische Optimierung von Vereisungsmaßnahmen

Die Ergebnisse der Parameterstudie haben gezeigt, dass die Grundwasserfließgeschwindigkeit nicht nur die Aufgefrierzeit sondern auch die erforderliche Kühlenergie einer Vereisungsmaßnahme maßgeblich beeinflusst. In früheren Untersuchungen konnten bereits deutliche Verkürzungen der Aufgefrierzeit durch strömungsangepasste Gefrierrohranordnungen erzielt werden. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden die maßgeblichen Optimierungssysteme (Ziegler et al. 2010) im Hinblick auf die erforderliche Kühlenergie in der Aufgefrierphase untersucht. Außerdem wurden die Untersuchungen der Kühlenergie auf die Erhaltungsphase erweitert. Für diese wurden unterschiedliche Steuerungsvarianten und deren Auswirkung auf die erforderliche Kühlleistung untersucht.

Das zugrunde liegende Ausgangsmodell einer angeströmten Baugrubenwand mit 9 Gefrierrohren, die einen Abstand von 0,8 m aufweisen, ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

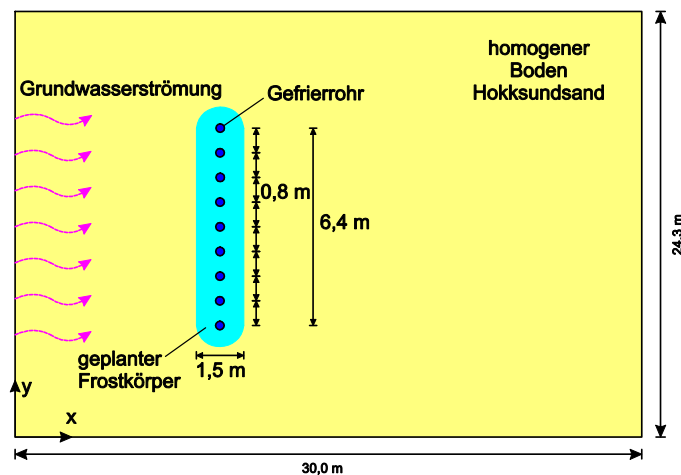
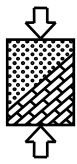


Abbildung 3.4 Basissystem der Baugrubenwand zur Optimierung der Kühlleistung

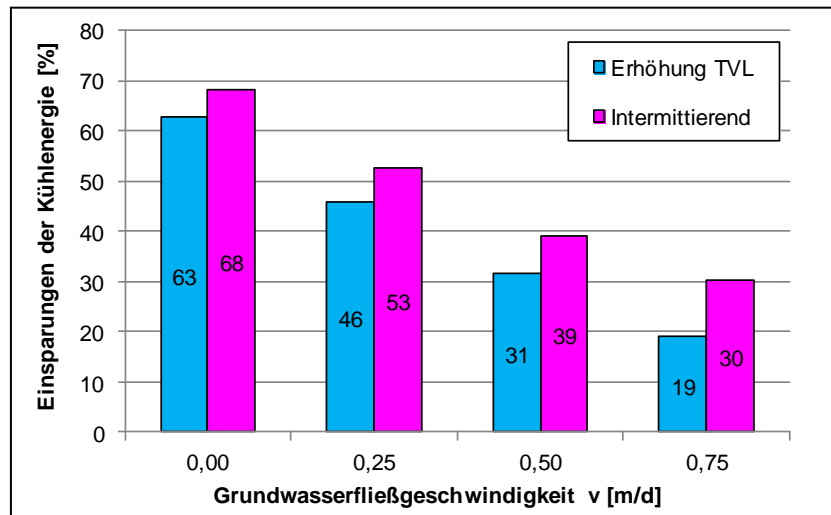
Die Vorkühlung, die sich als effektivste Optimierungsvariante der strömungsangepassten Gefrierrohranordnung herausgestellt hat (Ziegler et al. 2010), wurde im Hinblick auf die erforderliche Kühlleistung in der Aufgefrierphase untersucht. Im Ergebnis bleibt festzuhalten, dass deutliche Einsparungen bei der Aufgefrierzeit erreicht werden können, die mit der Anzahl der zusätzlich eingebrachten Gefrierrohre korrelieren. Im Hinblick auf die Kühlenergie ist kein eindeutiger Zusammenhang ersichtlich, so dass stets eine systemspezifische numerische Untersuchung erforderlich wird. Eine Erhöhung der zusätzlichen Gefrierrohre bedeutet nicht für alle Systeme eine Verringerung der erforderlichen Kühlleistung.

Da die Erhaltungsphase einen Großteil des Gesamtenergieverbrauchs einer Vereisungsmaßnahme bestimmt, wurde weiterhin eine Optimierung der Erhaltungsphase numerisch untersucht. Das Hauptziel ist dabei die Erhaltung des statisch erforderlichen Frostkörpers unter möglichst geringem Energieeinsatz. Darüber hinaus soll ein weiteres unnötiges Anwachsen des Frostkörpers weitgehend verhindert werden, um schädliche Frosthebungen zu verhindern bzw. zu reduzieren. Um diese Ziele zu erreichen, stehen unterschiedliche Betriebsvarianten zur Verfügung. Dazu zählen zum einen der Ansatz einer höheren



Vorlauftemperatur, der einer verminderten Kühlleistung entspricht, und zum anderen der intermittierende Betrieb des Kälteaggregats. Der intermittierende Betrieb ist dabei durch eine automatisierte temperaturgesteuerte Aktivierung bzw. Deaktivierung von Gefrierrohrgruppen gekennzeichnet.

Die möglichen Einsparungen der Kühlenergie für die verschiedenen Betriebsvarianten sind in Abbildung 3.5 für das Basissystem (s. Abbildung 3.4) bezogen auf einen Betrieb ohne Anpassung in der Erhaltungsphase dargestellt.



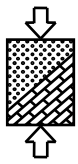
**Abbildung 3.5** Energieeinsparungen verschiedener Betriebsvarianten in der Erhaltungsphase für das Basissystem in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit

Es wird deutlich, dass deutliche Einsparungen der Kühlenergie erreicht werden können, die aufgrund des erhöhten konvektiven Wärmeeintrags mit steigender Fließgeschwindigkeit aber sinken. Der Vergleich der beiden Betriebsvarianten zeigt weiterhin, dass der intermittierende Betrieb die effektivere Variante darstellt, da vor allem bei größeren Fließgeschwindigkeiten noch deutliche Einsparungen erreicht werden können. Der Vorteil des intermittierenden Betriebs liegt dabei in der gezielten Steuerung einzelner Rohrgruppen, die den Schwachstellen des Systems angepasst werden können. Ein zusätzlicher Vorteil des intermittierenden Betriebs ist die wirkungsvolle Kontrolle des Frostkörperwachstums.

## 4 Fazit

Die im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Weiterentwicklungen des Programmsystems SHEMAT zur detaillierten und realitätsnahen Ermittlung der erforderlichen Kühlleistung von Vereisungsmaßnahmen wurden durch die Nachrechnung eines Modellversuchs verifiziert. Darauf aufbauend wurde eine Parameterstudie durchgeführt, mit der die Grundwasserfließgeschwindigkeit als maßgebender Einflussparameter, sowohl für die Aufgefrierzeit als auch für die Kühlleistung, identifiziert wurde. Die numerischen Simulationen zur energetischen Optimierung einer Vereisungsmaßnahme haben ergeben, dass durch eine strömungsangepasste Gefrierrohranordnung eine deutliche Verringerung der Aufgefrierdauer und der Kühlenergie in der Aufgefrierphase erreicht werden kann. Durch angepasste Betriebsvarianten in der Erhaltungsphase lassen sich weitere deutliche Einsparpotentiale realisieren. Der intermittierende Betrieb stellt in diesem





Zusammenhang die effektivste Variante dar, mit der in Abhängigkeit der Grundwassersituation bis zu 2/3 der Kühlenergie in der Erhaltungsphase eingespart werden können.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass das vorliegende Programmsystem prinzipiell die numerische Simulation von Vereisungsmaßnahmen im Vorfeld einer Baumaßnahme sowie deren zeitliche und energetische Optimierung sowohl für die Aufgefrier- als auch für die Erhaltungsphase ermöglicht.

## **5 Literaturverzeichnis**

- Andersland, O.B.; Ladanyi, B. (2004): Frozen Ground Engineering. American Society of Civil Engineers, John Wiley & Sons.
- Baier, Ch. (2009): Thermisch-hydraulische Simulationen zur Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau unter Einfluss einer Grundwasserströmung. Dissertation, Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen.
- Braun, B.; Shuster, J.; Burnham, E. (1979): Ground freezing for Support of Open Excavations. Engineering Geology 13, pp. 429-453.
- Clauser, C. (2003): Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers – SHEMAT and Processing SHEMAT. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Harris, J. S. (1995): Ground freezing in practice. Thomas Telford, London.
- Hellström, G. (1991): Ground heat Storage - Thermal Analyses of Duct Storage Systems. Ph.D. thesis; Theory. Dep. Of Mathematical Physics, University of Lund.
- Mottaghy, D.; Rath, V. (2006): Latent heat effects in subsurface modelling and their impact on palaeotemperature reconstructions. Geophysical Journal International 164, pp. 234-245.
- Sres, A. (2010): Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur künstlichen Bodenvereisung im strömenden Grundwasser. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik (IGT) der ETH Zürich, Band 234.
- Ständer, W. (1967): Das Gefrierverfahren im Schacht-, Grund- und Tunnelbau. Handbuch der Kältetechnik, Band 12, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York.
- Ziegler, M.; Aulbach, B.; Baier, Ch. (2010): Erweiterung des Vereisungsverfahrens zur umweltverträglichen Herstellung komplizierter Untergeschosskonstruktionen bei strömendem Grundwasser. Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart.