

Kurzbericht

Aktenkennzeichen: Z6 – 10.08.18.7-07.31

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

Kurztitel: „Erweiterung des Vereisungsverfahrens“

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

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

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

Weitere beteiligte Forschungseinrichtungen:

Geophysica Beratungsgesellschaft mbH
Lütticherstraße 32
52064 Aachen

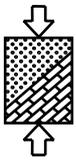
Phrealog
Hauptstraße 17-19
55120 Mainz

Mitfinanzierende Stelle:

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

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

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.



1 Ziel der Forschungsaufgabe

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

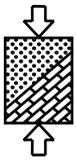
Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, Optimierungsmöglichkeiten zu finden, um den Anwendungsbereich des Vereisungsverfahrens auch für den Bau von Untergeschossen bzw. komplizierten Zugangsbauwerken z. B. bei unterirdischen Haltestellen oder Tiefgaragen zu erweitern. Besondere Beachtung sollte dabei die realitätsnahe Erfassung einer Grundwasserströmung finden, da diese erhebliche Auswirkungen auf die Sicherheit, Dauer und Kosten einer Gefriermaßnahme hat. Dies setzt sowohl eine fundierte Erkundung der Grundwasserverhältnisse, die bei vielen Projekten derzeit oft nur unzureichend erfasst werden, als auch die rechnerische Erfassung der Strömung unter Beachtung des wachsenden Frostkörpers mittels numerischer Simulationen voraus. Als Ergebnis der Untersuchungen sollten Empfehlungen für Vereisungskonzepte im Rahmen der Herstellung von Hochbauten unter Berücksichtigung einer Grundwasserströmung angegeben werden.

2 Durchführung der Forschungsaufgabe

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden zahlreiche numerische Simulationen mit dem Programmsystem SHEMAT durchgeführt. Das ursprünglich für die Beschreibung von Permafrostproblemen konzipierte Programm wurde vorab in Zusammenarbeit mit der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH weiterentwickelt und an die Randbedingungen der Baugrundvereisung angepasst. Die Verifikation des neu implementierten Phasenwechselmodells auf der Grundlage des ungefrorenen Wasseranteils erfolgte durch die Nachrechnung von Modellversuchen mit und ohne Grundwasserströmung.

Hierauf aufbauend wurde zunächst eine Parameterstudie durchgeführt und der Einfluss wesentlicher Eingangsparameter untersucht. Schließlich wurden verschiedene Systeme hinsichtlich der Möglichkeit untersucht, wie die Aufgefrierzeit der betrachteten Vereisungsmaßnahmen durch Umpositionierung von vorhandenen oder zusätzlichen Gefrierrohren reduziert werden kann.

Weiterhin wurde eine konkrete Baumaßnahme nachgerechnet. Hierzu fand im Vorfeld eine umfangreiche Erkundung der Grundwassersituation statt, um im



Rahmen der Simulationen eine möglichst realitätsnahe Berücksichtigung der Grundwasserströmung zu ermöglichen. Die Erkundungsmaßnahmen beinhalteten neben klassischen Methoden wie der Durchführung eines Pumpversuchs, der Auswertung von Pegelständen und der numerischen Simulation mit einem Strömungsprogramm auch den Einsatz des Grundwasser-Fluss-Visualisierungs-Verfahrens (GFV-Verfahren). Dieses Verfahren des Projektpartners Phrealog beruht auf der Beobachtung des Drifts der Schwebeteilchen im Grundwasser, woraus auf die Grundwasserfließgeschwindigkeit und -richtung geschlossen werden kann.

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

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

3.1 Parameterstudie für eine angeströmte Wand

Die Parameterstudie zur Untersuchung der Einflüsse verschiedener Kennwerte und Randbedingungen erfolgte am Beispiel einer angeströmten Wand. Der Vergleich der verschiedenen Systeme erfolgte dabei über den Zeitpunkt des Frostkörperschlusses.

Das der Parameterstudie zugrundeliegende Ausgangssystem einer angeströmten Wand ist in Abbildung 1 dargestellt.

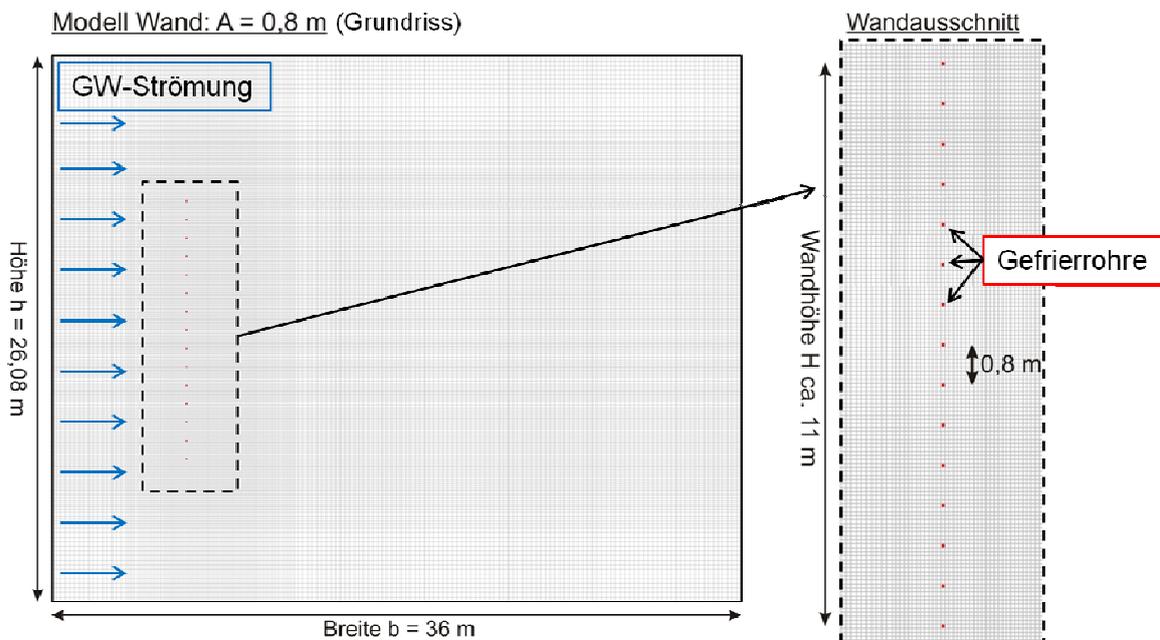
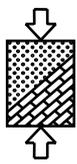


Abbildung 1: Systemskizze angeströmte Wand

Beim Ausgangssystem wurde das Aufgefrieren der Wand durch 15 Gefrierrohre realisiert, welche einen Abstand von 0,8 m aufwiesen. Zu Beginn einer jeden



Simulation besaß das gesamte Ausgangssystem eine konstante, dem Grundwasser entsprechende Temperatur, ehe den Gefrierrohren eine Temperatur von -35 °C zugewiesen wurde. Im Anstrom wurde die Temperatur während der gesamten Simulation weiterhin vorgegeben und somit die Temperatur der den Frostkörper beanspruchenden Grundwasserströmung aufrechterhalten. Die Grundwasserströmung selbst wurde durch verschiedene Potentiale am linken und rechten Modellrand erzeugt. Bei den in den folgenden Ausführungen angegebenen Grundwasserfließgeschwindigkeiten handelt es sich stets um diejenigen Filtergeschwindigkeiten, welche vor dem Aufgefrieren, also noch ohne Querschnittsverengung durch den Frostkörper, vorhanden waren.

Die Parameterstudie hat gezeigt, dass von den untersuchten Kennwerten und Randbedingungen die Grundwasserfließgeschwindigkeit den größten Einfluss auf das Gefrierverhalten hat. In der folgenden Abbildung sind die Aufgefrierzeiten am Ausgangssystem für verschiedene Fließgeschwindigkeiten aufgetragen.

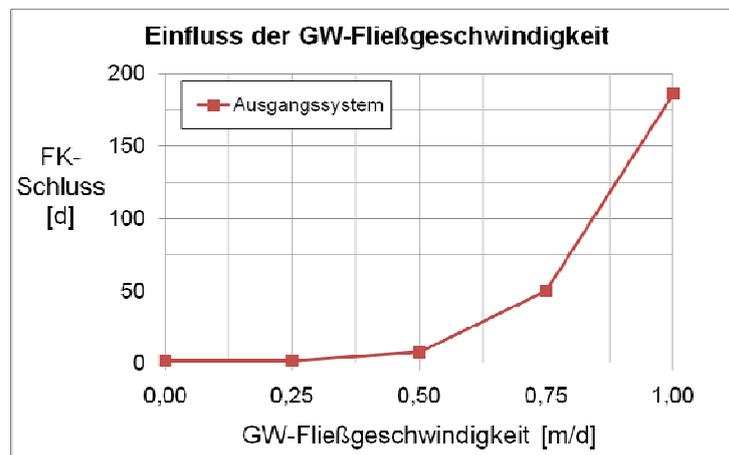


Abbildung 2: Einfluss der GW-Fließgeschwindigkeit

Es ist zu erkennen, dass die Zeitspanne bis zum Frostkörperschluss (FK-Schluss) mit Zunahme der Fließgeschwindigkeit überproportional stark ansteigt und bei noch größeren Fließgeschwindigkeiten damit zu rechnen ist, dass sich ein stationärer Zustand einstellt und somit kein Frostkörperschluss mehr erreicht wird.

Neben dem Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit wurden auch die Einflüsse aus Porenanteil n , Quarzgehalt q , Grundwassertemperatur T und Rohrabstand A untersucht. In Abbildung 3 sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammenfassend dargestellt.

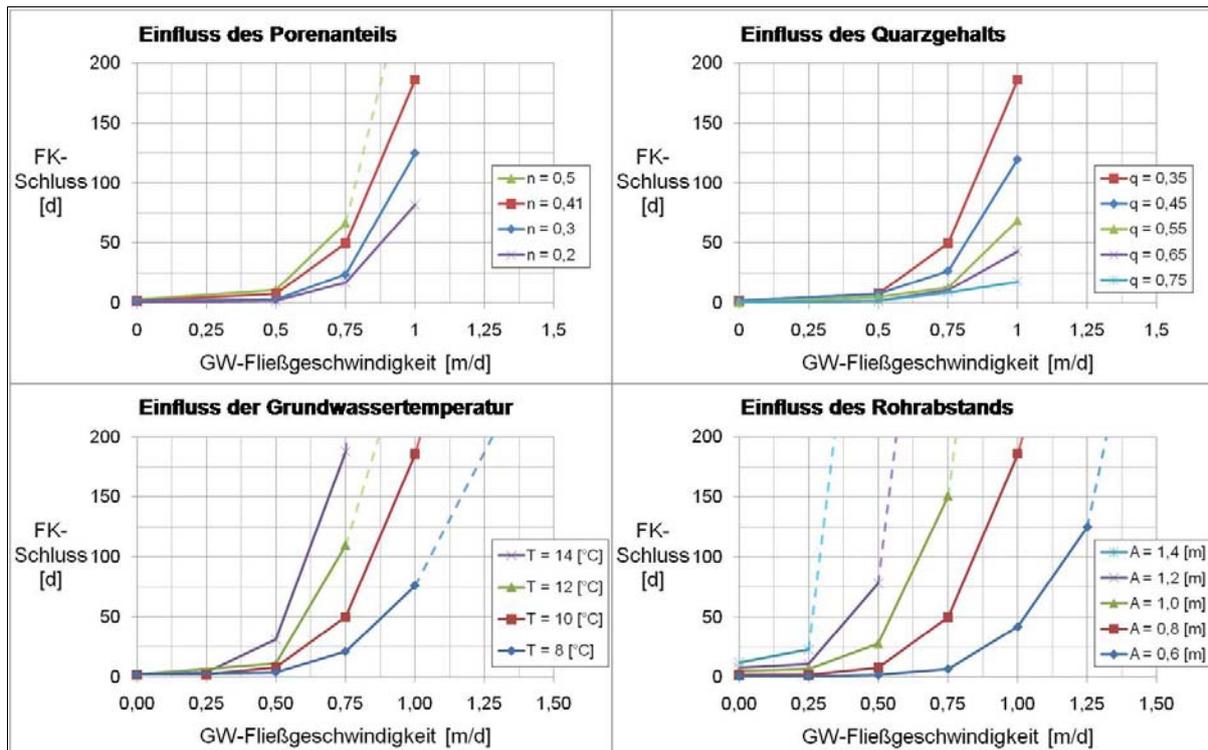
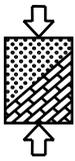


Abbildung 3: Einfluss der untersuchten Parameter in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit

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

Man sieht, dass bei vorhandener Grundwasserströmung der Porenanteil, der Quarzgehalt und die Grundwassertemperatur einen wesentlichen Einfluss auf das Gefrierverhalten haben, ohne Grundwasserströmung der Einfluss jedoch gering ist. Am deutlichsten ist der Einfluss des Rohrabstands zu sehen. Für Abstände $A > 1,0$ m wird schon für kleine Fließgeschwindigkeiten innerhalb des betrachteten Zeitraums bzw. teilweise auch generell kein Frostkörperschluss mehr erreicht.

3.2 Optimierungsmöglichkeiten zur Verkürzung der Aufgefrierzeiten

Die Parameterstudie hat gezeigt, dass die größte Beeinflussung des Gefrierhaltens aus der Grundwasserfließgeschwindigkeit selbst resultiert und das Verfahren bei erhöhten Geschwindigkeiten an seine Grenzen stößt. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen angestellt, inwiefern durch eine strömungsangepasste Anordnung der Gefrierrohre eine Verkürzung der Aufgefrierzeit ermöglicht werden kann. Es wurden verschiedene Möglichkeiten der Optimierung untersucht, von denen einige in Abbildung 4 dargestellt sind.

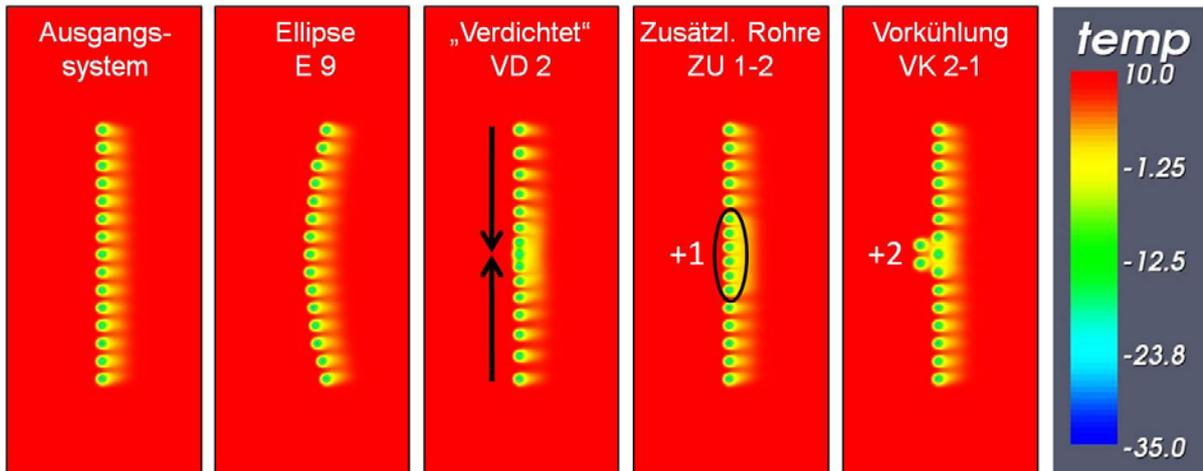
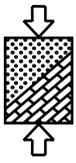


Abbildung 4: Auswahl untersuchter Systeme zur Optimierung der Aufgefrierzeit einer angeströmten Wand

Betrachtet wurden Systeme mit veränderter Wandform (z.B. Ellipse) und mit zur Mitte hin verkleinerten Rohrabständen („Verdichtet“) bei jeweils gegenüber dem Ausgangssystem unveränderter Rohranzahl, sowie Systeme mit zusätzlichen Rohren, die entweder in Wandmitte angeordnet oder zur Vorkühlung genutzt wurden.

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

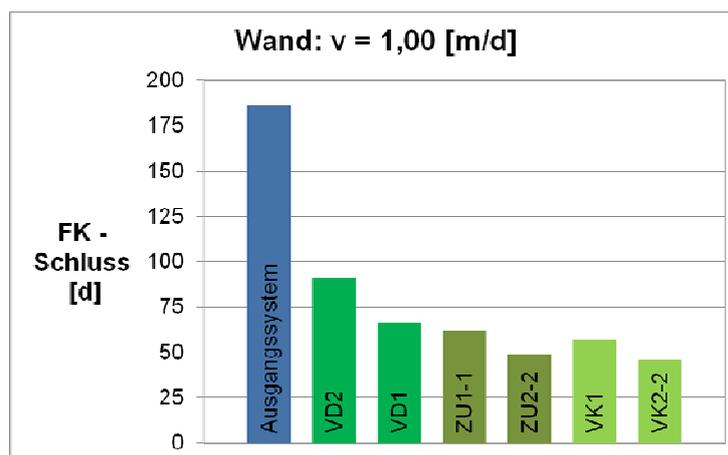
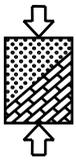


Abbildung 5: Vergleich der Aufgefrierzeiten verschiedener Wandsysteme

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



Im Anschluss an das Wandsystem wurden verschiedene geschlossene Systeme unterschiedlicher Form untersucht, wie sie beispielsweise bei der Herstellung von Baugruben vorkommen können. Betrachtet wurden quadratische, rechteckige und elliptische Systeme. Beispielhaft sind in Abbildung 6 untersuchte Varianten für ein quadratisches System abgebildet. Zur Verkürzung der Rechenzeiten wurde hierbei die Symmetrie ausgenutzt und jeweils immer nur ein halbes System betrachtet.

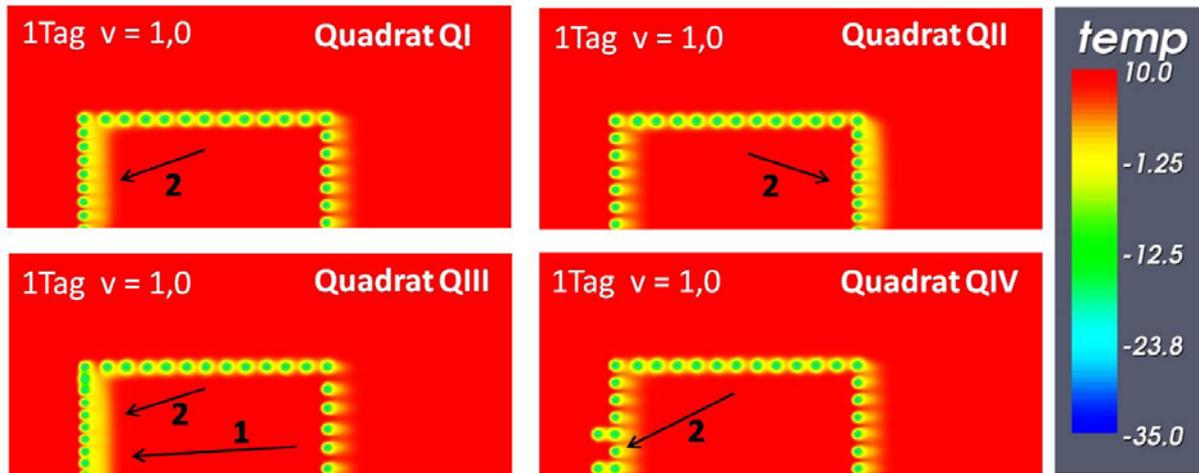


Abbildung 6: Quadratische Systeme

Zur Optimierung wurden Rohre von der strömungsparallelen Seite entfernt und an anderer Stelle positioniert. Weiterhin wurde auch ein System QIII untersucht, bei dem zusätzlich ein Rohr je Systemhälfte aus dem Abstrom in den Anstrom verschoben wurde.

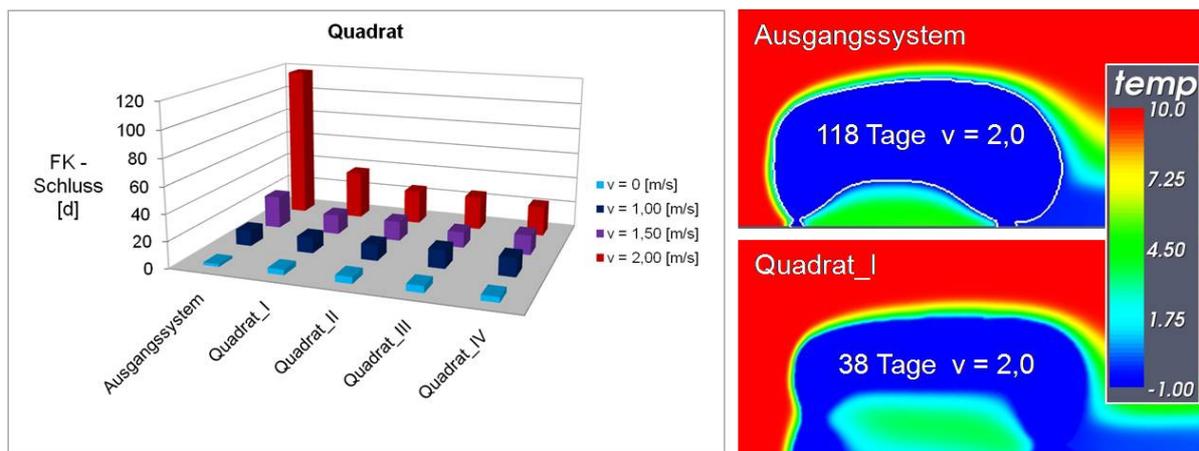
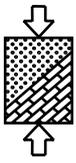


Abbildung 7: Aufgefrierzeiten und Temperaturplot für verschiedene quadratische Systeme

Die Gegenüberstellung der Aufgefrierzeiten in Abbildung 7 zeigt, dass sich die betrachteten Umpositionierungen erheblich positiv auswirken, sofern größere Fließgeschwindigkeiten auftreten. Wie anhand der Temperaturplots zum Zeitpunkt des jeweiligen Frostkörperschlusses zu sehen ist, reduziert sich auch das Frostkörperwachstum ins Innere gegenüber dem Ausgangssystem. Dadurch wird der



Aushub weniger durch das weder statisch noch als Dichtung erforderliche Eis im Inneren erschwert.

Die beispielhaft für das Quadrat gezeigten Ergebnisse gelten auch für die untersuchten rechteckigen und elliptischen Systeme. Es gilt generell, dass sich durch Verschieben von Rohren weg von der strömungsparallelen hin zur angeströmten Seite oder durch Vorkühlung kürzere Aufgefrierzeiten und ein geringeres Frostkörperwachstum ins Innere erzielen lassen.

Weiterhin wurde untersucht, inwiefern die Aufgefrierzeit auch bei Vereisungsmaßnahmen verkürzt werden kann, die infolge von Nachbarbebauung durch Düseneffekte beeinflusst werden. Hierbei wurde jedoch festgestellt, dass sich die Aufgefrierzeit nur für manche der untersuchten Varianten und auch dann nur geringfügig verkürzen lässt, da in den Düsenbereichen wesentlich größere Fließgeschwindigkeiten vorherrschen. Bei durch Düseneffekte beeinflussten Vereisungsmaßnahmen mit sehr hohen Fließgeschwindigkeiten lässt sich fast nur durch zusätzliche Rohre eine Verkürzung der Aufgefrierzeit bewirken. Auf jeden Fall sollten etwaige Optimierungen genau überprüft werden, um nicht durch vermeintliche Optimierungen negative Beeinflussungen hervorzurufen.

3.3 Nachrechnung einer konkreten Baumaßnahme

Anhand der vorab gezeigten Ergebnisse ist zu erkennen, dass die Grundwasserströmung einen entscheidenden Einfluss auf Vereisungsmaßnahmen hat. Oftmals wird dieser Einfluss jedoch unterschätzt bzw. aufgrund mangelnder Erkundung unzureichend berücksichtigt. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde daher eine umfassende Erkundung der Grundwassersituation einer konkreten Baumaßnahme vorgenommen. Hierzu wurden im Umfeld der Baumaßnahme mehrere Pegel sowie ein Brunnen zur Durchführung eines Pumpversuchs errichtet. Mit Hilfe der aus dem Pumpversuch abgeleiteten Durchlässigkeit und den täglichen Pegelmessungen wurden numerische Strömungsberechnungen durchgeführt und die Grundwasserfließgeschwindigkeit im Bereich der Vereisungsmaßnahme über die Zeit ermittelt. Weiterhin wurden auch mit dem vorab beschriebenen GFV-Verfahren Messungen der Fließgeschwindigkeit und -richtung durchgeführt. Diese ergaben größtenteils plausible Ergebnisse und zum Zeitpunkt der Messungen für den Bereich der Vereisungsmaßnahme eine mittlere Fließgeschwindigkeit von $v \approx 0,2 \text{ m/d}$. Allerdings wurde während des Pumpversuchs in einem vom Brunnen nur ca. 6 m entfernten Pegel eine Strömung vom Brunnen weg gemessen, was physikalisch nicht sein kann. Diese Ungereimtheiten lassen eine direkte Übertragung der Messwerte ohne Anbindung an konventionelle Messungen kritisch erscheinen.

Schließlich wurde unter Berücksichtigung der erkundeten Grundwasserverhältnisse eine Nachrechnung der Vereisungsmaßnahme mit dem Programm SHEMAT durchgeführt. In der folgenden Abbildung sind berechnete und der mit Messfühlern gemessene Temperaturverlauf gegenübergestellt.

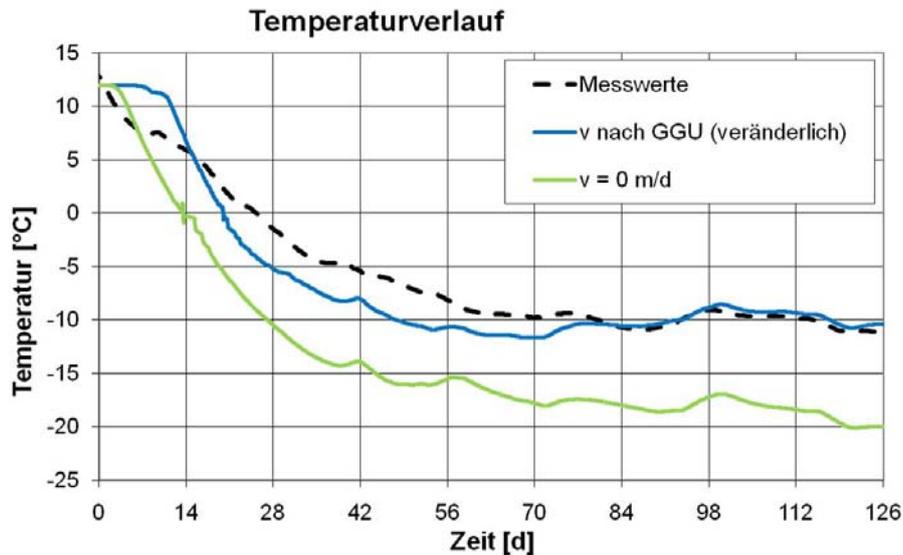
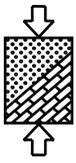


Abbildung 8: Gemessener und berechnete Temperaturverläufe im Schnitt durch die Haltestelle

Man sieht, dass bei Berücksichtigung der aus den Pegelmessungen und der numerischen Simulation erhaltenen Fließgeschwindigkeiten eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen erzielt wird. Eine Vernachlässigung der Grundwasserströmung hat hingegen zur Folge, dass die Temperaturen im Frostkörper wesentlich unterschätzt werden.

4 Fazit

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführte Parameterstudie hat gezeigt, dass das Gefrierverhalten von Böden durch viele Faktoren beeinflusst wird. Der größte äußere Einfluss auf das Gefrierverhalten resultiert jedoch aus der Geschwindigkeit der Grundwasserströmung. Wenn diese zu groß wird, stößt das Verfahren an seine Grenzen und es kann passieren, dass das Frostkörperwachstum zum Erliegen kommt, ehe der erforderliche Frostkörper aufgefroren ist. Durch strömungsangepasste Rohranordnungen oder durch zusätzliche Rohre lassen sich jedoch oftmals wesentliche Vorteile bezüglich der Aufgefrierzeit und auch bezüglich des unerwünschten Frostkörperwachstums nach innen erzielen. Hierfür ist jedoch die Kenntnis der vorhandenen Grundwassersituation und der Bodenkennwerte notwendig, um realitätsnahe Voruntersuchungen durchführen zu können. Abschließend wurde gezeigt, dass mit dem weiterentwickelten Programm SHEMAT konkrete Baumaßnahmen realitätsnah abgebildet werden können und damit ein Instrument zur Verfügung steht, mit dessen Hilfe im Vorfeld Untersuchungen zur Optimierung von Vereisungsmaßnahmen durchgeführt werden können.