

# **Numerische Simulation von Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau**

## **Problemstellung und Zielsetzung**

Das Gefrierverfahren dient der Herstellung von künstlich gefrorenem Boden und stellt damit insbesondere für das bergmännische Auffahren von Tunnelbauwerken eine bewährte Bauhilfsmaßnahme zur vorauseilenden Sicherung dar. Neben einem setzungsarmen Vortrieb kann dieses Verfahren bei Ausbildung eines geschlossenen Frostkörpers auch eine gegenüber Grundwasser abdichtende Wirkung erzielen. Im Gegensatz zu Injektionsmaßnahmen ist das Verfahren vollständig reversibel und umweltverträglich. Der Anwendungsbereich erstreckt sich dabei auch auf inhomogene und besonders schwierige Baugrundverhältnisse wie z.B. grundwasserdurchströmte Lockerböden. Oftmals werden jedoch die zu erwartenden primären Kosten der bereitzustellenden Kühlleistung als zu hoch bewertet und das Gefrierverfahren von vorneherein ausgeschlossen.

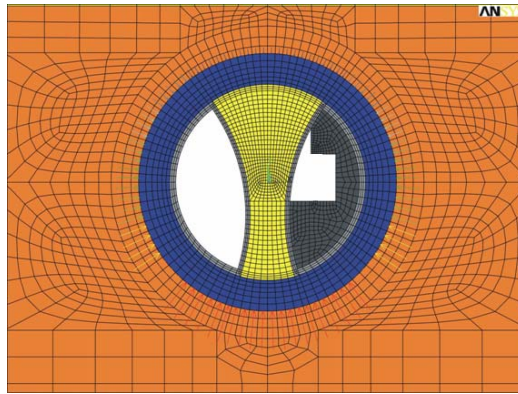
Das Ziel dieses Vorhabens ist die Bereitstellung eines praxistauglichen Berechnungsverfahrens, welches eine sichere Bemessung des Frostkörpers und eine wirtschaftlich optimierte Planung und Durchführung einer Vereisungsmaßnahme ermöglicht. Dabei sollen die unterschiedlichen thermischen Einflüsse während des Tunnelvortriebs Berücksichtigung finden. Ein wesentlicher Schwerpunkt liegt auf der Erfassung einer vorhandenen Grundwasserströmung, da diese als thermische Belastung für die Gefrierrohre den Gefrierprozess maßgeblich beeinträchtigen kann. Auf Grundlage dieser rechnerischen Prognose und den bauseits erhobenen Messdaten soll eine Optimierung des Gefrierprozesses auch während der Bauausführung ermöglicht werden.

## **Lösungsansatz**

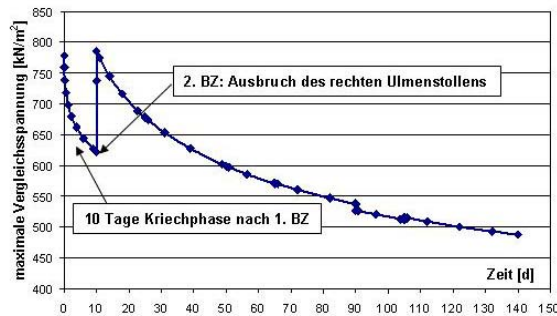
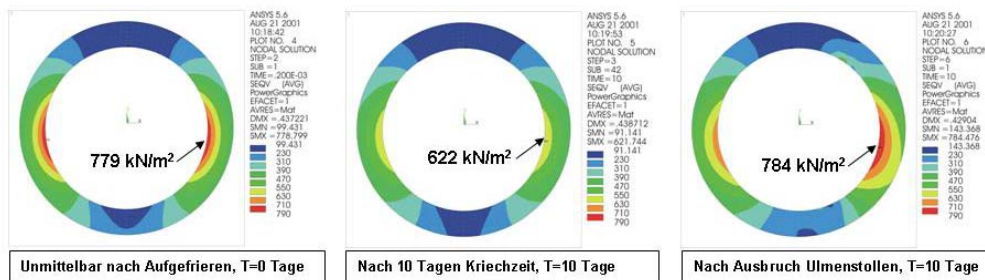
Bedingt durch das zeit- und temperaturabhängige Materialverhalten des gefrorenen Bodens sind die bei einer Vereisungsmaßnahme ablaufenden Prozesse während der Aufgefrier- und Erhaltungsphase derart komplex, dass zur wirklichkeitsnahen Beschreibung numerische Berechnungsverfahren erforderlich werden. Da sich die Frostausbreitung im Boden zeitabhängig vollzieht, sind instationäre Berechnungen durchzuführen. Die thermischen Kennwerte von Böden sind insbesondere bei Berücksichtigung des Phasenwechsels stark temperaturabhängig, so dass die Berechnungen einer zusätzlichen Nichtlinearität unterliegen. Ein numerisches Modell ermöglicht im Rahmen von Parametervariationen zudem die Identifikation der maßgebenden Parameter, die den Gefriervorgang und damit die eingebrachte Kühlleistung unter den projektspezifischen Randbedingungen beeinflussen.

## **Bisherige Erkenntnisse**

In einem ersten Schritt, in dem primär das Trag- und Verformungsverhalten während der Frosterhaltungsphase im Vordergrund stand, ist es gelungen, die zeitabhängigen Effekte, welche sich durch Kriech- und Relaxationsprozesse im gefrorenen Boden erklären, und die einhergehende zeitliche Interaktion der Komponenten eines bergmännischen Ulmenstollenvortriebs mit Hilfe des FE-Programmsystems ANSYS numerisch zu erfassen. Es konnte festgestellt werden, dass ein im Schutze eines Frostkörpers durchgeführter Tunnelvortrieb eine den Baugrund schonende und setzungsarme Variante zur Herstellung oberflächennaher Tunnelbauwerke darstellen kann.

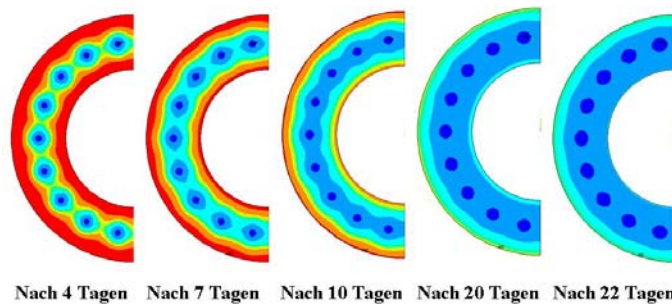


FE-Netz zur Simulation eines Ulmenstollenvortriebs im Schutze eines Frostkörpers (aus [1])



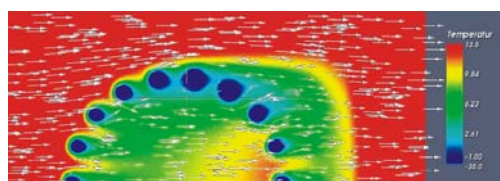
Zeitlicher Verlauf der maximalen Spannungen im Frostkörper (aus [1])

Der derzeitige Untersuchungsschwerpunkt sind Temperaturfeldberechnungen, welche die Grundlage zur Bestimmung der Schließzeiten der Frostkörper und der notwendigen Kapazität der Kühlaggregate bilden. Dabei ist es in einem ersten Schritt gelungen, die beim Phasenwechsel frei werdende Erstarrungswärme zu berücksichtigen, die sich als eine wesentliche Größe für die Schließzeit des Frostkörpers und damit den Erfolg des Aufgefrierprozesses herausgestellt hat [2].

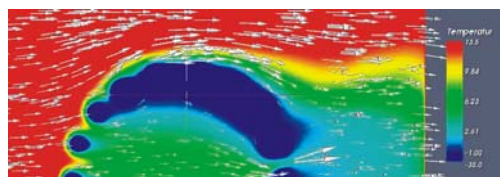
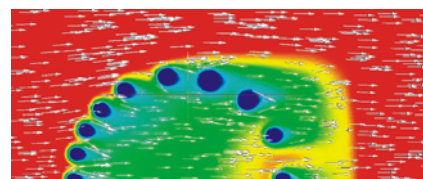


Temperaturentwicklung im Frostkörper während der Aufgefrierphase ohne Berücksichtigung einer Grundwasserströmung (aus [2])

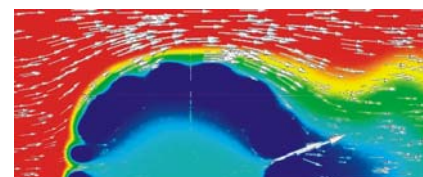
Eine vorhandene Grundwasserströmung stellt eine thermische Belastung für die Gefrierrohre dar, so dass unter Umständen ein stationärer thermischer Zustand eintreten kann, der ein weiteres Frostkörperwachstum gänzlich verhindert. Ist dies vor dem Frostkörperschluss noch während der Aufgefrierphase der Fall, wird der Frostkörper seine Abdichtungsfunktion nicht erfüllen. Die Notwendigkeit zur Erfassung einer Grundwasserströmung in den Berechnungen ist daher folgerichtig. Bei Erfassung einer Grundwasserströmung ergibt sich eine besondere Schwierigkeit durch die im Zeitablauf veränderliche Lage der Frostgrenze, welche als sogenannte "moving boundary" den durchströmten Bereich des Modells beeinflusst [3]. Mit dem Finite Differenzen Programm SHEMAT (Simulator for Heat and Mass Transport) wurden gekoppelte hydraulisch-thermische Berechnungen für einen Modellversuch [4] und einen fiktiven Tunnelvortrieb [5] durchgeführt. Als Ergebnis dieser Simulationen konnten unterschiedliche Anordnungen der Gefrierrohre und Betriebsweisen als Empfehlung für eine verkürzte Aufgefrierzeit unter Strömungseinfluss herausgearbeitet werden [6],[7],[8].



nach  
3 Tagen

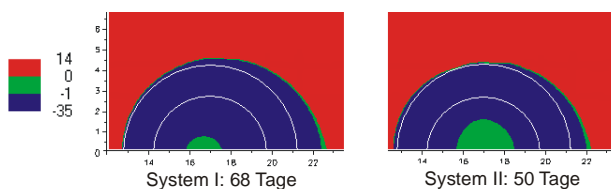


nach  
15 Tagen

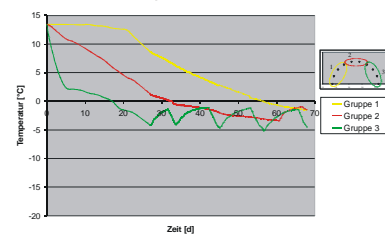


Frostkörperwachstum unter Strömungseinfluss bei äquidistanter Rohranordnung (System I)

Frostkörperwachstum unter Strömungseinfluss bei optimierter Rohranordnung auf der Anströmseite (System II)



Vergleich der Aufgefrierzeiten und Ausbildung des Frostkörpers



Optimierte intermittierende Betriebsweise in der Haltephase durch Ansteuerung einzelner Rohrgruppen

## Aufgefrierprozess unter Strömungseinfluss für unterschiedliche Anordnungen der Gefrierrohre und Betriebsweisen (aus[5])

### Ausblick

Im weiteren Verlauf des Vorhabens sollen die im numerischen Modell gefundenen Ergebnisse anhand von Messergebnissen eines Großversuchs auf Plausibilität überprüft und kalibriert werden. Weiterhin soll eine Parameterstudie Erkenntnisse zur Abhängigkeit der Schließzeit von der GW-Geschwindigkeit, dem Rohrabstand und der Soletemperatur liefern. Auf dieser Grundlage sollen praxistaugliche Empfehlungen für eine sichere und gleichsam wirtschaftlich optimierte Auslegung einer Vereisungsmaßnahme angegeben werden.

### Literatur

- [1] Baier, Ch.: Numerische Erfassung des Tragverhaltens großflächiger Baugrundvereisungen bei der bergmännischen Herstellung von Tunnelbauwerken in wassergesättigten Lockerböden. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen. Aachen 2001, unveröffentlicht. In Zusammenarbeit mit der Ingenieurgesellschaft für Bautechnik Zerna, Köpper und Partner (ZKP) in Bochum.

- [2] Boor, S.: Numerische Erfassung des Aufgefrierens wassergesättigter Lockerböden. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen. Aachen 2002, unveröffentlicht. In Zusammenarbeit mit der Ingenieurgesellschaft für Bautechnik Zerna, Köpper und Partner (ZKP) in Bochum.
- [3] Beerlage, N.: Numerische Erfassung des Aufgefrierens grundwasserdurchströmter Lockerböden. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen. Aachen 2005, unveröffentlicht.
- [4] Lastrada, E.: Numerische Erfassung thermischer Einflüsse auf Vereisungsmaßnahme im oberflächennahen Tunnelbau. Studienarbeit am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen. Aachen 2006, unveröffentlicht.
- [5] Norda, H.: Numerische Vortriebssimulation von Vereisungsmaßnahmen im oberflächennahen Tunnelbau. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen. Aachen 2006, unveröffentlicht.
- [6] Baier, Ch., Ziegler, M.:  
Numerische Simulation von Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau.  
In: Vorträge zum 14. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 15. März 2007. Darmstadt 2007. S. 183-194. (Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt; 76).
- [7] Ziegler, M., Baier, Ch.:  
Vereisungsmaßnahmen im strömenden Grundwasser.  
Beiträge zum 22. Christian Veder Kolloquium 2007, Graz, Heft 29, S. 177-194.
- [8] Ziegler, M., Baier, Ch.:  
Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau durch Anwendung numerischer Simulationen  
Angenommen für: Tunnel - Neue Wege - Neue Chancen : Vorträge der STUVA-Tagung 2007 in Köln / Hrsg.: Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen STUVA.  
Gütersloh: Bauverlag, 2007.