

Baugrundvereisung im durchströmten Untergrund

M. Ziegler, Chr. Baier

Im vorliegenden Beitrag wird eine Grundwasserströmung als maßgeblicher thermischer Einfluss für Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau beschrieben. Frühzeitige Erkundung und rechnerische Berücksichtigung der vorherrschenden Grundwasserverhältnisse sind von entscheidender Bedeutung für zuverlässige Gefrierzeitprognosen und sichere und wirtschaftliche Vereisungskonzepte.

Die künstliche Baugrundvereisung zur Herstellung statisch tragender und wasserdichter Frostkörper hat sich als begleitende Bauhilfsmaßnahme im Tunnelbau bereits vielfach bewährt und gewinnt gerade in jüngerer Zeit zunehmende Beachtung bei einer Vielzahl aktueller Bauvorhaben. Insbesondere das Auffahren von Querschlägen für Fluchtwege zwischen benachbarten Tunnelröhren (Bild 1) und die Herstellung unterirdischer Haltestellen durch die bergmännische Aufweitung im Nachgang zu maschinell vorgetriebenen Stre-

ckentunneln stellen interessante, aktuelle und zukunfts-trächtige Aufgabengebiete für das Gefrierverfahren im Tunnelbau dar [8, 10]. Neben den rein technischen Vorzügen durch das breite Einsatzspektrum in den unterschiedlichsten Bodenarten hebt sich das Verfahren auch im Hinblick auf seine Umweltverträglichkeit von anderen Ver-



1 Querschlagvereisung

1 Cross-passage freezing

Subsoil Freezing in a perfused Subsurface

M. Ziegler, Chr. Baier

In the following report a groundwater flow is described as the determining thermal influence for freezing measures in tunnelling. Early investigation and analytical consideration of the prevailing groundwater conditions are essential for reliable prognoses of the freezing times as well as safe and economic freezing concepts.

Artificial subsurface freezing for creating statically sustainable and watertight frost zones has proved itself on many occasions in the past as an accompanying measure in tunnelling and has actually gained in importance of late for a large number of projects. The driving of cross-passages for escape-ways between neighbouring

tunnel tubes (Fig. 1) in particular and the production of underground stations through expansion using mining means to follow upon mechanically driven tunnels represent interesting, topical and future-oriented sectors for the freezing method in tunnelling [8, 10]. In addition to purely technical advantages thanks to the broad spectrum of application for various types of soil, the method stands out compared with others when it comes to its environmental compatibility as it can be executed in such a way that it is reversible so that no negative resi-

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler, Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen an der RWTH Aachen/D

Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christian Baier, ehemaliger wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen an der RWTH Aachen/D

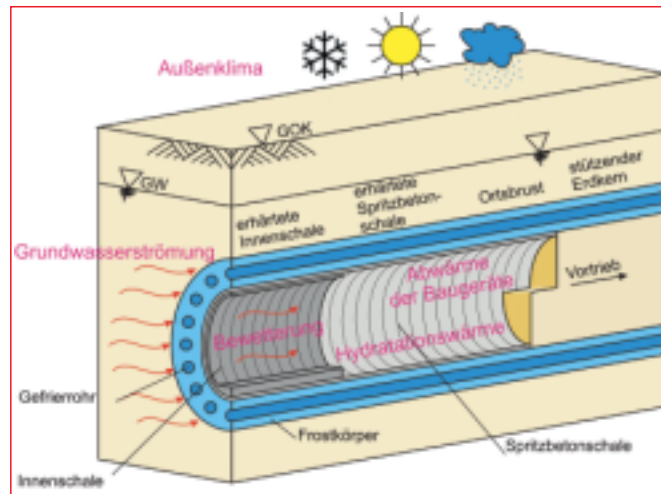
Prof. Martin Ziegler, Chair for Geotechnical Engineering at the RWTH Aachen University/D
Dr.-Ing. Christian Baier, former scientific associate at the Chair for Geotechnical Engineering at the RWTH Aachen University/D

(Photo: Bilfinger Berger)

fahren positiv ab, da es reversibel durchführbar ist und keine nachteiligen Rückstände im Boden bzw. Grundwasser verbleiben. Oft scheidet der planmäßige Einsatz jedoch an den hohen Energiekosten für den Wärmeentzug aus dem Boden. Neben dem reinen Gefriervorgang können sich diese noch zusätzlich erhöhen, wenn weitere thermische Einflüsse durch Zusatzinstallationen und erhöhten Energieeintrag der Gefrieranlage kompensiert werden müssen (Bild 2).

Eine zuverlässige Ermittlung der benötigten Zeit zum Aufgefrieren der vorgesehenen Frostkubatur muss die Wärmemengen, die das Temperaturregime im Boden bestimmen und den Gefrierfortschritt maßgeblich beeinträchtigen können, berücksichtigen. Im Vergleich zu anderen thermischen Einflüssen einer oberflächennahen Vereisungsmaßnahme (Bild 2) lässt sich dabei eine Grundwasserströmung als gefrierzeit- und kostenbestimmend charakterisieren [2].

Selbst bei vermeintlich moderaten Grundwasserfließgeschwindigkeiten ist der konvektive Wärmeeintrag aufgrund der hohen Wärmekapazität des Wassers beachtlich: Eine Grundwasserströmung, die eine Temperatur von $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ besitzt und mit $1,0\text{ m/d}$ (Filtergeschwindigkeit) fließt, erzeugt eine Wärmestromdichte von ca. 630 W/m^2 . Dies entspricht in etwa der Wärmestromdichte der Sonne auf der Erdoberfläche an einem klaren, sonnigen Frühlingstag auf Sylt (600 W/m^2). Die Spitzenwerte der mittäglichen Solarstrahlung liegen in Deutschland im Sommer bei ca. 900 W/m^2 . Dieser Wärmeeintrag wird bereits durch eine Grundwasserströmung von $1,5\text{ m/d}$ erreicht. Im stark durchströmten Untergrund kann das Frostwachstum folglich gänzlich zum Erliegen kom-



2 Mögliche thermische Einflüsse beim oberflächennahen Tunnelvortrieb im Schutze eines Frostkörpers

2 Possible thermal influences in the case of a tunnel drive close to the surface protected by a frost zone

men, wenn sich ein thermisches Gleichgewicht zwischen der herantransportierten und der durch die Gefrierrohre entzogenen Wärmemenge einstellt. Der Frostkörper kann dann seine angedachte Funktion nicht übernehmen. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten über das Maß der natürlichen Strömung hinaus können insbesondere im Bereich vorhandener Bebauung als Folge von Düseneffekten oder in zwischengelagerten Grobschichten mit hohen Durchlässigkeiten auftreten.

1 Wärmeübertragung und Wassertransport im Boden

1.1 Physikalische Grundlagen

Der vorherrschende Wärmeübertragungsmechanismus in Böden ist die reine Wärmeleitung [5]. Die Ursache dieses Energietransports liegt in einem Temperaturgefälle und erfolgt durch atomare Wechselwirkung zwischen benachbarten Molekülen. Der entstehende Wärmestrom \dot{Q} [J/s bzw. W] ist dabei dem Temperaturgefälle und der betrachteten Querschnittsfläche proportional. Der Propor-

duktionskoeffizienten α [W/(mK)] bleibt in der Regel konstant. Die Wärmeübertragung erfolgt durch Konvektion (Wärmeeintrag) und Hydratationswärme. Die Wärmeübertragung erfolgt durch Konvektion (Wärmeeintrag) und Hydratationswärme. Die Wärmeübertragung erfolgt durch Konvektion (Wärmeeintrag) und Hydratationswärme.

Any reliable determining of the time required to freeze the desired frost zone must consider the quantities of heat, which govern the temperatures prevailing in the soil and which can substantially influence the progress of freezing. Compared to other thermal influences a freezing measure close to the surface (Fig. 2) allows a groundwater flow to be characterised as governing the freezing time and costs.

Even in the case of supposedly moderate groundwater flow velocities the convective heat input is considerable on account of the high thermal capacity of the water: a groundwater flow, which possesses a temperature of $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ and flows at 1.0 m/d (discharge velocity),

generates a heat flux density of approx. 630 W/m^2 . This roughly corresponds to the sun's heat flux density on the earth's surface on a clear, sunny spring day on the Island of Sylt (600 W/m^2). The peak values for solar rays at midday in summer in Germany amount to around 900 W/m^2 . This heat input is arrived at by a groundwater flow of 1.5 m/d . As a consequence when the subsurface is strongly pervaded, the creation of frost can cease altogether should a thermal balance result between the induced quantity of heat and the one removed by the freezing pipes. The zone of frost is then unable to take over its desired function. High flow velocities exceeding the degree of natural flow can occur especially where there are buildings present as a result of jet effects or in interstratified coarse layers with high permeabilities.

1 Transmission of Heat and Transport of Water in the Soil

1.1 Physical Principles

The prevailing heat transfer mechanism in soils is the conduction of heat as such [5]. This transport of energy results from a drop in temperature and takes place through an atomic reciprocal effect between neighbouring molecules. The flow of heat \dot{Q} [J/s or W] thus created is in this case proportional to the drop in temperature and the considered cross-sectional area. The proportionality factor is a material-specific, mostly temperature-dependent parameter and is described as thermal conductivity λ [W/(mK)] (Fourier's Law). Other mechanisms such as for example thermal radiation do not play a decisive part given a high degree of saturation in stationary groundwater.

The effect of forced convection must also be taken into consideration in the case of

tionalitätsfaktor ist eine stoffspezifische, meist temperaturabhängige Größe und wird als Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)] bezeichnet (Gesetz nach Fourier). Andere Mechanismen wie beispielsweise die Wärmestrahlung spielen bei hohem Sättigungsgrad im ruhenden Grundwasser keine entscheidende Rolle.

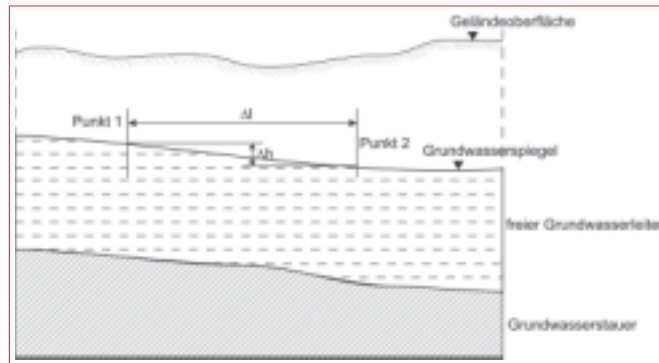
Bei strömendem Grundwasser muss zusätzlich der Effekt der erzwungenen Konvektion berücksichtigt werden. Diese beschreibt einen Wärmetransport durch Grundwasserströmung, die durch Potenzialunterschiede oder Pumpvorgänge hervorgerufen wird. Die infolge einer Wasserströmung transportierte Wärmemenge hängt wesentlich von deren Temperatur und Filtergeschwindigkeit v_f ab.

Die Filtergeschwindigkeit v_f des konvektiven Terms ergibt sich aus dem weithin bekannten Gesetz von Darcy:

$$v_f = k_f \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \cdot i$$

Demnach ist die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers proportional zum hydraulischen Gefälle i (Bild 3). Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s] ist von den Strömungseigenschaften des Fluides und den Eigenschaften des durchströmten Mediums abhängig [6]. Da die Fluideigenschaften Dichte und Viskosität temperaturabhängig sind, ist auch der k_f -Wert in dem für eine Baugrundvereisung relevanten Temperaturspektrum keinesfalls konstant. Selbst im ungefrorenen Zustand schwankt seine Größe so stark mit der Temperatur, dass diese Veränderung für eine zuverlässige Erfassung der Strömung nicht vernachlässigt werden darf.

Das Temperaturfeld beeinflusst somit durch die Temperaturabhängigkeit der Wassereigenschaften den Durchläs-



3 Hydraulisches Gefälle als Ursache einer Grundwasserströmung

3 Hydraulic gradient as the origin of a groundwater flow

sigkeitsbeiwert und damit die Filtergeschwindigkeit, die wiederum in den Konvektionsterm der Wärmetransportgleichung eingeht. Es liegt somit ein vollständig gekoppeltes Problem vor. Bild 4 zeigt schematisch den Modellzusammenhang.

1.2 Temperaturabhängigkeit der Bodenkennwerte

Die Temperaturabhängigkeit der thermischen und hydraulischen Kenngrößen muss bei der Berechnung von Vereisungsmaßnahmen berücksichtigt werden. Diese begründet sich zum einen in den temperaturabhängigen Eigenschaften der einzelnen Bodenbestandteile Feststoff, Wasser und Eis selbst, insbesondere aber in ihrer veränderlichen mengenmäßigen Zusammensetzung im Laufe des Gefrierens.

Bild 5 zeigt beispielhaft den qualitativen Verlauf der thermischen Kennwerte Wärmeleitfähigkeit λ (T) und Wärmekapazität c (T) eines Bodens unter Berücksichtigung des Phasenwechsels des Porenwassers während des Gefrierens. Besonders auffällig ist der Anstieg der Wärmekapazität im Gefrierintervall zwischen Solidus- (T_s) und Liquidustemperatur (T_l) zu erkennen, der aus der Freisetzung der latenten Wärme L resultiert. Diese beträgt für reines Wasser $L = 333600$ J/kg und würde

flowing groundwater. This describes a transfer of heat through a groundwater flow, which is caused by differences in potential or pumping processes. The quantity of heat transported as a result of flowing water largely depends on its temperature and filter velocity v_f .

The filter velocity v_f of the convective term results from Darcy's well-known law:

$$v_f = k_f \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \cdot i$$

Accordingly the flow velocity of the water is proportional to the hydraulic gradient i (Fig. 3). The permeability coefficient k_f [m/s] depends on the flow properties of the fluid and the properties of the medium it flows through [6]. As the fluid's properties – density and viscosity – depend on the temperature, the k_f value in the temperature spectrum relevant for subsurface freezing is also by no means constant. Even in non-frozen state its magnitude fluctuates so greatly with the temperature that this change must not be neglected for a reliable evaluation of the flow.

In this way the temperature field influences the permeability coefficient on account of the temperature dependence of the water properties and in turn the filter velocity, which for its part is incorporated in the con-

vection term for the heat transport equation. In other words, a completely coupled problem exists. Fig. 4 shows schematically the model inter-relationship.

1.2 Temperature Dependence of the Soil Characteristics

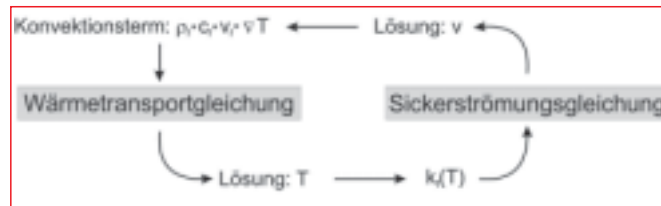
The temperature dependence of the thermal and hydraulic parameters must be taken into consideration for calculating freezing measures. This applies on the one hand for the temperature-related properties of the individual soil components – solid matter, water and ice – but particularly, however, their changing composition in terms of quantity in the course of the freezing process.

Fig. 5 shows as an example the qualitative course of the thermal characteristics thermal conductivity λ (T) and thermal capacity c (T) for a soil taking into account the change of phase for the pore water during freezing. Particularly striking is the rise in the thermal capacity in the freezing interval between solid (T_s) and liquid temperature (T_l), which results from the release of latent heat L . This amounts to $L = 333,600$ J/kg for pure water and would thus suffice to increase the temperature of 1 kg of water ($c_{sw} = 4.200$ J/kgK) by almost 80° C. The released heat delays the freezing process and thus influences the freezing rate considerably. During the melting process on the other hand this amount of energy must be expended in order to break open the ice's crystal structure. Only then does the temperature of the frozen ground change again. The inertia of frozen soils during the melting process can be attributed to this fact, which represents a safety factor for a construction project that should not be underestimated given short-term functional disturbances involving the freezing

damit immerhin ausreichen, um die Temperatur von 1 kg Wasser ($c_{s,w} = 4200 \text{ J/kgK}$) um knapp 80°C zu erhöhen. Die freigesetzte Wärme verzögert den Gefrierprozess und hat dadurch einen deutlichen Einfluss auf den Frostfortschritt. Beim Schmelzvorgang muss diese Energiemenge hingegen aufgebracht werden, um die Kristallstruktur des Eises aufzubrechen. Erst dann ändert sich die Temperatur des gefrorenen Bodens wieder. In dieser Tatsache begründet sich die Trägheit von gefrorenem Boden beim Auftauvorgang, die einen nicht zu unterschätzenden Sicherheitsaspekt bei kurzfristigen Funktionsstörungen des Gefriersystems einer Baumaßnahme bietet. Ein schlagartiges Auftauen findet nicht statt.

Die Anforderungen an ein Lösungsmodell zur Beschreibung der Frostausbreitung bei Berücksichtigung einer Grundwasserströmung ergeben sich aus den vorgenannten Zusammenhängen. Es sind demnach zeitabhängige (instationäre), nichtlineare (die thermischen und hydraulischen Kennwerte sind abhängig von der Temperatur) und vollständig gekoppelte Wärmetransport-Grundwasserströmungsberechnungen durchzuführen. Dazu werden numerische Verfahren erforderlich.

Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse von Gefrierberechnungen beruhen auf einem vereinfachten, praxistauglichen Phasenwechselmodell, welches für die Gefrierzeitprognose im Tunnelbau das thermische und hydraulische Verhalten eines gefrierenden Bodens hinreichend genau beschreibt. Deutlich entscheidender für die Eliminierung von Unsicherheiten bei der Gefrierzeitprognose ist die zutreffende Beschreibung der Strömungsgeschwindigkeit und -richtung des Grundwassers [2].



4 Kopplungsschema der beiden Grundgleichungen

4 Coupling scheme for the 2 basic equations

2 Vereinfachtes Phasenwechselmodell

Die für eine numerische Vereisungssimulation notwendigen Eingangsparameter lassen sich in einer Vielzahl von Fällen auf wenige bekannte Standardgrößen wie Dichte, Kornverteilung etc. reduzieren, die im Rahmen der üblichen geotechnischen Untersuchungen ohnehin bestimmt werden. Die Übertragung geotechnischer Kennwerte auf wärmetechnische Parameter gelingt deshalb, weil sich die thermischen Kennwerte Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität, die

system. A rapid melting process does not occur.

The requirements on a solution model to describe frost spreading taking the flow of groundwater into consideration result from the previously mentioned inter-relationships. As a result time-related (non-stationary), non-linear (the thermal and hydraulic characteristics depend on the temperature) and completely coupled heat transport groundwater flow calculations have to be executed. Towards this end numerical methods are required.

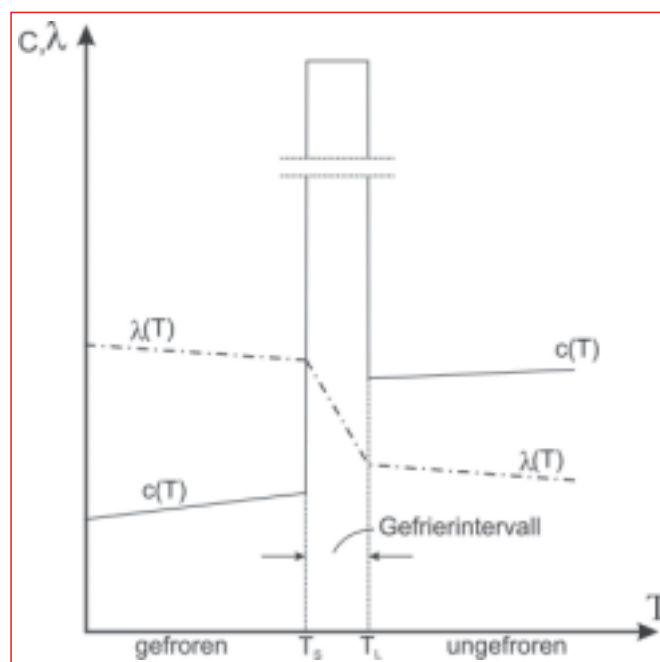
The results of freezing calculations provided in the follow-

ing are based on a simplified phase change model that is suitable for practice, which sufficiently well describes the thermal and hydraulic behaviour of a freezing soil for the freezing process in tunnelling. Far more decisive for eliminating uncertainties in conjunction with a prognosis for the freezing process is accurately describing the flow velocity and direction for the groundwater [2].

2 Simplified Phase Change Model

The starting parameters required for a numerical simulation of freezing can be reduced in a large number of cases to known standard magnitudes such as density, grain distribution etc., which are determined in any case within the scope of normal geotechnical investigations. The transference of geotechnical parameters to thermal technical values succeeds because the thermal characteristic values such as thermal conductivity and thermal capacity, permeability and the freezing behaviour of a water-saturated, non-cohesive soil can be derived from them with adequate simple mathematical/physical models with sufficient accuracy [7]. For this purpose only the volumetric proportions of solid matter, water and ice for each temperature have to be known if the theory of continuity is taken as the basis [4]. The main cause for the behaviour of the soil's temperature dependence is attributable to the changing division of the proportion of pores n in the ice and water phases, n_i and n_w , in frozen state (Fig. 6).

At the core of the solution model the reduction of the water content n_w falling short of the freezing temperature is expressed by a freezing function Θ , which can assume theoretic-



5 Idealisierte Verläufe der Wärmeleitfähigkeit λ und der Wärmekapazität c eines Bodens bei Berücksichtigung der Kristallisationswärme L

5 Idealised courses for the heat conductivity λ and the heat capacity c of a soil taking the crystallisation heat L into consideration

Durchlässigkeit und das Gefrierverhalten eines wasser-gesättigten, nichtbindigen Bodens hinreichend genau über einfache mathematische/physikalische Modelle aus diesen ableiten lassen [7]. Dazu müssen lediglich die Volumenanteile von Feststoff, Wasser und Eis für jede Temperatur bekannt sein, wenn die Kontinuumstheorie zugrunde gelegt wird [4]. In der veränderlichen Aufteilung des Porenanteils n auf die Eis- und die Wasserphase, n_i und n_w , im gefrorenen Zustand liegt die Hauptursache für die Temperaturabhängigkeit des Bodenverhaltens (Bild 6).

Im Kernpunkt des Lösungsmodells wird die Abnahme des Wassergehalts n_w mit Unterschreiten der Gefrieretemperatur durch eine Gefrierfunktion Θ ausgedrückt, die theoretisch Werte zwischen Null (vollständig gefroren) und Eins (ungefroren) annehmen kann und die Aufteilung mathematisch wie folgt beschreibt:

$$n_w = n \cdot \Theta \text{ mit } 0 \leq \Theta \leq 1$$

Der zunehmende Eisanteil ergibt sich daraus bei vollständiger Sättigung als Komplementärgröße zu:

$$n_i = n - n_w$$

Der genaue Verlauf der Gefrierfunktion Θ ist bodenabhängig. Es zeigt sich jedoch, dass die Beschreibung des Verlaufs von Θ auf Basis des ungefrorenen Wassergehalts w_w möglich ist, da auch für Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts nicht alles Wasser gefroren ist. Der aktuelle Wert von w_w ist ein direkter Indikator für den Gefrierverlauf und lässt sich mit hinreichender Genauigkeit über die spezifische Oberfläche aus der Kornverteilung des Bodens ableiten. Spezielle Versuche im Frostlabor erübrigen sich dadurch.

Durch die Implementierung dieses Phasenwechselmodells („Freezing-Modul“) wurde das bestehende Finite-Differenzen-Programm SHEMAT (Simulator for Heat and Mass Transport [3]) für den Anwendungsbereich oberflächennaher Vereisungsmaßnahmen erweitert und zur Ableitung von Optimierungsempfehlungen einer Querschlagvereisung unter Strömungseinfluss herangezogen [2]. Im Folgenden werden einige Erkenntnisse vorgestellt.

3 Einfluss einer Grundwasserströmung

Es wird beispielhaft der Aufgefrierprozess eines kreisrunden, symmetrischen Frostkörpers unter horizontalem Strömungseinfluss in Oberflächennähe untersucht. Die gewählten Abmessungen orientieren sich an denen einer typischen Querschlagvereisung. Der lichte Innendurchmesser des Ausbruchprofils soll 5,50 m und die statisch erforderliche Frostkörperdicke 1,50 m betragen. Im so genannten Basissystem, welches als Referenzfall dient, sind 18 Gefrierrohre mit einem gegenseitigen Abstand von ca. 1,22 m gleichmäßig über den Umfang angeordnet. Aus Symmetriegründen braucht nur eine

cal values between zero (completely frozen) and one (unfrozen) describing the distribution mathematically as follows:

$$n_w = n \cdot \Theta \text{ with } 0 \leq \Theta \leq 1$$

The increasing proportion of ice is consequently obtained as a complimentary value given complete saturation:

$$n_i = n - n_w$$

The precise course of the freezing function Θ depends on the soil. However, it is shown that the description of the course of Θ is possible on the basis of the unfrozen water content w_w , as not all water is frozen even given temperatures below the freezing point. The ongoing value of w_w represents a direct indicator of the course of freezing and can be derived with sufficient accuracy via the specific surface from the soil's grain distribution. Special tests in the frost lab are thus not necessary.

Through the implementation of this phase change module (“freezing module“) the existing finite differences programme SHEMAT (Simulator for Heat and Mass Transport [3]) was extended for application in the field of freezing measures close to the surface and used for

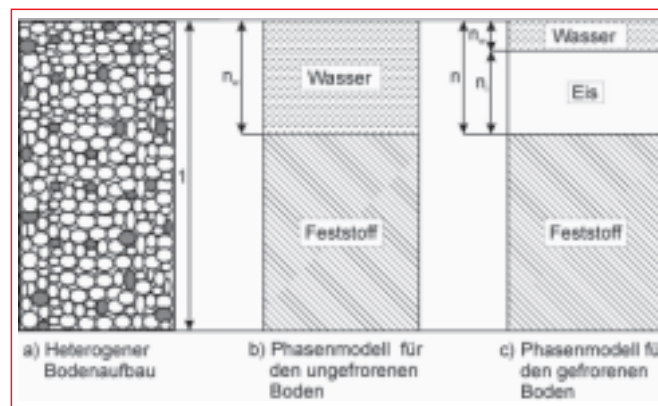
deriving recommendations for optimising freezing for a cross-passage subject to the influence of flow [2]. A number of recognitions are presented in the following.

3 Influence of a Groundwater Flow

As an example the freezing process of a circular, symmetric frost zone subjected to a horizontal influence of flow close to the surface is examined. The selected dimensions are geared towards a typical cross-passage freezing process. The clear inner diameter of the excavated profile is set at 5.50 m and the statically required frost zone thickness 1.50 m. In the so-called basic system, which serves as a reference case, 18 freezing pipes are distributed evenly over the perimeter set at gaps of roughly 1.22 m apart. Only one half of the tunnel need to be considered for symmetric reasons (Fig. 7).

In order to investigate the influence of a groundwater flow on the freezing process its velocity is increased successively in the simulations. As a result a spectrum of 0.25 to 1.50 m/d for the discharge velocity is covered. In the case of greater velocities the growth of the frost zone ceases at critical points so that a complete frost zone cannot be attained. The urgent necessity to include the groundwater situation that is actually prevailing at the planning stage becomes especially evident, if the frost zone geometry is compared at the same time points but for varyingly large flow velocities. In Fig. 8 this is undertaken for the time point in the basic system at which the entire freezing process ($t = 20$ d) has already ceased in the case of no flow.

For the basic system as expected the intake side emerged as determining for the freezing time regardless of the flow ve-



6 Homogenisierter Bodenaufbau eines vollgesättigten Bodens im ungefrorenen und gefrorenen Zustand als Modellgrundlage

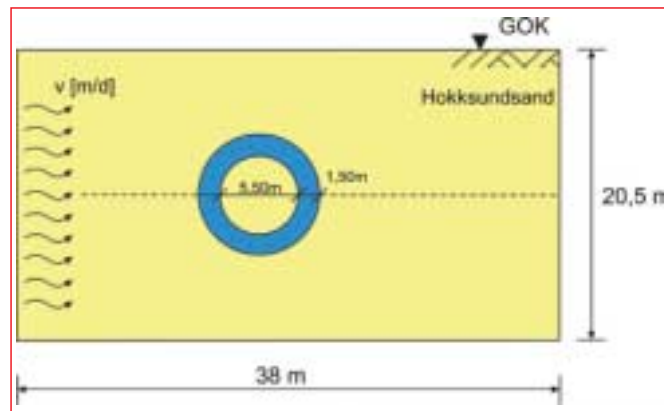
6 Homogenised soil set-up of a completely saturated soil in unfrozen and frozen state as model basis

Tunnelhälfte betrachtet zu werden (Bild 7).

Zur Untersuchung des Einflusses einer Grundwasserströmung auf den Gefrierprozess wird deren Geschwindigkeit in den Simulationen sukzessive erhöht. Dabei wird ein Spektrum von 0,25 m/d bis 1,50 m/d für die Filtergeschwindigkeit abgedeckt. Für größere Filtergeschwindigkeiten kommt das Frostkörperwachstum an kritischen Stellen zum Erliegen, so dass kein vollständiger Frostkörperabschluss erzielt werden kann. Die dringende Notwendigkeit, die tatsächlich vorherrschende Grundwassersituation auch schon in der Planungsphase zu erfassen, wird besonders deutlich, wenn die Frostkörpergeometrie zu gleichen Zeitpunkten, aber für unterschiedlich große Strömungsgeschwindigkeiten gegenübergestellt wird. In Bild 8 ist dies für das Basissystem für den Zeitpunkt vorgenommen worden, für den im undurchströmten Fall bereits der gesamte Aufgefriervorgang beendet ist ($t = 20$ d).

Für das Basissystem hat sich erwartungsgemäß die Luv-Seite unabhängig von der Fließgeschwindigkeit als gefrierzeitbestimmend herausgestellt. In Bild 9 sind die Aufgefrierzeiten über alle untersuchten Fließgeschwindigkeiten aufgetragen. Es zeigt sich, dass die Aufgefrierzeit für das Basissystem bei zunehmender Strömungsgeschwindigkeit erst näherungsweise linear und dann stark exponentiell ansteigt. Die Auftragung lässt auch die kritische Geschwindigkeit erahnen, für die die Gefrierzeit bei diesem Boden gegen Unendlich geht, d. h. der Frostkörper nicht mehr geschlossen werden kann.

Eine unzureichende oder gar fehlende Erkundung der Fließgeschwindigkeit oder eine nur überschlägige Ermittlung auf Basis eines geschätzten k_f -Werts



7 Basissystem und Berechnungsausschnitt des betrachteten Querschnitts

7 Basic system and calculation section for the considered cross-section

mit Schwankungsbreiten von einer Zehnerpotenz oder mehr kann folglich zu gravierenden Fehleinschätzungen der Gefrierzeiten führen. Ein Planungsfehler, der dann mit enormem Aufwand während der Ausführung kompensiert werden muss. So erhöhen sich beispielsweise die Kosten bei einer Fließgeschwindigkeit von 1 m/d im Vergleich zu einer Geschwindigkeit von 0,5 m/d für das hier vorgestellte Beispiel um 46 %. Eine Fehleinschätzung der Strömungsverhältnisse in dieser Größenordnung ist in der Planungsphase bei mangelnder Erkundung leicht vorstellbar.

4 Modifizierte Vereisungskonzepte

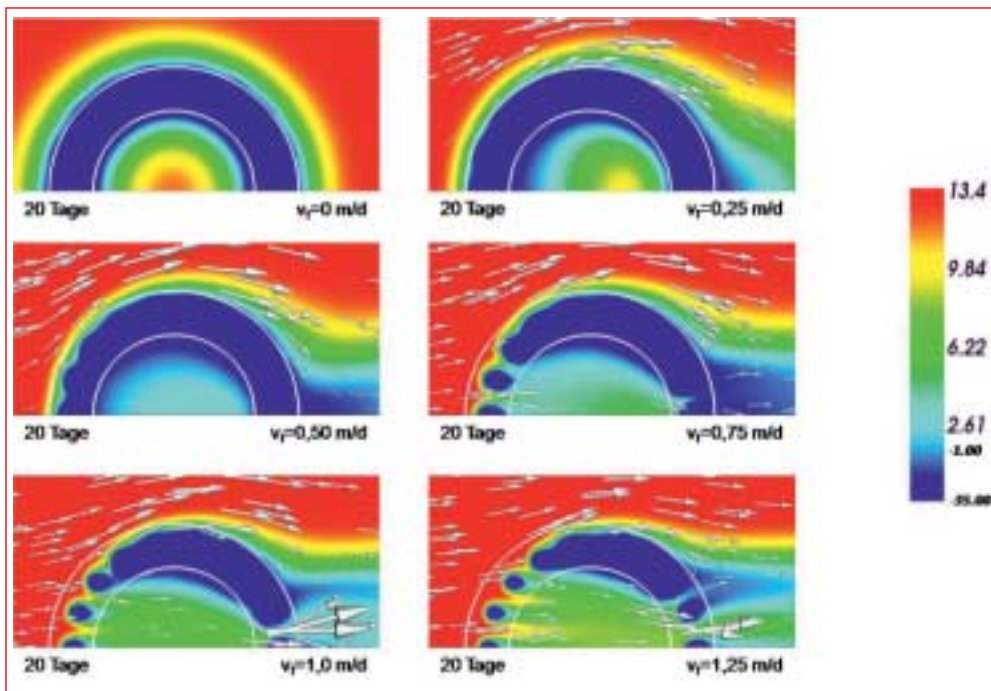
Das Ziel von optimierten Entwurfsvarianten muss darin liegen, eine Vergleichmäßigung des Frostfortschritts in den durch die Strömung unterschiedlich stark beanspruchten Bereichen zu erreichen. Dies lässt sich installationsseitig beispielsweise durch die Umpositionierung der geplanten oder die Installation zusätzlicher Gefrierrohre und betriebsseitig durch eine bedarfsgerechte Ansteuerung von Rohrgruppen erzielen [11, 1].

Selbst ohne Installation zusätzlicher Gefrierrohre lässt sich als Folge einer strömungs-

locity. Fig. 9 displays the freezing times for all investigated flow velocities. It is shown that the freezing time for the basic system given increasing flow velocity increases first of all more or less linearly and then to

a great extent exponentially. This application enables the critical velocity to be anticipated, at which the freezing time veers towards infinity for this soil, i.e. the frost zone can no longer be closed.

An insufficient investigation of the flow velocity or even a lack of one or even only a rough estimate on the basis of an estimated k_f – with fluctuation ranges amounting to a power of ten or more can thus lead to serious false estimates of the freezing time. A planning error, which has to be compensated for during execution that entails enormous difficulty. For instance the costs in the case of a flow velocity of 1 m/d compared with a rate of 0.5 m/d for the example displayed here rise by 46 %. An error in estimating



8 Frostkörperfortschritt nach 20 Tagen bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten (blau: gefrorener Boden, weiße Linie: geplante Frostkörperkontur)

8 Frost zone progress after 20 d given different flow velocities (blue: frozen soil, white line: planned frost zone contour)

angepassten Anordnung die Aufgefrierzeit im vorliegenden Beispiel um 20 % reduzieren. Dies kann z. B. durch Verdichtung der Gefrierrohre im Luvbereich oder Ausrücken der Gefrierrohre aus der Mittellinie in den Luvbereich erfolgen.

Eine noch größere Wirkung kann durch eine Vorkühlung des Grundwassers bei Positionierung zusätzlicher Rohre im Zustrom erzielt werden. Durch diese Anordnung wirkt sich der Vorkühleffekt besonders stark aus und es wird gleichzeitig ein keilartiger Frostkörper zur Ablenkung der Strömung gebildet (Bild 10). Der Querschlag ist somit auch im Luvbereich nicht mehr frontal der Strömung ausgesetzt. Die dadurch erzielbaren Gefrierzeitverkürzungen sind beachtlich. Durch den Einsatz von insgesamt nur 4 zusätzlichen Gefrierrohren lässt sich so in diesem Fall die Aufgefrierzeit von 50 Tagen im Basissystem auf 25 Tage halbie-

ren. Es entsteht ein sehr gleichmäßiger Frostfortschritt entlang des kompletten Umfangs des Querschlags. Aus thermischen Gesichtspunkten ist die Vorkühlung als sehr effektiv einzustufen. Es muss allerdings geprüft werden, ob eine baupraktische Umsetzung überhaupt möglich ist.

Da nur ein Teil der Kosten von der Fließgeschwindigkeit abhängt, wirkt sich die Gefrierzeitverkürzung nicht in gleichem Maße auf die Kostenreduktion aus, zeigt aber für das Optimierungsbeispiel mit Vorkühlung trotz zusätzlich installierter Gefrierrohre ein mögliches Einsparpotenzial von gut 20 %.

Die Vereisungssimulationen machen jedoch auch deutlich, dass durch den Eingriff in das Temperaturfeld und veränderte Fließwege der kritische Bereich oft nur verlagert wird, ohne eine Gesamtreduktion der Aufgefrierzeit zu erzielen. Für

the flow conditions of this magnitude is easily imaginable during the planning phase given a lack of proper investigation.

4 Modified Freezing Concept

The objective of optimised design variants must be to arrive at a levelling out of the frost progress in those areas that are affected by the flow to varying degrees. This can be achieved for instance from the installation side by the repositioning of the planned freezing pipes or the installation of additional ones or operationally by controlling groups of pipes as required [11, 1].

Even without the installation of additional freezing pipes the freezing time in the given example can be reduced by 20 % as a result of an arrangement adjusted to the flow.

This can e.g. be arrived at by concentrating the freezing

pipes at the intake side or relocating the pipes from the central line into the intake area.

A far greater effect can be attained by pre-cooling the groundwater through positioning additional pipes in the inflow. Thanks to this arrangement pre-cooling is particularly effective and at the same time a wedge-shaped frost zone is formed to divert the flow (Fig. 10). In this way the cross-passage is thus no longer exposed frontally to the flow in the intake area either. The freezing time is shortened considerably as a result. By employing no more than 4 additional freezing pipes the 50-day freezing period in the basic system can be halved to 25 in this case. Extremely uniform frost progress along the complete perimeter of the cross-section is attained. Seen from thermal aspects pre-cooling represents an extremely effective method. However, it must be looked into to find out whether this can actually be translated effectively into practice.

As only a part of the costs depends on the flow velocity, the reduction in freezing time does not exert the same effect on cost reduction. However, the optimisation example with pre-cooling in spite of the additionally installed freezing pipes reveals a possible savings potential of at least 20 %.

At the same time freezing simulations make it clear that by intervening in the temperature field and altered flow paths the critical area is often only relocated without arriving at an overall reduction of the freezing time. As a result the system should always be considered in its entirety for assessing a variant reliably.

The advantages of a certain design variant depend on the existing flow velocity and direction of flow. As a consequence it serves no purpose to provide an

eine zuverlässige Beurteilung einer Variante ist das System daher stets gesamtheitlich zu betrachten.

Die Vorteile einer bestimmten Entwurfsvariante hängen von der vorhandenen Fließgeschwindigkeit und Fließrichtung ab. Eine pauschale Optimierungsempfehlung für alle denkbaren Fließgeschwindigkeiten und Frostkörpergeometrien ist daher nicht zielführend. Voraussetzung für eine projektspezifische Optimierung ist stets die zuverlässige Erkundung der Strömungsverhältnisse, damit die kritischen Bereiche eines Systems sicher identifiziert werden können. Es muss geprüft werden, ob eine starke Richtungsänderung oder sogar völlige Umkehr der Strömung, beispielsweise durch Hochwassersituationen in Flussnähe, auftreten kann, da sich dadurch die vermeintliche Vorteilhaftigkeit eines Systems schnell zu einem Nachteil für die Gesamtsituation auswirken kann [2].

Aus den bisher am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen/D durchgeführten Untersuchungen lassen sich u. a. die folgenden Empfehlungen für eine Verkürzung der Aufgefrierzeit bzw. Optimierung der Betriebsweise bei einer Vereisungsmaßnahme unter Strömungseinfluss ableiten. Diese können im Planungsprozess als eine Hilfestellung auf dem Weg zu einem für die Situation optimierten System dienen:

- Die Fließgeschwindigkeit und -richtung ist die maßgebliche Eingangsgröße in den Berechnungen. Mit zunehmender Fließgeschwindigkeit steigt die Aufgefrierzeit exponentiell an.

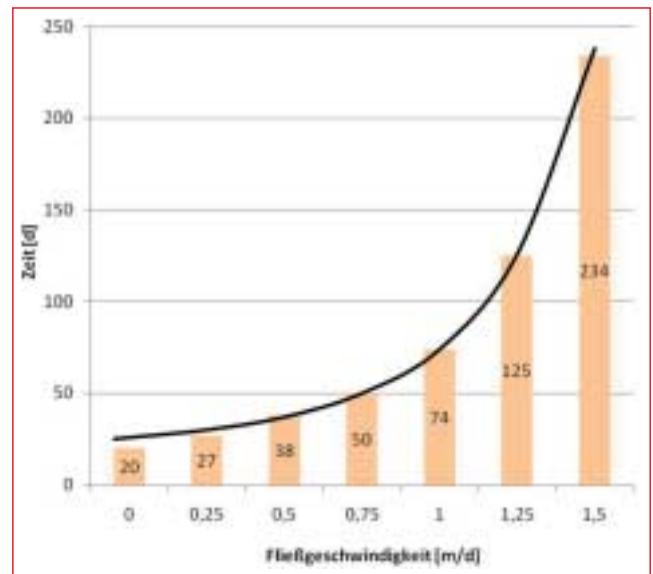
- Die Fließgeschwindigkeit kann am zuverlässigsten aus Pegelmessungen abgeleitet werden, wenn die Durchlässigkeit bekannt ist. Diese sollte vorzugsweise mittels Pumpversuch bestimmt werden. Mögliche Änderungen der Größe

oder Richtung der Strömung im Laufe der Baumaßnahme sollten zwingend in der Planungsphase Berücksichtigung finden.

- Für eine zielführende Optimierung muss vorab der gefrierzeitbestimmende, kritische Bereich für die vorliegende Strömungssituation lokalisiert werden. Bei äquidistanter Rohr-anordnung ist dies in der Regel der Luvbereich.

- Eine Verdichtung des Rohrabstandes im Luvbereich ist der Verdichtung im Leebereich zur Erzielung einer kürzeren Schließzeit vorzuziehen. Im Leebereich ist nicht so sehr der Abstand der Rohre, sondern in großem Maße auch die Abschirm- und Vorkühlwirkung aus dem Luvbereich für die Schließzeit relevant.

- Es sollte stets nachvollzogen werden, inwieweit sich ein Frostkörperschluss im Luvbereich durch eine Fließwegverlagerung nachteilig auf den Übergangsbereich zum First auswirkt. Bildet sich ein neuer kritischer Bereich mit einer Durchströmungsmöglichkeit, so ist die vorgesehene Gefrierzeitverkürzung gefährdet. Günstig ist eine frühzeitige Ablenkung

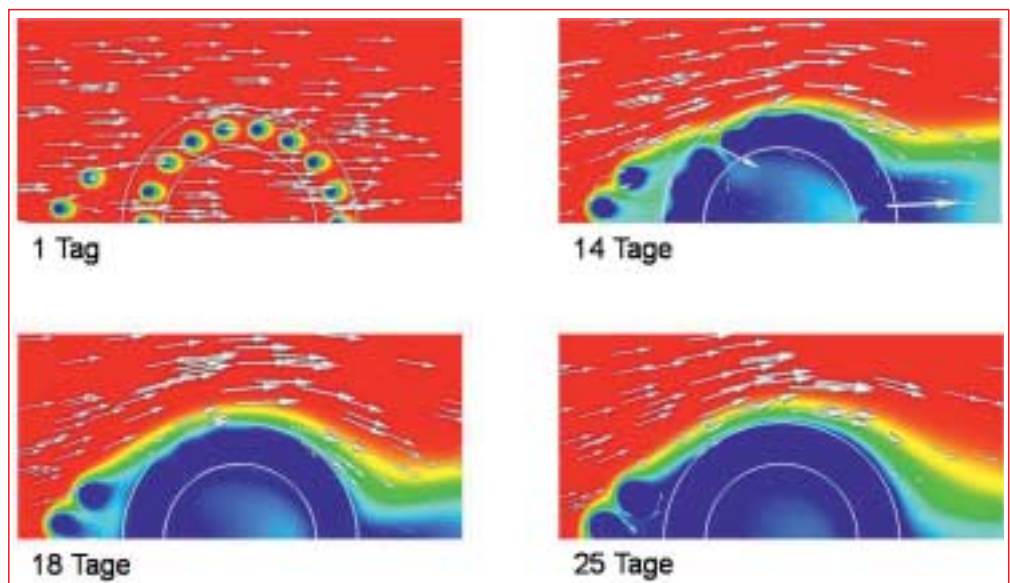


9 Exponentielle Zunahme der Aufgefrierzeit für das Basissystem bei steigender Fließgeschwindigkeit

9 Exponential increase in the freezing time for the basic system given growing flow velocity

overall recommendation for optimising all conceivable flow velocities and frost zone geometries. The prerequisite for a project-related optimisation is always reliable investigation of the flow conditions, so that the critical areas of a system can be safely identified. It has to be found out whether a pro-

nounced change in direction or even the complete reversal of the flow, for example as a result of situations brought on by flooding close to a river, can occur, as consequently the supposed advantages possessed by a system can quickly become a disadvantage for the overall situation [2].




10 Aufgefrierphase am modifizierten System mit zusätzlichen Rohren im Zustrom für $v_f = 0,75$ m/d

10 Freezing phase for the modified system with additional pipes in the inflow for $v_f = 0,75$ m/d

der Strömung über den First.

■ Die Vorkühlung des Grundwassers erweist sich als sehr effektive Maßnahme, um die Aufgefrierzeit zu verkürzen. Es sollte daher geprüft werden, inwieweit sich Gefrierrohre im Zustrom des Grundwassers so platzieren lassen, dass sie nach dem Aufbau des Frostkörpers zusätzlich eine Ablenkung der Strömung herbeiführen.

■ Die intermittierende Betriebsweise lässt sich optimieren, wenn die Rohre zu einzelnen Gruppen gebündelt werden, damit sie bedarfsgerecht angesteuert werden können. Insbesondere im Leebereich bietet sich großes Einsparpotenzial durch zeitweise Unterbrechung des Gefrierbetriebs.

Abschließend sei der Wayss & Freytag Ingenieurbau AG seitens der Autoren für die finanzielle Unterstützung und die Bereitstellung von Baustellen- und Rahmen des durchgeführten Forschungsvorhabens am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen gedankt. Ebenso gedankt sei der Entwicklergruppe von SHEMAT um Professor Clauser für ihre tatkräftige Unterstützung. 

Literatur

- [1] Baier, Ch., Ziegler, M., Mottaghy D., Rath V. (2008): Numerische Simulation des Gefrierprozesses bei der Baugrundvereisung im durchströmten Untergrund. Bauingenieur 83 (2008), H. 2, S. 49–60.
- [2] Baier, Ch. (2008): Thermisch-hydraulische Simulationen zur Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau unter Einfluss einer Grundwasserströmung. Dissertation am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen (Mittteilungsheft im Druck).
- [3] Clauser, C. (2003): Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers – SHEMAT and Processing SHEMAT, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [4] de Boer, R.; Blumh, J.; Wähling, M.; Ricken, T. (2003): Phasenübergänge in porösen Medien, Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen 98, Universität Duisburg-Essen.
- [5] Farouki, O.T. (1986): Thermal Properties of Soils. Trans Tech Publications, Series on Rock and Soil Mechanics, Vol. 11.
- [6] Hubbert, M.K. (1956): Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids, Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Vol. 207, pp. 222–239.
- [7] Johansen, O.; Frivik, P.E. (1980): Thermal properties of soils and rock materials; Proceedings of the 2nd International Symposium on Ground Freezing, NTH, Trondheim, Norwegen.
- [8] Müller, B.; Orth, W. (2005): Bodenvereisung unter schwierigen Bedingungen: Bahnsteigerweiterung beim U-Bahnhof Marienplatz München, STUVA Forschung und Praxis, 41, S. 111–115.
- [9] Orth, W. (1986): Gefrorener Sand als Werkstoff. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 100.
- [10] Weigl, H.; Dausch, G. (2006): Bodenstabilisierung durch Stickstoff- und Solevereisung anhand ausgeführter Beispiele in Deutschland und in den Niederlanden. Beiträge zum 21. Christian Veder Kolloquium. Hrsg.: M. Dietzel, W. Schubert, H. F. Schweiger; S. Semprich., S. 179–194.
- [11] Ziegler, M., Baier, Ch. (2007): Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau durch Anwendung numerischer Simulationen. Tunnel verbinden – Connections by Tunnels: Vorträge der STUVA-Tagung 2007 in Köln/Hrsg.: Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen STUVA. Gütersloh: Bauverlag, 2007. S. 177–183. (Forschung + Praxis 42).

From the investigations carried out so far at the Chair for Geotechnical Engineering at the RWTH Aachen University/D the following recommendations for shortening the freezing time or optimising the mode of operation for a freezing measure influenced by flow can be derived. They can serve to help arrive at an optimised system for the situation within the planning process:

■ The flow velocity and direction represents the determining starting parameter in the calculations. The freezing time increases exponentially as the flow velocity increases.

■ The flow velocity can most reliably be obtained from level measurements providing that the permeability is known. This should preferably be achieved by means of a pump test. Possible changes of the size or direction of flow during the course of the building project should definitely be taken into consideration during the planning phase.

■ In order to assure that optimisation succeeds the critical area determining the freezing time for the prevailing flow situation must be localised in advance. This is generally the intake area given an equidistant pipe set-up.

■ Any compression of the distance between pipes in the intake area in order to attain a shorter closing time is preferable to compression in the output area.

■ It should always be established to what extent closure of

the frost zone in the intake area exerts a negative effect on the transition area to the roof. Should this form a new critical area possibly giving rise to a through-flow the intended shortening of the freezing time is endangered. Early diversion of the flow via the roof is a favourable approach in this case.

■ Pre-cooling of the groundwater turns out to be a very effective measure in order to shorten the freezing time. As a result it should be established to what extent the freezing pipes can be placed in such a way in the groundwater inflow that this additionally leads to a diversion of the flow once the frost zone has been established.

■ The intermittent mode of operation can be optimised if the pipes are bundled together to form individual groups so that they can be controlled as required. There is a great savings potential especially in the output area by interrupting the freezing process from time to time.

In conclusion the Wayss & Freytag Ingenieurbau AG deserves the authors' thanks for its financial support and providing construction site data within the scope of the research project carried out at the Chair for Geotechnical Engineering at the RWTH Aachen University/D. Our thanks also go to the SHEMAT development group headed by Professor Clauser for its active support. 