

Bodenvereisung als Baugrundverbesserung

Umsetzung in den einzelnen Projektphasen

C. Fuchs¹⁾, J. Schmeiser¹⁾, R. Theiß¹⁾

¹⁾ ISP ZT GmbH, Wien

1 Einleitung

Das Vereisen von wasserführenden Bodenschichten wurde erstmals vor ca. 150 Jahren für das Abteufen von Minenschächten eingesetzt. Bis Mitte des 20. Jahrhunderts kam das Verfahren fast ausschließlich bei der Herstellung von Schächten (meist zum Kohleabbau) zur Anwendung. Danach wurde die Bodenvereisung lange Zeit als „Notmaßnahme“ im Tunnel- und Spezialtiefbau eingesetzt.

Heutzutage gilt die „Bodenvereisung“ bzw. „Baugrundvereisung“ schon beinahe als Standardverfahren des modernen Tunnelbaues im urbanen Gebiet. Der erhöhte Anspruch an eine verbesserte Infrastruktur in den großen Siedlungsbereichen auf der ganzen Welt, sowie die meist dicht verbauten städtischen Flächen zwingen den öffentlichen Verkehr vermehrt in den „Untergrund“. Vielerorts befinden sich in den dafür benötigten Baugründen ausgedehnte Grundwasserspiegel, gespannte Grundwässer und/oder eingeschlossenes Grundwasser (z.B. in Sandlinsen), welche aufgrund der hohen Bebauungsdichte bzw. aus umweltpolitischen Gründen nicht von Obertage abgesenkt oder entspannt werden können. Ein funktionierendes Grundwassermanagement ist jedoch eine unverzichtbare Grundlage für einen erfolgreichen Tunnelvortrieb. In diesem Spannungsfeld hat sich die Bodenvereisung als eine geeignete Maßnahme durchgesetzt.

Schon im Grundbautaschenbuch aus dem Jahre 1955 (Band 1) wird die „Vereisung des Baugrundes“ im Kapitel zur Baugrundverbesserung angeführt. Da sich die Wirkungsweise der Bodenvereisung ausschließlich auf einfache und nachvollziehbare physikalische Gesetze beschränkt, haben sich die damaligen Überlegungen und eingesetzten Verfahren bis heute nicht wesentlich geändert. Den größten Fortschritt gab es unbestritten in der Bohrtechnik. Erst mit der Entwicklung sehr langer und/oder gesteuerter Bohrungen in unterschiedlichsten Böden können heutzutage Frostkörper, und damit auch Projekte, realisiert

werden, welche damals noch als undenkbar erschienen. Moderne Computerprogramme zu den Themen Thermodynamik (Aufgefrieren und Erhaltung von Frostkörpern) und Bemessung von Grundbauten tragen zusätzlich dazu bei, dem vereisten Boden immer mehr „zuzutrauen“. Aus der reinen Bodenverbesserung um z.B. einen Tunnel überhaupt vortreiben zu können, wird dem Frostkörper eine immer höhere Tragfähigkeit zugemutet, die letztendlich sogar bis zur alleinigen Tragfähigkeit des gefrorenen Bodens führen kann.

Im vorliegenden Beitrag möchten wir aus der Sicht des Planungsbüros den Einsatz der Bodenvereisung (vor allem im Tunnelbau) über alle Planungsphasen hinweg näher beleuchten.

2 Boden-, Baugrundvereisung

2.1 Allgemeines

Die Bodenvereisung dient im Lockergesteinstunnelbau als Vorausmaßnahme zur Baugrundverbesserung für einen gesicherten Vortrieb nach den Kriterien der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT, engl.: NATM) bei anstehendem Grundwasser.

Der künstlich vereiste Boden muss einen entsprechenden Wassergehalt haben, und die Strömungsgeschwindigkeit des anstehenden Grundwassers darf nicht zu hoch sein. Im Einzelfall können „wasserlose“ Böden durch das künstliche Einbringen von Wasser vereist werden.

Der Frostkörper dient einerseits als Abdichtung gegenüber dem anstehenden Grundwasser während der Bauzeit, und andererseits zur Bodenverbesserung durch Erhöhung der Kohäsion und des E-Moduls. In seltenen Fällen kann der Frostkörper auch als „Tragelement“ eingesetzt werden. In diesem Fall kann dem Frostkörper eine Druckfestigkeit zugeordnet werden (in Abhängigkeit der Durchschnittstemperatur des Frostkörpers).

Der Frostkörperaufbau erfolgt mit flüssigem Stickstoff oder mit einer Sole-Lösung.

2.2 Sole-Vereisung

Bei der Sole-Vereisung wird ein Kälteträger in einer Gefrierstation mit Hilfe eines Kältemittels (z.B. Ammoniak) durch ein Gefrieraggregat heruntergekühlt (Kreisprozess). Als Kälteträger für die Baugrundvereisung dient eine Sole-Lösung, welche auf ca. -35°C bis -40°C abgekühlt und mit ca. -30°C bis -35°C (Vorlauftemperatur) in die Fallrohre eingebracht wird. Im Zuge des Rückflusses

zwischen dem Fallrohr und dem Bohr- bzw. dem Gefrierrohr wird dem Boden Wärme entzogen. Die Rücklauftemperatur der Sole-Lösung beträgt ca. -25°C bis -30°C . Die Sole-Vereisung stellt einen in sich geschlossenen Regelkreis dar.

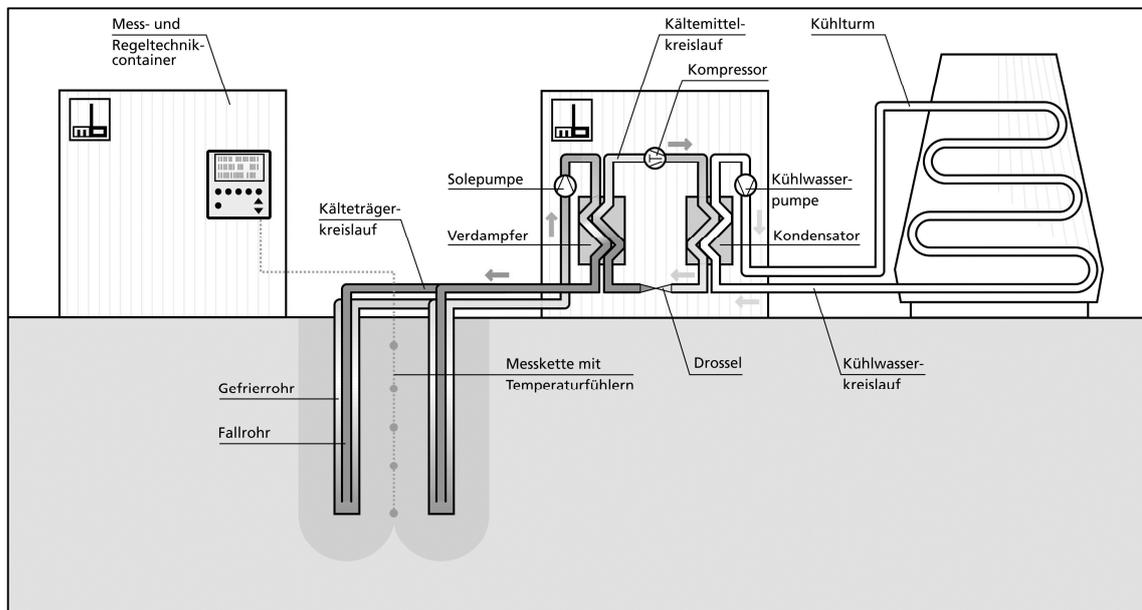


Abb. 1: Regelkreislauf Sole-Vereisung (Quelle: Max Bögl)

Die Sole-Vereisung ist grundsätzlich ein technisch sicheres Verfahren, wenn die Stromzufuhr, vor allem in der Erhaltungsphase, kontinuierlich gewährleistet ist. Systembedingte Risiken können durch die richtige Wahl der Gefrierrohrabstände, durch die Herstellung lagegenauer Bohrungen sowie durch die Wahl geeigneter Gefrierrohrdurchmesser minimiert werden. Eine kontinuierliche Messung der Temperatur des Bodens sowie die daraus resultierende Darstellung und Interpretation des vorhandenen Frostkörpers sind Grundlage für einen sicheren Vortrieb.

Vorteile:

- umweltverträglich (geschlossenes System)
- intermittierender Betrieb durch Einzelbeschickung der Gefrierrohre bzw. von Gefrierrohrgruppen möglich
- sicheres und erprobtes Verfahren

Nachteile:

- Bei Ausfall des Systems (z.B.: Stromausfall) muss Redundanz gegeben sein, daher Erfordernis einer „Zwillingsanlage“ und/oder eines Notstromaggregats
- Platzbedarf für die Gefrieranlage an der Oberfläche oder in einem Schacht

2.3 Stickstoff-Vereisung

Bei der Stickstoffvereisung wird tiefkalter flüssiger Stickstoff (LIN) aus Tankbehältern in das Gefrierrohr bzw. in die Vereisungslanze eingebracht. Dort verdampft er bei -196°C und entzieht dem Boden Wärme. Der verdampfte (gasförmige) Stickstoff entweicht mit einer Temperatur von ca. -80°C entweder in den Boden oder in die Atmosphäre. Bei der Stickstoff-Vereisung muss es einen ständigen Nachschub an flüssigem Stickstoff geben.

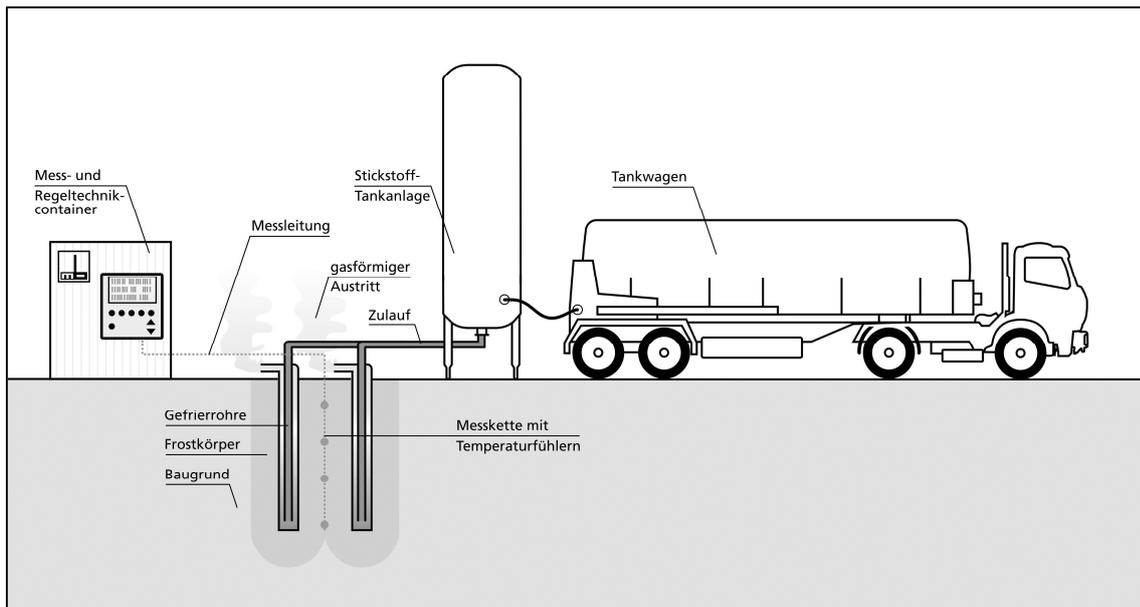


Abb. 2: Regelkreislauf Stickstoff-Vereisung (Quelle: Max Bögl)

Die Stickstoffvereisung stellt im modernen Tunnelbau keine Regelmaßnahme dar. Der Grund ist sicherlich auf der Kostenseite zu suchen. Für „kurzzeitige“ Spezialfälle sowie für „kurzfristige“ Notfallmaßnahmen ist sie jedoch eine unverzichtbare Größe im Grundbau. Im Tunnelbau wird sie meist in der Aufgefrierphase bei höheren Grundwasserströmungsgeschwindigkeiten oder anderen äußeren Einflüssen, die einen Aufbau des Frostkörpers mit Sole nicht zulassen, eingesetzt. Die Erhaltung erfolgt dann in den meisten Fällen mit Sole (Kosten).

Vorteile:

- umweltverträglich
- rasche Vereisung („Schockvereisung“)
- sicheres und erprobtes Verfahren

Nachteile:

- ständiger Nachschub an teurem Stickstoff mittels Spezialfahrzeugen
- Beschickung der Tanks auch in der Nacht (Lärm)

- fehlende Regelbarkeit (für längere Vereisungsmaßnahmen nicht geeignet)
- Platzbedarf für die Stickstofftanks an der Oberfläche oder in einem Schacht
- Nebelbildung des Stickstoffes bei Austritt in die Atmosphäre
- Gefahr von Stickstoffkonzentrationen unter- und Obertage (Abluft) und damit Gefährdung von Leib und Leben für Beschäftigte und Anrainer

2.4 Bohrungen

Grundsätzlich werden verrohrte Bohrungen hergestellt für

- die Vereisung,
- die Temperaturmessung und
- die Entwässerung des eingeschlossenen Wassers im Frostkörper .

Die Bohrdurchmesser sind dem Einsatzzweck anzupassen. Diese bewegen sich in der Regel zwischen 100mm und rund 160mm Durchmesser. Der Abstand der einzelnen Bohrungen liegt zwischen 1,0m und 1,5m.

In der Planung müssen der Platzbedarf für die Bohransätze (in den Schächten bzw. trompetenförmige Aufweitungen bei Tunneln) sowie die Länge der Bohrungen besonders berücksichtigt werden. Für Bohrungen bis ca. 40m können ungesteuerte Bohrverfahren eingesetzt werden. Bei Bohrlängen darüber hinaus sind zwingend gesteuerte Bohrungen vorzusehen. Diese können nach derzeitigem Stand der Technik mit Längen bis über 100m mit einer max. Bohrabweichung von ca. 0,5% (im gesamten Bohrlochverlauf) hergestellt werden. Weiters können Radien in Grund- und Aufriss gebohrt werden, das Umfahren kleinräumiger Hindernisse ist ebenfalls möglich. Bekannte oder unbekannte Hindernisse wie Stahl, Beton oder Holz können mit oder ohne Gerätewechsel bis zu bestimmten Stärken durchörtert werden.

Die Bohrgenauigkeit wird entweder durch die Verwendung eines hinter dem Bohrkopf befindlichen **Kreiselkompasses (Gyroscope)** oder durch eine **optische Ortung mit Diodenzieltafel** erreicht. Bei oberflächennahen Bohrungen ist der Bohrverlauf durch Ortung mit einem Sender von der Oberfläche aus steuerbar. In dicht verbaute Gebiete kann diese Methode jedoch nicht eingesetzt werden.

Der Kontrolle der Bohrgenauigkeit kommt eine entscheidende Bedeutung zu. Durch Einbringen von **Horizontalinklinometern** in die fertiggestellten Bohrungen, oder durch die Verwendung einer **Inertialsonde** (Kreiselsystem) kann der Bohrlochverlauf unabhängig nachvermessen werden. Besonders hilfreich erweist sich dabei die räumliche Darstellung der Ist-Bohrungen.

Nach Abschluss der Bohrungen inkl. deren Nachvermessung werden die Bohrungen mit

- Gefrierrohren,
 - Temperaturmessrohren und
 - Entwässerungsrohren (geschlitzte Pegelrohre)
- ausgebaut und an das Gefriersystem angeschlossen.

3 Projektvorstellungen

3.1 U-Bahn-Bau Wien, Bauabschnitt U2/1 „Schottenring“

Über dieses Bauvorhaben wurde auf den verschiedensten Veranstaltungen schon ausführlich referiert. Daher sind die nachfolgenden Erläuterungen bewusst kurz gehalten.

Im Zuge der Verlängerung der U-Bahn-Linie U2 von der Innenstadt Richtung Osten nach Aspern musste der Donaukanal in bergmännischer Bauweise unterfahren werden. Aufgrund der örtlichen Verhältnisse (Bestandsstation „Schottenring“ der U-Bahn-Linie U4) kam die neue Station der U2 knapp unterhalb der Flusssohle zu liegen. Um die Schifffahrt auf dem Donaukanal nicht zu behindern, konnte keine offene Bauweise durchgeführt werden.

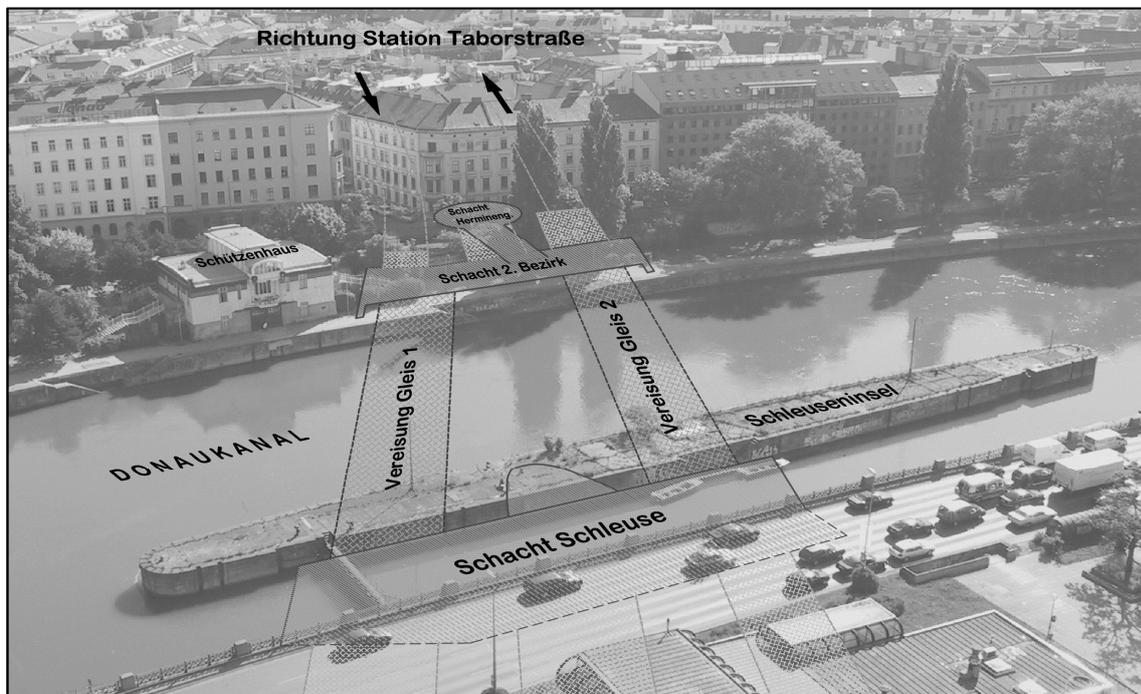


Abb. 3: Übersicht Baulos U2/1 „Schottenring“, Wien

Für die Erstellung der beiden Stationsröhren unter dem Donaukanal wurde eine künstliche Baugrundvereisung als temporäre Sicherung durchgeführt. Der

Vereisungskörper hatte hier nicht nur eine statische sondern auch eine wasserabdichtende Funktion während der Bauphase. Er diente als statisch tragendes Bauteil, bis die Außenschale (Spritzbeton) nach ca. 3 Tagen tragfähig war, und er diente als Dichtkörper ohne statische Funktion, bis die Innenschale hergestellt worden war.

Der Vortrieb in geschlossener Bauweise mit einem Ausbruchsquerschnitt von ca. 72,0m² konnte beginnen, sobald der Frostkörper eine Mächtigkeit von 2,0m erreicht hatte, und die Wasserdichtigkeit durch die Entwässerungsbohrungen nachgewiesen wurde. Die Außenschale wurde abschnittsweise in Spritzbeton $d=35\text{cm}$, und die Innenschale als 40cm dicke Ortbetonschale hergestellt. Die geringsten Überlagerungen zur Sohle des Donaukanals betragen ca. 4,30m.

Zur Herstellung des Frostkörpers wurden gegenläufig aus zwei Schächten Vereisungsbohrungen mit Längen von ca. 40m hergestellt. Als Vereisungsmaßnahme sollte grundsätzlich eine Sole-Vereisung rund um die Querschnitte zur Anwendung kommen. In der Aufgefrierphase wurde es allerdings aufgrund des Wärmeeinflusses des naheliegenden Donaukanals notwendig, eine Vereisung mit Stickstoff in den Firstbereichen vorzusehen. Nach vollständigem Frostkörperaufbau wurde diese in eine Sole-Vereisung umgerüstet.

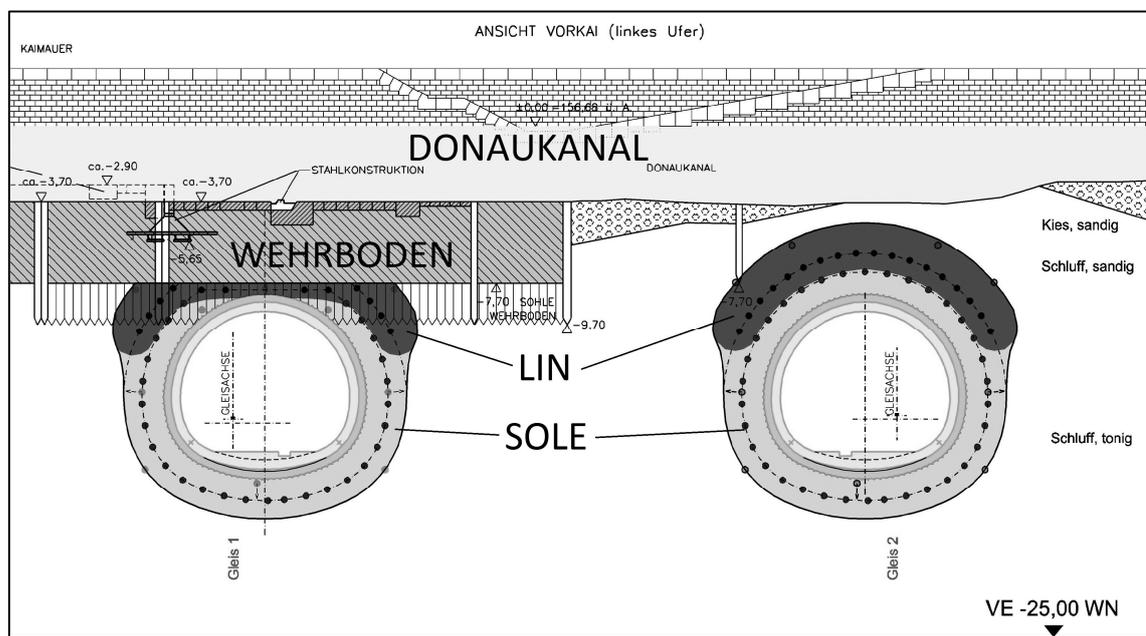


Abb. 4: U2/1 Frostkörper

Der Frostkörper um den Ausbruchsquerschnitt musste bis zum Einbau der Innenschale erhalten bleiben. Das theoretische Gesamtvolumen des zu vereisenden Baugrundes der Stationsröhren betrug ca. 14.000m³, und die Gesamtböhlänge lag bei ca. 9.700m.

3.2 U-Bahn-Bau Berlin, Lückenschluss U5, Teilprojekt Bahnhof „Museumsinsel“

Die bestehende U-Bahn-Linie U5 in Berlin endet im Bereich Berlin-Mitte am Bahnhof Alexanderplatz. Derzeit in Ausführung ist die Herstellung des Lückenschlusses der Trasse zwischen den bestehenden Tunnelanlagen am Alexanderplatz und dem Bahnhof Brandenburger Tor. Im Zuge der Baumaßnahmen der Verkehrsanlagen im zentralen Bereich wurde bereits der Tunnelabschnitt vom Hauptbahnhof bis zum Brandenburger Tor (derzeit als U-Bahn-Linie U55 im Shuttle-Betrieb Teil des Berliner Verkehrsnetzes) erstellt. Über die Verbindung der U55 mit der neu geplanten U5 erhält Berlin-Mitte Anschluss an den Hauptbahnhof. Die Linienführung der Trasse führt innerstädtisch vom Alexanderplatz über die neu zu erstellenden Bahnhöfe „Rotes Rathaus“, „Museumsinsel“ und „Unter den Linden“ entlang der Straße Unter den Linden zum Brandenburger Tor und unterquert dabei unter anderem die Spree, den Spreekanal und das neu errichtete Berliner Stadtschloss.

Die beiden ca. 2,2km langen Tunnel wurden bereits mit einem Hydroschild erfolgreich aufgeföhren. Der Innendurchmesser betrug $D = 5,70$ m. Weiterhin befinden sich derzeit drei Bahnhöfe in Bau. Der Bahnhof „Rotes Rathaus“ wird in unmittelbarer Nähe zum Berliner Roten Rathaus hergestellt. Durch das Bauwerk wird der Anschluss an die sich im Betrieb befindenden Tunnelanlagen (Abstellanlagen) der bestehenden U5 realisiert. Im weiteren Verlauf des Bahnhofs ist eine Gleiswechsellanlage in offener Bauweise geplant. Hier begann die Schildfahrt. Der Bahnhof „Museumsinsel“ kommt im Bereich des Spreekanals zu liegen. Die Planung sieht vor, den Bahnsteigbereich des Bahnhofs von den beiden Bahnhofsköpfen aus im Schutze einer Vereisung in Bergmännischer Bauweise herzustellen. Der Bahnhof „Unter den Linden“ wird als Kreuzungsbauwerk mit der bestehenden U-Bahnlinie U6 erstellt. Hierzu werden die bestehenden Tunnel unterirdisch abgebrochen und zur Realisierung der Umsteigebeziehungen neu erstellt.

Bahnhof Museumsinsel:

Der Bahnhof Museumsinsel beginnt am östlichen Spreekanalufer und endet im Bereich des Kronprinzenpalais'. Das Bauwerk besteht aus zwei Schächten, dem östlichen und dem westlichen Schacht, die jeweils an den Enden des Bahnhofs situiert sind, und dem Tunnelbereich (Bahnsteigröhren), der beide Schächte verbindet. Ein Teil der Bahnsteigröhre ist unmittelbar unter dem Spreekanal situiert. Im Bereich der Tunnelfirste beträgt die Überdeckung zur Sohle des Spreekanals ca. 4,50m. Aus diesem Grund wird der Gesamtquerschnitt der Tunnelröhre nach der Durchfahrt der TVM mit 3 Teilquerschnitten (Mittelstollen und zwei Seitenstollen) in bergmännischem Vortrieb (Spritzbetonbauweise) im

Schutze einer Vereisung mit Sole hergestellt. Die Schachtbauwerke werden in Deckelbauweise errichtet.

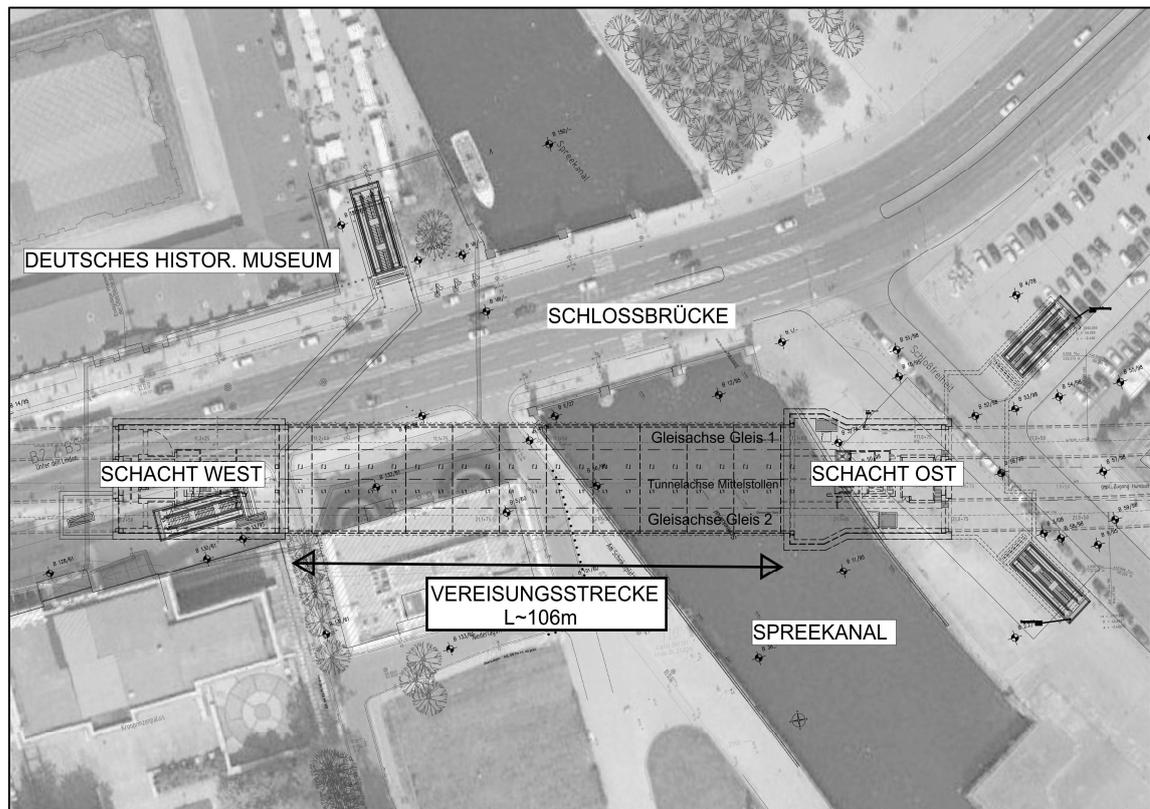


Abb. 5: Bahnhof „Museumsinsel“

Es ist vorgesehen, dass die Bohrungen sowohl vom Schacht Ost als auch vom Schacht West der offenen Bauweise hergestellt werden. Die Gefrier- und Temperaturmessbohrungen, gesteuerte und ungesteuerte Horizontalbohrungen mit einem Durchmesser von ca. 160mm und einer Länge von bis zu ca. 106m, liegen parallel bzw. leicht geneigt ($\leq 10\%$) zur Tunnelachse. Die Bohrungen sind mit einer max. Abweichung von 0,5% der Bohrlänge herzustellen.

Folgende Mindestanforderungen werden an den mittels Solevereisung herzustellenden Frostkörper gestellt:

- Der Frostkörper muss über den gesamten Vereisungszeitraum und die gesamte Vereisungslänge durchgehend wasserdicht sein.
- Der Frostkörper muss statisch tragfähig sein.
- Stärke des Frostkörpers zwischen den -2°C -Isothermen bzw. zw. dem Ausbruchsrund und der äußeren -2°C -Isotherme rund 2,50m.
- Mittlere Temperatur über den statisch erforderlichen Frostkörperquerschnitt (zwischen den Gefrierrohren), bezogen auf die -2°C -Isotherme: $T_m \leq -10^{\circ}\text{C}$
- Eine Maximaltemperatur von -10°C in den Auflagerbereichen des Frostkörpergewölbes über dem Mittelstollen.

- Ein wasserdichter Anschluss des Frostkörpers an die Start- bzw. Zielwand der Schächte ist sicherzustellen.

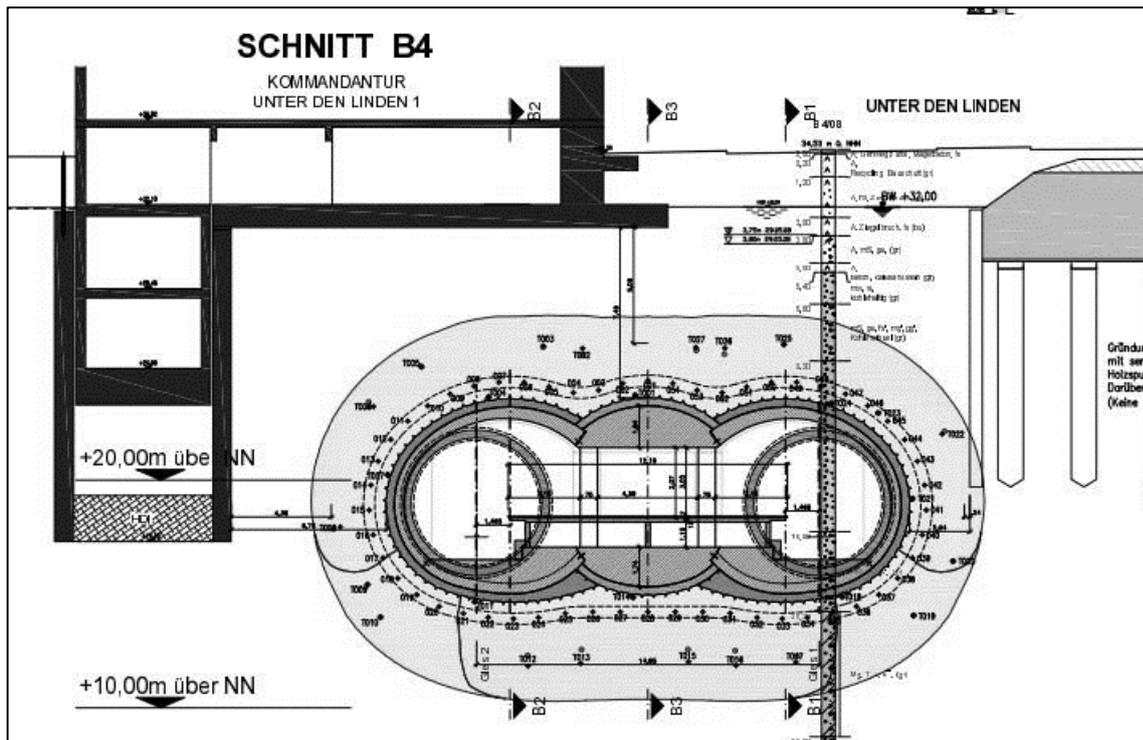


Abb. 6: Bodenvereisung Bahnhof „Museumsinsel“, Querschnitt B4

anstehende Geologie:

- anthropogene Auffüllungen
- obere Sande
- Talsande
- Geschiebemergel bzw. Steinlagen und Sande/Kiese
- Schmelzwassersande

Lokal sind in die oberen Sande Täler eingeschnitten, die mit holozänen Ablagerungen wie Torf/Mudde/Faulschlamm und holozänen Sanden gefüllt sind. In größerer Tiefe werden die o.g. Schichten von Beckenbildungen, elsterkaltzeitlichem Geschiebemergel bzw. Braunkohle-tonen und -schluffen unterlagert. Die Tiefenbereiche dieser Schichten entlang der Trasse sind variabel.

Die Grundwassertemperatur beträgt ungefähr 16°C bei sehr geringer Fließgeschwindigkeit. Für die Planung wurde von einer Grundwasserfließgeschwindigkeit von 0,5m/Tag ausgegangen.

4 Entwurfsphase

Abgesehen von dem Wunsch (bzw. der Notwendigkeit), eine neue unterirdische Verkehrsanlage zu errichten, steht deren Machbarkeit in dieser Projektphase im Vordergrund. Trivialerweise muss sich der Planer zuallererst mit dem Baugrund, der ihm zur Verfügung steht, und mit den sonstigen Randbedingungen wie z.B. Oberflächenbebauung und/oder Einbautenlagen beschäftigen. Diese Kombination aller relevanten Randbedingungen ist maßgebend für die richtige Wahl eines Baukonzeptes. Lässt der anstehende Boden einen Tunnelvortrieb ohne vorausseilende Bodenverbesserungsmaßnahmen nicht zu, sind auch diese im Rahmen aller o.g. Randbedingungen sorgfältig zu überlegen und zu planen. In vielen (wenn nicht in den meisten) Fällen stellt das anstehende Grundwasser (frei oder gespannt) im Lockergestein das größte Problem für einen Tunnelvortrieb nach den Regeln der NÖT dar. Sollte eine Grundwasserhaltung bzw. eine Grundwasserentspannung von Obertage aufgrund der dichten Bebauung an der Oberfläche nicht möglich, und eine vorausseilende Entwässerung aus dem Vortrieb heraus zu risikoreich und/oder unwirtschaftlich sein, dann stellt die Bodenvereisung eine gute Alternative als Baugrundverbesserung dar. Aus unserer Erfahrung wurde das Verfahren der Baugrundvereisung im Tunnelbau in der Vergangenheit oftmals als „Notmaßnahme“ eingesetzt. In den letzten Jahren fand das Verfahren vermehrt Einzug in die Ausschreibungen als geeignete Maßnahme zur vorausseilenden Bodenverbesserung.

In der Entwurfsphase ist demnach zuerst abzuklären, ob der geologische und hydrogeologische Aufbau des Bodens eine Bodenvereisung überhaupt zulässt. Das Vorhandensein von Wasser sowie die vorliegende Grundwassergeschwindigkeit stellen dabei die maßgebenden Parameter dar. Grundsätzlich können wasserarme Böden künstlich auch „bewässert“ werden. Bei einer Fließgeschwindigkeit von $>2,50\text{m/Tag}$ stößt die Bodenvereisung allerdings an seine Grenzen.

Weiters ist, im Rahmen der bautechnischen Ausführung, die Machbarkeit der Bohrungen für die späteren Vereisungs-, Temperaturmess- und Entwässerungsrohre zu untersuchen. Dabei sind die Bohrbarkeit des anstehenden Bodens, die Bohrlängen in Verbindung mit den erforderlichen Bohrgenauigkeiten und die Platzverhältnisse für die Bohrgeräte von entscheidender Bedeutung.

Generelle Überlegungen zu den erwarteten Anforderungen an den Frostkörper sowie die Lösung der daraus resultierende Konsequenzen (Platzbedarf, Hebungen, etc.) schließen die Entwurfsphase ab.

5 Ausschreibung und Vergabe

Aus planerischer Sicht ist vorerst die Ausbildung des Frostkörpers (Lage, Dicke, Durchschnittstemperatur, etc.) der Aufgabenstellung anzupassen. Für Frostkörper mit rein abdichtender Funktion sollte die plangemäße Mindestdicke von 1,0m nicht unterschritten werden. Der gefrorene Boden wird dabei in den Tunnelberechnungen nicht berücksichtigt. Um den Frostkörper auch in einer statischen Berechnung in Rechnung zu stellen, sollte dieser eine Stärke von 1,50m nicht unterschreiten. Schon frühzeitig sollte überlegt werden, in welcher Form der Nachweis des gefrorenen Bodens sinnvoll ist. Dieser kann durch die Berücksichtigung der bodenverbesserten Eigenschaften des gefrorenen Bodens (geotechnischer Ansatz) oder durch den Nachweis der Einhaltung der zulässigen Spannungen (nach altem Sicherheitskonzept) im Frostkörper (statischer Ansatz) erfolgen. Der Frostkörper stellt dabei ein eigenständiges Tragelement dar, welches nachgewiesen werden muss.

Die Bodenverbesserung wird bei der Berechnung mit einem FEM-Kontinuumsmodell (z.B.: Hardening Soil) durch die Erhöhung der Kohäsion, des E-Moduls und der Druckfestigkeit des gefrorenen Bodens erreicht. Damit erhält man eine erhöhte Vortriebssicherheit, eine Verringerung der Oberflächensetzungen durch Reduktion der Entspannungsvorgänge im Ausbruchsbereich, eine Verbesserung der Ortsbruststabilität sowie die Möglichkeit, größere Teilflächen beim Vortrieb auffahren zu können.

Alternativ zur Bemessung des Gesamtsystems Boden-Frostkörper-Bauwerk mit Hilfe eines FEM-Kontinuumsmodells kann der Frostkörper auch mit „vereinfachten“ statischen Mitteln untersucht werden. Dabei können z.B. Frostkörpergewölbe definiert, Spannungen ermittelt und berechnet werden. Die zulässigen Spannungen im Frostkörper können, in Abhängigkeit der Temperatur, in Laborversuchen ermittelt werden. Diese Vorgehensweise wird vor allem dann angewandt, wenn dem gefrorenen Boden die vollständige Lastableitung während des Tunnelausbruchs zugemutet werden soll. Der Tunnelausbau (Spritzbetonsicherung) erhält Lasten erst aus dem Kriechen des Frostkörpers. Im unmittelbaren Ausbruchsbereich trägt der Frostkörper alleine alle Lasten ab.

Selbstverständlich können beide Verfahren miteinander kombiniert werden, wengleich diese Vorgehensweise aus grundbautechnischer Sicht nicht schlüssig erscheint.

Bei dem Einsatz der Baugrundvereisung als Bodenverbesserung und/oder als Tragelement ist der durchschnittlichen Temperatur ein besonderes Augenmerk zu legen. Diese wird im Regelfall zwischen den -2°C -Isothermen festgelegt. Durchschnittliche (plangemäße) Mindesttemperaturen liegen dabei in einem Bereich von -10°C bis -5°C . Die Untersuchung der Temperaturentwicklung in

der Aufgefrier- und Erhaltungsphase des Frostkörpers erfolgt dabei mittels einer separaten thermodynamischen Berechnung.

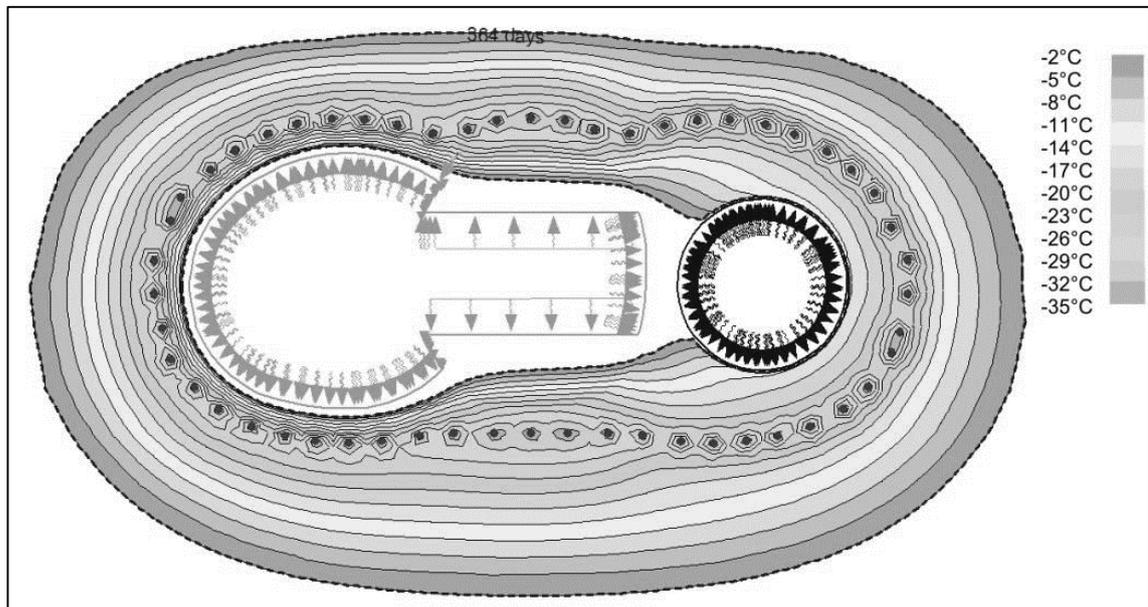


Abb. 7: Ausschnitt thermodynamische Berechnung „Museumsinsel“

Beim Bauvorhaben U2/1 in Wien wurden geotechnische Berechnungen unter Berücksichtigung der bodenverbesserten Eigenschaften des gefrorenen Bodens durchgeführt. Bei der U5 in Berlin entschlossen wir uns, eine zusätzliche Berechnung des Frostkörpers als eigenständiges Tragelement durchzuführen. Dies wurde vor allem durch die „Drillingsgeometrie“ der Stationsröhren und deren Herstellungsreihenfolge als sinnvoll erachtet.

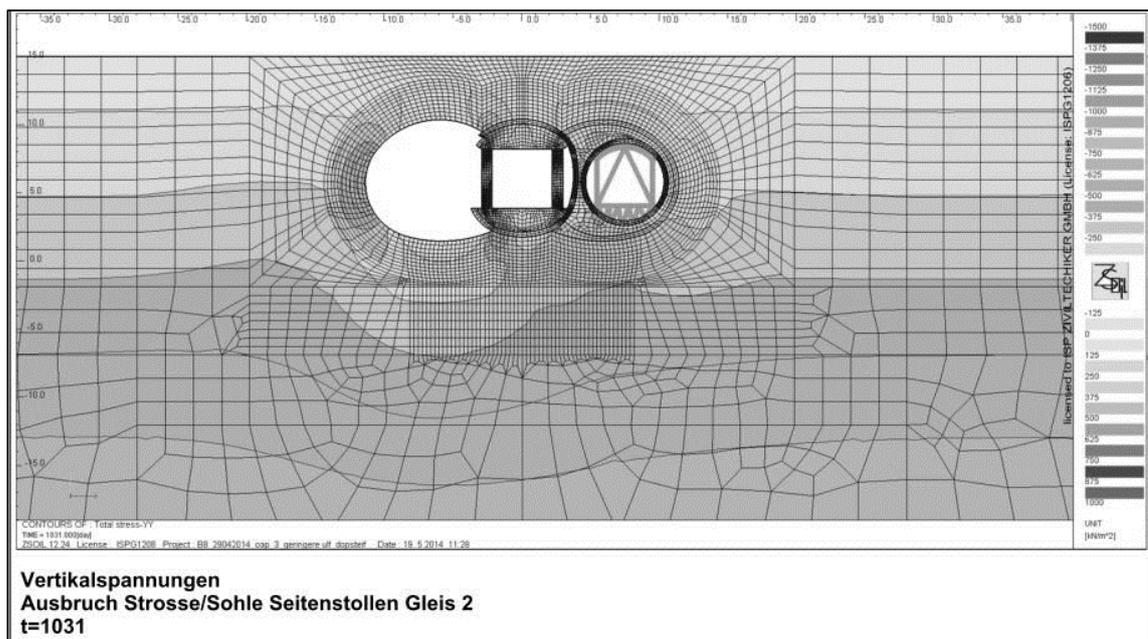


Abb. 8: Ausschnitt Kontinuumsmodell „Museumsinsel“

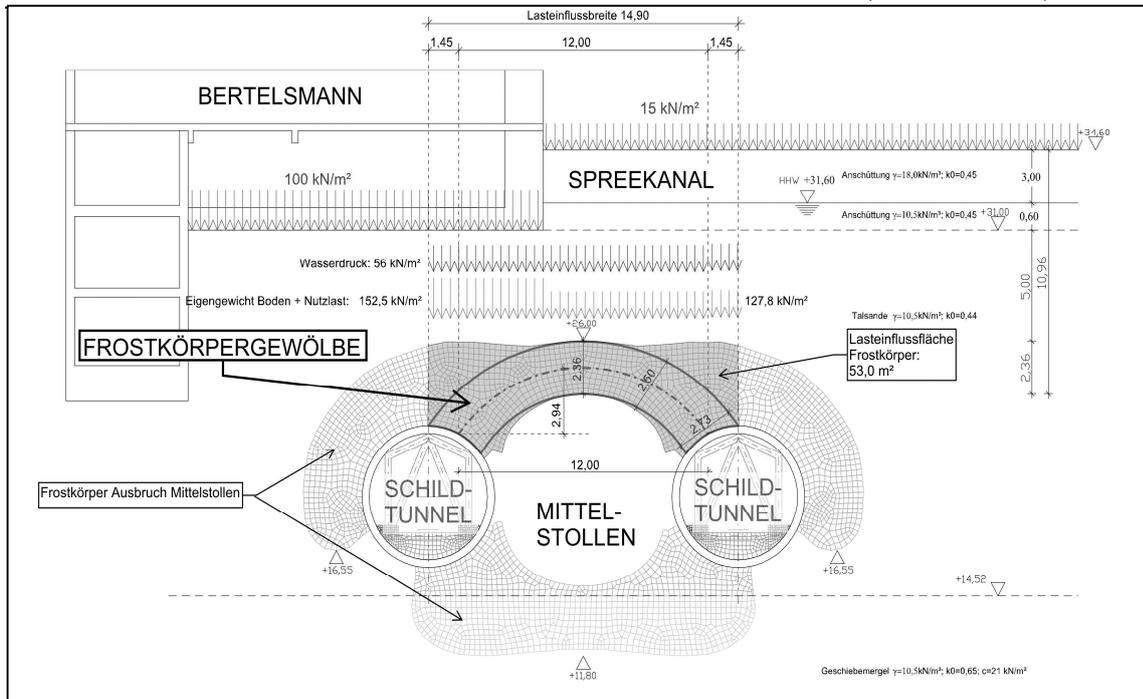


Abb. 9: Frostkörpergewölbe „Museumsinsel“ (Bild Stand Ausschreibung)

Der Aufbau des erforderlichen Frostkörpers (Aufgefrierphase) erfolgt rechtzeitig vor Beginn der Vortriebsarbeiten. Dabei gilt es vorweg festzustellen, welche Zeit für den Aufbau benötigt wird. Mit Hilfe der thermodynamischen Berechnung kann dieser Wert berechnet bzw., unter Berücksichtigung des Zeitaufwandes für das „Kaltfahren“ des Systems, abgeschätzt werden. Die Erhaltung des erforderlichen Frostkörpers erfolgt durch gesteuertes Ein- und Ausschalten aller bzw. einzelner Gefrierrohre (intermittierender Betrieb). Die Berechnung liefert weiters den zu erwartenden Energiebedarf (z.B.: Stromverbrauch).

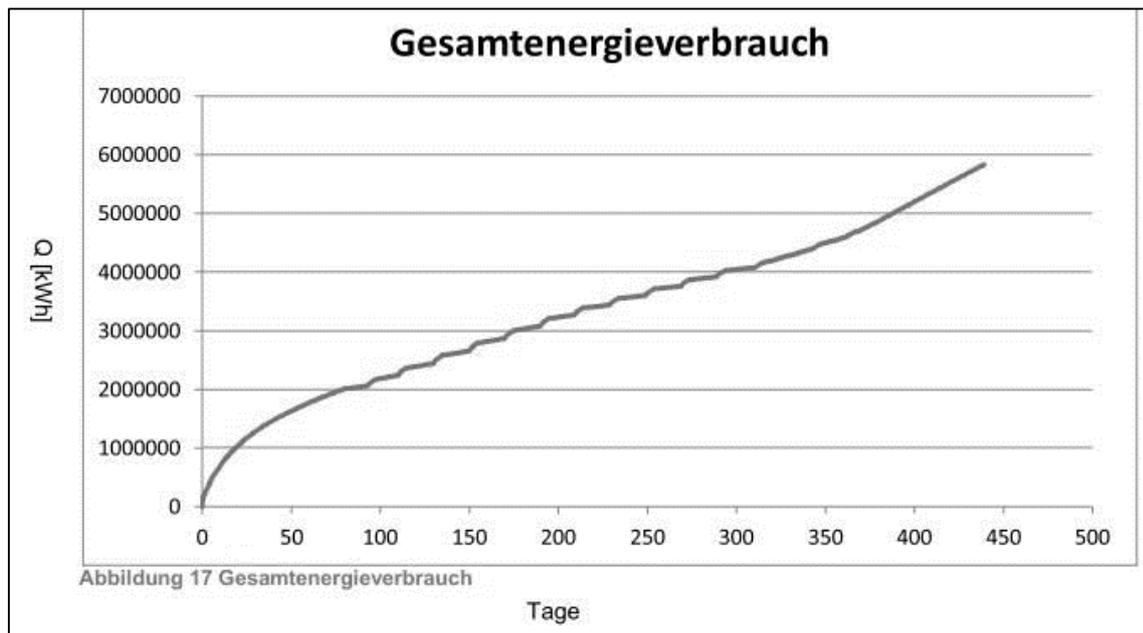


Abb. 10: Energieverbrauch „Museumsinsel“

Einen hohen Stellenwert bilden die Überlegungen zu den Bohrungen (siehe Kap.2.4). Im Anschluss an bestehende Bauwerke (z.B.: Schacht) kann es notwendig werden, zusätzliche Vereisungsmaßnahmen (Gegenbohrungen, Kühlung der Schachtwand) vorzusehen. Der Wärmeeintrag aus dem Schacht führt in Kombination mit einer verminderten Kälteleistung am Ende des Gefrierrohres eventuell zu einem unvollständigen Frostkörper.

Alle o.g. Überlegungen fließen schlussendlich in den Bauvertrag ein. Dabei sind die von der ausführenden Firma zu erbringenden Leistungen derart zu beschreiben, dass diese vollinhaltlich dargestellt und kalkulierbar sind. Aufgrund der speziellen Anforderungen an die Bohrtechnik, den Aufbau und die Erhaltung des Frostkörpers ist der ausführenden Firma ein möglichst großer Gestaltungsspielraum einzuräumen.

6 Ausführung

Die Aufgabe des Planers in der Ausführungsphase besteht vorwiegend in der Kontrolle der ausgeführten Maßnahmen sowie in der Interpretation der Messergebnisse. Dabei ist vorerst die Lagegenauigkeit der Bohrungen zu kontrollieren und zu prüfen ob ein Aufbau des geforderten Frostkörpers möglich ist. Anhand von 3D-Darstellungen der Bohrungen können die Bohrabweichungen zueinander recht gut dargestellt werden. Bei gesteuerten Bohrungen lassen sich diese Daten schon im Zuge der Bohrarbeiten erfassen, bei ungesteuerten Bohrungen können diese im Nachgang vermessen werden.

Während der Vereisungsmaßnahmen müssen sämtliche Daten (Temperaturmessungen, Druckmessungen, Durchflussmessungen, Füllstände, etc.), welche in einer zentralen Frostkörpermesswarte aufgezeichnet werden, vom Planer auf Basis einer Aufbereitung der Daten durch die ausführende Baufirma ausgewertet und beurteilt werden. In einem eigens entwickelten Modul (aufbauend auf der 3D-Datenvisualisierungssoftware „Voxler“) können wir mit Hilfe der gemessenen Temperaturen an den Messfühlern den Frostkörper zeitnah in seiner 3-dimensionalen Ausbreitung inkl. Temperaturangaben darstellen. Bauseitig erfolgt anhand dieser Daten auch die Steuerung der Anlage.

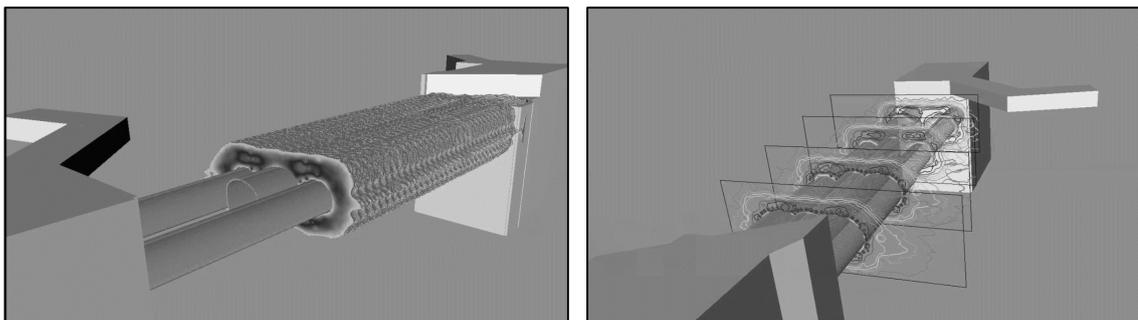


Abb. 11: Darstellung Frostkörper

7 Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat sich die Bodenvereisung als Baugrundverbesserungsmaßnahme von einer „Notmaßnahme“ schon fast hin zu einer „Standardmaßnahme“ emporgearbeitet. Dies ist vor allem auf das zunehmend schwieriger werdende Grundwassermanagement für Tiefbauvorhaben in dicht bebautem urbanem Gebiet zurückzuführen.

So einfach das physikalische Prinzip einer Bodenvereisung auch ist, so komplex ist die Entscheidungsfindung dieses Verfahren auch einzusetzen. Neben der Berücksichtigung wirtschaftlicher Faktoren, liegt der Fokus in der Planung einer derartigen Maßnahme sicherlich in deren technischer Machbarkeit. Eine gute Kenntnis der Bohrverfahren, der Gerätetechnik sowie der Grenzen des Machbaren im Zusammenhang mit einem akzeptierbaren Risiko ist dabei Grundvoraussetzung.

Aus bemessungstechnischer Sicht ist projektabhängig zu entscheiden, ob ein „geotechnischer“ Ansatz (FEM-Modellierung mit Kontinuumsmodellen), ein „statischer“ Ansatz (Betrachtung des Frostkörpers als eigenständiges Tragelement) oder eine Kombination aus beiden Ansätzen sinnvoll ist. Aus der Sicht der Autoren ist dem „geotechnischen“ Ansatz der Vorzug zu geben. Der gefrorene Boden stellt dabei eine eigene Gebirgsart dar. Spannungsvorgänge und -umlagerungen während der einzelnen Bauphasen lassen sich ebenso abbilden wie prognostizierte Verformungen. Letztendlich lässt sich die Wirkung des Gesamtsystems ungefrorener Boden-Frostkörper-Bauwerk nur mit geotechnischen Berechnungsmethoden analysieren und beurteilen.

8 Literatur

Verschiedene Autoren (1955)

Grundbautaschenbuch Band 1

Sres, A. (2009)

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur künstlichen Bodenvereisung im strömenden Grundwasser, Dissertation an der ETH Zürich

Autor:

Vorname, Name: Christian Fuchs
Titel: Dipl.-Ing.
Firma, Abteilung: ISP ZT GmbH
Adresse: Blindengasse 23, 1080 Wien
Tel: 01/405 42 86/35
Fax: 01/407 47 12
mail: fuchs.christian@isp-zt.at
internet: www.isp-zt.at

Nicht Zutreffendes bitte löschen:

Teilnahme: ja
Vortragender: nein

Co-Autor:

Vorname, Name: Josef Schmeiser
Titel: Dipl.-Ing.
Firma, Abteilung: ISP ZT GmbH
Adresse: Blindengasse 23, 1080 Wien
Tel: 01/405 42 86/46
Fax: 01/407 47 12
mail: schmeiser.josef@isp-zt.at
internet: www.isp-zt.at

Nicht Zutreffendes bitte löschen:

Teilnahme: ja
Vortragender: ja

Co-Autor:

Vorname, Name: Reinhold Theiß
Titel: Dipl.-Ing.
Firma, Abteilung: ISP ZT GmbH
Adresse: Blindengasse 23, 1080 Wien
Tel: 01/405 42 86/44
Fax: 01/407 47 12
mail: theiss.reinhold@isp-zt.at
internet: www.isp-zt.at

Nicht Zutreffendes bitte löschen:

Teilnahme: ja
Vortragender: nein