

Kriterien der Bodengefriertechnik

Benno Müller

Max Bögl GmbH & Co. KG; Frankfurter Ring 105 80807 München
Tel.: +49 89 350 607 13 65, E-Mail: bmueller@max-boegl.de

Zusammenfassung

Das Bodengefrieren ist ein flexibles Verfahren, das in jüngster Zeit vermehrt vor allem bei anspruchsvollen Maßnahmen und Bauen im Bestand eingesetzt wird. Bei maschinellen Tunnelvortrieben werden Querschlägen in wasserführenden, nicht standfesten Böden standardmäßig im Vereisungsverfahren ausgeschrieben und auch ausgeführt. Das Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Zuverlässigkeit aus. In der Planungs- und auch Ausführungsphase sind die technisch wie auch wirtschaftlichen Randbedingungen und Eingangsgrößen zu beachten, die sich teilweise von den herkömmlichen Bauverfahren unterscheiden. Eine thermische Dimensionierung ist für eine erfolgreiche Ausführung unabdingbar.

1 Einleitung

Das künstliche Gefrieren von Erdreich ist eine Verfahrensweise, die in der Vergangenheit fast ausschließlich im Schachtbau zum Abteufen von Kohleschächten eingesetzt wurde. Innerhalb der letzten 30 Jahre hat sich diese temporäre Bauhilfsmaßnahme als ein anerkanntes und bewährtes Bauverfahren auch im Spezialtiefbau und im Tunnelbau etabliert. In vielen erfolgreich abgeschlossenen Bauprojekten konnte die flexible Technik als Standardbauverfahren in den Bauablauf integriert werden und ist damit nicht nur eine Notlösung für Haveriefälle. Die Gefrierverfahren mit den Kälteträgern flüssiger Stickstoff und Sole bieten hierzu angepasste und wirtschaftliche Möglichkeiten.

Das Bodengefrierverfahren steht nicht in Konkurrenz zu den gängigen Schlitzwand-, Bohrpfahl-, Düsenstrahlarbeiten oder auch Wasserhaltungsmaßnahmen. Diese Bauverfahren sind in der Regel wesentlich kostengünstiger als eine Bodenvereisung. Die Bodengefriertechnik bietet Ergänzungen und Erweiterungen, die bei entsprechender Vorplanung und Umsetzung in einer sinnvollen Kombination mit den o. g. Verfahren zum Erfolg führen.

Um die technischen Möglichkeiten und auch die Grenzen des Vereisungsverfahrens beurteilen und einschätzen zu können, bedarf es einiger grundlegender Kenntnisse, die aus verschiedenen Disziplinen der Ingenieurwissenschaft gespeist werden. So sind Wissen und Erfahrungen im Bereich der Geotechnik, der Verfahrenstechnik und Kältetechnik notwendig, um ein Bodengefrierprojekt wirtschaftlich auslegen, kalkulieren und ausführen zu können.

Für den baupraktischen Einsatz werden im Wesentlichen die Wasserundurchlässigkeit von gefrorenem Boden und die statischen Eigenschaften als konstruktive Elemente genutzt.

2 Gefrierverfahren

Für das Gefrieren werden Rohre, sogenannte Gefrierrohre, in den Boden eingebracht und mit Kältemittel durchströmt. Durch das Entziehen von Wärme bilden sich walzenförmige Gefrierkörper, die entsprechend der geometrischen Anordnung der Gefrierrohre im Boden zusammenhängende Frostkörper ausbilden (Bild 1). Je nach Erfordernis wird die wasserdichtende und/oder die statische Komponente des gefrorenen Bodens genutzt. Frostkörper können beliebig nahe an oder unter bestehenden Bauwerken hergestellt werden, sofern dort die Gefrierrohre eingebohrt werden können. Gründungselemente, wie Pfähle oder auch Hindernisse können in den Frostkörper eingebunden werden.

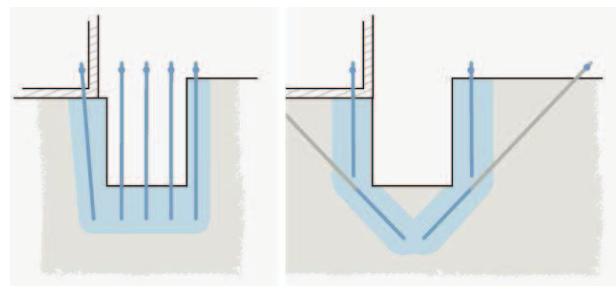


Bild 1: Beispiele für Gefrierrohranordnungen

Die Ausdehnung und die Temperaturen innerhalb des Frostkörpers werden durch ein umfangreiches Temperaturmessprogramm überwacht. Temperatursensoren in Rohren innerhalb oder am Rand des planmäßigen gefrorenen Bodens erlauben Aussagen zu Temperaturprofilen und Frostkörperausdehnung.

Die Bohrtechnik und die Bohrgenauigkeit sind für die Ausbildung und Funktion der Gefrierkörper von entscheidender Bedeutung. Bei großen Bohrabweichungen von den Solllagen ergeben sich für das Zusammenwachsen der einzelnen Gefrierwalzen längere Gefrierzeiten. Da im Extremfall die Frostwalzen nicht zusammenwachsen und die gewünschte Funktion z. B. einer wasserdichten Umschließung nicht erfüllen, werden alle



Gefrierrohre in der Lage mit Inklinometer oder auch mit Kreiselkompassmesstechnik vermessen. Sind zu große Abweichungen aus der Solllage aufgetreten, müssen Zusatzbohrungen ausgeführt werden.

Als Bohrtechnik wird in der Regel das Überlagerungsbohrverfahren mit einem Doppelkopfantrieb eingesetzt. Die Außenverrohrung wie auch das Innengestänge können entsprechend der Baugrundverhältnisse mit den geeigneten Werkzeugen bestückt werden, sodass der Baugrund verdrängt, gelöst, bzw. zerkleinert wird. Sobald die Bohrung auf die vorgesehene Endtiefe abgeteuft ist, kann das Innengestänge ausgebaut und die Lage der Außenverrohrung vermessen werden. Mit dem Bohrverfahren ist eine Bohrgenauigkeit von $\leq 1\%$ möglich.

Nach der Vermessung der Außenverrohrung kann das Gefrierrohr eingebaut werden. Die Bohrungen werden mit einem geeigneten Füllmittel z. B. Dämmen wärmeleitende in den Boden eingebunden. Die Außenverrohrung wird während des Verfüllens sukzessive gezogen, das Gefrierrohr verbleibt im Boden.



Bild 2: Bohrköpfe für gesteuerte Bohrungen bei der Baumaßnahme Wehrhahn-Linie, Düsseldorf

Für Bohrlängen >40 m ist es erforderlich gesteuerte Bohrungen auszuführen. Die Steuerung des Bohrverlaufs erfolgt über die Bohrkrone (Bild 2). Diese besitzt eine schräg angeordnete Platte im vorderen Bereich. Die Krone ist definiert drehbar, sodass über die Ausrichtung der Bohrkrone entgegen der gewünschten Bohrrichtung die vorgegebene Richtung erreicht wird. Gleichmäßige Rotation der Krone bewirkt gerade Bohrungen.

Der Bohrkopf ist mit den entsprechenden Werkzeugen bestückt, sodass der Baugrund verdrängt und gelöst wird. Der Transport des Bohrkleins erfolgt über die Bohrspülung zu der Auswurflocke des Bohrgerätes. Während des Bohrvorgangs wird ständig die Lage des Bohrkopfs vermessen. Hierzu wird eine hinter dem Bohrkopf befindliche Magnetfeld- oder Kreiselkompasssonde eingesetzt, die per Kabel mit dem Steuerstand verbunden ist. Mit dem Bohrverfahren ist eine Bohrgenauigkeit von ± 20 cm Abweichung möglich.

Der Ausbau der oben geschriebenen eingebauten Rohre zu einem funktionsfähigen Gefrierrohre vollzieht sich durch die Montage eines Gefrierkopfes und einem sogenannten Speise- oder auch Fallrohr (Bild 3). Durch das Fallrohr gelangt der Kälteträger in dem Gefrierrohr zum Rohrtiefsten und strömt im Ringspalt unter Aufnahme von Wärmeenergie aus.

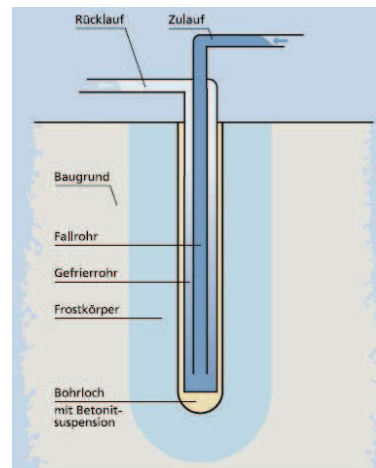


Bild 3: Schematische Darstellung eines Gefrierrohres

2.1 Gefrierverfahren mit flüssigem Stickstoff

Für Bodengefriermaßnahmen werden unterschiedliche Kälteträger eingesetzt.

Mit der Temperatur des flüssigen Stickstoffs von -196 °C und der großen frei werdenden Verdampfungsenthalpie (latente Wärme) steht mit diesem Medium ein sehr flexibler Kälteträger mit schneller Frostkörperausbildung zur Verfügung.

Bei der Anwendung von flüssigem Stickstoff tritt das Medium am Ende des Fallrohrs im Gefrierrohr aus und verdampft im Kontakt mit der relativ warmen Gefrierrohrwandung. Stickstoff ist ein ungiftiges Gas, das beim Gefrierprozess wieder in die Atmosphäre entweicht. Durch Änderung des Aggregatzustandes von der Flüssig- in die Gasphase wird dem Umfeld ein wesentlicher Energiebetrag entzogen. Dazu addiert sich die Energie, die das Gas bis zum Austritt aus dem Gefrierrohr durch Wärmeübergang aus der Rohrwandung aufnimmt.

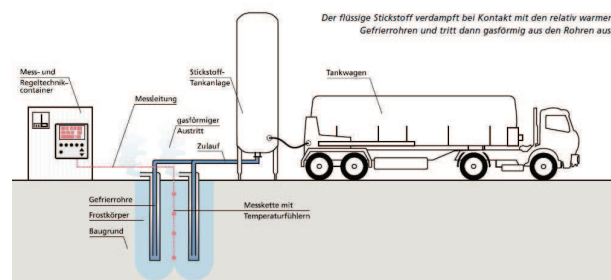


Bild 4: Funktionsschema Stickstoffvereisung

Flüssiger Stickstoff wird industriell in Luftverflüssigern hergestellt, mit vakuumisolierten Tankwagen auf die

Baustelle transportiert und in Tankanlagen auf der Baustelle zwischengelagert. Über isolierte Verteilerleitungen mit Dosier- und Magnetventilen erfolgt eine Anbindung der Gefrierrohre (Bild 4). Jedes Gefrierrohr kann individuell mit dem Regelkreis bestehend aus Magnetventil und Stickstoffabgasfühler geregelt werden, wodurch je Gefrierrohr unterschiedlichen Gefrierleistungen gefahren werden können.

Eine Stickstoffgefrieranlage mit standardisierten Tankanlagen und Rohrleitungskomponenten ist in wenigen Tagen einsatzbereit aufgebaut. Als wesentlicher wirtschaftlicher Faktor muss der Verbrauch des flüssigen Stickstoffs bewertet werden.

Wirtschaftlich angewendet wird flüssiger Stickstoff daher in der Regel bei kleinvolumigen Frostkörpern und kurzen Frostkörperhaltezeiten.

2.2 Gefrierverfahren mit Sole

Bei dem Solegefrierverfahren durchströmt eine wässrige 30%ige Calciumchloridlösung – der sogenannten Sole – die Gefrierrohre und entzieht damit dem Boden die Wärme. Diese Salzlösung hat einen Gefrierpunkt von -55 °C und ist wirtschaftlich pumpbar bis ca. -40 °C . Bei tieferen Temperaturen steigen die Viskosität und damit die Druckverluste in den Rohrleitungen sehr stark an.

Als wesentliches Unterscheidungsmerkmal zur Stickstoffvereisung ist anzuführen, dass bei der Solevereisung der Kälte Träger in einem geschlossenen Rohrleitungssystem umgepumpt und nicht verbraucht wird.

Die Erzeugung der Kälte erfolgt in vor Ort installierten Kälteaggregaten und Rückkühlwerken.

Als Kälteanlagen stehen vorkonfektionierte Containeranlagen mit Kälteleistungen von 80 bis 300 kW zur Verfügung. Werden größere Leistungen benötigt müssen Einzelaggregate zu einer Gesamtanlage zusammengeschlossen werden (Bild 5).

Die Auslegung der Gefrieranlage mit der benötigten und zu installierenden Kälteleistung basiert auf der thermischen Berechnung. In einem FE-Programm werden die Frostausbreitungen und die Wärmeströme im Boden ermittelt.

Die Installation für eine Solevereisung mit der dazugehörigen Anlagentechnik (Gefrieraggregat, Kühlturm, Solepumpen, Rohrleitungssystem mit Vor- und Rücklauf, Trafostation) ist im Vergleich zu einer Stickstoffvereisung wesentlich aufwändiger. Betriebskosten für Strom und Anlagenmieten (Gefrieraggregat, Kühlturm, Solepumpen) sind die Kenngrößen, die bei großvolumigen Frostkörpern und länger andauernden Vereis-

ungsmaßnahmen jedoch wirtschaftliche Vorteile der Sole- gegenüber der Stickstoffvereisung ergeben.

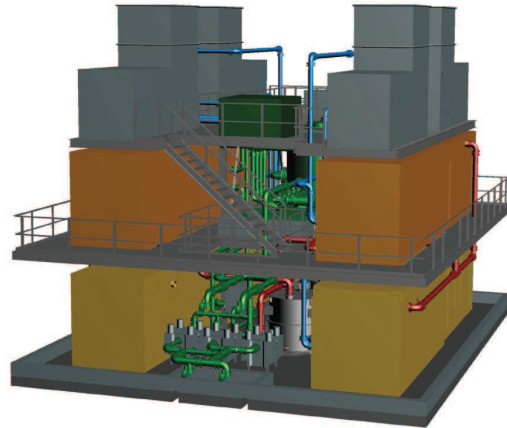


Bild 5: Solegefrieranlage mit vier Gefrieranlagen, installierte Leistung 1.200 kW

3 Auslegungskriterien

Die detaillierte Vorplanung einer Bodengefriermaßnahme ist für die erfolgreiche Ausführung unabdingbar. Zunächst sind für die Gefrier Aufgabe die möglichen technisch und wirtschaftlich sinnvollen Bohrgeometrien zu finden unter Berücksichtigung der Bauabfolgen und temporären Bauzwischenzuständen. Muss z. B. eine abdichtende Vereisung bis zur Auftriebssicherheit des Bauwerks aufrechterhalten werden, sind eventuell notwendige Durchdringungen des Bauwerkes vorzuzusehen und Rohrleitungsinstallationen anzupassen. Die im Ausgangszustand gewählte Bohrgeometrie ist somit mit der entsprechenden Vorausschau zu planen.

3.1 Thermische Bemessungen

Für die thermischen Berechnungen zur Frostausbreitung stehen in der Regel Daten aus dem geologischen Gutachten wie z. B. Bodentemperatur, Wassergehalt, Bodenarten, Grundwasserstände und Grundwasserfließgeschwindigkeiten zur Verfügung. Kenngrößen wie Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazität können aus Erfahrung abgeschätzt oder aus Nährungsformeln abgeleitet werden.

Externe Wärmequellen wie z. B. angrenzende Gewässer, Grundwasserströmungen, Rohrleitungen, Kellerräume und Wasserhaltungen innerhalb einer Baugrube müssen ebenfalls in die thermischen Berechnungen eingehen, um deren Einflüsse auf die Aufgefrierzeiten und die notwendige Unterhaltungsleistung für den Frostkörper abschätzen zu können.

Als Ergebnis der thermischen Betrachtungen werden Kenngrößen zu den Aufgefrierzeiten in Abhängigkeit von den gewählten Gefrierrohrabständen und für den



Aufgefrier- und den Haltemodus die notwendigen Stickstoffmengen bzw. die zu installierende Kälteleistung bei der Solevereisung ermittelt.

FE-Berechnungen liefern zudem Isothermendarstellungen, aus denen die Mitteltemperaturen des Frostkörpers ermittelt werden könnten. Erfahrungen aus abgeschlossenen Projekten haben eine gute Übereinstimmung von Berechnung und praktischer Ausführung gezeigt.

Frostempfindliche Böden neigen durch das Gefrieren zu Frosthebungen. Anhand der Sieblinien, des Wassergehaltes und der Grundwasserstände kann dieses abgeschätzt werden. Mit dem Auftauen des Frostkörpers treten Tausetzungen auf, die den Betrag der Hebungen übersteigen können. In einigen wenigen Fällen kann die Hebungseignung des Bodens ein Ausschlusskriterium für das Gefrierverfahren sein. Ansonsten ist das Gefrierverfahren in allen Bodenarten auch in stark geschichteten Böden anwendbar.

3.2 Statische Bemessungen

Für die statische Bemessung ist fundiertes Wissen zu dem Verhalten von gefrorenem Boden notwendig. Kenngrößen von unterschiedlichen Bodenarten zu Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der mittleren Frostkörpertemperatur sind in der Literatur oder aus Laborversuchung zu ermitteln.

Gefrorener Boden unterliegt bei Druck- oder Zugspannungen einem Kriechen, so dass auch die zeitliche Komponente bei der Bemessung Beachtung finden muss.

4 Anwendungsbeispiele

4.1 Querschläge

Bei Tunnelbaumaßen ist es bei zweiröhriger Bauweise vorgeschrieben im Abstand von max. 500 m Verbindungen zur Nachbarröhre zu schaffen. Dazu werden aus den aufgefahrenen Tunnelröhren Verbindungstunnel, sogenannte Querschläge, erstellt. Diese werden bei maschinell in tübbingbauweise aufgefahrenen Tunnelröhren in wasserführenden, nicht standfesten Böden in bergmännischer Bauweise im Schutze einer Vereisung ausgeführt.

Dazu werden aus einer Tunnelröhre meist nahezu horizontale Gefrierrohre bis zur gegenüberliegenden Tunnelröhre gebohrt (Bild 6). Durch die kreisförmige Anordnung der Gefrierrohre und dem erzeugten Frostkörper wird der zu erstellende Verbindungstunnel umhüllt und wasserdicht an die beiden Tunnelröhren angeschlossen. Für den nachfolgenden bergmännischen Vortrieb steht ein Erd- und Wasserdruck bemessener Frostkörper als Sicherung an. Diese Verfahrensweise ist

mittlerweile ein Standardverfahren, dass bei Straßen- und Eisenbahntunnel international ausgeschrieben wird.



Bild 6: Querschlagsvereisung Finnetunnel; Neubau-
strecke Erfurt-Halle/Leipzig

4.2 Baugrubenumschließung

Bei Baugrubenumschließungen mit Spundwänden, Schlitzwänden oder auch Bohrpfählen müssen oftmals bestehende Kanäle, Leitungen oder auch Tunnel in die Umschließung mit eingebunden werden. Liegen diese Durchdringungen unterhalb des Grundwasserspiegels, muss nach einem ergänzenden Abdichtungssystem gesucht werden, das eine zuverlässige wasserdichte Anbindung bietet. Mit einer Bodenvereisung kann dies zuverlässig erreicht werden.

Als Beispiel ist die Erweiterung der Metrostation „Centraalstation – Rotterdam“ Hauptbahnhof angeführt, die unter Betreib zu realisieren war. Dazu wurden rund um den Bestand Schlitzwände bis in eine Tiefe von 38 m eingebracht. Im Durchdringungsbereich des vorhandenen Metrotunnels erfolgte der Lückenschluss der Baugrubenumschließung mit Hilfe der Bodengefrieretechnik (Bild 7).

Unter dem bestehenden Tunnel stehen Wechselschichten aus Sand, Tonen und Sand mit lehmigen Zwischeneinlagerungen an. Die Grundwasserströmung im pleistozänen Sandpaket beträgt max. 4,0 m/d, welches eine Kombination aus Stickstoff- und Solegefrierverfahren erforderte. In der Aufgefrierphase wurde zunächst der Frostkörper bei gleichzeitigem Einsatz der Stickstoff- und Solegefrierkreisläufe aufgefroren. Es bildete sich im Boden eine wasserdichte Frostwand gewölbter Form, welche den Erd- und Wasserdruck aufnahm. Während des Aushubs der Baugrube, dem Erstellen der Betonsohlen und Wände wurde der Frostkörper ausschließlich mit der Solevereisung aufrechterhalten. Die Stickstoffvereisungsanlage diente dann betriebsbereit als Backup – System.

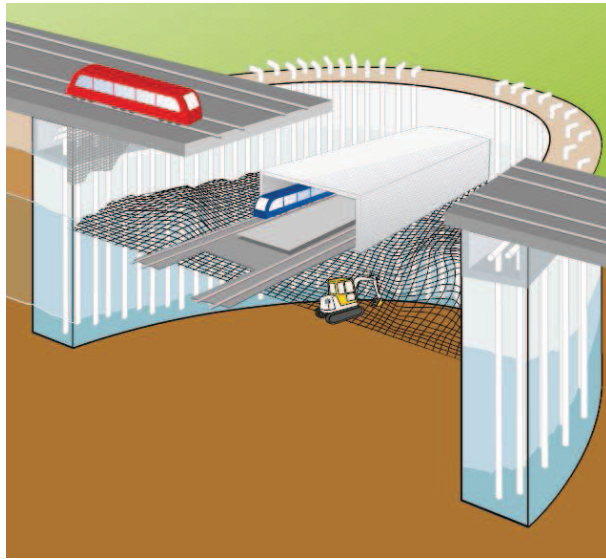


Bild 7: Schema „Centraalstation“ Rotterdam Baugrubenumschließung

4.3 Unterfangung

Im Zuge der Sanierung des im klassischen Stil erbauten Neuen Museums auf der Museumsinsel in Berlin wurden das Pergamonmuseum und das Alte Museum restauriert und durch die wiedererrichteten Archäologischen Promenaden an das Neue Museum angebunden. Unterhalb der Promenaden wurden Wartungs- und Installationsgänge gebaut. Dazu musste die Bodenplatte an der südlichen Fassade des Neuen Museums abgebrochen und tiefer geleitet werden.

Unter den Bestandsfundamenten steht ein wenig tragfähiger Baugrund mit aufgefüllten Sanden, Kiessanden und teilweise organischen Böden an. Die Lasten werden mit Rohrpresspfählen in Verbindung mit Steckträgern und Holzpfählen abgetragen bei Grundwasserständen von ca. 1,3 m unterhalb der bestehenden Bodenplatte.

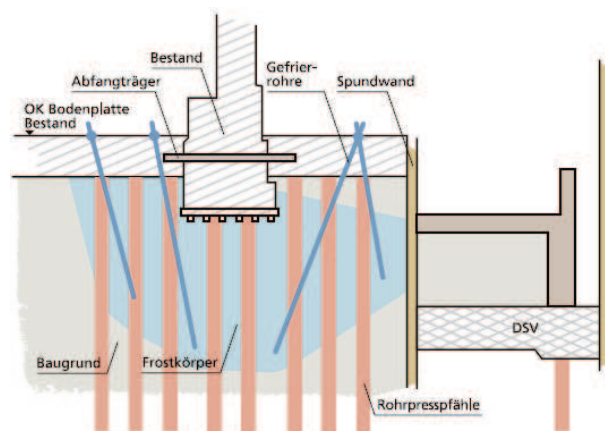


Bild 8: Gefrierinstallation zur südlichen Fassade Neues Museum Berlin

Um während der Umbauphase Setzungen durch Umlagerungen an dem historischen Gebäude zu vermeiden,

wurden unterhalb der Fundamente mehrere Frostkörper erstellt, welche die Pfähle umschlossen und die Lasten mittels Mantelreibung weiterleiteten (Bild 8). Ergänzend zu diesen Unterfangungsfrostkörpern wurde in Verbindung mit einer im Abstand von ca. 3,5 m parallel zur Fassade verlaufenden Spundwand eine wasserdichte Baugrube zur Herstellung der neu zu errichtenden und im Grundwasser liegenden Wartungs- und Installationsgänge aufgefroren. Die Vereisungsmaßnahme wurde mit Stickstoff als Kälteüberträger ausgeführt.

5 Resümee

Die Bodengefriertechnik kann für komplexe Bauaufgaben wirtschaftliche und technische ausgereifte Lösungen bieten und ist damit auf dem Weg sich als Standardbauverfahren im Markt behaupten und weiter zu etablieren.

Literatur

Bayer, F., Müller, B. (2008): Baupraktische Erfahrungen eines Vortriebs im Schutze eines umhüllenden Frostkörpers am Beispiel des U-Bahnhofs Brandenburger Tor, Berlin, Geomechanik und Tunnelbau 2008 Heft 5; S. 498-503

Müller, B. (2012): Wehrhahn-Linie Düsseldorf, Unterfahrung Kaufhof an der Kö; Baugrundvereisung als Sicherung für den bergmännischen Vortrieb Tagungsband Swiss Tunnel Congress 2012, S. 162–175

Müller, B.; Orth, W. (2005): Bodenvereisung unter schwierigen Randbedingungen: Bahnsteigerweiterung beim U-Bahnhof Marienplatz, München, Vorträge der STUVA-Tagung 2005 in Leipzig. Hrsg.: Studiengesellschaft für Unterirdische Verkehrsanlagen e.V. -STUVA-, Köln

Orth, W. (2009): Bodenvereisung, in: Grundbau-Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren, Kapitel 2.5, 7. Auflage (Hrsg. Witt, K. J.), 2009, Ernst & Sohn, Berlin