

Verfahren zur Erzeugung eines zusammenhängenden Eiskörpers bei einer
Bodenvereisung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erzeugung eines zusammenhängenden
5 Eiskörpers in einem Erdbodenbereich.

Diesbezüglich ist die Solekühlung eine etablierte und sichere Variante des Bodengefrierens und der Baugrundsicherung, die gegenüber anderen Verfahren wie z.B. der Betoninjektion durchaus wettbewerbsfähig ist. Versuche haben allerdings
10 gezeigt, dass die Solekühlung bei Grundwassergeschwindigkeiten oberhalb von 2 m/Tag auf ihre Grenzen stößt, d.h., ein zusammenhängender monolithischer Eiskörper (auch als Frostkörper bezeichnet), der alle Kühllanzen einschließt, in der Regel nicht mehr erzeugt werden kann. Ursache dafür ist u.a. eine auftretende Düsenwirkung. Der um die Kühllanzen wachsende Eiskörper engt die Strömungsquerschnitte für das
15 Grundwasser bzw. Strömungsmittel ein. Damit steigen die Strömungsgeschwindigkeit und die Wärmestromdichte am Rand des Eiskörpers an. Ein stationärer Zustand, bei dem der Eiskörper nicht mehr wächst, kann eintreten, bevor sich ein geschlossener Eiskörper gebildet hat.

20 Der Erfindung liegt hiervon ausgehend die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren bereitzustellen, das die Erzeugung eines zusammenhängenden Eiskörpers ermöglicht.

Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst.

25 Danach sieht das erfindungsgemäße Verfahren zur Erzeugung eines zusammenhängenden Eiskörpers in einem Erdbodenbereich durch Gefrieren des Erdbodenbereiches bzw. eines Teiles davon vor, dass erste Kühllanzen in den Erdbodenbereich eingebracht werden, in dem der zusammenhängende Frostkörper in Gegenwart einer den Erdbodenbereich durchziehenden Strömung eines fluiden
30 Strömungsmittels, insbesondere in Form von Grundwasser, zu erzeugen ist, wobei zum Kühlen bzw. Gefrieren des Erdbodenbereiches ein erster Kälteträger in die ersten Kühllanzen eingeleitet wird, und wobei weiterhin zum Kühlen bzw. Gefrieren des Erdbodenbereiches zumindest eine zweite Kühllanze auf einer strömungszugewandten Seite der ersten Kühllanzen in den Erdbodenbereich eingebracht wird und ein zweiter

Kälteträger, der eine Temperatur aufweist, die niedriger ist als die Temperatur des ersten Kälteträgers, in die mindestens eine zweite Kältelanze eingeleitet wird, um die Ausbildung eines zusammenhängenden Eiskörpers zu unterstützen, der sämtliche erste und zweite Kühllanzen umschließt.

5

Der Eiskörper wird vorliegend also durch Kühlen des Erdbodenbereiches erzeugt, wobei die durch die Kühllanzen strömenden Kälteträger den Erdbodenbereich durch indirekten Wärmetausch derart kühlen, dass der besagte Eiskörper durch entsprechendes Vereisen des Erdbodenbereiches ausgebildet wird, d.h., in dem Erdbodenbereich vorhandenes Wasser wird gefroren und bildet zusammen mit den eingefrorenen Feststoffen des Erdbodenbereiches den Eiskörper.

10

Erfindungsgemäß wird ein zusammenhängender Eiskörper gebildet, der die eingesetzten bzw. an dem Kühlprozess beteiligten ersten und zweiten Kühllanzen sämtlich umgibt. Zusammenhängend heißt hierbei wegzusammenhängend, d.h., je zwei Punkte dieses Eiskörpers können durch einen Weg verbunden werden, der vollständig in dem Eiskörper liegt und nicht etwa durch ein nichtvereistes Gebiet des Erdbodenbereiches führt. Eine mögliche Ausgestaltung der Kühllanzen wird weiter unten dargestellt.

20

Bevorzugt ist vorgesehen, dass der erste Kälteträger eine Sole ist, insbesondere eine Calciumchloridlösung, die Temperaturen im Bereich von -30°C bis -45°C aufweisen kann. Vorzugsweise liegt der maximale Salzgehalt bei einer Calciumchloridlösung bei 30%.

25

Bevorzugt ist weiterhin vorgesehen, dass der zweite Kälteträger flüssiger Stickstoff ist, der vorzugsweise eine Temperatur von -196°C (nämlich am Übergang zur gasförmigen Phase bei Normalbedingungen) aufweist.

30

Es können natürlich auch alternative erste und zweite Kälteträger verwendet werden, die in etwa die vorgenannten Temperaturen aufweisen.

Bevorzugt erfolgt das Einleiten des ersten Kälteträgers in die ersten Kühllanzen und das Einleiten des zweiten Kälteträgers in die zweiten Kühllanzen gleichzeitig.

35

Aufgrund der entsprechend tieferen Temperatur des zweiten Kälteträgers kann dabei trotz der beschriebenen Düsenwirkung ein geschlossener bzw. zusammenhängender Eiskörper entstehen, wobei nunmehr mit Vorteil nach der Aufgefrierphase, während der der zusammenhängende Eiskörper erzeugt wird, der Strom des zweiten Kälteträgers in
5 die zweiten Kühllanzen herunter geregelt bzw. vollständig gestoppt werden kann.

Die Erfindung bietet mit Vorteil eine größere Verfahrenssicherheit, da die zusammenhängende Vereisung auch bei vergleichsweise großen Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 6 m/Tag realisiert werden kann. Besonders
10 bei unklaren Verhältnissen hinsichtlich der Grundwassergeschwindigkeit ist dies ein entscheidender Vorteil. Durch die mittels des zweiten Kälteträgers unterstützte Vorkühlung wird die Aufgefrier-Phase deutlich verkürzt. Die Zusatzkosten für die zusätzliche Kühlung mittels des zweiten Kälteträgers (insbesondere Stickstoff) können durch die Einsparungen aufgrund der kürzeren Aufgefrier-Phase kompensiert oder
15 sogar überkompensiert werden.

Im Allgemeinen kann vorliegend der betrachtete Erdboden für den ungefrorenen Fall als Dreiphasen-Modell modelliert werden, besteht aus Feststoff, Wasser bzw. Strömungsmittel und Luft. Da für Verweisungsmaßnahmen eine Vollsättigung
20 angenommen werden kann, ergibt sich für den ungefrorenen Erdboden ein Zweiphasenmodell bestehend aus Feststoff und Wasser bzw. Strömungsmittel. Im Verlauf des Gefrierprozesses bzw. der Ausbildung des Eiskörpers reduziert sich die Wasserphase unter gleichzeitiger Zunahme der Eisphase. Die Erfahrung zeigt, dass bereits bei ca. -2°C für Erdbodenfeststoffe wie Feinsand, Grobsand oder Kies kein
25 nennenswerter Anteil ungefrorenen Wassers mehr vorhanden ist, was insbesondere bei den hier vorzugsweise zum Einsatz kommenden Temperaturen der Kälteträger (siehe oben) gegeben ist.

Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass mehrere zweite
30 Kühllanzen auf der strömungszugewandten Seite der ersten Kühllanzen in den Erdbodenbereich eingebracht werden und der zweite Kälteträger in die zweiten Kühllanzen eingeleitet wird. D.h., die zusätzlichen zweiten Kühllanzen werden auf der Luvseite des geplanten zusammenhängenden Eiskörpers vor den ersten Kühllanzen positioniert.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass die ersten Kühllanzen, insbesondere zur Ausbildung eines Eiskörpers in Form einer Baugrubenwand, in einer Erstreckungsebene nebeneinander, insbesondere parallel zueinander, in den Erdbodenbereich eingebracht werden.

5

Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass die ersten Kühllanzen, insbesondere zur Ausbildung eines Frostkörpers in Form eines Hohlzylinders bzw. einer Tunnelröhre, entlang einer umlaufenden gedachten Fläche (z.B. in Form eines Zylindermantels, insbesondere Kreiszylindermantel)

10 nebeneinander, insbesondere parallel zueinander, in den Erdbodenbereich eingebracht werden.

Simulationsberechnungen zeigen dabei, dass in Bereichen, in denen Düseneffekte verstärkt auftreten werden, pro erste Kühllanze vorzugsweise eine zweite Kühllanze empfehlenswert ist. Dies ist insbesondere in der Mitte eines ebenen Frostkörpers, z.B. in Form einer Baugrubenwand, oder eines zylindrischen, insbesondere kreiszylindrischen, Eiskörpers, z.B. in Form einer Tunnelröhre, sinnvoll.

15

Bevorzugt wird daher die mindestens eine zweite Kühllanze oder die mehreren zweiten Kühllanzen jeweils in einer Strömungsrichtung der Strömung vor einer zugeordneten ersten Kühllanze in den Erdbodenbereich eingebracht, wobei insbesondere die jeweilige zweite Kühllanze parallel zur zugeordneten ersten Kühllanze verläuft.

20

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung werden in den nachfolgenden Figurenbeschreibungen von Ausführungsbeispielen der Erfindung anhand der Figuren erläutert. Es zeigen:

25

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Anlage zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens;

30

Fig. 2 die Erzeugung eines zusammenhängenden Eiskörpers in Form einer ebenen Wand (z.B. Baugrubenwand) mit Sole-Kühlung bei verschwindender Grundwasserströmung (links) sowie bei einer Grundwasserströmung im Bereich von $V = 2\text{m/Tag}$, die die Entstehung eines zusammenhängenden Eiskörpers aufgrund eines Düseneffektes verhindert (rechts);

35

Fig. 3 eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Erzeugung eines zusammenhängenden Eiskörpers, insbesondere in Form einer ebenen Wand (z.B. Baugrubenwand);

5

Fig. 4 eine schematische Darstellung der Erzeugung eines zusammenhängenden hohlzylinderförmigen Eiskörpers mit Sole-Kühlung bei verschwindender Grundwasserströmung (links) sowie bei einer Grundwasserströmung im Bereich von $V = 2\text{m/Tag}$, die die Entstehung eines zusammenhängenden Eiskörpers aufgrund eines Düseneffektes verhindert (rechts); und

10

Fig. 5 eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Erzeugung eines zusammenhängenden hohlzylindrischen Eiskörpers (z.B. Tunnelröhre).

15 Figur 1 zeigt eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Anlage bzw. eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Erzeugung eines zusammenhängenden Eis- oder Frostkörpers 100, 200, wie er z.B. in den Figuren 3 und 5 gezeigt ist.

Dabei wird bei einer Strömung in Form einer Grundwasserströmung in einer Strömungsrichtung S der Strömung vor in den Erdbodenbereich 1 eingebrachten ersten Kühllanzen 10 (diese können vertikal als auch waagerecht in den Erdbodenbereich 1 eingebracht werden), in die ein erster Kälteträger T in Form einer Sole-Lösung (z.B. CaCl_2) geleitet wird, zumindest eine zweite Kühllanze 20 angeordnet, in die ein zweiter Kälteträger T' in Form von flüssigem Stickstoff eingeleitet wird. In einer Aufgefrierphase, während der der zusammenhängende Eiskörper 100, 200 im Erdbodenbereich 1 erzeugt wird, werden der erste und der zweite Kälteträger T, T' gleichzeitig in die entsprechenden, zugeordneten Kühllanzen 10, 20 eingeleitet. Später, nach Ausbildung des zusammenhängenden Eiskörpers 100, 200 kann der Strom des zweiten Kälteträgers T' (z.B. flüssiger Stickstoff) gedrosselt bzw. vollständig gestoppt werden.

30

Bei der besagten Sole-Kühlung wird der erste Kälteträger T in Innenrohre 11 der ersten Kühllanzen 10 eingeleitet, die jeweils in einem zugeordneten Außenrohr 13 koaxial angeordnet sind. Der erste Kälteträger T strömt dabei durch das jeweilige Innenrohr 11 bis zu einer Öffnung 12 des jeweiligen Innenrohres 11, die einer Stirnwand 14 des

35

jeweiligen Außenrohres 13 gegenüberliegt, tritt aus der jeweiligen Öffnung 12 aus und fließt in dem das jeweilige Innenrohr 11 umgebenden Außenrohr 13 zurück. Dabei kühlt der erste Kälte Träger T durch indirekte Wärmeübertragung den umgebenden Erdbodenbereich 1 ab und wird anschließend, nach Verlassen des jeweiligen

5 Außenrohres 13 in einen Kühlträgerkreislauf 30 geführt, in dem der erwärmte erste Kälte Träger T mittels einer Pumpe 31 durch einen Wärmeübertrager 32 gepumpt wird. In diesem wird der erste Kälte Träger T gegen ein Kühlmittel K (z.B. Ammoniak oder CO₂), das in einem Kühlmittelkreislauf 33 zirkuliert, abgekühlt und wird erneut in die Innenrohre 11 der ersten Kühllanlagen 10 eingeleitet.

10

Hierbei erwärmt sich das gasförmige Kühlmittel K, wird in einem Kompressor 34 verdichtet und sodann in einem Kondensator 36, der mit einem Kühlwasserkreislauf 37 wärmegekoppelt ist, wieder abgekühlt, über eine Drossel 35 entspannt und verflüssigt.

15 Das solchermaßen flüssige Kühlmittel K strömt erneut in den Wärmeübertrager 32 bzw. Verdampfer 32 und kühlt dort den ersten Kälte Träger T ab, wobei es verdampft wird.

Die zweiten Kühllanlagen 20 sind vorzugsweise wie die ersten Kühllanlagen 10 ausgebildet, wobei hier nun als zweiter Kälte Träger T' flüssiger Stickstoff aus einem

20 Flüssigstickstofftank 40 in das jeweilige Innenrohr 21 eingeleitet wird, aus der jeweiligen Öffnung 22, die der Stirnseite 24 des jeweiligen Außenrohres 23 gegenüberliegt, austritt und im jeweiligen Außenrohr 23 zurückströmt. Dabei wird der zweite Kälte Träger T' unter Kühlung des Erdbodenbereichs 1 verdampft, wobei die gasförmige Phase aus den Außenrohren 23 der zweiten Kühllanlagen 20 austritt und

25 sodann z.B. verworfen wird.

Bei einer reinen Sole-Kühlung kann bei Grundwasserströmungsgeschwindigkeiten V oberhalb von 2m/Tag bei einer Anordnung von ersten Kühllanlagen 10 parallel

30 zueinander entlang einer Ebene, wie sie in Fig. 2 gezeigt ist, aufgrund eines sich einstellenden Düseneffektes, der insbesondere im Zentrum zwischen benachbarten ersten Kühllanlagen 10 auftritt (hier ist die Strömungsgeschwindigkeit V aufgrund des Düseneffektes deutlich höher als 2m/Tag), kein zusammenhängender Eiskörper 100 mehr erzeugt werden, der alle ersten Kühllanlagen 10 einschließt, wie es in Fig. 2 (links) gezeigt ist. Vielmehr entsteht beispielsweise eine Konfiguration mit drei nicht

zusammenhängenden Eiskörpern 101, 102, 103, wobei ein zentraler Eiskörper 102 lediglich eine mittlere erste Kühllanze 10 umschließt.

Bei zusätzlicher Kühlung mittels zweiter Kühllanzen 20, in die - wie oben beschrieben -
5 ein zweiter Kälteträger T' in Form von flüssigem Stickstoff eingeleitet wird, kann auch bei einer Grundwasserströmungsgeschwindigkeit von $V=2\text{m/Tag}$ ein erfindungsgemäß zusammenhängender Eiskörper 100 im Erdbodenbereich 1 erzeugt werden (vgl. Fig. 4). Hierzu werden die zweiten Kühllanzen 20, hier insbesondere drei zweite Kühllanzen 20, in der Strömungsrichtung S mittig vor den ersten Kühllanzen 10 angeordnet, d.h.,
10 auf der strömungszuwandten Seite 2 des geplanten Eiskörpers 100, und zwar insbesondere in einem Abstand von ca. 1m zur durch die ersten Kühllanzen 10 aufgespannten Ebene. Der Abstand der ersten Kühllanzen 10 zueinander beträgt vorzugsweise 0,8m. Der Abstand der zweiten Kühllanzen 20 zueinander beträgt vorzugsweise 0,8m bis 1m.

15 Fig. 4 zeigt ein der Fig. 2 entsprechendes Phänomen bei der Erzeugung eines hohlzylindrischen Eiskörpers 200. Während dieser bei verschwindender Grundwasserströmungsgeschwindigkeit mit reiner Sole-Kühlung erzeugbar ist, ergibt sich bei erhöhter Grundwasserströmungsgeschwindigkeit im Bereich von $V=2\text{m/Tag}$
20 wiederum ein Düseneffekt, und zwar insbesondere zwischen den mittleren ersten Kühllanzen 10 auf der strömungszugewandten Seite oder Luvseite 2 der Kühllanzenanordnung 10 sowie ggf. auf der strömungsabgewandten Seite oder Leeseite 3, wenn auch in geringerem Ausmaß. Als mögliche nichtzusammenhängende Konfiguration ergeben sich somit z.B. eine Mehrzahl nichtzusammenhängender
25 kleinerer zentraler Eiskörper 203 auf der Luvseite 2 bzw. Leeseite 3 sowie zwei flankierende größere Eiskörper 201, 202.

Gemäß Fig. 5 kann wiederum auch bei einer hohlzylinderförmigen Konfiguration der ersten Kühllanzen 10 ein zusammenhängender Eiskörper 200 erzeugt werden, und
30 zwar bei erfindungsgemäßer zusätzlicher Kühlung durch Einleiten eines zweiten Kälteträgers T' in zweite Kühllanzen 20 (siehe oben), hier beispielhaft 5 zweite Kühllanzen 20, die wiederum in der Strömungsrichtung S des Grundwassers vor je einer zugeordneten ersten Kühllanze 10 angeordnet sind, und zwar insbesondere in einem Abstand von vorzugsweise 1m bis 2m zur durch die ersten Kühllanzen 10
35 aufgespannten Zylindermantelfläche bzw. der jeweils gegenüberliegenden ersten

Kühllanze 10. Der Abstand der ersten Kühllanzen 10 zueinander beträgt vorzugsweise wiederum 0,8m bis 1,2m, beispielsweise 1m. Der Abstand der zweiten Kühllanzen 20 zueinander beträgt vorzugsweise 0,8m bis 1,5m.

- 5 Allgemein sind bei zweiten Kühllanzen 20 mit Stickstoff als zweitem Kälteträger T' Abstände von 1,0 m üblich bzw. bevorzugt. Bei ersten Kühllanzen 10 mit Sole als erstem Kälteträger T sind aufgrund der erheblich höheren Temperaturen Abstände von 0,8 m bevorzugt. Werte darunter erhöhen den Aufwand, Werte darüber die Dauer des Gefrierens. Bei nicht-symmetrischen Frostkörpern oder bei symmetrischen
- 10 Frostkörpern, bei denen Kühllanzen aufgrund baulicher Gegebenheiten nicht symmetrisch ausgeführt werden können, können die Abstände der Kühllanzen 10 bzw. 20 untereinander und zueinander natürlich abweichen. Bevorzugt sind bei geraden wandartigen Eiskörpern (vgl. Fig. 3) Abstände zwischen den ersten und zweiten Kühllanzen von 1,0 m, bzw. bei einem Kreisquerschnitt (vgl. Fig. 5) von 1,5 m. Die
- 15 Abstände können hier durchaus von der Geometrie des Frostkörpers 100, 200 abhängig sein.

Bezugszeichenliste

1	Erdbodenbereich
2	Strömungszugewandte Seite oder Luvseite
3	Strömungsabgewandte Seite oder Leeseite
10	Erste Kühllanze
11	Innenrohr
12	Öffnung
13	Außenrohr
14	Stirnseite
20	Zweite Kühllanze
21	Innenrohr
22	Öffnung
23	Außenrohr
24	Stirnseite
30	Kälteträgerkreislauf
31	Pumpe
32	Wärmeübertrager
33	Kühlmittelkreislauf
34	Kompressor
35	Drossel
36	Kondensator
37	Kühlwasserkreislauf
40	Flüssigstickstofftank
T	Erster Kälteträger
T'	Zweiter Kälteträger
K	Kühlmittel
W	Kühlwasser
S	Strömung bzw. Strömungsrichtung

Patentansprüche

1. Verfahren zur Erzeugung eines zusammenhängenden Eiskörpers (100, 200) in einem Erdbodenbereich (1), wobei erste Kühllanzen (10) in den Erdbodenbereich (1) eingebracht werden, in dem der zusammenhängende Eiskörper (100, 200) in
5 Gegenwart einer den Erdbodenbereich (1) durchströmenden Strömung (S) eines fluiden Strömungsmittels, insbesondere in Form von Grundwasser, zu erzeugen ist, wobei ein erster Kälteträger (T) in die ersten Kühllanzen (10) eingeleitet wird, und wobei weiterhin zumindest eine zweite Kühllanze (20) auf einer strömungszugewandten Seite (2) der ersten Kühllanzen (10) in den
10 Erdbodenbereich (1) eingebracht wird und ein zweiter Kälteträger (T'), der eine Temperatur aufweist, die niedriger ist als die Temperatur des ersten Kälteträgers (T), in die mindestens eine zweite Kältelanze (20) eingeleitet wird, um die Ausbildung eines zusammenhängenden Eiskörpers (100, 200) zu unterstützen, der sämtliche Kühllanzen (10, 20) umschließt.
15
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere zweite Kühllanzen (20) auf der strömungszugewandten Seite (2) der ersten Kühllanzen (10) in den Erdbodenbereich (1) eingebracht werden und der zweite Kälteträger (T') in die zweiten Kühllanzen (20) eingeleitet wird.
20
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Kälteträger (T) und der zweite Kälteträger (T') gleichzeitig in die jeweiligen Kühllanzen (10, 20) eingeleitet werden.
- 25 4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass nach der Erzeugung des zusammenhängenden Eiskörpers (100, 200) das Einleiten des zweiten Kälteträgers (T') in die mindestens eine zweite Kühllanze (20) oder die mehreren zweiten Kühllanzen (20) gestoppt oder gedrosselt wird.
30
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Kälteträger (T) eine Sole ist, insbesondere eine Calciumchloridlösung.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zweite Kälteträger (T') flüssiger Stickstoff ist.
- 5 7. Verfahren nach einen der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die ersten Kühllanzen (10), insbesondere zur Ausbildung eines Eiskörpers (100) in Form einer Baugrubenwand, entlang einer Erstreckungsebene nebeneinander, insbesondere parallel zueinander, in den Erdbodenbereich (1) eingebracht werden.
- 10 8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die ersten Kühllanzen (10), insbesondere zur Ausbildung eines Eiskörpers (200) in Form einer Tunnelröhre, entlang einer umlaufenden Fläche nebeneinander, insbesondere parallel zueinander, in den Erdbodenbereich (1) eingebracht werden.
- 15 9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die mindestens eine zweite Kühllanze (20) oder die mehreren zweiten Kühllanzen (20) jeweils in einer Strömungsrichtung (S) der Strömung (S) vor einer zugeordneten ersten Kühllanze (10) in den
- 20 Erdbodenbereich (1) eingebracht werden, wobei insbesondere die jeweilige zweite Kühllanze (20) parallel zur zugeordneten ersten Kühllanze (10) verläuft.