

32 / uub (301) 2^e ex

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**

**Effect van vorst op de kwaliteit van zand-bentoniet-
afdichtingen**

**A.M. Weitz
D. Boels**

Rapport 301

DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1993

- 6 OKT. 1994



Handwritten signature

REFERAAT

Weitz, A.M. en D. Boels, 1993. *Effect van vorst op de kwaliteit van zand-bentonietafdichtingen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 301; 36 blz.; 8 fig.; 1 tab.; 19 ref.

De invloed van vorst op de afdichtende werking van zand-bentoniet is bepaald door monsters van 94 en 96% proctordichtheid te onderwerpen aan drie opeenvolgende vorst-dooicycli. Daarbij heeft het vorstfront zich in ca. 3 dagen verplaatst over een diepte van ca. 5 cm. Tijdens bevrozing werden ijslenzen gevormd, reeds ontdooide zand-bentonietmengsels en zwol het tijdens de eerste dooi. De doorlatendheid vooraf aan vorstbeproeving bedroeg gemiddeld $2,0 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ voor een mengsel met een relatieve dichtheid van 94% en $1,7 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ voor een dichtheid van 96%. Na de vorstwerking bleek de doorlatendheid van de mengsels met 94% dichtheid $11,35 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ te zijn, maar daalde in ongeveer een week naar ca. $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ en bleef gedurende de daaropvolgende periode van ca. 80 dagen constant en significant lager dan voor de vorstbeproeving. De doorlatendheid van het mengsel met een dichtheid van 96% bleek na de vorstbeproeving lager dan daarvoor en was gemiddeld $0,6 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$. Blijvende schade aan de afdichtingskwaliteit van zand-bentonietlagen behoeft niet te worden verwacht.

Trefwoorden: Vorstfront, ijslensvorming, dooi, proctordichtheid, doorlatendheid

ISSN 0927-4499

©1993 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen.
Tel.: 08370-74200; telefax: 08370-24812.

DLO-Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (IOB), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw 'De Dorschkamp' (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO-Staring Centrum.

Inhoud

	blz.
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Beschrijving vorstproces	13
2.1 Bevriezen van grond	13
2.2 Heffing van bevroren grond	16
2.3 Consolidatie	17
2.4 Effecten van bevroering	19
3 Poefopzet	23
3.1 Materiaal	23
3.2 Methoden	23
3.2.1 Proctorproef	23
3.2.2 Doorlatendheid	23
3.2.3 Bevroering	25
4 Resultaten	27
4.1 Proctordichtheid	27
4.2 Doorlatendheid	27
4.3 Effect van bevroering op doorlatendheid	27
4.3.1 Verloop van de temperatuur	27
4.3.2 Wateropname tijdens bevroering	28
4.3.3 Invloed van bevroering op de doorlatendheid	29
5 Conclusie	33
Literatuur	35
Tabel	
Doorlatendheid van zand-bentonietmengsels bij verschillende proctordichtheden	27
Figuren	
1 Schematische weergave faseverdeling in de vorstzoom en het temperatuursverloop	14
2 Schematische weergave van een open en een gesloten systeem (naar Flörkemeier, 1990)	18

3	Rangschikking kleimineralen voor en na bevrozing (naar Flörkemeier, 1990)	20
4	Meetopstelling voor doorlatendheid volgens de 'falling head' methode	24
5	Schematische weergave meetopstelling voor de vorstbeproeving van grondmonsters	26
6	Verloop van de temperatuur op 0,05 m diepte in monsters zand-bentoniet en van de vriesvloeistof	28
7	Wateropname van zand-bentonietmonsters tijdens één vorst-dooicyclus.	29
8	Verloop van de doorlatendheid van zand-bentoniet voor en na vorst-dooicycli bij twee verschillende initiële dichtheden	30

Woord vooraf

Het onderzoek naar het effect van vorst op de doorlatendheid van zand-bentonietafdichtingen is in opdracht van Heidemij Advies BV, 's Hertogenbosch, in 1993 uitgevoerd.

Namens de opdrachtgever trad ing. J. den Ouden op als contactpersoon. Mevr. A. Weitz was tot juli 1993 in tijdelijke dienst van SC-DLO.

Samenvatting

Te Landgraaf (Limburg) wordt een voormalige zandwinput ingericht voor het storten van afval. De bodem van deze put ligt boven de grondwaterspiegel. De bodem en taluds worden voorzien van een afdichting van folie op een laag zand-bentoniet. De taluds worden in fasen bekleed met het afdichtingsmateriaal, telkens als de hoogte van het gestort afval dat vereist. Gedurende een zekere tijd zal deze laag zijn blootgesteld aan weersinvloeden, waaronder vorst.

Omdat weinig bekend is van de invloed van afwisselend vorst en dooi op de doorlatendheid van zand-bentonietmengsels, is dit effect in 1993 in opdracht van Heidemij Advies BV op laboratoriumschaal bestudeerd door SC-DLO.

Er is uitgegaan van een door de opdrachtgever geleverd mengsel van zand-bentoniet. Aan monsters met 94 en 96% proctordichtheid is de doorlatendheid bepaald vooraf en na afloop van de vorstbeproeving.

Bij de bevriezing is uitgegaan van de meest ongunstige situatie. Deze bestaat uit een langzame bevriezing bij lage temperatuur en de mogelijkheid van ijslensvorming. De vorming van ijslenzen is maximaal als het vorstfront niet of nauwelijks opschuift, terwijl er water vanuit onderliggende lagen naar het vorstfront kan worden aangevoerd. Dat water gaat over in ijs en doet aanwezige ijslenzen of -naalden aangroeien. De kristallisatiedruk kan waarden van 100 tot 1000 kPa bereiken, waardoor een grondpakket gemakkelijk wordt opgeheven (vorstheffing).

De vereiste instelling van de vriestemperatuur aan het oppervlakte van de monsters is experimenteel bepaald door meting van zowel de vriestemperatuur als het verloop van de temperatuur op 5 cm diepte in het monster. De gehele opstelling is in een koelkast geplaatst, waarin gedurende de vorstproef een temperatuur van 2 °C is gehandhaafd. De vriestemperatuur is in een aantal stappen verlaagd, te beginnen bij -0,5 °C. Na ca. 3 dagen was het vorstfront op een diepte van 5 cm aangekomen.

Tijdens de bevriezing kon water worden opgenomen uit een gekalibreerde, horizontaal opgestelde meetbuis. Deze buis lag op het niveau van de onderzijde van het monster om capillaire aanvoer naar het vorstfront mogelijk te maken. De opgenomen hoeveelheid water tijdens de bevriezing is gemeten.

De invloed van vorst op de afdichtende werking van zand-bentoniet is bepaald door monsters van 94 en 96% proctordichtheid te onderwerpen aan drie opeenvolgende vorst-dooicycli, waarbij een minimale temperatuur van -2,5 °C werd bereikt. Tijdens de bevriezing werd ca. 1 mm water uit het aanvoersysteem opgenomen, wat duidt op ijslensvorming en tijdens de eerste dooi nog eens ca. 0,5 mm, wat duidt op zwel van reeds ontdooide zand-bentonietmengsels bij een ongelijkmatige dooi. In de daarop volgende cycli werd geen water meer opgenomen of afgestaan. De doorlatendheid vooraf aan vorstbeproeving bedroeg gemiddeld $2,0 \cdot 10^{-10}$ m.s⁻¹ voor een mengsel met een relatieve dichtheid van 94% en $1,7 \cdot 10^{-10}$ m.s⁻¹ voor een dichtheid van 96%. Na

de vorst-dooicycli bleek de doorlatendheid van de mengsels met 94% dichtheid $11-35 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ te zijn, maar daalde in ongeveer een week naar ca. $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ en bleef gedurende de daaropvolgende periode van ca. 80 dagen constant en significant lager dan voor de vorstbeproeving. De doorlatendheid van het mengsel met een dichtheid van 96% bleek na de vorstbeproeving lager dan daarvoor en was gemiddeld $0,6 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$. Blijvende schade aan de afdichtingskwaliteit van zand-bentonietlagen hoeft niet te worden verwacht. Indien de zand-bentoniet laag niet met een folie wordt afgedekt, is aan te bevelen de drainagelaag direct aan te brengen om extreme zwel aan de bovenkant van de afdichtingslaag te voorkomen.

1 Inleiding

Te Landgraaf (Limburg) wordt een nieuwe afvalstortplaats aangelegd in een zandafgraving boven de grondwaterspiegel. De bodem en taluds worden afgedicht met folie op een laag zand-bentoniet. De afdichting op de bodem wordt direct aangelegd, de afdichting op de taluds gebeurt in fasen, telkens als de storthoogte van het afval dat vereist. De afdichtingslaag op het talud wordt met een drainagelaag afgedekt en staat een tijdlang bloot aan weersinvloeden. Door de lage ligging in het terrein, bestaat de kans dat de afdichtingslaag 's winters bevriest.

Over de invloed van afwisselend bevrozen en dooien op de dichtheid en doorlatendheid van klei-houdend materiaal is weinig bekend. Om dit effect op zand-bentoniet afdichtingen te kwantificeren, is door SC-DLO in 1993 een laboratoriumproef opgezet.

Vorst bevordert de structuurvorming in de bodem, waardoor de doorlatendheid voor vloeistoffen en gassen toeneemt. Ook voor zand-bentonietafdichtingen kan dit worden verwacht.

Het proces van structuurvorming door bevrozing is vrij complex. In de wegenbouw ontstaat schade aan wegen door de vorming van ijslenzen waardoor de bovenliggende grond (ongelijkmatig) wordt opgedrukt (vorstheffing).

In hoofdstuk 2, is op basis van literatuuronderzoek een overzicht gegeven van de verschillende processen die een rol spelen bij bevrozing van grond. In hoofdstuk 3 is de proefopzet beschreven en de resultaten zijn in hoofdstuk 4 weergegeven.

2 Beschrijving vorstproces

In Nederland vriest het maar enkele weken per jaar. De vorst kan vooral diep in de grond dringen als een isolerende sneeuwdek ontbreekt. Vorstdieptes tot 1 m zijn waargenomen.

De vorstgevoeligheid van minerale materialen, waaronder wordt verstaan de verandering van de structuur en doorlatendheids-karakteristieken, onder invloed van bevriezing, wordt bepaald door verschillende factoren (Reuter 1989):

- de bevroeringsomstandigheden, zoals duur en intensiteit van de vorst, en aantal, verloop en intensiteit van dooidagen;
- de fysische eigenschappen van het materiaal zoals textuur, watergehalte, droog volumegewicht, doorlatendheid voor water, structuur, minerale samenstelling;
- externe drukken;
- de ondergrond en grondwatertoestand;
- de hoogteligging van het bevroerende materiaal ten opzichte van de omgeving (bos, kuil, open vlakte).

De vorstgevoeligheid kan volgens Saetersdal (1981), worden gekwantificeerd door: vorstheffing, heffingsdruk en verzwakking van het materiaal bij dooi.

2.1 Bevroren van grond

Een niet-bevroren onverzadigde grond wordt opgevat als een drie fasen systeem: een vaste fase (bodem materiaal), een vloeibare fase (water) en een gasfase (lucht). In een verzadigde grond ontbreekt de gasfase; deze is vervangen door water. Bij bevriezing van de bodem gaat de vloeibare fase over in een vaste fase (ijs), waarbij een groter volume wordt ingenomen. De vrijkomende latente warmte wordt afgevoerd naar het maaiveld (Kane en Stein 1983).

In de natuur is bevriezing van grond hoofdzakelijk een één-dimensionaal verticaal gericht proces (van Loon 1991). Als gevolg van temperatuurdalingen in de atmosfeer, daalt ook de temperatuur aan maaiveld. Daardoor ontstaat een temperatuurgradiënt waardoor warmte naar het maaiveld wordt afgevoerd en de bodem afkoelt. In de bodem bevriest water niet bij één bepaalde temperatuur, maar binnen een 'vriestraject'.

Ijskristallen worden uitsluitend uit zout-vrij water gevormd. Bij bevriezing neemt daarom het electrolietgehalte in de vloeibare fase toe, waardoor het vriespunt wordt verlaagd (Flörkemeier 1990). Ook de aantrekkingskrachten tussen watermolekulen en oppervlaktes van bodempartikelen verhinderen het vormen van ijskristallen. Er blijft een dunne waterfilm rond de bodemdeeltjes over die niet bevriest. Het volume van deze waterfilm is evenredig met het specifieke oppervlak. Naarmate de oppervlaktelading van bodembestanddelen groter is, is ook de bindingskracht tussen

bodemdeeltjes en ionen groter en is de laag rond de bodemdeeltjes met een hogere concentratie opgeloste stoffen dan in het porie-water, groter (Boels et al. 1993). De dikte van de niet-bevroren waterfilm is evenredig met de oppervlaktelading (van Loon 1991). De bindingsenergie kan worden verlaagd door temperatuurverlaging. Het waterlaagje verdwijnt pas bij temperaturen van -40 tot -50 °C (Wartena 1988), en komt in Nederland niet in de vrije natuur voor. In ons land is ijs daarom nooit direct aan de bodemdeeltjes gehecht, maar is daarvan gescheiden door een dunne waterfilm (fig. 1).

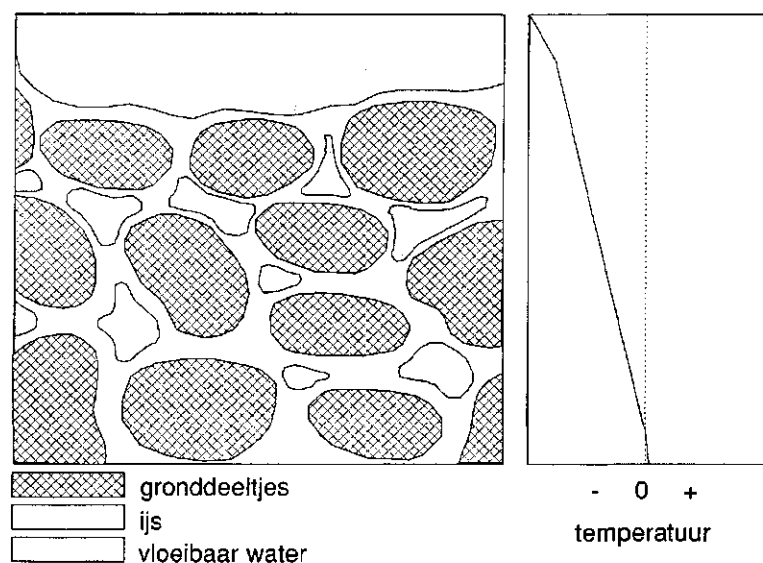


Fig. 1 Schematische weergave faseverdeling in de vorstzoom en het temperatuursverloop

Ook capillaire krachten veroorzaken een vriespuntsverlaging. Hoe fijner de textuur van bodems, des te groter ook de daling van het vriespunt van het poriënwater. In een vorstperiode komt het poriënwater in een onderkoelde toestand. Hoeveel bevroert wordt dan bepaald door de temperatuuurdaling en de fysische en chemische parameters van de grond. Bij bevriezing gaat net zoveel poriënwater in ijs over tot een thermodynamisch evenwicht ontstaat tussen de water- en ijsfase (Saetersdal 1981).

Bevriezing van bodemlagen aan maaiveld veroorzaakt spanningen waarbij afhankelijk van de thermische eigenschappen van de bodem scheuren kunnen ontstaan. Dit verschijnsel wordt door Andersland en Al Moussawi (1987) thermische contractie genoemd. De diepte en het patroon van scheurvorming wordt beïnvloed door bodemtype, temperatuur, vochtgehalte en de toestand aan het maaiveld (vegetatie, sneeuwbedekking), die invloed heeft op de warmte uitwisseling tussen bodem en atmosfeer. Het scheurpatroon en de poriënverdeling bepalen de ruimtelijke verdeling van ijs in de bodem. Aan de hand van onderzoek aan slijpplaten van kleigronden demonstreert Chamberlain (1981), de vorming van samenhangende horizontale en verticale ijspatronen. Eenzelfde poly-edrisch patroon ontstaat ook bij uitdroging van zwellende en krimpnde kleigronden. In niet-kleihoudende gronden ontstaan lamel-achtige ijslagen. Zijn scheuren eenmaal ontstaan dan breiden deze zich uit naar diepere lagen en veroorzaken een grotere doorlatendheid voor water en gas.

De indringingssnelheid van vorst in de bodem wordt bepaald door het warmtetransportproces. Warmte kan worden getransporteerd met stromend water (advectie), met waterdamp (convektie en diffusie) en via de vaste fase (diffusie). Het warmtegeleidingsvermogen van ijs is ca. 4 keer zo groot als van vloeibaar water, zodat het bevroeringsproces de thermische eigenschappen van het bodemsysteem verandert. Bij de overgang van water naar ijs komt een hoeveelheid energie (smelt- of stollingswarmte) vrij waarbij de temperatuur niet verandert. Warmte afgifte in overige gevallen leidt wel tot temperatuurdaling. Onder invloed van temperatuurverschillen stroomt warmte uit diepere bodemlagen naar het vorstfront. Daar vandaan stroomt het onder invloed van temperatuurgradiënten naar het maaiveld. De temperatuurdaling en bevroering veroorzaken potentiaalveranderingen waardoor een waterbeweging in de grond op gang komt. Deze stroming wordt in stand gehouden omdat water overgaat in ijs. Ook wanneer het water in de poriën is bevroren is watertransport via de niet-bevroren waterfilm mogelijk (van Loon 1992). De grootte van deze waterstroom wordt bepaald door potentiaalverschillen en de stromingsweerstand in de grond. De weerstand hangt samen met de dikte en de totale oppervlakte van de waterfilm en dus met de korrelgrootteverdeling en het specifiek oppervlak. Bij voortschrijdende bevroering neemt de dikte van de waterfilm op de bodemdeeltjes af en neemt de stromingsweerstand toe. Er stroomt dan minder water naar het vorstfront en de aangroei van ijs neemt af.

Het vorstfront verplaatst zich naar de diepte als de warmte-afvoer naar maaiveld groter is dan de warmte toevoer naar het vorstfront. Daarbij worden geen ijslenzen gevormd. Is de warmte afvoer naar maaiveld echter in evenwicht met de warmteaanvoer, dan worden ijsnaalden en -lenzen gevormd als gevolg van de capillaire aanvoer van water naar het vorstfront. Flörkemeier (1990) noemt dit het segregatie bevroeren.

Het warmtegeleidingsvermogen en warmtecapaciteit van de vaste bodemfase is niet gelijk aan die van water en ijs. Daardoor kan de zogenaamde 0 °C-isotherm zich in de vaste fase soms sneller verplaatsen dan in het poriënsysteem. Het gevolg daarvan is dat ook ijsvorming op enige afstand van het ijs-front kan ontstaan. De ijs-houdende zone wordt vorstzone genoemd, de zone tussen 0 °C isotherm en diepste ijslens in de bodem wordt vorstzoom ('frozen fringe') genoemd (fig. 1). In de vorstzoom bevriest water zonder vorming van ijsnaalden of -lenzen. Het segregatie-bevroeren gebeurt in de vorstzone iets boven de vorstzoom. Bij afwisselende vorst en dooi kunnen meerdere vorstfronten tegelijk in de bodem voorkomen. De dikte van de vorstzoom is groter naarmate de temperatuurgradiënt geringer en de bovenbelasting hoger is. De dikte van de 'frozen-fringes' in kleigronden is 2-4 mm volgens Flörkemeier 1990) en 5-15 mm volgens Van Loon (1991).

2.2 Heffing van bevroren grond

Bij de overgang van water naar ijs neemt het volume met 10% toe. De diameter van met water verzadigde poriën neemt dan ook toe. Wordt ijs aan maaiveld gevormd, dus zonder druk van bovenliggend materiaal, dan vindt de zogenaamde primaire heffing plaats (van Loon 1991). Vorstheffing treedt op als de kristallisatie druk van ijs groter is dan de gronddruk en verbreekt het direct contact tussen bodemdeeltjes. Dit proces wordt nog versterkt als door toestromend water uit de niet-bevroren omgeving ijslenzen worden gevormd (secundaire heffing). De totale heffing van grond is de som van primaire en secundaire heffing (van Loon 1991) en veroorzaakt een afnemend droogvolume gewicht van de bodem. Naarmate de bovenbelasting groter wordt, neemt ijsgroei en heffing af. De bovenbelasting verlaagt ook het vriespunt (Flörkemeier 1990). Volgens Saetersdal, 1981, bedraagt de heffingsdruk bij kleigronden 100-1000 kN/m². Als de kristallisatie druk van ijs kleiner is dan de bovenbelasting, wordt water uit de bevroerende zone geperst, en blijft heffing achterwege en treden geen veranderingen op in de bodemmatrix. Het thermisch contact tussen de bodemdeeltjes blijft bestaan waardoor de 0 °C isotherm snel in de grond kan dringen.

De fysische transporteigenschappen (onverzadigde doorlatendheid) van de bodem bepalen het optreden en de omvang van vorstheffing en de heffingssnelheid. Volgens Van Loon (1992) is de heffingssnelheid evenredig met de temperatuurgradiënt in de vorstzone. De doorlatendheid voor water daalt exponentieel met de temperatuu-
daling zodra de temperatuur onder nul is.

Vorst heffing is hoofdzakelijk afhankelijk van de snelheid van de warmte-afvoer en watertransport vanuit de niet-bevroren zone naar de vorstzone (Nakano en Horiguchi 1984). Bij een hoge warmte-afvoer dringt de 0 °C isotherm snel in de grond en befrist het water lokaal zonder lensvorming; de vorstheffing is dan gering. Bij langzame warmte-afvoer blijft de 0 °C isotherm stationair of dringt langzaam in de grond, water beweegt stroomt naar het vorstfront, gaat over in ijs en bevordert de vorming van ijslenzen; de vorstheffing is dan relatief groot. De hoeveelheid water in de vorstzone neemt daarbij toe en in de onderliggende lagen af. Afhankelijk van de beschikbaarheid van water wordt een open en een gesloten systeem onderscheiden (fig. 2). In een gesloten systeem ontbreekt het contact met grondwater en vindt alleen lokale waterbeweging plaats. De ijslenzen blijven dun en de vorstheffing is beperkt. In een open systeem is capillaire aanvoer van water uit het grondwater mogelijk en worden de mogelijkheden voor de vorming van ijslenzen en vorstheffing versterkt door het relatief grote warmtegeleidingsvermogen in de bijna verzadigde bodem en de relatief grote onverzadigde doorlatendheid (van Loon 1991).

Bodems met een grote fractie aan fijn materiaal (< 0,125 mm) tonen in beide systemen een grote vorstheffing (van Loon 1992). De kleifractie (< 0,002 mm) beïnvloedt de heffing negatief, omdat de doorlatendheid vaak gering is. Slecht-doorlatende gronden (klei, keileem) vertonen weinig heffing en relatief snelle verplaatsing van de 0 °C isotherm. In klei met een massieve structuur is de verdeling van ijs gewoonlijk homogeen.

In natte grond beweegt genoeg water naar het indringende vorstfront om ijslenzen te doen ontstaan. De vrij komende latente warmte remt de indringssnelheid van het vorstfront en de vorstheffing is relatief groot. In droge gronden is de waterdoorlatendheid gering en is ook de vorstheffing gering. Bij een grote thermische gradiënt kan de 0 °C isotherm zo snel in de grond dringen dat geen ijslenzen worden gevormd en dus geen heffing van betekenis optreedt.

Door inhomogeniteiten in de bodem groeien ijslenzen niet overal even snel. Bij kleine temperatuurgradiënten is de vorstgrens niet scherp, maar met toont een sterke ruimtelijke variatie in de indringdiepte (Hayhoe et al. 1983). Ijslenzen groeien in verschillende richtingen en veroorzaken daardoor onregelmatige heffingen. Ook verbreken ze de samenhang tussen boven- en ondergrond.

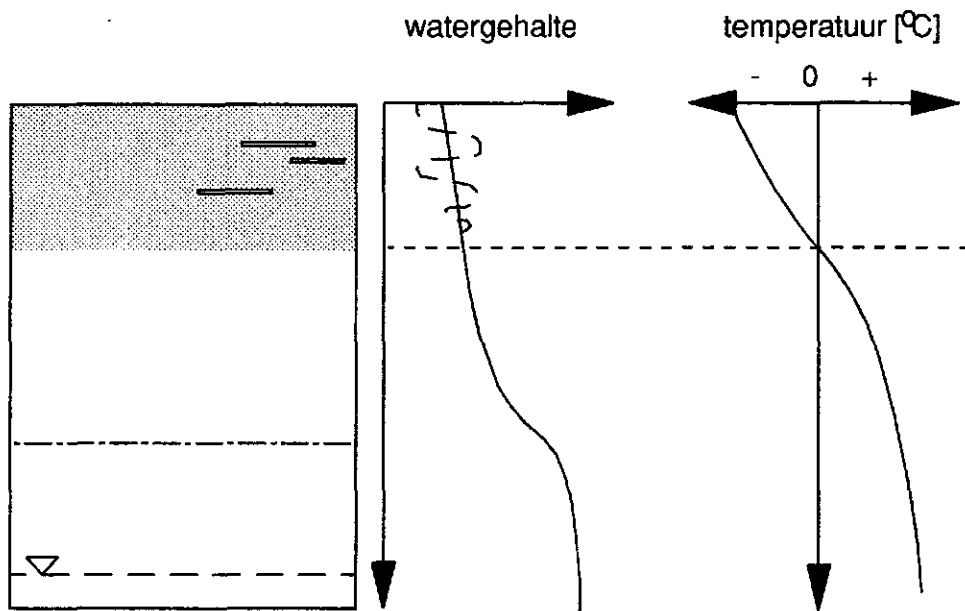
Bij dooi kan smeltwater niet door de bevroren ondergrond wegstromen en komt de bovengrond op een laagje water, de vroegere ijslenzen, te rusten. Gebeurt dit onder een wegdek, dan kan deze bij ongelijkmatige belasting breken. In Nederland is de vorstheffing, ook in strenge winters, slechts enkele centimeters, maar veroorzaakt toch aanzienlijke schade.

2.3 Consolidatie

Een bevroren bodem, die onder een constante druk staat, deformeert in het loop van de tijd alsof het een visceus medium betrof. Daardoor veranderen grondspanningen tijdens de vriesperiode (Chamberlain 1981). Door bevroering worden lokaal drukken uitgeoefend, waardoor de structuur en dichtheid veranderen en kunnen na dooi verschil-zettingen veroorzaken. Kwartshoudende bodems zijn minder goed te verdichten dan plastische kleien. Als van deze kleien het watergehalte bij bevroering hoger is dan overeenkomt met de uitrolgrens, kan consolidatie optreden. Bij bevroering aan het vorstfront stijgt de effectieve korrelspanning direct onder de vorstzone, en raakt de klei daar overgeconsolideerd. Er ontstaan afwisselend lagen ijs en grond, waarbij als gevolg van de overdruk water uit aggregaten wordt geperst, consolideren en waarvan dus de porositeit afneemt (Flörkemeier 1990). Consolidatie gebeurt gedurende bevroering, niet tijdens het dooien. De stabiliteit van aggregaten die tijdens bevroering waren ontstaan, neemt door ontwatering toe (Hartge 1978), en het gehalte aan dispergeerbare kleideeltjes daalt (van Loon 1991).

De vries-dooi kringloop vergroot de consolidatiecoëfficiënt en de verticale en horizontale doorlatendheid als gevolg van aggregaatvorming.

Gesloten systeem



Open systeem

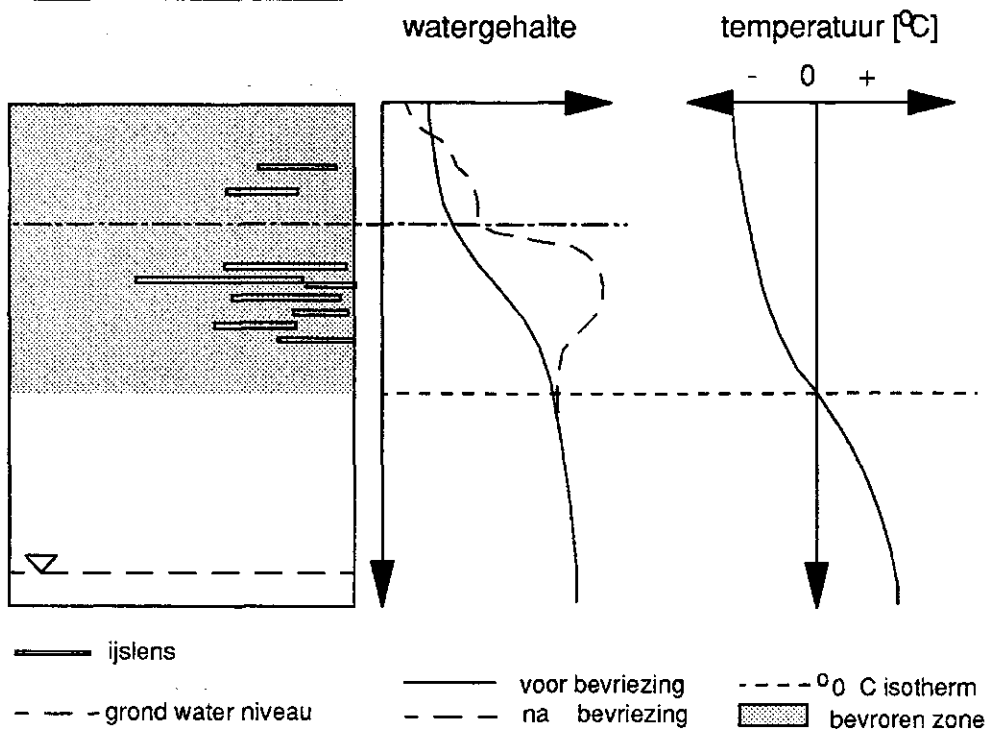


Fig. 2 Schematische weergave van een open en een gesloten systeem (naar Flörkemeier, 1990)

2.4 Effecten van bevriezing

De vorstgevoeligheid van grond varieert met de hoeveelheid beschikbaar water, de bevroeringsomstandigheden, externe drukken en de textuur (korrelgrootteverdeling). Saetersdal (1981) noemt de textuur als het geschiktste criterium om de vorst gevoeligheid van een grond te schatten, maar wijst erop dat alle criteria onzeker zijn en alleen een relatieve schatting kan worden gemaakt. Bovendien vindt hij een slechte relatie tussen laboratorium proeven en veldomstandigheden.

Waterdoorlatendheid van bevroren grond kan met onderkoeld ('supercooled') water onder isotherme condities worden gemeten (Nakano en Horiguchi 1984). In het beschreven experiment door Loch (1981) was de doorlatendheid $2 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ in de niet-bevroren grond en $1 \cdot 10^{-12} \text{ m.s}^{-1}$ in de bevroren grond bij een temperatuur van $-0,15 \text{ }^\circ\text{C}$.

De doorlatendheid van vorstgevoelige gronden varieert van 10^{-7} tot 10^{-9} m.s^{-1} (Chamberlain 1981). Een afname van de porositeit met 25% in een experiment met klei (vloei-grens 71%, PI 41%) als gevolg van bevriezing en dooi is door Chamberlain (1981) waargenomen.

Afhankelijk van de verdeling van ijs en water in de bovenste laag van de grond kan de infiltratiesnelheid over een brede range variëren gedurende de vorstperiode (Kane en Stein 1983). Efimov et al. (1981) hebben een verhoging met 10^{-3} m.s^{-1} gemeten van de infiltratiecapaciteit van een kleigrond, die daarvoor nog nooit bevroren was geweest, als gevolg van herhaald bevroren en dooien.

De vorstheffing is minimaal als het vochtgehalte tijdens bevriezing onder de uitrolgrens ligt (Changjian en Zongyan 1981). Saetersdal, 1981, beschrijft vorstheffing (dh) met de functie:

$$dh = \frac{1.09 \, dV + 0.09 \, V_0}{A} \quad (1)$$

Hierin is:

dh	=	vorst heffing	(m)
dV	=	verhoging van het watergehalte	(m ³)
V ₀	=	initiële water gehalte	(m ³)
A	=	oppervlakte	(m ²)

Flörkemeier (1990) vond bij het kunstmatig bevroren van siltig materiaal, waarbij het poriënvolume gelijk bleef, een verschuiving in de poriënverdeling van de grovere (< 15 µm) en de fijne intergranulaire poriën (< 1,5 µm) naar poriën van 1,5- 9,5 µm. Deze verschuiving bleek tijdens het dooien bijna geheel reversibel. Daarbij is echter de toestand voor het bevroren niet helemaal duidelijk beschreven. De microstructuur van klei verandert tijdens het bevroren, afhankelijk van het kleimineraal. Kleimineralen van het twee-lagen type gaan dwars op de richting van het vorstfront

liggen, het drie-lagen type heeft een honingraatstructuur die bij langzaam bevroren deformeert, en bij snel bevroren in afzonderlijke aggregaten uiteenvalt (fig. 3)

Het totale poriënvolume wordt alleen vergroot als ijslenzen de nieuwgevormde fijne aggregaten zodanig tegen elkaar drukken dat de intra-aggregaatporiën tijdens het dooien niet meer dicht vallen. Vooral herhaalde bevrozingen vergroot het poriënvolume en gaan de ontstane grove poriën gedurende dooi over in stabielere middel-grote poriën.

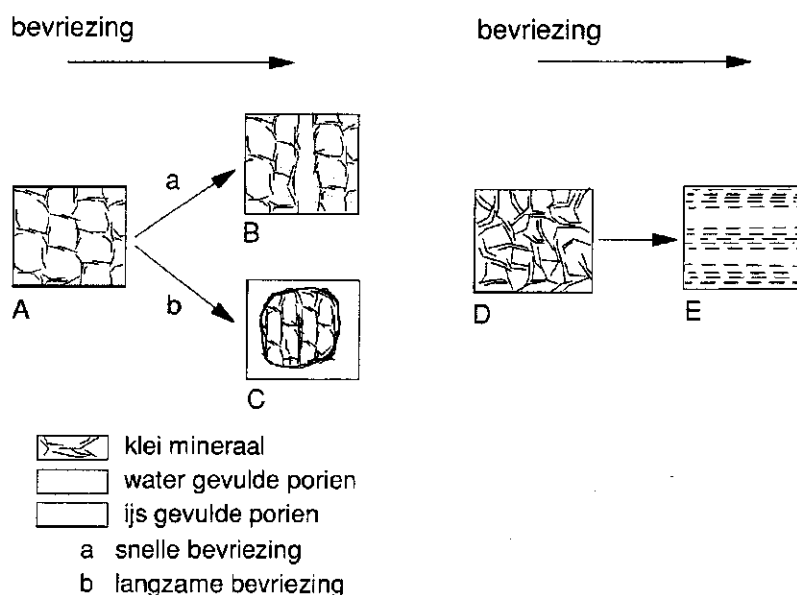


Fig. 3 Rangschikking kleimineralen voor en na bevrozing (naar Flörkemeier, 1990)

Aan het begin van de bevrozing kunnen temperatuurgradiënten snel oplopen. Andersland en Al Moussawi (1987) rapporteren temperaturdalingen van 15 °C in 12 uur. Penner en Goodrich (1981) hebben in een proef met kunstmatige bodems met verschillende korrelgrootteverdelingen bij langzame bevrozing een grote heffing en wateropname gevonden onder gelijktijdige ijslensvorming, telkens als de temperatuur, stapsgewijze werd verlaagd. Saetersdal (1981) noemt voor experimenten bevrozingsperioden van 100-300 uur als gewoon.

Uit bevrozingsproeven aan kleine kunstmatige monsters bleek dat bij gelijke omstandigheden één dimensionaal gericht bevroren in een open systeem dickere ijslenzen ontstaan dan in een gesloten systeem. De vorstheffing zonder bovenbelasting wordt in eerste aanleg bepaald door de netto snelheid van de warmte-afvoer, en dus door de bevrozingstemperatuur (Flörkemeier 1990). Pas in tweede instantie wordt de afnemende waterdoorlatendheid de bepalende factor. Bij waterspanningen tussen -15 en -30 kPa (~ 150-300 mBar onderdruk) neemt de capillaire waterbeweging sterk af, vindt geen noemenswaardige waterheffing meer plaats en is ijslens-vorming gering.

De verandering van de doorlatendheid van een zand-bentonietafdichting onder invloed van bevrozing is volgens Reuter (1989) gering tot verwaarloosbaar. Wel constateerde

deze auteur dat de dichtheid was afgenomen (ca. 5%) en dat de structuur minder samenhangend was geworden.

3 Proefopzet

3.1 Materiaal

Het zand-bentonietmengsel is door de opdrachtgever geleverd. Ook was door de opdrachtgever de proctordichtheid van het mengsel bepaald. Aanvullend is hieraan nog een punts-proctordichtheid bepaald bij een vochtgehalte van ca. 13%. In tegenstelling tot de oorspronkelijke opdracht is op verzoek van de opdrachtgever, de doorlatendheid bepaald van mengsels bij een proctordichtheid van 94 en 96%.

De invloed van vorst op de doorlatendheid van zand-bentonietmengsels is in duplo bepaald aan monsters van het geleverd materiaal bij initiële dichtheid van 94 en 96% van de door de opdrachtgever bepaalde proctordichtheid.

3.2 Methoden

3.2.1 Proctorproef

Het verdichtingsgedrag van het materiaal wordt bepaald door de samenstelling van het materiaal (textuur, gehalte organische substantie etc.), de verdichtingsenergie en het vochtgehalte. De maximale dichtheid en het bijhorende optimale vochtgehalte is volgens de Standaard Proctorproef (Rijkswaterstaat 1985) bepaald. Deze dichtheid wordt proctordichtheid genoemd. In de praktijk is gebleken dat deze dichtheid met de in de praktijk van de wegenbouw gebruikelijke methoden kan worden bereikt.

De proctorproef is met een geautomatiseerde standaard apparaat uitgevoerd. Het te testen materiaal wordt verdicht in een cilinder met behulp van een vrij vallende stamper in 3 lagen van 0,04 m met 25 slagen per laag. De slagen worden gelijkmatig over het monster oppervlakte verdeeld. Het monster wordt vlak afgesneden waarna het nat volumegewicht via weging wordt bepaald. Daarna wordt de inhoud van de cilinder gedurende 24 uur bij 105 °C gedroogd, waarna het gewicht opnieuw wordt bepaald. Hieruit wordt het droogvolumegewicht en het vochtgehalte (gew.%) berekend. De proef wordt herhaald bij verschillende vochtgehaltes. De resultaten worden grafisch weergegeven (de Proctorcurve). Uit de grafiek wordt de maximale (proctor)-dichtheid en het bijbehorend vochtgehalte afgelezen.

3.2.2 Doorlatendheid

De verzadigde waterdoorlatendheid van het zand-bentonietmengsel is in het laboratorium bepaald met behulp van de falling head methode (Hoeks et al. 1990). Daartoe wordt een monster in een roestvrij stalen ring gebracht en in de meetopstelling (fig. 4) ingebouwd. Het monster heeft een dikte van ca. 0,025 m. Het resterende ring-

volume is met gewassen, vochtig duinzand opgevuld. Het monster wordt van onderen af verzadigd. Voor de meting wordt het hele meetsysteem met water gevuld, zodat water vanuit de stijgbuis door het monster naar het uitstroompunt kan stromen. De hoeveelheid instromend water wordt met behulp van de verplaatsing van de meniscus in het stijgbuisje afgelezen.

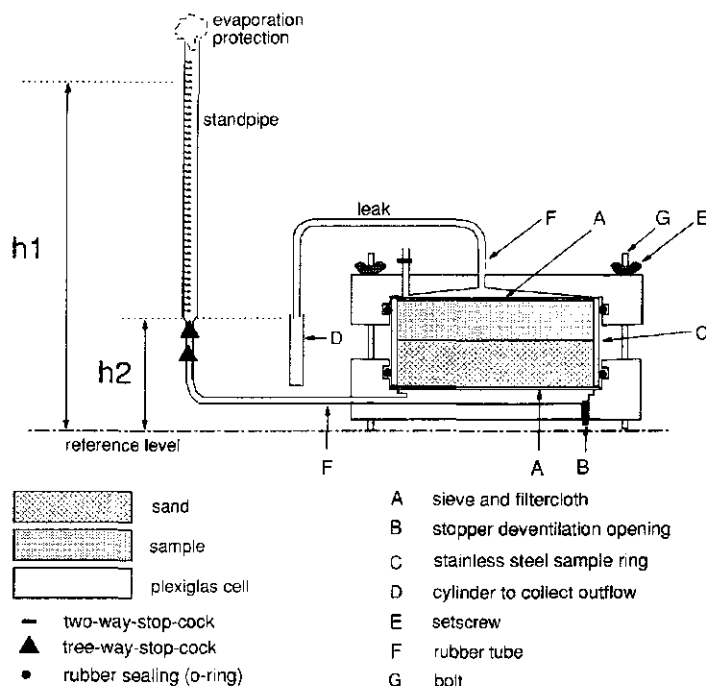


Fig. 4 Meetopstelling voor doorlatendheid volgens de 'falling head' methode

Ter controle wordt de uitgestroomde hoeveelheid opgevangen. De doorlatendheid (K) wordt berekend volgens:

$$K = \left(\frac{a \cdot d}{A \cdot \Delta t} \right) \cdot \ln \frac{h(1)}{h(2)} \quad (2)$$

Hierin is:

- | | | | |
|------|---|---|----------------------|
| K | = | doorlatendheid | (m.s ⁻¹) |
| h(1) | = | waterniveau in het stijgbuis op tijdstip t(1) | (m) |
| h(2) | = | waterniveau in het stijgbuis op tijdstip t(1) | (m) |
| Δt | = | t(2) - t(1) | (s) |
| A | = | oppervlakte doorsnede monster | (m ²) |
| a | = | oppervlakte doorsnede stijgbuis | (m ²) |
| d | = | de dikte monster | (m) |

De gemiddelde gradiënt (i) gedurende het tijdsinterval, Δt, wordt berekend volgens:

$$i = \frac{h(1)-h(2)}{d} / \ln \frac{h(1)}{h(2)} \quad (3)$$

De metingen zijn met leidingwater uitgevoerd bij verschillende hydraulische gradiënten.

3.2.3 Bevriezing

Een opstelling is opgebouwd voor het van bovenaf laten bevriezen van monsters. De monsters zijn ingebouwd in roestvrijstalen ringen die ook in de doorlatendheidsproef worden gebruikt. De ringen zijn alle voorzien van een warmte-isolerende mantel en bodem. Op de monsters wordt een drie-zijdig geïsoleerde kap geplaatst, waarin zich het vrieselement bevindt. Dit element bestaat uit twee tegen elkaar inlopende dunne buizen van roodkoper, waardoorheen gekoelde vloeistof met grote capaciteit kan worden gepompt. De spiralen zijn op een messing plaat gelast om een uniforme temperatuurverdeling te garanderen. Deze plaat staat in contact met het grondmonster (fig. 5). Tussen de vriesplaat en grond is een nylondoek aangebracht om naderhand zonder problemen (de monsters zijn na het dooien verzadigd) de vrieskap te kunnen verwijderen. De monsters zijn in een koelkast geplaatst waarin de temperatuur tijdens de vorstproef op 2 °C wordt gehouden. De luchtvochtigheid in deze kast wordt laag gehouden met behulp van silicagel om ijsvorming tussen vrieskap en monsterring te voorkomen. De vriesvloeistof wordt in een thermostaatbak (bereik tot -20 tot +20 °C) op de ingestelde temperatuur gehouden (variatie < 0,2 °C).

Vooraf aan de proef is in een reeks experimenten het meetprotocol vastgesteld. Daarbij is indringingssnelheid van de 0 °C isotherm bepaald bij een bepaald verloop van de temperatuur aan het monsteroppervlak.

In de proef is uitgegaan van een langzame bevriezing bij een open systeem. De temperatuur aan het oppervlak is in 4 stappen verlaagd, te beginnen bij ca. -0,5 °C. Iedere temperatuurstep is 2,5 dagen constant gehouden. Wateropname tijdens de bevriezing was van onderuit mogelijk vanuit een horizontaal opgestelde gekalibreerde meetbuis. In de opstelling is ruimte voor vier monsters (fig. 5). Monsters, waarvan eerst de doorlatendheid is bepaald zijn onderworpen aan drie vorst-dooicycli. De dooi-intervallen duren 2 dagen. Na afloop van de vorstbeproeving is de doorlatendheid weer bepaald.

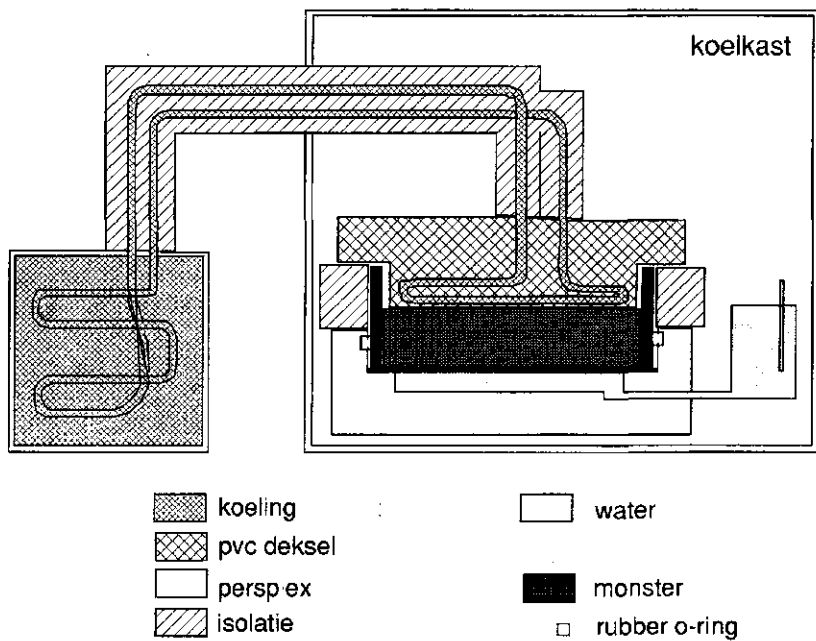


Fig. 5 Schematische weergave meetopstelling voor de vorstbeproeving van grondmonsters

4 Resultaten

4.1 Proctordichtheid

Volgens opgave van opdrachtgever is de proctordichtheid gemiddeld 1854 kg.m^{-3} , bij een vochtgehalte van ca. 13,5%. De bepaalde punt-proctordichtheid volgens de hiervoor omschreven methode, bedroeg echter 1730 kg.m^{-3} bij het zelfde vochtgehalte. In de experimenten is uitgegaan van de opgave van de opdrachtgever.

4.2 Doorlatendheid

De doorlatendheid is gemeten van monsters met een proctordichtheid van 94 en 96% (droogvolumegewicht resp. 1735 en 1770 kg.m^{-3}) (zie tabel).

Tabel Doorlatendheid van zand-bentonietmengsels bij verschillende proctordichtheden

Monster	Dichtheid (% proctor-waarde)	Doorlatendheid (* $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$)	Gemiddeld (* $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$)
34	94	1,6	
35	94	1,4	
2	94	1,2	
1	94	1,2	
Gemiddeld	94		1,35
33	96	1,2	
32	96	1,4	
3	96	1,2	
4	96	1,1	
Gemiddeld	96		1,22

Uit de tabel blijkt dat het verschil in dichtheid nauwelijks van invloed is op de doorlatendheid. Overigens voldoet de doorlatendheid ruimschoots aan de eisen voor een deugdelijke minerale afdichting.

4.3 Effect van bevrozing op doorlatendheid

4.3.1 Verloop van de temperatuur

De temperatuur op een diepte van 0,05 m in de monsters is gemeten met thermistors (temperatuur-gevoelige elektrische weerstand). De instelling van de badtemperatuur voor de koeling van de vriesvloeistof is zodanig afgeregeld, dat een zeer langzame bevrozing is gerealiseerd. In fig. 6 is het temperatuurverloop in de vier monsters en de koelvloeistof (vrieselement) weergegeven van de eerste cyclus vorst- en dooi.

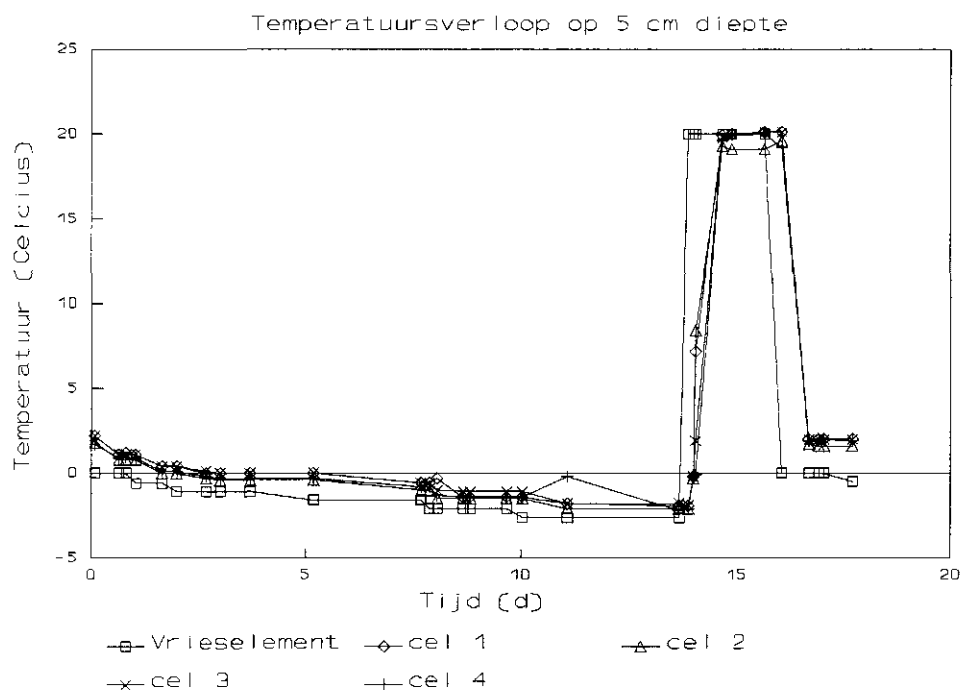


Fig. 6 Verloop van de temperatuur op 0,05 m diepte in monsters zand-bentoniet en van de vriesvloeistof

Uit fig. 6 blijkt dat het vorstfront pas na ca 3 dagen op de meetdiepte is aangekomen. Na 14 dagen is de bevroering gestopt en is de temperatuur van de koelvloeistof ingesteld op 20 °C en is de koeling van de koelkast uitgeschakeld. Te temperatuur in de monsters loopt relatief snel op. Na een dag is alles ontdooid en na weer een dag is begonnen aan de volgende vorstcyclus. Deze is ingeleid met een verlaging van temperatuur van de koelvloeistof tot 0 °C en het inschakelen van de koelkast op 2 °C. De bevroeringsduur in de daaropvolgende cycli is vier dagen en de dooi periode tot 1 dag. Aan het eind van de laatste dooi-dag zijn de monsters ingebouwd in de doorlatendheidscel en is een eerste meting verricht.

4.3.2 Wateropname tijdens bevroering

De vorstproef is ingesteld voor de meest ongunstige situatie: langzame bevroering in een open systeem, waarbij de vorming van ijslenzen mag worden verwacht. De opname van water tijdens de bevroering is gemeten om te kunnen vaststellen of ijslens-vorming daadwerkelijk optreedt. De wateropname is omgerekend naar de dikte van een waterschijf. In fig. 7 is de totale opname tijdens de eerste vorst-dooicyclus weergegeven.

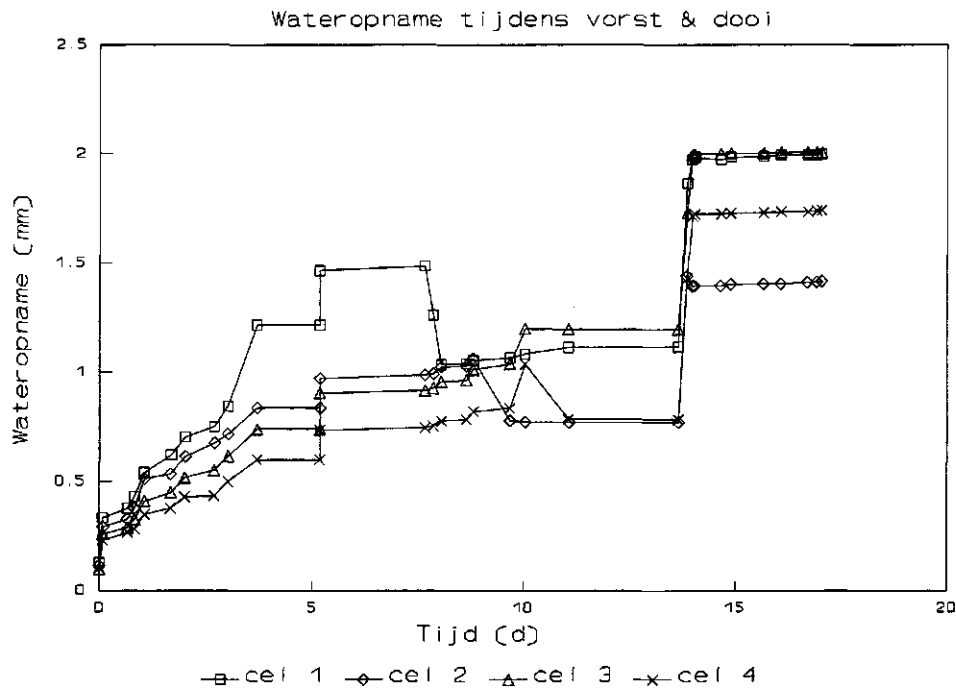


Fig. 7 Wateropname van zand-bentonietmonsters tijdens één vorst-dooicyclus

Uit fig. 7 blijkt dat de monsters water opnemen vanaf het begin van de bevroering. Na 3-4 dagen heeft de wateropname zijn maximum bereikt. Opmerkelijk is echter de wateropname tijdens de dooi. Deze opname moet waarschijnlijk worden toegeschreven aan extra zwelling van het bentoniet tijdens de dooi, die mogelijk werd omdat het mengsel waarschijnlijk niet gelijkmatig is gedooit. Daarbij werd waarschijnlijk de last van de vrieskap nog gedragen door het bevroren deel (centrum), terwijl het ontdooit deel vrij kon zwellen omdat het tengevolge van de dooi een kleiner volume had ingenomen. Bij de volgende vorst- en dooicycli werd geen water meer opgenomen.

4.3.3 Invloed van bevroering op de doorlatendheid

Vooraf aan de vorstbeproeving is de doorlatendheid gemeten. Vervolgens zijn drie vorst-dooicycli doorlopen, waarna opnieuw de doorlatendheid is gemeten.

Het verloop van de doorlatendheid van de verschillende monsters is in fig. 8 weergegeven.

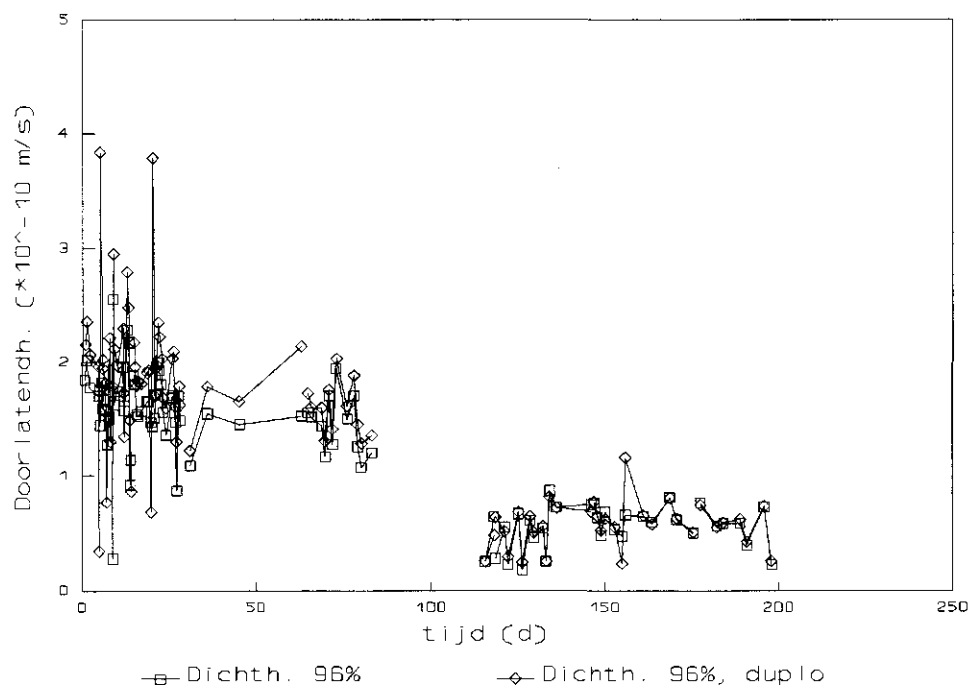
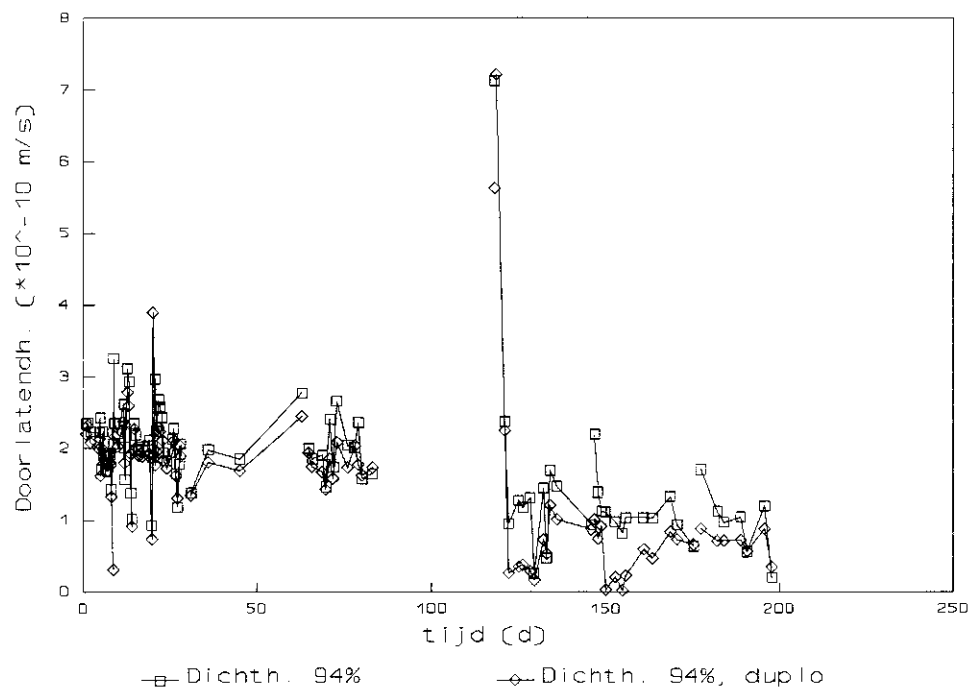


Fig. 8 Verloop van de doorlatendheid van zand-bentoniet voor en na vorst-dooicycli bij twee verschillende initiële dichtheden

De metingen in de periode 0 tot 90 dagen betreffen de situatie voor de vorstbeproeving. De vorstbeproeving heeft plaats gevonden in de periode 90 tot 115. In fig. 8 zijn niet alle extreme waarden voor de doorlatendheid weergegeven. Op dag 115 (na de vorstbeproeving), werd voor de monsters met een proctordichtheid van 94% doorlatendheden gemeten van $16,2 \cdot 10^{-10}$ en $36,2 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$. Op dag 118 werd van nog één monster met een relatieve dichtheid van 94%, een doorlatendheid gemeten van $11,9 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$. Daarna nam van beide monsters de doorlatendheid geleidelijk af tot lagere waarden dan voor de vorstbeproeving. De gemiddelde doorlatendheid van de mengsels was voor de vorstbeproeving $1,7 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ voor de monsters met een relatieve dichtheid van 96% en $2,0 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ bij een relatieve dichtheid van 94%. Na de vorstbeproeving is de gemiddelde doorlatendheid respectievelijk $0,57 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ en $1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$.

Waarschijnlijk is als gevolg van ijslensvorming in de monsters aanvankelijk de doorlatendheid iets groter als gevolg van een geringe structuur verandering. Waarschijnlijk als gevolg van de grote zwelcapaciteit is daarna de doorlatendheid afgenomen. Niet duidelijk is waarom de doorlatendheid uiteindelijk na de vorstbeproeving geringer is dan ervoor. Wellicht is als gevolg van de bevroering een herverdeling van de bentoniet tot stand gekomen of zijn bentoniet-aggregaten uiteen gevallen, waardoor de bentoniet beter over de poriën is verdeeld.

Geconcludeerd kan worden dat de meest ongunstige vorstsituatie (ijslensvorming) de doorlatendheid niet nadelig beïnvloedt.

5 Conclusie

Tijdens de bevroering van het zand-bentonietmengsel werd water opgenomen vanuit een horizontaal opgestelde meetbuis op het niveau van de onderzijde van het monster. De gemiddelde opname bedroeg de eerst drie dagen ca. 1 mm. Bij een gemiddelde opstijghoogte van 0,03 m en een gemiddelde doorlatendheid van zand-bentoniet van $2 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$, betekent dit dat er een gradiënt van ca. 20 nodig was om deze stroming op gang te houden. De hiervan afgeleide potentiaal aan het vorstfront heeft dan ca. -60 mBar bedragen. Het volume van het beproefd mengsel is als gevolg van de wateropname en de bevroering toegenomen met ca. 11%. Tijdens de eerste dooi is nog eens een hoeveelheid water opgenomen. Dit moet waarschijnlijk worden toegeschreven aan een ongelijkmatige ontdooiing van het mengsel. Langs de randen is waarschijnlijk de ontdooiing het eerst ingetreden. Daarbij neemt het volume af omdat water een geringer volume inneemt dan ijs. Plaatselijk valt dan tijdelijk de bovenbelasting weg en kan het materiaal zwellen.

Tijdens de dooi-cyclus werd geen water afgegeven, zodat de volumetoename door wateropname permanent is. Het volumegewicht van het mengsel is daardoor met ca. 5% afgenomen.

De doorlatendheid vooraf aan vorstbeproeving bedroeg gemiddeld $2,0 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ voor een mengsel met een relatieve dichtheid van 94% en $1,7 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ voor een dichtheid van 96%. Na de vorst-dooicycli bleek de doorlatendheid van de mengsels met 94% dichtheid $11-35 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ te zijn, maar daalde in ongeveer een week naar ca. $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ en bleef gedurende de daaropvolgende periode van ca. 80 dagen constant en significant lager dan voor de vorstbeproeving. De doorlatendheid van het mengsel met een dichtheid van 96% bleek na de vorstbeproeving lager dan daarvoor en was gemiddeld $0,6 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$.

Het is niet duidelijk waarom de doorlatendheid van de mengsels na de vorstbeproeving lager werd dan daarvoor. Mogelijk dat kleine zuivere aggregaten van bentoniet uiteen zijn gevallen waardoor een betere verdeling van de bentoniet over de poriën is bewerkstelligd. Duidelijk is echter wel geworden dat ondanks een tijdelijke volume toename met ruim 10%, bevroering van zand-bentonietmengsels geen gevolgen heeft voor de afdichtende werking. Omdat zand-bentoniet gemakkelijk water opneemt en zwelt, is het aan te bevelen om in situaties waarin geen folie wordt aangebracht, een bovenbelasting (bijvoorbeeld de drainlaag) aan te brengen om excessieve zwelling te remmen.

Literatuur

- Andersland, O.B. en H.M. Al Moussawi, 1987. Crack formation in soil landfill covers due to thermal contraction. *Waste Management & Research* 5, 445-452.
- Boels, D., E.P.W. Koenis en E.M. Loovers, 1993. *Geschiktheid van tertiaire kleien en waterglas voor afdichting van afval- en reststofbergingen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 291.
- Chamberlain, E.J., 1981. Overconsolidation effects of ground freezing. *Eng. Geology* 18, 97-110.
- Changjian, T. en S. Zongyan 1981. Horizontal frost heave thrust activity on buttress constructions. *Eng. Geology* 18, 259-268.
- Efimov, S.S., N.N. Kozhevnikov, A.S. Kurilko, M. Nikitina en A.V. Stephano 1981. Influence of cyclic freezing-thawing on heat and mass transfer characteristics of clay soil. *Eng. Geology* 18, 147-152.
- Flörkemeier, H. 1990. *Regeneration der Primärstruktur verdichteter Lössboden-Körper durch Frost*. Diss. Univ. Göttingen.
- Hartge, K.H. 1978. Einführung in die Bodenphysik. *Enke Verlag*, Stuttgart.
- Hayhoe, H.N., G.C. Topp en S.N. Edey, 1983. Analysis of measurement and numerical schemes to estimate frost and thaw penetration of a soil. *Can. J. Soil Sci.* 63, 67-77.
- Hoeks, J., H.P. Oosterom, D. Boels, J.F.M. Borsten, K. Strijbis en W. ter Hoeven, 1990. *Richtlijnen voor ontwerp en constructie van eindafdekkingen van afval- en reststofbergingen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 91.
- Kane, D.L. en J. Stein, 1983. Water movement into seasonally frozen soils. *Water Res. Res.* 19, 1547-1557.
- Loch, J.P.G., 1981. State-of-the-art, Report - Frost action in soils. *Eng. Geology* 18, 213-224.
- Loon, van W.K.P., 1991. *Heat and mass transfer in frozen porous media*. Ph.D. Thesis, Agr. Univ. Wageningen. 200 pp.
- Loon, van W.K.P., 1992. Vorming ijslenzen vergroot vorstschade aan wegen. *Land + Water* 5, 33-35.

Nakano, Y. en Horiguchi, K., 1984. Role of heat and water transport in frost heaving of fine-grained porous media under neglectible overburden pressure. *Adv. Water Res.* 7, 93-102.

Penner, E. en Goodrich, L.E. 1981. Location of segregated ice in frost susceptible soil. *Eng. Geology* 18, 231-244.

Rijkswaterstaat, *Standaard RAW bepalingen, 1985*. Uitgave van de stichting rationalisatie en automatisering grond-, water- en wegenbouw. Den Haag.

Reuter, E., 1989. Frostempfindlichkeit mineralischer Deponieabdichtungen. *Wasser & Boden* 41, 134-136.

Saetersdal, R., 1981. *Heaving conditions by freezing of soils*. *Eng. Geology*, 18: 291-305.

Wartena, L., 1988. Bevriezen van water in grond. In: Bouma et al.: *Weer, klimaat en bodem: voordrachten gehouden op de contactdagen 1987 van het technisch-bodemkundig personeel van de Stichting voor Bodemkartering*. Wageningen, STIBOKA, 57-64.