

NN31545.1630

KW nota 1630 II
juli 1985

Afstudeeropdracht
Technische Hogeschool Delft
Algemene Civiele Techniek
1e deelstudie
Vakgroep Waterbeheersing

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**

BENTONIET-GRONDLAGEN ALS AFDICHTING OP STORTPLAATSEN

door: Huub Glas



Stageverslag
Instituut voor Cultuurtechniek
en Waterhuishouding, Wageningen
dec. 1984

LS n 231263 *

VOORWOORD

Aan het einde van de opleiding tot civiel ingenieur aan de Technische Hogeschool Delft, is een afstudeerproject gepland. Dit is een onderwerp, waarmee de student(e) 34 werkweken bezig is.

Bij de richting Algemene Civiele Techniek, waarbij ik afstudeer, dient het afstudeerproject uit drie onderdelen te bestaan.

In de "voorstudie" wordt het gekozen onderwerp in zijn algemeenheid bestudeerd en worden de begrenzingen van het onderwerp aangegeven of gekozen. Uit deze gegevens worden twee relevante "deelstudies" gekozen.

In twee "deelstudies" wordt het gekozen onderwerp vrij diepgaand bestudeerd. Hierna worden de resultaten van de deelstudies in het kader van het gehele afstudeerproject geplaatst.

Het door mij gekozen afstudeerproject gaat over "afvalstortterreinen". In de eerste deelstudie heb ik me bezig gehouden met "bentoniet-grondlagen als afdichting op stortplaatsen". Met name is de invloed van enkele ontwerpvariabelen, zoals de grond- en bentonietsoort, het bentonietgehalte en de verdichting, op de doorlatendheid bestudeerd.

Mijn keuze is op dit onderwerp gevallen vanwege de actualiteit van het afvalstortprobleem. Stortplaatsen kunnen wanneer ze niet met de nodige zorg aangelegd worden, grote problemen voor het milieu en de mens geven.

Vanuit de verschillende vakdisciplines houdt men zich bezig met afvalstortterreinen. Eén van de taken van een algemeen civiel ingenieur is het leiden en/of begeleiden van een project waarbij deskundigen uit meerdere vakdisciplines betrokken zijn. De problematiek rond stortplaatsen lijkt me een uitstekende mogelijkheid deze taak te oefenen en om hierin een begin van praktijkervaring te verkrijgen.

Ik heb me eerst met de deelstudie beziggehouden alvorens de voorstudie te verrichten. In overleg met mijn afstudeerbegeleider is hiervoor gekozen, omdat bij de aanvang van mijn afstudeerwerk wel een

concrete taakstelling voor de deelstudie voorhanden was, maar niet voor de voorstudie.

De deelstudie, waarvan dit rapport het eindverslag is, is vanuit de werkgroep Algemene Civiele Techniek begeleid door B. Polen. Bij het opstarten van mijn afstudeerproject en vooral van deze deelstudie is zijn inbreng en motiverende steun van onmisbare waarde geweest.

De deelstudie is hoofdzakelijk in stageverband verricht bij het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW) in Wageningen. Dit is gebeurd in de periode van 14 mei tot en met 14 november 1984. Als stagebegeleider trad J. Hoeks op, die me inhoudelijk enorm gesteund heeft. Omdat hij altijd ruimschoots de tijd heeft genoemd om van gedachten te wisselen over gevonden resultaten, veronderstellingen of plannen voor verder onderzoek, had de stage voor mij een vlot en bevredigend verloop.

Inhoudelijke begeleiding vanuit de Technische Hogeschool werd vanuit de Vakgroep Waterbeheersing, gegeven door R. Boekelman. Van zijn raadgevingen heb ik dankbaar gebruik gemaakt. Voorts ben ik ook dank verschuldigd aan prof. J. van Dam, die dit verslag kritisch bestudeerd en becommentarieerd heeft.

Al deze begeleiders wil ik van harte bedanken voor hun steun. Zonder hen was deze studie niet mogelijk geweest.

Verder wil ik vooral J. Groen en L. Boeye bedanken voor de prettige contacten, die we hebben gehad omtrent de doorlatendheidsmetingen, die zij hebben verricht en die uiteindelijk uitgemond zijn in een ontwerp voor een nieuwe opstelling voor doorlatendheidsmetingen en verder alle medewerkers van het ICW, waarmee ik prettig samengewerkt heb.

Huub Glas

Postadres: Postbus 35
6700 AA Wageningen

Tel.: 08370-19100

I N H O U D

	blz.
VOORWOORD	
1. INTRODUCTIE, OPZET DEELSTUDIE	1
1.1. Afvalproduktie	1
1.2. Verwerkingsmethoden voor vast afval	2
1.3. Gecontroleerd storten	2
1.4. Afdichtingslagen	3
1.5. Bentonietgrondlagen	4
1.6. Opzet deelstudie	5
2. BENTONIET	6
2.1. Ontstaanswijze, winning	6
2.2. Mineralogische opbouw	7
2.3. Diffuse dubbellen	8
2.4. Zwelvermogen	10
2.5. Bentonietsoorten	11
3. GROND	13
3.1. Opbouw	13
3.2. Dichtheid, porositeit	14
3.3. Grond-, korrel- en waterspanningen	15
4. GRONDWATERSTROMING, WET VAN DARCY	17
4.1. Afleiding van de wet van Darcy	17
4.2. De doorlatendheid	19
4.3. Onverzadigde waterstroming	20
4.4. Turbulente waterstroming	21
4.5. Pre-laminaire waterstroming	22

	blz.
5. DE WET VAN DARCY BIJ WATERSTROMING DOOR BENTONIET-GRONDMENGSELS	23
5.1. Inleiding	23
5.2. De theorie van Gödecke	24
5.3. Verband tussen doorlatendheid en gradiënt	29
5.4. Stromingsmodel van water door bentoniet-gron- mengsels	30
6. LITERATUURSTUDIE NAAR DE INVLOED VAN DIVERSE ONTWERP- VARIABLEN OP DE DOORLATENDHEID VAN BENTONIET-GROND	31
6.1. Inleiding	31
6.2. Relatie bentonietgehalte - doorlatendheid	32
6.3. Invloed van de grondsoort en de bentonietsoort	37
6.4. Invloed van de dichtheid	37
6.5. De invloed van percolaatwater uit stortplaatsen voor stedelijk afval op de doorlatendheid	38
6.6. De invloed van geconcentreerde organische vloe- stoffen op de doorlatendheid	39
6.7. Conclusies	42
7. GEGEVENS OVER DE MATERIALEN, DIE BIJ DE DOORLATEND- HEIDSMETINGEN GEBRUIKT ZIJN	42
7.1. Korrelverdeling van het zand	42
7.2. Proctorcurves van de zandsoorten	45
7.3. De doorlatendheid van de zandsoorten	46
7.4. De bentonietsoort	47
8. DE PROEFOPSTELLING VOOR DOORLATENDHEIDSMETINGEN OP BENTONIET-ZANDMONSTERS	48
8.1. Werkingsprincipe	48
8.2. Gegevens	49
8.3. Apparaatweerstand	50
8.4. Berekening doorlatendheid	51
8.5. Installatie van het monster	51
8.6. Kritische kanttekeningen	52

	blz.
9. METINGEN OP BENTONIET-ZANDMONSTERS	53
9.1. Doorlatendheid van bentoniet-zandmonsters	53
9.2. De praktijkproef in Rosmalen	57
9.3. De kolomproef	58
9.4. Viscositeit van water-bentonietmengsels	60
10. HET METEN VAN DOORLATENDHEDEN	62
10.1. Inleiding	62
10.2. Laboratoriumproeven	63
10.3. Proefopstellingen	65
10.4. Voorstel voor een 'nieuwe' proefopstelling	70
11. CONCLUSIES	72
LITERATUUR	79
SYMBOLENLIJST	82
BIJLAGE	83

1. INTRODUCTIE, OPZET DEELSTUDIE

Dit hoofdstuk laat in vogelvlucht de problematiek van afvalstortterreinen zien. Hierop wordt dieper ingegaan in de voorstudie van dit afstudeerproject. Opgelegde beperkingen en keuzes worden (kort) beargumenteerd, waarbij alternatieve keuzes worden aangegeven. Tenslotte wordt aangegeven welke werkzaamheden in het kader van deze deelstudie worden verricht en wat ermee beoogd wordt.

1.1. Afvalproductie

In de welvarende en sterk geïndustrialiseerde landen wordt een enorme hoeveelheid afval geproduceerd. De afvalproductie per inwoner is erg hoog, zodat in dicht bevolkte gebieden de afvaldruk per oppervlakte-eenheid zeer groot is. In het westen van Nederland varieert de afvaldruk tussen 1000 en 1300 ton per jaar per km². In de minder dicht bevolkte gebieden in het noorden is dat zo'n 200 ton per jaar per km² (gegevens 1980).

Er is een zeer divers aanbod van afvalstoffen, zoals in tabel 1 kan worden gezien. Hierin zijn enkele afvalstoffencategorieën aangegeven en de hoeveelheden die in Nederland geproduceerd worden.

Tabel 1. Afvalstoffencategorieën (x 1000 ton, 1980), literatuur (1))

huisvuil	4 100	290 kg/inw.jaar
grof vuil	550	40
markt- en veegvuil	900	64
bedrijfs- en industrie-afval	4 000	280
agrarisches afval	1 000	70
ziekenhuisafval	150	11
bouw- en sloopafval	6 100	435
slib van rioolwaterzuiveringen	5 200	370
autowrakken	500	35
chemische afvalstoffen	1 500	105
afvalgips	2 000	140
baggerspecie	28 000	2000

1.2. Verwerkingsmethoden voor vast afval

Er zijn verschillende "verwerkingsmethoden" om van afval af te komen. Op de eerste plaats kan het afvalprodukt opnieuw gebruikt worden voor een andere functie, of eventueel ook voor dezelfde functie, wanneer het produkt hiervoor nog geschikt is (bijvoorbeeld een bankstel, aan de straat gezet, dat op een studentenverdieping terecht komt). Een andere methode om het afvalprodukt opnieuw te gebruiken is recycling. Dit gebeurt bijvoorbeeld met oud papier, glas, blik, etc.

Een derde methode, die genoemd kan worden is compostering. Onder invloed van biochemische processen wordt het organische afval afgebroken tot een neutrale stof, die uitstekend geschikt is voor bodemverbetering. Een veelgebruikte methode in stedelijke gebieden is afvalverbranding. Hierdoor wordt het afval zeer sterk in volume gereduceerd en door de hoge temperaturen gesteriliseerd.

Een vanouds zeer bekende methode is het storten van afval. Ongecontroleerd storten wil zeggen, dat het afval in het milieu wordt achtergelaten, zonder maatregelen te nemen om nadeling effecten te beheersen. Dit is dan ook een zeer slechte verwerkingsmethode, die in het verleden echter veelvuldig is toegepast, omdat men (onterecht) te veel vertrouwd was op het zelfreinigingsvermogen van de grond.

1.3. Gecontroleerd storten

In deze deelstudie zal ik me beperken tot het gecontroleerd storten van afval op afvalstortterreinen. Een belangrijke zaak, die beheerst moet worden is de grond- en oppervlaktewaterverontreiniging. Daartoe dient het afval geïsoleerd te worden van de omgeving. Het water, dat in contact is gekomen met het afval, mag zich immers niet verspreiden.

Bij de locatiekeuze van afvalstortterreinen kan reeds rekening worden gehouden met omstandigheden, die de gevaren van onder andere oppervlakte- en grondwaterverontreiniging beperken. Dit zijn bijvoorbeeld de afstand tot dichtbevolkte wooncentra en waterwingebieden en de geohydrologische situatie.

De locatiekeuze van afvalstortterreinen zal in de deelstudie echter niet aan de orde komen. Wel wil ik in het kort schetsen wat de gevolgen van de geohydrologische situatie op het ontwerp van de stortplaats zijn.

Wanneer direct onder de stortplaats een slecht waterdoorlatende laag aanwezig is, zoals klei of leem, dan kan het verontreinigde water niet of slechts ten dele indringen in de bodem. Het vervuilde water zal opgevangen en gezuiverd moeten worden.

Als geen afdekkend pakket aanwezig is boven de diepere watervoerende lagen dan zullen extra voorzieningen getroffen moeten worden om verspreiding van verontreinigingen via het grondwater te voorkomen. Bij dunne watervoerende pakketten waarbij de waterdoorlatende basis op niet te grote diepte (15-20 m) voorkomt kunnen rond het terrein verticale ondoorlatende schermen worden gemaakt tot in de ondoorlatende laag. Wanneer de grondwaterstand binnen het scherm permanent lager wordt gehouden dan in de omgeving kan geen lekkage naar buiten optreden.

Als een ondoorlatende laag op grotere diepte ligt, of wanneer de verticale schermen te hoge kosten met zich meebrengen, kan een horizontale onderafdichtingslaag aangelegd worden na ontgraving en voordat het afval wordt gestort. Een nadeel hiervan is, dat bij lekkage hiervan reparatie erg moeilijk kan plaatsvinden.

De voorgaande maatregelen waren er op gericht om het contact tussen vervuild water en omgeving te vermijden. Wanneer over het afval een bovenafdichting wordt aangebracht, wordt vermeden dat neerslagwater in het afval dringt. Hierdoor wordt de hoeveelheid vervuild en te zuiveren water fors verminderd.

1.4. A f d i c h t i n g s l a g e n

Ondoorlatende lagen kunnen worden gemaakt van verschillende materialen. De meest gangbare zijn kunststoffolies en bitumenmembranen. Deze folies zijn "technisch" waterdicht, maar met name de lassen en eventueel optredende scheurvorming door ongelijke zettingen kunnen problemen geven.

Er worden ook afdichtingslagen gemaakt van grondsoorten, zoals klei of leem. Deze materialen zijn niet ondoorlatend, maar hebben dusdanig lage doorlatendheden (10^{-8} tot 10^{-9} m/s), dat tenminste een groot deel van het water wordt tegengehouden en afgevoerd kan worden.

Toch is de doorlatendheid van klei- en leemafdichtingen vaak te hoog. Met mengsels van bentoniet en grond (zelfs goed doorlatende) kunnen dichtingslagen met zeer lage doorlatendheden worden bereikt (lager dan 10^{-9} m/s).

De afvalsoort en de gekozen locatie zijn van groot belang voor de te stellen eisen, in verband met de mogelijke gevaren voor mens en milieu. Aan de andere kant beïnvloeden de afvalsoort en de gekozen locatie bijvoorbeeld ook de chemische aantasting en het zettingsgedrag. Ook de toepassing als boven- en/of als onderafdichting is hierop van grote invloed. Bij een afdichting aan de bovenzijde zullen grotere zettingen verwacht kunnen worden (inklinken van het afval), maar zal de chemische aantasting van de afdichtingslaag minder zijn (neerslagwater i.p.v. vervuild percolatiewater).

1.5. B e n t o n i e t g r o n d l a g e n

Deze deelstudie beperkt zich tot het gebruik van bentonietgrondlagen als "horizontale" afdichtingslaag voor stortplaatsen. Dit betekent overigens niet, dat deze lagen niet onder een helling (bv. 1:3) gelegd zouden kunnen worden.

Bentonietgrondlagen lijken goed toegepast te kunnen worden als bovenafdichting, omdat het verwachte gedrag onder zettingen vanwege het plastisch gedrag van de bentoniet gunstig is. Omdat nog weinig bekend is over de bestendigheid tegen diverse chemische stoffen en vervuilingen in het water, dient toepassing als onderafdichting zeer kritisch beschouwd te worden.

De kosten van een bentonietgrondlaag zijn zeer sterk afhankelijk van het bentonietgehalte, omdat de prijs van bentoniet (f 250,- tot f 450,- per ton) erg hoog is. De gangbare bentonietgehalten variëren van 5 tot 10 gew.% bij een laagdikte van 10 tot 20 cm. In de Bondsrepubliek Duitsland wordt wel met lagere gehalten gewerkt, maar dan in dikkere lagen (30-60 cm). De kosten van bentonietgrondlagen variëren van f 10,- tot f 20,-/m². De kosten van kunststof- en bitumenfolies liggen in dezelfde orde van grootte.

(In hoofdstuk 2 zal worden ingegaan op de eigenschappen van bentoniet.)

1.6. O p z e t d e e l s t u d i e

Om in de toekomst te kunnen komen tot het op ruimere schaal toepassen van bentonietgrondlagen, zal meer onderzoek naar de eigenschappen van deze lagen nodig zijn. Er is nog niet veel bekend over het vervormingsgedrag en de invloed van diverse (chemische) stoffen op de doorlatendheid. Ook omtrent de invloed van diverse ontwerpvariabelen, zoals de zand- en bentonietsoort, het bentonietgehalte, de laagdikte en de verdichting, op de doorlatendheid bestaat nog veel onduidelijkheid.

In deze deelstudie wordt geprobeerd iets meer duidelijkheid te scheppen omtrent de invloed van de ontwerpvariabelen op de doorlatendheid. Het onderzoek pretendeert niet een afdoende antwoord te geven op alle vragen, die er leven ten aanzien van het aanleggen van bentonietgrondlagen.

In het laboratorium van het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding in Wageningen, zijn daartoe doorlatendheidsmetingen verricht op bentonietzandmonsters van verschillende samenstelling. Er is gebruik gemaakt van een ter plaatse aanwezige proefopstelling, die op een aantal punten aangepast is, zie hiervoor hoofdstuk 8. De gebruikte monsters hadden een oppervlak van circa 44 cm^2 en waren gemiddeld 12 mm dik. De hydraulische gradiënt varieerde van 55 tot 80 m/m, omdat de monsterdikte variabel was. Het stijghoogteverval bedroeg constant 95 cm. Er is gebruik gemaakt van vier zandsoorten en twee bentonietsoorten, die in hoofdstuk 7 worden beschreven. De doorlatendheid is bepaald voor monsters met de volgende bentonietgehalten: 1,0-2,5-5,0-7,5 gew.%. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in hoofdstuk 9. Uit deze metingen wordt de invloed van de zand- en bentonietsoort en het bentonietgehalte duidelijk.

Naast de laboratoriumwerkzaamheden is een literatuurstudie verricht naar de eigenschappen van bentoniet en grond en het stromingsgedrag van water door de poriën van bentonietgrondmengsels. Hierbij worden kritische kanttekeningen geplaatst bij de toepassing van de wet van Darcy voor waterstroming door slecht doorlatende bentonietgrondmengsels.

Tevens zijn een aantal publikaties bestudeerd waarin melding wordt gemaakt van doorlatendheidsmetingen op bentonietgrondmengsels. Hierbij is met name gelet op de effecten die de eerder genoemde ontwerpvariabelen veroorzaken ten aanzien van de doorlatendheid.

De meting van doorlatendheden van bentonietgrondmengsels is een moeilijke zaak, omdat bij dergelijke lage doorlatendheden nauwelijks meetbare hoeveelheden water opgevangen kunnen worden. In samenwerking met twee andere onderzoekers is gezocht naar een proefopstelling, waarmee op een bevredigende wijze doorlatendheden van bentonietgrond gemeten kunnen worden.

2. BENTONIET

Uitgelegd wordt wat bentoniet is en waar het vandaan komt. Het waterbindende vermogen van de bentoniet wordt verklaard uit de kleimineralogie. In het kort wordt ingegaan op het verschijnsel van diffuse dubbellagen en wordt het zwelvermogen gedefinieerd, en wordt de hoofdingeling van bentonietsoorten naar zwelvermogen opgegeven.

2.1. O n t s t a a n s w i j z e , w i n n i n g

Bentoniet is een zacht vetachtig gesteente, dat hoofdzakelijk bestaat uit het kleimineraal montmorilloniet. De mineralogische opbouw van bentoniet wordt besproken in par. 2.2. Bentoniet ontstaat door afzetting van vulkanische as op ondiepe vochtige plaatsen. De meeste bentoniet is gevormd tijdens het Krijt en het Tertiair. Door inwerking van water op de vulkanische as worden waterhoudende silika en alumina gevormd van kolloïdale ($< 2 \mu\text{m}$) afmetingen, die vervolgens uitkristalliseren.

De afzettingen kunnen in dikte variëren van 10 cm tot zo'n twee meter. De meeste vindplaatsen worden aangetroffen in de Verenigde Staten en Canada, maar ook in Mexico, China, Japan, Zuid-Afrika en Europa. In Nederland wordt geen bentoniet gevonden.

Kwalitatief hoog gewaardeerde bentoniet wordt gewonnen in Wyoming (USA). De bentoniet wordt afgegraven met behulp van bulldozers in open groeves en vervolgens gedroogd en gemalen. Bentoniet kan geleverd worden in poedervorm, maar ook in korrels.

Een zeer bekende toepassing van bentoniet is die als steunvloeistof in boorgaten, en diepwanden. De bentoniet wordt toegevoegd aan water waardoor een slurrie ontstaat, die voorkomt dat het gemaakte gat instort. Er zijn ook toepassingen bekend in bentoniet-cement wanden, die gebruikt worden als dichtingswand rond stortplaatsen.

2.2. Mineralogische opbouw

Zoals hiervoor al gesteld is bestaat bentoniet hoofdzakelijk uit het kleimineraal montmorrilloniet. Dit is een 2:1 kleimineraal, wat wil zeggen dat het opgebouwd is uit plaatjes van twee zeshoekige tetraëderringen. Tussen deze tetraëderring bevindt zich een oktaëderlaag, zie figuur 2.1.

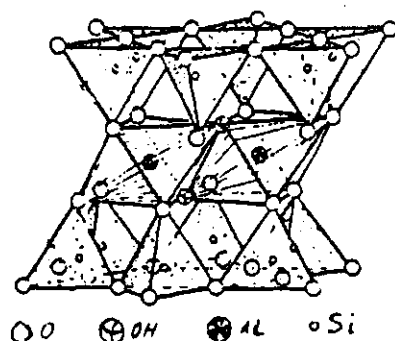


Fig. 2.1. Structuur montmorrilloniet

De tetraëderlaag bestaat uit Silicium (Si) atomen, die omringt zijn door zuurstof (O) atomen. De oktaëderlaag is opgebouwd uit aluminium (Al) atomen, die met hydroxyl (OH^-) groepen zijn verbonden.

Een typische eigenschap van kleimineralen is, dat ze een permanent negatieve elektrische lading hebben. Dat is te danken aan de volgende twee verschijnselen:

- isomorfe substitutie

Dit is het verschijnsel, dat tijdens de vorming van het kleimineraal een atoom in een kristalrooster vervangen kan worden door een ander atoom van vrijwel gelijke grootte, zonder dat verwringing van het kristalrooster optreedt. Zo kan Si^{4+} vervangen worden door Al^{3+} , en kan Al^{3+} vervangen worden door bijvoorbeeld Mg^{2+} of Fe^{2+} . Door deze substituties ontstaat een tekort aan positieve lading in het mineraal.

- dissociatie

Dit is het verschijnsel, dat de OH^- groepen aan de einden van het kleimineraalplaatje een H^+ -ion afstaan onder invloed van de H^+ -concentratie (pH) van het medium, waarmee ze in contact gekomen zijn. Dissociatie is voor 2:1 mineralen, zoals montmorrilloniet van ondergeschikt belang.

Om chemische neutraliteit te verkrijgen, trekt het negatief geladen kleimineraal positief geladen kationen aan. Afhankelijk van het milieu waarin het mineraal gevormd is of waarmee het in contact gebracht is kunnen Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ of K^+ geadsorbeerd worden.

2.3. D i f f u s e d u b b e l l a g e n

Wanneer de montmorrilloniet mineralen in contact komen met water, hebben de kationen de neiging uit te zwermen in de waterfase. Dit betekent, dat de kationen zich zodanig in de vloeistof willen verspreiden, dat de ionenconcentratie overal gelijk wordt (diffusie als gevolg van concentratieverschillen).

Vanwege de positieve lading van de kationen worden deze aangetrokken door het negatief geladen kleimineraal.

Uiteindelijk ontstaat een evenwicht tussen deze "krachten". De concentratie aan kationen in het water neemt in deze toestand geleidelijk af met toenemende afstand tot het mineraaloppervlak (zie figuur 2.2).

De afstand van het mineraaloppervlak tot het punt, waar de kationenconcentratie constant is (c_0), wordt de "diffuse dubbellaag" genoemd. In figuur 2.2 is te zien dat de diffuse dubbellaag dunner wordt, naarmate:

- de waardigheid van de kationen toeneemt;
- de concentratie kationen in het water hoger is.

Watermoleculen (H_2O) zijn dipolen. Dit betekent dat aan de ene zijde van het watermolecule een resulterende positieve lading heerst en aan de andere zijde een negatieve. Daarom worden de watermoleculen aangetrokken tot het kleimineraal, en sterk vastgehouden door de aanwezigheid van de kationen, zie figuur 2.3.

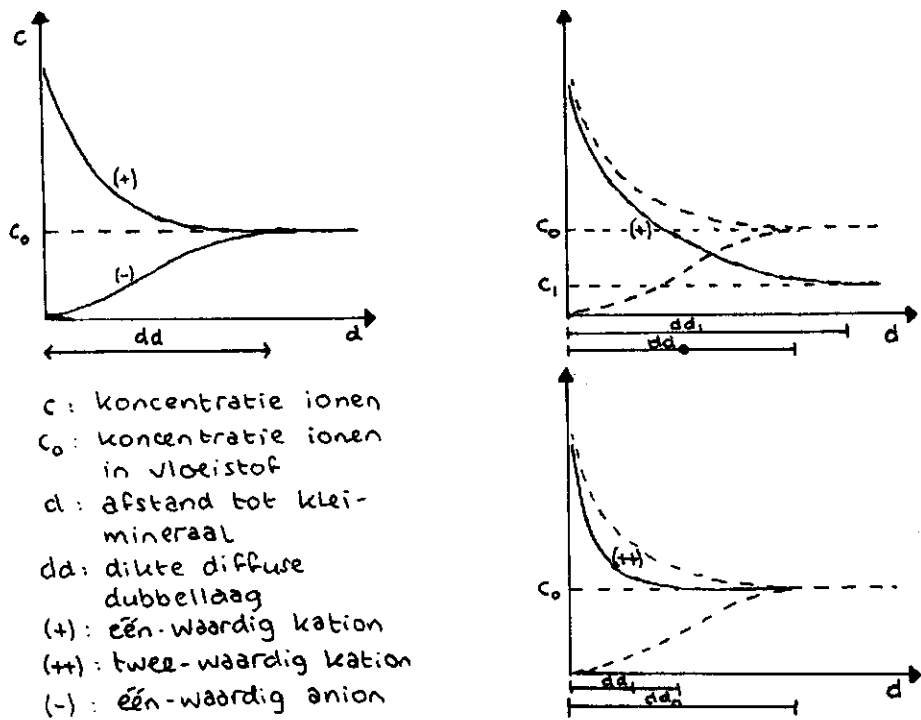


Fig. 2.2. Relatie tussen ionenconcentratie in de vloeistof en de afstand tot het kleimineraal

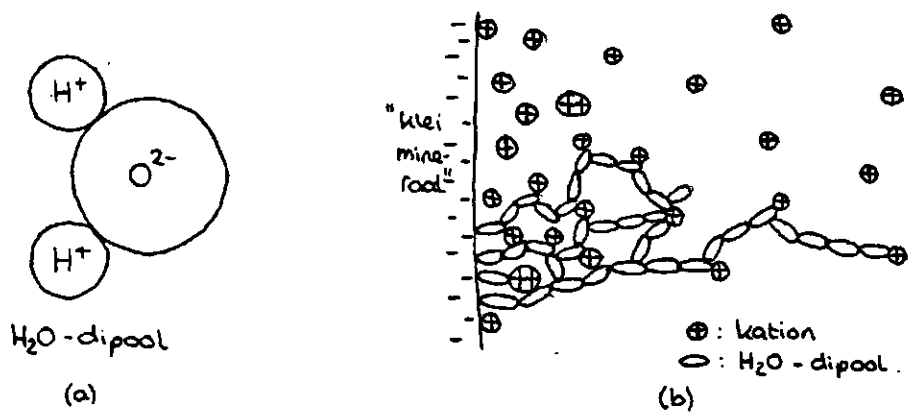


Fig. 2.3. Waterbinding aan kleimineraal

Het geschetste verloop van de kationconcentratie in figuur 2.2 kan worden beschreven met de Boltzmanvergelijking (2.1):

$$C = C_0 * \exp (-ze\psi/kT) \quad (2.1)$$

waarin: z = waardigheid van het ion
 e = de lading van een elektron
 ψ = de elektrische potentiaal
 kT = de kinematische energie van het ion

Dicht bij het kleimineraal is het water zo sterk gebonden, dat het opgevat kan worden als één geheel met het mineraal. Uit figuur 2.2 is duidelijk geworden, dat de kationconcentratie afneemt met de afstand tot het mineraaloppervlak. Dit geldt ook voor de mate waarin het water aan het mineraal wordt gebonden (bindingsspanning), omdat de kationconcentratie de bindingsspanning beïnvloedt.

2.4. Z w e l v e r m o g e n

Wanneer een kleimineraal water aan zich bindt, zegt men dat de klei zwelt. Naarmate de diffuse dubbellaag dikker is, wordt meer water gebonden aan het mineraal. Het zwelvermogen is dan groter. Het zwelvermogen is gedefinieerd als het volume water (cm^3) dat per gewichtseenheid (g) aan de klei wordt gebonden.

Uit deze definitie wordt duidelijk, dat de deeltjesgrootte van de mineralen van invloed is op het zwelvermogen. Wanneer de mineralen klein zijn is immers het totale oppervlak, waaraan water gebonden kan worden, per gewichtseenheid (specifiek oppervlak), groter. In tabel 2.1 wordt het specifiek oppervlak voor enkele klei mineralen opgegeven.

Tabel 2.1. Specifiek oppervlak (m^2/gram)

kaoliniet	1- 40
illiet	50-200
montmorrilloniet	400-800

Het zwelvermogen is dus groter naarmate:

- de waardigheid van de kationen afneemt;
- de concentratie ionen in oplossing afneemt;
- het specifiek oppervlak toeneemt.

2.5. B e n t o n i e t s o o r t e n

In de voorgaande drie paragrafen is gesproken over kleimineralen en montmorrilloniet in het algemeen. In deze paragraaf worden de specifieke eigenschappen van bentoniet besproken.

De montmorrillonietplaatjes, waaruit bentoniet hoofdzakelijk opgebouwd is, hebben een hoog specifiek oppervlak (zie tabel 2.1). Naar gelang de kationbezetting worden verschillende bentonietsoorten onderscheiden. De kationbezetting is afhankelijk van de vindplaats en de omstandigheden waaronder de bentoniet gevormd is.

In Wyoming (USA) wordt natuurlijke bentoniet gewonnen met een zeer hoog zwelvermogen (zie tabel 2.2).

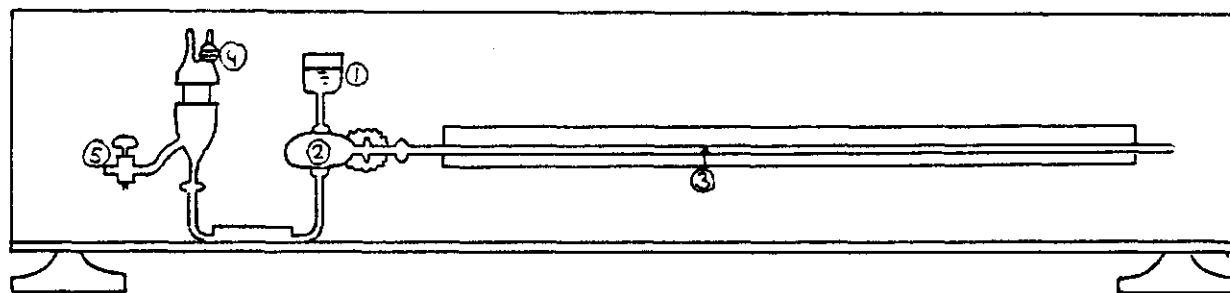
Deze Wyomingbentoniet is voornamelijk bezet met natrium (Na^+) als kation (38-50%). Daarnaast worden ook calcium (Ca^{2+} , 15-35%) en magnesium (Mg^{2+} , 10-30%) aangetroffen. Het hoge zwelvermogen van de bentoniet kan verklaard worden door de lage gemiddelde waardigheid van de kationen.

De bentoniet die in Europa wordt gewonnen heeft een hoger gehalte aan calcium (Ca^{2+}). Hierdoor is het zwelvermogen aanzienlijk lager (zie tabel 2.2). Het zwelvermogen kan echter verhoogd worden door deze Europese bentoniet intensief in contact te brengen met natriumhoudende stoffen (mengsel van natriumcarbonaat en magnesiumhydroxide). Door deze behandeling worden Ca^{2+} -ionen uitgewisseld voor Na^+ -ionen. De zo behandelde bentoniet wordt geactiveerde bentoniet genoemd.

Tabel 2.2. Zwelvermogen van bentonietsoorten (cm^3/g)

1. Wyomingbentoniet	9-12
2. geactiveerde bentoniet	6- 9
3. Europese bentoniet	2- 4
4. kaoliet klei	1
5. steenmeel	0,5

Het zwellermogen van bentoniet wordt bepaald met de zogenaamde Enslin-test, zie figuur 2.4. In de maatbuis wordt water gedaan. Dit water wordt in contact gebracht met 0,2 gram droge poedervormige bentoniet, dat op de filter is aangebracht. De bentoniet kan nu het water aan zich binden. In de maatbuis kan de hoeveelheid gebonden water worden afgelezen als functie van de tijd, zie figuur 2.5.



- | | |
|------------------|----------------|
| 1 : reservoir | 3 : meetpijp |
| 2 : driewegkraan | 4 : glasfilter |
| | 5 : kraan |

Fig. 2.4. Overzicht Enslin-test apparaat

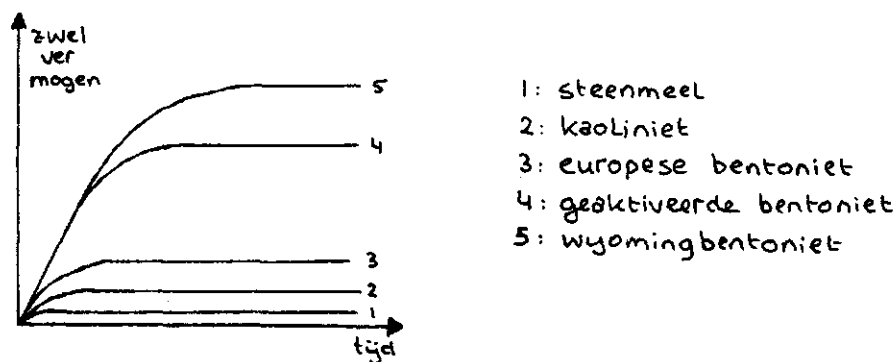


Fig. 2.5. Toename zwellermogen in de tijd voor diverse soorten

3. GROND

In het kort worden enkele begrippen uit de grondmechanica, zoals porositeit, dichtheid, vochtgehalte, korrel- en waterspanningen uitgelegd. Tevens wordt aangegeven hoe de grondsoorten gekarakteriseerd kunnen worden naar korrelgrootteverdeling en wordt aangegeven wat de proctorproef is.

3.1. O p b o u w

Onder grond wordt hier verstaan "Alle op aarde voorkomende, niet gecementeerde, verweerde materialen, die van natuurlijke, gesteenteachtige afkomst zijn".

Naast, uit mineralen opgebouwde korrels wordt in grond ook organische stof, lucht en water aangetroffen. De grond kan worden gekarakteriseerd naar vindplaats, ontstaanswijze, mineralogische samenstelling en korrelgrootteverdeling. Voor dit onderzoek is de korrelgrootteverdeling de belangrijkste karakterisering. Dit is de procentuele verdeling in korrelgroottefracties van een als representatief te beschouwen grondmonster.

Bij de korrelgrootteverdeling van grondsoorten worden de volgende fracties onderscheiden (zie tabel 3.1).

Tabel 3.1. Korrelgroottegrenzen van de fracties

fractie	d_{\min}	d_{\max}	fractie	d_{\min}	d_{\max}
lutum	-	2	middelzand	180	500
silt	2	63	grof zand	500	2000
fijn zand	63	180	grind	2000	6300

d_{\min} , d_{\max} : minimale respectievelijk maximale korrelgrootte (μm)

In de korrelstapeling blijft holle ruimte over, die bij droge grond gevuld is met lucht. Deze holle ruimten worden porieën genoemd.

3.2. D i c h t h e i d , p o r o s i t e i t

Wanneer in een grondvolume (V_g) het porieënvolume (V_p) bedraagt, dan wordt het quotiënt van V_p en V_g de porositeit (n) genoemd. De droge dichtheid (ρ_d) van grond wordt als volgt berekend, (formule 3.1):

$$\rho_d = \frac{(V_g - V_p)}{V_g} * \rho_m = (1-n) * \rho_m \quad (3.1)$$

waarin: ρ_m = soortelijke massa van de minerale fractie. Hiervoor mag in het algemeen een waarde van $2,65 \text{ g/cm}^3$ aangehouden worden

Als water in contact komt met de grond, dan wordt de lucht uit de porieën geleidelijk verdreven door het water. Het watergehalte (w) van grond wordt gedefinieerd als het quotiënt van het watergewicht (G_w) en het droge gewicht (G_d) in de grond (formule 3.2):

$$w = \frac{G_w}{G_d} = \frac{G_w}{g * \rho_d * V_g} \quad (3.2)$$

De natte dichtheid van grond wordt berekend volgens formule (3.3):

$$\rho_n = (1+w) * \rho_d = \frac{G_d + G_w}{g * V_g} \quad (3.3)$$

Wanneer de droge dichtheid wordt verhoogd (d.i. meer korrelmassa in eenzelfde volume grond), zegt men dat de grond wordt verdicht. Bij verdichting wordt het porieënvolume, en dus de porositeit, kleiner).

De dichtheid kan worden vergroot door de korrels in beweging te brengen (middels schudden, trillen of stampen), zodat de kleinere korrels zich tussen de grotere korrels kunnen voegen. Bij een bepaald vochtgehalte (w_{opt}) wordt de maximale "droge dichtheid" bereikt. Dankzij het water in de grond kunnen de korrels gemakkelijker langs elkaar schuiven. Bij een te hoog watergehalte bouwt het water juist weerstand op tegen verschuiven (soort drijfzand), zodat de droge dichtheid weer afneemt. De "droge dichtheid" van een grondmonster wordt bepaald door het vochtige monster te drogen in een oven bij 105°C en vervolgens het gedroogde monster te wegen. Wanneer nu het vochtige gewicht en volume bekend is, kunnen de droge dichtheid en het watergehalte worden berekend.

Het optimaal vochtgehalte (w_{opt}) en de bijbehorende maximale droge dichtheid (ρ_{dmax}) kunnen worden bepaald met de proctorproef (zie fig. 3.1). Dit is een gestandaardiseerde proef, waarbij een grondmonster in een cilindervormige kolom wordt verdicht. Het grondwater wordt verschillende malen verdicht, waarbij iedere keer het watergehalte verhoogd wordt. De verdichting wordt gerealiseerd met een valgewicht (2.5 kg) dat over een hoogte van 30,5 cm vijftwintig keer op het monster valt.

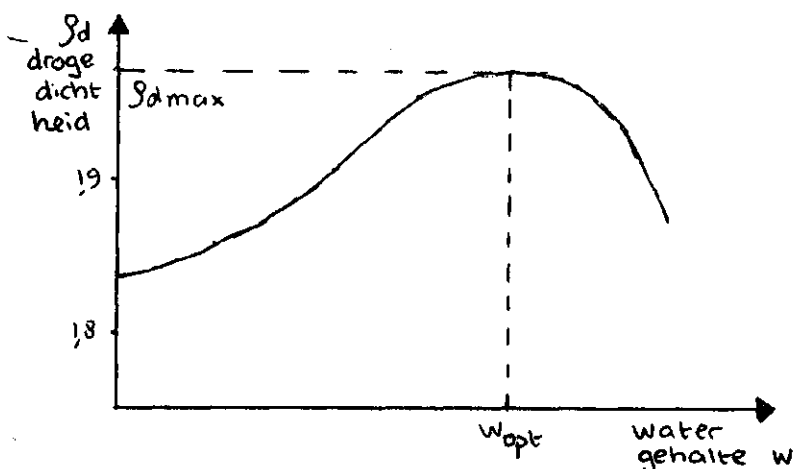


Fig. 3.1. Voorbeeld proctorcurve

3.3. Grond-, korrel- en waterspanningen

De grondkorrels rangschikken zich, na verdichting in een skelet, waarin alle korrels tegen elkaar aan liggen (zie figuur 3.2).

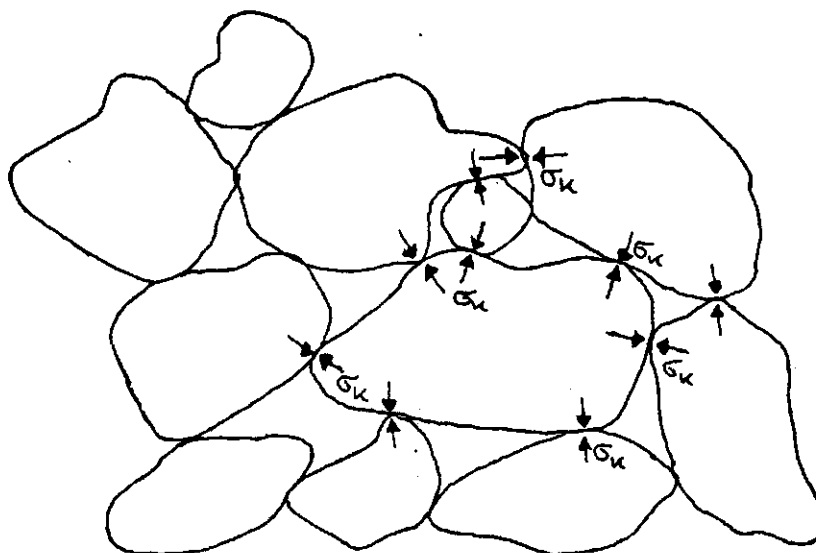


Fig. 3.2. Korrelskelet en contactspanningen

Via de contactpunten kunnen de korrels krachten op elkaar overdragen. Betrokken op het totale oppervlak van een horizontale doorsnede worden ze korrelspanningen (σ_k) genoemd.

Het gewicht van de grond en van een (eventuele) bovenbelasting, wordt zowel door de korrels als door het aanwezige water opgenomen door respectievelijk korrelspanningen (σ_k) en waterspanningen (σ_w).

Het gewicht van de grond en de bovenbelasting, per oppervlakte-eenheid, wordt grondspanning (σ_g) genoemd. Er geldt nu:

$$\sigma_g = \sigma_k + \sigma_w \quad (3.4)$$

Wanneer er geen verticale waterstroming optreedt, dan kunnen de waterspanningen worden berekend volgens formule (3.5):

$$\sigma_w = \gamma_w * h \quad (3.5)$$

waarin: γ_w = volumegewicht van water (10 kn/m^3)

h = waterdiepte, gerekend vanaf de grondwaterstand

De korrelspanningen (σ_k) geven de gemiddelde contactspanningen tussen de korrels weer. Ze kunnen worden berekend uit formule (3.4).

In figuur 3.3 is het verloop van grond- korrel- en waterspanningen met de diepte gegeven.

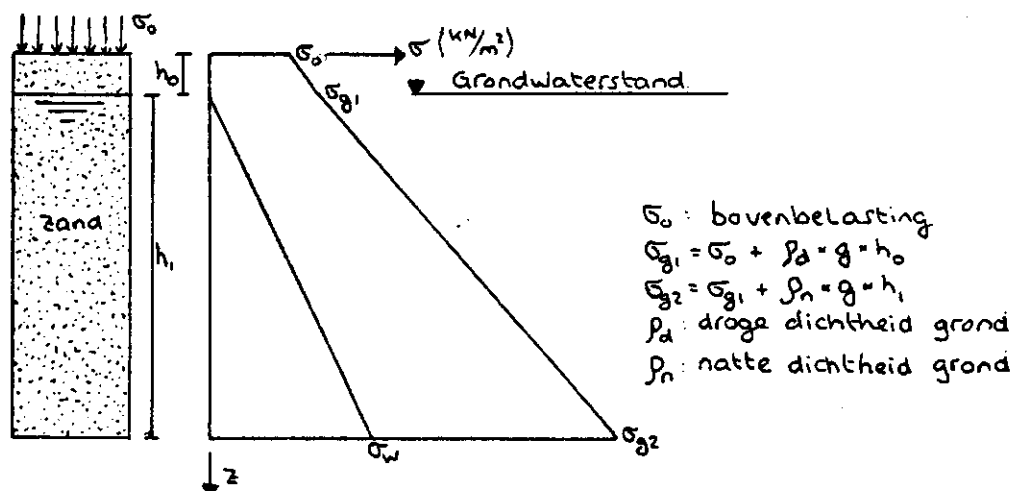


Fig. 3.3. Verloop grond-, water- en korrelspanningen in de grond uitgezet tegen de diepte

4. GRONDWATERSTROMING, WET VAN DARCY

In dit hoofdstuk wordt de theorie van grondwaterstroming behandeld. Na een afleiding van de wet van Darcy en de definiëring van het begrip doorlatendheid, wordt aangegeven onder welke voorwaarden de lineaire wet van Darcy geldt. Ingegaan wordt op onverzadigde stroming en het bekende gebied van turbulente grondwaterstroming. Het voor bentoniet-grondmengsels van belang zijnde prelaminare gebied van grondwaterstroming wordt in dit hoofdstuk geïntroduceerd.

4.1. Afleiding van de wet van Darcy

Om het water, dat zich in de poriën van de grond bevindt, in beweging te zetten is een kracht op het water nodig, die het water in de richting van de kracht laat stroming.

Op het poriënwater werken de volgende krachten, in de richting r :

- de zwaartekracht $G = -\gamma_w * \Delta r * \Delta A * \frac{\delta z}{\delta r}$
- de drukkracht $P = p * \Delta A - (p + \frac{\delta p}{\delta r} \Delta r) * \Delta A$
- een capillaire kracht $P_k = p_k * \Delta A - (p_k + \frac{\delta p_k}{\delta r} \Delta r) \Delta A$
- een laminaire wrijvingskracht $w = -G * \mu * v * \Delta r * \Delta A$

waarin: p = poriewaterspanning (N/m^2)

p_k = capillaire zuigspanning (N/m^2)

ΔA = oppervlak loodrecht op stroomrichting (zie fig. 4.1)

V_r = filtersnelheid in de stroomrichting (m/s)

γ_w = volumedichtheid van water (10 kN/m^3)

$\mu = \rho * \eta$ = dynamische viscositeit (Ns/m^2)

η = kinematische viscositeit (m^2/s)

G = proportionaliteitsconstante (m^{-2})

Een en ander is verduidelijkt in figuur 4.1.

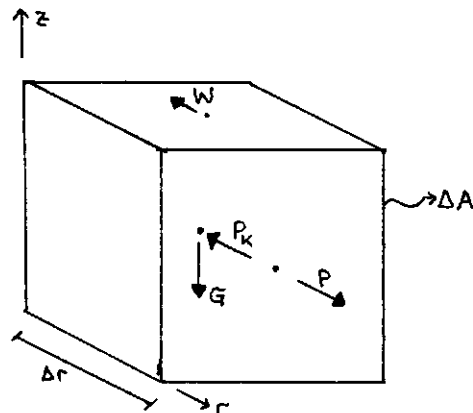


Fig. 4.1. Overzicht krachten op een volume-eenheid water in een porie

In de stationaire toestand is de som van deze vier krachten nul.
Hieruit volgt:

$$\frac{\delta p}{\delta r} + \gamma_w \frac{\delta z}{\delta r} - \frac{\delta p_k}{\delta r} + C \mu v_r = 0 \quad (4.1)$$

met:

$$k = \frac{g}{\eta} * k^* = \frac{\rho * g}{\mu * C} \quad (4.2)$$

en

$$\psi^* = (z - z_0) + \int_0^p \frac{\delta p}{\gamma_w} - \int_0^{p+p_k} \frac{\delta p_k}{\gamma_w} \quad (4.3)$$

volgt de bekende wet van Darcy

$$v_r = -k * \frac{\delta p}{\delta r} \quad (4.4)$$

De volgende symbolen zijn hierin gebruikt:

k = doorlatendheid (m/s)

k^* = intrinsieke doorlatendheid ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

g = versnelling van de zwaartekracht $10 \text{ m}/\text{s}^2$

ρ = dichtheid van water $1 \text{ kg}/\text{m}^3$

ψ^* = stijghoogte (m) ten opzichte van het referentieniveau z_0

$z - z_0$ = plaatshoogte (m)

z_0 = referentieniveau (m)

De formule voor de stijghoogte kan voor verzadigde porie-waterstroming ook als volgt worden geschreven

$$\psi^* = (z - z_0) + \frac{P}{\rho g} \quad (4.5)$$

De afname van de stijghoogte (ψ) per lengte-eenheid in de stromingsrichting (r) wordt de hydraulische gradiënt (i) genoemd. De stromingswet van Darcy kan nu worden geschreven als:

$$v_r = k * i \quad (4.6)$$

De belangrijkste definities zijn ook aangegeven in fig. 4.2.

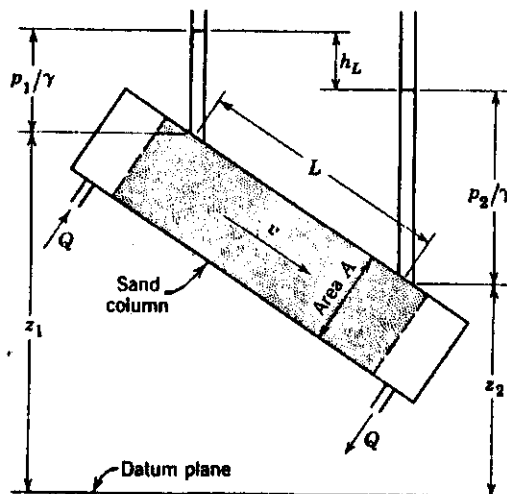


Fig. 4.2. Pressure distribution and head loss in flow through a sand column. (Todd, 1982)

Fig. 4.2. Overzicht gedefinieerde begrippen

4.2. De doorlatendheid

Uit formule (4.6) is te zien, dat de filtersnelheid gelijk is aan het produkt van de doorlatendheid en de hydraulische gradiënt. De hydraulische gradiënt is het gevolg van externe grootheden, zoals de druk- en plaatshoogte en de stromingsafstand. De doorlatendheid is een eigenschap, die afhankelijk is van de vloeistof (middels de dichtheid en de viscositeit) en van de grondsoort en de toestand waarin deze verkeert (middels de intrinsieke doorlatendheid).

Voor de intrinsieke doorlatendheid ' k^* ' worden in de literatuur formules opgegeven van het volgende type

$$k^* = M * \frac{n^3}{(1-n)^2 * U} \quad (4.7)$$

waarin:

M = constante

n = porositeit (zie hfd. 3)

U = specifiek oppervlak (m^2/kg)

De doorlatendheid 'k' is aan de intrinsieke doorlatendheid 'k*' gerelateerd volgens formule (4.2)

$$k = \frac{g}{\eta} * k^* \quad \text{of} \quad k = \frac{\gamma_w}{\mu} * k^* \quad (4.2)$$

Deze formules hebben slechts een beperkte geldigheid, omdat ze uitgaan van een lineaire relatie tussen de gradient en de filtersnelheid. Voorts heerst er veel onzekerheid omtrent de grootte van de constante 'M'. Hierdoor kunnen doorlatendheden, die met deze formules berekend zijn forse afwijkingen van praktisch gemeten doorlatendheden vertonen.

In dit verslag is de doorlatendheid gedefinieerd als het quotient van de filtersnelheid 'v' en de hydraulische gradient 'i'.

In het algemeen wordt gesteld, dat de doorlatendheid afhankelijk is van de vloeistof, de grondsoort en de temperatuur, de grootte van de filtersnelheid en de hydraulische gradient. De verhouding tussen filtersnelheid en hydraulische gradient blijft gelijk, onder de voorwaarden waaronder de wet van Darcy afgeleid is.

Deze voorwaarden zijn:

- volledig verzadigde grond, en
- laminaire waterstroming in de poriën.

4. O n v e r z a d i g d e w a t e r s t r o m i n g

Wanneer de grond niet volledig verzadigd is, kan toch waterstroming optreden in de poriën. De onverzadigde doorlatendheid 'k_o' is in dat geval kleiner dan de doorlatendheid van verzadigde grond 'k'.

Er zijn verschillende formules in gebruik

die een relatie leggen tussen de verzadigde en de onverzadigde doorlatendheid. Hiervan worden in formule (4.8) en (4.9) twee voorbeelden gegeven:

$$k_o(w) = \left(\frac{w}{n}\right)^2 * k \quad (4.8)$$

$$k_o(\psi) = k * \exp(-\alpha * \psi) \quad (4.9)$$

waarin:

w = watergehalte (%)

n = porositeit (%)

ψ = vocht(water)spanning (m)

α = constante, die van de grondsoort afhankelijk is (m^{-1})

De term vochtspanning wordt gebruikt voor negatieve waterspanningen (t.o.v. atmosferische druk). Tot $\psi = -10$ meter is dit fysisch voor te stellen als een zuigspanning. De potentiaal ("stijghoogte") in de onverzadigde zone is opgebouwd uit de sommatie van de plaatshoogte en de vochtspanning.

Iedere grondsoort kent een relatie tussen de vochtspanning ' ψ ' en het watergehalte 'w'. Deze bodemwaterkarakteristiek wordt pF-curve genoemd. De pF-waarde is gedefinieerd volgens formule (4.10).

$$pF = \log(\psi) \quad (\psi \text{ in cm}) \quad (4.10)$$

4.4. Turbulente waterstroming

Als in de verzadigde grond de stroomsnelheden in de poriën toenemen, kan turbulente waterstroming optreden in de poriën. In de afleiding van de stromingswet van Darcy mag nu niet meer gebruik gemaakt worden van de laminaire wrijvingskracht.

De turbulente wrijvingskracht is afhankelijk van het kwadraat uit de stroomsnelheid. De filtersnelheid 'v' is hierdoor niet meer lineair afhankelijk van de hydraulische gradiënt 'i' en de gemeten doorlatendheden zijn lager dan de doorlatendheden bij laminaire waterstroming.

Turbulentie zal optreden wanneer het getal van Reynolds ' N_R ' groter is dan één. De omslag van laminaire naar turbulente stroming gaat overigens niet sprongsgewijs. Er is sprake van een zekere overgangszone.

Het getal van Reynolds kan worden berekend uit formule (4.11).

$$N_R = \frac{\rho * v * D}{\mu} \quad (4.11)$$

waarin:

ρ = dichtheid van de vloeistof (water: 1000 kg/m^3)

D = equivalente diameter van de poriën (m)

μ = dynamische viscositeit (m^2/s)

(water: 10°C : $1,3 * 10^{-3}$; 20°C : $10 * 10^{-3}$)

v = filtersnelheid (m/s)

4.5. P r e - l a m i n a i r e w a t e r s t r o m i n g

Bij de afleiding van de wet van Darcy, zijn de electro-moleculaire krachten verwaarloosd. Dit zijn adhesiekrachten, die de vaste, minerale deeltjes in de grond op het water uitoefenen. De waterdipolen die zich dicht bij de vaste deeltjes bevinden, worden sterk aangetrokken. Op grotere afstand is de binding minder sterk. Het water verliest hierdoor zijn eigenschappen als Newtonse vloeistof, en vertoont meer de eigenschappen van een Binghamse vloeistof (zie fig. 4.3).

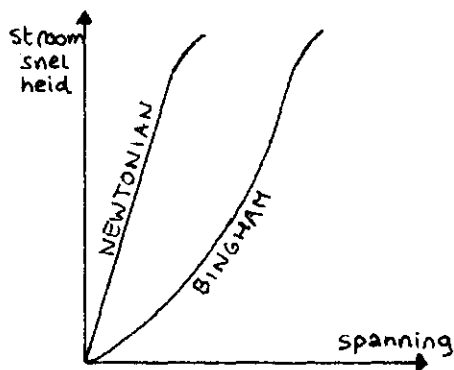


Fig. 4.3. Relatie waterspanning-stroomsnelheid voor Binghamse en Newtonse vloeistof

Wanneer electro-moleculaire krachten van invloed zijn op de waterstroming in de poriën, is er geen lineair verband tussen de filtersnelheid en de hydraulische gradiënt, zie fig. 4.4.

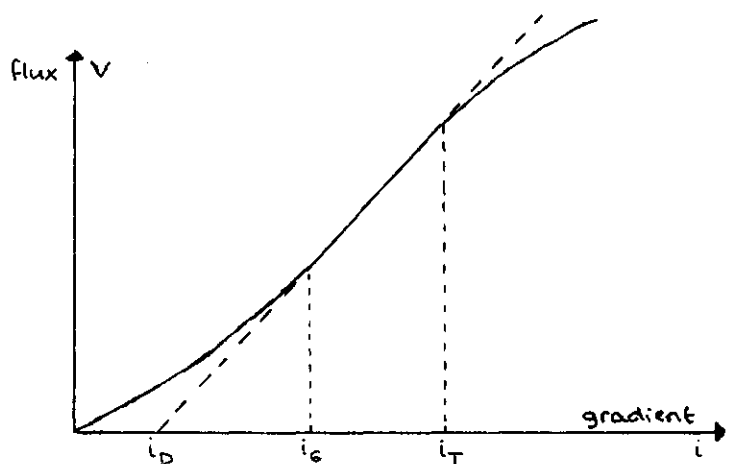


Fig. 4.4. Relatie stroomsnelheid-gradiënt voor fijnkorrelige grond

De gemeten doorlatendheid zal in dat geval kleiner zijn dan de doorlatendheid in het lineaire gebied, zie fig. 4.5. Electro-moleculaire krachten leiden tot een schijnbare verhoging van de viscositeit van de vloeistof (Binghamse vloeistof).

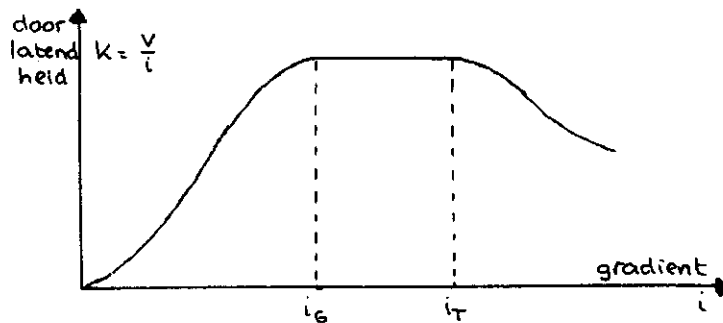


Fig. 4.5. Relatie doorlatendheid-gradiënt voor fijnkorrelige grond

5. DE WET VAN DARCY BIJ WATERSTROMING DOOR BENTONIET-GRONDMENGSELS

Het vijfde hoofdstuk geeft aan hoe de in het vorige hoofdstuk gepresenteerde algemene theorie van belang is voor de stroming van water door bentoniet-grondbmengsels. Daarbij is dankbaar gebruik gemaakt van de theoretische afleiding door Gödecke van een stromingswet voor fijnkorrelige materialen. Deze afleiding wordt hier gepresenteerd. De consequenties hiervan voor de invloed van de te beschouwen ontwerpvariabelen (dichtheid, bentoniet-gehalte, zand- en bentonietsoort) worden besproken.

5.1. I n l e i d i n g

In hoofdstuk 4 is gewezen op het effect van de electromoleculaire krachten op de relatie tussen doorlatendheid en hydraulische gradiënt in de Wet van Darcy. In hoofdstuk 2 is ingegaan op de aanwezigheid van diffuse dubbellen, rondom bentonietdeeltjes, wanneer deze in contact worden gebracht met water. Bentoniet oefent een grote aantrekkingskracht uit op het water. Wyomingbentoniet kan per gram zo'n 12 ml water aan zich binden.

Wanneer een stijghoogteverschil wordt aangelegd over een bentonietlaag, dan zal het water, dat zich in de poriën tussen de bentoniet-

deeltjes bevindt, willen stromen. Het poriewater wordt echter sterk gebonden aan de bentonietdeeltjes. Hierdoor neemt de viscositeit als het ware toe en krijgt het poriewater meer het karakter van een Binghamse vloeistof.

Op grond hiervan is een niet-lineaire relatie tussen de filtersnelheid (v) en de hydraulische gradient (i) te verwachten bij toename van de gradient. In dat geval mag niet van de veronderstelling uitgegaan worden, zoals in de Wet van Darcy, dat de doorlatendheid onafhankelijk van de hydraulische gradiënt is.

GÖDECKE (1980) heeft getracht een stromingswet af te leiden voor het gebied, waarin de electro-moleculaire krachten een rol van betekenis spelen bij de stroming van water door een poreus medium. Hij verwijst hierbij naar eerder onderzoek dat op dit gebied verricht is door MOSER (1977), HANSBO (1960), KEMPER (1964), KOVACS (1957) en KEZDI (1976), die allen wijzen op het niet-lineaire gedrag bij relatief lage gradiënten in kleiïge en siltige gronden.

GÖDECKE vindt in het gebied, waar de electro-moleculaire krachten niet verwaarloosd kunnen worden het volgende verband tussen filtersnelheid (v) en hydraulische gradiënt (i).

$$v = a_m * i^m \quad (5.1)$$

waarin:

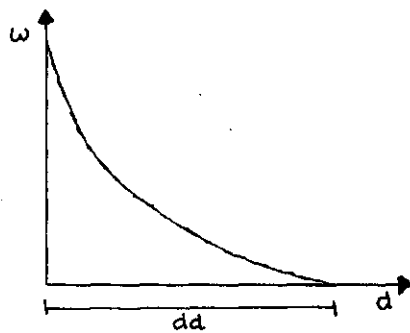
a_m en m = constanten

5.2. De theorie van GÖDECKE

Aan de hand van de door GÖDECKE (1980) ontwikkelde theorie, zal toegelicht worden hoe de aantrekkingskrachten, die het bentoniet uitoefent op het water, de doorlatendheid beïnvloeden.

Het verloop van de adhesiespanningen (w), waarmee de bentoniet water aantrekt, met de afstand tot het oppervlak van het bentonietmateriaal, wordt gelijk verondersteld aan het verloop van de kationconcentratie met de afstand tot het mineraaloppervlak (zie fig. 2.2).

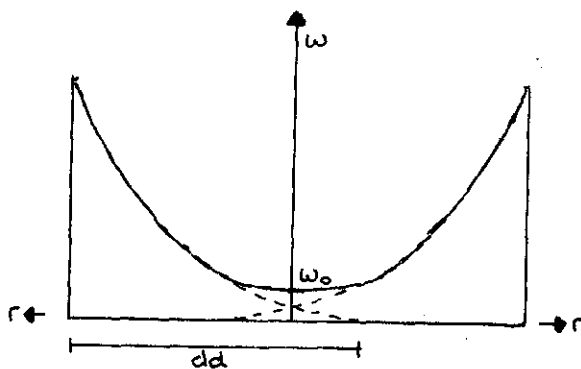
In fig. 5.1 is het verloop van de adhesiespanning met de afstand tot het kleimineraal getekend.



w = adhesiespanning
 d = afstand tot mineraaloppervlakte
 dd = dikte diffuse dubbellaag

Fig. 5.1. Afname adhesiespanning van het water aan het kleimineraal met toenemende afstand tot het mineraaloppervlak

Wanneer twee bentonietdeeltjes zó dicht bij elkaar gelegen zijn, dat de onderlinge afstand exact tweemaal de dikte van de diffuse dubbellaag is, dan is al het water tussen deze bentonietdeeltjes gebonden. Als de deeltjes nog dichter bij elkaar liggen, dan kan een minimale adhesiespanning (w_0) heersen (fig. 5.2).



w = adhesiespanning
 r = afstand vanaf middellijn porie
 dd = dikte diffuse dubbellaag
 w_0 = minimale adhesiespanning in poriedoorsnede

Fig. 5.2. Verloop adhesiespanning in een porie tussen twee bentonietdeeltjes

Aangenomen wordt, dat tussen de bentonietdeeltjes zich cirkelvormige poriën bevinden met straal $r = r_k$.

GÖDECKE stelt voor het verloop van de adhesiespanning (w) in de poriën vanaf het punt waar $w = w_0$ (d.i. in het centrum van de porie) tot het kleimineraaloppervlak ($r = r_k$) te beschrijven met de volgende formule:

$$w = w_0 + a_1 * r^n \quad (5.2)$$

De constanten 'a₁' en 'n' zijn afhankelijk van het bentoniettype. Hierover zijn helaas geen kwantitatieve gegevens beschikbaar.

Onder invloed van de hydraulische gradiënt treedt een schuifspanningsverloop in het water op volgens fig. 5.3, wanneer het water in de porie tussen de twee bentonietdeeltjes wil stromen.

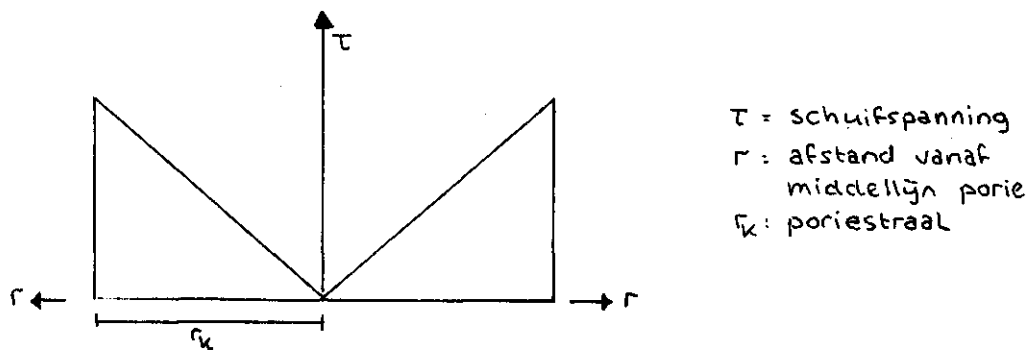


Fig. 5.3. Verloop schuifspanning in een porie tussen twee bentonietdeeltjes

Voor de schuifspanning geldt de volgende formule:

$$\tau = a_2 * r * i \quad (5.3)$$

Wellicht is een parabolisch verloop reëler. Voor deze afleiding wordt het lineaire verbond als een goede benadering beschouwd.

GÖDECKE gaat ervan uit, dat alleen dat gedeelte van het water beweegt, waar de schuifspanning groter is dan de adhesiespanning. Het punt waar de adhesiespanning gelijk is aan de schuifspanning wordt 'r_s' genoemd (zie fig. 5.4).

In fig. 5.4 is te zien, dat de schuifspanning op meer dan een plaats gelijk is aan de adhesiespanning. In het midden kan de schuifspanning lager zijn dan de adhesiespanning. Op grond daarvan zou gesteld kunnen worden, dat het water in het midden van de porie stil staat. Dit is fysisch niet voorstelbaar. Aangenomen moet worden, dat, wanneer er ergens in de doorsnede van de porie water beweegt, de deeltjes in het centrum van de porie niet meer een adhesiespanning ondervinden van

de bentonietdeeltjes en zich zullen verplaatsen onder invloed van de gradiënt.

Door gelijkstelling van de formules (5.3) en (5.2), kan de waarde van r_s worden berekend, zie formule (5.4).

$$a_o * i * r_s - r_s^n = w_1 \quad (5.4)$$

waarin:

$$a_o = \frac{a_2}{a_1} \quad \text{en} \quad w_1 = \frac{w_o}{a_1}$$

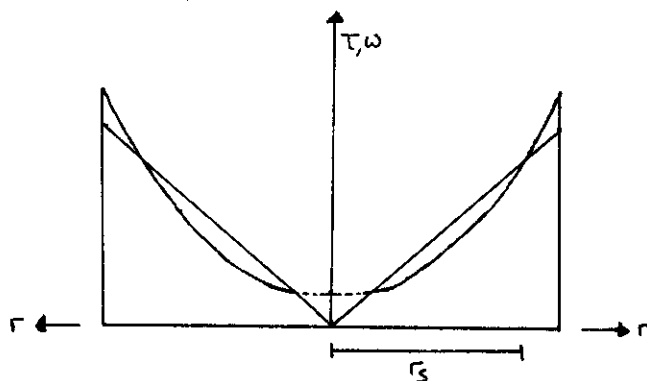
De waarde van r_s kan hieruit worden benaderd met behulp van formule (5.5).

$$r_s = \alpha * i^{1/n} \quad (r_s \leq r_k) \quad (5.5)$$

waarin:

$\alpha = \text{constante}$

De n-waarde is hoger naarmate de bentoniet meer water kan binden.



r_s : straal van het gebied, waarin water stroomt.

Fig. 5.4. Verloop adhesie- en schuifspanning in een porie. De adhesiespanning in het midden van de porie is verbroken

De snelheidsverdeling in een cirkelvormige porie wordt beschreven met formule (5.6), zie fig. 5.5.

$$v = \frac{i * \gamma_w}{2 * \eta} (r_k^2 - r^2) \quad (5.6)$$

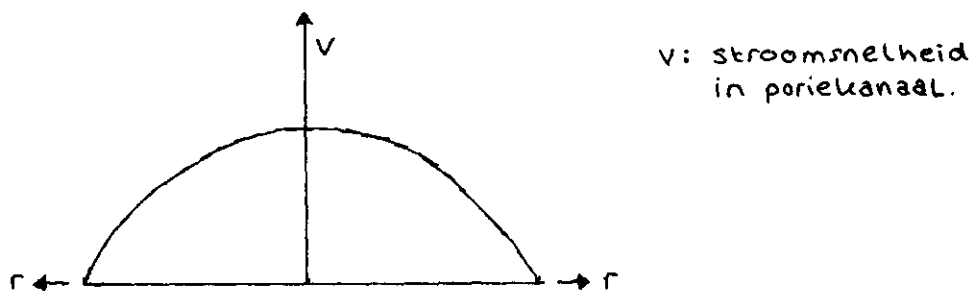


Fig. 5.5. Verloop van de stroomsnelheid over de doorsnede van een poriekanaal, waarbij geen adhesiespanningen een rol spelen

In het poriekanaal tussen de bentonietdeeltjes stroomt het water buiten de straal r_s niet, omdat de adhesiespanning daar groter is dan de schuifspanning. Daarom mag in formule (5.6) r_k worden vervangen door r_s .

De gemiddelde stroomsnelheid in de porie kan volgens POISSEUILLE beschreven worden met formule (5.7):

$$\bar{v} = C_a * \frac{\gamma_w}{\eta} * r_s^2 * i \quad (5.7)$$

Hierin is C_a een constante, die van de vorm van het poriënkanaal afhankelijk is.

Door in formule (5.7) de gevonden formule voor r_s (5.5) in te vullen wordt een formule gevonden waarin de snelheid (v) afhankelijk is van de gradiënt (i).

$$v = C_a * \frac{\gamma_w}{\eta} * \alpha^2 * i^{2/n} * i \quad (5.8)$$

met $a_m = C_a * \frac{\gamma_w}{\eta} * \alpha^2$, en

$$m = \frac{2+n}{n}$$

volgt hieruit

$$v = a_m * i^m \quad (5.1)$$

5.3. Verband tussen doorlatendheid en gradiënt

Met formule (5.1) kan de filtersnelheid in afhankelijkheid van de hydraulische gradiënt worden bepaald, als de adhesiespanningen, die de grondkorrels op het water uitoefenen, het doorstroomoppervlak in de porie tussen de bentonietdeeltjes verkleinen.

Als over het gehele poriekanaal de schuifspanning (τ) groter is dan de maximale adhesiespanning, dan geldt (in formule (5.5)) dat $r_s = r_k$. In dat geval is r_s onafhankelijk van de gradiënt, en volgt uit formule (5.7) dat de filtersnelheid lineair afhankelijk is van de gradiënt.

Voorgaande formules zijn afgeleid voor de stroming van water door een geïdealiseerd poriekanaal tussen bentonietdeeltjes. In een bentonietlaag zullen zeer veel poriekanaalen ontstaan met grillige vormen. Dit zal echter minder aan het verband tussen de filtersnelheid en de gradiënt afdoen, maar meer de grootte van de factor a_m bepalen.

Wanneer in alle poriën de adhesiespanning over de gehele doorsnede groter is dan de schuifspanning, dan zal geen waterstroming in de porie optreden. De waarde van ' r_s ' is in dat geval nul.

De verschillende stadia zijn weergegeven in fig. 5.6.

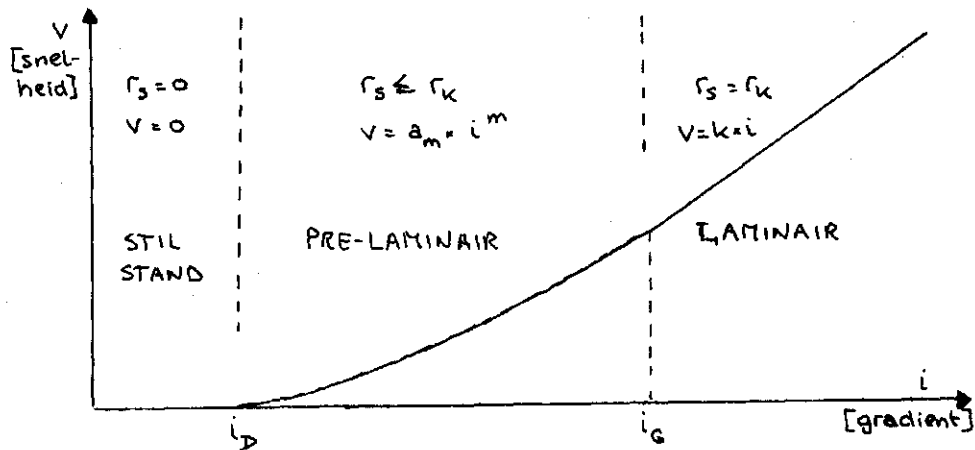


Fig. 5.6. Verloop stroomsnelheid met de hydraulische gradiënt in een poriekanaal tussen twee bentonietdeeltjes

5.4. S t r o m i n g s m o d e l v a n w a t e r d o o r b e n - t o n i e t - g r o n d m e n g s e l s

In de vorige paragrafen is een stromingswet afgeleid voor de waterstroming door grondsoorten, waarbij de electro-moleculaire krachten niet verwaarloosd kunnen worden. Bentoniet is een materiaal, waarbij deze krachten een zeer belangrijke rol spelen, omdat het wateradsorptievermogen (zwelvermogen) van bentoniet zeer groot is.

Door menging van poedervormige droge bentoniet met een (al dan niet vochtige) grondsoort wordt, na voldoende goede menging, een homogeen bentoniet-grondmengsel verkregen. De gemiddelde deeltjesgrootte van de gemalen bentoniet ($<20 \mu\text{m}$) is in het algemeen veel kleiner dan de grootte van de korrels, waaruit de grond bestaat. Daarom mag worden aangenomen, dat de bentonietdeeltjes geen wezenlijke bijdrage zullen leveren aan de opbouw van een (grond)korrelskelet. De bentoniet bevindt zich in de poriën, die binnen dit korrelskelet ontstaan.

Het water dat zich in de grond bevindt, wordt direct gebonden aan de bentonietdeeltjes. Wanneer meer water aan het bentoniet-grondmengsel wordt toegevoegd, wordt ook dit water gebonden aan de bentoniet, tot de maximale hoeveelheid water gebonden is. De maximale hoeveelheid wordt bepaald door het zwelvermogen van de bentoniet. Afhankelijk van de, na verdichting, bereikte porositeit, het bentonietgehalte en het zwelvermogen, kan al het water, dat zich na verzadiging in de poriën bevindt, gebonden zijn aan de bentoniet.

Wanneer meer bentoniet toegevoegd wordt, dan nodig is om al het water in de poriën te binden, zal een minimale adhesiespanning (w_0) in de poriën heersen. Om het water, dat door de bentoniet gebonden is in beweging te zetten, is een uitwendige kracht op het water nodig. Deze kracht verhoogt de gradiënt, zodat de schuifspanningen in het water (zie par. 5.2) toenemen.

In de poriekanalen tussen de bentonietdeeltjes en de kanalen tussen de grondkorrels en bentonietdeeltjes zal eenzelfde stromingsbeeld en krachtenspel optreden als weergegeven in par. 5.2.

Op grond van deze veronderstellingen, mag verwacht worden, dat een niet-lineair gedrag zal optreden in de relatie tussen de filtersnelheid en de hydraulische gradiënt. Afhankelijk van het bentonietgehalte, het zwelvermogen en de porositeit, is dan ook

de gemeten doorlatendheid van een verdicht bentoniet-grondmengsel afhankelijk van de hydraulische gradiënt.

Een belangrijke conclusie hieruit is, dat de doorlatendheid van bentoniet-grondmengsels zonder vermelding van de gradiënt, waarbij gemeten is, van weinig waarde is om te bepalen of de mengsels geschikt zijn als afdichtingsmateriaal bij stortplaatsen.

6. LITERATUURSTUDIE NAAR DE INVLOED VAN DIVERSE ONTWERP-VARIABELEN OP DE DOORLATENDHEID VAN BENTONIET-GROND

Dit hoofdstuk is besteed aan eerder onderzoek dat verricht is, waarbij de invloed van de ontwerp-variabelen dichtheid, grond- en bentonietsoort, en bentonietgehalte op de doorlatendheid aan bod komen. Aan het einde van dit hoofdstuk wordt ook ingegaan op onderzoek naar de chemische resistentie van bentoniet-grondmengsels ten opzichte van geconcentreerde stoffen en percolaatwater uit een huisvuilstortplaats.

6.1. I n l e i d i n g

Bij de bepaling van de doorlatendheid van bentoniet-grondmengsels spelen een groot aantal factoren een rol. Genoemd kunnen worden

- het bentonietgehalte
- het type bentoniet
- de grondsoort, met name de korrelgrootteverdeling
- het watergehalte en de porositeit na verdichting
- de gebruikte vloeistof (kalkhoudend water, percolaatwater...)
- de hydraulische gradiënt
- de gebruikte proefopstelling
- de tijdsduur van proefneming
- de methode van menging
- veld- of laboratoriummeting.

In de meeste publicaties, die bestudeerd zijn, is onvoldoende aangegeven hoe de metingen verricht zijn. Vaak wordt niet vermeld welke proefopstelling gebruikt is, en, wat belangrijker is, bij welke gradiënt gemeten is. In hoofdstuk 5 is aangetoond, dat dit van grote invloed kan zijn. Ook wordt weinig aandacht besteed aan

de verdichting, en de wijze waarop deze tot stand komt.

De diverse resultaten zijn daarom moeilijk met elkaar te vergelijken. Dit is overigens niet verwonderlijk. Het doel van de verschillende onderzoeken loopt sterk uiteen. In een aantal Duitse publicaties wordt vooral ingegaan op het gebruik van bentoniet-grondlagen als onderafdichting voor stortplaatsen van huishoudelijk afval. In Amerikaanse publicaties wordt meer aandacht besteed aan het gebruik van bentoniet-grond als afdichting voor industriële afvalstortplaatsen. De proeven worden daar gedaan met percolaatwater uit de stort of sterk geconcentreerde organische vloeistoffen.

In eerste instantie zal in dit hoofdstuk ingegaan worden op doorlatendheidsmetingen met water. Uit gegevens, die in de publicaties gevonden zijn, wordt een voorspelling gemaakt van de effecten, die de otnwerpvariabelen, zoals bentontietgehalte, grond- en bentonietsoort, en dichtheid op de doorlatendheid hebben.

Verderop zal aandacht besteed worden aan de effecten van percolaatwater uit huisvuilstortplaatsen en geconcentreerde organische stoffen op de doorlatendheid.

6.2. R e l a t i e b e n t o n i e t g e h a l t e - d o o r l a - t e n d h e i d

D'APPOLONIA (1980) presenteert een figuur, die het verband tussen het bentonietgehalte en de doorlatendheid voor verschillende grondsoorten geeft. Niet duidelijk is of wyomingbentoniet gebruikt is en bij welke gradiënt is gemeten.

Uit fig. 6.1 is af te leiden, dat met uitzondering van het gebied tussen 0 en 1 gew. % bentoniet, de krommen benaderd kunnen worden door een lineair verband tussen het bentonietgehalte (x) en de logaritme uit de doorlatendheid ($\log K$). Ook het effect van de gebruikte grondsoorten komt hieruit naar voren. Des te meer fijne deeltjes (met name 'plastic lines') in de grond aanwezig zijn, des te lager wordt de doorlatendheid. Dit effect wordt ook duidelijk in fig. 6.2, die ook aan D'APPOLONIA (1980) ontleend is.

Source: D'Appolonia, 1980

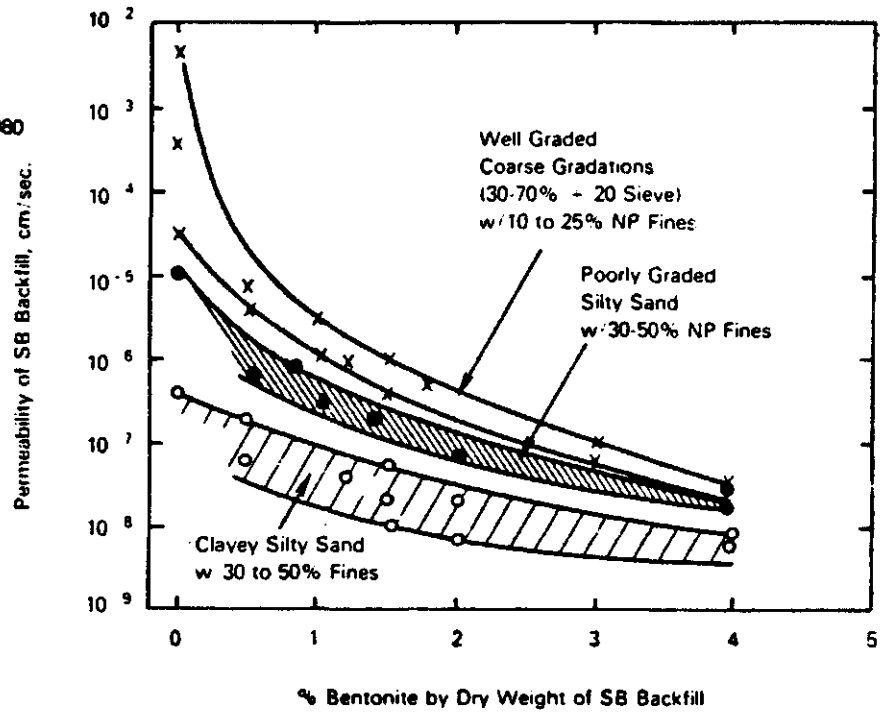


Fig. 6.1. Relatie bentonietgehalte-doorlatendheid volgens D'APPOLONIA

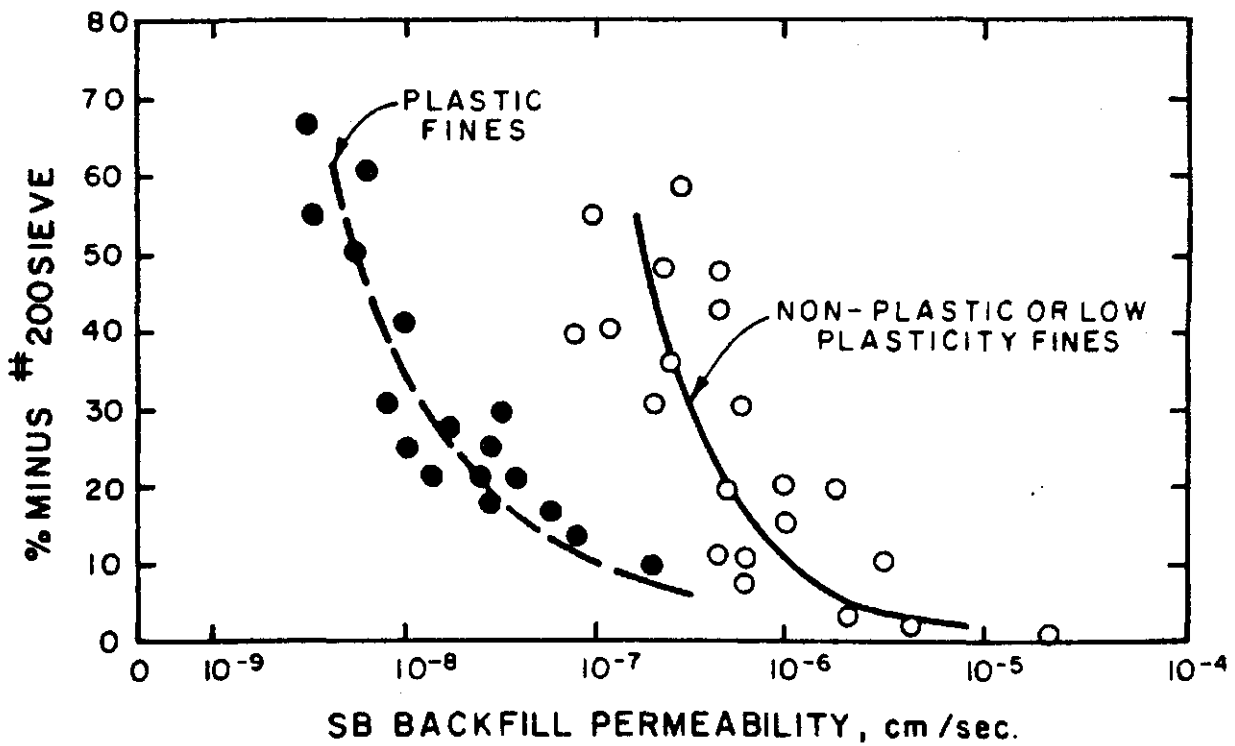


Fig. 6.2. Relatie doorlatendheid-gehalte fijne deeltjes (D'APPOLONIA)

HANSEL (1982) heeft enkele doorlatendheidsmetingen verricht op monsters met 0 tot 1,5 gew. % bentoniet en grondsoorten, die getypeerd kunnen worden als kleiïg siltig zand. Deze gegevens zijn uitgezet in fig. 6.3. Verdichting gebeurde onder optimaal watergehalte tot maximale proctordichtheid.

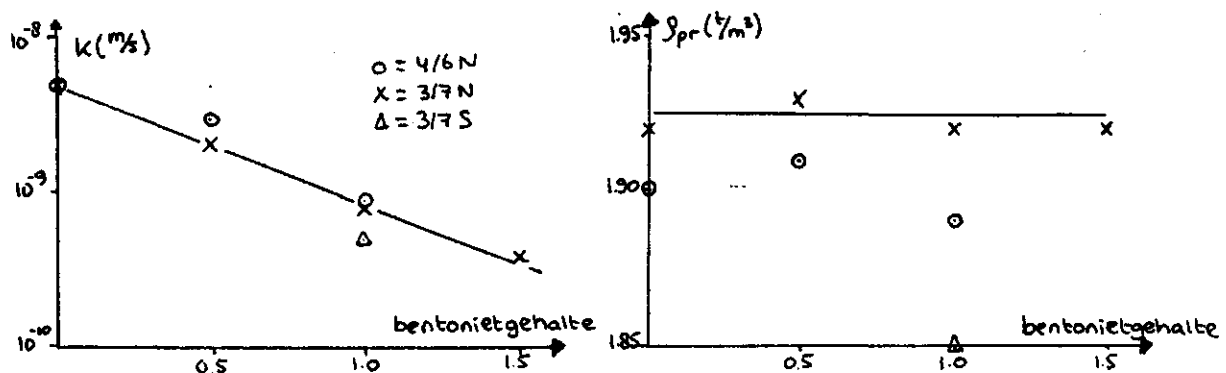


Fig. 6.3. Relatie bentonietgehalte-doorlatendheid en dichtheid
(bewerkt naar HANSEL)

De bereikte verdichting is nagenoeg onafhankelijk van het bentonietgehalte ($x = 1,92 \text{ g/cm}^3$, $o = 1,90 \text{ g/cm}^3$, $\Delta = 1,85 \text{ g/cm}^3$). Met behulp van fig. 6.3 wordt een lineair verband tussen het bentonietgehalte en de logaritme uit de doorlatendheid gevonden.

SCHMITT (1983) heeft ook metingen gedaan, die tot een zelfde conclusie leiden, zie fig. 6.4. Hij maakt gebruik van kleiïg siltig zand en van twee geactiveerde bentonietsoorten. Evenals bij HANSEL is niet duidelijk bij welke gradiënt gemeten is. De dichtheid neemt toe bij toenemend bentonietgehalte (proctorverdichting) van $1,87 \text{ g/cm}^3$ tot $1,93 \text{ g/cm}^3$. De k -waarden zijn gemiddeld een factor 10 hoger dan bij HANSEL (1980).

LUNDGREN (1981) komt op grond van eigen metingen en gevonden waarden in de literatuur tot fig. 6.5. Uit de publicatie wordt niet duidelijk hoe de doorlatendheid bepaald is, dit wil zeggen bij welke gradiënt, dichtheid en proefopstelling.

Opmerkelijk is, dat LUNDGREN hogere bentonietgehaltenes nodig heeft om dezelfde k -waarden te bereiken als voorgaande onderzoekers. Dit wordt wellicht veroorzaakt door het gebruik van een andere grondsoort (zand). Tevens is het opvallend dat bij k -waarden, lager

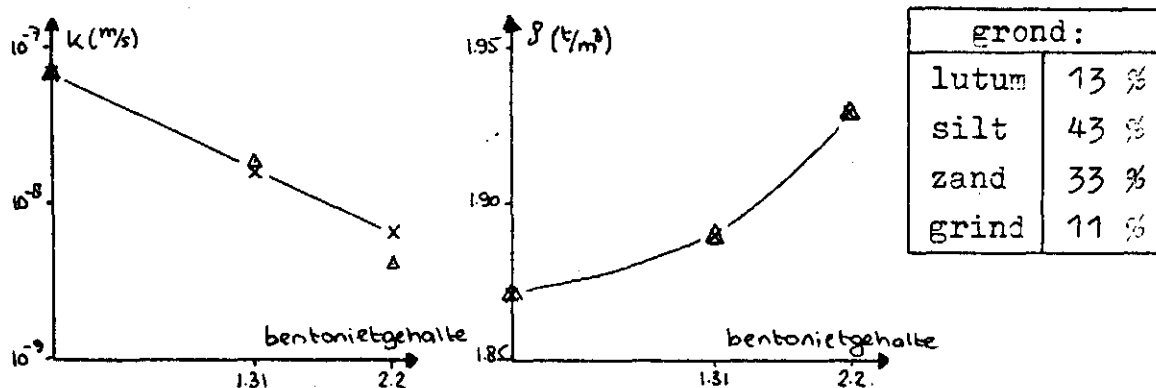
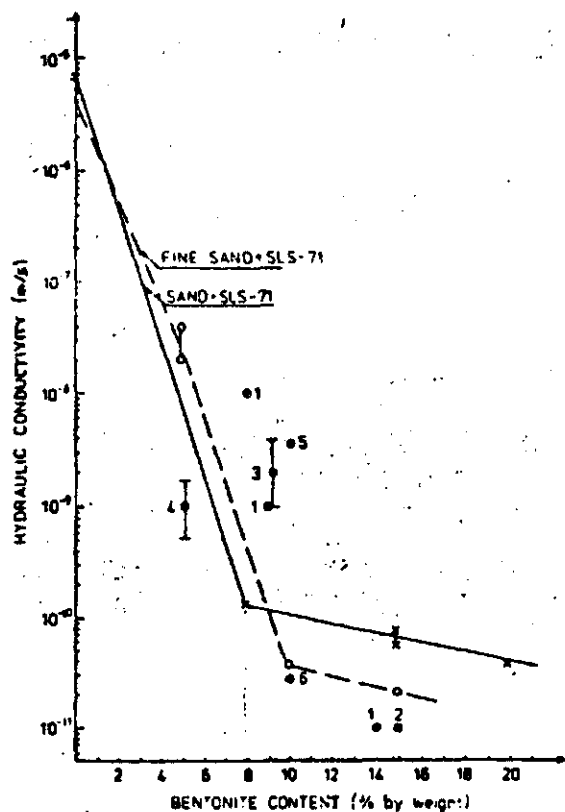


Fig. 6.4. Relatie bentonietgehalte-doorlatendheid en dichtheid
(bewerkt naar SCHMITT)



Hydraulic conductivity (pure water) in some soil/bentonite mixtures (compacted) in relation to bentonite percentage.

- 1 = Sand + untreated Volclay according to American Colloid Co
- 2 = Sand + untreated Volclay (laboratory tests) according to Hansbo & Olsson (1973)
- 3 = Field tests with Volclay SLS-71 in graded sand, in fine sand or in graded gravel
- 4 = Field tests with silt + Volclay SLS-70 according to Jerbo (pers. comm)
- 5 = Sorted sand + Volclay SLS-71 (laboratory tests)
- 6 = Fine sand + Volclay SLS-71 (laboratory tests)

Fig. 6.5. Relatie bentonietgehalte-doorlatendheid (LUNDGREN)

dan 10^{-10} m/s, een knik aangetroffen wordt. Dit kan verklaard worden, uit het feit, dat de apparatuur dergelijke lage k-waarden niet meer kan meten of uit de niet meer toenemende viscositeit van het bentoniet-water mengsel in de poriën bij hogere bentonietgehalten.

HAUSER (1978) vindt ook een lineair verband tussen het bentonietgehalte en de logaritme uit de doorlatendheid. Gegevens over de dichtheid ontbreken. De doorlatendheid is bepaald na één dag doorstroming in een falling head permeameter.

Hydraulic conductivity of bentonite mixed with unsieved silo sand or with unsieved silo sand + unsieved gravel. The regression lines and data points are for tests after 1 day of soaking.

	sand	gravel
lutum	-	-
silt	3	-
zand	97	2
grind	-	98
	%	%

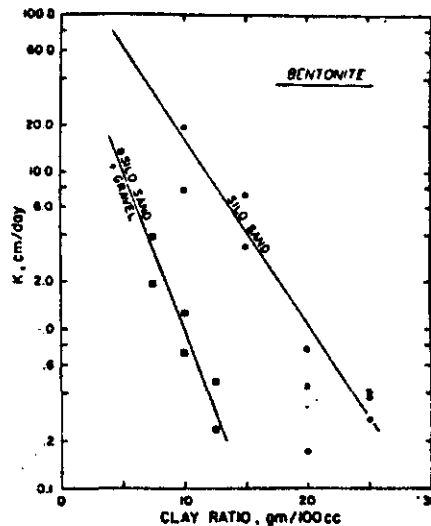


Fig. 6.6. Relatie bentonietgehalte-doorlatendheid (HAUSER)

HAUSER toont tevens aan, dat door toevoeging van grof grind aan fijn zand de doorlatendheid flink verlaagd wordt, zie in fig. 6.6 de lijn voor silo zand + gravel.

Concluderend kan worden gesteld, dat een lineair verband tussen het bentonietgehalte (x) en de logaritme uit de doorlatendheid (log k) aannemelijk lijkt, hoewel de gemeten relaties niet eenduidig bepaald zijn. De relatie luidt dus (omgewerkt):

$$k = k_0 * 10^{(-x/a)} \quad (6.1)$$

waarin:

k_0 = doorlatendheid van de grond (m/s)

a = constante

k = doorlatendheid bentoniet-grond (m/s)

x = bentonietgehalte (gew. %)

De grootte van de constanten 'a' en ' k_0 ' is zeer uiteenlopend in de verschillende onderzoeken.

6.3. Invloed van de grondsoort en de bentonietsoort

In par. 6.2 is het door D'APPOLONIA (1980) gevonden effect van de grondsoorten op de doorlatendheid weergegeven (zie fig. 6.1 en 6.2).

JESSBERGER (1983) vond dat door toevoeging van siltig zand aan grove mijnsteen een bentonietgehalte van slechts 1% geactiveerde bentoniet voldoende is om de doorlatendheid te verlagen tot minder dan $2 * 10^{-9}$ m/s. Bij gebruik van een bentonietsoort met minder zwelvermogen is twee keer meer bentoniet nodig om dezelfde doorlatendheid te bereiken.

Uit onderzoek van STEFFEN (1981) blijkt, dat geringe bentoniethoeveelheden (1-2,5 %) voldoende zijn om vrij grof materiaal te gebruiken voor afdichtingslagen met een doorlatendheid die lager is dan $2 * 10^{-9}$ m/s.

De grondsoort bepaalt in belangrijke mate de doorlatendheid van de verdichte grond (k_0). Daarom is de grondsoort van grote invloed op de relatie k-x. Goed gegradeerde grondsoorten met een groot aandeel fijne deeltjes zullen een lage waarde voor k_0 geven.

Geconcludeerd mag worden, dat aan grondsoorten met een vrij groot gehalte aan 'fijne' deeltjes in het algemeen minder bentoniet toegevoegd hoeft te worden om bij proctorverdichting eenzelfde doorlatendheid te bereiken als met meer grovere grondsoorten. Bij toepassing van een bentonietsoort met een hoog zwelvermogen is de bereikte doorlatendheid lager.

6.4. Invloed van de dichtheid

ALBIKER (1983) toonde door metingen op 21 veldmonsters met 16 kg/m^2 Montigel F (dikte 30 cm) aan, dat ondanks een grote spreiding in de gemeten waarden de doorlatendheid fors afneemt bij toenemende dichtheid.

De dichtheid die bereikt kan worden is sterk afhankelijk van de grondsoort. Bij grondsoorten met veel fijne deeltjes en een goed gegradeerde korrelverdeling zal de bereikte (droge) dichtheid hoog zijn. Het poriënvolume is derhalve klein, en het bentonietgehalte in de poriën hoog. De schijnbare viscositeit van het water in de poriën van het bentoniet-grondmengsel is derhalve hoog en de doorlatendheid, die gemeten wordt laag.

6.5. De invloed van percolaatwater uit stortplaatsen voor stedelijk afval op de doorlatendheid

HANSEL (1982) heeft langeduurproeven gedaan met bentonietpasta's (dit zijn mengsels van geactiveerde bentoniet en water), die 'ingebouwd' zijn in zand. Na 40 dagen is de doorlatendheid tegen vervuild water niet significant hoger dan voor gedestilleerd water.

HERMAN en TUTTLE (1984) hebben langeduurproeven gedaan met leiding- en percolaatwater uit een afvalstort op mengsels van 7,5 gew. % natriumrijke bentoniet en middelfijn zand. De gradiënt bedroeg 10-20 m/m. De doorlatendheid voor leidingwater is bepaald over een periode van 78 dagen; die voor percolaatwater gedurende negen maanden. De doorlatendheid is bij percolaatwater niet significant hoger dan bij leidingwater, maar vertoont wel een grotere spreiding. Bij gebruik van met polymeren behandelde bentoniet is de doorlatendheid $2-3 \cdot 10^{-10}$ m/s. Bij niet-gepolymeriseerde bentoniet is dat $4 \cdot 10^{-10}$ m/s.

HAJI DJAFARI en WRIGHT (1983) gebruikten monsters van kleiig silt met 4% bentoniet, die verdicht werden tot $2,04 \text{ g/cm}^3$ (95% proctor). Bij een gradiënt van 258 m/m^1 werd allereerst een doorlatendheid gemeten van $1,0 \cdot 10^{-10}$ m/s (grondwater).

Hierna werd de doorlatendheid bepaald voor percolaatwater (influent) met pH=2, een specifiek geleidingsvermogen van $23\ 000 \text{ } \mu\text{mhos/cm}$ en chloridegehalte $450 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$. De k-waarde bedroeg nu $1,7 \cdot 10^{-10}$ m/s na een beproevingstijd van 2000 uur. De pH van het effluent was toen 2 geworden.

ALTHER (--) stelde monsters van 8% bentoniet, gemengd met 92% 'Lake Michigan sand' bloot aan gedestilleerd water (86 dagen) en aan percolaatwater (320 dagen). Het gaat hier om drie bentoniettypen. De 'gele bentoniet' bevat veel Fe-ionen; de 'blauwe bentoniet' is een wyoming-bentoniet (veel Na). Ook werd een met polymeren behandelde bentoniet gebruikt.

In tabel 6.1 zijn de resultaten gegeven.

Doorlatendheid (m/s)	Gedestilleerd	Percolaat
Gele bentoniet	$4,0 \cdot 10^{-10}$	$6,9 \cdot 10^{-10}$
Blauwe bentoniet	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$
Gepolymeriseerde bentoniet	$6,1 \cdot 10^{-11}$	$3,0 \cdot 10^{-10}$

De doorlatendheid bij percolaatwater is 2 tot 6 keer hoger, maar neemt nog altijd niet drastisch toe. De metingen zijn verricht met een constant head permeameter met verval van 1 m.

Ook voor geringe concentraties NaCl, Na₂SO₄ en K₂SO₄ (3-8%) nam de doorlatendheid niet significant toe.

D'APPOLONIA (1980) heeft ook doorlatendheidsmetingen verricht met vloeistoffen, waarin kleine concentraties (1-3%) van respectievelijk calciumzout, NaOH en HCl opgelost waren. De proeven werden verricht op bentoniet-zand mengsels, waarin 1% bentoniet was opgenomen (via slurry trench principe). De doorlatendheid nam maximaal tot 6 maal toe.

BOUTWELL en DONALD (1982) hebben enkele doorlatendheidsproeven gedaan met 'leachate' (percolaatwater) uit een stort met gevaarlijk afval. Het 'leachate' is te karakteriseren met pH=7,2, COD 1500 mg/l, Cl⁻-gehalte 2960 mg/l en geleidingsvermogen 10900 µmhos/cm. Er is gebruik gemaakt van een constant head test bij gradiënten van 50-100. Aan de monsters was geen bentoniet toegevoegd.

De proeven op kleimonsters gaven geen significante verlaging of verhoging van de doorlatendheid (circa $3 \cdot 10^{-10}$ m/s) te zien. Het siltig klei ($k \approx 5 \cdot 10^{-10}$ m/s) gaf een geringe afname onder invloed van het percolaat te zien. Bij kleiïg silt ($k \approx 2 \cdot 10^{-8}$ m/s) was de verlaging van de doorlatendheid onder invloed van het percolaatwater nog een fractie groter.

BOUTWELL en DONALD (1982) legden tevens een relatie tussen de proctorkromme (watergehalte versus droge dichtheid) en de doorlatendheid. Bij afname van het watergehalte tot het optimum watergehalte nam de doorlatendheid voor siltige klei af van $5 \cdot 10^{-10}$ tot $8 \cdot 10^{-11}$ m/s.

6.6. De invloed van geconcentreerde organische vloeistoffen op de doorlatendheid

BROWN en ANDERSON (1981, 1982, 1983, 1983) hebben zeer uitgebreid en systematisch de invloed op de doorlatendheid onderzocht van geconcentreerde organische vloeistoffen. Daarbij is ervan uitgegaan dat de chemicaliën niet opgelost zijn in water of erdoor meegevoerd worden, maar zelf de vloeistoffen zijn die door de kleilaag willen penetreren.

Door de US Environmental Protection Agency wordt voorgeschreven dat de doorlatendheidsmetingen worden uitgevoerd met een 0,01N CaSO₄ oplossing in water. Door BROWN en ANDERSON is van een constant head permeameter gebruik gemaakt met starre wanden, zie fig. 10.5. De druk op de vloeistof boven het monster bedroeg 10 en 60 psi.

De grondsoorten zijn beproefd in de permeameter bij 90% Proctor-dichtheid op of iets boven het optimum watergehalte. Testen zijn uitgevoerd op de vier grondsoorten genoemd in tabel 6.2.

Tabel 6.2.

Grondsoort	Lutum	Silt	Zand	CEC	k(m/s)
Non calcareous smectite	37	27	36	24,2	$2 * 10^{-11}$
Calcareous smectite	49	43	8	36,8	$7 * 10^{-11}$
Mixed cation illite	47	39	14	18,3	$1 * 10^{-10}$
Mixed cation kaolinite	42	17	41	8,6	$2 * 10^{-10}$

Onder beproeving van de 0,01N CaSO₄ oplossing in water waren de doorlatendheden zoals aangegeven in tabel 6.2. Deze waren ruim beneden de veelvuldig gehanteerde eis van 10^{-9} m/s.

Er zijn vier typen vloeistoffen gebruikt namelijk organisch zuur, organische base, neutraal polaire organische en neutraal niet-organische vloeistof.

Onder invloed van azijnzuur trad aanvankelijk een daling van de doorlatendheid op, die wordt toegeschreven aan het loslaten van deeltjes, die over een zekere afstand verplaatsen en daar het doorstroomoppervlak verkleinen. Bij de illiet en de noncalcareous smectite nam de doorlatendheid later weer toe tot 10^{-10} m/s.

Onder invloed van aniline (base) nam de doorlatendheid snel toe bij de illite en de noncalcareous smectite tot boven 10^{-9} m/s. Ook bij kaolinite en calcareous smectite trad dit, zij het later, op. Dit verschijnsel werd toegeschreven aan een verandering in de plaatjesstructuur van de klei.

Onder invloed van neutrale polaire organische vloeistoffen als ethyleen glycol, aceton en methanol, nam de doorlatendheid gestadig toe tot waarden van 10^{-9} m/s en hoger. Bij aceton en ethyleen-glycol

trad eerst nog een kleine verlaging op. Dit wordt verklaard uit het hogere dipoolmoment (aceton), dat de adhesiespanning van de kleideeltjes op het water en de organische vloeistof verhoogt. Hierna volgde afname van de hoeveelheid gebonden vloeistof aan de kleideeltjes vanwege de lagere dielectrische constante van methanol en aceton. Dit was zichtbaar aan de grote krimpscheuren. Verplaatsing of uitspoeling van deeltjes werd niet waargenomen.

Onder invloed van neutrale niet-polaire organische vloeistoffen, zoals xyleen of heptaan nam de doorlatendheid vrijwel direct zeer snel toe. Hiervoor geldt dezelfde verklaring als bij polaire organische vloeistoffen, maar door het lager dipoolmoment trad geen aanvankelijke verlaging op. De gradiënt bedroeg voor de smectiten 362 en voor de illite en kaolinite 61.

Opmerkelijk is, dat de grondsoort met de hoogste doorlatendheid voor water (kaolinite) de grootste weerstand tegen doorlatendheidsveranderingen vertoonde. De noncalcareous smectite was hiervoor zeer gevoelig en bereikte in het algemeen dezelfde hoge doorlatendheid als kaolinite.

Aanbevolen werd om kleiafdichtingslagen niet alleen te beproeven met water, maar met de vloeistof waaraan ze in de veldsituatie bloot zal staan.

Veld- en laboratoriumproeven van BROWN, GREEN en THOMAS (1983, 1984) bevestigen het beeld, dat hierboven geschetst is. Een belangrijke opmerking is dat bentoniet kwa mineraalopbouw vergelijkbaar is met smectite.

HAMIDON (1984) heeft proeven gedaan op kaolinite-kleimonsters in een permeameter met flexibele wanden (triaxiaal cel), waarbij zijdelingse druk op het monster uitgeoefend kan worden om te voorkomen, dat lekkage langs de wanden optreedt. Bij pure oplossingen van aceton nam de doorlatendheid toe. Een kleine afname van de doorlatendheid werd geconstateerd bij fenol en een sterke daling trad op bij benzeen en nitrobenzeen. Bij geringe concentraties (1000 ppm) van deze stoffen trad een geringe afname van de doorlatendheid op. De oorzaken hiervoor worden gezocht in veranderingen van de adhesiespanningen tussen kleioppervlak en de vloeistof onder invloed van de chemische eigenschappen van de vloeistof (HAMIDON, 1984).

6.7. C o n c l u s i e s

Bij toenemend bentonietgehalte neemt de doorlatendheid af volgens een lineair verband tussen de logaritme uit de doorlatendheid ($\log k$) en het bentonietgehalte. De grondsoort, waarmee de bentoniet gemengd wordt bepaalt de startwaarde van dit verband (k_0).

Een grondsoort waarbij van nature een hoog gehalte fijne deeltjes aanwezig is heeft een lage doorlatendheid, zodat minder bentoniet toegevoegd behoeft te worden om de doorlatendheid verder te laten dalen.

De grondsoort bepaalt ook de dichtheid die met het bentoniet-grondmengsel te bereiken is. Hierdoor wordt ook het bentonietgehalte in de poriën bepaald, en daarmee de hoeveelheid bentoniet, die toegevoegd moet worden om een zekere doorlatendheid te bereiken.

Toepassing van een bentonietsoort met een hoger zwelvermogen leidt tot een lager bentonietgehalte om dezelfde doorlatendheid te bereiken, omdat met minder bentoniet meer water gebonden wordt.

Onder invloed van percolaatwater uit een huisvuilstort neemt de doorlatendheid over langere tijd (enkele maanden) niet drastisch toe (factor 2 tot 10). Onder invloed van geconcentreerde organische stoffen kan de doorlatendheid tot een factor 10^4 toenemen.

7. GEGEVENS OVER DE MATERIALEN, DIE BIJ DE DOORLATENDHEIDSMETINGEN GEBRUIKT ZIJN

Zoals reeds eerder is gesteld, zijn gedurende de stageperiode bij het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW) doorlatendheidsmetingen verricht. De verschillende materialen, die hierbij gebruikt zijn, zoals de zand- en bentonietsoorten zijn in dit hoofdstuk beschreven. Van de zandsoorten is de korrelgrootteverdeling, de proctorcurve, en de doorlatendheid bepaald. De bentonietsoorten worden kort beschreven.

7.1. K o r r e l v e r d e l i n g v a n h e t z a n d

Er zijn vier zandsoorten gebruikt, die worden vernoemd naar de vindplaats of ontstaanswijze bijvoorbeeld brekerzand. Dit is de

zandfractie die resteert na het breken van puin in een brekerinstallatie). Aan de zandsorten wordt in het vervolg de volgende codering meegegeven:

- brekerzand BRE
- wijsterzand WLJS
- heidezand HEI
- rosmalenzand ROS

De zandsorten zijn gezeefd met een trilapparaat, waarop zeven van het type TWENTE-Holland, standaard N480 ϕ 200 mm met vierkante openingen, zijn gezet. De zieving vond gedurende 7 minutendiscontinu plaats. Op de zeven werd geen verticale klap uitgeoefend, tijdens de zieving.

De korrelgrootteverdeling is gegeven in tabel 7.1. In tabel 7.2 zijn voor de zandsorten een aantal karakteristieke waarden opgegeven, die uit tabel 7.1 afgeleid kunnen worden.

Allereerst is een onderscheid gemaakt in de volgende fracties:

- grind >2 mm
- grof zand 0,5 - 2,0 mm
- middelzand 0,18- 0,5 mm
- fijn zand 63 - 180 μ m
- silt <63 μ m

Daarna zijn de korreldiameters gegeven waarbij respectievelijk 50% (d_{50}), 60% (d_{60}) en 10% (d_{10}) van het korrelgewicht een kleinere diameter heeft dan d_{50} , d_{60} en d_{10} .

De ongelijkvormigheid (U_c) wordt berekend met formule (7.1)

$$U_c = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (7.1)$$

Het specifiek oppervlak van de zandfractie (U_z) is als volgt berekend. Dit is overigens een andere definitie voor het U-cijfer dan genoemd is op blz. 21.

1. Het procentuele gewichtsaandeel van de fracties binnen de zandfractie (0,063 - 2mm) wordt zodanig omgerekend, dat het totaal van deze fractie 100% wordt.
2. Van iedere gezeefde fractie 'i' wordt het U_i -cijfer berekend:

$$U_i = 10 * \frac{0,4343}{\log(d_{\max}) - \log(d_{\min})} * \left(\frac{1}{d_{\min}} - \frac{1}{d_{\max}} \right) \quad (7.2)$$

waarbij:

d_{\min} = kleinste korreldiameter in fractie 'i'

d_{\max} = grootste korreldiameter in fractie 'i'

3. U_z wordt gevonden door voor iedere fractie 'i' het U_i -cijfer te vermenigvuldigen met het omgerekende gewichtspercentage ' p_i^* ', dat in de betreffende fractie wordt aangetroffen. Deze produkten worden gesommeerd over de zandfractie, dus

$$U_z = (U_1 * P_1) + (U_2 * P_2) + \dots + (U_i * P_i) \quad (7.3)$$

Dit wordt geïllustreerd door een voorbeeld voor het brekerzand.

Fractie	1	2	3	4	5	6	7
P_i	8	30	17	20	15	7	3
Omgerekende p_i^*	-	33	19	23	17	8	-
U_i	5	7,2	13	24	48	96	160
$U_i * P_i^*$	-	2,5	2,5	5,8	8,5	8,0	-

De sommatie geeft: $U_z = 25 + 2,5 + 5,8 + 8,5 + 8,0 = 27,3$

Tabel 7.1. Korrelgrootteverdeling (in gew.%) over de gezeefde fracties van de vier zandsorten

Fractie (μm)	BRE	WIJS	HEI	ROS
2000	8,0	5,8	0,1	0,0
1000 - 2000	29,3	7,2	0,3	0,3
600 - 1000	17,1	10,0	1,2	0,6
300 - 600	19,9	25,8	15,3	8,2
150 - 300	14,7	29,8	57,3	57,6
75 - 150	7,1	18,2	23,7	30,1
50 - 75	-	-	-	1,9
rest	3,3	3,3	2,1	1,3

Tabel 7.2. Karakteristieke waarden van de zandsorten

	BRE	WIJS	HEI	ROS	
grind	8	6	0	0	%
grof zand	52	22	3	1	%
middelzand	25	43	54	50	%
fijn zand	12	26	42	47	%
silt	3	3	1	2	%
d_{50}	690	290	200	180	μm
d_{60}	910	360	220	195	μm
d_{10}	140	100	110	90	μm
U_c	6,5	3,6	2,0	2,2	-
U_z	27	48	61	69	-

7.2. Proctorcurves van de zandsorten

Van drie van de vier zandsorten is het verband tussen het watergehalte en de droge dichtheid (proctorcurve) bepaald. Dit werd gedaan door middel van de proctorproef, waarvan in hoofdstuk 3 al een korte beschrijving gegeven is.

De proctorcurve van het rosmalenzand is niet bepaald. Op grond van de korrelgrootteverdeling mag worden verwacht, dat deze vrijwel hetzelfde zal zijn als de proctorcurve van het heidezand.

In tegenstelling tot de beschrijving van de proctorproef in de "EISEN" van Rijkswaterstaat is gebruik gemaakt van een grotere proctorkolom. Deze had een inwendige diameter van 154 mm en een hoogte van 126 mm. De inhoud van het monster was derhalve niet 944 cm³, maar 2347 cm³.

In tabel 7.3. zijn de hieruit bepaalde maximale dichtheid en het optimaal watergehalte weergegeven.

Tabel 7.3.

	W_{opt}	$\rho_{d_{max}}$	U_z
Brekerzand	13,2	1,71	27
Wijsterzand	11,5	1,68	48
Heidezand	13,5	1,62	61
	g/g	g/cm ³	

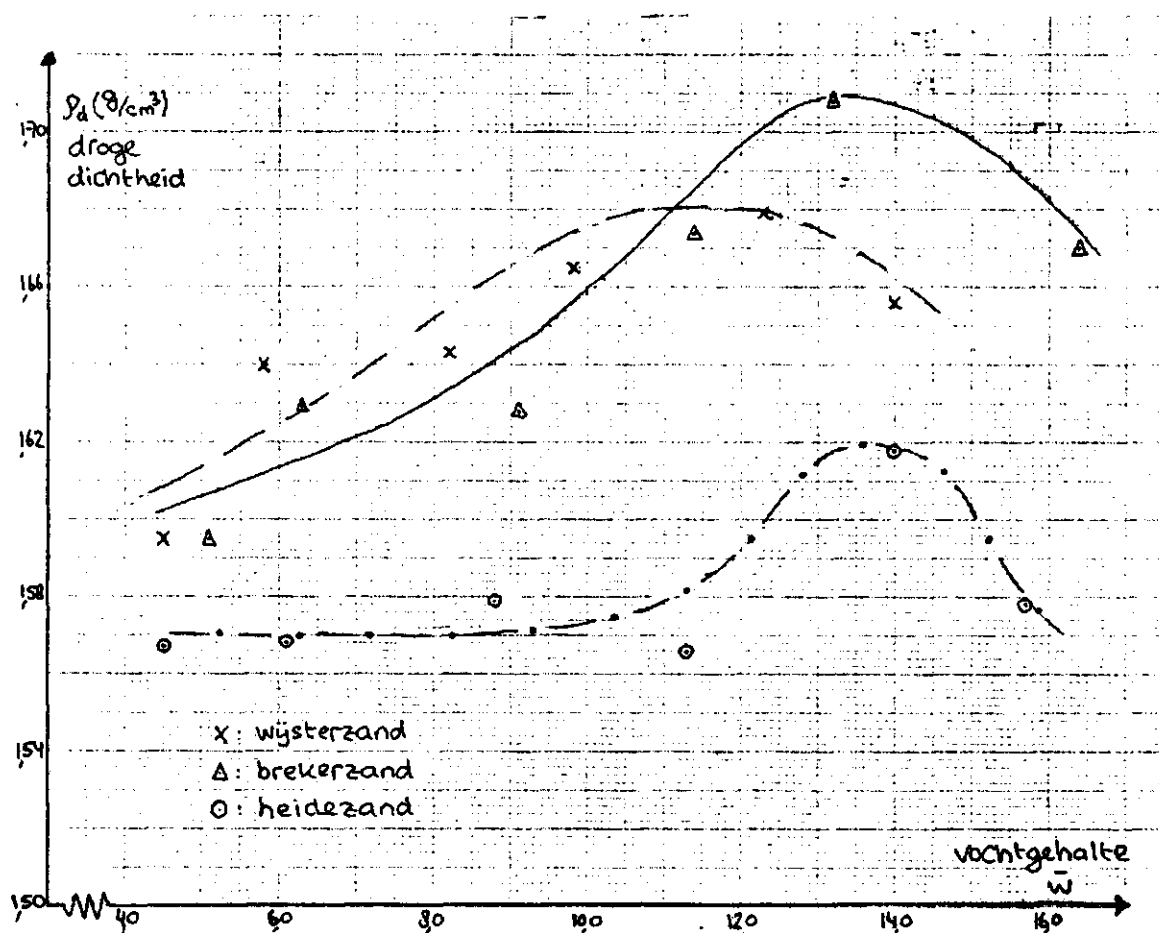


Fig. 7.1. Proctorcurven voor drie zandsorten

7.3. De doorlatendheid van de zandsorten

De doorlatendheid van de zandsorten kan niet gemeten worden met de proefopstelling, die gebruikt is voor de bentoniet-zandmonsters omdat de weerstand van dit apparaat tegen doorstroming te hoog is, zie hfdst. 8. Daarom is gebruik gemaakt van een andere, eenvoudige, opstelling, die weergegeven is in fig. 7.2.

Het droge zand (400 gram) is gemengd met 48 g water (vochtgehalte 12%) en op dezelfde wijze verdicht als de bentoniet-zandmonsters in hoofdstuk 9. De verdichting is van groot belang voor de doorlatendheid van zand. Om de doorlatendheid van de bentoniet-zandmonsters en de zandmonsters vergelijkbaar te houden, is daarom dezelfde verdichtingsmethode gekozen.

De doorlatendheid van de vier zandsorten is in drie periodes van een half uur onder een gradiënt van 4,3 m/m bepaald. Het gemeten debiet in deze drie periodes was nagenoeg constant. In tabel 7.4 is de gemeten doorlatendheid van de vier zandsorten gegeven.

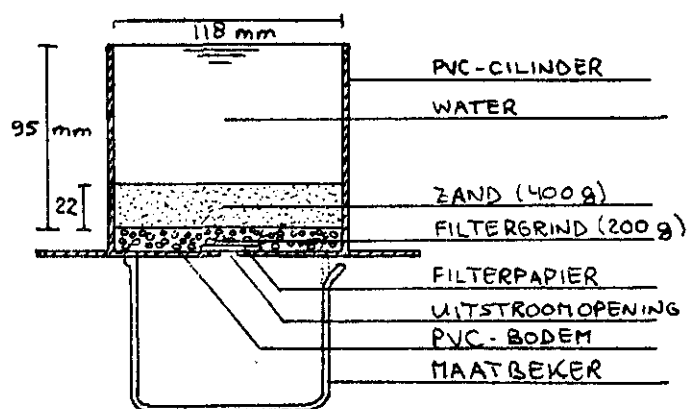


Fig. 7.2. Permeameter voor zand

Tabel 7.4. Doorlatendheden van zand (m/s)

		Debiet (cm ³ /uur)	K(m/s)
Brekerzand	BRE	82	$1 * 10^{-6}$
Wijsterzand	WIJS	735	$9 * 10^{-6}$
Heidezand	HEI	15	$2 * 10^{-7}$
Rosmalenzand	ROS	22	$3 * 10^{-7}$

De dichtheid was helaas niet nauwkeurig te meten, vanwege de geringe monsterdikte en het bovenoppervlak van het zand, dat niet exact horizontaal was. De gemiddelde monsterdikte is bepaald op 2,2 cm. Er is gebruik gemaakt van gedemineraliseerd, niet ontlucht water.

7.4. De bentonietsoort

Bij de doorlatendheidsmetingen op bentoniet-zandmonsters is gebruik gemaakt van twee bentonietsoorten. De eerste was een uit de Verenigde Staten geïmporteerde Wyoming-bentoniet, die van nature voornamelijk natrium als kation heeft. Deze bentonietsoort kost circa f 430,-/ton. De tweede bentonietsoort wordt geleverd onder de naam CEBO-Bond Foundry Bentonite. Dit is een bentonietsoort, die van nature voornamelijk calcium-ionen bevat heeft. Door een activeringsproces zijn deze calcium-ionen vervangen door natrium. De prijs van deze bentoniet is zo'n 40% lager dan de Wyomingbentoniet.

Het zwelvermogen van de CEBO-Bond F is volgens opgave van de leverancier iets lager dan die van de Wyomingbentoniet. De Wyomingbentoniet adsorbeert gemiddeld zo'n 12 ml. per gram; de CEBO-Bond F circa 10 ml per gram.

8. DE PROEFOPSTELLING VOOR DOORLATENDHEIDSMETINGEN OP BENTONIET-ZANDMONSTERS

Er is gebruik gemaakt van een proefopstelling, die bij het ICW ontwikkeld is voor doorlatendheidsmetingen op bentoniet-zand, en die bij aanvang van de stageperiode al aanwezig was. Gedurende de eerste weken van de stage, zijn hieraan een aantal aanpassingen aangebracht. Er is gemeten met vier apparaten van hetzelfde type. In dit hoofdstuk wordt de opstelling beschreven, en wordt in het kort uitgelegd welke procedure gevolgd is om tot metingen te komen. Het hoofdstuk wordt besloten met enkele kritische kanttekeningen.

8.1. W e r k i n g s p r i n c i p e

In fig. 8.1. is de opstelling getekend.

Op een volledig verzadigd bentoniet-zandmonster wordt een hoeveelheid water aangebracht. Het water, dat door het monster heen-gestroomd is wordt opgevangen in de verzamelruimte. Vanuit de verzameluimte stroomt het water door de A-slang en de meetslang naar de erlemeyer, die zo'n 85 cm onder het monster staat.

Omdat de verzameluimte en de slangen gedurende de doorstroming volledig met water gevuld zijn, wordt aan de onderzijde van het monster een onderdruk verkregen. Het water kan immers pas zo'n 85 cm onder het monster vrij uitstromen. Samen met het water, dat zich boven het monster bevindt, wordt een stijghoogteverschil ' ΔH ' over het monster gerealiseerd van 95 cm.

De hoeveelheid water, die per tijdseenheid (debiet) door het monster stroomt is dermate gering, dat geen constructie aangebracht is om een exact constant stijghoogteverschil te verkrijgen. Het stijghoogteverschil blijft nagenoeg constant.

Door over een bepaald tijdsinterval de gewichtstoename van de erlemeyer te wegen, kan het debiet worden berekend (Q). De monsterdikte (d) en het monsteroppervlak (A) worden door opmeting bepaald.

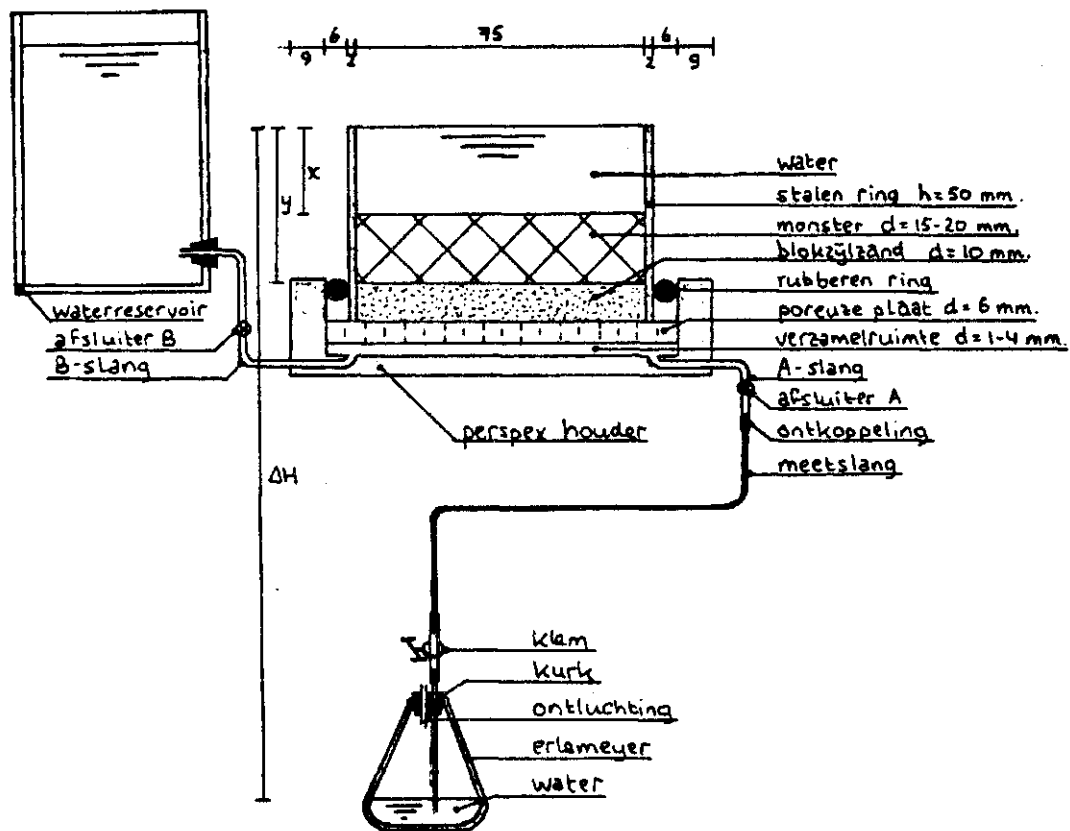


Fig. 8.1. Permeameter voor bentoniet-zandmonsters

Helaas is tijdens de proefnemingen (zie hoofdst. 9) gebleken, dat de monsterdikte vanwege de zwelling van de bentoniet toeneemt, ondanks het aanbrengen van een bovenbelasting (Blokzijlzand).

De aangelegde hydraulische gradiënt ($\Delta H/d$) is hierdoor afhankelijk van de zwelling van het monster, die op zijn beurt weer afhankelijk is van het bentonietgehalte in het monster.

Het waterreservoir en de B-slang zijn aangebracht in verband met de verzadiging van het monster. Zie hiervoor 8.5.

8.2. Gegevens

- binnendiameter stalen ring	D : 7,5 cm
- oppervlak monster	A : 44,18 cm ²
- stijghoogteverschil	ΔH : 95 cm
- monsterdikte	y-x: variabel
- hydraulische gradiënt	i : variabel

- blokzijlzand: droog gewicht $G_{db} : 80,0 \text{ g}$
watergehalte $W_b : 10\%$
- bentoniet-zandmonster: droog gewicht $G_{dm} : 100,0 \text{ g}$
watergehalte $W_m : 12\%$
- water: gedemineraliseerd en ontlucht

8.3. Apparaatweerstand

Het debiet, dat door het apparaat stroomt, stelt zich in als gevolg van de weerstanden, die het onderweg tegenkomt. Doel van de doorlatendheidsmeting is de weerstand te meten, die het monster veroorzaakt op de stroming. De overige weerstanden dienen verwaarloosbaar te zijn ten opzichte van de weerstand van het monster (doorlatendheid).

De overige weerstanden in het onderhavige doorlatendheid apparaat zijn:

- blokzijlzand
- de poreuze plaat en de verzamelruimte
- de slangen.

Deze weerstanden worden onder een noemer gebracht als apparaatweerstand.

Van twee apparaten is de weerstand bepaald door water door de opstelling (zonder monster!) te laten stromen. Deze waarden kwamen nagenoeg overeen met de weerstand, die gemeten werd bij 1,0 gew.% Wyomingbentoniet.

De apparaatweerstand is daarom voor de vier apparaten te bepalen uit de meting, waarbij een bentoniet-zandmonster met 1,0 gew.% Wyomingbentoniet is beproefd. De doorlatendheid van dit monster is dermate hoog, dat de apparaatweerstand maatgevend wordt voor de bepaling van het debiet.

De gevonden debieten zijn weergegeven in tabel 8.1. Hierin is ook de apparaatweerstand, uitgedrukt in een equivalente doorlatendheid (K_{app}) opgegeven.

Tabel 8.1. Apparaatweerstand

Apparaatnummer	I	II	III	IV
Debiet (cm^3/uur)	55	36	61	12
K_{app} ($* 10^{-10} \text{ m/s}$)	437	286	484	95

De verschillen tussen de apparaten kunnen verklaard worden door de lengte van de slangen, die voor alle apparaten verschillend is.

8.4. B e r e k e n i n g d o o r l a t e n d h e i d

De doorlatendheid (K) is gedefinieerd als het quotient van de filtersnelheid (V) en de hydraulische gradiënt (i). Uit de gegevens, die de meting oplevert kan de doorlatendheid worden berekend door middel van formule (8.1).

$$K = 2,778 * 10^{-6} \left(\frac{\text{uur}}{\text{s}} * \frac{\text{m}}{\text{cm}} \right) * \frac{Q * d}{A * \Delta H} \quad (8.1)$$

waarin:

K = doorlatendheid (m/s)

Q = debiet (cm³/uur)

d = monsterdikte (cm)

A = monsteroppervlak (44,18 cm²)

ΔH= stijghoogteverschil (95 cm)

Het debiet werd bepaald door de gewichtstoename van de erlemeyer in de tijd te meten. De doorlatendheid werd berekend bij het debiet, dat in de tijd constant is. Nadat de verzadigingsprocedure is afgerond, werd het debiet geregeld gemeten. In de loop van de tijd werd een afname van het debiet geconstateerd. Na zo'n 5 dagen doorstroming was het debiet nagenoeg constant in de tijd.

8.5. I n s t a l l a t i e v a n h e t m o n s t e r

Alvorens het monster in de opstelling aan te brengen werd de verzamelruimte met water gevuld. Op de poreuze porseleinen plaat wordt het vochtige Blokzijlzand aangebracht en verdicht met een stampertje. Dit stampertje heeft een licht gebogen oppervlak en een diameter van 2,7 cm.

In een kommetje werd gedroogd zand gemengd met 12 gram water. De hoeveelheid droog zand en de hoeveelheid toe te voegen bentoniet wogen samen 100 gram. Het bentonietgehalte werd bepaald ten opzichte van het droge monstergewicht (100 gram).

De bentoniet werd aan het vochtige zand toegevoegd en gedurende twee minuten geroerd en omgeschept. Dit gaf op het oog een homogeen mengsel. Het mengsel werd op het Blokzijlzand geschept en met hetzelfde

stampertje als hiervoor beschreven, verdicht. Op het bentoniet-zandmonster werd eenzelfde Blokzijlzandlaag aangebracht als op de poreuze plaat (80,0 gram droog zand, 8 gram water).

De dikte van de drie lagen werd opgemeten door met een lineaal de afstand tussen de bovenkant van de stalen ring tot het bovenoppervlak van de laag te meten op vijf plaatsen.

Vervolgens werd de verzadigingsprocedure gestart. Afsluiter B (zie fig. 8.1) werd geopend en het water stroomde uit het waterreservoir via de B-slang en de verzamelruimte door het monster. Het water-niveau in het reservoir moest daartoe natuurlijk enkele centimeters hoger staan dan de bovenzijde van het monster.

Gedurende circa 20 uur bleef de opstelling zo staan. Daarna werd afsluiter B gesloten. Afhankelijk van het bentonietgehalte bevond zich dan al dan niet een laagje water op het monster. Er werd vervolgens water op het monster gegoten tot iets onder de rand van de stalen ring. Afsluiter A en de klem werden vervolgens geopend, en de bepaling van het debiet kon beginnen. Het water boven het monster werd geregeld aangevuld, als dit peil gezakt was.

8.6. K r i t i s c h e k a n t t e k e n i n g e n

Tijdens de metingen, die met de proefopstelling verricht zijn, zijn een aantal nadelen gebleken. Deze worden hieronder beschreven.

1. De apparaatweerstand is hoog. Daarom is het onmogelijk de hogere doorlatendheden, die bij lage bentonietgehaltenes optreden, te meten. In dat geval blijkt ook de hoeveelheid water boven het monster te gering te zijn, zodat erg vaak water aangevuld moest worden. In weekends en 's nachts gaf dit problemen.
2. Het monster is klein. In hoeverre hierdoor de representativiteit van het monster aangetast wordt is niet duidelijk.
3. Door de swelling van de bentoniet wordt de monsterdikte groter. Dit betekent, dat het poriënvolume, waarin zich de bentoniet en het water bevindt, toeneemt. Hierdoor wordt de 'droge dichtheid' die na verdichting bereikt is, kleiner en dat is van invloed op de gemeten doorlatendheid.
Om dit tegen te gaan is een bovenbelasting van goed doorlatend zand op het monster aangebracht, die de korrelspanningen in het monster

vergroot. Deze korrelspanningen kunnen dan weerstand bieden aan de zweldruk van de bentoniet. De aangebrachte bovenbelasting van Blokzijklzand was te gering om toename van de dikte van het monster te voorkomen.

Deze nadelen leiden er echter niet toe te moeten stellen, dat de gemeten doorlatendheden onbruikbaar zijn. Ze dienen echter wel met de nodige voorzichtigheid geïnterpreteerd te worden.

In hoofdstuk 10 wordt een voorstel voor een verbeterde doorlatendheidsmeetopstelling gedaan. Deze is tijdens de stageperiode niet gebruikt, omdat het voorstel hiervoor laat in de stageperiode gereed kwam, en er een zekere ontwikkelingstijd nodig is om tot goede metingen te komen. Daarvoor ontbrak de tijd in deze stageperiode.

9. METINGEN OP BENTONIET-ZANDMONSTERS

Met de materialen, die in hoofdstuk 7 beschreven zijn, en de proefopstelling die in hoofdstuk 8 behandeld is, zijn metingen verricht op bentoniet-zandmonsters. De resultaten hiervan worden in dit hoofdstuk gepresenteerd. Allereerst worden de metingen behandeld, die verricht zijn om het effect van de bentoniet- en zandsoort en het bentonietgehalte op de doorlatendheid te bepalen. Daarna wordt de praktijkproef, die in Rosmalen gehouden is, beschreven, en worden de resultaten van een kolomproef gegeven, waarbij de indringingssnelheid van het vochtfront in een bentoniet-zandlaag bepaald is. Tenslotte wordt ingegaan op de viscositeit van bentoniet-watermengsels, omdat er aanwijzingen zijn (zie hoofdst. 4.5), dat toevoeging van bentoniet aan water tot verhoging van de viscositeit leidt.

9.1. Doorlatendheid van bentoniet-zandmonsters

9.1.1. Doel, proefopzet en resultaten

Het doel van de metingen is de invloed te leren kennen, die de gebruikte zand- en bentonietsoort en het bentonietgehalte, hebben op de doorlatendheid van bentoniet-zandmengsels. Gedurende de metingen zijn alleen deze variabelen veranderd. Verder zijn nog de volgende

opmerkingen ten aanzien van de metingen te maken:

- er is gebruik gemaakt van ontluicht, gedemineraliseerd water;
- de menging van de monsters is overeenkomstig het gestelde in par. 8.5 gedaan;
- de verzadigingsprocedure is volgens het gestelde in par. 8.5 verricht. Het verval en de tijdsduur van verzadiging zijn aangepast aan de situatie;
- de verdichting is ook volgens het gestelde in par. 8.5 gedaan. De dichtheid is berekend uit de opgemeten monsterdiktes. Deze blijkt nogal flink te variëren. In par. 9.1.2 wordt hierop dieper ingegaan;
- het stijghoogteverschil bedroeg 95 cm. Vanwege de zwelling van de monsters (variatie in monsterdikte) varieert de gradiënt tussen 55 en 80.

Er zijn verschillende combinaties gemaakt van de vier zandsoorten en de twee bentonietsoorten, die in hoofdstuk 7 beschreven zijn. Er zijn proeven verricht met vier bentonietgehalten (1,0 - 2,5 - 5,0 - 7,5 gew.%). De gemeten doorlatendheden zijn weergegeven in tabel 9.1.

Tabel 9.1. De gemeten doorlatendheden ($\ast 10^{-10}$ m/s)

Bentonietsoort: Wyoming				
Gehalte (gew.%)	Zandsoort			
	BRE	WIJS	HEI	ROS
7,5	4	2	2	3
5,0	7	- 2)	2	3
2,5	46	6	9	8
1,0 ¹⁾	>426	>477	>306	>94

Bentonietsoort: CEBO-Bond F				
Gehalte (gew.%)	Zandsoort			
	BRE	WIJS	HEI	ROS
7,5	34	7	5	6
5,0	8	6	4	4
2,5	26	7	- 2)	9

Opm.: 1) de doorlatendheid is in dit geval dermate groot, dat de apparaatweerstand een overheersende rol speelt.

2) Het verloop van het debiet in de tijd is erg grillig. Er kan geen constant debiet worden gevonden. Waarschijnlijk is er een storing in de proefopstelling opgetreden.

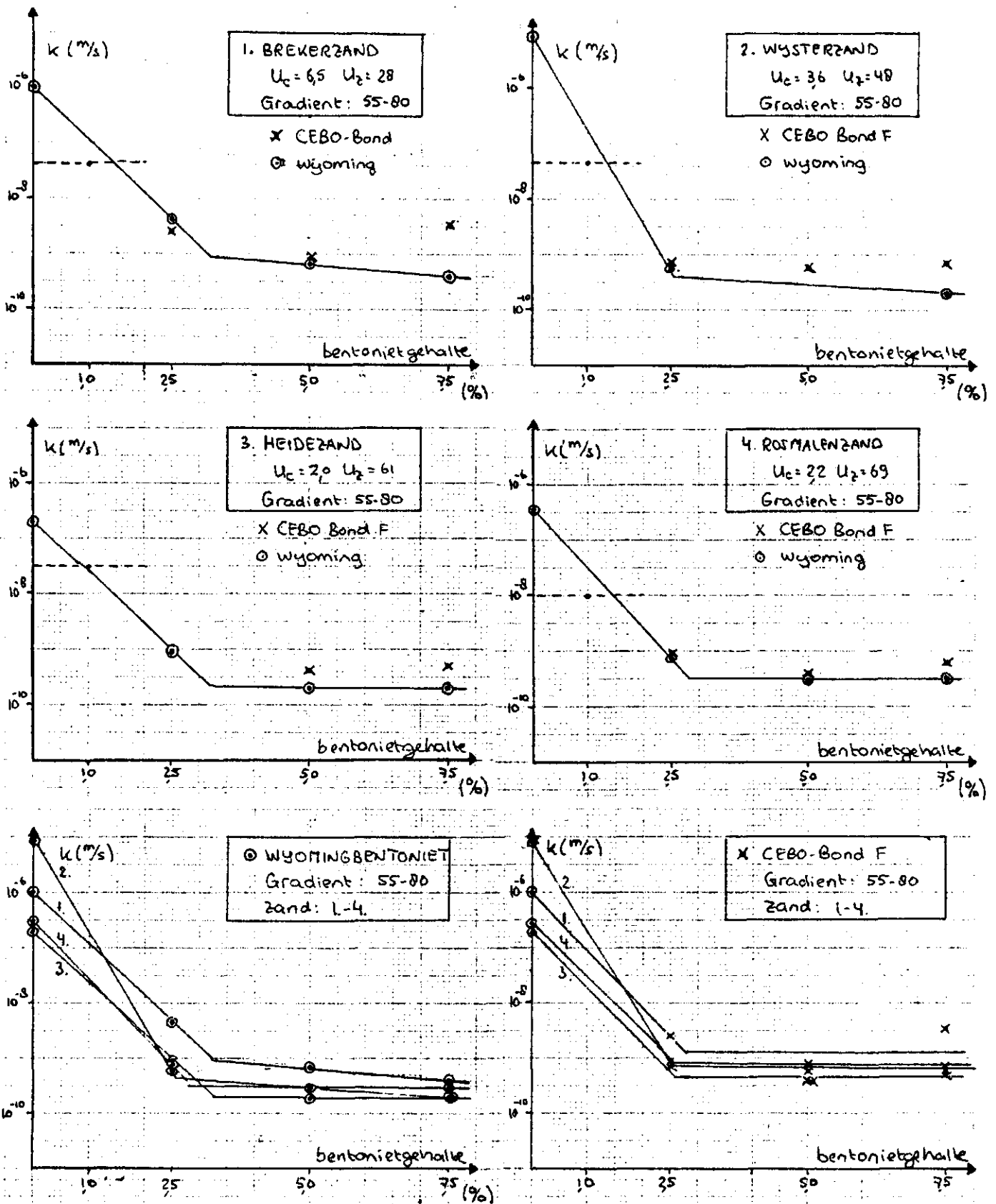


Fig. 9.1 t/m 9.6. Relatie bentonietgehalte-doorlatendheid voor vier verschillende zandsorten (fig. 9.1 t/m 9.4) en twee bentonietsoorten (fig. 9.5 en 9.6)

In de fig. 9.1 tot en met 9.6 is de relatie tussen het bentonietgehalte en de doorlatendheid weergegeven. De fig. 9.1 tot en met 9.4 geven voor één zandsoort de relatie voor beide bentonietsoorten. De fig. 9.5 en 9.6 geven voor één bentonietsoort de relatie voor de vier zandsoorten. De relatie is bepaald op grond van vier verschillende bentonietgehalten. Dit is erg weinig om definitieve conclusies te trekken. De lijnen moeten dan ook worden gezien als een voorlopige indicatie.

9.1.2. Monsterdiktes en dichtheid

In tabel 9.2 is de droge dichtheid, die direct na verdichting (ρ_{d1}) bereikt is en de geconstateerde maximale afwijking (S_1) van een viertal metingen, alsmede de droge dichtheid, tijdens de berekening van de doorlatendheid (ρ_{d2}) met maximale afwijking (S_2) opgegeven.

Tabel 9.2. Dichtheden (gemiddeld over vier zandsoorten) (g/cm^3)

Bentonietsoort	Gehalte	ρ_{d1}	S_1	ρ_{d2}	S_2
Wyoming	7,5	1,7	0,05	1,35	0,10
	5,0	1,9	0,15	1,55	0,20
	2,5	1,75	0,05	1,65	0,05
	1,0	2,0	0,10	1,9	0,05
CEBO-Bond	7,5	1,7	0,05	1,35	0,20
	5,0	1,8	0,10	1,55	0,20
	2,5	1,95	0,15	1,75	0,15

Tabel 9.3. Dichtheden (gemiddeld over alle bentonietgehalten)

	Zandsoort			
	BRE	WIJS	HEI	ROS
ρ_{d1} (g/cm^3)	1,8	1,8	1,8	1,8
S_1 (g/cm^3)	0,25	0,15	0,20	0,20

Uit deze tabellen is duidelijk de grote spreiding in de gemeten dichtheden te zien. Als oorzaken hiervoor kunnen genoemd worden:

- de onnauwkeurigheid, waarmee de monsterdikte bepaald is. Dit is met een meetlat gedaan, die een onnauwkeurigheid had van 0,5 mm;
- de verdichtingsenergie en het aantal klappen, dat met het stampertje gegeven is, is niet gestandaardiseerd;
- wanneer het bentoniet in contact komt met water, zwelt het op. De aangebrachte bovenbelasting van Blokzijlzand was onvoldoende om zwellling van de monsterdikte te voorkomen.

Er is een duidelijke afname van de dichtheid, als gevolg van de zwellling te constateren wanneer het bentonietgehalte toeneemt. Uit de verkregen gegevens is geen duidelijk verband tussen de droge dichtheid direct na verdichting (ρ_{d1}) en het bentonietgehalte af te leiden.

Het is opmerkelijk, dat de droge dichtheid (ρ_{d1}) van het bentoniet-zand (gemiddeld $1,80 \text{ g/cm}^3$) hoger is dan die van de zandsorten (zie proctorcurves fig. 7.1: 1,62; 1,68 en 1,71).

Niet duidelijk is geworden of de geconstateerde spreiding van de dichtheden ook werkelijk is opgetreden of dat dit slechts een gevolg is geweest van de meetonnauwkeurigheid.

9.2. De praktijkproef in Rosmalen

Op 5 juli 1984 is in Rosmalen een praktijkproef georganiseerd om ervaring op te doen met het aanleggen van een bentoniet-zandlaag. Dit is gebeurd met materieel, dat normaliter wordt gebruikt voor zand-cementstabilisaties in de wegenbouw.

Er is een 3-meter brede strook aangelegd van circa 50 meter lengte. De beoogde dikte was 15 cm. Er werd $13,5 \text{ kg/m}^2$ poedervormige Wyomingbentoniet toegevoegd (5 gew.%) aan het zand, dat in hoofdstuk 7 Rosmalenzand is genoemd (watergehalte 4,5 gew.%).

Door de spreidwagen werd de bentoniet uitgestrooid over het vochtige zand. Met een mengwagen werd de grond over een diepte van 15 cm omgewoeld en gemengd met bentoniet. Hierna werd met een bandenwals de bentoniet-zandlaag verdicht.

De cyclus mengen-verdichten is driemaal herhaald. Na iedere menggang en verdichting zijn met de schop monsters gestoken. De laagdikte bedroeg gemiddeld 17 cm met een spreiding van circa 3 cm. Een gedeelte

van de gestoken monsters is later in het laboratorium nagemengd. De doorlatendheid van de gestoken monsters is bepaald in de proefopstelling, die in hoofdstuk 8 is beschreven. De doorlatendheid is tweemaal gemeten. De resultaten zijn vermeld in tabel 9.4.

Tabel 9.4. Doorlatendheden ($\cdot 10^{-10}$ m/s) van monsters uit de praktijkproef (2 metingen)

1. Monsters, na 1e menggang	8	7
2. Monsters, na 2e menggang	6	6
3. Monsters, na 3e menggang	5	5
4. Idem als 1, nagemengd	5	6

Hieruit kan worden geconcludeerd, dat met toeneming van het aantal menggangen een geringe afname van de doorlatendheid optreedt. Opmerkelijk is het dat het nagemengde monster een iets hogere doorlatendheid heeft dan monster 3. De menging in het veld is dus zeker niet slechter dan die in het laboratorium.

9.3. De kolomproef

Met het bentoniet-zandmonster, dat na de 2e menggang gestoken was bij de praktijkproef in Rosmalen, is een kolomproef ingericht, zie fig. 9.7.

Het doel van de kolomproef was tweeledig:

- het meten van de indringingssnelheid van het verzadigingsfront. Door het plexiglas heen was uitstekend te zien hoe ver het bentoniet-zand verzadigd was (kleurverschil droog-nat zand);
- het bepalen van de doorlatendheid van het bentoniet-zandmonster onder een hydraulische gradiënt van 3,0 m/m.

In fig. 9.8 is het verloop van de gemiddelde indringingsdiepte over de omtrek uitgezet tegen de wortel van de tijd. Het is opvallend, dat over circa 1/3 deel van de omtrek de indringing van het vochtfront in het begin veel sneller ging dan over het resterende deel van de omtrek (vergelijk lijn \odot met lijn Δ).

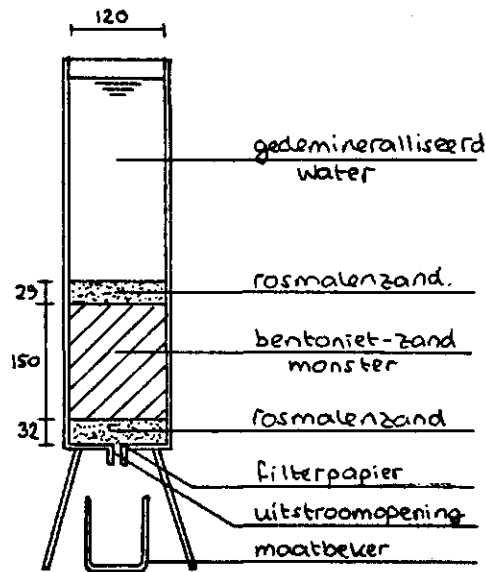


Fig. 9.7. Inrichting kolomproef

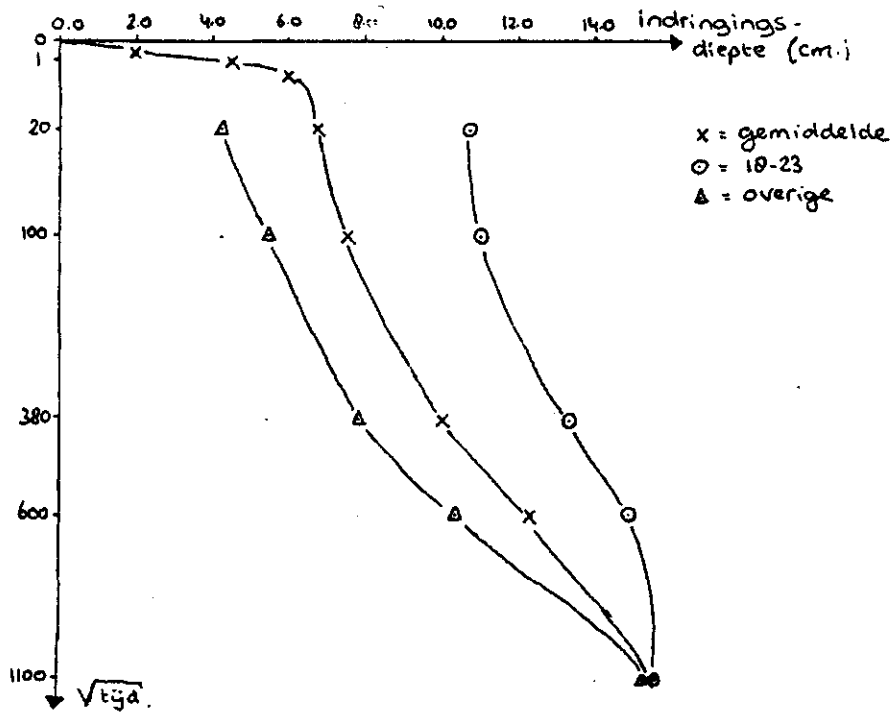


Fig. 9.8. Indringingsdiepte van het vochtfront in de kolomproef (uitgezet tegen de tijd)

Het vochtfront zakt nu veel langzamer. Boven het vochtfront is het water gebonden aan de bentoniet. Hoewel dit water sterk gebonden is zal het blijven bewegen dankzij de zeer grote 'gradiënt' ter plaatse van het scherpe vochtfront. Wanneer het vochtfront minder scherp wordt, zal het water minder snel zakken, of tot stilstand komen. Wanneer het vochtfront tot de onderzijde van het bentoniet-zandmonster komt, is onder het monster geen bentoniet aanwezig, dat water wil onttrekken en het vochtfront zal niet meer dalen.

Er zijn twee trajecten te onderscheiden in fig. 9.8. In het begin gaat de verzadiging snel. De doorlatendheid is nog hoog omdat de bentoniet enige tijd nodig heeft om water aan zich te binden. Wanneer de binding op gang komt, wordt de doorlatendheid lager en wordt de aanvoer van water belemmerd.

Over de gehele bentoniet-zandlaag (15 cm dik) heerst een stijghoogteverschil van 45 cm. Ook na twee maanden is niet geconstateerd dat onder invloed van deze gradiënt, water door het monster heen is gestroomd.

Het resultaat van deze proef sluit aan bij de theorie, uit hoofdstuk 4 en 5, dat bij lage gradiënten de doorlatendheid, lager is dan op grond van de lineaire wet van Darcy verwacht zou worden.

9.4. V i s c o s i t e i t v a n w a t e r - b e n t o n i e t m e n g s e l s

In par. 5.4 is verondersteld, dat zich in de poriën van een bentoniet-grondmengsel bentoniet en water bevindt. In par. 4.5 is gesteld dat door de adhesiekrachten, die gronddeeltjes op water uitoefenen de viscositeit schijnbaar hoger wordt.

Daarom zijn in het laboratorium enkele water-bentonietmengsels (slurries) aangemaakt, en is getracht een indruk van de viscositeit te verkrijgen. De slurrie werd daartoe in een trechttertje gedaan, waarna werd bepaald hoeveel slurrie per tijdseenheid uit het trechttertje stroomde. Dit simpele proefje is geïnspireerd op de 'marsh funnel viscosimeter'.

Het bentonietgehalte in de slurrie (y), te vergelijken met het bentonietgehalte in het poriewater, kon gerelateerd worden aan het bentonietgehalte van een bentoniet-grondmonster (x), middels de volgende formule:

$$y = \frac{\rho_s * \rho_d}{\rho_s - \rho_d} * x \quad (9.1)$$

Uitgaande van $\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$ en $\rho_d = 180 \text{ g/cm}^3$ volgt:

$$y = 5,55 * x \text{ met } y(\text{in g/cm}^3) \quad x(\text{in g/g}) \quad (9.2)$$

De slurries zijn gemaakt door aan 27 ml water een zekere hoeveelheid bentoniet toe te voegen. In tabel 9.5 zijn voor 5 slurries de hoeveelheid uitgestroomde slurrie per tijdseenheid en een omschrijving van het materiaal gegeven, plus het overeenkomstige bentonietgehalte 'x' volgens formule (9.2).

Tabel 9.5. Slurries

Nr.	y(%)	x(%)	q(ml/s)	Omschrijving
1	5,5	1,0	10	troebel water
2	8,3	1,5	1½	yoghurt
3	11,1	2,0	immobiel	slappe klei
4	13,9	2,5	immobiel	slappe klei
5	27,8	5,0	immobiel	boetseerklei

ROGERS (1963) geeft in zijn boek 'Composition and properties of oil well drilling fluids' het verband tussen 'viscosity' en het bentonietgehalte van een slurrie, zie fig. 9.9.

Uit fig. 9.9 is duidelijk te zien, dat de viscositeit van een slurrie tussen een bentonietgehalte van 6 en 10% flink toeneemt. Dit sluit goed aan bij de waarnemingen in tabel 9.5.

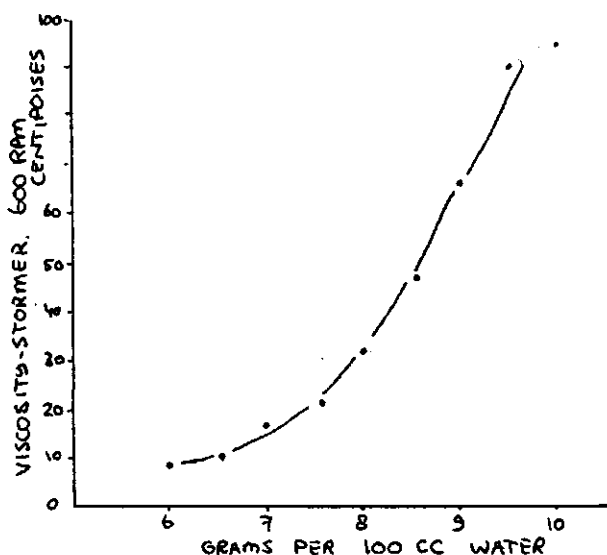


Fig. 9.9. Relatie bentonietgehalte-viscositeit in bentoniet-watremengsels (naar ROGERS)

10. HET METEN VAN DOORLATENDHEDEN

In dit hoofdstuk zal allereerst aangegeven worden hoe in het algemeen doorlatendheden van grond bepaald kunnen worden, en in hoeverre deze methoden van toepassing kunnen zijn op bentoniet-grondmengsels. Vervolgens wordt ingegaan op enkele proefopstellingen, die in Nederland gebruikt zijn bij CEBO-Holland BV, Bureau Grondmechanica van de gemeente Amsterdam en het ICW. Bovendien komen ook enkele opstellingen uit het buitenland aan de orde. Tenslotte wordt op grond van deze ervaringen in overleg met BOEYE (1984) en GROEN (1984) een voorstel gedaan voor een doorlatendheidsmeetopstelling, waarvan goede resultaten worden verwacht voor metingen op bentoniet-grondmengsels.

10.1. I n l e i d i n g

De doorlatendheid van een bentoniet-grondmengsel kan in hoofdlijn op drie verschillende wijzen worden bepaald:

- theoretisch.

Uitgaande van een aantal eigenschappen zoals de porositeit, het specifiek oppervlak, de korrelgrootteverdeling, de viscositeit van de vloeistof, wordt met behulp van een formule de doorlatendheid

berekend. Probleem hierbij is, dat de stroming van vloeistoffen door poreuze media een zeer complex verschijnsel is. Het grillige patroon van poriekkanalen speelt hierbij een rol, maar ook de verschillende eigenschappen van allerlei grondsoorten. Het is daarom moeilijk een exacte, theoretische, formule op te stellen;

- laboratoriumproeven.

In een proefopstelling wordt een relatief klein monster beproefd. Vaak zal dit onder een dusdanig stijghoogteverschil gebeuren, dat in betrekkelijk korte tijd een meetbare hoeveelheid vloeistof door het monster stroomt.

Nadeel van deze methode is, dat het monster onder andere omstandigheden wordt beproefd, dan waarin het in het veld verkeert. Het oppervlak en de dikte zijn anders, evenals de optredende hydraulische gradiënt, het watergehalte en de omgeving van het monster (representativiteit).

Voordeel is de eenvoud, de snelheid en de relatief geringe kosten waarmee metingen verricht kunnen worden;

- veldproeven.

De situatie waarin de te beproeven grond uiteindelijk zal functioneren wordt zo nauwkeurig mogelijk nagebootst. Hierdoor wordt een goede en getrouwe indruk verkregen van de uiteindelijke doorlatendheid. Er moet echter een uitgebreid onderzoeks- en meetprogramma opgezet worden. Dit kost veel tijd en geld.

Dit kan bijvoorbeeld door het opstellen van een waterbalans van een proefveld of van een lysimeter. In zo'n geval wordt nagegaan hoeveel water een afgebakend gebied binnentreedt en verlaat. Enkele bekende waterbalanstermen zijn de neerslag, de evapotranspiratie, de oppervlakkige afvoer, de grondwaterafvoer, de grondwaterberging en de drainafvoer.

10.2. L a b o r a t o r i u m p r o e v e n

In hoofdlijn kunnen drie soorten proeven onderscheiden worden:

a. de consolidatietest (oedometer)

Een grondmonster wordt door gewichten of iets dergelijks belast. De zetting van het monster wordt gemeten. Hieruit kan de doorlatendheid worden berekend, omdat de grond alleen maar kan zetten door

het uitdrijven van water uit de poriën. Deze methode is vooral geschikt voor klei en veenmonsters.

b. De constant head test

Bij deze test wordt een constante stijghoogteverschil over een monster met bekende dikte en doorsnede aangelegd. De hoeveelheid water, die onder invloed van het stijghoogteverschil door het monster stroomt, wordt gemeten. De doorlatendheid wordt berekend volgens formule (10.1).

$$K = \frac{V * d}{A * \Delta H * \Delta t} \quad (10.1)$$

met: V = hoeveelheid water (m^3)

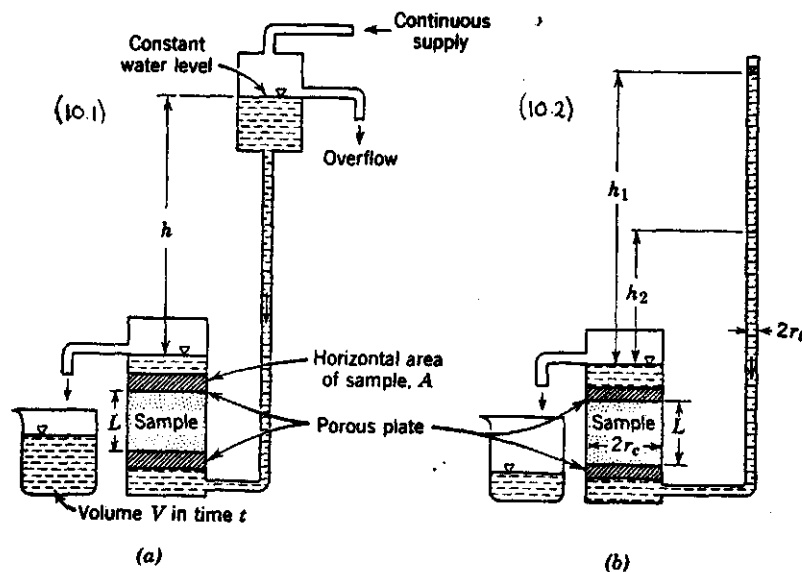
d = monsterdikte (m)

A = monsteroppervlak (m^2)

ΔH = stijghoogteverschil (m)

Δt = tijdsinterval (s)

Een voorbeeld van een constant headopstelling is gegeven in fig. 10.1.



Permeameters for measuring hydraulic conductivity of geologic samples. (a) Constant head. (b) Falling head.

Fig. 10.1. Constant head permeameter Fig. 10.2. Falling head permeameter

c. De falling head test

Bij de falling head test wordt bepaald hoeveel de stijghoogte is afgenomen in een bepaalde tijd. Fig. 10.2 toont het principe van de falling head test.

Door de tijd 't' te meten, waarin het water in de buis een vastgestelde waarde 'H' zakt, kan de k-waarde berekend worden met formule (10.2).

$$k = \frac{r^2}{R^2} * \frac{d}{\Delta t} * \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \quad (10.2)$$

Naast het onderscheid in deze drie hoofdtypen, kan ook een onderscheid worden gemaakt ten aanzien van de wand van de monsterhouder. Dit kan een stijve wand zijn, waarbij het risico van lekkage langs de wand aanwezig is.

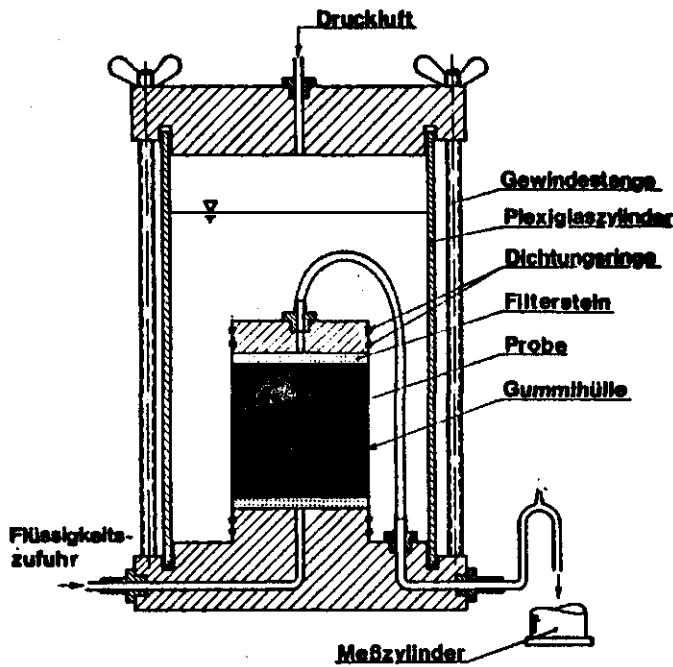
Er kan ook gekozen worden voor een flexibele wand. Bij deze zogenaamde triaxiaalcel wordt een uitwendige druk op de wand uitgeoefend. Dit geeft minder risico's voor lekkage langs de wanden.

Bij doorlatendheidsmetingen op bentoniet-grondmengsels wordt er in het algemeen vanuit gegaan, dat er geen lekkage langs de stijve wand optreedt. Aangenomen wordt dat de zweldruk van de bentoniet dermate hoog is, dat het monster zich tegen de wand aandrukt. Gelet op de toename van de monsterdikte bij de doorlatendheidsmetingen (hoofdstuk 9) lijkt dit een aanvaardbare aanname.

10.3. P r o e f o p s t e l l i n g e n

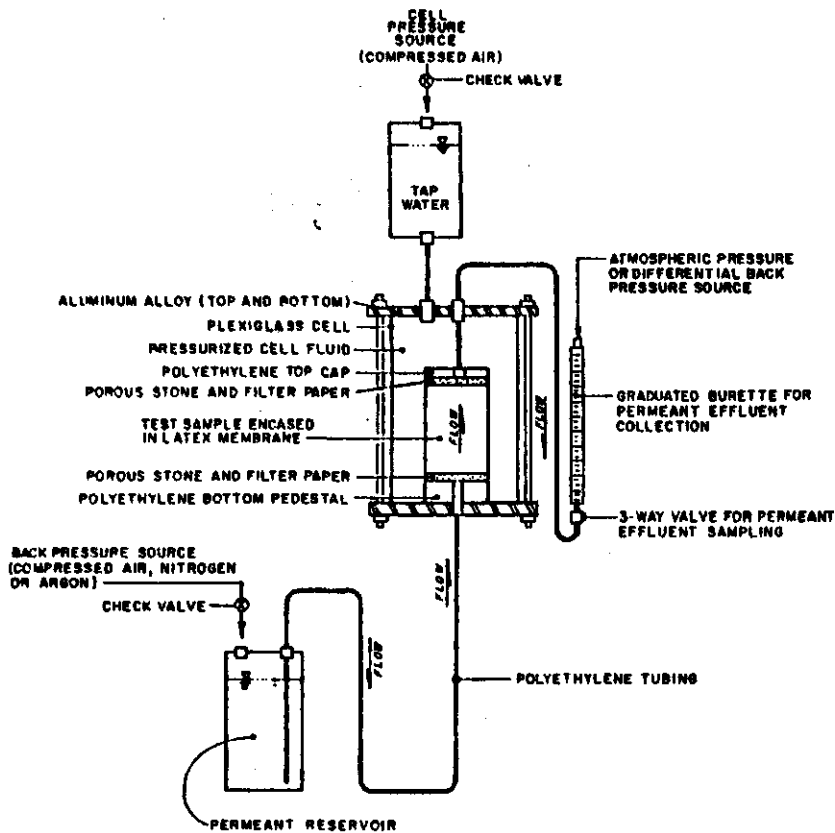
In de meeste publicaties betreffende doorlatendheidsmetingen van bentoniet-grondmengsels, wordt slechts summier melding gemaakt van de meetopstellingen, waarvan gebruik gemaakt is. In de fig. 10.3 tot en met 10.5 worden enkele afbeeldingen afgedrukt van proefopstellingen.

In Nederland zijn de auteur drie proefopstellingen bekend, waarmee doorlatendheidsmetingen op bentoniet-grondmengsels zijn verricht. In het kader van deze studie is er overleg geweest tussen drie onderzoekers, die met deze opstellingen hebben gewerkt. Doel van dit overleg was het uitwisselen van ervaringen om te komen tot een voorstel voor een 'nieuwe' proefopstelling.



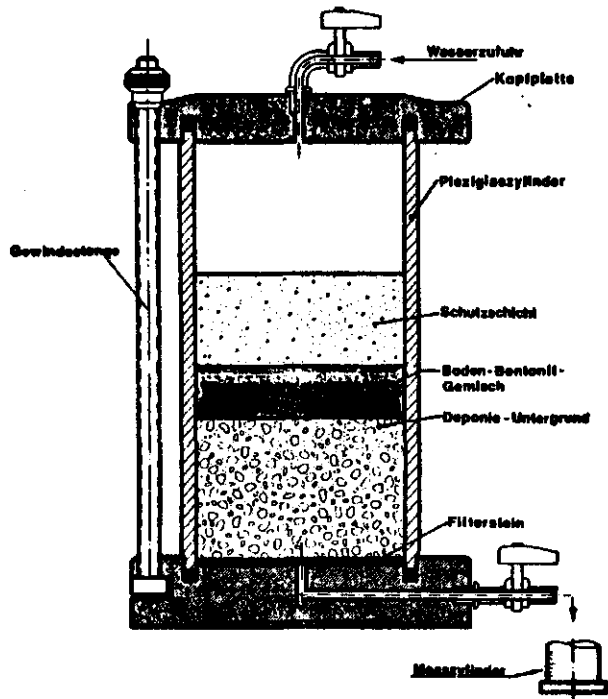
Prüfzelle für Bentonit-Zement-Gemische oder
Bentonit-Boden-Gemische

Fig. 10.3. Doorlatendheid meetopstelling (HÄNSEL)



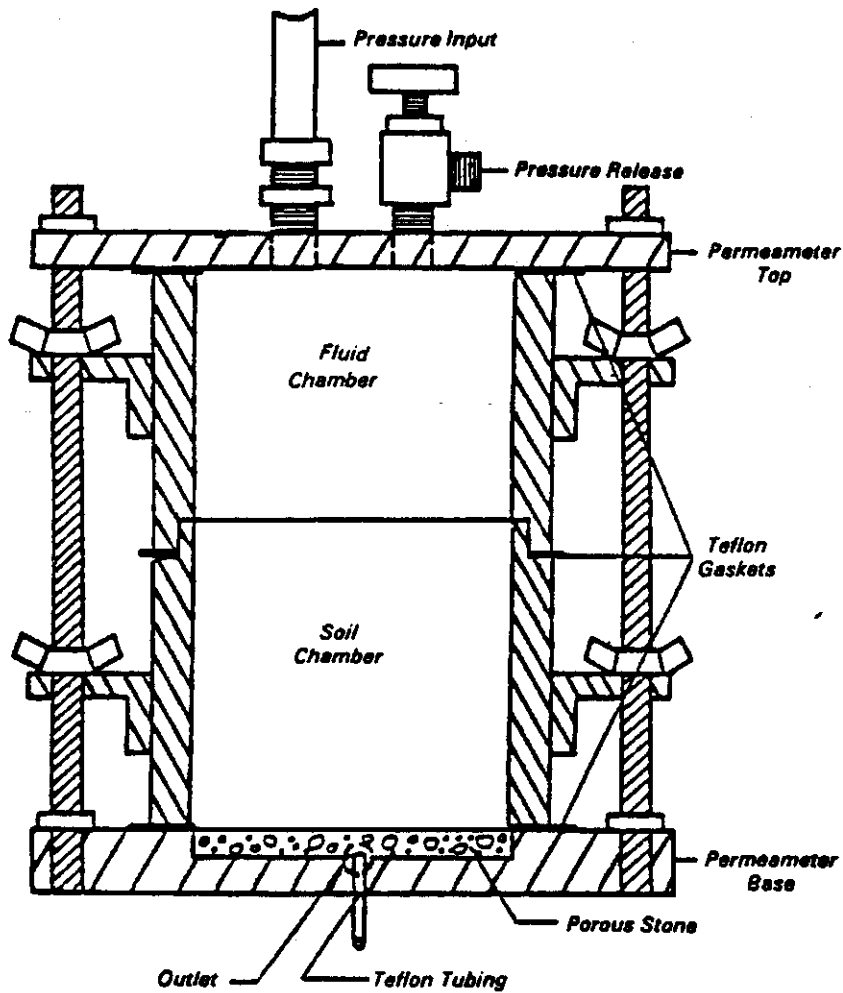
—Schematic of a constant head triaxial cell hydraulic conductivity test system.

Fig. 10.4. Doorlatendheid meetopstelling (HAJI-DJAFARI & WRIGHT)



Prüfzelle für Bentonit-Sand-Mischungen

Fig. 10.5. Doorlatendheidsmeetopstelling (HÄNSEL)

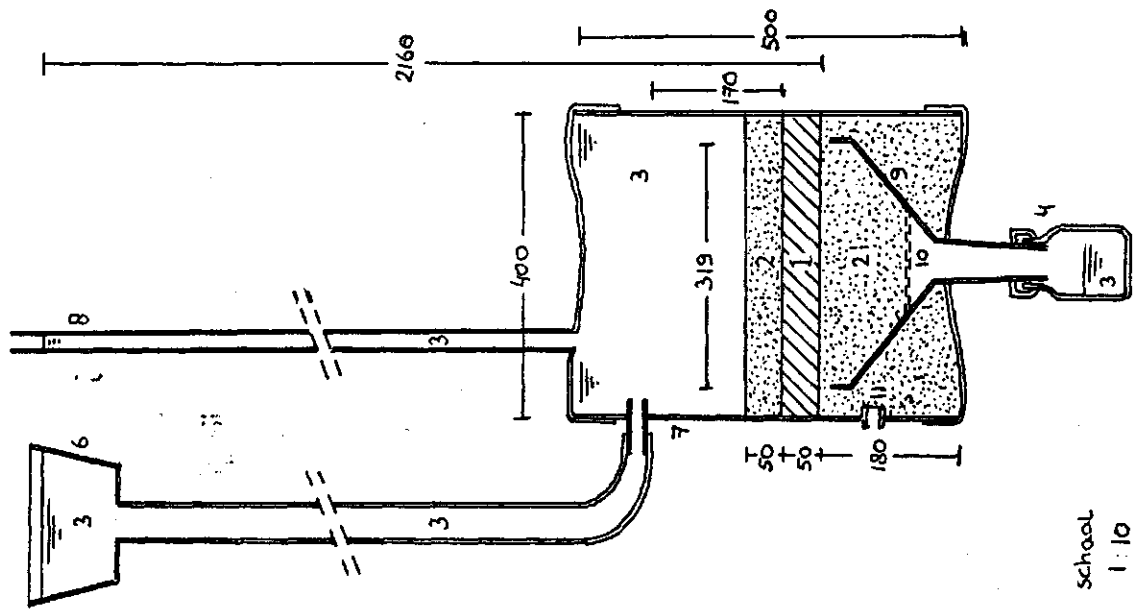


Schematic of the consolidation permeameter.

Fig. 10.6. Doorlatendheidsmeetopstelling (BROWN & ANDERSON)

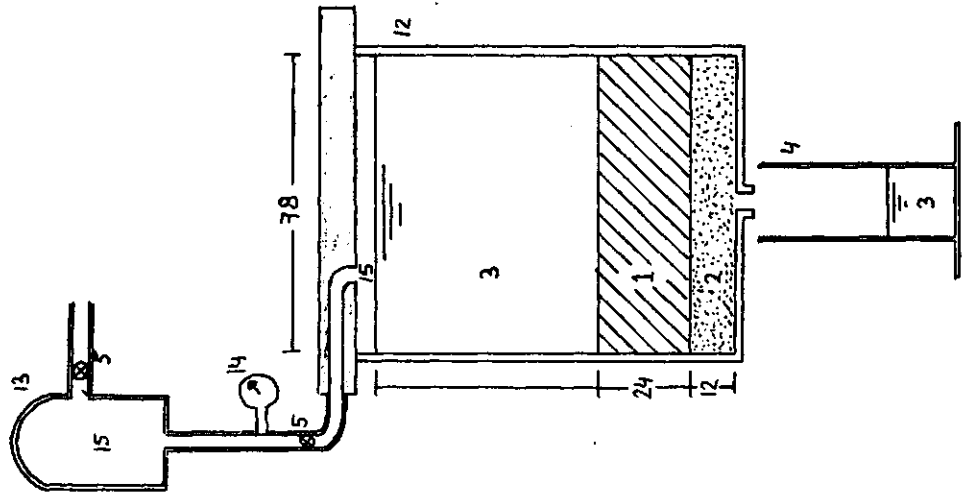
PERMEAMETERS VOOR BENTONIET-GRONDMONSTERS

Bureau Grondmechanika A'dam :



Schaal 1:10

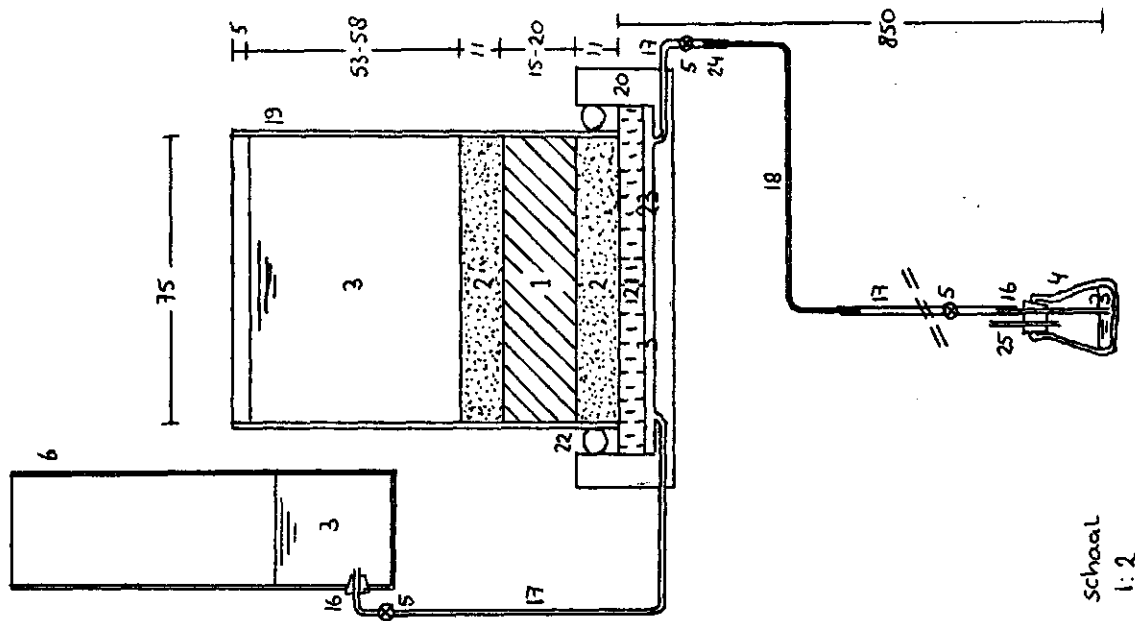
CEBO Uluiden :



Schaal 1:2

alle maten in mm.

ICW Wageningen :



Schaal 1:2

Fig. 10.7. Permeameters voor bentoniet-grondmonsters

Door GROEN zijn metingen verricht bij CEBO-Holland BV, BOEIJE heeft proeven gedaan bij Bureau Grondmechanica van de Gemeente Amsterdam. Deze proeven zijn vergeleken met de proefopstelling, die besproken is in hoofdstuk 8. In fig. 10.7 zijn de opstellingen gegeven. In tabel 10.1 zijn enkele karakteristieke gegevens vermeld; in tabel 10.2 is de verklaring van de cijfers uit fig. 10.7 opgenomen.

Tabel 10.1. Gegevens

	Amsterdam	CEBO	ICW
Monsteroppervlakte (cm ²)	799,2	47,4	44,2
Monsterdikte (mm)	50	22-26	15-19
Stijghoogteverval (cm)	17 of 216	0-500	95
	waterdruk	luchtdruk	waterdruk
	overdruk	overdruk	onderdruk
Gradiënt (m/m)	3,4 of 43	190-230	50-65
Verloop gradiënt	constant	oplopend	constant
Filtermateriaal	grof	grof	fijn

Tabel 10.2. Legenda bij fig. 10.6

1. bentoniet-zandmeter	14. drukmeter
2. filtermateriaal	15. lucht
3. water	16. kurk
4. opvangbeker	17. flexibele slang
5. afsluiter, kraan	18. meetslang \varnothing 0,5 mm ²
6. waterreservoir	19. stalen ring
7. PVC-vat	20. perspex houder
8. peilbuis	21. poreuze porseleinen plaat
9. trechter	22. rubberen ring
10. zeef	23. verzamelruimte
11. aftapkraan wandeffect	24. ontkoppeling
12. AP1-standardcel	25. ontluchting
13. luchtdruksysteem	

De drie opstellingen zijn met elkaar vergeleken aan de hand van de gemeten doorlatendheden en de ervaringen tijdens de meting. Daarnaast zijn ook de methode van menging, verdichting en verzadiging vergeleken.

De belangrijkste nadelen van deze opstellingen worden hier opgesomd. De monsterafmetingen zijn vrij klein bij CEBO en het ICW. Dit kan de representativiteit van de monsters aantasten. De apparaatweerstand van de opstellingen bij de CEBO en het ICW maakt metingen met lage bentonietgehaltenes (hoge doorlatendheden) onmogelijk. Hierdoor is het moeilijk met deze apparatuur de relatie tussen bentonietgehalte en doorlatendheid vast te stellen.

Bij beide opstellingen wordt afname van de 'droge dichtheid' van het monster door zwellings niet voorkomen. Amsterdam heeft hiertoe een bovenbelasting aangebracht. Ogenschijnlijk was die voldoende groot om effect te sorteren.

Belangrijkste nadeel van de opstelling van Bureau Grondmechanica Amsterdam is, dat het moeilijk is bij verschillende (constant te houden) gradiënten te meten. Het meten bij verschillende gradiënten wordt voor bentoniet-grondmengsels aanbevolen om de doorlatendheid bij lage gradiënten te kunnen voorspellen. Daarnaast blijkt het bij deze opstelling, ondanks de grote monsteroppervlakte, toch moeilijk om onder de gebruikte gradiënt een meetbaar debiet te verkrijgen bij hoge bentonietgehaltenes.

Rekening houdend met genoemde nadelen, zijn de positieve eigenschappen van de drie opstellingen gecombineerd tot een voorstel voor een 'nieuwe' opstelling. Dit is gebeurd tijdens een gesprek tussen BOEIJE, GROEN en GLAS, nog voordat kennis was genomen van de opstellingen in de fig. 10.3 t/m 10.6.

10.4. V o o r s t e l v o o r e e n ' n i e u w e ' p r o e f o p - s t e l l i n g

Het voorstel dat in bijlage I beschreven wordt is 'op papier' ontstaan. De opstelling en de voorgestelde werkwijze dienen nog in de praktijk getest te worden en vergeleken met resultaten en ervaringen van reeds bestaande methoden.

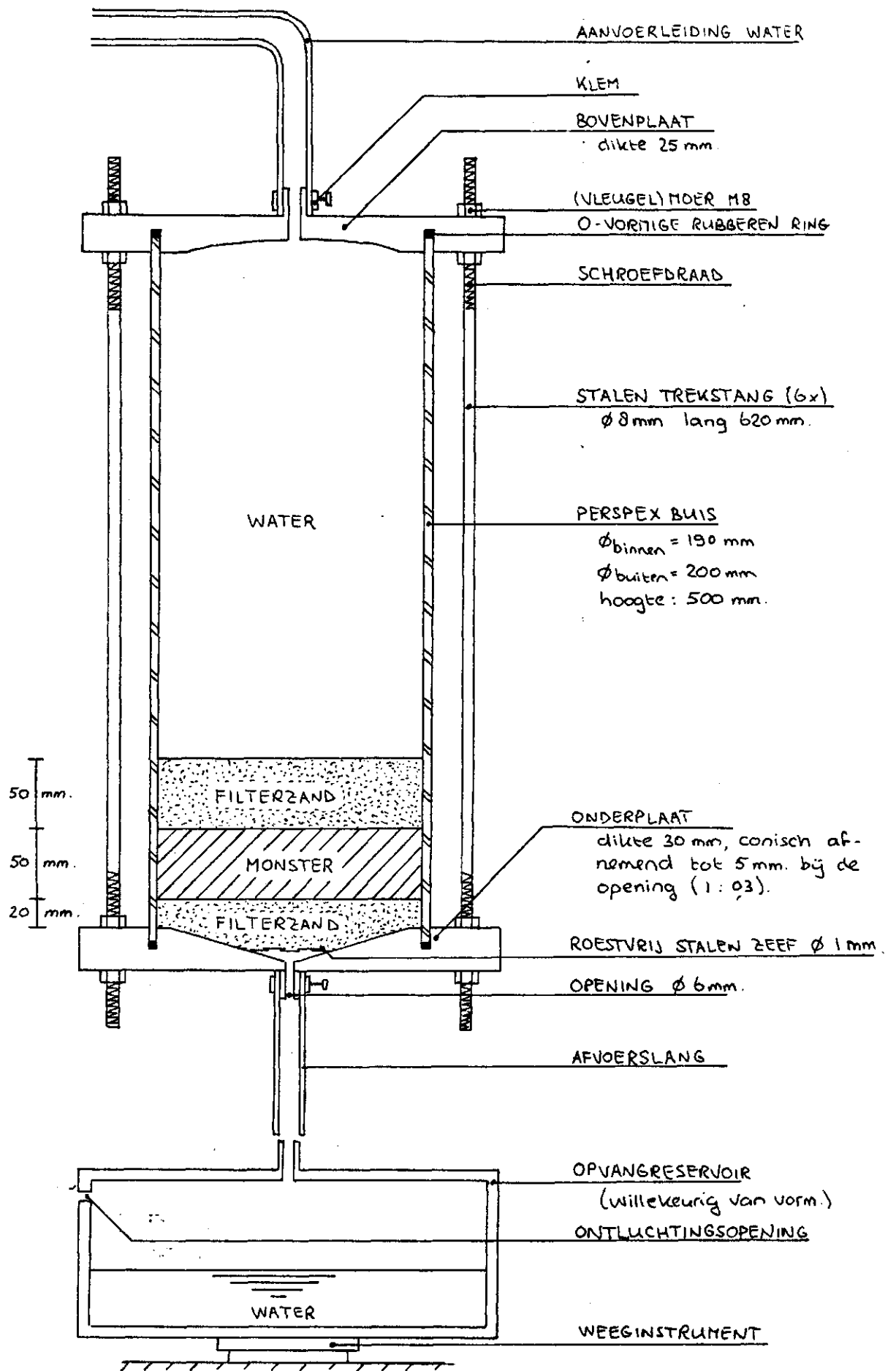


Fig. 10.8. Overzichtstekening doorlatendheidsmeetopstelling (voorstel)

11. CONCLUSIES

1. Toepassingsmogelijkheden

Mengsels van bentoniet en grond kunnen toegepast worden als afdichtingsmateriaal op afvalstortterreinen. Daarbij kunnen drie mogelijkheden onderscheiden worden:

- a. verticale wand
- b. horizontale of hellende basisafdichting
- c. horizontale of hellende bovenafdichting.

De eerste twee toepassingen hebben tot doel te voorkomen, dat verontreinigd percolatiewater in contact komt met het grond- en/of oppervlaktewater in de omgeving van het stortterrein. De derde toepassing dient om de hoeveelheid verontreinigd percolatiewater te verminderen. Deze studie heeft zich met name gericht op toepassing 'b' en 'c'.

2. De belangrijkste eisen

De belangrijkste eis, die aan een afdichtingslaag gesteld wordt, is dat de waterdoorlatendheid niet hoger mag zijn dan een van te voren vastgestelde waarde, òf dat de jaarlijkse hoeveelheid doorgelaten water lager is dan een vastgestelde waarde.

Belangrijke aanvullende eisen zijn, dat de doorlatendheid in de loop van de tijd niet boven de voorgeschreven waarde komt vanwege chemische aantasting of door vervorming als gevolg van zettingen.

In deze studie is voornamelijk aandacht besteed aan de invloed van diverse ontwerpvariabelen op de doorlatendheid. De invloed van chemische aantasting en het vervormingsgedrag is slechts zijdelings aan de orde gekomen, maar is zeker zeer belangrijk voor het slagen van het ontwerp van een afdichtingslaag (zie conclusie 11 en 12).

3. Opbouw korrelskelet van een verdichte bentoniet-grondlaag

Vanwege de geringe afmetingen (deeltjesgrootte overwegend kleiner dan 20 μm) zullen de bentonietdeeltjes nauwelijks een bijdrage leveren aan de opbouw van een korrelskelet in een verdichte bentoniet-grondlaag. Het korrelskelet wordt opgebouwd door de grondkorrels. De bentoniet bevindt zich in de poriën tussen de korrels.

In een verzadigd bentoniet-grondmengsel bevindt zich derhalve een mengsel van water en bentoniet in de poriën.

4. Een stromingsmodel voor bentoniet-grond

Bentoniet kan door een systeem van diffuse dubbellagen water aan zich binden. Het water is niet overal even sterk gebonden. Dichtbij het oppervlak van het bentonietdeeltje is het water zeer sterk gebonden, maar met het toenemen van de afstand tot het bentonietdeeltje neemt de bindingssterkte (adhesiespanning) af.

Wanneer over een bentoniet-grondlaag een stijghoogteverschil wordt aangebracht, zal het niet gebonden water kunnen stromen. Ook het water, waarvan de adhesiespanning ten gevolge van de grotere afstand tot een bentonietdeeltje kleiner is dan de schuifspanning, die door het stijghoogteverschil, in het water wordt veroorzaakt, zal gaan bewegen.

Door verhoging van het stijghoogteverschil (c.q. de hydraulische gradiënt) zal de schuifspanning in het water toenemen. Hierdoor zal een groter deel van het water aan de stroming deelnemen, aangezien de adhesiespanningen gelijk blijven. Theoretisch is aangetoond (zie hoofdst. 5), dat zolang adhesiespanningen een rol spelen, er een niet-lineair verband bestaat tussen de filtersnelheid en de hydraulische gradiënt in de wet van Darcy. In dat geval is de grootte van de doorlatendheid afhankelijk van de hydraulische gradiënt.

5. Optreden van een drempelwaarde voor de gradiënt

Bij geringe hydraulische gradiënten is het voorstelbaar dat de schuifspanning in het water, in alle poriën kleiner is dan de minimale adhesiespanning, die door de bentoniet wordt veroorzaakt. In dat geval zal in het geheel geen waterstroming optreden. Er is een aanvangsgradiënt nodig om een begin van waterstroming te verkrijgen in de poriën.

De grootte van de aanvangsgradiënt is afhankelijk van het bentonietgehalte, de porositeit en het zwelvermogen van de bentoniet.

6. Relatie bentonietgehalte-doorlatendheid bij percentages lager dan 3%

Door middel van doorlatendheidsmetingen met behulp van de proefopstelling, die in hoofdstuk 8 beschreven is, is een indicatie verkregen van de relatie tussen het bentonietgehalte en de doorlatendheid, zie de fig. 9.1 tot en met 9.6.

Tot een bentonietgehalte van circa 3% wordt een logaritmisch verband gevonden, zoals weergegeven in de formule:

$$\log k = -\frac{1}{a} * x + \log k_g \quad (11.1)$$

met: x = bentonietgehalte
 k = doorlatendheid
 k_g = doorlatendheid van de grond
 a = constante

Ook anderen (HAUSER (1978), LUNDGREN (1981), D'APPOLONIA (1980), HANSEL (1981) en SCHMITT (1983)) vinden een min of meer logaritmisch verband tussen de doorlatendheid en het bentonietgehalte. Deze relaties zijn echter ook vastgesteld op grond van betrekkelijk weinig metingen.

De constanten a en k_g zijn onder andere afhankelijk van de grondsoort. Bij de eerder genoemde onderzoekers wordt een grote spreiding in de waarden voor a en k_g aangetroffen.

7. Relatie bentonietgehalte-doorlatendheid bij hogere percentages

Boven een bentonietgehalte van circa 3% wordt bij de doorlatendheidsmetingen, die in het kader van deze studie verricht zijn, vrijwel geen verdere daling van de doorlatendheid waargenomen.

Hiervoor kunnen verschillende oorzaken worden genoemd, zoals

- a. Door opzwellling van het monster, is de droge dichtheid gedaald, en het totale porievolume toegenomen. Het bentonietgehalte in de poriën neemt hierdoor nauwelijks toe, = bij hogere bentonietgehaltenes in het monster, zodat de adhesiespanningen in de poriën vrijwel gelijk blijven. De doorlatendheid neemt daarom nauwelijks meer af.
- b. Vanwege de adhesiekrachten, die de bentoniet uitoefent, wordt een schijnbare viscositeit geïntroduceerd. De viscositeit van bentoniet-watermengsels neemt tussen 6 en 10 gew.% bentonietgehalte sterk toe, zie fig. 9.9. Dergelijke bentonietgehaltenes in het poriewater worden bereikt bij 1 tot 2% bentoniet in de bentoniet-zandmonsters. Bij hogere bentonietgehaltenes zal de viscositeit waarschijnlijk minder snel toenemen. Dit viscositeitsgedrag van water-bentoniet-mengsels sluit goed aan bij het doorlatendheidsgedrag van de bentoniet-zandmengsels.

8. De invloed van de grondsoort

In tabel 11.1 zijn de waarden van de constanten uit formule 11.1 gegeven voor de proeven, die in het kader van deze deelstudie zijn verricht.

Tabel 11.1.

	Wyoming		CEBOBOND		
	k_g (m/s)	a	a	U_z	U_c
Brekerzand	$1 * 10^{-6}$	1,08	0,96	28	6,5
Wijsterzand	$9 * 10^{-6}$	0,59	0,62	48	3,6
Heidezand	$2 * 10^{-7}$	1,08	0,97	61	2,0
Rosmalenzand	$3 * 10^{-7}$	0,95	1,02	69	2,2

Het is duidelijk, dat de doorlatendheid van het gebruikte zand (k_g) in het mengsel van grote invloed is op de relatie tussen doorlatendheid en het bentonietgehalte. Deze bepaalt immers de startwaarde ($x = 0$).

Er is geen duidelijk verband tussen de waarde voor 'a' (de hellingshoek) en het specifieke oppervlakte van de zandfractie (U_z). Wanneer het bentonietgehalte hoger is dan circa 3%, is de invloed van de zandsorten veel geringer, zie fig. 9.1 t/m 9.6. Bezien in het licht van de nauwkeurigheid van een doorlatendheidsmeting en het brede scala, waarin doorlatendheden van grond zich kunnen bevinden (10^{-3} t/m 10^{-11} m/s), zijn de doorlatendheden, die met de gebruikte zandsorten worden bereikt, nagenoeg gelijk.

D'APPOLONIA (1980) heeft gevonden, dat de doorlatendheid bij gelijk bentonietgehalte lager is voor een grondsoort met veel kleine, met name zwellende, deeltjes, zoals silt en klei. Ook in de publicatie van JESSBERGER (1983) zijn hiervoor aanwijzingen te vinden.

Bij hogere bentonietgehaltenes neemt het effect van de gebruikte grondsoort echter af, zie D'APPOLONIA (1980). Dit is verklaarbaar door ervan uit te gaan, dat bij hogere bentonietgehaltenes het aanwezige poriënvolume niet zo belangrijk meer is, omdat alle water toch al door een zekere minimale adhesiespanning is gebonden.

9. De invloed van verdichten

Door verdichting wordt het poriënvolume verkleind. Aannemende dat de bentoniet zich ook in de poriën bevindt, wordt door verdichting het bentonietgehalte in het poriënwater hoger.

Niet het bentonietgehalte in het monster of de afdichtingslaag, maar het bentonietgehalte in het poriewater, bepaalt de mate van

binding van het water aan de bentoniet. Door verdichting wordt het water in de poriën dus sterker gebonden en zal een hogere gradiënt nodig zijn om dezelfde hoeveelheid water te laten bewegen.

De bereikte porositeit (dichtheid) van een bentoniet-grondmengsel is afhankelijk van de verdichtingsenergie, de grondsoort en het watergehalte waaronder verdichting gerealiseerd wordt. Hierdoor is het duidelijk, dat de grondsoort en de wijze van verdichting van invloed zijn op de grootte van het bentonietgehalte in het poriewater en dus ook op de relatie tussen doorlatendheid en bentonietgehalte en de relatie tussen doorlatendheid en hydraulische gradiënt.

10. De invloed van bentonietsoorten

Bentonietsoorten met een hoger zwelvermogen, zullen bij lagere bentonietgehaltes reeds al het poriewater gebonden hebben. Bij hogere bentonietgehaltes zal het water in de poriën sterker gebonden zijn (hogere adhesiespanningen), en zal derhalve een grotere gradiënt nodig zijn om dezelfde hoeveelheid water in beweging te zetten.

11. Chemische bestendigheid

Wanneer percolaatwater uit een stortplaats voor huishoudelijk en daarmee vergelijkbaar afval door de bentoniet-grondlaag stroomt kunnen de in het percolaatwater opgeloste stoffen het systeem van diffuse dubbellagen aantasten. De verhoging van de doorlatendheid, die dit tot gevolg kan hebben, blijkt uit diverse metingen, niet drastisch te zijn (factor 2 tot 10).

Wanneer organische vloeistoffen door een bentoniet-grondlaag stromen, nemen deze vloeistoffen de plaats van het water in. Dit kan leiden tot enorme krimpverschijnselen, veranderingen in de plaatjesstructuur van bentoniet en het uitspoelen van vaste deeltjes. Deze verschijnselen gaan gepaard met een grote toename van de doorlatendheid (tot een factor 104).

Aanbevolen wordt om bij toepassing van bentoniet-grondlagen als onderafdichting doorlatendheidsproeven te verrichten met dezelfde vloeistof, die in de veldsituatie aanwezig zal zijn.

12. Invloed vervormingen

Door vervormingen kan plaatselijk de porositeit toenemen en derhalve het bentonietgehalte in het poriewater dalen. Dit kan leiden tot een lagere adhesiespanning in de poriën.

Hierdoor zal meer water door de laag kunnen stromen. De doorlatendheid wordt hoger. Omtrent dit fenomeen zijn in dit onderzoek geen kwantitatieve gegevens verkregen. Het is aan te bevelen meer bentoniet toe te voegen aan een bentoniet-grondlaag dan strikt noodzakelijk is, om aan de doorlatendheidseis te voldoen, wanneer de kans op vervormingen aanwezig is.

13. De invloed van de gradiënt

Eerder is gesteld, dat een niet-lineaire relatie tussen de filtersnelheid 'v' en de hydraulische gradiënt 'i' verwacht kan worden voor bentoniet-grondlagen volgens deze formule

$$v = a_m * i^m \quad (m > 1) \quad (11.2)$$

Aangezien de exponent (m) groter dan 1 is, zal door het verlagen van de hydraulische gradiënt de hoeveelheid water die door een laag stroomt meer dan evenredig afnemen. Het is zelfs niet uitgesloten, dat in de praktijk afhankelijk van het bentonietgehalte en de porositeit, de gradiënt beneden de drempelwaarde voor de gradiënt ligt, zodat in het geheel geen waterstroming optreedt.

14. Proefopstelling voor doorlatendheidsmetingen op bentonietgrond; meten van doorlatendheden

Met de proefopstelling, die in hoofdstuk 10 beschreven is, mag worden verwacht dat de doorlatendheid van bentonietgrond goed te meten is. De opstelling dient nog wel in de praktijk getest te worden en te worden vergeleken met andere opstellingen en metingen. Het opgeven van doorlatendheden van bentoniet-grondmengsels zonder vermelding van de hydraulische gradiënt en de bereikte droge dichtheid heeft weinig betekenis. De doorlatendheid van bentoniet-grondmonsters dient bij meerdere gradiënten bepaald te worden om inzicht te krijgen in het gedrag bij lage gradiënten.

15. Nader onderzoek, toepasbaarheid als afdichtingslaag

Het niet-lineaire verband tussen filtersnelheid en hydraulische gradiënt zal beter onderzocht moeten worden. Tot nu toe is dit verband slechts theoretisch aangetoond. Metingen bij lage gradiënten worden aanbevolen volgens de in conclusie 14 genoemde methode.

Wanneer hieruit volgt, dat de doorlatendheid van bentoniet-grondmengsels bij lage gradiënten practisch nul is, verdient het aanbeveling meer onderzoek te verrichten naar vervormingen (vooral bij toepassing als bovenafdichting) en chemische bestendigheid (toepassing als onderafdichting), opdat bentoniet-grondmengsels als volwaardig alternatief voor kunststoffolies en bitumenmembranen beschouwd kunnen worden.

LITERATUUR

- ALBIKER, B., 1983. Die dichtung einer abfalldeponie und einer Fäkal schlammbehandlungsanlage in Schleswig-Holstein, Kiel. uit: Süd Chemie Fachtagung Deponietechnik, Hamburg
- ALTHER, G.R. The role of bentonite in soil sealing applications. Illinois
- ANDERSON, D.C. and K.W. BROWN, 1980. Effects of organic chemicals on clay liner permeability: a review of the literature (EPA-600/9-80-010) Texas
- _____ and K.W. BROWN, 1983. Effects of organic solvents on the permeability of clay soils (project summary) (EPA-600/S-2-83-016) Texas
- _____ and K.W. BROWN, 1981. Organic leachate effect on the permeability of clay liners (classes of waste and a test method) (EPA-600/9-81-002B) Texas
- _____ , K.W. BROWN and J. GREEN, 1982. Effect of organic fluids on the permeability of clay soil liners (tests on four clay soil cores) (EPA-600/9-82-002) Texas
- BECHTE, W. Grundlagen für die abdichtung von deponien mit ton. Regierungspräsidium, Stuttgart
- BEUKERS, A., 1975. Afval. Antwerpen
- BOUTWELL, G.P. and V.R. DONALD, 1982. Compacted clay liners for industrial waste disposal. Las Vegas
- BOUWER, K., J. KLAVER en M. DE SOET, 1983. Nederland stortplaats? Nijmegen
- BROWN, K.W., J. GREEN and J.C. THOMAS, 1983. The influence of selected organic liquids on the permeability of clay liners (laboratory and field tests). (EPA-600-9-83-018), Texas
- _____ J. GREEN and J.C. THOMAS, 1984. Permeability of compacted soils to solvent mixtures and petroleum products (EPA-600/9-84-007)
- BUSCH, KARL FRANZ und LUDWIG LUCKNER, 1972. Geohydraulik. Leipzig
- DAM, J.C. VAN, e.a., 1980. Waterhuishouding (diktaat). Delft
- D'APPOLONIA, DAVID S., 1980. Slurry trench cut off walls for hazardous waste isolation. Pittsburgh
- DIETRICH, THOMAS, 1978. Determination of permeability of mineral deposit bases at low hydraulic gradients, Berlijn

- GÖDECKE, H.J., 1980. Flieszgesetz für die Porenwasserdurchströmung feinkörniger Böden. Uit: Die Bautechnik 6/1980, Bochum
- HAJI DJAFARI, S. and J.C. WRIGHT jr., 1983. Determining the long term effects of interactions between waste permeants and porous media. Philadelphia
- HAMIDON, A.B., 1984. Organic leachate effects on the stability and hydraulic conductivity of compacted kaolinite. Louisiana
- HÄNSEL, W., 1982. Entwicklung und eigenschaften von basisabdichtungen. Uit: Mitteilungen des Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik: Dichtungswände und -sohle Braunschweig
- HAUSER, V.L., 1977. Seepage control by particle size selection. Michigan
- HEIDEMIJ, 1982. Natuurlijke afdichtingsmaterialen, Arnhem
- HERMANN, D.J. and S.B. TUTTLE, 1984. Performance studies of various landfill and impoundment liners, Wisconsin
- HOEKS, J. en G. AGELINK, 1982. Vermindering van de infiltratie van regenwater in afvalstortterreinen, Wageningen
- INSTITUUT VOOR BODEMKUNDE RIJKSUNIVERSITEIT, 1980. Basisbegrippen van de bodemkunde, Utrecht
- JESSBERGER, H., R. BEINE und W. EBEL, 1983. Herstellung von basisabdichtungen für mulldeponien mit Waschberge, Bochum
- KARACHI, G. and I.V. NAGY, 1961. Investigations into the validity of the linear seepage laws, Budapest
- LUNDGREN, T.A., 1981. Some bentonite sealants in soil mixed blankets. Int. Conference, Stockholm
- REIMER, H., 1971. Mullplanet Erde, Hamburg
- ROGERS, W.F., 1963. Composition and properties of oil well drilling fluids, Houston
- SCHMITT, G., 1983. Mineralische abdichtungen durch bentonit-ton gemische mit natürlichen boden, Koblenz. Uit: Haus der Technik, Essen
- SCHOOTEN, J. VAN, 1982. Wegenbouwmaterialen (diktaat), Delft
- SIMONS, H., W. HÄNSEL und H. MESECK. Beständigkeit von deponiedichtungen aus ton gegen sickerwasser, Braunschweig
- SLEPICKA, F., 1961. The laws of filtration and limits of their validity, Praag
- STEFFEN, H., 1981. Möglichkeiten der Basisabdichtung von Mülldeponien unter besonderer Berücksichtigung zusammengesetzter mineralischer Abdichtungen aus Erdbaustoffen. Uit: Haus der Technik, Essen

- STEFFEN, H., 1979. Abdichtung von Mülldeponien unter Verwendung von örtlich anstehenden Materialien, dargestellt an Beispiel einer Deponie der Stadt Bonn. Uit: Kommunalwirtschaft 1/79, Essen
- TODD, D.K., 1982. Groundwater hydrology, New York
- US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1984. Slurry trench construction for pollution migration control, Cincinnati
- VERRUYT, A., 1983. Grondmechanica, Delft
- _____, 1983. Grondwatermechanica (diktaat), Delft

SYMBOLENLIJST

a	=	constante
A	=	oppervlakte (L^2)
α	=	constante
c	=	concentratie ($M.L^{-3}$)
C	=	constante
d	=	monsterdikte (L)
d_i	=	korreldiameter (L)
D	=	equivalente korreldiameter (L)
g	=	valversnelling ($L.T^{-2}$)
G	=	gewicht ($M.L.T^{-2}$)
γ	=	volumegewicht ($M.L^{-2}.T^{-2}$)
h	=	diepte/hoogte (L)
H	=	stijghoogte (L)
i	=	hydraulische gradiënt ($L.L^{-1}$)
K	=	doorlatendheid ($L.T^{-1}$)
K^*	=	intrinsieke doorlatendheid ($T.L^{-1}$)
m	=	constante
μ	=	dynamische viscositeit ($M.T.L^{-1}$)
η	=	kinematische viscositeit ($L^2.T^{-1}$)
n	=	porositeit ($L^3.L^{-3}$)
R	=	Reynoldsgetal
p	=	poriewaterspanning ($M.T^{-2}.L$)
Q	=	debiet ($L^3.T^{-1}$)
r	=	straal van een cirkel (L)
ρ	=	dichtheid ($M.L^{-3}$)
σ	=	spanning ($M.L^{-1}.T^{-2}$)
t	=	tijd (T)
U	=	maat voor specifiek oppervlak ($L^2.M^{-1}$)
v	=	snelheid ($L.T^{-1}$)
V	=	volume (L^3)
W	=	watergehalte ($M.M^{-1}$)
x	=	bentonietgehalte in grond ($M.M^{-1}$)
y	=	bentonietgehalte in poriewater ($M.L^{-3}$)
ψ	=	vochtspanning (L)

1. Beschrijving van de proefopstelling

De opstelling is opgebouwd uit een 50 cm hoge perspex buis, die een buitendiameter van 200 mm heeft, en een binnendiameter van 190 mm, zie fig. 10.8.

Aan de bovenzijde is deze buis afgesloten met een 2,5 cm dikke bovenplaat. In het midden van deze plaat is een opening gelaten, waar een aanvoerleiding voor water op aangesloten wordt. Aan de onderzijde van de bovenplaat is een cirkelvormige groef gemaakt, waar een rubberen O-ring wordt ingelegd. De groef is 5 mm breed en 10-15 mm diep. De binnendiameter is 190 mm, zodat de perspex buis precies in de groef past.

De buis wordt aan de onderzijde afgesloten door een 30 cm dikke onderplaat, die aan de bovenzijde conisch in dikte afneemt tot 0,5 cm. In het midden is een opening gemaakt van 6 mm doorsnede. Ook in de onderplaat wordt een identieke groef, zoals in de bovenplaat, aangebracht.

De onder- en bovenplaat worden aan elkaar verbonden door zes trekstangen, die aan boven- en onderzijde zijn voorzien van schroefdraad. Door het aandraaien van (vleugel)moeren worden onder- en bovenplaat aan elkaar verbonden om te voorkomen, dat onder invloed van de grote (water)druk in de perspex buis, de bovenplaat loslaat van de buis.

In de conisch aflopende ruimte van de onderplaat wordt een roestvrij stalen zeef met openingen \emptyset 1 mm horizontaal gelegd. Deze zeef moet voorkomen, dat filterzand of deeltjes van het monster door de opening wegspoelen. Deze ruimte is conisch gemaakt om het water, dat door het monster heenstroomt, naar de opening te geleiden.

Op de zeef wordt filterzand aangebracht tot 2 cm boven de onderplaat. Deze laag wordt onder verzadiging van water verdicht. Voor het aanbrengen van het monster wordt het water weer grotendeels verwijderd. Als filterzand wordt een grof zand gebruikt, waarvan de korreldiameters overwegend tussen 1 en 2 mm liggen.

Op het filterzand wordt het monster aangebracht (zie par. 10.4.5). Daar komt opnieuw een (5 cm dikke) laag filterzand bovenop, die moet voorkomen, dat de monsterdikte door zwelling toeneemt. Tijdens de metingen is de buis verder aangevuld met water. Dit water kan worden toegevoerd door middel van de aanvoerleiding. Dit moet voorzichtig gebeuren om het monster niet te verstoren.

Bijlage I vervolg

De wateraanvoerleiding is aangesloten op één of twee waterreservoirs, waarin het water onder druk gebracht kan worden. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren met behulp van luchtdruk uit een gasfles of een ander luchtdruksysteem. Het voordeel van twee waterreservoirs is, dat het water in één van de reservoirs kan worden bijgevuld, zonder de luchtdruk in het andere reservoir weg te nemen.

Het opvangsysteem voor het doorgelekte water dient zodanig ontworpen te worden, dat geen verdamping van water kan optreden. Worts verdient het aanbeveling tot een continue registratie van het debiet te komen.

2. Werkingsprincipe

Het water boven het monster kan onder druk gezet worden. Onder het monster heerst de atmosferische druk. Onder invloed van het stijghoogteverschil ten opzichte van de onderzijde van het monster, zal een verticale stroming door het monster plaats vinden. De snelheid, waarmee deze stroming plaatsvindt is afhankelijk van de monsterdikte " d ", het stijghoogteverschil " ΔH " en de doorlatendheid van het monster " k ".

Het water dat door het monster en de filterlagen heen gestroomd is, gaat door de opening en wordt daar opgevangen. De hoeveelheid opgevangen water (V) per tijdseenheid (Δt) is het debiet (Q).

Wanneer het water boven het monster niet onder druk wordt gebracht, zal hierin de hydrostatische waterdruk heersen. Onder invloed hiervan zal ook stroming optreden. Op deze manier kan ook bij lage gradiënten worden gemeten.

3. Berekening van de doorlatendheid

Het debiet " Q " kan worden bepaald door de gewichtstoename " ΔG " van het opvangreservoir in de tijd " Δt " te bepalen. Uitgaande van het soortelijk gewicht van water (1 g/cm^3) kan de hoeveelheid water " V " worden berekend. Wanneer het debiet in de loop van de tijd nagenoeg constant geworden is, kan de doorlatendheid worden berekend met formule (3):

$$k = \frac{Q * d}{A * \Delta H} * 2,778 * 10^{-6} \quad (\text{m/s}) \quad (3)$$

met: $Q = \Delta G / \Delta t$ (cm^3 / uur)
 $A =$ monsteroppervlak ($283,4 \text{ cm}^2$)
 $d =$ monsterdikte (5 cm)
 $\Delta H =$ stijghoogteverval (in cm)

De bereikte droge dichtheid " ρ_d " wordt berekend met formule (4):

$$\rho_d = \frac{(1 - W) * G_n}{0,25 * \pi * D^2 * d} = 6,63 * 10^{-4} * G_n \quad (\text{g/cm}^3) \quad (4)$$

met: $G_n =$ nat gewicht, dat nodig is om een 5 cm dik monster te maken (gram)
 $W =$ watergehalte van het monster bij verdichting (6,0 gew.%)
 $D =$ monsterdiameter (19 cm)

4. Menging van het monster

In een dwangmeter wordt gedurende één minuut 3,0 kg zand of grond met 180 gram water (6 gew.%) gemengd. Aan de vochtige grond wordt de gewenste hoeveelheid bentoniet toegevoegd. Het bentonietgehalte wordt bepaald ten opzichte van het gewicht van de droge grond. De bentoniet wordt gedurende 1½ minuut in de dwangmenger door de grond gemengd, opdat een homogeen mengsel ontstaat.

5. Aanbrengen en verdichten

De gemengde bentonietgrond wordt in twee lagen van 2,5 cm aangebracht en verdicht. Verdichting kan gebeuren met behulp van een vlakspaan, waarvan het oppervlak 1/3 van het monsteroppervlak is.

De gerealiseerde verdichting wordt berekend met formule (4).

6. Verzadiging

Verzadiging wordt bereikt door op het monster maximaal 10 cm water aan te brengen. Deze verzadigingsprocedure mag worden beëindigd, wanneer aan de onderzijde gedurende één uur water stroomt, of wanneer na 24 uur nog geen doorstroming optreedt.

Mogelijk kan ook van onderen af water worden toegevoegd, ter verzadiging bijvoorbeeld met behulp van een reservoir en een slangetje, dat aangesloten wordt op de "uitstroomopening". Voordeel hiervan is, dat de lucht uit de porieën makkelijker weg kan.

7. Meting van het debiet

Na beëindiging van de verzadigingsprocedure kan de perspex buis worden aangevuld met water tot de gewenste hoogte. Wanneer luchtdruk op het water wordt aangebracht, wordt de perspex buis eerst tot de rand gevuld, waarna de bovenplaat wordt bevestigd.

In enkele stappen wordt de luchtdruk in het waterreservoir verhoogd tot de gewenste waarde. Opgelet moet worden, dat de druk niet te snel wordt verhoogd, omdat anders uitspoeling van bentoniet uit het monster kan optreden. Het is raadzaam de druk in 3 à 4 stappen te verhogen, en voor elke stap één dag te nemen.

Wanneer de gewenste hydraulische gradiënt aangebracht is, wordt het verloop van het debiet in de tijd gemeten. Wanneer het debiet nagenoeg constant geworden is, kan de doorlatendheid, die bij de opgelegde gradiënt hoort, worden bepaald.

Aanbevolen wordt om van hetzelfde monster de doorlatendheid ook te bepalen voor enkele lagere gradiënten. De gradiënt kan in enkele stappen worden verlaagd. Bij iedere nieuwe gradiënt zal zich opnieuw een constant debiet moeten instellen.

Door de doorlatendheid bij meerdere waarden van de hydraulische gradiënt te bepalen, kan een indruk verkregen worden van het gedrag van de doorlatendheid bij lage gradiënten. Het zal waarschijnlijk sterk van het bentonietgehalte en de droge dichtheid afhangen bij welke gradiënt sprake is van niet-lineariteit in de wet van Darcy.