ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

ALTERRA,
Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

ICW nota 1722
juli 1986

nota

instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen

ZAND-BENTONIET MENGSELS ALS AFDICHTINGSMATERIAAL VOOR VUILSTORTPLAATSEN

Scriptie in het kader van een zesmaands doctoraalvak Cultuurtechniek

J.R. Hofkamp

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-middelen, dus geen officiële publikaties.
Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten.
Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra Wageningen UR

ALTERRA
Wageningen Universiteit & Research centrum
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

VOORWOORD

In Nederland dringt per jaar gemiddeld een neerslagoverschot van 300 mm de grond in. Wanneer er zich afvalstoffen op of in de grond bevinden, bestaat de kans dat door oplossen van afvalbestanddelen in het percolerende water, grondwater en bodem in de omgeving van een vuilstortplaats vervuild worden.

Verschillende maatregelen daartegen zijn mogelijk. Nieuwe stortplaatsen dienen volgens overheidsbeleid aan de I.B.C.-criteria te voldoen (Richtlijnen voor Gecontroleerd Storten, Min. V.R.O.M., 1984). Dit houdt in dat het systeem afvalstort wordt geïsoleerd, beheerst en gecontroleerd (Isoleren, Beheersen, Controleren). Voor reeds gesloten stortplaatsen moeten contrôle- en beheersmaatregelen genomen worden met betrekking tot de waterhuishouding.

Het meeste perspectief in het kader van de I.B.C.-criteria blijkt de aanleg van een slechtdoorlatende laag onder en/of boven het afval te bieden, in combinatie met een drainagesysteem.

Met betrekking tot de aan te leggen afdichtlaag wordt op het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding te Wageningen (I.C.W.) onderzoek gedaan naar het meest geschikte materiaal daarvoor. Als goed geschikt natuurlijk materiaal kwam daarbij een mengsel van zand en bentoniet naar voren, mits op de juiste wijze samengesteld en behandeld.

Veel onderzoek hiernaar is inmiddels verricht door Huub Glas in het kader van zijn stage op het I.C.W.. Zijn onderzoek heeft echter, zoals alle onderzoek, weer nieuwe vragen opgeroepen.

Het was daarom de bedoeling om gedurende de periode van 1 april tot 1 oktober 1985 in het kader van mijn zesmaands-doctoraalvak Cultuurtechniek enkele onderwerpen verder uit te diepen. Hierbij is dankbaar gebruik gemaakt van de onderzoeksresultaten van Huub Glas.

Tevens wil ik dr.ir.J.Hoeks en ir.E.v.d.Bogaard bedanken voor hun waardevolle begeleiding en voor het feit dat zij deze stage voor mij mogelijk maakten.

Jeannette Hofkamp
Wageningen, mei 1986.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

INHOUD

	blz.
VOORWOORD	i
SAMENVATTING	iv
1. ALGEMENE PROBLEEMSTELLING	1
1.1. De waterbalans van een afvalstortplaats	1
1.1.1. Beperking van de infiltratie	2
1.1.2. Opvang van percolatiewater	3
1.2. Selectie van afdichtmateriaal	3
1.2.1. Eisen aan de afdichtlaag	3
1.2.2. Mogelijke opbouw van de afdeklaag	5
1.3. Doelstelling van het onderzoek	5
2. METHODIEK EN RESULTATEN VAN EERDER ONDERZOEK	6
2.1. Zand-bentoniet mengsels als afdichtmateriaal	6
2.1.1. Werkingsprincipe	6
2.1.2. Resultaten van eerder onderzoek	9
2.2. Methodes en technieken	12
2.2.1. Gebruik van de wet van Darcy	12
2.2.2. Opzet van de kolomexperimenten	15
3. NIET-DARCY STROMING IN ZAND-BENTONIET MENGSELS	17
3.1. Literatuuronderzoek naar de geldigheid van de wet van Darcy	17
3.2. Experimenten met zand-bentoniet mengsels	24
3.3. Meetresultaten	26
3.4. Interpretatie	30
3.5. Evaluatie van de nieuwe permeameter	31
3.6. Conclusies inzake de geldigheid van de wet van Darcy	31

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

blz.

4. HET BENTONIETGEHALTE VAN ZAND-BENTONIET AFDICHTINGSLAGEN 32
4.1. Experimenten met zand-bentoniet mengsels 32
4.2. Meetresultaten 34
4.3. Interpretatie 35
4.4. Conclusies inzake de invloed van het bentoniet-gehalte op de doorlatendheid van zand-bentoniet mengsels 37

5. DE CHEMISCHE BESTENDIGHEID VAN ZAND-BENTONIET MENGSELS 37
5.1. Experimenten met zand-bentoniet mengsels 37
5.2. Meetresultaten 38
5.3. Interpretatie 45
5.4. Conclusies inzake de chemische bestendigheid van zand-bentoniet mengsels als basisafdich-ting 46

6. CONCLUSIES 47

7. LITERATUUR 48

BIJLAGEN

ICW-nota 1722
Thema Integraal Waterbeheer
Alterra, Wageningen UR

SAMENVATTING

ALTERRA,
Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Onderzoek Integraal Waterbeheer

Onderhavig verslag vormt een onderdeel van het onderzoek naar maatregelen ter beperking van de grondwater- en bodemvervuiling in de omgeving van vuilstortplaatsen.

Mogelijke aangrijpingspunten daarvoor zijn :

- opvang en zuivering van vuil percolatiewater uit het afval doormiddel van een ondoorlatende laag onder het afval alsmede een drainagesysteem boven deze onderafdichting,
- opvang van infiltratiewater naar het afval door een slechtdoorlatende laag boven het afval alsmede een drainagesysteem om het water af te voeren.

De eisen die aan de afdichtlaag gesteld worden, bepalen de keuze van het materiaal. Deze eisen zijn :

- voor onderafdichting : - waterdicht;
  - goede chemische bestendigheid;
- voor bovenafdichting : - $k = 5.10^{-10}$ m/s, of kleiner;
  - goede fysische bestendigheid.

Als goed geschikt natuurlijk materiaal kwam uit onderzoek naar voren een mengsel van bentoniet, een sterk zwellende kleisoort, met zand. De werking van dergelijke mengsels als afdichtmateriaal berust op de electromolekulaire krachten die er heersen tussen het doorstromende water en de klei uit het mengsel. Het water wordt gebonden aan de klei, die vervolgens opzwelt, de poriën in het mengsel opvult en op die manier de doorlatendheid verkleint.

Voor de aanleg van zand-bentoniet afdichtingslagen gelden de volgende ontwerpvariabelen :

- zandsoort en verdichting
- bentonietsoort en bentonietgehalte
- laagdikte

In voortzetting van onderzoek door HOEKS en AGELINK (1982), HOEKS en RYHINER (1985) en GLAS (1984), is in dit onderzoek aandacht besteed aan de volgende onderwerpen :

- de geldigheid en het gebruik van de wet van Darcy voor stroming van water door zand-bentoniet mengsels,
- de invloed van het bentonietgehalte en de bentonietsoort op de doorlatendheid van zand-bentoniet mengsels en het benodigde bentonietgehalte van deze mengsels als bovenafdichtingslaag,

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

- de chemische bestendigheid van zand-bentoniet mengsels als onderafdichting.

DE GELDIGHEID VAN DE WET VAN DARCY

Doordat electromolekulaire krachten tussen water- en kleideeltjes werkzaam zijn werd verwacht dat stroming van water door zand-bentoniet mengsels een soort van vertraging zou oplopen en zich daardoor niet volgens de wet van Darcy zou gedragen. De stroomsnelheid zou dan afhankelijk zijn van de aangelegde druk (gradiënt) en van het feit of die in staat is de electromolekulaire krachten te overwinnen. Met behulp van een nieuwe permeameter (GLAS (1984)) werd dit getest.

Inderdaad bleek de stroming afhankelijk te zijn van de gradiënt en de doorlatendheid (k) bijgevolg voor dit medium niet constant over een range van gradiënten. Laboratoriummetingen zoals doorlatendheid kunnen daarom niet zondermeer als voorspelling van de veldsituatie dienen.

Dit gradiënt-effect op de doorlatendheid wordt echter beïnvloed door het feit dat bentoniet enige tijd nodig heeft om tot volledige zwelcapaciteit te komen (ca. 2 maanden).

HET BENTONIETGEHALTE

De doorlatendheid van monsters met 5 dr.gew.% bentoniet (i = 5 à 10 ; dichtheid 1,77 gr/cm^3) bedroeg voor Wyomingbentoniet na minimaal 20 dagen zwel 0,01 mm/d, en voor Geactiveerde Europese bentoniet na minimaal 30 dagen zwel 0,03 mm/d, hetgeen beide onder de gestelde norm voor bovenafdichting ligt. Bij mogelijkheid tot beschadiging van de laag kan meer bentoniet gewenst zijn, wat een extra zwelcapaciteit geeft.

DE CHEMISCHE BESTENDIGHEID

Vooraf verzadigen van de onderafdichtlaag met "schoon"water bleek de bestendigheid van die laag tegen "vuil"water te vergroten. Nader onderzoek met betrekking tot het gewenste bentonietgehalte en de laagdikte voor basisafdichtingen is nog nodig.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

ALTERRA
Wageningen Universiteit & Research centr
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

1. ALGEMENE PROBLEEMSTELLING

In dit hoofdstuk wordt een eerste indruk gegeven van de mogelijkheden om de vervuiling van grondwater en bodem in de omgeving van een vuilstortplaats te beperken. Eveneens zal de doelstelling van dit onderzoek uiteengezet worden.

1.1. De waterbalans van een afvalstortplaats

Vervuiling van grondwater en bodem in de omgeving van een afvalstortplaats wordt veroorzaakt door infiltratie van vervuild percolatiewater uit het afval in onderliggende bodem en grondwater. Isolatie en beheersing van de waterhuishouding van een stort (I.B.C.-criteria) kunnen de vervuiling van een stortplaats-omgeving beperken.

De waterbalans van een stort zoals schematisch weergegeven in figuur 1. kan worden beschreven als :

$$P = N - E - R - A - \Delta B_1 - \Delta B_2 \qquad (1)$$

waarin : P = percolatie
N = neerslag
E = verdamping
R = oppervlakte-afvoer
A = zijdelingse afvoer door de afdeklaag
B_1 = berging van de afdeklaag
B_2 = berging van het afval

Deze waterbalansvergelijking kan als volgt in twee delen geschreven worden :

$$I = N - E - R - A - \Delta B_1 \qquad (1a)$$
$$P = I - \Delta B_2 \qquad (1b)$$

waarin : I = infiltratie

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

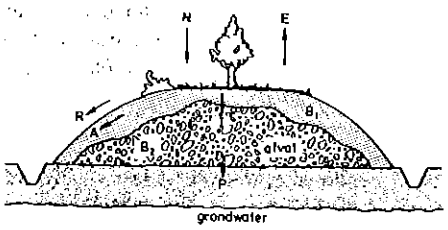


Fig. 1. Schematische voorstelling van de waterbalans van een afvalstort, met de termen: neerslag (N), verdamping (E), oppervlakte-afvoer (R), zijdelingse afvoer door de afdeklaag (A), berging in de afdeklaag (B_1) en in het afval (B_2), en percolatie (P) (HOEKS en AGELINK (1982)).

Beperking van de vervuiling van grondwater kan dus op twee plaatsen aangepakt worden, ten eerste door beperking van de hoeveelheid infiltratie (I), ten tweede door opvang van het percolatiewater (P) en zuivering daarvan.

1.1.1. Beperking van de infiltratie

Uit de waterbalans (1a) is op te maken dat de hoeveelheid infiltratiewater wordt bepaald door de hoeveelheid neerslag (N), de verdamping (E), de oppervlakte-afvoer (R), de zijdelingse afvoer door de afdeklaag (A) en de bergingscapaciteit van de afdeklaag(B_1). Door beheersing van deze waterbalanstermen kan in principe de hoeveelheid infiltratiewater worden beïnvloed.

De meest reële oplossing blijkt te zijn het bevorderen van de zijdelingse afvoer door de afdeklaag (HOEKS en AGELINK (1982)). Onder normale omstandigheden is deze zijdelingse afvoer van weinig betekenis. Bevordering hiervan is mogelijk door beperking van de doorlatendheid in vertikale richting, waardoor een (schijn)grondwaterspiegel ontstaat, en er afvoer in horizontale richting mogelijk wordt. Als de bovengrond slecht ontwaterd is, en de grondwaterspiegel tot in het maaiveld stijgt, kan gevaar voor erosie ontstaan, vooral op steile hellingen. Daarom moet naast beperking van de doorlatendheid in vertikale richting, door een slechtdoorlatende laag, de ontwateringstoestand van de bovengrond verbeterd worden met een drainagesysteem.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

1.1.2. Opvang van percolatiewater

Een andere manier om de vervuiling van grond en grondwater in de nabijheid van een vuilstortplaats te beperken is door opvang en zuivering van het percolatiewater uit het afval alvorens dat te lozen op het oppervlaktewater.

Hiertoe kan onder het afval een horizontale basisafdichting aangelegd worden, welke het percolatiewater opvangt, met daarboven een drainagesysteem om het percolatiewater af te voeren naar een zuiveringsinstallatie.

Nadeel is, dat een dergelijke basisafdichting alleen mogelijk is aan te leggen op nieuwe stortplaatsen en voor er afval gestort wordt. Verder zijn er later in geval van lekkage geen reparatie werkzaamheden mogelijk.

1.2. Selectie van afdichtmateriaal

1.2.1. Eisen aan de afdichtlaag

De eisen waaraan het afdichtmateriaal moet voldoen, hangen samen met de functie van de afdichtlaag.

Bij een basisafdichting wordt volledige waterdichtheid geëist. Verder worden er aan het materiaal hoge eisen gesteld met betrekking tot de chemische bestendigheid, daar het in contact komt met het vervuilde percolatiewater waarin diverse organische en anorganische verbindingen voorkomen.

Wat betreft bovenafdichtingen is de chemische bestendigheid van het materiaal van minder belang aangezien deze alleen in contact komen met regenwater. Wel belangrijk is de fysische bestendigheid. Door vertering en afbraak van het afval kunnen grote onregelmatige zakkingen optreden. Er wordt daardoor veel gevraagd van de rek- en treksterkte van het materiaal in drie dimensies. Bovendien moet de afdichtingslaag bestand zijn tegen beschadiging door plantewortels en bodemdieren.

Met betrekking tot de doorlatendheid van bovenafdichtingen wordt de eis gesteld dat de jaarlijkse infiltratie van regenwater in het afval minder dan 50 mm moet zijn (HOEKS en AGELINK (1982)).

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

Tabel 1 : De jaarlijkse lekkage door een afdichtende laag als functie van de doorlaatfactor (Nederlandse omstandigh.) (HOEKS en AGELINK (1982)).

Doorlaatfactor (mm/dag)	Stijghoogte-gradient	Afvoerperiode (dag/jaar)	Jaarlijkse lekkage (mm/jaar)
2,0	1-1,2	150	300
1,0	1,5	180	250
0,5	2	200	200
0,2	3	200	120
0,1	4	200	80
0,05	5	200	50
0,02	6	200	25

In tabel 1 is af te lezen dat onder Nederlandse omstandigheden de doorlaatfactor van het materiaal voor de afdichtlaag kleiner moet zijn dan 0,05 mm/dag (5.10^{-10} m/s). Bij het testen van materialen voor bovenafdichtingen wordt deze doorlaatfactor als norm gehanteerd.

Tabel 2 : Overzicht van enkele materialen en hun bruikbaarheid als afdichting op stortplaatsen met betrekking tot de gestelde eisen per soort afdichtlaag.
(- onvoldoende/slecht ; + goed)

	bovenafdichting		onderafdichting	
materialen	doorl.factor	fys.best.	waterd.	chem.best.
leem, klei	-	?	-	?
grond/cement	+	-	-	-
grond/vliegas	-	-	-	-
zand/bitumen	-	+	-	-
zand/bentoniet	+	+	?	?
waterglas	+	+	?	-
kunststoffolie	+	-/+	+	-/+

In tabel 2 wordt een overzicht gegeven (bewerking naar literatuuronderzoek) van verschillende materialen die getest zijn op hun bruikbaarheid als afdichtmateriaal, met gebruikmaking van die eisen die hiervoor besproken zijn, ingedeeld naar type afdichtlaag.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

1.2.2. Mogelijke opbouw van de afdeklaag

Op grond van onderzoeksresultaten, (HOEKS en AGELINK (1982)), zou de afdeklaag als volgt kunnen worden opgebouwd (figuur 2) :

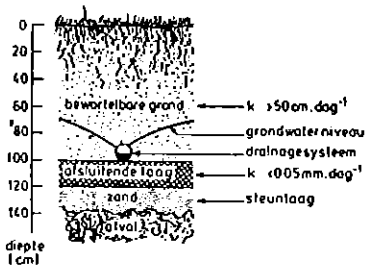


Fig.2. . Schematische opbouw van een afdeklaag met een afsluitende laag, waarbij de infiltratie in het stort minder is dan 50 mm.jaar^{-1} (HOEKS en AGELINK (1982)).

- een steunlaag van 15 à 20 cm, bestaande uit grond waaraan geen speciale eisen worden gesteld;
- een afdichtingslaag bestaande uit een synthetisch product of een zand-bentoniet mengsel; de dikte van de laag is afhankelijk van de materiaalkeuze, terwijl de verzadigde doorlatendheid kleiner moet zijn dan 5.10^{-10}m/s;
- een drainagesysteem boven de afdichtingslaag waarvan de drainafstand en andere karakteristieken afhankelijk zijn van eigenschappen van de afdeklaag en de helling, volgens een formule van Ernst;
- een laag bewortelbare grond van ongeveer 1m; deze grond dient een redelijke vochtbergingscapaciteit te hebben en de verzadigde doorlatendheid moet in verband met de drainageafvoer groter zijn dan 50 cm/dag.

1.3. Doelstelling van het onderzoek

Opzet van het door het I.C.W. gestarte onderzoek inzake afdichtingslagen voor vuilstortplaatsen was in eerste instantie het zoeken naar methodes en materialen die daarvoor het meest geschikt waren. Met behulp van modelberekeningen en veld- en

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

laboratorium-experimenten werd getracht eisen en grenswaarden voor materialen, die in aanmerking kwamen, vast te stellen.

Omdat zand-bentoniet mengsels daarbij als veelbelovend naar voren kwamen, heeft verder onderzoek zich daarop toegespitst.

GLAS (1984) heeft aan de hand van literatuuronderzoek en oriënterend laboratoriumonderzoek aandacht besteed aan de ontwerpvariabelen van zand-bentoniet mengsels als afdichtlaag (par.2.1). De resultaten van dat onderzoek waren aanleiding voor het hier beschreven vervolg-onderzoek. De aandacht heeft zich hierbij vooral toegespitst op de bentonietsoort, het bentonietgehalte en de chemische bestendigheid in geval van gebruik als basisafdichting. De eerder door GLAS (1984) veronderstelde Niet-Darcy stroming in zand-bentoniet mengsels is in dit verslag nader uitgewerkt.

2. METHODIEK EN RESULTATEN VAN EERDER ONDERZOEK

In dit hoofdstuk wordt beschreven welke eigenschappen bentoniet geschikt maken als afdichtmateriaal en hoe het gebruikt kan worden in afdichtlagen. Vervolgens wordt besproken hoe de experimenten van dit onderzoek zijn opgezet en verwerkt.

2.1. Zand-bentoniet mengsels als afdichtmateriaal

2.1.1. Werkingsprincipe

Bentoniet is een sterk zwellende kleisoort. Deze klei is ongeveer 70 miljoen jaar geleden gevormd tijdens het Krijt en het Tertiair, uit vulkanische as, welke in vochtig klimaat in afvoerloze laagten is afgezet. Onder invloed van water is de as gehydrolyseerd tot Si- en Al-(hydr)oxyden met colloïdale eigenschappen. Deze afzettingen komen op diverse plaatsen op de wereld voor echter niet overal in dezelfde samenstelling. Het wordt gewonnen als klei, gedroogd en gemalen en verhandeld als poeder of korrels.

In principe bestaat bentoniet uit het kleimineraal montmorilloniet. Dit is een 2:1 mineraal, dat wil zeggen dat het

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

bestaat uit plaatjes opgebouwd uit twee tetraëderlagen (SiO_4-molekulen) waartussen zich één oktaëderlaag bevindt ($Al(OH)_6$-molekulen). Deze plaatjes zijn vrijwel altijd negatief geladen door dissociatie van OH-groepen aan het oppervlak onder invloed van de in de bodemoplossing heersende pH, en door isomorfe substitutie waarbij in het kristalrooster atomen zijn vervangen door andere evengrote atomen met andere lading (BOLT en BRUGGENWERT (1978)).

Om electrische neutraliteit te verkrijgen trekken kleiplaatjes kationen uit de oplossing aan. Aan de ene kant worden deze kationen door het negatieve kleiplaatje aangetrokken, aan de andere kant hebben zij de neiging uit te zwermen naar de bodemoplossing ten gevolge van een concentratiegradient (diffusie). Tussen deze twee krachten stelt zich uiteindelijk een evenwichtsverdeling in. De op deze wijze ontstane laag met verhoogde concentratie van kationen in de nabijheid van een kleiplaatje heet diffuse dubbellaag. De omvang van deze diffuse dubbellaag is afhankelijk van :

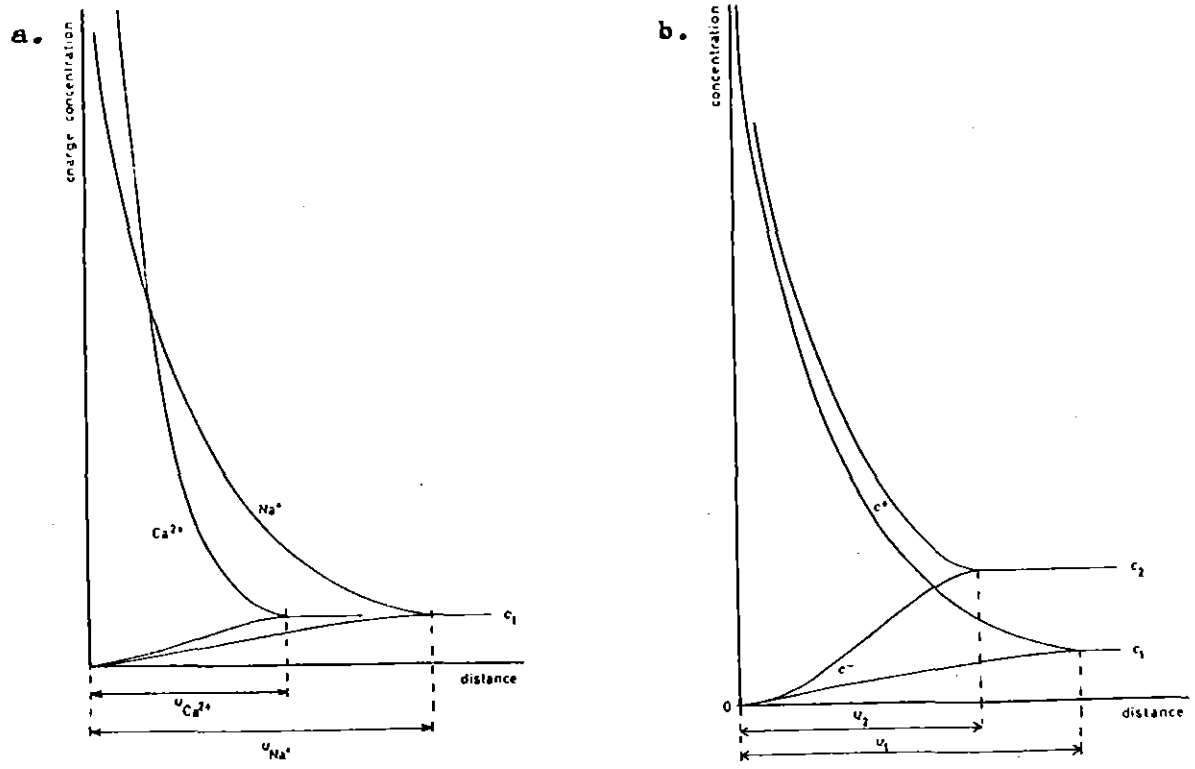


Fig. 3 Dikte van de diffuse dubbellaag (u), als functie van
a. de valentie van de kationen in de dubbellaag
b. de concentratie van de evenwichtsoplossing
(KOOREVAAR en DIRKSEN (1982)).

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

- de valentie van de kationen in de dubbellaag; monovalente kationen worden minder sterk aangetrokken en kunnen daarom verder uitzwermen dan divalente kationen, waardoor de laag dikker is (figuur 3a);
- de concentratie van de evenwichtsoplossing; een hogere concentratie in de bodemoplossing vermindert de neiging tot uitzwermen van de kationen waardoor de laag dunner is dan in geval van lage concentratie (figuur 3b).

Watermolekulen hebben een dipoolkarakter en ondervinden daardoor in de diffuse dubbellaag electrische aantrekking als gevolg van de negatieve lading van het kleioppervlak. Dit betekent dat watermolekulen in de diffuse dubbellaag worden opgenomen. Bij toevoeging van schoon water aan droge bentoniet zwermen de op het oppervlak aanwezige kationen uit in de waterfase. De diffuse dubbellaag zal, als voldoende water beschikbaar is, zover uitdijen totdat er evenwicht bestaat tussen de aantrekkende kracht van het kleideeltje en de neiging tot uitzwermen in de oplossing.

Wanneer kleideeltjes op deze manier water opnemen en als het ware in omvang toenemen heet dit zwellen van de klei. De zwelcapaciteit van klei wordt gedefinieerd als het volume water (cm^3) gebonden per gewichtshoeveelheid klei (gr). De zwelcapaciteit is dus groter naarmate de kationen een grotere neiging tot uitzwermen hebben, hetgeen dus het geval is als :
- de valentie van de kationen in de laag kleiner is;
- de concentratie in de bodemoplossing lager is.

In tabel 3 wordt de zwelcapaciteit van verschillende bentonietsoorten gegeven.

Tabel 3 : Zwelcapaciteit van bentonietsoorten (cm^3/gr) (naar : HOEKS en RYHINER (1985)).

1. Wyomingbentoniet	9-12
2. Geactiveerde bentoniet	6- 9
3. Europese bentoniet	2- 4

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

Wyomingbentoniet is voor een groot deel bezet met monovalente (Na^+)-ionen, waardoor het een groot zwelvermogen heeft. Europese bentoniet heeft een veel groter aandeel tweewaardige (Ca^{2+})-ionen waardoor het een kleinere zwelcapaciteit heeft. Geactiveerde (Europese) bentoniet, die een Na^+-behandeling heeft ondergaan, waarbij veel Ca^{2+} is vervangen door Na^+, heeft een zwelcapaciteit die tussen die van Wyoming- en Europese-bentoniet in ligt.

Voor afdichtingslagen wordt bentoniet droog in poedervorm aan vochtige grond toegevoegd en gemengd. De relatief kleine bentoniet-deeltjes liggen dan tussen de zandkorrels in de poriën van het zandskelet. Wanneer dit systeem water opneemt zal de bentoniet opzwellen waardoor de poriën van het zandskelet worden opgevuld. De doorlatendheid van de grond wordt op die manier verkleind.

De effectiviteit van zand-bentoniet mengsels als afdichtmateriaal is zodoende afhankelijk van de porositeit van het zand, het zwelvermogen van de bentoniet, de hoeveelheid bentoniet in het mengsel en de laagdikte. De zogenaamde ontwerpvariabelen bij de aanleg van een afdichtlaag zijn dus :

1. zandsoort
2. bentonietsoort
3. verdichting
4. bentonietgehalte
5. laagdikte

2.1.2. Resultaten van eerder onderzoek

Het effect van het bentonietgehalte op de doorlatendheid van zand-bentoniet mengsels werd eerder onderzocht door GLAS (1984) voor een viertal zandsoorten en twee bentoniettypen (Wyoming- en Geactiveerde Europese bentoniet CEBO-Bond F). De belangrijkste resultaten zijn weergegeven in figuur 4 en tabel 4.

Een probleem bij zijn doorlatendheidsmetingen was dat de monsterdikte tijdens meting toenam als gevolg van zwelling. De gradiënt bleef hierdoor niet constant. Bovendien zijn de curves in figuur 4 gebaseerd op slechts vier meetpunten.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

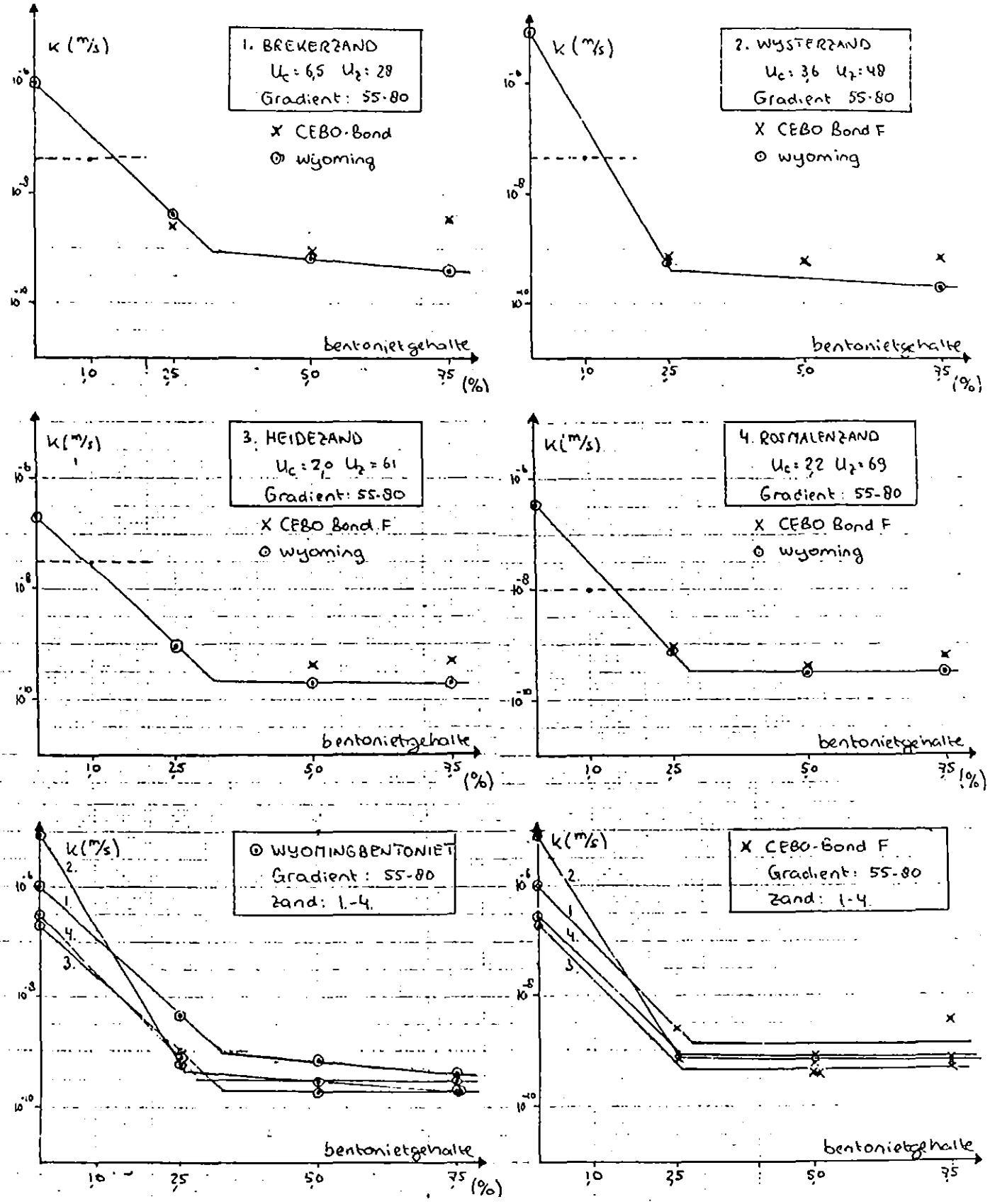


Fig. 4.(a t/m f). Doorlatendheid als functie van bentonietgehalte voor vier zandsoorten en twee bentonietsoorten (GLAS (1984)).

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

Tabel 4 : Combinaties van vier zandsoorten en twee bentonietsoorten in vier verschillende gehaltes voor het meten van de doorlatendheid ($.10^{-10}$ m/s). (GLAS (1984)).

Bentonietsoort: Wyoming				
Gehalte	Zandsoort			
(gew.%)	BRE	WIJS	HEI	ROS
7,5	4	2	2	3
5,0	7	-	2	3
2,5	46	6	9	8
1,0[1)]	>426	>477	>306	>94
Bentonietsoort: CEBO-Bond F				
Gehalte	Zandsoort			
(gew.%)	BRE	WIJS	HEI	ROS
7,5	34	7	5	6
5,0	8	6	4	4
2,5	26	7	-	9

Onderzoek met betrekking tot de maximale verdichting van zandmonsters leerde dat de maximaal haalbare dichtheid in de orde van 1,62-1,71 gr/cm^3 lag bij een optimaal vochtgehalte van 11,5-13,5 % (zie proctorcurves GLAS (1984) en tabel 5).

Tabel 5 : Maximale droge dichtheid en optimaal vochtgehalte voor de drie zandsoorten.(naar : GLAS (1984), tab. 9.1.).

	W_{opt}	ρ^d_{max}
Brekerzand	13,2	1,71
Wijsterzand	11,5	1,68
Heidezand	13,5	1,62

W_{opt} = optimaal vochtgehalte (gr/100 gr. grond)
ρ^d_{max} = maximale droge dichtheid (gr/cm^3)

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

In verband met problemen als gevolg van zwelling, te kleine afmetingen van het monster, te grote apparaatweerstand, beperkte variatiemogelijkheden met betrekking tot de gradiënt ontwierp GLAS (1984) een opstelling voor het meten van lage doorlatendheden (figuur 7). Met dit apparaat is het hier beschreven onderzoek naar de invloed van de gradiënt op de doorlatendheid uitgevoerd.

2.2. Methodes en technieken

2.2.1. Gebruik van de wet van Darcy

De stroming van water door een poreus medium wordt beschreven met de in 1856 door Darcy geformuleerde wet. Voor beschrijving van apparatuur en methodes welke Darcy gebruikte bij zijn experimenten kan worden verwezen naar VONCKEN (1969). Wel moet hier worden opgemerkt dat hij voor zijn experimenten uitsluitend matig grof en matig fijn zand heeft gebruikt.

Globaal kunnen de laboratoriumexperimenten van Darcy als volgt ingedeeld worden :

a. kolomexperimenten met onder het monster een druk gelijk aan de atmosferische druk, vier verschillende filterlengtes en variabele meetduur;
b. kolomexperimenten met onder het monster een druk groter of kleiner dan de atmosferische druk, de filterlengte 1,10 m en de meetduur constant.

De meetresultaten bestonden uit het doorstromende volume of gewicht water per tijdseenheid, het debiet genaamd (Q in m^3/s). Uit het debiet zijn via omrekening naar standaard oppervlak en standaard filterlengte waarden berekend die een maat zijn voor de karakteristieke doorlatendheid van de bodem. Toen hieruit de verhouding tussen debiet (Q) en aangelegde druk (p) werd bepaald, bleek deze per grond nagenoeg constante waarden op te leveren.

Darcy concludeerde dat "voor zand van gelijke aard als bij deze proeven, het debiet (Q) evenredig is met de druk (p) en de monsteroppervlakte (s) en omgekeerd evenredig met de filterlengte (e)"(VONCKEN (1969)).

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

Naar aanleiding van deze resultaten werd de volgende vergelijking opgesteld :

$$Q = k.p.s/e \qquad (2)$$

waarin : Q = debiet (m^3/s)
k = doorlatendheidscoëfficient (m/s)
p = druk ten opzichte van de atm.druk (m)
s = filteroppervlak (m^2)
e = filterlengte (m)

Als h = waterhoogte boven het monster (m), dan geldt p = h+e, en met Q/s = v (m/s) en i = drukgradiënt = (h+e)/e (dim.loos) wordt (2) :

$$v = k.i \qquad (3)$$

De doorlatendheid k (m/s) is de tangens van de hellingshoek in de grafische weergave van de lineaire wet van Darcy (figuur 5), en specifiek voor één bepaald medium en voor dat medium volgens Darcy constant.

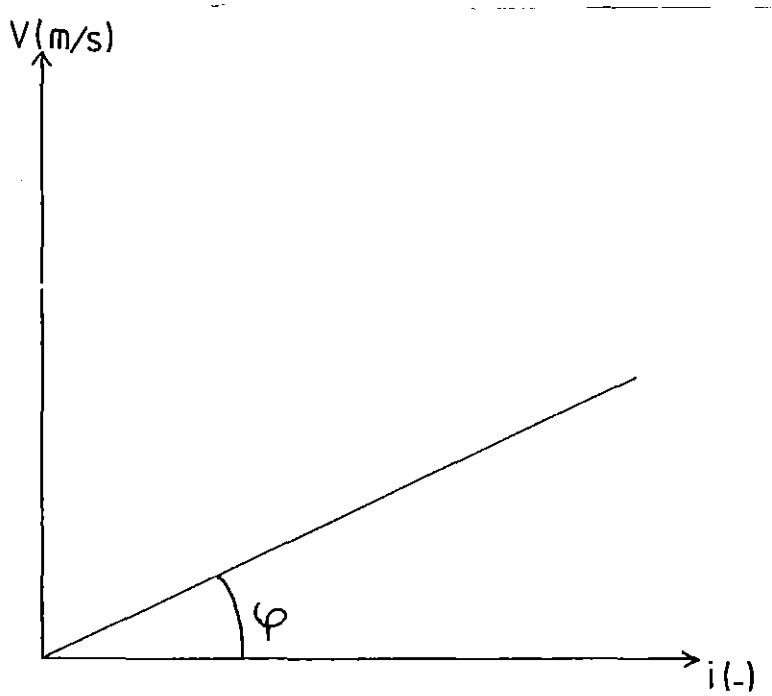


Fig. 5. Relatie doorstroomsnelheid (v) - gradiënt (i) volgens Darcy, met $tg.\varphi = v/i = k$. (k = doorlatendheid)

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

Voor de uitwerking van kolomexperimenten in dit onderzoek is gebruik gemaakt van de wet van Darcy. In deze experimenten wordt het debiet (Q in cm^3/uur) gemeten. Met behulp van dit debiet wordt de doorlatendheid (k in m/s) als volgt berekend :

$$v = Q \cdot 1/A \cdot 2{,}8.10^{-6} \qquad (4)$$

$$k = v/i \qquad (3)$$

$$k = Q/(i \cdot A) \cdot 2{,}8.10^{-6} \qquad (5)$$

waarin : A = doorstroomoppervlak (cm^2); v = stroomsnelheid (m/s).

De hydraulische gradiënt (i) representeert het drukverschil tussen onder-en bovenzijde van de afdichtingslaag, ten gevolge waarvan er stroming optreedt. In de kolom ziet dit er als volgt uit (figuur 6) :

$$i = \Delta H / \Delta Z \qquad (6)$$

waarin : $\Delta H = H_1 - H_2$

$H_1 = P + h_w + d_1 + d_2$

$H_2 = -d_3 + P_0$

(referentievlak = H_2)

Dit leidt tot :

$$\Delta H = P + h_w + d_1 + d_2 + d_3 - P_0 \qquad (7)$$

waarin : P = extra druk op monster t.o.v. atm.druk (m)

P_0 = extra druk aan onderzijde kolom t.o.v. atm.dr. (m)

h_w = hoogte waterkolom op grond (m)

d_1 = dikte laag filterzand op monster (m)

d_2 = dikte monster = ΔZ = d (m)

d_3 = dikte laag filterzand onder monster (m)

H_1 = stijghoogte bovenzijde monster = drukhoogte + plaatshoogte (ten opzichte van ref.vl. H_2) (m)

H_2 = stijghoogte onderzijde monster = drukhoogte + plaatshoogte (t.o.v. ref.vl. H_2) (m)

ΔZ = afstand waarover H berekend (= d_2)(m).

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

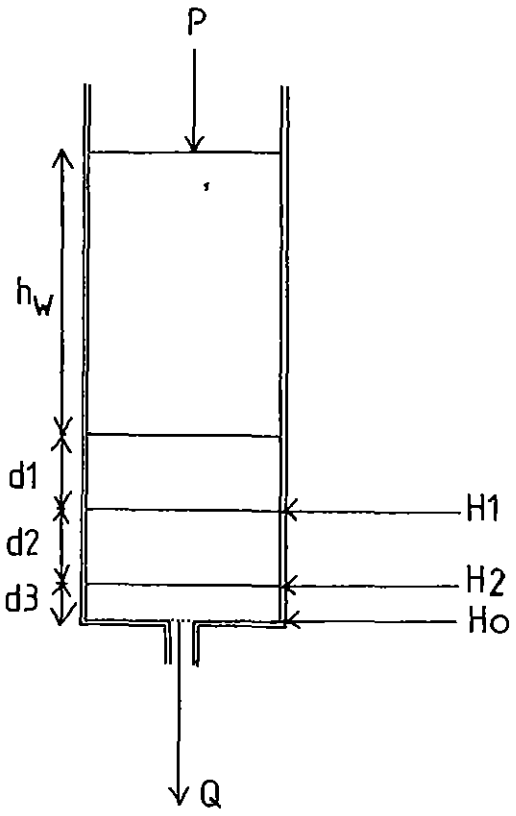


Fig.6. Schematische weergave van kolom met symbolen ter bepaling van de gradiënt .

2.2.2. Opzet van de kolomexperimenten

Bij het onderzoek naar de doorlatendheid van zand-bentoniet mengsels is gebruik gemaakt van kolommen waarbij drie verschillende werkwijzen zijn gevolgd.

In twee gevallen (figuur 11 en 13) zijn gewone percolatie-kolommen gebruikt, waarbij een vloeistofkolom voor de gewenste gradiënt zorgt, Dat vloeistofniveau wordt constant gehouden door bijgieten van de vloeistof. De aangelegde gradiënt en het oppervlak van de kolom zijn in deze gevallen relatief klein.

In het derde geval is een door GLAS (1984) ontwikkelde permeameter (figuur 7) gebruikt, welke het mogelijk maakt met luchtdruk grote gradiënten te realiseren, terwijl het monster toch redelijke afmetingen kan hebben. Tevens kan de gradiënt door instelling van de luchtdruk eenvoudig gevarieerd worden.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

In de kolommen werden achtereenvolgens aangebracht :
- een filtreerpapier tegen uitspoelen van het zand
- een laag van 2 cm filterzand
- een laag van 5 cm zand-bentoniet mengsel (monster)
- een laag van 2 tot 5 cm filterzand
- een vloeistofkolom

Bovenop het monster werd een bovenbelasting in de vorm van een laag filterzand aangebracht, om zwelling van het monster in vertikale richting te voorkomen. Aangenomen wordt dat geen lekkage langs de wand optreedt. De monsterdikte is tijdens meting niet toegenomen, bij deze bovenbelasting. De zwelling van de bentoniet kon dus alleen plaatsvinden binnen de ruimte van de poriën van het zandskelet, én er treedt een natuurlijke afdichting langs de wand op. Tevens voorkwam deze filterlaag verstoring van het monster tijdens opdruppelen van de percolatievloeistof.

Ter bepaling van de hoeveelheden zand en bentoniet werd uitgegaan van de resultaten van de proctorproeven van GLAS (1984). Daaruit bleek de maximale droge dichtheid 1,62-1,71 gr/cm^3 te zijn bij een optimaal vochtgehalte van 11,5-13,5 % (tabel 5). Via deze droge dichtheid (maximaal haalbaar) , de oppervlakte van de kolom en de gewenste laagdikte konden de benodigde hoeveelheden zand en bentoniet (afhankelijk van het gewenste gehalte) bepaald worden, evenals de hoeveelheid water (drooggewichts%) . De uiteindelijke gerealiseerde dichtheid kwam tot stand door een bekend gewicht grond te verdichten tot een bekende laagdikte.

De afgewogen hoeveelheden werden gemengd in een mengbak met behulp van een spatel. De grond werd in de kolom gebracht met een lepel. Verdichting vond plaats door middel van aanstampen met een ronde schijf op een handvat. De lagen van 5 cm dikte werden in twee maal verdicht (2.2,5 cm). Vervolgens werd door middel van een hevelsysteem water opgedruppeld tot de gewenste hoogte (in verband met de gradient). De grond werd zo langzaam mogelijk van bovenaf verzadigd, maar toch traden kleine scheurtjes op.

Het bepalen van de gradiënt ging als volgt (zie par. 2.2.1.). In alle gevallen zijn d_1,d_2, en d_3, de laagdiktes,bekend. P_0 is in alle gevallen 0. De hoogte van de waterkolom boven de grond (h_w) is door opdruppelen direct instelbaar. In geval van de

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

gewone percolatiekolommen (figuur 11 en 13) is de druk op het water ten opzichte van de atmosferische druk (P) 0. In geval van de door GLAS (1984) ontworpen opstelling (figuur 7) is deze door middel van de luchtdruk instelbaar.

Verdamping uit de kolom of uit het opvangreservoir werd tegengegaan door hierover een folie te spannen met kleine opening voor ontluchting en toevoer. Invloed van het licht (algengroei) werd uitgeschakeld met behulp van zwart plastic.

3. NIET-DARCY STROMING IN ZAND-BENTONIET MENGSELS

3.1. Literatuuronderzoek naar de geldigheid van de wet van Darcy

Ondanks het nut van de wet van Darcy bleek bij experimenten vaak verschil te bestaan tussen theorie en werkelijkheid. Hierbij weken de practisch gemeten doorlatendheden af van de volgens de wet van Darcy berekende waarden.

Mogelijk komt deze afwijking voort uit het feit dat Darcy zijn experimenten deed onder zeer specifieke omstandigheden en enkele voorwaarden stelde, namelijk :

- volledige verzadiging van de grond;
- laminaire stroming door het monster;
- stationaire stroming,dat wil zeggen constant debiet.

In deze paragraaf worden andere auteurs met hun bevindingen inzake de geldigheid van de wet van Darcy besproken. Met name is gekeken naar de invloed van (lage) gradiënt en kleigehalte, aangezien dat voor de eigen experimenten met zand-bentoniet mengsels van belang was.

GÖDECKE (1980) gaat uit van eerder onderzoek door Moser (1977), Hansbo (1960), Kemper (1964), Kovacs (1957) en Kezdi (1976), die allen een niet-lineaire relatie vonden, vooral bij relatief lage gradiënten en kleiïge, siltige gronden. Hij zocht een verklaring hiervoor bij in klei en silt bestaande electromolekulaire krachten tussen grond- en waterdeeltjes.

Het verloop van de aantrekkingskracht voor water vanaf het

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

kleioppervlak, kan volgens GÖDECKE gelijk worden verondersteld aan het verloop van de kationen concentratie. Deze aantrekkingskracht voor water wordt adhesie-spanning genoemd (w). Wanneer de straal van de poriën klein is, zoals bij klei, kunnen de bindingszônes van twee naburige kleideeltjes elkaar overlappen, waardoor alle water tussen de deeltjes gebonden is, en er een minimale adhesie-spanning heerst (w_o). De adhesie-spanning kan worden voorgesteld als :

$$w = w_o + a_1 \cdot r^n \qquad (8)$$

waarin : w = adhesie-spanning
w_o = minimale adhesie-spanning
a_1 = constante
n = constante
r = afstand tot middellijn porie

Onder invloed van een van buitenaf opgelegde drukgradiënt treedt er in de poriën tussen water en kleideeltjes een schuifspanning op, wanneer het water wil gaan stromen. Het verloop van de schuif-spanning (τ) kan worden weergegeven door :

$$\tau = a_2 \cdot r \cdot i \qquad (9)$$

waarin : τ = schuif-spanning
a_2 = constante
r = afstand tot middellijn porie
i = drukgradiënt

GÖDECKE gaat ervan uit dat alleen dat deel van het water in de poriën beweegt, waarvoor de schuif-spanning groter is dan de adhesie-spanning. De straal van dit gebied wordt r_s genoemd, gerekend vanaf de middellijn van de porie, en kan worden benaderd door :

$$r_s = a \cdot i^{1/n} \qquad (10)$$

waarin : a,n = constanten

Door middel van de snelheidsverdeling van Poisseuille voor

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

een poriekanaal met straal r_w kan worden afgeleid dat :

$$\bar{v} = c_a \cdot r_w/\eta \cdot r_s^2 \cdot i \qquad (11)$$

$$\bar{v} = c_a \cdot r_w/\eta \cdot a^2 \cdot i^{2/n} \cdot i$$

wanneer $c_a \cdot r_w/\eta \cdot a^2$ wordt opgenomen in constante a_m en $(2+n)/n$ in constante m, dan volgt hieruit :

$$v = a_m \cdot i^m \qquad (12)$$

Met formule (12) kan de filtersnelheid in afhankelijkheid van de drukgradiënt worden berekend, als de adhesie-spanning, die gronddeeltjes op het water uitoefenen, het doorstroomoppervlak in de porie tussen de gronddeeltjes verkleind.

VONCKEN (1969) bespreekt in zijn scriptie drie soorten stroming, namelijk :

- Newton vloeistofstroming
- Niet-Newton vloeistofstroming
- Bingham materiaalstroming

Newton stroming gaat bij grafische weergave als een rechte lijn door de oorsprong, Niet-Newton stroming gaat wel door de oorsprong, maar is geen rechte, en Bingham materiaalstroming is lineair bij grote waarden van i maar bij kleine waarden is er een zekere drempelwaarde waar beneden geen stroming optreedt.

VONCKEN geeft verder een beschrijving van de afleiding van Swartzendruber en Kutilek voor een theoretische benadering van Niet-Newton stroming en Bingham stroming.

Swartzendruber vond voor Niet-Newton stroming :

$$v = M((i-I\ (1-e^{-i/I}))) \qquad (13)$$

waarin M en I constanten zijn die door grafische methoden te bepalen zijn. Er geldt (randvoorwaarden) v=0 bij i=0. Verder nadert $e^{-i/I}$ tot 0 als i zeer groot wordt, met als gevolg ,

$$v = M\ (i-I) \qquad (14)$$

een rechte lijn met helling M en intercept I.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

I kan Niet-Newton index worden genoemd, want voor I=0 wordt (14) de lineaire vergelijking v = M.i , welke Newton stroming of de wet van Darcy voorsteld.

Een andere methode van Swartzendruber en wel voor Bingham stroming is er een met drie constanten. De vergelijking voor v (vergelijk (13)) luidt dan :

$$v = B((i-J\ (1-e^{-Ci}))) \qquad (15)$$

waarin B, J en C constanten zijn die volgens grafische en rekentechnische methoden te bepalen zijn. Ook hier geldt als i groot wordt, neemt (15) de lineaire vorm aan, namelijk

$$v = B\ (i-J) \qquad (16)$$

waarbij B analoog is met M. Als Niet-Newton (Niet-Darcy) index kan dan beschouwd worden $J^2C = D$, want als D=0 zijn J, C of beide 0, en in het laatste geval wordt (15) v = B . i (Darcy).

Vervolgens geeft differentiëren van (15) bij i=0 ,

$$dv/di = B\ (1-JC) \qquad (17)$$

Hierbij geeft : JC < 1 een positieve helling;
JC = 1 een initiële helling =0;
JC > 1 een negatieve helling .

Als JC=1 dan is D=J=I en dan wordt I de drempelwaarde, waardoor v=0 voor $0 \leqq i \leqq i_o$ en $v = B\ ((i-J\ (1-e^{-Ci})))$ voor $i \geqq i_o$ waarbij i_o dus de drempelwaarde is.

Kutilek veronderstelde de volgende relatie op grond van grafische weergave van gemeten doorstroomsnelheden :

$$v = M((1/B\ \ln(A+e^{BI}) - I_o)) \qquad (18)$$

waarin : $B = (\ln(M/M'))/I_o$
$A = M/M' - 1$
M = hydraulisch geleidingsvermogen
M' = initiële M
I = hydraulische gradiënt
I_o = intercept van M op de I-as (drempelwaarde)

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

Voor Newton stroming is M' = M en I_o = 0 dus A = 0, waarna (18) overgaat in v = M.I (= wet van Darcy). Gronden zijn dus gekarakteriseerd door M, M' en I_o, welke op wiskundige wijze te bepalen zijn.

SLEPIČKA (1961) stelt microfysische processen op het grensvlak tussen vaste en vloeibare fase verantwoordelijk voor afwijking van het ideale Darcy stroomgedrag. Hij heeft geprobeerd een relatie te vinden die alle factoren die deelnemen aan het stromingsgedrag bevat. Deze relatie presenteert hij als Φ.

$$\Phi = f\ (\ Q,F,L,K,h,g,\rho,\eta,\sigma,E) \qquad (19)$$

waarin : Q = debiet
F = oppervlakte
L = lengte
K = porositeitscoëfficiënt
h = drukhoogte
g = zwaartekrachtversnelling
ρ = soortelijk gewicht
η = viscositeit
σ = oppervlaktespanning
E = elasticiteitscoëfficiënt

Door introductie van de substituties v = Q/F, $\gamma = \rho.g$, $I_p = \gamma.h/L$, en h = p/γ wordt (19) :

$$\Phi = f\ (\ v,K,I_p,\eta,\sigma) \qquad (20)$$

waarin ook de elasticiteitscoëfficiënt is weggelaten omdat water niet verder samendrukbaar is dan 25 atm..

Door invoering van twee dimensieloze parameters $\pi_1 = K.I_p/v.\eta$ en $\pi_2 = K.I_p/\sigma$ en voorstelling van de functie door :

$$\Phi = f\ (\pi_1,\pi_2) \qquad (21)$$

kan de volgende vergelijking opgesteld worden :

$$I_p = (\ v.\eta/K\ )^a.\ (\sigma/K\ )^b \qquad (22)$$

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

waarin : b = 1 - a

a = 1/f

hetgeen na herschrijving van (22) met behulp van $k = K.\gamma/\eta$, leidt tot :

$$v = (\eta/\sigma)^{f-1} . k^f . I^f \qquad (23)$$

waarin : v = actuele stroomsnelheid

ofwel

$$f = (\log \eta/\sigma . v) / (\log \eta/\sigma . w) \qquad (24)$$

waarin : v = actuele stroomsnelheid bij gradiënt I

w = Darcy's ideale stroomsnelheid (potentieel) bij gradiënt I

Nu kan f worden beschouwd als maat voor de afwijking van Darcy-gedrag. Wanneer de wet van Darcy geldt is v = w en f = 1, waardoor (23) overgaat in v = k . I (Darcy).

Wanneer nu in (23) $(\eta/\sigma)^{f-1} . k^f$ ondervangen wordt in de constante k_f, dan ontstaat :

$$v = k_f . I^f \qquad (25)$$

Gesteld kan worden dat de doorlatendheid van een bodem afhankelijk is van het karakter van de vloeistof (η) en medium (σ), alsmede van de gradiënt en de factor f. Als namelijk K als functie van I wordt uitgezet (K(I)), ontstaan drie sectoren :

- f > 1 : K(I) is parabolisch;
- f = 1 : K(I) is lineair (Darcy);
- f < 1 : K(I) is hyperbolisch.

KARADI en NAGY (1961) gaan uit van zogenaamde traagheidskrachten die bij de afleiding door Darcy verwaarloosd zijn. Deze krachten worden door bodemdeeltjes op water uitgeoefend, waardoor het water andere eigenschappen gaat vertonen dan die waarvoor een lineaire stromingsvergelijking geldt. Door de aantrekkende kracht van bodemdeeltjes op water gedraagt dat water zich als een zogenaamd Bingham materiaal.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

KARADI en NAGY onderscheiden in een poriekanaal naast een bodemdeeltje een zône van " bonded " water direct ernaast, en een zône van " free " water op enige afstand."Free" water gedraagt zich bij stroming als een Newton vloeistof," bonded " water gedraagt zich bij stroming als Bingham materiaal. Dichter bij het oppervlak is een grotere schuifspanning nodig om de aantrekkingskracht te overwinnen. Wanneer in een systeem alleen " bonded " water aanwezig is, zal een grenswaarde voor de schuifspanning overwonnen moeten worden om stroming te veroorzaken.

De schuifspanning wordt veroorzaakt door een van buitenaf opgelegde hydraulische drukgradiënt. Hoe hoger die gradiënt dus, hoe meer water in stroming komt. Het gevolg is een exponentieel verloop van de stroomsnelheid tot een zekere waarde van de gradiënt waarbij alle " bonded " water in beweging is. Vanaf dat moment verloopt de stroomsnelheid lineair met de gradiënt.

FAHMY (1961) onderzocht de invloed van klei op de doorlatendheid van zand. Hiertoe gebruikte hij kunstmatig gevormde zand-klei mengsels en maakte hij een indeling van experimenten aan illiet- en montmorillonietklei bij toevoeging als grote en kleine aggregaten (0,0 - 0,5 mm ; 0,5 - 1,0 mm). Voor de experimenten met montmorilloniet nam hij Wyoming-Ca^{2+}-klei. Bij grove aggregaten bleek toevoeging van 12% een reductie tot 1/60 van de uitgangsdoorlatendheid te geven, bij kleine aggregaten vond hij bij 3% een " fatale " reductie. Het effect van illiet was vooral bij grove aggregaten veel minder.

FAHMY wijt dit aan de eigenschap van montmorilloniet om water op te nemen en te zwellen. Dit veroorzaakt een volume verandering van het monster, maar gezien de afname van de doorlatendheid ook een verstopping van de poriën.

De meetresultaten bleken af te wijken van berekende waarden volgens Darcy. Dit wijt FAHMY aan de invloed van de klei. Daarvoor noemt hij drie redenen. Ten eerste blokkeren de kleine kleideeltjes de poriën van het zandskelet. Ten tweede is de porositeit van kleiaggregaten zo klein dat ze geen bijdrage leveren aan de uiteindelijke porositeit van het mengsel en kunnen de delen waar zich kleiaggregaten bevinden als ondoorlatend beschouwd worden. Ten derde hebben kleideeltjes een waterbindend vermogen, vooral de montmorilloniet deeltjes,en zo een vertragend effect.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

3.2. Experimenten met zand-bentoniet mengsels

Voor de experimenten werd gebruik gemaakt van de door GLAS (1984) ontworpen permeameter (figuur 7). Deze werd via een precioso en een reduceerventiel aangesloten op een fles lucht onder druk (figuur 8). De ingestelde druk (P) kon worden afgelezen op de ook in de aansluiting opgenomen digitale drukmeter. Voor de veiligheid was tevens een luchtuitlaat ingebouwd.

Met deze opstelling kon de doorlatendheid van monsters gemeten worden bij variabele gradiënt. Op die manier kon de invloed van de gradiënt op de doorlatendheid en zodoende de geldigheid van de wet van Darcy voor zand-bentoniet mengsels gemeten worden.

Dit is gedaan voor twee bentonietsoorten, namelijk Wyoming-bentoniet en Geactiveerde Europese bentoniet, beiden bij een gehalte van 5 drooggew% en een droge dichtheid van 1,77 gr/cm^3. De gebruikte zandsoort was afkomstig van de proefvelden in Wijster. Deze werd gebruikt als meng- en filtermateriaal. Als percolatie- en verzadigingsvloeistof werd gedemineraliseerd water gebruikt.

Besloten was om gedurende enkele achtereenvolgende periodes (tijdreeksen) bij verschillende gradiënten (gradiëntreeksen) te meten, van grote naar kleine gradiënt. Per gradiënt werd ongeveer twee dagen gemeten tot een (tamelijk) constant debiet. Verwacht werd dat als bij bijvoorbeeld tijdreeks 1 als gradiënt 50 en 30 werd gemeten, de bij een volgende tijdreeks 2 gemeten doorlatendheid bij gradiënt 40 op dezelfde hoogte (y-as) er tussenin zou liggen.

Voor beide bentonietsoorten werden dergelijke reeksen gemeten in de volgende periodes :

- Wyomingbentoniet
  t0 = moment van opzetten proef = 8 mei 1985
  t1 = 9 mei - 20 mei
  t2 = 21 mei - 28 mei
  t3 = 28 mei - 3 juni
  t4 = 4 juni - 24 juni
  t5 = 25 juni - 4 juli
  t6 = 5 juli - 12 juli
- Geactiveerde Europese bentoniet
  t0 = moment van opzetten proef = 18 sept. 1985
  t1 = 23 sept. - 4 okt.
  t2 = 7 okt. - 18 okt.
  t3 = 21 okt. - 1 nov.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

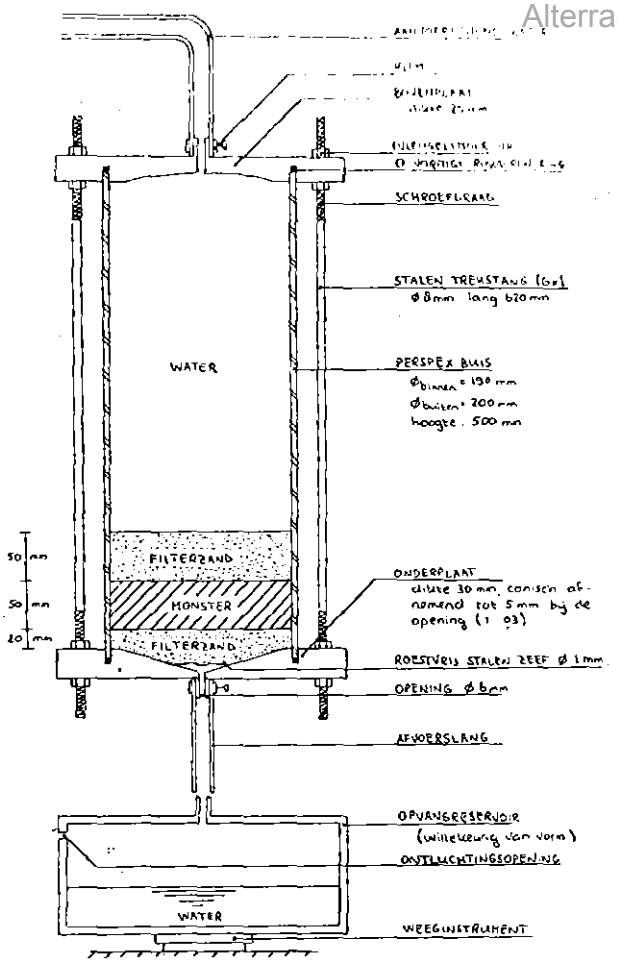


Fig. 7. Nieuwe permeameter (GLAS (1984)).

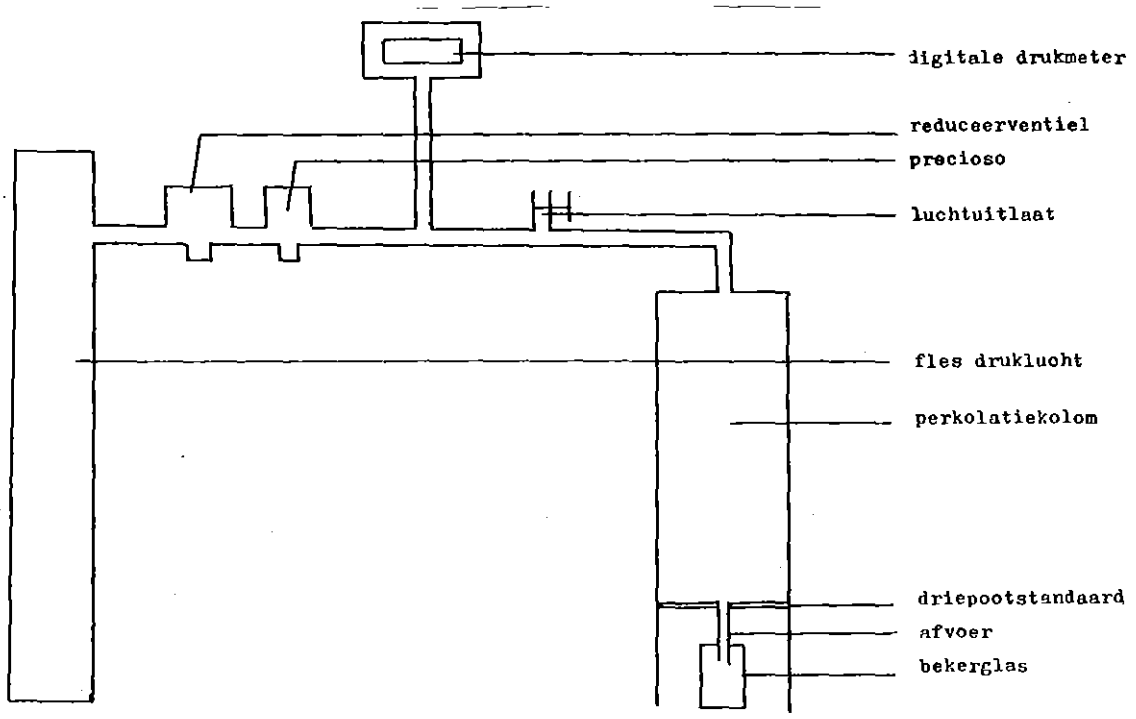


Fig. 8. Proefopstelling voor meting van de invloed van de gradient op doorlatendheid.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

3.3. Meetresultaten

De resultaten van deze experimenten staan vermeld in tabel 6 (a : Wyomingbentoniet ; b : Geactiveerde Europese bentoniet). Gegeven zijn daar de uit het gemeten debiet berekende waarden van de stroomsnelheid volgens par. 2.2.1., bij de daarvoor ingestelde gradiënt, per tijdreeks.

Deze resultaten zijn grafisch weergegeven in figuur 9 (a : Wyomingbentoniet ; b : Geactiveerde Europese bentoniet).

Als voor iedere meetwaarde de doorlatendheid (k) berekend wordt als v/i, dus als de tangens van de hellingshoek van de raaklijn uit de oorsprong (figuur 9), dan blijkt dat deze k-waarden niet constant zijn per monster. Deze k-waarden staan in tabel 7 (a : Wyomingbentoniet ; b : Geactiveerde Europese bentoniet).

Om de verschillen tussen beide bentonietsoorten beter tot uitdrukking te laten komen is per bentonietsoort de stroomsnelheid als functie van de tijd vanaf het begin van de proef uit de meetgegevens bepaald, en wel bij één en dezelfde gradiënt (i = 30). De resultaten staan in tabel 8 en figuur 10.

Naar aanleiding van alle resultaten kunnen de volgende constateringen gedaan worden :

- de relatie tussen stroomsnelheid en gradiënt is niet-lineair,
- alle meetwaarden van een latere tijdreeks liggen onder die van eerdere tijdreeksen,
- de berekende k-waarden zijn per monster niet constant, maar afhankelijk van de gradiënt en de zweltijd,
- latere tijdreeksen worden steeds meer lineair, na ca. 2 maanden is een grote mate van lineariteit ingetreden (min. zweltijd ?) (t6),
- uiteindelijk wordt bij gradiënt 5-10 (veldsituatie) met Wyomingbentoniet een doorlatendheid bereikt van ca. 0,01 mm/dag, en met Geactiveerde Europese bentoniet ca. 0,03 mm/dag, hetgeen ruim onderde gestelde norm van 0,05 mm/dag (5.10^{-10}m/s) ligt,
- uit figuur 10 blijkt dat Geactiveerde Europese bentoniet minder snel zwelt ofwel minder zwelcapaciteit heeft dan Wyomingbentoniet omdat de eerste bij eenzelfde zweltijd een hogere stroomsnelheid heeft,
- uit figuur 10 blijkt dat (na omrekening in doorlatendheid (k)) op de langeduur zelfs bij gradient 30 bij beide bentonietsoorten een doorlatendheid wordt bereikt van minder dan 5.10^{-10}m/s.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

Tabel 6a : Stroomsnelheid (m/s.10^{-8}) als functie van de gradiënt voor zand-bentoniet mengsel (5 dr.gew.% Wyomingbentoniet) voor zes tijdreeksen (t1 t/m t6).

	gradient :										
	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
t1	3,2	-	1,4	-	1,0	-	0,6	-	-	-	0,07
t2	-	1,2	-	0,8	-	0,5	-	-	-	-	0,04
t3	1,1	-	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-
t4	0,8	-	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,02
t5	0,6	-	-	0,3	-	0,2	-	0,1	-	-	-
t6	0,4	-	0,3	-	0,2	-	0,1	-	-	-	-

Tabel 6b : Idem, (met 5 dr.gew.% Geactiveerde Europese bentoniet)

	gradient :						
	60	50	40	30	20	10	5
t1	-	5,0	-	1,9	0,9	0,5	0,2
t2	2,2	-	1,4	1,0	0,5	-	0,2
t3	-	1,3	-	0,6	0,4	-	0,2

Tabel 7a : Doorlatendheid k (m/s.10^{-10}) berekend uit de gegevens van tabel 6a volgens Darcy (Wyomingbentoniet).

	gradient :										
	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
t1	5,8	-	3,1	-	2,9	-	2,4	-	-	-	1,4
t2	-	2,4	-	2,0	-	1,7	-	-	-	-	0,8
t3	2,0	-	1,3	-	-	-	-	-	-	-	-
t4	1,5	-	1,1	1,0	1,1	1,0	0,8	1,0	0,7	1,0	0,4
t5	1,0	-	-	0,8	-	0,7	-	0,5	-	-	-
t6	0,7	-	0,5	-	0,6	-	0,4	-	-	-	-

Tabel 7b : Idem, (Geactiveerde Europese bentoniet)

	gradient :						
	60	50	40	30	20	10	5
t1	-	10,0	-	6,3	4,5	5,0	4,0
t2	3,6	-	3,5	3,3	2,5	-	4,0
t3	-	2,6	-	2,0	2,0	-	4,0

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

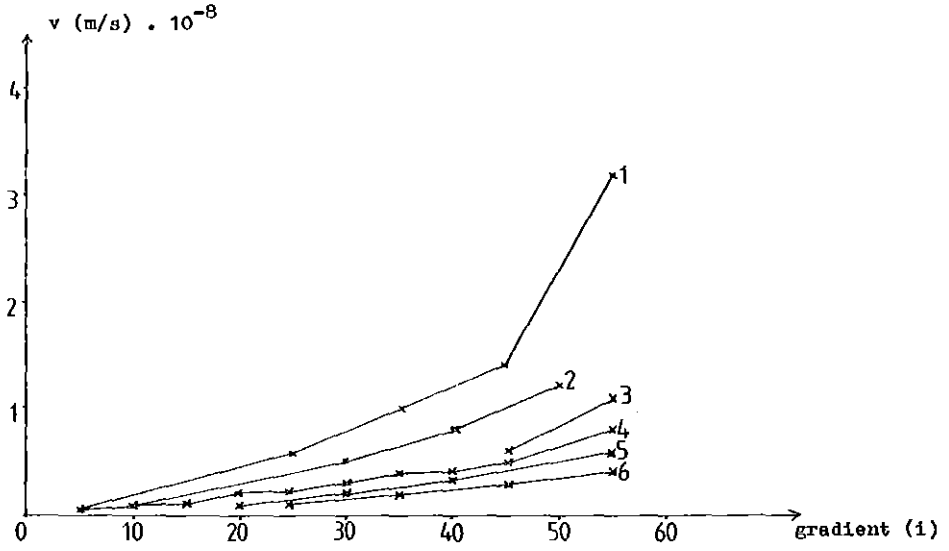


Fig. 9a. Verloop van de stroomsnelheid v als functie van de gradiënt i voor een zand-bentoniet mengsel (5 dr.gew.% Wyomingbent.) voor zes tijdreeksen (t1 t/m t6).

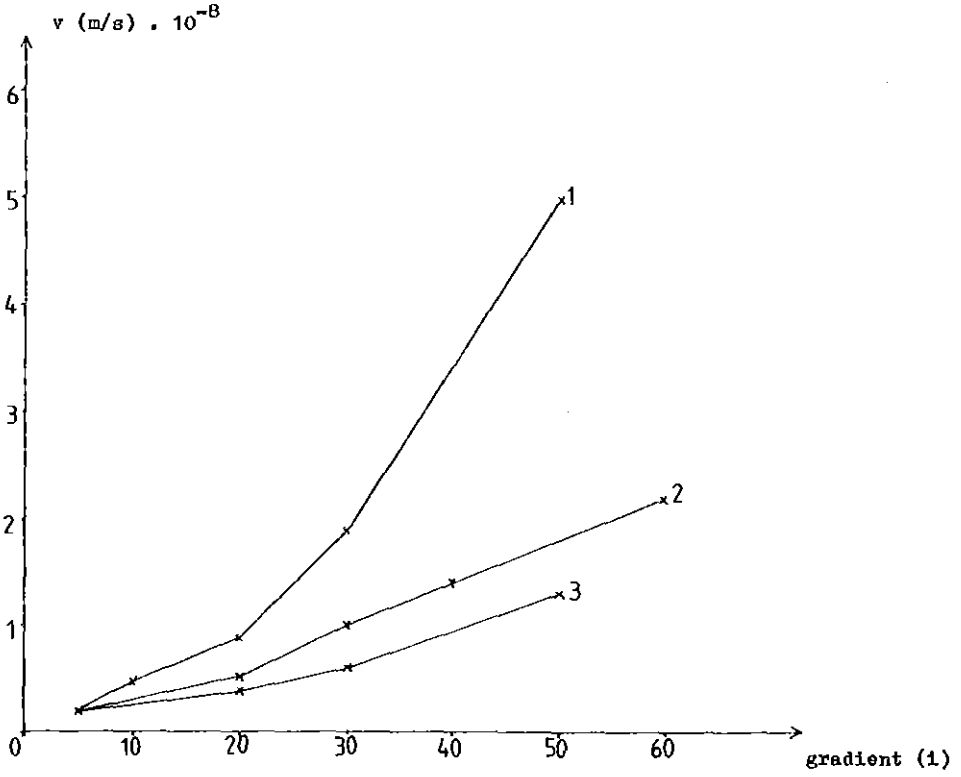


Fig. 9b. Verloop van de stroomsnelheid v als functie van de gradiënt i voor een zand-bentoniet mengsel (5 dr.gew.% Geactiveerde Europese bentoniet) voor drie tijdreeksen (t1 t/m t3).

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

Tabel 8 : Effect van de zweltijd per bentonietsoort; gemeten stroomsnelheid (v in m/s.10^{-8}) als functie van de tijd (dagen) bij 5 dr.gew.% bentoniet (i = 30).

Wyomingbentoniet		Geactiveerde Europese bentoniet	
tijd(dag)	v	tijd(dag)	v
6	0,8	8	1,9
16	0,5	26	1,0
34	0,3	36	0,6
55	0,2		
64	0,16		

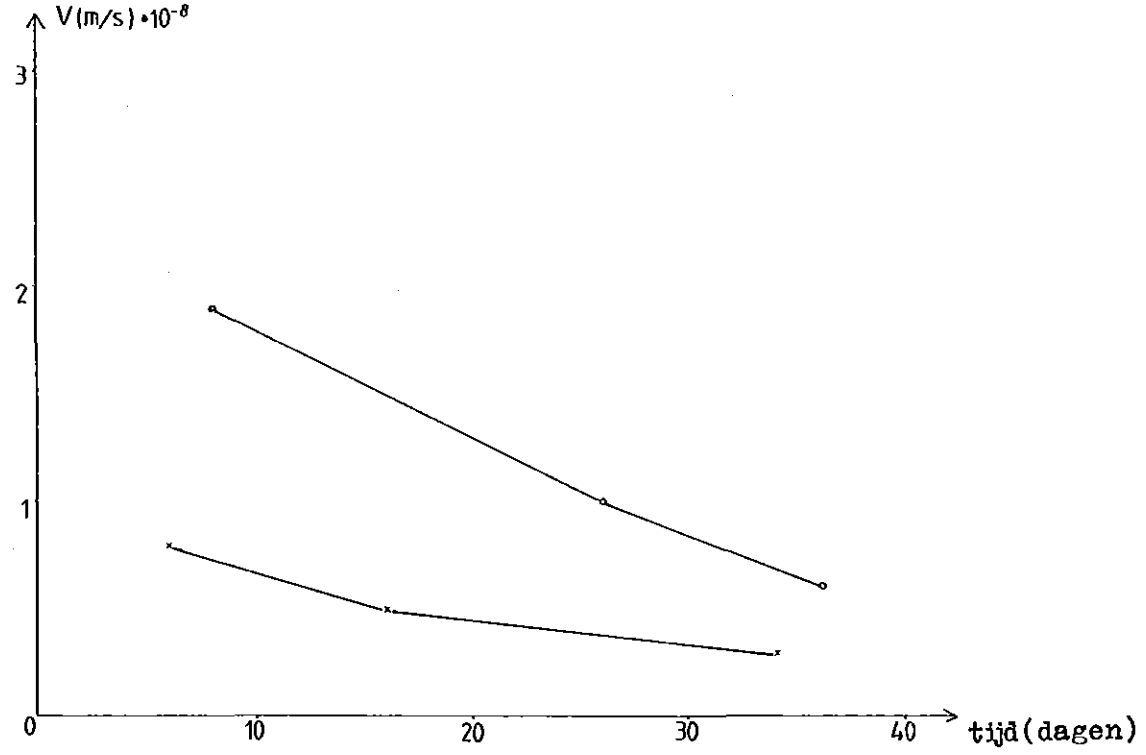


Fig. 10. Doorstroomsnelheid als functie van de tijd, bij i = 30, voor Wyomingbentoniet (×) en Geactiveerde Europese bentoniet (∘).

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

3.4. Interpretatie

In de literatuur wordt het niet-lineaire verloop van de stroomsnelheid van water door zand-bentoniet mengsels verklaard door het bestaan van electromolekulaire krachten tussen water en de kleideeltjes. Deze veroorzaken een soort traagheid van water om te gaan stromen, ook wel "schijnbare viscositeit" genoemd. Daardoor zal bij lagere gradiënt de drijvende kracht (druk) zwakker worden en steeds minder in staat zijn om de bindende kracht van de kleideeltjes te overwinnen. Er wordt een lagere stroomsnelheid gemeten dan op grond van de wet van Darcy verwacht, mogelijk onder een grenswaarde van de gradiënt zelfs helemaal geen stroming meer.

Eveneens, echter, treedt een tijdeffect op. Naarmate meer tijd verstrijkt zwelt de grond meer dicht en levert een lagere doorstroomsnelheid. Aangezien binnen één tijdreeks gemeten is van hoge naar lage gradiënt speelt dit tijdeffect dus ook binnen een gradiëntreeks.

Het vertoonde niet-lineaire gedrag is dus een samenspel van het gradiënteffect en het tijdeffect. Dit kan als volgt voorgesteld worden :

$$v = (a_o e^{-\alpha t} + a_f)\, i^m \qquad (26)$$

waarin : a_o , a_f = constanten afhankelijk van bentonietsoort en -gehalte
α , m = constanten
t = tijd
i = gradiënt

Op de lange duur gaat (26) dan over in :

$$v = a_f \cdot i^m \qquad (27)$$

De relaties v-i van de laatste tijdreeksen liggen dichter op elkaar dan de eerste relaties, en zijn bovendien vlakker. Blijkbaar wordt een maximale zwelcapaciteit bereikt na ca. 2 maanden en neemt dan de invloed van het tijdeffect af.

Het verschil in zwelcapaciteit tussen beide bentonietsoorten is reeds in par. 2.1.1. besproken (figuur 10).

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

3.5. Evaluatie van de nieuwe permeameter

Ten aanzien van het gebruik van de door GLAS (1984) ontworpen permeameter (figuur 7) kan het volgende gezegd worden :

- verzadiging van de grond in het apparaat van onderaf (volgens voorschrift) bleek niet gewenst ; door gebrek aan tegendruk aan de bovenkant ontstonden scheuren in de grondkolom, vooral op grensvlakken tussen de lagen in, en traden aan de bovenzijde van de grond kleine deeltjes uit (bentoniet ?) die in het water zweefden, uiteindelijk bezonken en zodoende een dun laagje slib op de grond vormden ; er werd besloten voortaan van bovenaf te verzadigen, waarbij de bodem van de permeameter voor tegendruk zorgde ;
- de aansluiting van de permeameter op de fles lucht via een reduceerventiel, precioso en drukmeter vertoonde een lek ; de ingestelde druk op de drukmeter verliep daardoor na verloop van tijd ; de drukinstelling moest daarom van tijd tot tijd bijgesteld worden, waardoor fluctuaties van druk van maximaal 10 mbar ontstonden ; bij lage gradiënten was daardoor niet meer te meten, terwijl juist in veldsituatie gradiënten van 5 tot 10 voorkomen.

3.6. Conclusies inzake de geldigheid van de wet van Darcy

In verband met het geconstateerde Niet-Darcy gedrag van stroming van water door zand-bentoniet mengsels kunnen laboratoriummetingen niet zonder meer door middel van de wet van Darcy geïnterpoleerd en geëxtrapoleerd worden en als voorspelling gebruikt worden voor de situatie in het veld. Vermelding van uit kolomexperimenten verkregen meetwaarden zoals doorlatendheid, zonder vermelding van de gradiënt waarbij gemeten is, is van weinig (voorspellende) waarde.

Bij het doen van kolomexperimenten aan bentoniet-zand mengsels ter bepaling van de doorlatendheid is gebleken dat volledige zwelling van de bentoniet tenminste 2 maanden duurt.

De uiteindelijk bereikte doorlatendheid (na 20 resp. 30 dagen) bij gradiënt 5-10 bedroeg minder dan de gestelde norm van 0,05 mm/dag (Wyomingbentoniet 0,01 mm/d ; Geactiveerde Europ.bentoniet 0,03 mm/d).

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

4. HET BENTONIETGEHALTE VAN ZAND-BENTONIET AFDICHTINGSLAGEN

4.1. Experimenten met zand-bentoniet mengsels

Ter bepaling van de invloed van het bentonietgehalte op de doorlatendheid van zand-bentoniet mengsels werd gebruik gemaakt van vijf gelijke percolatiekolommen, zoals in figuur 11 weergegeven. Om in de kolommen een constante gradiënt te handhaven werd er boven elke kolom met behulp van een statief een erlenmeyer bevestigd met de opening naar beneden. Deze was voorzien van een kurk met een buisje erdoor (figuur 11a.). In de erlenmeyer bevond zich een voorraad percolatievloeistof. De uitstroomopening van het buisje was precies ter hoogte van het gewenste vloeistofniveau in de kolom gemonteerd.

In deze kolommen is de doorlatendheid bepaald van afdichtingslagen van 5 cm dikte voor een reeks bentonietgehaltes van 0 tot 7 drooggew%, dichtheid 1,70 tot 1,81 gr/cm^3 (afhankelijk van het bentonietgehalte) en gradient 8.

Bij deze experimenten werd Wyomingbentoniet gebruikt. Zand van de proefvelden in Wijster werd gebruikt als meng- en filtermateriaal. De verzadigings- en percolatievloeistof was gedemineraliseerd water.

Per bentonietgehalte werd ca. 2 weken gepercoleerd tot een constant debiet optrad.

In verband met het hoge debiet bij lage bentonietgehalten (0-3%) was continue meting en opvang van het debiet vooral 's nachts een probleem. Daarom werd bij deze kolommen 's nachts de afvoer afgesloten. Om dezelfde reden (hoog debiet) werd bij deze gehaltes de hoeveelheid debiet volumetrisch gemeten.

Bij hoge bentonietgehalten werd wel continu doorstroomd, maar 's nachts werd niet doorgemeten omdat de verdamping op een dergelijk klein debiet enige invloed had. Het debiet werd bij deze hoge bentonietgehalten door weging gemeten. Het soortelijk gewicht van water werd aangenomen 1,00 gr/cm^3 te zijn.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

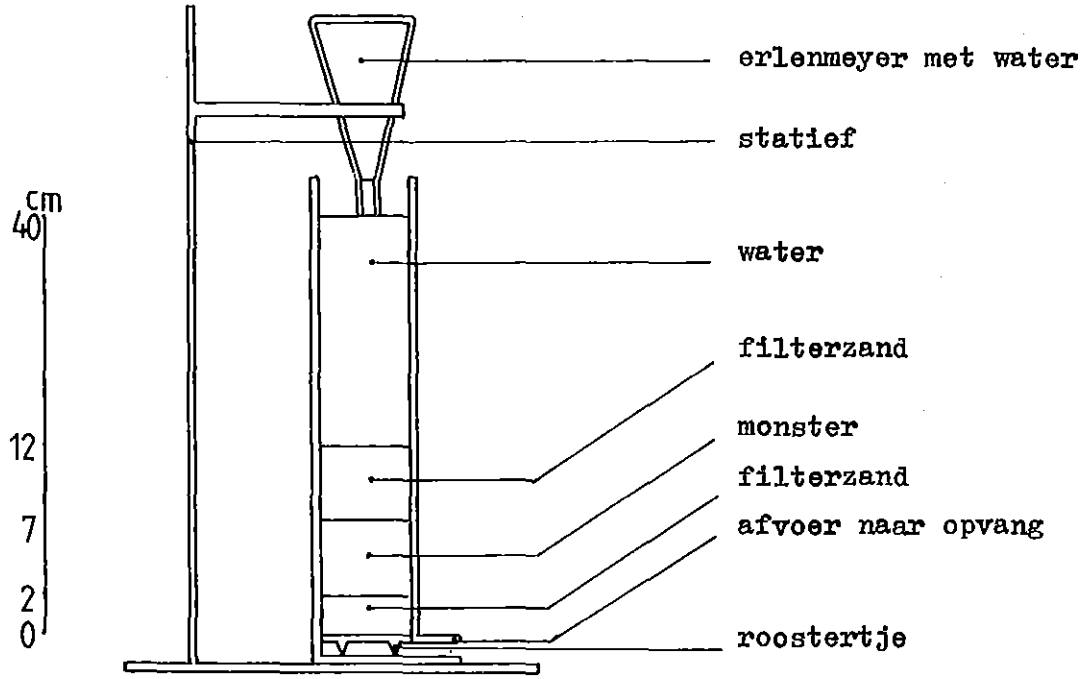


Fig. 11. Permeameter ter bepaling van de invloed van het bentonietgehalte van het mengsel op de doorlatendheid.

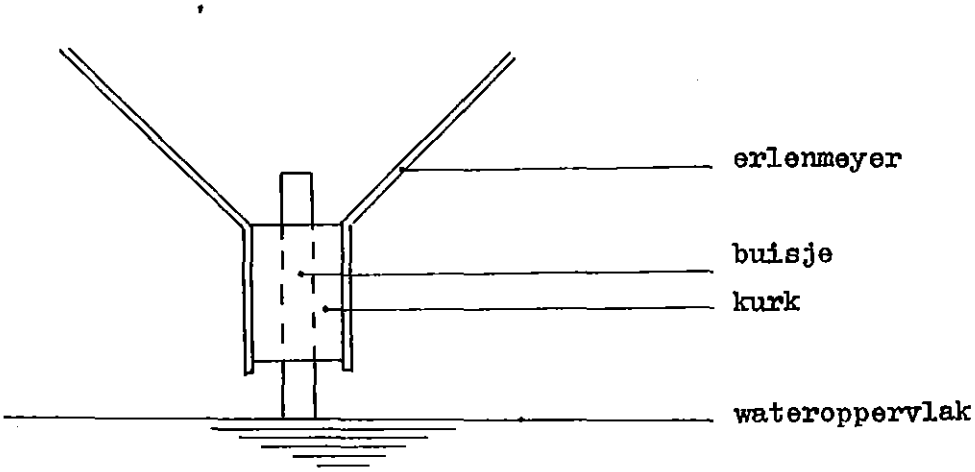


Fig. 11a. "Constante-gradiënt"-methode m.b.v. erlenmeyer.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

4.2. Meetresultaten

De meetresultaten (relatie doorlatendheid - bentonietgehalte) van deze experimenten zijn vermeld in tabel 9 en grafisch uitgezet in figuur 12.

Tabel 9 : Meetresultaten van de bepaling van de doorlatendheid van bentoniet-zand mengsels als functie van het bentonietgehalte.(i = 8 ; d = 5 cm ; ρ_{dr} = 1,70-1,81 gr/cm^3)

bentonietgehalte (drooggew%)	doorlatendheid (m/s)
0	$2,1.10^{-5}$
1	$2,3.10^{-5}$
1,5	$1,0.10^{-5}$
2	$1,5.10^{-5}$
2,5	$6,0.10^{-8}$
3	$3,6.10^{-7}$
3,5	$7,1.10^{-9}$
4	$2,2.10^{-9}$
5	$1,2.10^{-9}$
6	$5,5.10^{-10}$
7	$2,8.10^{-10}$

Wanneer de gemeten relatie uit figuur 12 vergeleken wordt met de resultaten van anderen, vermeld in GLAS (1984), SCHMITT (1983), LUNDGREN (1981), D'APPOLONIA (1980) en HAUSER (1977), dan kan het volgende geconstateerd worden :

- de gemeten relatie heeft evenals de andere relaties uit de literatuur een afname van de doorlatendheid bij toename van het bentonietgehalte,
- de gemeten relatie verloopt logaritmisch evenals de (meeste) relaties uit de genoemde literatuur ; er treedt afname van het effect van verhoging van het bentonietgehalte op bij hogere bentonietgehaltes,
- de gestelde norm voor bovenafdichtingen van een doorlatendheid kleiner dan 5.10^{-10} m/s wordt bereikt bij een bentonietgehalte van 6 à 7 drooggew% bentoniet na ca. 2 weken zwel,

34

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

- bij de gemeten relatie treedt een niet eerder gevonden verschijnsel op bij lage bentonietgehalten (kleiner dan 2 dr. gew.%) ; in dit traject lijkt de doorlatendheid onafhankelijk te zijn van het bentonietgehalte

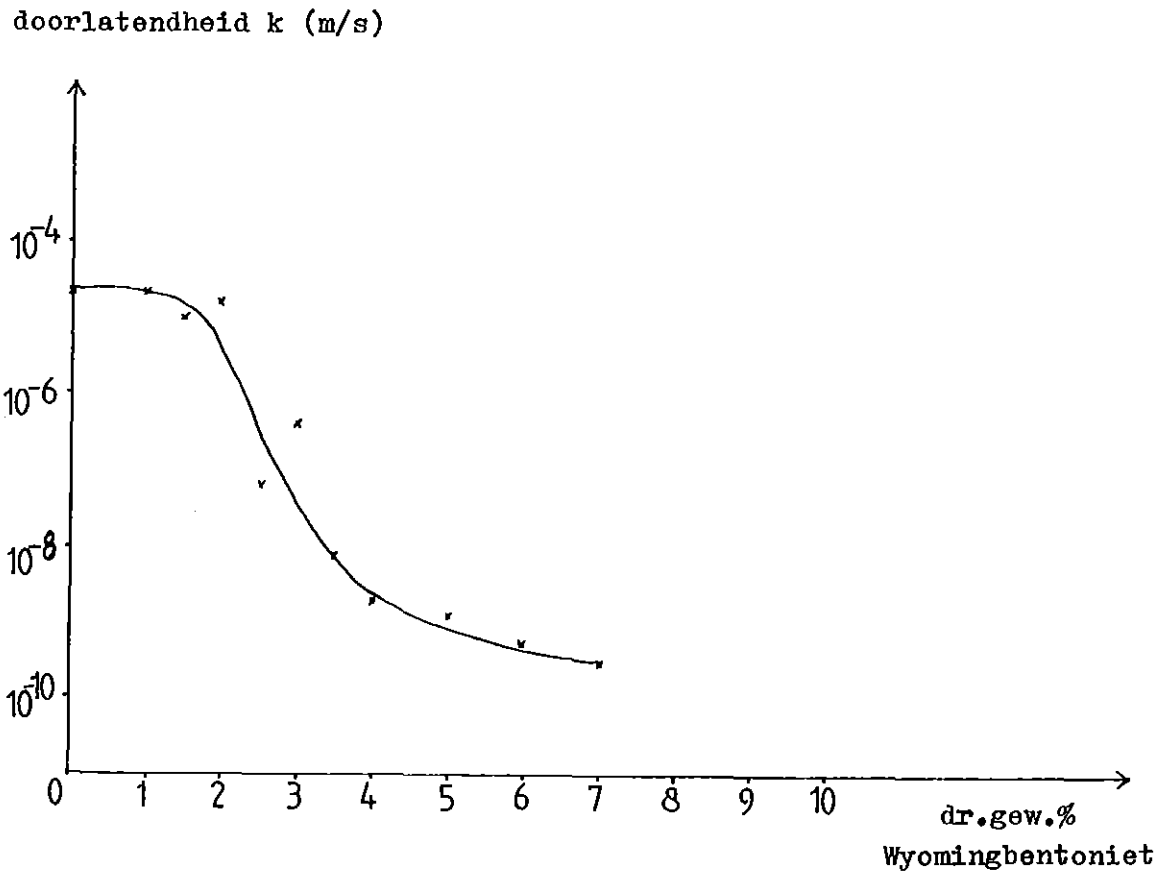


Fig. 12. Gemeten relatie bentonietgehalte-doorlatendheid van zand-bentoniet mengsels (i = 8 ; d = 5 cm).

4.3. Interpretatie

Zoals eerder beschreven (par. 2.1.1.) neemt de doorlatendheid van zand-bentoniet mengsels af bij toenemend bentonietgehalte, omdat met toename van bentoniet in de poriën, door meer zwelling daarvan, meer vertraging van stroomsnelheid optreedt, meer water gebonden wordt aan de kleideeltjes.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

Te verwachten is dat na een bepaald bentonietgehalte, wanneer het totale porievolume opgevuld zal zijn door het zwellen van de daarin aanwezige bentoniet, verdere toevoeging van bentoniet geen effect meer kan hebben op de doorlatendheid, omdat alle water op dat moment gebonden is in dubbellagen (afhankelijk van de gradient). Dit punt manifesteert zich in diverse grafische weergaves van de relatie tussen doorlatendheid en bentonietgehalte (GLAS (1984), LUNDGREN (1981)) als een verminderde afname of helemaal geen afname meer van de doorlatendheid bij toevoeging van meer bentoniet. In de gemeten relatie kwam dit minder tot uitdrukking. In principe is dit punt echter te berekenen als het porievolume van het monster bekend is, en tevens het zwelvermogen van de bentoniet.

voorbeeld :

porievolume zandskelet = 1 - 1,70/2,65 = 0,36 cm^3/cm^3
zwelvermogen Wyomingbentoniet = 9 cm^3/gr (tabel 3)
1 % bentoniet neemt in : 1 . 1,70/100 . 9 = 0,153 cm^3
2 % bentoniet neemt in : 2 . 1,70/100 . 9 = 0,306 cm^3
3 % bentoniet neemt in : 3 . 1,70/100 . 9 = 0,459 cm^3

Dus, bij optimale zweltijd, zou bij 3 dr.gew.% Wyomingbentoniet alle poriewater gebonden zijn. Dat dit bij het hier gevonden resultaat niet het geval was, is waarschijnlijk te wijten aan de te korte zweltijd (ca. 2 weken).

Opvallend bij de eigen waarnemingen is verder het voorkomen van een tamelijk constant niveau van doorlatendheid bij gehaltes van 0 tot ca. 2 dr.gew.%. Dit kan verklaard worden door de apparaatweerstand van de kolommen. Als deze te hoog wordt ten opzichte van de weerstand van het te meten monster, beheerst die volkomen het te meten debiet. Het debiet kan dan slechts zo hoog worden als de apparaatweerstand toelaat.

Tenslotte moet vermeld worden dat de periodes waarover een monster gemeten werd slechts 2 weken lang waren. Gezien de resultaten van de experimenten uit hoofdstuk 3 (welke echter pas later gedaan werden) waarin bleek dat de maximale zweltijd minimaal 2 maanden is, mag worden aangenomen dat de monsters nog niet op maximale zwelcapaciteit waren. Mogelijk liggen de te bereiken doorlatendheden nog lager dan hier gemeten.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

4.4. Conclusies inzake de invloed van het bentonietgehalte op de doorlatendheid van zand-bentoniet mengsels

Uitgaande van de eis voor bovenafdichtingslagen welke een doorlatendheid van maximaal 5.10^{-10} m/s voorschrijft, kan gesteld worden dat deze in dit experiment met de hier gebruikte zandsoort (proefvelden Wijster), gradiënt (i = 8), laagdikte (d = 5 cm), oppervlak (A = 63,6 cm^2) en zweltijd (ca. 2 weken), bereikt wordt bij ca. 6 dr.gew.% bentoniet (dichtheid (droog) : 1,80 gr/cm^3).

Hierbij moet opgemerkt worden dat de zweltijd van 2 weken veel te kort was. Bij andere experimenten (hfst. 3) bleek de maximale zwelcapaciteit pas na minimaal 2 maanden bereikt te worden. Het is zodoende mogelijk dat een lager bentonietgehalte bij maximale zwelling voldoet aan de gestelde eis.

Echter, toevoeging van meer bentoniet kan gewenst zijn omdat dit de afdichtingslaag een extra zwelcapaciteit geeft en extra plasticiteit, welke bruikbaar is in geval van onregelmatige zakking aan het oppervlak van het stort en in geval van beschadiging van de afdichtlaag.

5. DE CHEMISCHE BESTENDIGHEID VAN ZAND-BENTONIET MENGSELS

5.1. Experimenten met zand-bentoniet mengsels

Voor deze lange-duur proef is gebruik gemaakt van twee gelijke kolommen zoals in figuur 13 weergegeven. De twee kolommen werden A en B genoemd. In beide kolommen werd eenzelfde monster met dezelfde filterlaag onder en boven aangebracht. Vervolgens werd bovenop de grond in kolom A "schoon"water (gedemineraliseerd) geplaatsd en op de grond in kolom B "vuil"water uit het afval in Wijster. Na één week percoleren (tamelijk constant debiet) werd in kolom A het "schone"water vervangen door hetzelfde"vuile"water als in kolom B, door middel van overhevelen. Het debiet werd in beide kolommen continu gemeten door weging.

Als filtermateriaal onder en boven het monster werd Rosmalenzand en als mengmateriaal voor het monster zelf werd Wijsterzand gebruikt (zie GLAS (1984)).Het monster bevatte in beide kolommen

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

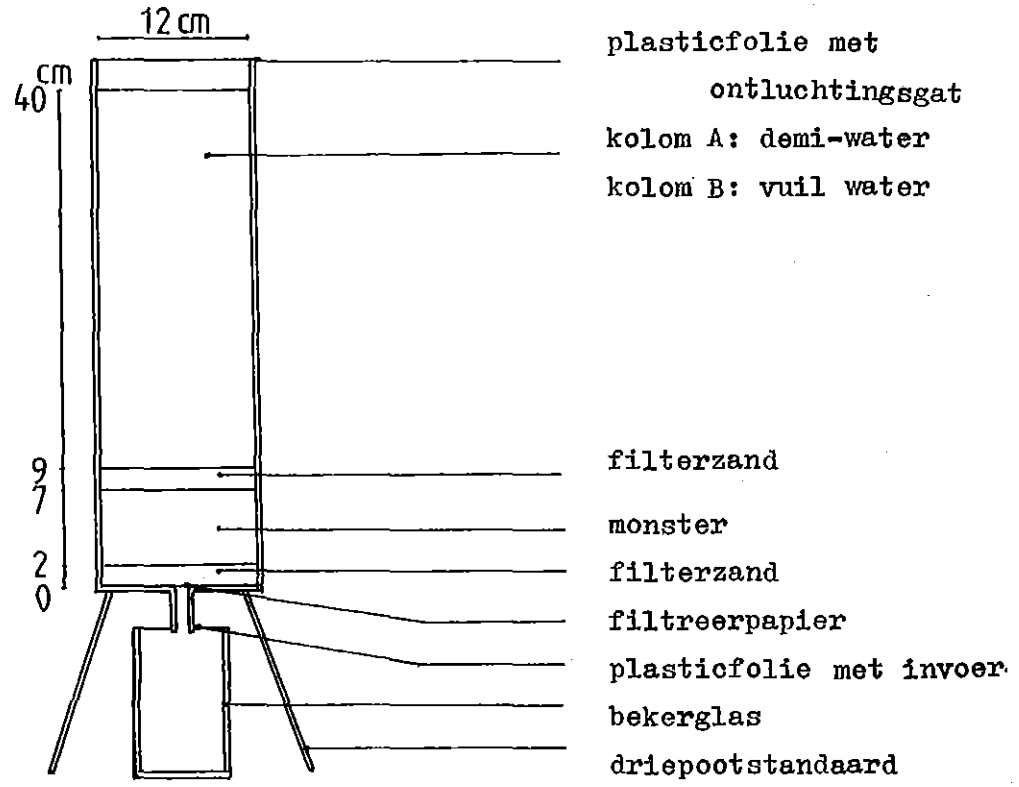


Fig. 13. Permeameter ter bepaling van de chemische bestendigheid van zand-bentoniet mengsels.

5 drooggewichts% Wyomingbentoniet. De dichtheid bedroeg 1,82 gr/cm^3 en de doorlatendheid werd gemeten onder een gradiënt van 8. De laagdikte was 5 cm en het oppervlak was 113,1 cm^2.

De chemische samenstelling van het "vuile"water uit Wijster is in het laboratorium van het I.C.W. geanalyseerd voor en na percolatie door de monsters. De resultaten van deze analyses staan vermeld in tabel 10.

5.2. Meetresultaten

Dit experiment bestaat in feite uit twee delen, namelijk :

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

Tabel 10 : Chemische samenstelling van het "vuile"water (Wijster, 1985) voor en na percolatie door de monsters met i = 8 en 5 dr.gew.% Wyomingbentoniet.
(analyse : chem.lab. I.C.W., Wageningen)

	voor percolatie		na percolatie	
K	2056	mg/l	2088	mg/l
Na	2828		2860	
Mg	128		92	
Ca	143,5		22	
Al	3,77			
Fe	8,38			
Mn	0,54			
Cu	0,161			
Ni	0,393			
Zn	0,900			
Cr	0,410			
Cd	0,001			
Pb	-			
dichtheid	1,005	gr/cm^3		
electr.geleid.verm.(EC)	2200	mS/m	1800	mS/m
zuurgraad (pH)	9,04			

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

- deel 1 : kolom A : "schoon"water
  kolom B : "vuil"water
- deel 2 : kolom A : "vuil"water

In tabel 11 zijn de gemeten doorlatendheden (k(m/s)) vermeld (a : deel 1 ; b : deel 2). In tabel 12 is het verloop van het electrisch geleidingsvermogen (EC(mS/m)) van het "vuile"water uit kolom A (na percolatie door het monster) gegeven. In figuur 14 zijn deze resultaten vervolgens grafisch weergegeven (a : deel 1 ; b : deel 2).

De doorbraak van "vuil"water in kolom A (deel 2) kan goed gevolgd worden door meting van de EC van het uitgestroomde water. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het electroliet karakter van het percolaat. De EC wordt namelijk bepaald door de aanwezige ionen in oplossing. Wanneer het "vuile"water door het monster in kolom A is gestroomd zal het electrisch geleidingsvermogen van het effluent (= percolaat na percolatie) stijgen.

Het indringingsfront kan van buitenaf ook gevolgd worden door de doorzichtige wand van de kolom. Over deze wand zijn op bepaalde tijdstippen transparanten gehangen waarop het front werd aangetekend. Deze transparanten staan getekend in figuur 15.

Na afloop van deel 1 van de proef kon de volgende vergelijkende morfologische beschrijving van de grond in kolom A en B gemaakt worden :

- kolom A ("schoon"water) : kleur - geel-bruin
  structuur - grote verkleefde aggregaten
  hier en daar scheurtjes
- kolom B ("vuil"water) : kleur - grijs-bruin
  structuur - korrelig, los
  fijn vertakt porienetwerk

Samenvattend kunnen de resultaten als volgt beschreven worden :

- de afdichtlaag waar direct na start van de proef "vuil"water op werd gezet (B) heeft en houdt een hoge doorlatendheid ($2{,}1.10^{-7}$m/s),
- de afdichtlaag waar eerst gedurende een week "schoon"water door was gestroomd, dat na een week vervangen werd door "vuil"water (A), vertoont eerst een afname van de doorlatendheid, waarna die een constante waarde aanneemt welke na verwisselen van de vloeistoffen na enkele fluctuaties gelijk blijft ($1{,}5\text{-}2{,}3.10^{-9}$m/s), en ongeveer 100 maal kleiner is dan in geval van kolom B ,

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

- de EC van het percolaat na percolatie neemt na ca. 45 dagen (totaal) toe en blijft dan constant vanaf ca. 70 dagen (totaal) op een niveau lager dan dat van niet-gepercoleerd percolaat uit Wijster, namelijk 1800 mS/m ten opzichte van 2200 mS/m ,
- figuur 14b vertoont ná verwisselen van de vloeistoffen (ca. 9 dagen) een verdere daling van de doorlatendheid vlak voor doorbraak van het "vuile"water ,
- uit de transparanten (figuur 15) blijkt dat na ca. 40 dagen over de hele omtrek van de kolom, over grote delen van het wand-oppervlak, het "vuile"water de onderzijde van de kolom heeft bereikt, waarbij opmerkelijk is dat het "vuile"water zich langs bepaalde voorkeurswegen door de grond beweegt.

Tabel 11a : Doorlatendheid (m/s) voor twee percolatieexperimenten beide met eenzelfde kolom (A = 113,1 cm^2) en eenzelfde monster (d = 5 cm ; 5 dr.gew.% Wyomingbentoniet) als functie van de tijd (dagen), bij gradiënt 8. Percolatievloeistof A : "schoon"water; B :"vuil"water (Wijster, 1985).

tijd (dagen)	A : k(m/s)	B : k(m/s)
1	$2,6.10^{-8}$	$2,8.10^{-7}$
2	$4,0.10^{-9}$	$1,9.10^{-7}$
5	$2,0.10^{-9}$	$2,1.10^{-7}$
6	$2,3.10^{-9}$	$2,1.10^{-7}$
7	$2,4.10^{-9}$	$2,1.10^{-7}$
8	$2,1.10^{-9}$	$2,0.10^{-7}$
9	-	$2,1.10^{-7}$

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

Tabel 11b : Voortzetting meting doorlatendheid (m/s) als functie van de tijd (dagen) bij gradiënt 8, na verwisseling van percolatievloeistoffen in kolom A uit tabel 11a, nu met percolatievloeistof A : "vuil"water (Wijster,1985).

tijd (dagen)	A : k(m/s)	tijd (dagen)	A : k(m/s)
12	$1,6.10^{-9}$		
14	$1,5.10^{-9}$	75	$1,4.10^{-9}$
36	$7,3.10^{-10}$	80	$2,1.10^{-9}$
39	$5,4.10^{-10}$	85	$2,3.10^{-9}$
41	$4,1.10^{-10}$	90	$2,4.10^{-9}$
56	$1,8.10^{-9}$	120	$2,0.10^{-9}$
60	$2,8.10^{-9}$	130	$1,8.10^{-9}$
64	$2,9.10^{-9}$	140	$1,8.10^{-9}$
68	$2,3.10^{-9}$	150	$1,5.10^{-9}$
70	$1,4.10^{-9}$	200	$1,5.10^{-9}$

Tabel 12 : Electrisch geleidingsvermogen (EC(mS/m)) bij 20°C van effluent uit kolom A na percolatie van het "vuile"water uit Wijster (Wijster, 1985).

tijd (dagen)	EC (mS/m)	tijd (dagen)	EC (mS/m)
43	1060	74	1740
47	1160	78	1750
53	1210	81	1780
55	1260	84	1770
56	1270	88	1780
57	1320	90	1780
60	1480	91	1800
61	1490	118	1820
62	1510	123	1770
63	1540	130	1780
64	1780	150	1870
67	1750	155	1850
70	1750	200	1800

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

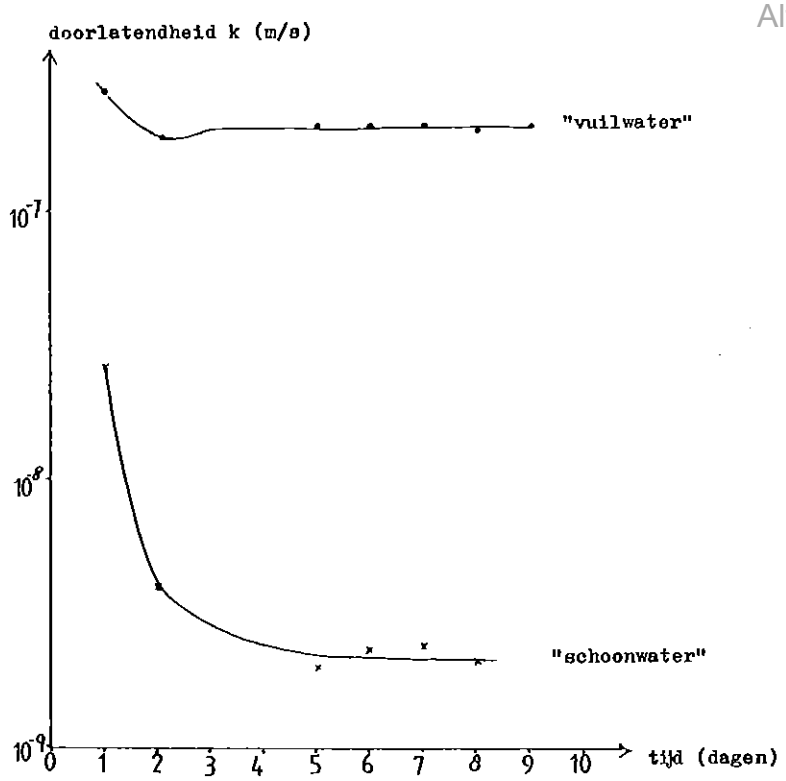


Fig. 14a. Verloop van de doorlatendheid k in de tijd, voor twee identieke monsters zand-bentoniet mengsel (i = 8), bij percolatie met "schoon"- (A) en "vuil"water (B).

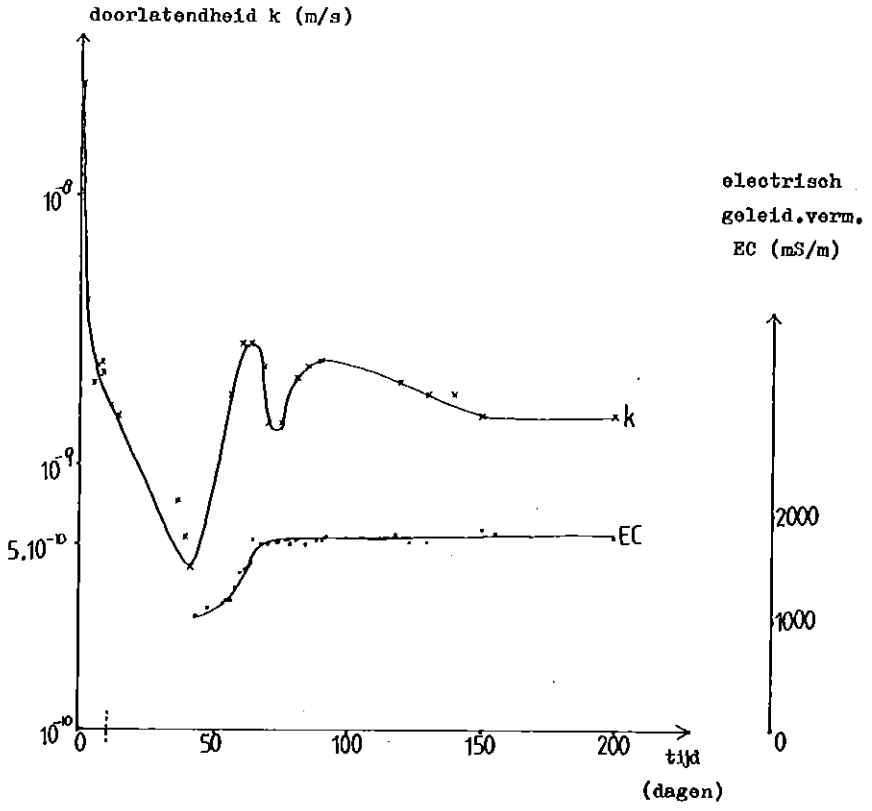


Fig. 14b. Verloop van doorlatendheid k en el.geleid.verm. EC van het effluent in de tijd, voor het monster uit kolom A (ca. 10 dagen verzadigd met "schoon"water) bij percolatie nu met "vuil"water (i = 8).

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-Wageningen UR

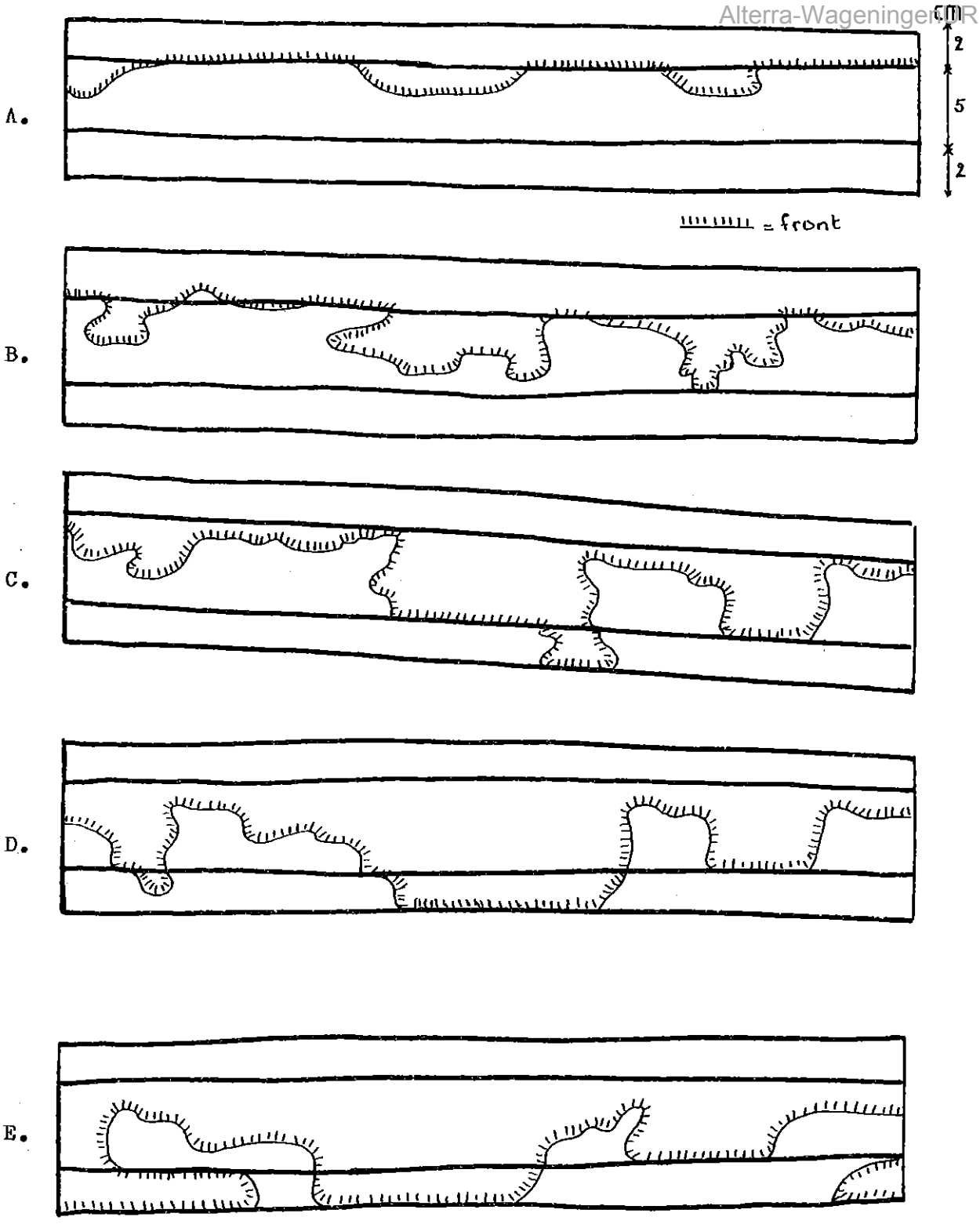


Fig. 15. Indringingsfront van "vuil"water in kolom grond (2 cm filterzand, 5 cm zand-bentoniet mengsel met 5 dr.gew.% Wyomingbentoniet, 2 cm filterzand) bij i = 8, op de tijdstippen : A 25/4/85 ; B 2/5/85 ; C 9/5/85 ; D 23/5/85 ; E 6/6/85.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

5.3. Interpretatie

De kolom waar direct "vuil"water op was gezet vertoonde uiteindelijk een doorlatendheid die ca. 100 maal groter was dan die van de kolom waar eerst, gedurende een week, "schoon"water door had gestroomd. Een dergelijk gedrag werd ook door ALTHER (1982) en SCHMITT (1983) vastgesteld. Blijkbaar kan bentoniet in "vuil" water niet goed zwellen. Een goede verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat aanwezige Na^+-ionen aan het adsorptiecomplex door Ca^{2+}-ionen uit het "vuile"water worden vervangen, waardoor de zwelcapaciteit van de bentoniet afneemt (LUNDGREN (1981), HAJI DJAFARI en WRIGHT (1983)). Hiervoor is echter de verhouding Na^+/Ca^{2+} in het "vuile"water te hoog.

De zuurgraad van het "vuile"water (pH 9,04) leidt niet tot sterke oplossing van kleibestanddelen, waardoor de grotere doorlatendheid te verklaren zou zijn geweest (ALTHER (1982), BROWN en ANDERSON (1983), HAJI DJAFARI en WRIGHT (1983)).

De meest aannemelijke verklaring is daarom de grote zoutconcentratie (ionsterkte) van het "vuile"water. Deze vormt weerstand voor de diffusie van de diffuse dubbellaag, waardoor de klei niet kan zwellen (niet voldoende). Dit wordt bevestigd in de morfologische beschrijving van de monsters na percolatie. Deze toont dat in kolom B de bentoniet-zand laag geen dichte verkitte afsluitende laag is geworden, zoals in kolom A, maar een korrelige losse structuur heeft.

Na zwel van het zand-bentoniet mengsel in "schoon"water gedurende een week, blijkt het resistent te zijn tegen aantasting door "vuil"water, in ieder geval blijft de doorlatendheid ver beneden die in kolom B.

Naar aanleiding van de resultaten van later gedane experimenten, besproken in hoofdstuk 3, moet worden aangemerkt dat 1 week zweltijd erg kort is. De maximale zwelcapaciteit wordt pas bereikt na minstens 2 maanden percoleren en zwellen. Aangenomen wordt nu dat de doorlatendheid van kolom A na een week niet constant was, maar nog verder zou dalen wanneer daar de tijd voor was genomen. Inderdaad vertoont figuur 14b een verdere afname van doorlatendheid vlak voor de doorbraak van het "vuile"water. Dit is mogelijk een doorgaande daling van doorlatendheid onder invloed

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

van het "schone"water. Hierna treedt welliswaar stijging van de doorlatendheid op maar deze blijft uiteindelijk toch ca. 100 maal kleiner dan die in kolom B. Daarvoor is echter nog geen goede verklaring gevonden.

Opmerkelijk is verder dat de EC vóór percolatie van het "vuile" water hoger is dan ná percolatie. Verondersteld wordt dat er ionen in de grond zijn achtergebleven, afgefilterd of neergeslagen, welke een dichtkitting tot gevolg hebben gehad (ALTHER (1982), SIMONS, HäNSEL en MESECK (1983), BECHTTE (1983)).

5.4. Conclusies inzake de chemische bestendigheid van zand-bentoniet mengsels als basisafdichting

Uit deze experimenten blijkt niet overtuigend dat zand-bentoniet mengsels geschikt zijn als basisafdichtingslaag. Er werden, na verzadiging met "schoon"water vooraf, doorlatendheden bereikt van $1,5\text{-}2,3.10^{-9}$ m/s voor "vuil"water (gradiënt 8 ; dichtheid 1,82 gr/cm^3 ; d = 5 cm ; 5 dr.gew.% Wyomingbentoniet). Dit is voor onderafdichting veel te hoog. Wel was deze doorlatendheid ca. 100 maal lager dan van eenzelfde laag die niet van te voren met "schoon"water verzadigd was. Het is mogelijk dat een langere zwelperiode in "schoon"water betere resultaten levert dan nu na 1 week zwellen. Latere proeven hebben namelijk aangetoond dat maximale zwelcapaciteit pas bereikt wordt na minimaal 2 maanden.

Tot slot kan worden opgemerkt dat nader onderzoek gewenst is waarbij juist gekeken gaat worden naar het effect van een grotere laagdikte en een hoger bentoniegehalte op de bestendigheid van de zand-bentoniet mengsels.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

6. CONCLUSIES

Bij laboratoriumexperimenten aan zand-bentoniet mengsels is gebleken dat volledige zwelling van de bentoniet in het mengsel minstens 2 maanden duurt.

In verband met het feit dat bij vertikale stroming van water door zand-bentoniet mengsels een niet-lineair verband werd geconstateerd tussen stroomsnelheid en gradiënt, wordt geconcludeerd dat de wet van Darcy niet opgaat. Laboratoriummetingen kunnen dus niet zonder meer via deze wet geïnterpoleerd en geëxtrapoleerd worden en als voorspelling van de veldsituatie gebruikt worden. Bij alle waarnemingen aan stroming van water door zand-bentoniet mengsels moet de gradiënt vermeld worden waarbij de metingen gedaan zijn.

De doorlatendheid van monsters met 5 drooggewichts% bentoniet (d = 5 cm) bij gradiënt 5-10 bedroeg voor Wyomingbentoniet 0,01 mm/d en voor Geactiveerde Europese bentoniet 0,03 mm/d (na resp. 20 en 30 dagen zwellen), hetgeen beide ruim onder de gestelde norm voor bovenafdichtingen ligt (0,05 mm/d). Er werden dichtheden gerealiseerd van ca.1,77 gr/cm^3 (droog).

Toevoeging van meer dan 5 dr.gew.% bentoniet aan het mengsel kan echter gewenst zijn in geval van beschadiging van de laag, bij onregelmatige zakking van het afval. Door een hoger bentonietgehalte heeft de laag dan een reserve zwelvermogen.

Uit de in dit onderzoek verrichte experimenten met betrekking tot de chemische bestendigheid van zand-bentoniet mengsels als onderafdichting is niet duidelijk gebleken dat het materiaal daarvoor bruikbaar is. De doorlatendheid was bij deze methode te hoog. Wel bleek een gunstig effect van vooraf verzadigen van de afdichtlaag met "schoon"water alvorens hem bloot te stellen aan "vuil"water. Nader onderzoek met betrekking tot het gewenste bentonietgehalte en de laagdikte voor onderafdichtingen is aan te bevelen, mede omdat volgens de huidige Richtlijnen voor Gecontroleerd Storten (Min. V.R.O.M., 1984) op nieuw in te richten stortterreinen een basisafdichting voorgeschreven wordt.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

7. LITERATUUR

ALTHER, G.R., 1982. The role of bentonite in soil sealing applications. Illinois

BECHTLE, W., 1983. Grundlagen für die Abdichtung von Deponien mit Ton. Stuttgart

BOLT, G.H. and M.G.M. BRUGGENWERT, 1978. Soil Chemistry; A. Basic Elements. Wageningen

BROWN, K.W. and D.C. ANDERSON, 1983. Effects of organic solvents on the permeability of clay soils (project summary). (EPA-600/S2-83-016) Texas

D'APPOLONIA, D.J., 1980. Slurry trench cut-off walls for hazardous waste isolations. Pittsburgh

FAHMY, M.I., 1961. The influence of clay particles on the hydraulic conductivity of sandy soils. Wageningen

GLAS, H., 1984. Bentoniet-grondlagen als afdichting op stortplaatsen. Stageverslag, I.C.W., Wageningen

GÖDECKE, H.J., 1980. Entwicklung eines Fliessgesetzes für die Porenwasserdurchströmung feinkörniger Böden unter kleinen Druckgradienten. Bochum

HAJI DJAFARI, S. and J.C. WRIGHT jr., 1983. Determing the long term effects of interactions between waste permeants and porous media. Philadelphia

HAUSER, V.L., 1977. Seepage control by particle size selection. Michigan

HOEKS, J. en G.J. AGELINK, 1982. Onderzoek naar mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen. Rapport nr 3, I.C.W., Wageningen

HOEKS, J. en A.H. RYHINER, 1985. Onderzoek naar de practische uitvoerbaarheid van bovenafdichting op afvalstortterreinen. Nota I.C.W. 1609, Wageningen

KARADI, G. and I.V. NAGY, 1961. Investigations into the validity of the linear seepage law. Budapest

KOOREVAAR, P. en C. DIRKSEN, 1982. Elements of soil physics. (college dictaat). Wageningen

LUNDGREN, T.A., 1981. Some bentonite sealants in soil mixed blankets. Int. Conference, Stockholm

SCHMITT, G.P., 1983. Mineralische Abdichtungen durch Bentoniet-Ton-Gemische mit natürlichen Böden. Koblenz

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

SIMONS, H., W. HäNSEL und H. MESECK, 1983. Beständigkeit von Deponiedichtungen aus Ton gegen Sickerwasser. Braunsweig

SLEPIĆKA, F., 1961. The laws of filtration and limits of their validity. Praag

VONCKEN, G.K.S.J.M., 1969. Toetsing van de wet van Darcy in verzadigde stroming bij lage drukgradienten. (Scriptie voor Cultuurtechniek) Wageningen

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

BIJLAGE I

BEGRIPPENLIJST

afdeklaag	=	het geheel van grondlagen en eventuele bovenafdichtlaag waarmee een afvalstort na de beëindiging van de stortactiviteit wordt afgedekt (= afdekgrond + bovenafdichtlaag),
bovenafdicht(ings)laag	=	uitsluitend die laag in de afdeklaag die tot doel heeft de infiltratie van regenwater in het stort geheel of ten dele te verhinderen,
afdekgrond	=	laag teelaarde boven de bovenafdichtlaag, aangebracht ten behoeve van de verder geplande activiteit op het stort,
basis/onderafdicht(ings)laag	=	een ondoorlatende laag onder een afvalstort aangelegd, die tot doel heeft het vervuilde percolatiewater uit het afval op te vangen voordat het zich bij het grondwater kan voegen.

ICW-nota 1722
Team Integraal Waterbeheer
Alterra-WageningenUR

BIJLAGE II

SYMBOLENLIJST

v = filtersnelheid (m/s)
k = doorlatendheid (m/s)
i = hydraulische (druk)gradiënt (-)
Q = debiet (cm^3/uur)
A = oppervlak monster (= kolom) (cm^2)
ΔH = drukverschil onderzijde-bovenzijde monster (m)
Δz = afstand bovenzijde-onderzijde monster (m)
d = dikte monster = z (m)
H = stijghoogte water = drukhoogte + plaatshoogte (m)
h_w = hoogte waterkolom op het monster - filterlaag bovenzijde (m)
P = extra druk op monster t.o.v. atmosferische druk (m)
ρ_{dr} = droge dichtheid van de grond (gr/cm^3)
$d1$ = dikte filterlaag boven monster (m)
$d2$ = dikte monster = z = d (m)
$d3$ = dikte filterlaag onder monster (m)
$H1$ = stijghoogte bovenzijde monster t.o.v. ref. vlak (m)
$H2$ = stijghoogte onderzijde monster t.o.v. ref. vlak (m)
$H0$ = stijghoogte onderzijde permeameter t.o.v. ref. vlak (m)
$P0$ = extra druk onderzijde permeameter t.o.v. atmosferische dr. (m)
P = (waterbalans) percolatie (mm)
N = neerslag (mm)
E = verdamping (mm)
R = oppervlakte-afvoer (mm)
A = zijdelingse afvoer door de afdeklaag (mm)
B_1 = berging van de afdeklaag (mm)
B_2 = berging van het afval (mm)
I = infiltratie (mm)