BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

NN31545.1875

ICW Nota 1875
juni 1988

nota

instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen

ONDERZOEK NAAR DE GESCHIKTHEID VAN NATUURLIJKE MATERIALEN VOOR AFDICHTING VAN VUILSTORTPLAATSEN

Scriptie in het kader van het afstudeervak
Cultuurtechniek

G. Jessen

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS
0000 0363 4298

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, 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

28 SEP. 1988

JSN 291079 *

NOTA 1875

I N H O U D

	blz.
VOORWOORD	1
1. INLEIDING	2
1.1. Introductie	2
1.2. Doelstellingen	3
1.3. Werkopzet en rapportindeling	3
2. VUILSTORTPLAATSEN	5
2.1. De verontreinigingsproblematiek	5
2.2. Afdichting	6
3. FYSISCH-CHEMISCHE ASPECTEN	10
3.1. Kleimineralogische samenstelling	10
3.2. Influentsamenstelling	13
3.3. Het stromingsgedrag	14
3.4. Verdichting	20
4. HET ONDERZOEK	25
4.1. De gebruikte materialen	25
4.1.1. De grondmonsters	25
4.1.2. Het influent	29
4.2. De proefopzet	30
4.2.1. De verdichtingsmethode	30
4.2.2. De doorlatendheidsmetingen	31
5. RESULTATEN	35
5.1. Zwelcapaciteit	35
5.2. Dichtheden	35
5.3. Doorlatendheden	36
5.4. Lekkages	44

NOTA 1875

vervolg INHOUD

6. CONCLUSIES 47
6.1. Conclusies 47
6.2. Suggesties voor verder onderzoek 48

SAMENVATTING 50

LITERATUUR 53

BIJLAGEN 56

VOORWOORD

Het voorliggend onderzoek vormt een van de laatste fases van mijn studie Cultuurtechniek aan de Landbouw Universiteit Wageningen. Het is mijn afstudeervak. Ik heb het afstudeervak ingevuld met een onderzoek dat met bodemsanering te maken heeft, om mijn kennis over dit onderwerp uit te breiden.

Het onderzoek heeft vooral te maken met het isoleren van vuilstortplaatsen met behulp van natuurlijke materialen. Klei en zand-bentoniet mengsels zijn onderzocht om te kijken of ze geschikt zijn voor het afdichten van vuilstortplaatsen. Het onderzoek is uitgevoerd op het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (Hoofdafdeling Waterkwaliteit) te Wageningen van eind oktober 1987 tot april 1988.

Het onderzoek bestaat uit experimenten met grondmonsters en een literatuurrecherche naar de belangrijkste factoren, zoals de specifieke eigenschappen van de klei en het niet-Darcy stromingsgedrag. In het laboratorium zijn monsters onderzocht om het stromingsgedrag te bepalen. Het stromingsgedrag van het monster bepaalt grotendeels de geschiktheid voor afdichtingsmateriaal.

Voor het goede verloop van dit onderzoek wil ik de mensen bij het ICW bedanken en met name Jan Hoeks en Arthur Ryhiner voor hun intensieve begeleiding.

1. INLEIDING

1.1. Introductie

De belasting van het milieu door allerlei verontreinigingen is de laatste jaren toegenomen. Het zelfreinigend vermogen van het milieu dreigt steeds vaker overschreden te worden. De samenleving en overheid zijn zich hiervan bewust geworden. De overheid voert een beleid dat verontreiniging van bodem, water en lucht terugdringt en voorkomt. Het beleid ten aanzien van vuilstortplaatsen is dat bodem en grondwater zo weinig mogelijk verontreinigd worden door stoffen uit de vuilstort. Het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer heeft daarom de richtlijn 'Gecontroleerd Storten' (VROM, 1985) opgesteld. In deze richtlijn staat dat onder nieuwe afvalstorten een waterdichte laag met bovenliggend drainagesysteem moet worden aangebracht. Als waterdichte onderafdichting worden hoofdzakelijk synthetische produkten (kunststof- en bitumenfolies) vermeld en geen natuurlijke materialen (zware kleien en zand-bentoniet mengsels).

Bij voormalige en nog operationele vuilstorten is het aanbrengen van een onderafdichting technisch moeilijk realiseerbaar en economisch niet haalbaar. Om bij deze 'oude' vuilstortplaatsen het gevaar van bodem- en grondwaterverontreiniging te beperken, wordt de vuilstort aan de bovenzijde afgedekt met een ondoorlatende laag, die voorkomt dat regenwater infiltreert en stoffen uit de stort meevoert naar de onderliggende bodem en het grondwater.

Ook nieuwe stortplaatsen worden met een slecht-doorlatende laag afgedekt om de hoeveelheid regenwater en daarmee de hoeveelheid perkolatiewater in het stort te reduceren.

De bovenafdichting kan bestaan uit een synthetisch produkt of een natuurlijk materiaal. Om de bovenafdichting afdoende tegen externe invloeden te beschermen wordt er een afdekking voorgeschreven van een laag grond met daarin een drainagesysteem (VROM, 1985).

1.2. Doelstellingen

De doelstellingen van het onderzoek luiden als volgt: het onderzoeken van de geschiktheid van natuurlijke materialen voor afdichtingsmateriaal op afvalstortterreinen.

De natuurlijke materialen zijn Nederlandse kleien en zand-bentoniet mengsels. Het materiaal wordt getoetst op het hydraulische gedrag onder variërende gradiënten en verschillende influenten, met het oog op de eisen, die men stelt aan het materiaal bij gebruik voor een afdichting.

1.3. Werkopzet en rapportindeling

De theoriën over de fysisch-chemische processen zijn verzameld uit de literatuur. Bij deze processen spelen vooral de granulaire en kleimineralogische samenstelling een rol. Het belangrijkste fysische proces is de doorstroming van het monster.

De stroming door het kleimonster kan een darcy of niet-darcy stroming zijn. Bij een lineaire of darcy stroming is de doorlatendheid constant. Een niet-darcy stroming betekent dat de doorlatendheid afneemt bij lagere gradiënten. Turbulente stroming treedt op bij hogere gradiënten en doet de doorlatendheid sterk afnemen. De niet-darcy stroming treedt op in kleiïge bodems bij lage gradiënten (GABENER, 1983).

Om het bovengenoemde stromingsgedrag aan te tonen is gekozen voor de "falling head" methode. Bij deze methode wordt de verzadigde doorlatendheid van een grondmonster bepaald bij dalende gradiënt.

De grondmonsters zijn uit verschillende bronnen verzameld. Ze zijn geselecteerd op de granulaire en kleimineralogische samenstelling, die de doorlatendheid naar verwachting sterk beïnvloeden. Ze zijn in het laboratorium van het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding doorgemeten met gedemineraliseerd water en perkolatiewater van een vuilstort. Uit de resultaten van het bovengenoemde onderzoek is de geschiktheid van het materiaal voor afdichting nagegaan.

Of het materiaal werkelijk voor gebruik als afdichtingsmateriaal in aanmerking komt is ook afhankelijk van de winningsmogelijkheden en economische competiviteit met andere materialen.

Het rapport is als volgt opgebouwd: hoofdstuk 2 beschrijft de processen in het afvalstort en de mogelijkheden om de invloed van deze processen op de omgeving te verminderen. Hoofdstuk 3 somt fysisch-chemische aspecten op, die de experimenten beinvloeden. In hoofstuk 4 zijn de gebruikte materialen en de onderzoeksmethode beschreven. In hoofdstuk 5 staan de onderzoeksresultaten van de verdichting en de doorlaatfactoren. Tevens is de lekkage door de afdichting berekend. In hoofdstuk 6 zijn de conclusies en de suggesties voor verder onderzoek aangegeven.

2. VUILSTORTPLAATSEN

2.1. De verontreinigingsproblematiek

De meest gebruikte techniek voor het 'verwerken' van afval is het storten (in 1983 werd circa 85% van alle afvalstoffen gestort). De bedoeling bij het storten van afvalstoffen is: het in of op de bodem brengen van afvalstoffen zodanig dat er tijdens en na de beëindiging van de stortactiviteiten zo min mogelijk milieuhygiënische en esthetische bezwaren optreden. Het stortterrein moet na beëindiging van de stortactiviteiten een positieve functie kunnen vervullen (VROM, 1985).

Het grootste probleem bij vuilstortplaatsen is de mogelijke verontreiniging van de ondergrond en het grondwater. Transport van stoffen uit het stort wordt voornamelijk veroorzaakt door de vertikale waterstroming in de afvalberg. De waterbalans van een stort wordt schematisch weergegeven in Fig. 1.

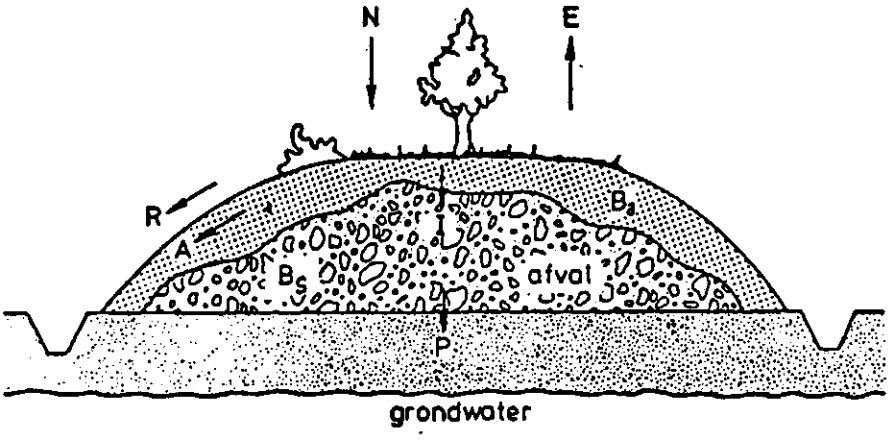


Fig. 1. De waterbalans in een stort (bron: HOEKS en AGELINK, 1982)

Volgens de bovenstaande Fig. 1 is de waterbalans in de stort:

$$P + B_s = N - A - E - R - B_a$$

De betekenis van de symbolen is:

P = het perkolatiewater uit het stort

B_s = het water geborgen in het stort

N = het neerslagwater op het stort

A = het water afgevoerd zijdelings door de afdeklaag

E = het water evapotranspirerend uit de afdeklaag

R = het water afstromend oppervlakkig over de afdeklaag

B_a = het water geborgen in de afdeklaag

Het terugdringen van het verontreiningsgevaar voor de ondergrond door hydrologische ingrepen kan bereikt worden door de hoeveelheid perkolerend water te verminderen (HOEKS en AGELINK, 1982).

De kwaliteit van het water wordt bepaald door de gestorte afvalstoffen en de processen in het stort. De volgende fasen met kenmerkende processen treden op:

1. De aërobe fase. De processen in deze fase hebben weinig invloed op de samenstelling van het perkolatiewater.
2. De verzuringsfase. Tijdens deze fase wordt het perkolatiewater gekarakteriseerd door een lage zuurgraad en een hoge verontreinigingsgraad.
3. De methaangistingsfase. In deze laatste fase ontstaat een relatief 'schoon' perkolatiewater ten opzicht van het water uit de zuurvormende fase met een hogere zuurgraad (HOEKS et al., 1981; VROM, 1985).

2.2. Afdichting

Bij een nieuwe stort wordt in het algemeen het afval ingesloten door een afdeklaag en een stortbed (zie Fig. 2). Het stortbed is de voorziening om het afval verantwoord te storten en de afdeklaag maakt de stort voor recultivatie geschikt. De 'oude' storten worden alleen aan de bovenkant met een afdeklaag afgesloten omdat het aanbrengen van een onderafdichting technisch moeilijk realiseerbaar en economisch onhaalbaar is voor alle 'oude' stortplaatsen.

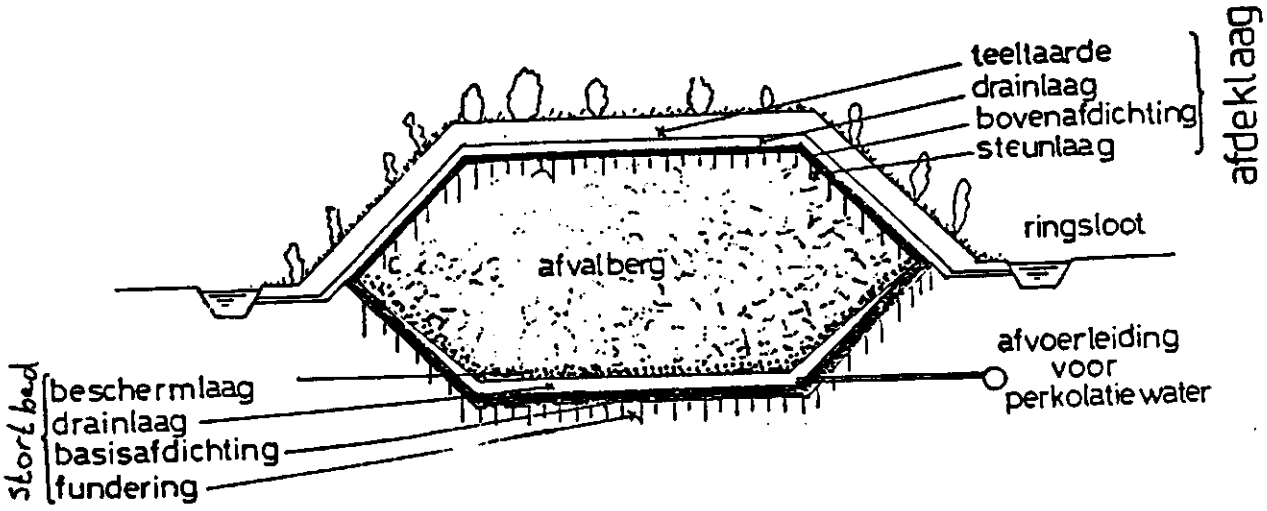


Fig. 2. Afval ingesloten door de afdichtingslagen

De functies van de afdeklaag zijn:
- bedekking van het afval (esthetische overwegingen);
- standplaats voor de vegetatie en dieren na de recultivatie van de stort;
- verminderen van de infiltratie van het regenwater in de stort;
- reguleren van de gasafvoer.

De afdeklaag bestaat uit de volgende lagen:
a. een laag met teeltaarde voor recultivatie van de stort;
b. een laag met een drainagesysteem om de overtollige neerslag af te voeren;
c. de afdichtingslaag. De laag is slecht doorlatend voor water om infiltratie van regenwater in de stort te beperken;
d. de steunlaag. De steunlaag voorkomt beschadiging van de bovenafdichting door scherpe voorwerpen uit het afval (HOEKS en AGELINK, 1982; VAN DE BOGAARD, 1986).

De bovenafdichting moet voldoen aan de volgende eisen:
- ten eerste een slechte doorlatendheid om de hoeveelheid infiltrerend regenwater in het afval te verminderen. Volgens HOEKS en AGELINK

(1982) moet de hoeveelheid infiltrerend water minder zijn dan 50 millimeter per jaar. De materialen van de afdichting bepalen de doorlaatfactor en dikte van de laag. In onderstaande tabel is de lekkage door de afdichting berekend bij de gegeven doorlatendheden en met een waterlaag van 1,0 meter op de afdichting gedurende 200 dagen per jaar.

Tabel 1. De dikte van en de infiltratie door de afdichting

Verzadigde doorlatendheid (k) (m/s)	(mm/dag)	Dikte (m)	Hydraulische gradiënt (i) (-)	Infiltratie (mm/jaar)
5.10^{-8}	4,320	1,00	2,00	1729
1.10^{-8}	0,864	1,00	2,00	346
5.10^{-9}	0,432	1,00	2,00	173
1.10^{-9}	0,086	0,60	2,67	46
5.10^{-10}	0,043	0,30	4,33	37
1.10^{-10}	0,009	0,30	4,33	7,5
5.10^{-11}	0,004	0,30	4,33	3,7
1.10^{-11}	0,001	0,30	4,33	0,7

De stijghoogte aan de onderkant van de afdichting is nul. De hele afdichting is dus verzadigd.

- De tweede eis is goede plastische eigenschappen om de zettingen te volgen. De zettingen zijn het gevolg van afbraakprocessen in het afval.
- De afdichtingslaag moet uit milieuvriendelijke materialen samengesteld zijn.
- Als laatste eis wordt de bestendigheid tegen beschadiging door wortels van de vegetatie en activiteiten van bodemdieren opgesomd (HOEKS en AGELINK, 1982; VROM, 1985).

Het stortbed onder het afval heeft als doel het perkolatiewater uit de stort op te vangen en af te voeren. Het perkolaat kan dan de onderliggende bodem en het grondwater niet verontreinigen. Het perkolaat kan na zuivering op het oppervlaktewater geloosd worden (HEIDEMIJ, 1984; VROM, 1985). Het stortbed onder het afval kan natuurlijk alleen aangelegd worden bij nieuwe stortterreinen of compartimenten.

Het stortbed ziet er als volgt uit:

a. een beschermingslaag. De laag beschermt het onderliggende systeem tegen invloeden van uit het afval;
b. een laag met het drainage systeem. Het drainage systeem is voor het afvoeren van het perkolaat uit het stort;
c. de basisafdichting. Deze laag is ondoorlatend om het perkolaat tegen te houden;
d. de funderingslaag. Dit is de laag waarop de basisafdichting wordt aangebracht. Het is bewerkte ondergrond of een zandbed met drains om de werking van de afdichtende laag te controleren.

De eisen voor de basisafdichting luiden:

- de basisafdichting moet ondoorlatend zijn en blijven in de toekomst. Deze eis is absoluut nooit te bereiken. Synthetische produkten zijn vrijwel ondoorlatend, maar hebben een beperkte levensduur. Natuurlijke materialen zijn zeer slecht tot slecht doorlatend en hebben een vrijwel eeuwige levensduur;
- de afdichting moet bestand zijn tegen de chemische invloeden uit de stort. De basisafdichting wordt blootgesteld aan chemisch aggressieve stoffen uit het afval;
- de afdichting moet goede plastische eigenschappen bezitten om de zettingen van de ondergrond op te vangen als gevolg van het erop gestorte afval;
- het materiaal van de afdichting moet milieuvriendelijk zijn;
- de afdichting mag tijdens de aanleg niet beschadigd of later door micro-organismen en bodemdieren aangetast worden (HANSEL, 1982; REUTER, 1985; VROM, 1985).

3. DE FYSISCH-CHEMISCHE ASPECTEN

3.1. Kleimineralogische samenstelling

Een grondmonster is klei als het in de korrelgrootteverdeling meer dan 25% (gewichtsprocenten) lutumdeeltjes bevat. Zavel bevat 8 tot 25% lutum. Zand heeft minder dan 8% lutum in de korrelgrootteverdeling. Lutum heeft de specifieke eigenschappen om vocht op te nemen (zwellen) en positieve ionen vast te houden (kationenuitwisseling). Andere bodemdeeltjes hebben deze minder of helemaal niet. Dit is te verklaren met de bouw van het kleimineraal. Het kleimineraal is opgebouwd uit lagen of platen van zeer kleine kristallen (kalium, aluminium of magnesiumsilikaten). In de kleiplaatjes heeft substitutie plaatsgevonden van kationen van gelijke grootte, maar met verschillende ladingen (isomorfe substitutie). Dit heeft tot gevolg dat de kleiplaatjes een negatieve lading hebben en kationen aantrekken.

In droge toestand zitten de kationen tegen de kleiplaatjes. Wordt er water toegevoegd, dan gaan, door het concentratieverschil, de kationen uitzwermen (diffusie). Door de aantrekking van het kleiplaatje kunnen de kationen zich niet vrij over de vloeistof verdelen. Er ontstaat een toestand waarbij het verloop van de kationenconcentratie van het kleiplaatje af sterk afneemt en de anionenconcentratie toeneemt (de toestand van de minimale vrij energie). Zie Fig. 3.

Het uitzwermen van de kationen veroorzaakt de binding van een laag bodemvocht aan het kleiplaatje. De laag wordt de diffuse dubbellaag genoemd. De dikte van de diffuse dubbellaag is afhankelijk van het soort kationen, de concentratie in het bodemvocht en de beschikbare hoeveelheid water. De mogelijkheid van de diffuse dubbellaag om in dikte toe of af te nemen veroorzaakt zwel of krimp in de klei. Kationen met een lage valentie veroorzaken een grotere zwelling dan kationen met een hoge valentie. Lage concentraties opgeloste zouten in het bodemvocht effectueren ook een grotere zwelling dan hoge concentraties.

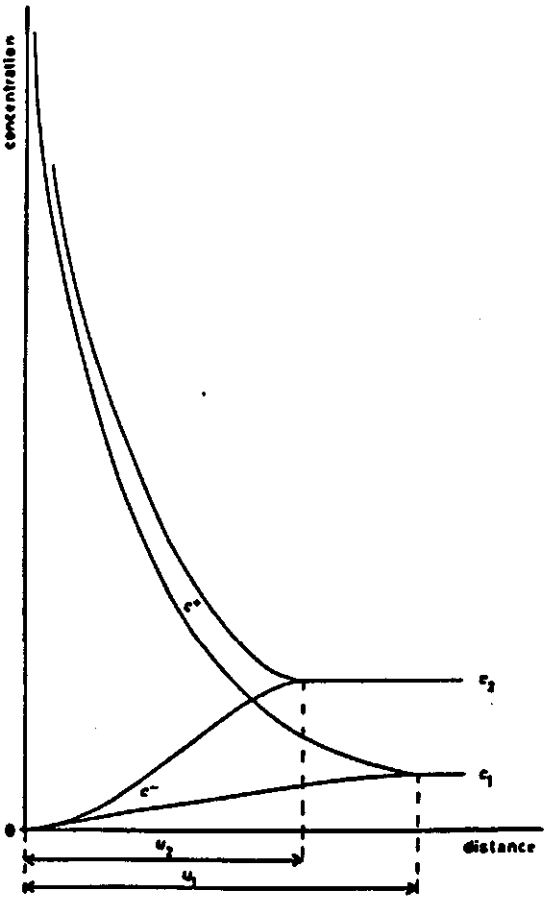


Fig. 3. De diffuse dubbellaag van de kleimineralen (Bron: KOOREVAAR et al., 1985)

Omdat de dubbellaag een hoge concentratie aan kationen bevat, kan deze bij lage concentraties in het bodemvocht water opnemen (osmose effect). Dit osmose effect wordt kleiner of omgekeerd (water afstaan) als de concentratie in het bodemvocht hoger wordt. De maximale dikte van de dubbellaag wordt bereikt als er gedestilleerd water aan de klei wordt toegevoegd.

De meest voorkomende kleimineralen zijn kaoloniet, illiet (K-, Al-, Mg-silicaten) en montmorilloniet (Mg-Al2-silicaten). De montmorilloniet-kleimineralen hebben de grootste zwelcapaciteit, omdat de kleiplaatjes van het kleimineraal na toevoeging van water uit elkaar gaan. Ze vormen een extra dubbellaag in het kleimineraal. Zie Fig. 4.

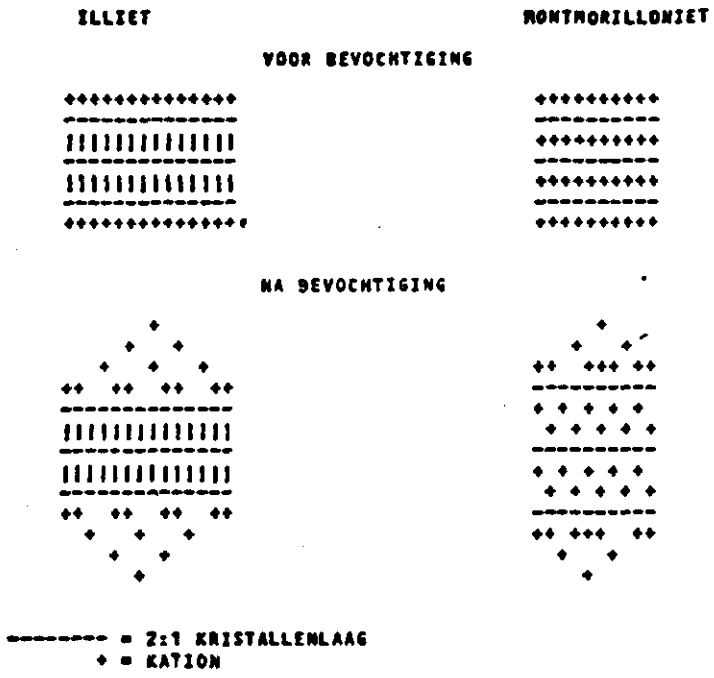


Fig. 4. Het geschematiseerde verschil in zwelkapaciteit tussen illiet en montmorilloniet

De illiet en vooral de kaoliniet hebben een kleiner zwelvermogen. De karakteristieken van de kleimineralen zijn in Tabel 2 vermeld.

Tabel 2. De karakteristieken van de vier kleimineralen (Bron: GABENER, 1983)

Eigenschappen	Kaoliniet	Montmor-illoniet (smectiet)	Illiet	Chloriet
Aantal lagen in structuur	twee	drie	drie	vier
Intern zwelvermogen	geen	wel	geen	geen
Soort binding tussen lagen	water bruggen	ionen binding	kalium binding	water bruggen
Kationen Uitwisselcapaciteit (mval/100 g)	3- 15	80 -120	20- 50	10-40
Afmetingen:				
Dikte (pm)	5- 50	0.1- 10	1- 20	
Doorsnede (pm)	30-400	10 -100	10-200	
Plaatafstand (nm)	71	96 -210	100	142
Specifiek opp. (m^2/g)	10	800	100	5-50

3.2. Influentsamenstelling

Het influent is de vloeistof, die in het monster stroomt. De vloeistof, die uit het monster stroomt, wordt het effluent genoemd. Het influent oefent een directe invloed uit op het bodemvocht. De concentraties van de stoffen in het bodemvocht worden door de concentraties en de aard van de stoffen in het influent veranderd. Afhankelijk van de tijd treedt er ook een interactie met de vaste fase van het grondmonster op. Er worden kationen uitgewisseld tussen het kleimineraal en het bodemvocht.

De bovenstaande processen resulteren in een verandering van de zwelling en doorlatendheid. De doorlatendheid wordt constant als het evenwicht in het systeem bodemoplossing-vaste fase hersteld is. Het gebruik van gedemineraliseerd water als influent resulteert in een verdunning van de bodemvochtoplossing. Het verdunnen van de bodemvochtoplossing betekent dat er zouten uitspoelen. Door de afname van de zoutconcentratie in de bodemoplossing kan de dubbellaag in dikte toenemen. De klei zwelt en drukt poriën dicht. De doorlatendheid neemt door de zwelling af.

Het gebruik van andere vloeistoffen zoals sterke zuren en zoutoplossingen verminderen de zwelcapaciteit en verhogen de doorlatendheid. De hoge concentraties van opgeloste stoffen in deze vloeistoffen vermindert de dikte van de dubbellaag. Ook kan er op den duur door uitwisseling van kationen een verandering van de dikte van de diffuse dubbellaag optreden. Het resultaat van deze processen is dat de zwelling afneemt en de doorlatendheid toeneemt.

Het effect van de verschillende oplossingen op de kleimineralen is in Tabel 3 weergegeven.
De tabel is opgesteld met gegevens uit de literatuur (REUTER, 1985; KOHLER, EHRLICHER und USTRICH, 1985; HÄNSEL, 1982).

Tabel 3. De toename van de doorlatendheid van kleimineralen voor de agressieve stoffen ten opzichte van de doorlatendheid voor water

Vloeistof	Kaoloniet	Montmorilloniet	Illiet
anorganische basen	+++++	++	+++
organische zuren	+++++	++	+++
anorganische zuren	++	+++	++
zware metalen opl.	++	+	++
geconc. zout opl.	+++	++	++
koolwaterstoffenopl.	+	+	+

+++++ = zeer sterke toename
++++ = sterke toename
+++ = matige toename
++ = kleine toename
+ = zeer kleine toename

Uit de tabel blijkt dat een klei met veel montmorilloniet, de kleinste veranderingen in doorlatendheid voor de gebruikte vloeistof vertoont. De sterke basen, zuren en geconcentreerde zoutoplossingen verhogen de doorlatendheid. De zware metalen en koolwaterstoffen veroorzaken een geringe toename. De resultaten van een meting met gedemineraliseerd water mogen dus niet gelijk gesteld worden aan de doorlatendheid voor agressieve oplossingen.

Door uitdroging van de afdichting treedt krimp op. Het scheuren van de afdichting door de krimp verhoogt de doorlatendheid bij bevochtiging als er geen volledige zwelling meer optreedt.

3.3. Het stromingsgedrag

De stroming van een vloeistof door een isotroop (dezelfde eigenschappen in alle richtingen) medium voldoet bij een stabiele situatie aan de wet van Darcy. De wet van Darcy luidt:

$$q = -k\left(\frac{dH}{dS}\right) \qquad (1)$$

waarin:

q = de hoeveelheid vloeistof ($m^3/m^2/s$)

k = de verzadigde doorlaatfactor van het medium (m/s)

dH = de stijghoogte, die een hydraulische druk veroorzaakt in het medium (m)

dS = de afstand waarover de hydraulische druk wordt aangelegd (m)

De bovenstaande vergelijking is te gebruiken voor de stroming door de grondmonsters van gedemineraliseerd water en perkolatiewater. De vergelijking wordt dan geschreven als (zie Fig. 5):

$$v = k\ i \qquad (2)$$

waarbij geldt:

v = de stroomsnelheid van het water door het monster (m/s)

k = de verzadigde doorlaatfactor van het monster (m/s)

i = de hydraulische gradient, die de stroming in het monster veroorzaakt (-)

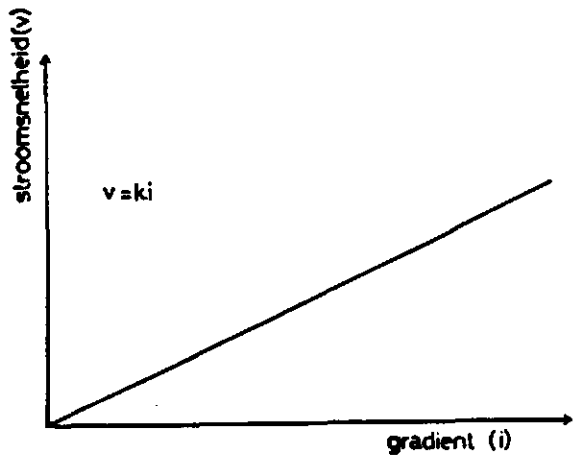


Fig. 5. De lineaire relatie tussen v en i bij lineaire stroming

De verzadigde doorlatendheid is afhankelijk van de weerstand van de grond en de viscositeit van het water. De weerstand van de grond hangt nauw samen met de poriënopbouw en structuur. De viscositeit is bij een constante temperatuur afhankelijk van de concentratie en aard van de opgeloste stoffen in het water.

Bij kleimonsters kan er een niet-Darcy stroming optreden (Fig. 6). De wet van Darcy is dan niet meer geldig. Vooral zware kleien vertonen het niet-Darcy gedrag. De doorlatendheid is dan afhankelijk van de aangelegde stijghoogtegradiënt (GÖDECKE, 1980; GABENER, 1984; HOEKS, 1984; HOEKS et al., 1986; RYHINER en HOEKS, 1986).

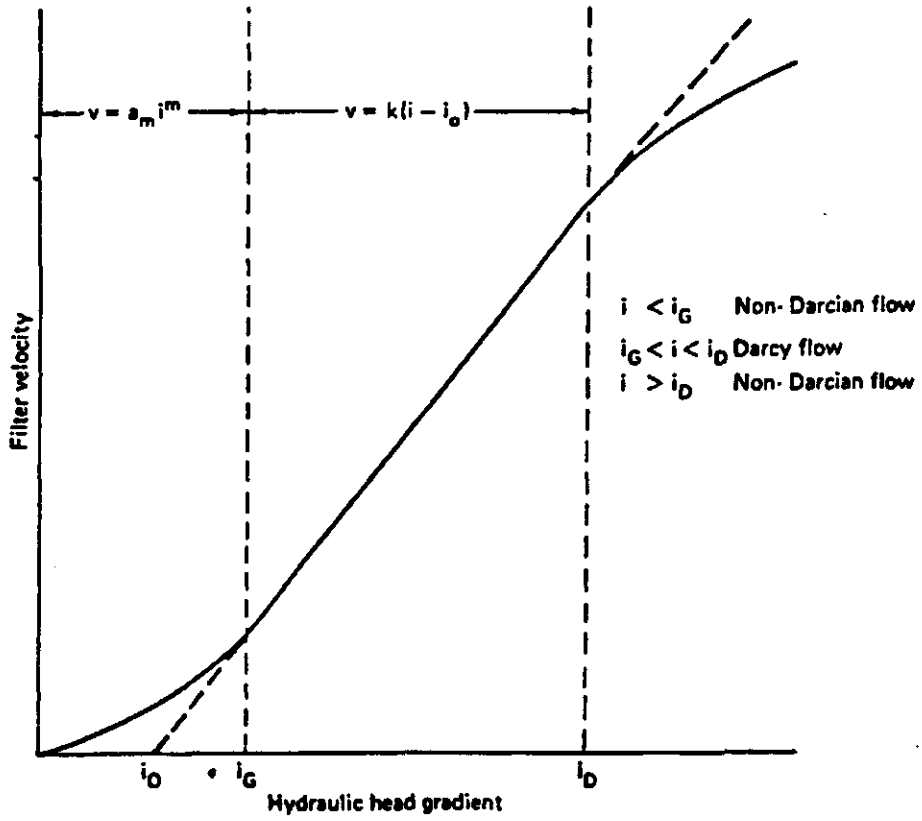
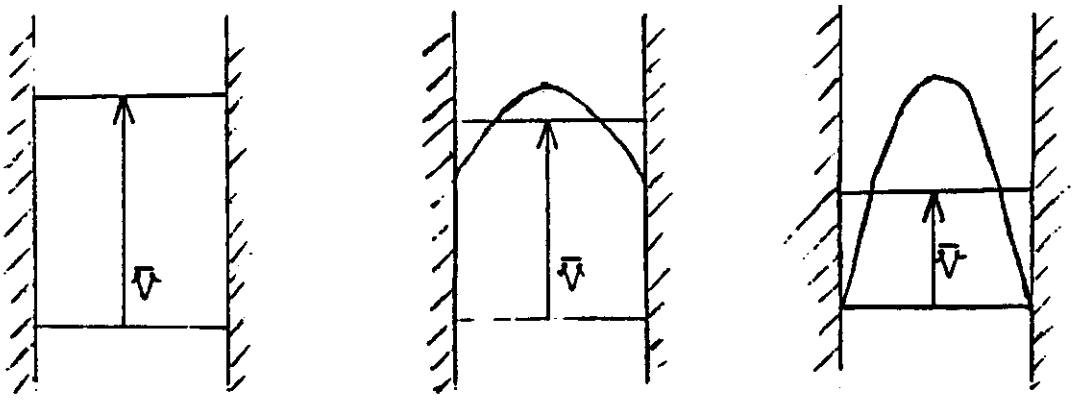


Fig. 6. De relatie tussen v en i bij een niet-Darcy stroming (bron: RYHINER en HOEKS, 1986)

Bij lage gradiënten kan de waterdruk aan de bovenkant van de porie de weerstand, die door de klei wordt geïnduceerd, niet helemaal overwinnen. Hierdoor beweegt niet alle water in de porie even snel. Het verloop van de snelheid in de porie heeft een sterk parabolisch verloop. Aan de rand van de porie is een grote weerstand omdat het water wordt vastgehouden aan de kleiplaatjes (diffuse dubbellaag). Meer naar het centrum van de porie en van het kleideeltje vandaan wordt de weerstand minder groot (GÖDECKE, 1980). De weerstand van de kleimineralenwand is groter dan de weerstand van de normale ruwe wand van een porie bij stroming. Zie Fig. 7.



a. Stroming langs een hydraulisch gladde wand (wrijvingsloos)

b. Stroming langs een hydraulisch ruwe wand (wandwrijving)

c. Stroming langs een wand van kleimineralen (diffuse dubbellaag)

Fig. 7. Het verloop van de stroming door de wandweerstand in de porie

De extra weerstand zou bij een minimale gradiënt (drempelwaarde) geen stroming veroorzaken. De minimale gradiënt waarbij geen stroming optreedt, is nog niet aangetoond (GABENER, 1983).

Bij een toenemende gradiënt wordt de weerstand meer overwonnen en gaat er een groter gedeelte van het water in de porie aan de stroming deelnemen. Het stromingsgedrag wordt dan weer lineair. Bij het aanleggen van een zeer grote gradiënt (>1000) wordt de stroming turbulent en de doorlatendheid is ook niet meer constant.

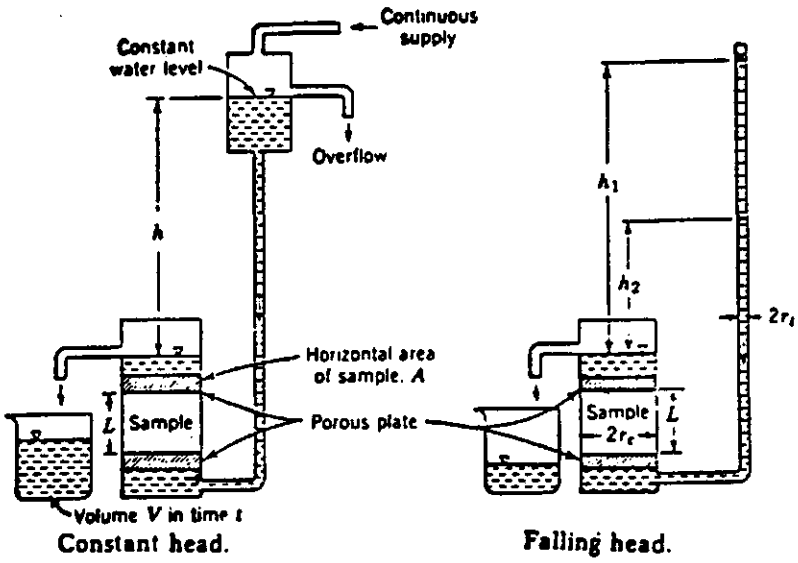


Fig. 8. De 'falling head' en de 'constant head' methode (bron: GLAS, 1985)

GABENER (1983) komt tot een beschrijving van het stromingsgedrag voor de 'falling head' en 'constant head' methode (zie Fig. 8) als volgt: met de 'falling head' methode wordt bij een afnemende stijghoogte (gradiënt) gemeten. De doorlaatfactor wordt dan berekend met de formule:

$$k = \left(\frac{al}{At}\right) \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \qquad (3)$$

waarin:

a = oppervlak van het water in de stijgbuis (m^2),

H_1 = stijghoogte water bij begin van het tijdsinterval (m)

H_2 = stijghoogte water bij einde van het tijdsinterval (m)

t = duur van het tijdsinterval (s)

l = dikte van het monster (m)

A = oppervlakte van het monster (m^2)

Als de aanvangsgradiënt (drempelwaarde) groter dan nul is, dan wordt de doorlaatfactor in het lineaire bereik als volgt berekend:

$$k = \left(\frac{al}{At}\right) \ln\left(\frac{H_1 - i_o l}{H_2 - i_o l}\right) \qquad (4)$$

Het debiet (Q) in de stijgbuis, dat gemeten wordt in het tijdsinterval (t) is gelijk aan de hoeveelheid geïnfiltreerd volume (V) in het monster. Dit volume is gelijk aan het volume dat na verzadiging uit het monster stroomt, bij aanname dat er geen berging in het monster is.

De gemiddelde stroomsnelheid door het monster over het tijdsinterval is dan:

$$v = \frac{Q}{At} = (H_1 - H_2)\left(\frac{a}{At}\right) \qquad (5)$$

Of de meting op de lijn $v = k(i - i_o)$ ligt wordt pas duidelijk als de bijbehorende 'gemiddelde' gradiënt uitgerekend is, omdat de stroomsnelheid met de stijghoogtegradiënt afneemt.
De 'gemiddelde' gradiënt (i_x) is te berekenen uit het harmonische gemiddelde van i_1 en i_2:

$$i_x = \frac{2\, i_1 i_2}{i_1 + i_2} \qquad (6)$$

met de bijbehorende stroomsnelheid (v_x):

$$v_x = \left(\frac{2a}{At}\right) \left(\frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2}\right) \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \qquad (7)$$

Bij de "constant head" methode wordt gemeten met een constante gradiënt over het monster. Er wordt als volgt te werk gegaan. De hoeveelheid effluent uit het monster wordt gemeten. Uit dit volume water (V),

dat in het tijdsinterval (t) door het monster met een bekend oppervlak (A) stroomt, is de stroomsnelheid door het monster te berekenen;

$$v = \frac{V}{At} \qquad (8)$$

Met de aangelegde constante gradiënt (i_c) is de doorlaatfactor te berekenen.

$$k = \frac{v}{i_c} \qquad (9)$$

3.4. Verdichting

Bij het verdichten van grond wordt het volume kleiner (in drie dimensies) en het soortelijk gewicht neemt toe. Het verkleinen van het volume gaat ten koste van het poriënvolume en de structuur van de grond. De dichtheid wordt als volgt berekend:

- de natte dichtheid: $\rho_n = \frac{M_n}{V_n}$ (10)

Dit is de dichtheid van een (ongestoord) grondmonster met een willekeurig vochtgehalte. Belangrijk is te weten wat de droge dichtheid en het vochtgehalte is. Deze worden bepaald door het volume grond nat te wegen, te drogen bij 105°C en daarna weer te wegen.

- de droge dichtheid: $\rho_d = \frac{M_d}{V_n}$ (11)

- het vochtgehalte: $\omega = (\frac{M_n - M_d}{M_d}) \times 100\%$ (12)

de symbolen hebben de volgende betekenis:

- ρ_n = de natte dichtheid (kg/m³),
- ρ_d = de droge dichtheid (kg/m³),
- M_n = de massa van het vochtige grondmonster (kg),
- M_d = de massa van het gedroogde grondmonster (kg),
- V_n = het volume van het vochtige grondmonster (m³).

De verdichtbaarheid van een grond wordt in de grondmechanica beproefd met de proctorproef. De proctorproef wordt beschreven in de "EISEN VAN RIJKSWATERSTAAT" (1978). Met de gestandariseerde methode wordt het optimale vochtgehalte met de corresponderende maximale droge dichtheid bepaald. De proctorkurve verschilt voor elk grondmateriaal (zie Fig. 9, VAN DRIEL, 1984).

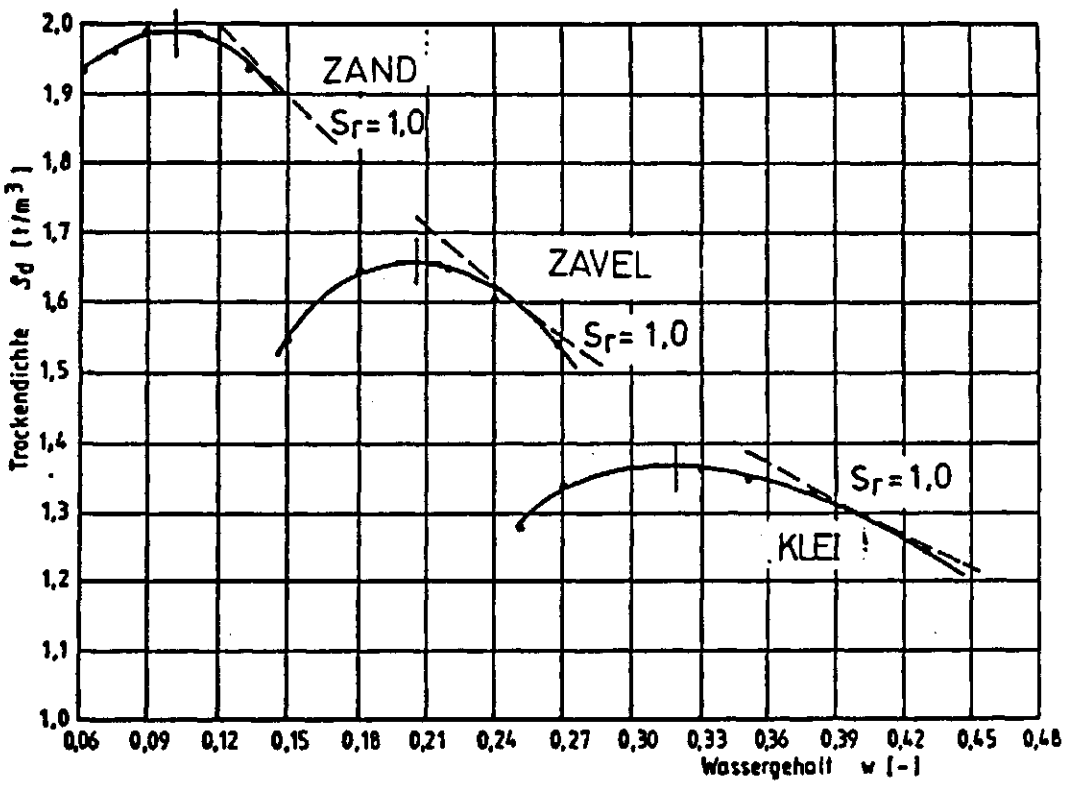


Fig. 9. De proctorkurve voor verschillende grondmonsters

De proctorkurve heeft in zijn maximum de hoogst bereikbare droge dichtheid bij het optimale vochtgehalte. Het gedeelte links van het

maximum wordt de droge tak en het gedeelte rechts wordt de natte tak van de proctorkurve genoemd.

De dichtheid is niet alleen afhankelijk van het vochtgehalte, maar ook van de granulaire en kleimineralogische samenstelling van het monster. De dichtheid wordt lager als de monsters meer lutum bevatten. Bij het kleimonster wordt de dichtheid lager als het zwellende vermogen groter is.

De dichtheid beïnvloedt drie factoren namelijk de doorlatendheid, de afschuifweerstand en het zettingsgedrag van het materiaal. Deze factoren worden kort in het volgende stuk behandeld.
De structuur van een kleimonster vertoont een onregelmatige vlokkenstructuur als het verdicht wordt aan de droge kant van het optimum. Wordt de klei verdicht bij een te hoog vochtgehalte, dan ontstaat een gerangschikte disperse structuur (KEZDI, 1969), die een lagere doorlatendheid heeft dan de onregelmatige vlokkenstructuur.
Het monster moet daarom aan de natte kant van de proctorkurve verdicht worden. Zie fig. 10.

Het verdichten van de klei aan de natte kant van de kurve (verkneden) verhoogt ook de afschuifweerstand. Het monster kan door de gerangschikte disperse structuur een grotere afschuifkracht weerstaan (KEZDI, 1969). Zie fig. 11.

De zetting van het materiaal door de bovenbelasting wordt minder bij een hoge dichtheid en vochtgehalte bij aanbrengen. De klei wordt minder samendrukbaar, omdat de overgebleven porien gevuld zijn met water.

De mogelijkheid om zettingen te volgen is afhankelijk van de plasticiteit. De plasticiteit van natuurlijke materialen neemt toe met het vochtgehalte en is ook afhankelijk van de kleimineralogische samenstelling van de klei. Kleien met actief zwellende mineralen (montmorilloniet) hebben een betere plasticiteit dan de kleien met andere mineralen (illiet en kaoloniet). Door het zwelvermogen kunnen zelfs scheuren in een afdichting gedicht worden (zelf-herstellend vermogen, REUTER, 1985).

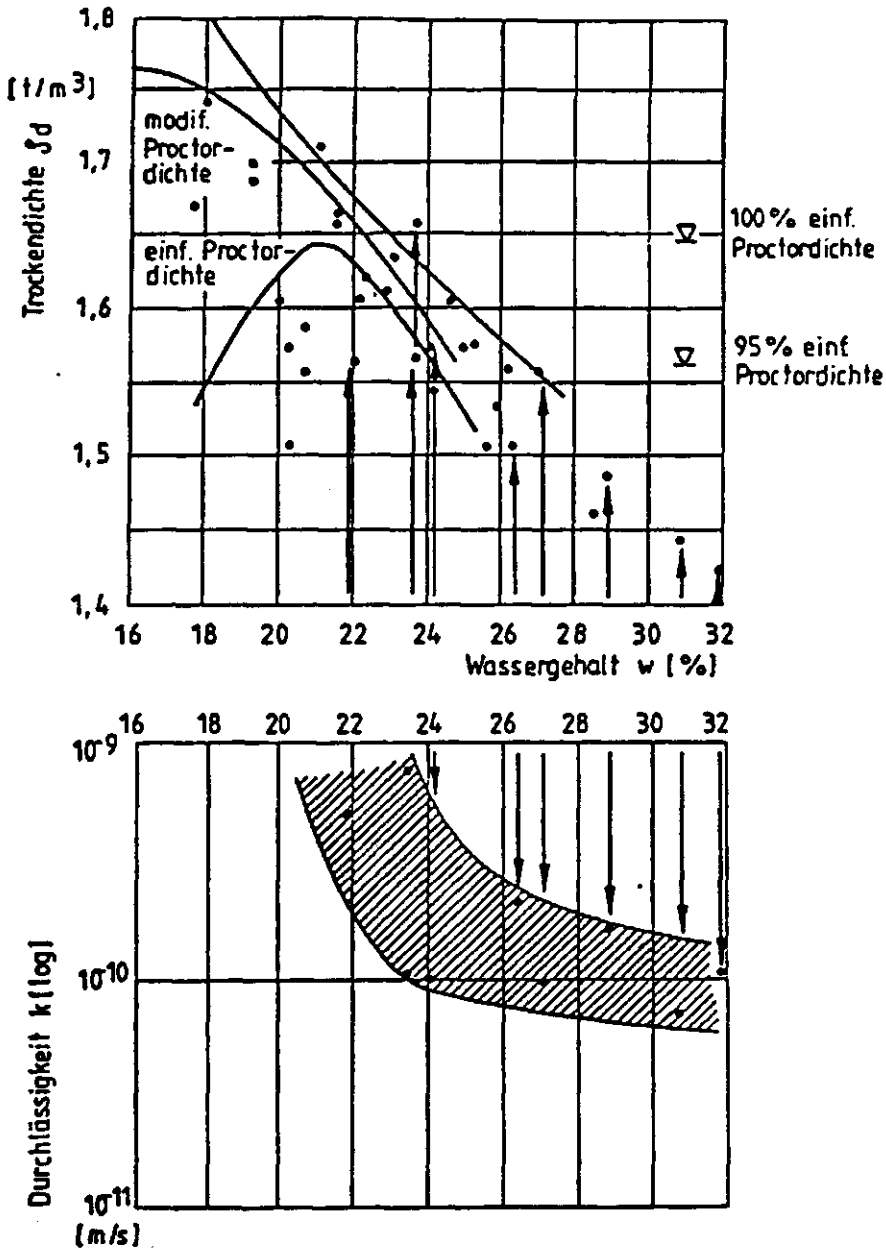


Fig. 10. Doorlatendheid afhankelijk van het vochtgehalte tijdens verdichten (BRON: REUTER, 1985)

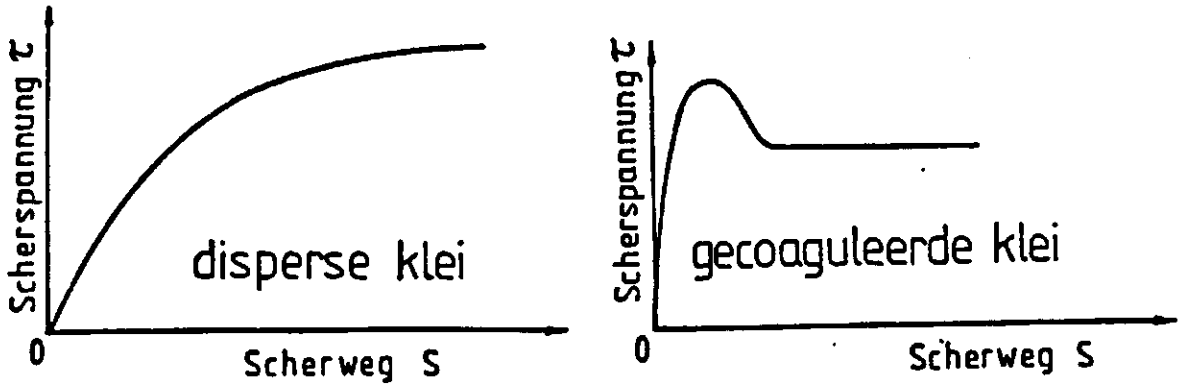


Fig. 11. De afschuifweerstand afhankelijk van de verdichting (BRON: KEZDI, 1969).

4. HET ONDERZOEK

4.1. De gebruikte materialen

4.1.1. De grondmonsters

De grondmonsters zijn verzameld op grond van de granulaire en kleimineralogische samenstelling. De bedoeling is om een aantal kleien door te meten varierend van matig doorlatend tot zeer slecht doorlatend. Er zijn twee zand-bentoniet mengsels en zes kleimonsters doorgemeten.

De twee zand-bentoniet mengsels zijn samengesteld uit matig grof zand van de Vuil Afvoer Maatschappij te Wijster en Wyoming-bentoniet. Eén monster bevat 10% (gewichts) bentoniet en de ander 15 % bentoniet. Het matig grof zand heeft de volgende eigenschappen;

- korrelgrootteverdeling; grind(>2000 µm) 6%, grof zand (500-2000 µm) (in gewichtsprocenten) 22%, middelzand (180-500 µm) 43%, fijn zand (63-180 µm) 26% en de silt (< 63 µm) 3%.
- optimale proctordichtheid is 1,68 Mg/m^3; deze wordt bereikt door te verdichten bij een vochtgehalte van 11,5%;
- de verzadigde doorlatendheid van het zand is $9*10^{-6}$ m/s.

De gebruikte bentoniet is Wyoming-bentoniet. Bentoniet is een klei, die het eerst werd ontdekt in de Verenigde Staten bij Fort Benton (Staat Wyoming). De klei is verweringsmateriaal van vulkanische assen, die in een vochtig klimaat (het Krijt en Tertair) in afvoerloze depressies afgezet en verweerd zijn tot een zeer zware klei. De klei komt op verschillende plaatsen in de wereld voor. De samenstelling verschilt echter per groeve (HOFKAMP, 1986). In Nederland komt bentoniet niet voor, het wordt geïmporteerd uit het buitenland.

De Amerikaanse bentoniet heeft een kleikomplex dat grotendeels met éénwaardige ionen (Na) bezet is. De Europese bentoniet heeft meer tweewaardige ionen (Ca) aan het kleikomplex. De Amerikaanse bentoniet heeft door zijn kationenbezetting een groter zwelvermogen dan de Europese bentoniet. Het zwelvermogen van de Europese bentoniet is te

verbeteren door de klei te activeren (met Na oplossing behandelen). Het zwelvermogen van de verschillende bentonietsoorten is in de onderstaande Tabel 4 weergegeven.

Tabel 4. Het zwelvermogen van de bentonietsoorten (Bron: HOEKS & RYHINER, 1985).

Soort bentoniet	Zwelvermogen (m^3/Mg)
Wyoming bentoniet	9 - 12
Geactiveerde Europese bentoniet	6 - 9
Europese bentoniet	2 - 4

De bentoniet wordt gewonnen als klei in dagbouw. Het wordt daarna gedroogd, gemalen en verhandeld als droge poeder of korrels. Het wordt gebruikt voor vele doeleinden zoals in de aardolie- en papierindustie. De lage doorlatendheid van zand-bentoniet mengsels wordt bereikt doordat de poriën in het zandskelet van het mengsel worden opgevuld met zwellende bentonietdeeltjes. Met 3% (gewichtsprocenten) Wyoming bentoniet wordt bij het matig grof zand alle poriënwater gebonden. De zwelling van het monster duurt circa 2 maanden (HOFKAMP, 1986).

Uit het onderzoek van Hofkamp (1986) is gebleken dat een 5% zand-bentoniet mengsel te doorlatend is voor onderafdichting, daarom is gekozen voor zand-bentoniet mengsels met 10 en 15 gewichtsprocenten bentoniet. Met dit hogere gehalte aan bentoniet wordt een extra zwelcapaciteit toegevoegd, omdat de zwelling door het perkolatiewater afneemt.

De doorlatendheid van een zand-bentoniet mengsel kan door interne erosie afnemen. De interne erosie in het monster treedt op door de stroming. De kleinere bentoniet deeltjes spoelen uit bovenste lagen en worden lager in het monster afgezet.

Eén van de kleimonsters (TK) is afkomstig van de Midden-Limburgse zand-, klei-, en vuilexploitant Sanders & Geraedts. De exploitant wint deze klei in de Wambach groeve nabij Roermond en gebruikt de klei voor het afdichten van de regionale vuilstortplaats te Linne. Uit eerder

onderzoek van het Laboratorium van Grondmechanica te Delft (VAN REE, 1986) is gebleken dat dit een zeer slecht doorlatende klei is.

De klei is van de "Formatie van Tegelen" en wordt daarom Tegelse Klei genoemd. De "Formatie van Tegelen" bestaat uit twee kleiafzettingen en uit twee grind-zand afzettingen. Het zijn Vroeg-Pleistocene afzettingen van de Rijn met uitzondering van de afzettingen in Zuid-Limburg van de Maas. De klei wordt gewonnen in groeves tussen Roermond en Venlo. De klei komt er in dikke lagen van 10 meter voor.

De "Formatie van Tegelen" komt voor in de ondergrond van vrijwel geheel Zuid en Midden Nederland. Ze dagzoomt in Zuid-Limburg en Zuid-West Brabant. De dikte varieert van 10 tot 100 meter (ZAGWIJNEN en STAAL-DUINEN, 1975).

Vier van de monsters zijn van de "Formatie van Westland". Twee zijn uit Noord-Nederland (N11 en N29) en twee uit West-Nederland (W21 en W22). De "Formatie van Westland" bestaat uit lagen met zand, klei en veen. Tot de Formatie behoren Holocene kust- en peri-mariene afzettingen. Ze komt voor en dagzoomt in vrijwel geheel Noord-West Nederland. De dikte bedraagt 1 tot bijna 50 meter.

Het vijfde monster behoort tot de "Formatie van Singraven" en komt uit Oost-Nederland (O17). De "Formatie van Singraven" is in het Holoceen door beken en riviertjes afgezet. Ze bestaat in Noord-Oost Nederland hoofdzakelijk uit veenafzetingen en in Zuid-Oost Nederland uit leem en klei. De Formatie komt voor in beekdalen van het pleistocene landschap van Nederland. De beekdalen liggen gemiddeld boven N.A.P. De dikte is maximaal enkele meters (BREEUWSMA, 1987; ZAGWIJN en STAAL-DUINEN, 1975).

De Tegelse klei is in het Bedrijfslaboratorium voor Grond- en Gewasonderzoek te Oosterbeek onderzocht op de granulaire samenstelling (beperkt uitgebreid granulair onderzoek). De kleimineralogisch samenstelling is door de vakgroep Bodemkunde en Geologie van de Landbouw Universiteit te Wageningen met de röntgendiffractie methode bepaald (DOESBURG, 1988).

Vijf andere monsters zijn afkomstig van de Stichting voor Bodemkartering. De granulaire en kleimineralogische samenstelling zijn al bekend. Deze zijn eerder door Stiboka onderzocht op dezelfde manier als bovenvernoemd (BREEUWSMA, 1985, 1987).
De kleimineralogische en granulaire samenstelling van de kleien is in de onderstaande tabellen 5 en 6 weergegeven.

Tabel 5. De granulaire samenstelling van de kleien
(Bron: STIBOKA en het BEDRIJFSLABORATORIUM VOOR GROND- EN GEWASONDERZOEK, 1987).

Klei	Monster-nummer	Korrelgrootte fractie			
		< 2 µm %	2-16 µm %	16-50 µm %	> 50 µm %
Tegelse klei	(TK)	51,5	34,8	11,4	2,3
Zware zeeklei	(N29)	37,2	22,9	34,8	5,1
Zware zeeklei	(W22)	37,4	17,3	21,4	23,9
Zware beekklei	(O17)	33,8	14,0	45,0	7,2
Lichte zeeklei	(W21)	31,5	13,7	42,1	12,7
Lichte zeeklei	(N11)	27,8	12,7	34,0	25,5

Uit de tabel blijkt dat Tegelse klei een zeer zware klei is met weinig zand en N11 is een lichte klei met veel zand. De Tegelse klei is ook de klei met de grootste fractie (86,3%) aan afslibbare delen (<16 um) en N11 heeft de kleinste fractie (40,5 %) afslibbare delen.

Tabel 6. De kleimineralen in percentages van de lutumfractie
(Bronnen: STIBOKA en VAKGROEP BODEMKUNDE EN GEOLOGIE, 1988)

Monster-nummer	Kaoloniet %	Illiet %	Montmorilloniet %	Overige %
TK	15 - 25	35 - 55	15 - 25	< 10
N29	5 - 10	35 - 45	35 - 45	< 10
W22	5 - 10	35 - 45	35 - 45	< 10
O17	5 - 10	< 10	50 - 80	0 - 20
W21	5 - 10	35 - 45	35 - 45	< 10
N11	5 - 10	35 - 45	35 - 45	< 10

De Tegelse klei en de beekklei hebben een andere kleimineralogische samenstelling dan de zeekleien. De oorzaak van dit verschil is de geologische oorsprong van het materiaal.

In Tabel 7 zijn de kenmerken betreffende de plasticiteit van de kleien vermeld. Ze zijn afgeleid uit gegevens van het literatuuronderzoek en het lutumgehalte van de kleimonsters.

Tabel 7. Vloei-, plasticiteitsgrens en plasticiteitsindex van de kleien (afgeleid uit gegevens van GABENER, 1983).

Monster-nummer	Vloei-grens	Plasticiteits-grens	Plasticiteits-index
TK	79 %	26 %	53 %
N29	57 %	23 %	34 %
W22	49 %	23 %	26 %
O17	45 %	23 %	22 %
W21	55 %	22 %	33 %
N11	39 %	16 %	24 %

De Tegelse klei is duidelijk het meest plastisch. De oorzaak is het hoge lutumgehalte (51,5 %). De kleien met een lager lutumgehalte vertonen geen echt grote verschillen in plasticiteit (ca. 10%).
De lage plasticiteit van de beekklei (O17) is te verklaren doordat er alleen een overeenkomst is in de granulaire samenstelling met de kleien uit het onderzoek van GABENER (1983). Hij heeft geen onderzoek gedaan naar eventuele effecten van de kleimineralogische samenstelling van zijn kleien.

Het filterzand dat op de monsters wordt aangebracht is Blokzijlzand. Het is een goed doorlatend fijn zand ($k = 3.5/*10^{-7}$ m/s) en heeft de volgende korrelgrootteverdeling: <2 µm, 3%; 2 - 16 µm, 2%; 16 - 50 µm, 83% en >50 µm, 12%.

4.1.2. Het influent

Als influent zijn gedemineraliseerd water en perkolatiewater gebruikt. Het perkolatiewater is in 1986 bij de V.A.M te Wijster gehaald. Het is

daarna in de geconditioneerde ruimten in de kelder van het I.C.W. opgeslagen. Het perkolaat zat in een afgesloten, donkere jerrycan, zodat er geen verandering van de chemische samenstelling optrad. De chemische eigenschappen van het perkolatiewater staan hieronder vermeld.

Tabel 8. De eigenschappen van het perkolatiewater van de Vuil Afvoer Maatschappij te Wijster (Bron: WATERKWALITEITSLABORATORIUM I.C.W., 1987).

Zuurgraad (pH)		7.15
Electrische geleidingsvermogen (mS/m)		830
soortelijke massa (gram/ml)		1.0043
Ionen (mg/l)	chloride	4881
	kalium	735
	natrium	912
	calcium	108
	magnesium	59
	ijzer	47
	aluminium	0
	mangaan	0.2
Zware metalen	koper	0.39
	nikkel	0.09
	zink	0.56
	chroom	0.09
	cadmium	0.06
	lood	0

Aangezien het perkolatiewater een zuurgraad heeft van 7,15, verkeert het stort kennelijk in de methaangistingsfase. Er komen veel chlorideionen in voor en bij de metaalionen overheersen de kalium- en natriumionen. Bij de zware metalen zijn hogere waarden gemeten van koper en zink. Aluminium en lood komen er vrijwel niet in voor.

4.2. De proefopzet

4.2.1. De verdichtingsmethode

De verdichting van de monsters is uitgevoerd na eventuele voorbevochtiging. De proefring en de Kopecky-ring zijn laagsgewijs ingevuld en

verdicht. De monsters zijn verdicht met een stalen stamper met een vlak oppervlak, waarvan de diameter ongeveer gelijk is aan de binnendiameter van de ringen. Iedere laag is zo lang verdicht tot een samenhangend, vlak oppervlak ontstaan is. Daarna is de volgende laag aangebracht. De verdichting is dus niet volgens de proctor-methode uitgevoerd, omdat de apparatuur voor deze methode niet beschikbaar was. Met de Kopecky-ring is de natte, droge dichtheid en het vochtgehalte bepaald. De ring is hiervoor helemaal gevuld.

De proefring (een stuk p.v.c buis met diameter van 103 mm en hoogte van 52 mm.) wordt gebruikt voor het meten van de verzadigde doorlatendheid. De proefring is in lagen opgevuld tot het monster circa 2 centimeter dik is. Na het wegen van de massa en het meten van de dikte, is de natte dichtheid berekend. Met de gegevens van de grond in de Kopecky-ring is de droge dichtheid van het monster bekend.

Door het grondmonster in de proefring te verdichten, wordt het gevaar van randstroming verkleind. Tijdens de proeven is er dan ook geen randstroming geconstateerd. De rest van de proefring wordt na verzadiging van het monster opgevuld met Blokzijlzand. Dit is na het aanbrengen voorzichtig verdicht. Daarna is de proefring met het monster in de meetopstelling geplaatst.

4.2.2. De doorlatendheidsmetingen

Voor het meten van de verzadigde doorlatendheid van de monsters is gekozen voor de "falling head" methode. Met deze methode wordt bij een afnemende stijghoogte (gradiënt) gewerkt, zodat ook in het lage stromingsbereik wordt gemeten waar de niet-Darcy stroming optreedt. Er is gemeten met de in Fig. 12 weergegeven meetopstelling bij constante temperatuur van circa 21°C.

De ring met het monster wordt ingeklemd door twee perspex kappen. De kappen zijn met een beugel op elkaar vastgezet zodat het monster niet kan zwellen. Tussen de kappen en de ring zitten vier rubber ringen, die lekkage langs de buitenkant van de ring moet voorkomen. Voor alle zekerheid wordt de ruimte tussen de ring en de onderste perspex kap nog afgekit met siliconen kit.

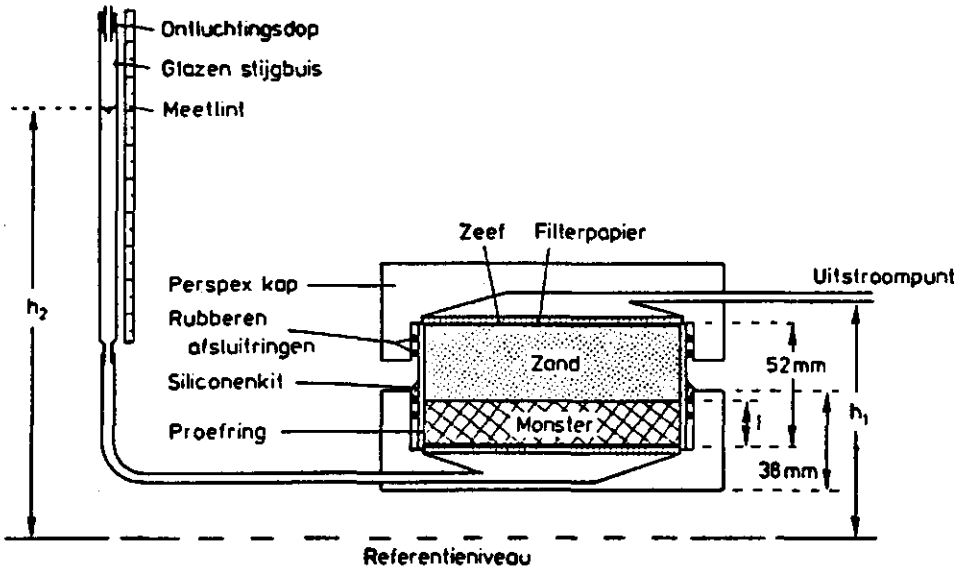


Fig. 12. De "falling head" meetopstelling

In de twee identieke kappen is een zeefje met in- of uitstroomopening aanwezig waardoor water door het monster kan stromen. Op de onderste kap is het instroompunt bevestigd, dat het water via een slang uit de stijgbuis ontvangt. Aan de bovenste kap is het uitstroompunt bevestigd. Het monster wordt zodoende van onder naar boven met water doorstroomd, waardoor insluiting van luchtbellen in het monster beperkt wordt. Aan het uitstroompunt kan het water opgevangen worden om de hoeveelheid ingestroomd water te controleren.

Het waternivo wordt met een meetlint op de stijgbuis afgelezen. De stijghoogte over het monster is het waternivo (t.o.v. referentievlak) minus de afstand van het referentievlak tot het uitstroompunt. De verdamping uit de stijgbuis is te verwaarlozen.

De serie metingen zijn voor de klei minstens twee keer uitgevoerd om het effect van de uitspoeling van de zouten op de doorlatendheid te bepalen. Daarna is de klei twee keer doorspoeld met het perkolaat. Alle poriënwater is dan vervangen. Het ruwe perkolaat is gefilterd om verstopping van de poriën door grove deeltjes te voorkomen. Over het perkolaat in de stijgbuis wordt met water verzadigd stikstofgas geleid om oxidatiereacties en verdamping te voorkomen.

Tijdens de doorspoeling met het perkolaat is het electrische geleidingsvermogen gemeten van het effluent uit het monster. Dit geeft een indicatie van de doorbraak van het perkolaat in het grondmonster. Na de doorbraak stabiliseert de doorlatendheid. Na de doorbraak is nog een serie metingen uitgevoerd op het monster met perkolaat, waarna de doorlatendheid van het grondmonster voor perkolatiewater berekend is.

Met de formules (6) en (7) is voor elk tijdsinterval i_x en v_x uit te rekenen. De waarden voor elk monster zijn uitgezet in een grafiek, waaruit na lineaire regressie de aanvangsgradiënt (i_0) en de doorlaatfactor (k) berekend zijn voor het niet-Darcy stromingsgebied.
De doorlaatfactor is voor het eerste stuk van de grafiek constant, ongeacht de aangelegde gradiënt (GABENER, 1983) tot het overgangsgebied.

Een andere meetopstelling staat in figuur 13. De bovenstaande opstelling is daarvoor gedeeltelijk gesloopt. De bovenste kap is verwijderd. Op de onderste perspex kap met het grondmonster is een dikke plexiglas kolom geplaatst. Deze kolom is gevuld met perkolatiewater. Over het perkolatiewater is water-verzadigd stikstofgas geleid om oxidatie van stoffen in het perkolatiewater te voorkomen.

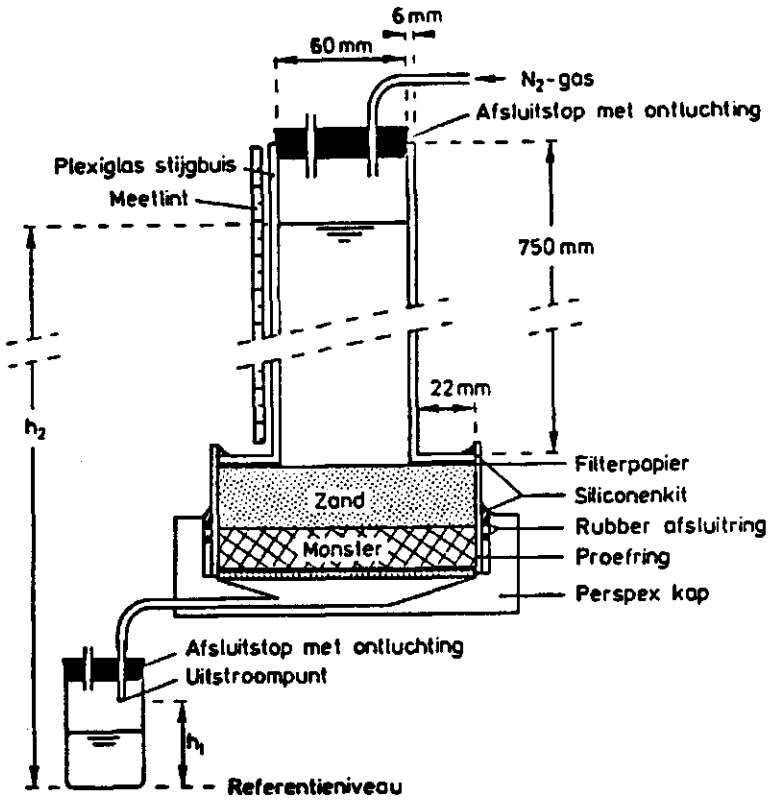


Fig. 13. De "constant head" meetopstelling

Het effluent kan aan de onderkant van het monster vrij uitstromen. De stroming door het monster is daardoor omgekeerd. De uitgestroomde volumina van de dikke stijgbuizen zijn gewogen om de stroomsnelheid te bepalen.

Het beproeven van de monsters met de dikke stijgbuizen is als een "constant head" test te beschouwen, omdat de stroomsnelheden zo laag waren, dat de stijghoogte gradiënt (ca. 35) vrijwel niet veranderde.

5. RESULTATEN

5.1. Zwelcapaciteit

Van de monsters is de zwelcapaciteit te berekenen door de granulaire en kleimineralogische samenstelling met elkaar te verwerken. Zo zijn de percentages kleimineralen in elk monster te berekenen (zie tabel 9).

Tabel 9. Gewichtspercentage kleimineralen per monster

Monster-nummer	Kaoloniet (%)	Illiet (%)	Montmorilloniet (%)
TK	8 - 12	18 - 27	8 - 12
N29	2 - 4	13 - 17	13 - 17
W22	2 - 4	13 - 17	13 - 17
O17	2 - 3	0 - 3	17 - 27
W21	2 - 3	11 - 14	11 - 14
N11	1 - 3	10 - 12	10 - 12
Z-B 10 %	0	0	10
Z-B 15 %	0	0	15

De Tegelse klei bevat weinig sterk zwellende kleimineralen. De beekklei bevat veel zwellende kleimineralen en de andere zitten tussen deze waarden in.

5.2. Dichtheden

De resultaten van de verdichting zijn hieronder weergegeven:

Tabel 10. de vochtgehalten en bereikte droge dichtheid

Monster-nummer	Vochtgehalte (gewichtsprocenten)	Droge dichtheid (mg/m^3)
TK	33,4	1,89
N29	44,2	1,45
W22	17,4	1,69
O17	40,8	1,36
W21	16,2	2,27
N11	30,5	1,52
Z-B 10%	0	1,65
Z-B 15%	0	1,67

Uit de tabel valt te concluderen dat het vochtgehalte een grotere invloed op de verdichting heeft, dan de granulaire samenstelling. Bij een vochtgehalte van circa 17 % wordt een hoge verdichting bereikt. Bij hogere vochtgehalten blijken de poriën te veel verzadigd te zijn met water, waardoor een goede verdichting niet mogelijk is.

De zand-bentoniet mengsels zijn niet optimaal verdicht. De bereikte dichtheid is groter als er water toegevoegd wordt voor het verdichten.

5.3. Doorlatendheden

De doorlaatfactoren zijn gemeten met de "falling head" methode. De opstelling met de dunne stijgbuizen functioneert goed. De resultaten zijn goed reproduceerbaar.

De opstelling met de dikke stijgbuizen en perkolatiewater werkt niet goed, omdat de stroomsnelheden te laag zijn. Door de lage stroomsnelheden (kleine debieten) en de dikke buizen neemt de gradiënt zeer langzaam af. Deze opstelling is daarom beschouwd als een "constant head" methode. De doorlaatfactor wordt berekend door de gradiënt per tijdsinterval te middelen en het uitgestroomde debiet te meten.

Ondanks het gebruik van de formules (8) en (9) uit de "constant head" methode, zijn de resultaten niet betrouwbaar. De oorzaak is de zeer lage stroomsnelheid door het monster. Daardoor is de verblijftijd van het perkolatiewater in het monster groot, waardoor er gasontwikkeling in de opstelling kan optreden. Het gas kan niet ontwijken, omdat de doorstroming van het monster van boven naar beneden gericht is. Het gas verstopt de poriën en daardoor is de gemeten doorlatendheid te laag. Deze veronderstelling is bevestigd bij het afbreken van de opstelling. Er borrelde toen duidelijk gas omhoog en het perkolaat stonk naar H_2S. De monsters uit deze opstellingen zijn daarna in de opstelling met de dunne stijgbuizen doorgemeten.

In de figuren 14 t/m 21 zijn de gemeten waarden voor stroomsnelheid v en de gradiënt i voor elk grondmonster uitgezet. Daarna is er met de

kleinste-kwadraten-methode een lineaire functie bepaald van elke serie metingen.

De variabelen van de functies zijn in de tabel 11 vermeld.

Tabel 11a. De doorlaatfactor (k in 10^{-10} m/s) en de aanvangsgradiënt (i_0) na doorspoelen met gedemineraliseerd water

Monster-	1X			2X			>2X		
nummer	k	i_0	R2	k	i_0	R2	k	i_0	R2
TK	5.10	7.39	0.96	3.60	5.39	0.78	-	-	-
N29	1.30	4.38	0.77	1.60	16.55	0.85	1.20	2.20	0.91
W22	28.70	2.36	0.99	16.70	0.77	0.99	17.30	1.75	0.96
017	250.00	1.09	1.00	424.00	0.99	0.99	-	-	-
W21	10.50	4.71	0.90	9.00	5.29	0.99	5.40	4.57	0.99
N11	11.00	5.60	0.98	8.10	3.63	0.69	-	-	-
Z-B 10%	1.70	-0.29	0.98	-	-	-	-	-	-
Z-B 15%	1.30	-0.36	0.98	-	-	-	-	-	-

Tabel 11b. De doorlaatfactor (k in 10^{-10} m/s) en de aanvangsgradiënt (i_0) na doorspoelen met perkolatiewater

Monster-	1X			2X			>2X		
nummer	k	i_0	R2	k	i_0	R2	k	i_0	R2
TK	-	-	-	-	-	-	31.69	9.84	0.92
N29	4.00	20.97	0.84	1.40	1.01	0.92	1.64	11.97	0.86
W22	15.20	6.43	0.90	13.70	3.39	0.99	11.00	3.12	1.00
017	464.80	1.12	0.43	213.30	3.27	0.94	268.80	4.03	0.96
W21	2.60	10.73	0.85	2.10	9.19	0.98	1.73	3.76	0.87
N11	-	-	-	-	-	-	5.37	5.83	0.92
Z-B 10 %	-	-	-	5.80	7.72	0.96	-	-	-
Z-B 15 %	-	-	-	5.30	8.09	0.99	4.30	2.16	1.00

(R2 is het quotiënt van de variantie van v verklaard door de regressoren k en i_0 en de totale variantie van v. R is de correlatiecoëfficiënt, dit is een maat voor de relateerdheid van de variabelen v en i).

Bij de doorgemeten kleien is wel een aantal keren een niet-lineair verband vastgesteld. Dit kwam in de grafieken tot uiting door een knik in de lijn van v met i. De overgang in doorlatendheid wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de dubbellaag, die een weerstand veroorzaakt (zie ook 3.1.). Bij lage gradiënten is de weerstand groot door de bijna volledige uitbreiding van de dubbellaag. De doorlaatfactor is klein, omdat de weerstand tegen stroming groot is. Neemt de gradiënt toe, dan komt een gedeelte van het gefixeerde water in de dubbellaag in beweging. Dit water doet mee met de stroming. De weerstand langs het kleioppervlak wordt kleiner en de doorlaatfactor neemt toe. Bij een hoge gradiënt doet bijna alle water in de dubbellaag mee aan de beweging met uitzondering van het immobiele water dicht bij de kleiplaatjes. De doorlaatfactor bereikt dan de hoogste waarde en de doorstroming van het monster is lineair. Het kleimonster N29 (Fig. 14) is hier een mooi voorbeeld van. Het effect van doorspoeling en het influent op het stromingsgedrag van klei is in de vorenstaande tabellen weergegeven.

Uit de tabel 11a blijkt dat bij de meeste kleien (m.u.v. O17) de doorlaatfactor afneemt na doorspoeling met gedemineraliseerd water. De aanvangsgradiënt neemt ook af na doorspoeling.

Verklaring voor de verschijnselen is de uitspoeling van zouten. Door de uitspoeling wordt de concentratie in het bodemvocht lager, de dubbellaag van de klei kan dan meer water opnemen en breidt haar invloed verder uit. De weerstand tegen stroming in de porie wordt groter en de doorlatendheid neemt dus af. Door de uitspoeling wordt de bodemoplossing echter ook schoner (lagere concentraties), waardoor de viscositeit van de bodemoplossing afneemt. Een lagere viscositeit (minder stroperig) betekent dat een vloeistof gemakkelijker in beweging komt. De aanvangsgradiënt waarbij het water begint te stromen is dus kleiner.

De zware beekklei (O17) vertoont een hoge doorlatendheid. De oorzaak is de lage dichtheid van het monster en de bezetting van het kleikomplex met ijzerionen. Uitspoeling van ijzerionen is duidelijke waargenomen tijdens het meten. De ongunstige bezetting van het kleikomplex veroorzaakt een dunne dubbellaag.

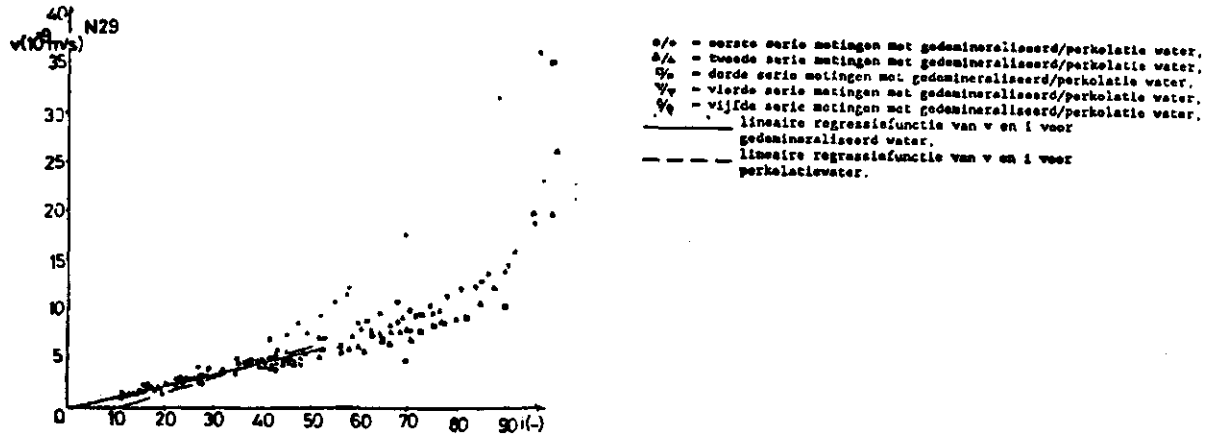


Fig. 14. Doorlatendheid van de zeeklei (N29)

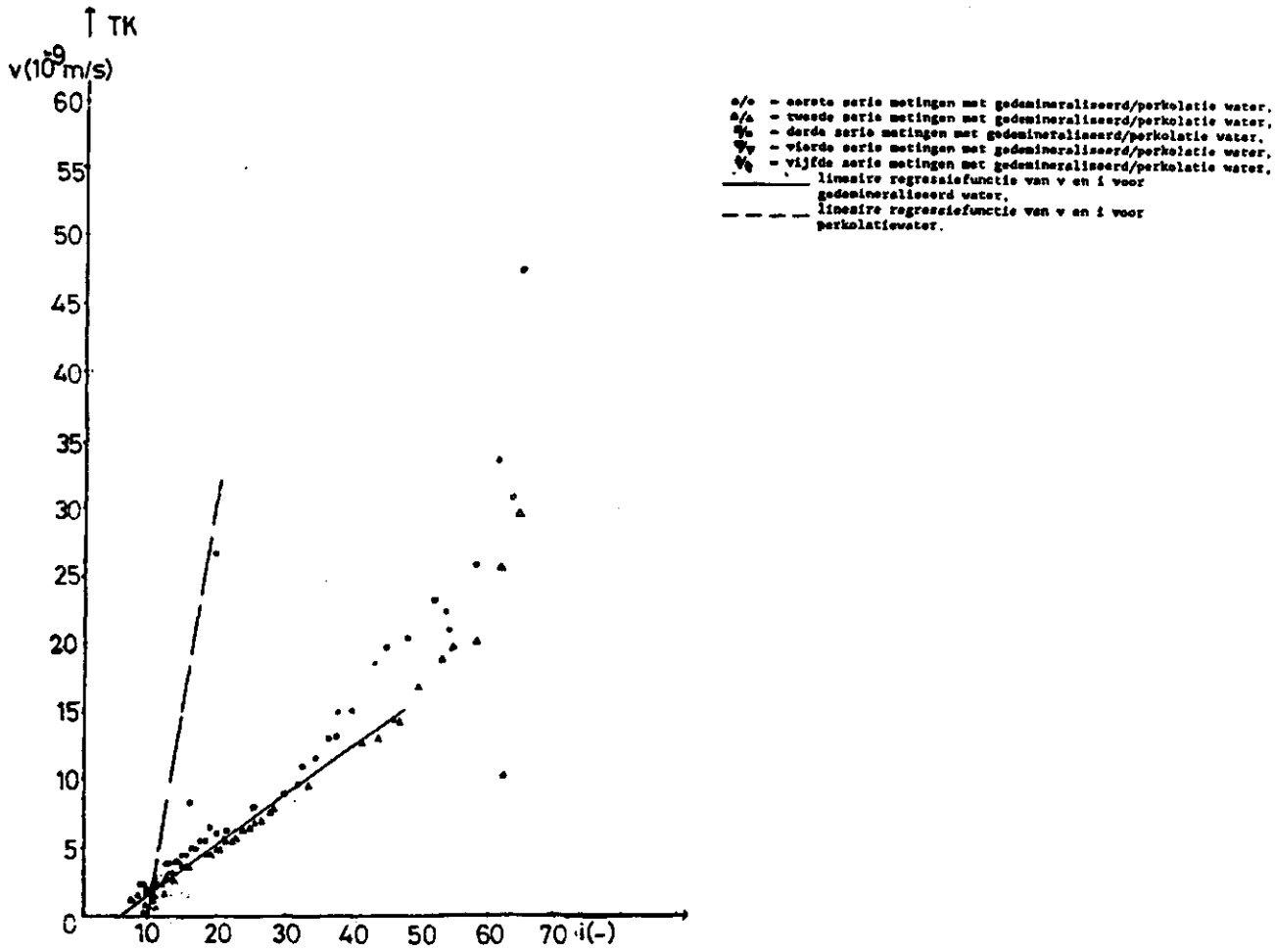


Fig. 15. Doorlatendheid van de Tegelse klei (TK)

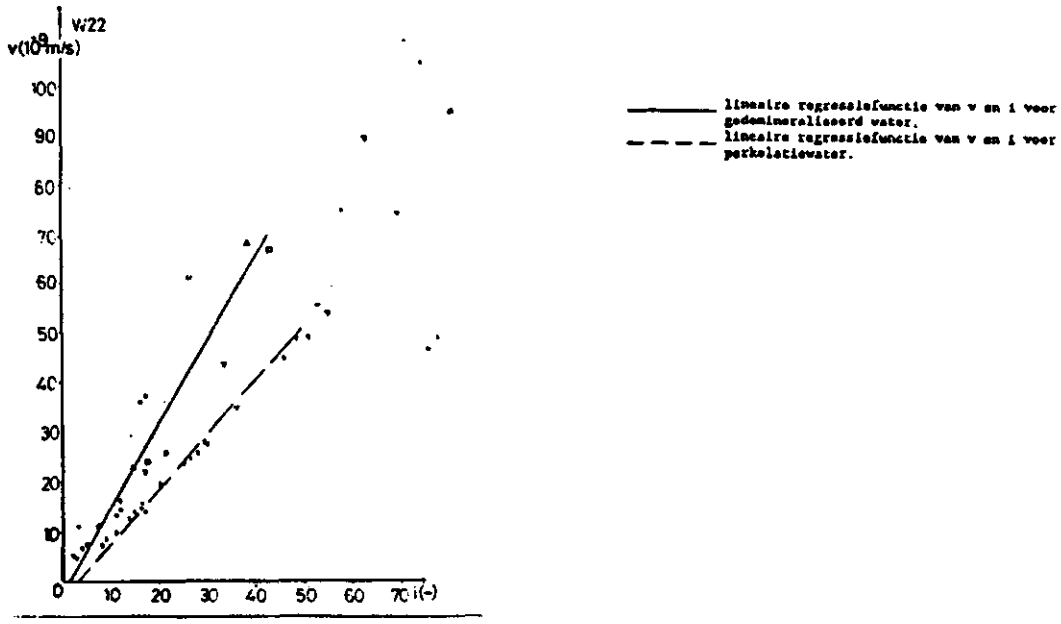


Fig. 16. Doorlatendheid van de zeeklei (W22)

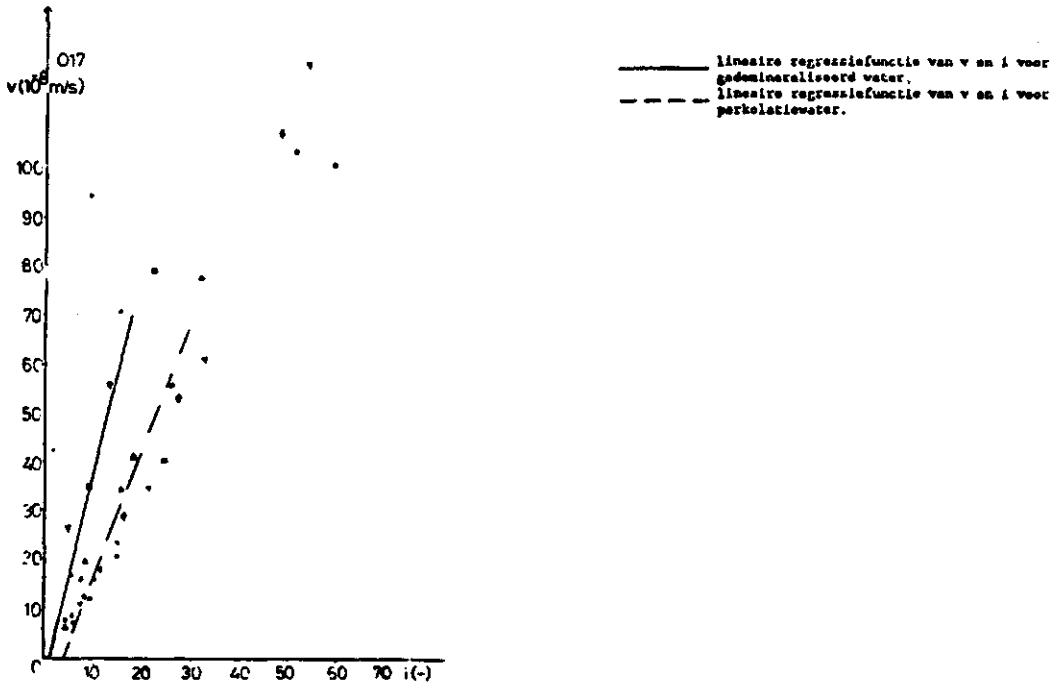


Fig. 17. Doorlatendheid van de beekklei (O17)

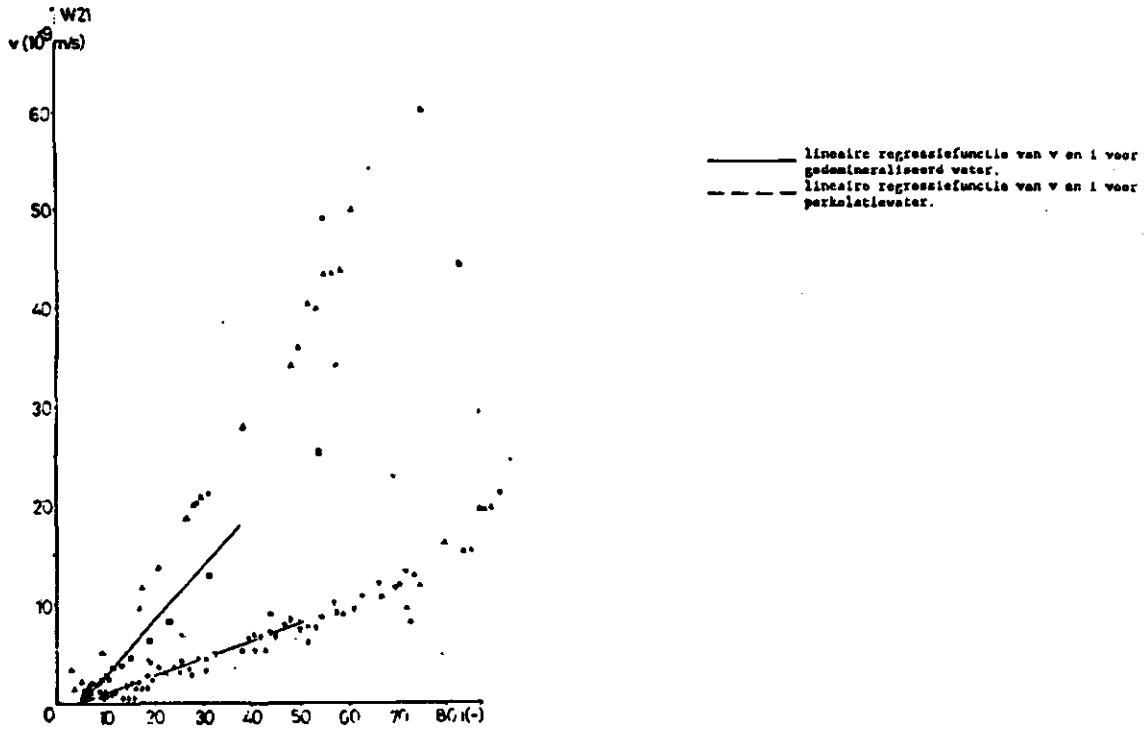


Fig. 18. Doorlatendheid van de zeeklei (W21)

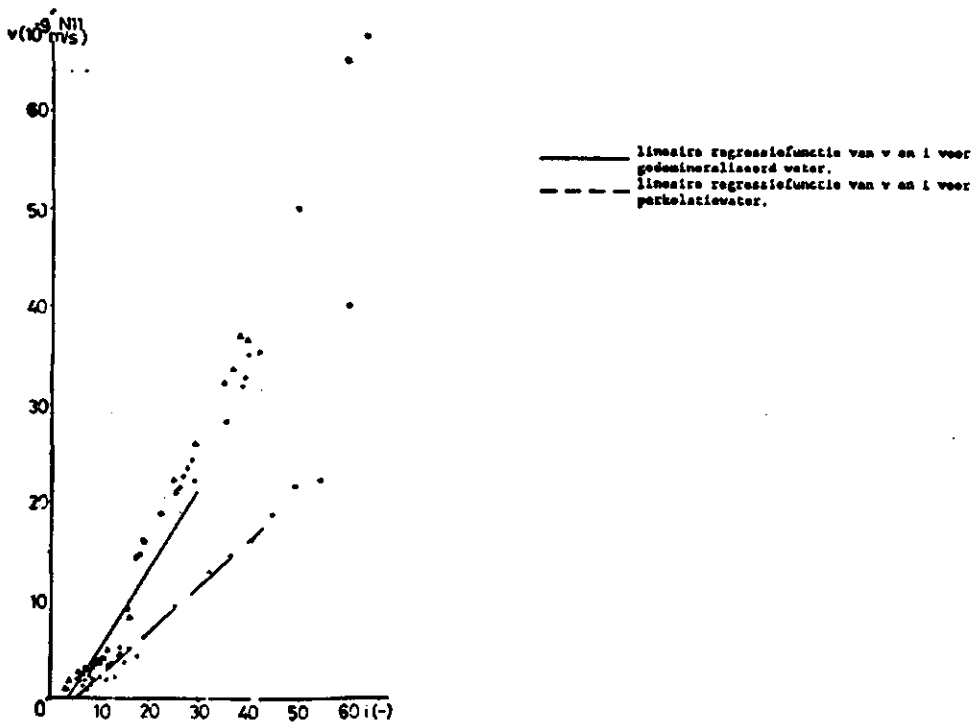
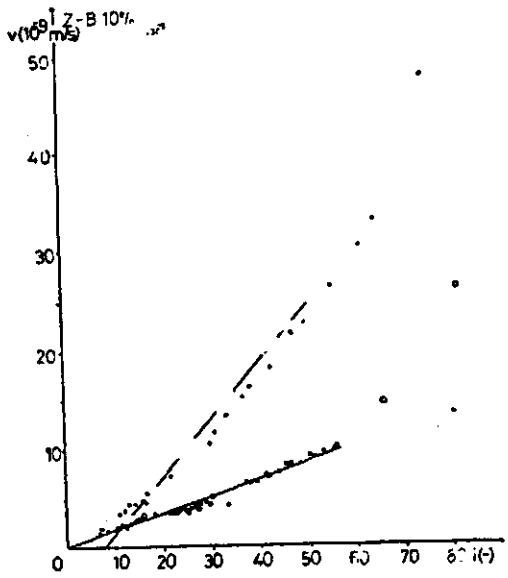
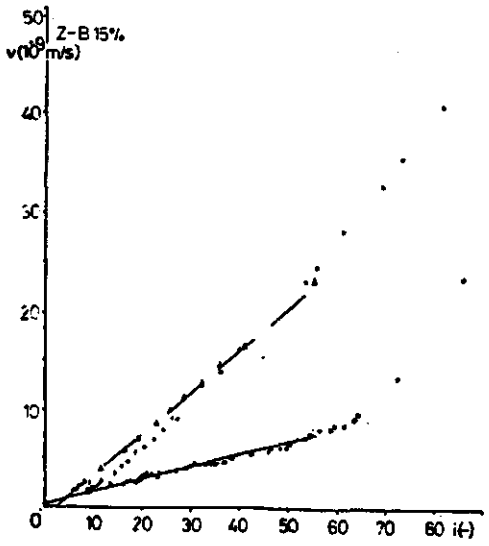


Fig. 19. Doorlatendheid van de zeeklei (N11)



lineaire regressiefunctie van v en i voor gedemineraliseerd water.
lineaire regressiefunctie van v en i voor perkolatiewater.

Fig. 20. Doorlatendheid van zand-bentoniet(10%)mengsel (Z-B 10%)



lineaire regressiefunctie van v en i voor gedemineraliseerd water.
lineaire regressiefunctie van v en i voor perkolatiewater.

Fig. 21. Doorlatendheid van zand-bentoniet(15%)mengsel (Z-B 15%)

Bij de zand-bentoniet mengsels, de Tegelse klei en N29 neemt de doorlatendheid toe met perkolatiewater. De toename in doorlatendheid wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het inkrimpen van de dubbellaag en door de verhoging van de zoutconcentratie in het bodemvocht. Deze monsters hebben waarschijnlijk veel éénwaardige kationen aan het kleimineraal, zodat een uitbreiding als gevolg van kationenuitwisseling verwaarloosbaar is.

Bij de andere monsters neemt de doorlatendheid af met perkolatiewater. De dubbellaag heeft schijnbaar nog steeds niet de maximale uitbreiding. Dat de kleicomplexen overwegend met meerwaardige kationen bezet zijn, kan ook een rol spelen. Er kan nog zwelling optreden door het uitwisselen van meerwaardige ionen (ijzer, calcium en magnesium) met éénwaardige ionen (kalium en natrium). De bezetting van het kleicomplex met kationen uit zich dus in een verandering van de doorlatendheid met perkolatiewater.

Over het algemeen neemt de aanvangsgradiënt toe met perkolatiewater. De toename in aanvangsgradiënten wordt veroorzaakt door de stoffen, die in het influent opgelost zijn. Daardoor neemt de viscositeit van de vloeistof toe en kan verstopping van poriën optreden door deeltjes uit het perkolaat. De vloeistof begint minder gemakkelijk te stromen. Er moet dus een hogere aanvangsgradiënt aangelegd worden om de stroming op te starten.

In de onderstaande tabel 12 zijn de waarden voor k en i_0 weergeven. De waarden zijn berekend uit de grafieken met de kleinste kwadraten methode uit de betrouwbaarste meetserie voor gedemineraliseerd en perkolatiewater.

Uit de tabel zijn niet echt duidelijk conclusies te trekken over doorlaatfactoren en aanvangsgradiënten enerzijds en vochtgehalte bij verdichting. De kleien uit de Westland Formatie, die verdicht zijn bij een hoog vochtgehalte, hebben een lagere doorlatendheid dan de kleien die bij een lager vochtgehalte verdicht zijn. Dit is het effect van het kneden tijdens de verdichting.

Tabel 12. De doorlaatfactor (m/s) en aanvangsgradiënt (-) van de materialen voor gedemineraliseerd water en perkolatiewater

Monster-nummer	Vochtgehalte (gew.proc.)	Voor gedem. water doorlaatfactor	gradiënt	Voor perkolatiewater doorlaatfactor	gradiënt
TK	33,4 %	$3.60 * 10^{-10}$	5.39	$3.17 * 10^{-9}$	9.84
N29	44,2 %	$1.20 * 10^{-10}$	2.20	$1.64 * 10^{-10}$	11.97
W22	17,4 %	$1.73 * 10^{-9}$	1.75	$1.10 * 10^{-9}$	3.12
O17	40,8 %	$4.24 * 10^{-8}$	0.99	$2.68 * 10^{-8}$	4.03
W21	16,2 %	$5.40 * 10^{-10}$	4.57	$1.73 * 10^{-10}$	3.73
N11	30,5 %	$8.10 * 10^{-10}$	3.63	$5.73 * 10^{-10}$	5.85
Z-B 10 %	0 %	$1.70 * 10^{-10}$	-0.29	$5.80 * 10^{-10}$	7.72
Z-B 15 %	0 %	$1.30 * 10^{-10}$	-0.36	$4.30 * 10^{-10}$	2.16

5.4. Lekkages

De maximale jaarlijkse lekkage door de afdichtingslaag dient voor het in gebruik nemen van het stort vastgesteld te worden. De toegelaten jaarlijkse lekkage is afhankelijk van de geohydrologische en milieuhygiënische omgeving en de aard van het lekwater. Deze factoren bepalen hoe schadelijk de emissie van de stoffen uit het stort voor het milieu is.

Voor bovenafdichtingen is gerekend met de doorlaatfactor voor gedemineraliseerd water (Tabel 13a). De maximaal optredende gradiënt is 2.5 als de laag 0.5 meter dik is en er 0.75 meter water op staat. Dit is een aannemelijke waarde voor een normaal functionerend drainagesysteem (BROUWERS, 1987). De duur van de afvoer van het neerslagoverschot is 200 dagen. De lekkage is berekend in millimeters waterlaag per jaar. De lekkage door de onderafdichting (Tabel 13b) is berekend met de doorlaatfactor van gedemineraliseerd en perkolatiewater. Dit geeft een indruk van het lekkageverschil berekend met de doorlaatfactor van gedemineraliseerd water en perkolatiewater. De basisafdichting is 0.5 meter dik en de gradiënt over de laag is 5.0. De laag water op de afdichting is dan 2.00 meter. Deze omstandigheden treden op in ongunstige situaties als het drainagesysteem onvoldoende functioneert. De tijd van de lekkageduur is 365 dagen. Lekkage is in millimeters waterlaag per jaar berekend. De lekkage wordt berekend met de relaties voor v en i van 5.3.

Tabel 13a. De lekkages (mm/jaar) door een afdichting met de beproefde materialen met gedemineraliseerd water

Monster-nummer	k	i_0	Bovenafdichting lekkage
TK	3.60 * 10 -10	5.39	< 1.0 *
N29	1.20 * 10 -10	2.20	< 1.0
W22	1.73 * 10 - 9	1.75	22.4
O17	4.24 * 10 - 8	0.99	>1000.0
W21	5.40 * 10 -10	4.75	< 1.0 *
N11	8.10 * 10 -10	3.63	< 1.0 *
Z-B 10 %	1.70 * 10 -10	-0.29	8.2
Z-B 15 %	1.30 * 10 -10	-0.36	6.4

Tabel 13b. De lekkages (mm/jaar) door een afdichting met de beproefde materialen met perkolatiewater

Monster-nummer	k	i_0	Onderafdichting lekkage
TK	3.17 * 10 - 9	9.84	< 1.0 *
N29	1.64 * 10 -10	11.97	< 1.0 *
W22	1.10 * 10 - 9	3.12	65.2
O17	2.68 * 10 - 8	4.03	820.0
W21	1.73 * 10 -10	3.76	6.8
N11	5.73 * 10 -10	5.83	< 1.0 *
Z-B 10%	5.80 * 10 -10	7.72	< 1.0 *
Z-B 15%	4.30 * 10 -10	2.16	38.5

*) deze klei vertoont een niet-Darcy stromingsgedrag. Maar een lekkage van nul millimeters per jaar is onwaarschijnlijk, daarom is de lekkage op kleiner dan een millimeter per jaar gesteld.

Uit Tabel 13a blijkt dat bij een toegestane lekkage van max. 50 mm/jaar alle kleien met uitzondering van de zware beekklei (O17) voor bovenafdichtingsmateriaal geschikt zijn. In het veld moet voor de dichtheid nog een hogere waarde (Voor Tegelse klei is bij de stortplaats Linne een dichtheid van 1.70 Mg/m³ gerealiseerd.) te bereiken zijn, waardoor de doorlatendheid nog verder afneemt. De zware beekklei (O17) is niet geschikt, omdat deze een ongunstige kleikomplexbezetting met ijzer heeft.

Voor onderafdichting komen vooral de kleien in aanmerking die een hoge aanvangsgradiënt voor perkolatiewater (>5) hebben (TK,N29,N11 en Z-B). De lekkage is dan verwaarloosbaar klein. Ook hier geldt dat met kleien met een hogere dichtheid betere resultaten te bereiken zijn. De verdichting dient verknedend uitgevoerd te worden.

Klei met een lutumgehalte van groter dan 30% lijkt het meest perspectief te bieden. De bezetting van het kleikomplex is echter ook belangrijk omdat die de doorlatendheid negatief of positief beïnvloedt.
Met perkolatiewater treedt bij de lage gradiënten minder lekkage op dan met schoon water, omdat de aanvangsgradiënten hoger zijn.

6. CONCLUSIES

6.1. Conclusies

De conclusies uit dit onderzoek zijn:

- Er is geen eenduidig verband gevonden tussen de granulaire, kleimineralogische samenstelling en de doorlatendheid. Wel kan gezegd worden dat zware kleien het beste perspectief bieden om voor een afdichting gebruikt te worden.
- Het effect van natte verdichting speelt een grotere rol dan de uiteindelijk bereikte dichtheid voor de doorlatendheid.
- Na doorspoelen met gedemineraliseerd water neemt bij alle monsters de doorlatendheid af. De doorlatendheid neemt af omdat er zouten uitgespoeld worden, waardoor de weerstand door de dubbellaag van de kleimineralen groter wordt.
- Vrijwel ieder kleimonster heeft een aanvangsgradiënt. De aanvangsgradiënt neemt af na doorspoeling met gedemineraliseerd water.
  De viscositeit van de bodemoplossing wordt door het uitspoelen van zouten lager, waardoor de vloeistof gemakkelijker begint te stromen.
- Bij zeer zware klei treedt niet-Darcy stroming op.
  Bij de Tegelse klei en de zware zeeklei (N29) is dit goed te zien.
- Bij de zand-bentoniet is er een Darcy stromingsgedrag met gedemineraliseerd water.
- De invloed van de bezetting van het kleikomplex is nog niet helemaal duidelijk, maar kan een negatief effect hebben op de doorlatendheid. De zware beekklei met de ijzeruitspoeling is hier een duidelijk voorbeeld van.
- Met perkolatiewater neemt voor de Tegelse klei, zand-bentoniet mengsels en de zware zeeklei (N29) de doorlatendheid toe. Bij de andere kleimonsters neemt de doorlatendheid verder af. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de initiële bezetting van het kleikomplex.
- Met perkolatiewater nemen vrijwel alle aanvangsgradiënten toe. Dit wordt veroorzaakt door stoffen die in het perkolaat opgelost zijn. Die veroorzaken een hogere viscositeit van het bodemvocht en verstopping van poriën.

- Bij een goede verdichting zouden alle monsters (m.u.v. de zware beekklei) voldoen aan de eis van minder lekkage dan 50 millimeter per jaar. Deze kleien zijn daarom geschikt voor bovenafdichting.
- Voor onderafdichting komt vooral de klei met een niet-Darcy stromingsgedrag voor het perkolatiewater in aanmerking. Dat zijn de Tegelse en de zeeklei (N29 en N11).
- Het materiaal voor de afdichting moet bij een onderafdichting ook beproefd worden met het te verwachten perkolaat uit de stort.

6.2. Suggesties voor verder onderzoek

In het onderzoek zouden nog meer kleisoorten opgenomen moeten worden, om het effect van granulaire, kleimineralogische samenstelling en de verdichting op de doorlatendheid te ontdekken. Kleien van een ander geologisch tijdperk (b.v. Reuverse Klei) en met een andere ontstaansgeschiedenis (b.v. oude en jonge rivierkleien) geven een completer beeld van de kleisoorten in Nederland. Een mengsel van zand met de Europese bentoniet soorten is ook interessant. De Europese bentoniet reageert anders op de proeven dan de Amerikaanse bentoniet, door de andere kationen aan het kleikomplex.

Daaruit blijkt dat de kationenbezetting een derde eigenschap van de klei is, die in het onderzoek meegenomen moet worden. Bij de Europese bentoniet is de kleikomplex bezetting zodanig, dat een afname in doorlatendheid te verwachten is na doorstroming met perkolatiewater.

De verdichting van de monsters is niet optimaal gebleken. Deze zou te verbeteren zijn door het uitvoeren van een betere standaard verdichtingstest. Het gebruik van de meetresultaten in de praktijk wordt zinvoller, als er eerst per kleimonster een proctorkurve bepaald wordt. Misschien is het mogelijk om de proctorproef en verdichting bij de vakgroep Cultuurtechniek (lab. Bodemtechniek) uit te voeren.

De meetopstelling functioneert goed voor het meten van doorlaatfactoren groter dan $1*10^{-10}$ m/s. Wordt de doorlatendheid lager, dan treden een aantal problemen op:

- toetreden van lucht boven het monster. Hierdoor is de exacte gradiënt over het monster niet meer te meten. De lucht veroorzaakt ook een weerstand in het uitstromingspunt, waardoor de gemeten stroomsnelheden te laag zijn. Dit probleem is op te lossen door aan de uitstroomopening een dunner uitstroomslangetje te monteren;
- de toename in afleesfout. Door de lage doorlaatfactoren is de stroomsnelheid zeer laag bij lage gradiënten (<10). Door de lage stroomsnelheden zakt het waterniveau in de stijgbuis weinig. Het verschil in waterhoogte tussen twee tijdsintervallen is dan moeilijk af te lezen. Dit probleem is op te lossen door de tijdintervalen te vergroten of door een dunnere stijgbuis te nemen, waardoor de verschillen in waterhoogte beter zichtbaar worden.

Een ander ding dat bij verder onderzoek te overwegen valt, is het gebruik van een standaard perkolatievloeistof. Dit is zeker nodig omdat het perkolaat van een vuilstort in samenstelling verandert, als het niet anaëroob gehouden wordt. Verder is het perkolatiewater voor elke vuilstort verschillend. De uitkomsten van het onderzoek zijn dan ook gemakkelijker te vergelijken met ander onderzoek op het gebied van stromingsgedrag.

Ook de invloed van de diverse opgeloste stoffen/zouten op de viscositeit is nog niet helemaal duidelijk geworden. De viscositeit heeft een grote invloed op de aanvangsgradiënt. Het achterhalen van een relatie tussen de viscositeit van de vloeistof en de aanvangsgradiënt is daarom belangrijk.

SAMENVATTING

Dit is een onderzoek naar de geschiktheid van natuurlijke materialen voor afdichting van vuilstorterreinen. De afdichting vormt de isolatie van het afval, waardoor emissie van stoffen uit de afvalberg naar het milieu voorkomen wordt. Isolatie van stortplaatsen is in 1985 door de Nederlandse overheid wettelijk geregeld.

De voornaamste bron van emissie vormt het watertransport, waarbij een advectief transport van ongewenste stoffen naar het milieu optreedt. Daarom wordt gesteld dat de laag onder het afval waterondoorlatend moet zijn. Voor de bovenafdichting op het afval gelden minder strenge eisen. De onderzochte natuurlijke materialen zijn zand-bentoniet mengsels en zware kleien uit Nederland. Deze materialen hebben een slechte doorlatendheid.

Het onderzoek is als volgt opgezet. Uit de literatuur zijn factoren achterhaald, die een rol spelen bij de experimenten met het materiaal. De belangrijkste zijn: het stromingsgedrag, de verdichting, de granulaire en kleimineralogische samenstelling van de materialen en het perkolatiewater.

De samenstelling van het influent kan het stromingsgedrag veranderen. Met gedemineraliseerd water treedt er eerder een niet-Darcy stroming op. Dit betekent dat de doorlatendheid bij lage gradiënten afneemt en dat er bij zeer lage gradiënten zelfs geen stroming optreedt (drempelwaarde). Dit wordt veroorzaakt door het zwellen van de kleideeltjes.

De zwelling neemt af als perkolatiewater (hoge zoutconcentraties) door het monster stroomt. De doorlatendheid neemt hierdoor toe, maar de aanvangsgradiënt neemt in veel gevallen ook toe.

Verder zijn er experimenten gedaan met monsters om het stromingsgedrag te bepalen. Bij deze experimenten is gekozen voor een aantal verschil-

lende kleisoorten qua granulaire en kleimineralogische samenstelling. Ook zijn twee zand-bentoniet mengsels doorgemeten.

Het lutumgehalte van de kleien varieert van 28 tot 52% lutum. De kleimineralogische samenstelling van de zeeklei en Tegelse klei verschilt niet zo sterk, alleen de beekklei bevat veel zwellende kleimineralen. De zand-bentoniet mengsels bevatten 10 en 15% Wyoming bentoniet en matig grof zand.

Na verdichting zijn de monsters beproefd met de "falling head" methode. De monsters zijn doorgemeten met gedemineraliseerd en perkolatiewater. Het perkolatiewater is afkomstig uit een stort (VAM te Wijster).

Er zijn ook proeven genomen met een "constant head" methode. De uitkomsten van deze proeven zijn niet betrouwbaar, omdat er met perkolatiewater gasontwikkeling in de monsters optreedt.

Bij de monsters zijn doorlaatfactoren gemeten, die variëren van $1{,}20.10^{-10}$ $m.s^{-1}$ tot $4{,}24.10^{-8}$ $m.s^{-1}$ voor gedemineraliseerd water. De aanvangsgradiënten zijn kleiner dan 5,4. Met perkolatiewater variëren de doorlaatfactoren van de verschillende monsters van $1{,}64.10^{-10}$ $m.s^{-1}$ tot $2{,}68.10^{-8}$ $m.s^{-1}$. De aanvangsgradiënten nemen toe tot maximaal 12,0.

De conclusies uit dit onderzoek zijn:
- er is geen eenduidig verband gevonden tussen de granulaire, kleimineralogische samenstelling en het stromingsgedrag;
- het effect van natte verdichting speelt een grotere rol dan de uiteindelijk bereikte dichtheid voor de doorlatendheid;
- met gedemineraliseerd water nemen de verzadigde doorlatendheid en aanvangsgradiënt met de tijd af;
- de invloed van de bezetting van het kleikomplex is nog niet helemaal duidelijk, maar kan een negatief effect hebben op de doorlatendheid;
- met perkolatiewater neemt voor de Tegelse klei, zand-bentoniet mengsels en de zware zeeklei (N29) de doorlatendheid toe. Voor de andere monsters neemt de doorlatendheid verder af;

- met perkolatiewater nemen vrijwel alle aanvangsgradiënten toe. De stoffen in het perkolatiewater veroorzaken een hogere viscositeit van het bodemvocht en verstopping van poriën;
- bij een goede verdichting zouden alle monsters (met uitzondering van de zware beekklei) voldoen aan de eis van minder lekkage dan 50 millimeter per jaar. Deze materialen zijn daarom geschikt voor bovenafdichting;
- voor onderafdichting komen vooral de materialen met een niet-Darcy stromingsgedrag voor het perkolatiewater in aanmerking. Dat zijn de Tegelse en de zeekleien (N29 en N11);
- het materiaal moet bij een onderafdichting ook beproefd worden met het verwachten perkolaat uit de stort.

LITERATUUR

BOGAARD v.d., E., 1986. Cultuurtechnische aspecten van de bodemverontreiniging en -sanering, Vakgroep Cultuurtechniek van Landbouw Universiteit, Wageningen.

BREEUWSMA, A., 1985. Kleimineralogische en chemische karakteristieken van zeeklei, rivierklei en beekklei. STIBOKA rapport nr. 1869, Wageningen.

BREEUWSMA, A. ,1987. Persoonlijke mededeling, november 1987, Wageningen.

BROUWERS, SANDERS & GERAEDTS, 1987. Keuringsprotokol voor kleiafdichtingen op vuilstortplaatsen, (Reuverse en Tegelse Klei). Adviesbureau Brouwers en Sanders & Geraedts vuilverwerking, Roermond.

DOESBURG, v. H., 1988. Voorlopige resultaten kleimineralogische samenstelling van de kleimonsters met de röntgendiffractie methode, Vakgroep Bodemkunde en Geologie, Wageningen.

DRIEL v, W.F., 1984. Grondwerken, Vakgroep Weg- en Waterbouwkunde en Irrigatie van Landbouw Hogeschool te Wageningen.

ERBSLOH, 1987. Bau und Bohrbentonite, duitse reklamefolder over bentoniet en zijn gebruiksmogelijkheden, Erbsloh Geisenheim Ghmb & Co, Geisenheim.

HANSEL, W., 1982. Entwicklungen und Eigenschaften von Basisabdichtungen und ihre Überwachung. Heft Nr.8, Mitteilungen des Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig.

HOEKS, J., 1981. Measures to control groundwater pollution near waste disposal sites. I.C.W. Wageningen, Voordracht op het ISWA Symposium te Munchen, Duitsland.

HOEKS, J. en AGELINK, G.J., 1982. Onderzoek naar mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen, rapport 3, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.

HOEKS, J., H. HOEKSTRA en A. RYHINER, 1984. Kolomproeven met perkolatiewater uit een afvalstort. I.C.W. Nota 1530, Wageningen.

HOEKS, J., H. GLAS, J.R. HOFKAMP and A.H. RYHINER, 1987. Bentonite liners for isolation of waste disposal sites, uit Waste Management & Research (1987) 5, 93-105, ISWA.

HOFKAMP, J.R., 1986. Zand-bentoniet mengsels als afdichtingsmateriaal voor vuilstortplaatsen, I.C.W. Nota 1722, Wageningen.

GABENER, H.G., 1983. Untersuchungen über die Anfangsgradienten und Filtergesetze bei bindigen Boden. Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik. Heft 6. Universität-Gesamthochschule Essen.

GABENER, G.H., 1984. Über Abweichungen vom darcysche Gesets bei Durchstromung bindigen Boden. Artikel uit Bautechnik, Fachblad für dem gesamte Bauingenieurswesen, nr 6, blz.351-358, Berlijn.

GLAS, H., 1985. Afvalstortterreinen, resultaten afstudeerproject Huub Glas, Technische Hogeschool Delft.

GODECKE, H.J., 1985. Entwicklungen eines Fliesgesetses für die Porenwasserdurchstromung feinkorniger Boden unter kleine Druckgradienten. Die Bautechnik 6, blz. 184-193.

KOHLER, E.E., 1985. Mineralogische Veranderungen von Tonen und ton Mineralen durch organische Losungen. Heft Nr.20, Mitteilungen des Instituts fur Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig.

KOHLER, E., U. EHRLICHER und E. USTRICH, 1986. Mineralogische Untersuchungen an Abdichtungsmaterialien, uit Beihefte zu Mull und Abfall, Nr.24, Mineralogische Deponieabdichtungen, Erich Schmidt Verlag Gmbh, Berlijn 1987.

KOOREVAAR, P., G. MENELIK en C. DIRKSEN, 1983. Elements of soil physics, Vakgroep Bodemkunde en Plantenvoeding van de Landbouw Hogeschool te Wageningen, Elsevier, Amsterdam.

KUIPERS, S.F., 1981. Bodemkunde. 14de druk, 2de oplage, Educaboek b.v. Culemborg.

REE, v. C.C.D.F. e.a., 1986. Beproeving klei-afdichting stortplaats Linne, Laboratorium voor Grondmechanica, rapport CO 284280/16, Delft.

REE, v. C.C.D.F., e.a., 1986. Beproeving klei uit de Wambachgroeve (rapport 2), CO 286830/5, Laboratorium voor Grondmechanica, Delft.

REUTER, E., 1985. Entwurf, Prufung und Eigenschaften mineralische Basisabdichtungen. Heft Nr.20, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig.

REUTER, E., 1985. Eignungsuntersuchungen von naturlichen Dichtungsmaterialien für Deponien. Heft Nr.17, Mitteilungen des Instituts fur Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig.

REUTER, E., 1986. Langzeitverhalten mineralische Deponieabdichtungen. uit Beihefte zu Mull und Abfall, Nr.24, Mineralogische Deponieabdichtungen, Erich Schmidt Verlag Gmbh, Berlijn 1987.

RYHINER, A.H. en HOEKS, J. 1986. Onderzoek naar de bruikbaarheid van Reuverse en Tegelse klei als afdichtingsmateriaal op afvalstortterreinen, I.C.W. Nota 1726, Wageningen.

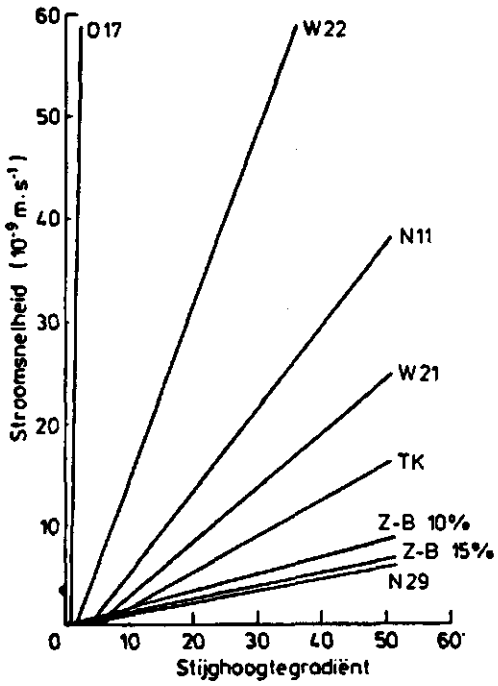
V.R.O.M., 1985. "Richtlijn Gecontroleerd Storten", Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieuhygiene, Den Haag.

V.R.O.M., 1985. Protocollen voor het toepassen van afdichtingsfolies t.b.v. de bodembescherming. Bodembescherming nr 39, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieuhygiene, Den Haag.

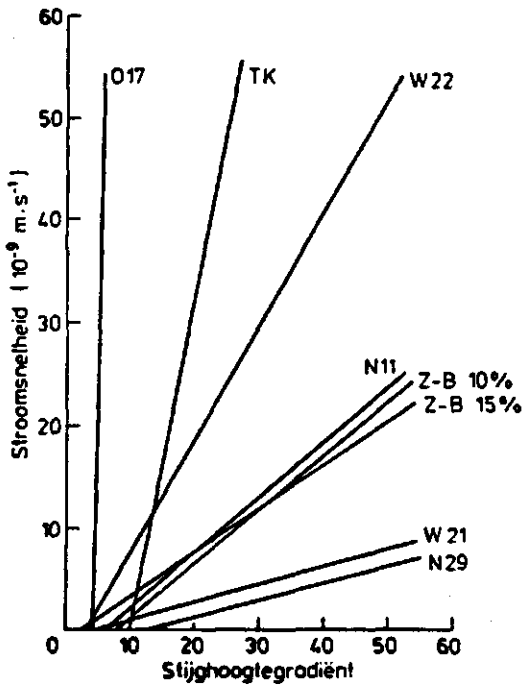
ZAGWIJNEN, W.H. en STAALDUINEN v, C.J.,1975, Geologische overzichtskaarten van Nederland, Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

BIJLAGE 1

GRAFIEKEN VAN DE MONSTERS VOOR GEDEMINERALISEERD EN PERKOLATIEWATER



De grafiek met de relaties tussen de stroomsnelheid (v) en de gradiënt (i) voor de monsters met gedemineraliseerd water



De grafiek met de relaties tussen de stroomsnelheid (v) en de gradiënt (i) voor de monsters met perkolatiewater

BIJLAGE 2

AANBRENGEN VAN DE NATUURLIJKE MATERIALEN IN HET VELD

De afdichtingen met natuurlijke materialen worden als volgt aangebracht. De zand-bentoniet mengsels worden op het terrein gemengd volgens de eisen uit het vooronderzoek. Het zand wordt eerst uitgespreid. Daarna wordt de bentoniet over het zand gestrooid en in de laag zand gefreesd. Na deze bewerkingen wordt de laag na toevoeging van water verdicht tot de gewenste dichtheid. De afdichtingslaag wordt uit lagen van 0,30 m opgebouwd. De dikte van de afdichtingslaag is afhankelijk van de doorlatendheid van de lagen.

De kleien worden geselecteerd op hun eigenschappen. Uit het vooronderzoek volgen ook de eisen voor de constructie van de afdichting met de klei. De klei wordt ook in lagen van 0,30 meter aangebracht en verdicht.

Omdat de natuurlijke materialen heterogener samengesteld zijn, moet het materiaal goed gemengd worden tijdens de constructie van de afdichtingslaag. Na het aanbrengen van de materialen moet er nog een nacontrole gebeuren, om te kijken of de afdichting beantwoordt aan de eisen van de opdrachtgever. De nacontrole moet ongeveer tegelijk en direct na het aanbrengen uitgevoerd worden door een onafhankelijke instantie. Als uit de resultaten van de nacontrole blijkt, dat de afdichting voldoet aan de eisen, mag de stort verder afgewerkt worden.

De factoren, die onderzocht worden tijdens de nacontrole zijn de typische eigenschappen van de afdichting(slagen) en het gebruikte materiaal. De eigenschappen zijn de dikte, de verdichting en de doorlatendheid. Het gebruikte materiaal moet gelijk zijn aan het materiaal, dat bij het vooronderzoek beproefd is.

De dikte van de laag is te controleren door het inmeten van een aantal punten voor en na de afdichting met b.v. een laser. De verdichting kan op het werk intensief gecontroleerd worden met een isotopensonde. De

waarden van deze metingen moeten echter geijkt worden aan de verdichting en vochtgehalte van gestoken monsters. Deze bepaling wordt in het laboratorium uitgevoerd. De verdichting moet voldoen aan 95% van de proctordichtheid en aan de natte kant van het optimum (kneden) uitgevoerd zijn (SONDERMANN, 1985). Van de gestoken monsters wordt verder de doorstroomsnelheid gemeten bij een gradiënt van ca. 20. De proef kan uitgevoerd worden volgens de "constant head" omdat het stromingsgedrag van het materiaal uit het vooronderzoek bekend is. De gemeten stroomsnelheid moet volgens een statistische analyse vergeleken worden met de uitkomsten van het vooronderzoek (BROUWERS, 1987). De monsters worden gestoken met stalen Delftse bussen. Van elke laag wordt per 1000 m^2 een monster genomen. Het gebruikte materiaal wordt gecontroleerd op de korrelgrootteverdeling of bentoniet toevoeging en de proctorkromme. Hiervoor wordt ook per elke 1000 m^2 per laag een monster genomen (SONDERMANN, 1985; BROUWERS, SANDERS en GERAEDTS, 1987).
Een uitgebreid bemonsteringsprotocol is te vinden in het keuringsprotocol voor kleiafdichtingen (BROUWERS, SANDERS en GERAEDTS, 1987).

Als er sprake is van een onderafdichting, dan dient de doorlatendheid beproefd te worden met het te verwachten of vergelijkbaar perkolaat, omdat het gedrag van het materiaal afhankelijk is van het gebruikte influent.

De eis dat een afdichting ook op de lange duur volledig ondoorlatend moet zijn, is niet reëel. Wel zou men kunnen stellen dat de emmisie van stoffen jaarlijks zeer klein moet zijn. Dit kan enigzins voorspeld worden door materialen te gebruiken, waarvan over de lange duur de eigenschappen niet veranderen. De werkingsduur en jaarlijkse lekkage door de afdichting is belangrijker dan de absolute eis van ondoorlatendheid na installeren van de afdichting.

Bepalen van de best-passende kromme

Voor een verzameling gegevenspunten (x_i, y_i) met $i = 1, 2, \ldots, n$ kan dit programma dienen om de gegevens bij elk van de volgende krommen te laten passen:

1. Een rechte lijn (lineaire regressie): $y = a + bx$.
2. Een exponentiële kromme: $y = ae^{bx}$ $(a > 0)$.
3. Een logarithmische kromme: $y = a + b \ln x$.
4. Een machtenkromme: $y = ax^b$ $(a > 0)$.

De regressiecoëfficiënten a en b worden gevonden door het oplossen van het volgende equivalente stelsel vergelijkingen.

$$An + B\Sigma X_i = \Sigma Y_i$$

$$A\Sigma X_i + B\Sigma X_i^2 = \Sigma Y_i X_i$$

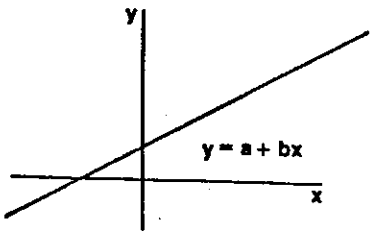
De relaties tussen de veranderlijken worden als volgt bepaald:

Regressie	A	B	X_i	Y_i
Lineair	a	b	x_i	y_i
Exponentieel	ln a	b	x_i	$\ln y_i$
Logarithmisch	a	b	$\ln x_i$	y_i
Machten	ln a	b	$\ln x_i$	$\ln y_i$

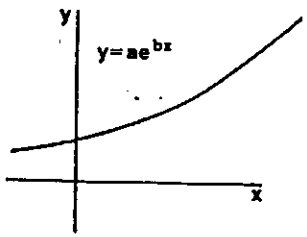
De bepaaldheidscoëfficiënt is gelijk aan:

$$R^2 = \frac{A\Sigma Y_i + b\Sigma X_i Y_i - \frac{1}{n}(\Sigma Y_i)^2}{\Sigma(Y_i^2) - \frac{1}{n}(\Sigma Y_i)^2}$$

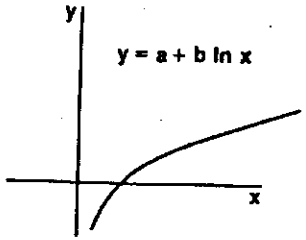
Lineaire regressie



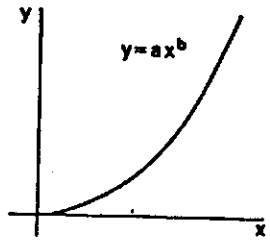
Exponentiële kromme



Logarithmische kromme



Machtenkromme



Opmerkingen:

1. Het programma past de methode der kleinste kwadraten toe, of op de oorspronkelijke vergelijkingen (rechte lijn en logarithmische kromme), of op de omgevormde vergelijkingen (exponentiële kromme en machtenkromme).
2. Negatieve waarden en nulwaarden van x_i veroorzaken een fout (error) voor de calculator indien de best-passende logarithmische kromme gezocht wordt. Negatieve waarden en nulwaarden van y_i veroorzaken een fout (error) voor de calculator bij het bepalen van de best-passende exponentiële kromme. Voor de bepaling van de passende machtenkromme moeten zowel x_i als y_i positief zijn, en niet gelijk aan nul.
3. Wanneer de verschillen tussen de x- en/of y-waarden klein worden, vermindert de nauwkeurigheid van de regressiecoëfficiënten.