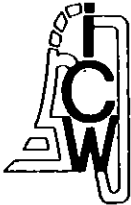


**ALTERRA**  
Wageningen Universiteit & Research centre  
Omgevingswetenschappen  
Centrum Water & Klimaat  
*Team Integraal Waterbeheer*

ICW Nota 1726  
augustus 1986



nota

instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen

ONDERZOEK NAAR DE BRUIKBAARHEID VAN REUVERSE EN TEGELSE  
KLEI ALS AFDICHTINGSMATERIAAL OP AFVALSTORTTERREINEN

A.H. Ryhiner en J. Hoeks

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van  
het Adviesbureau Brouwers BV te Roermond

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

I N H O U D

	<b>blz.</b>
1. INLEIDING	1
2. NIET-DARCY STROMING	3
3. PROEFOPZET	7
4. RESULTATEN	
4.1. Granulaire en mineralogische samenstelling	11
4.2. Verdichting en zwellling	12
4.3. Doorlatendheid	13
5. CONCLUSIES	19
6. LITERATUUR	21
BIJLAGEN	

**ALTERRA**

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

## 1. INLEIDING

Eerder uitgevoerd onderzoek (HOEKS en AGELINK, 1982) heeft aangetoond dat natuurlijke materialen bruikbaar zijn voor bovenafdichting van stortplaatsen mits de doorlatendheid in de orde van  $5 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$  of lager ligt. Dergelijk lage doorlatendheden blijken alleen realiseerbaar te zijn met zeer speciale kleisoorten. Zo is gebleken dat menging van zand met circa 5% van het sterk zwellende kleimineraal bentoniet een mengsel oplevert dat na verdichting een doorlatendheid heeft in de orde van  $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$  of zelfs lager. (HOEKS et al., 1986). Bij toepassing onder praktijkomstandigheden bleek de lekkage door de zand-bentoniet afdichtingslagen nihil te zijn. Bovendien bleek de afdichtingslaag goed bestand te zijn tegen onregelmatige zettingen (RYHINER et al., 1985). Met name deze duurzaamheid op langere termijn is waarschijnlijk een sterk pluspunt van natuurlijke afdichtingsmaterialen.

Op verzoek van het Adviesbureau Brouwers BV te Roermond is de toepasbaarheid van Reuverse en Tegelse klei als afdichtingsmateriaal voor stortplaatsen nader onderzocht. Het betreft hier een zeer zware klei, die wordt gewonnen in het grensgebied bij Venlo. Met dergelijke kleisoorten zijn in West-Duitsland reeds meerdere stortplaatsen afgedicht.

In de Duitse literatuur over het gebruik van natuurlijke materialen voor basisafdichtingen wordt nog vrij algemeen uitgegaan van de eis dat  $k \leq 1 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$  (zie bijv. SIMONS et al., 1982). In sommige deelstaten is, afhankelijk van de gevarenklasse, deze eis verscherpt tot  $k \leq 1 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$  (BECHTLE, 1979).

Bij de gradiënten, zoals deze in het veld voorkomen, betekent dit nog altijd een lekkage in de orde van  $100 - 300 \text{ mm.jaar}^{-1}$  (zie HOEKS en AGELINK, 1982). De eisen met betrekking tot basisafdichtingen zijn in Nederland beduidend strenger. In feite dient de basisafdichting hier ondoorlatend te zijn, maar dit is met natuurlijke afdichtingsmaterialen niet of nauwelijks te realiseren. Zelfs met kunststofafdichtingen is dit waarschijnlijk niet te realiseren vanwege vroeg of laat optredende lekkages.

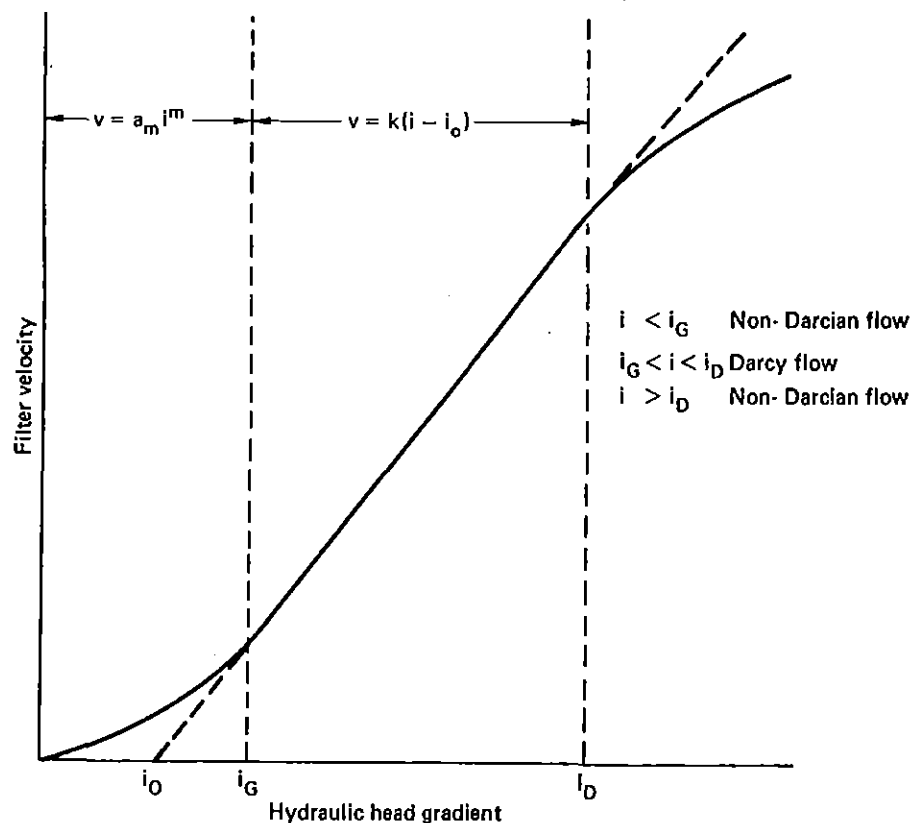
EHRIG (1980) bespreekt de waterbalansen van een 13-tal vuilstortplaatsen in Duitsland, waarbij verscheidene een basisafdichting hebben bestaande uit klei of een kunststoffolie. De resultaten van deze studies zijn echter niet bruikbaar om de effectiviteit van de basisafdichting te beoordelen. Daarvoor zitten er te veel onzekerheden in de waterbalansen. Met name de berging van water in het afval is onbekend. Veel stortplaatsen waren ten tijde van het onderzoek nog in bedrijf en dit betekent dat er nog voortdurend berging van water in vers aangevoerd afval plaatsvindt, zodat er voorlopig nog geen sprake is van een evenwichtssituatie. Voorts treedt soms oppervlakteafvoer op als gevolg van een lemige of kleiïge afdeklaag. Dit is niet gekwantificeerd, waardoor geen juist beeld van de waterbalans wordt verkregen. Opmerkelijk is overigens wel, dat een grotere hoeveelheid perkolatiewater wordt opgevangen op stortplaatsen, waar de basisafdichting bestaat uit een in situ reeds aanwezige slecht doorlatende kleilaag.

Een beoordeling van geschiktheid van kleiafdichtingen kan daarom voorlopig slechts gebaseerd zijn op laboratoriumonderzoek, met dien verstande dat de resultaten worden vertaald naar de veldsituatie. Dit is temeer van belang gezien het optreden van Niet-Darcy stroming in zware kleigronden (zie par. 2).

Behalve de toepasbaarheid van deze klei voor bovenafdichting is ook onderzocht in hoeverre deze klei bruikbaar is voor basisafdichtingen onder afvalstortplaatsen. Uiteraard zijn de eisen ten aanzien van de basisafdichting strenger, omdat voorkomen dient te worden dat verontreinigd perkolatiewater in de ondergrond dringt.

## 2. NIET-DARCY STROMING

Een belangrijk aspect bij de interpretatie van op het laboratorium gemeten doorlatendheden betreft de Niet-Darcy stroming in dergelijke zware kleiën. Dit betekent dat de  $k$ -waarde afhankelijk is van de aangelegde stijghoogte-gradiënt ( $i$ ) (zie o.a. GÖDECKE, 1980; GABENER, 1984; HOEKS et al., 1986). Dit verschijnsel wordt veroorzaakt door het feit dat bij lage gradiënten de krachten, waarmee het water aan de klei gebonden is, een belangrijke rol gaan spelen. Een deel van het water is dan niet meer vrij beweeglijk. Pas bij hoge gradiënten wordt alle poriewater beweeglijk en voldoet de waterstroming aan de Wet van Darcy (fig. 1). In principe bestaat de mogelijkheid dat bij lage gradiënten alle poriewater gebonden en dus immobiel blijft. Er treedt dan geen stroming op. Uit de literatuur (zie GABENER, 1984) kan echter geen zekerheid worden verkregen over het bestaan van een minimale gradiënt, waar beneden geen stroming optreedt.



Figuur 1. Schematische voorstelling van de relatie tussen de filtersnelheid  $v$  en de gradiënt  $i$

Op grond van onderzoek van KEZDI concludeert het Adviesbureau Brouwers in haar rapport (augustus 1985) wel dat geen stroming optreedt in de Reuverse en Tegelse klei voor gradiënten kleiner dan de  $i_0$ -waarde ( $i_0 \approx 8 \text{ à } 12$ ). Dit is echter een onjuiste interpretatie van de aanvangsgradiënt  $i_0$ . Bovendien zou volgens GABENER (1983) de  $i_0$  voor dit type klei aanzienlijk kleiner zijn, namelijk circa 0,3 tot 1,7.

Het Niet-Darcy gedrag heeft tot gevolg dat de doorlatendheid in het laboratorium bij uiteenlopende stijghoogte-gradiënten moet worden gemeten. Pas als de relatie tussen de stroomsnelheid ( $v$ ) en de gradiënt ( $i$ ) bekend is, kan worden vastgesteld hoe groot de doorlatendheid in het veld is bij de daar voorkomende gradiënten (vaak in de orde van 1 tot 5).

In het pre-lineaire gebied ( $i < i_G$ ) voldoet de stroming volgens GÖDECKE (1980) aan (zie ook fig. 1):

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

waarin:  $v$  = filtersnelheid ( $\text{m.s}^{-1}$ )

$a_m$  = filtersnelheid voor  $i = 1$  ( $\text{m.s}^{-1}$ )

$i$  = stijghoogte gradiënt (-)

$m$  = constante (-)

Uit onderzoek van HOEKS et al. (1986) bleek voor zand-bentonietmengsels met 5% Wyoming bentoniet  $m = 1,4$  en  $a_m = 1 \times 10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$  te zijn in het gradiënt-bereik van 5 tot 55.

Uit vergelijking (1) volgt dat de  $k$ -waarde, berekend volgens Darcy als  $v/i$ , in het prelineaire gebied afhankelijk is van de gradiënt:

$$k(i) = a_m i^{m-1} \quad (2)$$

Een afdichtingslaag met een  $k$ -waarde van  $1 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ , gemeten bij  $i = 25$ , kan dus in het veld bij  $i = 2,5$  een  $k$ -waarde hebben van  $4 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$  ( $m = 1,4$ ).

In het lineaire bereik ( $i_G < i < i_D$ ) voldoet de stroming aan (zie fig. 1):

$$v = k (i - i_0) \quad (3)$$

waarin  $i_0$  de "aanvangsgradiënt" wordt genoemd. In feite is dit geen juiste benaming, aangezien voor  $i < i_0$  nog wel stroming optreedt, zoals ook uit fig. 1 blijkt. In zware kleigronden voldoet de stroming vaak pas bij hoge gradiënten aan deze lineaire relatie ( $i_0 \approx 50 - 100$ ).

GABENER (1983) bespreekt uitvoerig de consequenties van het niet-Darcy gedrag voor de interpretatie van doorlatendheidsexperimenten. In het lineaire bereik wordt de doorlatendheid, welke is bepaald volgens de "constant head" methode, berekend volgens de gemodificeerde Darcy formule:

$$k = \frac{Q}{A t(i-i_0)} \quad (4)$$

waarin:

$k$  = doorlatendheid ( $m \cdot s^{-1}$ )

$Q$  = debiet ( $m^3$ )

$A$  = monsteroppervlak ( $m^2$ )

$t$  = tijdsinterval (s)

$i = \frac{\Delta H}{l}$  = gradiënt (-)

$\Delta H$  = stijghoogteverschil (m)

$l$  = monsterdikte (m)

$i_0$  = de aanvangsgradiënt (-)

Het debiet  $Q$  wordt gemeten door de hoeveelheid vloeistof, die door het monster stroomt, op te vangen in een erlenmeijer en te wegen. Hieruit wordt de filtersnelheid ( $v$ ) berekend als:

$$v = \frac{Q}{At} (m \cdot s^{-1}) \quad (5)$$

In vergelijking (3) zijn echter zowel  $k$  als  $i_0$  onbekend, zodat minimaal twee vergelijkingen nodig zijn om deze onbekenden op te lossen. Daarom moet bij minstens twee verschillende gradiënten  $i_1$  en  $i_2$  de bijbehorende filtersnelheden  $v_1$  en  $v_2$  worden gemeten. Volgens GABENER (1983) kunnen de onbekenden dan als volgt worden berekend:

$$k = \frac{v_1 - v_2}{i_1 - i_2} \quad (6)$$

$$i_0 = \frac{v_1 \times i_2 - v_2 \times i_1}{v_1 - v_2} \quad (7)$$

waarin:

$v_1, v_2$  = filtersnelheid bij gradiënt  $i_1$  respectievelijk  $i_2$  ( $m \cdot s^{-1}$ )  
 $i_1, i_2$  = gradiënt tijdens eerste respectievelijk tweede meting (-)

Bij de "falling head" methode wordt de doorlatendheid berekend als:

$$k = \frac{al}{At} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (8)$$

waarin:

$a$  = oppervlak van de stijgbuis boven het monster ( $m^2$ )  
 $h_1$  = stijghoogte bij aanvang tijdsinterval (m)  
 $h_2$  = stijghoogte na afloop van tijdsinterval (m)  
 $t$  = duur tijdsinterval (s)  
 $l$  = dikte van het monster (m)  
 $A$  = monsteroppervlak ( $m^2$ )

Voor het geval dat  $i_0 > 0$  wordt de doorlatendheid bij de "falling head" methode in het lineaire bereik berekend als (zie GABENER, 1983):



$$k = \frac{a1}{At} \ln \left( \frac{h_1 - i_o1}{h_2 - i_o1} \right) \quad (9)$$

Het gemeten debiet  $Q$  tijdens het tijdsinterval is per definitie gelijk aan het geïnfiltreerde volume  $(h_1 - h_2) \cdot a$ , als geen berging in het monster optreedt. De gemiddelde filtersnelheid tijdens het tijdsinterval is dus:

$$v = \frac{Q}{A \cdot t} = (h_1 - h_2) \frac{a}{A \cdot t} \quad (10)$$

In werkelijkheid neemt de filtersnelheid echter voortdurend af bij dalende waterspiegel. Of deze enkele waarneming werkelijk op de lijn  $v = k (i - i_o)$  ligt, kan pas blijken als de bijbehorende "gemiddelde" gradiënt bekend is. Uit de beschouwingen van GABENER (1983) blijkt dat deze "gemiddelde" gradiënt moet worden berekend als het harmonisch gemiddelde van  $i_1$  en  $i_2$ :

$$i_x = \frac{2 i_1 i_2}{i_1 + i_2} \quad (11)$$

met als bijbehorende berekende filtersnelheid:

$$v_x = \frac{2a h_1 h_2}{At(h_1+h_2)} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (12)$$

Door aldus voor twee verschillende tijdsintervallen  $i_x$  en  $v_x$  te berekenen, kunnen nu met de vergelijkingen (6) en (7) respectievelijk de  $k$ - en  $i_o$ -waarde worden berekend.

### 3. PROEFOPZET

De kleimonsters voor dit onderzoek zijn aangeleverd door de firma Sanders en Gerardts op verzoek van het Adviesbureau Brouwers BV te Roermond. Het eerste monster (ontvangen eind maart 1986) bleek reeds

langdurig aan de lucht te hebben blootgestaan en was in vergaande mate geoxydeerd (bruinkleuring door ijzeroxydatie). Dit monster werd niet representatief geacht voor de klei, die wordt gebruikt als afdichtingsmateriaal. Het tweede monster (ontvangen d.d. 1 april 1986) betrof een monster van de Reuverse klei en was blauw/grijs van kleur. Tegen het eind van de onderzoeksperiode is ook nog een monster Tegelse klei ontvangen. Hiermee is slechts een kortdurend doorlatendheidsexperiment uitgevoerd.

De granulaire samenstelling van de klei werd vastgesteld op het ICW-laboratorium. De kleifractie is mineralogisch onderzocht op de Vakgroep Bodemkunde en Geologie van de Landbouwhogeschool.

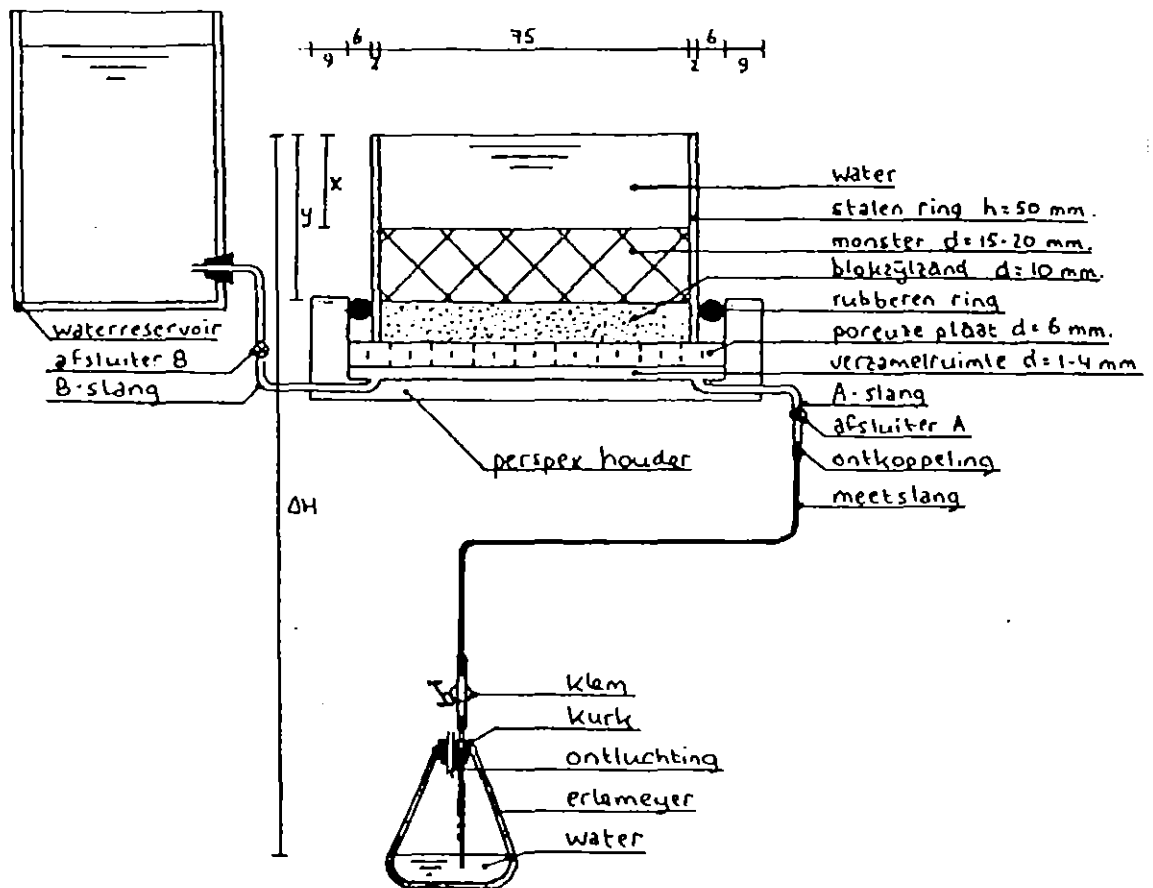
Het vochtgehalte van de aangeleverde klei werd bepaald en bedroeg 32,4 gew.%. Voor de bepaling van het nat volumegewicht ( $\rho_n$ ) en het droog volumegewicht ( $\rho_d$ ) na verdichting werd de klei laagsgewijs ingevuld en verdicht in een Kopecky ring. Het monster werd verdicht met een stalen stamper met een vlak oppervlak, waarvan de diameter van het stempel gelijk is aan de binnendiameter van de ring. Voordat de volgende laag werd opgebracht, werd de laag zo lang verdicht totdat een coherent vlak oppervlak werd verkregen.

Voor de bepaling van de doorlatendheid werd zowel de "constant head" methode als ook de "falling head" methode gebruikt. De hiervoor gebruikte meetopstelling is schematisch weergegeven in figuur 2.

Het verschil tussen beide methoden bestaat slechts hieruit, dat tijdens de meting volgens de "constant head" methode het waterniveau boven het monster constant wordt gehouden, terwijl bij de "falling head" methode het debiet wordt gemeten bij een dalend waterniveau.

Voor de meting volgens de "constant head" methode werd gebruik gemaakt van een stalen ring met binnendiameter van 7,5 cm en een hoogte van 5 cm, waarin de klei op de eerder beschreven wijze werd verdicht tot een dichtheid van  $1,498 \text{ t.m}^{-3}$  bij een natuurlijk vochtgehalte van 30,7 gew.% water (monsterdikte 2,2 cm). Het monster is belast met Blokzylzand ( $P = 0,18 \text{ kN.m}^{-2}$ ), waarna de ring op een poreuze plaat, ingebouwd in een perspex houder, is geplaatst. Aansluitend werd de verzadigingsprocedure gestart, waarbij het monster van onder naar boven werd doorstroomd met gedemineraliseerd en ontlucht water. Tijdens de verzadigingsprocedure werd de drukhoogte geleidelijk opgevoerd tot 40 cm. Na 7 dagen bevond zich een laagje water op het monster en werd

de verzadigingsprocedure beëindigd. De zandbelasting bleek niet voldoende om zwelling van het monster te voorkomen.



Figuur 2. Permeameter-opstelling gebruikt voor de bepaling van de doorlatendheid

De verzamelruimte en de afvoerslang naar de erlenmeyer (zie fig. 2) zijn gevuld met water, waardoor aan de onderzijde van het monster een onderdruk wordt verkregen. Het stijghoogte verschil wordt dus bepaald door het waterniveau boven het monster en het niveau in de erlenmeyer. Na instelling van het stijghoogte verschil is het debiet gemeten door de gewichtstoename van de erlenmeyer te bepalen.

In een volgend experiment is de doorlatendheid bepaald volgens de "falling head" methode. In dit geval is de stalen ring vervangen door

een perspex kolom met dezelfde buitendiameter als de ring en een hoogte van 46 cm, waarin het monster werd verdicht tot  $1,593 \text{ t.m}^{-3}$  en belast met  $0,34 \text{ kN.m}^{-2}$  zand. De hogere zandbelasting had tot doel om volumevergroting door zwelling te voorkomen. Na verdichting werd de kolom op het poreuze plaatje geplaatst en gevuld met gedemineraliseerd en ontlucht water (waterkolom 39 cm). De metingen zijn hier direct gestart zonder een voorafgaande verzadigingsprocedure. De gewichtstoename van de erlenmeyer en het waterniveau boven het monster werden dagelijks gemeten.

In verband met de toepassing van deze klei voor basisafdichting van een toekomstige stortplaats is de doorlatendheid bovendien bepaald met perkolatiewater, afkomstig van de stortplaats van de VAM in Wijster. Het monster in de perspex kolom werd verdicht tot een dichtheid van  $1,546 \text{ t.m}^{-3}$ , waarop een zandbelasting van  $0,50 \text{ kN.m}^{-2}$  is aangebracht. Na verdichting is de kolom op het poreuze plaatje geplaatst en gevuld met perkolatiewater (waterkolom 39 cm). Na 23 dagen is het perkolatiewater vervangen door demiwater om na te gaan welk effect dit heeft op de doorlatendheid.

Met de Tegelse klei is alleen een kortdurend doorlatendheidsexperiment met demiwater uitgevoerd. Het vochtgehalte van deze klei was 20,3 gew.% en ligt daarmee dicht in de buurt van het optimale vochtgehalte voor verdichting. Het monster is verdicht tot  $1,645 \text{ t.m}^{-3}$ . Zwelling van het monster is niet nader onderzocht. Ook de granulaire samenstelling en de mineralogische samenstelling van de kleifractie is niet onderzocht.

#### 4. RESULTATEN

##### 4.1. Granulaire en mineralogische samenstelling

De geleverde Reuverse klei kan worden omschreven als een silty clay met een kleigehalte ( $<2\mu$ ) van 38,7% en een siltgehalte ( $2-50\mu$ ) van 61%. De resultaten van de granulaire analyse zijn in tabel 1 samengevat.

Tabel 1. Granulaire analyse van de Reuverse klei

Fractie	$<2 \mu$	$2-16 \mu$	$16-50 \mu$	$>50 \mu$
Gehalte (gew. % van de minerale delen)	38,7	41,4	19,6	0,35

Qua granulaire samenstelling komt deze klei overeen met de "stark tonigen Schluff", die gewonnen wordt in de kleigroeven bij Brügggen en Bracht in de nabijheid van de Duits-Nederlandse grens. GABENER (1983) bepaalde de vloeigrens van deze "Schluff" op 56,5% en de plasticiteitsgrens op 23,3% met een plasticiteitsgetal van 33,2%. Voor de Reuverse klei werd door het Erdbaulaboratorium te Essen het plasticiteitsgetal bepaald op 44,3% (vloeigrens 61%, plasticiteitsgrens 16,7%). Volgens het plasticiteitsdiagram van Casagrande behoort de Reuverse klei daarmee tot de uitgesproken plastische kleien en is daarom krimp- en vorstgevoelig. De plasticiteit van compacte gronden wordt in hoofdzaak bepaald door de hoeveelheid en soort kleimineraal. Aktieve, zwellende kleimineralen, zoals montmorilloniet, hebben een grotere plasticiteit dan de inaktieve, zoals kaoliniet en muscoviet.

Wegens hun vervormbaarheid lenen de plastische gronden zich goed voor afdichtingsdoeleinden, daar zij bij zettingen de vervormingen goed volgen en zelfs in staat zijn reeds ontstane scheuren weer te sluiten.

De kleifractie van het monster Reuverse klei is kleimineralogisch onderzocht bij de Afdeling Bodemkunde en Geologie van de Landbouwhogeschool. De kleifractie had de volgende samenstelling:

- 20-30% kaoliniet (niet zwellend)
- 40-50% illiet (niet zwellend)
- 20-30% smectiet (sterk zwellend)
- $<10\%$  chloriet (niet zwellend)

Met name de aanwezigheid van smectiet, dit is de groep kleimineralen waar ook montmorilloniet toe behoort, zorgt er voor dat de klei bij opname van water zal zwellen. Deze zwelcapaciteit is overigens wel afhankelijk van de chemische bezetting van de kleimineralen (zie HOEKS et al., 1986). Dit kan o.a. tot gevolg hebben dat de chemische samenstelling van een perkolerende vloeistof invloed heeft op de doorlatendheid van de klei.

#### 4.2. Verdichting en zwellling

De resultaten in tabel 2 hebben betrekking op enkele verdichtingsproeven. De bereikte verdichting ligt in de orde van slechts 85-90% van de maximaal bereikbare proctordichtheid, die volgens onderzoek van het Erdbaulaboratorium in Essen en het Laboratorium voor Grondmechanica (LGM) in Delft ongeveer  $1,67 - 1,73 \text{ t.m}^{-3}$  bedraagt bij een optimum vochtgehalte van 17-19%.

Tabel 2. Bereikte dichtheden ( $\text{t.m}^{-3}$ ), poriënvolume (vol. fractie) en poriëngetal na verdichting van Reuverse klei, in relatie met het vochtgehalte (gew.%)

Monster	Dicht- heid $\rho_{\text{nat}}$	( $\text{t.m}^{-3}$ ) $\rho_{\text{droog}}$	Poriën- volume n ( $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ )	Poriën- getal e ( $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ )	Vocht- gehalte (gew.%)
A	1,943	1,463	0,45	0,83	33
B	1,991	1,506	0,44	0,77	32
C	1,962	1,483	0,44	0,80	32
gem.	1,965	1,484	0,44	0,80	32

Het vochtgehalte van het aangeleverde monster was te hoog om deze dichtheid te bereiken. In dit geval verhindert het water in het monster een verdere verkleining van het poriënvolume. Volgens het LGM zou deze klei aan de natte zijde van de proctorcurve bij een vochtgehalte van 20,6% moeten worden verdicht tot een dichtheid van  $1,675 \text{ t.m}^{-3}$  (= 97% van de maximale proctordichtheid) om een minimale doorlatendheid bij geringe zettingen te bereiken.

Bij de bepaling van de doorlatendheid is gebleken dat bij de monsters, die niet vooraf zijn verzadigd, gedurende de eerste 4 à 5 dagen een relatief lage doorlatendheid wordt gemeten. Daarna neemt de doorlatendheid vrij plotseling toe om vervolgens geleidelijk iets af te nemen in de

tijd. In de eerste 4 à 5 dagen vindt verzadiging plaats. De doorlatendheid is in deze fase gering omdat hier sprake is van niet-verzadigde stroming, er is nog lucht in het monster aanwezig. Na verzadiging neemt de doorlatendheid toe, omdat het water nu ook door de aanvankelijk met lucht gevulde potiën kan stromen.

Tijdens de verzadigingsfase bleek swelling op te treden, ondanks de aangebrachte zandbelasting. Deze swelling is berekend door na afloop opnieuw het volume van de kleilaag op te meten. De resultaten zijn vermeld in tabel 3.

Tabel 3. Droge dichtheid ( $\rho_d$ ) en poriënvolume (n) van de monsters gebruikt voor de doorlatendheidsproeven, voor en na verzadiging

Monster	Omschrijving (klei + methode)	Influent	vóór verzadiging		na verzadiging	
			$\rho_d$ (t.m <sup>-3</sup> )	n (vol.%)	$\rho_d$ (t.m <sup>-3</sup> )	n (vol.%)
1	Reuverse klei, CH	water	1,498	43,9	1,348	49,5
2	Reuverse klei, FH	water	1,593	40,3	1,397	47,7
3	Reuverse klei, FH	perkola- tiewater	1,546	42,1	1,361	49,0
4	Tegelse klei, FH	water	1,645	38,4	n.b.	n.b.

CH = constant head; FH = falling head

De swelling van de monsters, gemeten als volumetoename, bedroeg circa 11 - 14% van het aanvangsvolume. Hierdoor neemt het poriënvolume toe en daarmee ook de doorlatendheid. Onder veldomstandigheden bij een bovenbelasting van 5 - 10 kN.m<sup>-2</sup> zal deze swelling waarschijnlijk niet optreden, zodat de oorspronkelijk gerealiseerde dichtheid gehandhaafd blijft.

#### 4.3. Doorlatendheid

In het eerste experiment (monster 1) is de doorlatendheid bepaald met demiwater volgens de "constant head" methode bij twee gradiënten,  $i = 43,6$  en  $i = 35,9$  (zie Bijlage 1). Op grond van deze twee waarnemingen kan de  $i_0$ -waarde worden berekend. In dit geval is  $i_0 = 10,5$ , waaruit geconcludeerd mag worden dat bij lage gradiënten de stroming niet meer voldoet aan Darcy's wet. De k-waarde in vergelijking (3)

bedraagt hier  $3,18 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ , als er van uitgegaan wordt dat de twee gradiënten inderdaad in het lineaire bereik liggen. Gezien de resultaten van GABENER (1983) is dit waarschijnlijk wel juist.

De doorlatendheid van monster 2 is gemeten met demiwater volgens de "falling head" methode. De spreiding in de waarnemingen bleek hier zeer groot (zie Bijlage 2). Bovendien trad een vrij abrupte toename in de doorlatendheid op tijdens het eerste weekend. Verondersteld is dat gedurende de eerste drie dagen het monster verzadigd raakt. In deze fase is de doorlatendheid gering wegens nog in het monster aanwezige lucht. De k-waarde lag in de orde van  $10^{-11}$  à  $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ . Na verzadiging is de k-waarde 10 - 100 keer groter. Vanwege de grote spreiding in de resultaten is de  $i_o$ -waarde berekend voor twee tijdsintervallen, namelijk een eerste interval van 6 - 9 dagen en een tweede interval van 14 - 23 dagen. In dit geval is  $i_o = 7,0$  en de bijbehorende k-waarde in het lineaire gebied bedraagt  $3,75 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ .

Aangezien het punt  $i_G$  (zie fig. 1), waar beneden de stroming een exponentiële relatie vertoont met  $i$ , niet is af te leiden uit de meetgegevens, kan alleen een schatting worden gemaakt van de doorlatendheid bij relatief lage gradiënten onder veldomstandigheden.

Voor de relatie tussen  $i_o$  en  $i_G$  kan worden afgeleid (zie GABENER, 1983) dat:

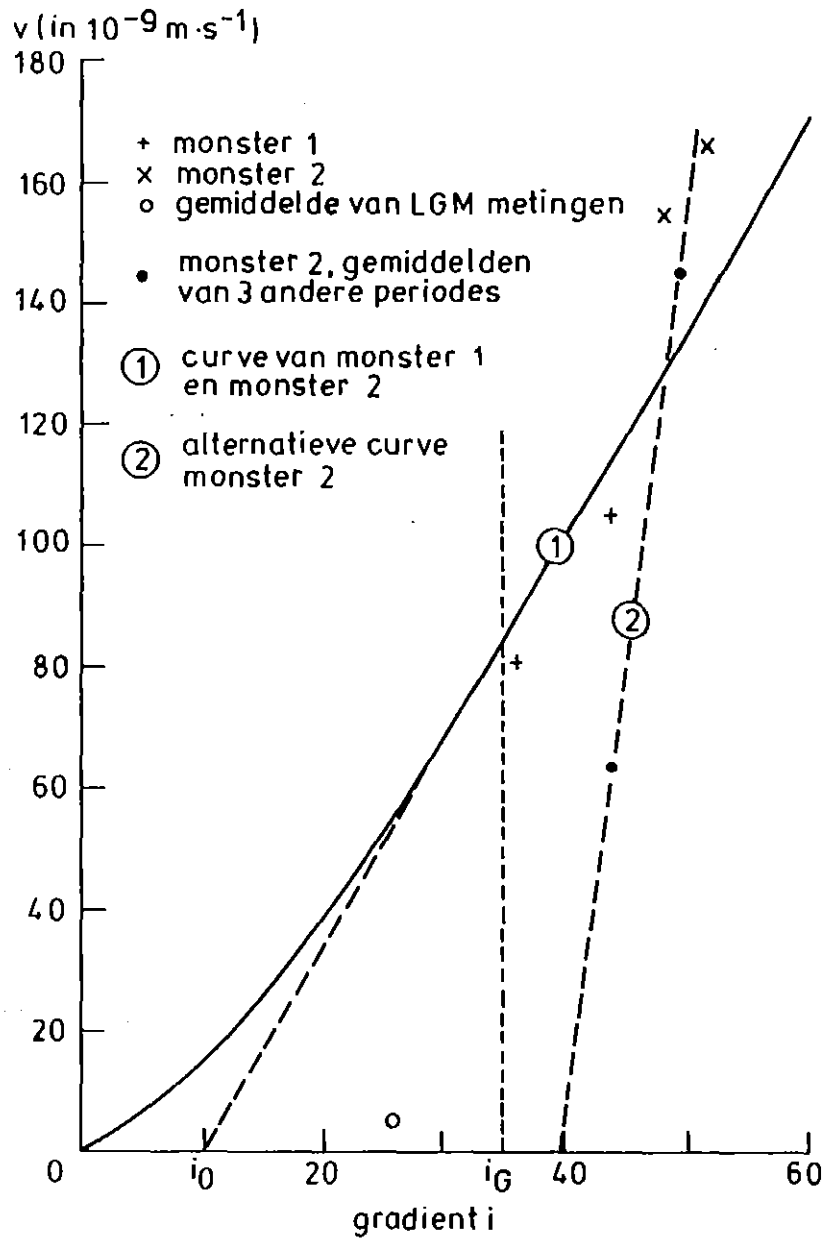
$$i_o = i_G \frac{m-1}{m} \quad \text{of} \quad m = \frac{i_G}{i_G - i_o} \quad (13)$$

waarin  $m$  de constante voorstelt uit de exponentiële relatie (zie vergelijking 1). Voor  $m = 1,4$  (zie HOEKS et al., 1986) en  $i_o = 10$  zou  $i_G = 35$  zijn. Voor de vergelijkbare "Schluff" vindt GABENER een waarde van  $m$  tussen ongeveer 1,05 en 1,25, hetgeen met een  $i_o = 10$  zou leiden tot zeer hoge  $i_G$ -waarden in de orde van 50 à 210.

Hier is aangenomen dat  $m = 1,4$  bij  $i_o = 10$  zodat  $i_G = 35$ . De stroomsnelheid  $v$  als functie van  $i$  is weergegeven in figuur 3 (curve 1) en de twee meetpunten voor monster 1 en een tweetal gemiddelden over de genoemde twee perioden voor monster 2 zijn eveneens aangegeven.

De vergelijkingen die de relatie tussen  $v$  en  $i$  (curve 1) beschrijven luiden:





Figuur 3. Relatie tussen de filtersnelheid  $v$  en de gradiënt  $i$  voor de Reuverse klei, gemeten aan de monsters 1 en 2 met demiwater

$$i < 35 \quad v = 5,9 \times 10^{-10} i^{1,4}$$

$$i > 35 \quad v = 3,4 \times 10^{-9} (i - 10)$$

Als wordt aangenomen dat de gradiënt in het veld bij een dikte van de kleilaag van 50 cm in de orde van 1 tot 2,5 ligt, dan ligt  $v$  tussen de grenzen:

$$5,87 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1} \ll v \leq 2,12 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$$

Dit betekent dat de lekkage door de kleilaag in de orde van 19 - 67 mm. jaar<sup>-1</sup> ligt. Bij een bovenafdichting is deze lekkage zeker de helft kleiner, omdat in de zomerperiode de gradiënt kleiner dan 1 en vaak kleiner dan 0 is als gevolg van uitdroging van de bovengrond.

De doorlatendheid van de monsters, die zijn onderzocht door het LGM ( $i = 26$ ) ligt lager (zie fig. 3). In dit geval was de bereikte dichtheid echter belangrijk hoger ( $1,60 \text{ t.m}^{-3}$ ) dank zij een gunstiger vochtgehalte (24 à 25 gew.%).

Aangezien het hier onderzochte monster met een vochtgehalte van 30,7 gew.% waarschijnlijk natter is geweest dan de klei, zoals deze in het veld wordt gebruikt voor de constructie van de afdichtingslaag, kan worden aangenomen dat in de veldsituatie een hogere dichtheid wordt bereikt. Bovendien wordt daar zwellingsverschijnselen door een hogere bovenbelasting. Dit betekent dat een droge dichtheid van 1,50 à 1,60 gerealiseerd moet kunnen worden. In dat geval ligt de  $v$ - $i$  curve onder de curve zoals gegeven in figuur 3.

Niettemin laat figuur 3 duidelijk zien dat de gradiënten in het veld laag moeten blijven ( $i < 2$ ) om de lekkage tot een minimum te beperken. Boven de kleilaag dient daarom een goed functionerend drainagesysteem aanwezig te zijn.

Overigens laat curve 2 in figuur 3 zien dat bij een andere middeling van de resultaten een veel hogere  $i_0$  wordt gevonden ( $i_0 \approx 40$ ). In dat geval zal de lekkage onder veldomstandigheden nihil zijn, hetgeen meer in overeenstemming is met de hierna te bespreken proef met perkolatiewater.

Voor een basisafdichting is de doorlatendheid van de klei voor perkolatiewater van belang. Daarom is de doorlatendheidsproef voor monster 3 uitgevoerd met perkolatiewater, afkomstig van de stortplaats in Wijsster (zie Bijlage 3).

In tegenstelling tot het experiment met demiwater is hier sprake van een duidelijke lineaire relatie tussen  $v$  en  $i$  (zie fig. 4). De helling van deze lijn ( $= k$ ) heeft een waarde van  $2,43 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ . De  $i_0$ -waarde is dan ook zeer nauwkeurig vast te stellen en bedraagt 39,8. Aangezien voor  $i > 45$  een duidelijk lineaire relatie optreedt kan  $i_G$  dus niet groter dan 45 zijn. Volgens vergelijking (13) zal  $m$  dan circa 9 moeten bedragen. In dat geval wordt de relatie  $v$ - $i$  beschreven als (zie ook fig. 4):

$$i \geq 45 \quad v = 2,43 \times 10^{-8} (i - 39,8)$$

$$i < 45 \quad v = 1,67 \times 10^{-22} i^9$$

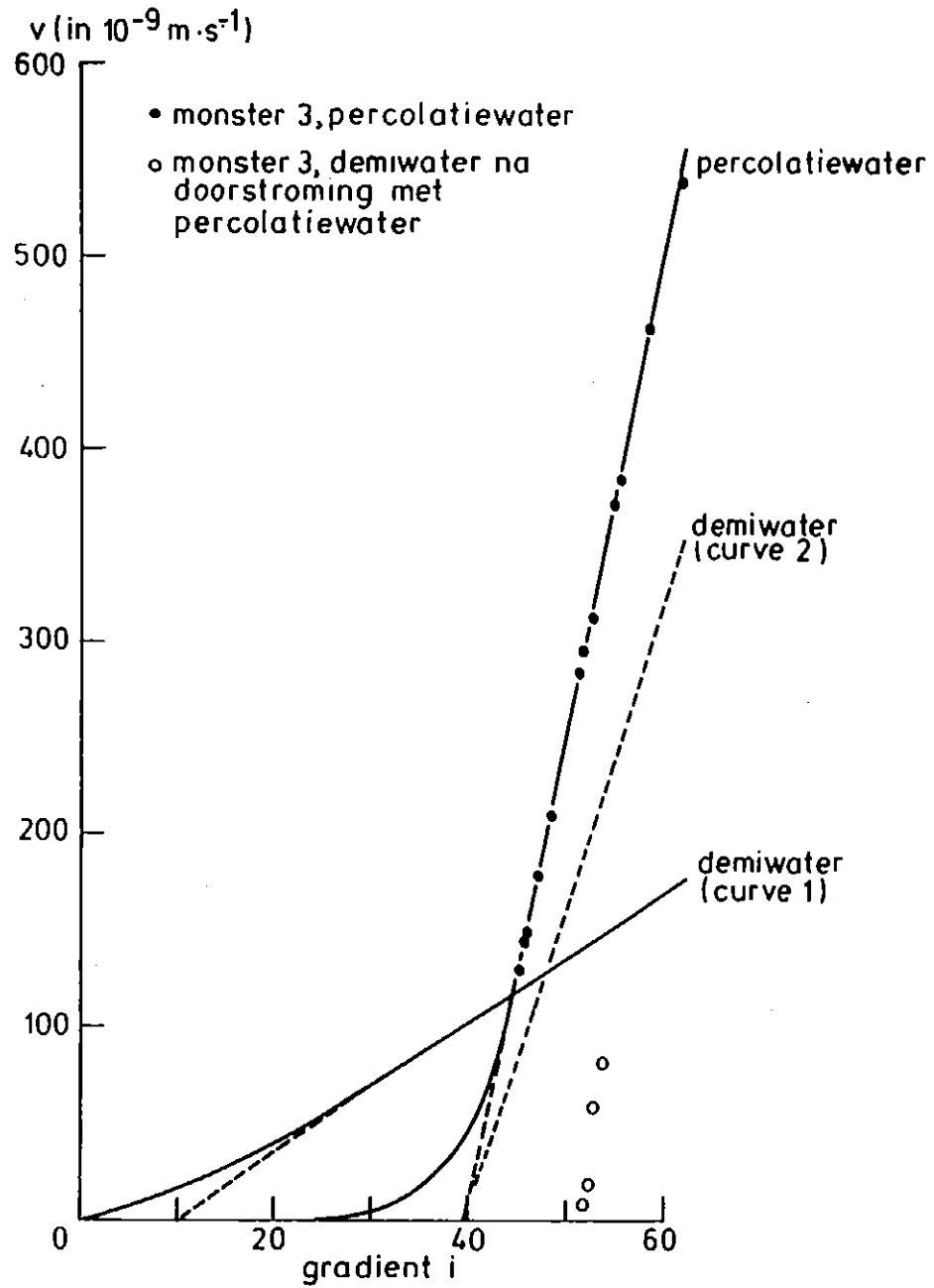
Dankzij de zeer hoge  $i_0$ -waarde blijkt dit monster bij lage gradiënten vrijwel ondoorlatend te zijn. Voor de normaal in het veld voorkomende gradiënten,  $i \approx 1 \text{ à } 2,5$ , ligt  $v$  tussen de grenzen

$$1,67 \times 10^{-22} \text{ m.s}^{-1} < v < 6,37 \times 10^{-19} \text{ m.s}$$

De lekkage voor perkolatiewater blijkt nihil te zijn in dit geval. Bij dit experiment lijkt het er inderdaad op dat er een minimale gradiënt bestaat, waar beneden geen stroming optreedt.

Bij hoge gradiënten is de klei veel doorlatender voor perkolatiewater dan voor demiwater. De  $i_0$ -waarde is bij gebruik van perkolatiewater echter verrassend hoog, waardoor normaal onder veldomstandigheden geen lekkage te verwachten is. De aangeboden klei lijkt daarom geschikt als afdichtingsmateriaal, zowel voor bovenafdichting als voor basisafdichting. De verschillen in doorlatendheid voor perkolatiewater en demiwater kunnen vooralsnog niet verklaard worden. Wel moet opgemerkt worden dat de  $i_0$ -waarde bepaald voor monster 2 zeer onnauwkeurig is. Bij een andere keuze van tijdsintervallen wordt ook een hogere  $i_0$  gevonden (zie curve 2). Het lijkt niet uitgesloten, gezien de ligging van de punten rond de lijn in figuur 3, dat bij een volgend experiment ook voor demiwater een hoge  $i_0$ -waarde wordt gevonden.

Na doorstroming met perkolatiewater gedurende 22 dagen is de proef vervolgd met demiwater. Het duurt ongeveer 4 dagen voor het demiwater het perkolatiewater uit het monster heeft verdrongen. De doorlatendheid loopt hierdoor sterk terug. Dit verschijnsel houdt verband met de dikte



Figuur 4. Relatie tussen filtersnelheid  $v$  en gradiënt  $i$  voor de Reuverse klei, gemeten aan monster 3 met percolatiewater, later gevolgd door demiwater

van de diffuse dubbellaag rond geladen kleideeltjes. In demiwater is deze laag aanmerkelijk dikker dan in perkolatiewater. Gevolg is dat de watermoleculen sterker worden gebonden en moeilijker in beweging komen. De doorlatendheid neemt af en de  $i_0$ -waarde neemt toe.

De metingen met de later geleverde Tegelse klei (monster 4) hebben te kort geduurd om betrouwbare conclusies te trekken (zie Bijlage 1). Hoewel dit monster goed verdicht kon worden, is de doorlatendheid na verzadiging aanmerkelijk hoger dan bij de Reuverse kleimonsters. De  $i_0$ -waarde lijkt ook hier echter hoog ( $i_0 \approx 22$ ), zodat de doorlatendheid onder veldomstandigheden mogelijk gering is.

## 5. CONCLUSIES

Voor de beoordeling of klei geschikt is voor afdichting op of onder vuilstortplaatsen is de doorlaatfactor  $k$  geen goede maatstaf. In dergelijke kleien voldoet de waterstroming niet aan de Wet van Darcy. Dit betekent dat de volgens Darcy berekende  $k$ -waarde afhankelijk is van de aangelegde stijghoogte-gradiënt.

Voor een goede beoordeling dient de relatie tussen de filtersnelheid  $v$  en de gradiënt  $i$  te worden vastgesteld. Vervolgens moet dan  $v$  worden berekend voor de in het veld te verwachten gradiënten. De beoordeling kan dan plaatsvinden door deze  $v$  te toetsen aan een opgestelde norm, bijvoorbeeld  $v \leq 1 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1} = 31,5 \text{ mm.jaar}^{-1}$ .

De doorlatendheidsmetingen met demiwater laten zien dat de te verwachten lekkage door een afdichtingslaag van 50 cm Reuverse klei in de orde van  $50 \text{ mm.jaar}^{-1}$  ligt. Bij verdichting onder gunstiger condities met betrekking tot vochtgehalte en zwellings is een hogere dichtheid en een geringere lekkage haalbaar. De resultaten, verkregen met demiwater, zijn vrij onnauwkeurig, vooral als deze worden vergeleken met de resultaten, verkregen met perkolatiewater.

De lekkage van perkolatiewater door de Reuverse klei is op grond van de hier uitgevoerde metingen nihil. Gezien de effecten van perkolatiewater en demiwater op de dikte van diffuse dubbellaagen rond kleideeltjes, zou verwacht mogen worden dat de doorlatendheid voor demiwater zelfs nog kleiner is dan voor perkolatiewater. Om deze reden wordt ook getwijfeld aan de eerder berekende lekkage van  $50 \text{ mm.jaar}^{-1}$  voor demiwater.

Op grond van de eerder uitgevoerde onderzoeken door het Erdbau-laboratorium in Essen en het Laboratorium voor Grondmechanica in Delft kan er van worden uitgegaan, dat bij inbouw in het veld onder optimale omstandigheden zelfs een hogere dichtheid bereikt kan worden, dan in het hier uitgevoerde laboratorium onderzoek. De klei wordt in de Wambachgroeve gewonnen met een natuurlijk watergehalte van circa 25% (droog volumegewicht  $1,6 \text{ t.m}^{-3}$ ). Onder deze omstandigheden moet onder veldomstandigheden een dichtheid van  $1,50 \text{ t.m}^{-3}$  haalbaar geacht worden. Bovendien wordt in het veld door het aanbrengen van een bovenbelasting zwellen en afname van de dichtheid voorkomen. Bij beproeving van de in het veld ingebouwde laag door LGM is gebleken dat de dichtheid gemiddeld  $1,42 \text{ t.m}^{-3}$  bedroeg met een doorlatendheid van circa  $2 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ , gemeten bij een gradiënt  $i \approx 22$  (dit punt is ook ingetekend in fig. 3). In dit geval is de lekkage bij gradiënten van 1 - 5 zeer gering, naar schatting minder dan  $10 \text{ mm.jaar}^{-1}$ .

De slotconclusie luidt dat de Reuverse klei, zeker wanneer deze onder optimale omstandigheden wordt verdicht, uitstekend geschikt is als afdichtingsmateriaal, zowel voor bovenafdichting op het stort als voor basisafdichting onder het stort.

## 6. LITERATUUR

- BECHTLE, W., 1979. Grundlagen für die Abdichtung von Deponien mit Ton.  
In: Deponiebasisabdichtungen (Hrsg.K.Stief), Erich Schmidt  
Verlag.
- EHRIG, H.J., 1980. Beitrag zum quantitativen und qualitativen Wasser-  
haushalt von Mülldeponien. Inst. für Stadtbauwesen, TU  
Braunschweig, Heft 26, Braunschweig.
- GABENER, H.G., 1983. Untersuchungen über die Anfangsgradienten und  
Filtergesetze bei bindiger Böden. Mitt. Fachgebiet Grundbau  
und Bodentechnik, Univ. Gesamt Hochschule Essen.
- GABENER, H.G., 1984. Über die Abweichungen von Darcyschen Gesetz bei  
der Durchströmung bindiger Böden. Bautechnik 61: 351 - 358.
- GÖDECKE, H.J., 1980. Fliessgesetz für die Porenwasserdurchströmung  
feinkörniger Böden. Die Bautechnik 57 : 184 - 193.
- HOEKS, J., H. GLAS, J. HOFKAMP and A.H. RYHINER, 1986. Applicability  
of bentonite liners for isolation of waste disposal sites.  
(Ingezonden naar Waste Management and Research voor publikatie).
- RYHINER, A.H., J. HOEKS en A.H.M. VAN HEESSEN, 1985. Onderzoek naar de  
praktische uitvoerbaarheid van bovenafdichting op afvalstort-  
terreinen. Deelrapport 3: Experimentele resultaten van het  
hydrologisch onderzoek op de proefvelden.  
Nota ICW 1631, Wageningen.
- SIMONS, H., M. GEIL und W. HÄNSEL, 1982. Tonige Stoffe zur Dichtung  
neuer und Sanierung alter Deponien. Baugrundtagung 1982,  
Braunschweig.

### Verder geraadpleegd:

- ADVIESBUREAU BROUWERS BV, 1985. Reionale stortplaats te Linne,  
Stadsgewest Roermond. Maart 1985.
- ADVIESBUREAU BROUWERS BV, 1985. Beproevingresultaten vloeistofdichte  
constructie bestaande uit een afdichtende kleilaag op basis  
van LGM-rapport CO-274591/8. Augustus 1985.
- ADVIESBUREAU BROUWERS BV, 1986. Beproevingresultaten vloeistofdichte  
constructie bestaande uit een afdichtende kleilaag op basis  
van LGM-rapport CO-284280/19. Juli 1986.
- L G M, 1986. Beproeving klei uit de Wambachgroeve. Rapport CO-284850/4,  
Lab. voor Grondmechanica, Delft, juni 1986.

- REUTER, E., 1985. Entwurf, Prüfung und Eigenschaften mineralischer Basisabdichtungen. In: Heft 20, Techn. Univ. Braunschweig, Inst. Grundbau und Bodentechnik, Braunschweig.
- SIMONS, H. und E. REUTER, 1985. Entwicklung von Prüfverfahren und Regeln zur Herstellung von Deponieabdichtungen aus Ton zum Schutz des Grundwassers. Heft 18, Inst. Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig.



## RESULTATEN VAN DOORLATENDHEIDSMETINGEN (monsters 1 en 4)

## Doorlatendheidsmetingen monster 1 (Reuverse klei)

Influent : demiwater (na voorafgaande verzadigingsprocedure)

Methode : constant head, zandbelasting  $0,18 \text{ kN.m}^{-2}$ Dichtheid ( $\rho_d$ ): voor zwelling  $1,498 \text{ t.m}^{-3}$ , na zwelling  $1,348 \text{ t.m}^{-3}$ 

Vochtgehalte : bij aanvang 30,7%, na afloop 36,7%

Filtersnelheid $v(\text{m.s}^{-1})$	Gradiënt $i$	Gradiënt $i_o$	Doorlatendheid* $k(\text{m.s}^{-1})$
$1,053 \times 10^{-7}$	43,6		
		10,5	$3,18 \times 10^{-9}$
$8,080 \times 10^{-8}$	35,9		

$$* \text{berekend als } k = \frac{v}{i - i_o}$$

## Doorlatendheidsmeting monster 4 (Tegelse klei)

Influent : demiwater

Methode : falling head, zandbelasting  $0,78 \text{ kN.m}^{-2}$ Dichtheid ( $\rho_d$ ): voor zwelling  $1,645 \text{ t.m}^{-3}$ , na zwelling niet bepaald

Vochtgehalte : bij aanvang 20,3%, na afloop niet bepaald

Tijdstip (dagen)	Filtersnelheid $v(\text{m.s}^{-1})$	Gradiënt $i_x$	Gradiënt $i_o$	Doorlatendheid* $k(\text{m.s}^{-1})$
0				
	$8,623 \times 10^{-9}$	54,1	-	niet verzadigd
3				
	$1,276 \times 10^{-6}$	46,8		
6				
	$9,804 \times 10^{-7}$	41,1	22,2	$5,19 \times 10^{-8}$
7				

$$* \text{berekend als } k = v/(i - i_o)$$

## RESULTATEN VAN DOORLATENDHEIDSMETINGEN (monster 2)

Doorlatendheidsmetingen monster 2 (Reuverse klei)

Influent : demiwater

Methode : falling head, zandbelasting  $0,34 \text{ kN.m}^{-2}$ Dichtheid ( $\rho_d$ ): voor zwelling  $1,593 \text{ t.m}^{-3}$ , na zwelling  $1,397 \text{ t.m}^{-3}$ 

Vochtgehalte : bij aanvang 30,7%, na afloop 34,1%

Tijdstip (dagen)	Filtersnelheid $v \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	Gradiënt $i_x$	Gradiënt* $i_o$	Doorlatendheid** $k \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$
0				
	$9,964 \times 10^{-9}$	67,6	-	niet verzadigd
1				
	$1,249 \times 10^{-9}$	67,6	-	niet verzadigd
3				
	$1,911 \times 10^{-7}$	53,1	7,0	$4,15 \times 10^{-9}$
6				
	$3,380 \times 10^{-7}$	51,1	7,0	$7,66 \times 10^{-9}$
7				
	$6,894 \times 10^{-8}$	50,4	7,0	$1,59 \times 10^{-9}$
8				
	$1,067 \times 10^{-7}$	50,1	7,0	$2,45 \times 10^{-9}$
9				
	$8,407 \times 10^{-8}$	49,8	7,0	$1,96 \times 10^{-9}$
10				
	$6,210 \times 10^{-8}$	49,3	7,0	$1,47 \times 10^{-9}$
13				
	$4,065 \times 10^{-8}$	48,9	7,0	$9,70 \times 10^{-10}$
14				
	$3,496 \times 10^{-8}$	48,8	7,0	$8,36 \times 10^{-10}$
15				
	$3,550 \times 10^{-8}$	48,7	7,0	$8,51 \times 10^{-10}$
16				
	$1,555 \times 10^{-7}$	48,4	7,0	$3,76 \times 10^{-10}$
17				
	$2,807 \times 10^{-7}$	46,7	7,0	$7,07 \times 10^{-9}$
20				

Tijdstip (dagen)	Filtersnelheid $v$ ( $\text{m.s}^{-1}$ )	Gradiënt $i_x$	Gradiënt* $i_o$	Doorlatendheid** $k$ ( $\text{m.s}^{-1}$ )
20	$1,082 \times 10^{-7}$	45,1	7,0	$2,84 \times 10^{-9}$
21	$1,251 \times 10^{-7}$	44,7	7,0	$3,32 \times 10^{-9}$
22	$7,312 \times 10^{-8}$	44,4	7,0	$1,96 \times 10^{-9}$
23	$9,346 \times 10^{-8}$	44,1	7,0	$2,52 \times 10^{-9}$
24	$6,812 \times 10^{-8}$	43,6	7,0	$1,86 \times 10^{-9}$
27	$5,107 \times 10^{-8}$	42,9	7,0	$1,42 \times 10^{-9}$
31	$4,276 \times 10^{-8}$	42,2	7,0	$1,22 \times 10^{-9}$
34				
-----				
*berekening $i_o$				
6	$1,66 \times 10^{-7}$	51,2		
9			7,0	$3,75 \times 10^{-9}$
14	$1,54 \times 10^{-7}$	48,0		
23				
-----				
middeling voor curve 2				
6	$1,45 \times 10^{-7}$	49,1		
21	$6,37 \times 10^{-8}$	43,7	39,5	$1,51 \times 10^{-8}$
34				

\*\*berekend als  $k = v/(i - i_o)$

## RESULTATEN VAN DOORLATENDHEIDSMETINGEN (monster 3)

Doorlatendheidsmeting monster 3 (Reuverse klei)

Influent : perkolatiewater, gevolgd door demiwater

Methode : falling head, zandbelasting  $0,50 \text{ kN.m}^{-2}$ Dichtheid ( $\rho_d$ ): voor zwelling  $1,546 \text{ t.m}^{-3}$ , na zwelling  $1,361 \text{ t.m}^{-3}$ 

Vochtgehalte: bij aanvang 30,7%, na afloop 36,0%

Tijdstip (dagen)	Filtersnelheid $v \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	Gradiënt $i_x$	Gradiënt $i_o$	Doorlatendheid* $k \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$
0	$1,152 \times 10^{-8}$	61,6	-	niet verzadigd
1	$1,237 \times 10^{-8}$	61,6	-	niet verzadigd
2	$6,266 \times 10^{-9}$	61,6	-	niet verzadigd
3	$4,623 \times 10^{-7}$	58,9	39,8	$2,42 \times 10^{-8}$
6	$5,385 \times 10^{-7}$	62,0	39,8	$2,43 \times 10^{-8}$
7	$4,570 \times 10^{-7}$	58,7	39,8	$2,42 \times 10^{-8}$
8	$3,831 \times 10^{-7}$	55,6	39,8	$2,42 \times 10^{-8}$
9	$3,701 \times 10^{-7}$	55,1	39,8	$2,42 \times 10^{-8}$
10	$3,114 \times 10^{-7}$	52,6	39,8	$2,43 \times 10^{-8}$
13	$2,954 \times 10^{-7}$	52,0	39,8	$2,42 \times 10^{-8}$
14	$2,847 \times 10^{-7}$	51,5	39,8	$2,43 \times 10^{-8}$
15	$2,092 \times 10^{-7}$	48,4	39,8	$2,43 \times 10^{-8}$
16	$1,782 \times 10^{-7}$	47,1	39,8	$2,44 \times 10^{-8}$
17				

Tijdstip (dagen)	Filtersnelheid $v$ (m.s <sup>-1</sup> )	Gradiënt $i$	Gradiënt $i_0$	Doorlatendheid* $k$ (m.s <sup>-1</sup> )
17	$1,477 \times 10^{-7}$	45,9	39,8	$2,42 \times 10^{-8}$
20	$1,442 \times 10^{-7}$	45,7	39,8	$2,44 \times 10^{-8}$
21	$1,298 \times 10^{-7}$	45,1	39,8	$2,45 \times 10^{-8}$
22				
-----				
perkolatie vervolgd met demiwater				
23	$8,230 \times 10^{-8}$	53,7		perkolatiewater nog niet verdrongen
24	$5,890 \times 10^{-8}$	52,9		
27	$1,738 \times 10^{-8}$	52,4		
31	$8,307 \times 10^{-9}$	52,0	51,6	$2,3 \times 10^{-8}$
34				

\*berekend als  $k = v/(i - i_0)$