

32 / uwb (115) 2<sup>e</sup> ex.

**BIBLIOTHEEK  
STARINGGEBOUW**

**Duurzame werking van zand-bentoniet afdichtingen in eindafdekkingen  
van stortplaatsen**

**D. Boels  
R. Wiebing**

**Rapport 115**

**STARING CENTRUM, Wageningen, 1990**



15n 538000\*

REFERAAT

Boels, D. en R. Wiebing, 1990. *Duurzame werking van zand-bentoniet afdichtingen in eindafdekkingen van stortplaatsen*. Wageningen, Staring Centrum. Rapport 115, 27 blz; 2 fig.; 2 tab.

Op een proefveld voor bovenafdichtingen dat in 1982 was aangelegd op een stortplaats van de VAM te Wijster, is de kwaliteit van de zand-bentoniet-afdichtingslaag beoordeeld. Eventuele structuurvorming in deze laag kan duiden op sterk wisselende vochtomstandigheden, en dierlijke en plantaardige activiteit in de afdichtingslaag. De dikte van de afdichtende laag en de materiaaldichtheid zijn op drie locaties op een helling bepaald. Het gehalte aan Wyoming-bentoniet is bepaald volgens de sedimentatie-methode. De doorlatendheid is gemeten aan ongeroerde monsters met een diameter van 0,30 m en een hoogte van 0,09 m volgens de methode van de van afnemende drukhoogteverschillen, op uiteenlopende momenten in ongeveer drie maanden. Daarnaast is het percolatieverlies vanuit een aan de bovenzijde gesloten infiltrometerring gemeten op drie locaties op een helling.

De zand-bentoniet afdichtingslagen hebben meer dan zeven jaar na aanleg een betere afdichtende werking dan waarop ze zijn ontworpen en bovendien voldoen ze aan de huidige norm voor maximale percolatie verliezen bij de huidige ontwerp-randvoorwaarden.

Trefwoorden: bovenafdichting, infiltrometer, Wyoming-bentoniet.

ISSN 0924-3070

©1990

STARING CENTRUM Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied  
Postbus 125, 6700 AC Wageningen  
Tel.: 08370-74200; telefax: 08370-24812; telex: 75230 VISI-NL

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

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

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

Project 7195

[DBRAP/115]

## INHOUD

	blz.
WOORD VOORAF	7
SAMENVATTING EN CONCLUSIES	9
1 INLEIDING	11
2 PROEFOPZET	13
3 MEETMETHODEN	15
3.1 Profielbeschrijving	15
3.2 Doorlaatfactor op het laboratorium	15
3.3 Infiltratiemetingen in het veld	18
4 RESULTATEN	21
4.1 Profielbeschrijving	21
4.2 Laboratorium-doorlatendheidstest	22
4.3 Infiltratiemetingen in het veld	24
LITERATUUR	27
FIGUREN	
1 Laboratoriumopstelling doorlatendheidsmeting	17
2 Schematische weergave infiltrometer	18
TABELLEN	
1 Gemiddelde doorlatendheid in relatie tot de gemiddelde gradiënt per gradiëntklasse	23
2 Waterverlies uit meetbuizen en berekende percolatieverliezen door de afdichtingslaag	25

## WOORD VOORAF

Het onderzoek naar de duurzame werking van afdichtingslagen van zandbentoniet in eindafdekkingen van stortplaatsen is uitgevoerd in opdracht van Cebo- Holland BV te Heemstede. Het onderzoek vond plaats op een proefveld van de VAM te Wijster. De afdichtende lagen op dit proefveld zijn gemaakt met mengsels van zand en door Cebo geleverde bentoniet. Wij zijn de VAM dank verschuldigd voor de bereidheid het onderzoek op hun terrein toe te staan en voorts voor de loyale medewerking die wij van enkele medewerkers hebben gekregen.

## SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Uit laboratorium- en proefveldonderzoek is gebleken, dat met zand en bentoniet mengsels lagen in de eindafdekking van stortplaatsen te maken zijn, die vrijwel dicht zijn voor vloeistoffen. Niet zeker was of deze lagen ook op langere termijn hun geringe doorlatendheid zouden behouden. Om dit vast te stellen is op verzoek van Cebo-Holland BV te Heemstede een onderzoek ingesteld naar de kwaliteit van zand-bentoniet lagen, geruime tijd na de aanleg.

Op een proefterrein van de VAM te Wijster zijn afdichtingslagen van zand-bentoniet mengsels, die in 1982 zijn aangelegd, onderzocht op het voorkomen van structuurvorming, plantewortels en activiteit van bodemdieren. De doorlatendheid, dichtheid en bentonietgehalte zijn bepaald aan monsters uit de afdichtende laag. Ook is de infiltratie uit ringinfiltrometers in de afdichtende laag in het veld gemeten.

Gebleken is, dat de dikte van de afdichtende laag op de locatie boven aan de helling geringer is dan de 0,20 m die volgens het ontwerp moest worden aangetroffen. Op de overige locaties was de dikte enkele centimeters meer dan de ontwerpdikte. De dichtheid op de locaties boven en midden op de helling is ca.  $1750 \text{ kg.m}^{-3}$  en onderaan de helling ca.  $1650 \text{ kg.m}^{-3}$ . Omdat er geen dichtheidsmetingen direct na aanleg van het proefveld zijn verricht, kan niet worden nagegaan of de geringere dichtheid onderaan de helling mogelijk het gevolg is van zettingen in het stort.

Onder de afdichtende laag was stortgas duidelijk waarneembaar. De afdichtende laag toonde geen sporen van structuurvorming. Deze laag is zeer waarschijnlijk nauwelijks onderhevig aan wisselend uitdrogen en bevochtigen en heeft een vrijwel constant vochtgehalte (verzadigd). Evenmin werden sporen van dierlijke of plantaardige activiteit in de afdichtingslaag aangetroffen. Populaties regenwormen vlak boven de afdichtingslaag duiden er op, dat de laag gasdicht is. Het bentonietgehalte is volgens de sedimentatieproef bepaald op gemiddeld 7,9%. Dit gehalte is in overeenstemming met het nagestreefd percentage ten tijde van de aanleg van de proef. De spreiding in de gehalten is relatief gering.

De doorlatendheid van de afdichtende laag, zoals die aan de monsters is bepaald in de gradiëntklasse 4 t/m 6, bedraagt ca.  $2 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ . De ontwerp-percolatieverliezen die daarmee gepaard gaan (ca. 17 mm in 200 dagen) liggen ver onder de aanvankelijke beoogde 50 mm in 200 dagen. Het is kennelijk mogelijk om de doorlatendheden, die op het laboratorium aan mengsels zijn gemeten, ook in het veld te realiseren. Voorts is de doorlatendheid nog steeds erg gering, ook na een reeks van jaren.

In het veld zijn de percolatieverliezen door de afdichtende laag gemeten vanuit een aan de bovenzijde gesloten infiltratiering. De verliezen hieruit bij een drukhoogte van ca. 0,50 m waterkolom aan de

bovenzijde van de afdichtende laag, zijn geringer dan 20 mm per 200 dagen. Hierbij is alleen het oppervlak van de infiltrometerring aangehouden en is geen rekening gehouden met de zogenaamde laterale divergentie van de stroombanen. Uitgaande van de gemeten doorlatendheid aan monsters, is deze divergentie ca. 25 tot 35%. Wordt hiermee wel rekening gehouden, dan zijn de percolatieverliezen bij een permanente drukhoogte van 0,50 m boven de afdichtingslaag, 5 tot 10 mm per 200 dagen.

Samenvattend hebben de zand-bentoniet afdichtingslagen meer dan zeven jaar na aanleg een betere afdichtende werking dan waarop ze zijn ontworpen en voldoen ze bovendien ruimschoots aan de huidige norm voor maximale ontwerp-percolatie-verliezen.

## 1 INLEIDING

Ten behoeve van de uitvoering van het bodembeschermingsbeleid is in 1985 de Richtlijn Gecontroleerd Storten van kracht geworden. Op het moment is het voorgeschreven dat na beëindiging van de stortactiviteiten er een eindafdekking moet worden aangebracht met daarin een vloeistofdichte laag. Aanvankelijk werd verondersteld, dat folies de gewenste afdichting konden leveren. Gebleken is echter, dat de folies op de lange termijn gebreken gaan vertonen, mogelijk als gevolg van ongelijkmatige zetting, en dat daarom minerale afdichtingen wellicht een grotere zekerheid bieden. Minerale afdichtingen zijn echter niet absoluut vloeistofdicht. Er zal altijd een (zeer geringe) lekkage optreden. Praktijkproeven met afdichtingen van zand-bentoniet mengsels zijn in opdracht van het ministerie van VROM en in samenwerking met de VAM te Wijster uitgevoerd in 1982. Metingen van afvoeren op de proefobjecten zijn verricht van 1983 tot het voorjaar van 1987 (Hoeks et al., 1987). Hieruit kon worden geconcludeerd, dat de percolatie verliezen zeer gering waren en lagen binnen de toenmalige doelstelling: minder dan 50 mm in 200 dagen. Ten behoeve van het ontwerp, dimensionering en materiaalkeuze van de eindafdekking en bovenafdekking heeft het Staring Centrum samen met Heidemij Adviesbureau BV richtlijnen opgesteld in opdracht van VROM (Hoeks et al., 1990). Hierin is een ontwerpgrafiek opgenomen voor de dimensionering van de afdichtende laag. Daarbij wordt een geaccepteerde percolatieverlies gehanteerd, dat de vergunningverlener vaststelt op grond van de stand van wetenschap en technologie. Zo heeft de Commissie voor Milieu-effectrapportage (1990) vastgesteld dat " ... voor het ontwerpen van bovenafdekkingen van natuurlijke materialen, ... een maximale percolatie van neerslagoverschot van 20 mm in 200 dagen bij een waterspanning van 0,05 bar boven de laag en - 0,05 bar eronder" gehanteerd dient te worden. De huidige doelstelling is op grond van ervaringen en inzichten daarom al aangescherpt. Tot dusver bestaat er geen inzicht in de duurzame werking van afdichtingen die zijn samengesteld uit mengsels van zand en bentoniet.

Bentoniet is een kleisoort, genoemd naar het fort Benton (Wyoming, USA), waar het in de omgeving voorkomt. Deze klei heeft een enorm zwelvermogen. Deze eigenschap hangt samen met de aard van het kleimineraal in het bentoniet (montmorilloniet) en de bezetting van het adsorbtiecomplex met natrium. Als gevolg van dit eenwaardig ion, kan de elektrische dubbellaag ver uitdijen, waardoor met name het Amerikaanse bentoniet tot 12 gram water per gram bentoniet kan opnemen. Daardoor worden de poriën (in het zand-bentonietmengsel) als het ware gevuld met gebonden water. Wel moet daarvoor het percentage bentoniet toereikend zijn.

Aangenomen wordt dat, bij een relatief geringe hydraulische gradiënt, geen stroming van betekenis plaatsvindt door de dubbellaag. De zand-bentonietmengsels ontleen de geringe doorlatendheid dan ook aan de hoge dichtheid en aan het zwelvermogen van het bijgemengde bentoniet.

De zeer geringe doorlatendheid kan worden aangetast doordat :

- de dichtheid kan afnemen als gevolg van activiteiten van bodemdieren en ongelijkmatige zetting;
- het zwelvermogen kan afnemen door vervanging van Na-ionen aan het kleicomplex door ionen met een hogere waardigheid (bijvoorbeeld calcium, magnesium, ijzer enz.);
- verlaging van de zuurgraad nadelige effecten kan opleveren (toename doorlatendheid als gevolg van chemische veranderingen van kleimineralen);
- bentoniet zou kunnen uitspoelen als de hydraulische gradiënten erg groot zijn, hoewel dit niet erg waarschijnlijk is.

Gedurende de proefperiode van drie en half jaar zijn in Wijster geen veranderingen in de doorlatendheid van zand-bentonietmengsels geconstateerd (Hoeks et al., 1987). Zekerheid voor de toekomst is daarover niet. Op verzoek van Cebo-Holland BV, de leverancier van het bentoniet, dat is toegepast in de experimenten in Wijster, is een onderzoek ingesteld naar huidige doorlatendheid en veranderingen die mogelijk sinds de aanleg in de afdichtende laag zelf zijn opgetreden.



## 2 PROEFOPZET

Van de proefvelden op het terrein van de VAM te Wijster is het veld gekozen, waar de afdichtende laag een dikte heeft van 0,20 m en een bentonietgehalte van 7,5%. Volgens de huidige richtlijnen voor ontwerp en constructie van eindafdekkingen is een minimumdikte van 0,25 m vereist voor afdichtende lagen van zand-bentoniet, terwijl de doorlaatfactor op dit moment bij een ontwerpgradient van 5, kleiner dient te zijn dan  $2,3 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ . Hierbij wordt uitgegaan van een percolatiesnelheid van maximaal  $0,1 \text{ mm.d}^{-1}$ . Ten tijde van de aanleg van het proefveld (1982) werd nog uitgegaan van een percolatiesnelheid van maximaal  $0,25 \text{ mm.d}^{-1}$ . De toen aangehouden diktes, dichtheden en mengverhouding zijn hierop gebaseerd. De U.S. Environmental Protection Agency (EPA) schrijft voor, dat de verzadigde doorlatendheid van minerale afdichtingen geringer moet zijn dan  $1 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$  (Albrecht and Cartwright, 1989).

Op drie plaatsen op een helling is de afdichtingslaag onderzocht op de doorlaatfactor, eventuele inspoelingen, plantewortels en bodemdieren of sporen hiervan. Ook is gekeken of er structuurvorming is, die een indicator is voor een sterk wisselend vochtgehalte in de afdichtingslaag en voor verandering in de samenstelling van het adsorptiecomplex van het bentoniet.

Voor dit onderzoek is één plek gesitueerd bovenaan de helling, waar zeer waarschijnlijk hooguit gedurende zeer korte perioden een grondwaterstand wordt aangetroffen, één in het midden van de helling, waar mogelijk gedurende iets langere perioden grondwater wordt aangetroffen en één onderaan de helling, waar het grondwater gedurende nog langere tijd kan voorkomen en waar percolaat vanuit het stort naar buiten kan diffunderen.

Uit de afdichtingslaag zijn drie monsters geprepareerd die in houders (diameter 0,30 m, hoogte 0,10 m) zijn gefixeerd en waaraan op het laboratorium de doorlaatfactor in relatie tot de hydraulische gradiënt is gemeten. Na afloop van deze bepaling is de dichtheid en het bentonietgehalte bepaald.

Naast de plekken waar monsters zijn genomen, zijn infiltrometerringen (diameter 0,30 m) geplaatst. Vanuit voorraadvaten kon water in de afdichtingslaag infiltreren. Daarbij zijn condities aangehouden die bij het ontwerpen van de dikte van de afdichtingslaag zijn gehanteerd: een drukhoogte van minstens 0,50 m boven de afdichtingslaag. De condities onder de laag zijn niet bekend.

### 3 MEETMETHODEN

#### 3.1 Profielbeschrijving

De toestand van de afdichtende laag wordt beoordeeld aan de hand van criteria die samenhangen met de eisen die aan die laag worden gesteld. Deze zijn:

- een zeer geringe doorlatendheid;
- een grote dichtheid;
- plastisch gedrag.

Bij een te grote doorlatendheid van de afdichtende laag zijn er kleurveranderingen waar te nemen in de zand-bentoniet laag als gevolg van inspoeling van opgeloste organische stoffen uit de afdekgrond. Bovendien zal als gevolg van een intensieve uitwisseling tussen opgeloste stoffen in het percolaat uit de afdekgrond en het bodemvocht en adsorptiecomplex in de afdichtende laag, de pH in de afdichtende laag na verloop van tijd overeenkomen met die in de afdekgrond.

Bij een ontoereikende dichtheid, kunnen plantewortels en bodemdieren (wormen, kevers, rupsen, mollen, muizen) in de afdichtende laag dringen. Zodra echter het volumegewicht in de afdichtende laag groter is dan  $1600 \text{ kg/m}^3$  zal dit worden voorkomen. De dichtheid wordt gemeten aan monsters (100 ml, drie herhalingen) die uit de grote ongestoorde monster worden genomen.

De afdichtende laag heeft een zekere plasticiteit nodig om ook bij ongelijkmatige vervorming niet te gaan scheuren. Daarvoor is nodig dat de laag voldoende vocht bevat. Is dat niet het geval en is deze laag afwisselend nat en droog, dan treedt er structuurvorming op, die met het blote oog is waar te nemen. Bij ongelijkmatige vervorming kunnen toch nog haarscheurtjes ontstaan, waardoor de doorlatendheid kan toenemen. Bij een toereikend bentonietgehalte, kan deze nog extra zwellen en de haarscheurtjes afdichten. Het bentonietgehalte in de afdichtende laag is volgens de sedimentatieproef bepaald.

#### 3.2 Doorlaatfactor op het laboratorium

Op het laboratorium is van de monsters, die in het veld zijn geprepareerd, aan de onderzijde en bovenzijde een laag van ca. 1 cm grond verwijderd. De vrijkomende ruimte is weer opgevuld met grof filterzand. Deze lagen dienen drukverliezen te voorkomen bij het aan- en afvoeren van water tijdens de meting. Aan de aanvoerszijde (de onderzijde) wordt daardoor ook een uniforme waterverdeling verkregen. De aanvoer is aan de onderzijde gekozen om een goede bevochtiging en een zo goed mogelijke uitdrijving van aanwezige lucht te bevorderen. Vanuit een voorraadvat met een constante drukhoogte zijn de monsters verzadigd tot de afvoer goed opgang was gekomen. Daarna is de doorlaatfactor volgens de methode van de afnemende drukhoogtegradiënt

bepaald, waarna weer is overgeschakeld op aanvoer vanuit het voorraadvat. Met tussenpozen van ongeveer een week is de doorlaatfactor gemeten. De metingen zijn gedurende twee en een halve maand verricht.

Grondmonsters raken in het algemeen nooit helemaal met water verzadigd. Er blijft 1-3 volume procent lucht achter. Veranderingen in de atmosferische druk veroorzaken drukaanpassingen in het monster die gepaard gaan met volumeaanpassing. Een drukvariatie van +2 tot -2% veroorzaakt een variatie van het volume ingesloten lucht van - 1,96 tot + 2,04%. Het gevolg is dat de hoeveelheid water die het monster binnenstroomt, groter is dan de uitgestroomde hoeveelheid als de atmosferische druk toeneemt en omgekeerd als de atmosferische druk afneemt. Bij zeer geringe doorlaatfactoren komt de uitstroming soms zelfs tot stilstand. De omvang van devolume aanpassing bij een monster met een diameter van 0,30 m en een hoogte van 0,10 m varieert tussen - 3,6 cm<sup>3</sup> en + 3,7 cm<sup>3</sup>. Bij een doorlaatfactor van  $5,0 \times 10^{-10}$  m. s<sup>-1</sup> en een gradiënt van 5 bedraagt de volumeaanpassing ca. 25% van de hoeveelheid die per dag onder die condities door het monster percoleert.

Een variatie in de temperatuur van 2% heeft vrijwel een zelfde effect als een overeenkomstige drukschommeling. Bovendien kunnen beide effecten elkaar versterken, zodat de resultaten aanzienlijk kunnen variëren (een variatie van 50% in de gemeten doorlaatfactor is dan geen uitzondering).

Gedurende de proef is de atmosferische druk continu geregistreerd; de metingen zijn verricht in perioden waarin de atmosferische druk vrijwel niet veranderde. De temperatuur op het laboratorium is vrij constant. Tijdens de metingen is zowel de instromende als de uitstromende hoeveelheid water gemeten. Alleen als beide hoeveelheden vrijwel gelijk waren, zijn de metingen gebruikt voor de berekening van de doorlaatfactor.

De methode van de afnemende drukhoogtegradiënt houdt dat de meetvloeistof (water) tijdens de meting uit de stijgbuis komt waarin de drukhoogte aan de aanvoerzijde wordt gemeten. De stijghoogte daalt en omdat de hoogte van de uitstroomopening van het monster gelijk blijft, neemt de het drukverschil geleidelijk af. Op deze wijze wordt een reeks van drukhoogteverschillen en dus ook -gradiënten doorlopen. Bij elke gradiënt wordt de de doorlaatfactor berekend volgens:

$$K = (D_1 / D_s)^2 \cdot (L_m / \Delta t) \cdot \ln((H_t - H_0) / (H_{t+\Delta t} - H_0))$$

en de bijbehorende gradiënt:

$$i = ((H_t - H_{t+\Delta t}) / L_m) \cdot (1 / \ln((H_t - H_0) / (H_{t+\Delta t} - H_0)))$$

waarin:

- $K$  = doorlatendheid (m/d)
- $D_1$  = binnendoorsnede van de stijgbuis (m)
- $D_s$  = effectieve monsterdiameter (m)
- $H_t$  = waterhoogte in de stijgbuis op tijdstip  $t$  (m)
- $H_0$  = hoogte van de uitstroomopening (m)
- $L_m$  = effectieve monsterdikte (m)

De opstelling is weergegeven in fig. 1

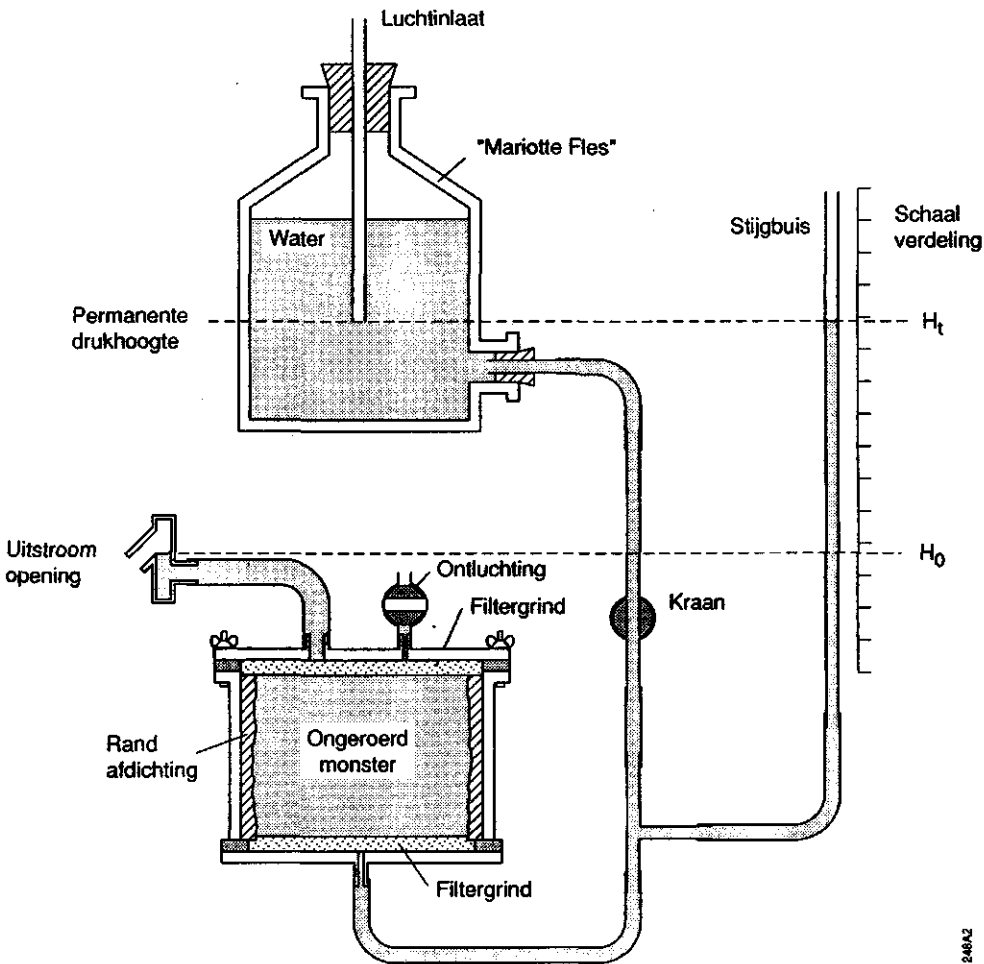


Fig. 1 Laboratoriumopstelling doorlatendheidsmeting

### 3.3 Infiltratiemetingen in het veld

De infiltratiemeting in het veld is verricht met een ringinfiltrometer (fig. 2). Dit instrument bestaat uit een ring, die aan de bovenzijde waterdicht kan worden afgesloten. De ring zonder bovenplaat wordt in het veld rond een uitgeprepareerde grondkolom geplaatst. De ruimte tussen kolom en ring, en omliggende grond en ring is opgevuld met een snelhardende waterdichte cement (CEBAR poeder). De hoogte van de uitgeprepareerde kolom is ca. 8 cm. De ring wordt vervolgens afgesloten met een plaat, waarin een water- en luchtdoorvoer is aangebracht. De luchtafvoer dient om lucht te laten ontsnappen uit de ruimte boven de grondkolom tijdens het vullen met water. Daarna wordt de ontluchting gesloten. Water wordt aangevoerd vanuit een voorraadvat, waarin een constante drukhoogte wordt gehandhaafd (Mariotte systeem).

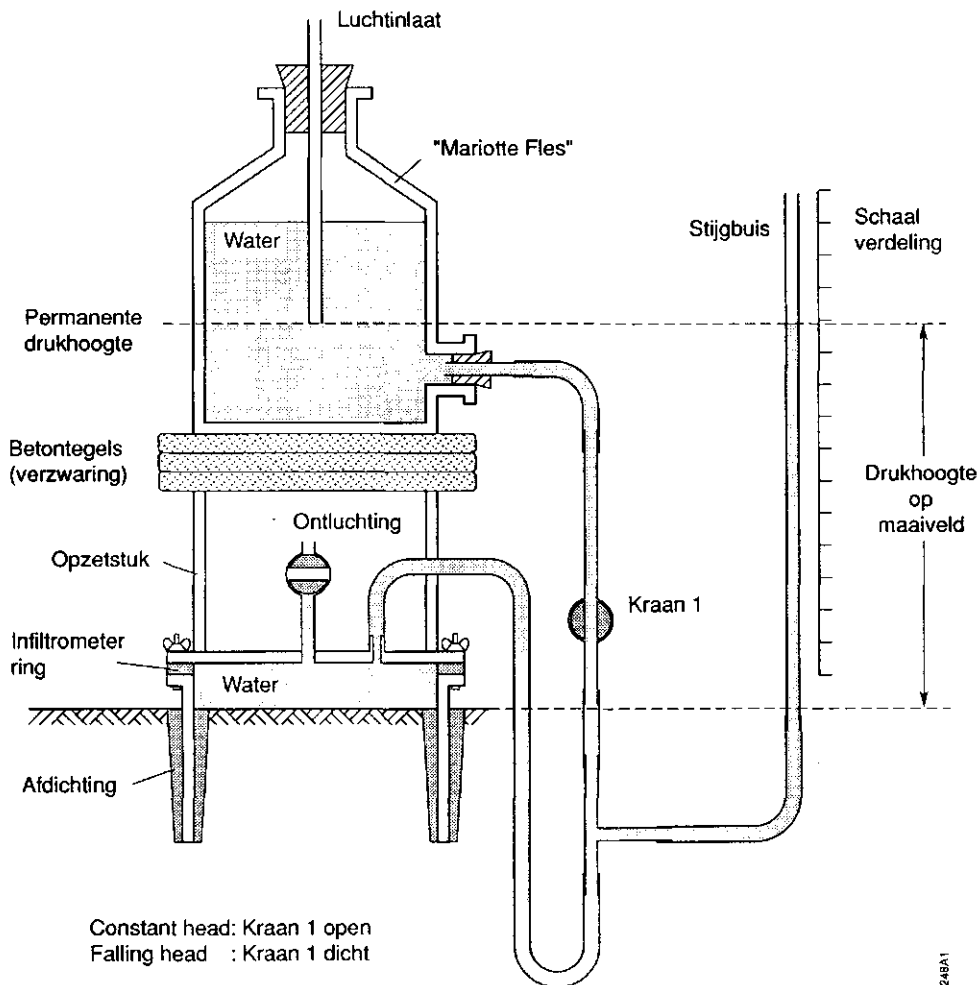


Fig. 2 Schematische weergave infiltrometer

Het voorraadvat is met betontegels op de infiltrometerring geplaatst om hydrostatische opdrijving te voorkomen. Indien dat niet mogelijk is of wanneer er bij grotere drukhoogten dan ca. 0,5 m (boven bovenzijde

infiltrometerring) wordt gemeten, is een verankering noodzakelijk. Naast het voorraadvat is een stijgbuis aangebracht om nauwkeurige infiltratiemetingen te verrichten.

De watertoevoer vanuit het voorraadvat wordt afgesloten, waarna aanvoer uitsluitend plaats vindt vanuit de stijgbuis. De daling daarin geeft derhalve de totale infiltratie weer. De infiltratiesnelheid hangt samen met de doorlaatfactor van de grond, de hydraulische gradiënt en de geometrie van de infiltrometerring. Bij deze proefopzet is de hydraulische gradiënt groter dan één (1), zodat ook de infiltratiesnelheid getalsmatig groter is dan de verzadigde doorlatendheid. Het gevolg hiervan is, dat de (verticale) stroomlijnen globaal nog evenwijdig aan elkaar verlopen in de grond die is omsloten door de infiltrometerring, terwijl ze divergeren (uiteen gaan wijken) in de zone onder de infiltrometerring. De doorsnede voor stroming is daar groter dan de doorsnede van de infiltrometerring. Als het aandeel van stroming in de onverzadigde grond aan de totale stroming wordt verwaarloosd, is op relatief grote diepte onder de infiltrometerring de hydraulische gradiënt gelijk aan een (1), en de filtersnelheid daar gelijk aan de verzadigde doorlatendheid. De verhouding tussen de doorsnede op die diepte en de doorsnede van de infiltrometerring is gelijk aan de verhouding tussen de infiltratiesnelheid en de verzadigde doorlatendheid. De uitdijning van het doorstroomd oppervlak op grote diepte ten opzichte van het oppervlak van de infiltrometerring wordt laterale divergentie genoemd. De infiltrometerring is echter over een relatief grote diepte ingebracht, omdat de dikte van de afdichtende laag beperkt is. Onder de afdichtende laag bevindt zich een zandlaag met een goede doorlatendheid (steunlaag). De percolatiestroom door de afdichtende laag vindt plaats in een verzadigde toestand. In de steunlaag is de percolatiesnelheid getalsmatig vrijwel gelijk aan de onverzadigde doorlatendheid (eenheidsgradiënt). Daarbij hoort een onderdruk in het bodemvocht tussen -0,10 en -0,30 m H<sub>2</sub>O. Als hier zeer geringe overdrukken worden toegepast, is de verhouding tussen infiltratiesnelheid en doorlatendheid 2-3 (Bouwer, 1961). De laterale divergentie bedraagt dan 40 tot 70%. Veiligheidshalve kan hier een laterale divergentie van 20% worden aangehouden.

## 4 RESULTATEN

### 4.1 Profielbeschrijving

De opbouw van de eindafdekking op het stortterrein is, van onderen naar boven gezien:

- steunlaag;
- afdichtingslaag;
- afdeklaag (tevens drainlaag).

De steunlaag bestaat uit matig grofzand, waarin geen verkleuringen zijn geconstateerd. Verkleuringen kunnen duiden op percolatie van water met daarin opgeloste organische verbindingen uit de afdeklaag. De steunlaag is matig vochtig en heeft duidelijk zichtbaar poriën zonder water. Nadat de afdichtende laag was verwijderd en de steunlaag bloot kwam liggen, werd stortgas geconstateerd (penetrante geur). De pH-KCl-waarde van deze laag is 7,8. Deze relatief hoge pH, die toch nog geringer is dan in de afdichtende laag, duidt op een zeer geringe percolatie door de afdichtende laag. Er wordt aangenomen, dat het bufferend vermogen van zand verwaarloosbaar klein is en dat de oorspronkelijke pH in de steunlaag ca. 5,5 was. De laagdikte waarvoor de gemeten pH representatief is, is kleiner dan 0,1 m. Verder wordt aangenomen, dat er volledige menging optreedt tussen percolaat en het vocht in de steunlaag. De percolatie door de afdichtende laag die onder die voorwaarden zou hebben geleid tot de gemeten pH waarde in de steunlaag, is geringer dan 30 mm per jaar. Het voorgaande betreft slechts een rekenvoorbeeld. Door het ontbreken van historische gegevens kan op grond van de gemeten pH in de steunlaag geen uitspraak worden gedaan over opgetreden percolatiesnelheid.

De dikte van de afdichtende laag is gemeten. Op de locatie bovenaan de helling is deze ca. 0,10 m. Op de overige locaties midden en aan de voet van de helling is de dikte 0,20 tot 0,22 m. Op deze laatste locaties is de dikte in overeenstemming met de 0,20 m die oorspronkelijk bedoeld was.

De afdichtende laag is homogeen van samenstelling. Er is geen structuurvorming waargenomen. De laag was bij het opgraven erg vochtig en leek nagenoeg verzadigd met water. Er zijn geen wortels op of in de afdichtende laag aangetroffen. Evenmin zijn er sporen van dierlijke activiteit gevonden. Het droogvolume gewicht onder aan de helling is ca. 1650 kg.m<sup>3</sup> en midden en boven op de helling ca. 1750 kg.m<sup>3</sup>.

Het bentonietgehalte varieert van 7,3 tot 8,0%.

Bij het blootleggen van de afdichtingslaag is geen stortgas waargenomen. Ook in de afdichtingslaag is tijdens het blootleggen geen verkleuring geconstateerd. Wel was er zeer plaatselijk verkleuring toen de laag enkele weken aan de lucht had bloot gestaan gedurende een

overwegende droge periode. Dergelijke (donkere) verkleuringen duiden op infiltratie van water met opgeloste organische verbindingen. Infiltratie in die omstandigheden is mogelijk doordat de laag eerst (in beperkte mate) uitdroogt en daarna weer wordt bevochtigd. De pH-KCl-waarde van deze laag is ca. 8,0.

De afdeklaag of teellaag bestaat uit weinig materiaal (ca. 25% organische stof) en is ca. 0,90 m dik. Waarneembaar was nog dat deze bovengrond bewerkt is geweest met een (scherpe) woeler tot een diepte van 0,5-0,6 m. De bovengrond was sterk beworteld tot de diepte, waarover de grond was gewoeld. Daaronder kwamen weinig tot geen wortels voor en was de grond daar aanmerkelijk vochtiger dan in de (droge) wortelzone. De wortels in deze grondlaag reikten tot op de zand-bentoniet-laag, maar waren hier overigens niet ingedrongen. De pH-KCl van de teelaarde ligt tussen pH 5,15 en 5,65.

Er zijn plaatselijk grote aantallen regenwormen aangetroffen op de scheiding tussen bovengrond en afdichtende laag. De grond daar is aëroob. Als stortgas door de afdichtende laag was gedrongen, dan zou vlak boven de afdichtende laag een anaërobe (zuurstofloze) toestand hebben geheerst, waarin regenwormen niet gedijen. Op grond van de aanwezigheid van regenwormen juist op het scheidingsvlak, mag worden geconcludeerd, dat de afdichtende laag minstens gasdicht is.

#### 4.2 Laboratorium-doorlatendheidstest

Aan de ongeroerde monsters uit het veld is de samenhang tussen de hydraulische gradiënt en de doorlatendheid bepaald met de methode van afnemende drukhoogtegradiënten. De monsters zijn van onderuit verzadigd met leidingwater vanuit een voorraadvat, waarin met het zgn. Mariotte systeem een constante waterdruk wordt gerealiseerd. De verzadiging vergde één tot twee weken, waarna de uitstroming regelmatig was. Vanaf dat moment is een groot aantal keren de samenhang tussen hydraulische gradiënt en doorlatendheid bepaald. Hierbij is steeds zowel de ingestroomde als de uitgestroomde hoeveelheid water gemeten om vast te stellen of aan de voorwaarde voor deze meting is voldaan: geen verandering van het watervolume in het monster tijdens de metingen. Hierbij zijn geringe afwijkingen geaccepteerd.



Tabel 1 Gemiddelde doorlatendheid in relatie tot de gemiddelde gradiënt per gradiëntsklasse

Gra- diënt- klasse	Monster 1			Monster 2			Monster 3			Alle monsters		
	N	grd	K <sub>sat</sub>	N	grd	K <sub>sat</sub>	N	grd	K <sub>sat</sub>	N	grd	K <sub>sat</sub>
4				3	3,74	1,80				3	3,74	1,80
5	4	4,74	2,08	9	4,61	2,92				13	4,65	2,66
6	8	5,76	1,26	12	5,55	2,37	6	5,61	1,31	26	5,63	1,78
7	12	6,30	1,61	8	6,54	2,26	7	6,47	1,92	27	6,42	1,88
8							5	7,48	2,24	15	7,56	2,67
9	13	8,43	2,56	16	8,55	3,18	1	8,64	4,84	30	8,50	2,96
10	7	9,53	4,09	11	9,44	3,56	1	9,84	5,18	19	9,49	3,84
11				2	10,24	4,33	2	10,70	2,24	4	10,47	3,28
12							6	11,51	2,66	6	11,51	2,66
13							4	12,63	3,21	4	12,63	3,21
14							3	13,61	3,29	3	13,61	3,29
15							3	14,81	3,95	3	14,81	3,95
16							4	15,53	2,81	4	15,53	2,81
17							4	16,59	2,43	4	16,59	2,43
18							3	17,29	5,34	3	17,29	5,34
19							1	18,30	4,98	1	18,30	4,98
gem.		7,21	2,26		7,17	2,90		11,19	2,79		8,40	2,69
Corr. coëff.			0,659			0,421			0,440			0,394

N - aantal waarnemingen per gradiëntklasse  
 grd - gradiënt (m/m)  
 K<sub>sat</sub> - verzadigde doorlatendheid ( $10^{-10}$  m.s<sup>-1</sup>)

Er kon geen significante samenhang tussen het tijdsverloop en de doorlatendheid worden vastgesteld. Daarom mogen per gradiëntklasse de gradiënten en doorlatendheden van alle metingen worden gemiddeld. Als gradiëntklasse zijn aangehouden: 4 t/m 19. Klasse 4 heeft als bovengrens een gradiënt van 4 en als ondergrens een gradiënt groter dan 3. Klasse 19 heeft als bovengrens een gradiënt van 19 en als ondergrens een gradiënt groter dan 18.

Getoetst is of er daadwerkelijk gesproken kan worden van een samenhang tussen doorlatendheid en gradiënt. Daarbij is uitgegaan van de ("nul") hypothese, waarin zo'n samenhang niet bestaat. Getoetst is met een eenzijdige 1%-significantiegebied, omdat immers de alternatieve hypothese luidt dat er geen correlatie is en slechts uitzonderingen leiden tot een schijnbare correlatie (Wijvekate, 1964). De correlatie tussen de genormaliseerde gradiënt (gradiënt van meting,  $i$ , verminderd met de gemiddelde gradiënt van alle metingen) en de genormaliseerde doorlatendheid is berekend. Vervolgens is getoetst of de berekende correlatie groter is dan de waarde waarbij de nul-hypothese nog juist wordt geaccepteerd. De resultaten zijn in tabel 1 weergegeven. Uit tabel 1 blijkt dat de gemeten doorlatendheden een samenhang tonen met de gradiënt. De correlatie-coëfficiënten zijn niet erg hoog, wat betekent, dat de samenhang niet erg duidelijk is. Voor monster 1 is er sprake van een samenhang als de correlatiecoëfficiënt voor dat aantal waarnemingen groter is dan 0,386, voor monster 2, als de correlatiecoëfficiënt groter is dan 0,302 en voor monster 3 groter dan 0,361. De berekende coëfficiënten zijn alle groter dan de minimumwaarden, zodat

met een betrouwbaarheid van 99% kan worden besloten, dat er een significante samenhang bestaat tussen doorlatendheid en gradiënt. De doorlatendheden, die horen bij een gradiënt van ca. 5 zijn alle kleiner dan  $3 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ . De percolatieverliezen bij die gradiënt zijn in 200 dagen kleiner dan 23 mm. Daarbij is ruimschoots voldaan aan het oorspronkelijk ontwerp, terwijl eveneens is voldaan aan de huidige eisen.

#### 4.3 Infiltratiemetingen in het veld

De opstellingen zijn medio juli 1990 geïnstalleerd. Vanaf dat moment is een permanente overdruk in stand gehouden van ca. 50 cm  $\text{H}_2\text{O}$ . Een controlemeting is uitgevoerd op 8 aug. 1990. Het waterverlies bovenaan de helling was relatief erg groot (1,5 mm/dag infiltratie over het natte oppervlak). Midden op de helling was de infiltratie 0,072 mm/dag. De definitieve meting is uitgevoerd op 17 sept. 1990. Ook toen was het waterverlies bovenaan de helling nog erg groot. Rondom de infiltratiering was de grond niet nat, zodat waarschijnlijk de aansluiting tussen ring en bodem ontoereikend is geweest. De geringe dikte van de afdichtingslaag daar maakt het mogelijk dat het percolaat snel naar de ondergrond verdwijnt en niet meer geremd wordt door een dichte grond. Besloten is daar geen verdere meting meer te verrichten. De waterverliezen tijdens de meting zijn omgerekend naar een verlies per 200 dagen, uitgedrukt in een laagdikte. Als infiltrerend oppervlak is alleen de doorsnede van de infiltratiering aangehouden. Er zijn derhalve geen correcties voor de laterale divergentie van de stroomlijnen ingevoerd. De percolatieverliezen representeren in dit geval verliezen die op het moment horen bij de ontwerp-randvoorwaarden voor het dimensioneren van afdichtingslagen volgens de huidige inzichten (Hoeks et al., 1990). De percolatieverliezen zijn niet constant, maar laten een samenhang zien met de stijghoogte in de infiltratiering. De gemeten percolatieverliezen zijn aanzienlijk geringer dan de 50 mm in 200 dagen waarop de afdichtingslaag was gedimensioneerd. De doorlaatfactor kan uit de infiltratie metingen worden afgeleid bij de aangenomen uitdijning van het doorstroomd oppervlak op relatief grote afstand onder de infiltratiering. Veiligheidshalve is een laterale divergentie van 20% verondersteld, zodat de natte doorsnede op relatief grote diepte onder de infiltratiering ca. 1,44 keer zo groot is als de doorsnede van de infiltratiering. Dan is de doorlaatfactor kleiner dan  $6 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$  onderaan de helling en  $3 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$  in het midden van de helling. Vergeleken met de gemeten doorlatendheden aan monsters op het laboratorium, zijn deze ramingen enigszins conservatief. Uitgaande van een gemeten gemiddelde doorlatendheid in de gradientklassen 4 t/m 6, ter grootte van ca.  $2 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ , zou de laterale divergentie 25 tot 35% moeten zijn. De percolatieverliezen bij condities als op het proefobject zijn dan minimaal ca. 5 mm per 200 dagen en maximaal ca. 10 mm per 200 dagen.

Tabel 2 Waterverlies uit infiltrometerringen en berekende percolatieverliezen door de afdichtingslaag

Locatie	Waterverlies ( $\text{cm}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	Tijdsduur (min)	Gem. drukh. ( $\text{cm H}_2\text{O}$ )	Percolatie ( $\text{mm } 200 \text{ d}^{-1}$ )	Opmerking
onder	5,72	130	55,6	16,2	1 <sup>e</sup> serie
	6,79	60	53,9	19,2	2 <sup>e</sup> serie, 1 <sup>e</sup> periode
	4,81	55	50,2	13,6	2 <sup>e</sup> serie, 2 <sup>e</sup> periode
	5,84	115	52,2	16,5	2 <sup>e</sup> serie, 1 <sup>e</sup> + 2 <sup>e</sup> periode
	3,45	65	47,8	9,8	2 <sup>e</sup> serie, 3 <sup>e</sup> periode
	4,98	180	51,1	14,1	2 <sup>e</sup> serie, 1 <sup>e</sup> +2 <sup>e</sup> +3 <sup>e</sup> periode
	5,63	85	50,9	15,9	3 <sup>e</sup> serie
	gewogen gemiddelde			15,2	
midden	2,90	130	50,9	8,2	1 <sup>e</sup> serie
	4,24	60	51,7	12,0	2 <sup>e</sup> serie, 1 <sup>e</sup> periode
	1,85	55	49,9	5,2	2 <sup>e</sup> serie, 2 <sup>e</sup> periode
	3,10	115	51,2	8,8	2 <sup>e</sup> serie, 1 <sup>e</sup> + 2 <sup>e</sup> periode
	1,72	65	48,9	4,9	2 <sup>e</sup> serie, 3 <sup>e</sup> periode
	2,60	180	50,6	7,4	2 <sup>e</sup> serie, 1 <sup>e</sup> +2 <sup>e</sup> +3 <sup>e</sup> periode
		gewogen gemiddelde			7,7

## LITERATUUR

Albrecht, K.A. and K. Cartwright, 1989. "Infiltration and Hydraulic Conductivity of a compacted Earthen Liner". In: *Ground Water*, 27, 1:14-20.

Bouwer, H., 1961. "A study of final infiltration rates from cylinder infiltrometers and irrigation furrows with an electrical resistance network". In: *Trans. Int. Congr. Soil Sci.*, 7th 6:448-456.

Commissie Voor De Milieu-effectrapportage, 1990. *Advies voor richtlijnen voor de inhoud van het milieu-effectenrapport uitbreiding capaciteit stortplaats Spinder*. Utrecht, Rapport 277-57.

Hoeks, J., A.H. Rhyhiner en J. van Dommelen, 1987. *Onderzoek naar de praktische uitvoerbaarheid van bovenafdichtingen op afvalstortterreinen*. Wageningen, ICW. Rapport 21, nieuwe serie.

Hoeks, J., H.P. Oosterom, D. Boels, J.F.M. Borsten, K. Strijbis en W. ter Hoeven, 1990. *Richtlijnen voor ontwerp en constructie van eindafdekkingen van afval- en reststofbergingen*. Wageningen, Staring Centrum. Rapport 91.

Wijvekate, M. L., 1964. *"Verklarende Statistiek"*. Utrecht/Antwerpen, Het Spectrum.