

ONDERZOEK NAAR DE PRAKTISCHE UITVOERBAARHEID
VAN BOVENAFDICHTING OP AFVALSTORTTERREINEN

J. Hoeks, A.H. Ryhiner en J. van Dommelen

RAPPORT 21

INSTITUUT VOOR CULTUURTECHNIEK EN WATERHUISHOUDING (ICW)
POSTBUS 35. 6700 AA WAGENINGEN 1987

130708

Copyright© 1987
Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Postbus 35, 6700 AA Wageningen
Tel. 08370-19100

ISSN 0921-089X

VOORWOORD

Het hier beschreven onderzoek naar de praktische uitvoerbaarheid van bovenafdeling van stortplaatsen sluit aan bij een eerder uitgevoerd onderzoeksproject 'Vermindering van de infiltratie van regenwater in afvalstortterreinen', waarvan het eindrapport is verschenen in de Bodembeschermingsreeks van het Ministerie voor Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (HOEKS en AGELINK, 1982).

Het onderzoek is uitgevoerd door het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW) in samenwerking met de Vuil Afvoer Maatschappij (VAM) en is grotendeels gefinancierd door het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM).

In eerste instantie werd financiering voor de periode november 1982 - december 1984 toegezegd. Later werd aanvullende financiering verkregen voor de periode januari 1985-mei 1986 op basis van een verlengingsvoorstel. Het project werd begeleid door een door het Ministerie ingestelde begeleidingscommissie waarin de volgende personen zitting hadden:

- dr. mr. D.A. Zeilmaker (voorzitter)
Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer,
Hoofdafdeling Bodem
 - drs. J.P.N. Smit
Min. VROM, Directie Afvalstoffen en Schone Technologie
 - ir. K. Strijbis
Min. VROM, later Heidemij Adviesbureau, Arnhem
 - ir. E.J. Mesu (tot 1-1-85)
 - ir. D. Beker (na 1-1-85)
Rijks Instituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (RIVM)
 - dr. ir. P.E. Rijtema
Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, (ICW) Hoofdafdeling
Waterkwaliteit
 - dr. ir. J. Hoeks (projectleider)
ICW, Hoofdafdeling Waterkwaliteit
 - A.H. Ryhiner
ICW, Hoofdafdeling Waterkwaliteit
 - prof. ir. D.A. Kraijenhof v.d. Leur (tot 1-1-85)
Landbouwuniversiteit, Vakgroep Hydraulica en Afvoerhydrologie
 - ir. L. Eppink
Landbouwuniversiteit, Vakgroep Cultuurtechniek
 - J. Oosthoek
Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen (IMAG)
 - J.A. van Dommelen
Vuil Afvoer Maatschappij (VAM)
 - ir. J. Stellema (tot 1-4-85)
 - ir. J. Deunk (na 1-4-85)
Regionale Inspectie Milieuhygiëne voor de provincies Groningen,
Friesland en Drenthe
-

INHOUD

IN KORT BESTEK	a
1. INLEIDING	1
2. DOEL EN OPZET VAN HET ONDERZOEK	3
3. LITERATUURSTUDIE BETREFFENDE CONSTRUCTIE VAN AFDEKLAGEN EN TOEPASSING VAN AFDICHTINGSMATERIALEN	6
3.1. Algemeen	6
3.2. Functies van de afdeklaag	6
3.3. Selectie van afdichtingsmaterialen	8
3.3.1. Algemene eisen	8
3.3.2. Natuurlijke afdichtingsmaterialen	9
3.3.3. Synthetische materialen	15
3.4. Selectie van afdekgrond en drainagesysteem	17
3.4.1. Algemene eisen	17
3.4.2. Afdekgrond	18
3.4.3. Drainerende zandlaag en drainagesysteem	19
3.5. Constructie van de afdeklaag in de praktijk	21
3.5.1. Funderingslaag	21
3.5.2. Afdichtingslaag	21
3.5.3. Afdekgrond	26
3.5.4. Drainagesysteem	27
3.5.5. Speciale constructie aan de voet van de helling	28
3.5.6. Speciale constructie in verband met gasvorming	29
3.5.7. Inzaaien en beplanten	29
3.6. Controle op lekkages	30
3.7. Conclusies	31
4. AANLEG VAN DE PROEFVELDEN EN DAARBIJ OPGEDANE PRAKTIJKERVARINGEN	33
4.1. Inrichting van proefvelden	33
4.1.1. Lokatie en opbouw van het afvalstort	33
4.1.2. Afdichtingsmaterialen	34
4.1.3. Bovengrond en drainagesysteem	36
4.1.4. Meetinstrumenten en inrichting meetput	38

4.2. Ervaringen met betrekking tot de toepassing van Hypofors	38
4.2.1. Produkt-informatie	38
4.2.2. Eisen ten aanzien van de ondergrond	39
4.2.3. Het uitrollen en lassen van de Hypofors-banen	39
4.2.4. Kosten	41
4.3. Ervaringen met betrekking tot de toepassing van bentoniet	41
4.3.1. Produkt-informatie	41
4.3.2. Eisen te stellen aan de materialen	42
4.3.3. Methode van menging	43
4.3.4. Aanbrengen van de afdichtingslaag in het veld	46
4.3.5. Effect van weersomstandigheden	47
4.3.6. Kosten	48
4.4. Ervaringen met betrekking tot het opbrengen van afdekgrond	49
4.4.1. Aard van de afdekgrond	49
4.4.2. Opbrengen van de afdekgrond	49
4.4.3. Inzaaien met gras	50
4.4.4. Erosie en erosiebestrijding	51
4.5. Conclusies betreffende toepassing in de praktijk	52
5. RESULTATEN VAN HET HYDROLOGISCH ONDERZOEK OP DE PROEFVELDEN	55
5.1. Algemeen	55
5.2. Proefopzet en meetprogramma	56
5.3. Fysische eigenschappen van de afdekgrond	61
5.4. Neerslag en verdamping	64
5.4.1. Neerslag	64
5.4.2. Verdamping	67
5.5. Oppervlakte-afvoer en drainafvoer	69
5.5.1. Storingen in de afvoermetingen	69
5.5.2. Oppervlakte-afvoer	71
5.5.3. Drainafvoer	73
5.6. Metingen in de afdeklaag	78
5.6.1. Berging van water in de afdeklaag	78
5.6.2. Grondwaterstand	80
5.6.3. Bodemtemperatuur	83
5.6.4. Lekkage van stortgas	85
5.6.5. Zettingen	89
5.7. Waterbalansen van de proefvelden	90
5.8. Conclusies	95

6. MODELBEREKENINGEN BETREFFENDE DE WATERBALANS VAN DE PROEFVELDEN	97
6.1. Algemeen	97
6.2. Beknopte beschrijving van het REDRAM-model	97
6.3. Invoergegevens	101
6.4. Resultaten	104
6.4.1. Toetsing van het model	104
6.4.2. Invloed van bodemfysische eigenschappen op de water- balans	104
6.4.3. Analyse meetgegevens aan de hand van modelberekeningen	107
6.5. Conclusies	113
7. LABORATORIUMONDERZOEK MET BENTONIET EN SPECIALE KLEISOORTEN	115
7.1. Algemeen	115
7.2. Opzet van de experimenten	115
7.3. Doorlatendheid van zand-bentoniet mengsels	116
7.3.1. Effect van verdichting en zandsoort	116
7.3.2. Effect van bentonietgehalte en bentonietsoort	117
7.3.3. Effect van stijghoogtegradiënt en tijd	118
7.3.4. Effect van de kwaliteit van het percolerende water	120
7.4. Doorlatendheid van speciale kleisoorten	121
7.5. Conclusies	124
8. SAMENVATTING EN CONCLUSIES	125
8.1. Inleiding	125
8.2. Aanleg proefvelden	125
8.3. Hydrologisch onderzoek	126
8.4. Modelberekeningen	127
8.5. Laboratoriumonderzoek	127
8.6. Toepassing van natuurlijke afdichtingsmaterialen	128
LITERATUUR	129
BIJLAGEN	

IN KORT BESTEK

De infiltratie van regenwater in een afvalstort kan worden beperkt of zelfs geheel worden voorkomen door het aanbrengen van een afdichtingslaag op het stort. Onderzoek uit het begin van de jaren tachtig toonde aan dat de meeste leem- en kleigronden niet geschikt zijn omdat deze nog teveel water doorlaten. Wel bleek uit laboratoriumonderzoek dat specifieke kleimaterialen, bijvoorbeeld het sterk zwellende kleimineraal bentoniet, mogelijk geschikt waren voor bovenafdichting op stortplaatsen.

Semi-praktijk proeven op de afvalstortplaats van de VAM te Wijster hebben nu aangetoond, dat afdichtingslagen bestaande uit een mengsel van zand en bentoniet inderdaad waterdicht waren gedurende de gehele onderzoeksperiode van 3½ jaar (1982-1986). De dikte van de afdichtingslaag moet dan minimaal 20 cm zijn en het bentonietgehalte minimaal 5 gew.%. Dunnere lagen blijken onvoldoende bestand te zijn tegen onregelmatige zettingen. Bestendigheid tegen vervormingen onder invloed van zettingen is namelijk een eerste vereiste bij de constructie van bovenafdichtingen op stortplaatsen.

De afdichtingslaag moet worden afgedekt met een laag drainagezand en teelaarde met een totale dikte van circa 1 m, waarbij direct boven de afdichtingslaag een drainagesysteem is aangebracht voor ontwatering van de afdeklaag. Aan de voet van de hellingen van het stort moet speciale aandacht worden geschonken aan de gescheiden opvang van dit schone drainwater en het sterk vervuilde percolatiewater uit het afvalstort.

Uit aanvullende laboratoriumonderzoek blijkt dat ook speciale Tertiaire kleimaterialen (bijv. Reuverse klei) voldoen als afdichtingsmateriaal. Dankzij de sterke binding van water in zwellende kleimaterialen lijkt het zelfs mogelijk dat sommige kleiafdichtingen geheel waterdicht zijn bij lage stijghoogtegradiënten.

Nader onderzoek zal moeten aantonen of sommige kleimaterialen daarom ook voor basisafdichtingen kunnen worden gebruikt.

1 . INLEIDING

Het beleid van de overheid is er op gericht om verontreiniging van de bodem en het grondwater bij afvalstortplaatsen zoveel mogelijk te voorkomen. Voor nieuw in te richten terreinen voor afvalberging wordt daarom in de Richtlijn Gecontroleerd Storten van het Ministerie voor Volksgezondheid, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM, 1985) voorgeschreven dat onder het afvalstort een waterdichte laag met daarop een drainagesysteem moet worden aangelegd. Op reeds volgestorte terreinen of terreinen waar al sinds jaren wordt gestort, heeft men niet meer de mogelijkheid om een dergelijke basisafdichting aan te brengen. Om in dergelijke gevallen toch de kans op bodemverontreiniging zo klein mogelijk te maken kan men het stort aan de bovenzijde zodanig afwerken en afdichten dat de infiltratie van regenwater grotendeels wordt voorkomen.

Ook op stortplaatsen met een basisafdichting kan het echter om allerlei redenen wenselijk zijn een bovenafdichting aan te brengen. Deze redenen kunnen verband houden met problemen bij de zuivering van het percolatiewater, de hoge kosten van zuivering of de niet uit te sluiten kans dat de basisafdichting lek raakt.

Eerder onderzoek (HOEKS EN AGELINK, 1982) heeft aangetoond, dat de infiltratie van regenwater kan worden beperkt door het stort af te dekken met een waterdichte laag met daarop een laag afdekgrond en een drainagesysteem. Het bevorderen van de verdamping of de oppervlakte-afvoer draagt relatief weinig bij of stuit op praktische bezwaren. Dat onderzoek heeft eveneens aangetoond, dat de in Nederland voorkomende natuurlijke materialen meestal een te hoge doorlatendheid hebben en daarom niet geschikt zijn als afdichtingsmateriaal. De verzadigde doorlatendheid van het afdichtingsmateriaal moet bij een stijghoogte-gradiënt van maximaal 5 lager zijn dan $0,05 \text{ mm.dag}^{-1}$ ($\approx 5 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$), wil de lekkage tijdens een afvoerperiode van 200 dagen per jaar minder zijn dan 50 mm.

Afdichtingslagen van klei en leem, zoals deze in Nederland voorhanden zijn, hebben een doorlatendheid in de orde van $0,5\text{-}2,0 \text{ mm.dag}^{-1}$ ($\approx 5\text{-}20 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$). Dit is niet afdoende, want de lekkage door een dergelijke laag ligt in de orde van $200\text{-}300 \text{ mm.jaar}^{-1}$. Door zeer sterke verdichting onder relatief natte omstandigheden is het misschien mogelijk nog lagere doorlatendheden te bereiken, bijvoorbeeld tot $0,2 \text{ mm.dag}^{-1}$, waardoor de lekkage afneemt tot $100 \text{ à } 150 \text{ mm.jaar}^{-1}$. Een verdere reductie van de infiltratie

lijkt met de in Nederland beschikbare klei- en leemsoorten echter niet haalbaar, tenzij het zeer specifieke kleisoorten betreft (zie hfdst. 7). Doorlatendheden kleiner dan $0,05 \text{ mm} \cdot \text{dag}^{-1}$ kunnen wel bereikt worden met behulp van sterk zwellende montmorillonietkleiën. Op enkele plaatsen in de USA en ook in Europa worden deze montmorillonietkleiën in zeer zuivere vorm aangetroffen. Onder de naam 'bentoniet' worden ze in de handel gebracht en onder andere gebruikt voor bovenafdichtingen. Door grond te mengen met bentoniet wordt een mengsel verkregen dat vrijwel geen water doorlaat. De afdichting berust op binding van het water aan de bentonietdeeltjes. Het waterbindend vermogen van de bentoniet neemt toe met de Na-bezetting aan het adsorptiecomplex. Door uitwisseling van Na tegen Ca loopt het waterbindend vermogen aanzienlijk terug.

Behalve natuurlijke materialen kunnen ook kunststofprodukten, zoals diverse plastic folies en asfaltmembranen, worden gebruikt als afdichtingsmateriaal. De doorlatendheid van dergelijke materialen is zo klein dat lekkage van water te verwaarlozen is. Als er lekkage optreedt, dan zal dit voor namelijk via lassen of later ontstane lekken (b.v. t.g.v. zettingen) plaatsvinden. Het is van groot belang dat de lassen bij de aanleg nauwkeurig worden getest op lekdichtheid. Voor bovenafdichtingen moet het materiaal, inclusief de lassen een grote fysische bestendigheid hebben aangezien flinke zettingen kunnen optreden. De chemische bestendigheid van het materiaal, welke bij basisafdichtingen een belangrijk punt is, speelt hier slechts een ondergeschikte rol. Door TNO is uitvoerig onderzoek verricht naar de bruikbaarheid van kunststoffolies en bitumenlagen voor afdichtingen in het kader van bodembescherming (ALGRA en DER KINDEREN, 1984).

Ter bescherming van de afdichtingslaag wordt deze afgedekt met een laag afdekgrond met daarin een drainagesysteem. De bovengrond moet bestaan uit een humeuze, goed bewortelbare grond om een geschikte bewortelingslaag voor de vegetatie te krijgen. De totale dikte van deze afdeklaag zou ongeveer 80-100 cm moeten bedragen (zie HOEKS EN AGELINK, 1982).

Het hier beschreven onderzoek had tot doel om het effect en de praktische uitvoerbaarheid van bovenafdichting op afvalstortterreinen op praktijk-schaal te testen.

2. DOEL EN OPZET VAN HET ONDERZOEK

Een van de uitgangspunten bij de opzet van het onderzoek was, dat het uit- testen van verschillende kunststofprodukten voor afdichting niet tot het onderzoeksterrein zou behoren. Wel werd het wenselijk geacht om een van de proefvelden af te dichten met een kunststofprodukt waarvan kon worden aan- genomen dat het waterdicht was. Dit veld zou dan kunnen dienen als referen- tie, dat wil zeggen de afvoer van de andere velden zou kunnen worden verge- leken met de afvoer van dit referentieveld. Bovendien zou op deze manier informatie worden verkregen over het effect van grote en onregelmatige ver- zakkingen op een afdichting met een kunststofprodukt.

Voor het vaststellen van de waterbalans is het niet beslist noodzakelijk om te beschikken over een referentieveld. Met modelberekeningen (HOEKS, 1981) blijkt het namelijk goed mogelijk te zijn om de waterafvoer uit een afdek- laag te voorspellen als de hydrologische eigenschappen van de afdekgrond en de afdichtingslaag bekend zijn.

De doelstelling van het onderzoek is in de opdrachtbrief van het toenmalige Ministerie voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (zie bijlage 1) als volgt geformuleerd:

- a. Op praktijkschaal ervaring opdoen met het aanbrengen van afsluitende lagen op een afvalstort.
- b. Middels hydrologisch onderzoek vaststellen of de afsluitende laag het gewenste effect heeft op de waterbalans van de afdeklaag.
- c. Opstellen van richtlijnen met betrekking tot de ontwatering van de afdekgrond boven de afsluitende laag (drainage, greppels, sloten).
- d. Relatie tussen gasvorming in het afvalstort en bovenafdichting (aanleg van ontgassingssysteem).
- e. Gedrag van de afsluitende laag op lange termijn, waarbij vooral onregel- matige verzakkingen een rol spelen.
- f. Kostenvergelijking van bruikbare alternatieven.

In het onderzoeksvoorstel werd destijds voorgesteld om een van de proef- velden af te dichten met een vliegas-bentoniet mengsel. Nader onderzoek heeft geleerd dat er verschillende soorten vliegas met sterk variërende eigenschappen bestaan. Dit hangt onder meer samen met de soort kolen die wordt gestookt in een centrale en ook de vorm waarin de vliegas beschikbaar is (poedervorm of als nat produkt).

De zuurgraad van de vliegas blijkt een belangrijk gegeven te zijn. In het laboratorium is gebleken dat droge, kalkhoudende vliegas (pH 11) na menging met bentoniet niet voldoende waterdicht was. In eerder onderzoek met natte vliegas (pH 7) was dit wel het geval. Zeer waarschijnlijk heeft een hoog kalkgehalte in de vliegas tot gevolg dat de Na^+ -ionen aan de bentoniet worden omgewisseld tegen Ca^{2+} -ionen, waardoor het zwelvermogen van de bentoniet sterk terugloopt. Behalve dit bezwaar geeft ook de menging van poedervormige vliegas met het eveneens poedervormige bentoniet grote praktische problemen.

Om deze redenen is besloten het vliegas-bentoniet mengsel te vervangen door een zand-bentoniet mengsel. De drie proefvelden op de helling van het VAM-stortterrein in Wijster zijn daarom voorzien van de volgende afdichtingslagen:

- een proefveld met een bitumineus produkt (Hypofors);
- een proefveld met een 10 cm dikke laag zand-bentoniet (mengverhouding 100:10);
- een proefveld met een 20 cm dikke laag zand-bentoniet (mengverhouding 100:7½).

Op de afdichtingslagen is circa 1 meter goed bewortelbare afdekgrond aangebracht met juist boven de afdichtingslaag een drainagesysteem. Voor een goede ontwatering dient de verzadigde doorlatendheid van de afdekgrond minimaal 50 cm.dag^{-1} te zijn (HOEKS en AGELINK, 1982). De onderlinge afstand tussen de drains is daarop afgestemd. Rekening houdend met de helling (1:3) en met een ontwateringscriterium van 7 mm.dag^{-1} bij een ontwateringsdiepte van 45 cm minus maaiveld bleek de drainafstand 15 meter te kunnen zijn.

Het in de projectbeschrijving aangegeven hydrologisch onderzoek omvatte het meten van de verschillende waterbalanstermen om daaruit de infiltrate in het stort af te leiden. Dit betreft het meten van neerslag, drainafvoeren, afstroming van water over het oppervlak (oppervlakte-afvoer), grondwaterstanden en vochtspanningen. De zakkingen van het onderliggende stort zijn bepaald door regelmatig een waterpassing uit te voeren. De gemeten afvoeren zijn tevens vergeleken met de resultaten van modelberekeningen (zie hfdst. 5 en 6).

Naast het veldonderzoek werd ook literatuuronderzoek voorzien met betrekking tot de ervaringen elders. Dit betreft met name andere afdichtingsmaterialen, mogelijkheden voor ontgassing bij bovenafdichting en het effect van

onregelmatige verzakkingen op de duurzaamheid van afdichtingslagen. Alternatieve materialen voor afdichting zijn kritisch beoordeeld en enkele afdichtingsmaterialen zijn op laboratoriumschaal uitgetest (zie hfdst. 3 en 7).

Het voorstel tot verlenging van het onderzoek (zie bijlage 1) had betrekking op het gedrag van de onderzochte afdichtingslagen op langere termijn. Het voorstel werd ingediend omdat tijdens het onderzoek aanwijzingen werden gevonden voor lekkage door de afdichtingslagen, vermoedelijk als gevolg van onregelmatige zettingen. In het projectvoorstel werden de volgende aspecten van onderzoek aangegeven:

- a. Effecten van zettingen op de waterdichtheid van afdichtingslagen op een stort, vast te stellen aan de hand van waterbalansmetingen.
- b. Opsporen van oorzaken van lekkages.
- c. Effecten van warmteproductie in het stort en afwijkende instraling op hellingen op de verdamping van de vegetatie.
- d. Mechanische beschadiging van afdichtingslagen door bodemdieren en plantewortels.
- e. Bruikbaarheid van alternatieve afdichtingslagen.
- f. Ontwerp van een afwateringssysteem bij bovenafdichting (drainagesysteem, 'teenconstructie' voor scheiding van schoon en vuil water).

In het kader van dit vervolgonderzoek is vooral aandacht besteed aan de bestendigheid van de afdichtingslagen op langere termijn. Via opgravingen is vastgesteld wat de oorzaak was van eerder geconstateerde lekkages.

Voorts is op laboratoriumschaal onderzoek verricht naar de bruikbaarheid van meerdere bentonietsoorten en ook speciale tertiaire kleiën voor afdichtingsdoeleinden. Ten aanzien van het ontwerpen van afwateringssystemen op stortplaatsen zijn slechts enkele richtlijnen gegeven, aangezien weinig praktijkervaringen ter beschikking staan.

3. LITERATUURSTUDIE BETREFFENDE CON- STRUCTIE VAN AFDEKLAGEN EN TOE- PASSING VAN AFDICHTINGSMATERIALEN

3.1. ALGEMEEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten beschreven van een literatuurstudie naar praktisch toepasbare afdichtingsmaterialen voor bovenafdichting en de eisen ten aanzien van afdichtingsmaterialen, afdekgrond en drainagesysteem. Aangezien echter aanzienlijk meer informatie beschikbaar is met betrekking tot basisafdichtingen, zijn deze gegevens ook in het onderzoek betrokken voor zover van belang voor bovenafdichting.

3.2. FUNCTIES VAN DE AFDEKLAAG

Het begrip 'afdeklaag' wordt hier gedefinieerd als het geheel van grondlagen en eventueel afdichtingslagen (kunststoffolies, bentoniet, klei) waarmee een afvalstort na beëindiging van de stortactiviteiten wordt afgedekt. Het begrip 'afdichtingslaag' wordt uitsluitend gebruikt voor die lagen in de afdeklaag, die tot doel hebben om de infiltratie van regenwater in het stort geheel of ten dele te verhinderen.

Op grond van esthetische overwegingen is minimaal een afdekking met grond vereist om het wegwaaien van papier en plastic te voorkomen. De enige eis die daarbij gesteld wordt, is dat de afdeklaag zo dik moet zijn dat ook na zetting geen afval aan het maaiveld zichtbaar is. Ook om redenen van volksgezondheid is een dergelijke afdekking gewenst, zodat brandgevaarlijke situaties en stankoverlast worden voorkomen en vogels, ratten en ander ongedierte worden geweerd.

De functies van de afdeklaag zijn uitvoerig beschreven door LUTTON et al (1979). Behalve de reeds genoemde functies kunnen nog worden vermeld:

- het bieden van een standplaats voor de vegetatie;
- het creëren van een geschikte ondergrond in verband met de herinrichting van de stortplaats, bijvoorbeeld voor speel- en ligweiden, beplanting met bos, aanleg van wegen, wandel- of ruiterspaden, eventuele bebouwing (kleedruimten, toiletgebouwen, manege, etc.), tennisbanen, skihellingen, crossbanen, golfbanen, e.a.;

-
- het beheersen van de infiltratie van regenwater in het stort;
 - het beheersen van de afvoer van stortgas om schade aan de vegetatie te vermijden en eventueel winning en gebruik van het stortgas mogelijk te maken.

Deze laatste functies zijn alleen te realiseren als zeer specifieke eisen worden gesteld aan de afdekgrond. Een goede standplaats voor de vegetatie vereist een laagdikte van 80-100 cm, bij zeer diep wortelende bomen of struiken mogelijk nog dikker. De grond moet goed doorwortelbaar zijn en voldoende vocht kunnen vasthouden. De hoeveelheid beschikbaar vocht (tussen veldcapaciteit en verwelkingspunt) moet 100-150 mm zijn om ernstige verdroging in de zomerperiode te voorkomen. De infiltratiecapaciteit van de afdekgrond moet ten minste 50 cm.dag^{-1} bedragen volgens HOEKS en AGELINK (1982) om een goede ontwatering te realiseren met geringe kans op oppervlakte-afvoer en erosie.

De uiteindelijke bestemming van een afgewerkte stortplaats kan soms zeer specifieke eisen stellen aan de afdeklaag. In feite zou reeds bij de eerste planvorming rond een in te richten stortterrein rekening moeten worden gehouden met de uiteindelijke bestemming, aangezien de vorm van het stort (hoogte, hellingen) aangepast moet zijn aan deze bestemming.

In dit rapport wordt vooral aandacht besteed aan het effect van een afdeklaag op de infiltratie van regenwater in het stort. Voor een effectieve reductie van deze infiltratie is het noodzakelijk dat onder de afdekgrond een min of meer waterdichte laag wordt aangebracht. Boven deze afdichtingslaag moet een drainagesysteem aanwezig zijn om wateroverlast te voorkomen. De afdekgrond dient in dit geval de afdichtingslaag te beschermen tegen onder andere uitdroging, mechanische beschadiging, grote temperatuurschommelingen en beschadiging door wortels en bodemdieren. Wat dit laatste betreft wordt door LUTTON (1982) aanbevolen de afdichtingslaag af te dekken met een laag humusarm zand met weinig cohesie tussen de korrels, zodat bodemdieren en knaagdieren hierin geen gangen kunnen graven. Nader onderzoek naar dit aspect lijkt gewenst, te meer daar op hellingen de kans op afschuiving toeneemt bij gebruik van cohesieloos zand (zie HEIDEMIJ, 1985). Met afdichtingslagen is ook de ongecontroleerde migratie van stortgas via de afdeklaag te beteugelen. Hoewel infiltratie van water wordt tegengegaan door de bovenafdichting, is tijdens het storten wel zoveel regenwater in het stort terechtgekomen, dat de gasproductie ongestoord op gang komt en ook na afdichting gewoon door gaat. Daarom zal bij bovenafdichting een gasventilatie- of gasonttrekkingssysteem moeten worden aangelegd, zodat het

gas kan ontsnappen in de atmosfeer of kan worden opgevangen en gebruikt voor energiedoeleinden.

Bij afwezigheid van afdichtingslagen wordt de gasdoorlatendheid van de afdeklaag in hoofdzaak bepaald door de structuur en het vochtgehalte van de afdekgrond. Aangezien de produktie doorgaat zal het gas ergens, vooral op de beter doorlatende plaatsen, een uitweg vinden naar de atmosfeer. In de praktijk blijkt dit vooral op de hellingen aanleiding te geven tot schade aan de vegetatie. Soms ontwijkt het gas via de ondergrond en komt in de bodem naast het stort terecht (vooral bij stortplaatsen in diepe zandafgravingen), waardoor schade buiten het stortterrein kan optreden. Bij ophoping van gas onder gebouwen kunnen zeer gevaarlijke situaties ontstaan (explosiegevaar).

Voor zeer uitvoerige informatie betreffende de functies van de afdeklaag en de te stellen eisen wordt hier verwezen naar LUTTON et al (1979) en LUTTON (1982).

3.3. SELECTIE VAN AFDICHTINGSMATERIALEN

3.3.1. Algemene eisen

Afdichtingslagen, of ze nu op of onder het stort zijn aangebracht, hebben tot doel de infiltratie van water zoveel mogelijk te verhinderen. Dit betekent dat ze moeten voldoen aan bepaalde eisen met betrekking tot de waterdichtheid. Voor een basisafdichting stelt de overheid als eis dat de afdichtingslaag in het geheel geen percolatiewater mag doorlaten. Op grond van onderzoek van HOEKS en AGELINK (1982) is de verwachting dat natuurlijke materialen, hoewel niet absoluut dicht, deze eis benaderen als de doorlatendheid kleiner is dan $1 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$. Synthetische afdichtingsmaterialen voldoen doorgaans aan het criterium van absolute waterdichtheid.

Voor bovenafdichtingen geeft de overheid wel adviezen maar geen dwingende eisen ten aanzien van de waterdoorlatendheid tenzij de aard van het afval volledige afdichting noodzakelijk maakt. Een belangrijke reductie van de infiltratie van regenwater in het stort is alleen haalbaar als de doorlatendheid van de afdichtingslaag kleiner is dan $1 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ en liever nog kleiner dan $5 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$. Overigens moet men bij het bepalen van de doorlatendheid in het laboratorium rekening houden met het feit dat bij

dergelijk lage doorlatendheden de Wet van Darcy niet meer opgaat (zie par. 3.3.2.)

De bestendigheid van bovenafdichtingen tegen chemische aantasting is van minder belang dan bij basisafdichtingen, die in contact komen met het percolatiewater uit het afvalstort (aantasting door organische verbindingen en anorganische zouten).

Zeer belangrijk bij bovenafdichtingen is de bestendigheid van het afdichtingsmateriaal tegen grote en onregelmatige zettingen. Bovendien moet de afdichtingslaag bestand zijn (of beschermd worden) tegen mechanische beschadiging door plantenwortels en bodemdieren.

Voor een overzicht van verschillende bodembeschermingsconstructies kan hier tevens worden verwezen naar FREDERIKS en HEINIS (1984).

3.3.2. Natuurlijke afdichtingsmaterialen

Zoals reeds eerder door HOEKS en AGELINK (1982) is aangetoond voldoen de in Nederland voorkomende leem- en kleisoorten niet als afdichtingsmateriaal op een stortplaats. Bij optimale verdichting onder de daarvoor benodigde vochtcondities ligt de laagst bereikbare doorlatendheid in de orde van $2-5 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$. Afgezien van het feit of een dergelijke verdichting realiseerbaar is op een stortplaats, blijft ook dan nog de lekkage in de orde van 150 mm.jaar^{-1} .

Om nog lagere doorlatendheden te bereiken moet men de grond mengen met producten als cement, bitumen, bentoniet, waterglas, bepaalde chemicaliën of mogelijk afvalstoffen als vliegashuis of boorgruis. In het laatste geval dient men echter tevens de milieuhygiënische consequenties in beschouwing te nemen.

De doorlatendheid van natuurlijke afdichtingsmaterialen moet vooraf in het laboratorium worden bepaald. De doorlatendheid van een grondmonster wordt doorgaans bepaald door water op het monster te zetten en de hoeveelheid water, die door het monster stroomt, op te vangen en te meten. De doorlatendheid wordt dan berekend volgens de wet van Darcy:

$$Q = k i A \tag{1}$$

waarin: Q = uitstromend debiet ($m^3 \cdot s^{-1}$)
 k = doorlaatfactor ($m \cdot s^{-1}$)
 i = stijghoogtegradiënt
 A = oppervlak van het monster (m^2)

Het uitstromend debiet is hier recht evenredig met de aangelegde stijghoogtegradiënt. Deze stijghoogtegradiënt i wordt berekend als (zie fig. 1):

$$i = \frac{h_1 - h_{ref}}{\Delta z} \quad (2)$$

waarin: h_1 = stijghoogte aan de bovenzijde van het monster (m)
 h_{ref} = stijghoogte aan de onderzijde van het monster (m)
 Δz = dikte van het monster (m)

De stijghoogte h is opgebouwd uit twee componenten, namelijk de drukhoogte (h_d) en de plaatshoogte (h_p). Wat de plaatshoogte betreft wordt een referentieniveau aangehouden, in dit geval de onderkant van het monster. De stijghoogte (h_1) aan de bovenzijde van het monster is dus gelijk aan de drukhoogte ($h_d =$ hoogte waterkolom) plus de plaatshoogte ten opzichte van het referentieniveau ($h_p = \Delta z$). De stijghoogte aan de onderzijde van de kolom (h_{ref}) is gelijk aan de drukhoogte ($h_d = 0$, wegens vrij uitstroming aan de lucht) plus de plaatshoogte ($h_p = 0$, referentieniveau).

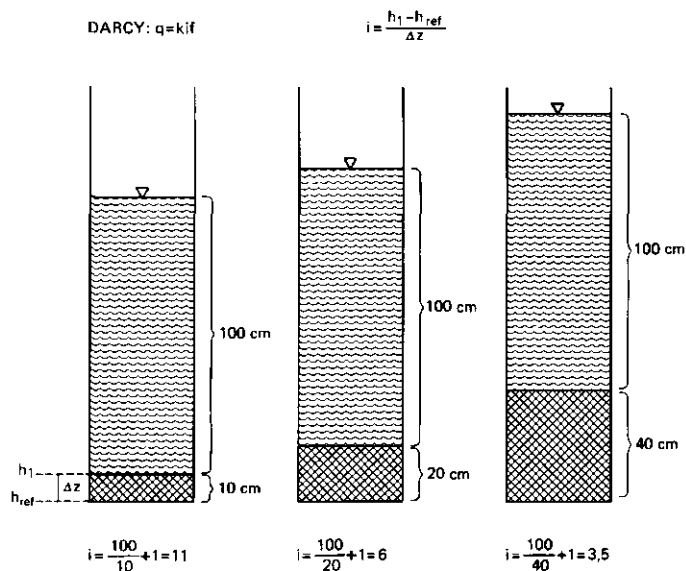


Fig. 1. Effect van de dikte van de afdichtingslaag op de stijghoogtegradiënt (zie tekst voor betekenis symbolen)

De stijghoogtegradiënt i bedraagt dan:

$$i = \frac{h_d}{\Delta z} + 1 \quad (3)$$

De gradiënt neemt dus af met toenemende dikte (Δz) van de afdichtingslaag en afnemende hoogte van de waterkolom. Echter, zelfs al zou $h_d = 0$ zijn, dan blijft de gradiënt $i = 1$, zodat nog steeds lekkage mogelijk is.

Vanwege de geringe doorlatendheid van natuurlijke afdichtingsmaterialen wordt de doorlatendheid vaak bij grote gradiënten ($i = 25$ à 75) gemeten (zie GLAS, 1984). Een probleem is echter dat bij deze lage doorlatendheden de Wet van Darcy niet meer opgaat (SCHMITT, 1983). Dit betekent dat de gemeten doorlatendheid geen constante is, maar afhankelijk is van de aangelegde stijghoogtegradiënt.

GÖDECKE (1980) heeft op theoretische gronden aangetoond dat de flux van water door een grondmonster exponentieel toeneemt met de gradiënt. Pas boven een bepaalde grenswaarde (i_G) neemt de flux volgens Darcy lineair toe met de gradiënt (zie fig. 2).

In zware kleigronden zou deze grenswaarde i_G zelfs in de orde van circa 100 kunnen liggen.

Het niet-Darcy gedrag houdt verband met de krachten waarmee de watermoleculen worden gebonden in capillairen en aan negatief geladen kleioppervlakken (zie ook GLAS, 1984). GÖDECKE (1980) geeft een uitvoerige beschrijving van het verschijnsel en heeft op grond van theoretische beschouwingen formules afgeleid voor de mathematische beschrijving van de niet-Darcy stroming in capillairen.

In het laboratorium wordt de doorlatendheid doorgaans gemeten en berekend volgens de Darcy-vergelijking. Betreft het echter niet-Darcy stroming dan is uit de beschouwingen van Gödecke af te leiden dat de fluxen in het veld (v_{veld}) en de gemeten fluxen in het laboratorium (v_{lab}) zich in het niet-Darcy traject verhouden als:

$$v_{\text{veld}} = v_{\text{lab}} \left(\frac{i_{\text{veld}}}{i_{\text{lab}}} \right)^m \quad (4)$$

De waarde voor m varieert van 1 voor goed doorlatende gronden ($i_G=0$, dus normale Darcy-stroming) tot circa 2 à 3 voor zeer slecht doorlatende gronden (i_G groot, niet-Darcy stroming).

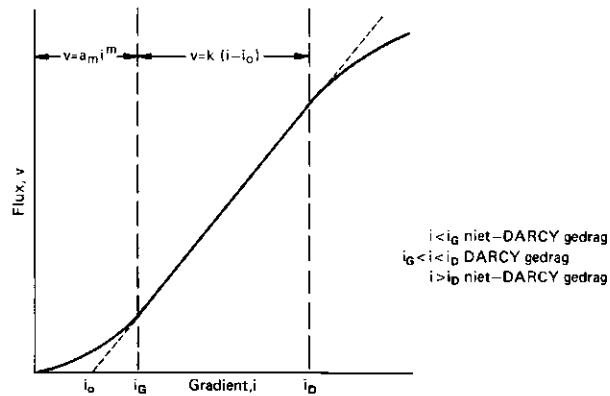


Fig. 2. Schematische voorstelling van de relatie tussen de waterflux (v) en de stijghoogtegradiënt (i). De waterstroming voldoet niet aan de Wet van Darcy bij gradiënten lager dan i_G (wegens binding van watermoleculen, $v = a_m i^m$ met constanten a_m en m) en bij gradiënten hoger dan i_D (wegens turbulentie). In het tussenliggende gebied voldoet de Wet van Darcy ($v = k (i - i_0)$ met k doorlaatfactor)

Dat dit effect van groot belang is moge blijken uit een rekenvoorbeeld: stel, de doorlatendheid in het laboratorium is gemeten bij $i=50$ terwijl in het veld slechts een gradiënt van maximaal $i=5$ optreedt, dan is de flux in het veld 10 à 100 keer lager ($m=2$ à 3) dan op grond van de Wet van Darcy (als $m=1$) mocht worden verwacht.

Voor de praktische toepassing van natuurlijke afdichtingsmaterialen betekent dit, dat de doorlatendheid in het laboratorium moet worden gemeten bij de gradiënten zoals die in het veld voorkomen ($i=1$ à 5). Zo mogelijk zou ook de relatie tussen flux en gradiënt experimenteel moeten worden vastgesteld.

In de literatuur wordt bij het opgeven van doorlatendheden zelden aandacht aan dit niet-Darcy gedrag geschonken en de bijbehorende gradiënt wordt dan ook meestal niet vermeld. Zo lang de metingen zijn uitgevoerd bij gradiënten die vergelijkbaar zijn met de veldsituatie hoeft dit echter niet tot problemen te leiden.

LUTTON et al (1979) en HEIDEMIJ (1981) geven meerdere mogelijkheden aan hoe grond ondoorlatend gemaakt kan worden door bijmenging van allerlei producten. Enkele voorbeelden zullen hier nader worden besproken.

Menging met cement leidt tot doorlatendheden in de orde van $5 - 100 \times 10^{-10}$ m.s⁻¹ bij een cementgehalte van 10 vol. % in het mengsel. In de meeste gevallen blijft de doorlatendheid dus te hoog. Bovendien is het mengsel door verharding moeilijk vervormbaar en breekt gemakkelijk bij onregelmatige zettingen. Deze methode is daarom niet geschikt voor bovenafdichtingen. Omdat cement niet bestand is tegen een groot aantal chemische verbindingen zijn zand-cement mengsels evenmin geschikt voor basisafdichtingen.

Een soortgelijk produkt wordt verkregen na menging met vliegas. Dank zij de puzzolane eigenschappen van vliegas wordt met bijmenging van een kleine hoeveelheid kalk of portland cement een verharding verkregen. De doorlatendheid van het gecementeerde produkt kan een factor 10^3 lager liggen dan het hierbij gebruikte zand. Dit is vooral een gevolg van de dan ontstane korrelgrootteverdeling (menging van fijn en grof materiaal). Overigens heeft dit produkt dezelfde bezwaren als het zand-cement mengsel, dat wil zeggen de doorlatendheid is nog te groot, het produkt is niet bestand tegen zettingen en het wordt aangetast door chemische stoffen.

Zand-bitumen mengsels zijn minder kwetsbaar in geval van zettingen en de waterdoorlatendheid is waarschijnlijk geringer dan bij de zand-cement mengsels. Ze lijken daarom geschikt voor bovenafdichtingen. De bitumen kan overigens wel aangetast worden door chemische stoffen (b.v. organische oplosmiddelen), waardoor deze mengsels minder geschikt kunnen zijn voor basisafdichtingen.

Zand-bentoniet mengsels blijken zowel in laboratoriumproeven als in praktijktoepassingen een goede afdichting te geven. Afhankelijk van de granulaire samenstelling van het zand en de soort bentoniet kan het bentonietgehalte in het mengsel variëren van 5 tot 15 gew. %. De doorlatendheid van het mengsel ligt dan meestal beneden 5×10^{-10} m.s⁻¹. Het materiaal is elastisch en daardoor in staat om zettingen op te vangen, althans zolang de laagdikte niet te dun is en de bentoniet in het mengsel nog zwelcapaciteit over heeft. In verband hiermee is het wenselijk om meer bentoniet te gebruiken dan op basis van het zwelvermogen strikt genomen nodig zou zijn om het water in de poriën tussen de zandkorrels te binden. Het zwelvermogen van enkele bentonietsoorten is weergegeven in tabel 1.

Tabel 1. Zwelvermogen van enkele bentonietsoorten

Bentonietsoort	Zwelvermogen (cm ³ H ₂ O per g)
Wyoming bentoniet	9-12
Geactiveerde bentoniet (met Na behandeld)	6- 9
Europese bentoniet	2- 4

Bij bovenafdichtingen speelt de chemische bestendigheid een ondergeschikte rol. Eén aspect verdient echter aandacht, althans wanneer het natuurlijke afdichtingsmaterialen betreft. De zwelcapaciteit van kleimineralen (b.v. bentoniet) kan sterk teruglopen als de Na-ionen aan het adsorptiecomplex worden omgewisseld tegen Ca-ionen. Het gebruik van kalkhoudende afdekgrond moet daarom worden ontraden. Natuurlijke afdichtingsmaterialen, waarvan de afdichting berust op de zwellings van kleimineralen, worden minder geschikt geacht voor basisafdichtingen omdat de doorlatendheid geleidelijk zou kunnen toenemen onder invloed van de hoge zoutconcentraties in het percolatiewater. Overigens kan bij zand-bentoniet mengsels de verminderde zwellings waarschijnlijk worden gecompenseerd door meer bentoniet aan het mengsel toe te voegen. Bovendien zijn er bentonietsoorten in de handel, die zijn behandeld met polymeren om de uitwisseling van ionen tegen te gaan. Volgens LUNDGREN (1981) verhindert dit echter niet dat er toch enige uitwisseling plaats vindt. Hij vermeldt dat de Na-bezetting van Wyoming bentoniet door behandeling met percolatiewater terugliep van 63% naar minder dan 5%. Bij de met polymeren behandelde bentoniet (Volclay SLS-71) liep de Na-bezetting terug van 78% naar 18%. Behalve de mogelijkheid van ionen-omwisseling bestaat er ook kans dat organische oplosmiddelen de kleiafdichtingslaag aantasten (BROWN and ANDERSON, 1982; ANDERSON et al, 1982).

De zand-bentoniet mengsels lijken goed geschikt voor bovenafdichtingen. Voor basisafdichtingen moet het bentonietgehalte minstens 2-3 x hoger zijn omdat het zwelvermogen van de bentoniet kan afnemen wanneer het in contact komt met percolatiewater (hoge zoutconcentraties, omwisseling van Na tegen andere kationen). Nader onderzoek naar het effect van percolatiewater op de doorlatendheid van zand-bentoniet mengsels is gewenst (zie hfdst. 7).

De afdichtende werking van waterglas, dat meestal via injectie in de bodem wordt gebracht, berust op het feit dat de poriën van de grond worden opgevuld met een gelachtig materiaal, waardoor de doorlatendheid sterk afneemt en waarden kan bereiken van 10^{-9} à 10^{-10} m.s⁻¹ (BOGUSH, 1979; STEFFEN, 1979). Waterglas kan, behalve door injectie op grotere diepte, ook in de grond worden gebracht door het in droge poedervorm door de grond te mengen waarna het wordt bevochtigd en verdicht. Waterglas is slecht bestand tegen zuren en basen en wordt daarom minder geschikt geacht voor afdichtingen onder stortplaatsen (HEIDEMIJ, 1981). Er bestaan geen ervaringen met betrekking tot bovenafdichtingen maar het lijkt aannemelijk dat een grondwaterglas afdichting niet goed bestand is tegen onregelmatige zettingen, omdat dit produkt geen extra zwelcapaciteit heeft zoals de zand-bentoniet mengsels dit hebben.

3.3.3. Synthetische materialen

In het voorgaande is al gebleken, dat de doorlatendheid van een afdichtingslaag bijzonder klein moet zijn en dat slechts enkele natuurlijke materialen, meestal met bijmenging van andere produkten, aan het gestelde criterium kunnen voldoen. Het ligt daarom voor de hand dat synthetische produkten, die doorgaans vrijwel waterdicht zijn, op grote schaal zijn en worden toegepast voor bodemafdichtingen. Een belangrijk punt bij de afweging of natuurlijke dan wel synthetische produkten zullen worden gebruikt voor afdichting is, afgezien van de waterdichtheid van het materiaal, het prijsverschil tussen beide. De grote concurrentie op deze markt heeft echter tot gevolg dat de prijzen van alle produkten inclusief de natuurlijke afdichtingsmaterialen momenteel in dezelfde orde van grootte liggen (1986: circa f 15,- tot f 20,- per m² gelegd). Dit betekent dat bij de afweging andere punten, zoals de duurzaamheid van de materialen op lange termijn en de methode volgens welke de afdichtingslaag onder praktijkomstandigheden kan worden aangelegd, een belangrijke rol gaan spelen. Synthetische afdichtingslagen kunnen worden aangebracht door het afdichtingsmateriaal in vloeibare vorm op de met grond afgedekte stortplaats te spuiten of door in de fabriek geprefabriceerde banen in het veld aan elkaar te lassen.

Vloeibare produkten, die in het veld over het te behandelen oppervlak worden gespoten, zijn bijvoorbeeld bitumen, asfalt-rubber mengsels en vloeibare rubbersoorten. Er bestaan echter zeer weinig ervaringen met betrekking tot de praktische toepassing van dit soort materialen.

Het meest toegepast zijn de geprefabriceerde flexibele membranen, die in het veld als banen worden uitgerold en vervolgens aan elkaar gelast. Voorbeelden zijn: butyl-rubber, polytheen (LDPE en HDPE), polyvinyl chloride (PVC) en verschillende rubber- en polyethyleensoorten (zie HAXO et al, 1979, 1982). In Nederland heeft TNO op grond van door de fabrikanten geleverde produktinformatie aanbevelingen gegeven voor toepassing van deze produkten als basisafdichting (ALGRA en DER KINDEREN, 1984).

In het door HAXO et al (1977, 1979, 1982) uitgevoerde onderzoek werden deze kunststofmembranen blootgesteld aan percolatiewater uit een afvalstort en aan een scala van chemische afvalstoffen. Meerdere materialen bleken te zwellen in contact met vloeistoffen, hetgeen leidt tot verweking van het materiaal, verlies van mechanische sterkte, afname van rekvermogen, toename van doorlatendheid, toename van de gevoeligheid voor biologische aantasting van het polymeer, en andere. De conclusies van dit onderzoek waren:

- voorafgaand aan de keuze van een afdichtingsmateriaal moeten bestendigheidstesten worden uitgevoerd met het afval en het afvalwater waarmee het materiaal in contact zal komen;
- veld- en fabriekslasten zijn van essentieel belang voor de waterdichtheid van een synthetisch membraan en moeten zowel in het laboratorium als in het veld worden getest op lekdichtheid, maar ook op bestendigheid in contact met afval en afvalwater;
- organische afdichtingsmaterialen zoals bitumineuze en polymerische membranen zijn gevoelig voor organische oplosmiddelen en de absorptie van deze stoffen leidt tot aanzienlijke verslechtering van de mechanische eigenschappen van de membranen;
- er zijn momenteel nog te weinig veldervaringen om de correlatie tussen kleinschalige laboratoriumtesten en het gedrag onder veldomstandigheden met zekerheid vast te stellen, vooral de bestendigheid op lange termijn blijft een onzekere factor.

Voor bovenafdichtingen zijn met name de testen met percolatiewater of organische oplosmiddelen minder interessant. Uit het onderzoek van HAXO et al (1979, 1982) blijkt echter dat verschillende materialen ook water absorberen of op de lange duur de weekmakers verliezen, waardoor het materiaal hard en bros wordt. Dit laatste werd vooral waargenomen bij PVC-membranen.

Uiteraard zijn de rek- en trekeigenschappen van het materiaal van belang in verband met zettingen. Deze eigenschappen worden meestal bepaald met behulp van 1-dimensionale trekproeven. Met het oog op de praktische situatie bij bovenafdichting verdient het echter aanbeveling deze proeven zodanig uit te voeren dat het materiaal gelijktijdig in twee richtingen wordt uitgerekt. Het is namelijk gebleken dat materialen, die in één richting een groot rekvermogen hebben, bij tweedimensionale belasting soms zeer snel scheuren (zie ook ALGRA en DER KINDEREN, 1984).

Behalve de geprefabriceerde polymerische membranen zijn er ook met asfalt versterkte membranen, die in het algemeen aanzienlijk dikker zijn (4 à 5 mm) en daardoor beter bestand tegen mechanische beschadigingen. Hoewel de asfaltmaterialen water absorberen en vooral olieachtige stoffen constateerden HAXO et al (1982) geen achteruitgang en geen toename van de doorlatendheden. In organische oplosmiddelen gaat het asfalt echter in oplossing. Een belangrijk aspect bij toepassing van synthetische afdichtingsmaterialen is de betrouwbaarheid van de veldlassen. Niet alleen de lastechniek, maar ook de weersomstandigheden tijdens het lassen kunnen van grote invloed zijn op de kwaliteit van de lassen. Uiteraard dient de las, evenals de folie, bestand te zijn tegen onregelmatige zettingen, ook bij relatief hoge temperaturen (tot 40 à 50°C).

3.4. SELECTIE VAN AFDEKGROND EN DRAINAGESYSTEEM

3.4.1. Algemene eisen

De fysische eigenschappen van de afdekgrond spelen een belangrijke rol bij de vochtvoorziening van de vegetatie en de ontwatering van de afdeklaag. De ontwatering dient zodanig te zijn dat langdurig hoge grondwaterstanden worden voorkomen en dat de kans op oppervlakte-afvoer en erosie gering is. De dikte van de afdeklaag wordt in hoofdzaak bepaald door de bewortelingsdiepte van de vegetatie en de gewenste vochtvoorraad in de afdeklaag om verdrogingsverschijnselen in de zomerperiode zoveel mogelijk te voorkomen. Ter bescherming van de afdichtingslaag zou volstaan kunnen worden met een laag van 30-50 cm, maar met het oog op de vegetatie heeft een dikkere laag van 80-100 cm de voorkeur.

3.4.2. Afdekgrond

De afdekgrond zal een redelijk vochthoudend vermogen moeten hebben. Geschikte gronden zijn humeus zand met een organische stofgehalte van 2-5% of een niet te zware kleigrond. De hoeveelheid beschikbaar vocht (tussen veldcapaciteit en verwelkingspunt) ligt voor deze gronden in de orde van 15-20 vol. %, dat wil zeggen bij een laagdikte van 60 à 75 cm bedraagt de hoeveelheid beschikbaar vocht dan 100-150 mm.

De fysische eigenschappen van de toplaag verdienen bijzonder aandacht, omdat direct na het aanbrengen van de afdeklaag de grond nog niet begroeid is waardoor de kans op oppervlakte-afvoer en erosie erg groot is, vooral op steile hellingen. Voor een berekening van de kans op erosie wordt vaak gebruik gemaakt van de zogenaamde 'Universal Soil Loss Equation' (zie LUTTON, 1982; MINISTERIE VROM, 1987). De in deze vergelijking voorkomende gewasfactor laat zien dat erosie op een onbegroeide grond meer dan 100 x hoger is dan op een met gras begroeide grond. De erosiegevoeligheidsfactor ligt het hoogst voor gronden met veel fijne delen, vooral in de siltfractie, en weinig organische stof. Dit betekent dat de toplaag vooral geen lemig zand of slempgevoelige zavelgrond mag bevatten. De toplaag dient een goede structuur te hebben en bij voorkeur te bestaan uit humeus leemarm-zand. Eventueel kan de erosiegevoeligheid van de toplaag nog verminderd worden toe extra toevoeging van organische materiaal (b.v. compost). Zodra de grond bedekt raakt met een grasvegetatie neemt de kans op oppervlakte-afvoer en erosie snel af. De grasmat zorgt ervoor dat de grond niet dichtslemt en zijn goede structuur behoudt.

Uiteraard speelt de steilheid van de helling een belangrijke rol bij de kans op erosie. Zo is erosie op een helling van 30% circa 15 x groter dan op een helling van 5%.

De verzadigde doorlatendheid van de afdeklaag zou volgens HOEKS en AGELINK (1982) minstens 50 cm.dag^{-1} moeten zijn om verzekerd te zijn van een goede ontwatering van de afdeklaag, aangenomen dat in de afdeklaag een drainage-systeem aanwezig is vlak boven de afdichtingslaag. In dat geval is de kans op langdurige hoge grondwaterstanden in de afdeklaag gering.

Behalve de fysische eigenschappen van de grond zijn ook de chemische eigenschappen van belang, omdat het drainwater zal moeten voldoen aan de normen voor lozing op het oppervlaktewater. Dit aspect verdient vooral aandacht als overwogen wordt om 'afvalgrond' te gebruiken als afdek materiaal.

In dit verband kan men bijvoorbeeld denken aan met olie vervuilde grond die via het 'landfarming' procédé biologisch is gereinigd.

Bij zand-bentoniet afdichtingen is het gebruik van kalkrijke afdekgrond af te raden, aangezien de uitspoeling van Ca-ionen omwisseling van de aan de bentoniet geadsorbeerde Na-ionen tot gevolg kan hebben waardoor het zwelvermogen van de bentoniet terugloopt.

3.4.3. Drainerende zandlaag en drainagesysteem

Voor een goede ontwatering van de afdeklaag is het noodzakelijk om vlak boven de afdichtingslaag een drainagesysteem aan te leggen. De eerste laag grond boven de afdichtingslaag dient daarom goede drainerende eigenschappen te hebben en moet bij voorkeur bestaan uit humusarm, matig grof zand. Om inspoeling van fijne gronddeeltjes uit de bovenlaag in deze zandlaag te voorkomen, moet het verschil in fijnheid niet te groot zijn. LUTTON (1982) geeft hiervoor als criterium, dat de verhouding tussen D_{15} van het filtermateriaal en D_{85} van de bovengrond kleiner dan 4 à 5 moet zijn (D_{15} , D_{85} = diameter, waarbij geldt dat 15% respectievelijk 85% van het materiaal een korreldiameter heeft kleiner of gelijk aan deze diameter). Dit betekent dus dat, wanneer de drainlaag een $D_{15} = 400 \mu\text{m}$ heeft, de D_{85} van de bovengrond niet kleiner mag zijn dan 80-100 μm . Over het algemeen zullen hier geen problemen ontstaan, tenzij de drainlaag zou bestaan uit grind met een zeer hoge D_{15} .

De laag grond boven de afdichtingslaag heeft overigens nog een andere functie, namelijk het beschermen van de afdichtingslaag tegen graafoctiviteiten van bodemdieren en knaagdieren. Hiertoe moet de onderlinge samenhang (cohesie) tussen de zandkorrels gering zijn, zodat eventueel gegraven gangen meteen weer dichtvallen. Dit weerhoudt gravende dieren ervan om in deze laag holen en gangen te graven. Deze bescherming is niet alleen van belang bij zand-bentoniet afdichtingen maar ook bij afdichtingen van synthetisch materiaal.

Beide functies vereisen dus afdekking met humusarm, matig grof zand. Op steile hellingen kan dit cohesieloze zand echter problemen geven vanwege de grotere kans op afschuiving van grond (zie HEIDEMIJ, 1985).

Bij de keuze van drainagematerialen en bij het opstellen van een drainageplan dienen een aantal zaken in het oog te worden gehouden:

- het drainagesysteem moet zoveel mogelijk uit enkelvoudige drains bestaan, omdat dit het onderhoud (doorspuiten) vergemakkelijkt;
- op steile hellingen dienen de drains ongeveer evenwijdig aan de hoogtelijnen te worden gelegd;
- de onderlinge drainafstand kan worden berekend met een door ERNST (1978) ontwikkelde formule, waarbij rekening wordt gehouden met de doorlatendheid van de grond, het ontwateringscriterium en de steilheid van de helling (zie HOEKS en AGELINK, 1982a);
- de kosten voor het drainagesysteem vormen een relatief klein aandeel in de totale kosten van de eindafdekking; gezien het belang van een goede ontwatering is het dus alleszins gerechtvaardigd om iets duurdere en betere materialen te gebruiken, bijvoorbeeld voor het filtermateriaal rond de buizen;
- het drainagesysteem dient zodanig ontworpen te worden dat zo weinig mogelijk doorvoeringen door de afdichtingslaag gemaakt hoeven te worden, dit in verband met het risico van lekkages;
- bijzondere aandacht vergt de scheiding van schoon drainwater en verontreinigd percolatiewater aan de voet van de helling langs de rand van de stortplaats.

Voor uitvoerige informatie over de aanleg van een drainagesysteem op een afdichtingslaag onder het stort wordt verwezen naar een rapport van HEIDEMIJ (1984), waarin informatie wordt gegeven over de lay-out van het drainagesysteem onder een afvalstort, de dimensionering en de te gebruiken materialen en constructies. Veel van deze informatie is ook nuttig en toepasbaar voor drainagesystemen in de afdeklaag op het stort. HEIDEMIJ (1984) doet voor drainage onder het stort de aanbeveling om HPE- of HDPE-ribbelbuizen met een minimale diameter van 80/72 mm te gebruiken met grind of soortgelijke materialen (lavakorrels, slakkengranulaat) als omhullingsmateriaal. Als de filter/beschermlaag bestaat uit grof zand is het wellicht ook verantwoord om de drains te onthullen met synthetisch dun vlies. De dikte van de filter/beschermlaag dient 25-30 cm te zijn. Bij een totale dikte van de afdeklaag van 80-100 cm is de dikte van de bewortelbare bovengrond dan circa 50-75 cm.

3.5. CONSTRUCTIE VAN DE AFDEKLAAG IN DE PRAKTIJK

3.5.1. Funderingslaag

Alvorens de afdichtingslaag kan worden aangebracht moet het afval worden afgedekt met een laag grond om een egaal vlakke ondergrond te krijgen. Meestal zal een laagdikte van 20 à 30 cm voldoende zijn. De laag dient als steunlaag en moet zo dik zijn dat geen scherpe voorwerpen meer door de zandlaag dringen en later de afdichtingslaag beschadigen.

Het is om meerdere redenen wenselijk om bij het opbrengen van de laatste 1 à 2 meter afval al rekening te houden met de eindafdekking. Uiteraard moet in deze laag geen grof vuil meer worden verwerkt. In verband met de afvoer van stortgas onder de afdichtingslaag is het zeer aan te bevelen om in deze laatste afvallaag goed doorlatend materiaal te verwerken. Het verdient aanbeveling om in deze laag een horizontaal gasdrainagesysteem aan te brengen met behulp van geperforeerde buizen, grindbanen of puinbanen. Via dit gasdrainagesysteem kan het gas worden afgevoerd naar verticaal in het stort aangebrachte gasonttrekkingsbuizen.

3.5.2. Afdichtingslaag

Klei en leem

Als men met de bovenafdichting slechts een vermindering van de infiltratie van regenwater wil bereiken zonder te streven naar volledige afdichting dan kan men onder bepaalde voorwaarden gebruik maken van klei of leem als afdichtingsmateriaal (zie fig. 3). Bij het afgraven van de klei of leem moet bijmenging van zand zoveel mogelijk worden vermeden. Op het stort wordt deze klei of leem uitgespreid in een laag van minimaal 25-50 cm dikte en zo goed mogelijk verdicht. Tijdens het aanbrengen zal reeds enige verdichting door het berijden (bulldozers, vrachtwagens) plaatsvinden. Na het aanbrengen van de laag is het gewenst om speciale verdichtingsmachines in te zetten voor een verdere verdichting van de laag (b.v. met een schapewals of bandenwals).



Fig. 3. Constructie van een basisafdichting bestaande uit slecht doorlatende klei (foto CECOS/CER Company, Ohio, USA)

Bij optimale verdichting kan op deze manier de infiltratie worden gereduceerd tot 100 à 150 mm.jaar⁻¹. Bij grotere laagdikte, minimaal 50 cm of meer, kan de infiltratie worden teruggebracht tot minder dan 100 mm.

Overigens blijft het probleem, dat het bereikte effect zeer sterk afhankelijk is van de in het veld te realiseren verdichting.

Een uitzondering wordt gemaakt voor zeer speciale, montmorilloniet-houdende kleisoorten, waarmee het onder bepaalde voorwaarden mogelijk is een praktisch waterdichte laag te maken. In hoofdstuk 7 wordt de toepassing van dergelijke kleien nader besproken.

Bentoniet-mengsels

Streeft men naar meer volledige afdichtingen dan vormen bentonietgrondmengsels een goed alternatief. De menging van grond met bentoniet kan plaatsvinden zowel voor als na het aanbrengen van de laag in het veld. De menging vooraf kan plaatsvinden in een dwangmenger, bijvoorbeeld een betonmixer of een asfaltmenginstallatie (zie hfdst. 4). De menging vooraf zal over het algemeen een homogener mengsel opleveren dan de menging in het veld.

Menging in het veld kan geschieden met normale landbouwwerktuigen (frees, cultivator) of met speciale wegebouwmachines, die worden gebruikt bij de aanleg van wegfunderingen. Bij een in juni 1984 uitgevoerde proef in Rosmalen werden hier goede resultaten mee verkregen (samenwerking NBM en CEBO). De bentonietdosering werd hierbij ingesteld op $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ en na elke menggang werd een bemonstering uitgevoerd. Voor de verdichting van de laag (mengdiepte 25 cm) werd een bandenwals ingezet. Inmiddels zijn reeds praktijkervaringen opgedaan met de constructie van bentonietafdichtingen, namelijk als bovenafdichting bij de VAM in Wijster (menging vooraf) en als basisafdichting onder een kolenopslag en een afvalstort (menging in het veld).

Menging met landbouwwerktuigen vereist volgens LUNDGREN (1981) zeker 5-8 bewerkingsgangen alvorens een redelijke menging wordt verkregen.

Echter ook dan nog is de menging minder homogeen dan bij menging in een dwangmenger.

Als de menging vooraf plaats vindt, wordt na menging het mengsel uitgespreid in een laag ter dikte van 10 à 20 cm (d.i. dikte na verdichting). Bij de aanleg van de proefvelden in Wijster is gebleken dat 10 cm een wel zeer minimale laagdikte is (zie hfdst. 4). Met bulldozers is het nauwelijks mogelijk om een egale dikte van 10 cm te realiseren. Afwijkingen in dikte van $\pm 2,5$ cm zijn onvermijdelijk. Het is daarom aan te bevelen een laagdikte van 20 cm aan te houden.

De bentonietdosering is sterk afhankelijk van de korrelgrootteverdeling van de gebruikte grond (GLAS, 1985; EPA, 1984). Naarmate de grond meer fijne delen bevat kan worden volstaan met een lager bentonietgehalte in het mengsel. EPA (1984) maakt daarbij nog een onderscheidt tussen plastische fijne delen (kleideeltjes) en niet-plastische fijne delen (siltfractie). In figuur 4 is het effect van het gehalte aan fijne delen op de doorlatendheid van grondbentonietmengsels weergegeven (fijne delen = gehalte aan deeltjes $< 74 \mu\text{m}$).

De gewenste bentonietdosering wordt vastgesteld op basis van een doorlatendheidstest in het laboratorium, daarbij rekening houdend met het niet-Darcy gedrag in dit lage doorlatendheidstraject. Hoewel voor sommige grondsoorten de eerdergenoemde grens van $5 \times 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ mogelijk al bereikt wordt met 2 à 4 gew. % bentoniet in het mengsel, lijkt 5 gew. % toch wel een minimum als men nog enige zwelcapaciteit wil overhouden voor het opvangen van onregelmatige zettingen.

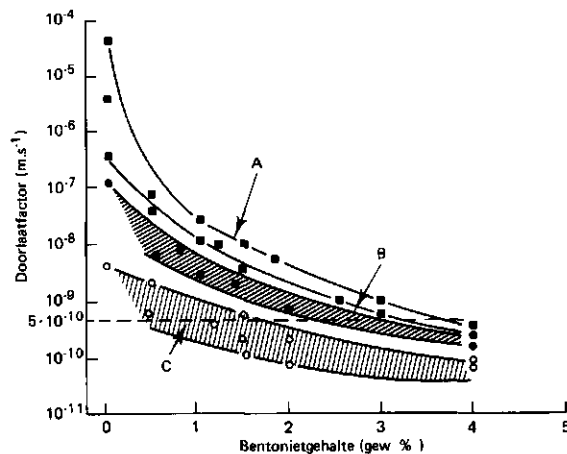


Fig. 4. Effect van het gehalte aan fijne delen op de doorlatendheid van grondbentonietmengsels (naar gegevens van D'APPELONIA, 1980; geciteerd door EPA, 1984). A: coarse sand, B: silty sand, C: clayey silty sand

De verdichting van de laag kan plaatsvinden met een bulldozer (rupsbanden) of met speciale verdichtingsmachines (schapenwals, bandenwals). Naarmate het bentonietgehalte kleiner wordt gekozen, worden hogere eisen aan de verdichting gesteld. Immers hoe lager de dichtheid hoe groter het poriënvolume. Verdichting tot een droog volumegewicht van 1800 kg.m^{-3} is goed te realiseren. Het optimale vochtgehalte voor verdichting ligt bij zandgrond in de orde van 15 gew. %. Naarmate de grond meer afslibbare delen bevat neemt het optimale vochtgehalte voor verdichting toe tot 20-25 gew. % (zie ook LUNDGREN, 1981; LUTTON, 1982). Hoe beter de verdichting gelukt hoe meer zwelcapaciteit blijft er over voor het opvangen van scheuren en onregelmatige zettingen.

Het aanbrengen van een grond-bentoniet afdichtingslaag moet onder droge weersomstandigheden gebeuren. Regen tijdens het werk geeft veel praktische problemen, vooral op hellingen. Door swelling van de bentoniet wordt het oppervlak glibberig en onbegaanbaar voor mens en werktuig. Na het aanbrengen moet de laag daarom zo snel mogelijk worden afgedekt met grond. Bij menging in het veld is men uiteraard nog meer afhankelijk van de weersomstandigheden. Het opbrengen van het droge bentonietpoeder, bijvoorbeeld met een cementdoseermachine uit de wegenbouw, veroorzaakt grote stofwolken en kan daarom alleen bij windstil weer worden uitgevoerd. Overigens kan dit bezwaar van stuiven waarschijnlijk volledig worden ondervangen als de bentoniet met behulp van injecteurs in de grond (i.p.v. op de grond) gebracht zou kunnen worden. De menging in het veld lijkt verreweg het best te lukken

met een landbouwfrees (of een soortgelijke machine uit de wegenbouw), waarbij een mengdiepte van 15-20 cm kan worden aangehouden. Is de grond erg nat dan wordt een minder goede menging verkregen. Ter compensatie kan dan meer bentoniet worden gebruikt (SCHMITT, 1983). De verdichting geschiedt op soortgelijke wijze als eerder is vermeld bij menging vooraf.

Synthetische produkten

De kwaliteit van synthetische afdichtingsconstructies wordt in belangrijke mate bepaald door de kwaliteit van de lasnaden. Een deel van de lasnaden wordt in de fabriek aangebracht. Deze fabrieklassen zijn doorgaans van betere kwaliteit dan de veldlassen.

Kunststoffoliën en bitumenmembranen worden geleverd in baanbreedtes van 5-10 meter en deze banen worden in het veld aan elkaar gelast (fig. 5). De meest toegepaste lasmethoden voor kunststoffoliën zijn heteluchtlassen en heetelementlassen. Bitumenmembranen worden in het veld aan elkaar gelast met hete bitumen.



Fig. 5. Het aan elkaar lassen van banen in het veld bij bovenafdichting met synthetische afdichtingsmaterialen. A: Heet elementlassen van LDPE-folie; B: Lassen van bitumenmembranen met hete bitumen

De laswerkzaamheden moeten bij niet te lage temperaturen en onder droge weersomstandigheden worden uitgevoerd. Overigens zijn niet alle lasmethoden in gelijke mate gevoelig voor natte weersomstandigheden. Bij het uitleggen van vooral dunne kunststoffoliën kan te veel wind problemen veroorzaken in verband met opwaaien van de folie.

Na het leggen en lassen van de afdichtingsconstructie is het noodzakelijk om de lassen te controleren op lekdichtheid. Hiervoor bestaan veel methoden zoals ultrasoon onderzoek, lekdichtheidstesten met vacuüm klok of perslucht, en andere (zie FREDERIKS en HEINIS, 1984).

Bij gebruik van kunststoffoliën dient men in het oog te houden dat op steile hellingen (25-30%) gevaar bestaat voor afschuiving van grond over de afdichtingslaag. Dit is met name het geval op gladde foliën.

De synthetische afdichtingsconstructies moeten, evenals de zand-bentoniet-afdichtingen, zo snel mogelijk worden afgedekt met grond om mechanische beschadiging of kwaliteitsvermindering door zonnestraling te voorkomen.

3.5.3. Afdekgrond

Zoals reeds in par. 3.4.3. is vermeld moet de afdichtingslaag bij voorkeur worden afgedekt met humusarm, matig grof zand om deze te beschermen tegen graafoctiviteiten van bodemdieren en knaagdieren. Deze laag ter dikte van 25 à 30 cm is tevens bedoeld om een goede afvoer van water naar de drains te waarborgen. Deze humusarme laag wordt vervolgens afgedekt met een laag teelaarde ter dikte van 50-75 cm. De genoemde laagdikten gelden na zetting, dat wil zeggen dat bij het opbrengen de lagen zeker 10% dikker moeten zijn dan hier aangegeven.

De afdekgrond moet zo droog mogelijk worden verwerkt om sterke verdichting bij het aanbrengen van de laag te vermijden. Niettemin zal, na het aanbrengen, de bovenlaag moeten worden losgemaakt alvorens gras gezaaid kan worden. Deze grondbewerking kan worden uitgevoerd met een ploeg, cultivator of triltandcultivator. Op hellingen moet deze bewerking langs de hoogtelijnen worden uitgevoerd om te voorkomen dat er in de lengterichting van de helling geulen ontstaan, waarlangs oppervlakkig afstromend water naar beneden kan spoelen. Als de steilheid van de helling niet toelaat dat gebruik wordt gemaakt van trekkers of bulldozers dan zal de grondbewerking moeten worden uitgevoerd met kleinere werktuigen (b.v. met een tuinbouwtrekker) of zelfs met de hand.

3.5.4. Drainagesysteem

In het algemeen zal het niet mogelijk zijn om met grote draineermachines op het stort te werken. Wel kan men met kleinere machines sleuven graven, waarna de drains met de hand worden gelegd. Het is ook mogelijk om de drains uit te leggen op de afdichtingslaag voor dat men de afdekgrond opbrengt (zie fig. 6). Daarmee wordt vermeden dat later nog een drainsleuf moet worden gegraven met kans op beschadiging van de afdichtingslaag.

Uiteraard moet bij het opbrengen van de grond de nodige voorzichtigheid in acht worden genomen om de uitgelegde drains niet te beschadigen.

Op hellingen moeten de drains evenwijdig aan de hoogtelijnen worden gelegd. De onderste 30-40 cm van de drainsleuf moet worden opgevuld met humusarm, matig grof zand (zelfde zand als gebruikt voor de drainerende laag boven de afdichting).

De drains kunnen bestaan uit de normale landbouwdrains met cocosomhulling. Overigens is dit cocosmateriaal niet bestendig op de lange termijn omdat het wordt afgebroken door micro-organismen. Wellicht is het beter de drains te omhullen met dun vlies of filterdoek in combinatie met filterzand of eventueel turf (zie ook par. 3.4.3; HEIDEMIJ, 1984).



Fig. 6. Drainagesysteem op de afdichtingslaag (hier een bitumenmembraan)

Het ontwerp van het gehele drainagesysteem voor een stortplaats van vele hectares verdient bijzondere aandacht. Het drainagesysteem kan eventueel gecombineerd worden met een systeem van greppels en sloten in de afdeklaag. Belangrijk is in ieder geval dat het systeem eenvoudig is van opzet, zodat het gemakkelijk te onderhouden is.

3.5.5. Speciale constructie aan de voet van de helling

Van essentieel belang bij bovendichting is de scheiding van schoon drainwater en vuil percolatiewater uit het stort. Vooral op stortplaatsen, die reeds lang in bedrijf zijn, kan zijdelings percolatiewater uittreden. Ook na volledige afdichting aan de bovenzijde kan deze uittreding van percolatiewater nog lange tijd doorgaan gezien de soms hoge waterstanden in het stort. Op stortplaatsen met een basisafdichting zal het percolatiewater volledig moeten worden opgevangen in een ringsloot of ondergronds riool rond het stortterrein.

Een probleem bij de aanleg van deze 'teenconstructie' is dat de werkomstandigheden vaak verre van ideaal zijn als gevolg van het uittredende percolatiewater. Het maken van waterdichte lassen wordt daardoor bemoeilijkt. Bij het VAM-bedrijf in Wijster is reeds de nodige ervaring opgedaan met dergelijke 'teenconstructies'. Ook hier geldt dat het resultaat beter is en het systeem gemakkelijker is te onderhouden naarmate de constructie eenvoudiger is van opzet.

Meer praktijkervaringen zijn nodig om aan te geven hoe de scheiding van schoon en vuil water het best kan worden gerealiseerd. Een algemeen geldend advies is om het aantal doorvoeringen van drains door de afdichtingslaag tot een minimum te beperken omdat hier in principe een kans op lekkage aanwezig is.

Een voorbeeld van een 'teenconstructie' is gegeven in figuur 7. Een probleem zou kunnen zijn, dat hier in de nabijheid van het ondergrondse riool stortgas ontwijkt in de atmosfeer, waardoor ter plaatse de vegetatie kan afsterven. Andere oplossingen zijn denkbaar, mits de constructie eenvoudig blijft, praktisch is te realiseren en goed controleerbaar blijft. Voor nadere informatie hierover wordt verwezen naar Van Dommelen (VAM-Wijster).

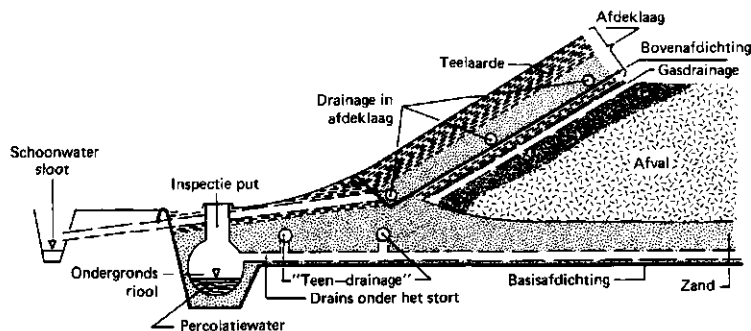


Fig. 7. Een mogelijk ontwerp voor de scheiding van schoon water en percolatiewater aan de teen van het storttalud

3.5.6. Speciale constructies in verband met gasvorming

In praktisch elk afvalstort wordt gas gevormd en ook na aanbrengen van een bovenafdichting zal de produktie van stortgas doorgaan. De gasdruk kan hoog oplopen als het gas niet kan ontsnappen. Onder de afdichtingslaag moet daarom een ontgassingssysteem worden aangelegd, bestaande uit een goed doorlatende laag met bij voorkeur horizontale puin- of grindbanen of een gasdrainagesysteem. Op regelmatige afstanden zal het gas via een verticale ontgassingsbuis, die door de afdichtingslaag naar boven komt, moeten kunnen ontsnappen. Vooral op grotere stortplaatsen kunnen deze ontgassingsbuizen worden aangesloten op een centraal afzuigsysteem en kan het gewonnen gas worden gebruikt voor verwarming van gebouwen, voor aandrijving van motoren en opwekking van electriciteit (zie ook HOEKS en OOSTHOEK, 1981).

3.5.7. Inzaaien en beplanten

Direct na het opbrengen is de afdeklaag erg gevoelig voor erosie, omdat de grond nog onbegroeid is (fig. 8).

In par. 3.4.2. is reeds vermeld, dat de toplaag weinig silt moet bevatten en tamelijk humeus moet zijn om erosie te voorkomen. Eventueel kan extra compost worden toegevoegd. Na de aanleg moet zo snel mogelijk gras worden ingezaaid.

De planning van de werkzaamheden moet zodanig zijn dat uiterlijk omstreeks eind augustus/begin september het gras kan worden ingezaaid. Dit is noodzakelijk om voor de winter nog een redelijke grasmat te krijgen. Als de werkzaamheden onverhoopt toch later in het najaar moeten worden uitgevoerd kan men het beste een mengsel van rogge en gras inzaaien. Rogge is namelijk



Fig. 8. Erosie van de toplaag op een onbegroeide helling

een snel kiemend en snel groeiend gewas, zodat de grond ook dan nog redelijk snel bedekt raakt door de vegetatie. Waarschijnlijk is het gebruik van rogge zelfs in alle omstandigheden aan te bevelen om een snelle bodembedekking te krijgen.

Als de uiteindelijke bestemming van het stortterrein in de recreatiesfeer ligt zullen vroeger of later ook struiken en bomen worden geplant. Aangezien diepwortelende planten schade kunnen berokkenen aan de afdichtingslaag is het in dergelijke gevallen van groot belang dat de drainerende zandlaag vlak boven de afdichtingslaag bestaat uit moeilijk doorwortelbaar humusarm en matig grof zand. Met de aanplant van bomen en struiken kan men overigens beter wachten tot zich een goede grasmat heeft ontwikkeld.

3.6. CONTROLE OP LEKKAGES

Afgezien van de controles op dichtheid van de afdichtingslaag tijdens de constructie, kunnen ook na de aanleg van de eindafdekkingslaag nog controles op lektheid worden uitgevoerd. Een eerste indruk wordt verkregen door meting van de drainafvoer boven de afdichtingslaag. De totale drainafvoer over een jaar zal in de orde van het neerslagoverschot moeten liggen. Daarbij dient uiteraard de neerslag te worden gemeten en moet men de verdamping schatten.

Lekken in de bovenafdichting leiden tot het ter plaatse ontsnappen van stortgas. Bij lekkages van enige omvang zal dit al gauw leiden tot het afsterven van de vegetatie. Vooral in de nazomer en het najaar openbaart dit zich zeer duidelijk. In twijfelgevallen kan een eenvoudige gaslekzoeker goede diensten bewijzen.

Bij zand-bentonietafdichtingen bestaat in principe de mogelijkheid dat door uitdroging in de zomer de laag gasdoorlatend wordt. Onder natte omstandigheden in het najaar kan de laag weer opnieuw dichtzwellen en ondoorlatend worden. Vanwege het gevaar van irreversibele uitdroging moet de afdeklaag zo geconstrueerd worden dat uitdroging van de afdichtingslaag zoveel mogelijk wordt voorkomen. De afdeklaag moet daarom vrij dik zijn en de draineerende zandlaag moet niet kunnen uitdrogen (geen beworteling in deze laag). Een voordeel van bovenafdichting is, dat bij optredende lekkages nog relatief eenvoudig herstelwerkzaamheden kunnen worden uitgevoerd. Bij een basisafdichting onder het stort is dit uiteraard niet meer mogelijk.

3.7. CONCLUSIES

De ervaringen met betrekking tot de praktische uitvoering van bovenafdichtingen op afvalstortterreinen zijn zeer schaars. In de buitenlandse literatuur wordt hoofdzakelijk de afdekking met kleimateriaal vermeld, overigens zonder praktische informatie omtrent de wijze van aanbrengen en verdichten. Ook gegevens omtrent de lekkage van regenwater door dergelijke kleiafdekkingen ontbreken geheel. Naar verwachting zal het effect op de infiltratie van regenwater echter gering zijn. Alleen bij gebruik van zwellende montmorillonieethoudende kleigronden, die goed worden verdicht, zijn waarschijnlijk wel gunstige resultaten te bereiken. Op grond van het geconstateerde niet-Darcy gedrag bij lage gradiënten lijkt het niet uitgesloten, dat sommige natuurlijke afdichtingsmaterialen ook bruikbaar zijn voor basisafdichtingen.

Wel zijn vele publikaties beschikbaar, waarin algemene eisen met betrekking tot afdichtingsmaterialen en afdekgrond staan vermeld. In dit verband kan worden verwezen naar een tweetal publikaties van LUTTON e.a. (1972, 1982), waarin veel nuttige informatie wordt gegeven.

Op grond van eigen ervaringen en de gegevens uit de literatuur kunnen de volgende materialen als geschikt worden aangemerkt voor bovenafdichting van stortplaatsen:

-
- zwellende, montmorilloniehoudende kleigronden: hoewel complete afdichting moeilijk haalbaar lijkt, kan met deze klei een belangrijke reductie van de infiltratie van regenwater worden bereikt;
 - grond-bitumenmengsels: er bestaan nog weinig ervaringen, maar gezien de elasticiteit en mogelijkheid tot vervorming lijkt dit materiaal geschikt voor afdichting;
 - grond-bentonietmengsels: de tot nu toe opgedane ervaringen wijzen er op dat deze mengsels goed bestand zijn tegen zettingen en tevens voldoen aan de gestelde criteria met betrekking tot waterdichtheid;
 - synthetische membranen: vele produkten zijn geschikt uit oogpunt van waterdichtheid, er bestaan echter weinig ervaringen met betrekking tot het effect van zettingen. De materialen zullen in dit verband moeten worden beoordeeld op rek- en trekeigenschappen (bij twee-dimensionale belasting!), elasticiteit en mogelijkheid tot vervorming. Op steile hellingen moeten geen gladde folies worden gebruikt in verband met de kans op afschuiven van de grond.

De afdekgrond moet bij voorkeur worden opgebouwd in twee lagen, waarbij de onderlaag fungeert als drainlaag en tevens de afdichtingslaag moet beschermen tegen mechanische beschadiging door plantenwortels en bodemdieren en tegen uitdroging. De bovenlaag fungeert als bewortelingslaag voor de vegetatie. Om direct na het opbrengen erosie te voorkomen lijkt het verstandig een mengsel van rogge/haver en gras te zaaien, waarbij de rogge/haver, vanwege de snelle kieming en ontwikkeling van het gewas, ervoor zorgt dat op korte termijn de bodem bedekt raakt.

Een punt dat bijzondere aandacht verdient bij het aanbrengen van bovenaf-dichtingen, betreft het drainagesysteem boven de afdichtingslaag. Vooral bij grotere stortplaatsen dient het gehele ontwateringsplan zeer kritisch beschouwd te worden in verband met onderhoud en ongestoorde afvoer van drainwater. Vooral de 'teenconstructie' aan de voet van de hellingen verdient aandacht omdat hier tevens vervuild percolatiewater kan uitreden. Speciale constructies zijn vereist in verband met een ongestoorde afvoer van gas uit het stort. Onder de afdichtingslaag dient daarom een gasdoorlatende laag aanwezig te zijn, welke aansluit op verticaal in het stort aangebrachte gasonttrekkingsbuizen.

4. AANLEG VAN DE PROEFVELDEN EN DAAR- BIJ OPGEDANE PRAKTIJKERVERVARINGEN

4.1. INRICHTING VAN PROEFVELDEN

4.1.1. Lokatie en opbouw van het afvalstort

De proefvelden zijn aangelegd op de oosthelling van stortsectie VI op het VAM-terrein te Wijster (Dr). Op dit gedeelte van het stortterrein is sinds juli 1981 afval gestort.

Het afvalstort is opgebouwd op het oorspronkelijke maaiveld, dat een hoogte heeft van 14,50 m+NAP. Voordat met het storten werd begonnen is het terrein van sectie VI gedraineerd (geribbelde pvc-drain met cocosomhulling en een diameter van 60 mm). De drains liggen op 80 cm minus het oorspronkelijke maaiveld op onderlinge afstanden van 8 m.

Ter plaatse van de proefvelden is het afvalstort versneld opgebouwd in het voorjaar van 1982. Daarbij is extra zorg besteed aan de verdichting van het afval om al te grote en onregelmatige verzakkingen te vermijden. Het afval is daartoe laagsgewijs opgebracht met een bulldozer en vervolgens extra verdicht met een compactor. Daarbij is naar schatting een dichtheid bereikt van 800 kg.m^{-3} .

Bij het opbouwen van het storttalud is een helling aangehouden van ongeveer 1:3. Het stort is opgehoogd tot circa 20 meter boven maaiveld. De helling bleek toen ongeveer 64 meter lang te zijn.

Eind april 1982 was het storttalud gereed. Daarna heeft het gestorte afval nog tot de aanvang van de werkzaamheden (eind september 1982) de gelegenheid gehad om enigszins na te zakken. In september bleek de hoogte van het storttalud 32,70 m+NAP te zijn, dat is dus 18,70 meter boven maaiveld. Er was dus reeds enige zetting opgetreden ($\pm 6,5\%$). De helling van het talud bedroeg toen dus 30%.

Het oppervlak van het talud is afgedekt en min of meer vlak gemaakt met grove compost, waarna de helling is geëgaliseerd met een laag zand van ongeveer 20 cm dikte (fig. 9).

Op de helling zijn vervolgens schuttingen van Eterspanplaten geplaatst (1,25 m hoog) als afscheiding tussen de drie proefvelden. De afmetingen van de proefvelden zijn 60x30 m, het oppervlak van elk proefveld bedraagt dus



Fig. 9. Overzicht van de uitgevlakte helling waarop een laag zand van ongeveer 20 cm dikte wordt aangebracht

1800 m². De aanleg van de proefvelden werd verzorgd door het Aannemingsbedrijf Snitjer BV te Hellum en vond plaats in de periode 23 september - 5 november 1982.

4.1.2. Afdichtingsmaterialen

Op de met zand geëgaliseerde helling zijn vervolgens de afdichtingslagen aangebracht. Hiervoor zijn de volgende materialen gebruikt:

- Hypofors (proefveld 1)

Hypofors is een flexibel, waterdicht membraan, bestaande uit sterk nylonweefsel dat samen met een polyester folie aan beide zijden is gecoat met bitumen (zie ook par. 4.2.). De hier gebruikte mat was 4 mm dik en werd geleverd en gelegd door Hypofors VOF in Zaltbommel.

- Bentoniet-zand mengsels (proefveld 2 en 3)

Bentoniet is een kleiprodukt afkomstig uit de Amerikaanse staat Wyoming. De naam is ontleend aan de eerste vindplaats 'Ford Benton'. De afdichtende werking berust op het sterke zwelvermogen van de bentoniet. Door opname van water kan het materiaal opzwellen tot 12 keer het eigen gewicht. Bij menging met zand worden daardoor de poriën tussen de zandkorrels vrijwel volledig opgevuld, waardoor een zeer slecht doorlatend materiaal ontstaat. De hier gebruikte bentoniet is geleverd door CEBO-

Holland BV te IJmuiden, die ook adviezen heeft gegeven met betrekking tot de menging met zand, het aanbrengen en verdichten van het mengsel op de proefvelden en de controle van de laagdikte (zie ook par. 4.3).

Het zand, waarmee de bentoniet is gemengd, is afkomstig uit een zandafgraving te Zwiggelte. De granulaire samenstelling van het zand werd als volgt opgegeven:

< 63 μm	4,9%
63 - 180 μm	54,2%
180 - 500 μm	39,4%
500 - 1300 μm	0,7%
1300 - 2000 μm	0,2%
> 2000 μm	0,6%

Het zand is vrij goed gesorteerd, ruim 93% heeft een korrelgrootte tussen 63 en 500 μm .

Op proefveld 2 is een zand-bentoniet mengsel in een mengverhouding 100:10 aangebracht in een laagdikte van 10 cm. Voor proefveld 3 is een lagere mengverhouding gekozen, namelijk 100:7½, maar de laagdikte op dit veld bedroeg 20 cm.

In figuur 10 is te zien, dat de onderzijde van de drie proefvelden is afgedicht met een baan Hypofors ter breedte van 5 meter. Deze baan ligt over de breedte van het veld, schuin opstaand tegen de onderrand en aansluitend op de afvoergoot voor opvang van over het oppervlak afstromend water.

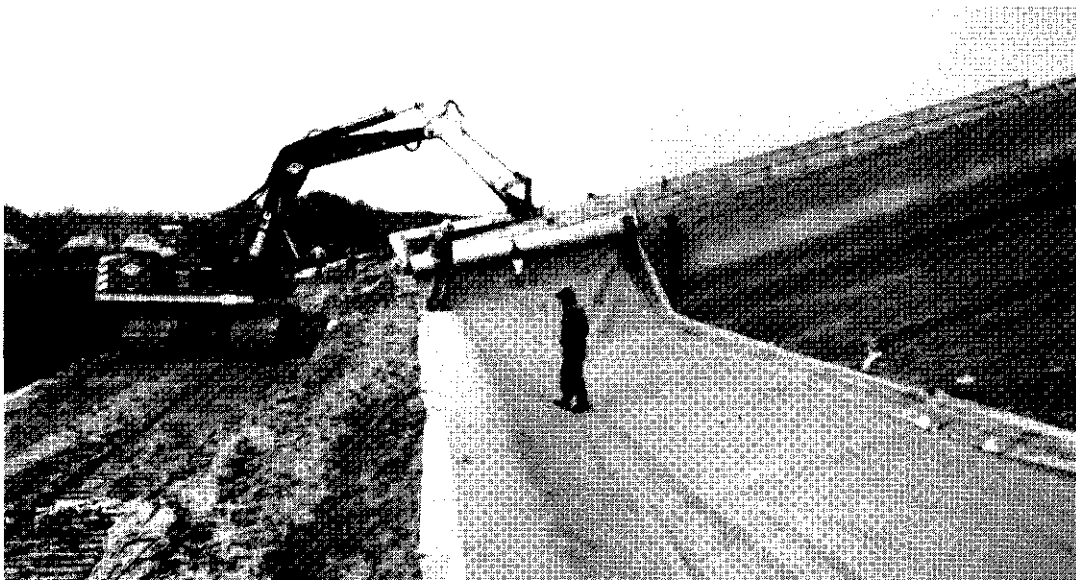


Fig. 10. Afdichting van de onderzijde van de drie proefvelden met een 5 m brede baan Hypofors

Op proefveld 1 is deze baan met een overmaat hete bitumen vastgelast aan de Hypofors-afdichting op het veld. Op de twee andere proefvelden is het afdichtingsmateriaal zand-bentoniet tot ruim (± 1 m) op de onderste Hypofors-baan aangebracht. Gezien de helling mag worden aangenomen dat er geen gevaar voor lekkage bestaat ter plaatse van de aansluiting van de zand-bentoniet laag op de onderste Hypofors-baan.

In elk proefveld is aan de onderzijde een draindoorvoer gemaakt met behulp van een dichte buis. Het gat, waar de buis doorsteekt, is vervolgens rondom afgewerkt met hete bitumen zodat geen lekkage kan optreden.

4.1.3. Bovengrond en drainagesysteem

De afdekgrond is afkomstig uit een zandafgraving van de fa. Beugel bij Beilen. In 1980 is deze firma hier begonnen met de afgraving. De teelaarde, inclusief de onderliggende venige laag, werd opzij gezet in depot en wordt door de firma afgeleverd als 'zwarte grond'. Aanvankelijk werd afdekgrond aangevoerd uit depot (gehele proefveld 3, bovenste helft van proefveld 2 en boven aan de helling van proefveld 1 nog een klein gedeelte). Deze grond is zeer humusrijk (bijna venig) zoals blijkt uit de analyse in tabel 2.

Aangezien er onvoldoende grond in depot voorradig was, moest later grond worden bijgegraven. Deze grond was natter en gaf meer problemen bij de verwerking op het veld. Daarom besloot de aannemer om bij het afgraven iets meer zand bij te mengen. Later bleek dat het bijgemengde zand sterk lemig was. Dit is waarschijnlijk de belangrijkste reden, waarom later met name op veld 1 en in mindere mate ook op veld 2 erosie is opgetreden.

Totaal is circa 1 meter zwarte grond op de afdichtingslaag aangebracht. In de afdekgrond is juist boven de afdichtingslaag een drainagesysteem aangelegd. In elk proefveld liggen vier drains over de breedte van het veld op onderlinge afstanden van 15 meter (fig. 11). De drains bestaan uit geribbelde pvc met een omhulling van polypropyleen en een diameter van 60 mm. De drains liggen onder afschot van 1 cm per meter en zijn aan de zijkant van

Tabel 2. Granulaire samenstelling en verzadigde doorlatendheid van de afdekgrond

Organische stof (gew. %)	Granulaire samenstelling (Gew. % van de minerale delen)					Doorlaatfactor (cm.dag ⁻¹)
	< 2	2-16	16-50	50-210	> 210 μ m	
25,1	7,1	4,2	10,7	54,7	23,3	361

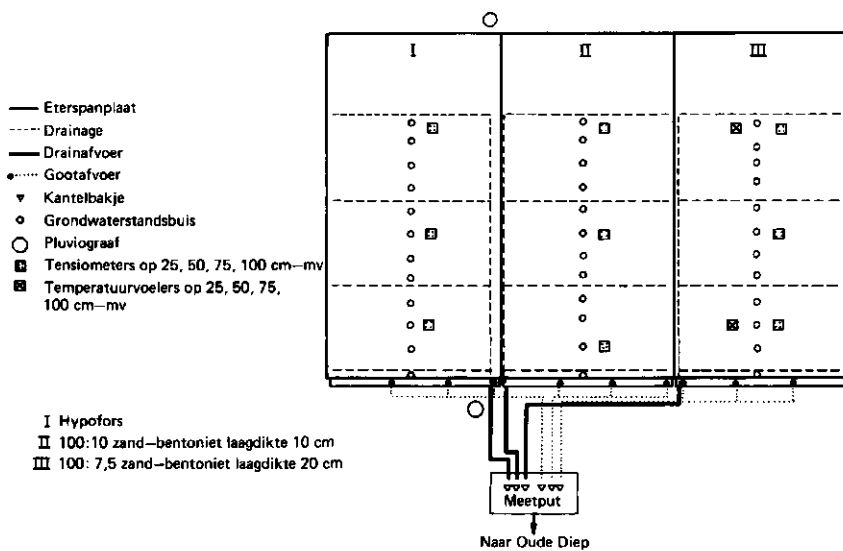


Fig. 11. Bovenaanzicht van de proefvelden met meetopstellingen en drainage-systeem

elk veld aangesloten op een hoofddrain in de lengterichting van het veld. Deze hoofddrain mondt onderaan de helling uit in de gesloten buis die door de Hypofors-afdichting steekt en in de meetput uitkomt.

De onderste drain is afgedekt met filterzand om hier een optimale afvoer van water te garanderen. Bij de hoger op de helling gelegen drains is de drainsleuf opgevuld met de uit de sleuf komende grond. Hier is geen extra filtermateriaal aangebracht rond de drain.

Vóór de aanleg van de proefvelden is langs de teen van het afvaltalud een drain aangelegd die er voor moet zorgen dat zijdelings uit het stort tredend perkolatiewater gemakkelijk kan worden afgevoerd. Daarmee wordt voorkomen dat er water accumuleert onder de proefvelden en aan de onderzijde druk uitoefent op de aansluitende laag.

Onder elk veld is bovendien onder de afsluitende laag een 30 meter lange drainbuis aangelegd. Deze drain ligt langs de helling op het oorspronkelijke afvaltalud en is bedoeld voor afvoer van stortgas dat anders mogelijk zou accumuleren onder de proefvelden. De bovenste 10 meter van deze 'ontgassingsbuis' is als gesloten buis uitgevoerd. Eventueel kan hier de gasdruk onder de afdichtingslagen worden gemeten.

4.1.4. Meetinstrumenten en inrichting meetput

Een van de belangrijkste gegevens voor het onderzoek is de afvoer van drainwater uit de proefvelden. Onder aan de helling is daarom een meetput ingericht waarin de verzamel drains van de drie proefvelden uitmonden. Ook het regenwater dat over het grondoppervlak afstroomt, wordt onder aan de helling opgevangen in een goot en afgevoerd naar deze meetput.

In de meetput worden de afvoeren gemeten met zogenaamde kantelbakken (bakinhoud 1 ltr, mechanische telling van het aantal kantelingen).

In elk van de proefvelden zijn op de helling 12 grondwaterstandsbuizen geplaatst (fig. 11), waarbij het filter zich juist boven de afsluitende laag bevindt. Voor het meten van de vochtspanning zijn op vier plaatsen op de helling tensiometers aangebracht op diepten van 25, 50, 75 en 90 cm minus maaiveld. In proefveld 3 zijn bovendien nog op twee plaatsen temperatuurvoelers geplaatst op diepten van 25, 50, 75 en 90 cm minus maaiveld.

De regenmetingen zijn uitgevoerd met 1,20 meter hoge zelfregistrerende regenmeters. Ingraven van deze meters, wat voor een goede meting eigenlijk noodzakelijk is, heeft op een afvalstort praktische bezwaren of is zelfs onmogelijk. Eén regenmeter is onder aan de helling geplaatst, de andere meter staat boven op het stort direct naast het proefveld. De meetgegevens zijn vergeleken met de regenmetingen bij het kantoor op het VAM-terrein en met regenmetingen op het Biologisch Station in Wijster.

4.2. ERVARINGEN MET BETREKKING TOT DE TOEPASSING VAN HYPOFORS

4.2.1. Produkt-informatie

Hypofors is een flexibel waterdicht membraan, bestaande uit een sterk nylon weefsel (de maaswijdte van de wapening: $1/6 \times 1/6 \text{ cm}^2$) dat samen met een polyester folie aan beide zijden is gecoat met vloeibare geblazen bitumen. Hierdoor ontstaat een membraan met zeer goede sterkte- en rekeigenschappen (treksterkte ca. 30 kN/m, rek tot 20%).

Hypofors wordt geproduceerd in banen van 5 meter breed en al naar gelang de dikte 50 à 100 m lang, geleverd op rol. De hier gebruikte mat was 4 mm dik en 60 meter lang. Het oppervlak wordt tijdens de fabricage bestrooid met zand om kleven op de rol te vermijden. Het oppervlak is hierdoor ruw waardoor de kans op afschuiven van grond op een helling gering is.

Voor het aan elkaar lassen van de banen is een strook schone gladde bitumen nodig. Voordat de mat in de fabriek wordt bestrooid met zand, wordt daarom aan beide zijden een strook van 50 cm afgeplakt met poly-ethyleen, dat vlak voor het lassen in het veld wordt verwijderd.

De Hypofors-afdichting is geleverd door Hypofors VOF in Zaltbommel die ook de aanleg op het proefveld verzorgde. Hypofors-afdichtingen worden veelvuldig toegepast, ondermeer voor basisafdichtingen bij opslag van havenslib, vervuilde grond, vliegias en huisvuil. Het materiaal is ook reeds toegepast voor bovenafdichting op een stortplaats met chemisch afval. Volgens de leverancier hebben diverse proeven met het materiaal uitgewezen dat Hypofors de volgende eigenschappen heeft:

- het is bestendig tegen verontreinigd lekwater;
- het is gemakkelijk te leggen en te lassen, met grote zekerheid ten aanzien van de dichtheid van de veldlassen;
- het is bestand tegen plantewortels en groeipunten;
- het is in staat om spanningen door zettingsverschillen van de ondergrond op te vangen, zonder dat de waterdichtheid in gevaar komt.

4.2.2. Eisen ten aanzien van de ondergrond

De ondergrond op de helling is zo goed mogelijk vlak gemaakt door egalisatie met een circa 20 cm dikke zandlaag. Er mogen geen uitstekende punten in voorkomen, omdat hierdoor beschadiging van de Hypofors-mat zou kunnen optreden.

Hoewel volgens informatie van de leverancier Hypofors in staat is om gelijkmatige zettingen van de ondergrond te kunnen opvangen, is het wenselijk om het onderliggende afvalstort zo goed mogelijk te verdichten om al te grote zettingen te voorkomen. Dit is hier gedaan door het afval laagsgewijs te verdichten met behulp van een compactor.

Aan de helling worden geen speciale eisen gesteld. Ook op steile hellingen kan de Hypofors-afdichting zonder al te veel problemen worden aangelegd.

4.2.3. Het uitrollen en lassen van de Hypofors-banen

Het materiaal is aangevoerd op rollen. De 5 meter brede banen zijn uitgerold met behulp van een legframe, dat is bevestigd aan een hydraulische kraan. Op het proefveld zijn de banen van boven naar beneden uitgerold in de lengterichting van het veld. De laatste strook langs de scheidingswand

is gelegd door de kraan aan de andere kant van de schutting naar beneden te laten rijden. Dit uitrollen van de banen verliep probleemloos.

De baan, die beneden aan de helling in de breedte langs alle drie de proefvelden is gelegd, gaf wat meer problemen, omdat deze baan schuin oploopt tegen de onderrand van het proefveld (zie ook fig. 10).

Het aanbrengen van een Hypofors-afdichting moet plaatsvinden bij droog weer. De reden hiervan is, dat het aan elkaar lassen van de banen alleen bij droog weer goed lukt. Bij regen kan de waterdichtheid van de las niet worden gegarandeerd.

Na het uitrollen van de banen wordt de poly-ethyleen strook van de 50 cm brede overlap verwijderd. Vervolgens wordt deze overlap verhit met een brander om deze watervrij te maken. Op de warm gemaakte overlap wordt nu een overmaat hete bitumen gegoten, waarna de flappen op elkaar worden gebracht en met de voeten worden aangedrukt. Door de overmaat bitumen worden eventuele plooiën in de las goed opgevuld.

Door de Hypofors-banen op deze wijze aan elkaar vast te lassen, wordt een zogenaamde glijlas verkregen, waarbij volgens de leverancier de banen niet star met elkaar zijn verbonden, maar ter plaatse van de las over elkaar kunnen schuiven zonder verlies van waterdichtheid.

Hoewel dit steekproefgewijs soms wel wordt gedaan, is hier geen controle op dichtheid van de las uitgevoerd. De brede overlap plus de overmaat bitumen garanderen echter een goede afdichting.



Fig. 12. Overzicht van het Hypofors-veld

Ter plaatse van de scheidingswand is een 1 meter brede strook Hypofors voor de ene helft met een overmaat hete bitumen vastgeplakt op de laatste baan, die tegen de scheidingswand ligt, terwijl de andere helft (50 cm breed) verticaal tegen de schutting omhoog is gezet en daar is vastgeplakt met bitumen (fig. 12).

4.2.4. Kosten

De kosten het hier geleverde 'Hypofors NF 3000' bedroegen ruim f 19,- (excl. BTW) per m² inclusief leggen en lassen. Daarvoor is geleverd een mat van 4 mm dik, in banen van 5 meter breedte en 60 meter lengte en met een treksterkte van 30 kN/m.

4.3. ERVARINGEN MET BETREKKING TOT DE TOEPASSING VAN BENTONIET

4.3.1. Produkt-informatie

Bentoniet is een drie-lagen-aluminium silicaat klei met de mineralogische naam montmorilloniet. Voor de afdichting van de proefvelden is gebruik gemaakt van de natrium variant, die uitsluitend wordt aangetroffen in de Verenigde Staten, met name in de staten Wyoming, South Dakota en Montana. De op de proefvelden gebruikte bentoniet is afkomstig uit Wyoming en is geleverd door CEBO HOLLAND BV te IJmuiden.

In de Verenigde Staten zijn ook voor het eerst methoden ontwikkeld om de bodem onder stortplaatsen af te dichten met bentoniet. Dit bleek uiterst economisch en goed controleerbaar te kunnen worden uitgevoerd. Alvorens met het storten te beginnen worden de bodem en de taluds van het stortgat afgedekt met een 15 tot 25 cm dikke laag zand/bentoniet mengsel (mengselverhouding bentoniet : zand = 1:3 tot 1:10). Bij een daartoe geschikte ondergrond kan eventueel de uitgestrooide bentoniet met behulp van een frees door de bovenlaag van de grond worden gemengd. Aansluitend wordt de zand-bentoniet laag verdicht en afgedekt met een laag minerale grond van minstens 20 cm dikte.

De afdichtende werking berust op het zwelvermogen van de bentoniet. In het algemeen ontlenen kleimineralen hun zwelvermogen aan het feit, dat in aanraking met water de H₂O-moleculen zich tussen de kleiplaatjes, die in droge toestand evenwijdig zijn gerangschikt, dringen. De klei zwelt daardoor en

bij bentoniet wordt dit nog versterkt, doordat de H_2O -moleculen in de ruimten tussen de kristaleenheden kunnen dringen.

Het zwelvermogen wordt mede bepaald door de kationbezetting van het kleimineraal. Zo is het zwelvermogen van een Na-bentoniet aanzienlijk groter dan van een Ca-bentoniet. Het zwelvermogen van de Amerikaanse bentoniet is zeer groot. Het materiaal kan tot 12 keer het eigen gewicht opzwellen.

Europese bentoniet heeft een veel geringer zwelvermogen omdat het gewonnen wordt als Ca-bentoniet. Na behandeling met Na blijft het zwelvermogen toch nog 2x kleiner dan dat van de Amerikaanse bentoniet.

De doorlatendheid van een zand-bentoniet mengsel is primair afhankelijk van de mengverhouding. Uit onderzoek van HOEKS en AGELINK (1982) en HÄNSEL (1982) blijkt dat de doorlatendheid exponentieel afneemt bij toenemend bentonietgehalte. Verder speelt uiteraard de soort bentoniet en ook de granulaire samenstelling van het zand een rol. In laboratoriumonderzoek bleek, dat met bentoniet-zand mengsels ruim kon worden voldaan aan de eerder gestelde eis dat de verzadigde doorlatendheid kleiner dan $0,05 \text{ mm.dag}^{-1}$ ($\approx 5 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$) moet zijn (HOEKS en AGELINK, 1982).

4.3.2. Eisen te stellen aan de materialen

Hoewel natuurlijke Na-bentoniet beter bestand is tegen omwisseling met Ca-ionen dan de kunstmatige Na-bentoniet (geactiveerde Europese bentoniet) is uit vooronderzoek op het CEBO-laboratorium in IJmuiden gebleken dat door menging van bentoniet met kalkhoudende vliegias de Na-ionen vrij snel worden omgewisseld tegen de Ca-ionen uit de vliegias. De bentoniet verliest daardoor een belangrijk deel van zijn zwelvermogen. Bij deze bentoniet-vliegias mengsels trad vrijwel onmiddellijk lekkage van water op. Hieruit kan worden geconcludeerd dat menging van Wyoming bentoniet met kalkrijk zand moet worden vermeden. Ook de afdekgrond boven de zand-bentoniet laag moet bij voorkeur geen vrije kalk bevatten, om de kans op omwisseling van Na tegen Ca zo klein mogelijk te houden.

De menging van bentoniet met het hier gebruikte 'woudzand' uit de zandafgraving te Zwiggelte (zie granulaire samenstelling in par. 4.1.2.) bleek bij onderzoek in het laboratorium goed te voldoen. Na vooronderzoek op het CEBO-laboratorium en het ICW-laboratorium is besloten één proefveld af te dichten met een mengsel met een verhouding bentoniet : zand = $7\frac{1}{2}$:100 bij een laagdikte van 20 cm (proefveld 3) en één proefveld met een mengsel met een verhouding bentoniet : zand = 10:100 bij een laagdikte van 10 cm

(proefveld 2). Omgerekend naar hoeveelheden bentoniet per m^2 betekent dit bij een geschat volumegewicht van 1600 kg.m^{-3} een hoeveelheid van ongeveer 16 kg.m^{-2} op proefveld 2 en ongeveer 24 kg.m^{-2} op proefveld 3.

4.3.3. Methode van menging

Na overleg tussen CEBO-HOLLAND en Aannemingsbedrijf Snitjer is besloten om het zand en de bentoniet te mengen in de asfaltinstallatie van de fa. Snitjer in Wezuperbrug (fig. 13). Naar verwachting zou op deze wijze het mengsel homogener zijn dan wanneer de bentoniet in het veld zou worden uitgestrooid op de zandlaag en daarna met een frees zou worden ingewerkt. Voor de menging in de asfaltinstallatie zijn de zandzeven uit de zeefkast verwijderd omdat afwegen van fracties op korrelgrootte niet nodig was. De bentoniet is op dezelfde wijze toegevoegd als de vulstof bij de fabricage van asfalt.

Al spoedig bleek dat de zandtoevoer via de zeefkast en de trommel verstopt raakte. Hoewel het zand slechts een vochtgehalte had van 2 à 3%, bleek dit toch nog te nat te zijn. Daarom werd besloten om via verhitting van de trommel het zand te drogen bij circa 100°C . Omdat droog zand en poedervormige bentoniet zich moeilijk laten mengen moest vervolgens weer water worden ingespoten tijdens het mengen. Via drie toevoerslangen werd water in de



Fig. 13. Asfaltinstallatie van de fa. Snitjer te Wezuperbrug waar de menging van zand-bentoniet plaats vond

menger gespoten. In de menger werd het mengsel voor proefveld 3 (laagdikte 20 cm, vereiste mengverhouding bentoniet : zand = 7,5:100) als volgt samengesteld:

750 kg droog zand (100°C)

57,5 kg bentoniet

± 50 kg ingespoten water

De mengtijd was ongeveer 70 seconden en moest met de hand worden geregeld. Als door bepaalde omstandigheden de mengtijd langer duurde, nam ook de hoeveelheid water in het mengsel toe, omdat de watertoevoer niet automatisch doseerbaar was. Het gevolg was, dat er grote verschillen in vochtgehalte ontstonden. Bovendien werden in het mengsel veel kleine kluitjes bentoniet van 2 à 3 mm grootte aangetroffen. Deze moesten tijdens het mengen zijn gevormd omdat de bentoniet kluitvrij is aangevoerd.

Op advies van CEBO HOLLAND is, voordat werd begonnen met het mengsel voor proefveld 2, de watertoevoer geautomatiseerd. Door middel van een pomp met tijdschakelaar kon nu de ingespoten hoeveelheid water (via de bitumenpijp) worden geregeld. In verband met de swelling van het bentoniet werd het charge-gewicht teruggebracht naar 600 kg zand in plaats van 750 kg.

Het mengsel voor proefveld 2 (laagdikte 10 cm, vereiste mengverhouding bentoniet : zand = 10:100) werd nu als volgt samengesteld:

600 kg droog zand (100°C)

60 kg bentoniet

75-80 kg water

Het mengsel was nu veel homogener. Na 15 seconden droog mengen werd de watertoevoer geopend en werd nog eens 60 seconden gemengd. Dit mengsel voldeed beter, doordat op deze wijze alle materialen op hun juiste hoeveelheid werden gedoseerd.

Dat de mengverhouding vrij precies is te regelen in een asfaltinstallatie blijkt ook uit de granulaire analyse van een monster uit proefveld 3 (zie tabel 3). De vereiste verhouding bentoniet : zand moest zijn 7,5:100, dat wil zeggen dat het bentonietgehalte in het mengsel 7,0 gew. % bedraagt.

Volgens de analyse van het Grond- en Gewaslaboratorium in Oosterbeek bedraagt de lutumfractie 6,8%.

Aangezien het zeer goed gesorteerde woudzand praktisch geen lutum bevat, bestaat deze lutumfractie hier uit de bijgemengde bentoniet.

Tabel 3. Granulaire samenstelling van een mengmonster van de afdichtingslaag op proefveld 3 (bentoniet: zand = 7,5:100)

Fractie (in μm)	Gew. procenten van minerale delen	Benaming (vgl. Stiboka)
0- 2	6.8	lutum (= bentoniet)
2- 50	3.7	silt
50- 105	14.6	uiterst fijn zand
105- 150	24.7	zeer fijn zand
150- 210	30.4	matig fijn zand
210- 420	18.6	matig grof zand
420-1700	1.2	zeer grof zand

Niettemin is op de twee proefvelden meer bentoniet verbruikt dan aanvankelijk was voorzien. Berekend was dat zou worden verbruikt (geschat volumegewicht zand: 1600 kg.m^{-3}):

- op proefveld 2:		
1800 m^2 à 16 kg.m^{-2} =		28,800 ton
- op proefveld 3:		
1800 m^2 à 24 kg.m^{-2} =		<u>43,200 ton</u>
	totaal	72,000 ton
Geleverd door CEBO		87,040 ton
Meerverbruik		15,040 ton
Af: restant in silo		<u>4,040 ton</u>
Extra verbruikt op de proefvelden		11,000 ton

Aangezien de mengverhouding vrij nauwkeurig kan worden ingesteld en ook de granulaire analyse bevestigt dat hier weinig afwijkingen inzitten (max. afwijking mogelijk 2,5 ton op 72 ton), moet de hogere dosering vooral worden gezocht in een hoger volumegewicht van het mengsel na verdichting in het veld.

Naar schatting, en gezien de korrelgrootteverdeling van het woudzand is dit aannemelijk, ligt het volumegewicht van het zand na verdichting in de orde van 1850 kg.m^{-3} . Aannemend dat de laagdikten op het veld inderdaad gemiddeld 10 respectievelijk 20 cm zijn geweest, betekent dit een bentonietverbruik van $18,5 \text{ kg.m}^{-2}$ op veld 2 en $27,75 \text{ kg.m}^{-2}$ op veld 3. Vergeleken met de eerste berekening betekent dit een meerverbruik van ruim 11 ton.

4.3.4. Aanbrengen van de afdichtingslaag in het veld

Het zand-bentoniet mengsel werd met vrachtwagens aangevoerd op de proefvelden 2 en 3. De vrachtwagens daalden op eigen kracht de helling af, maar de bulldozer moest er regelmatig aan te pas komen om ze weer de helling op te trekken. Overigens ontstond hierdoor nogal wat spoorvorming, waardoor het soms moeilijk was om overal een gelijkmatige laagdikte te realiseren. Het mengsel werd met behulp van de bulldozer, en later ook een hydraulische kraan, over de helling verdeeld. Regelmatig werden oneffenheden met een schep bijgewerkt. Door verhitting van het zand in de asfaltinstallatie was het mengsel nog behoorlijk warm toen het op het veld aan kwam (fig. 14). Door het veelvuldig heen en weer rijden met de bulldozer werd de laag goed vastgereden. Nadat de vereiste dikte was bereikt, is de laag verder verdicht door met de hydraulische kraan de helling op en af te rijden. Onder de druk van de rupsbanden bleek het materiaal goed te worden verdicht (fig. 15).

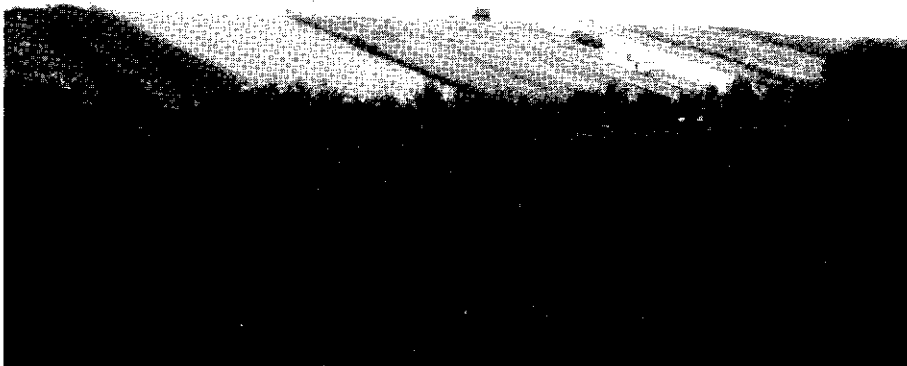


Fig. 14. Verdeling van het zand-bentoniet mengsel over de helling met behulp van een bulldozer

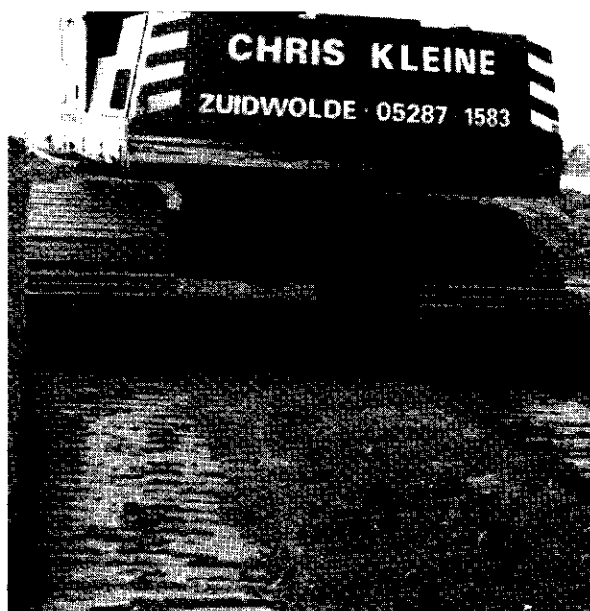


Fig. 15. Verdichten van het zand-bentoniet mengsel met behulp van rupsvoertuigen

De dikte van de opgebrachte laag werd uiteraard regelmatig gecontroleerd. Dit gebeurde steekproefsgewijs met behulp van een gutsboor. Het aanbrengen van de 20 cm dikke laag bleek goed uitvoerbaar te zijn, hoewel er wel secuur moet worden gewerkt. Afwijkingen in dikte van 2,5 cm zijn niet te vermijden. Nauwkeurige controle tijdens het werk is vereist. De verdichting met de bulldozer lukte uitstekend, zij het dat het veranderen van rijrichting zoveel mogelijk moet worden vermeden.

Het aanbrengen van de 10 cm dikke laag gaf meer problemen. Het verdelen van het mengsel over de helling bleek alleen goed mogelijk met de hydraulische kraan. Verder is veel handwerk verricht om een zo egaal mogelijke laagdikte te krijgen. Bij controle bleken de afwijkingen in dikte soms zeer groot te zijn (2-15 cm). Door de intensieve controle en het daarna bijwerken van de geconstateerde afwijkingen ligt de uiteindelijke laagdikte naar schatting tussen 7 en 13 cm. Bij dergelijke dunne lagen is het met de hier gebruikte zware machines moeilijk om een gelijkmatige dikte te realiseren.

4.3.5. Effect van weersomstandigheden

Nog meer als bij de aanleg van Hypofors geldt hier de voorwaarde dat er bij de aanleg van een bentonietlaag geen regen mag vallen. Gebeurt dat namelijk wel, dan wordt het terrein onbegaanbaar. De bentoniet begint te zwellen, de

toplaag wordt daardoor zeer glibberig en het regenwater blijft er op staan. Op hellingen begint dit water dan over het oppervlak af te stromen en bij veel regenval kan dit leiden tot erosie.

Tijdens de aanleg en vlak na de aanleg op proefveld 3 (voordat de laag werd afgedekt met grond) is nogal wat neerslag gevallen. Overigens heeft deze neerslag niet tot erosie van de laag geleid. Wel bleek het onmogelijk om vlak na de regen op het glibberige oppervlak te werken. Zelfs het opbrengen van zwarte grond moest worden gestopt, omdat onder het gewicht van de bulldozer de laag grond dreigde af te schuiven op het glibberige bentonietoppervlak.

Droog weer tijdens de aanleg en vervolgens zo snel mogelijk afdekken van de laag met grond zijn dus belangrijke voorwaarden om problemen bij de aanleg te voorkomen.

4.3.6. Kosten

Rekening houdend met de hogere dichtheid in het veld is op proefveld 2 (laagdikte 10 cm, mengverhouding bentoniet : zand = 10:100) uiteindelijk 18,5 kg bentoniet per m^2 gedoseerd. De prijs van de bentoniet bedroeg f 430/ton (excl. BTW), dit is dus in dit geval f 7,96 per m^2 . De prijs voor het mengen en aanbrengen van de laag in het veld is berekend op f 6,50 per m^2 . De totale kosten voor deze afdichtingslaag bedragen dus afgerond f 14,50 per m^2 (excl. BTW).

Op proefveld 3 (laagdikte 20 cm, mengverhouding bentoniet : zand = 7,5:100) is uiteindelijk 27,75 $kg \cdot m^{-2}$ gedoseerd, wat neerkomt op f 11,93 per m^2 voor de bentoniet. Voor het mengen en aanbrengen is hier eveneens f 6,50 gerekend per m^2 . Op dit veld is echter een dikkere laag aangebracht en de transportkosten zullen hier zeker hoger zijn geweest. In de totaalberekening is echter met één gemiddelde prijs gewerkt. Dit betekent dat de totale kosten voor proefveld 3 afgerond f 18,50 per m^2 (excl. BTW) bedragen.

4.4. ERVARINGEN MET BETREKKING TOT HET OPBRENGEN VAN AFDEKGROND

4.4.1. Aard van de afdekgrond

Grond, die wordt gebruikt als afdekgrond boven een afdichtingslaag op een stortterrein, dient te voldoen aan een aantal eisen. De grond moet goed doorwortelbaar zijn en in verband met een goede ontwatering moet de doorlaatfactor groter zijn dan 50 cm.dag^{-1} . De grond mag uiteraard niet verontreinigd zijn met chemische stoffen of nog niet gestabiliseerde organische stoffen, omdat het de bedoeling is het drainwater rechtstreeks te lozen op het oppervlaktewater.

De afdekgrond voor de proefvelden is afkomstig uit een zandafgraving bij Beilen. Ten behoeve van de zandwinning is hier de bovengrond, dit is de teelaarde plus de daaronder voorkomende venige laag opzij gezet. Deze grond heeft hier twee jaar in depot gelegen en was tamelijk droog. Het organische stofgehalte van deze grond is vrij hoog (ca. 25%, zie ook tabel 2 in par. 4.1.3.). Met deze grond is proefveld 3 geheel afgedekt. Op proefveld 2 is alleen de bovenste helft en op proefveld 1 een klein gedeelte boven aan de helling afgedekt met deze grond.

Er was niet voldoende grond voorradig in depot om alle proefvelden af te dekken. Daarom is later opnieuw teelaarde met de onderliggende venige laag afgegraven. Deze grond was natter, waardoor de verwerking op de proefvelden problemen gaf. Daarom is men later bij het afgraven van de grond dieper gaan graven zodat wat meer zandig materiaal werd bijgemengd. Waarschijnlijk, gezien latere ervaringen, betreft het hier lemig zand, waardoor de doorlatendheid en de structuur van de grond ongunstig is beïnvloed.

4.4.2. Opbrengen van de afdekgrond

Op de afsluitende lagen is een laag afdekgrond ter dikte van circa 1 meter aangebracht. Deze grond dient als bescherming van de afdichtlaag. De laag moet vrij dik zijn om voldoende vocht te kunnen vasthouden voor de beplanting. Behoudens een enkele stagnatie in de aanvoer van grond, heeft het opbrengen van de grond geen noemenswaardige problemen opgeleverd. De grond is met vrachtwagens aangevoerd tot op de helling en daarna met de bulldozer over de helling verdeeld.

Alleen op proefveld 3 is het werk na hevige regenval tijdelijk gestaakt wegens het gevaar van afschuiven van de bovengrond op de spekglad geworden bentonietlaag. Het opbrengen van de zwarte bovengrond heeft, voor zover dit te constateren was, geen verstoring van de onderliggende bentonietlaag tot gevolg gehad.

Door het vele heen en weer rijden met de bulldozer is de grond nogal verdicht. Dit was vooral het geval met de grond die later vers afgegraven is bij de zandwinning in Beilen. Deze grond was vochtiger en bevatte leemhoudend zand. De structuur van deze grond is daarom merkbaar slechter dan van de grond die vanuit het depot werd aangevoerd.

Teneinde het nadelige effect van de verdichting enigszins op te heffen is de grond, nadat alle proefvelden waren afgedekt, tot op een diepte van 50 cm losgemaakt met een ripper (in de lengterichting van het veld).

De ervaring heeft geleerd, dat verwerking van natte grond of verwerking onder regenachtige omstandigheden zeer ongunstig is voor de structuur van de bovengrond. De infiltratiecapaciteit van de toplaag wordt dan te klein en dit heeft tot gevolg dat tijdens hevige regenval water op het oppervlak blijft staan. Op hellingen kunnen dan erosieverschijnselen optreden.

De structuur, de doorlatendheid en de infiltratiecapaciteit van de afdekgrond zijn dus belangrijke eigenschappen in verband met de afwateringsmogelijkheden. Dit betekent dat ook de bovengrond met zorg moet worden uitgekozen.

4.4.3. Inzaaien met gras

Zodra alle grond was opgebracht en het drainagesysteem was aangelegd zijn de proefvelden geëgaliseerd en ingezaaid met gras. Het gebruikte graszaadmengsel BTK 1100 is speciaal geschikt voor berm, taluds en kaden. De hoeveelheid graszaad, die is uitgestrooid, kwam overeen met $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Het was echter intussen begin november 1982, zodat de weersomstandigheden niet erg gunstig waren voor het opkomen van het gras. Het is dan ook inderdaad niet gelukt om voor de winter nog een behoorlijke grasgroei te krijgen. De proefvelden bleven zodoende onbegroeid liggen. Daardoor en door de grote regenval in het najaar van 1982 is aanzienlijke erosie opgetreden.

4.4.4. Erosie en erosiebestrijding

In de voorgaande paragrafen zijn reeds enkele oorzaken genoemd voor het feit dat tijdens de winter 1982/1983 aanzienlijke erosie optrad, met name op proefveld 1 en in mindere mate ook op proefveld 2. Deze oorzaken zijn:

- op proefveld 1 en een deel van proefveld 2 is de structuur en de doorlatendheid van de opgebrachte grond slechter dan op proefveld 3; op de erosiegevoelige gedeelten was het organische stofgehalte duidelijk lager (5-10%) dan op de niet-erosiegevoelige gedeelten (15-25%);
- de afwerking en de inzaai van gras vond te laat in de herfst plaats, waardoor de hellingen onbegroeid bleven liggen;
- door de hevige regenval tijdens de winterperiode is de top laag verslemt, met name op proefveld 1 en proefveld 2, waar de bovengrond kennelijk meer slempgevoelig was;
- de steile helling (ca. 30%) bevordert uiteraard de oppervlakte-afvoer althans als de infiltratiecapaciteit klein is.

Als gevolg van de erosie is veel grond afgespoeld en onder aan de helling in de goot voor de oppervlakte-afvoer terechtgekomen, waardoor de afvoerbalingen verstopt raakten. Meting van de oppervlakte-afvoer was daardoor niet mogelijk. Met name op proefveld 1, maar in mindere mate ook op proefveld 2, is daardoor veel water over de goot gespoeld en niet gemeten.

In de loop van januari 1983 is besloten om over de breedte van het veld drains in geulen op het oppervlak te leggen om op die manier het afstromende water te onderscheppen en de erosie te beteugelen.

Aanvankelijk zijn op het veld geulen gemaakt op onderlinge afstanden van 10 meter en een afschot van 1 meter op 30 meter, waarin de drains zijn gelegd. Bij hevige buien spoelde echter nog teveel zand in de drainsleuf, waardoor de steunrug aan de benedenzijde van de drain plaatselijk doorbrak, waarna de erosie in verhevigde mate plaatsvond.

Uiteindelijk zijn Rehau-drains aangelegd op onderlinge afstanden van 5 meter (zie fig. 16). In verband met de zeer natte omstandigheden was het niet mogelijk om veen in de sleuven aan te brengen. Niettemin is na de aanleg van deze drains geen erosie meer opgetreden.

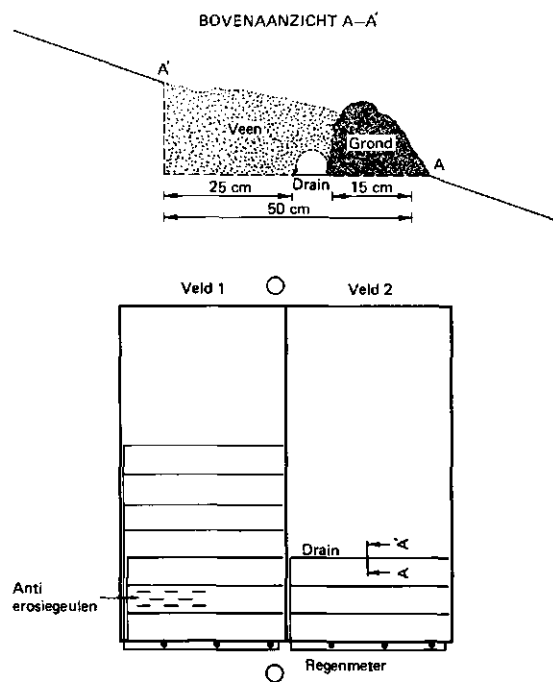


Fig. 16. Erosiebestrijding met REHAU-drains (verhang 1 cm per meter) op onderlinge afstanden van 5 meter, met daartussen trapsgewijs elkaar overlappende anti-erosiegeulen (2 à 2,5 meter lang)
 A: dwarsdoorsnede drainsleuf
 B: bovenaanzicht oppervlakedrainage op proefvelden 1 en 2

4.5. CONCLUSIES BETREFFENDE TOEPASSING IN DE PRAKTIJK

Bij de aanleg van de proefvelden op een helling van het VAM-stortterrein in Wijster is speciale aandacht gegeven aan de problemen die zich voordeden bij het aanbrengen van de afsluitende lagen.

Het aanbrengen van een Hypofors-afdichting blijkt vrijwel probleemloos te verlopen, zelfs op hellingen van meer dan 30%. De grote overlap (50 cm) en de overmaat bitumen die bij het lassen wordt gebruikt lijken een behoorlijke garantie te geven dat de lassen inderdaad waterdicht zijn. Er is overigens na de aanleg geen test op dichtheid van de lassen uitgevoerd. Het procédé van leggen en lassen is zonder grote problemen uitvoerbaar in de praktijk. Dit is intussen ook wel bewezen, want Hypofors is reeds op meerdere stortplaatsen in Nederland toegepast, zowel voor basisafdichting als voor bovenafdichting. Deze toepassingen zijn van recente datum zodat geen conclusies te trekken zijn met betrekking tot de duurzaamheid en

waterdichtheid op langere termijn onder invloed van onregelmatige verzakkingen.

In Nederland bestonden tot nu toe geen ervaringen met het aanbrengen van zand-bentoniet mengsels op stortplaatsen. Internationaal is er wel enige ervaring, maar dan uitsluitend met betrekking tot basisafdichting. De bentoniet wordt daarbij meestal uitgestrooid met een kunstmeststrooier en dan met behulp van een frees of schijveneg door de zandlaag gemengd. Daarna wordt de laag verdicht met een rol.

In dit onderzoek is de menging in een asfaltmenginstallatie uitgevoerd, waarna het mengsel met behulp van een kraan en een bulldozer in de gewenste dikte op het veld is aangebracht. De aldus verkregen menging was zeer goed, waarschijnlijk beter dan bij menging in het veld. Het aanbrengen van de relatief dunne lagen in het veld gaf wel problemen. Het blijkt moeilijk te zijn, vooral op steile hellingen, om met zware apparatuur een egale laagdikte van 10 of 20 cm te krijgen. De weersomstandigheden zijn zeer belangrijk bij de aanleg. Bij veel regenval tijdens de aanleg ontstaan problemen doordat het oppervlak van de zand-bentoniet laag onbegaanbaar wordt (bentoniet zwelt, oppervlak wordt glibberig). Na de aanleg moet de laag daarom ook zo snel mogelijk worden afgedekt met grond.

Bij toepassing van bentoniet op praktijkschaal verdient het aanbeveling om de menginstallatie op enkele onderdelen aan te passen aan de specifieke eisen die voor menging van zand en bentoniet worden gesteld. Overigens is het gewenst om meer informatie te verzamelen over ervaringen met menging in het veld. De kosten van beide procédé's spelen uiteraard ook een belangrijke rol bij de uiteindelijke keuze.

Het opbrengen van de bovengrond (laagdikte ca. 1 meter) gaf weinig problemen. Wel dient men er voor te waken dat bij het opbrengen de structuur van de grond niet te veel verslechtert door verdichting en versmering. De weersomstandigheden spelen ook hier een belangrijke rol.

Verder is gebleken dat de eindafdekking op een stort, d.i. de afdichtingslaag met daarop de afdekgrond, bij voorkeur voor de herfst moet zijn aangelegd. Dit is nodig om voor de winter nog een goede grasgroei te krijgen op de afdeklaag. Lukt dit namelijk niet dan is erosie door oppervlakte-afvoer vrijwel onvermijdelijk. Op niet-begroeide oppervlakken ontstaat namelijk zeer gemakkelijk oppervlakte-afvoer, omdat de bovengrond verslemt tijdens regenbuien. Vooral op hellingen leidt dit tot erosieproblemen. Alleen als de infiltratiecapaciteit van de bovengrond hoog is en als de grond niet

slompgevoelig is, zal weinig of geen erosie optreden. Hieruit blijkt dat het noodzakelijk is om eisen te stellen ten aanzien van de structuur en doorlatendheid van de afdekgrond.

5. RESULTATEN VAN HET HYDROLOGISCH ONDERZOEK OP DE PROEFVELDEN

5.1. ALGEMEEN

Het in dit hoofdstuk beschreven hydrologisch onderzoek heeft betrekking op de periode november 1982 tot en met mei 1986, dat is inclusief de verlenging van het project. De metingen op de drie proefvelden hadden tot doel om aan de hand van waterbalansen uitspraken te doen omtrent de waterdichtheid van de gebruikte afdichtingsmaterialen en eventuele veranderingen in waterdichtheid onder invloed van onregelmatige zetting van het onderliggende afval.

Voor het onderzoek naar de waterdichtheid van de aangebrachte afdichtingslagen is uitgegaan van de volgende waterbalans vergelijkingen (in mm's):

$$N = E + q_{\text{drain}} + q_{\text{opp}} + q_{\text{lek}} + \Delta B \quad (5)$$

waarin: N = neerslag
E = werkelijke verdamping
 q_{drain} = afvoer via het drainagesysteem
 q_{opp} = afvoer over het grondoppervlak
 q_{lek} = lekkage door de afdichtingslaag
 ΔB = wijziging van de vochtvoorraad in de afdeklaag

In het kader van dit waterbalansonderzoek zijn in de periode november 1982 tot mei 1986 enkele waterbalanstermen direct gemeten, zoals de neerslag en de afvoeren over het bodemoppervlak en via het drainagesysteem. De verdamping is berekend aan de hand van bekende relaties met de open waterverdamping, terwijl de berging ten dele kan worden afgeleid uit vochtspanningsmetingen en grondwaterstandsmetingen maar bovendien verwaarloosbaar klein wordt als de beschouwde periode gunstig wordt gekozen. De lekkage door de afdichtingslaag is niet direct gemeten en moet dus als restpost uit deze balans worden berekend.

Bij onderlinge vergelijking van de drie proefvelden kan uiteraard direct een vergelijking worden gemaakt tussen de gemeten afvoeren, als tenminste de verdamping en de berging onderling niet veel verschillen. Aangezien de eigenschappen van de afdekgrond per proefveld verschillen (zie par. 4.1.3 en 5.3) moet de vergelijking van de afvoeren met de nodige voorzichtigheid gebeuren.

5.2. PROEFOPZET EN MEETPROGRAMMA

De aanleg en inrichting van de proefvelden is uitvoerig beschreven in hoofdstuk 4. De voor het waterbalansonderzoek van belang zijnde gegevens worden hier kort samengevat.

De proefvelden zijn aangelegd op een helling op de OZO-flank van het afvalstort van de VAM in Wijster. Bij aanleg bedroeg het stijgingspercentage van de helling circa 30%, later is door zetting van het afval dit percentage afgenomen tot minder dan 27%. De proefvelden, elk ter grootte van 30 x 60 m², zijn ingezaaid met gras en onderling van elkaar gescheiden met scheidingswanden bestaande uit (niet-waterdichte) eternit-platen. De drains liggen juist boven de afdichtingslaag, evenwijdig aan de hoogtelijnen en op onderlinge afstanden van 15 meter. Langs de scheidingswand monden deze drains uit in een verzameldrain, die het water afvoert naar een meetput beneden aan de helling. De oppervlakte-afvoer wordt opgevangen in een goot onder langs de helling en wordt eveneens afgevoerd naar de meetput. Op de drie proefvelden zijn verschillende materialen gebruikt voor de constructie van de afdichtingslaag. De belangrijkste gegevens kunnen als volgt worden samengevat:

Proefveld 1:

- afdichtingslaag van 4 mm dik bitumenmembraan (merk Hypofors);
- banen ter breedte van 5 meter zijn in het veld aan elkaar gelast met hete bitumen (overlap 50 cm);
- bitumen-membraan is 50 cm opgezet tegen de scheidingswanden.

Proefveld 2:

- afdichtingslaag bestaande uit mengsel van zand en Wyoming bentoniet (leverancier CEBO-HOLLAND);
- mengverhouding zand : bentoniet = 100:10, gemengd in een asfaltmenginstallatie;

-
- laagdikte circa 10 cm, na verdichting tot circa 1850 kg.m^{-3} met brede rupsbanden;
 - afdichtingslaag ligt vlak tegen de scheidingswanden;
 - geen bijzondere maatregelen getroffen om scheidingswand waterdicht te maken.

Proefveld 3:

- afdichtingslaag bestaande uit mengsel van zand en Wyoming bentoniet;
- mengverhouding zand: bentoniet = 100:7,5;
- laagdikte na verdichting circa 20 cm;
- overige gegevens: zie proefveld 2.

Op de afdichtingslaag is vervolgens een laag van circa 100 cm afdekgrond aangebracht. Deze afdekgrond bestaat uit zwarte teelaarde met een hoog humusgehalte (5-25).

De neerslag is continue geregistreerd met behulp van twee pluviografen RI en RII, respectievelijk onder aan en boven op de helling, met een opvangopening op 1,50 meter boven maaiveld. Na registratie wordt de neerslag opgevangen in een voorraadvat, zodat aan het eind van de maand (later wekelijks) de totale hoeveelheid neerslag kon worden gemeten en vergeleken met de geregistreerde hoeveelheden.

De drainafvoer en oppervlakte-afvoer zijn per proefveld gemeten met behulp van kantelbakken, die in een meetput bijeen zijn gebracht. De kantelbak bestaat uit twee compartimenten, elk met een inhoud van circa 1 liter, die gezamenlijk om een horizontale as draaien (fig. 17). Het aantal kantelingen wordt geregistreerd door een mechanisch telwerk.

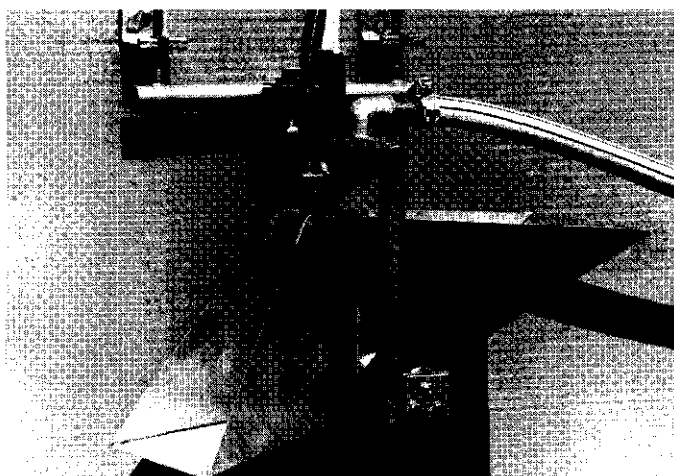


Fig. 17. Kantelbak voor meting van drain- en oppervlakte-afvoeren (foto RIVM, Bilthoven)

Er zijn weinig gegevens beschikbaar met betrekking tot de meetnauwkeurigheid van de geïnstalleerde kantelbakken. In de literatuur is wel bekend dat de meetnauwkeurigheid van kantelbakken toeneemt naarmate het te meten debiet kleiner is. Dit apparaat is dan ook bij uitstek geschikt voor het meten van kleine draindebieten. Voor de mini-uitvoering (capaciteit $15 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) is de systematische fout maximaal 4% bij een debiet van $15 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Voor kantelbakken met een netto inhoud van 2500 cm^3 per compartiment variëren de kantelintervallen van 125 tot 5 seconden voor het meetbereik van $20\text{--}500 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Kantelintervallen van minder dan 5 seconden moeten worden vermeden omdat dan de fout onaanvaardbaar groot wordt. Bij grote watertoevoer wordt namelijk het gelijkmatig vullen verstoord door de ongunstige aanstroming, wat resulteert in een vertraagd kantelen. De netto vulling kan bij grote toevoer met circa 10% worden overschreden voordat de bak gaat kantelen. Dit is gebleken uit onderzoek van BELLIN (1964) met kantelbakken met een netto vulling van 8000 cm^3 (bruto 9500 cm^3).

Voor de hier geïnstalleerde kantelbakken met een netto inhoud van ruim 1000 cm^3 betekent dit dat de meetfout acceptabel blijft zolang het debiet kleiner is dan circa $200 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (kantelinterval 5 seconden). Bij hogere debieten is de meting niet meer nauwkeurig.

Tijdens een flinke regenbui op 28 januari 1983 werd een oppervlakte-afvoer van $333 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ gemeten. Het kantelinterval werd toen vastgesteld op circa 3 seconden. De vulling van de bak verliep daarbij onregelmatig tengevolge van het met geweld toestromende water. Bij dergelijke debieten is de meting waarschijnlijk niet meer binnen 10% nauwkeurig. De toevoerbuï naar de kantelbak bleek overigens geen grotere debieten te kunnen verwerken, want tijdens deze buï liep de afvoergoot onder aan de helling over. Dit betekent dat debieten van meer dan $1200 \text{ l} \cdot \text{uur}^{-1}$ (d.i. $0,67 \text{ mm} \cdot \text{uur}^{-1}$) niet geregistreerd zijn. In de beginfase, toen de grond nog onbegroeid was, zijn dergelijke debieten zeker enkele malen voorgekomen. Overigens werden toen de metingen ook verstoord door erosie en dichtslibbing van de goot onder aan de helling.

Bij de drainafvoer, en later na begroeiing van de helling gold dit ook voor de oppervlakte-afvoer, zijn dergelijke hoge afvoeren niet voorgekomen. De hoogste drainafvoer bedroeg circa $125 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Dit betekent dat de drainafvoeren nauwkeurig zijn geregistreerd met deze kantelbakken, afgezien van storingen als gevolg van corrosie van de draaias en het mechanisch telwerk.

De afvoeren zijn meestal wekelijks gemeten door de standen van de tellers op te nemen. Daarmee is de cumulatieve afvoer dus van week tot week bekend. Gelijktijdig werden ook de afvoersnelheden gemeten door gedurende 1 à 3 minuten het aantal kantelingen op te nemen.

De grondwaterstand is wekelijks gemeten in een groot aantal grondwaterstandsbuizen op de helling van de proefvelden. Daartoe zijn op elk proefveld 12 grondwaterstandsbuizen aangebracht, waarbij het filter zich juist boven de afsluitende laag bevindt. De posities van de peilbuizen ten opzichte van de drains zijn weergegeven in fig. 18. De corresponderende maaiveldhoogten, opgenomen op 22 februari 1983, zijn vermeld in meters ten opzichte van NAP.

De vochtspanning in de afdekgrond is gemeten met behulp van ingegraven tensiometercups. Op elk proefveld zijn op drie plaatsen vochtspanningsmetingen verricht, namelijk onder, midden en boven op de helling. De exacte locaties zijn gegeven in fig. 11 in hoofdstuk 4. Er is steeds op vier diepten gemeten, namelijk 25, 50, 75 en circa 90 cm beneden maaiveld, waarbij de laatste zich juist boven de afsluitende laag bevindt.

Meer of minder regelmatig zijn nog een aantal metingen verricht om aanvullende informatie te verkrijgen omtrent fysische eigenschappen van de afdekgrond, zettingen, temperaturen in de afdeklaag en lekkage van stortgas door de afdichtingslaag.

De fysische eigenschappen van de afdekgrond zijn bepaald door op meerdere plaatsen per proefveld grondmonsters te nemen, die op het Bedrijfslaboratorium te Oosterbeek zijn onderzocht met betrekking tot granulaire samenstelling, organische stofgehalte, kalkgehalte en pH.

De vocht karakteristiek (pF-curve) is vastgesteld aan de hand van ringmonsters (inhoud 100 cm^3). De hogere pF-waarden (3,4 en 4,2) werden bepaald aan losse, gestoorde grondmonsters. De ringmonsters zijn tevens gebruikt voor de bepaling van het droog volumegewicht van de grond. De verzadigde doorlatendheid is eveneens bepaald aan ringmonsters met een inhoud van 100 cm^3 .

De zetting, in hoofdzaak het gevolg van zetting van het onderliggende afval, is enkele malen vastgesteld aan de hand van waterpassingen. Daarbij werd de maaiveldshoogte gemeten ter plaatse van de grondwaterstandsbuizen en bij de hoekpunten van de drie proefvelden.

De temperatuur van de afdeklaag is aanvankelijk alleen op proefveld 3 gemeten, onder en boven aan de helling. Daartoe zijn per meetlocatie vier temperatuurvoelers ingegraven op 25, 50, 75 en circa 90 cm beneden maaiveld.

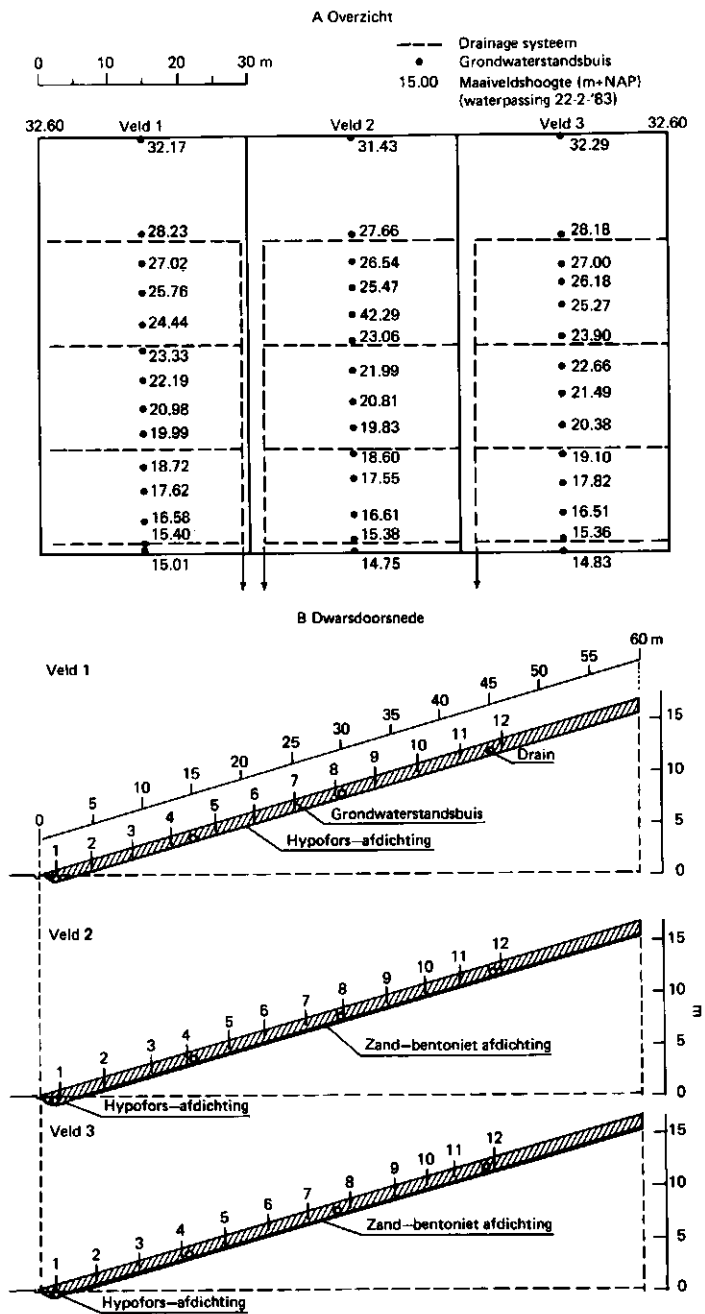


Fig. 18. Positie van de grondwaterstandsbuizen ten opzichte van de drains in de drie proefvelden.
A: overzicht met waterpasgegevens
B: dwarsdoorsnede

De bedrijfszekerheid van de temperatuurvoelers liet voor een groot deel van 1983 te wensen over, omdat de snoeren van de voelers regelmatig, waarschijnlijk door konijnen, werden stuk gebeten. Eind november 1983 werden de beschadigde voelers vervangen en de boven de grond uitstekende snoeren

beveiligd door ze in een ingegraven pvc-buis, voorzien van deksel, op te bergen.

In de loop van 1984 werden de temperatuurvoelers onder op de helling van proefveld 3 verwijderd en verplaatst naar proefveld 1 boven aan de helling. Wegens gaslekkage en de daarmee gepaard gaande hoge temperaturen in de grond zijn de voelers later nogmaals verplaatst naar een locatie lager op de helling van proefveld 1.

Lekkage van stortgas door de afdichtingslaag is mogelijk op plaatsen waar lekken in de afdichtingslaag zijn ontstaan. Deze gaslekkage zal vooral optreden onder drogere omstandigheden in het groeiseizoen en kan dan oorzaak zijn van het afsterven van de vegetatie. Daarom is de schade aan de grasvegetatie nauwlettend vervolgd en in kaart gebracht.

Het opsporen van gaslekkage is tevens gebeurd door meting van het methaan-gehalte met behulp van een gaslekzoekmeter (verbrandingsprincipe) en meting van het zuurstofgehalte met behulp van een zuurstofdetectiemeter. Bij gaslekkage, ook bij kleine lekken, zal het zuurstofgehalte in de afdeklaag sterk dalen vooral als gevolg van oxydatie van methaan door methaan-oxyderende bacteriën (HOEKS, 1972).

5.3. FYSISCH EIGENSCHAPPEN VAN DE AFDEKGROND

De granulaire samenstelling van de afdekgrond is per monster gegeven in bijlage 2. Daaruit blijkt dat er belangrijke verschillen bestaan tussen de proefvelden, terwijl met name op proefveld 1 ook verschillen bestaan tussen de afdekgrond onder en boven op de helling en tussen de bovenlaag (0-50 cm) en de onderlaag (50-100 cm). Deze verschillen in samenstelling en de daarmee samenhangende gevoeligheid voor erosie is ook beschreven in hoofdstuk 4. In verband met de op te stellen waterbalansen zijn de gegevens per proefveld gemiddeld en samengevat in tabel 4. De afdekgrond op proefveld 3 is redelijk homogeen en heeft een moerig tot weinig karakter (25% organische stof). Deze grond is ook aanwezig op proefveld 1 op een diepte van meer dan 50 cm beneden maaiveld. Hoger op de helling ligt deze grond ook aan het maaiveld. Lager op de helling van proefveld 1 bestaat de bovenlaag (0-50 cm) uit humeus zand met een organische stofgehalte van circa 5%. De afdekgrond op veld 2 heeft een organische stofgehalte in de orde van 10-13%, bovendien is de minerale fractie iets minder leem- en lutumhoudend dan op de velden 1 en 3.

Tabel 4. Fysische eigenschappen van de afdekgrond op de drie proefvelden (naar gegevens van Bedrijfslaboratorium voor Grond- en Gewas- onderzoek Oosterbeek)

Omschrijving	Veld 1	Veld 2	Veld 3
pH-H ₂ O	6,4	6,6	6,2
pH-KCl	5,7	5,6	5,5
In % van stoofdroge grond:			
. organische stof	11,6	11,5	25,1
. CaCO ₃	0,1	0,1	0,3
. afslibbaar 0- 16 µm	7,7	4,7	8,2
. tot.-zand 16-2000 µm	80,7	83,7	66,4
In % van minerale delen:			
. 0- 2 µm	6,0	3,9	7,1
. 2- 16 µm	2,9	1,5	4,2
. 16- 50 µm	11,7	7,6	10,7
. 50-420 µm	75,3	82,9	71,6
. >420 µm	4,4	4,1	6,4
M ₅₀ (µm)	128	145	140

De verschillen in grondsoort kwamen ook duidelijk naar voren bij de bepaling van de vochtkarakteristiek van de afdekgrond. De pF-curven (relatie tussen vochtgehalte en vochtspanning) verschillen aanzienlijk voor de verschillende grondmonsters (zie bijlage 3). Deze verschillen hangen sterk samen met het organische stofgehalte en de dichtheid van de grond. De monsters zijn genomen op 30 juni 1983. Gezien de hoge grondwaterstanden in de voorafgaande winterperiode mag worden aangenomen dat de zetting van de afdeklaag op dat moment nog betrekkelijk gering was. Na uitdroging van de grond is de afdeklaag, die oorspronkelijk circa 100 cm dik was, door zetting ingeklonken tot een laagdikte van 80 à 90 cm. Dit zal een grote invloed hebben op de pF-curve, met name op de vochtgehalten bij lage pF-waarden omdat het totaal poriënvolume afneemt. In tabel 5 zijn de gegevens per proefveld gemiddeld en is bovendien een schatting gegeven van de waarden na zetting tot een laagdikte van 85 cm. Met name op veld 3 mag worden verwacht dat door oxydatie van organische stof op langere termijn een voortgaande zetting plaats vind. Uiteindelijk zullen de pF-curven van de drie proefvelden daardoor dichter bij elkaar komen te liggen.

De pF-curven, zoals weergegeven in fig. 19, zijn bepaald door de monsters eerst te verzadigen en er vervolgens door het aanleggen van onderdruk water aan te onttrekken. Het is algemeen bekend dat op deze manier hogere vochtgehalten worden gevonden bij de verschillende pF-waarden dan wanneer men, van de droge kant komend, het monster bevochtigd. Dit hysteresis-effect wordt veroorzaakt door het zogenaamde 'ink-bottle' effect (hangt samen met

Tabel 5. Vochtcharacteristieken van de afdekgrond op de drie proefvelden (veld 1 en 2: gemiddelde van 6 monsters; veld 3: gemiddelde van 5 monsters)

Omschrijving	Situatie 30-6-83			Na zetting		
	veld 1	veld 2	veld 3	veld 1	veld 2	veld 3
Droog volumegewicht (g.cm^{-3})	0,86	1,09	0,58	1,01	1,28	0,68
Dichtheid vaste fase (g.cm^{-3})	2,51	2,51	2,34	2,51	2,51	2,34
Poriënvolume (vol. %)	66	57	75	60	51	71
Vochtgehalte pF 0,5 (vol. %)	64	56	74	58	50	70
Idem pF 1,5 (vol. %)	62	52	72	56	47	68
Idem pF 2,0 (vol. %)	56	46	67	51	42	63
Idem pF 4,2 (vol. %)	10	21	16	10	21	16

de kromming van de watermeniscus in een porie), door insluiting van lucht in zogenaamde 'dead-end pores' en door het hydrofoob karakter van organische stof. Ook zwel- en krimpverschijnselen kunnen een belangrijk effect hebben op de vorm van de pF-curve.

Uit onderzoek van BOHEEMEN en HUMBERT (1984) blijkt dat onder veldomstandigheden vrijwel altijd lagere vochtgehalten worden gevonden dan op grond van de in het laboratorium bepaalde pF-curve verwacht mag worden. Dit verschil schreven zij toe aan hysteresis-effecten tengevolge van herhaald uitdrogen en bevochtigen. Dit betekent dat met name de vochtgehalten bij pF 1,5 en 2,0 onder veldomstandigheden lager uitvallen dan in tabel 5 is vermeld, mogelijk circa 5 vol.% lager.

De vochtinhoud van de profielen is geschat in relatie met de vochttoestand (tabel 6) en rekening houdend met zetting en hysteresis-verschijnselen.

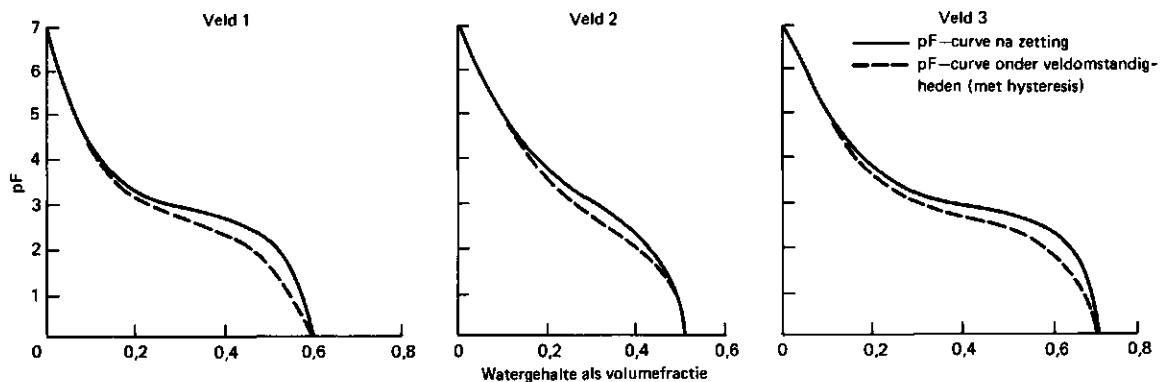


Fig. 19. Vochtcharacteristieken (pF-curven) van de afdekgrond op de drie proefvelden, geschat op grond van meetgegevens en rekening houdend met zetting en hysteresis onder veldomstandigheden (veld 2: voor pF 4,2 vochtgehalte gewijzigd in 15 vol. %)

Tabel 6. Vochtinhoud (in mm's) van de afdekklagen op de drie proefvelden in afhankelijkheid de vochttoestand (laagdikte na zetting 85 cm)

Omschrijving vochttoestand	Veld 1	Veld 2	Veld 3
Verzadiging	510	435	605
Veldcapaciteit (pF 2)	380	340	490
Verwelkingspunt (pF 4,2)	85	125*	135
Beschikbaar vocht (pF 2-4,2)	295	215	355
Beschikbaar voor de plant**	215	160	260

*geschat vochtgehalte 15 vol.% aangezien de waarde in tabel 5 (21 vol. %) onwaarschijnlijk wordt geacht

**aannname: in bovenste 40 cm is alle beschikbaar vocht beschikbaar voor de plant, in onderste 45 cm is slechts de helft beschikbaar voor de plant (afrondding op 5-tallen mm's)

Gezien de spreiding in de laboratoriumresultaten en de niet gemeten hysteresiseffecten moeten de cijfers in tabel 6 worden gezien als globale schattingen, waarbij afwijkingen van 10% niet onmogelijk zijn.

5.4. NEERSLAG EN VERDAMPING

5.4.1. Neerslag

De neerslag is gemeten met twee regenmeters respectievelijk onder en boven aan de helling. De regencijfers van beide pluviografen zijn onderling vergeleken en eveneens met regencijfers van het KNMI-station in Dwingeloo en het Biologisch Station in Drijber (tabel 7). Daaruit blijkt dat de pluviograaf RII boven aan de helling aanmerkelijk minder neerslag registreert dan de pluviograaf RI onder aan de helling. Dit is het gevolg van hoge windsnelheden boven op de helling, die vooral tijdens buien in het winterhalfjaar de metingen ongunstig hebben beïnvloed. Bovendien is regenmeter RII vele keren verstopt geraakt door inwaaiend stof. Tijdens de zomerperiode waren de verschillen tussen beide meters veel geringer.

Tabel 7. Neerslagcijfers in mm's van de twee pluviografen bij de proefvelden, vergeleken met cijfers van het Biologisch Station Drijber (periode 29-12-1982 tot 31-8-1983)

Periode	Onder aan helling RI	Boven aan helling RII	Biologisch Station Drijber
29/12- 3/2	122,0	96,0	121,9
3/ 2- 1/3	-	-	-
1/ 3-30/3	83,5	27,0	85,3
30/ 3- 4/5	118,8	42,7	119,5
4/ 5- 3/6	123,4	129,4	137,8
3/ 6-28/6	41,5	37,9	49,6
28/ 6- 3/8	27,7	23,3	23,4
3/ 8-31/8	9,4	6,8	8,6
Totaal	526,3	363,1	546,1

De regencijfers van pluviograaf RI onder aan de helling blijken redelijk overeen te stemmen met de regencijfers van het dichtstbij gelegen weerstation (Biologisch Station Drijber).

In tabel 8 zijn de waarnemingen van regenmeter RI vergeleken met die van het Biologisch Station in Drijber en het KNMI-station in Dwingeloo. Uit de hoge correlatiecoëfficiënt blijkt dat de waarnemingen onderling nauw gecorreleerd zijn. Uit deze tabel blijkt verder dat de neerslagmetingen op het proefterrein systematisch 11-15% lager liggen dan de gegevens van de normaal opgestelde regenmeters (opening 0,40 m boven maaiveld) op de nabijgelegen stations. Dit verschil moet enerzijds worden toegeschreven aan de windfout van de hoog opgestelde (1,50 m boven maaiveld) pluviograaf bij het proefveld en anderzijds aan de ongunstige aërodynamische vorm van deze pluviograaf. Zo vonden COLENBRANDER en STOL (1970) voor een dergelijke pluviograaf in de winter een tekort van 8 à 9% ten opzichte van de standaardregenmeter. In de zomer bedroeg dit tekort slechts 2 à 3%. Volgens BRAAK (1945) en DEKKER (1979) is de windfout als gevolg van het verschil in opvanghoogte (0,40 m tegenover 1,50 m) ongeveer 2,0 à 2,4% voor de winterperiode en 1,2 à 1,4% voor de zomerperiode (gemeten in De Bilt). Overigens vertoont de standaard regenmeter op 0,40 m hoogte nog weer een afwijking van gemiddeld 2 à 8% ten opzichte van een grondregenmeter. De tekorten nemen af wanneer de regenmeter goed beschermt staat opgesteld (DE ZEEUW, 1963). Op een goed beschutte plaats, zoals geldt voor regenmeter RI, bedraagt het tekort ten opzichte van de grondmeter circa 4 à 5%.

Tabel 8. Resultaten van de regressie-analyse volgens de vergelijking $y = a+bx$, voor de relatie tussen de maandsommen van de neerslag gemeten op het proefterrein te Wijster (RI), het Biologisch Station te Drijber en het KNMI-station te Dwingeloo

Station voor neerslagmeting		Coëfficiënten		Standaard- afwijking S_{xy}	Correlatie- coëfficiënt r
y	x	b	a		
Wijster (RI)	B.S. Drijber	$0,89 \pm 0,13$	2,29	7,69	0,97
Wijster (RI)	Dwingeloo	$0,85 \pm 0,15$	-1,30	11,23	0,97
B.S. Drijber	Dwingeloo	$0,99 \pm 0,15$	-7,03	9,52	0,97

De overeenstemming tussen het Biologisch Station in Drijber en het KNMI-station in Dwingeloo is goed, waaruit mag worden geconcludeerd dat de waarnemingen van het Biologisch Station representatief zijn voor het gebied. Daarom zijn voor die perioden, waarin waarnemingen ontbreken als gevolg van het niet goed functioneren van de pluviograaf, de ontbrekende waarden berekend uit de regencijfers van het Biologisch Station te Drijber met de vergelijking $y = 2,29 + 0,89 x$ (x = regencijfer van het Biologisch Station). Hoewel in feite de neerslaghoeveelheid op een helling lager is (per m^2 oppervlak) dan op een horizontaal vlak en de neerslagcijfers dus enerzijds gecorrigeerd behoren te worden voor de hellingshoek (ca. 5% lager op een 1:3 helling) is deze correctie achterwege gelaten omdat de regencijfers anderzijds met circa 5% verhoogd zouden moeten worden als gevolg van de 1,50 m hoge opvanghoogte (windeffect ca. 2-8%).

Een overzicht van de gemeten neerslag, weergegeven als neerslagsom per maand, is gegeven in fig. 20 voor de periode november 1982 tot en met mei 1986.

Vergeleken met de normale gebiedsgemiddelden onderscheidt het jaar 1983 zich door een extreem natte winter- en voorjaarperiode, gevolgd door een droge zomer- en najaarperiode. In de maanden januari tot en met mei 1983 viel 497,7 mm neerslag tegen normaal 278,0 mm. Gemiddeld was het jaar 1984 iets natter dan 1983. De jaarsom van de neerslag was totaal 846,3 mm in 1984 en 838,6 mm in 1983 tegen 822 mm normaal.

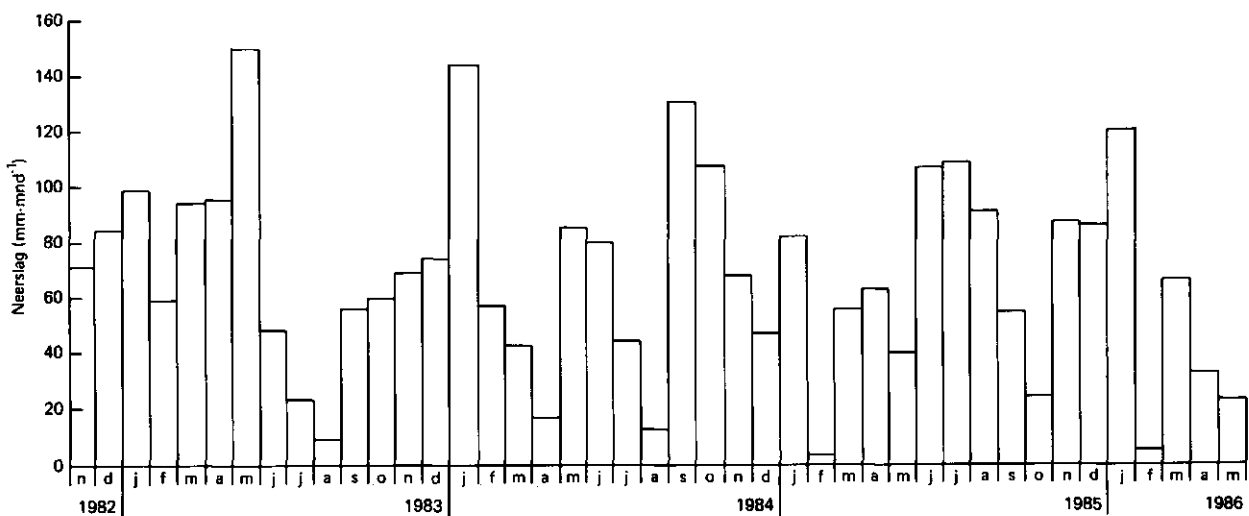


Fig. 20. Verdeling van de neerslag, weergegeven als neerslagsom per maand, in de periode november 1982 tot en met mei 1986

5.4.2. Verdamping

De verdamping is niet afzonderlijk gemeten op de proefvelden. De locale verschillen in de zogenaamde open-water-verdamping (E_o) zijn echter betrekkelijk gering, vandaar dat de potentiële verdamping meestal wordt berekend aan de hand van verdampingscijfers van omliggende KNMI-stations. De verdamping van open water kan redelijk nauwkeurig worden berekend op basis van gemeten grootheden zoals zonneshijnduur, windsnelheid, luchtvochtigheid en luchttemperatuur. Op het KNMI worden deze berekeningen uitgevoerd met behulp van de formule van Penman. Voor de berekening van de potentiële gewasverdamping (E_p) wordt dan een reductiefactor (α) aangehouden:

$$E_p = \alpha E_o \tag{6}$$

De waarde α is afhankelijk van de bodembedekking en de ontwikkeling van het gewas en varieert van 0,5 voor een onbedekte bodem tot 0,8 voor een volledig bedekte bodem (kortgehouden grasvegetatie). De gemiddelde Penman-verdamping verschilt wel enigszins van plaats tot plaats en neemt in het algemeen af met toenemende afstand tot de kust. In tabel 9, ontleend aan BUISHAND en VELDS (1980) is voor een aantal stations de gemiddelde Penman-verdamping (E_o) weergegeven voor de normaal-periode 1941-1970.

Tabel 9. Gemiddelden (normalen) van de Penman-verdamping E_0 in mm voor het tijdvak 1941-1970

Station	Jaarsom	Winterhalfjaar (okt.-maart)	Zomerhalfjaar (april-sept.)
Leeuwarden	672	98	574
Wijster/Witteveen/Dedemsvaart*	655	93	562
Winterswijk	650	95	555

*gegevens gecombineerd van drie stations

Uit deze tabel blijkt dat de Penman-verdamping in het zomerhalfjaar ongeveer 6x zo groot is als in het winterhalfjaar. Voorts valt op dat de normaal-waarden voor de verdamping van het station Winterswijk ongeveer gelijk zijn aan de normaal-waarden voor de stations Wijster/Witteveen/-Dedemsvaart. Omdat het station Dedemsvaart recent is verplaatst en er onvoldoende gegevens bestaan met betrekking tot deze nieuwe locatie is voor het onderzoek gebruik gemaakt van de verdampingscijfers van station Winterswijk.

Bij de berekening van de verdamping dient bedacht te worden dat de E_0 -waarde voor de proefvelden mogelijk groter is omdat de instraling op een helling groter kan zijn dan op een horizontaal vlak. RIJTEMA et al (1986) namen aan dat voor een zuidhelling (helling 16%) de inkomende straling circa 20% hoger ligt dan op een horizontaal vlak. Op de proefvelden in Wijster zal dit effect groter zijn aangezien het hellingspercentage 30% bedraagt. De helling is echter op het OZO gericht, waardoor extra instraling tijdens de morgenuren weer te niet gedaan wordt door verminderde instraling tijdens de middaguren. De verschillen in instraling ten opzichte van het horizontale vlak zijn het grootst bij lage zonnestand, dat wil zeggen in de winterperiode. De verdamping is dan echter gering. Een en ander betekent dat het effect van de helling op de E_0 -waarde klein is.

Een ander aspect bij de verdampingsberekeningen betreft de gewasfactor (α). De grasvegetatie op de proefvelden was over het algemeen nogal lang, omdat weinig frequent is gemaaid. De interceptie is daardoor hoger dan bij kort gras. Bij het opstellen van globale waterbalansen voor de periode november 1982 tot augustus 1984 (zie par. 5.7) is niettemin de gewasfactor $\alpha=0,80$ gekozen, zoals meestal gebruikelijk is. Zeker tijdens de zomer van 1983 was het gras nog relatief kort. Bij de latere modelberekeningen (hfdst. 6) kon met de gegevens van het jaar 1985/1986, waarin geen verdampingsreductie is opgetreden, worden vastgesteld dat de gewasfactor waarschijnlijk iets hoger

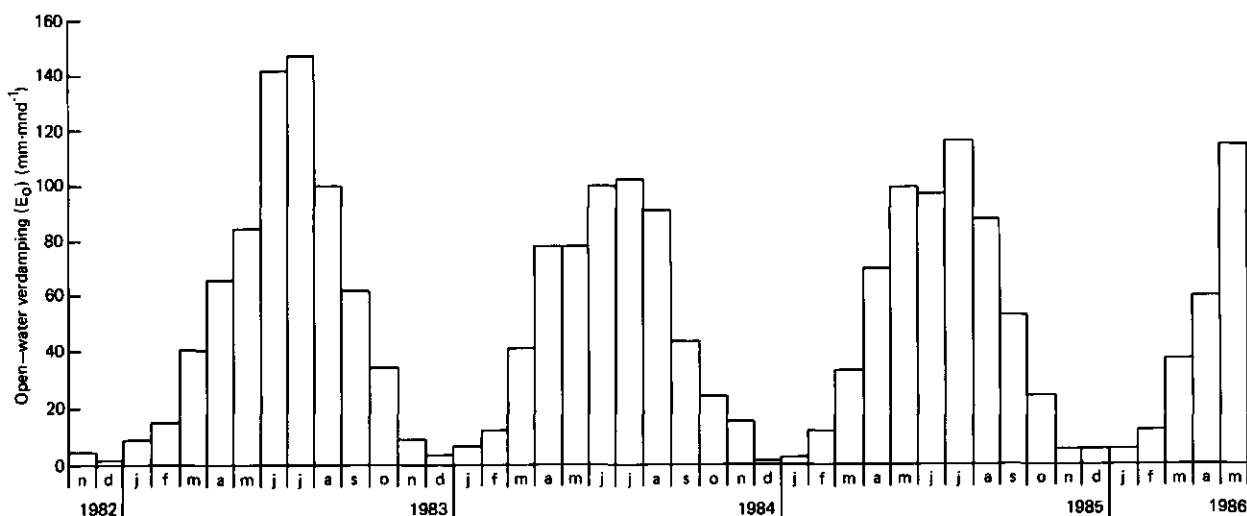


Fig. 21. Verdeling van de open-water-verdamping (E_o), weergegeven als verdampingssom per maand, in de periode november 1982 tot mei 1986

moet zijn. De effecten van eventuele extra instraling en de lengte van de grasvegetatie zijn daar tesamen verdisconteerd door voor de gewasfactor de waarde $\alpha=0,85$ te kiezen.

Een overzicht van de open-water-verdamping (E_o) is weergegeven in figuur 21, waar de verdampingssom per maand is uitgezet tegen de tijd. Hieruit blijkt dat de zomer van 1983 er duidelijk uitspringt met een hogere verdampingssom. Dit blijkt later bij de berekeningen (zie hfdst 6) ook de enige zomer te zijn, waarin verdampingsreductie optreedt als gevolg van vochttekort in de wortelzone. In de zomers van 1984 en 1985 is op geen van de proefvelden sprake geweest van verdampingsreductie. Dit is te danken enerzijds aan de relatief grote hoeveelheid beschikbaar water in de humeuze afdekgrond en anderzijds aan de neerslagverdeling in deze zomers.

5.5. OPPERVLAKTE-AFVOER EN DRAINAFVOER

5.5.1. Storingen in de afvoermetingen

Reeds in hoofdstuk 4 (par. 4.4.4) is vermeld dat tijdens het eerste halfjaar na aanleg erosie is opgetreden op de velden 1 en 2. Daardoor zijn grote hiaten ontstaan in de oppervlakte-afvoer metingen. De ontbrekende gegevens zijn zo goed mogelijk geschat door vergelijking met veld 3, waar geen erosie is opgetreden (zie par. 5.5.2).

Een tweede storing betrof de lekkage van percolatiewater uit het afvalstort, voor het eerst waargenomen in het voorjaar van 1984. Door de hoge waterstand in het stort drong aan de voet van de helling percolatiewater naar binnen in de proefvelden. Bij zeer hoge waterstanden kwam het zelfs in de goot voor de oppervlakte-afvoer terecht. Dankzij het hoge chloridegehalte in het percolatiewater bleek het mogelijk om de afvoeren te corrigeren voor deze lekkage (zie par. 5.5.3). Overigens wijst deze lekkage op het grote belang van een goede 'teenconstructie' om vuil en schoon water gescheiden te houden (zie ook par. 3.5.5).

Storingen als gevolg van de soms niet goed werkende apparatuur hebben incidenteel tot hiaten in de afvoergegevens geleid. Dankzij het feit dat met name bij de drainafvoer onderling min of meer vaste verhoudingen bestonden tussen de afvoeren van de drie velden, konden de ontbrekende cijfers redelijk worden geschat. Overigens zijn deze storingen beperkt gebleven dankzij de wekelijkse metingen en controle/onderhoud van de meetapparatuur.

In een latere fase van het onderzoek, met name in de periode 1984-1986 zijn een aantal storingen opgetreden die de interpretatie van de meetgegevens van die periode ernstig bemoeilijken. Tijdens de zomer van 1984 is op de helling grenzend aan proefveld 1 door de VAM een bentoniet-afdichtingslaag aangebracht, waarbij de scheidingswand langs veld 1 werd verwijderd. Gebleken is dat daardoor in de periode september-november 1984 water van het aangrenzende hellingsgedeelte op proefveld 1 terecht is gekomen. Pas in november is de scheidingswand hersteld.

In het najaar van 1984 is de drainafvoer van veld 2 verstopt geraakt. Aangezien doorspuiten van de afvoerbuïs weinig resultaat heeft gehad, moet worden aangenomen dat aansluitingen in het drainagesysteem op het veld zijn losgeraakt door verzakkingen. De drainafvoer was daarom zeer gering tijdens de winter 1984/85. Omdat het water niet werd afgevoerd, steeg de grondwaterspiegel op veld 2 tot in het maaiveld, waarna het neerslagoverschot in hoofdzaak over het oppervlak werd afgevoerd. Op proefveld 1 is verstopping van de drainafvoerbuïs opgetreden, waardoor in de eerste maanden van 1985 overwegend oppervlakte-afvoer optrad. Dankzij onderhoudwerkzaamheden zijn de drainafvoeren van de velden 1 en 2 weer enigszins op gang gekomen in de winterperiode 1985/86.

Ook op veld 3 zijn de afvoermetingen niet zonder storingen verlopen. In de winter 1984/85 bleef de totale afvoer aanzienlijk beneden verwachting. Bij opgraving van de draaindoorvoer onder aan de helling bleek hier lekkage op te treden. Door technische problemen heeft de reparatie van dit lek lang op

zich laten wachten. Na reparatie en doorspuiten van de afvoerbuis bleek de afvoer tijdens de winter 1985/86 weer normaal te zijn.

De waterbalansgegevens van de periode april 1983-maart 1984 zijn het meest betrouwbaar, zodat deze gebruikt kunnen worden voor ijking van de modelberekeningen. In deze periode werd het meest intensief gemeten en de storingen, voorzover deze zijn opgetreden, zijn snel verholpen en gecorrigeerd.

5.5.2. Oppervlakte-afvoer

Door het ontbreken van een grasvegetatie (zie par. 4.4.4) is tijdens het eerste halfjaar na aanleg van de proefvelden zeer veel oppervlakte-afvoer opgetreden, die met name op de velden 1 en 2 veel erosie heeft veroorzaakt. Door afspoeling van grond slibde de afvoergoot aan de voet van de helling regelmatig dicht, waardoor water en grond over de goot spoelden. Afvoermetingen waren dan uiteraard niet mogelijk. De gegevens betreffende de oppervlakte-afvoer vertonen dan ook veel hiaten in deze periode.

De gemiste oppervlakte-afvoer op de velden 1 en 2 is geschat uit de waterbalansen door aan te nemen dat in het eerste halfjaar na aanleg nog geen lekkage door de afdichtingslaag is opgetreden en dat de berging van water op de velden 1 en 2 gelijk is aan die op veld 3, waar geen erosie is opgetreden (gezien de fysische eigenschappen van de grond kan de berging op de velden 1 en 2 in ieder geval niet groter geweest zijn dan op veld 3). De gecorrigeerde oppervlakte-afvoer (= restpost uit de waterbalans) is opgenomen in tabel 10 en verwerkt in figuur 24 waar de afvoeren als maandsommen zijn weergegeven.

Vanaf mei/juni 1983 is de grasvegetatie op de proefvelden goed tot ontwikkeling gekomen en in het daaropvolgende jaar is de oppervlakte-afvoer zeer gering gebleven (minder dan 1 mm per maand). Alleen in de maand januari 1984, die met 144,3 mm neerslag zeer nat was, is nog oppervlakte-afvoer van betekenis voorgekomen, namelijk 1,5-2,5 mm. De totale oppervlakte-afvoer in de periode september 1983 tot en met augustus 1984 bedroeg slechts 8, 3 en 5 mm voor respectievelijk de proefvelden 1, 2 en 3. Hieruit blijkt het grote belang van een goede bodembedekking, waardoor enerzijds de weerstand tegen afstroming toeneemt maar anderzijds ook de structuur en de infiltratiecapaciteit van de toplaag sterk verbetert.

Tabel 10. Oppervlakte-afvoer op de drie proefvelden in de periode november 1982 tot en met augustus 1983 (proefveld 3: gemeten waarden; proefveld 1 en 2: gecorrigeerde waarden (zie tekst), gemeten waarden tussen haakjes)

Maand	Neerslag (mm)	Oppervlakte-afvoer		
		veld 1	veld 2	veld 3)
November 1982	70,5	6,8(4,3)	6,4(6,4)	5,3
December	85,0	18,0(5,2)	30,2(7,7)	6,4
Januari 1983	99,6	24,8(9,1)	32,0(10,4)	8,0
Februari	59,0	27,8(10,9)	22,1(20,3)	11,8
Maart	94,2	14,2(14,2)	19,4(15,4)	7,2
April	94,8	25,0(7,0)	31,2(7,1)	4,7
Mei	150,1	33,5(14,8)	40,1(26,7)	14,2
Juni	48,0	0,2(0,2)	0,1(0,1)	0,1
Juli	23,4	0,3(0,3)	0 (0)	0,1
Augustus	9,3	0 (0)	0 (0)	0
Totalen	734	151 (66)	182 (94)	58

Een bijzonder probleem deed zich voor in de periode maart/april 1984. Door hoge waterstanden in het afvalstort, onder meer als gevolg van berekening op het stort, lekte percolatiewater naar binnen aan de onderzijde van de proefvelden (zie fig. 22). Dit werd voor het eerst geconstateerd bij de afvoergoot onder aan de helling en later ook bij de drainafvoer uit de velden. Door regelmatig het chloridegehalte in de afvoer te meten kon de omvang van de lekkage worden vastgesteld (zie par. 5.5.3).

Tijdens de winter 1984/85 is op de proefvelden 1 en 2 veel oppervlakte-afvoer opgetreden (zie fig. 24), omdat in deze periode de drainafvoerbuis verstopt is geraakt. Op veld 2 functioneert bovendien het drainagesysteem op het veld slecht, waardoor hier relatief hoge grondwaterstanden voorkomen (fig. 26). Op veld 1 functioneert het drainagesysteem kennelijk wel, maar de afvoerbuis is verstopt geraakt. Het water stroomt hier via het drainagesysteem naar beneden en verzamelt zich aan de voet van de helling. Daar stijgt de grondwaterspiegel en tenslotte stroomt het water over de rand in de goot voor de oppervlakte-afvoer.

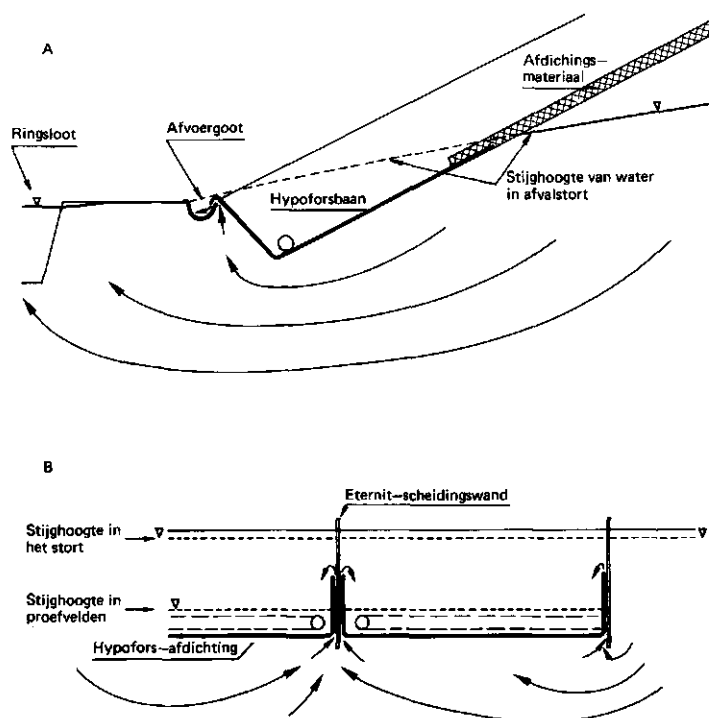


Fig. 22. Schematische weergave van de plaatsen waar lekkage van percolatiewater is geconstateerd aan de voet van de helling. A: lekkage bij de goot voor oppervlakte-afvoer; B: lekkage langs de scheidingswanden

5.5.3. Drainafvoer

De meting van de drainafvoer heeft slechts af en toe gehaperd. Dankzij regelmatige controle van de kantelbakken zijn storingen altijd van korte duur geweest. Voor zover deze storingen hiaten in de metingen hebben veroorzaakt, kon de afvoer voor die periode redelijk nauwkeurig worden geschat op grond van de relatie tussen neerslag en drainafvoer en de onderlinge verhouding tussen de drainafvoeren van de drie proefvelden.

Zoals reeds hiervoor werd opgemerkt, is in de periode 29 februari tot 25 april 1984 door hoge grondwaterstanden in het stort percolatiewater terechtgekomen in de afvoergoot voor de oppervlakte-afvoer. Onder aan de helling is langs de scheidingswanden ook percolatiewater naar binnengekomen en in de drainafvoer terechtgekomen. Schematisch zijn de plaatsen, waar lekkage optrad, aangegeven in figuur 22.

De lekkage is op de volgende wijze berekend:

$$q_{\text{perc}} = \frac{C_{\text{drain}} - C_o}{C_{\text{perc}} - C_o} q_{\text{drain}} \quad (7)$$

waarin: q_{perc} = lekkage van percolatiewater (mm)
 q_{drain} = gemeten drainafvoer (mm)
 C_{drain} = Cl-concentratie in het drainwater
 C_{perc} = Cl-concentratie in het percolatiewater
 C_o = Cl-concentratie in het infiltrerende neerslagoverschot

De Cl-concentraties in het drainwater zijn in tabel 11 weergegeven voor de periode 29 februari tot 25 april 1984. De drainafvoer is op basis van de gemeten Cl-concentraties gecorrigeerd voor de lekkage (berekend volgens (7)). De Cl-concentratie in het percolatiewater is bepaald aan de hand van percolatiewatermonsters uit de afvoergoot onder aan de helling. Met name op de velden 2 en 3 stroomde percolatiewater over de rand in de goot. De afvoergoten van veld 2 en 3 liggen namelijk lager (mogelijk door verzakking) dan de afvoergoot van veld 1 waar praktisch geen lekkage is opgetreden. De Cl-concentratie varieerde van aanvankelijk 3100 mg.l^{-1} tot uiteindelijk 5400 mg.l^{-1} . De Cl-concentratie in het infiltrerende regenwater is bepaald op 75 mg.l^{-1} , op basis van grondwatermonsters uit grondwaterstandsbuizen boven op de helling.

Tabel 11. Berekening van de lekkage uit de totale drainafvoer en de Cl-gehalten in het afgevoerde water (periode 29/2-25/4/1984)

	8/3	15/3	22/3	29/3	5/4	12/4	19/4	25/4	Totaal
<u>Proefveld 1:</u>									
drainafvoer (mm)	6,95	8,66	1,75	-0,95	2,99	2,84	0,84	0,15	25,13
Cl-gehalte (mg.l^{-1})	284	-	1087	1221	612	340	204	246	
lekkage (mm)	0,48	0,70	0,58	0,36	0,53	0,17	0,03	0,005	2,86
gecorr. afvoer (mm)	6,47	7,96	1,17	0,59	2,46	2,67	0,81	0,15	22,28
<u>Proefveld 2:</u>									
drainafvoer (mm)	7,10	9,06	3,18	1,77	4,52	4,26	1,39	0,30	31,58
Cl-gehalte (mg.l^{-1})	350	-	634	590	374	329	357	676	
Lekkage (mm)	0,64	1,00	0,58	0,30	0,44	0,25	0,09	0,03	3,33
gecorr. afvoer (mm)	6,46	8,06	2,60	1,47	4,08	4,01	1,30	0,27	28,25
<u>Proefveld 3:</u>									
drainafvoer (mm)	7,86	10,80	3,93	1,79	3,73	4,34	1,59	0,34	34,38
Cl-gehalte (mg.l^{-1})	474	-	780	932	778	586	792	1239	
lekkage (mm)	1,03	1,60	0,91	0,50	0,86	0,51	0,27	0,07	5,75
gecorr. afvoer (mm)	6,83	9,20	3,02	1,29	2,87	3,83	1,32	0,27	28,63

Uit de gegevens met betrekking tot de lekkage (tabel 11) blijkt dat de lekkage in tijden van lage drainafvoer aanleiding geeft tot hoge Cl-gehalten in het drainwater (vooral op veld 2 en 3). Kwantitatief is de lekkage betrekkelijk gering, namelijk 11-17% van de totale afvoer. Voor de velden 1, 2 en 3 bedroeg de lekkage respectievelijk 2,9; 3,3 en 5,8 mm. De onderlinge verschillen worden verklaard door de hoogteligging (veld 1 ligt het hoogst, veld 3 het laagst).

Uit opgravingen op 12 april 1984 is gebleken, dat deze lekkage optrad langs de scheidingswanden tussen de velden (zie fig. 22). Onder aan de helling, waar de velden zijn afgewerkt met één baan Hypofors overdwars, kwam percolatiewater over de tegen de wand opstaande Hypofors naar binnen. Later is met behulp van een pomp het peil in de ringsloot sterk verlaagd waardoor ook de waterstand in het stort daalde, waarna de lekkage spoedig afnam. Het is niet waarschijnlijk dat deze lekkage van percolatiewater vóór de genoemde periode een belangrijke rol heeft gespeeld. Vanwege de opstaande rand Hypofors langs de scheidingswanden moet de waterstand in het stort vrij hoog zijn alvorens lekkage optreedt. In dat geval komt ook vrijwel zeker percolatiewater in de afvoergoot onder aan de helling terecht. Dit zou zeer waarschijnlijk wel zijn opgemerkt. Er is een kans dat het Cl-gehalte in de drainafvoer een tijdlang in de orde van $200-250 \text{ mg.l}^{-1}$ heeft gelegen (hoger is niet waarschijnlijk gezien de latere metingen). Dit betekent dat het aandeel van de lekkage in de totale afvoer (zie vgl. (7)) maximaal in de orde van 5% kan hebben gelegen. Grotere lekkages zouden beslist zijn waargenomen, met name vanwege de verontreiniging van de oppervlakte-afvoer.

In figuur 23 zijn de Cl-gehalten in het drainwater uitgezet tegen de tijd en vergeleken met de totaal afvoer en de berekende lekkage. Het blijkt dat de hoogste Cl-gehalten optreden in perioden met lage afvoer. De drainafvoer uit de proefvelden loopt in droge perioden sneller terug dan de afvoer van percolatiewater uit het stort, waardoor in droge perioden de lekkage een relatief belangrijker aandeel krijgt in de totale afvoer en in de zomermaanden kon het zelfs voorkomen dat het afgevoerde water vrijwel uitsluitend bestond uit percolatiewater. Niettemin blijkt dat kwantitatief de omvang van de lekkage gering is gebleven. Eén uitzondering moet worden gemaakt voor proefveld 3, met name in de periode juni tot en met augustus 1984.

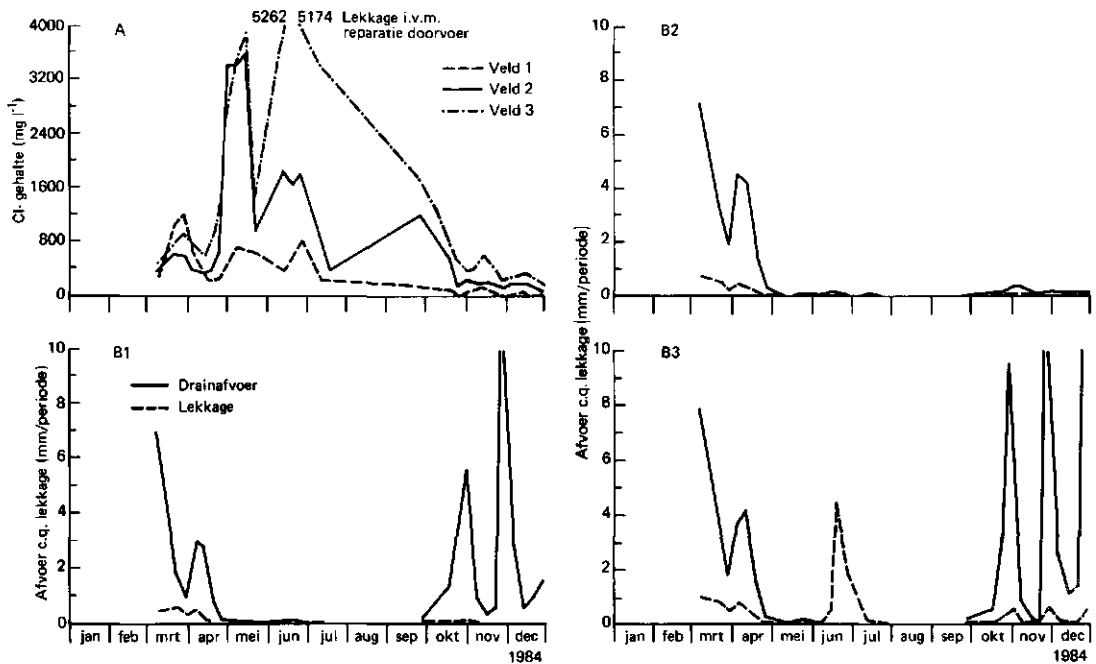


Fig. 23. Chloridegehalten in het drainwater als functie van de tijd (A), in vergelijking met de totale afvoer en de berekende lekkage op de drie proefvelden (B)

Op dit veld is bij een opgraving op 4 juni 1984 de doorvoer van het drainagesysteem door de Hypoforsbaan onder aan de helling blootgelegd. Daarbij bleek dat langs de doorvoerbuis percolatiewater naar binnen lekte. Door het weggraven van de grond nam de lekkage tijdelijk sterk toe. In afwachting van reparatie bleef het gegraven gat open liggen tot augustus 1984. In deze periode is uiteraard veel percolatiewater naar binnen gelekt. Na reparatie en dichtgooien van het gat met grond is de lekkage weer snel afgenomen. De totale afvoer, dat is de drainafvoer plus de oppervlakte-afvoer (tijdens de winter 1982/1983 gecorrigeerd voor gemiste oppervlakte-afvoer) is weergegeven in figuur 24 en vergeleken met de neerslagverdeling. In grote lijnen reageert de drainafvoer van de drie proefvelden vergelijkbaar op de neerslagverdeling. Opvallend is dat de afvoer meteen vanaf de start van de metingen (11 november 1982) op gang is gekomen. Kennelijk is tijdens de aanleg en direct daarna zoveel neerslag gevallen dat de bergingscapaciteit van de grond op 11 november reeds is overschreden. Voorts blijkt in het najaar 1983 de afvoer op alle velden ongeveer gelijktijdig te beginnen, wat er op duidt dat na de zomerperiode op de drie proefvelden een ongeveer gelijke hoeveelheid water wordt geborgen alvorens de drainafvoer begint.

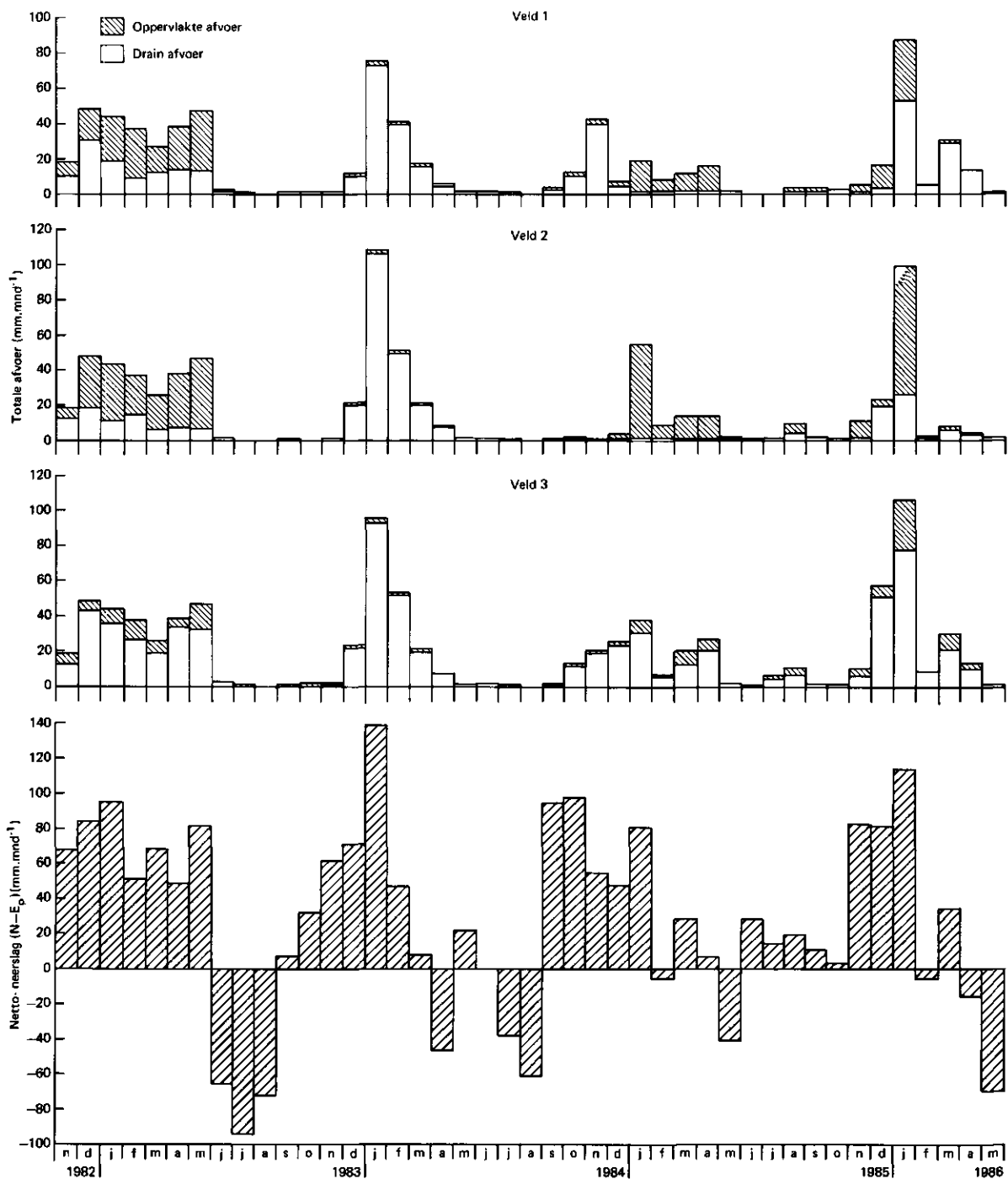


Fig. 24. Verloop van de maandelijkse totale afvoer (oppervlakte-afvoer + drainafvoer) in de tijd, in vergelijking met het maandelijkse neerslagoverschot

De meetgegevens van de periode november 1982 tot en met augustus 1984 zijn het meest betrouwbaar, omdat de opgetreden storingen snel werden verholpen en correctie van gemiste afvoeren mogelijk bleek te zijn. De afvoeren, gemeten tijdens deze periode zijn samengevat in tabel 12. Bij vergelijking

Tabel 12. Oppervlakte-afvoer en drainafvoer op de drie proefvelden

	Proefveld 1	Proefveld 2	Proefveld 3
<u>November 1982 t/m augustus 1983:</u>			
oppervlakte-afvoer (mm)	151*	182*	58
drainafvoer (mm)	114	81	205
	<u>265</u>	<u>263</u>	<u>263</u>
<u>September 1983 t/m augustus 1984:</u>			
oppervlakte-afvoer (mm)	8	3	5
drainafvoer (mm)	150	212	202
	<u>158</u>	<u>215</u>	<u>207</u>

*geschat (aanname: geen lekkage door afdichtingslaag, berging niet groter dan berging op proefveld 3)

van de drie proefvelden blijkt de afvoer van proefveld 1 in de periode september 1983-1984 achter te blijven bij de afvoeren van de velden 2 en 3. Het verschil van 50-55 mm kan niet worden toegeschreven aan verschillen in verdamping of berging. Het lijkt dus waarschijnlijk dat hier lekkage door de afdichtingslaag heeft plaatsgevonden. De oorzaak van deze lekkage is later door middel van opgravingen vastgesteld (zie par. 5.6.4).

In de periode september 1984 - mei 1986 zijn een aantal storingen opgetreden, waarbij correctie van de meetgegevens niet mogelijk was (zijdelingse toestroming van aangrenzende helling, lekkages ten gevolge van verstopte afvoer). Vooral door verstoppingen zijn tijdens de winter 1984/1985 de afvoeren op alle proefvelden te laag in vergelijking met het berekende neerslagoverschot (zie tabel 20 in hoofdstuk 6).

Na onderhouds- en reparatiewerkzaamheden in 1985 is de afvoer tijdens de daaropvolgende winter 1985/1986 weer normaal, althans op veld 3. Op de velden 1 en 2 is de drainafvoer wel weer op gang gekomen, maar de totale afvoer blijft duidelijk achter in vergelijking met veld 3.

5.6. METINGEN IN DE AFDEKLAAG

5.6.1. Berging van water in de afdeklaag

In par. 5.3 is reeds aangegeven dat het vochtbergend vermogen van de afdekgrond op de drie proefvelden belangrijk verschilt. Indien alle overige termen van de waterbalans bekend en/of gemeten zijn, dan kan de berging als restpost uit deze balans worden afgeleid. In het hier beschreven onderzoek

was het echter de bedoeling om de lekkage door de afdichtingslaag als restpost uit de balans af te leiden. Dit betekent dat de berging van water in de afdeklaag zo goed mogelijk moet worden gemeten of geschat.

In het eerste winterhalfjaar na aanleg van de proefvelden bleek een goede schatting van de vochtberging niet mogelijk vanwege de eerdergenoemde problemen met de oppervlakte-afvoer en het ontbreken van betrouwbare vochtspanningsmetingen. Door aan te nemen dat in dit eerste halfjaar nog geen lekkage optrad is de berging op veld 3 als restpost uit de waterbalans bepaald (240 mm in de periode 11 nov. '82 t/m mei '83). Voor de velden 1 en 2 is aangenomen dat de berging in deze periode ongeveer gelijk was aan die op veld 3.

De vochtspanningsmetingen zijn gebruikt om een indruk te krijgen van de mate van uitdroging/verzadiging van de afdeklaag. Met behulp van de pF-curven kan dan een schatting worden verkregen van de vochtinhoud van de laag. Gezien de spreiding in de pF-gegevens en de eerder gesignaleerde hysteresis-effecten mag worden verwacht, dat de nauwkeurigheid van deze schatting te wensen overlaat. De vochtspanningsmetingen zijn daarom vooral gebruikt om na te gaan in hoeverre de vochttoestanden bij het begin en het eind van een balansperiode van elkaar verschillen. Ook de gegevens met betrekking tot de grondwaterstand zijn hierbij beschouwd.

Het verloop in de vochtspanning met de tijd is in grote lijnen vergelijkbaar voor de drie proefvelden. Een voorbeeld betreffende uitdroging tijdens de zomer 1983 is gegeven in figuur 25. Uit deze figuur blijkt dat omstreeks eind augustus de vochtvoorraad in de afdekgrond zo ver is afgenomen dat de vochtspanning tot 75 cm diepte is opgelopen tot 1000 cm of meer (ca. pF 3). Op veld 3 blijkt de uitdroging tot minder hoge vochtspanningen te leiden, aangevend dat hier de hoeveelheid beschikbaar vocht het grootst is.

De modelberekeningen zijn in hoofdzaak getoetst met de meetgegevens van de periode april '83 - maart '84. Voor de periode maart '84 - mei '86 is de berging in het profiel berekend met behulp van het REDRAM-model (zie hoofdstuk 6).

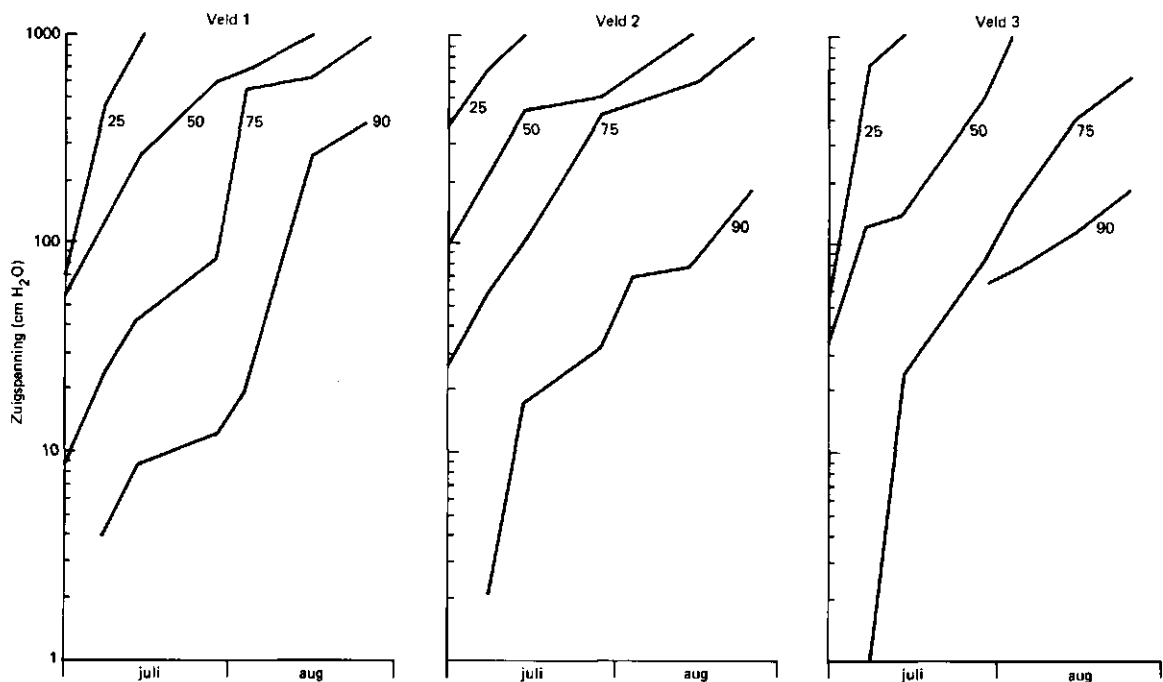


Fig. 25. Verloop van de zuigspanning tijdens de zomermaanden juli en augustus 1983 als functie van de diepte in de afdeklaag (diepten: 25, 50, 75 en 90 cm minus maaiveld)

5.6.2. Grondwaterstand

Een hoge grondwaterstand in de afdeklaag betekent enerzijds dat de afdichtingslaag kennelijk goed waterdicht is, anderzijds duidt het echter ook op het slecht functioneren van het drainagesysteem boven de afdichtingslaag. In het eerste halfjaar na aanleg van de proefvelden zijn op alle proefvelden hoge grondwaterstanden gemeten, gemiddeld in de orde van 40 cm minus maaiveld (zie fig. 26). Kennelijk was de drainageweerstand nogal groot en werd niet voldaan aan het criterium van een minimum doorlatendheid van de afdekgrond van $50 \text{ cm} \cdot \text{dag}^{-1}$, zoals geadviseerd door HOEKS en AGELINK (1982). Dit criterium is namelijk gebruikt voor de berekening van de drainafstand (15 m) op de proefvelden (helling $\approx 33\%$). De drains liggen direct in de zwarte afdekgrond. Afgezien van de cocosomhulling is geen speciaal omhullingsmateriaal (turfmolm, filterzand) gebruikt. Dit zal ertoe hebben bijgedragen dat de radiale weerstand rond de drains nogal hoog was. Ondanks de hoge grondwaterstanden bleek toch nog voortdurend berging van water op te treden tijdens dit eerste winterhalfjaar. Een mogelijke verklaring kan zijn dat bij bevochtiging van de afdeklaag veel lucht ingesloten raakt, die pas in de loop van de winter geleidelijk ontsnapt.

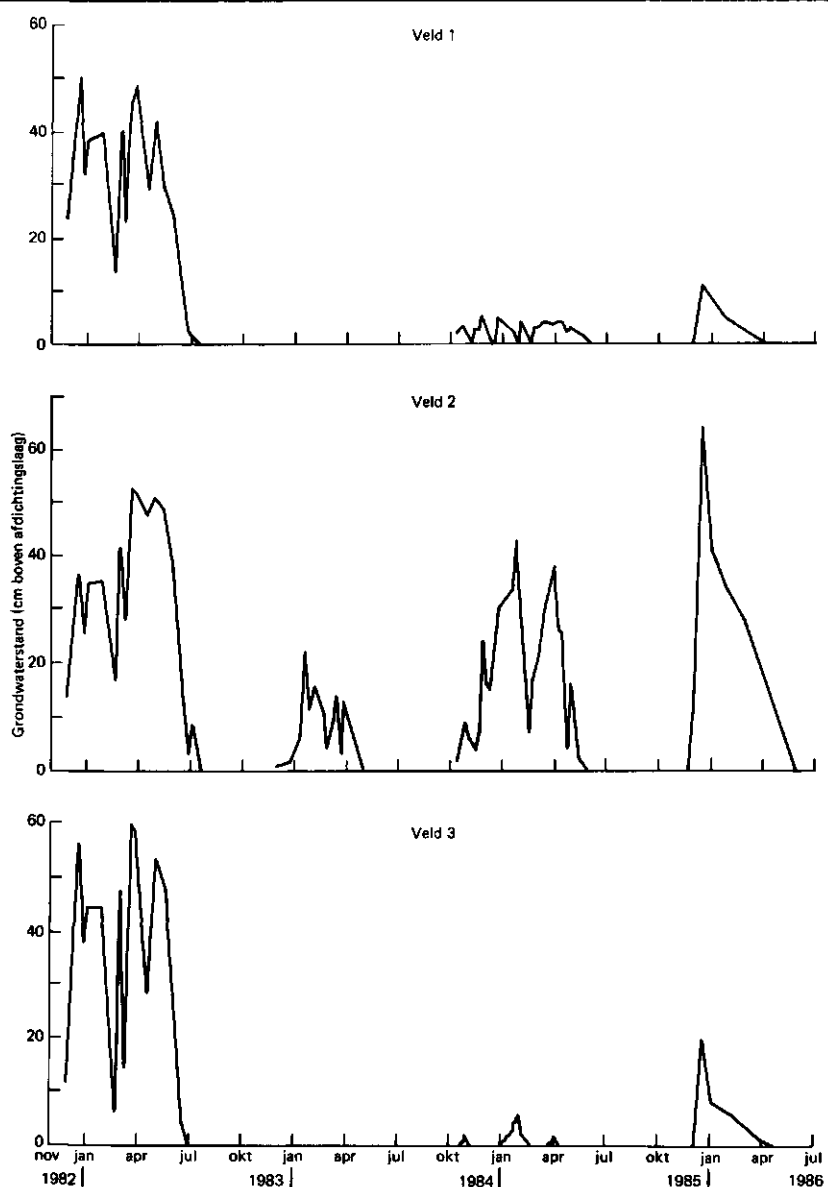


Fig. 26. Verloop van de grondwaterstanden op de drie proefvelden met de tijd (per veld zijn de gegevens van 12 grondwaterstandsbuizen gemiddeld)

Bij de aanleg is de afdekgrond nogal vastgereden, alleen de bovenlaag is later tot een diepte van circa 30 cm losgemaakt met een 'ripper' (zie par. 4.4.1). Dankzij de grasgroei en het op gang komen van het bodemleven is in de loop van 1983 de structuur van de grond zodanig verbeterd, dat tijdens de winter 1983/'84 op veld 1 en 3 praktisch geen grondwaterstanden van enige betekenis zijn gemeten. Proefveld 2 vormt een uitzondering. Het lijkt aannemelijk dat hier een gedeeltelijke verstopping in het afvoersysteem naar de meetput is opgetreden, te meer daar in de winter 1984/'85 op dit veld nog hogere grondwaterstanden zijn opgetreden, die gepaard gingen met een zeer lage drainafvoer. Pogingen om deze verstopping op te heffen met

behulp van een hoge drukspuit hebben geen succes gehad. In de winter 1983/'84 kon het neerslagoverschot van veld 2 nog vrijwel geheel via de drains worden afgevoerd. In de winter 1984/'85 is het drainagesysteem echter nog meer verstopt geraakt. De grondwaterstand begon in de loop van november te stijgen. Op het gehele veld zijn hoge grondwaterstanden gemeten.

Dus niet alleen de afvoer van het veld maar ook het drainagesysteem op het veld functioneert onvoldoende. Het neerslagoverschot is grotendeels over het oppervlak afgevoerd. Overigens wijzen de hoge grondwaterstanden erop dat de afdichtingslaag op veld 2 een grote weerstand heeft. Ook tijdens de winter 1985/1986 blijft de grondwaterstand hoog, hetgeen wijst op een slecht functionerend drainagesysteem.

Op veld 1 en 3 heeft het drainagesysteem aanvankelijk goed gefunctioneerd. In de winter 1983/'84 bleef de grondwaterstand hier zeer laag (max. 10 cm boven de afdichtingslaag). In de winter 1984/'85 is op veld 1 wel een grondwaterstand waarneembaar, omdat in de grondwaterstandsbuis onder aan de helling steeds een hoge grondwaterstand is gemeten terwijl alle andere buizen droog stonden. Dit wijst er op dat het drainagesysteem op het veld goed werkt, maar dat de afvoer naar de meetput verstopt is geraakt. Met name in de maanden januari - april 1985 is de drainafvoer nihil. De totale afvoer bestaat in deze periode overwegend uit oppervlakte-afvoer. Het water verzamelt zich aan de voet van de helling en stroomt tenslotte over de rand in de goot voor oppervlakte-afvoer.

Op veld 3 heeft het drainagesysteem over het algemeen goed gefunctioneerd. Hier zijn geen hoge grondwaterstanden geconstateerd, wel was aan de voet van de helling altijd een hogere grondwaterstand aanwezig, hetgeen duidt op enige weerstand in het afvoersysteem.

Tijdens de laatste winter 1985/86 heeft het drainafvoersysteem weer redelijk gefunctioneerd, met uitzondering van veld 2 waar op het gehele veld nog steeds hoge grondwaterstanden voortkwamen.

Op hellingen is het van groot belang dat de grondwaterstand niet te hoog oploopt. Op verzoek van de VAM heeft de Heidemij een onderzoek verricht naar de kans op afschuiving van afdekgrond op een helling (HEIDEMIJ, 1985). Hieruit blijkt dat de kans op afschuiving toeneemt naarmate de grondwaterstand hoger is en de grond minder cohesie vertoont.

5.6.3. Bodemtemperatuur

Op enkele plaatsen op de velden 1 en 3 is de bodemtemperatuur als functie van de diepte gemeten met het doel enige informatie te hebben over het temperatuurverloop met de diepte. Dit temperatuurverloop kan aanwijzingen geven over de warmtetoevoer vanuit het stort naar de afdeklaag.

Op veld 3 is op twee plaatsen gemeten, onder en boven aan de helling, omdat uit eerder onderzoek (AGELINK, 1981) was gebleken dat de temperatuur in de bodem toeneemt met de dikte van de laag afval onder de afdeklaag. Hoewel bij enkele metingen de bodemtemperatuur boven aan de helling inderdaad iets hoger was dan onder aan de helling, blijkt gemiddeld dit verschil niet significant te zijn. Wel geven de hoge temperaturen op 75-90 cm diepte aan, dat er voortdurend warmte vanuit het afvalstort wordt afgestaan aan de afdeklaag. Zelfs in de zomerperiode is de temperatuur op 75 cm diepte hoger dan op 25 cm diepte (zie fig. 27). Ook in volgende jaren (1985/1986) is een vergelijkbaar temperatuurverloop met die diepte gevonden.

In de periode januari tot en met maart 1984 verandert de buitentemperatuur langere tijd weinig, resulterend in een tamelijk constante temperatuur op 25 cm diepte van circa 7°C. In deze periode blijkt er een praktisch constant verschil van circa 4°C te bestaan met de temperatuur op 75 cm diepte. De warmte-afvoer uit het stort zou geschat kunnen worden met:

$$G = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \approx - \lambda \frac{T_{25} - T_{75}}{0,50} \quad (8)$$

waarin: G = warmteflux ($W \cdot m^{-2}$)
λ = warmtegeleidingsvermogen van de grond ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
 T_{25}, T_{75} = temperatuur (K) op 25 respectievelijk 75 cm diepte
T = temperatuur (K)
z = diepte (m)

Bij een vochtgehalte van circa 50 vol.% kan λ worden geschat op ongeveer $1,25 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ dus $G = 10 W \cdot m^{-2}$ ($= 2,39 \text{ cal} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). Per jaar is de vrijkomende hoeveelheid warmte dan circa $75 \text{ 000 kcal} \cdot m^{-2}$. Hoewel deze hoeveelheid warmte op zich voldoende is om circa 140 mm water te verdampen, zal in de zomerperiode de warmtetoevoer meestal niet tot extra verdamping leiden, omdat dan als gevolg van vochttekorten de verdamping vaak niet potentieel is. De warmtetoevoer leidt dan tot extra opwarming van de afdeklaag en uit-

straling in de atmosfeer. In de winterperiode, onder relatief natte omstandigheden, kan een deel van de toegevoerde warmte leiden tot hogere verdamping. Aannemend dat de warmtetoevoer uit het stort gelijkelijk is verdeeld over winter- en zomerperiode en dat in de winter 50% van de warmtetoevoer (d.i. 50% van $37\ 500\ \text{kcal.m}^{-2} \approx 18\ 750\ \text{kcal.m}^{-2}$) beschikbaar is voor verdamping, dan zou ongeveer 35 mm water extra kunnen verdampen in de winterperiode (totale verdamping in de winterperiode (okt.-april) ca. 90-100 mm). De warmtetoevoer uit het stort kan er dus toe leiden dat op jaarbasis circa 35 mm extra verdamping optreedt op een totale verdamping van 450 à 500 mm, dat is dus circa 7% extra verdamping.

Er lijken geen redenen aanwezig om aan te nemen dat de warmte-toevoer uit het stort op de drie proefvelden verschillend is. De temperatuurgradiënten liggen voor de velden 1 en 3 in dezelfde orde van grootte (zie tabel 13).

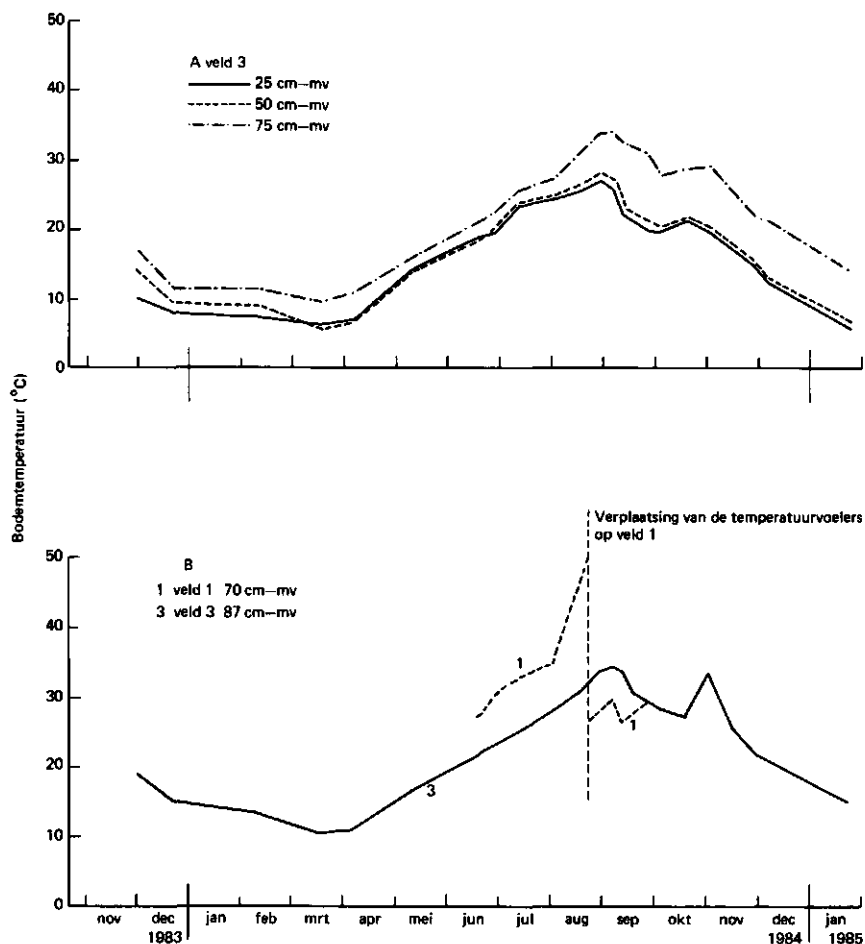


Fig. 27. Verloop van de bodemtemperatuur boven aan de helling op proefveld 3, op diepten van 25, 50 en 75 cm onder maaiveld (A) en een vergelijking van de temperatuur vlak boven de afdichtingslaag op veld 1 en 3 (B)

Tabel 13. Temperaturen (°C) in de afdeklaag op de proefvelden 1 en 3 op enkele tijdstippen in zomer en najaar

Locatie	Datum	Temperatuur (°C) op diepte			
		25 cm	50 cm	75 cm	90 cm
<u>Proefveld 1:</u>					
- bij buis 12 (gaslekkage!)	12- 7-'84	32,1	32,4	33,1	-
	25- 8-'84	47,7	49,3	50,9	-
- bij buis 8 (na verplaatsing)	25- 8-'84	25,3	26,6	26,8	-
	26- 9-'84	20,5	27,3	29,7	-
	4-10-'84	19,1	25,5	27,8	-
<u>Proefveld 3:</u>					
- bij buis 3	12- 7-'84	23,2	23,6	25,4	25,6
	25- 8-'84	26,5	27,3	31,8	31,8
	26- 9-'84	19,7	21,2	30,6	30,7
	4-10-'84	19,4	20,3	27,8	28,0

Kennelijk heeft de aard van het verdichtingsmateriaal (bentoniet-zand of Hypofors) weinig effect op de temperaturen in de afdeklaag.

Lekkage van gas door de afdichtingslaag heeft wel grote invloed op de temperatuur in de afdeklaag. Dit bleek op veld 1 waar de temperatuurmeting aanvankelijk plaats vond in de nabijheid van meetpunt 12, waar later gaslekkage is geconstateerd. Hier werden in de bodem temperaturen van 40-50°C gemeten.

5.6.4. Lekkage van stortgas

De totale afvoer op veld 1 bleef in de winterperiode 1983/'84 duidelijk achter bij de velden 2 en 3. Dit was aanleiding tot nader onderzoek met betrekking tot mogelijke lekkage op dit veld. Verlies van water in de winterperiode via lekken in de afdichtingslaag kan tot gevolg hebben dat onder drogere omstandigheden in de zomerperiode mogelijk stortgas in de afdeklaag doordringt via deze lekken. Daarom zijn in het voorjaar en de zomer van 1984 enkele gasmetingen uitgevoerd, waarbij zowel het methaan- als het zuurstofgehalte werden gemeten in de afdekgrond boven de afdichtingslaag. Ook al wordt geen methaangas aangetroffen, dan wijzen zuurstofgehalten lager dan 10 à 15% meestal toch op gaslekkage. Bij relatief kleine lekkages verloopt de oxydatie van CH_4 door methaanoxyderende bacteriën zo snel dat methaan niet meer aantoonbaar is. Het hoge zuurstofverbruik bij deze oxydatie leidt echter wel tot lage zuurstofgehalten (zie HOEKS, 1972).

Op 19 april 1984 werd op de plaatsen aangegeven in figuur 28 het zuurstof- en methaangehalte gemeten. Op de punten 4 tot en met 9, dus op het lagere gedeelte van de helling, werd gaslekkage geconstateerd. In enkele gevallen bleek dit direct uit de aanwezigheid van methaangas in de afdeklaag. In andere gevallen bleek dit indirect uit de zeer lage zuurstofgehalten. Bij latere metingen in mei 1984 kon geen gaslekkage meer worden vastgesteld op deze plaatsen.

Op 4 juni 1984 is een opgraving verricht ter plaatse van de meetpunten 6, 8 en 9, waarbij ook de eerste las vanaf de scheidingswand werd blootgelegd. Metingen vooraf toonden aan dat toen wel weer gas aanwezig was in de afdeklaag. Bij deze opgraving bleek de las in uitstekende conditie. Met de

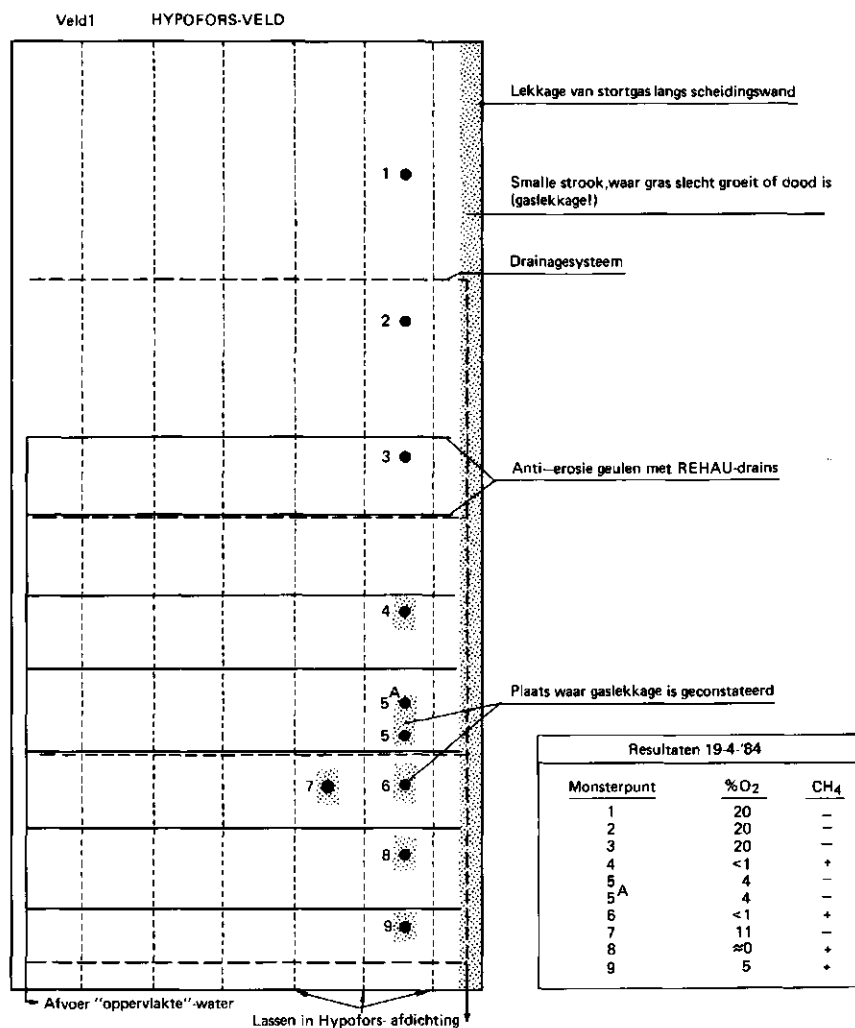


Fig. 28. Resultaten van metingen met betrekking tot het methaan- en zuurstofgehalte in de afdeklaag op proefveld 1, gemeten op 19 april 1984 (zie tekst)

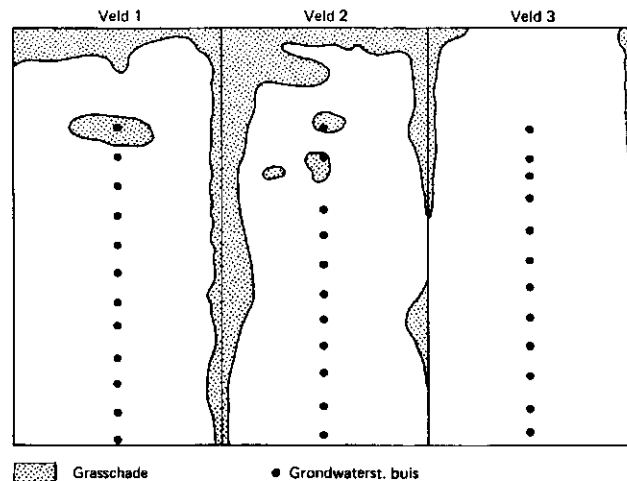


Fig. 29. Bovenaanzicht van de schade aan de grasvegetatie door gaslekkage op de drie proefvelden, gekarteerd op 16 augustus 1984

vacuumklok werden verscheidene controles op lekdichtheid uitgevoerd. Er werden geen lekken geconstateerd. Dit betekent dat het methaangas afkomstig moet zijn van lekken langs de scheidingswand, waar inderdaad forse gaslekkage werd geconstateerd (tussen scheidingswand en opstaande Hypofors rand). Zijdelingse verplaatsing van gas over afstanden van meer dan 2 à 3 meter kan plaatsvinden als de bovengrond slechtdoorlatend is voor gas. Dit treedt voornamelijk op als de bovengrond door veel neerslag bijna verzadigd is (tijdens en vlak na perioden met veel neerslag). Deze omstandigheden hebben zich inderdaad voorgedaan vóór en op 19 april en 4 juni 1984.

Later in de zomer van 1984 openbaarden zich de plaatsen met gaslekkage zeer duidelijk in bruinkleuring en afsterven van de grasvegetatie. De schade aan de grasvegetatie is zo goed mogelijk gekarteerd en weergegeven in figuur 29. Een belangrijk deel van de gaslekkage is geconcentreerd langs de scheidingswanden tussen de velden en langs de bovenrand. Deze lekkage heeft weinig of geen gevolgen voor de waterbalans van de velden omdat hier in de winterperiode nauwelijks water kan weglekken (opstaande rand Hypofors). Alleen op de bentonietvelden zou langs de randen enige lekkage kunnen plaatsvinden (opstaande rand ontbreekt) maar door opzwellen van de bentoniet onder natte omstandigheden zal deze lekkage gering zijn.

Bij praktische toepassing van bovenafdichting zullen normaliter geen scheidingswanden (met kans op lekkage) aanwezig zijn. Het in figuur 29 geschetste beeld van de vegetatieschade is dus extreem. Wel illustreert deze figuur dat door metingen met een gaslekzoekmeter en opname van de vegeta-

tieschade betrekkelijk eenvoudig lekken in de bovenafdichting kunnen worden opgespoord.

Op veld 2, waar de zand-bentoniet laag slechts 10 cm dik is, werden ook midden op het veld en vooral hoger op de helling bruine plekken in de grasvegetatie geconstateerd. Mogelijk is hier de zand-bentoniet laag plaatselijk uitgedroogd en gasdoorlatend geworden. Overigens is er een redelijke kans dat onder natte omstandigheden de bentoniet opnieuw opzwellt en weer waterdicht wordt.

Eind augustus 1984 is midden op veld 1 (bij meetpunt 12, ca. 15 m van de bovenrand) lekkage van methaangas geconstateerd, aan de hand van gas- en zuurstofmetingen. Bovendien was de bodemtemperatuur ter plaatse zeer hoog (40-50°C). De lekkage openbaarde zich door bruinkleuring van gras ter plaatse. Op 21 mei 1985 is middels opgraving onderzocht wat de oorzaak van deze lekkage was. Over een oppervlak van 5 x 5 m² is de grond weggegraven en de Hypofors-afdichting blootgelegd. Bij dit onderzoek werden meerdere lekken geconstateerd. Ter plaatse van de 'fabriekslussen' (in een Hypoforsbaan zijn namelijk drie banen anti-doorgroei-folie opgenomen) werden vele kleine lekken geconstateerd. De lekkage door de fabriekslussen is het gevolg van een incidentele constructiefout bij de hier geleverde partij Hypofors. Verdere aanpassingen en verbeteringen in het fabricageproces hebben er voor gezorgd dat deze constructiefout momenteel niet meer kan voorkomen.

Tevens zijn een drietal gaten gevonden, waarvan één met zekerheid is ontstaan door een grindsteen in de onderliggende zandlaag. Onder invloed van de druk van de bovenliggende afdeklaag en vooral de relatief hoge temperatuur (40-50°C) kunnen harde voorwerpen door het asfaltmembraan worden gedrukt.

Ten tijde van de opgraving bleek dat de grasvegetatie op veld 1 duidelijk achterbleef bij de andere twee velden. Op veld 2 en 3 was de vegetatie donkergroen van kleur en goed ontwikkeld. Vergeleken daarmee was de vegetatie op veld 1 slecht ontwikkeld en lichtgroen en plaatselijk gelig van kleur. Het vermoeden bestond dat de gaslekkage diffuus verspreid over het gehele veld plaats vindt (vermoedelijk via de 'fabriekslussen'). In juli 1985 is daarom het gras geoogst en het vers gewicht bepaald. De resultaten waren:

- veld 1 2240 kg (= 12,4 ton.ha⁻¹)
- veld 2 7210 kg (= 39,6 ton.ha⁻¹)
- veld 3 7360 kg (= 40,9 ton.ha⁻¹)

De achterstand van de grasgroei op veld 1 bleek groot te zijn, maar liefst 70% opbrengstreductie vergeleken met de andere velden. De belangrijkste oorzaak ligt vrijwel zeker bij de gaslekkage, waardoor slechte aeratie-omstandigheden ontstaan in de wortelzone.

5.6.5. Zettingen

De zettingen op de helling, waarop de proefvelden zijn aangelegd, is vastgesteld aan de hand van waterpassingen. Daarbij zijn de hoekpunten van het proefferrein en de maaiveldshoogten ter plaatse van de grondwaterstandsbuizen gewaterpast.

De gegevens in tabel 14 laten zien dat boven aan de helling duidelijk sprake is van zetting, bij buis 12 circa 0,60 meter in de periode 1983/84 en circa 1,40 meter periode 1983/1986. Verder de helling afgaand neemt de zetting steeds verder af. Op de onderste 10 à 20 m van de helling is de zetting gering en op veld 1 en 2 is soms zelfs sprake van een toename van de hoogte. Waarschijnlijk is de zetting van de lagen afval onderaan de helling gering, omdat de bovenlasting hier klein is en bovendien hoge waterstanden voorkomen in het stort. Mogelijk heeft ook geringe (overigens niet waarneembare) afschuiving van grond plaatsgevonden.

Tabel 14. Zettingen op de proefvelden, bepaald aan de hand van waterpassingen (hoogten in meters t.o.v. NAP)

Meetpunt (nr buis)	Veld 1			Veld 2			Veld 3		
	22-2-83	15-2-84	15-5-86	22-2-83	15-2-84	15-5-86	22-2-83	15-2-84	15-5-86
1	15,40	15,52	15,52	15,38	15,40	15,38	15,36	15,40	15,27
2	16,58	16,70	16,46	16,61	16,69	16,56	16,51	16,54	16,45
3	17,62	17,67	17,53	17,55	18,07	17,54	17,82	17,78	17,60
4	18,72	18,80	18,53	18,60	19,08	18,88	19,10	19,06	18,79
5	19,99	19,98	19,82	19,83	20,30	20,06	20,38	20,35	20,02
6	20,98	20,97	20,78	20,81	21,19	21,01	21,49	21,31	21,25
7	22,19	22,10	21,85	21,99	22,31	22,10	22,66	22,43	22,26
8	23,33	23,13	22,83	23,06	23,30	23,03	23,90	23,56	23,51
9	24,44	24,15	23,79	24,29	24,51	24,07	25,27	24,84	24,72
10	25,76	25,38	24,80	25,47	25,57	24,98	26,18	25,68	25,63
11	27,02	26,49	25,66	26,54	26,49	25,71	27,00	26,36	25,74
12	28,23	27,51	26,63	27,66	27,38	26,43	28,18	27,33	26,71
bovenrand	32,17	31,24		31,43			32,29	30,84	
onderrand	15,01			14,75			14,83		

5.7. WATERBALANSEN VAN DE PROEFVELDEN

De eerder vermelde gegevens met betrekking tot neerslag, verdamping, oppervlakte-afvoer, drainafvoer en berging worden hier samengevat in waterbalansen voor de periode november 1982 tot september 1984. De lekkage door de afdichtingslaag moet als restpost uit de waterbalans naar voren komen. De waterbalans (in mm's) luidt:

$$N = E + q_{\text{opp}} + q_{\text{drain}} + \Delta B + q_{\text{lek}} \quad (9)$$

waarin: N = neerslag
E = actuele verdamping
 q_{opp} = oppervlakte-afvoer
 q_{drain} = afvoer uit drainagesysteem
 ΔB = wijziging van de vochtberging in het profiel
 q_{lek} = lekkage door de afdichtingslaag

De betrouwbaarheid van deze balans laat met name voor de eerste winterperiode 1982/'83 te wensen over. Als gevolg van erosie op de velden 1 en 2 moest de oppervlakte-afvoer hier geschat worden door aan te nemen dat geen lekkage is opgetreden in deze periode en dat de vochtberging gelijk was aan de vochtberging op veld 3. Op veld 3 kon de berging redelijk nauwkeurig worden vastgesteld omdat hier geen erosie is opgetreden. Overigens werd daarbij ook aangenomen dat de lekkage verwaarloosbaar was.

De actuele verdamping is geschat door de beschikbare hoeveelheid vocht aan het begin van een periode met verdampingsoverschot te vergelijken met het totale neerslagtekort (= verdampingsoverschot) in deze periode. Als de beschikbare hoeveelheid vocht te klein is om het neerslagtekort te dekken, dan is aangenomen dat verdampingsreductie optreedt. De reductie is berekend als het verschil tussen verdampingsoverschot en beschikbaar vocht over de beschouwde periode. Hier is dus aangenomen dat pas verdampingsreductie optreedt als alle beschikbare vocht is verbruikt. Later bij de modelberekeningen (hoofdstuk 6) is aangenomen dat reeds eerder reductie begint op te treden.

De vochtvoorraad in het profiel was eind mei 1983 nog bijzonder hoog. De grondwaterstand stond op circa 30-70 cm beneden maaiveld. Ruw geschat bedraagt de vochtvoorraad op de drie proefvelden op dat moment:

31 mei 1983:

veld 1: voorraad = 465 mm; beschikbaar voor plant = 300 mm

veld 2: voorraad = 400 mm; beschikbaar voor plant = 220 mm

veld 3: voorraad = 550 mm; beschikbaar voor plant = 320 mm.

Bij potentiële verdamping bedraagt het neerslagtekort in de maanden juni tot en met augustus 1983 totaal 231 mm. Daarom is aangenomen dat op de velden 1 en 3 potentiële verdamping heeft kunnen plaatsvinden. Op veld 2 is volgens deze schatting een geringe verdampingsreductie opgetreden van 11 mm.

In het voorjaar van 1984 is in april reeds sprake van een neerslagtekort, maar dit wordt in mei weer gedeeltelijk aangevuld met een neerslagoverschot. Eind mei 1984 bedraagt de vochtvoorraad:

31 mei 1984:

veld 1: voorraad = 370 mm; beschikbaar voor plant = 205 mm

veld 2: voorraad = 310 mm; beschikbaar voor plant = 130 mm

veld 3: voorraad = 455 mm; beschikbaar voor plant = 225 mm.

Bij potentiële verdamping bedraagt het neerslagtekort in de maanden juni tot en met augustus 1984 in totaal slechts 99 mm. Dit betekent dat op alle velden potentiële verdamping heeft kunnen plaatsvinden. Uit de cijfers blijkt dat de zomer van 1984 aanzienlijk natter was dan die van 1983. Ook de verdampingscijfers liggen belangrijk lager (minder straling) met name in de maanden juni en juli.

De waterbalanscijfers zijn per maand berekend en gepresenteerd in de tabellen 15 en 16. Opvallend is het achterblijven van de totale afvoer op veld 1 in de periode september 1983 - augustus 1984 (tabel 16), terwijl de afvoeren van veld 2 en 3 in dezelfde orde van grootte liggen. Dit verschil in afvoer (ca. 50 mm) treedt met name aan de dag tijdens de winterperiode 1983/84 (zie ook fig. 30). Vergelijking met het neerslagoverschot in de periode september 1983 tot en met augustus 1984 (245 mm) laat zien dat op veld 1 slechts 65% van dit overschot tot afvoer kwam, terwijl op de velden 2 en 3 respectievelijk 88% en 85% van het overschot werd afgevoerd. De overige 12-15% werd geborgen in de afdeklaag van deze twee velden. De vochtinhoud aan het eind van deze balansperiode is dan ook groter dan bij het begin (1 sept. 1983). Dit is in overeenstemming met de gemeten vochtspanningen (1 sept. 1983: ca. pF 3,0; 1 sept. 1984; ca. pF 2,6).

Tabel 15. Waterbalansen (in mm's per maand) voor de periode 11 november 1982 tot en met augustus 1983

Omschrijving	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Totaal
E_o	4	1	8	15	41	66	85	142	147	100	609
α	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	
E_p	2,0	0,5	4,0	7,5	24,6	46,2	68,0	113,6	117,6	80,0	464
N_p	70,5	85,0	99,6	59,0	94,2	94,8	150,1	48,0	23,4	9,3	734
$N-E_p$	68,5	84,5	95,6	51,5	69,6	48,6	82,1	-65,6	-94,2	-70,7	270
<u>Veld 1:</u>											
N-E	68,5	84,5	95,6	51,5	69,6	48,6	82,1	-65,6	-94,2	-70,7	270
opp. afvoer*	6,8	18,0	24,8	27,8	14,2	25,0	33,5	0,2	0,3	0	151
drainafvoer	11,4	30,6	19,3	9,7	12,7	14,0	14,1	1,7	0	0	114
Δ berging	50,3	35,9	51,5	14,0	42,7	9,6	34,5	-67,5	-94,5	-70,7	+ 5
vochtinhoud	227							465			232
<u>Veld 2:</u>											
N-E	68,5	84,5	95,6	51,5	69,6	48,6	82,1	-65,6	-94,2	-59,7	281
opp. afvoer*	6,4	30,2	32,0	22,1	19,4	31,2	40,1	0,1	0	0	182
drainafvoer	12,9	18,4	12,1	15,4	6,2	7,8	7,5	0,6	0	0	81
Δ berging	49,2	35,9	51,5	14,0	44,0	9,6	34,5	-66,3	-94,2	-59,7	+18
vochtinhoud	161							400			180
<u>Veld 3:</u>											
N-E	68,5	84,5	95,6	51,5	69,6	48,6	82,1	-65,6	-94,2	-70,7	270
opp. afvoer*	5,3	6,4	8,0	11,8	7,2	4,7	14,2	0,1	0,1	0	58
drainafvoer	12,9	42,2	36,1	25,7	18,4	34,3	33,4	1,9	0	0	205
Δ berging	50,3	35,9	51,5	14,0	44,0	9,6	34,5	-67,6	-94,3	-70,7	+ 7
vochtinhoud	310							550			317

*geschat: zie tabel 10 (par. 5.5.2)

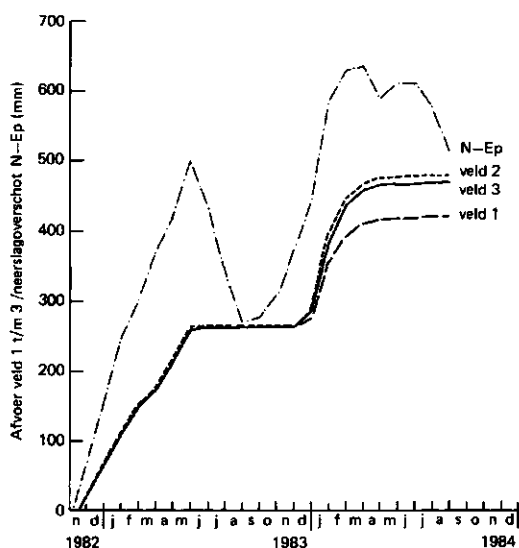


Fig. 30. Totale afvoer (drainafvoer + oppervlakte-afvoer) in vergelijking met het neerslagoverschot bij potentiële verdamping, beide cumulatief uitgezet tegen de tijd

Tabel 16. Waterbalansen (in mm's per maand) voor de periode september 1983 tot en met augustus 1984

Omschrijving	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Totaal
E _o	62	34	9	3	6	13	42	79	79	100	103	92	622
α	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
E _p	49,6	27,2	7,2	2,4	4,8	10,4	33,6	63,2	63,2	80,0	82,4	73,6	498
N _p	56,3	59,8	69,2	73,5	144,3	57,1	43,4	17,0	84,9	80,0	44,3	12,6	742
N-E _p	6,7	32,6	62,0	71,1	139,5	46,7	9,8	-46,2	21,7	0	-38,1	-61,0	245
N-E _p	6,7	32,6	62,0	71,1	139,5	46,7	9,8	-46,2	21,7	0	-38,1	-61,0	245
Veld 1:													
opp. afvoer	0,3	0,2	0,9	0,3	2,5	0,7	0,5	0,2	1,0	0,9	0,5	0,1	8
drainafvoer	0,2	0,1	0,4	11,9	73,4	40,6	17,0	5,4	0,3	0,4	0,1	0	150
Δ berging	6,2	32,3	60,7	48,9	38,6	-4,6	-10,7	-53,8	20,4	-1,3	-38,7	-76,1	+37
lekkage	-	-	-	10	25	10	3	2	-	-	-	-	50
vochtinhoud	232			332		419		404		370			269
Veld 2:													
opp. afvoer	0,1	0,1	0,3	0,2	1,6	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0	0	3
drainafvoer	0,1	0	1,9	21,9	107,6	50,7	19,9	8,5	0,5	0,5	0,1	0	212
Δ berging	6,5	32,5	59,8	49,0	30,3	-4,2	-10,3	-54,8	20,9	-0,8	-38,2	-61,0	+30
vochtinhoud	180			279		358		343		310			210
Veld 3:													
opp. afvoer	0,2	0,3	0,4	0,6	1,5	0,4	0,3	0,1	0,6	0,5	0,3	0,1	5
drainafvoer	0,1	0,1	1,0	23,1	94,2	53,5	21,0	7,6	0,4	0,4	0,2	0	202
Δ berging	6,4	32,2	60,6	47,4	43,8	-7,2	-11,5	-53,9	20,7	-0,9	-38,6	-61,1	+38
vochtinhoud	317			417		508		489		456			355

Opmerking: de afvoercijfers zijn gecorrigeerd voor lekkage van percolatiewater met behulp van de Cl-gehalten in het afgevoerde water

Gezien de vocht karakteristiek van de afdekgrond op veld 1 is het niet aan- nemelijk dat de vochtberging op veld 1 groter zou zijn dan op de velden 2 en 3. Ook een andere verklaring, namelijk dat het drainagesysteem op veld 1 niet goed zou werken waardoor hier water zou stagneren, gaat niet op want in dat geval zou tijdens een natte periode de grondwaterstand op veld 1 hoger moeten zijn en zou de drainafvoer na deze periode langer door moeten gaan dan op de beide andere velden. Dit is niet het geval, ook na de natte periode van december 1983 tot en met februari 1984 blijft de afvoer van veld 1 achter bij de twee andere velden. De conclusie moet dan ook zijn, dat op veld 1 water is verdwenen tengevolge van lekkage door de afdich- tingslaag. De lekkage kan niet langs de scheidingswanden plaats hebben gevonden, aangezien de Hypofors-afdichting circa 50 cm is opgezet tegen de wanden en de grondwaterstand niet boven dit niveau is gestegen in de winter 1983/'84. Nader onderzoek naar de oorzaak van deze lekkage (zie par. 5.6.4) heeft bevestigd dat lekkage mogelijk was, niet alleen ter plaatse van de opgraving maar ook elders op het veld.

Tabel 17. Samenvatting van de belangrijkste waterbalanstermen voor de periode 11 november 1982-1 september 1984

	Veld 1	Veld 2	Veld 3
Neerslagoverschot (N-E)	515	526	515
Totale afvoer (drainafvoer + opp. afvoer)	423	478	470
Berging in de afdeklaag	+42	+48	+45
Lekkage door afdichtingslaag	50	-	-
Waterdichtheid (% van neerslagoverschot)	90%	100%	100%

Hoewel door allerlei storingen de nauwkeurigheid van de metingen soms te wensen overliet, konden voor de periode 11 november 1982 tot 1 september 1984 de ontbrekende gegevens toch redelijk worden geschat. Een samenvatting van de belangrijkste gegevens voor deze periode is gegeven in tabel 17. De waterdichtheid van de afdichtingslagen is weergegeven als percentage van het neerslagoverschot, dat wil zeggen een percentage van 100% betekent dat het neerslagoverschot volledig is opgevangen en/of geborgen in de afdeklaag, terwijl een percentage lager dan 100% duidt op lekkage door de afdichtingslaag.

In de verlengingsfase van het onderzoek is vooral gekeken naar het functioneren van de afdichtingslagen op langere termijn. In de periode september 1984 tot mei 1986 zijn echter, zoals reeds eerder vermeld, veel storingen opgetreden die zonder de modelberekeningen moeilijk te interpreteren zijn. De modelberekeningen zijn daarom getoetst met de gegevens van de periode november 1982 tot september 1984. Voor de periode daarna tot mei 1986 zijn de modelberekeningen als basis genomen. Dat wil zeggen dat de berekende afvoeren als juist zijn aangenomen en dat de verschillen met de gemeten afvoeren veroorzaakt worden door lekkage. De bespreking van deze gegevens vindt plaats in hoofdstuk 6.

Op grond van de gegevens, verzameld tijdens de verlengingsfase, is geconcludeerd dat later ook op veld 2 lekkage is opgetreden. Gezien de hoge grondwaterstanden op dit veld moet een belangrijk deel van de lekkage worden toegeschreven aan lekkage langs de scheidingswanden. Aan de voet van de helling kan lekkage plaatsvinden over de tegen de wand opgezette Hypoforsbaan. Welk deel werkelijk door de bentonietafdichting is weggelekt is niet te achterhalen. De totale lekkage tijdens de winter 1985/86 bedroeg circa 100 mm en lag daarmee in dezelfde orde als op veld 1 (waar toen overigens ook lekkage langs de scheidingswanden is opgetreden).

Op veld 3 is ook tijdens de verlengingsfase geen lekkage opgetreden. Tijdens de laatste winter 1985/86 is de totale gemeten afvoer op 4 mm na gelijk aan de berekende afvoer.

Als het jaar 1984/1985 buiten beschouwing blijft, gezien de vele storingen, dan ontstaat het volgende beeld (zie voor meer informatie hfdst 6):

veld 1: 83% waterdicht

veld 2: 88% waterdicht

veld 3: 101% waterdicht

Hierbij moet worden opgemerkt dat een deel van de lekkage op de velden 1 en 2 is ontstaan door lekkage langs de scheidingswanden.

5.8. CONCLUSIES

Het hydrologisch onderzoek op de drie proefvelden heeft aangetoond, dat de infiltratie van regenwater in een afvalstort praktisch geheel kan worden voorkomen door het aanbrengen van afdichtingslagen op het stort. De zandbentoniet afdichtingen voldeden aan de verwachting en bleken na twee jaar nog 100% waterdicht te zijn, ondanks zettingen in de orde van 0,50 tot 1,50 m. De Hypofors-afdichting bleek aanvankelijk waterdicht te zijn, maar in het tweede jaar zijn lekken ontstaan in deze afdichting waardoor circa 50 mm water is geïnfiltreerd in het afvalstort. Bij opgravingen werden lekken geconstateerd, deels ten gevolge van incidentele constructiefouten bij de 'fabriekslagen' en deels ten gevolge van zettingen en/of grindstenen in de onderliggende zandlaag (= steunlaag).

Tijdens de verlengingsfase is ook lekkage opgetreden op veld 2 met de 10 cm dikke bentoniet afdichting. Een deel van de lekkage is echter in de hand gewerkt door het slecht of niet functioneren van het drainagesysteem, waardoor lekkage langs de scheidingswanden is opgetreden. Ook op veld 1 is gedurende de laatste winter 1985/1986 extra lekkage opgetreden als gevolg van het slecht functioneren van het drainafvoersysteem.

De lekkage van sterk verontreinigd percolatiewater aan de voet van de helling heeft aangetoond dat de 'teenconstructie' van essentieel belang is voor de scheiding van schoon en vuil water. In hoofdstuk 3 is hier reeds uitvoerig aandacht aan besteed.

Bij het opstellen van de waterbalansen zijn correcties uitgevoerd voor gemiste oppervlakte-afvoer als gevolg van erosie en voor lekkage van percolatiewater aan de voet van de helling. Bij incidentele storingen in de meetapparatuur zijn afvoeren geschat op grond van eerdere relaties tussen afvoer en neerslag en de actuele afvoersnelheden gemeten in het veld. Voor de periode november 1982 - september 1984 konden aldus redelijk betrouwbare waterbalansen worden opgesteld. Voor de periode september 1984 - mei 1986 was het niet mogelijk om alle storingen te corrigeren. In hoofdstuk 6 wordt nader ingegaan op de meetgegevens van de verlengingsfase, in vergelijking met de modelberekeningen.

6. MODELBEREKENINGEN BETREFFENDE DE WATERBALANS VAN DE PROEFVELDEN

6.1. ALGEMEEN

De waterbalansen van de drie proefvelden zijn berekend met behulp van het model REDRAM (RIJTEMA, ROEST en PANKOW, 1986). Bij de berekeningen is aangenomen, dat de afdichtingslaag geen water doorlaat. Daarom moeten de verschillen tussen berekende en gemeten afvoeren worden toegeschreven aan lekkage.

Het model REDRAM is tevens gebruikt om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren, waarbij is nagegaan welke invoergegevens het meest kritisch zijn voor de berekende afvoeren. Op deze wijze wordt meer zekerheid verkregen met betrekking tot de betrouwbaarheid van de conclusies. Dit is vooral van belang voor de conclusies betreffende lekkage, omdat de lekkage niet direct is gemeten maar als restpost uit de waterbalans is afgeleid.

6.2. BEKNOPTE BESCHRIJVING VAN HET REDRAM-MODEL

Het REDRAM-model is uitvoerig beschreven door RIJTEMA, ROEST en PANKOW (1986). Hier wordt volstaan met een beknopte uiteenzetting van de belangrijkste uitgangspunten van het model.

Het model berekent achtereenvolgens de waterbalans van de afdeklaag, de infiltratie van water in het afval, de waterbalans van het afvalstort en vervolgens de drainage en wegzijging/kwel onder het stort. Aangezien zetting en afbraak grote invloed hebben op de waterbalans van het afvalstort, zijn ook deze processen in het model opgenomen. De volgende afvoercomponenten worden berekend:

- de werkelijke verdamping van de vegetatie op de afdeklaag;
- de oppervlakte-afvoer over de afdeklaag;
- de zijdelingse uitstroming uit de afdeklaag;
- de afvoer via drains in de afdeklaag;
- de afvoer van percolatiewater via drains onder het afvalstort;
- de wegzijging van percolatiewater naar de ondergrond.

De waterbalans van een afvalstort wordt in grote mate bepaald door de hydrologische eigenschappen van de afdeklaag (zie HOEKS, 1981). Het neerslagoverschot, dat door de afdeklaag percoleert en infiltreert in het afvalstort, zal in de evenwichtssituatie aan de onderzijde als percolatiewater uittreden. Aanvankelijk zal echter de vochtbergingscapaciteit in het afval moeten worden opgevuld. Uit de modelberekeningen van RIJTEMA e.a. (1986) blijkt, dat de afvoer van percolatiewater vrij snel op gang komt, maar afhankelijk van de storthoogte kan het vele jaren duren alvorens de evenwichtssituatie wordt bereikt.

Bij de hier beschreven toepassing van het REDRAM-model is alleen de situatie met een waterdichte afdichtingslaag onder de afdeklaag beschouwd. Waterstroming in het afvalpakket is daarom buiten beschouwing gebleven. De berekeningen hebben voorts betrekking op slechts één helling van het stort, dus niet op de gehele stortplaats (laagdikte afval = 0, bovenbreedte stort = 0, breedte andere helling = 0).

Voor de waterbalans van de afdeklaag geldt de volgende vergelijking:

$$\frac{dM_t}{dt} = N - E - q_{opp} - q_z - q_{drain} - q_v \quad (10)$$

waarin: M_t = beschikbaar vocht in de afdeklaag op tijdstip t (m)
 t = tijd (dagen)
 N = neerslag (m.dag⁻¹)
 E = actuele verdamping (m.dag⁻¹)
 q_{opp} = oppervlakte-afvoer (m.dag⁻¹)
 q_z = zijdelingse afvoer (m.dag⁻¹)
 q_{drain} = drainafvoer (m.dag⁻¹)
 q_v = verticale afvoer naar het afval (m.dag⁻¹)

Aangezien hier is aangenomen dat de afdichtingslaag waterdicht is, zal $q_v=0$ zijn.

Enkele waarden met betrekking tot de hoeveelheid vocht in de afdeklaag zijn zeer karakteristiek als grenswaarden. In het rekenprogramma treedt oppervlakte-afvoer op zodra de afdeklaag volledig verzadigd is (M_s). Afvoer uit de afdeklaag treedt op zodra de hoeveelheid beschikbaar vocht groter wordt dan de beschikbare vochtinhoud bij evenwicht (M_e).

De verdamping stopt als er geen vocht meer beschikbaar is, dat wil zeggen bij het verwelkingspunt ($M_w=0$), en verdampingsreductie treedt op zodra een bepaalde mate van uitdroging van het profiel is bereikt (aM_e).

De potentiële verdamping (E_p), dat is de maximale gewasverdamping, wordt berekend uit de open-water-verdamping (E_o):

$$E_p = \alpha E_o \quad (11)$$

waarin: α = gewasfactor.

Bij de berekeningen wordt aangenomen dat in de effectieve wortelzone (dikte d_w) uitdroging kan optreden tot verwelkingspunt, terwijl uit de laag onder de wortelzone (dikte = $d_{afd} - d_w$) de helft van het beschikbare vocht kan worden onttrokken. De bovengenoemde grenswaarden worden dan als volgt berekend:

- beschikbaar vocht bij verzadiging

$$M_s = 0,5(d_w + d_{afd})(\theta_s - \theta_w) \quad (12a)$$

- beschikbaar vocht bij evenwicht

$$M_e = 0,5(d_w + d_{afd})(\theta_e - \theta_w) \quad (12b)$$

- beschikbaar vocht bij aanvang verdampingsreductie

$$M = a M_e \quad \text{met} \quad a = 14,68(E_p - N)^{0,641} \quad (12c)$$

waarin: d_w = dikte van effectieve wortelzone (m)
 d_{afd} = totale dikte van de afdeklaag (m)
 θ_s = vochtgehalte bij verzadiging ($m^3 \cdot m^{-3}$)
 θ_e = vochtgehalte bij evenwicht ($m^3 \cdot m^{-3}$)
 θ_w = vochtgehalte bij verwelkingspunt ($m^3 \cdot m^{-3}$)

Oppervlakte-afvoer treedt op zodra de afdeklaag geheel verzadigd is met water of wanneer het neerslagoverschot in de beschouwde periode de infiltratiecapaciteit overtreft. Dit betekent dat de volgende condities gelden voor het optreden van oppervlakte-afvoer ($q_v=0$):

$$M_t = M_s \quad \text{en} \quad N - E_p > q_z + q_{\text{drain}}$$

δf

$$N - E_p > k_c \tag{13}$$

waarin: k_c = verzadigde doorlatendheid van de afdeklaag (\approx infiltratiecapaciteit)

De werkelijke verdamping (E) wordt berekend met behulp van de eerder vermelde grenswaarde voor verdampingsreductie ($a M_e$) volgens de condities:

$$\begin{aligned} E_p < N & & E &= E_p \\ E_p < N \quad \text{en} \quad M_t > aM_e & & E &= E_p \\ E_p > N \quad \text{en} \quad M_t < aM_e & & E &= \frac{M_t}{aM_e}(E_p - N) + N \end{aligned} \tag{14}$$

Hierin is a de fractie van het beschikbaar vocht bij evenwicht, waarbij reductie in verdamping begint op te treden.

Afvoer uit de afdeklaag door zijdelingse uitstroming en/of afvoer via drains treedt in de hier beschreven situatie (afdichtingslaag ondoorlatend) alleen op als de beschikbare vochtinhoud M_t groter is dan M_e , de hoeveelheid beschikbaar vocht bij veldcapaciteit (= evenwicht). Op dat moment begint zich in de afdeklaag een grondwaterspiegel op te bouwen.

Uit onderzoek van HOEKS en AGELINK (1982) blijkt dat zijdelingse afvoer door de afdeklaag van weinig betekenis is zolang geen grondwaterspiegel aanwezig is in de laag. Wanneer wel een grondwaterspiegel aanwezig is boven de afdichtingslaag dan worden de zijdelingse afvoer en de drainafvoer berekend als:

$$q_z + q_{\text{drain}} = \frac{\Delta h}{T_c} \tag{15}$$

waarin: Δh = stijghoogteverschil (m)

T_c = drainageweerstand (dagen)

De drainageweerstand T_c wordt bepaald door de weerstand voor zijdelingse afvoer en, indien van toepassing, de intreeweerstand van het drainagestelsel. Daarbij is aangenomen dat de drains pas gaan afvoeren als ze geheel gevuld zijn met water. Bij de afvoerberekeningen wordt voorts aangenomen dat er geen grondwaterspiegel boven de drains staat. Deze voorwaarde wordt in de praktijk alleen vervuld worden als de intreeweerstand van de drains veel kleiner is dan de weerstand voor zijdelingse afstroming. In het model hebben de genoemde aannames tot gevolg dat ter plaatse van de drains vrijwel alle water door de drains moet worden afgevoerd. Bij relatief hoge intreeweerstanden lukt dit alleen als de stijghoogtegradiënt hoog is. Het gevolg is dan dat in kolommen met een drain hoge grondwaterstanden ontstaan zonder dat de zijdelingse afvoer toeneemt. Het verdient aanbeveling het REDRAM-model op dit punt aan te passen, zodat een meer realistische opbouw van de grondwaterspiegel wordt berekend.

Voor de verdere berekening van weerstanden, afvoeren en hoogte van de grondwaterspiegel wordt verwezen naar RIJTEMA, ROEST en PANKOW (1986).

6.3. INVOERGEGEVENS

De benodigde invoergegevens voor het REDRAM-model zijn in drie groepen ingedeeld. De eerste groep gegevens betreft algemene invoergegevens, die in het hoofdprogramma worden ingelezen en gelden voor alle onderscheiden perioden. De tweede groep gegevens, die ook in het hoofdprogramma worden ingelezen, betreft de meteorologische grootheden, neerslag en open water verdamping. De derde groep wordt per beschouwde periode ingelezen. Dit betreft gegevens die na verloop van tijd kunnen wijzigen. In het oorspronkelijke REDRAM-programma betreft dit de opbouw van het afvalstort tijdens een aantal stortperioden. Voor de hier beschreven toepassing is het echter ook mogelijk om perioden te onderscheiden met verschillen in vegetatieontwikkeling of verschillen in vocht karakteristieken als gevolg van zetting van de afdeklaag.

De eerste groep invoergegevens betreft voor de hier beschreven toepassing het aantal kolommen op de helling, de startdatum van de berekeningen, het aantal onderscheiden perioden, de tijdstap (1 dag), droog volumegewicht van de afdeklaag, de intreeweerstand van de drains in de afdeklaag en de drainafstand in de afdeklaag.

De tweede groep gegevens heeft betrekking op de meteorologische grootheden. De open-water-verdamping wordt ingelezen per decade en de neerslag per dag. De derde groep invoergegevens wordt per beschouwde periode ingelezen en heeft betrekking op de periodelengte, de effectieve dikte van de wortelzone in de afdeklaag, de doorlatendheid van de afdeklaag, de vocht karakteristiek van de afdeklaag (verzadiging, veldcapaciteit, verwelkingspunt), correctiefactoren voor neerslag en verdamping in verband met de helling en de expositie van de helling, aantal kolommen, breedte van de kolommen, helling van de ondergrond (hier de afdichtingslaag), dikte van de afdeklaag, diameter van de drains, initiëel vochtgehalte, initiële waterspiegel in de afdeklaag en doorlatendheid en weerstand van de afdichtingslaag (hier als waterdicht beschouwd).

De complete lijst van invoergegevens is opgenomen in bijlage 4. Enkele belangrijke gegevens zijn opgenomen in tabel 18. De gegevens in deze tabel hebben betrekking op de situatie na zetting. De karakteristieke vochtgehalten zijn ontleend aan de pF-curven, rekening houdend met hysteresiseffecten. De evenwichtsvochtgehalten (θ_e) zijn daarom gekozen in het traject (zie par. 5.3: fig. 19 en tabel 5):

- veld 1: 0,45-0,51 $m^3 \cdot m^{-3}$, in modelberekeningen 0,48 $m^3 \cdot m^{-3}$;
- veld 2: 0,40-0,42 $m^3 \cdot m^{-3}$, in modelberekeningen 0,42 $m^3 \cdot m^{-3}$;
- veld 3: 0,55-0,63 $m^3 \cdot m^{-3}$, in modelberekeningen 0,55 $m^3 \cdot m^{-3}$

waarbij de hoogste waarden zijn afgeleid uit de pF-curve (pF 2,0). De laagste waarden zijn geschat aan de hand van hysteresiseffecten zoals gevonden door VAN BOHEEMEN en HUMBERT (1984).

Tabel 18. Enkele belangrijke invoergegevens voor het REDRAM-model betreffende drie proefvelden in Wijster

Omschrijving	Dimensie	Symbool	Veld 1	Veld 2	Veld 3
Dikte afdeklaag	(m)	d_{afd}	0,85	0,85	0,85
Dikte wortelzone	(m)	d_w	0,50	0,50	0,50
Helling na zetting		$tg \gamma$	0,28	0,27	0,27
Drainafstand	(m)	L_c	15	15	15
Doorlaatfactor afdekgrond	($m \cdot d^{-1}$)	k_c	0,20	0,10	0,20
Vochtgehalte bij verzadiging	($m^3 \cdot m^{-3}$)	θ_s	0,60	0,51	0,71
Vochtgehalte bij veldcapaciteit	($m^3 \cdot m^{-3}$)	θ_e	0,48	0,42	0,55
Vochtgehalte bij verwelking	($m^3 \cdot m^{-3}$)	θ_w	0,10	0,10	0,16
Doorlatendheid afdichtingslaag	($m \cdot d^{-1}$)	k_s	2×10^{-30}	2×10^{-30}	2×10^{-30}
Initieel vochtgehalte	($m^3 \cdot m^{-3}$)	θ_i	0,27	0,19	0,36

Het vochtgehalte bij verwelkingspunt is voor veld 2 lager gekozen dan in hoofdstuk 5 namelijk $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. In hoofdstuk 5 werd de waarde uit de pF-curve ($0,21 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) reeds betwijfeld, reden waarom daar voor de berekeningen $0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ is gebruikt. Bij de modelberekeningen bleek in dat geval echter nog te veel verdampingsreductie op te treden tijdens de zomer van 1983.

Bij de modelberekeningen zijn de effecten van extra instraling en gewas-hoogte (zie par. 5.4.2) verdisconteerd in de gewasfactor, waarvoor de waarde 0,85 is gekozen (ruim 6% hoger dan normaal). De potentiële verdamping is dus berekend als:

$$E_p = 0,85 E_o \quad (16)$$

Deze waarde is mede gebaseerd op de veldgegevens, omdat de totale afvoer in de tweede helft van de onderzoeksperiode vrijwel uitsluitend bepaald wordt door het neerslagoverschot (N-E). Aangezien in de zomers van 1984 en 1985 geen verdampingsreductie is opgetreden, hebben de andere invoerparameters vrijwel geen effect op de afvoer in deze jaren.

De verdeling tussen oppervlakte-afvoer en drainafvoer wordt vooral bepaald door de intreeweerstand van de drains (ω_c) en de doorlatendheid (k_c). Kortdurende oppervlakte-afvoer tijdens buien kan niet worden berekend met de in REDRAM gebruikte tijdstap van 1 dag. Daarom is een vergelijking van berekende en gemeten oppervlakte-afvoer niet zo zinvol. Wel is rekening gehouden met het feit, dat het drainagesysteem van veld 2 slecht gefunctioneerend heeft, waardoor hier veel oppervlakte-afvoer is opgetreden. Ook is rekening gehouden met het feit dat de oppervlakte-afvoer op veld 1 doorgaans iets groter was dan op veld 2. Uiteindelijk zijn de volgende waarden gekozen:

- veld 1: $\omega_c = 25 \text{ dag} \cdot \text{m}^{-1}$, $k_c = 0,20 \text{ m} \cdot \text{dag}^{-1}$;
- veld 2: $\omega_c = 45 \text{ dag} \cdot \text{m}^{-1}$, $k_c = 0,10 \text{ m} \cdot \text{dag}^{-1}$;
- veld 3: $\omega_c = 20 \text{ dag} \cdot \text{m}^{-1}$, $k_c = 0,20 \text{ m} \cdot \text{dag}^{-1}$.

De waarden voor ω_c zijn hier nogal hoog, aangezien voor een goed functionerend drainagesysteem deze waarde meestal kleiner is dan $5 \text{ dag} \cdot \text{m}^{-1}$. De reden hiervoor is dat ondanks de tijdstap van 1 dag toch geprobeerd is de berekende oppervlakte-afvoer enigszins in de orde van grootte van de gemeten afvoer te krijgen. Als gevolg hiervan zullen uiteraard te hoge grondwaterstanden worden berekend.

6.4. RESULTATEN

6.4.1. Toetsing van het model

Het model REDRAM (RIJTEMA, ROEST en PANKOW, 1986) is gebruikt voor simulatie van de oppervlakte-afvoer en drainafvoer uit de afdeklaag. De toetsing van het model heeft voornamelijk plaats gevonden met de meetgegevens van de periode april 1983-april 1984, omdat in deze periode de metingen het meest intensief hebben plaatsgevonden. Storingen in de afvoermetingen waren relatief kortdurend en konden meestal gecorrigeerd worden voor gemiste afvoer. Zo is voor de eerste winter (1982/1983) de oppervlakte-afvoer voor de proefvelden 1 en 2 geschat (zie tabel 10, par. 5.5.2). Verder zijn de afvoeren, met name in het vroege voorjaar 1984, gecorrigeerd voor lekkage van percolatiewater door meting van het chloridegehalte (zie tabel 11, par. 5.5.3).

De toetsing van het model had vooral betrekking op de berekening van de totale afvoer (= oppervlakte-afvoer + drainafvoer). Aan de verdeling tussen oppervlakte-afvoer en drainafvoer is minder aandacht besteed, aangezien het REDRAM-model niet geschikt is voor een nauwkeurige berekening van de oppervlakte-afvoer.

Hoewel het REDRAM-model minder geschikt is voor berekening van oppervlakte-afvoer en ook de grondwaterstanden in de afdeklaag niet juist worden berekend, heeft dit weinig gevolgen voor de waterbalansberekeningen. De totaal afvoeren over de balansperioden worden namelijk wel juist berekend omdat steeds uitgegaan wordt van de waterbalans en aldus geen water verloren kan gaan.

6.4.2. Invloed van bodemfysische eigenschappen op de waterbalans

De berekeningen met het REDRAM-model geven de mogelijkheid om de effecten van bodemfysische eigenschappen op de waterbalans nader te onderzoeken. Zo is door variatie van een aantal invoervariabelen nagegaan welke factoren vooral de afvoer bepalen. In eerste instantie is uiteraard de verdeling van neerslag en verdamping in de tijd bepalend voor het al dan niet optreden van afvoer. Maar daarnaast blijkt de afvoer afhankelijk te zijn van het vochthoudend vermogen en de doorlatendheid van de grond.

De vochtbergingscapaciteit van de afdekgrond bepaalt het moment waarop de afvoer begint en beïnvloedt ook de actuele verdamping. Naarmate de vochtbergiging groter is, kan de vegetatie tijdens het groeiseizoen langer potentieel verdampen. Verdampingsreductie treedt dan niet op of pas later in het seizoen. Dankzij de hogere actuele verdamping is de hoeveelheid water, die moet worden afgevoerd, dan ook kleiner. Dit was ook reeds aangetoond door AGELINK en HOEKS (1980).

In de onderzoeksperiode november 1982 - mei 1986 is alleen verdampingsreductie opgetreden tijdens de zomer van 1983. In hoofdstuk 5 werd voor de globale berekening van de waterbalansen aangenomen dat alle beschikbare water tussen pF 2,0 en 4,2 zonder beperking door de plant kan worden opgenomen. Bij de modelberekeningen is echter aangenomen dat al veel eerder verdampingsreductie optreedt (zie vgl. 12c in par. 6.2). Om deze redenen werd in deelrapport 3 alleen verdampingsreductie berekend voor veld 2 (11 mm), terwijl bij de modelberekeningen voor alle velden reductie in verdamping is berekend: 19 mm op veld 1, 37 mm op veld 2 en 13 mm op veld 3. In alle volgende jaren was de neerslagverdeling tijdens de zomer zodanig, dat geen vochttekort en verdampingsreductie is opgetreden.

Het initiële vochtgehalte (θ_i) bij de start van het onderzoek bepaalt samen met het vochtbergend vermogen bij veldcapaciteit (θ_e) hoeveel water kan worden geborgen alvorens de drainafvoer begint. Daarna speelt het initiële vochtgehalte geen rol meer in de waterbalans. De vochtinhoud bij aanvang is ontleend aan de gegevens in hoofdstuk 5. Het REDRAM-model berekent dan de hoeveelheid beschikbaar vocht bij aanvang volgens de vergelijking:

$$M_i = 0,5(d_w + d_{afd})(\theta_i - \theta_w) \quad (17)$$

De oppervlakte-afvoer is afhankelijk van de neerslagintensiteit, de infiltratiecapaciteit en de drainageweerstand. In het REDRAM-model wordt de neerslagintensiteit ingevoerd als een daggemiddelde. Daardoor zal het zelden voorkomen dat de neerslagintensiteit de infiltratiecapaciteit (= k_c) overtreft. Dit betekent dat in het model alleen oppervlakte-afvoer optreedt als de grondwaterstand tot in het maaiveld stijgt en de neerslagintensiteit de drainafvoer overtreft. De drainafvoer is afhankelijk van de drainageweerstand, die wordt bepaald door de doorlatendheid (k_c) en de intreeweerstand (ω_c) van de drains. Om toch nog enige oppervlakte-afvoer te krijgen zal de drainageweerstand tamelijk groot moeten zijn. Opvoeren van de drainageweerstand leidt tot hogere grondwaterstanden en meer oppervlakte-

afvoer. Met name in de aanvangsperiode leidt dit ook tot berging van meer water in het profiel en het later op gang komen van de afvoer. De totale afvoer (oppervlakte-afvoer + drainafvoer) in de periode november 1982 - maart 1983 is daarom afhankelijk van zowel θ_i en θ_e , als ook van ω_c en k_c , die alle de vochtberging tijdens deze periode bepalen.

In volgende jaren is de totale afvoer vrijwel uitsluitend afhankelijk van het neerslagoverschot (N-E). Aangezien de neerslag via meting bekend is, wordt de afvoer dan vooral bepaald door de berekende actuele verdamping. Voor veld 3 zijn de meetgegevens, met uitzondering van het jaar 1984/85, voldoende betrouwbaar. De waterbalans blijkt hier het best te kloppen als $E_p = 0,85 E_o$. Gezien het eerder besproken instralingseffect op hellingen lijkt deze waarde wel aannemelijk. Omdat in de jaren 1984-1986 geen verdampingsreductie is opgetreden, hebben de bodemfysische eigenschappen vrijwel geen effect meer op de totale afvoer in die jaren.

De belangrijkste effecten van enkele parameters zijn samengevat in tabel 19. Duidelijk blijkt dat in jaren met potentiële verdamping (1984/1986) de totale afvoer alleen afhankelijk is van E_p . Dergelijke jaren lenen zich dus uitstekend voor bepaling van de grootte van de gewasfactor ($\alpha = E_p/E_o$). Met name de schatting van waarden voor ω_c en k_c is lastig omdat weinig meetgegevens beschikbaar waren. Bovendien leent het REDRAM-model zich niet goed voor het exact berekenen van oppervlakte-afvoer. De verdeling van de totale afvoer over oppervlakte-afvoer en drainafvoer is sterk afhankelijk van beide parameters. Gezien de onzekerheid omtrent de waarden van deze parameters moet niet al te veel waarde worden gehecht aan de verdeling over beide afvoercomponenten.

Tabel 19. Effecten van bodemfysische eigenschappen op de totale afvoer (A) en de verdeling oppervlakte-afvoer/drainafvoer (B) in de onderzoeksperiode

Parameter	1982/1983		1983/1984*)		1984/1986	
	A	B	A	B	A	B
Veldcapaciteit (θ_e)	+++	+	++	+	-	+
Initieel vochtgehalte (θ_i)	+++	-	-	-	-	-
Intreeweerstand (ω_c)	+	+++	±	+++	-	+++
Doorlatendheid (k_c)	+	+++	±	+++	-	+++
Verdamping (E_p)	±	-	++	-	+++	-

*) dit jaar wordt apart vermeld wegens het optreden van verdampingsreductie

+++ = zeer veel effect ++ = veel effect + = duidelijk effect

± = weinig effect - = geen effect

6.4.3. Analyse meetgegevens aan de hand van modelberekeningen

Bij vergelijking van gemeten afvoeren met berekende afvoeren moet worden bedacht dat het REDRAM-model de afvoeren berekent aannemende dat de afdichtingslaag onder de afdekgrond waterdicht is. Als de gemeten afvoeren lager uitvallen, betekent dit dus dat er lekkage is opgetreden. Gezien de storingen kan deze lekkage bestaan uit het verdwijnen van water langs de scheidingswanden (vooral bij hoge grondwaterstand), lekkage uit het afvoersysteem tussen de proefvelden en de meetput (lekke doorvoeringen, lekken in de afvoerbuis) en lekkage door de afdichtingslaag. Uiteraard is het doel van dit onderzoek om de lekkage door de afdichtingslaag vast te stellen. De totale afvoeren, bestaande uit oppervlakte-afvoer en drainafvoer, zijn weergegeven in tabel 20. De gemeten afvoeren van veld 1 en 2 zijn in de periode november 1982-mei 1983 gecorrigeerd voor gemiste oppervlakte-afvoer als gevolg van erosie (correctie veld 1: 85 mm, veld 2: 88 mm; zie tabel 10, hoofdstuk 5).

Tabel 20. Gemeten en berekende afvoeren (in mm) van de proefvelden tijdens de onderzoeksperiode november 1982-mei 1986

Periode	Gemeten afvoeren			Berekende afvoeren		
	q_{opp}	q_{drain}	q_{tot}	q_{opp}	q_{drain}	q_{tot}
Veld 1						
nov 82-mrt 83	92	+	84 = 176*	22	+	139 = 161
apr 83-mrt 84	64	+	173 = 237	33	+	251 = 284
apr 84-mrt 85	46	+	72 = 118	12	+	214 = 226
apr 85-mrt 86	75	+	103 = 178	48	+	226 = 274
apr 86-mei 86	0	+	14 = 14	0	+	14 = 14
			<u>723</u>			<u>959</u>
Veld 2						
nov 82-mrt 83	110	+	65 = 175*	54	+	90 = 144
apr 83-mrt 84	74	+	218 = 292	124	+	178 = 302
apr 84-mrt 85	84	+	13 = 97	61	+	165 = 226
apr 85-mrt 86	112	+	64 = 176	115	+	159 = 274
apr 86-mei 86	1	+	5 = 6	1	+	13 = 14
			<u>746</u>			<u>960</u>
Veld 3						
nov 82-mrt 83	39	+	135 = 174	10	+	155 = 165
apr 83-mrt 84	23	+	263 = 286	12	+	269 = 281
apr 84-mrt 85	23	+	115 = 138	2	+	225 = 227
apr 85-mrt 86	62	+	207 = 269	31	+	242 = 273
apr 86-mei 86	3	+	13 = 16	0	+	15 = 15
			<u>883</u>			<u>961</u>

* incl. schatting voor gemiste oppervlakte-afvoer (veld 1: 85 mm, veld 2: 88 mm)

q_{opp} = oppervlakte-afvoer q_{drain} = drainafvoer q_{tot} = totale afvoer

De totale afvoer blijkt volgens de modelberekeningen alleen in de periode november 1982-maart 1984 verschillend te zijn voor de drie velden. De verschillen in bodemfysische eigenschappen leiden in de beginperiode namelijk tot verschillen in berging en actuele verdamping. Met name veld 2 wijkt enigszins af als gevolg van een relatief laag aanvangsvochtgehalte waardoor de afvoer in de eerste winterperiode lager uitvalt. Vervolgens is de hoeveelheid beschikbaar vocht bij veldcapaciteit lager op dit veld, waardoor in de zomer van 1983 hier de grootste verdampingsreductie optreedt. In de volgende jaren is de totale afvoer voor alle velden gelijk, omdat geen verdampingsreductie is opgetreden. In dat geval blijken verschillen in bodemfysische eigenschappen geen rol meer te spelen.

In de periode november 1982-maart 1983 zijn de gemeten afvoeren hoger dan de berekende. De reden hiervoor is dat in die periode nog geen grasvegetatie aanwezig was, waardoor de verdamping naar schatting circa 20 mm lager is geweest dan berekend volgens de modelberekeningen, waar $E_p = 0,85 E_o$ is gekozen voor de gehele onderzoeksperiode.

Zoals reeds eerder is vermeld, zijn er tijdens het winterhalfjaar 1984/1985 veel storingen voorgekomen. Als dit jaar buiten beschouwing wordt gelaten, dan kan voor de overige jaren een vergelijking worden gemaakt tussen de gemeten en berekende totale afvoer (tabel 21). Uit deze vergelijking blijkt dat de afvoer van veld 3 zelfs nog iets groter is geweest dan berekend met het REDRAM-model (reden is waarschijnlijk de lagere verdamping tijdens de eerste winter). Deze cijfers geven aan dat de bentonietafdichtingslaag op veld 3 gedurende de totale onderzoeksperiode waterdicht is gebleven.

De conclusie met betrekking tot de waterdichtheid van de afdichtingslagen op de velden 1 en 2 zijn minder eenduidig. Voor het jaar 1983/84 werd reeds in hoofdstuk 5 geconcludeerd dat op veld 1 50 mm water is verdwenen als gevolg van lekkage door het asfaltmembraan. Gezien de resultaten van de opgraving op dit veld in mei 1985 kan worden aangenomen, dat de lekkage in volgende jaren minstens in dezelfde orde van grootte ligt.

Tabel 21. Vergelijking van gemeten en berekende totale afvoer voor de totale onderzoeksperiode, met uitzondering van het jaar 1984/85

Proefveld	Totale afvoer (in mm)		Lekkage (mm)	Waterdichtheid (%)
	gemeten	berekend		
veld 1	605	733	128	83
veld 2	649	734	85	88
veld 3	745	734	-11	101

De bentonietafdichtingslaag op veld 2 bleek in het jaar 1983/84 nog waterdicht te zijn. Daarna zijn echter problemen ontstaan met de drainafvoer. Ook is op dit veld tijdens de zomerperioden gasschade aan de grasvegetatie waargenomen. Het is daarom waarschijnlijk dat hier de bentonietafdichtingslaag niet waterdicht is gebleven, hoewel de hoge grondwaterstanden wel aangeven dat de weerstand van de laag groot is. Door de hoge grondwaterstanden kan extra lekkage langs de scheidingswanden zijn opgetreden.

Ruw geschat zal de lekkage door de afdichtingslaag op veld 2 in de winter 1985/86 in dezelfde orde van grootte hebben gelegen als op veld 1. In de winter 1985/86 deden zich op beide velden nog steeds problemen voor met de afvoer. Het is daarom niet verantwoord om een nauwkeurige schatting van de lekkage door de afdichtingslaag te geven. Uit de cijfers blijkt dat op de velden 1 en 2 respectievelijk 83 en 88% van het af te voeren neerslagoverschot is afgevoerd. Bij een goed functionerend drainafvoersysteem was dit percentage zeer waarschijnlijk hoger geweest (ca. 90%). Hoewel dus geen absolute afdichting is bereikt, is wel een belangrijke reductie van de infiltratie van regenwater in het afvalstort bereikt met de aangebrachte afdichtingslagen.

De totale afvoer, zoals berekend met het REDRAM-model is cumulatief uitgezet in figuur 31 en vergeleken met de gemeten afvoer. Hierbij moet worden opgemerkt dat de gemeten curve niet gecorrigeerd is voor gemiste oppervlakte-afvoer tijdens de eerste winter 1982/83 (geldt voor veld 1 en 2). Bovendien werken de storingen tijdens de winterperiode 1984/85 door in deze cumulatieve curven. Het uiteindelijke verschil tussen beide curven aan het eind van de onderzoeksperiode is dus ontstaan door gemiste oppervlakte-afvoer, lekken in het afvoersysteem en lekkage door de afdichtingslaag. Het verloop van de totale afvoer (= oppervlakte-afvoer + drainafvoer) met de tijd is weergegeven in bijlage 5. Hieruit blijkt dat onder veldomstandigheden de afvoer in het najaar eerder op gang komt dan de berekeningen aangeven. Dit houdt verband met het feit dat in het REDRAM-model pas afvoer optreedt als het vochtgehalte van de grond boven veldcapaciteit komt. In werkelijkheid blijkt reeds eerder afvoer op te treden omdat ook onder niet verzadigde omstandigheden al verticaal vochttransport kan optreden. Ook kan sprake zijn van hysteresis, waardoor drainafvoer al bij een lager vochtgehalte begint en uiteindelijk bij een hoger vochtgehalte stopt. In de berekeningen komt het hysteresiseffect alleen tot uitdrukking in een lagere

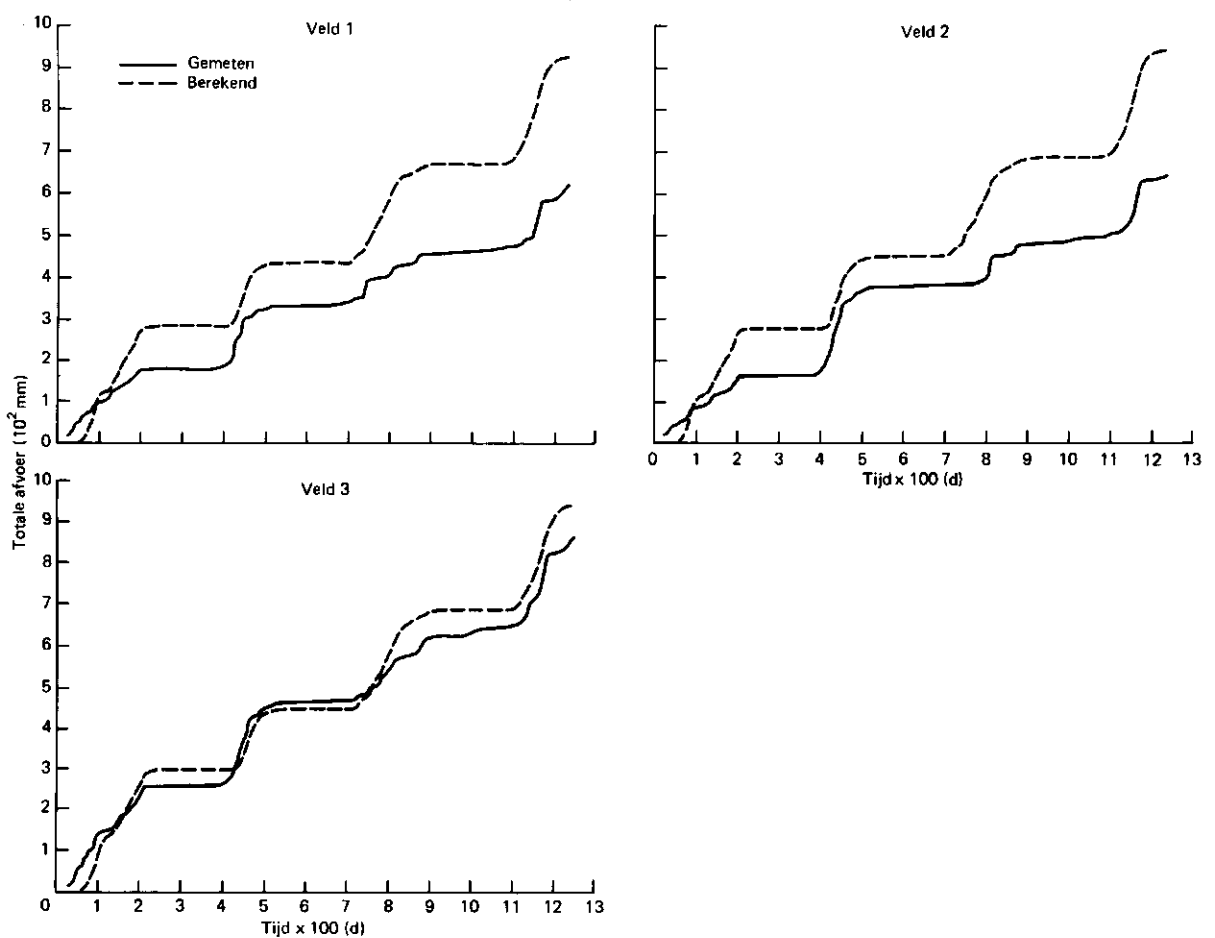


Fig. 31. Vergelijking van gemeten en met het REDRAM-model berekende totaalafvoeren (in mm) voor de drie proefvelden, cumulatief uitgezet tegen de tijd

veldcapaciteit (zie par. 6.3). Vooral op veld 3 (25% organische stof) kunnen hysteresiseffecten van belang zijn als gevolg van indroging van de organische stof tijdens het groeiseizoen.

Het berekende grondwaterstandsverloop is weergegeven in figuur 32. Voor alle proefvelden zijn de berekende grondwaterstanden hoger dan in het veld gemeten werd (vergelijk met fig. 26). Zoals reeds eerder opgemerkt wordt dit veroorzaakt door de te hoge drainageweerstand, welke zo gekozen werd om de gemeten oppervlakte-afvoer zo dicht mogelijk te benaderen. Op veld 2 zijn de grondwaterstanden het hoogst, omdat hier de hoogste drainageweerstand is ingevoerd (wegens het slecht functioneren van het drainafvoersysteem).

Het onderzoek heeft duidelijk gemaakt dat door het onvoldoende functioneren van het drainafvoersysteem de lekkage versterkt wordt. Uiteraard is dit op de proefvelden vooral langs de scheidingswanden gebeurd omdat deze niet tot aan het maaiveld waterdicht waren afgewerkt. Dit zal bij toepassing van bovenafdichting in de praktijk niet voorkomen. Toch zal ook in de praktijk

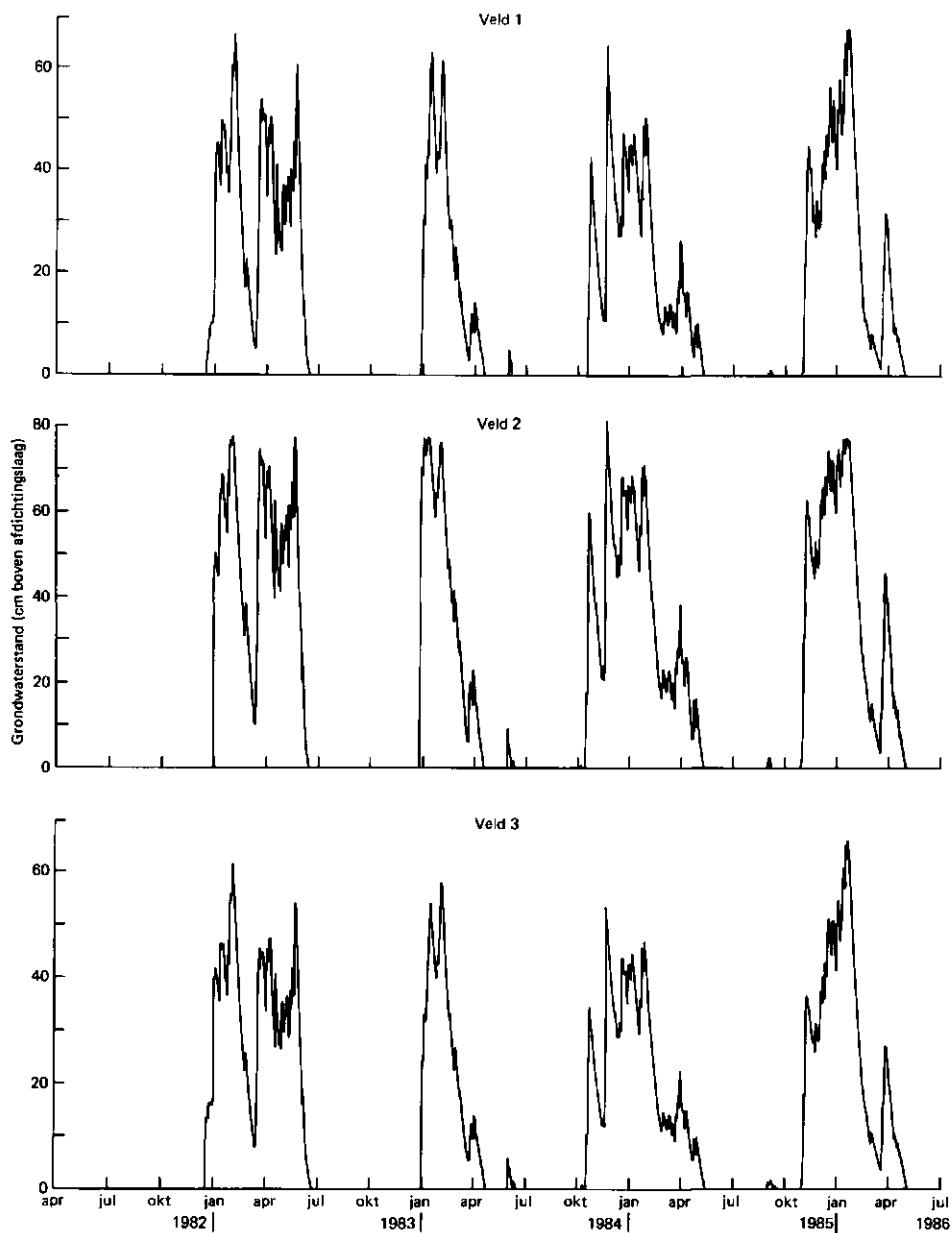


Fig. 32. Grondwaterstandsverloop op de drie proefvelden, berekend met het REDRAM-model voor de onderzoeksperiode november 1982 - mei 1986

een goed functionerend drainagesysteem noodzakelijk zijn, omdat in gevallen waar enige lekkage optreedt deze versterkt wordt als hoge grondwaterstanden voorkomen.

Het berekende verloop van de vochtinhoud van de afdeklaag op de drie proefvelden is weergegeven in figuur 33. Hierbij moet worden opgemerkt dat bij invoering van een aanvangsvochtgehalte θ_i het REDRAM-model een beschikbare vochtinhoud M_i berekent volgens vergelijking (17) waarbij θ_i betrekking

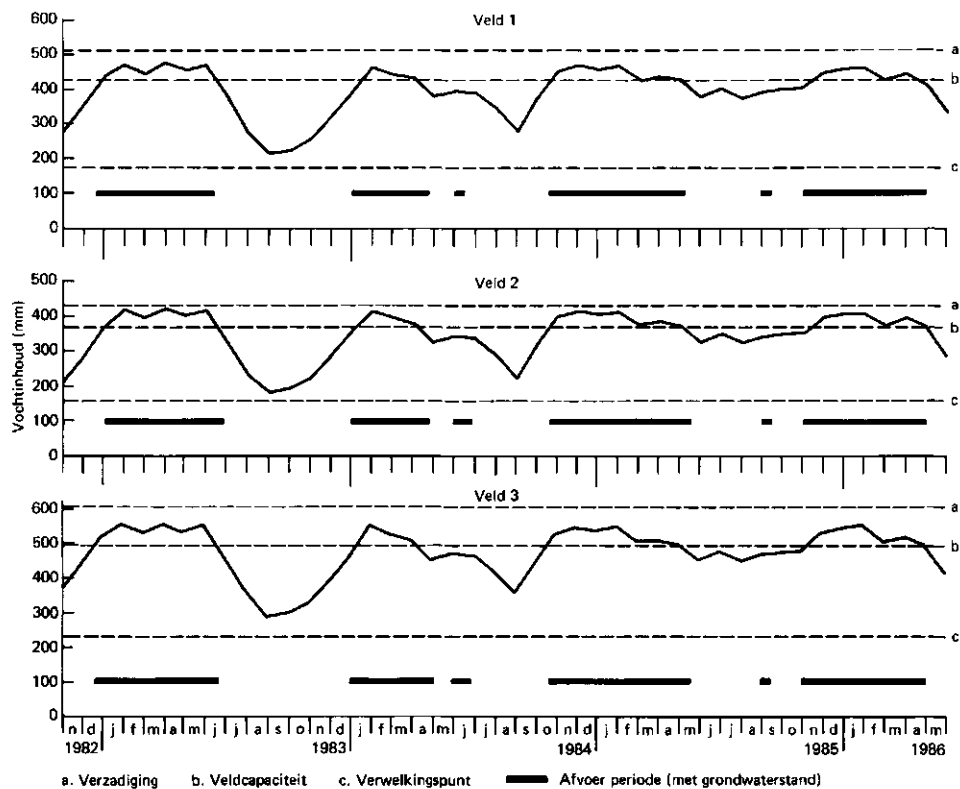


Fig. 33. Verloop van de vochtinhoud op de drie proefvelden, berekend met het REDRAM-model voor de periode november 1982 - mei 1986 (a = verzadiging, b = veldcapaciteit, c = verwelkingspunt)

heeft op het vochtgehalte in de wortelzone. Daarbij wordt een niet beschikbare hoeveelheid vocht verondersteld van:

$$M_r = d_{afd} \theta_w + 0,5(d_{afd} - d_w)(\theta_s - \theta_w) \quad (18)$$

De totale vochtinhoud wordt dan:

$$M_{tot,i} = M_i + M_r = d_{afd} \theta_i + 0,5(d_{afd} - d_w)(\theta_s - \theta_i) \quad (19)$$

Als θ_i echter het gemiddelde vochtgehalte van de afdeklaag betreft dan is $M_{tot,i} = d_{afd} \theta_i$, en wordt dus met een te hoge initiële vochtinhoud gestart. Dit verschil (ΔM) bedraagt dus:

$$\Delta M = 0,5(d_{afd} - d_w)(\theta_s - \theta_i) \quad (20)$$

Voor de velden 1, 2 en 3 bedraagt ΔM bij de gebruikte gegevens respectievelijk 58 mm, 56 mm en 61 mm.

Zoals blijkt uit tabel 19 in paragraaf 6.4.2 heeft het aanvangsvochtgehalte alleen effect op de totale afvoer in de winter 1982/83 en niet op de afvoer in volgende jaren. Het hogere aanvangsvochtgehalte heeft tot gevolg dat voor de winter 1982/83 een te hoge afvoer wordt berekend. Overigens is het aanvangsvochtgehalte niet bekend, daar tijdens het opbrengen van de grond geen vochtbemonstering heeft plaatsgevonden en tijdens het aanbrengen van de afdekgrond reeds neerslag is gevallen. In hoofdstuk 5 is de uitgangssituatie teruggerekend uitgaande van een geschatte vochtinhoud per 31 mei 1983 van respectievelijk 465 mm, 400 mm en 550 mm voor de proefvelden 1, 2 en 3, een hoeveelheid die overigens goed overeenstemt met de berekende vochtinhoud (zie fig. 33).

Duidelijk blijkt uit figuur 33 dat de vochtinhoud op veld 2 in de winterperiode tot verzadiging nadert, hetgeen veroorzaakt wordt door de hoge drainageweerstand en de relatief geringe bergingscapaciteit tussen veldcapaciteit en verzadiging. Verder blijkt ook de sterke uitdroging van het profiel tijdens de zomer 1983, het enige jaar waarin sprake was van verdampingsreductie.

6.5. CONCLUSIES

De modelberekeningen geven een redelijke schatting van de afvoeren, zoals deze hadden moeten optreden als er geen lekkage was opgetreden. Uit de berekeningen blijkt dat, afgezien van de storingen in het jaar 1984/85, geen lekkage is opgetreden op veld 3. De zand-bentoniet afdichting (20 cm dik hier) heeft dus goed gewerkt. Op veld 2, waar de laagdikte slechts 10 cm was, is met name in de tweede helft van de onderzoeksperiode wel lekkage opgetreden. Deze conclusie komt overeen met het feit dat tijdens de zomerperiode op dit veld vegetatieschade door gaslekkage is waargenomen. Overigens kwam dit nauwelijks tot uitdrukking in de grasopbrengst, zoals deze in juli 1985 is bepaald (zie par. 5.6.4). De lekkage op veld 2 is zeker versterkt door het slecht functionerende drainafvoersysteem.

Op veld 1 is reeds vanaf het jaar 1983/84 lekkage waargenomen, hetgeen ook door opgravingen in mei 1985 werd bevestigd. De lekkage is waarschijnlijk diffuus verdeeld over het gehele veld. In de zomerperiode is dit waarneembaar aan de vegetatieschade tengevolge van gaslekkage. De reductie in de grasopbrengst was zelfs circa 70% in vergelijking met de beide andere velden.

De lekkage door de afdichtingslaag op veld 1 is naar alle waarschijnlijkheid het gevolg van een incidentele constructiefout, waardoor op de fabriekslagen lekkage is opgetreden, en mechanische beschadiging door grindstenen in de onderliggende zandlaag. Bij de hoge temperaturen onder de afdeklaag (soms 40 à 50°C) bleek het materiaal kwetsbaar te zijn.

Op veld 2 is de lekkage waarschijnlijk veroorzaakt door zettingen, omdat de laag te dun was om plaatselijke vervormingen op te vangen. Voorts is op dit veld de lekkage door de afdichtingslaag en langs de scheidingswanden versterkt door de hoge grondwaterstanden (drainagesysteem functioneerde slecht). Gezien het goed functioneren van de afdichtingslaag op veld 3 kan worden geconcludeerd dat een zand-bentoniet afdichtingslaag circa 15 à 20 cm dik moet zijn. Een bijkomend voordeel van een dikkere laag is, dat deze beter aan te brengen is en dat de maximaal optredende stijghoogte-gradiënten kleiner zijn (zie ook hfdst. 7).

Het bentonietgehalte in het mengsel op proefveld 3 bedroeg 7%. Later uitgevoerd onderzoek op laboratoriumschaal heeft aangetoond, dat bij verdichting tot $1,8 \text{ g.cm}^{-3}$ een bentonietgehalte van 5% ook voldoende is (HOEKS et al, 1987). Zelfs bij dit bentonietgehalte blijkt de afdichtingslaag nog veel extra zwelcapaciteit over te hebben om onregelmatige zettingen op te vangen.

7. LABORATORIUMONDERZOEK MET BENTONIET EN SPECIALE KLEISOORTEN

7.1. ALGEMEEN

Op laboratoriumschaal is aanvullend onderzoek verricht met betrekking tot de doorlatendheid van zand-bentonietmengsels in afhankelijkheid van het bentonietgehalte, de bentonietsoort, de granulaire samenstelling van het zand en de mate van verdichting. Ook is onderzoek gedaan met Reuverse klei, waarmee op de regionale stortplaats van het Stadsgewest Roermond een basisafdichting wordt aangebracht. De doorlatendheidsproeven met deze klei zijn uitgevoerd met gedemineraliseerd water en ook met percolatiewater van een stortplaats vanwege de toepassing als basisafdichting.

7.2. OPZET VAN DE EXPERIMENTEN

De doorlatendheid van bentoniet-zand mengsels is gemeten met een permeameter, zoals beschreven door HOEKS et al (1987), volgens de zogenaamde 'constant head' methode. De metingen zijn uitgevoerd bij verschillende stijghoogtegradiënten, teneinde het in hoofdstuk 3 genoemde niet-lineaire verband tussen filtersnelheid en gradiënt aan te tonen.

Het effect van de granulaire samenstelling van het zand is onderzocht door de bentoniet met vijf verschillende zandsoorten te mengen, te weten een monster grof zand, twee monsters matig fijn zand en twee monsters fijn zand. Deze zanden werden gemengd met Wyoming bentoniet en geactiveerde Europese bentoniet (CEBO-Bond F). Meer informatie over de opzet van deze experimenten is te vinden in eerdere publikaties van GLAS (1985), HOFKAMP (1986) en HOEKS et al (1987).

In aansluiting op het onderzoek met bentoniet-zand mengsels is ook een onderzoek uitgevoerd met Reuverse klei, op verzoek van Adviesbureau Brouwers te Roermond. Dit onderzoek werd eerder beschreven door RYHINER en HOEKS (1986). Deze Reuverse klei bestond voor 38,7% uit lutum ($< 2 \mu\text{m}$) en voor 61,0% uit silt ($2-50 \mu\text{m}$) en kan dus worden omschreven als een 'silty-clay'.

Na verdichting tot $1,50$ à $1,60 \text{ g.cm}^{-3}$ zijn de monsters onderzocht volgens de 'falling head' methode, waarbij de stijghoogtegradiënt afneemt tijdens het experiment. Dit heeft als voordeel dat volgens een bepaalde rekenmethode (zie RYHINER en HOEKS, 1986) direct de relatie tussen filtersnelheid en gradiënt wordt verkregen. De doorlatendheid werd bepaald zowel met gedemineraliseerd water als met percolatiewater uit een afvalstort.

7.3. DOORLATENDHEID VAN ZAND-BENTONIET MENGSELS

7.3.1. Effect van verdichting en zandsoort

Na menging van bentoniet met zand moet het mengsel worden verdicht om het poriënvolume tussen de zandkorrels te verkleinen. Naarmate dit poriënvolume kleiner is, kan met minder bentoniet worden volstaan om de vereiste waterdichtheid te bereiken. De mate van verdichting, die in de praktijk bereikt kan worden, hangt samen met de granulaire samenstelling en het vochtgehalte van het zand. In het laboratorium kan daartoe een zogenaamde Proctor-curve worden bepaald, welke aangeeft bij welk vochtgehalte de grootste dichtheid wordt bereikt. Volgens REUTER (1985) moet de verdichting plaats vinden bij een iets hoger vochtgehalte, dat wil zeggen aan de natte zijde van de Proctor-curve, om een minimale doorlatendheid te bereiken.

Voor de onderzochte zand-bentoniet mengsels ligt het optimale vochtgehalte voor verdichting in de orde van 11-14 gew. %. Het droge volumegewicht van de mengsels bedroeg gemiddeld $1,8 \text{ g.cm}^{-3}$ na verdichting.

In principe kan elke grond slecht doorlatend gemaakt worden door toevoeging van bentoniet. Uit onderzoek van d'APPOLONIA (1980) blijkt dat minder bentoniet nodig is naarmate de grond meer fijne deeltjes bevat, vooral als dit de lutumfractie betreft. Het blijkt dat slecht gegradeerde gronden met zowel fijne als grove fracties het best verdicht kunnen worden, waardoor in deze gronden het poriënvolume klein is na verdichting.

Overigens is niet elke grond geschikt voor menging met bentoniet. De grond moet bij voorkeur structureloos zijn met een enkelvoudige korrelstructuur en een laag gehalte aan organische stof. Om deze reden wordt in de praktijk vaak gebruik gemaakt van humusarm zand.

De onderzochte zand-bentoniet mengsels bevatten alle 5 gew. % bentoniet. De laagste doorlatendheid werd gemeten voor de mengsels met matig fijn zand en fijn zand, namelijk circa $3 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ gemeten bij een stijghoogtegradiënt van 55 à 80. Voor het mengsel met het grove zand bleek de doorlatendheid ongeveer twee keer zo hoog te zijn (ca. $7 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$). De doorlatendheid van deze mengsels is relatief hoog vergeleken met volgende experimenten (zie par. 7.3.3), maar dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de hoge gradiënten en de relatief korte duur van de experimenten (enkele dagen).

7.3.2. Effect van bentonietgehalte en bentonietsoort

De relatie tussen doorlatendheid en bentonietgehalte werd bepaald voor mengsels van matig fijn zand en Wyoming bentoniet. In dit geval duurden de metingen circa 2 weken, hetgeen overigens nog te kort lijkt te zijn voor volledige zwelling van de bentoniet (zie par. 7.3.3). De resultaten zijn weergegeven in figuur 34. De verwachting is, dat de hier gemeten doorlatendheden uiteindelijk na volledige zwelling nog 3-5 keer lager zullen zijn.

Op grond van deze resultaten kan geconcludeerd worden dat een bentonietgehalte van 5 gew. % voldoende is om de doorlatendheid te reduceren onder de voor bovenafdichting gehanteerde bovengrens van $5 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$.

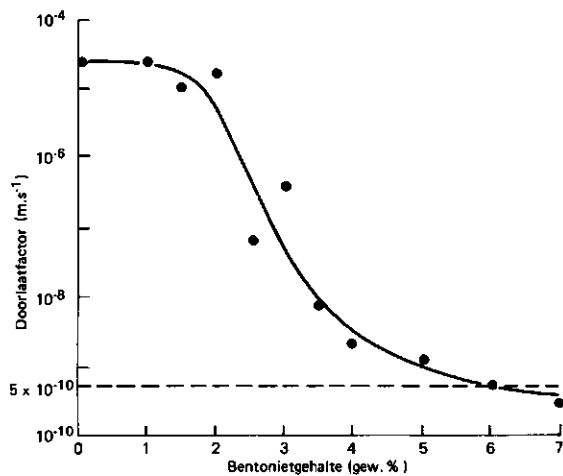


Fig. 34. Doorlaatfactor ($k=v/i$) van zand-bentonietmengsels, bestaande uit matig fijn zand en Wyoming bentoniet, als functie van het bentonietgehalte, gemeten bij een constante stijghoogtegradiënt ($i=8$) na een zwelperiode van circa 2 weken, in vergelijking met de eerder gehanteerde bovengrens van $5 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ (stippellijn)

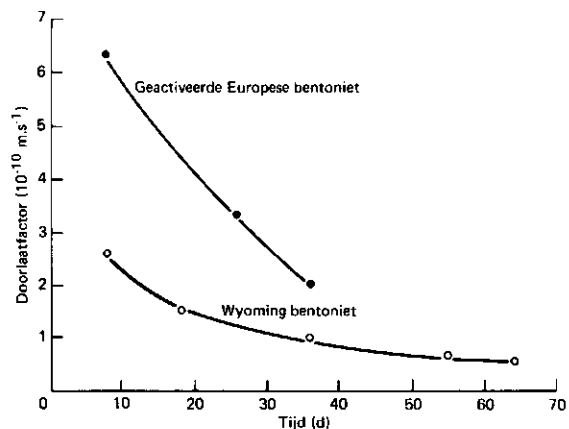


Fig. 35. Doorlaatfactor ($k=v/i$) van zand-bentonietmengsels, bestaande uit matig fijn zand met 5 gew. % bentoniet (geactiveerde Europese bentoniet resp. Wyoming bentoniet), als functie van tijd bij een constante stijghoogtegradiënt ($i=30$)

De bentonietsoort, die wordt gebruikt, is van belang omdat het waterbindend vermogen per bentonietsoort verschilt. De Wyoming bentoniet heeft een zeer groot waterbindend vermogen vanwege de hoge Na-bezetting van het adsorptie-complex. Europese bentoniet heeft een lager waterbindend vermogen, ook al is deze geactiveerd met natrium.

In figuur 35 zijn de resultaten weergegeven van doorlatendheidsproeven met deze twee bentonietsoorten gemengd met matig fijn zand. Het bentonietgehalte bedroeg 5 gew. % en de experimenten bestrijken hier een periode van 1 à 2 maanden, zodat ook het effect van de tijd tot uiting komt. Hoewel de doorlatendheid met geactiveerde Europese bentoniet hoger is dan met Wyoming bentoniet, blijkt dat ook met 5 gew. % Europese bentoniet de doorlatendheid op den duur onder de grens van $5 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ komt te liggen.

7.3.3. Effect van stijghoogtegradiënt en tijd

De niet-lineaire relatie tussen filtersnelheid (v) en stijghoogtegradiënt (i), zoals eerder besproken in hoofdstuk 3, is onderzocht voor mengsels van matig fijn zand en Wyoming bentoniet (5 gew. % bentoniet). De metingen, volgens de 'constant head' methode, zijn gestart bij een gradiënt van 55, waarna de gradiënt stapsgewijs is verlaagd tot uiteindelijk 5. Na instelling van een nieuwe gradiënt werd de doorlatendheid gedurende 2 à 3 dagen gemeten. Nadat de gradiënt $i=5$ was bereikt, is de stijghoogtegradiënt

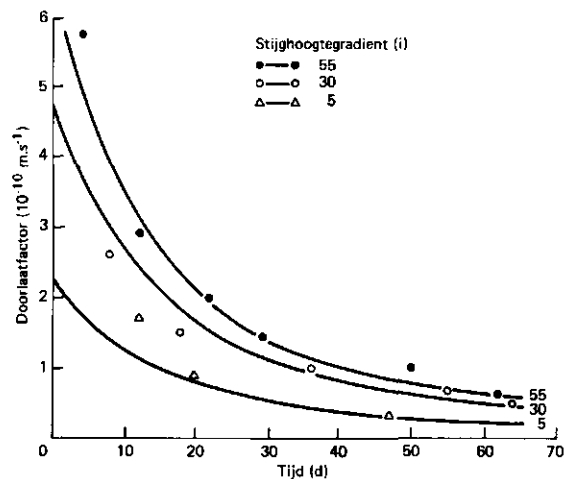


Fig. 36. Verloop van de doorlaatfactor ($k=v/i$) voor een mengsel van matig fijn zand met 5 gew. % Wyoming bentoniet, berekend met behulp van vergelijking (21) en (22) als functie van de tijd, in vergelijking met meetgegevens voor drie verschillende stijghoogtegradiënten ($i=5, 30$ en 55)

opnieuw verhoogd tot circa 50-55 en is een tweede serie metingen uitgevoerd op dezelfde wijze door de gradiënt weer stapsgewijs te verlagen. Op deze wijze zijn in totaal 6 series metingen verricht.

De resultaten tonen aan (zie HOFKAMP, 1986; HOEKS et al, 1987) dat hier de effecten van de gradiënt en de effecten van tijd door elkaar spelen. Bij nauwkeurige analyse van de meetgegevens bleek het mogelijk beide effecten te scheiden (zie fig. 36). Het blijkt dat de doorlatendheid, volgens Darcy berekend als v/i , exponentieel afneemt in de tijd. Verder blijkt dat de doorlatendheid hoger is naarmate de gradiënt hoger is, hetgeen er op wijst dat het verband tussen filtersnelheid (v) en gradiënt (i) niet lineair is. Het effect van tijd en gradiënt kon beschreven worden met de volgende vergelijking:

$$v = (A_0 e^{-\beta t} + A_f) i^m \quad (21)$$

- waarin: v = filtersnelheid ($m.s^{-1}$)
 i = stijghoogtegradiënt (-)
 A_0, A_f = doorlatendheidsconstanten ($m.s^{-1}$)
 β = coëfficiënt voor afname doorlatendheid (s^{-1})
 t = tijd (s)

Voor het mengsel met 5 gew. % bentoniet hadden de constanten de volgende waarden:

$$A_0 = 1,1 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1} \quad \beta = 0,06 \text{ dag}^{-1}$$
$$A_f = 1 \times 10^{-11} \text{ m.s}^{-1} \quad m = 1,4 \quad (22)$$

Op de lange duur ($t=\infty$) loopt de filtersnelheid dus terug tot

$$v = A_f i^m \quad (23)$$

Met bovenstaande gegevens is de uiteindelijke lekkage onder veldomstandigheden (voor bovenafdichting: $i=\text{max. } 5$, $t=\infty$) te berekenen als 3 mm.jaar^{-1} . Indien voor een bovenafdichting wordt aangenomen dat lekkage alleen in het winterhalfjaar kan optreden (bijv. gedurende 200 dagen), dan bedraagt de lekkage slechts $1,6 \text{ mm.jaar}^{-1}$.

Het tijdseffect blijkt aanzienlijk te zijn en moet waarschijnlijk worden toegeschreven aan zwelling van de bentoniet en mogelijk ook aan interne erosie in het monster, waarbij bentonietdeeltjes bovenuit het monster met het water meegevoerd worden en dieper in het monster verstopping veroorzaken.

7.3.4. Effect van de kwaliteit van het percolerende water

Percolatie van het zand-bentoniet mengsel met verontreinigd water kan leiden tot desorptie van Na^+ -ionen en adsorptie van de in het water aanwezige kationen. Kationomwisseling en verhoging van de ionsterkte van de bodemoplossing kunnen leiden tot samendrukking van de diffuse dubbellaag rond de bentonietdeeltjes en daardoor tot afname van het waterbindend vermogen en toename van de doorlatendheid.

Doorlatendheidsproeven, uitgevoerd met gedemineraliseerd water en percolatiewater uit een afvalstort, hebben aangetoond dat de doorlatendheid van een zand-bentoniet mengsel voor percolatiewater ongeveer 100 keer groter is dan voor gedemineraliseerd water. Zo bleek de doorlatendheid van matig fijn zand gemengd met 5 gew. % Wyoming bentoniet voor percolatiewater circa $2 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ te bedragen, terwijl in hetzelfde experiment voor gedemineraliseerd water een waarde van circa $2 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ werd gevonden (beide gemeten gedurende 8 dagen bij $i=8$). In het doorlatendheidsexperiment met gede-

mineraliseerd water werd na 10 dagen het gedemineraliseerde water vervangen door percolatiewater. Het duurde daarna nog 40 dagen voordat het percolatiewater het monster geheel doorstroomd had. Gedurende deze 40 dagen daalde de doorlatendheid verder van $2 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ tot circa $5 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$. Tijdens de 'doorbraak' van het percolatiewater begon de doorlatendheid toe te nemen todat uiteindelijk een constant niveau van $1,9 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ werd bereikt (experiment duurde 200 dagen). Hieruit blijkt dat de uiteindelijke doorlatendheid voor percolatiewater veel lager is als voorafgaand doorstroming met gedemineraliseerd water heeft plaatsgevonden. Waarschijnlijk leidt de doorleiding met water tot peptisatie van de bentoniet (dikke diffuse dubbellaag), waardoor bentonietdeeltjes uitspoelen en dieper in het monster mechanische verstopping veroorzaken. Dit gebeurt niet als direct met de doorstroming van percolatiewater wordt begonnen, omdat dan de diffuse dubbellaag dunner is waardoor minder peptisatie en uitspoeling optreedt. Hoewel de doorlatendheden bij dit experiment ook voor gedemineraliseerd water hoger lagen dan bij de eerder besproken experimenten, is wel duidelijk geworden dat bij afdichtingsmaterialen, waar de afdichting berust op zwellings, de doorlatendheid sterk toeneemt bij doorleiding van verontreinigd water. Overigens kan dit effect blijkbaar in belangrijke mate worden tegengegaan als de afdichtingslaag vooraf wordt verzadigd en doorstroomd met schoon water. De belangrijkste verklaring hiervoor lijkt te zijn dat onder invloed van schoon water interne erosie van bentonietdeeltjes optreedt in het monster, waardoor dieper in het monster mechanische verstopping optreedt.

Voor toepassing als onderafdichting zal het zand-bentoniet mengsel belangrijk meer bentoniet moeten bevatten, temeer daar in dat geval de lekkage door de laag praktisch nihil dient te zijn. Ter vaststelling van het vereiste bentonietgehalte voor basisafdichtingen is onderzoek nodig naar de relatie tussen de doorlatendheid voor percolatiewater en hogere bentonietgehalten, waarbij ook het niet-lineaire verband tussen filtersnelheid en gradiënt aandacht moet hebben.

7.4. DOORLATENDHEID VAN SPECIALE KLEISOORTEN

Hoewel de meeste klei- en leemsoorten niet geschikt zullen zijn als afdichtingsmateriaal (zie HOEKS en AGELINK, 1982) lijkt het niet uitgesloten dat sommige specifieke kleisoorten geschikt zijn als afdichtingsmateriaal.

Immers, zand gemengd met slechts 5 gew. % bentoniet blijkt voldoende dicht te zijn om voor bovenafdichting te gebruiken.

Ondanks zeer sterke verdichting zal een afdichtingslaag altijd een poriënvolume van minstens 25 vol. % hebben, en is daarom nooit absoluut dicht.

Een belangrijke reden voor de zeer lage doorlatendheid van een zand-bentoniet mengsel is dat het water in de poriën sterk wordt gebonden door de bentonietdeeltjes, waardoor bij lage gradiënten weinig of geen water in beweging komt. Dit betekent, dat mogelijk ook andere kleisoorten geschikt zijn voor afdichtingsdoeleinden, mits zwellende kleimineralen aanwezig zijn in de klei. Het lijkt interessant om na te gaan welke kleisoorten eventueel voor afdichting in aanmerking komen, vooral omdat de duurzaamheid op lange termijn waarschijnlijk een sterk pluspunt is van natuurlijke afdichtingsmaterialen.

Op verzoek van Adviesbureau Brouwers is een onderzoek uitgevoerd (zie RYHINER en HOEKS, 1986) met Reuverse klei, een 'silty clay' waarvan de kleifractie voor 20-30% bestaat uit smectiet (dat is de groep van sterk zwellende kleimineralen). Bij een lutumgehalte van 38,7% betekent dit dat deze klei circa 8-11 gew. % zwellende kleimineralen bevat. Dat is zelfs aanmerkelijk meer dan in de hiervoor beschreven zand-bentoniet mengsels. De doorlatendheidsproef met Reuverse klei, verdicht tot een droog volumegewicht van $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$, is uitgevoerd met percolatiewater uit een afvalstort. Figuur 37 laat zien dat een lineair verband tussen de filtersnelheid (v) en de gradiënt (i) pas optreedt als de stijghoogtegradiënt groter is dan 40. De i_0 -waarde (zie ook fig. 2 in hoofdstuk 3) werd hier vastgesteld op 39,8. Hoewel geen meetpunten verkregen zijn beneden $i=40$, kan bij aanname van een exponentieel verband tussen v en i wel een relatie worden berekend. Hierbij is aangenomen, op grond van figuur 37, dat v lineair afhangt van i boven $i=45$, dat wil zeggen $i_G=45$ (zie fig. 2 in hoofdstuk 3). Volgens GABENER (1983) kan worden afgeleid dat de exponent m gelijk is aan:

$$m = \frac{i_G}{i_G - i_0} \quad (24)$$

Met de bovengenoemde waarden voor i_0 en i_G wordt $m=9$ en kan de relatie tussen v en i worden beschreven als:

$$\begin{aligned} i \geq 45 & \quad v = 2,43 \times 10^{-8} (i-39,8) \quad [\text{m.s}^{-1}] \\ i \leq 45 & \quad v = 1,67 \times 10^{-22} i^9 \quad [\text{m.s}^{-1}] \end{aligned} \quad (25)$$

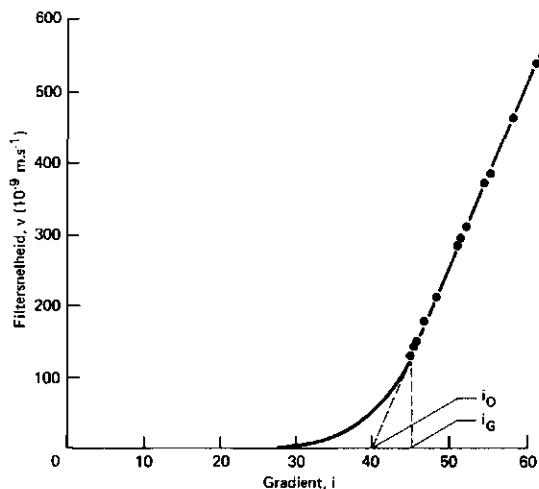


Fig. 37. Relatie tussen de filtersnelheid (v) en de stijghoogtegradiënt (i) voor Reuverse klei, gemeten volgens de zogenoemde 'falling head' methode met percolatiewater uit een afvalstort ($i_0=39,8$; $i_G=45$; zie tekst)

Voor veldomstandigheden blijkt de lekkage praktisch nihil te zijn ($\leq 1 \text{ mm.jaar}^{-1}$ als $i \leq 18$). Uiteraard dient de afdichtingslaag dan wel een behoorlijke dikte te hebben. Bij een dikte van 50 cm is de maximaal toelaatbare waterhoogte boven de laag $(18-1) \times 0,50 \text{ m} = 8,50 \text{ m}$. Deze klei is daardoor, behalve voor bovenafdichtingen, ook geschikt voor basisafdichtingen onder afvalstortplaatsen, mits een goed functionerend drainage-systeem aanwezig is.

Bovenstaand voorbeeld laat duidelijk zien dat de effectiviteit van een kleiafdichting niet gekarakteriseerd kan worden met de doorlaatfactor (k , in m.s^{-1}), aangezien deze niet constant is, maar afhangt van de aangelegde stijghoogtegradiënt. Hoewel het nog steeds zeer gebruikelijk is k -waarden op te geven, zonder daarbij de gradiënt te vermelden, moet worden vastgesteld dat op deze wijze geen indruk wordt verkregen van de te verwachten lekkage onder veldomstandigheden.

Aanbevolen wordt om de waterdichtheid van een kleiafdichtingslaag aan te geven met de jaarlijks te verwachten lekkage (in mm.jaar^{-1}). Dit betekent dat er een omrekening naar veldomstandigheden moet plaatsvinden, rekening houdend met het niet-lineaire verband tussen filtersnelheid en stijghoogtegradiënt en de te verwachten stijghoogtegradiënten in de veldsituatie.

7.5. CONCLUSIES

Uit het laboratoriumonderzoek blijkt, dat bovenafdichtingen met bentoniet voldoende waterdicht zijn als tenminste 5 gew. % bentoniet aanwezig is in het zand-bentoniet mengsel. Het is van belang het mengsel optimaal te verdichten, zodat het zwelvermogen van de bentoniet slechts ten dele gebruikt hoeft te worden voor binding van het poriewater. De overblijvende zwelcapaciteit is dan beschikbaar voor het opvangen van vervormingen ten gevolge van onregelmatige zettingen.

Hoewel de Wyoming bentoniet verreweg de beste resultaten geeft, blijkt ook de geactiveerde Europese bentoniet goed bruikbaar te zijn. Ook hier geldt, dat met 5 gew. % bentoniet voldoende afdichting wordt verkregen. Als richtlijn is daarbij steeds gesteld, dat bovenafdichting pas zinvol wordt als de lekkage minder dan 50 mm.jaar^{-1} bedraagt. Gezien het feit dat de doorlatendheid afnam in de tijd, mogelijk als gevolg van zwellen en interne erosie in het monster, kan worden vastgesteld dat bij 5 gew. % bentoniet in het mengsel de lekkage uiteindelijk zelfs minder dan 10 mm.jaar^{-1} zal bedragen. Dit geldt voor beide onderzochte bentonietsoorten.

Bij gebruik van bentoniet voor basisafdichtingen moet rekening worden gehouden met een verhoogde doorlatendheid voor percolatiewater. Op grond van de laboratoriumexperimenten kan worden geconcludeerd dat 5 gew. % bentoniet in de afdichtingslaag niet genoeg zal zijn om lekkage van percolatiewater te verhinderen. Nader onderzoek zal moeten aantonen of toevoeging van extra bentoniet de doorlatendheid voor verontreinigd percolatiewater verder kan doen afnemen.

Speciale kleien met sterk zwellende kleimineralen blijken geschikt te zijn voor afdichtingen. Onderzoek met Reuverse klei heeft aangetoond dat bij relatief geringe stijghoogtegradiënten de lekkage door de kleiafdichting praktisch nihil is. Dit gold ook voor percolatiewater uit een afvalstort. Dit betekent, dat deze klei behalve voor bovenafdichtingen ook geschikt is voor basisafdichtingen onder stortplaatsen, mits de laag voldoende dik is en een goed functionerend drainagesysteem aanwezig is boven de afdichtingslaag. Zeker in combinatie met bovenafdichting wordt de kans op lekkage dan praktisch nihil.

8. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

8.1. INLEIDING

Het hier beschreven onderzoek naar de praktische uitvoerbaarheid van bovenafdeling op afvalstortterreinen had tot doel om op praktijkschaal ervaring op te doen met het aanbrengen van afdichtingslagen op een afvalstort en middels hydrologisch onderzoek vast te stellen in hoeverre de infiltratie van regenwater in het stort hiermee kan worden verhinderd. Een belangrijk aspect daarbij was hoe duurzaam de waterdichtheid van een dergelijke afdichtingslaag op lange termijn is, temeer daar de afdichtingslagen op een stort sterk vervormen door grote en onregelmatige zettingen van het onderliggende afval.

8.2. AANLEG PROEFVELDEN

Op een helling van de stortplaats van de VAM in Wijster zijn daartoe drie proefvelden aangelegd, waarvan één veld is afgedicht met een asfaltmembraan en twee andere velden met een mengsel van zand en bentoniet (een sterk zwellend kleimineraal). Op laboratoriumschaal was gebleken dat door menging van zand met 5 à 10 gew. % bentoniet een voldoende waterdichte bovenafdeling kan worden gerealiseerd, waarbij de infiltratie van regenwater in het afvalstort afneemt tot minder dan 50 mm.jaar^{-1} .

Later onderzoek heeft uitgewezen dat de lekkage door zand-bentoniet lagen zelfs kleiner is dan $5 \text{ à } 10 \text{ mm.jaar}^{-1}$ (zie hfdst. 7) en onder praktijkomstandigheden zelfs nihil kan zijn (zie hfdst. 5).

Bij de aanleg van de proefvelden is veel ervaring opgedaan met betrekking tot de uitvoering in de praktijk. De aanleg van een asfaltmembraan geeft weinig problemen vanwege de robuuste uitvoering van het materiaal en de relatief eenvoudige wijze van het aan elkaar lassen van de banen in het veld. Het aanbrengen van de zand-bentoniet afdichtingen heeft geleerd dat de laagdikte minimaal 15 à 20 cm moet zijn. Dunnere lagen zijn, vooral op steile hellingen, moeilijk aan te brengen met zware apparatuur. De aanleg moet onder droge weersomstandigheden plaats vinden, en na aanleg moet de laag zo spoedig mogelijk worden afgedekt met grond. De werkzaamheden dienen op een zodanig tijdstip te worden afgerond, dat voor de winter nog een

goede grasvegetatie tot ontwikkeling kan komen. Dit is nodig om op hellingen erosie door oppervlakte-afvoer te voorkomen.

8.3. HYDROLOGISCH ONDERZOEK

Het hydrologisch onderzoek heeft aangetoond dat door aanleg van een bovenafdichting de infiltratie van regenwater in het afvalstort praktisch geheel kan worden voorkomen. De 20 cm dikke zand-bentoniet afdichting (met 7,0 gew. % Wyoming bentoniet) bleek voor 100% waterdicht te zijn, zelfs na 3,5 jaar waarbij op de helling zettingen van 1 à 2 meter zijn waargenomen. De 10 cm dikke zand-bentoniet afdichting (met 9,1 gew. % bentoniet) bleek na twee jaar lekkage te vertonen. Gezien de gasschade aan de grasvegetatie, lijkt lekkage vooral hoger op de helling plaats te vinden, waar ook de grootste zettingen zijn geconstateerd. De lekkage is overigens verergerd doordat het drainagesysteem boven de afdichtingslaag slecht heeft gefunctioneerd. Dit leidde tot voortdurend hoge grondwaterstanden waardoor de lekkage door de afdichtingslaag en langs de scheidingswanden versterkt is. De afdichting met het asfaltmembraan bleek na ruim één jaar lekkages te vertonen. Bij opgravingen is gebleken dat de lekkage het gevolg was van incidentele constructiefouten bij de fabricage van de geleverde partij en beschadiging van het membraan door zetting van het onderliggende afval waarbij enkele harde voorwerpen in de onderliggende zandlaag door het membraan gedrukt zijn. De asfaltlaag verweekt enigszins bij de relatief hoge temperaturen ten gevolge van bacterie-activiteit in het afvalstort. De temperatuur net onder de afdichtingslaag bedroeg ongeveer 40-50°C. Het onderzoek heeft aangetoond, dat de gescheiden opvang van schoon water en vervuild percolatiewater aan de rand van het stortterrein veel aandacht verdient. Inmiddels heeft de VAM in Wijster ruime praktische ervaring opgedaan met betrekking tot de gescheiden opvang van schoon en vervuild water, en de problemen die zich voordoen bij de aanleg van deze zogenaamde 'teenconstructie'.

8.4. MODELBEREKENINGEN

Met behulp van modelberekeningen is de te verwachten afvoer van neerslagoverschot berekend voor het geval de afdichtingslaag geheel waterdicht zou zijn. Op grond van deze berekeningen kan de waterdichtheid van de afdichtingslagen worden gekarakteriseerd door de werkelijke afvoer van overtollig regenwater weer te geven als percentage van het totaal af te voeren neerslagoverschot over de gehele onderzoeksperiode. Dit levert het volgende beeld:

<u>Afdichtingslaag</u>	<u>Waterdichtheid</u>
- asfaltmembraan, 4 mm dik	83%
- zand/bentoniet, 10 cm dik, 9,1 gew. % bentoniet	88%
- zand/bentoniet, 20 cm dik, 7,0 gew. % bentoniet	100%

8.5. LABORATORIUMONDERZOEK

Uit laboratoriumonderzoek is gebleken dat bovenafdichtingen met bentoniet voldoende waterdicht zijn als het bentonietgehalte tenminste 5 gew. % bedraagt en de afdichtingslaag optimaal wordt verdicht in het veld. Er blijft dan nog voldoende zwelcapaciteit over om onregelmatige zettingen op te vangen. De laagdikte moet minimaal 15 à 20 cm bedragen. Behalve de Wyoming bentoniet blijkt ook de geactiveerde Europese bentoniet voldoende afdichting te geven.

De doorlatendheid van zand-bentoniet mengsels neemt af in de tijd, vermoedelijk als gevolg van langzame zwellings- en interne erosie van bentonietdeeltjes. In het laboratoriumonderzoek nam de lekkage af tot een uiteindelijk niveau van minder dan 10 mm.jaar^{-1} . De waterdichtheid van kleiafdichtingen kan niet, zoals vaak gebeurt, worden gekarakteriseerd met het opgeven van de doorlaatfactor (in m.s^{-1}). Het blijkt dat de gevonden doorlaatfactor groter is naarmate de stijghoogtegradiënt tijdens de doorlatendheidsmeting groter is geweest. Een veel betere maat is daarom de jaarlijkse lekkage (in mm.jaar^{-1}) onder veldomstandigheden, berekend uit de niet-lineaire relatie tussen filtersnelheid en stijghoogtegradiënt en de in het veld optredende maximale stijghoogtegradiënt.

8.6. TOEPASSING VAN NATUURLIJKE AFDICHTINGSMATERIALEN

Het onderzoek heeft aangetoond dat met bentoniet een waterdichte bovenafdichting is te realiseren als de afdichtingslaag minstens 20 cm dik is en minimaal 5% bentoniet bevat. Een dergelijke laag blijft ook op lange termijn en onder invloed van zettingen waterdicht.

Bij gebruik van bentoniet voor basisafdichtingen dient zeker gesteld te worden dat de lekkage nihil is. Uit het laboratoriumonderzoek (hfdst. 7) blijkt dat dit met 5 gew. % bentoniet niet te realiseren is. Meer onderzoek is nodig om vast te stellen of bentoniet bruikbaar is voor basisafdichtingen en hoeveel bentoniet nodig is om een dergelijke basisafdichting geheel waterdicht te maken.

Speciale kleisoorten met sterk zwellende kleimineralen waaronder ook zandbentoniet mengsels kunnen in principe waterdicht zijn bij lage stijghoogtegradiënten, omdat het poriewater zo sterk wordt gebonden door de kleideeltjes dat dit bij lage gradiënten niet in beweging komt. Onderzoek met Reuverse klei toonde aan dat de lekkage van percolatiewater door de kleiafdichting praktisch nihil was onder veldomstandigheden. Voorwaarde is wel dat de afdichtingslaag voldoende dik is en het drainagesysteem boven deze laag goed functioneert. De voorschriften betreffende vooronderzoek, materiaalkeuze, verwerking in het veld en de uit te voeren controles moeten worden vastgelegd in keuringsprotocollen, op vergelijkbare wijze als dit vereist is voor synthetische afdichtingsmaterialen.

L I T E R A T U U R

- AGELINK, G.J., 1981. Onderzoek naar mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen. Deelrapport 3: Experimentele resultaten. Nota 1295, ICW, Wageningen.
- en J. HOEKS, 1980. Onderzoek naar mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen. 1. Literatuuronderzoek. Nota 1175, ICW, Wageningen.
- ALGRA, E.A.H. en F.A. DER KINDEREN, 1984. Protocollen voor het toepassen van afdichtingsfolies ten behoeve van bodembescherming, in het bijzonder bij stortplaatsen. Bodembescherming nr 39. Min. VROM, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage.
- ANDERSON, D., K.W. BROWN and J.C. THOMAS, 1985. Conductivity of compacted clay soils to water and organic liquids. Waste Management & Research 3: 339-349.
- BELLIN, K., 1964. Entwicklung und Probleme des Dränversuches unter besonderer Berücksichtigung des Ertragsversuches. Mitt. Inst. für Wasserwirtschaft und landwirtschaftlichen Wasserbau, T.H. Hannover, Heft 4.
- BOGUSH, W., 1979. Versuche zur Deponiebasisabdichtung mit Wasserglas. In: Deponiebasisabdichtung (Ed. K. Stief, 1979). Beiheft 15, Müll und Abfall.
- BOHEEMEN, P.J.M. VAN and H. HUMBERT, 1984. Sprinkling of grassland. II. Fundamentals of soil water flow at the experimental field. Nota 1540, ICW, Wageningen.
- BRAAK, C., 1945. Invloed van de wind op regenwaarnemingen. KNMI-medelingen en verhandelingen 48, 's-Gravenhage.
- BROWN, K.W. and D. ANDERSON, 1980. Effect of organic chemicals on clay liner permeability (a review of the literature). In: Disposal of Hazardous Waste (Ed.: D.W. Schultz), EPA 600/9-80-010, pp. 123-134.
- BUISSHAND, T.A. en C.A. VELDS, 1980. Neerslag en verdamping, KNMI, De Bilt.
- CHEYNEY, A.C., 1983. Settlement of landfills. Proc. Landfill Completion Symposium (25 May 1983), Harwell (UK).
- COLENBRANDER, H.J. en Ph.Th. STOL, 1970. Neerslag en neerslagverdeling naar plaats en tijd. Deelrapport 5. In: Hydrologisch onderzoek in het Leerinkbeekgebied. Tweede Interimrapport Werkgroep I, Comm. Waterbehoefte Gelderse Landbouwgronden, Prov. Gelderland, Arnhem, p. 98-108.

-
- D'APPOLONIA, D.J., 1980. Soil-bentonite slurry trench cutoffs. J. Geotechn. Eng. Div. 106: 399-417.
- DEKKER, C.G., 1979. Een onderzoek naar de grootte van de systematische windfout van de standaard regenmeter. KNMI-verslagen, V 318, De Bilt.
- DOMMELEN, J. VAN, W. VENEMA, J. HOEKS en A.H. RYHINER, 1983. Onderzoek naar de praktische uitvoerbaarheid van bovenafdichting op afvalstortterreinen. Deelrapport 1: Onderzoeksopzet en aanleg van proefvelden. Nota 1458, ICW, Wageningen.
- EPA, 1982. Handbook for remedial action at waste disposal sites. EPA-625/6-82-006, EPA, Cincinnati, USA.
- 1984. Slurry trench construction for pollutant migration control. EPA-540/2-84-001, EPA, Cincinnati, USA.
- ERNST, L.F., 1978. Theoretische analyse van het drainageprobleem in hellende gebieden. Jaarverslag ICW 1977. Mededeling 155, ICW, Wageningen.
- FREDERIKS, A.N.J. en F.S. HEINIS, 1984. Gecontroleerd opslaan en storten van (chemische) afvalstoffen. Land+Water-nu 24 (nr 3): 8-14.
- GABENER, H.G., 1983. Untersuchungen über die Anfangsgradienten und Filtergesetze bei bindiger Böden. Mitt. Grundbau und Bodentechnik, Univ. Gesamt Hochschule Essen (D).
- GLAS, H., 1985. Bentoniet-grondlagen als afdichting op stortplaatsen. Nota 1630, ICW, Wageningen.
- GÖDECKE, H.J., 1980. Entwicklung eines Fliessgesetzes für die Porenwasserdurchströmung feinkörniger Böden unter kleinen Druckgradienten. Die Bautechnik 6: 184-193.
- HÄNSEL, W. 1982. Entwicklung und Eigenschaften von Basisabdichtungen und ihre Überwachung. Mitt. Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig. Heft 8, Braunschweig (D).
- HAXO, H.E., R.S. HAXO and R.M. WHITE, 1977. Liner materials exposed to hazardous and toxic sludges (First Interim Report). EPA-600/2-77-081, EPA, Cincinnati, Ohio, USA.
- , R.S. HAXO and T.F. KELLOGG, 1979. Liner materials exposed to municipal solid waste leachate. EPA/600/2-79-038, EPA, Cincinnati, USA.
- , R.S. HAXO and T.F. KELLOGG, 1982. Chemical compatibility of lining materials with different waste fluids. Paper submitted for Conference in Paris (F).
- HEIDEMIJ, 1981. Natuurlijke afdichtingsmaterialen. Bodembescherming nr 8, Min. VROM, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage.
-

-
- HEIDEMIJ, 1984. Opvang en behandeling van percolatiewater van afvalstortterreinen. Reeks Bodembescherming nr 35, Min. VROM, Staatsuitgeverij, Den Haag.
- 1985. Onderzoek afdekgrond op taluds stortplaats te Wijster. Rapport nr 630-03738. Heidemij Adviesbureau, Arnhem.
- HOEKS, J., 1972. Effect of leaking natural gas on soil and vegetation in urban areas. Agr. Res. Rep. 778, Pudoc, Wageningen.
- 1981. Onderzoek naar de mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen. Deelrapport 4: Hydrologische berekeningen. Nota 1299, ICW, Wageningen, 26 pp.
- 1983. Final covering of landfill sites. Proc. Landfill Completion Symposium (25 May 1983), Harwell, UK.
- en G.J. AGELINK, 1982. Onderzoek naar mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen. Rapporten n.s. 3, ICW, Wageningen (tevens in: Bodembescherming nr 10, Staatsuitgeverij, Den Haag).
- and G.J. AGELINK, 1982a. Hydrological aspects of sealing waste tips with liners and soil covers. IAHS-Publ. 139 (Symposium Exeter, July 1982): 157-167. Tevens verschenen als: Techn. Bull. n.s. 14, ICW, Wageningen.
- en J. OOSTHOEK, 1981. Gaswinning uit afvalstortterreinen. Gas 11 (nov. 1981); tevens verschenen als Meded. n.s. 14, ICW, Wageningen.
- en A.H. RYHINER, 1985. Onderzoek naar de praktische uitvoerbaarheid van bovenafdichting op afvalstortterreinen. Deelrapport 2: Ervaringen en meningen omtrent bovenafdichting op grond van literatuuronderzoek. Nota 1609, ICW, Wageningen.
- en A.H. RYHINER, 1987. Onderzoek naar de uitvoerbaarheid van bovenafdichting op afvalstortterreinen. Deelrapport 4: Modelberekeningen met betrekking tot de waterbalans van de proefvelden. Nota 1770, ICW, Wageningen.
- , H. GLAS, J. HOFKAMP and A.H. RYHINER, 1987. Bentonite liners for isolation of waste disposal sites. Waste Management & Research 5: 93-105; Techn. Bull. n.s. 61, ICW, Wageningen.
- HOFKAMP, J.R., 1986. Zand-bentoniet mengsels als afdichtingsmateriaal voor vuilstortplaatsen. Nota 1722, ICW, Wageningen.
- LUNDGREN, T.A., J.R., 1986. Some bentonite sealants in soil mixed blankets. Proc. Conf. Soil Mechanics and Foundation Eng., June 1981, Stockholm, Vol 2: 349-354.

-
- LUTTON, R.J., G.L. REGAN and L.W. JONES, 1979. Design and construction of covers for solid waste landfills. EPA-600/2-79-165, EPA, Cincinnati USA.
- 1982. Evaluating cover systems for solid and hazardous waste, EPA, Cincinnati, USA.
- MINISTERIE VAN VOLKSHUISVESTING, RUIMTELIJKE ORDENING EN MILIEUBEHEER.
1987. Milieu-Effectrapportage nr 22: Effectvoorspelling, IV Bodem. Staatsdrukkerij- en Uitgeverijbedrijf, 's-Gravenhage, pp. 281-283.
- REUTER, E., 1985. Entwurf, Prüfung und Eigenschaften mineralischer Basisabdichtungen. In: Abdichten von Deponien, Altlasten und kontaminierten Standorten (Ed.: H. Meseck). Heft 20, Mitteilung IGB, TU Braunschweig (D).
- RYHINER, A.H., J. HOEKS en A.H.M. VAN HEESSEN, 1985. Onderzoek naar de praktische uitvoerbaarheid van bovenafdichting op afvalstortterreinen. Deelrapport 3: Experimentele resultaten van het hydrologisch onderzoek op de proefvelden. Nota 1631, pp. 54, ICW, Wageningen.
- en J. HOEKS, 1986. Onderzoek naar de bruikbaarheid van Reuverse en Tegelse klei als afdichtingsmateriaal op afvalstortterreinen. Nota 1726, ICW, Wageningen.
- RIJTEMA, P.E., C.W.J. ROEST en J. PANKOW, 1986. Onderzoek naar de waterbalans van vuilstortplaatsen. Rapport nr 19, ICW, Wageningen, 95 pp.
- SCHMITT, G.P., 1983. Mineralische Abdichtungen durch Bentonit-Ton-Gemische mit natürlichen Böden. Tagung nr T-70-505-092-3, Haus der Technik, Essen.
- STEFFEN, H., 1979. Versuche zur Abdichtung von Deponien mit Bergematerial. In: Deponiebasisabdichtung (Ed. K. Stief, 1979); Beiheft 15, Müll und Abfall.
- ZEEUW, J.W. DE, 1963. Over de werkelijkheidsbenadering van gemeten neerslagen. Landbouwkundig Tijdschrift 75, p. 815-832.

Bijlage 1: OPDRACHTBRIEF EN PROJECTVOORSTELLEN

1A. Opdrachtbrief Ministerie VROM



Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne

Leidschendam - Deltaparkweg 12 - Tel. (0 71) 20 12 00 - Telefax 2220 v m n l - Telegraafcode VEMM
kersting van station Den Haag NB met buslijn 44 en van de stations Den Haag CB en Voorburg met de bus-
lijn 26 44 en 46 - Correspondentie uitsluitend: Postbus 426, 2200 AK Leidschendam

BKK
GHN
PMT
18 SEP 1982 + 271473

Aan: de Directeur van het Instituut voor
Cultuurtechniek en Waterhuishouding
de heer ir. C.A. Oosterbaan
Postbus 35
6700 AA WAGENINGEN

uw kenmerk

uw brief

ons kenmerk Nr. 172137
DCMR/BWS

onderwerp **Onderzoek naar de praktische uitvoerbaarheid van bovenafdicthing op stortterreinen.** datum **7 september 1982**
(XE 064)

In antwoord op Uw brief van 24 maart 1982, kenmerk 27/506, waarin U verzoekt een financiële bijdrage te verstrekken voor het project "Onderzoek naar de praktische uitvoerbaarheid van bovenafdicthing op stortterreinen", deel ik U het volgende mee.

Het onderzoek dat voortbouwt op de door Uw instituut verrichte studie naar de mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen (M 214), heeft het volgende tot doel:

1. Op praktijkschaal ervaring opdoen met het aanbrengen van afsluitende lagen op een afvalstort.
2. Door middel van hydrologisch onderzoek vaststellen of de afsluitende laag het gewenst effect heeft op de waterbalans van de afdeklaag.
3. Opstellen van richtlijnen met betrekking tot de ontwatering van de afdekgrond boven de afsluitende laag (drainage, greppels, sloten).
4. Relatie tussen gasvorming in het afvalstort en bovenafdicthing (aanleg van ontgassingssysteem).
5. Gedrag van de afsluitende laag op de lange termijn, waarbij vooral onregelmatige versakkingen een rol spelen.
6. Kostenvergelijkingen van bruikbare alternatieven.

Het onderzoek zal worden uitgevoerd volgens het werkplan en het tijdschema in bijlage 2 van de projectomschrijving. Gezien het belang van dit onderzoek voor het opstellen van voorschriften bij de aanleg en afwerking van zowel nieuwe als reeds bestaande stortterreinen ben ik bereid in de totale kosten van het voorgestelde project een bijdrage te verlenen van maximaal f 463.400,— (exclusief 18% BTW). De normale kosten van afdekking zijn f 70.000,— en zullen voor rekening van de VAM komen. Het CW zal een bijdrage van f 45.000,— verlenen in de personele kosten van het project.

De bijdrage dezerzijds is als volgt verdeeld:

	1982	1983	1984
Inrichting proefvelden	f 223.500,—		
Rekentijd computer		f 3.750,—	f 3.750,—
Personele kosten	f 56.100,—	f 69.000,—	f 107.300,—

De met subsidiegelden aangeschafte meetapparatuur blijft het eigendom van het ministerie en wordt voor de duur van het onderzoek aan u in bruikleen gegeven. Daartoe dient een overeenkomst te worden gesloten. Ten behoeve van dit onderzoek zullen de bruikleenovereenkomsten van de voor het vorige onderzoek aangeschafte apparatuur verlengd worden.

Gespecificeerde declaraties van werkelijk gemaakte kosten dienen zo spoedig mogelijk na afloop van elk kwartaal onder vermelding van datum en nummer van deze brief en onder vermelding van het projectnummer te worden gezonden naar het hoofd van de Centrale afdeling financieel-economische zaken. Personele kosten dienen gebaseerd te zijn op een volledige tijdverantwoording. Vaststelling van de financiële bijdrage zal geschieden na ontvangst van een accountantsverklaring van het Ministerie van Landbouw en Visserij na afloop van dit project of na een eventueel dezerzijds in te stellen boekenonderzoek.

Ten behoeve van dit onderzoek zal een begeleidingscommissie worden ingesteld. Hierin zal vanuit het Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne ir. K. Strijbis van de hoofdafdeling Bodem, als projectcoördinator zitting nemen. Tevens zullen een aantal externe deskundigen aangezocht worden om in deze commissie zitting te nemen.

De Staatssecretaris van
Volksgezondheid en Milieuhygiëne,

1B. Projectvoorstel

Dit onderzoek is voortgevloeid uit het onlangs afgesloten project 'Onderzoek naar de mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen'. Het eindrapport is momenteel in concept gereed en is ter informatie bijgevoegd. De belangrijkste conclusies daarin zijn:

- natuurlijke materialen (leem, klei) zijn niet geschikt als afdichtingsmateriaal op een afvalstort;
- de doorlatendheid van het afdichtingsmateriaal moet kleiner zijn dan $0,05 \text{ mm.dag}^{-1}$ (dit betekent dat de infiltratie in het stort kleiner is dan 50 mm.jaar^{-1});
- met kunststofproducten en speciale kleisoorten, zoals bentoniet, kan een goede afdichting worden verkregen.

In dit rapport wordt aanbevolen op praktisch schaal enkele geschikt lijkende afdichtingsmaterialen te beproeven.

Bij dit onderzoek staan daarom de volgende doelstellingen centraal:

1. Op praktisch schaal ervaring opdoen met het aanbrengen van afsluitende lagen op een afvalstort.
2. Middels hydrologisch onderzoek vaststellen of de afsluitende laag het gewenste effect heeft op de waterbalans van de afdeklaag.
3. Opstellen van richtlijnen met betrekking tot de ontwatering van de afdekgrond boven de afsluitende laag (drainage, greppels, sloten).
4. Relatie tussen gasvorming in het afvalstort en bovenafdichting (aanleg van ontgassingsysteem).
5. Gedrag van de afsluitende laag op de lange termijn, waarbij vooral onregelmatige verzakkingen een rol spelen.
6. Kostenvergelijkingen van bruikbare alternatieven.

De doelstellingen 4 en 5 volgen niet direct uit dit onderzoek. Daarom zal hier moeten worden volstaan met de informatie zoals deze in de literatuur beschikbaar is. Overigens lijkt het wenselijk om met betrekking tot punt 5 het onderzoek na afloop van de onderzoekstermijn van 2 jaar nog enkele jaren voort te zetten. De metingen kunnen dan met een lagere frequentie worden voortgezet, waardoor een dergelijk vervolgonderzoek relatief weinig inspanning hoeft te kosten.

Werkplan

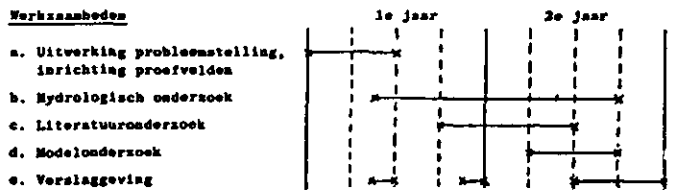
Op de VAM-stortplaats in Wijster zullen de volgende proefvelden worden aangelegd:

1. Een proefveld met Hypofors als afdichtingsmateriaal (ca. 3000 m^2)
2. Een proefveld met sand/bentoniet-mengsel als afdichtingsmateriaal (ca. 2000 m^2)
3. Een proefveld met vliegas/bentoniet-mengsel als afdichtingsmateriaal (ca. 2000 m^2)

De proefvelden worden aangelegd op een helling van 31%. De afsluitende laag wordt afgedekt met ca. 1 meter afdekgrond die goed bewortelbaar en redelijk doorlatend is. De afdeklaag zal worden ingezaaid met gras. In de afdeklaag is een drainagesysteem aanwezig.

Het hydrologisch onderzoek bestaat uit het meten van de verschillende waterbalanstermen en het daaruit afleiden van de infiltratie in het stort. In dit verband wordt het Hypofors-veld als referentie beschouwd (infiltratie is nihil).

Naast het veldonderzoek zal literatuuronderzoek worden verricht betreffende de ervaringen elders, met name de mogelijkheden van ontgassing bij bovenafdichting en het effect van onregelmatige verzakkingen zullen daarbij aandacht krijgen. Mochten zich tijdens het onderzoek andere alternatieven voor afdichting aandienen, dan zullen deze, voor zover de tijd dat toelaat, kritisch worden beoordeeld. Eventueel zullen op laboratoriumschaal enkele doorlatendheidsproeven met dergelijke materialen worden uitgevoerd.



Overzicht van de kosten (alle bedragen excl. BTW)

	1e jaar	2e jaar
1. Inrichting proefvelden		
- Afdichtingsmateriaal Hypofors ¹⁾	f 44 000	
- Afdichting met bentoniet	- 34 000	
- Aanleg drainagesysteem	- 8 000	
- Zand voor uitvlakken helling en menging met bentoniet (2500 m^3)	- 35 000	
- Afdekgrond ($6 000 \text{ m}^3$) ²⁾	- 90 000	
- Aanvoer vliegas (375 m^3)	- 7 500	
- Constructie meetputten + afvoerleiding	- 10 000	
- Aanbrengen scheidingswanden tussen de velden + steungrond	- 30 000	
2. Meetapparatuur ³⁾	- 15 000	
3. Rekentijd computer (modelonderzoek)		f 7 500
4. Personeelskosten:		
ICW: 125 mandagen à f 880	- 39 600	- 70 400
200 mandagen à f 470	- 47 000	- 47 000
VAM: 73 mandagen à f 800	- 34 400	- 24 000
30 mandagen à f 500	- 12 500	- 2 500
T o t a l e k o s t e n	f 427 000	f 151 400
Totale kosten 1e jaar	f 427 000	
Totale kosten 2e jaar	f 151 400	
Totale kosten van het onderzoek	f 578 400	

- 1) inclusief opvangroot onder langs de 3 proefvelden
- 2) normale kosten van afdekking: f 70 000; extra kosten ter voorkoming van beschadiging afdichtingslaag, belemmering in bedrijfsvoering, etc. f 20 000
- 3) apparatuur van het vorige project kan hier opatueer worden gebruikt

Benodigde mandagen

	Werkzaamheden					Totaal	Tarief
	a	b	c	d	e		
<u>1e jaar</u>							
ICW: projectleider	8	15	5	-	5	33	1
medewerker	40	50	5	-	5	100	2
wetenschappelijke begeleiding	2	10	2	-	2	12	1
VAM: medewerkers	20	-	3	-	20	43	3
technische assistenten	20	5	-	-	-	25	4
<u>2e jaar</u>							
ICW: projectleider	-	10	10	15	20	55	1
medewerker	-	60	15	5	20	100	2
wetenschappelijke begeleiding	-	8	-	10	7	25	1
VAM: medewerkers	-	-	5	-	25	30	3
technische assistenten	-	5	-	-	-	5	4

1C. Voorstel voor projectverlenging

Voorstel tot voortzetting van het Project "Onderzoek naar de praktische uitvoerbaarheid van bovenaafdichting van afvalstortterreinen".

Projectuitvoering: Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW) Vuil Afvoer Maatschappij (VAM)

1. INLEIDING

In de toelichting op de doelstelling van het project "Bovenaafdichting Stortterreinen", dat is gestart in september 1982, werden destijds de volgende doelstellingen genoemd:

- Op praktijkschaal ervaring opdoen met het aanbrengen van afsluitende lagen op een afvalstort;
- Middels hydrologisch onderzoek vaststellen of de afsluitende laag het gewenste effect heeft op de waterbalans van de afdeklaag;
- Opstellen van richtlijnen met betrekking tot de ontwatering van de afdekgrond boven de afsluitende laag (drainage, greppels, sloten);
- Relatie tussen gevorming in het afvalstort en bovenaafdichting (aanleg van ontgassingsstelsel);
- Gedrag van de afsluitende laag op lange termijn, waarbij vooral onregelmatige verzakkingen een rol spelen;
- Kostenvergelijking van bruikbare alternatieven.

De ervaringen opgedaan bij de aanleg van afsluitende lagen op de drie proefvelden (punt a.) zijn vastgelegd in Deelrapport 1 (VAN DONNHELEN a.s., 1983). Het hydrologisch onderzoek (punt b.), reeds eerder ten dele vastgelegd in een aantal notities (okt. 1983, mei 1984, nov. 1984), is beschreven in Deelrapport 3 (in concept gereed). Het onderzoek genoemd onder de punten c. en d. heeft aandacht gekregen bij de literatuurstudie, waarvan de resultaten zijn beschreven in Deelrapport 2 (HOEKS en RYHIMER, 1984).

Het gedrag van de afdichtingslagen op lange termijn (punt e.) kon binnen de tijd, die was uitgetrokken voor het onderzoek (sept. 1982-eind 1984), slechts ten dele worden bestudeerd. De zettingen, die tijdens de twee jaar durende onderzoeksperiodes zijn opgetreden, hebben o.s. geleid tot een toename van gaslekkage langs de scheidingvanden tussen de proefvelden. Voorts is op het Hypofors-proefveld lekkage van water door de afdichtingslaag geconstateerd. De oorzaak van deze lekkage dient nader onderzocht te worden. Dit betekent ook dat de kostenvergelijking van bruikbare alternatieven (punt f.) nog niet kan worden afgerond.

Het gedrag op lange termijn speelt namelijk een belangrijke rol bij de beoordeling van de bruikbaarheid van een afdichtingsmateriaal.

Het is daarom wenselijk het onderzoek met betrekking tot lange termijn effecten nog een tweetal jaren voort te zetten. Aan de hand van waterbalansmetingen zal dan moeten blijken in hoeverre de zettingen een toenemende lekkage van water tot gevolg hebben.

Bij voortzetting van het project zal ook meer aandacht besteed moeten worden aan de verdamping op een stortterrein (warmteproductie in het stort, afwijkende instraling op hellingen).

2. DOELSTELLING VAN HET VERVOLG-PROJECT

Het voort te zetten onderzoek zal informatie moeten geven over:

- effecten van zettingen op de waterdichtheid van afdichtingslagen op een stort, vast te stellen aan de hand van waterbalansmetingen;
- oorzaken van lekkages;
- effecten van warmteproductie in het stort en afwijkende instraling op hellingen op de verdamping van de vegetatie;
- mechanische beschadiging van afdichtingslagen door bodemdieren en plantewortels;
- bruikbaarheid van alternatieve afdichtingslagen;
- ontwerp voor een afwateringssysteem bij bovenaafdichting (drainagesysteem, "teenconstructie" voor scheiding van schoon en vuil water).

Uiteraard zullen elders opgedane ervaringen worden meegenomen in het onderzoek.

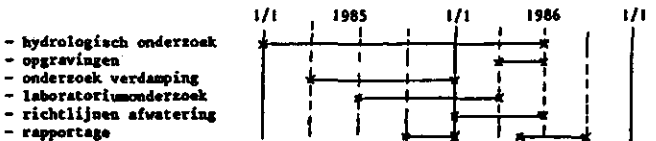
3. WERKWIJZE EN TIJDSHEMA

Het hydrologisch onderzoek op de drie proefvelden bij de VAM in Wijster zal worden voortgezet om zodoende de waterbalanscijfers van een reeks van jaren met elkaar te kunnen vergelijken. De frequentie van veldmetingen en -waarnemingen zal worden teruggebracht tot 1 x per 2 weken. De kans op storingen neemt desondanks waarschijnlijk niet toe, omdat de betrouwbaarheid van de afvoermeters wordt verbeterd (vervanging van onderdelen, waarbij roestvrije materialen worden gebruikt).

De oorzaken van de in 1984 vastgestelde lekkage op het met Hypofors afdichtte veld zullen nader worden onderzocht. Opgravingen zullen moeten aan tonen of lekken voorkomen in de in de fabriek geprefabriceerde banen of in de veldlassen waarmee de banen in het veld aan elkaar gelast zijn. Eventuele lekkages in de sand-bentoniet afdichting lijken in eerste instantie moeilijk vast te stellen via opgravingen. Niettemin kan aan een verticale profielwand mogelijk informatie ontleend worden over het gedrag van plantewortels en de diepgang van gangen van bodemdieren.

Op laboratoriumschaal zal het onderzoek naar alternatieve afdichtingsmaterialen worden voortgezet. Te denken valt aan andere bentonietsoorten, waterglas, vloeibare latex- of bitumenproducten, e.s. De aanleg van afdichtingslagen op praktijkschaal door de VAM in Wijster zal een belangrijke bijdrage kunnen geven met betrekking tot de bruikbaarheid van alternatieve materialen (LDPE-folie, Europese bentoniet). Ook de hier verworven ervaring op het gebied van de "teenconstructie" onder aan de helling heeft reeds belangrijk bijgedragen aan de gedachtenvorming rond de "ideale teenconstructie". Bij het geven van richtlijnen voor het ontwerpen van een afwateringssysteem op een afdichtte stortplaats verdient de scheiding van schoon en vuil water bijzondere aandacht.

Het tijdschema voor het onderzoek ziet er als volgt uit:



4. KOSTEN VAN HET ONDERZOEK

Personnelkosten:

ICW: 120 dagen à f. 450,-	= f. 54.000,-
30 dagen à - 850,-	= - 25.500,-
VAM: 5 dagen à - 800,-	= - 4.000,-
20 dagen à - 500,-	= - 10.000,-
	f. 93.500,-

Materiële kosten:

Onderhoud drainsvoermeters	f. 5.000,-
Reparaties ondergronds afvoersysteem	= 2.500,-
	f. 7.500,-

Reis- en verblijfkosten

	f. 5.000,-
TOTALE KOSTEN	f. 106.000,-

ICW en VAM zijn bereid f. 26.000,- voor eigen rekening te nemen. Gevraagde bijdrage in de kosten: f. 80.000,- (1985: f. 30.000,-, 1986: f. 50.000,-)

Bijlage 2. GRANULAIRE SAMENSTELLING VAN AFDEKGROND EN ZAND-BENTONIET
MENGSELS

De grondmonsters, die zijn onderzocht op het Laboratorium voor Grond- en Gewasonderzoek in Oosterbeek, betreffende volgende locaties:

nr monster	omschrijving
B 220042	Veld 1: afdekgrond, tussen interceptie-drains
B 220043	Veld 1: afdekgrond, boven op de helling
B 220044	Veld 2: afdekgrond, tussen interceptie-drains
B 220045	Veld 2: afdekgrond, boven op de helling
B 216912	Veld 3: zand-bentoniet mengsel (zand: bentoniet = 100:7,5)
B 216913	Veld 3: afdekgrond
B 220317	Veld 2: zand-bentoniet mengsel (zand: bentoniet = 100:10)
B 220318	Zand-bentoniet mengsels (100:10)
B 220319	(gemengd in het laboratorium)

Onderzoeknummer	B220042	B220043	B220044	B220045	B216912	B216913	
Gegevens van het monster	Veld 3a	Veld 1b	Veld 2a	Veld 2b		Afdek- grond	
Laag in cm							
pH-KCl	8,7	8,6	8,5	8,6	7,3	8,5	
In % van de steefdroge grond	Org. stof 1)	4,8	10,3	9,5	13,5	0,2	25,1
	CaCO ₃	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3
	Afelijkbaar 0 - 16	7,0	8,4	3,6	5,8	7,8	8,2
	Totaal zand 16-2000	88,0	73,3	86,8	80,6	81,7	66,4
In % van de minerale delen	0 - 2	4,8	7,3	2,9	4,8	6,8	7,1
	2 - 4	1,4	1,2	0,4	1,2	0,2	1,6
	4 - 8	0,7	0,8	0,4	0,8	0,4	1,2
	8 - 16	0,6	1,0	0,3	0,2	0,4	1,4
	16 - 32	1,4	0,7	0,2	0,8	0,2	1,4
	32 - 63	0,5	0,6	0,1	1,1	0,3	2,2
	63 - 90	8,1	12,0	5,8	7,2	2,2	7,1
	90 - 120	4,7	8,2	6,1	6,8	4,2	6,6
	120 - 150	11,0	12,4	10,0	10,4	10,4	7,8
	150 - 200	20,4	17,8	26,2	18,8	24,7	17,5
	200 - 300	22,0	18,6	25,4	24,7	30,4	22,8
	300 - 420	12,8	10,0	12,5	13,7	14,6	12,1
	420 - 600	8,4	4,3	8,3	8,2	4,0	4,8
600 - 850	2,2	1,6	1,6	1,9	0,8	1,6	
850 - 1200	1,2	1,0	0,8	1,0	0,2	1,1	
1200 - 1700	0,7	1,0	0,8	0,7	0,1	1,5	
M	0,2	0,6	0,8	0,3	0,1	2,2	
V	178	118	146	144	151	140	
pH-H ₂ O	8,4	8,4	8,6	8,6	8,3	8,2	

Fractiegrenzen in cm
RSM 7-012-100-3-'82

1) Gloeiverliesmethode
2) Steefdroog %

Onderzoeknummer	B220317	B220318	B220319
Gegevens van het monster	Zand- Bentoniet 1	Zand Bentoniet 2	Zand Bentoniet 3
Laag in cm			
pH-KCl	7,4	7,6	7,6
In % van de steefdroge grond			
Organische stof 1)	0,2	0,1	0,0
CaCO ₃	0,3	0,3	0,4
Afelijkbaar 0 - 16	8,9	11,3	11,4
Zand 16 - 2000	90,6	88,3	88,2
Minerale delen in %			
0 - 2	8,5	9,8	10,5
2 - 4	0,5	1,5	0,8
4 - 8	4,8	3,2	4,4
8 - 16	14,6	17,2	16,0
16 - 30	25,3	23,5	23,7
30 - 60	46,3	44,8	44,5
pH-H ₂ O	8,2	8,0	8,0
1) Gloeiverliesmethode			

Bijlage 3. VOCHTKARAKTERISTIEKEN VAN DE AFDEKGROND

Bodemvochtgehalten (vol. Z) als functie van pF-waarden (vochtgehalte bij pF 3,4 en 4,2 in gev. X) en diepte (cm-mv)

Veld 1:

pF-waarde	1A		1B		1C		Gemiddelde waarden
	20 cm	60 cm	20 cm	75-80 cm	20-30 cm	50-70 cm	
start	12,8	59,5	48,6	43,0	63,4		
0,5	45,1	74,1	60,7	75,8	55,9	71,5	63,9
1,0	44,0	71,4	60,2	75,4	55,4	71,8	63,0
1,5	43,3	69,0	60,3	73,5	55,4	71,0	62,1
2,0	29,0	64,3	55,4	69,6	51,5	65,8	55,9
2,3	21,8	60,6	51,8	66,3	47,3	62,1	51,7
2,7	18,4	55,8	48,4	61,2	42,9	58,1	47,5
3,4	9,7	35,8	8,9	39,0	10,6	55,7	18,5*
4,2	5,1	23,3	4,2	22,3	3,6	34,8	10,4*
vol. gev. (g.cm ⁻³)	1,36	0,59	0,91	0,60	1,9	0,60	

*omgerekend naar vol. Z

Veld 2:

pF-waarde	2A		2B		2C		Gemiddelde waarden
	20-30 cm	50-70 cm	20-30 cm	50-70 cm	20-30 cm	50-70 cm	
start	33,0	45,1	42,4	41,5	33,1	35,0	
0,5	59,6	53,8	62,1	51,3	52,2	58,2	56,2
1,0	56,9	53,5	62,9	50,8	52,5	55,8	55,3
1,5	52,3	53,2	59,0	49,8	51,9	48,2	52,4
2,0	45,9	46,5	54,0	45,3	43,8	38,7	45,7
2,3	41,4	42,2	50,8	42,7	38,4	34,8	41,7
2,7	37,4	38,9	46,7	39,4	34,2	31,6	38,0
3,4	21,3	n.b.	36,7	33,7	25,8	26,4	31,3*
4,2	13,4	n.b.	23,4	21,5	22,6	13,0	20,8*
vol. gev. (g.cm ⁻³)	1,08	1,09	1,01	1,24	1,21	0,9	

*omgerekend naar vol. Z

Veld 3:

pF-waarde	3A		Gemiddelde waarden (1A t/m C-diep + 3A-beide)**
	20-30 cm	50-70 cm	
start	59,3	67,5	
0,5	73,8	76,5	74,3
1,0	73,3	75,8	73,5
1,5	72,9	75,6	72,4
2,0	66,1	67,6	66,7
2,3	61,6	63,6	62,8
2,7	55,3	57,0	57,5
3,4	n.b.	n.b.	26,0*
4,2	n.b.	n.b.	16,0*
vol. gev. (g.cm ⁻³)	0,62	0,48	

*omgerekend naar vol. Z

**ondergrond van veld 1 is vergelijkbaar met grond op veld 3

Bijlage 4: INVOERGEGEVENS REDRAM

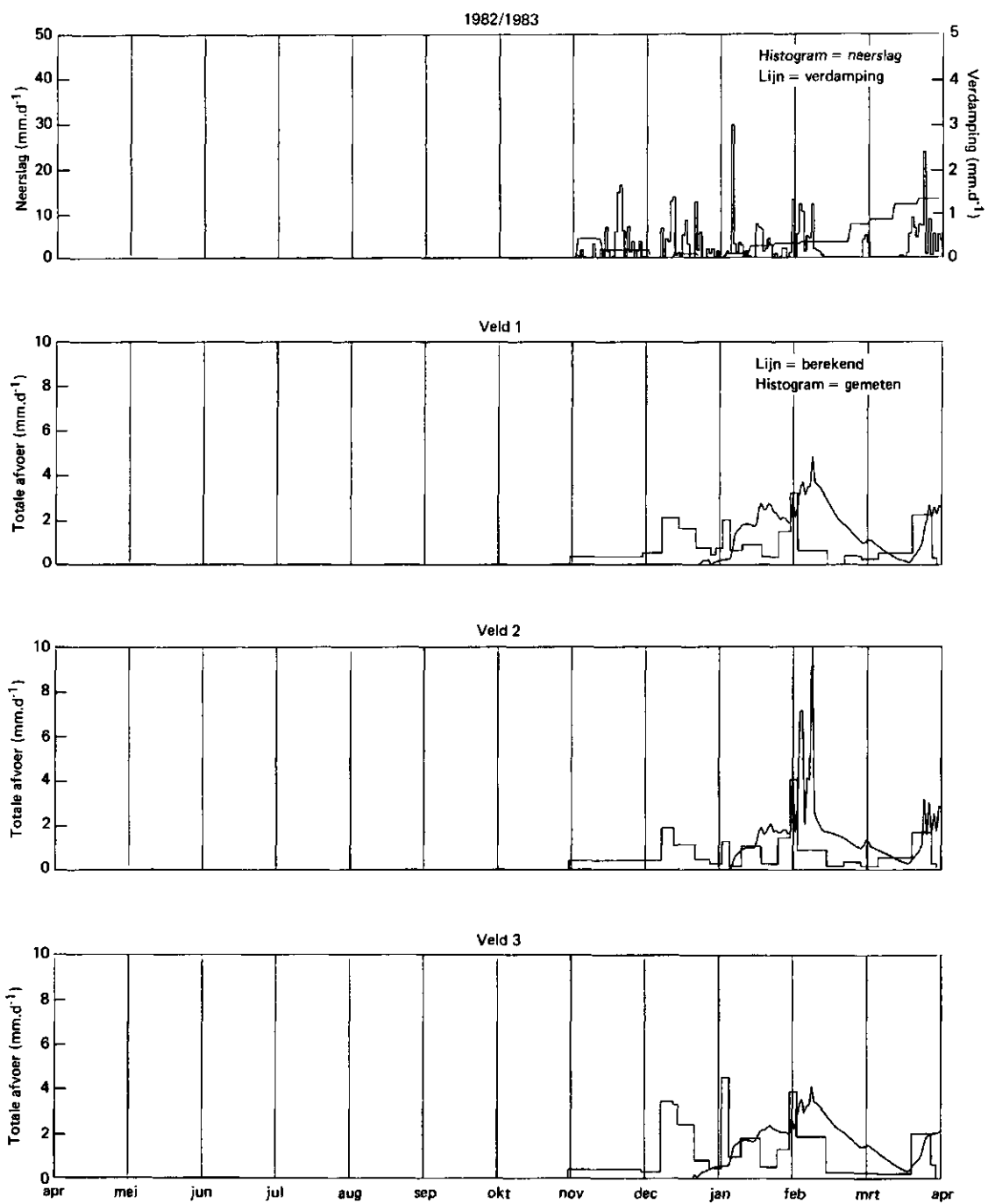
1.1. Eenmalige invoerfile VELDK.DAT

Onschrijving	Symbol	VELD1.DAT	VELD2.DAT	VELD3.DAT
Weerstand van de storende laag onder het stort	C_{dq}	2E30	2E30	2E30
Uiteindelijke aantal kolommen	JJ_f	12	12	12
Uiteindelijke aantal afvallagen	NN_f	0	0	0
Aantal bodemlagen onder het stort, boven de storende laag	NN_0	1	1	1
Aantal stortperiodes waarvoor een nieuwe invoerfile gelezen dient te worden	NN_{if}	1	1	1
Decadenummer van de eerste decade volgend op het eerste storttijdstip	Dec_i	1	1	1
Maandnummer van deze decade	Mon_i	11	11	11
Jaarnummer van deze maand	Y_i	1982	1982	1982
Rakentijdteplengte (d)	Δt	1,00	1,00	1,00
Stortlengte van het stort (m)	L_s	40,00	40,00	40,00
Eenheidelaagdikte van het afval voor zakking (m)	Δh	0,10	0,10	0,10
Maximale bovenbelasting van een afvalklaag ($t.m^{-2}$)	P_{max}	800,00	800,00	800,00
Porievolumen bij maximale pakingsdichtheid ($m^3.m^{-3}$)	P_f	0,30	0,30	0,30
Droogtevolumegewicht afdeklaag ($t.m^{-3}$)	ρ_c	1,01	1,28	0,68
Soortelijk gewicht inert materiaal ($t.m^{-3}$)	ρ_i	2,00	2,00	2,00
Soortelijk gewicht organisch keukenafval ($t.m^{-3}$)	ρ_o	1,40	1,40	1,40
Soortelijk gewicht tuinafval ($t.m^{-3}$)	ρ_t	1,40	1,40	1,40
Laag dikte bodem (m)	ΔL_0	0,50	0,50	0,50
Intraeweerstand drains ($d.m^{-1}$)	ω	200,00	200,00	200,00
Doorlatendheid bodem onder het afval ($m.d^{-1}$)	K_0	2,00	2,00	2,00
Drainafstand (m)	L	8,33	8,33	8,33
Dikte watervoerend pakket (m)	B	0,20	0,20	0,20
Diepte van de drains onder het bodem/afval grensvlak (m)	d_b	0,30	0,30	0,30
Piezometrische drukhoogte boven de drains van het diepe- en water-voerende pakket (m)	h_d	0,20	0,20	0,20
Verzadigd vochtgehalte van de bodem ($m^3.m^{-3}$)	θ_{0s}	0,40	0,40	0,40
Evenwichtvochtgehalte van de bodem ($m^3.m^{-3}$)	θ_{0e}	0,38	0,38	0,38
Laagdikte afval (m)	ΔL	0,50	0,50	0,50
Porievolumen niet-permanent vocht van nieuw aangebracht afval ($m^3.m^{-3}$)	P_1	0,16	0,16	0,16
Porievolumen permanent vocht van nieuw aangebracht afval ($m^3.m^{-3}$)	P_2	0,46	0,46	0,46
Onverzadigde doorlatendheid afval ($m.d^{-1}$)	K_a	0,02	0,02	0,02
Fractie vaste fase in het vers gestorte afval	V_0	0,38	0,38	0,38
Fractie van vaste fase bestaand uit inert materiaal	V_1	0,41	0,41	0,41
Fractie van vaste fase bestaand uit snel afbrekend organisch keukenafval	V_{n1}	0,18	0,18	0,18
Fractie van vaste fase bestaand uit matig snel afbrekend organisch keukenafval	V_{n2}	0,04	0,04	0,04
Fractie van vaste fase bestaand uit langzaam afbrekend organisch keukenafval	V_{n3}	0,04	0,04	0,04
Fractie van vaste fase bestaand uit snel afbrekend organisch tuinafval	V_{t1}	0,01	0,01	0,01
Fractie van vaste fase bestaand uit matig snel afbrekend organisch tuinafval	V_{t2}	0,20	0,20	0,20
Fractie van vaste fase bestaand uit langzaam afbrekend organisch tuinafval	V_{t3}	0,12	0,12	0,12
Initiële waterspiegel in de bodem/afval bij het begin van de eerste stortperiode (m)	h_{c0}	0,00	0,00	0,00
Initiële verzadigde doorlatendheid van het afval ($m.d^{-1}$)	K_{as}	5,00	5,00	5,00
Vormfactor van het afval	α_f	0,50	0,50	0,50
Intraeweerstand van de drains in afdeklaag ($d.m^{-1}$)	ω_c	25,00	45,00	20,00
Drainafstand drains in afdeklaag (m)	L_c	15,00	15,00	15,00

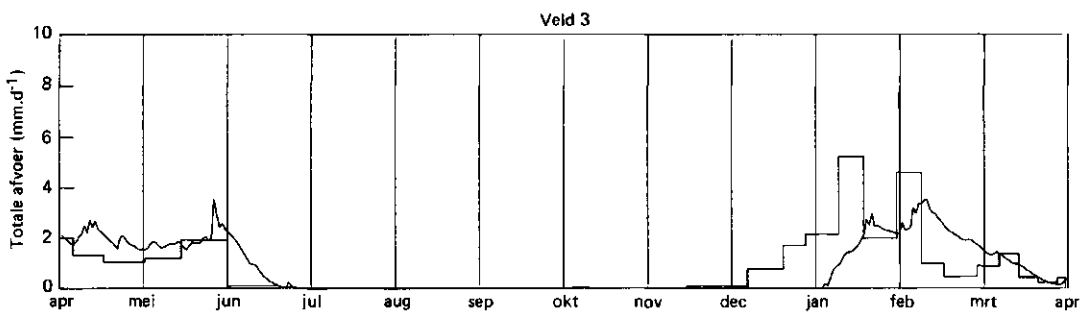
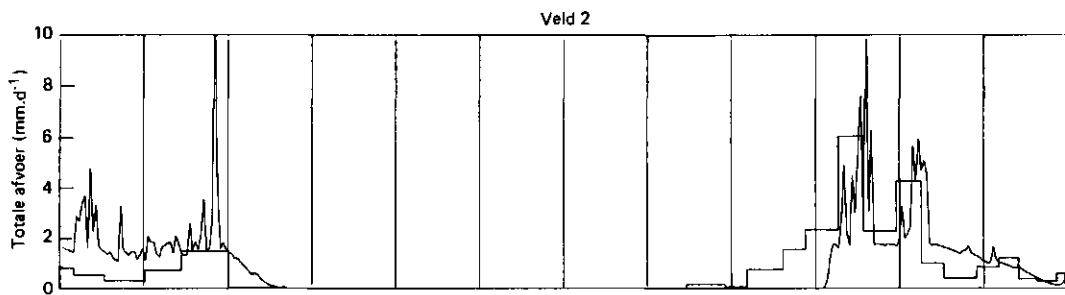
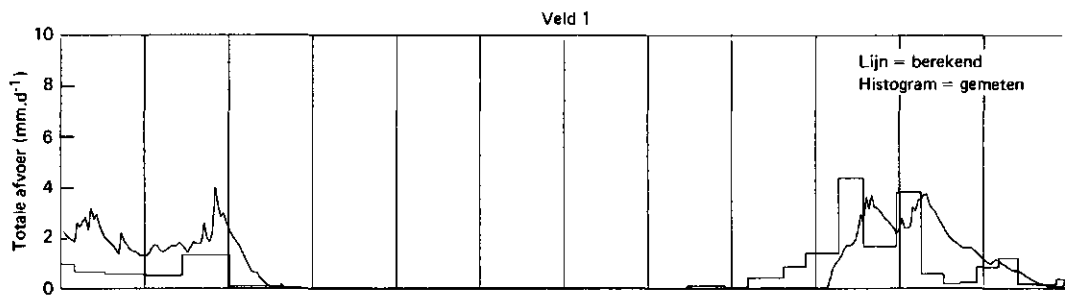
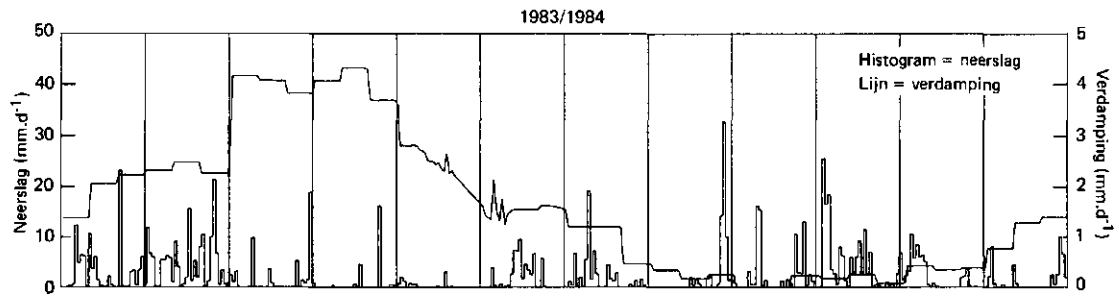
1.2. Inputfile 1e periode VELOXNIF1.DAT

Onschrijving	Symbol	VELD1NIF1.DAT	VELD2NIF1.DAT	VELD3NIF1.DAT
Aantal decaden in de stortperiode	N_d	129,00	129,00	129,00
Dikte van de effectieve wortelzone van het plantendek op de afdeklaag (m)	d_1	0,50	0,50	0,50
Doorlatendheid afdeklaag ($m.d^{-1}$)	K_c	0,20	0,10	0,20
Vochtgehalte bij verwelkingspunt van afdeklaag ($m^3.m^{-3}$)	θ_w	0,10	0,10	0,16
Vochtgehalte bij verzadiging van afdeklaag ($m^3.m^{-3}$)	θ_e	0,60	0,51	0,71
Vochtgehalte bij veldcapaciteit van afdeklaag ($m^3.m^{-3}$)	θ_e	0,48	0,42	0,55
Verdampingscorrectiefactor voor linker- en rechterzijde van het stort	α_e	1,00	1,00	1,00
Neerslagcorrectiefactor voor linker- en rechterzijde van het stort	α_p	1,00	1,00	1,00
Geweaverdampingsfactor	α	0,85	0,85	0,85
Reactiefactor voor zetting	C_{zet}	1,4.E-4	1,4.E-4	1,4.E-4
Reactiefactor snel afbrekend keukenafval	K_{n1}	4.E-5	4.E-5	4.E-5
Reactiefactor matig snel afbrekend keukenafval	K_{n2}	4.E-6	4.E-6	4.E-6
Reactiefactor langzaam afbrekend keukenafval	K_{n3}	4.E-7	4.E-7	4.E-7
Reactiefactor snel afbrekend tuinafval	K_{t1}	1,5.E-5	1,5.E-5	1,5.E-5
Reactiefactor matig snel afbrekend tuinafval	K_{t2}	5.E-6	5.E-6	5.E-6
Reactiefactor langzaam afbrekend tuinafval	K_{t3}	4.E-7	4.E-7	4.E-7
Aantal kolommen gedurende de stortperiode	J	12	12	12
Aantal afvallagen in de langste kolom	N_m	0	0	0
Initiële vochtgehalte afdeklaag ($m^3.m^{-3}$)	θ_i	0,27	0,19	0,36
Dikte afdeklaag (m)	d_{afd}	0,85	0,85	0,85
Draintraal (m)	r	0,03	0,03	0,03
Initiële waterspiegel in de afdeklaag (m)	$h_c(t_0)$	0,00	0,00	0,00
Initiële verticale drainagesnelheid uit de afdeklaag ($m.d^{-1}$)	$f_{dV}(t_0)$	0,00	0,00	0,00
Doorlatendheid storende laag tussen de afdeklaag en het afval ($m.d^{-1}$)	K_0	2.E-30	2.E-30	2.E-30
Weerstand storende laag (d)	C_0	2.E30	2.E30	2.E30
Helling na zetting	S	0,28	0,27	0,27
Breedte van de kolommen	B_i	5,00	5,00	5,00

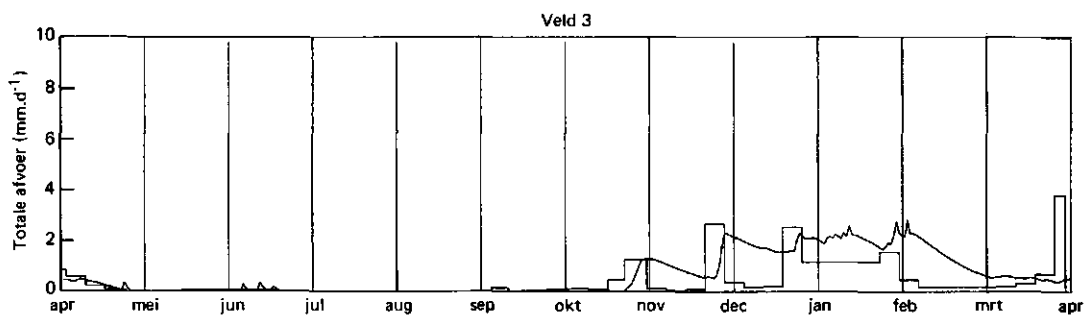
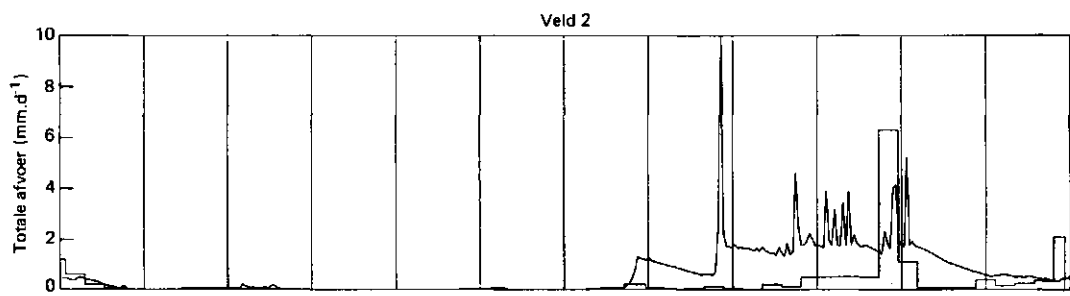
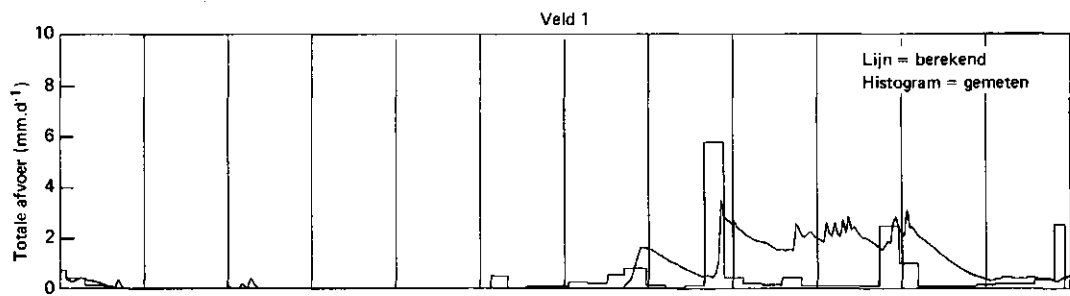
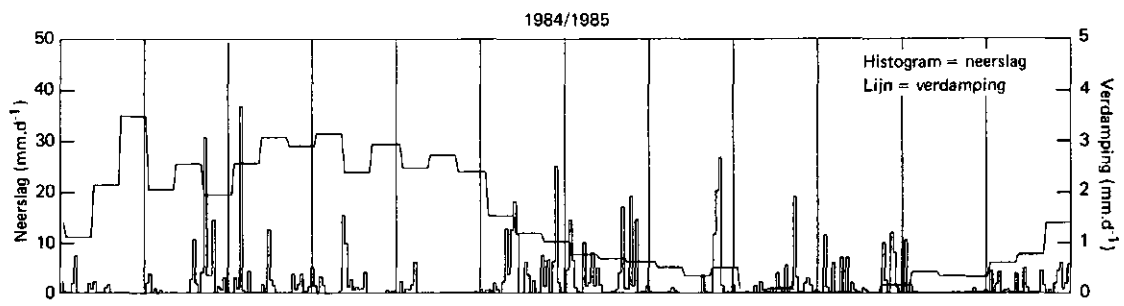
Bijlage 5: BEREKENDE EN GEMETEN AFVOEREN IN DE TIJD



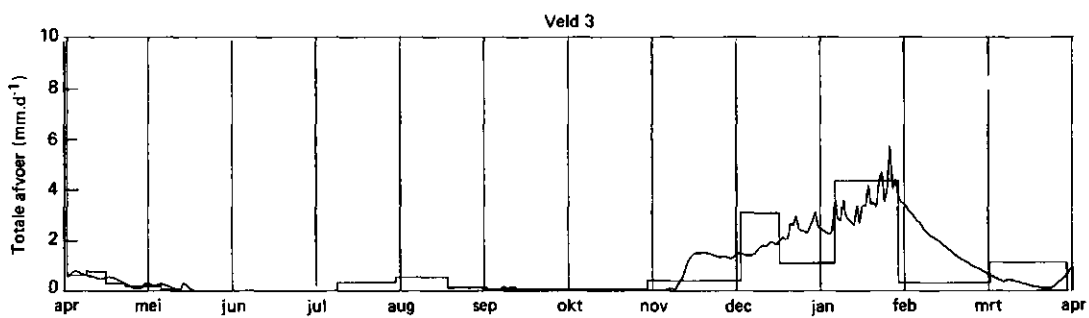
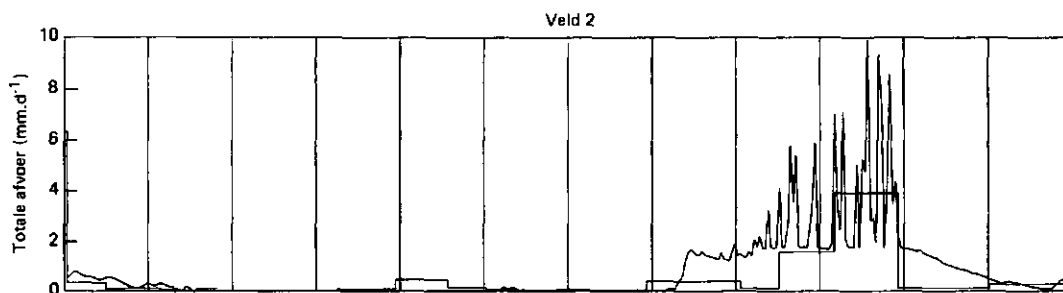
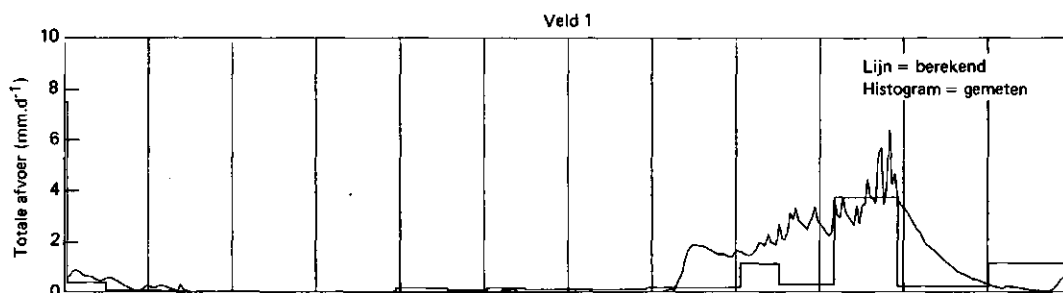
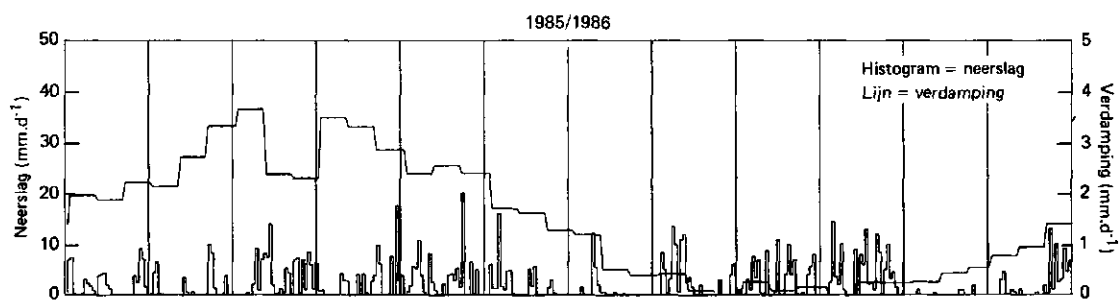
Bijlage 5: BEREKENDE EN GEMETEN AFVOEREN IN DE TIJD



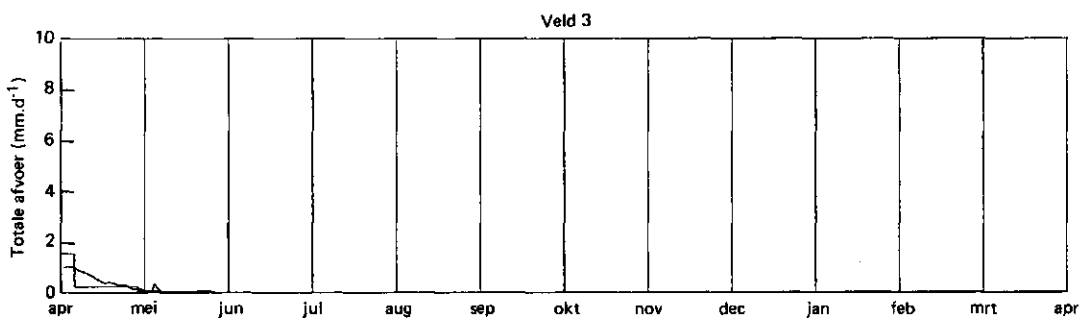
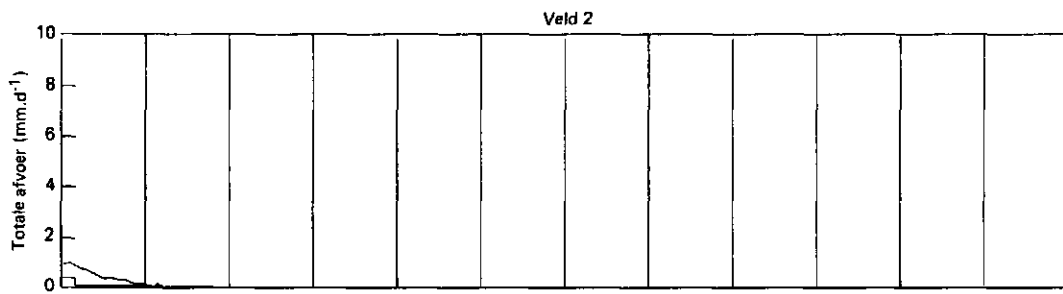
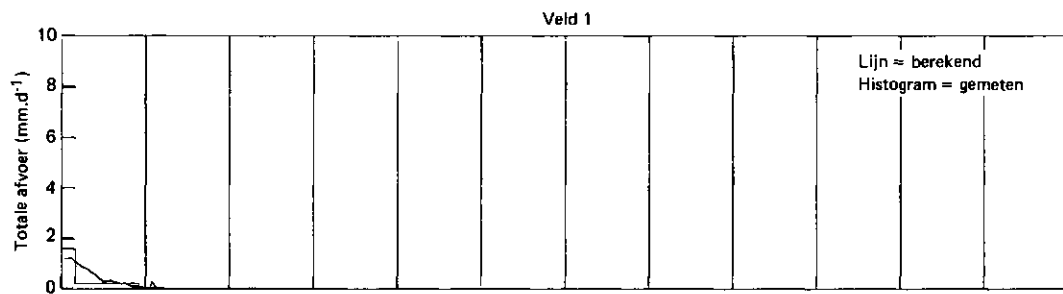
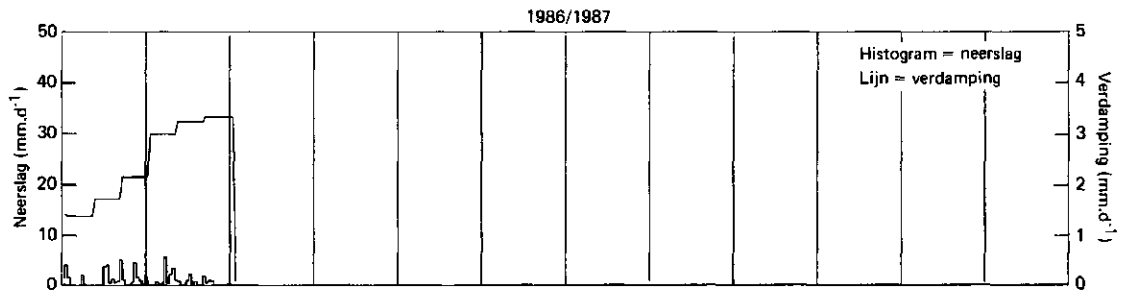
Bijlage 5: BEREKENDE EN GEMETEN AFVOEREN IN DE TIJD



Bijlage 5: BEREKENDE EN GEMETEN AFVOEREN IN DE TIJD



Bijlage 5: BEREKENDE EN GEMETEN AFVOEREN IN DE TIJD



OVERZICHT VERSCHENEN RAPPORTEN

Nr	Auteur(s) + Titel	Prijs (Hfl)
1.	Sprik, J.B. en G.H. Horst. 1982. Onderzoek naar capaciteitsnormen voor diepploegen bulldozers en hydraulische graafmachines.	15,-
2.	Nieuwenhuis, G.J.A. en C.L. Palland. 1982. Verdamping van een aardappelgewas en de meting daarvan via remote sensing	10,-
3.	Hoeks, J. en G.J. Agelink. 1982. Onderzoek naar mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen.	5,-
4.	Alderwegen, H.A. van. 1982. Planning van openluchtrecreatievoorzieningen bij voorbereiding van landinrichtingsprojecten	*
5.	Rijtema, P.E. et al. 1982. Bemesting, waterhuishouding, perceelscheidingen en landbouw. Commentaar op een RIN-rapport.	5,-
6.	Harmsen, J. en H. van Drumpt. 1982. Conservering van watermonsters.	5,-
7.	Ernst, L.F. 1983. Wegzijging en kwel; de grondwaterstroming van hogere naar lagere gebieden.	7,50
8.	Steenvoorden, J.H.A.M. en M.J. de Heus. 1984. Fosfaatbalansstudies en de bijdrage van diffuse bronnen.	7,50
9.	Wijk, A.L.M. van. 1984. Landbouwkundige aspecten van ontwatering in veenweidegebieden. Commentaar op een literatuuranalyse.	5,-
10.	Beuving, J. 1984. Vocht- en doorlatendheidskarakteristieken, dichtheid en samenstelling van bodemprofielen in zand-, zavel, klei- en veengronden.	7,50
11.	Weerd, B. van der en L.F. Ernst. 1984. Een prognose van het effect van een peilverhoging in het Philippinekanaal (Zeeland) op de grondwaterstand in de aangrenzende polders.	7,50
12.	Werkgroep nitraatuitspoeling in waterwingebieden. 1985. Nitraatproblematiek bij grondwaterwinning in Nederland. Onderzoek naar alternatieve maatregelen.	12,50
13.	Wilde, J.G.S. de. 1984. Dammen van riet, heide of boomschors als perceelverbinding in veenweidegebieden.	10,-
14.	Kemmers, R.H. en P.C. Jansen. 1985. Stikstofmineralisatie in onbemeste half-natuurlijke graslanden.	7,50
15.	Bakel, P.J.T. van. 1985. Effecten van peilbeheer in het gebied 'De Monden' (Drenthe).	15,-
16.	Wilde, J.G.S. de. 1985. Rekenmodel en produktienormen voor grondtransport met getrokken en zelfrijdende dumpers.	10,-
17.	Projectteam Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland. 1985. Onderzoek naar de mogelijkheden van operationele toepassing van remote sensing technieken in de landbouw en het natuurbeheer. Eindrapport.	12,50
18.	Wösten, J.H.M., M.H. Bannink en J. Beuving. 1987. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks.	10,-

Nr	Auteur(s) + Titel	Prijs (Hfl)
19.	Rijtema, P.E., C.W.J. Roest en J. Pankow. 1986. Onderzoek naar de waterbalans van vuilstortplaatsen.	20,-
20.	Bakker, J.W., F.R. Boone en P. Boekel. 1987. Diffusie van gassen in grond en zuurstofdiffusiecoëfficiënten in Nederlandse akkerbouwgronden	15,-
21.	Hoeks, J., A.H. Ryhiner en J. van Dommelen. 1987. Onderzoek naar de praktische uitvoerbaarheid van bovenafdichting op afvalstortterreinen.	25,-

*** uitverkocht**

De RAPPORTEN zijn te bestellen door storting van het verschuldigde bedrag op giro 817672 t.n.v. ICW, Wageningen, onder vermelding van de gewenste publikatie en het aantal exemplaren. Toezending geschiedt na ontvangst van het bedrag.