

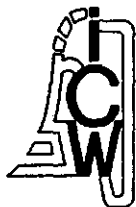
NN31545.1770

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

ICW nota 1770

september 1987

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW



nota

— instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen —

ONDERZOEK NAAR DE UITVOERBAARHEID VAN BOVENAFDICHTING OP
AFVALSTORTTERREINEN

Deelrapport 4
Modelberekeningen met betrekking tot de waterbalans van
de proefvelden

dr. J. Hoeks en A.H. Ryhiner

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-
middelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen
de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek
nog niet is afgesloten.

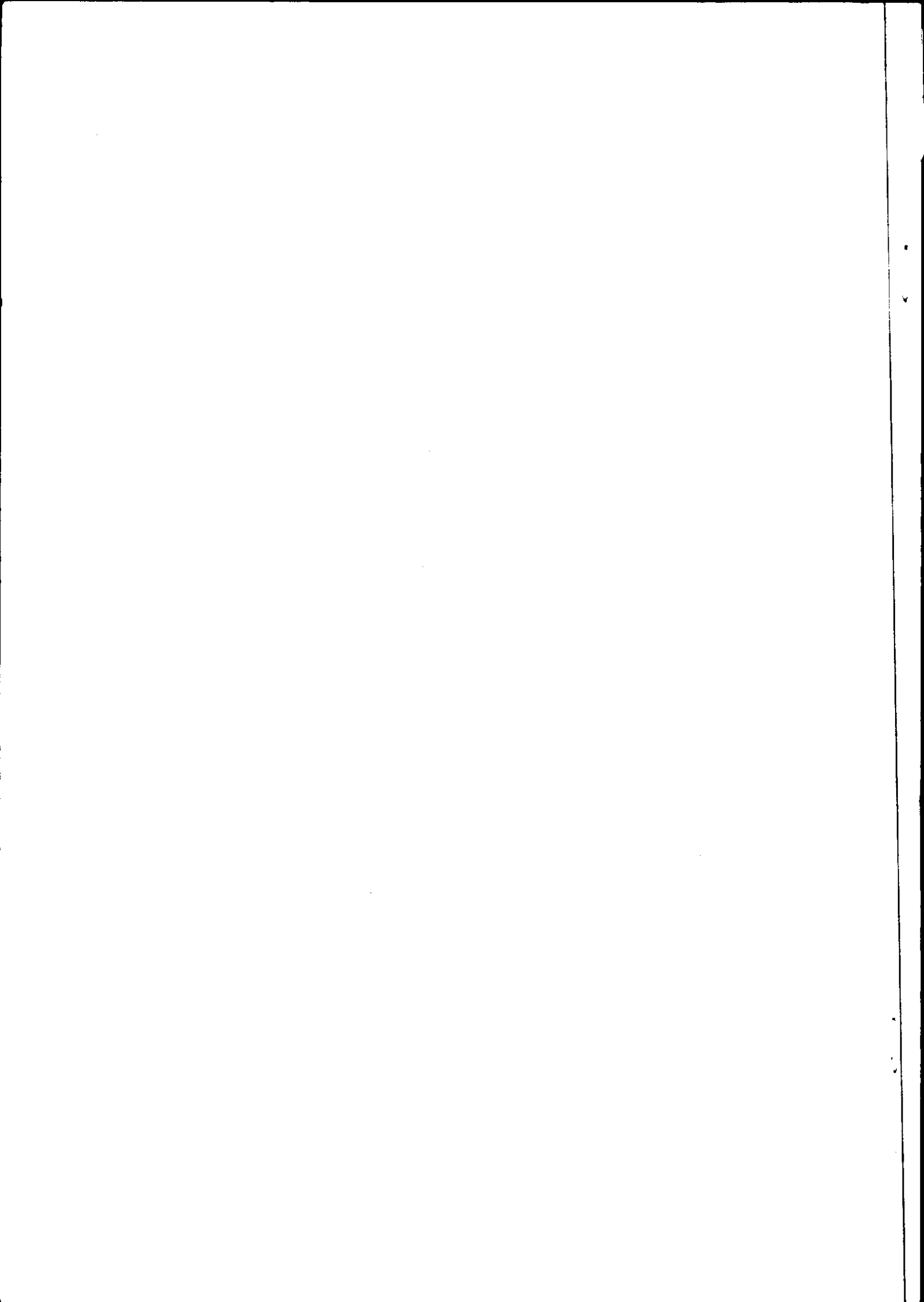
Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking



0000 0503 4091

13826117
ISBN = 195002 *

7 DEC 1987



VOORWOORD

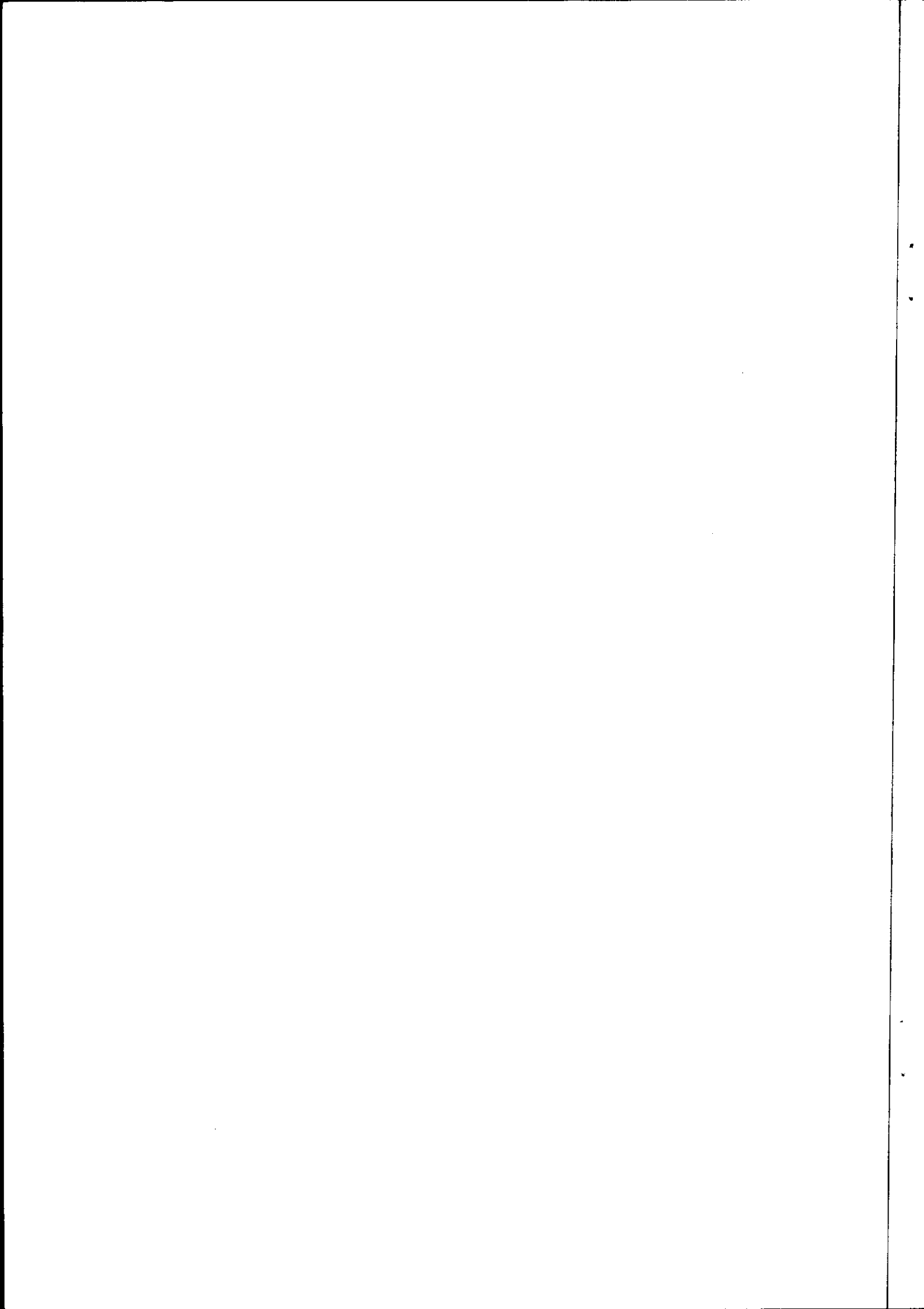
Het hier beschreven onderzoek naar de praktische uitvoerbaarheid van bodemafdichting van stortplaatsen sluit aan bij het eerder uitgevoerde onderzoeksproject 'Vermindering van de infiltratie van regenwater in afvalstortterreinen', waarvan het eindrapport is verschenen in de Bodembeschermingsreeks van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

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

Het project wordt begeleid door een door het Ministerie ingestelde begeleidingscommissie waarin de volgende personen zitting hebben:

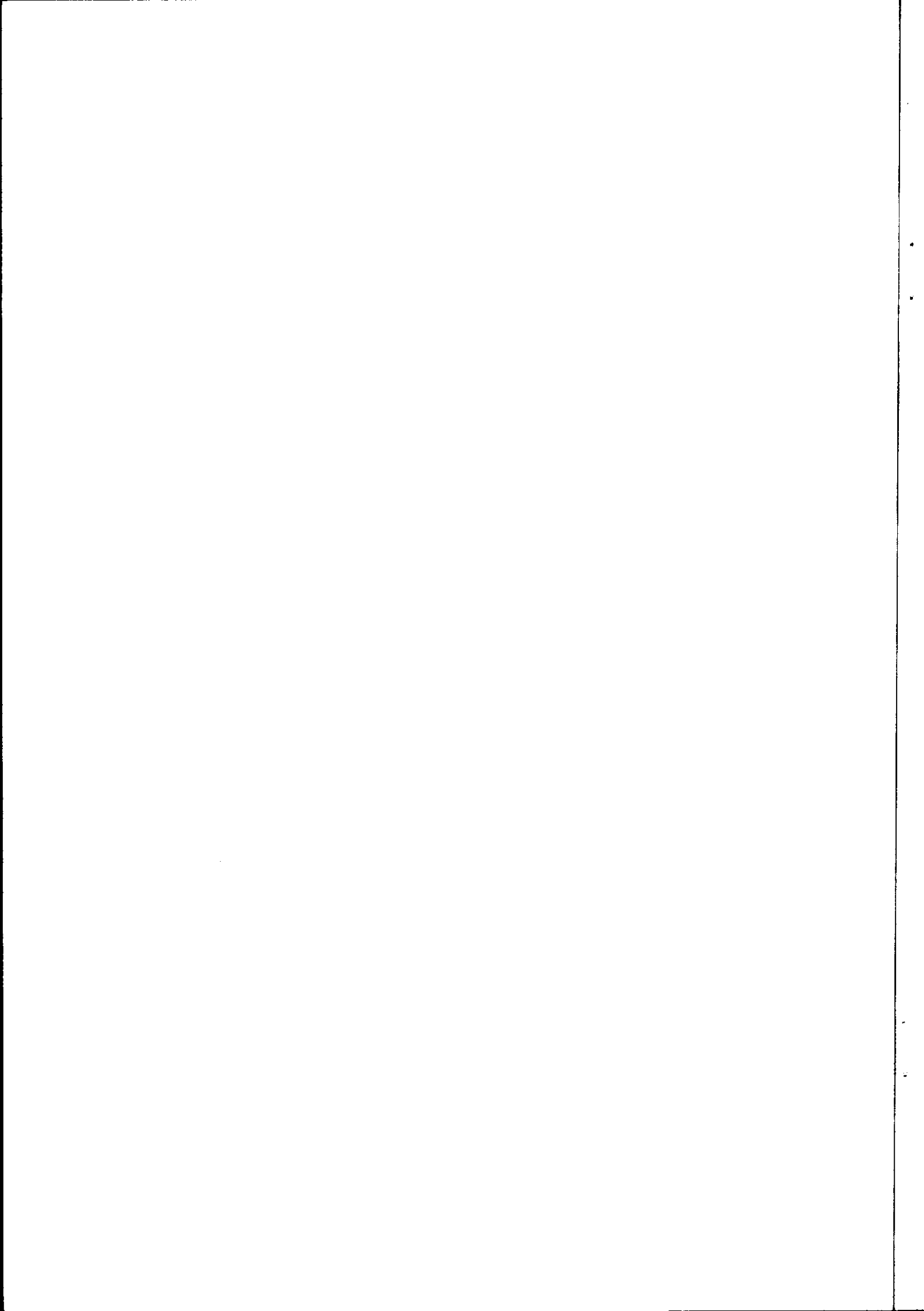
- | | |
|---|--|
| - dr.mr. D.A. Zeilmaker | Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Hoofdafdeling Bodem |
| - drs. J.P.N. Smit | Idem, Directie Afvalstoffen en Schone Technologie |
| - ir. K. Strijbis | Heidemij Adviesbureau, Arnhem |
| - ir. D. Beker | Rijks Instituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (RIVM) |
| - dr. P.E. Rijtema | Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Hoofdafdeling Waterkwaliteit |
| - dr.ir. J. Hoeks (projectleider) | Idem |
| - A.H. Ryhiner | Idem |
| - prof.ir. D.A. Kraijenhof v.d. Leur (tot 1-1-1985) | Landbouwhogeschool, Vakgroep Hydraulica en Afvoerhydrologie |
| - ir. L. Eppink | Landbouwhogeschool, 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) | Regionale Inspectie Milieuhygiëne voor de provincies Groningen, Friesland en Drenthe |
| - ir. J. Deunk (na 1-4-85) | idem |

De rapportage over het onderzoek vindt plaats in de vorm van een aantal deelrapporten en een eindrapport. Dit rapport is het vierde deelrapport in deze reeks.



I N H O U D

	blz.
VOORWOORD	
1. INLEIDING	1
2. BEKNOPT BESCHRIJVING VAN HET REDRAM-MODEL	2
3. INVOERGEGEVENS	6
4. RESULTATEN	9
4.1. Algemeen	9
4.2. Resultaten van het veldonderzoek (periode 1984-1986)	10
4.3. Invloed van bodemfysische eigenschappen op de waterbalans	13
4.4. Analyse van meetgegevens aan de hand van modelberekeningen	16
5. CONCLUSIES	24
LITERATUUR	25
BIJLAGEN	27



1. INLEIDING

In deelrapport 3 (RYHINER, HOEKS en VAN HEESEN, 1985) zijn de experimentele resultaten beschreven van waterbalansonderzoek op een drietal proefvelden, gelegen op de ZO-helling van het afvalstort bij het VAM-bedrijf in Wijster. Op deze proefvelden wordt het effect van afdichtingslagen op de infiltratie van regenwater onderzocht. Ervaringen met de aanleg van dergelijke lagen en de elders beschikbare kennis en ervaring werden reeds eerder vastgelegd in de deelrapporten 1 en 2 (VAN DOMMELEN e.a., 1983; HOEKS en RYHINER, 1985).

De afdichtingslagen op de drie proefvelden bestaan uit de volgende materialen:

- proefveld 1: asfalt-membraan;
- proefveld 2: 10 cm zand/bentoniet-mengsel (mengverhouding 100:10);
- proefveld 3: 20 cm zand/bentoniet-mengsel (mengverhouding 100:75).

Op de afdichtingslagen is afdekgrond ter dikte van circa 100 cm (na zetting 80-90 cm) aangebracht met daarin een drainagesysteem vlak boven de afdichtingslaag. Onderaan de helling (aanvankelijk 1:3, na zetting afnemend tot 1:ca. 3,5) is een goot geconstrueerd voor opvang van over het oppervlak afstromend water. Voor uitvoerige informatie omtrent aanleg en inrichting van de proefvelden wordt verwezen naar deelrapport 1 (VAN DOMMELEN e.a., 1983).

De metingen met betrekking tot de waterbalans van de afdeklagen op deze proefvelden besloegen een periode van 3½ jaar (november 1982 t/m mei 1986). In deelrapport 3 zijn de meetresultaten van november 1982 tot en met augustus 1984 besproken. Het project dat aanvankelijk tot eind 1984 liep, is daarop verlengd en de metingen zijn voortgezet tot en met mei 1986. De meetresultaten van de periode september 1984 tot en met mei 1986 worden daarom in dit rapport besproken.

In dit rapport worden met name de resultaten van modelberekeningen gepresenteerd. Met het model REDRAM, een waterbalansmodel voor vuilstortplaatsen (RIJTEMA, ROEST en PANKOW, 1986), zijn de waterbalansen van de drie proefvelden nagerekend en zijn de afvoeren (oppervlakteafvoer en drainafvoer) gesimuleerd en vergeleken met de gemeten afvoeren. Bij de berekeningen is aangenomen dat de afdichtingslaag geen water doorlaat, zodat de verschillen tussen berekeningen en metingen moeten worden toegeschreven aan lekkage.

Het model REDRAM is tevens gebruikt om na te gaan welke invoergegevens het meest kritisch zijn voor de berekende afvoeren, zodat meer zekerheid wordt verkregen omtrent de betrouwbaarheid van de conclusies. Dit geldt vooral voor de conclusies met betrekking tot lekkage (zie ook deelrapport 3), omdat de lekkage niet direct is gemeten maar als restpost uit de waterbalans is afgeleid.

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 afhankelijk van de storthoogte, het vele jaren kan 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:

$$\frac{dM_t}{dt} = N - E_{act} - A_{opp} - A_z - A_{dr} - A_v \quad (1)$$

waarin: M_t	= beschikbaar vocht in de afdeklaag op tijdstip t (m)	
t	= tijd	(dagen)
N	= neerslag	(m.dag ⁻¹)
E_{act}	= actuele verdamping	(m.dag ⁻¹)
A_{opp}	= oppervlakte-afvoer	(m.dag ⁻¹)
A_z	= zijdelingse afvoer	(m.dag ⁻¹)
A_{dr}	= drainafvoer	(m.dag ⁻¹)
A_v	= verticale afvoer naar het afval	(m.dag ⁻¹)

Aangezien hier is aangenomen dat de afdichtingslaag waterdicht is, zal $A_v=0$ 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 beschikbaar vocht meer over 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 waterverdamping (E_0):

$$E_p = \alpha E_0 \quad (2)$$

waarin: α = gewasfactor.

Bij de berekeningen wordt aangenomen dat in de effectieve wortelzone (dikte d_1) uitdroging kan optreden tot verwelkingspunt, terwijl uit de laag onder de wortelzone (dikte = $d_{afd} - d_1$) de helft van het beschikbare vocht kan worden onttrokken. De bovengenoemde grenswaarden worden dan als volgt berekend:

- beschikbaar vocht bij verzadiging

$$M_s = 0,5 (d_1 + d_{afd}) (\theta_s - \theta_w) \quad (3a)$$

- beschikbaar vocht bij evenwicht

$$M_e = 0,5 (d_1 + d_{afd}) (\theta_e - \theta_w) \quad (3b)$$

- beschikbaar vocht bij aanvang verdampingsreductie

$$M = a M_e \quad \text{met} \quad a = 14,68 (E_p - N)^{0,641} \quad (3c)$$

waarin: d_1 = 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 ($A_v=0$):

$$M_t = M_s \quad \text{en} \quad N - E_p > A_z + A_{dr}$$

òf

$$N - E_p > k_c \quad (4)$$

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

De actuele verdamping (E_{act}) wordt berekend met behulp van de eerder vermelde grenswaarde voor verdampingsreductie ($a M_e$) volgens de condities:

$$\begin{aligned} E_p < N & \quad E_{act} = E_p \\ E_p > N \quad \text{en} \quad M_t > a M_e & \quad E_{act} = E_p \\ E_p > N \quad \text{en} \quad M_t < a M_e & \quad E_{act} = \frac{M_t}{a M_e} (E_p - N) + N \end{aligned} \quad (5)$$

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:

$$A_z + A_{dr} = \frac{\Delta h}{T_c} \quad (6)$$

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 kan echter 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).

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 gegevens 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 vegetatie-ontwikkeling 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 waterverdamping 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 vochtkarakteristiek 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, initiële 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 1. Enkele belangrijke gegevens zijn opgenomen in tabel 1 (zie ook deelrapport 3, RYHINER et al, 1985). 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:

- 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).

Het vochtgehalte bij verwelkingspunt is voor veld 2 lager gekozen dan in deelrapport 3, namelijk 0,10 $m^3 \cdot m^{-3}$. Door RYHINER et al (1985) werd de waarde uit de pF-curve (0,21 $m^3 \cdot m^{-3}$) reeds betwijfeld. Zij gebruikten voor de berekeningen 0,15 $m^3 \cdot m^{-3}$. Bij de modelberekeningen bleek in dat geval echter nog te veel verdampingsreductie op te treden tijdens de zomer van 1983.

Tabel 1. Enkele belangrijke invoergegevens voor het REDRAM-model betreffende de drie proefvelden in Wijster

Omschrijving		Symbol	Veld 1	Veld 2	Veld 3
dikte afdeklaag	(m)	d_{afd}	0,85	0,85	0,85
dikte wortelzone	(m)	d_1	0,50	0,50	0,50
helling na zetting		$tg \gamma$	0,28	0,27	0,27
drainafstand	(m)	L_C	15	15	15
doorlatendheid afdekgrond	(m.dag ⁻¹)	k_C	0,20	0,10	0,20
vochtgehalte bij verzadiging	(m ³ .m ⁻³)	θ_s	0,60	0,51	0,71
vochtgehalte bij veldcapaciteit	(m ³ .m ⁻³)	θ_e	0,48	0,42	0,55
vochtgehalte bij verwelking	(m ³ .m ⁻³)	θ_w	0,10	0,10	0,16
doorlatendheid afdichtingslaag	(m.dag ⁻¹)	k_S	2×10^{-30}	2×10^{-30}	2×10^{-30}
initieel vochtgehalte	(m ³ .m ⁻³)	θ_i	0,27	0,19	0,36

Voor de berekening van de verdamping is aangenomen dat de instraling op een helling groter is dan op een horizontaal vlak. RIJTEMA et al (1986) namen aan dat voor de zuidhelling (helling 16%) de inkomende straling circa 20% hoger is dan op een horizontaal vlak. Op de proefvelden in Wijster zal dit effect groter zijn aangezien het een helling van 30% betreft. De helling is daar echter op het zuidoosten gericht. Daardoor zal de extra instraling tijdens de morgenuren weer gedeeltelijk te niet worden gedaan 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 ander aspect bij de verdampingsberekeningen betreft de gewasfactor. De grasvegetatie was over het algemeen nogal lang, omdat weinig gemaaid is. De interceptie is daardoor groter dan bij kort gras, waarvoor meestal een gewasfactor van 0,8 wordt aangehouden.

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

$$E_p = 0,85 E_0 \quad (7)$$

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 ($N-E_{act}$). 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 gefunctioneerd 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: $\omega_C = 25 \text{ dag.m}^{-1}$, $k_C = 0,20 \text{ m.dag}^{-1}$;
- veld 2: $\omega_C = 45 \text{ dag.m}^{-1}$, $k_C = 0,10 \text{ m.dag}^{-1}$;
- veld 3: $\omega_C = 20 \text{ dag.m}^{-1}$, $k_C = 0,20 \text{ m.dag}^{-1}$.

De waarden voor ω_C zijn hier nogal hoog, aangezien voor een goed functionerend drainagesysteem deze waarde meestal kleiner is dan 5 dag.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 te hoge grondwaterstanden worden berekend.

4. RESULTATEN

4.1. Algemeen

Het model REDRAM (RIJTEMA, ROEST en PANKOW, 1986) is gebruikt voor simulatie van de oppervlakte-afvoer en drainafvoer uit de afdeklaag. Aangenomen is daarbij dat de aangebrachte afdichtingslagen (asfalt-membraan en zand-bentoniet) waterdicht zijn, zodat de berekende afvoeren gebruikt kunnen worden als referentiewaarden. Vergelijking van de berekende afvoeren met de gemeten afvoeren maakt het dan mogelijk een schatting te geven van de lekkage door de afdichtingslagen.

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, waardoor storingen in de afvoermetingen relatief kortdurend waren en meestal gecorrigeerd konden worden voor gemiste afvoer.

Tijdens de eerste winter (1982/1983) kon tengevolge van erosie de oppervlakte-afvoer niet betrouwbaar worden vastgesteld. In deelrapport 3 is de oppervlakte-afvoer voor de proefvelden 1 en 2 geschat door aan te nemen dat de vochtbergingscapaciteit op deze velden gelijk geweest is aan die op veld 3. De aldus geschatte oppervlakte-afvoeren zijn minimum schattingen, omdat de vochtbergingscapaciteit op de velden 1 en 2 in werkelijkheid kleiner is dan op veld 3.

Als gevolg van hoge waterstanden in het afvalstort is met name in het vroege voorjaar van 1984 percolatiewater naar binnen gelekt langs de scheidingswanden (zie deelrapport 3). Door meting van het chloridegehalte van het afgevoerde water konden de afvoeren hiervoor worden gecorrigeerd. Sindsdien is het chloridegehalte van het afgevoerde water steeds gemeten, en zonodig zijn de afvoeren gecorrigeerd.

4.2. Resultaten van het veldonderzoek (periode 1984-1986)

De resultaten van het veldonderzoek in de periode november 1982 tot en met augustus 1984 zijn uitvoerig beschreven in deelrapport 3 (RYHINER et al. 1985). Daarna zijn de metingen voortgezet tot juni 1986. De belangrijkste resultaten van dit vervolgonderzoek zullen hier worden besproken.

In de onderzoeksperiode 1984-1986 zijn vele storingen opgetreden, die de interpretatie van de meetgegevens ernstig bemoeilijken. Tijdens de zomer 1984 is op de helling grenzend aan proefveld 1 door de VAM een bentoniet-afdichtingslaag aangebracht, waarbij de scheidingswand langs proefveld 1 werd verwijderd. Gebleken is dat daardoor in de periode september tot en met november 1984 water van het aangrenzende hellinggedeelte op proefveld 1 is terechtgekomen (zie fig. 1). De afvoer, die tot dan toe steeds lager was dan op veld 3, was in deze periode circa 25 mm groter dan op veld 3. Pas in november in de scheidingswand hersteld.

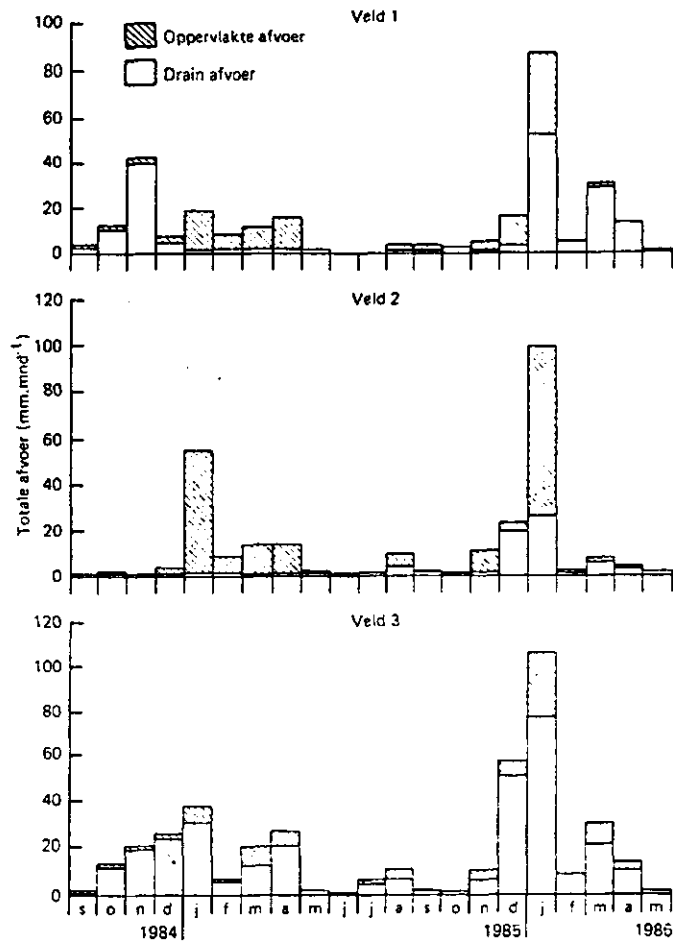


Fig. 1. Drainafvoeren en oppervlakte-afvoeren (in mm.maand⁻¹) gemeten op de drie proefvelden in de onderzoeksperiode september 1984 tot en met mei 1986

In het najaar van 1984 is de drainafvoer van veld 2 verstopt geraakt. Aangezien het doorspuiten van de afvoerbuiss weinig resultaat heeft gehad, is het waarschijnlijk dat de aansluiting op de afvoerbuiss is losgeraakt als gevolg van verzakking. De drainafvoer is daardoor tijdens de winter 1984/85 zeer gering. Aanvankelijk (september-december 1984) wordt alle water geborgen in de afdeklaag. Vanaf december stijgt de grondwaterspiegel (zie fig. 2), waardoor in januari 1985 veel oppervlakte-afvoer plaats vindt. De totale afvoer in 1984/85 haalt echter niet meer het niveau van veld 3, zoals in het voorgaande jaar wel het geval was. Ook in het jaar 1985/86 ligt de totale afvoer

van veld 2 lager dan op veld 3. Het niveau is ongeveer gelijk aan de afvoer op veld 1. Kennelijk treedt op veld 2 lekkage op, hetgeen vooral een gevolg zal zijn van de hoge grondwaterstanden. Hierdoor kan langs de scheidingswanden lekkage plaats vinden, vooral aan de voet van de helling. Door de hoge grondwaterstand kan in principe ook meer lekkage door de bentoniet-afdichtingslaag optreden. Overigens wijzen de hoge grondwaterstanden er wel op dat de zand/bentoniet-laag een grote weerstand heeft en dus slecht doorlatend is.

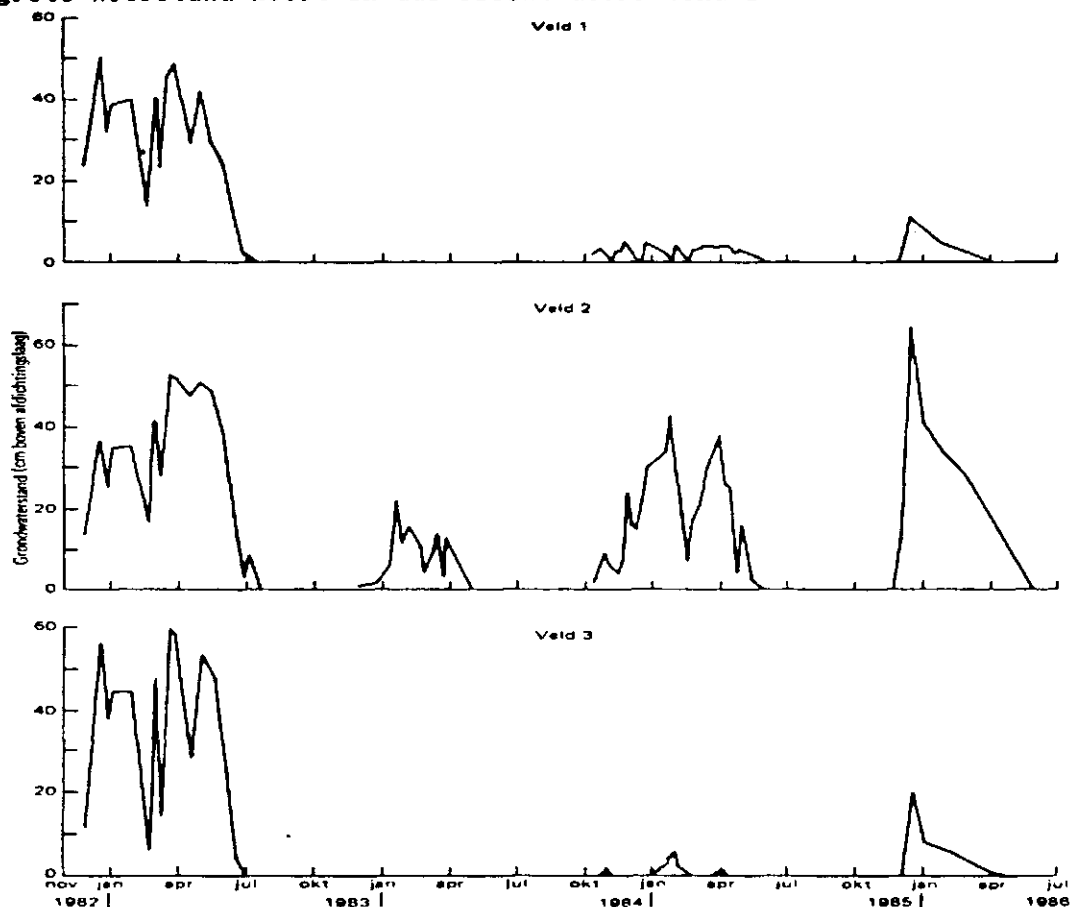


Fig. 2. Grondwaterstanden (in cm boven de afdichtingslaag), gemeten op de drie proefvelden in de onderzoeksperiode november 1982-mei 1986

Ook op veld 1 heeft het drainafvoersysteem vanaf eind 1984 onvoldoende gefunctioneerd. De totale afvoer bestaat in de eerste maanden van 1985 overwegend uit oppervlakte-afvoer (zie fig. 1). Het drainage-systeem op het veld functioneert nog wel, want hier zijn geen hoge grondwaterstanden gemeten (zie fig. 2). Dit wijst er op dat de afvoerbuis verstopt is geraakt. Het water verzamelt zich dan aan de voet van de helling en stroomt tenslotte over de rand in de goot voor oppervlakte-afvoer.

Op proefveld 3 zijn de afvoermetingen ook niet zonder storingen verlopen. Tijdens de winter 1984/85 ligt de totale afvoer belangrijk lager dan op grond van de waterbalansberekeningen verwacht mag worden. Bij opgraving van de draindoorvoer onder aan de helling bleek hier lekkage op te treden. Door technische problemen heeft de reparatie van dit lek lange tijd op zich laten wachten. Na reparatie en doorspuiten van de afvoerbuis blijkt de afvoer in 1985/86 weer normaal te verlopen.

Dankzij de onderhoudswerkzaamheden aan het drainafvoersysteem tussen de proefvelden en de meetput is ook de drainafvoer van veld 1 en 2 weer op gang gekomen in 1985/86. Niettemin blijft de afvoer, vooral op veld 2, onvoldoende functioneren gezien het grote aandeel van oppervlakte-afvoer in de totale afvoer. Ook de grondwaterstanden blijven hoog op dit veld.

In deelrapport 3 (RYHINER et al, 1985) werd reeds geconstateerd dat op veld 1 lekkage heeft plaatsgevonden tijdens de winter 1983/84. Bij opgravingen in mei 1985 werden lekken geconstateerd in het asfaltmembraan. Tijdens de zomerperioden is bruinkleuring en afsterven van de grasvegetatie geconstateerd als gevolg van lekkage van stortgas. Opvallend was dat de grasgroei op het hele veld achterbleef bij de beide andere velden. In juli 1985 is daarom het gras geoogst en het vers gewicht van deze opbrengst 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 voor deze opbrengstderving is gaslekkage door het asfaltmembraan, waardoor slechte aeratie-omstandigheden ontstaan in de wortelzone.

4.3. 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 vochtberging 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 deelrapport 3 (RYHINER et al. 1985) is bij de berekening aangenomen dat alle beschikbare water tussen pF 2,0 en 4,2 zonder beperking door de plant kan worden opgenomen. Bij de modelberekeningen is aangenomen dat al veel eerder verdampingsreductie optreedt (zie vgl. 3c in hfdst. 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 deelrapport 3. Het REDRAM-model berekent dan de hoeveelheid beschikbaar vocht bij aanvang volgens de vergelijking:

$$M_i = 0.5 (d_1 + d_{afd}) (\theta_i - \theta_w) \quad (8)$$

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 opper-

vlakke-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 dus 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 ($N-E_{act}$). 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 $E_p = 0,85 E_0$. Gezien het eerder besproken instralingseffect op hellingen lijkt deze waarde wel aannemelijk. Vooral 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 2. Duidelijk blijkt dat in jaren met potentiële verdamping (1984/86) de totale afvoer alleen afhankelijk is van E_p . Dergelijke jaren lenen zich dus uitstekend voor bepaling van de grootte van de gewasfactor ($\alpha = E_p/E_0$). 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. Alleen de verdeling 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 2. 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

4.4. Analyse van meetgegevens aan de hand van modelberekeningen

Bij de 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 afvoerbuïs) 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 3. De gemeten afvoeren van veld 1 en 2 zijn alleen in de periode november 1982-mei 1983 gecorrigeerd voor gemiste oppervlakte-afvoer als gevolg van erosie (correctie veld 1: 85 mm, veld 2: 88 m; zie deelrapport 3, RYHINER et al. 1985).

Tabel 3. Gemeten en berekende afvoeren (in mm) van de proefvelden tijdens de onderzoeksperiode november 1982-mei 1986

Periode	Gemeten afvoeren			Berekende afvoeren						
	A _{opp}	A _{dr}	A _{tot}	A _{opp}	A _{dr}	A _{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)

A_{opp} = oppervlakte-afvoer A_{dr} = drainafvoer A_{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. 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 volgens de modelberekeningen, waar $E_p = 0,85 E_0$ is gekozen voor de gehele onderzoeksperiode.

Zoals reeds in paragraaf 4.2 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 4). 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.

Tabel 4. Vergelijking van gemeten en berekende totale afvoer voor de totale onderzoeksperiode, met uitzondering van het jaar 1984/85

Proefveld	Totale afvoer (in mm)	
	gemeten	berekend
veld 1	605	733
veld 2	649	734
veld 3	745	734

De conclusies 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 deelrapport 3 gesteld 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 in dezelfde orde van grootte ligt.

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 ook 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. Wel kan gesteld worden dat op de velden 1 en 2 circa 85 à 90% van het af te voeren neerslagoverschot ook inderdaad 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 grote reductie van de infiltratie van regenwater in het afvalstort bereikt met de aangebrachte afdichtingslagen. Overigens moet wel worden opgemerkt dat de lekkage vermoedelijk met de tijd zal toenemen.

De totale afvoer, zoals berekend met het REDRAM-model is cumulatief uitgezet in figuur 3 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.

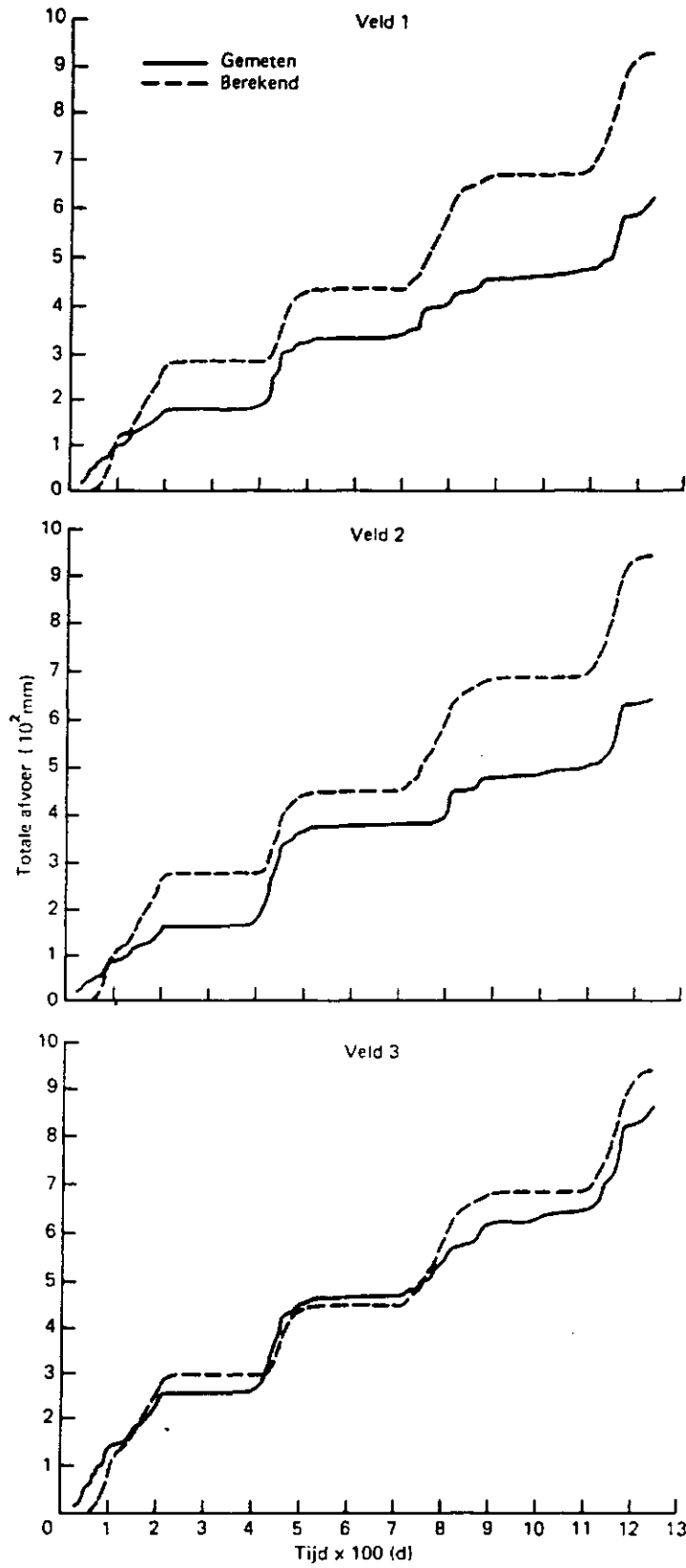


Fig. 3. Vergelijking van gemeten en met het REDRAM model berekende totaal-afvoeren (in mm) voor de drie proefvelden, cumulatief uitgezet tegen de tijd (in dagen)

Het verloop van de totale afvoer (= oppervlakte-afvoer + drainafvoer) met de tijd is weergegeven in bijlage 2. 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. Het hysteresiseffect is slechts ten dele bij de berekeningen opgenomen, door voor veld 1 en 3 met een lagere waarde voor veldcapaciteit te rekenen, dan blijkt uit de pF-curven. Vooral op veld 3 (25% organische stof) kunnen hysteresiseffecten van belang zijn als gevolg van indroging van de organische stof tijdens het groeiseizoen.

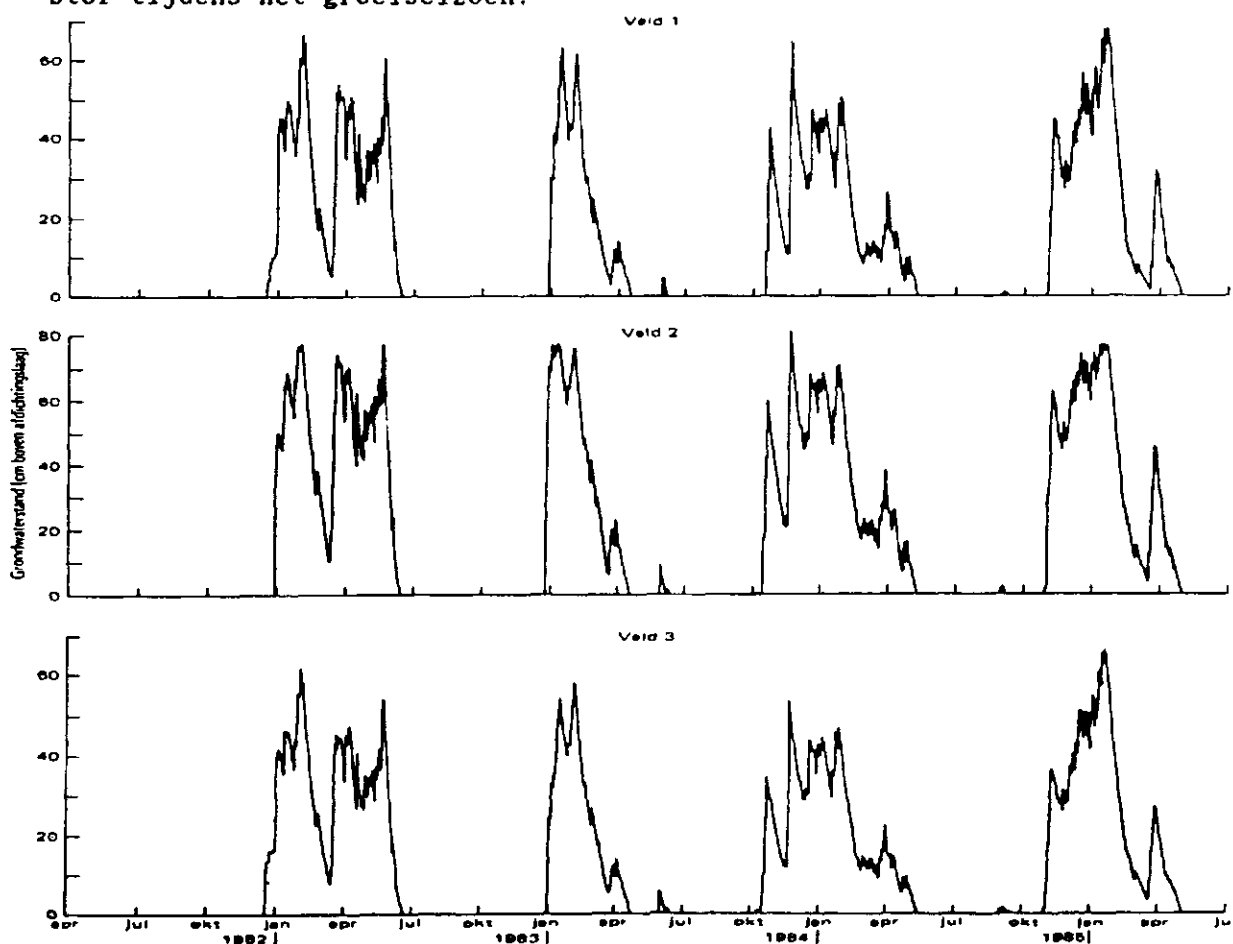


Fig. 4. Grondwaterstandsverloop op de drie proefvelden, berekend met het REDRAM-model voor de onderzoeksperiode november 1982-mei 1986

Het berekende grondwaterstandsverloop is weergegeven in figuur 4. Voor alle proefvelden zijn de berekende grondwaterstanden hoger dan in het veld gemeten werd (vergelijk met fig. 2). 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 een goed functionerend drainagesysteem noodzakelijk zijn, omdat in gevallen waar enige lekkage optreedt deze versterkt wordt als hoge grondwaterstanden voorkomen.

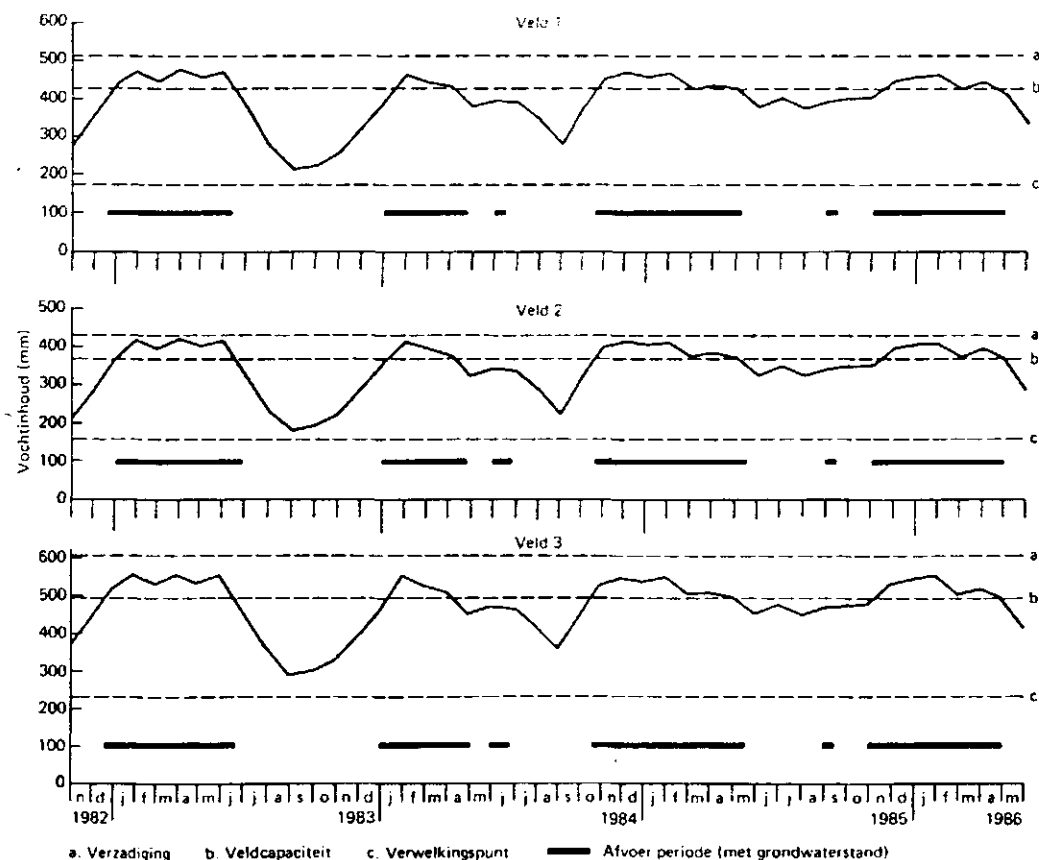


Fig. 5. Verloop van de vochtinhoud van het profiel op de drie proefvelden, berekend met het REDRAM-model voor de periode november 1982-mei 1986

Het berekende verloop van de vochtinhoud van de afdeklaag op de drie proefvelden is weergegeven in figuur 5. Hierbij moet worden opgemerkt dat bij invoering van een aanvangsvochtgehalte θ_i het REDRAM-model een beschikbare vochtinhoud M_i berekend volgens (hier is θ_i het vochtgehalte in de wortelzone):

$$M_i = 0.5 (d_1 - d_{afd}) (\theta_i - \theta_w) \quad (9)$$

Daarbij wordt een niet beschikbare hoeveelheid vocht verondersteld van:

$$M_r = d_{afd} \theta_w + 0.5 (d_{afd} - d_1) (\theta_s - \theta_w) \quad (10)$$

De totale vochtinhoud wordt dan:

$$M_{tot,i} = M_i - M_r = d_{afd} \theta_i + 0.5 (d_{afd} - d_1) (\theta_s - \theta_i) \quad (11)$$

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:

$$\Delta M = 0.5 (d_{afd} - d_1) (\theta_s - \theta_i) \quad (12)$$

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 2 in paragraaf 4.3 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 deelrapport 3 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. 5).

Duidelijk blijkt uit figuur 5 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 de sterke uitdroging van het profiel tijdens de zomer 1983, het enige jaar waarin sprake was van verdampingsreductie.

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 storingsen in het jaar 1984/85, geen lekkage is opgetreden op veld 3. De zandbentoniet 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 stemt overeen met het feit dat tijdens de zomerperiode op dit veld aanzienlijk meer vegetatieschade door gaslekkage is waargenomen dan op veld 3. Overigens kwam dit nauwelijks tot uitdrukking in de grasopbrengst, zoals deze in juli 1985 is bepaald (zie 4.2). 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.

Redenen voor de lekkage door de afdichtingslaag op veld 1 zijn, zoals reeds vermeld in deelrapport 3, constructiefouten waardoor op de fabriekslagen lekkage optreedt en lekken ontstaan door zettingen en door grindstenen in de onderliggende zandlaag. Vooral bij hogere temperaturen (de temperatuur onder de afdeklaag was 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 deze op te vangen. Voorts is op dit veld de lekkage door de afdichtingslaag vooral versterkt door de hoge grondwaterstanden (drainagesysteem functioneerde slecht). Gezien het goed functioneren van de afdichtingslaag op veld 3 moet worden geconcludeerd dat een zand-bentoniet afdichtingslaag minstens 15 à 20 cm dik moet zijn. Zoals reeds in deelrapport 1 werd vastgesteld is het ook praktisch niet goed mogelijk een laag van 10 cm gelijkmatig aan te brengen, althans niet bij de hier gevolgde werkwijze waarbij het mengsel met een kraan en een bulldozer op het veld werd gebracht.

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, 1986). Zelfs bij dit bentonietgehalte blijkt de afdichtingslaag nog veel extra zwelcapaciteit over te hebben om onregelmatige zettingen op te vangen.

LITERATUUR

- AGELINK, G.J. en J. HOEKS, 1980. Onderzoek naar mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen.
1. Literatuuronderzoek. Nota 1175, ICW, Wageningen.
- 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.
- 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.
- HOEKS, J.. 1981. Measures to control groundwater pollution near waste disposal sites. In: Proc. ISWA-Symp., Munich (June 1981).
Miscellaneous Reports 262, ICW, Wageningen.
- 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: Bodembescherming nr. 10, Staatsuitgeverij, Den Haag).

- HOEKS, J. en A.H. RYHJNER. 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.
- RYHJNER, A.H., J. HOEKS en A.H.M. VAN HEESEN. 1985. Onderzoek naar de praktische uitvoerbaarheid van bovenafdichting op afvalstortterreinen. Deelrapport 3: Experimentele resultaten van het hydrologisch onderzoek op de proefvelden. Nota 1631, ICW, Wageningen.
- RIJTEMA, P.E., C.W.J. ROEST en J. PANKOW. 1986. Onderzoek naar de waterbalans van vuilstortplaatsen. Rapporten n.s. 19, ICW, Wageningen.

BIJLAGE 1. INVOERGEGEVENS REDRAM-MODEL

1.1. Eenmalige invoerfile VELDX.DAT

Omschrijving	Symbool	VELD1.DAT	VELD2.DAT	VELD3.DAT
Weerstand van de storende laag onder het stort	C_{aq}	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_o	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
Rekentijdstaplengete (d)	Δt	1.00	1.00	1.00
Stortlengete van het stort (m)	L_s	40.00	40.00	40.00
Eenheidslaagdikte van het afval voor zakking (m)	Δh	0.10	0.10	0.10
Maximale bovenbelasting van een afval laag ($t.m^{-2}$)	π_{max}	800.00	800.00	800.00
Porienvolume bij maximale pakkingsdichtheid ($m^3.m^{-3}$)	P_f	0.30	0.30	0.30
Droogtevolume gewicht 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_o	0.50	0.50	0.50
Intreeweerstand drains ($d.m^{-1}$)	ω	200.00	200.00	200.00
Doorlatendheid bodem onder het afval ($m.d^{-1}$)	K_o	2.00	2.00	2.00
Drainafstand (m)	L	6.33	6.33	6.33
Dikte watervoerend pakket (m)	D	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_{os}	0.40	0.40	0.40
Evenwichtsvochtgehalte van de bodem ($m^3.m^{-3}$)	θ_{oe}	0.38	0.38	0.38
Laagdikte afval (m)	ΔL	0.50	0.50	0.50
Porienvolume niet-permanent vocht van nieuw aangebracht afval ($m^3.m^{-3}$)	P_1	0.16	0.16	0.16
Porienvolume 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_s	0.38	0.38	0.38
Fractie van vaste fase bestaand uit inert materiaal	V_i	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_{to}	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
Intreeweerstand 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

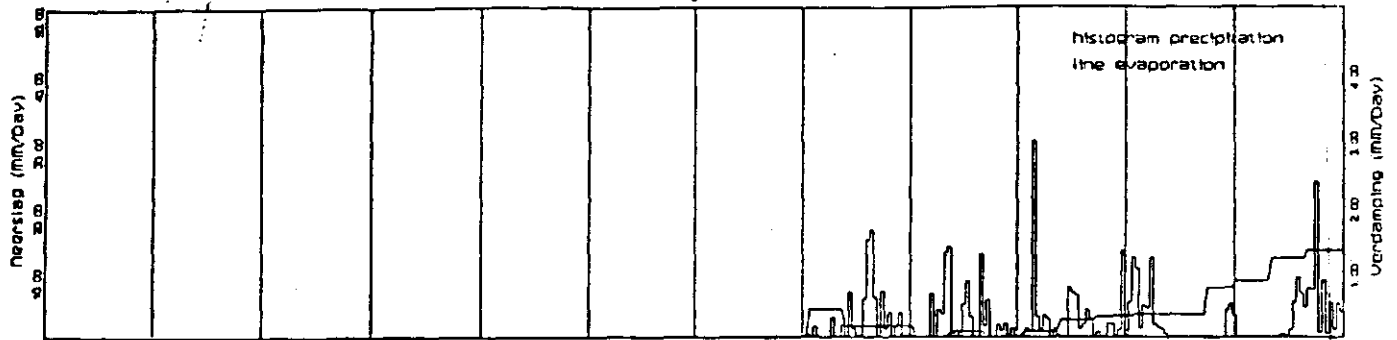
BIJLAGE 1. (vervolg)

1.2. Inputfile 1e periode VELDXNIF1.DAT

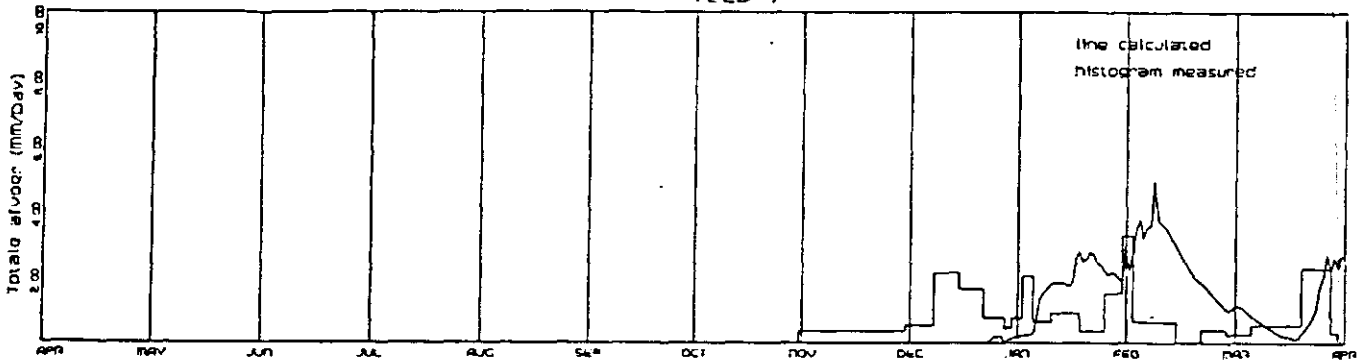
Omschrijving	Symbool	VELD1NIF1.DAT	VELD2NIF1.DAT	VELD3NIF1.DAT
Aantal decaden in de stortperiode	N_d	129.00	129.00	129.00
Dikte van de effectieve wortelzone van het plantendek op de afdeklaag (m)	d_1	0.50	0.50	0.50
Doorlatendheid afdeklaag ($m \cdot d^{-1}$)	K_c	0.20	0.10	0.20
Vochtgehalte bij verwelkingspunt van afdeklaag ($m^3 \cdot m^{-3}$)	θ_w	0.10	0.10	0.16
Vochtgehalte bij verzadiging van afdeklaag ($m^3 \cdot m^{-3}$)	θ_s	0.60	0.51	0.71
Vochtgehalte bij veldcapaciteit van afdeklaag ($m^3 \cdot m^{-3}$)	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
Gewasverdampingsfactor	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
Initieel vochtgehalte afdeklaag ($m^3 \cdot m^{-3}$)	θ_i	0.27	0.19	0.36
Dikte afdeklaag (m)	d_{afd}	0.85	0.85	0.85
Drainstraal (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 ($m \cdot d^{-1}$)	$f_{dv}(t_0)$	0.00	0.00	0.00
Doorlatendheid storende laag tussen de afdeklaag en het afval ($m \cdot d^{-1}$)	K_s	2.E-30	2.E-30	2.E-30
Weerstand storende laag (d)	C_s	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 2. Berekende en gemeten afvoeren in de tijd, in relatie met
neerslag en verdamping

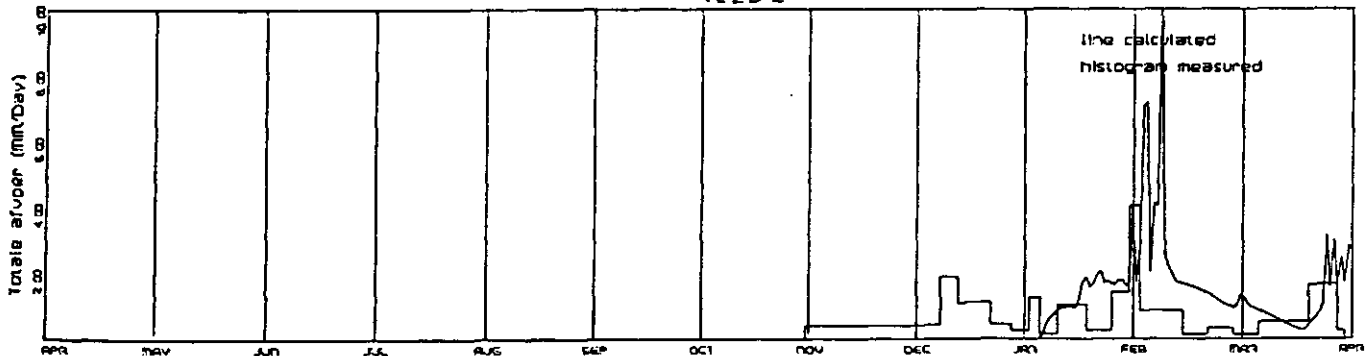
1982/1983



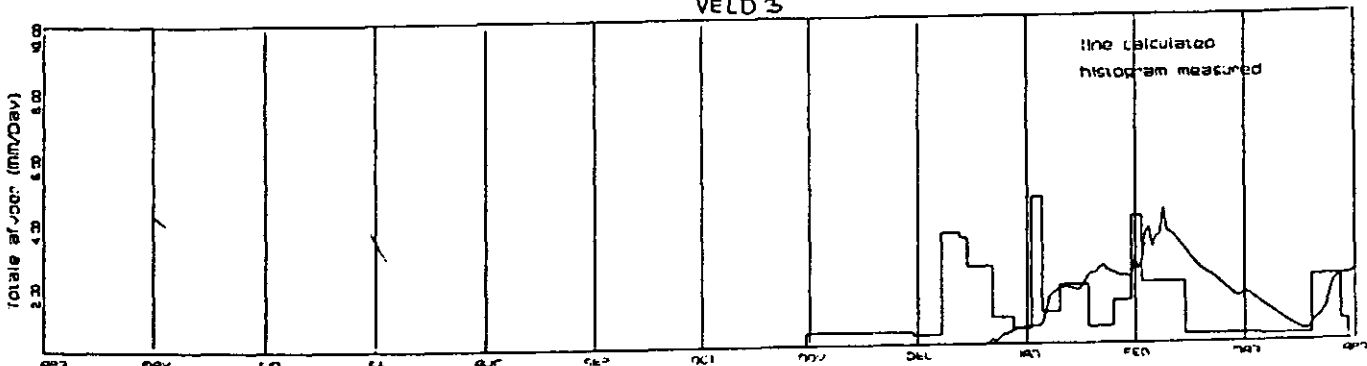
VELD 1



VELD 2

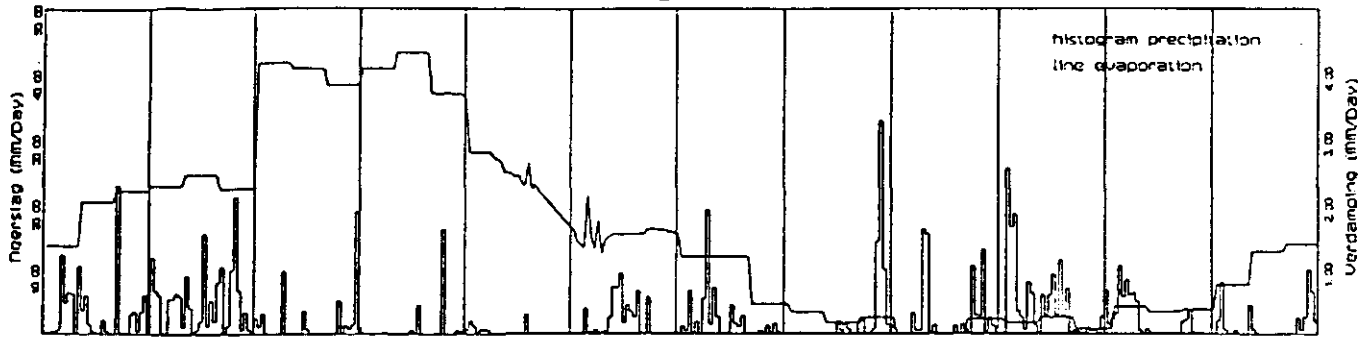


VELD 3

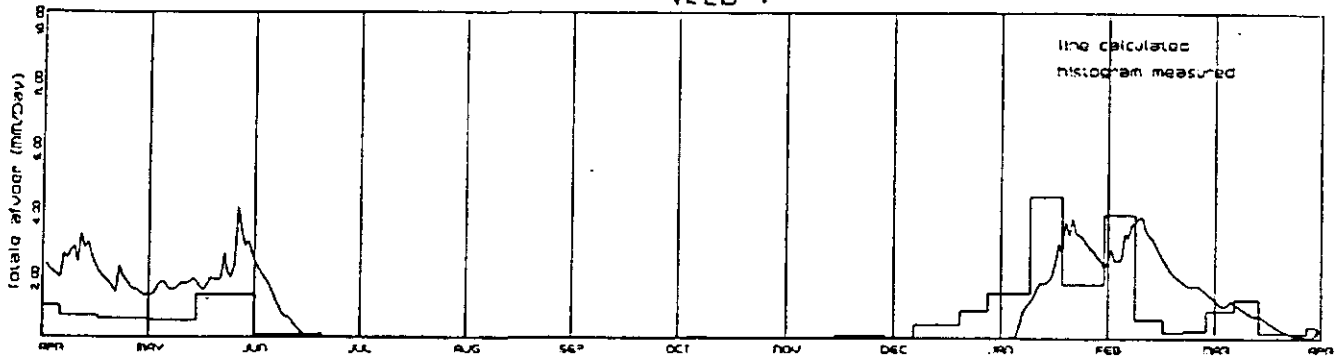


Bijlage 2. Berekende en gemeten afvoeren in de tijd, in relatie met
neerslag en verdamping

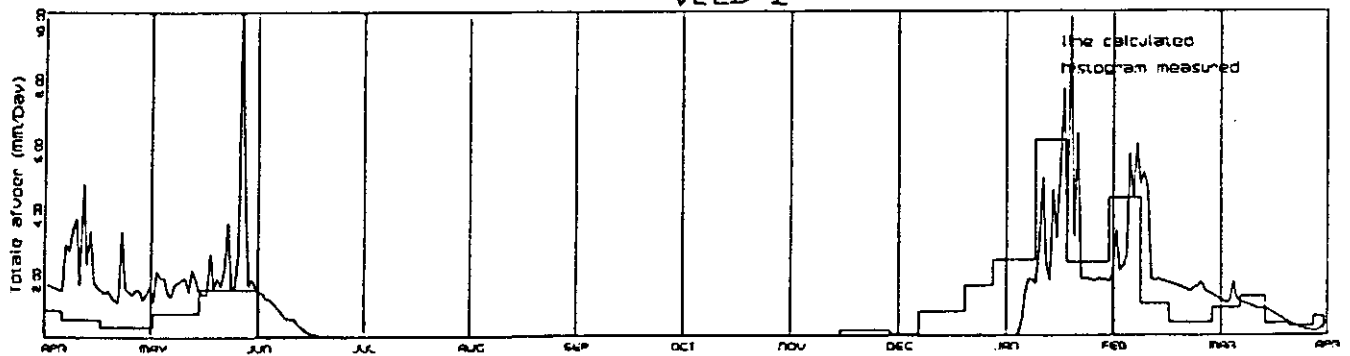
1983/1984



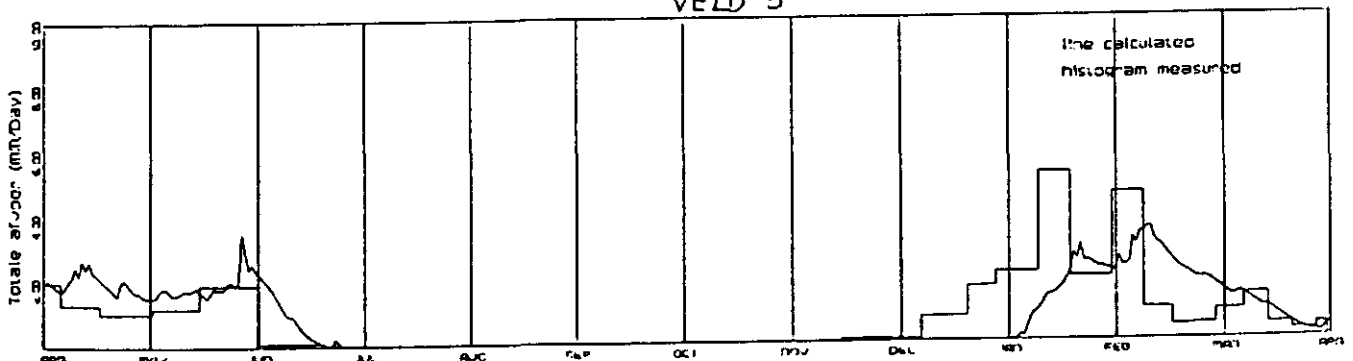
VELD 1



VELD 2

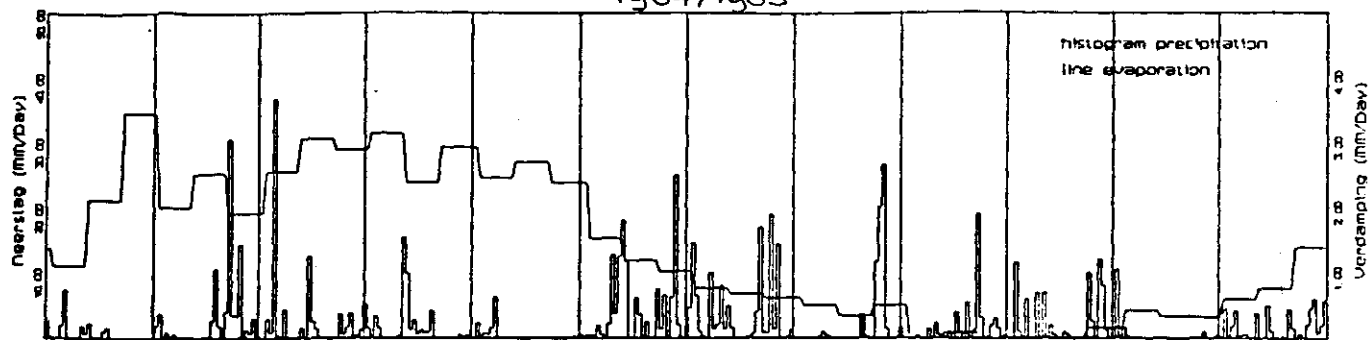


VELD 3

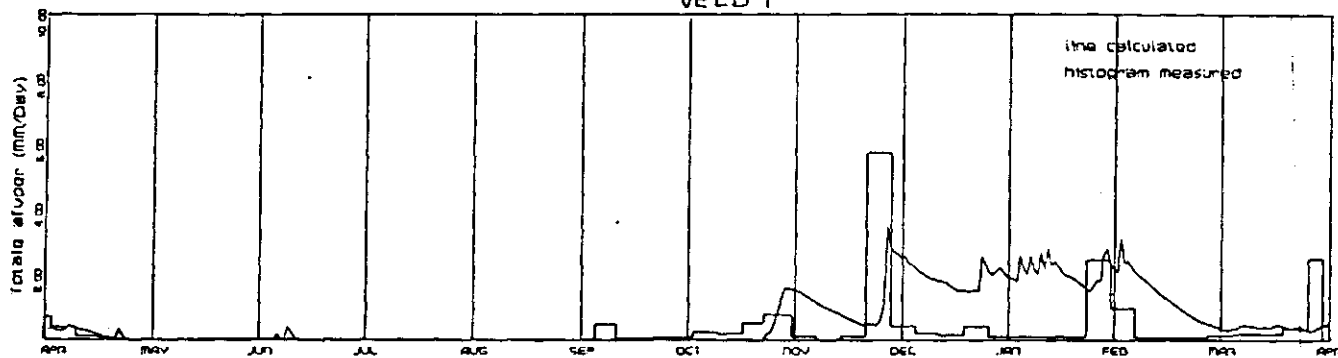


Bijlage 2. Berekende en gemeten afvoeren in de tijd, in relatie met neerslag en verdamping

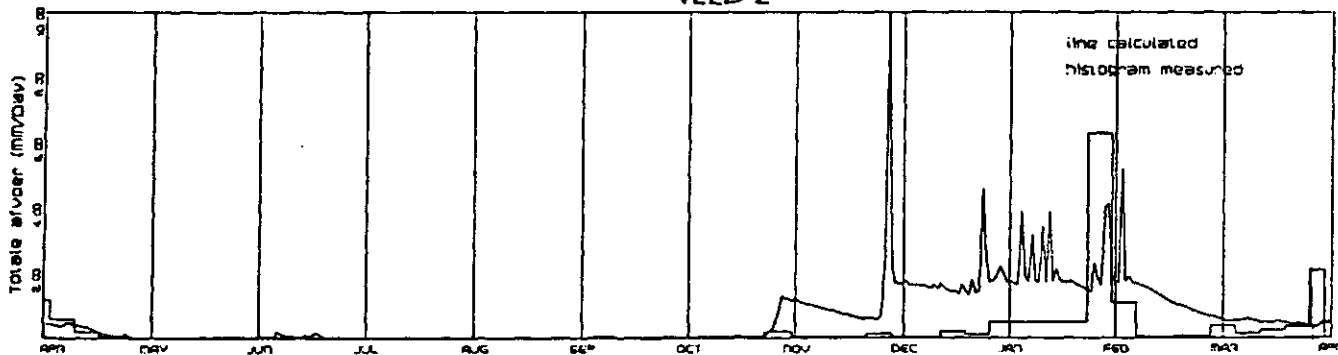
1984/1985



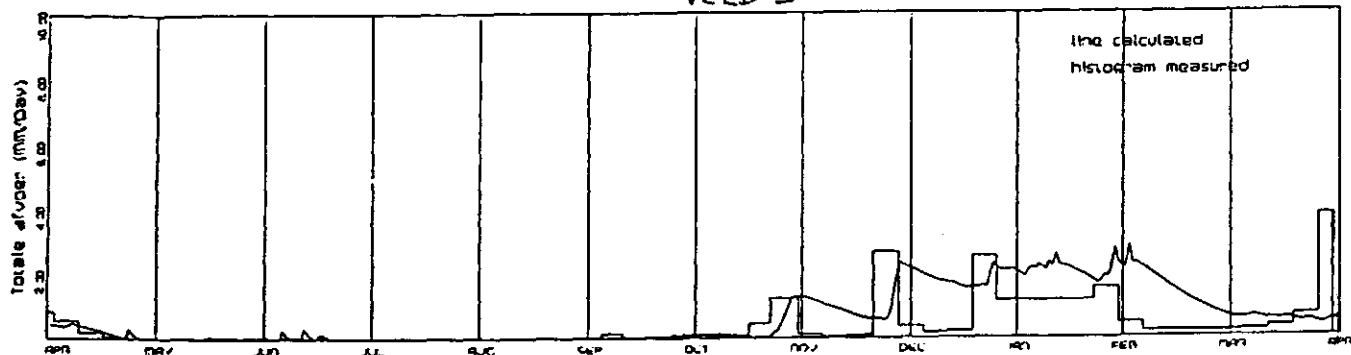
VELD 1



VELD 2

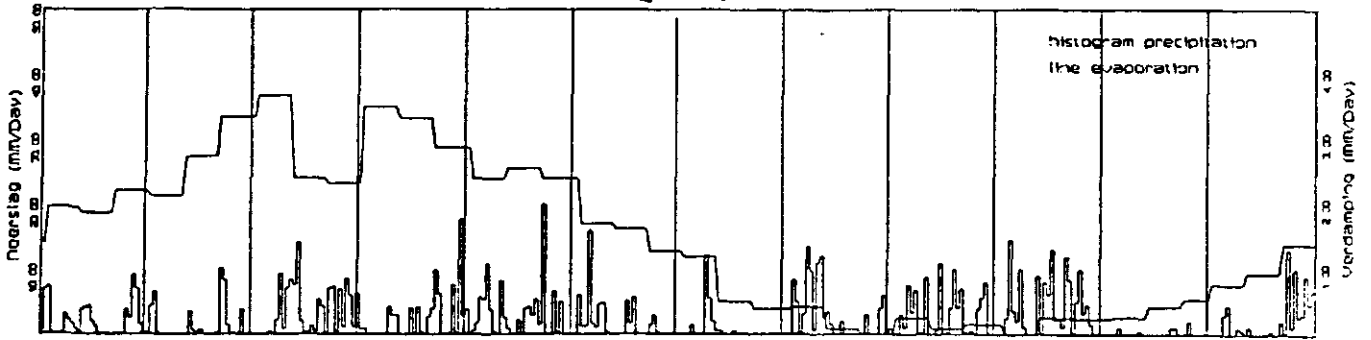


VELD 3

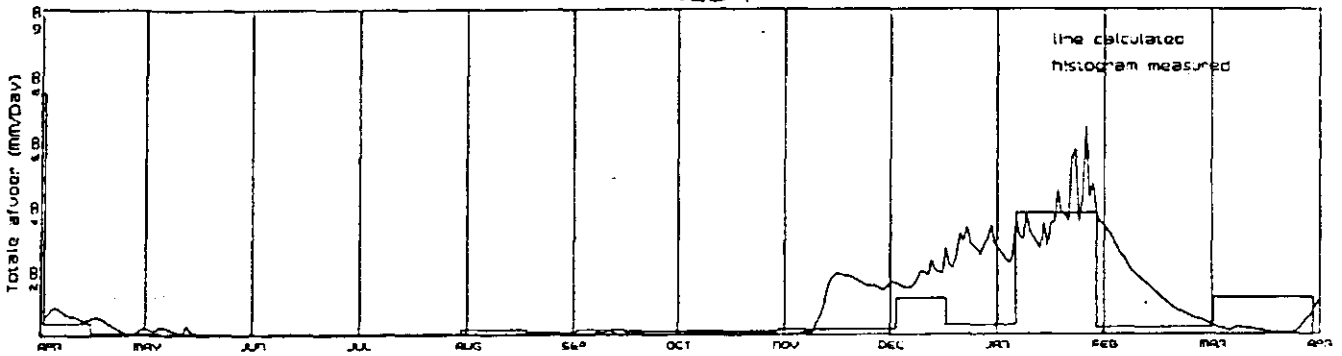


Bijlage 2. Berekende en gemeten afvoeren in de tijd, in relatie met neerslag en verdamping

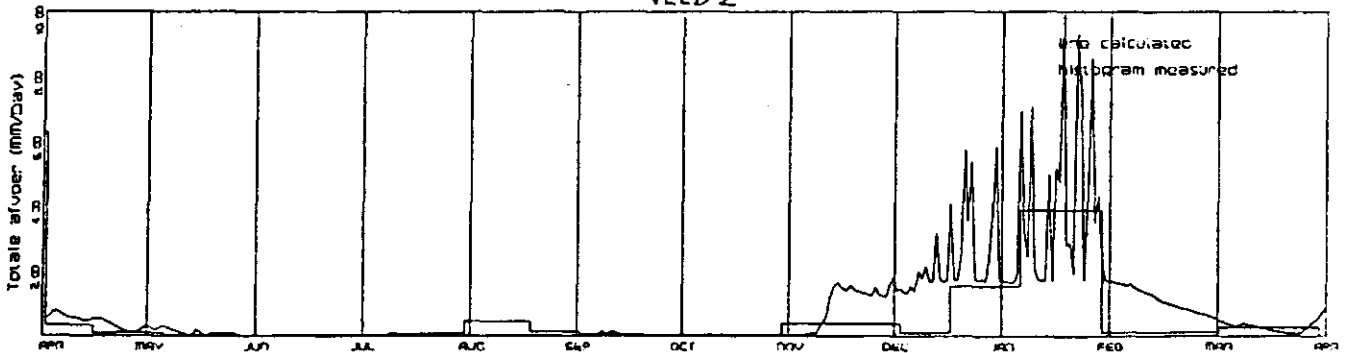
1985/1986



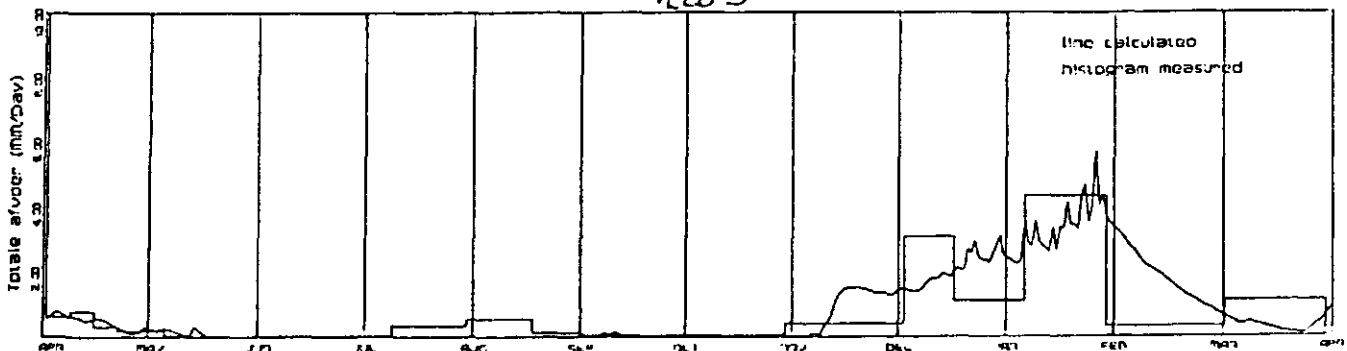
VELD 1



VELD 2

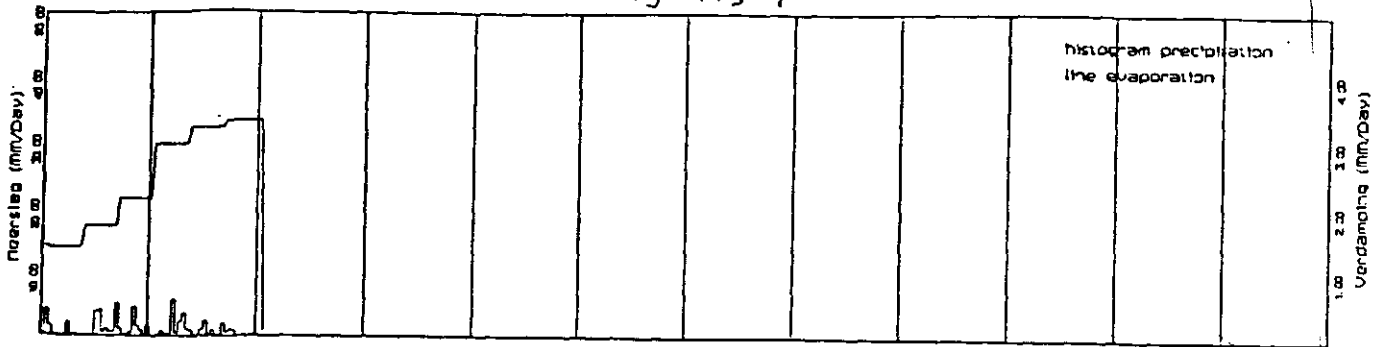


VELD 3

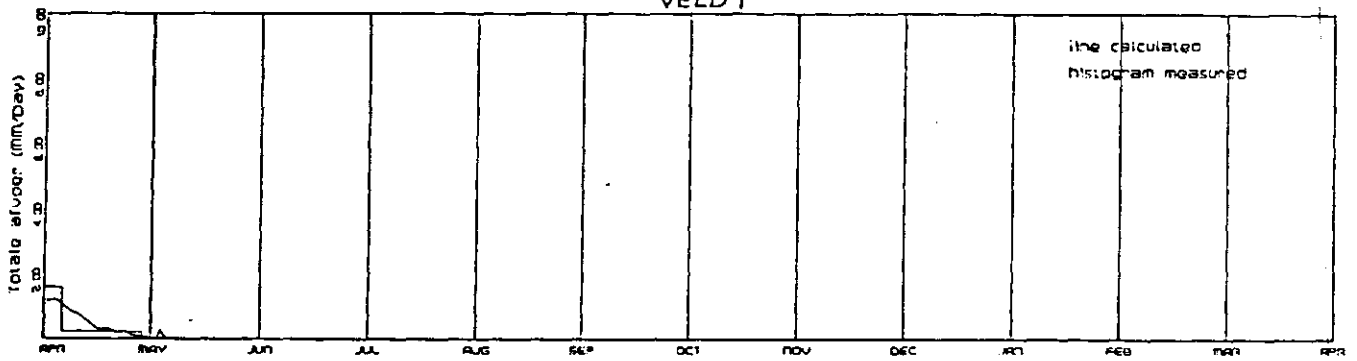


Bijlage 2. Berekende en gemeten afvoeren in de tijd, in relatie met
neerslag en verdamping

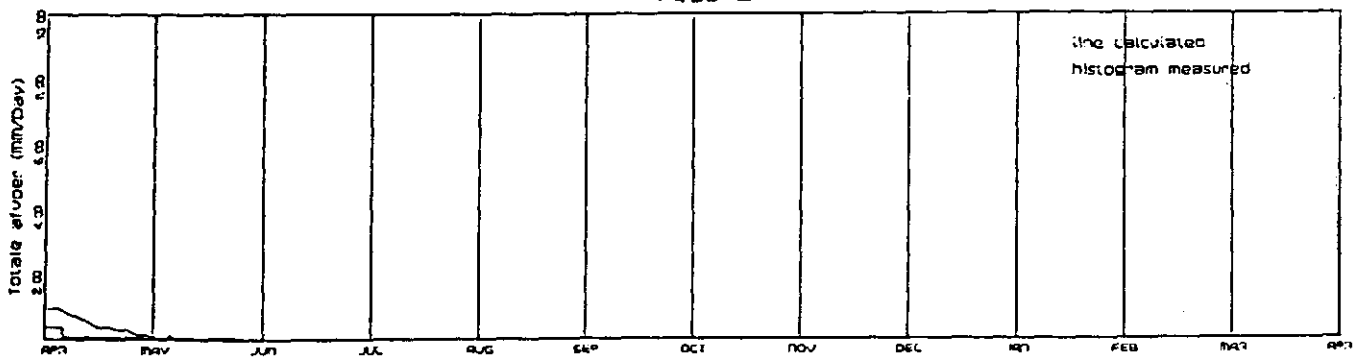
1986/1987



VELD 1



VELD 2



VELD 3

