

NOTA 1299

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

ALTERRA
Wageningen Universiteit & Research cent
Omgevingswetenschapper
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

ONDERZOEK NAAR MOGELIJKHEDEN OM DE INFILTRATIE VAN
REGENWATER IN EEN AFVALSTORT TE VERMINDEREN

4. Hydrologische berekeningen

dr. J. Hoeks

Dit rapport is het vierde interim-rapport over het project 'Oppervlakkige afvoer van regenwater op vuilstortterreinen'. Het project wordt grotendeels gefinancierd door het Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne.

I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. THEORETISCHE ACHTERGRONDEN	2
3. INFILTRATIE IN DE BODEM	5
4. AFVOER OVER EN DOOR EEN SLECHT DOORLATENDE LAAG	7
4.1. Model UNSAT	7
4.2. Model ELAN	12
4.3. Vergelijking met veldgegevens	18
5. ALTERNATIEVEN VOOR DE OPBOUW VAN DE AFDEKLAAG	20
6. CONCLUSIES	23
7. LITERATUUR	24

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

1. INLEIDING

De infiltratie van regenwater in een afvalstort wordt vrijwel geheel bepaald door de hydrologische eigenschappen van de afdeklaag op het stort. De storttechniek (opbouw van lagen, wijze van verdichting) lijkt hier nauwelijks invloed op te hebben (AGELINK en HOEKS, 1980). Gelet op het streven om de kans op grondwaterverontreiniging te beperken, zou de infiltratiecapaciteit van de afdeklaag (met name de top-laag) zo klein mogelijk moeten worden gekozen. In de praktijk zou dit bijvoorbeeld gerealiseerd kunnen worden met een toplaag, bestaande uit leem of slempgevoelige zavel. De afdeklaag heeft echter ook nog een andere belangrijke functie, namelijk het verschaffen van een goede standplaats voor de vegetatie op het stortterrein. Dit is moeilijk te realiseren als de toplaag een zeer geringe infiltratiecapaciteit heeft. Overigens zou dan, vooral op lange hellingen, de kans op erosie groot zijn.

Een andere mogelijkheid is om de afdeklaag op te bouwen uit verschillende lagen. Onder de goed bewortelbare bovengrond zou een slecht doorlatende laag (bijvoorbeeld leem) aangebracht kunnen worden. Het infiltrerende water stagneert dan op deze laag en zou via drains of greppels afgevoerd kunnen worden. Een dergelijke afdeklaag wordt momenteel beproefd op het stortterrein van de VAM in Wijster (AGELINK, 1981). Ook in de literatuur worden suggesties gedaan ten aanzien van de opbouw van de afdeklaag, waarbij de waterkerende laag bestaat uit leem of klei. Een soortgelijke aanbeveling wordt aangetroffen in de Nederlandse 'Richtlijn gecontroleerd storten' (MINISTERIE VAN VOLKSGEZONDHEID EN MILIEUHYGIËNE, 1980). Tot nu toe is echter op geen enkele wijze getoetst, in hoeverre een dergelijke afdeklaag een afdoende reductie geeft van de infiltratie van regenwater in het afvalstort.

Naast veldexperimenten kan het gebruik van hydrologische modellen

informatie verschaffen over het te verwachten effect van een bepaalde afdeklaag. Hydrologische modellen hebben daarbij het voordeel dat verschillende alternatieven ten aanzien van de opbouw van de laag kunnen worden doorgerekend. Het gebruikte model kan worden getoetst aan de resultaten, die beschikbaar komen uit het lopende praktijkexperiment in Wijster.

2. THEORETISCHE ACHTERGRONDEN

De berekening van het effect van een afdeklaag op de infiltratie van water in het afvalstort is een zuiver hydrologisch probleem. De uitgangsvergelijking voor het transport van water in de afdeklaag is dus de bekende, empirische wet van Darcy:

$$v = -k \nabla \phi \quad (1)$$

waarin: v = filtersnelheid (cm.dag^{-1})

k = doorlatendheid van de grond (cm.dag^{-1})

$\nabla \phi$ = gradiënt van de stijghoogte in de transportrichting (cm.cm^{-1})

De stijghoogte ϕ (cm) is de som van de drukhoogte ψ en de plaatshoogte z . Dit betekent dat vergelijking (1) kan worden herschreven als:

$$v = -k(\psi) \nabla(\psi + z) \quad (2)$$

waarin $k(\psi)$ de doorlatendheid voorstelt, die afhankelijk is van de drukhoogte ψ . Voornegatieve waarden van ψ wordt veelal de (niet juiste) term "vochtspanning" gebruikt.

Voorts geldt de continuïteitsvergelijking, die voor een 2-dimensionaal

vertikaal vlak geschreven kan worden als:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\delta v_x}{\delta x} - \frac{\delta v_z}{\delta z} - s \quad (3)$$

waarin: θ = volumetrisch vochtgehalte van de grond ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)

t = tijd (dagen)

v_x, v_z = filtersnelheid (cm.dag^{-1}) in de x-richting respectievelijk de z-richting

x, z = afstandskoördinaat (cm) in de x -richting respectievelijk z -richting

S = 'sink' term ten gevolge van wateronttrekking of wateropname door planten ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{dag}^{-1}$)

Combinatie van de vergelijkingen (2) en (3) levert de basisvergelijking voor het transport van water in de bodem ($S = 0$):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial k(\psi)}{\partial z} \quad (4)$$

Hierbij is verondersteld dat het medium isotroop is, dat wil zeggen dat de doorlatendheid in alle richtingen gelijk is. Voor $\psi < 0$ kan de doorlatendheid $k(\psi)$, althans binnen bepaalde grenzen, worden weergegeven als functie van de vochtspanning (RIJTEMA, 1969):

$$k(\psi) = k_0 e^{\alpha \psi} \quad (5)$$

waarin: k_0 = doorlatendheid in verzadigde toestand, d.w.z. voor $\psi > 0$
 α = constante (cm^{-1}) ($\text{cm} \cdot \text{dag}^{-1}$)

RIJTEMA heeft de waarden voor k_0 en α getabelleerd voor een 20-tal karakteristieke gronden.

Voor het oplossen van de differentiaalvergelijking (4) kan men gebruik maken van een numerieke methode met eindige differenties. Het bodemprofiel wordt daarbij opgedeeld in denkbeeldige elementen (afmetingen $\Delta x \times \Delta z$). Een probleem bij deze numerieke benadering is dat voor de berekening van de flux van het ene element naar het andere element de gemiddelde k -waarde tussen deze elementen bekend moet zijn. Volgens vergelijking (5) kan men eerst de ψ -waarden middelen en vervolgens k berekenen, ook kan men eerst de k -waarden berekenen en vervolgens deze k -waarden middelen. Geen van beide methoden zal echter de juiste waarde geven.

Met de methode beschreven door WIND (1979) kan deze keuze van middeling worden vermeden. Daarbij wordt vergelijking (5) eerst naar z gedifferentieerd:

$$\frac{\partial k(\psi)}{\partial z} = \alpha k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (6)$$

Substitutie van vergelijking (6) in (2) leidt voor het verticale transport tot:

$$\frac{\partial k(\psi)}{\partial z} + \alpha k(\psi) + \alpha v = 0 \quad (7)$$

Voor een bepaald traject, waarbinnen v constant is, luidt de oplossing van deze differentiaalvergelijking (C = integratieconstante):

$$k(\psi) = C e^{-\alpha z} - v \quad (8)$$

Met behulp van de randvoorwaarden ($k(\psi) = k_{i-1}$ voor $z = z_{i-1}$ en $k(\psi) = k_i$ voor $z = z_i$ waarbij $d = z_i - z_{i-1}$) wordt de oplossing:

$$v_i = \frac{k_i - k_{i-1}}{e^{\alpha d} - 1} - k_{i-1} \quad (9)$$

Door nu de continuïteitsvergelijking (3) voor verticale stroming te combineren met vergelijking (9) kan de infiltratie in de bodem numeriek worden opgelost (model INFIL, vergelijkbaar met model FLOW van WIND and VAN DOORNE, 1975). Het profiel wordt daartoe opge-

deeld in laagjes ter dikte d . Voor het eerste laagje aan het oppervlak is daarbij aangenomen dat de infiltratie gelijk is aan de hoeveelheid neerslag, tenzij de som van bergingscapaciteit in de eerste laag plus afvoer naar de tweede laag wordt overschreden. In dat geval verdwijnt het surplus via runoff.

Voor het twee-dimensionale geval, bijvoorbeeld de berekening van de zijdelingse afvoer in een hellende afdeklaag, heeft het voordelen om de Galerkin-methode van eindige elementen te gebruiken in plaats van de methode van eindige differenties. De afmetingen van de elementen kunnen dan namelijk worden aangepast aan de grootte van de potentiaalgradiënten. Naarmate de potentiaalgradiënten dan groter worden, bijvoorbeeld vlak bij een sloot of drain, kunnen de elementen kleiner worden gekozen. Deze methode is voor het eerst door NEUMAN toegepast bij de verzadigde-onverzadigde stroming in grond (NEUMAN, 1973; NEUMAN et al., 1975). Het door NEUMAN et al. (1974) beschreven model UNSAT is hier gebruikt, omdat dit model als voordeel heeft dat variaties in bodemopbouw, variaties in helling en ook de evaporatie en de transpiratie door planten in principe ingevoerd kunnen worden. Bovendien is

anisotropie, dat wil zeggen dat de k -waarden niet gelijk zijn voor de verticale en horizontale richting, mogelijk. Afvoer van water is mogelijk via sloten, drains of bronbemalingen, en ook via opname door plantewortels.

Een bezwaar van het UNSAT-model is dat een omvangrijke hoeveelheid inputgegevens nodig is, terwijl de benodigde rekentijd aanzienlijk is. In principe is het echter zeer geschikt om het effect van verschillende alternatieven voor de afdeklaag op een stortterrein door te rekenen.

3. INFILTRATIE IN DE BODEM

Met het model INFIL zijn berekeningen uitgevoerd om een indruk te krijgen van het verloop van de infiltratiesnelheid tijdens een regenbui. De berekeningen zijn opgezet voor een 'fine sand' met $k_0 = 50 \text{ cm.dag}^{-1}$ en $\alpha = 0,05 \text{ cm}^{-1}$, waarbij het uitgangsvochtgehalte varieert van droog tot nat (fig. 1).

Naarmate het vochtgehalte in de uitgangssituatie toeneemt, wordt eerder het moment bereikt waarop de neerslagintensiteit de infiltratiesnelheid overtreft en dus oppervlakte-afvoer optreedt. Uiteraard

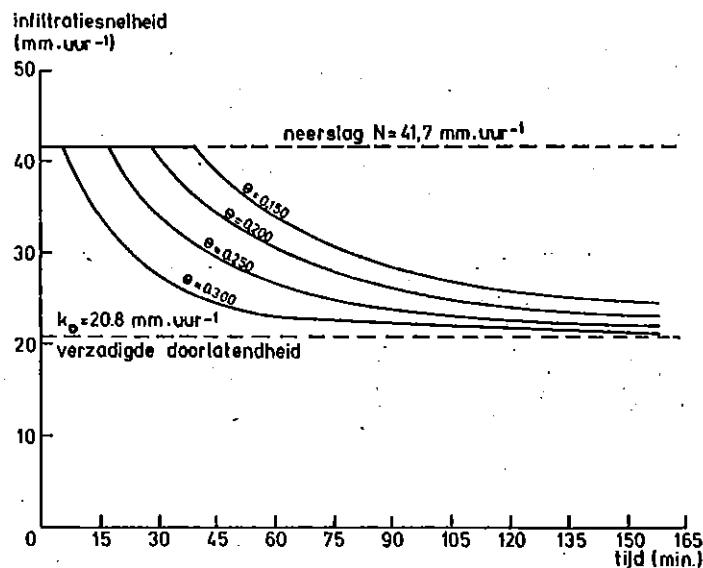


Fig. 1. Berekening van de infiltratiesnelheid in een 'fine sand' (gegevens RIJTEMA, 1969) voor verschillende uitgangsvochtgehalten

kan alleen oppervlakte-afvoer optreden als de neerslagintensiteit de verzadigde doorlatendheid overtreft, tenzij de afvoer dieper in het profiel beperkend gaat worden.

De kans op oppervlakte-afvoer zou dus groter moeten zijn in het natte winterseizoen. Onder de Nederlandse klimatologische omstandigheden is echter de kans op hoge neerslagintensiteiten groter in het zomerseizoen. De grond is dan in de uitgangssituatie doorgaans droger. Uit fig. 1 blijkt dat de bui dan al vrij lang moet duren, wil er oppervlakte-afvoer optreden.

Overigens moet de infiltratiecapaciteit van een grond vrij laag zijn, wil oppervlakte-afvoer optreden. Uit een berekening, waarbij is uitgegaan van de 5-minuten regens van De Bilt (gemiddelden over 12 jaar), blijkt dat de kans op oppervlakte-afvoer het grootst is in de periode mei - september. Enkele gegevens zijn vermeld in tabel 1 (naar BEBELAAR en BAKKER, 1981). De verdeling van de oppervlakte-afvoer over het jaar is weergegeven in fig. 2.

De infiltratiecapaciteit is echter niet constant. In de praktijk blijkt de infiltratiecapaciteit 's winters vaak lager te zijn dan 's zomers. Dit is een gevolg van verslemping van de bovengrond (BOELS, 1975).

Tabel 1. Gegevens betreffende de oppervlakte-afvoer als functie van de infiltratiesnelheid van de grond, berekend uit de 5-minuten regens van De Bilt (naar BAKKER, 1980)

Infiltratie- snelheid (mm. uur ⁻¹)	Jaarlijkse oppervlakte-afvoer (mm. jaar ⁻¹)	Oppervlakte-afvoer in % van neerslag (totale neerslag = 758 mm. jaar ⁻¹)
1	407	53,7
2	234	30,9
3	160	21,1
4	119	15,7
5	94	12,4
7	67	8,8
10	45	5,9
14	29	3,8
20	18	2,4

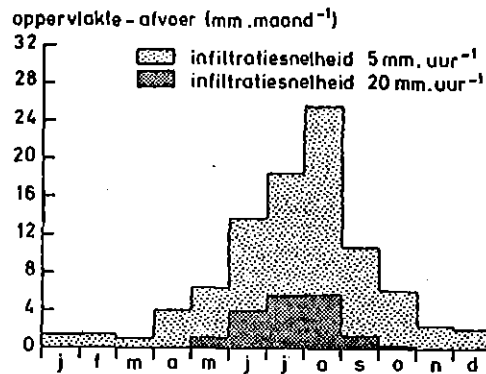


Fig. 2. Verdeling van de oppervlakte-afvoer over het jaar, berekend uit 5-minuten regens van De Bilt (naar gegevens van BAKKER, 1980) bij een infiltratiesnelheid van 5 mm.uur^{-1} respectievelijk 20 mm.uur^{-1}

Afstroming over het oppervlak kan alleen plaatsvinden als de berging op het oppervlak gering is. Dit is vooral het geval op steile hellingen met weinig begroeiing. Over het algemeen is de berging op het oppervlak echter niet verwaarloosbaar. In dat geval wordt de oppervlakte-afvoer al belangrijk minder. Ook de infiltratiecapaciteit mag niet te laag zijn in verband met erosiegevaar. Daarom is de oppervlakte-afvoer in de praktijk veelal minder dan 10% van de neerslag. Overigens is hiermee dan wel 25% van het neerslagoverschot oppervlakkig afgevoerd.

Het grootste deel van de neerslag zal echter infiltreren in de afdeklaag. Om infiltratie in het afvalstort te voorkomen of te beperken, zal dan dieper in de afdeklaag een waterkerende laag aanwezig moeten zijn.

4. AFVOER OVER EN DOOR EEN SLECHT DOORLATENDE LAAG

4.1. Model UNSAT

Met het model UNSAT, een numeriek, 2-dimensionaal simulatiemodel (NEUMAN et al., 1974), zijn berekeningen uitgevoerd voor een afdeklaag, vergelijkbaar met de afdeklaag zoals deze in Wijster in een veldexperiment (zie AGELINK, 1981) wordt getest. De berekeningen hebben betrekking op de situatie weergegeven in fig. 3. Hierbij is aangenomen

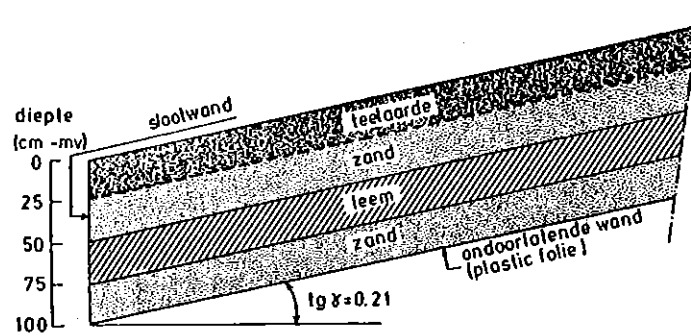


Fig. 3. Schematische weergave van de opbouw van de afdeklaag, waarvoor de berekeningen zijn uitgevoerd (helling 21%)

dat boven de leemlaag drains aanwezig zijn op een onderlinge afstand van 9 m. Voor de berekeningen zijn de drains vervangen door sloten met verticale slootwanden, waarbij zowel de afvoer boven de leem als onder de leem afzonderlijk berekend wordt. De onderkant van de zandlaag onder de leem is ondoorlatend verondersteld (vergelijkbaar met de plastic folie in de veldproef). De afvoer door deze zandlaag geeft dan in feite de hoeveelheid water, die zonder aanwezigheid van de folie in het afvalstort zou zijn geïnfiltreerd.

Enkele resultaten zijn weergegeven in fig. 4. De beide lagen boven de leemlaag bestaan uit zand met een verzadigde doorlatendheid van $1,41 \text{ m.dag}^{-1}$, waarbij de $k-\psi$ relatie is aangehouden zoals RIJTEMA (1969) deze opgeeft voor 'medium fine sand'. De laag onder de leemlaag bestaat in dit geval uit hetzelfde zand. De leemlaag heeft een lage doorlatendheid van 7 mm.dag^{-1} , waarbij de $k-\psi$ relatie berekend is volgens de methode van BLOEMEN (1980) uit gegevens omtrent de granulaire samenstelling (afkomstig van Stiboka).

Opvallend is de vrij sterke daling van de afvoer boven de leemlaag en de trage reactie van de afvoer onder de leemlaag. De afvoer onder de leemlaag gaat vervolgens zeer lang door en neemt slechts geleidelijk af. Dit is geheel in overeenstemming met de waarnemingen bij het veldexperiment. De berekende afvoer onder de leemlaag (max. waarde $\sim 9 \text{ mm.dag}^{-1}$) is echter aanmerkelijk hoger dan in de veldsituatie (max. waargenomen waarde ruim 2 mm.dag^{-1}). Voorts bleek in het veld de afvoer boven de leemlaag een aanzienlijk hogere waarde te bereiken

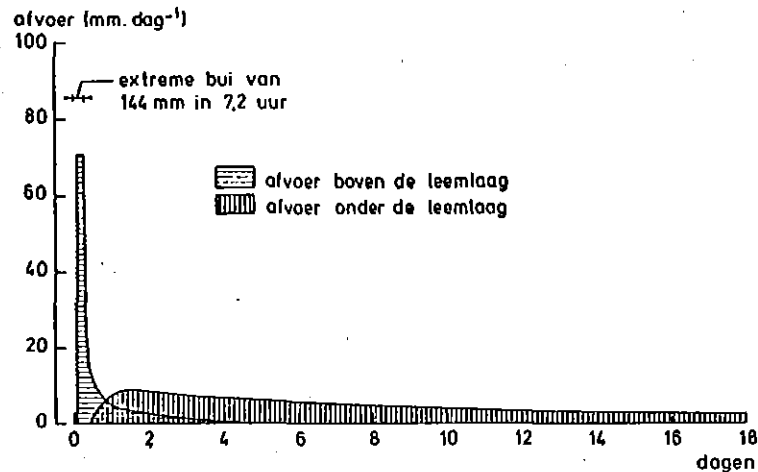


Fig. 4. Berekende afvoeren boven en onder de leemlaag tijdens en na een bui van 20 mm.uur^{-1} gedurende 7,2 uur; k_0 (zand) = $1,41 \text{ m.dag}^{-1}$, k_0 (leem) = 7 mm.dag^{-1}

tijdens berekening (tot ruim 300 mm.dag^{-1}). Daarom zijn voor de tweede berekening, toen ook de gegevens over de doorlatendheid en pF-waarden beschikbaar waren, de waarden voor de doorlatendheid gewijzigd. De neerslagintensiteit bij deze berekening was 35 mm.uur^{-1} , gelijk aan de beregeningsintensiteit bij de veldexperimenten.

Volgens de laboratoriummetingen bedroeg de verzadigde doorlatendheid van het zand boven en onder de leemlaag circa $7,5 \text{ m.dag}^{-1}$. De spreiding tussen de diverse ringmonsters was echter zeer groot. Voor de leemlaag werd gemiddeld een k_0 -waarde van circa 12 cm.dag^{-1} gevonden, eveneens met een grote spreiding. Dit is een onwaarschijnlijk hoge waarde, gezien de gemeten afvoer in het veld. Op grond van de veldgegevens kan worden aangenomen dat de verzadigde doorlatendheid van de leemlaag in de orde van 2 mm.dag^{-1} moet liggen. Voor de berekeningen is de k_0 -waarde voor het zand boven en onder de leem aangehouden op 5 m.dag^{-1} en de k_0 -waarde voor de leem op 2 mm.dag^{-1} . De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in fig. 5.

Tijdens de bui blijkt de afvoer boven de leem vrij snel op gang te komen. De uitgangssituatie was in dit geval vrij vochtig ($\psi = -50 \text{ cm}$, dit is pF 1,7). Dit gaat gepaard met een vrij snelle stijging van de grondwaterspiegel boven de leemlaag, totdat deze na 4 à 5 uur tot in het maaiveld reikt. De afvoersnelheid boven de leem bereikt een maximale waarde van 229 mm.dag^{-1} , dit is ongeveer $9,5 \text{ mm.uur}^{-1}$.

Gezien de neerslagintensiteit van 35 mm.uur^{-1} betekent dit dat op dat moment de oppervlakte-afvoer ruim 25 mm.uur^{-1} bedraagt (circa 73% van de neerslag). Hierbij dient wel bedacht te worden dat het hier een zeer extreme bui betreft. De veldexperimenten tonen aan, dat boven de leem geen schijngrondwaterspiegel wordt waargenomen, zelfs niet in het natte winterseizoen. Alleen tijdens langdurige beregeningsproeven blijkt de grondwaterspiegel binnen enkele uren tot in het maaiveld te stijgen (AGELINK, 1981a).

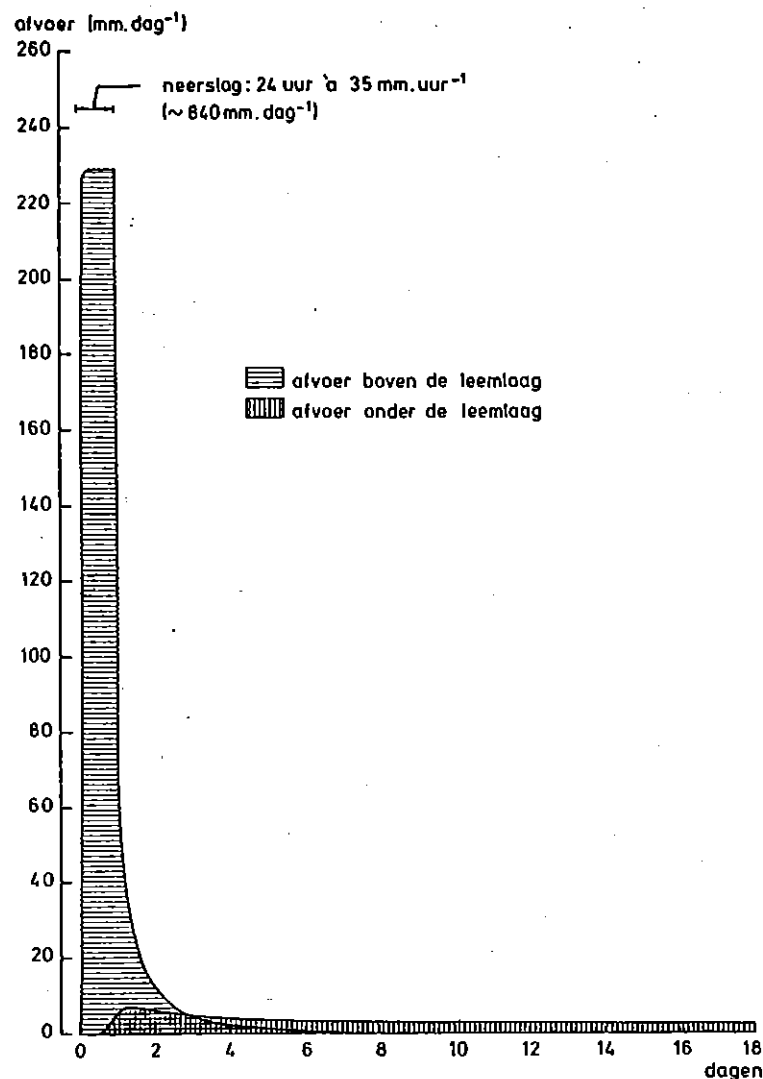


Fig. 5. Berekende afvoeren boven en onder de leemlaag tijdens en na een bui van 35 mm.uur^{-1} gedurende 24 uur; k_0 (zand) = 5 m.day^{-1} , k_0 (leem) = 2 mm.day^{-1}

De afvoer boven en onder de leem ligt nu veel beter in de orde van de veldgegevens. Mogelijk moet de doorlatendheid van het zand boven de leem nog iets hoger worden gekozen. De afvoer onder de leem bereikt nu een maximale waarde van 7 mm.dag^{-1} , en neemt daarna geleidelijk af. Na 2 tot 3 weken ligt de afvoer echter nog steeds in de orde van $2 \text{ à } 3 \text{ mm.dag}^{-1}$. Wordt vervolgens opnieuw neerslag toegevoerd, nu in hoeveelheden overeenkomend met de gemiddelde natuurlijke neerslag (20 mm per periode van 10 dagen, of gemiddeld 2 mm.dag^{-1}) dan blijkt, dat deze neerslaghoeveelheid geheel kan worden afgevoerd via de leemlaag. De afvoer onder de leemlaag is weer gegeven in fig. 6. In de periode van de 21^e tot de 100^e dag vindt boven de leemlaag geen af-

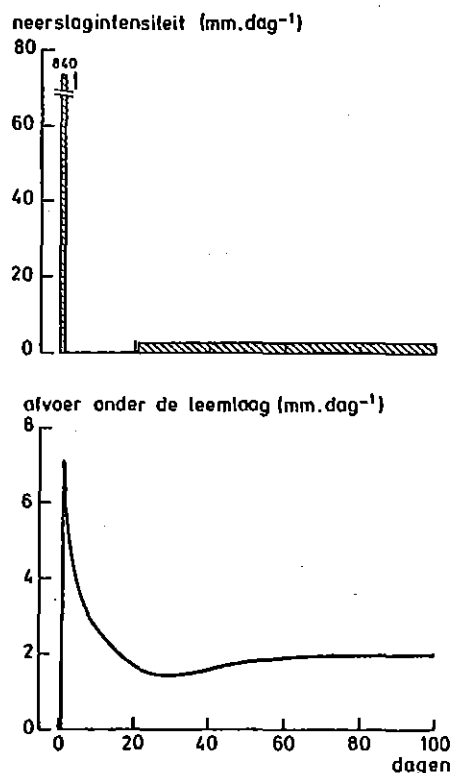


Fig. 6. Berekende afvoer onder de leemlaag in relatie met de neerslagintensiteit

voer plaats. Ook als de neerslag in deze periode verdeeld zou zijn over buien van hoge intensiteit (bijvoorbeeld 2 keer per 10 dagen een bui van 10 mm), dan mag worden verwacht dat dergelijke buien de bergingscapaciteit van de bovenlaag niet overtreffen en dat er geen schijnspiegel ontstaat boven de leem. Dit betekent dat onder omstandigheden van natuurlijke neerslag, de kans op afvoer van water boven de leemlaag verwaarloosbaar klein blijft.

4.2. Model ELAN

Ook met het model ELAN, een elektrisch analogon (WIND and MAZEE, 1979; WIND, 1979), zijn berekeningen uitgevoerd. Het voordeel van dit model is dat de rekentijd gering is. Het model simuleert één dag in 2 seconden. Dit model is daarom goed bruikbaar om een hele winterperiode door te rekenen. Met het model UNSAT is dit niet goed mogelijk.

Het model ELAN is bruikbaar in het natte traject (vochtspanning: 0 tot ongeveer -200 cm), dat is dus hoofdzakelijk de winterperiode tussen 1 oktober en 1 april.

Berekeningen zijn uitgevoerd voor de volgende profielopbouw:

- * 0- 50 cm zavel: $k_o = 3 \text{ cm.dag}^{-1}$
 $k-\psi$ relatie: $\alpha = 0,02 \text{ cm}^{-1}$
- * 50- 70 cm leem : $k_o = 0,2 \text{ cm.dag}^{-1}$ (resp. $0,02 \text{ cm.dag}^{-1}$)
 $k-\psi$ relatie: $\alpha = 0,01 \text{ cm}^{-1}$
- * 70-100 cm zand : $k_o = 3 \text{ cm.dag}^{-1}$
 $k-\psi$ relatie: $\alpha = 0,05 \text{ cm}^{-1}$

In het model zijn drains aangebracht op een diepte van 45 respectievelijk 90 cm -mv. De draincassette op 90 cm -mv was echter zodanig ingesteld dat de werkelijke diepte, waarop de drain werkzaam is, circa 110 cm was. De $\psi-\theta$ en $k-\theta$ relaties zijn in fig. 7 weergegeven, evenals de wijze waarop de $k-\theta$ relaties zijn benaderd door drie rechte lijnstukken.

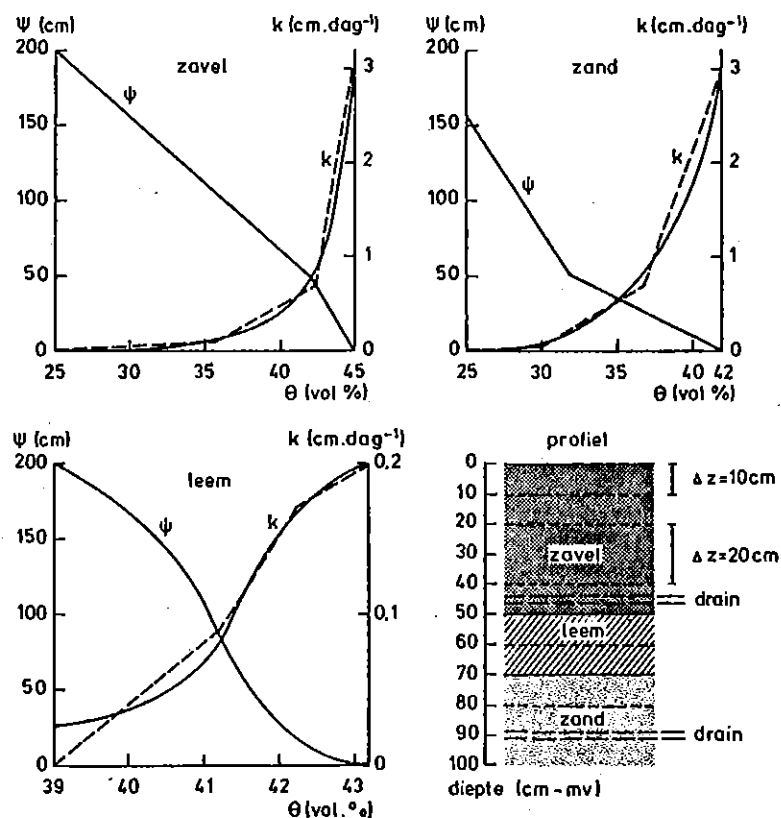


Fig. 7. De k - θ en ψ - θ relaties voor de zavel-, zand- en leemgrond, zoals deze gebruikt zijn voor de berekening met ELAN. De k - θ relatie wordt daarbij benaderd door drie rechte lijnstukken (zie stippellijnen). De opbouw van het bodemprofiel is eveneens weergegeven

De resultaten stemmen zeer goed overeen met de eerder beschreven resultaten van het UNSAT-model. Fig. 8 geeft een voorbeeld van de berekeningen. Op tijdstip $t = 0$ is het profiel in evenwicht met een neerslagintensiteit van 9 mm.dag^{-1} , dat wil zeggen dat de afvoer boven de leem in geval a 6 mm.dag^{-1} bedraagt en de afvoer onder de leem 3 mm.dag^{-1} . Na een droge periode van 10 dagen duurt het, na aanvang van de nieuwe regenperiode ($t = 10$), circa 3 dagen voor de afvoer boven de leem begint. Dit betekent dat circa 27 mm in het profiel boven de leemlaag kan worden geborgen.

Als de droge periode langer duurt, bijvoorbeeld 20 dagen ($t = 30$

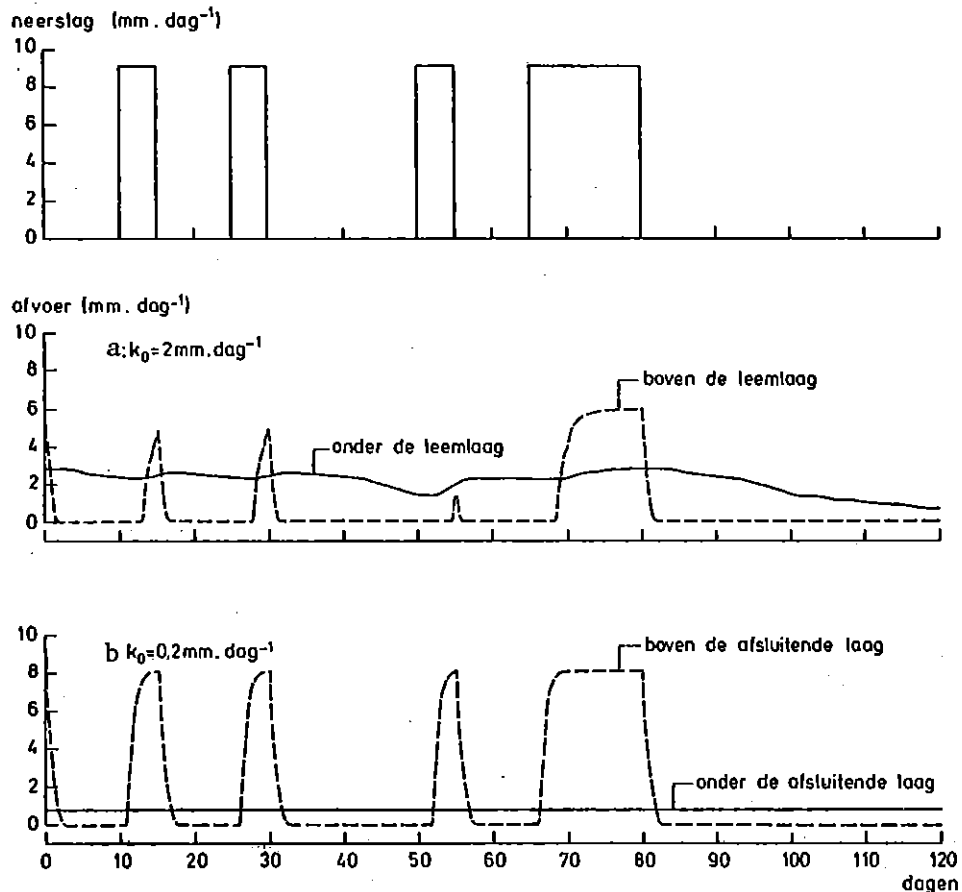


Fig. 8. Afvoer boven en onder een slecht doorlatende laag met een k_0 -waarde van 2 mm.dag^{-1} (a) respectievelijk $0,2 \text{ mm.dag}^{-1}$ (b) in relatie met een fictief neerslagpatroon, berekend met het model ELAN

tot $t = 50$) dan duurt het na aanvang van de regenperiode ($t = 50$) langer voordat de afvoer boven de leem op gang komt. Dit is nu pas na bijna 5 dagen het geval, dat wil zeggen dat circa 40 à 45 mm in het profiel wordt geborgen.

Na afloop van een regenperiode neemt de afvoer boven de leemlaag zeer snel af en is binnen 1 à 2 dagen tot nul gereduceerd. De afvoer onder de leemlaag reageert zeer traag op de neerslag, maar blijft ook in droge perioden zeer lang doorgaan. Het grootste deel van het neerslagoverschot zal daarom, bij een normaal neerslagpatroon, via de

leemlaag infiltreren in het daaronder gelegen afvalstort.

Afvoer boven de leemlaag kan alleen optreden als de neerslagintensiteit de afvoer via de leemlaag (hier maximaal 3 mm.dag^{-1}) overtreft. De neerslagperiode moet dan echter zodanig lang zijn dat ook de bergingscapaciteit van de bovengrond (kan variëren van 20 tot meer dan 50 mm) wordt overtroffen.

Bij een lagere doorlatendheid van de afsluitende laag (zie fig. 8b waar $k_0 = 0,2 \text{ mm.dag}^{-1}$) neemt de afvoer via deze laag sterk af, echter niet evenredig met k_0 . De afvoer onder de afsluitende laag blijft zeer constant en reageert uiterst traag op de neerslag. De afvoer bedraagt hier $0,6 \text{ à } 0,8 \text{ mm.dag}^{-1}$, dat wil zeggen 3 à 4 maal hoger dan de verzadigde doorlatendheid. Dit is het gevolg van de vrij grote gradiënt over de laag. Boven de laag heersen natte omstandigheden ($\psi \approx -10$ tot $+50 \text{ cm}$), terwijl de grond onder de laag vrij droog is ($\psi \approx -50 \text{ cm}$). Dit betekent dat in de wet van Darcy:

$$v = k(\psi) \left[-\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right]$$

de waarde van $-\frac{\partial \psi}{\partial z} \approx \frac{40 \text{ à } 100 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} = 2 \text{ à } 5$. De totale gradiënt wordt dan dus 3 à 6. De doorlatendheid $k(\psi)$ is onder niet-verzadigde omstandigheden te beschrijven met de relatie volgens Rijtema:

$$k(\psi) = k_0 e^{\alpha \psi}$$

Voor $\alpha = 0,01 \text{ cm}^{-1}$, $\psi(\text{gemiddeld}) = -20 \text{ cm}$ en $k_0 = 0,2 \text{ mm.dag}^{-1}$ is de waarde van $k(\psi) = 0,16 \text{ mm.dag}^{-1}$. Met een gemiddelde gradiënt van 4,5 betekent dit dat de afvoer via de afsluitende laag circa $0,75 \text{ mm.dag}^{-1}$ bedraagt.

Uit dit rekenvoorbeeld blijkt dat zelfs bij een zeer lage doorlatendheid van $0,2 \text{ mm.dag}^{-1}$ de afvoer via de leemlaag nog aanzienlijk kan zijn. Omdat deze afvoer in de praktijk gedurende het gehele winterseizoen optreedt, bedraagt de totale afvoer toch nog circa 135 mm.jaar^{-1} .

Met het model ELAN zijn eveneens berekeningen uitgevoerd voor een volledig winterseizoen (1 oktober - 1 april). Zowel de neerslag als de verdamping ($= 0,8 \times$ potentiële verdamping) is hierbij in be-

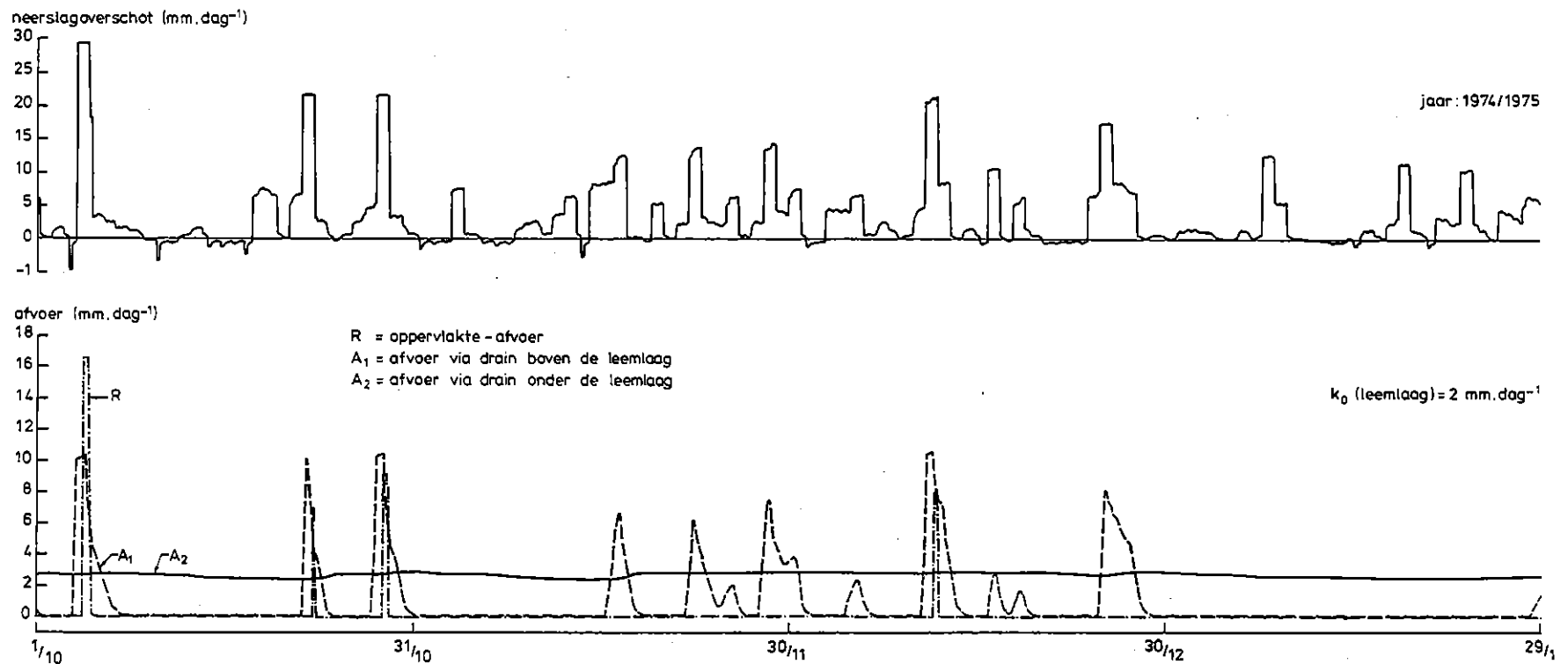


Fig. 9. Oppervlakte-afvoer en drainafvoeren boven en onder een leemlaag met een k_0 -waarde van 2 mm.dag⁻¹ in relatie met het neerslagpatroon tijdens het zeer natte winterseizoen 1974-1975

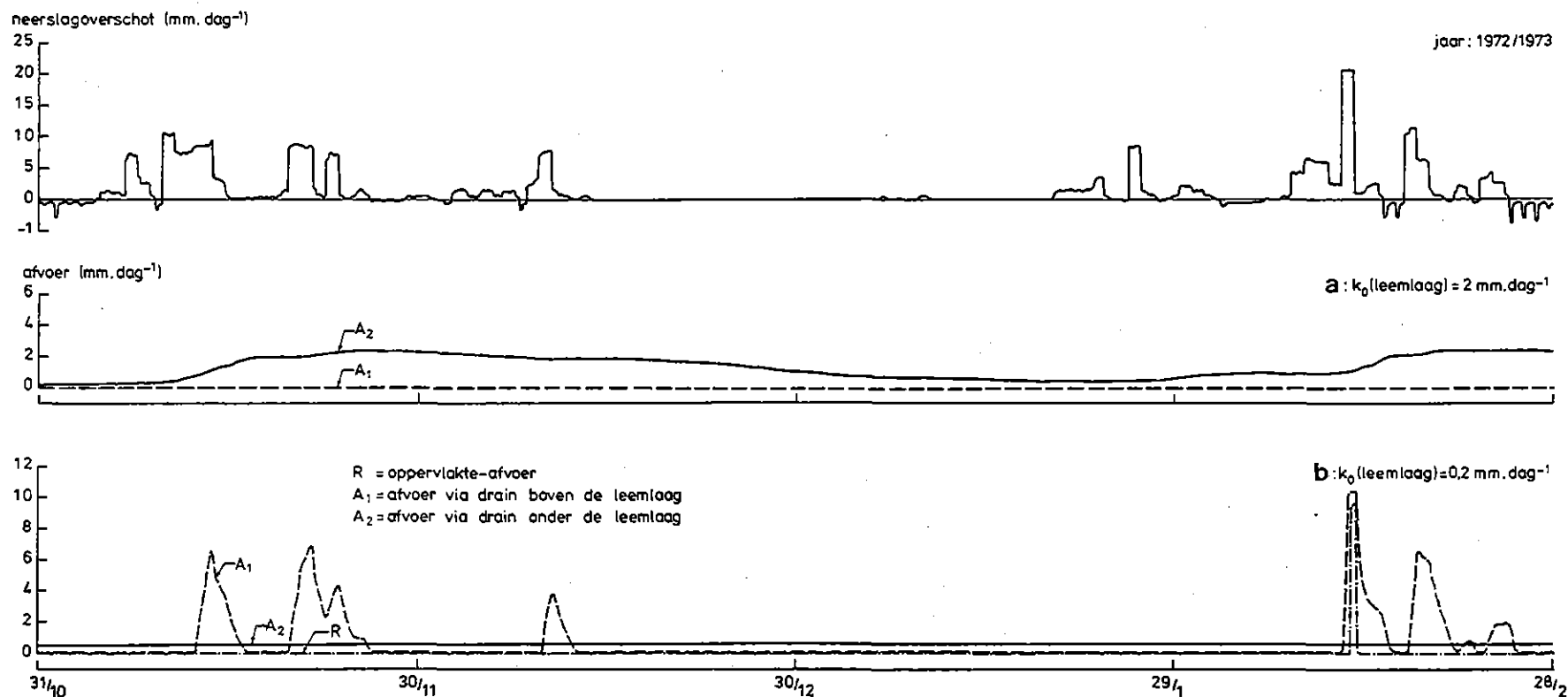


Fig. 10. Oppervlakte-afvoer en drainafvoeren boven en onder een leemlaag met een k_0 -waarde van 2 mm.dag^{-1} (a) respectievelijk $0,2 \text{ mm.dag}^{-1}$ (b), in relatie met het neerslagpatroon tijdens het relatief droge winterseizoen 1972-1973

schouwing genomen. In de figuren 9 en 10 is dit aangegeven als het netto neerslagoverschot (negatief in geval van verdampingsoverschot).

In fig. 9 is voor de periode 1 oktober 1974 tot eind januari 1975 het verloop van de afvoeren weergegeven. De leemlaag heeft een doorlatendheid van 2 mm.dag^{-1} . In dit natte najaar van 1974 bleek veelvuldig afvoer boven de leemlaag op te treden, soms ging dit gepaard met oppervlakte-afvoer. De afvoer via de leem bedroeg $2 \text{ à } 3 \text{ mm.dag}^{-1}$ en nam pas in april en mei 1975 sterk af. De totale afvoer via de leemlaag in dat winterhalfjaar bedroeg circa 400 mm.

In het veel drogere winterhalfjaar 1972-1973 (fig. 10) is de situatie geheel anders. Bij een doorlatendheid van 2 mm.dag^{-1} voor de leemlaag blijkt gedurende het gehele winterhalfjaar geen afvoer boven de leemlaag op te treden. Het neerslagoverschot wordt hier volledig afgevoerd via de leemlaag. Deze afvoer bedroeg ruim 200 mm over het gehele winterseizoen.

Voor een zeer lage doorlatendheid van $0,2 \text{ mm.dag}^{-1}$ blijkt wel afvoer boven de leemlaag op te treden, en zelfs één keer runoff. De afvoer onder de leemlaag is zeer constant en bedraagt circa $0,6 \text{ mm.dag}^{-1}$ gedurende het gehele winterhalfjaar, dat is totaal circa 100 mm.

Deze berekeningen maken duidelijk dat de doorlatendheid van een afsluitende laag zeer klein moet zijn (in de orde van $0,01 \text{ mm.dag}^{-1}$, dit is circa $10^{-10} \text{ m.sec}^{-1}$), wil de infiltratie in het afvalstort niet boven de 25 mm per jaar komen. Deze eis moet zo zwaar zijn, omdat juist bij een goedwerkende afsluitende laag de verschillen in vochtgehalte boven en onder de laag groot worden. Dit leidt tot gradiënten in de orde van 5 à 10, waardoor zelfs bij lage k-waarden nog belangrijke lekkage kan plaatsvinden.

4.3. V e r g e l i j k i n g m e t v e l d g e g e v e n s

De berekende resultaten zijn goed in overeenstemming met de veldgegevens. Ook daar blijkt het neerslagoverschot vrijwel geheel te worden afgevoerd via de leemlaag. De afvoer boven de leemlaag blijft zeer gering en moet waarschijnlijk geheel worden toegeschreven aan transport via de onverzadigde zone, wat in dit geval mogelijk is dankzij de helling van de afdeklaag (AGELINK, 1981a).

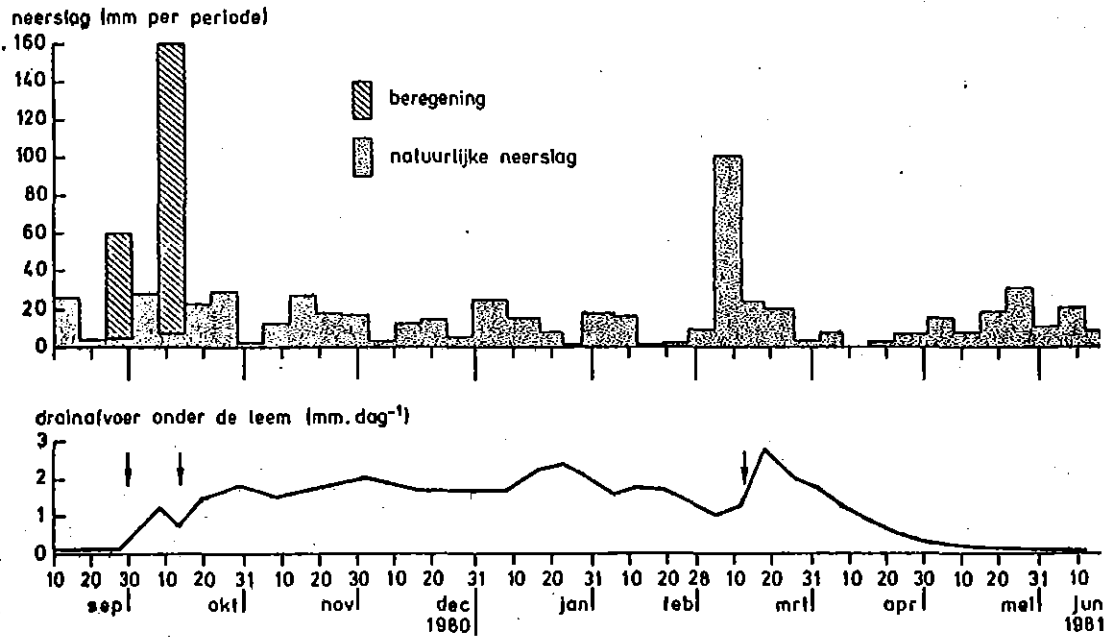


Fig. 11. Wegzijging door de leemlaag, gemeten onder veldomstandigheden op de stortplaats in Wijster, in relatie met het neerslagpatroon in de periode september 1980 - mei 1981. Drainafvoer boven de leemlaag is alleen opgetreden tijdens de twee beregeningsexperimenten van 30/9 en 14/10 (pijl-tjes) en tijdens de zeer natte periode in maart 1981 (12/3) (AGELINK, 1981a)

De afvoer, zoals deze in Wijster onder veldomstandigheden is gemeten, is weergegeven in fig. 11. Vergelijking met de berekende resultaten (zie fig. 6, fig. 9 en fig. 10A) toont aan dat de afvoer hier in dezelfde orde van grootte ligt. Hieruit mag de conclusie worden getrokken, dat de rekenmodellen goed bruikbaar zijn voor het berekenen van effecten van alternatieven betreffende de opbouw van de afdeklaag.

5. ALTERNATIEVEN VOOR DE OPBOUW VAN DE AFDEKLAAG

Uit het voorgaande is gebleken, dat een leemlaag met een verza-
digde doorlatendheid van circa 2 mm.dag^{-1} niet voldoet als waterkeren-
de laag, omdat het neerslagoverschot vrijwel geheel via deze laag in
het afvalstort infiltreert. Uit de berekeningen in het vorige hoofd-
stuk blijkt dat zelfs een doorlatendheid van $0,2 \text{ mm.dag}^{-1}$ nog niet
voldoende effect sorteert (zie fig. 8B en 10B). Wil men de infiltratie
beperken tot minder dan 25 mm per jaar, dan zal de doorlatendheid in
de orde $0,01 - 0,03 \text{ mm.dag}^{-1}$ ($\approx 1 \text{ à } 3 \times 10^{-10} \text{ m.sec}^{-1}$) moeten liggen.
Een dergelijke geringe doorlatendheid is met natuurlijke materialen
nauwelijks te bereiken. Alleen speciale kleisoorten, zoals bentoniet,
komen misschien nog in aanmerking.

De waterkerende laag moet dus in hoge mate ondoorlatend zijn. Dit
betekent dat mogelijk de volgende alternatieven voor een waterkerende
laag in aanmerking komen:

- mengsel van zand met bentoniet-klei;
- een kunststof membraan (vele soorten, van dunne folies tot dikke
asfalt-membranen);
- zand impregneren met chemische middelen;
- gecementeerde vliegas.

In de meeste gevallen zal de doorlatendheid van dergelijke water-
kerende lagen gering zijn, waarbij zich overigens wel het probleem
voordoet in hoeverre deze lagen ondoorlatend blijven op de lange ter-
mijn, vooral onder omstandigheden van onregelmatige zakking en tijde-
lijke uitdroging.

Voor een berekening van de vereiste drainagecapaciteit boven een
dergelijke waterkerende laag kan in eerste instantie worden aangenomen
dat de laag volledig ondoorlatend is. De afvoercapaciteit van de af-
deklaag kan dan worden berekend met de door ERNST (1978) ontwikkelde
formule:

$$l^2 = \frac{4 k h^2}{S} \left(\cos^2 \gamma + \frac{k}{4S} \sin^2 \gamma \right) \quad (10)$$

waarin: l = afstand tussen drains of sloten (m)
 k = doorlatendheid van de afdekgrond boven de afsluitende laag (m.dag^{-1})
 h = maximale opbolling van het grondwater tussen de sloten of drains (m)
 S = afvoercapaciteit (m.dag^{-1})
 γ = hellingshoek

Voor de hier uit te voeren berekening is vergelijking (10) herschreven als (oplossing van vierkantsvergelijking):

$$S = \frac{2 k h^2}{l^2} \cos^2 \gamma + \sqrt{\left(\frac{2 k h^2}{l^2} \cos^2 \gamma\right)^2 + \frac{k^2 h^2}{l^2} \sin^2 \gamma} \quad (11)$$

Uitgaande van gegeven waarden voor k , l en γ kan de afvoercapaciteit S worden berekend als functie van de opbolling h . De waarde S kan daarbij worden geïnterpreteerd als de hoeveelheid neerslag die kan worden afgevoerd, onder de voorwaarde dat de neerslag continue valt met een intensiteit van $S \text{ m.dag}^{-1}$.

In tabel 2 zijn enkele resultaten van deze berekeningen weergegeven voor een drietal drain- of slootafstanden.

Tabel 2. Afvoercapaciteit (mm.dag^{-1}) van de afdekgrond boven een afsluitende laag als functie van de grondwateropbolling tussen de drains of sloten, op een helling van 21% ($\text{tg } \gamma = 0,21$). De doorlatendheid van de afdekgrond (k) bedraagt 5 m.dag^{-1}

Opbolling h (cm)	Afvoercapaciteit $S(\text{mm.dag}^{-1})$ bij een drain/sloot- afstand van:		
	$l = 10 \text{ m}$	$l = 20 \text{ m}$	$l = 50 \text{ m}$
10	11,3	5,4	2,1
20	24,7	11,3	4,3
30	40,6	17,7	6,5
40	59,2	24,7	8,9
50	80,6	32,4	11,3

Zelfs voor de zeer grote drainafstand van 50 meter is de afvoercapaciteit nog vrij groot. Voor grasland wordt een afvoercapaciteit van 7 mm.dag^{-1} bij een minimale ontwateringsdiepte van 30 cm aangehouden als aanvaardbaar ontwateringscriterium. Als de grondlaag boven de waterkerende laag circa 75 cm dik is en een goede doorlatendheid heeft, dan wordt ruimschoots aan deze eis voldaan. Dit betekent dat op de steile flanken van een stortplaats geen drainagesysteem benodigd is. Op de vlakkere gedeelten boven op het stort is wel een drainagesysteem noodzakelijk. In tabel 3 is de afvoercapaciteit weergegeven voor een volledig vlak gedeelte (helling: 0%).

Tabel 3. Afvoercapaciteit (mm.dag^{-1}) van de afdekgrond boven een afsluitende laag als functie van de grondwateropbolling tussen de drains of sloten, op een vlak terrein (helling: 0%). De doorlatendheid (k) van de afdekgrond bedraagt 5 m.dag^{-1}

Opbolling (h) (cm)	Afvoercapaciteit (mm.dag^{-1}) bij een drain/slootafstand van:		
	10 meter	20 meter	50 meter
10	2,0	0,5	0,1
20	8,0	2,0	0,3
30	18,0	4,5	0,7
40	32,0	8,0	1,3
50	50,0	12,5	2,0

Uit deze tabel blijkt, dat op vlakke gedeelten van het stort een aanvaardbaar ontwateringscriterium wordt bereikt, als de onderlinge afstand tussen sloten of drains in de orde van 20 meter ligt. Hierbij dient wel bedacht te worden, dat de doorlatendheid van de afdekgrond hier nogal hoog gekozen is (namelijk 5 m.dag^{-1}).

Andere alternatieven, waarbij de waterkerende laag nog in geringe mate doorlatend is, kunnen met behulp van de rekenmodellen UNSAT en ELAN worden getest. Daarbij is echter wel vereist, dat nauwkeurige gegevens betreffende de k - ψ en ψ - θ relaties beschikbaar zijn. Voorts kan men in dit geval denken aan een combinatie van maatregelen:

- a) Het aanbrengen van een slecht doorlatende laag van leem of klei;
- b) het aanbrengen van een bovengrond met een geringe bergingscapaciteit in natte toestand (bijvoorbeeld klei of zavel);
- c) een toplaag kiezen met een lage infiltratiecapaciteit (bijvoorbeeld slempgevoelige zavelgrond of leemhoudend zand);
- d) het kiezen van een vegetatie die veel water verdampt (naaldbos, grasvegetatie).

Een dergelijke combinatie van maatregelen zal in het gunstigste geval kunnen leiden tot een duidelijke afname van de infiltratie in het afvalstort. Een absolute garantie, dat de infiltratie in zo'n geval beneden een toelaatbaar maximum blijft, is echter moeilijk te geven. Daarvoor zijn er te veel factoren in het geding. Zo kunnen de infiltratiecapaciteit en de doorlatendheid van een grond in de loop van de tijd veranderen onder invloed van begroeiing, zetting, uitdroging en andere fysisch/chemische processen.

6. CONCLUSIES

De belangrijkste conclusies, die uit de hier weergegeven berekeningen zijn af te leiden, kunnen als volgt worden samengevat:

a. Bevorderen van oppervlakte-afvoer

Dit zou kunnen door een toplaag met lage infiltratiecapaciteit te kiezen. Een belangrijke reductie van de infiltratie lijkt echter niet haalbaar, omdat in dat geval de groei-omstandigheden voor de vegetatie zeer ongunstig worden.

b. Bevorderen van afvoer boven een afsluitende laag

Dit is mogelijk door een afsluitende laag te kiezen met een zeer geringe doorlatendheid. Bij een doorlatendheid van 1 mm.dag^{-1} is het effect nog vrij gering. Pas bij doorlatendheden beneden $0,05 \text{ mm.dag}^{-1}$ begint het effect zo groot te worden, dat de wegzijging door de laag minder dan 50 mm per jaar wordt.

Teneinde oppervlakte-afvoer en daarmee erosie te voorkomen is het noodzakelijk om boven de afsluitende laag een drainagesysteem aan te brengen.

c. Bevorderen van verdamping

Het is wenselijk om boven de afsluitende laag een afdekgrond met een redelijke bergingscapaciteit aan te brengen. De dikte van deze laag dient bij voorkeur in de orde van circa 75 cm te liggen. Voor een maximale verdamping is het gewenst om een vegetatie te kiezen die ook in de winter groen blijft (bij voorkeur naaldbomen en gras). Een afdeklaag van behoorlijke dikte met een bergingscapaciteit in de orde van 75 à 100 mm is gewenst om verdroging van de vegetatie in de zomer te voorkomen.

De infiltratie in het afvalstort kan dus alleen effectief worden verminderd door onder de afdekgrond een laag met een doorlatendheid van $0,01-0,03 \text{ mm.dag}^{-1}$ (dit is $1-3 \times 10^{-10} \text{ m.sec}^{-1}$) aan te brengen. Dit betekent dat materialen als leem en klei hiervoor in het algemeen niet geschikt zijn. Mogelijk zijn leem of klei onder extreme omstandigheden wel zodanig te verdichten dat de hier genoemde eis wordt benaderd. Deze omstandigheden zijn echter zodanig extreem en bovendien moeilijk te definiëren, dat dit geen haalbare oplossing is voor de praktijk.*

De gewenste afdichting lijkt alleen gerealiseerd te kunnen worden met kunststof produkten of met zand/bentoniet mengsels. Vliegias is van nature redelijk doorlatend en zal daarom vermengd moeten worden met andere produkten, bijvoorbeeld cement of ook bentoniet. De praktische toepassing, met name de wijze waarop dergelijke afsluitende lagen moeten worden aangebracht en in hoeverre ze in tact blijven bij onregelmatige verzakkingen, dient nader te worden onderzocht.

* Wel bestaat de kans, dat gasophoping onder de afsluitende laag de infiltratie van water verhindert. Dit aspect verdient nadere aandacht.

7. LITERATUUR

- AGELINK, G.J., 1981. Onderzoek naar mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen. 2. Opzet van experimenten. Nota ICW 1246
- _____ 1981a. Onderzoek naar mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen. 3. Experimentele resultaten. Nota ICW 1295
- _____ en J. HOEKS, 1980. Onderzoek naar mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen. 1. Literatuuronderzoek. Nota ICW 1175
- BEBELAAR, J.P. en J.W. BAKKER, 1981. Infiltratie van regenwater door verschillende wegdekken in verband met de watervoorziening van straatbomen. Nota ICW 1247
- BLOEMEN, G.W., 1980. Calculation of hydraulic conductivities of soils from texture and organic matter content. Techn. Bull. ICW 120
- BOELS, D., 1975. Analyse afvoeren via zakputten op het slootdempingsproefveld te Kloosterburen. Nota ICW 892
- ERNST, L.F., 1978. Theoretische analyse van het drainageprobleem in hellende gebieden. Jaarverslag ICW 1977.
- MINISTERIE VAN VOLKSGEZONDHEID EN MILIEUHYGIËNE, 1980. Richtlijn gecontroleerd storten. DGM, Sector Afvalstoffen, Leidschendam.
- NEUMAN, S.P., 1973. Saturated-unsaturated seepage by finite elements. Proc. ASCE, J. Hydraul. Div. 99: 2233-2250.
- NEUMAN, S.P., R.A. FEDDES and E. BRESLER, 1974. Finite element simulation of flow in saturated-unsaturated soils considering water uptake by plants. Institute of Soil and Water, Agric. Res. Organisation, Bet Dagan, Israel.
- NEUMAN, S.P., R.A. FEDDES and E. BRESLER, 1975. Finite element analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots. I. Theory; II. Field Applications. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 39: 224-230 and 231-237. Verspreide Overdrukken ICW 173.
- RIJTEMA, P.E., 1969. Soil moisture forecasting. Nota ICW 513.

- WIND, G.P., 1979. Analog modelling of transient moisture flow in unsaturated soil. Agric. Res. Rep. 894, Pudoc, Wageningen
- _____ and A.N. MAZEE, 1979. An electronic analog for unsaturated flow and accumulation of moisture in soils. J. Hydrol. 41: 69-83. Techn. Bull. ICW 109
- _____ and W. VAN DOORNE, 1975. A numerical model for the simulation of unsaturated vertical flow of moisture in soils. J. Hydrol. 24: 1-20. Techn. Bull. ICW 93