

NN31545.1175

NOTA 1175

maart 1980

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

BIBLIOTHEEK DE HAFF

Droevendaalsesteeg 3a
Postbus 241
6700 AE Wageningen

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

1. Literatuuronderzoek

ing. G. J. Agelink en dr. J. Hoeks

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

1792385

13 FEB. 1998

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS



0000 0941 2095

INHOUD

	blz.
1. INLEIDING	1
2. DE WATERHUISHOUDING VAN EEN GECONTROLEERD AFVALSTORT	2
2. 1. De waterbalans	3
2. 2. Effect van verdichten	4
2. 3. Effect van afdekken met grond	6
2. 4. Het zakkingsproces	9
3. NADERE BESCHOUWING VAN ENKELE WATERBALANSTERMEN	11
3. 1. Oppervlakte-afvoer	11
3. 2. Berging op het oppervlak	11
3. 3. Infiltratie in de afdeklaag	12
3. 4. Interceptie van regenwater door de vegetatie	15
3. 5. Evapotranspiratie	16
4. GEBRUIK VAN HYDROLOGISCHE REKENMODELLEN	17
4. 1. Alternatieven ter beperking van grondwater- verontreiniging	17
4. 2. Globale berekening van de waterbalans van de afdeklaag	19
4. 3. Berekening van de zijdelingse afvoer door de afdeklaag	21
4. 4. Beschrijving en berekening van de oppervlakte- afvoer	26
4. 5. Toepassing van het UNSAT-model	30
5. UITVOERING VAN EXPERIMENTEN	31
6. CONCLUSIES	32
7. LITERATUUR	32

1. INLEIDING

Er is reeds veel onderzoek verricht naar de verontreiniging van grond- en oppervlaktewater in de omgeving van vuilstortterreinen. Daarbij is ondermeer gebleken dat het percolatiewater uit een afvalstort sterk is verontreinigd met organische- en anorganische stoffen. De hoeveelheid percolatiewater varieert met de klimaatsomstandigheden, maar zal uiteindelijk gelijk worden aan het neerslagoverschot, dat is ca. 200 mm per jaar op 2000 m³ per hectare per jaar. Om verontreiniging van grondwater en oppervlaktewater te voorkomen of zoveel mogelijk te beperken, kunnen verschillende maatregelen worden getroffen:

- Vermindering van de verontreinigingsgraad van het percolatiewater, door de afbraak, met name de methaangisting in het stort te bevorderen.

Dit aspect wordt momenteel onderzocht door de Stichting Verwijdering Afvalstoffen (SVA). Het lijkt waarschijnlijk dat de toevoeging van kalkhoudende afvalstoffen in dit verband gunstig zal werken. Uit de literatuur worden bovendien aanwijzingen verkregen dat het (gedeeltelijk) terugvoeren van het percolatiewater op het stort en een minder sterke verdichting van het afval gunstig zijn voor het snel op gang brengen van de methaangisting.

- Opvangen van het percolatiewater door op het stortterrein eerst een afsluitende laag aan te brengen alvorens er afval op te storten. Veelal zal boven de afsluitende laag een drainagesysteem worden aangelegd. Hiermee wordt voorkomen dat percolatiewater in het grondwater terechtkomt. Het opvangen percolatiewater is in dit geval zodanig verontreinigd dat het eerst een zuivering moet ondergaan, alvorens het geloosd kan worden op het oppervlaktewater.
- Vermindering van de hoeveelheid percolatiewater door de infiltratie van het regenwater in het afvalstort te beperken. Deze infiltratie

wordt bepaald door de fysische eigenschappen van de afdeklaag (structuur, textuur, doorlatendheid, infiltratiecapaciteit). Door de keuze van de afdekgrond is het in principe mogelijk om de afvoer van regenwater over en door de afdeklaag naar de zijkant van het stortterrein te bevorderen.

Deze laatste mogelijkheid is tot dusver nog niet onderzocht. Het doel van deze literatuurstudie was inzicht te krijgen in de hydrologische aspecten, met name in de factoren die oppervlakte-afvoer en afvoer door de afdeklaag bepalen. Ook is nagegaan welke hydrologische modellen beschikbaar zijn en of deze toepasbaar zijn voor het onderhavige onderzoek.

2. DE WATERHUISHOUDING VAN EEN GECONTROLEERD AFVALSTORT

De vroeger veelvuldig toegepaste wijze van storten op een open vuilnisbelt behoort momenteel vrijwel tot het verleden. Vanwege de vele milieuhygiënische bezwaren is men geleidelijk overgegaan op de methode van het 'gecontroleerd storten'. Het afval wordt volgens een stortplan gestort in lagen van 2 à 3 meter, het wordt vervolgens vastgereden met een bulldozer of compactor en dagelijks afgedekt met een laagje grond.

Bij het vastrijden met een compactor wordt een dichtheid van 800 à 900 kg/m³ bereikt. Dit geeft enerzijds een ruimtebesparing en anderzijds wordt verondersteld dat hierdoor de doorlatendheid van het afval zodanig afneemt dat een deel van het regenwater oppervlakkig afstroomt. In de praktijk blijkt echter dat ook de doorlatendheid van verdicht afval nog zeer hoog is. Dit betekent dat in feite alleen de fysische eigenschappen van het afdek materiaal bepalen of en in welke mate oppervlakte-afvoer plaatsvindt.

Hoewel door het gecontroleerd storten een groot aantal, vooral bovengronds waarneembare, milieuhygiënische bezwaren zijn ondergaan, is er ten aanzien van het aspect van verontreiniging van grondwater en oppervlaktewater nog betrekkelijk weinig veranderd.

2.1. De waterbalans

In fig. 1 zijn de belangrijkste posten van de waterbalans voor een afvalstort weergegeven

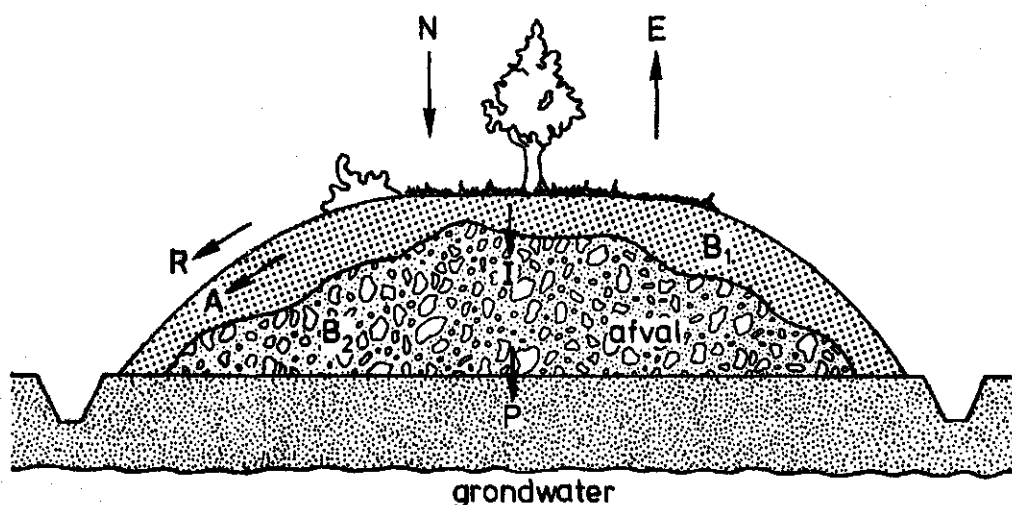


Fig. 1. De waterbalans van een afvalstort (zie tekst)

De waterbalanstermen in deze figuur zijn: de neerslag (N), verdamping (E), infiltratie in het stort (I), bovengrondse afstroming (R), zijdelingse afvoer door de afdeklaag (A), waterberging in de afdeklaag (B1) en in het afval (B2) en de afvoer van percolatiewater (P) naar het grondwater.

Vanwege de heterogeniteit van het afval verplaatst het water zich in het afval niet als een vochtfront over het gehele stortoppervlak. Het water zoekt bepaalde voorkeursbanen en zakt via grotere holten en kanalen naar beneden met gevolg dat het afval niet homogeen wordt bevochtigd (EHRIG, 1978; STEINBACH, 1968)

Het zal duidelijk zijn dat het bevorderen van runoff (R), verdamping (E) en afvoer door de afdeklaag (A) een verminderde infiltratie van regenwater in het stort tot gevolg heeft, waardoor ook de belasting van het grondwater afneemt.

2.2. Effect van verdichten

Zoals reeds werd vermeld is verdichten een belangrijk aspect van gecontroleerd storten. Hieronder worden allereerst enkele voor- en nadelen van het verdichten opgesomd (PROV. WATERSTAAT DRENTHE, 1979).

Voordelen:

- minder ruimte nodig;
- weinig vers afval ligt aan het oppervlak; minder last van vogels en stank;
- minder last van ratten, verwaaien en branden;
- stortoppervlak goed berijdbaar;
- nazakking zal gelijkmatiger en langzamer gebeuren;
- minder emissies vanuit het afval naar het milieu.

Nadelen:

- het contact tussen afval en percolatiewater is intenser. Hierdoor krijgt het percolatiewater een relatief hogere vervuilingsgraad;
- de methanogene fase komt mogelijk later en ook onvolledig op gang, waardoor het percolatiewater meer organische verontreinigingen bevat en zuurder is. Dit vergroot de oplosbaarheid van een aantal anorganische verontreinigingen (met name zware metalen);
- het later op gang komen van de methanogene fase is ongunstig voor de eindbeplanting.

De effecten van verdichten en afdekken zijn door verschillende onderzoekers bestudeerd. Vooral ten aanzien van het effect op de hoeveelheid percolatiewater lopen de meningen uiteen.

Volgens EHRIG (1978) heeft verdichting grote invloed op de hoeveelheid percolatiewater. Indien met een compactor wordt verdicht zou de hoeveelheid percolatiewater 20 à 25% van de neerslag bedragen. Wordt er met een bulldozer gewerkt dan zou volgens Ehrig het percentage oplopen tot 30 à 50%. Ook STIEF (1978) vermeldt dergelijke verschillen. Hij spreekt over zwak en sterk verdicht afval en komt dan tot hoeveelheden percolatiewater van respectievelijk 30-50% en 15-20% van de neerslag.

FRANZIUS (1978) vermeldt dat het waterbergend vermogen van afval ca. 10-13 vol. % bedraagt bij een dichtheid van 0,5-0,9 ton/m³.

De dichtheid zou vooral invloed hebben op de verdamping. Een grotere verdichting heeft een hoger vochtgehalte van de bovenlaag en daardoor een hogere verdamping tot gevolg. STEINBACH (1968) heeft de waterdoorlatendheid bepaald voor al dan niet verdicht vuil. Tevens bepaalde hij de volume veranderingen voor verdicht en onverdicht vuil. De waterdoorlatendheid van het los gestorte afval bedroeg 2445 m/dag, voor verdicht afval was dit 120 m/dag. In beide gevallen was het afval van tevoren verkleind. FRANZIUS (1978) vermeldt een waarde van 2,16 m/dag voor verkleind afval met een dichtheid van 0,9 ton/m³. Ook bij verdicht afval is de doorlatendheid dus zeer hoog. Zelfs bij de zwaarste regenbui is dan geen oppervlakte-afvoer te verwachten.

Bij de bepaling van de volume veranderingen werd gebruik gemaakt van met afval gevulde kolommen. Het afval werd van tevoren bevochtigd. Dit had tot gevolg dat het verdichte materiaal door het opnemen van water gedurende de eerste 4 dagen aan volume toenam. Tabel 1 toont de volume veranderingen van verkleind afval.

Tabel 1. Volume veranderingen van verkleind afval, waarbij de zinking is weergegeven in % van de oorspronkelijke storthoogte (naar Steinbach, 1968)

Tijd (etm)	Volume veranderingen	
	los gestort (%)	verdicht (%)
4	0	+ 3,8 à 7,4
33	-30,8	-17,3
56	-34,6 à -38,5	-15,4 à -23,1

Een ander interessant aspect van het in lagen opbouwen en verdichten van een stort is de mogelijke horizontale afstroming van water op de laaggrenzen. STEINBACH (1968) rapporteert hier eveneens over. Bij het opgraven van een in lagen van 1 meter opgebouwd oud stort bleek namelijk dat op het oppervlak van elke laag (dit is de plaats waar de grootste verdichting heeft plaatsgevonden) horizontale afstroming plaatsvond.

Ook MESU (1976) veronderstelt horizontale afstroming van water op de laaggrenzen. Deze veronderstelling is gebaseerd op praktijkervaringen, gegevens omtrent de kwantiteit en kwaliteit van het zijdelings afstromende water ontbreken (Fig. 2).

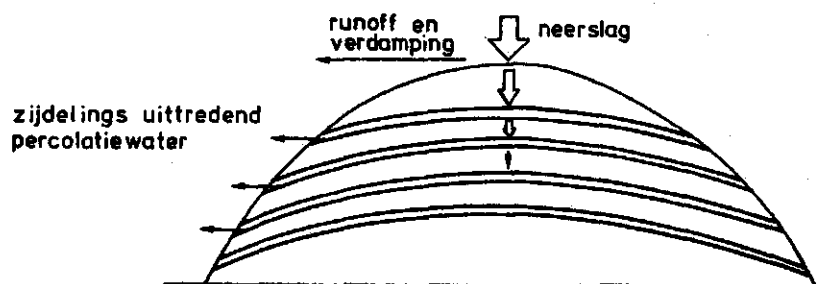


Fig. 2. Afstroming van percolatiewater op de laaggrenzen in een afvalstort (MESU, 1976)

2.3. Effect van afdekken met grond

HAM (1974) heeft aan de hand van lysimeterproeven onderzoek gedaan naar de gevolgen van het al dan niet verkleinen van afval en het direct of naderhand afdekken daarvan (na ca. 6 maanden). Hij deed proeven met lysimeterbakken van 10 bij 20 meter.

Bak 1. niet verkleind vuil; direct afdekken.

Bak 2. verkleind vuil; direct afdekken.

Bak 3. verkleind vuil; na 6 maanden afdekken.

Bak 4. verkleind vuil; niet afdekken.

Het afval werd in alle lysimeterbakken op dezelfde wijze gecompriëerd. Wat betreft de hoeveelheid percolatiewater vond HAM weinig verschil tussen de bakken onderling. Deze hoeveelheid bedroeg ca. 20% van de neerslag. Zonder grondafdekking bleek geen runoff op te treden. Met grondafdekking werd wel enige runoff geconstateerd, maar ook de verdamping werd geringer.

Belangrijk bij het onderzoek van HAM is dat hij tot de conclusie komt dat door het verkleinen en het direct afdekken het percolatiewater een lagere pH en een hogere COD-waarde heeft. Hierdoor wordt de vervuilingsgraad groter. Dit zou dus betekenen dat het beter is om aanvankelijk los te storten en pas later af te dekken met grond, waardoor de aerobe fase langer wordt. De verzuringsfase blijkt dan korter te zijn,

terwijl de methaangisting sneller op gang komt (Rotte-deponie in Duitsland).

Door de vele bezwaren die aan los storten kleven, o. a. esthetische en hygiënische bezwaren, is dit een minder geschikte oplossing. Vandaar dat in de praktijk meer wordt gestreefd naar het 'conserveren' van het afval. In dit verband zal een zodanige afdeklaag moeten worden aangebracht dat er zo min mogelijk regenwater in het afval infiltreert.

STIEF (1979) stelt de volgende eisen aan de afdeklaag:

- Goede bewortelingsmogelijkheden;
- Beperkte infiltratie van neerslag;
- Beperkte gasdoorlatendheid in verband met het ongecontroleerd uitstromen van gas;
- Goede afdekking van het afval in verband met vogels, ongedierte, stank en het wegwaaien van afval;
- Weinig erosiegevoelig;
- Ongevoelig voor zetting;
- Goede begaanbaarheid en berijdbaarheid;
- Nette esthetische aanblik.

STIEF stelt voor een afdeklaag van ca. 2,50 meter dikte op te bouwen, zoals schematisch is weergegeven in fig. 3.

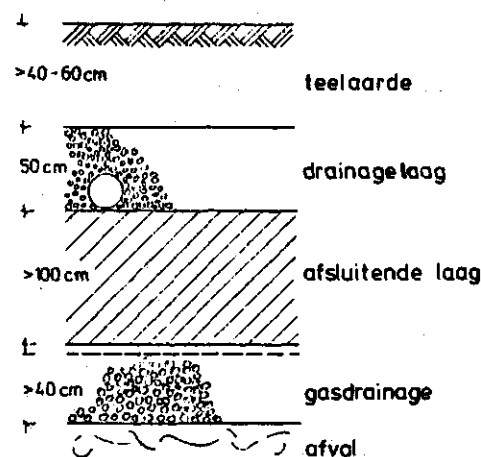


Fig. 3. Opbouw van een afdeklaag volgens STIEF (1979).

Om zakkingen zoveel mogelijk te vermijden stelt hij voor dat op het stort, na voltooiing, voorlopig alleen gras wordt ingezaaid en dat het stort pas definitief wordt afgewerkt nadat de zakking en de gasontwikkeling grotendeels gestopt zijn. Dit zal minstens enkele jaren duren. Daarna moet het oppervlak opnieuw worden verdicht met zware machines. Pas dan wordt de eigenlijke afdeklaag met de drains aangebracht. Deze procedure ontleend STIEF aan de 'Schweizer Deponie-richtlijnen'. Interessant daarbij is dat STIEF (1979) een globale kostenberekening heeft gemaakt waarbij hij zeker niet uitsluit dat het waterafsluitend maken van een stortplaats in sommige gevallen goedkoper kan zijn dan het aanleggen van een drainagesysteem voor het opvangen van percolatiewater en de kosten van het zuiveren ervan.

Ook SCHODER (1975) geeft een mogelijkheid voor het afdichten van een stort. Hij ziet geen heil in het gebruiken van kunststoffolie, omdat het zeer de vraag is hoe dit zich in de loop van de jaren houdt. Verder noemt hij het gevaar van dieren en wortels die de kunststoffolie beschadigen. Bovendien bestaat het gevaar dat de grondlaag op de folie afschuift. SCHODER stelt voor de afdeklaag als volgt op te bouwen:

- boven het vuil 10 cm filtergrind;
- daarop een 25 cm dikke klei- of leemlaag ter afsluiting;
- vervolgens 60 cm goed doorwortelbare grond;
- het geheel afdekken met 20 cm teelaarde.

Om ongewenste gasontsnapping te vermijden dient men maatregelen te nemen voor ontgassing.

De opbouw van de afdeklaag, zoals voorgesteld door STIEF en SCHODER, zijn nog niet getest in de praktijk of met behulp van berekeningen. Dit geldt ook voor de voorstellen van NEUMAN (1976) die de opzet van SCHODER niet doelmatig vindt. Volgens NEUMAN zijn de zeer gunstige groeiomstandigheden in de bovenste laag aanleiding voor de wortels om minder diep in de ondergrond door te dringen. Winderosie en afschuiven van grond zouden het gevolg zijn. Bovendien zou de vochtvoorziening voor de beplanting tekort schieten bij droog weer. Zijn voorkeur gaat uit naar een niet bewerkte grond (Roh-boden), waarin door de vegetatie een humushorizont wordt op-

gebouwd. Er zou dan een meer homogene laag ontstaan, waarin de planten goed kunnen wortelen en beter het vocht in de afdeklaag benutten.

2.4. Het zakkingsproces

Een belangrijk aspect bij het realiseren van afwateringssystemen op een afvalstort is het verloop van de zakking in de tijd. Door de heterogene samenstelling van het afval en het hoge percentage organische stof in het afvalstort ontstaan verzakkingen, die bovendien zeer onregelmatig zijn. De zakking tengevolge van de oxydatie van organische stof zou in principe kunnen worden voorkomen door conservering van het afval. Dit lijkt echter geen haalbare zaak. Het zakkingsproces van een stort is tot nu toe nauwelijks onderzocht. Er zijn slechts zeer weinig gegevens bekend.

In de rapporten over het SVA-onderzoek bij de stortplaats Ambt-Delden worden enkele gegevens omtrent zakking vermeld. Tabel 2 is overgenomen uit het SVA-rapport van juni 1974. (SVA, 1974).

Tabel 2. Omvang van de zakking op de vuilstortplaats Ambt-Delden (naar gegevens van SVA, 1974)

Baken	Hoogtemeting		Zakking		
	15/12'72	29/12'73	in 1 jaar	t/m 15/12'72	totaal
I	11,92	11,86	0,06	0,47	0,53
II	12,34	12,11	0,23	0,30	0,53
III	12,55	12,22	0,33	0,33	0,66
IV	12,27	11,97	0,30	0,41	0,71

Het betreft hier een weinig verdichte laag afval van 2 m. De zakking in 4 jaar tijd varieert van 0,53 m tot 0,71 m over een laagdikte van 2 meter of wel 26,5% tot 35,5%. Zelfs voor een laag van 2 meter is de zakking dus groot en bovendien onregelmatig.

Met behulp van deze summierse gegevens is het moeilijk om de zakking op een stortplaats enigszins betrouwbaar te schatten. Toch is getracht met hulp van een eenvoudige exponentiële relatie een globale

indruk te krijgen van de zakking en de zaksnelheid in de loop van de tijd. De veronderstelde relatie luidt:

$$Z = A h (1 - e^{-bt}) \quad (1)$$

en

$$z = a h \cdot e^{-bt} \quad (2)$$

waarin:

Z = de totale zakking (m)

z = zaksnelheid (m/jr)

A = maximale zakking (m/m storthoogte)

a = initiële zaksnelheid voor $t = 0$ (m/jr per m storthoogte)

b = zakkingsconstante (jr^{-1})

h = storthoogte (m)

t = tijd (jr)

In tabel 3 zijn enige resultaten van de berekening weergegeven.

Tabel 3. Overzicht van het verloop van de zakking in de loop der jaren volgens berekening met formule (1); $A = 0,40$ m/m storthoogte, $b = 0,25$.

		Storthoogte (m)				
Totale zakking		2 m	5 m	10 m	15 m	20 m
na	1 jaar	0,18	0,44	0,88	1,33	1,77
"	2 jaar	0,31	0,79	1,57	2,36	3,15
"	3 jaar	0,42	1,06	2,11	3,12	4,22
"	4 jaar	0,51	1,26	2,53	3,79	5,06
"	5 jaar	0,57	1,43	2,85	4,28	5,71
"	6 jaar	0,62	1,55	3,11	4,66	6,21
"	7 jaar	0,66	1,65	3,30	4,96	6,61
"	8 jaar	0,69	1,73	3,46	5,19	6,92
"	9 jaar	0,72	1,79	3,58	5,37	7,16
"	10 jaar	0,73	1,84	3,67	5,51	7,34
"	15 jaar	0,78	1,95	3,91	5,86	7,81
"	20 jaar	0,79	1,99	3,97	5,96	7,95
"	∞ jaar	0,80	2,00	4,00	6,00	8,00

De maximale zakking A is afhankelijk van de mate van verdichting en van de fractie organische stof die later door afbraak verdwijnt. De zakking bestaat dus enerzijds uit een inklinking onder invloed van de zwaartekracht en anderzijds uit een zakking tengevolge van de afbraak van organische stof.

3. NADERE BESCHOUWING VAN ENKELE WATERBALANSTERMEN

3.1. Oppervlakte-afvoer

Uit de waterbalans, zoals deze in het vorige hoofdstuk is weergegeven, blijkt dat een vermindering van de hoeveelheid percolatiewater in principe kan worden bereikt door het bevorderen van de oppervlakte-afvoer (runoff). Oppervlakte-afvoer treedt op als de neerslagintensiteit de infiltratiecapaciteit van de afdeklaag overtreft. Alvorens dit surplus aan water tot afvoer komt, vindt eerst berging van water op het oppervlak plaats (zie 3.2). Aangezien de infiltratiecapaciteit afneemt met de tijd (zie 3.3) neemt de runoff toe met de tijd totdat uiteindelijk een constante waarde wordt bereikt.

De oppervlakte-afvoer wordt in belangrijke mate bepaald door de intensiteit, de duur en de verdeling van de neerslag over de seizoenen. Zodra de neerslagintensiteit de infiltratiecapaciteit overtreft, zal bij verdere toename van de intensiteit ook de runoff toenemen. Naarmate de neerslagduur langer is zal de runoff met de tijd toenemen, dat wil zeggen dat het percentage van de neerslag, dat tot afstroming komt, met de tijd toeneemt totdat een constante waarde wordt bereikt. Meestal is dit vrij snel gerealiseerd (binnen 10 à 15 minuten), afhankelijk van de neerslagintensiteit en de grondsoort.

In natte perioden blijkt de runoff groter te zijn, omdat de infiltratiecapaciteit van natte grond geringer is dan van droge grond. Verder zal de runoff ook sterk toenemen als in het bodemprofiel een slechtdoorlatende laag voorkomt, waarop het water stagneert zodat de grondwaterspiegel tot in het maaiveld reikt.

3.2. Berging op het oppervlak

De tijdsduur die verloopt tussen het begin van een regenbui en het begin van oppervlakte-afvoer wordt mede bepaald door de berging van water op het oppervlak. In de Amerikaanse literatuur wordt hierbij onderscheid gemaakt tussen 'depression storage' en 'detention storage'.

Onder depression storage wordt verstaan de hoeveelheid water die wordt geborgen in kleinere oneffenheden en ingesloten laagten in het terrein en niet tot oppervlakkige afstroming komt, maar infiltreert of verdampt. De grootte van de depression storage hangt samen met de grootte van het beschouwde gebied. De oneffenheden en ingesloten laagten kunnen afhankelijk van de hydrologische eenheden variëren van een hectare tot wat kleine kuultjes op kleine landbouwpercelen. Op stortplaatsen kan de depression storage worden vermindert door het stortoppervlak hellend af te werken en er voor te zorgen dat er geen ingesloten laagten ontstaan.

Onder detention storage verstaat men de tijdelijke waterberging aan het oppervlak, in aanvulling op de depression storage. Wil namelijk oppervlakkige afstroming plaatsvinden, dan zal eerst een waterlaagje op het oppervlak ontstaan. De hoeveelheid water die in deze dunne waterschijf is geborgen noemt men detention storage. Een gedeelte van dit water zal, zodra de neerslagintensiteit kleiner wordt dan de infiltratiecapaciteit van de grond, nog oppervlakkig afstromen, een ander gedeelte zal echter infiltreren of verdampen. De dikte van de waterschijf en daarmee dus de omvang van de detention storage is afhankelijk van de hoeveelheid water die per tijdseenheid afstroomt. Wordt deze hoeveelheid groter door toename van de neerslagintensiteit of afname van de infiltratiecapaciteit, dan zal de detention storage ook toenemen totdat er zich een evenwicht heeft ingesteld tussen aan- en afvoer. Op begroeide grond is de detention storage groter dan op kale, niet begroeide grond.

3.3. Infiltratie in de afdeklaag

Een meer of minder groot deel van de neerslag zal infiltreren in de bodem. Bij infiltratie kan men onderscheid maken tussen de infiltratiesnelheid en de infiltratiecapaciteit, waarvoor de volgende definities worden gehanteerd (BRUGGENWERT e. a., 1966).

Met infiltratiesnelheid wordt de hoeveelheid water bedoeld die per tijdseenheid een oppervlakte-eenheid van het maaiveld passeert. De infiltratiesnelheid is afhankelijk van de aanvoercharacteristiek en

het opnemend vermogen van de grond.

Onder infiltratiecapaciteit wordt verstaan de infiltratiesnelheid bij juist beginnende plasvorming. De infiltratiecapaciteit neemt met de tijd af. De afname is omgekeerd evenredig met de tijd. Oorzaak hiervan is dat de infiltratiesnelheid ruwweg wordt bepaald door het potentiaalverschil tussen natte en droge grond, gedeeld door de lengte van de kolom waarin het water beweegt. Naarmate het water verder indringt wordt de lengte van deze kolom groter waardoor de infiltratiesnelheid afneemt (BOLT, e. a., 1965). Het verloop van de indringing is eerst snel, daarna langzamer tot een vrijwel constante waarde is bereikt (the final infiltration rate). Dit proces is in fig. 4 schematisch weergegeven.

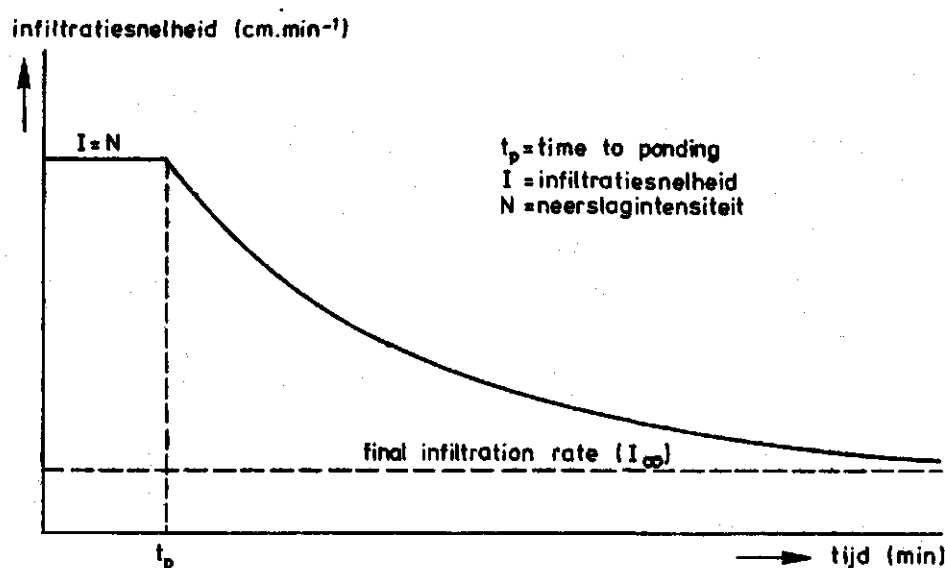


Fig. 4. Weergave van het verloop van de infiltratie met de tijd voor een bepaalde neerslagintensiteit N (SMITH, 1972)

Op het gebied van infiltratie zijn veel onderzoeken gedaan, onder andere door SMITH (1972) en MORIN en BENYAMIN (1977). Uit de infiltratiecurven van deze onderzoekers blijkt steeds dat de infiltratie in een vrij korte tijd (ca. 15 min, afhankelijk van grond-

hoort en neerslagintensiteit) afneemt tot een waarde die net iets boven de final infiltration rate ligt. Een toename van de neerslagintensiteit veroorzaakt een verschuiving in de curve, waardoor het tijdstip van plasvorming (t_p) eerder wordt bereikt. De relatie tussen runoff en neerslagintensiteit is weergegeven in fig. 5 (EMMET, 1970).

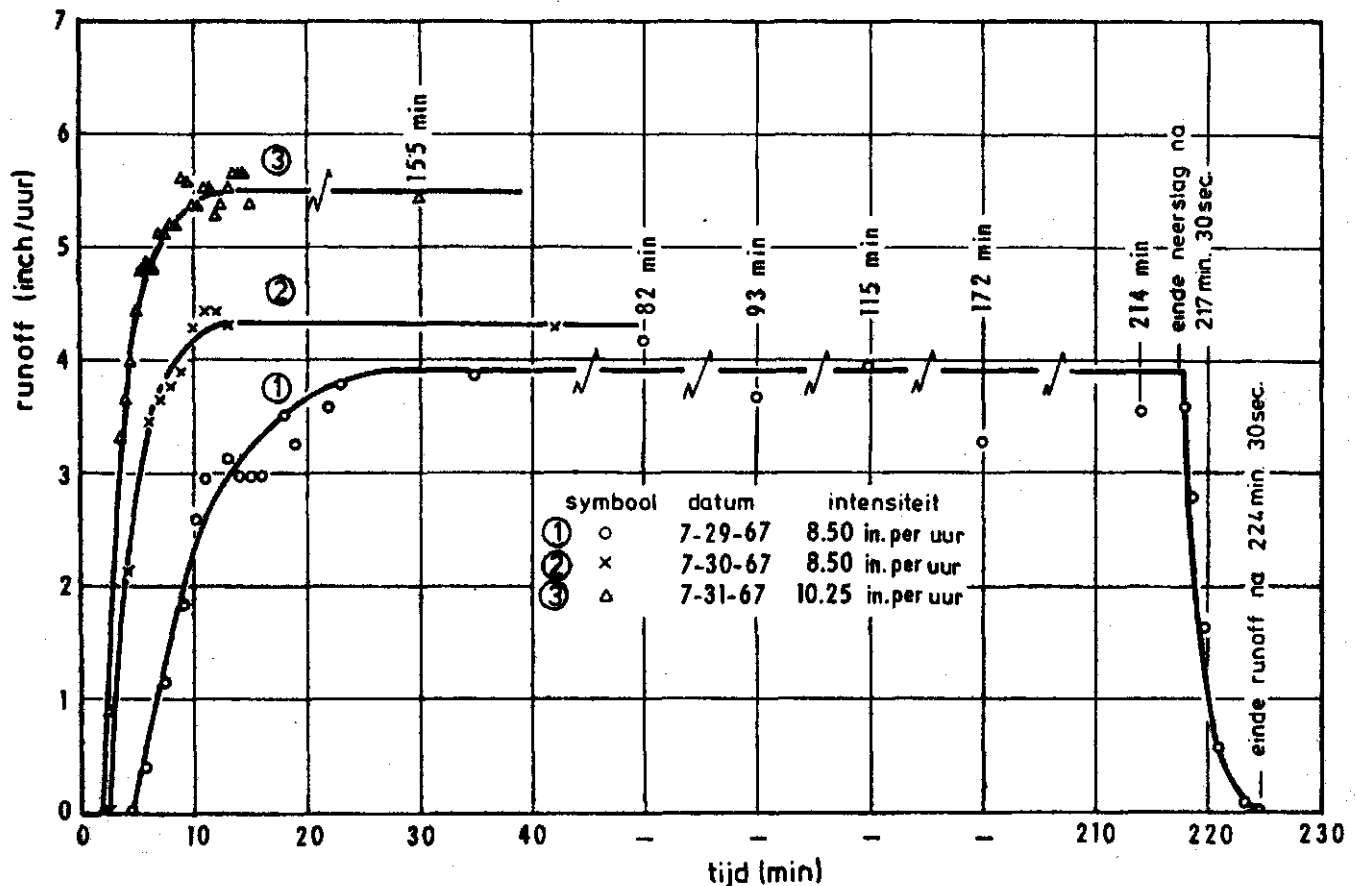


Fig. 5. Het verloop van de runoff in de tijd bij verschillende neerslagintensiteiten (EMMET, 1970)

In deze figuur is te zien hoe snel de runoff constant wordt, dat wil zeggen, hoe snel de infiltratiesnelheid een constante waarde bereikt. Voorts valt de invloed van een natte uitgangssituatie en een verhoogde neerslagintensiteit te zien.

Bij een bepaalde infiltratiecapaciteit en neerslagintensiteit wordt de runoff uiteindelijk constant. Wanneer echter lijn 2 met lijn 1 wordt vergeleken dan blijkt dat de hellingshoek van lijn 2 veel groter is (beide bij dezelfde neerslagintensiteit). De infiltratiesnelheid benadert in dit geval eerder de final infiltration rate en de runoff wordt

eerder constant. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de grond in geval 2 natter is in de uitgangssituatie, waardoor de infiltratiecapaciteit bij het begin van de bui lager is dan in geval 1. De uiteindelijk bereikte 'final infiltration rate' zou in beide gevallen gelijk moeten zijn. EMMET (1970) wijt het niveauverschil tussen lijn 1 en 2 dan ook aan meetfouten.

3.4. Interceptie van regenwater door de vegetatie

Voordat regenwater de gelegenheid krijgt om in de grond te infiltreren zal het de begroeiing moeten passeren. Naarmate de gewasbedekking van het oppervlak groter is zal de hoeveelheid water die door de begroeiing wordt opgevangen groter zijn. Een gedeelte van het onderschepte water zal van het blad afdruppen en alsnog in de grond dringen, dan wel op het oppervlak worden geborgen, of tot runoff komen. De hoeveelheid water die uiteindelijk wordt onderschept is mede afhankelijk van de wind. Deze is bepalend voor de hoeveelheid neerslag die onder bepaalde omstandigheden aan het bladerdek blijft hangen.

Het belangrijkste effect van de interceptie op de waterbalans is de toename van de totale verdamping. In het algemeen geldt namelijk dat de verdampingssnelheid van een nat bladerdek groter is dan die van een droog bladerdek onder dezelfde omstandigheden (PHILIPS, 1979).

Als plantedelen met een waterlaagje zijn bedekt, is transpiratie uitgesloten, in geval van sterke uitdroging kan deze zelfs negatief worden. Doorgaans verdampt het interceptiewater echter sneller dan het geval is bij de transpiratie van een droog bladerdek. Voor Nieuw-Zeeland geldt bijvoorbeeld dat 25 - 40% van de totale neerslag onderschept wordt en verdampt met een snelheid van 2 - 4 maal de transpiratiesnelheid. De interceptieverliezen kunnen aanzienlijk zijn, vooral in bossen. PHILIPS (1979) geeft als ruwe schatting voor de interceptie in Nederland 20 - 40% van de neerslag in bossen en 10 - 20% bij een laag vegetatiedek. In feite is het weergeven in percentages geen juiste maat. De interceptie is afhankelijk van de neerslag en bereikt uitein-

delijk een maximum. Zo neemt interceptie voor gras volgens RIJTEMA (1965) toe met de neerslag tot een maximale waarde van ca. 2 mm.

SCHULZE (1972) geeft ook cijfers met betrekking tot interceptie. Maïs kan in het stadium van rijpheid ongeveer 0,5 mm neerslag vasthouden, en bos daarentegen kan bij langdurige neerslag, onder omstandigheden van weinig wind, 10 - 15 mm vasthouden. Hier wordt volstaan met het opsommen van de componenten die tezamen de totale interceptie door vegetatie bepalen (KIRBY, e. a., 1978)

$$V_i = S_i + C_p \cdot E_a \cdot t_r$$

waarin:

- V_i = totale interceptie gedurende de bui (mm)
- S_i = bergingscapaciteit op de vegetatie per m^2 bodemoppervlak (mm)
- C_p = verdampend oppervlak per m^2 bodemoppervlak
- E_a = de evaporatiesnelheid per m^2 verdampend oppervlak (mm/uur)
- t_r = regenduur (uur)

De tweede term beschrijft dus de verdamping vanaf het vegetatieoppervlak tijdens de bui.

3.5. Evapotranspiratie

De verdamping door de vegetatie is een belangrijke term in de waterbalans. Vermindering van de hoeveelheid percolatiewater is in principe mogelijk door de verdamping te bevorderen. Probleem hierbij is dat in tijden van neerslagoverschot de verdamping zeer gering is. Dit betekent dat het neerslagoverschot zoveel mogelijk in de wortelzone geborgen moet worden zodat het tijdens de zomerperiode nog beschikbaar is voor de vegetatie.

Bij verdamping wordt onderscheidt gemaakt tussen potentiële - en actuele verdamping respectievelijk voorgesteld door E_{pot} en E_{act} . De potentiële verdamping wordt in Nederland meestal bepaald volgens

PENMAN, voor een open wateroppervlak (Dictaat Agrohidrologie LH, 1975). De zo bepaalde verdamping (E_o) geldt dan alleen voor open water. Ter bepaling van de verdamping van een gewas moet de E_o worden vermenigvuldigd met een factor die afhankelijk is van het desbetreffende gewas (gewasfactor f).

$$E_{\text{pot}} = f \cdot E_o$$

De factor f is afhankelijk van het jaargetijde, het klimaat, de bodembedekkingsgraad van de vegetatie en de albedo van het gewas (d.i. de reflectiecoëfficiënt). De gewasfactor voor kort gras is 0,8.

Gedurende de wintermaanden, wanneer er sprake is van een neerslagoverschot, is de verdamping die werkelijk plaatsvindt (E_{act}) even groot als de E_{pot} . In de zomer, wanneer er sprake is van een neerslagtekort of wel een verdampingsoverschot, kan er potentieel meer water verdampen dan wordt aangevoerd. Dit heeft tot gevolg dat een gedeelte van de vochtvoorraad in de bodem wordt aangesproken. Door uitdroging van de bodem zal dan de actuele verdamping kleiner zijn dan de potentiële verdamping.

Naarmate de afdekgrond verder is uitgedroogd zal het bergend vermogen toenemen en zal het in het najaar langer duren voordat water in het afval infiltreert.

Door de warmte ontwikkeling in een afvalstort is het mogelijk dat de verdamping op een afvalstort hoger is dan elders in de omgeving. Ook kan het windeffect door de hoogte van het afvalstort afwijken ten opzichte van de vlakke grond.

4. GEBRUIK VAN HYDROLOGISCHE REKENMODELLEN

4.1. Alternatieven ter beperking van grondwaterverontreiniging

Een belangrijk aspect van gecontroleerd storten behoort te zijn het treffen van maatregelen ter vermindering van de grondwaterverontreiniging. In de meer recente literatuur worden verschillende mo-

gelijkheden geopperd om dit te bereiken. Tot nu toe ontbreken echter gegevens betreffende het resultaat van deze maatregelen in de praktijk.

Samengevat kunnen de volgende mogelijkheden ter vermindering van de hoeveelheid percolatiewater worden genoemd (KNOCH, 1976; MESU, 1976; HOEKS, 1978).

- Het stortoppervlak afdekken met een schuimlaag. De neerslag wordt in het schuim vastgelegd, van waaruit het weer kan verdampen. Er zou dan minder of geen water in het afval dringen.
- Recirculatie van het percolatiewater door dit water te verzamelen en weer over het stort te verregenen. Vooral in de zomerperiode kan daardoor de verdamping belangrijk toenemen.
- Op het stortoppervlak een laag vers afval aanbrengen, waarin een aëroob composteringsproces plaatsvindt. De temperatuur in deze laag zal dan oplopen tot ca. 70 °C. De neerslag die in deze laag wordt geborgen, zal door de hoge temperatuur weer snel verdampen.
- Bevordering van de verdamping door de aanplant van veel water verbruikende planten. Dit kan alleen effectief zijn als het in de winter geïnfiltreerde water in de zomer weer beschikbaar komt voor de plant.
- Het aanbrengen van een afsluitende laag met daarop een drainage-systeem op het afvalstort om de infiltratie van regenwater in het stort te beperken. In verband met de kans op verzakking wordt aanbevolen om het afval laagsgewijs te verdichten en na het afdekken van het stort met grond eerst nog een jaar te wachten met de aanleg van een drainagesysteem.
- Het aanbrengen van een afsluitende laag met daarop een drainage-systeem onder het afvalstort, zodat het percolatiewater kan worden opgevangen.
- Aanbrengen van hellingen, zodanig dat geen ingesloten laagten voorkomen op het afvalstort, zodat eventueel oppervlakkig afstromend regenwater kan worden afgevoerd naar de buitenrand van het stort.
- Bevordering van de oppervlakte-afvoer (runoff) door een afdekgrond met lage infiltratiecapaciteit te kiezen.

Verschillende van deze voorstellen hebben bezwaren vanwege technische problemen of vanwege het geringe effect dat er van mag worden verwacht. Met name de voorstellen met betrekking tot de bevordering van de verdamping kunnen slechts effect hebben als het neerslagoverschot van de winterperiode voor de planten beschikbaar is. Afsluiting van het stort aan de bovenzijde met een slecht doorlatende laag brengt zeker technische problemen met zich mee. Hydrologisch gezien bestaat het gevaar dat de grondlaag boven de slecht doorlatende laag verzadigd raakt en vooral op hellingen kan afschuiven. In de volgende paragrafen zullen, aan de hand van berekeningen, enkele van de hier genoemde mogelijkheden nader worden besproken.

4.2. Globale berekening van de waterbalans van de afdeklaag

Verschillende maatregelen ter beperking van grondwater verontreiniging (zie 4.1) betreffen het bevorderen van de verdamping. Dit heeft alleen zin als de vochtberging in de wortelzone groot is.

Om een globale indruk te krijgen van de effecten van de verschillende waterbalanstermen is een globale waterbalans voor de afdeklaag berekend. Daarbij is gebruik gemaakt van de methode Thornthwaite-Mather (Dictaat Agrohidrologie LH, 1975) waarbij de volgende gegevens zijn gebruikt:

- neerslaggegevens (N), afkomstig van het Weerstation van de Afdeling Natuur en Weerkunde van de Landbouwhogeschool in Wageningen;
- runoff (R), is berekend door een constante en lage infiltratiecapaciteit van 13 mm/dag (= 0,54 mm/uur) aan te nemen. Zodra de neerslagintensiteit (in mm/uur) de infiltratiecapaciteit overtreft, treedt runoff op, zij het dat eerst berging op het oppervlak plaatsvindt waarvoor 2,5 mm is aangehouden) gegevens ontleend aan BOELS, 1978);

- potentiële verdamping (E_{pot}), berekend volgens Penman als $0,8 E_o$ waarbij E_o de open water verdamping voorstelt;
- de voor de plant beschikbare vochtvoorraad (ST) in de bodem is op maximaal 100 mm resp. 200 mm gesteld en is als uitgangssituatie gekozen op 1 januari (ST_o);
- de verandering in de vochtvoorraad (ST) wordt berekend met behulp van het gesommeerde neerslagtekort (APWL) volgens de formule

$$ST = ST_o e^{-APWL/ST_o}$$

waarmee dus een exponentieel uitputtingsverloop van de bodemvochtvoorraad wordt verondersteld.

De berekening is uitgevoerd voor het jaar 1974 en voor een tweetal situaties, namelijk een afdeklaag met een normale vochtvoorraad van 100 mm en een afdeklaag met een uitzonderlijk hoge vochtvoorraad van 200 mm. Dit laatste kan alleen voorkomen bij een dikke afdeklaag met een hoog bergend vermogen en een zeer diepe beworteling. De gegevens zijn vermeld in tabel 4.

Uit deze berekening blijkt, dat de runoff op een grond met een lage infiltratiecapaciteit een belangrijke bijdrage kan geven. Verder blijkt dat door het kiezen van een afdekgrond met een hoge bergingscapaciteit tezamen met een diepwortelende vegetatie eveneens een reductie van de hoeveelheid percolatiewater optreedt, voornamelijk doordat in het najaar meer water in het bodemprofiel wordt geborgen. Dit betekent dat het aanplanten van een vegetatie, die veel water kan verdampen, nuttig kan zijn mits gelijktijdig de bergingscapaciteit in de afdeklaag wordt opgevoerd.

Tabel 4. Berekening van de waterbalans van een afdeklaag met een maximale vochtvoorraad van 100 resp. 200 mm volgens de methode Thornthwaite-Mather, voor het jaar 1974. Alle waterbalansen termen zijn opgegeven in mm

Waterbalans termen	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Totaal
neerslag(N)	59,3	31,7	55,4	9,4	51,1	69,4	65,4	78,1	126,5	117,6	91,0	114,8	870
runoff (R)	10,0	4,6	2,7	0,0	24,1	30,3	20,1	36,5	41,5	44,7	19,8	39,1	273
potentiële verdamping(E_{pot})	0	0	20,0	65,0	87,0	97,0	83,0	72,1	37,0	20,0	3,0	0	-
neerslagoverschot($N-R-E_{pot}$)	49,3	27,1	32,7	-55,6	-60,0	-57,9	-37,7	-30,5	48,0	52,9	68,2	75,7	-
gesommeerd neerslagtekort(APWL)	-	-	-	55,6	115,6	173,5	211,2	241,7	-	-	-	-	-
Vochtvoorraad 100 mm													
vochtvoorraad(ST) 100	100	100	100	57,4	31,5	17,6	12,1	8,9	56,9	100	100	100	-
ΔST	0	0	0	-42,6	-25,9	-13,9	-5,5	-3,2	48,0	43,1	0	0	-
actuele verdamping (E_{act})	0	0	20,0	52,0	52,9	53,0	50,8	44,8	37,0	20,0	3,0	0	334
percolatiewater(P)	49,3	27,1	32,7	0	0	0	0	0	0	9,8	68,2	75,7	263
Vochtvoorraad 200 mm													
vochtvoorraad(ST) 200	200	200	200	151,5	112,2	84,0	69,6	59,7	107,7	160,6	200	200	-
ΔST	0	0	0	-48,5	-39,3	-28,2	-14,4	-9,9	48,0	52,9	39,4	0	-
actuele verdamping (E_{act})	0	0	20,0	57,9	66,3	67,3	59,7	51,5	37,0	20,0	3,0	0	383
percolatiewater(P)	49,3	27,1	32,7	0	0	0	0	0	0	0	28,8	75,7	214

4.3. Berekening van de zijdelingse afvoer door de afdeklaag

Indien de afdeklaag niet verzadigd is met water zal de zijdelingse afvoer via de onverzadigde zone doorgaans gering zijn. Eventueel is deze afvoer wel te vergroten door onder de afdeklaag een grofzandige laag of een grindlaag aan te brengen. In de fijnzandige afdeklaag zal dan op de overgang naar de grove laag bijna verzadiging optreden, omdat het water hier stagneert wegens de sterk verschillende pF-curven van beide materialen.

De hoeveelheid water die aldus via een hellende afdeklaag kan worden afgevoerd, is geschat met behulp van de volgende berekening. De daarbij aangenomen situatie is aangegeven in fig. 6, waarbij voor

de vochtspanning ψ_s op de grenslaag - 5 cm is gekozen, dat wil zeggen, een bijna verzadigde toestand. In de afdeklaag is verder een evenwichtssituatie veronderstelt.

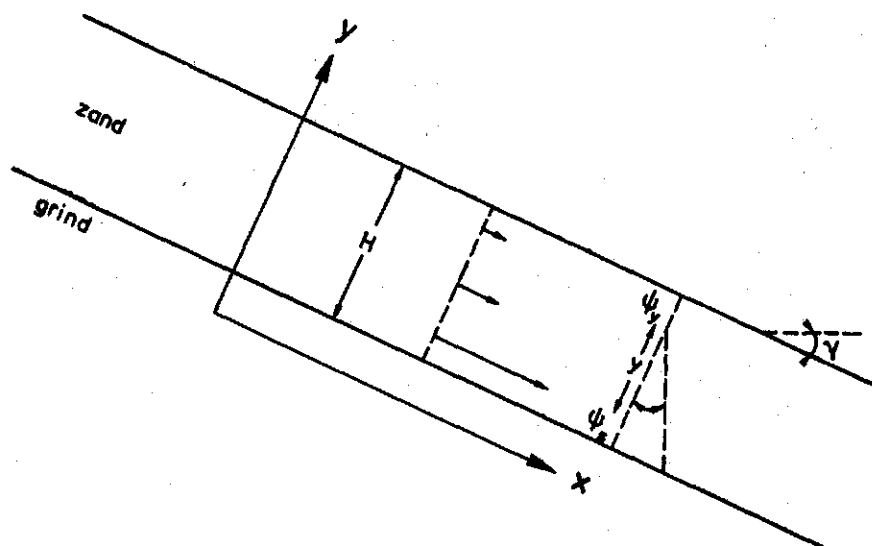


Fig. 6. Onverzadigde stroming door de afdeklaag (zie tekst voor symbolen)

Er geldt nu:

$$q_x = \int_0^H v \, dy \quad \text{waarin } v = K(\psi) \sin \gamma$$

met $K(\psi) = K_0 e^{\alpha \psi}$ en $\psi = \psi_s - \frac{y}{\cos \gamma}$

geldt $q_x = K_0 \sin \gamma \int_0^H e^{\alpha (\psi_s - \frac{y}{\cos \gamma})} dy$

Na integratie wordt dit:

$$q_x = K_0 \sin \gamma \cdot \frac{\cos \gamma}{\alpha} \cdot e^{\alpha \psi_s} \left(1 - e^{-\frac{\alpha H}{\cos \gamma}} \right)$$

waarin:

q_x = afvoer door de afdeklaag ($\text{cm}^2 \cdot \text{dag}^{-1}$)

K_0 = verzadigde doorlatendheid van de afdeklaag ($\text{cm} \cdot \text{dag}^{-1}$)

- γ = hellingshoek
 α = constante in de K - ψ relatie vlg RIJTEMA (1970) (cm^{-1})
 ψ = vochtspanning (cm)
 ψ_s = vochtspanning op de grenslaag (cm)
 v = stroomsnelheid volgens DARCY (cm. dag^{-1})
 H = dikte van de afdeklaag (cm)

Aangenomen is dat de aldus berekende hoeveelheid water de maximale afvoer is, die aan de voet van de helling zal optreden. Door q_x te delen door de hellinglengte L wordt de afvoer berekend in mm water per dag. Enkele resultaten zijn weergegeven in tabel 5.

Tabel 5. Zijdelingse afvoer (in mm/dag) door een niet-verzadigde, hellende afdeklaag voor twee verschillende grondsoorten (1 = matig fijn zand, 2 = matig grof zand); $\psi_s = -5$ cm, $H = 60$ cm, zie verder tekst.

Lengte van de helling (meters)	helling: tg γ = 0,03		helling: tg γ = 0,33		
		grond 1	grond 2	grond 1	grond 2
	K _o :	110	300	110	300
	α :	0,0822	0,138	0,0822	0,138
10		0,26	0,33	2,76	3,42
25		0,11	0,13	1,11	1,37
100		0,03	0,03	0,28	0,34

In het algemeen blijkt het zijdelingse transport in de onverzadigde zone gering te zijn. Alleen op korte, steile hellingen kan het een bijdrage leveren van 1 à 3 mm per dag.

Uit het voorgaande volgt dat een belangrijke zijdelingse afvoer door de afdeklaag alleen mogelijk is bij verzadiging, dat wil zeggen, dat zich in de afdeklaag een grondwaterspiegel opbouwt. Dit is alleen mogelijk als onder de afdeklaag een afsluitende of slecht doorlatende laag wordt aangebracht (folie of leem). Gezien de kans op erosie en afschuiving zal het op lange hellingen noodzakelijk zijn dat in de afdeklaag een ontwateringssysteem (drains, sloten of greppels) wordt aangelegd. De praktische haalbaarheid lijkt twijfelachtig gezien de grote kans op verzakkingen op een afvalstort.

Met een formule van ERNST kan de afstand tussen de drains of sloten worden berekend als functie van het ontwateringscriterium en de minimale ontwateringsdiepte:

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

waarin:

- l = drain- of slootafstand (m)
- K = doorlatendheid van de afdeklaag (m. dag⁻¹)
- h = maximale opbolling van het grondwater tussen de sloten of drains (m)
- S = ontwateringscriterium (m. dag⁻¹)
- γ = hellingshoek

In fig. 7 is de beschouwde situatie weergegeven.

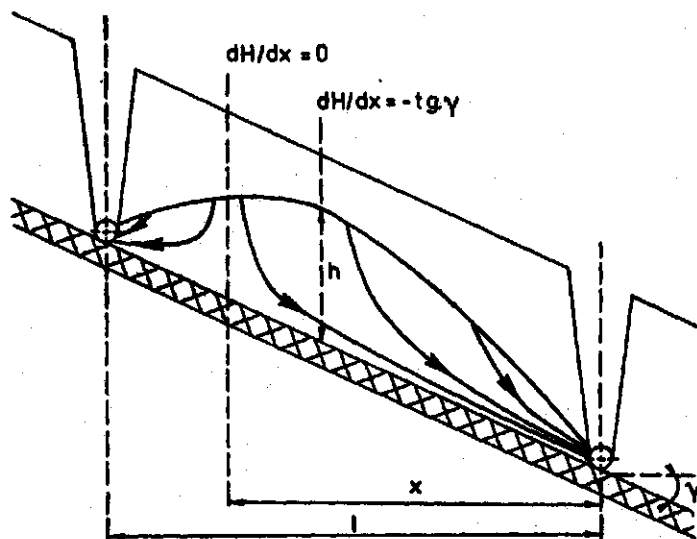


Fig. 7. Schematische voorstelling van een hellende afdeklaag met drains of sloten op een ondoorlatende laag (naar HOEKS, 1978)

In tabel 6 zijn enkele resultaten van de berekening weergegeven voor een afdeklaag van 60 cm bewortelbare grond op 20 cm ondoor-

latende leem. De helling is aangenomen op 3% ($\text{tg } \gamma = 0,03$)

Tabel 6. Afstand tussen drains of sloten (m) in de afdeklaag als functie van ontwateringsdiepte en ontwateringscriterium ($K = 5 \text{ m/dag}$, $\text{tg } \gamma = 0,03$)

Ontwateringsdiepte	h	Ontwateringscriterium S(mm/dag)			
		1	2,5	5	10
0,20	0,40	82	43	28	19
0,25	0,35	72	38	25	17
0,30	0,30	62	32	21	14
0,35	0,25	52	27	17	12
0,40	0,20	41	22	14	9
0,45	0,15	31	16	10	7

Voor een ontwateringscriterium van 7 mm (gebruikelijk op landbouwgrond) een minimale ontwateringsdiepte van 30 cm moet de afstand tussen sloten en drains in de orde van 15 à 20 m liggen. Zonder sloten of drains mogende hellingen dus niet langer zijn dan 15 à 20 m. Op een stortplaats zullen de hellingen over het algemeen veel langer zijn, tenzij terrassen worden aangelegd, waarbij op de terrassen een ontwateringssysteem wordt aangebracht. Ook hier blijft het zakingsprobleem een rol spelen.

Variaties in helling hebben ook invloed op de drainafstand, vooral bij ontwateringscriteria kleiner dan 5 mm /dag. Een kleinere hellingshoek heeft tot gevolg dat de drainafstand ook kleiner wordt (zie tabel 7)

Tabel 7. Relatieve drainafstand als functie van de hellingshoek en het ontwateringscriterium. De drainafstand op een vlak terrein ($\text{tg } \gamma = 0$) is daarbij gelijk gesteld aan 1,00.

Ontwateringscriterium mm/dag	1	2,5	5	10
helling: $\text{tg } \gamma = 0$	1,00	1,00	1,00	1,00
$\text{tg } \gamma = 0,01$	1,06	1,02	1,01	1,01
$\text{tg } \gamma = 0,02$	1,22	1,10	1,05	1,02
$\text{tg } \gamma = 0,03$	1,46	1,20	1,11	1,05
$\text{tg } \gamma = 0,04$	1,73	1,34	1,18	1,09
$\text{tg } \gamma = 0,05$	2,03	1,50	1,27	1,14

De bovenomschreven methode met een slecht doorlatende laag biedt misschien perspectief als met terrassen wordt gewerkt, zodat de hellinglengten niet al te groot worden. In verband met de zakking zou de uitvoering met sloten de voorkeur verdienen, vanwege het feit dat deze gemakkelijker te onderhouden zijn dan een drainagesysteem. Of de afsluitende laag in de praktijk werkelijk afsluitend zal zijn en ook in de toekomst afsluitend zal blijven is twijfelachtig. Voorlopig blijft het nog een probleem hoe een dergelijke afdeklaag in de praktijk moet worden aangelegd en hoe deze zal functioneren.

4.4. Beschrijving en berekening van de bovengrondse afvoer

Voor de beschrijving van het bovengrondse afvoerproces bestaan in de literatuur vele methoden die meer of minder fundamenteel het proces beschrijven. Doorgaans is hierbij het doel om de kans op grote afvoergolven in afwateringsgangen te voorspellen en om zodoende de dimensionering van de afwateringsgang daarop aan te passen.

KRAYENHOFF VAN DER LEUR (1973) geeft een uitvoerig overzicht van de verschillende methoden ter beschrijving van de bovengrondse afvoer. Vele van deze methoden zijn experimentele benaderingen, waarbij via metingen in het gebied de relaties tussen runoff en neerslagintensiteit worden vastgesteld om vervolgens de gevonden relaties te gebruiken voor voorspellingen. Hier volgen kort enkele van deze experimentele methoden:

a. The infiltration approach

Dit is de meest simpele methode, waarbij een infiltratie-index wordt berekend als de hoeveelheid neerslag minus runoff gedeeld door de neerslagduur. Hierbij wordt geen informatie verkregen over het afvoerproces en de factoren die er op van invloed zijn. Voor elke situatie moet opnieuw de infiltratie-index worden vastgesteld.

b. The graphical coaxial correlation method

Bij deze methode wordt rekening gehouden met het effect van de initiële vochttoestand van de bodem door het invoeren van een

Antecedent Precipitation Index (API). Tevens wordt rekening gehouden met seizoenschommelingen ten aanzien van vegetatie, bodemstructuur, bodemvochtuitputting door verdamping, e. a.

Ook hier moeten eerst de onderlinge relaties tussen runoff, regenintensiteit, initiële bodemvochttoestand en seizoeneffecten experimenteel worden vastgesteld.

c. The curve number method

Via een nomogram kan met behulp van een 'curve number' (CN) direct de runoff worden afgelezen als functie van de neerslagintensiteit. De CN-waarde wordt bepaald aan de hand van tabellen, waarbij rekening wordt gehouden met voorafgaande regenval, grondgebruik, gewasbedekking en bodemtype. De tabellen zijn opgesteld door de U.S. Soil Conservation Service voor typisch Amerikaanse situaties.

d. The unit hydrograph method

Voor een bepaald afvoergebied wordt eerst een zogenaamde 'unit hydrograph' vastgesteld, dit is een karakteristieke runoff curve voor een 'eenheidsbui' van 1 mm neerslag met een voor het gebied karakteristieke builengte. Deze builengte wordt zodanig klein gekozen dat de runoff curve qua vorm en tijdsduur niet meer merkbaar wordt beïnvloed door de neerslagverdeling binnen de bui. Door nu regenbuien te beschouwen als een somming van 'eenheidsbuien' van 1 mm neerslag met de karakteristieke builengte, kan de runoff curve worden gevonden door superpositie van de bij de eenheidsbuien behorende karakteristieke afvoercurven.

Naast de experimentele benaderingen bestaan ook meerdere meer fundamentele benaderingen. Zo heeft BOELS (1975, 1978) het bovengrondse afvoerproces beschreven, in navolging van HENDERSON en WOODING (1964) als de afvoer van water door een waterfilm op een effen hellend oppervlak. Hij gaat daarbij uit van de volgende conservatievergelijking:

$$\frac{\delta q}{\delta x} + \frac{\delta y}{\delta t} = N - I$$

waarin:

- q = debiet bovengrondse afstroming op plaats en x op de helling ($m^2 \cdot sec^{-1}$)
 y = dikte van de waterfilm (m)
 x = plaatscoördinaat (m)
 t = tijd (sec)
 N = neerslagintensiteit ($m \cdot sec^{-1}$)
 I = infiltratiesnelheid ($m \cdot sec^{-1}$)

Voorts wordt een functioneel verband verondersteld tussen het debiet en de waterdiepte, y , volgens

$$q = \alpha y^n$$

Hierin is n een constante, die afhangt van de soort stroming (turbulent of laminair, voor laminaire stroming is $n = 3$) en α is een maat voor de oppervlakteruwheid en de hellingshoek.

Voor de verdere uitwerking wordt verwezen naar BOELS (1975). Bij deze methode wordt een gemiddelde infiltratiesnelheid I berekend uit gemeten afvoergolven. Vervolgens kan dan het afvoerend oppervlak, dat in deze benadering onbekend is verondersteld, worden berekend. Ook de berging op het oppervlak is te berekenen.

Een andere mogelijkheid is om de runoff af te leiden uit een berekening van de infiltratiesnelheid. Een voorbeeld hiervan wordt gegeven door SMITH (1972). De infiltratiesnelheid wordt dan berekend met:

$$I = -K \left\{ \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)_{z=0} - 1 \right\}$$

Verder geldt de conserveringsvergelijking

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right]$$

waarin:

- I = infiltratiesnelheid aan het oppervlak ($cm \cdot min^{-1}$)
 K = onverzadigde doorlatendheid ($cm \cdot min^{-1}$)
 ψ = vochtspanning (cm)
 z = verticale afstand (cm)
 θ = vochtgehalte ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)
 t = tijd (min)

Door deze vergelijkingen numeriek op te lossen, waarbij de K - ψ en

$\psi - \theta$ relaties van een gegeven grond worden ingevoerd, kan de infiltratiesnelheid worden berekend voor verschillende neerslagintensiteiten en verschillende initiële vochtcondities in de bodem. Een voorbeeld van de aldus berekende infiltratiecurven is gegeven in fig. 8.

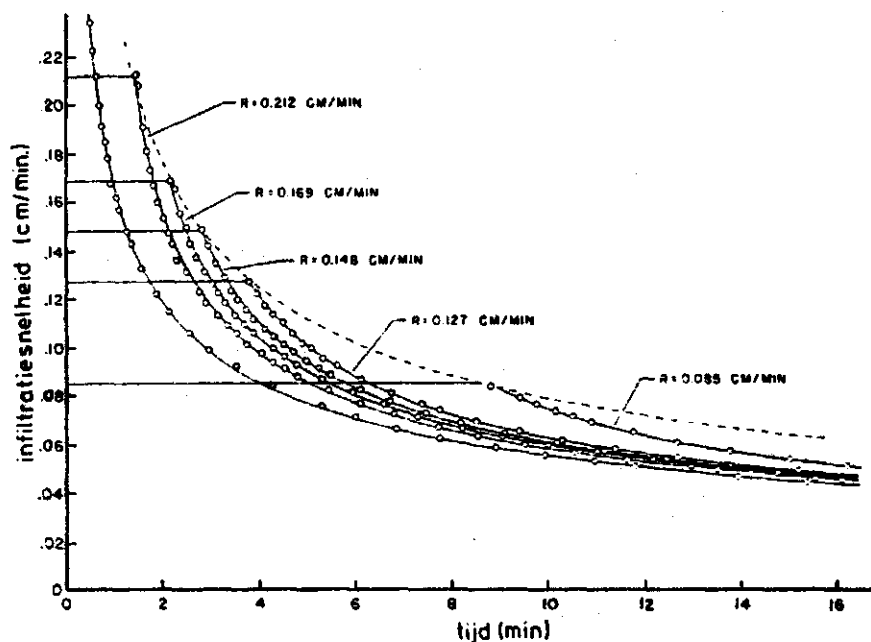


Fig. 8. Verloop van de infiltratiesnelheid met de tijd als functie van de neerslagintensiteit (naar SMITH, 1972)

De berekende infiltratiecurven bleken het best te worden benaderd met de vergelijking

$$I = I_{\infty} + A (t - t_0)^{-\alpha}$$

waarin:

I_{∞} = infiltratiesnelheid voor $t \rightarrow \infty$ (cm. min⁻¹)

t_0 = bodemconstante, waarvoor geldt $0 \leq t_0 \leq t_p$ als t_p de tijd voorgesteld nodig om plasvorming te bereiken (min)

A = bodemconstante (cm. min⁻¹)

α = bodemconstante

SMITH (1972) geeft de dimensie van A op als cm. min⁻¹. Dit is echter alleen juist als $\alpha = 1$. Voor door hem onderzochte gronden ligt α echter in de range 0,35 - 0,68. De waarde voor t_0 , A en α zijn bo-

demconstanten voor een bepaalde initiële vochttoestand en een gegeven neerslagintensiteit.

Een vergelijking die op de vorige lijkt is die van PHILIP (1957), waarin de infiltratiesnelheid omgekeerd evenredig is met $\sqrt{t}$.

$$I = I_{\infty} + A t^{-\frac{1}{2}}$$

Deze vergelijking is af te leiden uit de theorie van de onverzadigde waterstroming. De aanvankelijk snelle afname van de infiltratiesnelheid wordt hiermee goed verklaard. Voor langdurige infiltratie is dit model minder bevredigend.

Het numerieke model van WIND en VAN DOORNE (1974) en ook het elektrisch analogon van WIND (1979) gaan eveneens uit van de waterstroming in de onverzadigde zone. Ook met deze modellen is het dus mogelijk de infiltratiesnelheid te berekenen en daaruit vervolgens de bovengrondse afvoer af te leiden. Beide modellen geven een oplossing voor het één-dimensionale, verticale watertransport onder niet-verzadigde, maar wel relatief vochtige omstandigheden.

4.5. Toepassing van het UNSAT-model

Voor het onderzoek naar de oppervlakkige afstroming op stortplaat-
sen is niet alleen de bovengrondse afstroming van belang, maar ook de zijdelingse afvoer van water door de afdeklaag, eventueel in combinatie met een ontwateringssysteem (sloten, drains) in deze afdeklaag. Dit betekent dat een model voor een twee-dimensionale waterstroming moet worden gebruikt. Voorts is het wenselijk dat de afdeklaag in het model kan worden opgebouwd uit meerdere bodemlagen met sterk verschillende fysische eigenschappen. De eerder besproken modellen schieten op deze punten tekort.

Goed toepasbaar lijkt het model UNSAT 2 van NEUMAN e. a. (1974). Met dit model kan twee-dimensionale waterstroming worden berekend onder verzadigde en onverzadigde omstandigheden. Voorts is het mogelijk om rekening te houden met hellingen en verschillende bodemlagen in het systeem, terwijl ook de vochtopname door plantewortels en waterontrekking door drainagestelsels of pompputten kan worden ingevoerd.

De voordelen van dit programma zijn, dat op vrij eenvoudige wijze andere $K - \psi$ en $\psi - \theta$ relaties kunnen worden ingevoerd, zodat verschillende grondsoorten kunnen worden getest. Ook de neerslagintensiteit en de vochtopname door plantewortels kan eenvoudig worden gevarieerd. Hoewel de bovengrondse afvoer niet wordt berekend, is deze eenvoudig af te leiden uit de berekende infiltratiesnelheid en de neerslagintensiteit.

Met het model UNSAT zullen verschillende mogelijkheden voor de opbouw van de afdeklaag worden getest ten aanzien van de bovengrondse afstroming, zijdelingse afvoer door de afdeklaag en de kans op vorming van percolatiewater. Ook het effect van een drainagesysteem in de afdeklaag zal worden nagegaan.

5. UITVOERING VAN EXPERIMENTEN

In de literatuur worden verschillende technieken beschreven (zie o. a. KIRKBY, 1978; DUNNE, 1970; EMMET, 1970) om de bovengrondse afvoer experimenteel vast te stellen. Belangrijk daarbij is het construeren van een opvangsysteem en het frequent en liefst continu meten van de afvoersnelheid.

In veldexperimenten zal het effect van verschillende toplagen en de begroeiing op de bovengrondse afstroming worden getest. Soortgelijke experimenten zullen op kleinere schaal in het laboratorium worden uitgevoerd. In de veldexperimenten zal een afdekking van teelaarde op een slecht doorlatende laag worden onderzocht. Hierbij zal op de slecht doorlatende laag een drainagesysteem worden aangelegd. In verband met de praktische toepassing zal worden onderzocht welke materialen bruikbaar zijn voor het aanbrengen van een slechtdoorlatende laag. Hierbij kan namelijk behalve aan leem of klei ook worden gedacht aan bepaalde afvalstoffen die in grote hoeveelheden beschikbaar komen. Voorbeelden zijn de bij elektrische centrales vrijkomend vlieg-as, terwijl eventueel ook zuiveringsslib, havenslib of metaalhydroxyde slib kan worden gebruikt. Bij gebruik van dergelijke afvalstoffen dienen echter wel de milieuhygiënische consequenties te worden afgewogen.

In lysimeterbakken zullen verschillende materialen worden getest ten aanzien van doorlatendheid en infiltratiecapaciteit.

6. CONCLUSIES

In de literatuur worden meerdere voorstellen gedaan om de vorming van percolatiewater onder vuilstortplaatsen te beperken. Meerdere van deze voorstellen kunnen op grond van hydrologische berekeningen als onbruikbaar van de hand worden gewezen. Er zijn bovendien geen ervaringen beschikbaar met betrekking tot de praktische uitvoering van deze voorstellen.

Er blijken verschillende modellen beschikbaar te zijn voor het berekenen van de bovengrondse afstroming. Het meest aantrekkelijk lijkt de benadering via berekening van de infiltratiecapaciteit uit beschikbare $K - \psi$ en $\psi - \theta$ relaties. Uit experimenten kan een indruk worden verkregen van de berging van water op het oppervlak in relatie met de helling.

In verband met de zijdelingse afvoer door een hellende afdeklaag en het effect van een drainagesysteem in de afdeklaag is gekozen voor het UNSAT-model, waarmee verschillende opbouw mogelijkheden voor de afdeklaag zullen worden getest. Enkele van deze situaties zullen in het veld en het laboratorium experimenteel worden getoetst.

Ook de mogelijkheid van erosie zal in het onderzoek de nodige aandacht moeten krijgen. CARSON en KIRKBY (1972) geven uitvoerige informatie over erosieverschijnselen op hellingen en de factoren die daarbij een rol spelen.

7. LITERATUUR

A. Intekst geciteerde literatuur

- BOELS, D. 1975. Analyse afvoeren via zakputten op het slootdempingsproefveld te Kloosterburen. Nota 892, ICW, Wageningen.
- , 1978. Bovengrondse afstroming op kruisige zavelperdel en. Cultuurt. Tijdschr. 18 (nr. 4), p. 1-10.
- BOLT, G.H., e. a. 1965. Algemene Bodemkunde. Syllabus Kandidaatscollege Landbouw Hogeschool Wageningen. Deel II.

- BRUGGENWERT, M. G. M., 1966. Algemene Bodemkunde. Handleiding Kandidaatspracticum Landbouw Hogeschool. Wageningen.
- CARSON, M. A. and M. J. KIRKBY, 1972. Hillslope form and process. Cambridge University Press, 475 pp.
- DICTAAT AGROHYDROLOGIE, 1975. Landbouwhogeschool, Wageningen.
- DUNNE, T. and R. D. BLACK, 1970. An experimental investigation of runoff production in permeable soils. Water Res. Res. 6 (nr. 2).
- EHRIG, H. J., 1978. Beitrag zum quantitativen und qualitativen Wasserhaushalt von Mülldeponien. Veröff. Inst. für Stadtbauwesen, Heft 26. Techn. Univ. Braunschweig.
- EMMET, W. W., 1970. The hydraulics of overland flow on hillslopes. Geological Survey Prof. Paper 622 - A - Washington.
- FRANZIUS, V., 1977. Der Sickerwasserabfluss aus Mülldeponien. T. U. Darmstadt. Inst. für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Heft 16.
- , 1978. Der Wasserhaushalt von Deponien - eine wichtige Grösse für die Deponiepraxis. Müll und Abfall 11: 340-345.
- HAM, R. K. and C. R. ANDERSON, 1974. Pollutant production by refuse degradation in testlysimeters. Waste Age 5 (9), p. 33.
- HENDERSON, F. M. and R. A. WOODING, 1969. Overland flow and groundwater flow from a steady rainfall of finite duration. J. of Geophys. Res. 69, 8. p. 1531-1540.
- HOEKS, J., 1978. Kwantitatieve en kwalitatieve aspecten van het waterbeheer op het VAM-bedrijf in Wijster. Nota 1105, ICW, Wageningen.
- KIRBY, M. J. and R. J. CHORLEY, 1967. Through flow, overland flow and erosion. Bull. Intern. Assoc. Sci. Hydr. 12, p. 5-21.
- KNOCH, J., 1976. Sickerwassermenge und Massnahmen zur Verminderung der Sickerwassermenge von Hausmülldeponien. 2. Vertiefter Lehrgang für Abfallbeseitigung. T. U. Berlin. p. 36.

- KRAYENHOFF VAN DE LEUR, D.A., 1973. Rainfall-runoff relations and computational models. In: Drainage Principles and Applications II. Publikatie 16. ILRI, Wageningen.
- MESU, E.J., 1976. Gecontroleerd storten in Nederland. Publ. 1836, Stichting Verwijdering Afvalstoffen, Amersfoort.
- MORIN, J. and Y. BENYAMIN, 1977. Rainfall infiltration into bare soils. Water Res. Res. 13. (5) p. 813-817.
- NEUMAN, S.P., R.A. FEDDES and E. BRESLER, 1974. Finite element Simulation of flow in saturated - unsaturated soils considering water uptake by plants. Inst. of Soil and Water, Agric. Res. Organisation, Bet Dagan, Israel.
- NEUMAN, IJ, 1975. Anmerkungen zu den Aufsätzen. Hantge. E: Mülldeponie und Schutz des Grund- und Oberflächenwassers und Schoder, G. : Sicherung Massnahmen beim Betrieb einer geordneten Grossdeponie. Müll und Abfall 7. Heft 1. p. 27-28.
- PHILIP, J.R., 1957. The theory of infiltration: IV. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Service, 84:p. 257-264.
- , 1969. Theory of infiltration. Advances in hydrosience 5, p. 215-296.
- PHILIPS, R., 1979. Invloed van het plantendeck op de hydrologische kringloop. Basis rapport ten behoeve van de commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland. Maart.
- RIJTEMA, P.E., 1965. An analysis of actual evapotranspiration. Agric. Res. Rep. 659: 1 - 107.
- , 1970. Soil moisture forecasting. Nota 513, ICW. Wageningen.
- SCHODER, G., 1975. Sicherungsmassnahmen beim Betrieb einer geordneten Grossdeponie. Müll und Abfall 7. Heft 1. p. 4-14.
- SCHULZE, F.E., 1972. Bovengrondse afstroming. ILRI-publ. Wageningen.
- SMITH, R.E. and D.A. WOOLHISER, 1971. Overland flow on an infiltrated surface. Water Res. Res. , 7 (4), p. 899-913.
- SMITH, R.E., 1972. The infiltration envelop : Results from a theoretical infiltrometer. J. of Hydr. 17, p. 1-21.
- STEINBACH, W., 1968. Wasserlöslichkeit und Durchlässigkeit verschiedener Abfallarten. Stuttgarter Berichten zur Siedlungswasserwirtschaft, Heft 41, p. 63.

STIEF, K. , 1978. Massnahmen zur Erfassung und Verminderung von Sickerwasser aus Deponien. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft. Bd. 9.

—————, 1979. Zur Vorteilhaftigkeit der Verminderung von Sickerwasser durch Oberflächenabdichtung von Deponien. Wasser und Boden 9.

STICHTING VERWIJDERING AFVALSTOFFEN, 1974. Rapport V: Onderzoek bij de stortplaats Ambt-Delden, SVA 938, Amersfoort.

WIND, G. P. , 1979. Een eenvoudige relatie tussen afvoer, berging en neerslagintensiteit. Landbouwk. Tijdschr. 79, 4: 110-113.

—————, 1979. Analog modelling of transient moisture flow in unsaturated soil. Agric. Res. Rep. 894. Poduc, Wageningen. pp. 123.

WIND, G. P. en W. VAN DOORNE, 1974. A numerical model for the simulation of unsaturated vertical flow of moisture in soils. J. of Hydrology 24 (1/2).

B. Overige geraadpleegde literatuur

ANDERSON, M. G. en T. P. BURT, 1977. A laboratory model to investigate the soil moisture conditions on a drainage slope. J. of Hydr. 33, p. 383-390.

BECKER, A. , 1968. Modelkonzeption zur gesetzmässigen Erfassung Niederslag - Abfluss Beziehungen. Wasserwirtschaft- Wassertechnik 18(1): p. 16-21

BEITRAG zum quantitativen und qualitativen Wasserhaushalt von Mülldeponien. Inst. f. Stadtbauwesen, T. U. Braunschweig, Heft Heft 26, 1978.

BEUNDER, C. T. , 1976. Menge und Qualität von Sickerwasser. Versuche in den Niederlanden. Schriftenreihe Edelhoff, Heft 5, Hrg. Stadtreinigung KG. Edelhoff, Iserlohn.

BRUSTKERN en MOREL-SEYTOUX, 1975. Description of water and air movement during infiltration. J. of Hydr. 24, p. 21-35.

- CHOW, VEN TE and T.E. HARBAUGH, 1965. Raindrop production for laboratory watershed production. J. Geophys. Res. 70 (24), pp. 6111-6119.
- CLARK, T.P., 1965. Survey of groundwater protection methods for Illinois Landfills. Groundwater 13, pp. 321-331.
- CLUETT, R.W., 1977. Linings for containment of liquids. D.O.E. Construction no. 2. p. 18-22.
- DEKKER, L.W. en J. BOUMA, 1978. Relaties tussen de verticale verzadigde doorlatendheid van enige komkleigronden en het voorkomen van plasvorming. Cultuurt. Tijdschr. 18 (3): p. 126-142.
- EBBERS, W.J., 1976. Oppervlakte-afvoer op zware kleigraslanden. Cultuurt. Tijdschr. 15 (5), p. 267-247.
- FOSTER, G.R., L.F. HUGGINS and L.D. MEYER, 1968. Simulation of overland flow on short field plots. Water Res. Res. Vol. 4 (6). p. 1179-1187.
- FRESINIUS, W., K.H. KNOLL, H.W. LEONHARDT, H. TANGER-MANN und W. SCHNEIDER, 1977. Qualitative und Quantitative Untersuchung des Sickerwassers einer Hausmülldeponie mit Basisabdichtung. Müll und Abfall Heft 9. p. 190.
- HANTGE, E., 1975. Mülldeponie und Schutz des Grund- und Oberflächenwassers. Müll und Abfall 7. Heft 1. p. 1.
- HOORN, J.W. VAN, 1960. Grondwaterstroming in komgrond en de bepaling van enige hydrologische grootheden in verband met het ontwateringssysteem. Versl. van landbouwk. onderzoekingen. nr. 66 (10).
- HULL, J.E., 1978. The technology of plastic liners for area sealing of earth structures. Water Serv. vol. 82 (983) p. 27-28.
- INTERN. INST. LAND RECL. AND IMPROVEMENT, 1976. Publ. 20. Wageningen.
- JAMES, L.D., 1972. Hydrologic modelling, parameter estimation and watershed characteristics. J. of Hydr. 17, p. 283-307.
- KIRBY, M.J. (ed), 1978. Hillslope Hydrology. A Wiley Interscience Publication. John Wiley and Sons, New York.
- KNAPP, B.J., 1973. A system for the field measurement of soil water movement. Techn. Bull. Geomorph. Res. no. 9.

- KOCHLER, G., 1977. Simulativen von Monatssummen des Abflusses aus Niederschlagen. *Wasserwirtschaft* 67, 1977. Heft 2. p. 29.
- KOOPMANS, R.W.R., 1969. De bepaling van de verdamping met nomogrammen. *Cultuurt. Tijdschr.* (9), p. 76-85.
- NASSIF, S.H. and E.M. WILSON, 1975. The influence of slope rain intensity on runoff and infiltration. *Hydrological Sciences Bull.* XX, 4;12.
- NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK, 1974. Section 4, Hydrology. Soil Conservation Service, Washington, D.C., 1972.
- REE, W.O., 1939. Some experiments on shallow flows over a grassed slope. *Trans. Am. Geophys. Union*, 32, p. 582-590.
- SCHEELE, M.J., 1971. Inleiding in de mathematische benadering van oppervlakte-afstroming. *Meded.* 6, afd. Cultuurtechn. L.H., Wageningen.
- WALZ, D.H. und K. CHESTNUT, 1977. Landdisposal of Hazardous Wastes: An example from Hopewell, Virginia. *Groundwater*, Vol. 15 (1). p. 75-80.

- ABDEL-RAZOQ, AHMED Y., W. VRIESMAN en J.W. HERNANDEZ, 1967. A solution to the surface runoff problem. *J. of Hydr. Div. Proc. ASCE. Hy* 6, p. 335-352.
- ALBERT, H. Mutterboden Rutschungen an Böschungen. Forschungsarbeiten aus dem Strassenwezen, Neue Folge. Heft 51. Kirschboom-Verlag, Bad-Godesberg.