

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

NN31545.0892

ANALYSE AFVOEREN VIA ZAKPUTTEN OP HET
SLOOTDEMPINGSPROEFVELD TE KLOOSTERBUREN

ir. D. Boels

BIBLIOTHEEK
STATIONSBIBLIOTHEEK

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publikaties. Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten. Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking.

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS



0000 0102 0862

ISN = 318359-

I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. MEETMETHODEN	2
3. ANALYSE MEETRESULTATEN	6
3.1. Afvoermodel bij constante neerslag	6
3.2. Afvoermodel na beëindigen neerslag	10
3.3. Afvoermodel na verandering neerslagintensiteit	13
3.4. De aard van α en n	17
3.5. Interpretatie meetresultaten	19
4. ERVARING MET HET GEBRUIK VAN ZAKPUTTEN	29
5. SAMENVATTING EN CONCLUSIES	30
LITERATUUR	31

1. INLEIDING

In de kleimozaiekgebieden kunnen aanzienlijke baten per ha behaald worden door een betere kavelinrichting. Het rendement wordt echter overwegend bepaald door de omvang van het nodig grondverzet.

Toepassing van volledige egalisatie levert een investeringseffect van 3-5 %. Worden de laagten rond de kruinen echter niet volledig opgevuld, doch wordt volstaan met naar de sloten hellende laagtes in de lengterichting van het nieuw perceel, dan kunnen de investeringen met ca. 40 % beperkt worden.

Een besparing tot 60 % wordt verkregen door de in het nieuw perceel ontstane laagtes na slootdemping deels hellend in de richting van de nieuwe sloten af te werken, deels ze te laten hellen naar een centraal laag punt in het nieuw perceel. Op dit lage punt wordt een zakput gesitueerd van waaruit eventueel oppervlakkig afstromend water naar een sloot wordt afgevoerd (KESTER en SPRIK, 1974).

De zakput bestaat uit een betonbak, afgedekt met een hardhouten deksel waarop een laag schelpen ter dikte van ca. 0,5 m is gestort.

Welk alternatief de voorkeur verdient moet echter nader worden bepaald. Een van de bepalende factoren is de praktische bruikbaarheid van de zakputten en de wenselijkheid te beschikken over een inrichting om, voor zover dit optreedt, oppervlakkig afstromend water te kunnen afvoeren.

Om het functioneren van zakputten te bestuderen zijn de afvoeren uit de zakputten in de periode 1972 tot en met 1974 gemeten. Voor een nadere analyse van de oorzaak van de gemeten afvoeren zijn meetopstellingen gemaakt om oppervlakte-afvoeren en detail te kunnen meten op een kruin en een helling.

2. MEETMETHODE

Eén debietmeter bestond uit een pvc stijgbuis, inwendige diameter 200 mm, een uitstroompip, inwendige diameter 28 mm met een lengte van 50 mm, die steeds onder water uitmondt, en voorts een geperforeerde inlaatpijp en een geperforeerde vlotterbuis.

De perforaties dienen er voor om schommelingen in het waterniveau in de buis als gevolg van turbulente uitstroming te dempen, waardoor een nauwkeuriger registratie van het niveau mogelijk wordt.

Het niveau in de uitstroombak (fig. 1a) bleef constant doordat het slootpeil niet uitkwam boven het peil in de uitstroombak. In dit geval kon worden volstaan met alleen het meten van het niveau in de stijgbuis.

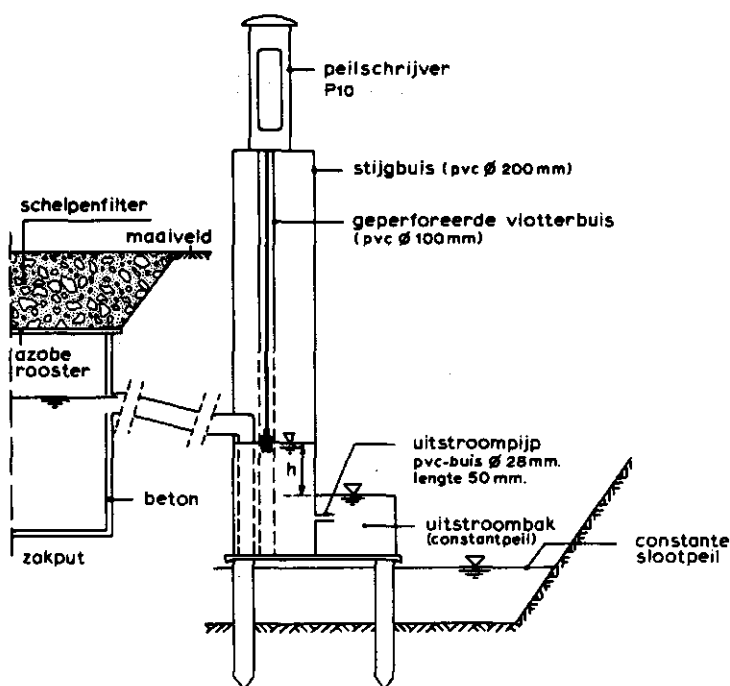


Fig. 1a. Schema opstelling debietmeting uit zakput

In een ander geval zou het nodig zijn geweest het verschil in peil in de buis en dat daarbuiten te meten. Het debiet is namelijk alleen afhankelijk van het peilverschil. Voor de hier beschreven

debietmeter hangt het debiet samen met het niveauverschil (h), volgens:

$$Q = 13\sqrt{h}$$

hierin is:

Q = debiet, l.mm⁻¹

h = verschil in peil in en buiten de stijgbuis, cm

Deze debietmeter was aangesloten op een zakput. Het niveau in de stijgbuis werd geregistreerd door een peilschrijver, voorzien van een wekklok.

Een tweede debietmeter bestaat uit een rechthoekige bak (1200 * 500 * 500 mm³) met in de voorzijde een V-schot (grootste breedte 100 mm, tophoek 25°). Een rooster op ca. 900 mm afstand van het V-schot dient voor demping van golven. Een peilschrijver, voorzien van een wekklok registreert het niveau in de bak ten opzichte van het peil waarbij juist geen afvoer optreedt.

Het debiet hangt samen met het bedoeld niveau volgens:

$$Q = 0.618 h^{2,2}$$

hierin is:

Q = debiet, l.mm⁻¹

h = hoogte overstort en de straal, cm

Deze debietmeter was aangesloten op twee, onderling gekoppelde zakputten.

Om de oppervlakte-afvoer op kleine schaal te meten werden goten met een lengte van 4 m ingegraven. Om lekverliezen te voorkomen, werd een plastic strip deels in de grond en deels overhangend over de rand van de goot aangebracht. Ongeveer 10 m hoger op de helling werd een tweede goot ingegraven om de oppervlakte-afvoer op de daarboven gelegen helling op te vangen en weg te leiden. Het op de eerste goot afwaterend oppervlak werd hierdoor begrensd (fig. 1b). Het afstromend water werd in een bak opgevangen (ca. 400 x 400 x 300 mm³) en het peil in de bak door een peilschrijver, voorzien van een wekklok, geregistreerd. Zodra een zeker hoog peil bereikt is, wordt de bak leeg

geheveld. De hevelinrichting bestaat uit een soort balans met verschuifbaar contragewicht. Een stijgend peil in de bak, betekent dat de rechterarm van de balans (fig. 1b) meer belast wordt. De balans is zodanig afgesteld, dat de rechterarm naar beneden gaat voor het water uit de hevelbuis stroomt wanneer deze nog in geheven positie is. Alleen in dat geval is een goede hevelwerking verzekerd. De balansarmen, waarvan er twee onderling gekoppeld gemonteerd zijn, zijn afkomstig uit een zelfregistrerende regenmeter, type KNMI.

De meetinrichting werd opgesteld in een perceel wintertarwe begin december 1972 en heeft ca. twee maanden bevredigend gefunctioneerd. Daarna werd de bruikbaarheid geringer doordat de hevelbuis regelmatig dichtslibde en het balansdraaipunt corrodeerde ten gevolge van zoutafzettingen.

De neerslag werd met een zelfregistrerende regenmeter bepaald, terwijl de grondwaterstanden deels continu deels met de hand, maar dan met tijdsintervallen van een week werden gemeten.

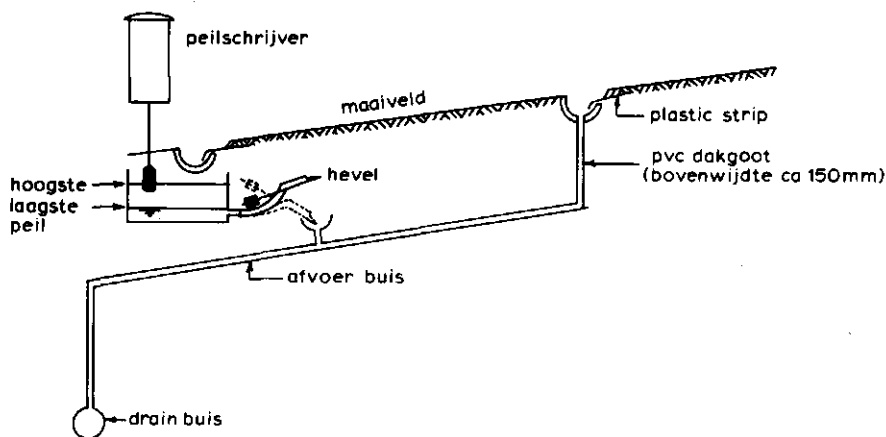


Fig. 1b. Schema meetopstelling voor oppervlakte-afvoeren

In fig. 2 is de situering van het proefobject weergegeven.

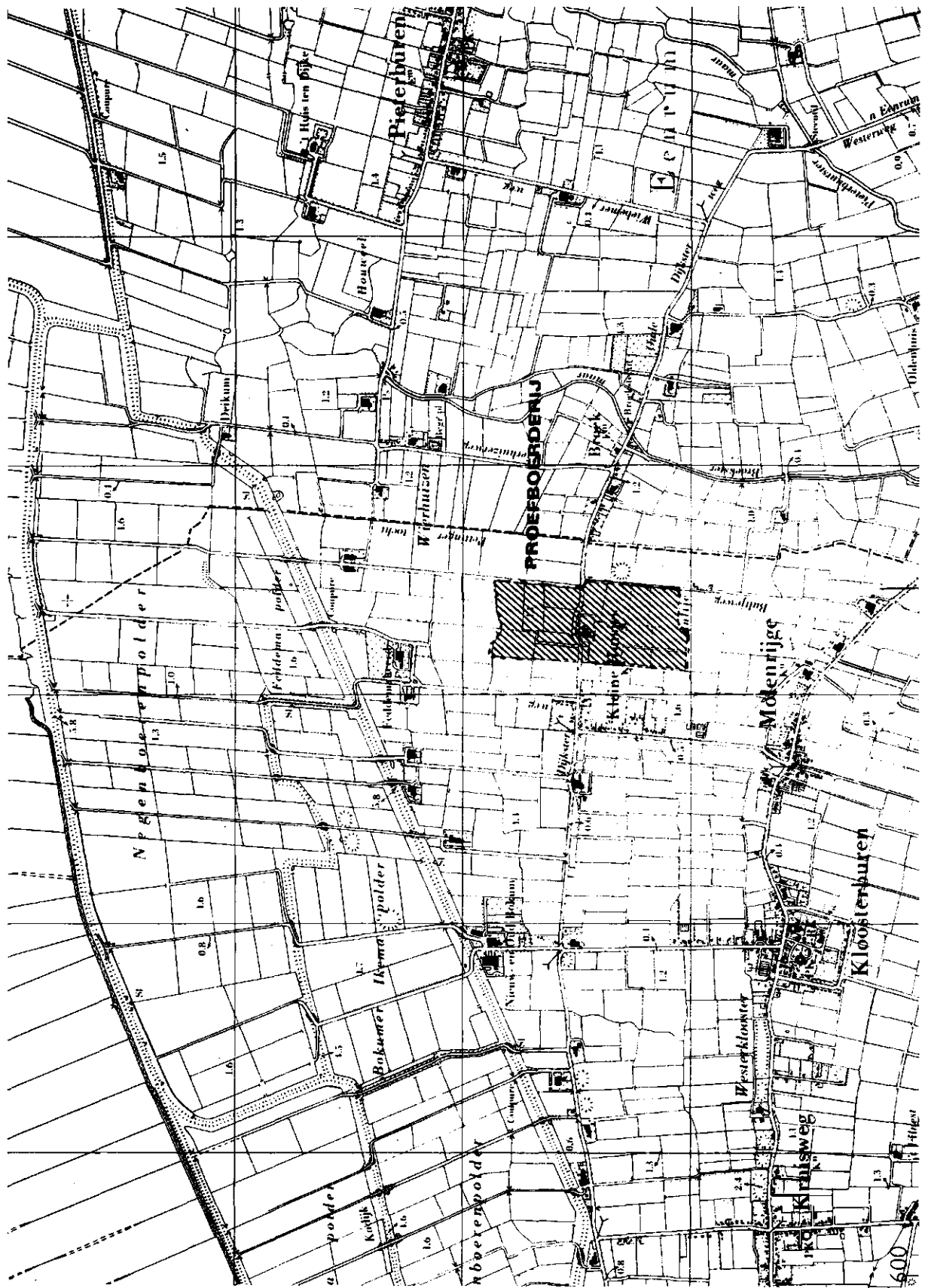


Fig. 2. Situering proefobject

3. ANALYSE MEETRESULTATAN

3.1. Het afvoermodel bij constante neerslag

Oppervlakte-afvoer ontstaat indien de infiltratiesnelheid geringer is dan de neerslagintensiteit terwijl de neerslagsom de totale infiltratie vermeerderd met de oppervlakteberging en eventuele interceptie, juist overtreft.

Een te geringe infiltratiesnelheid kan zijn veroorzaakt door een slecht capillair geleidingsvermogen (er ontstaat dan een waterspiegel boven de grondwaterspiegel) of door een te geringe drainage intensiteit, waardoor de grondwaterspiegel tot aan of juist boven het maaiveld stijgt.

De optredende oppervlakte-afvoer kan mathematisch worden beschreven door combinatie van de continuïteitsvergelijking (wet voor behoud van massa) en de gangvergelijking (wet voor behoud van energie).

Een overzicht van de gangbare oplossing voor de gecombineerde vergelijkingen is gegeven door SCHEELE (1971). Voor de analyse van de gemeten afvoergolven wordt hier uitgegaan van de benadering van HENDERSON en WOODING (1964).

Deze benadering houdt in dat de invloed van de energie-uitwisseling tussen neerslag en afstromend water verwaarloosd mag worden, evenals de mogelijk optredende versnellingskrachten wanneer er nog geen evenwicht is tussen afvoer en neerslag en de stroomsnelheid nog verandert. Een verdere aanname is dat het oppervlak bij benadering effen is en in één richting helt, terwijl de oppervlakte-afvoer zich manifesteert als een waterschijf met niet overal dezelfde dikte. Deze dikte, die afhangt van de tijd, het neerslagoverschot en de plaats op de helling, kan dan worden opgelost uit de continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = (N - I) \quad (3.1.1)$$

hierin is:

q = debiet $m^2 \cdot sec^{-1}$

y = waterdiepte, m

x = plaatscoördinaat, m

t = tijd, sec.

N = neerslagintensiteit, m.sec⁻¹

I = infiltratiesnelheid, m.sec⁻¹

Voorts wordt een functioneel verband tussen het debiet en de watterdiepte verondersteld volgens:

$$q = \alpha y^n \quad (3.1.2)$$

Hierin is α een constante, die afhangt van de soort stroming (turbulent of laminair), de oppervlakte ruwheid en de hellingshoek.

Combinatie van (3.1.1) en (3.1.2) levert:

$$\alpha n y^{n-1} \cdot \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = (N - I) \quad (3.1.3)$$

met als randvoorwaarden

$$t = 0 \quad y = 0, \quad 0 < x < L \quad (3.1.4)$$

$$t = 0, \quad y = 0, \quad x = 0 \quad (3.1.5)$$

$$t = t(e), \quad q(L) = (N - I) \cdot L \quad (3.1.6)$$

($t(e)$, tijdstip waarop er juist evenwicht is tussen neerslag en afvoer). De lengte van de helling is L . Aangenomen is dat er aan het einde van de helling een soort lange overlaat is, zodanig dat de watterdiepte slechts over een verwaarloosbaar kleine afstand stroomopwaarts wordt beïnvloed.

De vergelijking (3.1.2) is door Henderson en Wooding met behulp van de methode van de karakteristieken opgelost. Deze methode houdt in dat (3.1.3) simultaan wordt opgelost voor respectievelijk t constant en x constant, zodat in een zeker traject van x , $x_e < x < L$:

$$y(t) = (N - I) \cdot t \quad (3.1.7)$$

en op een bepaald tijdstip t geldt ($x < x_e$)

$$y(x) = \left\{ \frac{(N - I) \cdot x}{\alpha} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (3.1.8)$$

Hierin is x_e de coördinaat tot waar er in het bovenstroomsgebied evenwicht bestaat tussen neerslag en afvoer.

De oplossing houdt in, dat de waterspiegel stijgt met een snelheid gelijk aan $(N - I)$, tot een diepte is bereikt die overeenkomt met de evenwichtssituatie.

In fig. 3 is schematisch weergegeven op welke wijze de waterdiepte zich in opeenvolgende perioden ontwikkeld. Op een rekestijdstip is in het gebied $0 < x < x_1$ de evenwichtssituatie bereikt, terwijl in $x_1 < x < L$ de waterspiegel evenwijdig loopt aan het maaiveld (project OAB) op een volgend tijdstip is project OA'B' bereikt.

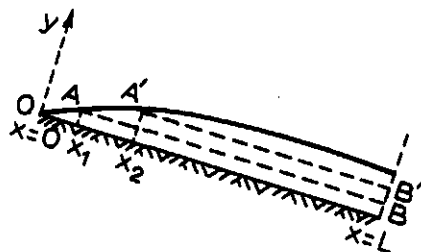


Fig. 3. Schematische weergave ontwikkeling waterdiepte profiel in de tijd

De snelheid waarmee het punt A zich beweegt is:

$$v = \frac{\partial q}{\partial y} = \alpha n y^{n-1} \quad (3.1.9)$$

De tijd die nodig is om de afstand x_e te overbruggen is op te lossen uit gelijkstelling van:

$$\int_{x_e} dx = \int_t v dt \quad (3.1.10)$$

Substitutie van (3.1.7) en (3.1.9) in (3.1.10) levert uiteindelijk:

$$t_{e,x} = \left(\frac{x_e}{\alpha(N - I)^{n-1}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.1.11)$$

De afvoer in $x = L$ wordt nu verkregen door substitutie van respectievelijk (3.1.7) en (3.1.8) in (3.1.2):

$$q(L, t) = \alpha(N - I)^n t^n, \quad t < t_{e,L} \quad (3.1.12a)$$

$$q(L, t) = L(N - I), \quad t > t_{e,L} \quad (3.1.12b)$$

Om de oplossing van Henderson en Wooding te toetsen, is langs numerieke weg de vorm van de waterspiegel berekend uit vergelijking (3.1.3) op een helling van 20 m lang, bij een constante neerslagoverschot van $3,472 \cdot 10^{-8} \text{ m.sec.}^{-1}$ (3 mm.etm^{-1}) en een verhang van 0,05.

De randvoorwaarden (3.1.4) tot en met (3.1.6) werden toegepast, terwijl een tijdsinterval 500 sec. en afstandsinterval 1 m werd genomen. Voor n werd de waarde 3 en voor α , $1255 \text{ cm}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ gebruikt.

In fig. 4 zijn de resultaten weergegeven. Duidelijk blijkt dat de berekende vorm van de waterspiegel de in fig. 3 geschematiseerde vorm op verschillende tijdstippen goed benadert. In het gebied waar evenwicht bestaat tussen neerslag en afvoer valt het numeriek berekend evenwichtsprofiel niet samen met het analytisch berekend profiel. De oorzaak hiervan is dat de tijdsintervallen en de afstandsintervallen te groot gekozen zijn.

Geconcludeerd mag dan ook worden, dat de oplossing van Henderson en Wooding goed is.

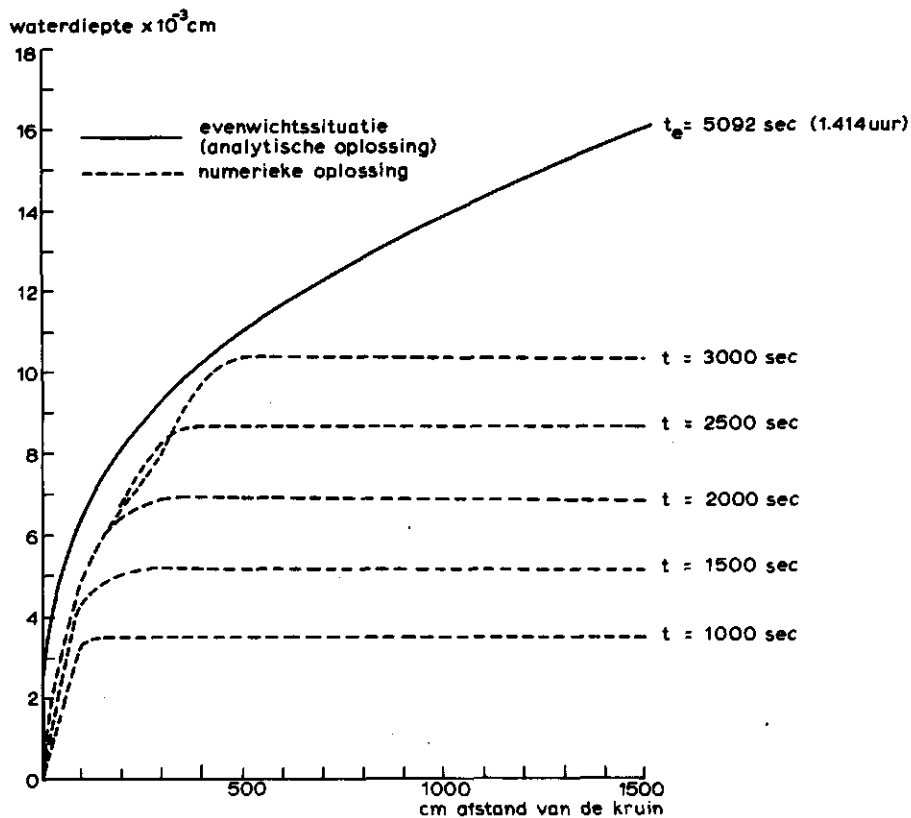


Fig. 4. Numerieke benadering waterdiepte-profiel op verschillende tijdstippen na begin neerslag (neerslag $3.472 \cdot 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ ($3 \text{ mm} \cdot \text{etm}^{-1}$))

3.2. Het afvoermodel na het stoppen van de neerslag

Er kunnen twee gevallen worden onderscheiden:

- a. in $x = L$ heerst een evenwichtssituatie;
- b. in $x = L$ is deze situatie nog niet bereikt.

De afvoer zal stoppen op het moment, dat de waterdiepte in $x = L$ juist 0 is.

Een willekeurig punt B op het oppervlak van het evenwichtsprofiel heeft een snelheid $V = \alpha y^{n-1}$ op het moment dat de neerslag juist stopt. Het punt B (fig. 5) gedraagt zich als een golf, waarvan de snelheid alleen wordt bepaald door de waterdiepte y . Indien de infiltratiesnelheid constant blijft, kan uit (3.2.1) worden afgeleid wanneer het punt B in $x = L$ is aangekomen:

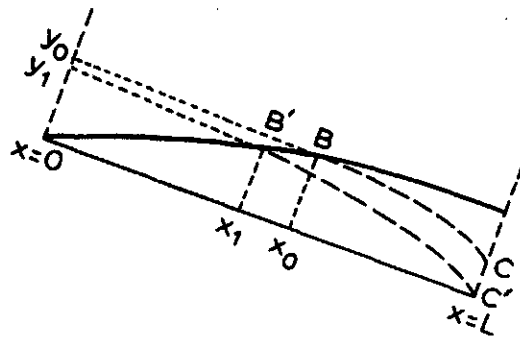


Fig. 5. Stroombaan van een punt, oorspronkelijk op het evenwichtsprofiel, na beëindigen van de neerslag voor $I > 0$

$$\int_{x_0}^L dx = \alpha n \int_0^t (y_0 - It)^{n-1} dt \quad (3.2.1)$$

Nu is $x_0 = \frac{\alpha y_0^n}{(N-I)}$, zodat de oplossing voor t (tijdsduur na beëindigen neerslag) luidt:

$$t = \frac{y_0}{I} - \left\{ \frac{N}{N-I} \cdot \left(\frac{y_0}{I}\right)^n - \frac{L}{\alpha I^{n-1}} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (3.2.2)$$

Nu zal er een punt op het evenwichtsprofiel zijn waarvoor $y = 0$ op het moment, dat dit punt in $x = L$ is aangekomen. Was de oorspronkelijke waterdiepte y_1 , dan moet in $x = L$ juist gelden:

$$y_1 - It_s = 0 \quad (3.2.3)$$

Wordt (3.2.3) in (3.2.1) gesubstitueerd, dan ontstaat:

$$t_s = \left\{ \frac{(N-I) \cdot L}{\alpha N I^{n-1}} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (3.2.4)$$

waarmee de tijdsduur na beëindiging van de neerslag gevonden is waarop

de afvoer juist 0 is.

Deze tijdsduur wordt ook gevonden door de term $\left\{ \dots \right\}^{\frac{1}{n}}$ in (3.2.2), 0 te stellen, en uit de aldus verkregen vergelijking, de verhouding $\frac{y_0}{I} = t_s$ op te lossen.

Indien de infiltratiesnelheid ten opzichte van het neerslagoverschot verwaarloosbaar klein is, kan het uit (3.2.1) worden afgeleid voor $I_t = 0$:

$$t = \frac{L}{\alpha y_0^{n-1}} - \frac{y_0}{n(N-I)} \quad (3.2.5)$$

In het voorgaande is aangenomen dat op het moment waarop de regen ophoudt, er in $x = L$ een evenwichtssituatie heerst. Is dat niet het geval, dan hebben alle punten op het waterprofiel in het gebied $x_e < x < L$ dezelfde snelheid.

Zij de waterdiepte in het bedoeld traject y_0 op het moment dat het ophoudt te regenen. Indien er in dit traject een punt op de waterpiegel is waarvoor de snelheid in $x = L$ juist 0 is op het moment dat het daar verschijnt (dus $y = 0$), dan was de coördinaat van dit punt:

$$x = L - \frac{\alpha y_0^n}{I} \quad (3.2.6)$$

wat uit (3.2.1) kan worden afgeleid.

In het hier bedoeld geval moet gelden

$$x > x_e \quad (3.2.7)$$

met:

$$x_e = \frac{\alpha y_0^n}{(N-I)} \quad (3.2.8)$$

Het tijdstip waarop de afvoer in $x = L$ juist 0 is wordt gevonden uit:

$$t_s = \frac{y_0}{I} \quad (3.2.9)$$

Geldt (3.2.7) echter niet, dan kan (3.2.4) toegepast worden voor de bepaling waarop de afvoer juist 0 is.

Om nu de afvoer na beëindiging van de neerslag te kunnen berekenen, moet het verband tussen de waterdiepte in $x = L$ en de tijd bekend zijn. Samengevat wordt $y(L,t)$ voor de onderscheiden gevallen berekend uit:

$$a_0 : \text{Evenwicht in } x = L \text{ op } t = 0, I = 0 \quad : y(L,t) \text{ uit (3.2.5)}$$

$$a_1 : \text{Evenwicht in } x = L \text{ op } t = 0, I > 0 \quad : t_s \text{ uit (3.2.4)}$$

$$y(L,t) \text{ uit (3.2.2), } t < t_s$$

$$b_0 : \text{Geen evenwicht in } x = L \text{ op } t = 0, I = 0: t_c = \frac{L - x_e}{\text{any}(L,0)^{n-1}}$$

$$x_e \text{ uit (3.2.8)}$$

$$y(L,t) = \begin{cases} y(L,0) & , t < t_c \\ \text{uit (3.2.5), } & t \geq t_c \end{cases}$$

$$b_1 : \text{Geen evenwicht in } x = L \text{ op } t = 0, I > 0: x \text{ uit (3.2.6)}$$

$$x_e \text{ uit (3.2.8)}$$

Hieruit volgen de mogelijkheden:

$$b_{1,1}: x \leq x_e \quad : t_s \text{ uit (3.2.4)}$$

$$t_c \text{ uit (3.2.2) voor } y_0 = y(L,0)$$

$$y(L,t) = \begin{cases} y(L,0) - It & , t < t_c \\ y_0 - It, & t \geq t_c, y_0 \text{ uit (3.2.2)} \end{cases}$$

$$b_{1,2}: x > x_e \quad : t_s = \frac{y(L,0)}{I}$$

$$y(L,t) = y(L,0) - It \quad , t \leq t_s$$

3.3. Het afvoermodel na verandering neerslagintensiteit

In het navolgende wordt er steeds van uitgegaan, dat de neerslagintensiteit plotseling verandert en dan een redelijk lange tijd constant blijft. Als eerste geval wordt genomen een situatie waar even-

wicht heerst $x = L$ en de neerslagintensiteit verandert met een hoeveelheid ΔN , terwijl de infiltratiesnelheid constant blijft.

Wanneer een waarnemer met de stroom mee zou lopen, met een snelheid gelijk aan de oorspronkelijke locale snelheid, dan ziet deze waarnemer de waterspiegel stijgen met een snelheid $\frac{dy}{dt} = \Delta N$. (N.B. deze stijging geldt alleen in het bewegend coördinatenstelsel). In $x = L$ wordt eenzelfde stijgsnelheid waargenomen, tot het moment waarop er een nieuwe evenwichtssituatie ontstaat, hetgeen op tijd t_s gebeurt.

Derhalve is:

$$t_s = \frac{y(L, t_s) - y(L, 0)}{\Delta N}$$

$$= \frac{1}{\Delta N} \cdot \left(\frac{L}{\alpha}\right)^{\frac{1}{n}} \left\{ (N + \Delta N - I)^{\frac{1}{n}} - (N - I)^{\frac{1}{n}} \right\} \quad (3.3.1)$$

$$\text{en } y(L, t) = y(L, 0) + \Delta N \cdot t \quad , \quad t \leq t_s \quad (3.3.2)$$

Heerst er echter op het moment waarop de neerslag verandert geen evenwicht in $x = L$, dan moeten twee gevallen onderscheiden worden:

- a. de neerslagintensiteit neemt toe of
- b. de neerslagintensiteit neemt af.

In het geval $\Delta N > 0$, kan aangenomen worden dat het tijdstip waarop een evenwichtssituatie ontstaat die bij de nieuwe toestand hoort gelijk is aan:

$$t_s = \frac{y(L, t_s) - y(L, 0)}{N + \Delta N - I}$$

$$= \left(\frac{L}{\alpha}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot (N + \Delta N - I)^{\frac{1-n}{n}} - \frac{y(L, 0)}{N + \Delta N - I} \quad (3.3.3)$$

De waterdiepte in $x = L$ is dan:

$$y(L, t) = y(0, t) + (N + \Delta N - I) t \quad , \quad t \leq t_s \quad (3.3.4)$$

Is echter $\Delta N < 0$ en $y(L, 0)$ kleiner dan de bij $(N + \Delta N - I)$ behorende evenwichtswaterdiepte in $x = L$, dan zal een punt op de waterspiegel,

dat zich op $t = t_s$ in $x = x_e$ bevond, stijgen met een snelheid $(N + \Delta N - I)$ tot het is aangekomen in $x = L$.

Het tijdstip waarop dat gebeurt wordt afgeleid uit:

$$\int_{x_e}^L dx = \int_{t_s}^{t_s + t_e} v_{x,t} dt \quad (3.3.5)$$

Nu is

$$y_t = y_0 + (N + \Delta N - I) \cdot t$$

$$x_e = \frac{\alpha y_0^n}{(N - I)}$$

$$v_{x,t} = \alpha n y_t^{n-1}, \text{ zodat:}$$

$$t_e = \frac{1}{N + \Delta N - I} \left\{ \left(\frac{N + \Delta N - I}{\alpha} \cdot L - \frac{\Delta N}{(N - I)} \cdot y_0^n \right)^{\frac{1}{n}} - y_0 \right\} \quad (3.3.6)$$

De waterspiegel in $x = L$ zal stijgen boven de evenwichtswater-spiegel. De oorzaak hiervan is dat x_e , behorende bij $(N - I)$ en $y(L,0)$ kleiner is dan de x -waarde die hoort bij $(N + \Delta N - I)$ en $y(L,0)$, zodat het bewust punt een langere weg aflegt voor het in $x = L$ aankomt dan een overeenkomstig punt op het evenwichts-waterdiepte profiel behorend bij de neerslagintensiteit $(N + \Delta N - I)$.

Het verschil in weglengte volgt uit de gelijkstelling:

$$x_e (N - I) = \alpha y(L,0)^n = (x_e + \Delta x) (N + \Delta N - I) \quad (3.3.7)$$

Dus:

$$\Delta x = - \frac{\Delta N}{N + \Delta N - I} \cdot x_e \quad (3.3.8)$$

In fig. 6 is Δx schematisch weergegeven. De waterdiepte in $x = L$ zal direct nadat het bedoeld punt daar is aangekomen weer gaan dalen.

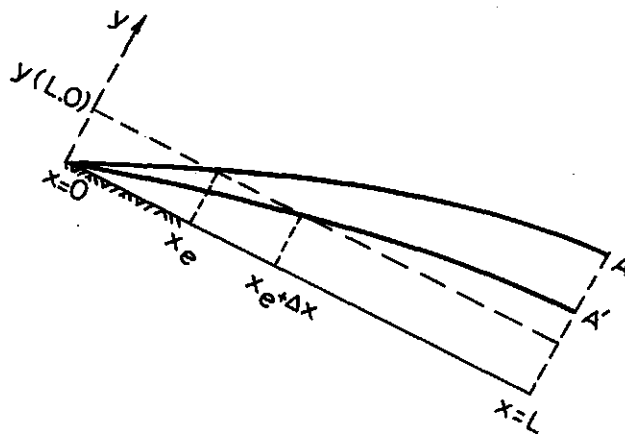


Fig. 6. Verband tussen waterdiepte en afstand op een helling
 OA - evenwichtsprofiel, behorend bij $(N - I)$
 OA' - evenwichtsprofiel, behorend bij $(N + \Delta N - I)$
 $y(L,0)$ waterdiepte in $x = L$ op $t < t_e$

Verondersteld wordt dat de bereikte waterdiepte een evenwichts-
 diepte is die hoort bij een neerslag $> (N + \Delta N - I)$. De bijbehorende
 fictieve neerslag kan worden berekend, evenals het fictief verschil
 ΔN^x . De tijd die verloopt tussen het moment waarop de grootste water-
 diepte werd bereikt en het moment waarop de evenwichtswaterdiepte,
 behorend bij $(N + \Delta N - I)$ is ingesteld, kan met (3.3.1) worden bere-
 kend. De waterdiepte in $x = L$ gedurende die tijd is dan:

$$y(L,t) = y(L,t_e) + \Delta N^x(t - t_e) \quad (3.3.9)$$

In fig. 7 is tot slot schematisch weergegeven hoe het verloop
 is van de oppervlakte-afvoer voor verschillende waarden van α . Voor
 $\alpha(1)$ wordt vrij snel de evenwichtswaterdiepte bereikt, waarna de af-
 voer constant blijft tot het moment waarop de neerslagintensiteit ver-
 andert. Op dat moment verandert ook de afvoer, tot weer een evenwicht
 is bereikt. Na beëindigen van de neerslag daalt de waterdiepte snel
 vanaf het moment van beëindigen. Voor $\alpha(2)$ wordt in de eerste regen-
 periode geen evenwichtswaterdiepte bereikt, zodat de afvoer blijft
 toenemen bij afnemende neerslag. De afvoer stijgt zelfs even boven
 de neerslagintensiteit in de tweede periode. Na het maximum bereikt
 te hebben daalt de afvoer snel tot de evenwichtssituatie. Na beëindi-
 gen van de neerslag neemt de afvoer direct af. Echter minder snel dan
 bij (1).

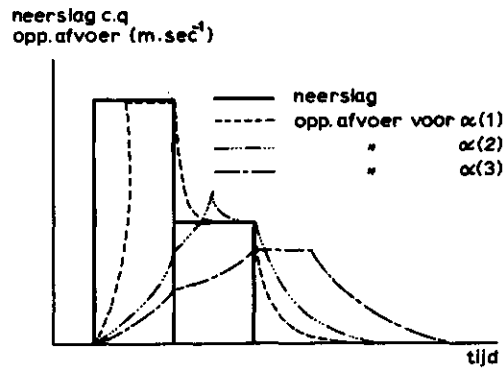


Fig. 7. Oppervlakte-afvoer, geïnduceerd door variabele neerslag, bij verschillende waarden van α :
 $\alpha(1) \gg \alpha(2) \gg \alpha(3)$

Voor $\alpha(3)$ wordt in geen van de neerslagperioden een evenwichts-situatie bereikt, zodat de afvoer na beëindigen van de neerslag nog een tijd constant blijft, waarna ook deze afneemt. Aangenomen is dat de infiltratiesnelheid hier nagenoeg 0 is.

3.4. De aard van α en n

Van de optredende stroming, kan worden aangenomen, dat deze laminaire is. Een laminaire stroming is op te vatten als parallel aan elkaar, over elkaar glijdende vlakken, waar tussen een wrijvingskracht optreedt, die evenredig is met de gradiënt van de snelheid, loodrecht op de stroomrichting.

Voor een permanente, niet veranderlijke stroming geldt (zie fig. 8) dat er steeds evenwicht is tussen alle optredende krachten. In vlak A'B heerst een hydrostatische druk

$$\int_y^{y_0} \rho g s ds = \frac{1}{2} \rho g (y_0^2 - y^2) \quad (3.4.1)$$

In vlak C'D heerst een evengrote hydrostatische druk, doch tegengesteld gericht aan die in A'B:

$$- \frac{1}{2} \rho g (y_0^2 - y^2) \quad (3.4.2)$$

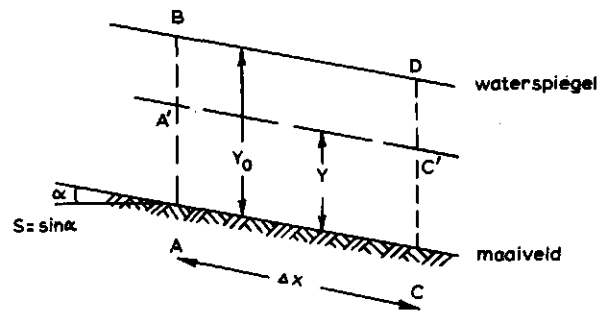


Fig. 8. Gemeten afvoergolven, neerslag en grondwaterstand

Een component van de zwaartekracht evenwijdig aan het vlak, met helling S_0 , heeft de grootte

$$\rho g (y_0 - y) \cdot \Delta x \cdot S_0 \quad (3.4.3)$$

Tegengesteld gewicht aan deze kracht werkt een wrijvingscomponent, die afhangt van de viscositeit ν , en de gradiënt van de snelheid:

$$- \nu \cdot \frac{dv}{dy} \cdot \Delta x \quad (3.4.4)$$

Daar er evenwicht is, is de som van alle krachten 0, dus is uiteindelijk:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{\rho g S_0}{\nu} (y_0 - y) \quad (3.4.5)$$

De randvoorwaarde is $v = 0$, $y = 0$, zodat de oplossing van (3.4.5) luidt:

$$v(y) = \frac{\rho g S_0}{\nu} (y_0 y - \frac{1}{2} y^2) \quad (3.4.6)$$

Het totaal debiet door een doorsnede is:

$$\int_0^{y_0} v(y) dy \quad (3.4.7)$$

oftewel:

$$q = \frac{\rho g S_0}{3\nu} \cdot y_0^3 \quad (3.4.8)$$

Hieruit volgt dus dat $\alpha = \frac{\rho g \cdot S_0}{3\nu}$ en $n = 3$ voor laminaire stroming. In de praktijk zal echter de op deze wijze berekende waarde van α te hoog blijken te zijn, daar het maaiveld nooit zo vlak is als in de schematisering is bedoeld. Een correctie op S_0 zal veelal nodig zijn. Uit een gemeten afvoergolf is echter α op te lossen.

3.5. Interpretatie met resultaten

3.5.1. Bepaling afwaterend oppervlak en α/L

Indien na het beëindigen van de neerslag de oppervlakte-afvoer nog gedurende Δt optreedt, geldt vanaf het moment dat de oppervlakte-afvoer begint:

$$\int_0^T q(t) dt - A \cdot \int_0^{T-\Delta t} (N(t) dt - A \int_0^T I(t)) = 0 \quad (3.5.1.1)$$

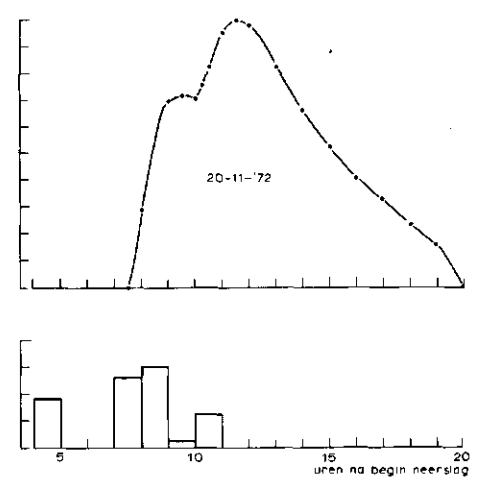
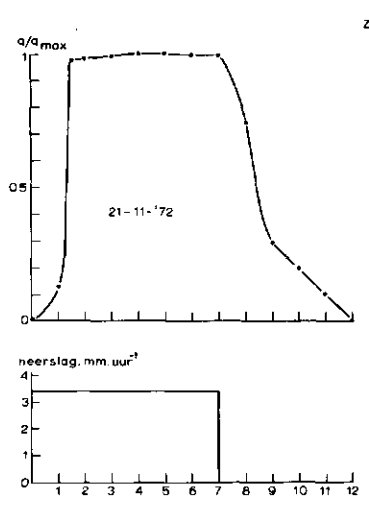
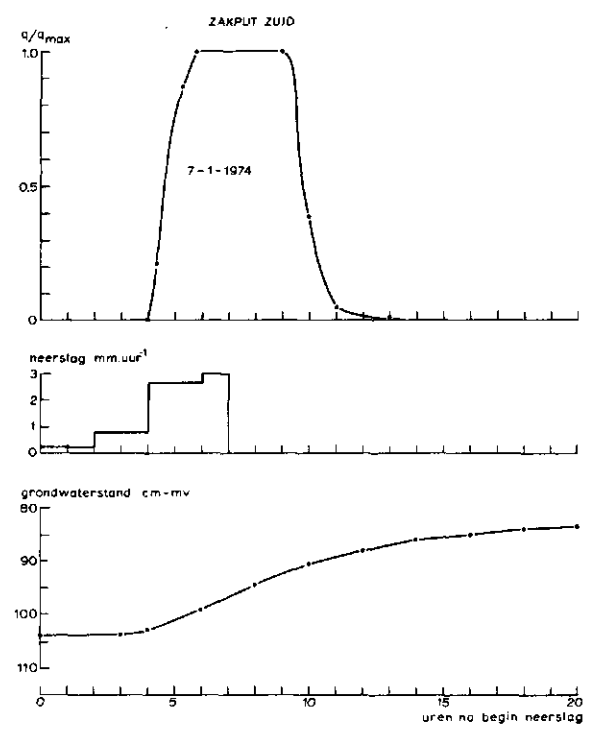
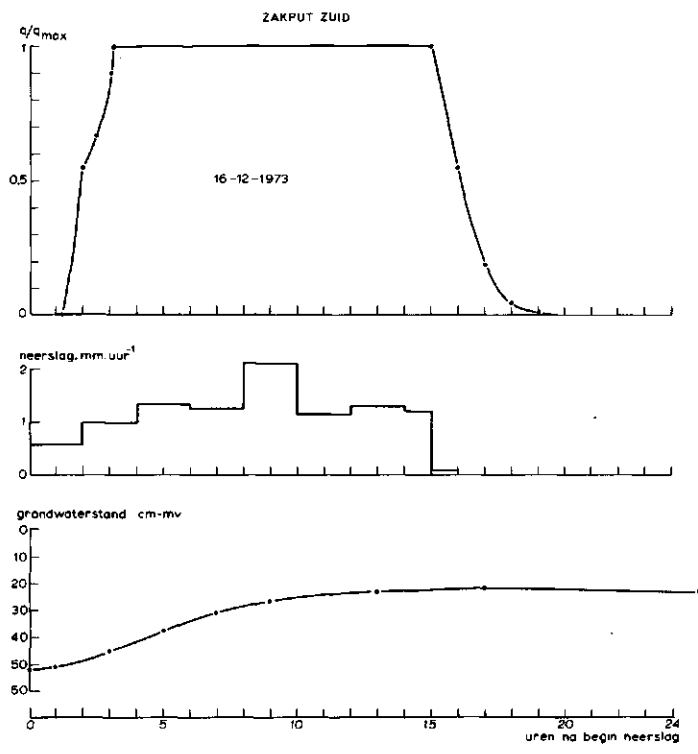
Hierin is A het afwaterend oppervlak.

De functie $I(t)$ kan niet bepaald worden, wel echter de gemiddeld infiltratiesnelheid I .

Door combinatie van de vergelijkingen (3.1.11) en (3.2.4) onder eliminatie van $\frac{\alpha}{L}$, worden de gelijkheden gevonden: ($n = 3$)

$$\frac{\alpha}{L} = \frac{N_1 - I}{N_1 I^2 \cdot t_s^3} = \frac{1}{(N_0 - I)^2 \cdot t_e^3} \quad (3.5.1.2)$$

Hierin is N_0 de gemiddelde neerslagintensiteit in de periode dat de oppervlakte-afvoer begint en tot evenwicht komt met de neerslag. N_1 is de gemiddelde neerslag in de laatste periode. Ook daarin is er in de hier gehanteerde afleiding, evenwicht tussen neerslag en afvoer.



Combinatie van de rechter twee termen in (3.5.1.2) leidt tot:

$$I^3 + \left\{ \left(\frac{t_s}{t_e} \right)^3 - 1 \right\} N_1 - 2 N_0 \} I^2 + (2 N_1 N_0 + N_0^2) I - N_0^2 N_1 = 0 \quad (3.5.1.3)$$

waaruit I is op te lossen.

Vervolgens kan A, het afwaterend oppervlak, uit (3.5.1.1) worden afgeleid, terwijl $\frac{\alpha}{L}$ kan worden bepaald uit (3.5.1.2).

Uit de verschillende gemeten afvoergolven zijn er enkele uitgezocht die leken te voldoen aan de voorwaarde, dat er zowel aan het begin als aan het einde van de afvoergolf evenwicht bestaat tussen neerslag en afvoer. In de fig. 8a tot en met d zijn deze golven weergegeven in een dimensieloze vorm. Het verloop van de grondwaterstand in de laagte is, voor zover de metingen beschikbaar waren, eveneens weergegeven. Het valt op, dat er oppervlakte-afvoer optreedt, bij relatief diepe grondwaterstand, zodat geconcludeerd mag worden, dat de infiltratiesnelheid te beperkt is.

In tabel 1 staan de benodigde gegevens voor de berekening van het afwaterend oppervlak vermeld, en is de berekende oppervlakte weergegeven.

Tabel 1. Basisgegevens voor de berekening van het afwaterend oppervlak op de zakputten

Zakput	Datum	Neerslagintensiteit			Neerslagsom mm	Duur opp. afvoer uren	Afvoersom m^3	Tijdsduur, nodig voor		Berekende		afw. opp. ha
		begin	eind	evenwicht $t_e, \text{ sec.}$				stoppen afv. $t_s, \text{ sec.}$	infiltr. snelheid mm.hr^{-1}	α/L $\text{cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$		
		$N_0 \text{ mm.hr}^{-1}$	$N_1 \text{ mm.hr}^{-1}$									
	16/12-'73	1,2	1,2	18	18,4	36,2	6500	16 200	0,22	0,02	0,26	
Zuid	7/ 1-'74	2,2	2,2	10	8,5	11,8	6300	11 900	0,55	0,002	0,22	
	22/ 2-'74	1,35	1,35	5,4	8,6	3,53	4300	12 200	0,235	0,013	0,10	
Noord	21/11-'71	3,43	3,43	24	9,6	65,2	5040	18 000	0,418	0,0011	0,33	
	20/11-'72	1,3	0,6	2,9	12	30,9	5400	30 600	0,084	0,0049	1,63	

Het berekend afwaterend oppervlak op 20-11-'72 voor zakput Noord wijkt aanzienlijk af van dat, berekend op 21-11-'71. Deels is dit verschil toe te schrijven aan de groundbewerking. Op 21-11-'71 was een deel van het potentieel afwaterend oppervlak geploegd, waarop geen oppervlakte-afvoer zal optreden, terwijl het ander deel een geroid, nog niet bewerkt bietenperceel was.

Op 20-11-'72 lag vrijwel het geheel potentieel afwaterend oppervlak in gras.

Voorts is het berekend verschil in oppervlak hieraan toe te schrijven, dat de afvoergolf op 20-11-'72 niet geheel aan de voorwaarden voor de berekening van het afwaterend oppervlak voldoet.

Om het oppervlak, dat afwaterd op zakput 'Noord' toch te kunnen benaderen, is met behulp van de ontwikkelde formules, de afvoer afgeleid uit de neerslagverdeling bij verschillende waarden van α/L en een constante infiltratiesnelheid van $0,2 \text{ mm.uur}^{-1}$.

De aldus berekende afvoergolven zijn in fig. 9a in een dimensioze vorm weergegeven. De berekende golf voor $\alpha/L = 0,0007 \text{ cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$ sluit redelijk aan bij de gemeten golf. Deze aansluiting is redelijk, daar er op zakput Noord ca. 8 hellingen afwateren, terwijl in de berekening van een soort gemiddelde helling wordt uitgegaan.

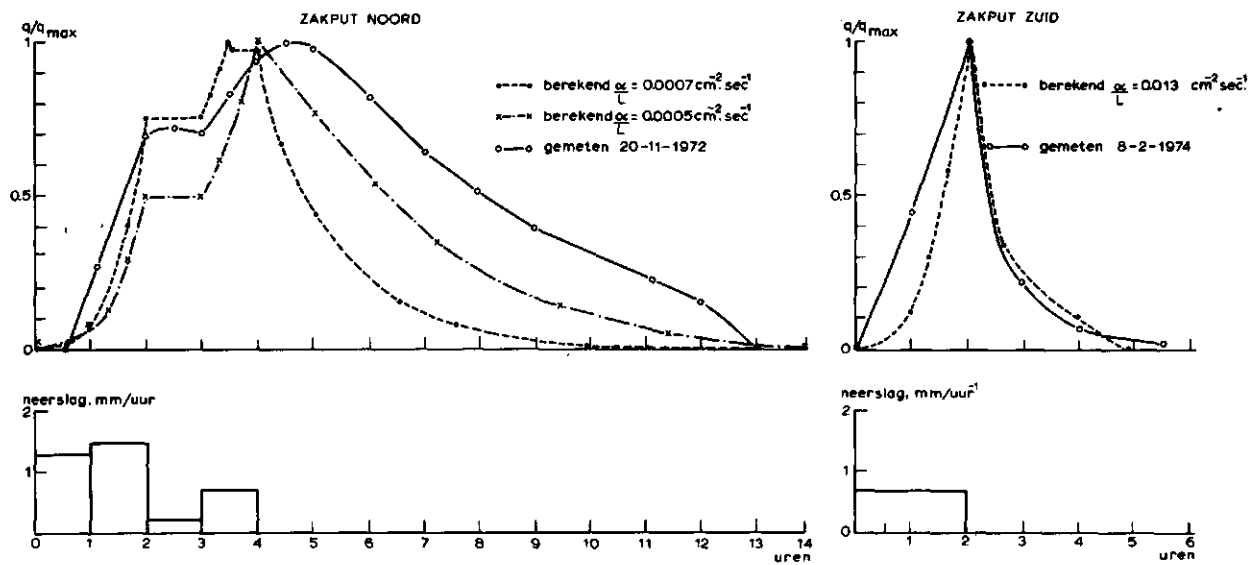


Fig. 9. Gemeten en berekende afvoergolven

a. zakput noord:

$$\begin{aligned} \text{berekend, } \frac{\alpha}{L} &= 0,0007 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}, q(\text{max}) = 0,52 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1} \\ \text{idem, } \frac{\alpha}{L} &= 0,0005 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}, q(\text{max}) = 0,27 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1} \\ \text{gemeten} & & q(\text{max}) &= 4,6 \text{ m}^3 \cdot \text{hr}^{-1} \end{aligned}$$

b. zakputten zuid:

$$\begin{aligned} \text{berekend, } \frac{\alpha}{L} &= 0,013 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}, q(\text{max}) = 0,36 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1} \\ \text{gemeten} & & q(\text{max}) &= 0,172 \text{ m}^3 \cdot \text{hr}^{-1} \end{aligned}$$

De berekende maximale afvoer is $0,52 \text{ mm} \cdot \text{uur}^{-1}$; de gemeten maximum afvoer was $4,6 \text{ m}^3 \cdot \text{uur}^{-1}$, zodat het berekend afwaterend oppervlak ca. $0,88 \text{ ha}$ is. Dit laatste oppervlak lijkt redelijk, gezien de terreinge-steldheid op die datum in vergelijking met de toestand op 21-11-'71.

Ter controle op de berekende α/L voor de zakputten zuid (ca. 14 potentieel afwaterende hellingen) is de afvoergolf op 8-2-'74 uit de neerslag berekend. Een infiltratiesnelheid van $0,24 \text{ mm} \cdot \text{uur}^{-1}$ werd hier aangehouden.

Een goede aansluiting bij de gemeten afvoergolf werd gevonden voor $\alpha/L = 0,013 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ (fig. 9b). De berekende maximale afvoer is

0,36 mm.uur⁻¹, terwijl de gemeten maximum afvoer 0,172 m³.uur⁻¹ was, waaruit een afwaterend oppervlak van ca. 0,05 ha kan worden berekend. Dit berekend oppervlak is lager dan die in tabel 1 staan vermeld. Wel is het een voortzetting van de tendens dat naarmate het totaal afgevoerd oppervlakkig afgestroomd water geringer is, het afwaterend oppervlak ook geringer is.

Men zou hieruit kunnen afleiden, dat aan de voet van de hellingen de berging in de toplagen van het profiel geringer is dan hoger op de hellingen. Dit zou dan betekenen, dat de grens tussen wel en niet oppervlakkig afwaterende grondgebied helling opwaarts wordt verschoven naarmate de bergingscapaciteit meer wordt benut. Zekerheid hierover bestaat echter niet.

Samengevat kan geconcludeerd worden dat het afwaterend oppervlak op zakput noord waarschijnlijk niet groter is dan 0,9 ha en dat op de zakputten zuid niet groter dan 0,26 ha. Deze berekende oppervlakten zijn over het algemeen niet veel groter dan die, waarover in de laagten een ophoging nodig was om de laagten hellend naar de zakputten te laten aflopen: 0,4 ha rond zakput noord en 0,5 ha rond de zakputten zuid. Hieruit zou geconcludeerd kunnen worden, dat de oppervlakte-afvoeren waarschijnlijk overwegend in de opgehoogde laagten optreden.

Zeker is in elk geval dat er op de kruinen en hellingen geen oppervlakte-afvoeren optreden, wat uit detailmetingen is gebleken.

3.5.2. Bepaling van het verloop van de infiltratiesnelheid

Vanaf het moment dat er oppervlakte-afvoer optreedt tot het moment dat er evenwichtleemte tussen neerslag en afvoer geldt voor de waterdiepte in $\alpha = L$:

$$y(t+\Delta t) = y(t) + (N-I)_{t+\Delta t} \cdot \Delta t \quad (3.5.2.1)$$

Is de gemeten oppervlakte-afvoer $q(t)$, cm.sec⁻¹, dan geldt:

$$y(t) = q(t) \cdot \frac{L}{\alpha} \quad (3.5.2.2)$$

zodat voor het gemiddeld verschil $(N-I)$ gedurende Δt geldt:

$$(N-I)_{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \left(\frac{L}{\alpha}\right)^{\frac{1}{n}} \left\{ q(t+\Delta t)^{\frac{1}{n}} - q(t)^{\frac{1}{n}} \right\}$$

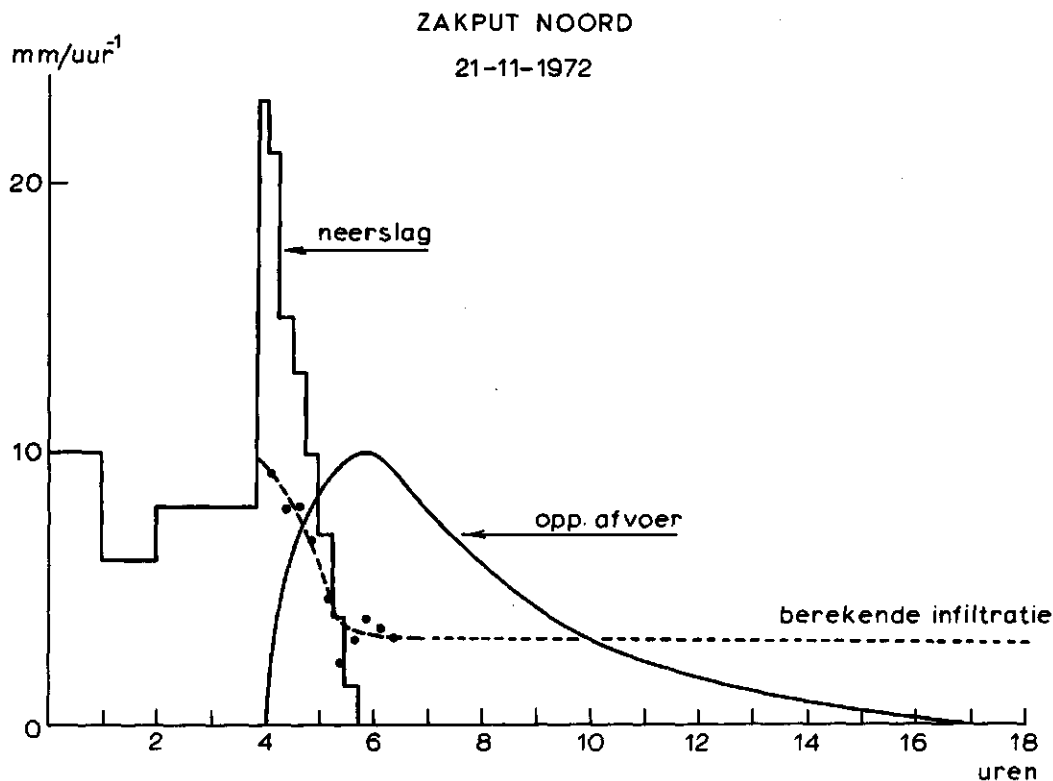


Fig. 10. Verloop van de neerslag, gemeten oppervlakte-afvoer en de berekende infiltratiesnelheid bij zakput 'noord'

Het verloop van de infiltratie is berekend uit een afvoergolf, gemeten aan zakput noord op 21-11-'72. Voor de berekening is een afwaterend oppervlak aangenomen van 0,9 ha en $\frac{\alpha}{L} = 0,0007 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$. In fig. 10 is het resultaat weergegeven. De aanvankelijke infiltratiesnelheid van ca. $0,9 \text{ mm} \cdot \text{uur}^{-1}$ loopt snel terug tot $0,2-0,3 \text{ mm} \cdot \text{uur}^{-1}$ en blijft dan constant.

Uit deze afvoergolf en uit de andere, aan zakput noord gemeten (fig. 11a) afvoergolven, wordt de indruk gekregen dat globaal pas dan een afvoer optreedt (in het najaar wel te verstaan) wanneer een berging van 3 à 4 mm wordt overschreden. In de zomersituatie (fig. 11b) is deze 'berging' veel groter.

De 'berging rond de zakputten zuid' is geringer en wordt geschat op 1,5 à 2 mm (vergelijk fig. 11c).

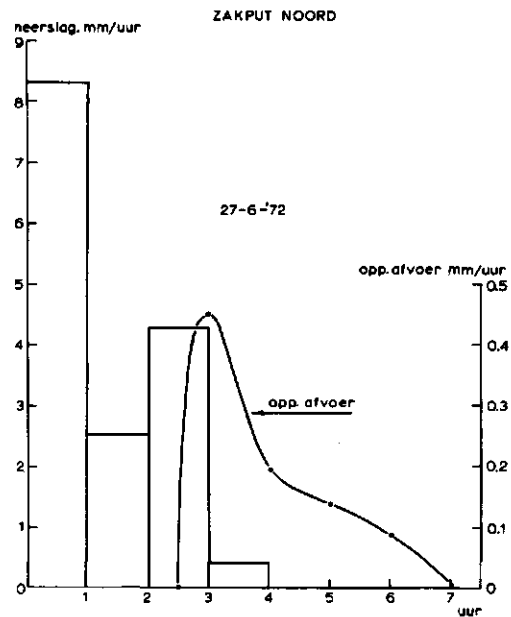
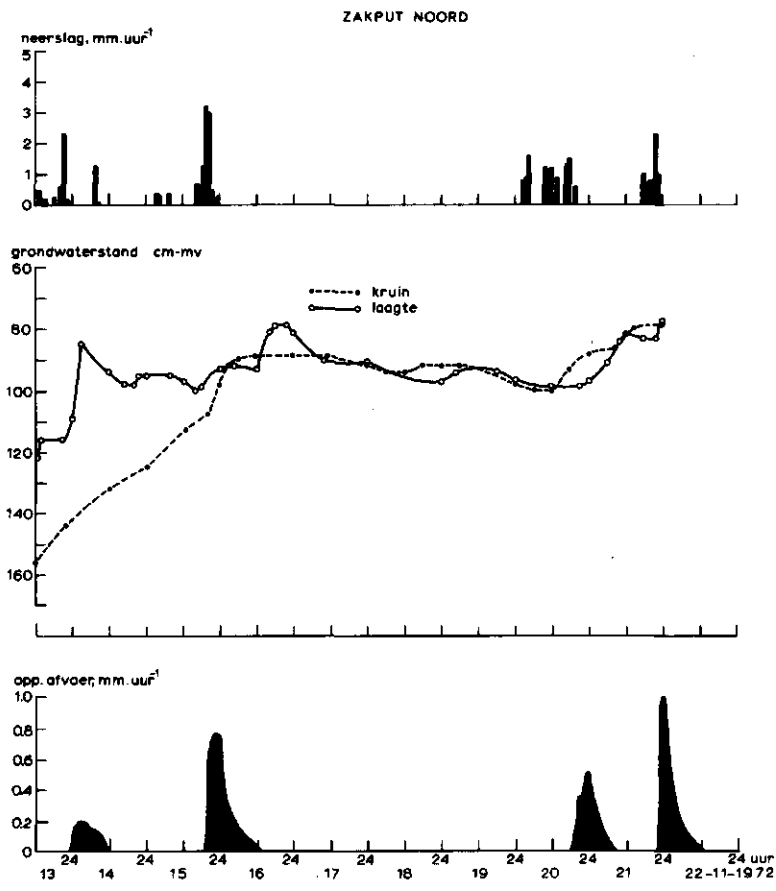


Fig. 11 a. Verloop van neerslag en oppervlakte-afvoer bij zakput 'Noord' gedurende de herfstperiode
 b. Idem, in een zomersituatie

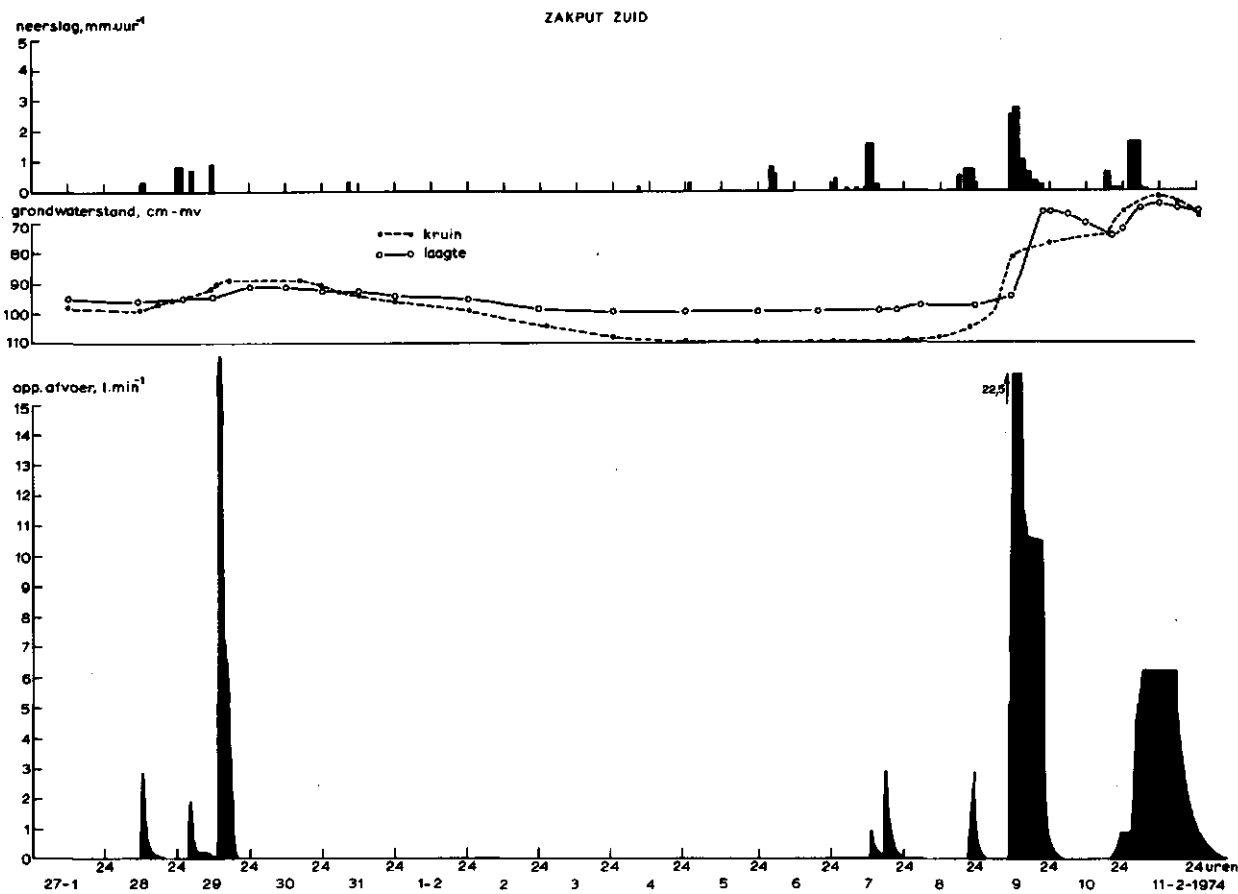


Fig. 11c. Verloop neerslag en oppervlakte-afvoer bij zakput 'zuid' in een herfstperiode

Tabel 2. Neerslag en piekafvoeren van de zakputten (N) neerslag, (PN) piekafvoer zakput Noord, (PZ) idem, zakputten Zuid

Datum	1971			1972			1973			1974																								
	november			februari			mei			juni			november			oktober			november			december			januari			februari			maart			
	N	PN	PZ	N	PN	PZ	N	PN	PZ	N	PN	PZ	N	PN	PZ	N	PN	PZ	N	PN	PZ	N	PN	PZ	N	PN	PZ	N	PN	PZ	N	PN	PZ	
1	0,1			0			0			2,2			0			-			0			0	xx	0			0							
2	0			0			0			0			0			0			0			-	0,1	0			0							
3	0			0,7			0			0			0			-			0			127	0			0			2,0					
4	0			0			0			2,7	1		0,5			-			0			127	0			0			0					
5	0			1,2	39	x	0			1,6			1,2			0			0,8	1	-	6	0			0,5			0,7					
6	0,3			0			0			2,6	3		1,0			0			20,0	13	1,2		0,4			1,4			1,1					
7	1,0			0			0			1,0			0			0			5,4	1	4,8		3,9			0,6			0					
8	5,2			11,2	81	x	0			1,2			8,0			0			0,1		14,0	131	10,1	37	4,0	3	0							
9	8,0			0			14			2	2,0		0			0			0		3,0		2,3			2,9	3	0						
10	7,3			0			1,5			1,8			1,0			6,4			6,2		-		-	1	11,8	23	0							
11	0,1			0,4			3,3			1,7			9,0			14,9			7,4	6	-				7,3	x	0							
12	0,6			3,3			0			1,0			14			1,3			4,0	6				8,5	16	0,7	6	0						
13	0			0,7			8,1			0			17,8	1	0				7,7	32	16	5,5		0			4,4							
14	2,7			0			0			0			7,6	32	0				10,9	96	35	4,3		1,5		0								
15	0,7			0			0			0			2,7	119	0,5				5,7	23	32	3,4	36	7,5	6	0								
16	0,1			0			0			0			6,6			1,8			0,6		12,0		0,4	4	0		9,3							
17	5,1			0			7,8			0			3,3			3,7			7,1	4	12,0	131	42	9,0	0		6,8			8				
18	8,1			0			1,0			0			4,8			10,3	x	1,0			2,0		5,1	42	0		0,8							
19	20,0			0			3,0			6,0			2,5			7,1	39		2,1	1	0,5		0			4,0			2					
20		38		0			0			2,2			4,5	78		13,7	49		0,9		0		0		0		0							
21	24,3	147		0,5			0			0,3			10,4	153		14,4	71	5	0,9		0		0		0		5,9							
22		37		14			0			0,2			6,4			1,3			0		0,7		0		0		0							
23	-			0			0			1,0			1,6			10,6	34	65	0		0,2		0,5		5,4	11	0							
24	-			0			10,1	x	x	0			3,8			1,0			0	1	2,9		5,0	23	0		0							
25	-			0			9,1			0			2,7			0			11,1		-		0		0		0							
26	1,0			0			1,5			0			0,8			0			8,0	x	-		0		1,4		0							
27	0,2			0			11,5			0			0			0			8,8	x	0,6		0,4		0		0							
28	0,3			0			10	x	10	15,5	68		0			0			4,5		0		2,7	3	0		0							
29	3,0			0			1,6			0			0,3			0			6,0		1,9		5,0	10		0								
30	3,9						0,9			0			1,7			0			0,4		0		1,1			0								
31							5,3			1,2						0,6					0,7		0			0								

N=neerslag, mm.etm⁻¹, PN-piekafvoer zakput 'Noord' l.min⁻¹, PZ-piekafvoer zakput 'Zuid'

x geconstateerde afvoer, doch wegens hoog slootpeil niet meetbaar (verdrongen overlaat)

xx door onder ploegen zakput buiten werking

4. ERVARING MET HET GEBRUIK VAN ZAKPUTTEN

De afvoermeters zijn vanaf 21-10-'71 tot en met 10-5-'74 in bedrijf geweest en hebben regelmatig afvoeren geregistreerd. De data waarop en de gemeten piekafvoeren staan vermeld in tabel 2. In november 1971 hebben de zakputten zuid niet afgevoerd. De percelen rond deze zakputten lagen toen in gras. Door lichte verslemping kon er in mei en juni nog oppervlakte-afvoer optreden. In het najaar werd het grasland bewerkt en bleef grof liggen, zodat er in november 1972 vrijwel geen afvoer is opgetreden. In 1973 werden rond zakput zuid aardappels verbouwd. Na de oogst werd een lichte grondbewerking toegepast, waarna de grond snel kon verslempen. De veelvuldige afvoeren in de

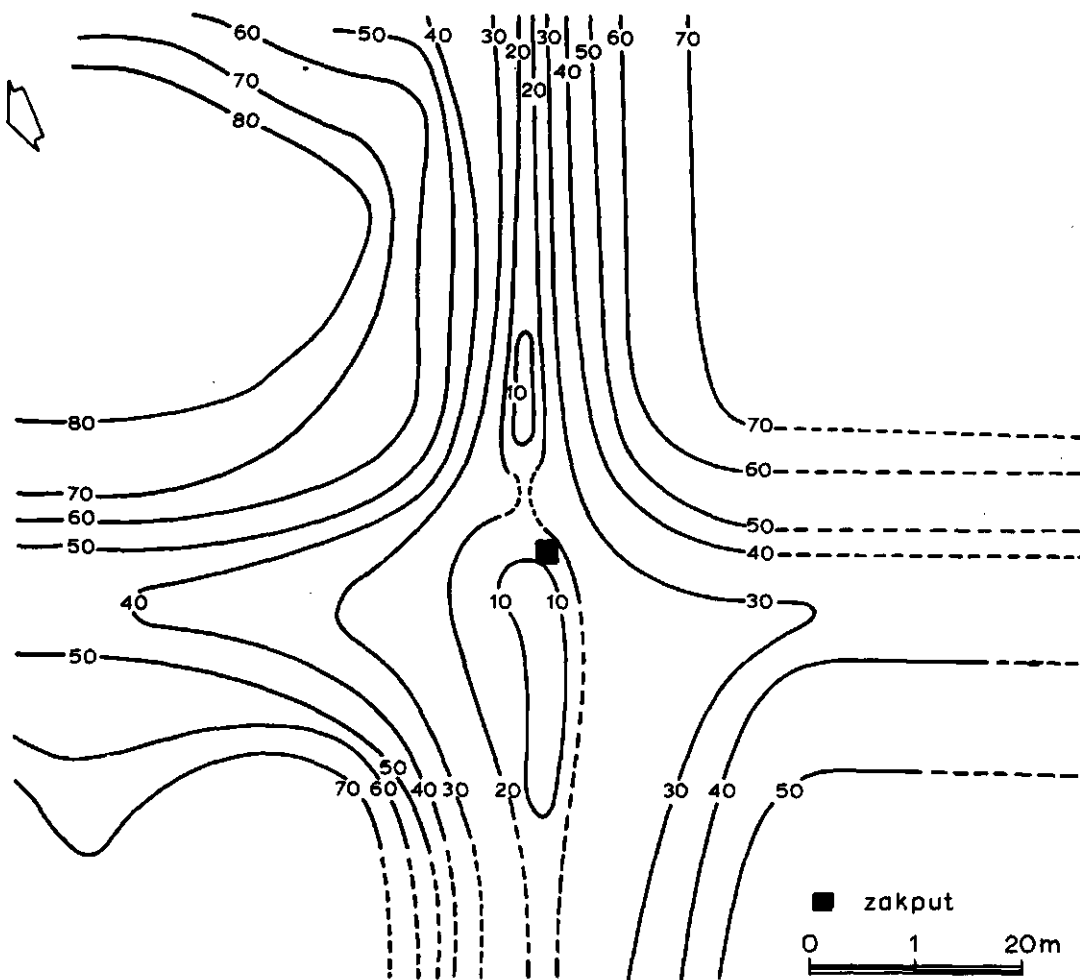


Fig. 12. Hoogtekaart in de omgeving van zakput 'noord' (hoogten in cm boven rand zakput)

daarop volgende maanden zijn daarvan een gevolg. Tevens heeft de ondernemer hier en daar greppels gemaakt om de ontstane plassen weg te werken. Dit kwam tot uiting in de vorm van de afvoergolven: zeer snel evenwicht tussen afvoer en neerslag en een kortdurende 'staartafvoer'.

De zakput 'noord' heeft regelmatig gewerkt. De grond rond deze zakput lag eind 1972 en 1973 in gras. In december 1973 werd dit grasland op wintervoor geploegd, waarbij de zakput ondergeploegd werd en daarna niet meer heeft gefunctioneerd. Doordat de zakput 'noord' niet op de laagst gelegen plek lag, kwamen daar regelmatig plassen voor (fig. 12).

5. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Het rendement van kavelinrichting in de kleimozaiek gebieden in het noorden des lands wordt overwegend bepaald door de omvang van het nodig grondverzet. Ten opzichte van algehele egalisatie van de kruinige percelen kan aanzienlijk op het grondverzet bespaard worden, indien de na slootdemping ontstane laagten in het nieuw perceel deels hellend naar de nieuwe sloten, deels hellend naar een centraal gelegen laag punt worden afgewerkt. Op dit laagpunt moet dan een zakput worden gesitueerd om eventueel oppervlakkig afstromend water op te vangen en naar een sloot af te voeren.

Het welslagen van dit alternatief zal ondermeer afhangen van het optreden van oppervlakte-afvoer en de praktische bruikbaarheid van zakputten. Op het slootdempingsproefveld te Kloosterburen werden deze facetten nader bestudeerd.

Geconstateerd werd, dat er regelmatig oppervlakte-afvoeren optraden, vooral op niet bewerkte grond en op licht bewerkte grond, die gemakkelijk verslemt. De zakputten hebben redelijk gefunctioneerd. Het onderhoud aan de putten, bestaande uit het grondvrij houden van het schelpenfilter was erg matig. Na drie jaar werd daardoor een zakput buiten bedrijf gesteld.

De oorzaak van de oppervlakte-afvoer moet aan een te geringe infiltratiecapaciteit worden toegeschreven. De grondwaterstanden stegen tijdens oppervlakte-afvoer vrijwel niet en bleven minimaal enkele deci-

meters onder maaiveld. De uit de afvoergolven afgeleide permanente infiltratiecapaciteit was 0,2-0,3 mm per uur. Het oppervlak per zakput waarover afvoer optrad werd eveneens uit de afvoergolven afgeleid en verder bepaald op ca. 0,26 ha voor de zakputten zuid en ca. 0,9 ha voor de zakput noord. Gelet op de relatief grote naijling van de afvoergolven op de neerslaggolven, gevoegd bij het feit dat op de kruinen en hellingen geen oppervlakte-afvoer werd gemeten, de afwaterende oppervlakten per zakput in aanmerking genomen, kan geconcludeerd worden dat zeer waarschijnlijk alleen in de (opgehoogde) laagten een oppervlakte-afvoer is opgetreden.

Samengevat kan geconcludeerd worden, dat het kavelinrichtingsalternatief, waarbij ter besparing op grondverzet zakputten worden toegepast, een bruikbaar alternatief is onder voorwaarde dat het onderhoud goed gebeurt en de putten daadwerkelijk op de laagste plek worden gelegd.

LITERATUUR

- HENDERSON, F.M. and R.A. WOODING. 1964. Overland flow and groundwater flow from a steady rainfall of finite duration. *Journ. of Geophysical Research* 69,8: 1531-1540.
- KESTER, J.A. en J.B. SPRIK. 1974. Noordelijk kleimozaiekgebied. Grondslagen van de kavelinrichting. *Regionale Studies* 5, ICW.
- SCHEELE, M.J. 1971. Inleiding in de mathematische benadering van oppervlakte-afstroming (literatuuroverzicht). Meded. 6, afdeling Cultuurtechniek, Landbouwhogeschool, Wageningen.