



*Verhoging van grondwaterstanden en
vermindering van afvoer door
opstuwing van beken*

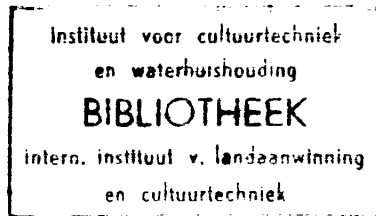
L. F. ERNST

INSTITUUT VOOR CULTUURTECHNIEK EN WATERHUISHOUDING

MEDEDELING **8**
1959

VERHOGING VAN GRONDWATERSTANDEN
EN VERMINDERING VAN AFVOER
DOOR OPSTUWING VAN BEKEN

L. F. ERNST



*Overdruk uit Verslagen Technische Bijeenkomsten 11-12
Versl. Meded. Comm. Hydrol. Onderz. T.N.O. No. 3 (1958)*

7 SEP. 1959

ERRATA:

blz. 64, vergelijking (5): in plaats van $5p_0$, lees $4p_0$

blz. 66, vergelijking (6): in plaats van $5p_0$, lees $4p_0$

blz. 66, vergelijking (8): in plaats van $5p_0$, lees $4p_0$

blz. 66, 3e regel van onder: in plaats van $p_0 = 0,15$, lees $p_0 = 0,20$

blz. 66, 1e regel van onder: in plaats van $= 1,15$ m, lees $= 1,10$ m

blz. 67, 2e regel van onder: in plaats van $0,12$ lees $0,15$

blz. 68, Fig. 11, rechts boven: in plaats van $p_0 = 0,15$, lees $p_0 = 0,12$

III. VERHOOGING VAN GRONDWATERSTANDEN EN VERMINDERING VAN AFVOER DOOR OPSTUWING VAN BEKEN

L. F. ERNST *

Landbouwproefstation en Bodemkundig Instituut T.N.O.

Enkele belangrijke vragen, waarmede men bij het opstuwen van beken in het algemeen te maken krijgt, zijn de volgende.

1. Welke grondwaterstandsverhoging kan praktisch bereikt worden?
2. Hoelang duurt het voor deze grondwaterstandsverhoging bereikt is?
3. Hoeveel water moet hiervoor in totaal beschikbaar zijn?
4. Welk gedeelte van dit water wordt nuttig gebruikt (verdamping), welk gedeelte stroomt door de grond (en voor een klein deel ook over de stuwen) naar lagere gebieden, waar dit water minder gewenst is en in extreme gevallen zelfs schadelijk kan zijn?

Voor de berekening van de grondwaterstromingen, die hierbij een rol zal spelen, zijn de volgende gegevens gewenst:

1. Bodemvariabelen:

- a. Horizontale doorlatendheid kD
- b. Verticale weerstanden: c
- c. Radiale (intreed-)weerstanden: w
- d. Vrij poriëgehalte (bergend vermogen): p_0 .

De bodemvariabelen, die men ook wel bodemconstanten pleegt te noemen, omdat men ze moeilijk van waarde kan doen veranderen en deze eigenschappen daardoor vrijwel onafhankelijk van de tijd zijn (uitgezonderd p_0 ?), vertonen op korte afstand meestal grote verschillen. Voor een exacte oplossing zouden alle bodemlagen en alle doorlaatfactoren bekend moeten zijn. Dit is noch theoretisch noch praktisch mogelijk. De juiste weg is hier dan ook, dat men alleen de belangrijkste eigenschappen in de berekeningen tracht op te nemen en voor deze eigenschappen de gemiddelde waarde zoekt.

2. Wateronttrekking aan de grondwaterspiegel (capillaire opstijging). Afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid water en het gemiddelde tekort zal men dit van te voren willen vaststellen op een waarde, die meestal niet hoger is dan enkele millimeters per dag. Genoemde berekeningen zullen ten slotte moeten aantonen of een dergelijke toevoer of vermindering in de afvoer van het grondwater mogelijk is.
3. Gewenste grondwaterstandsdiepte. Deze varieert op zandgrond meestal van - 50 cm tot - 175 cm, afhankelijk van gewas en bodemtype. De belangrijkste bodemeigenschappen, die hierop van invloed zijn, zijn dikte van de humushoudende laag en grofheid van de zandondergrond.
4. Topografische gesteldheid. Doordat in het maaiveld op korte afstand steeds zekere hoogteverschillen voorkomen, is het niet mogelijk de vorm van de grondwaterspiegel hier volmaakt bij aan te passen.

* Thans: *Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding.*

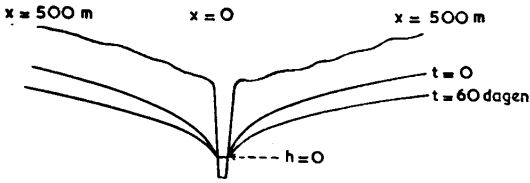


FIG. 1a. Ongestoorde toestand in het zomerhalfjaar met normale daling van freatisch vlak en constant beekpeil ($h_0 = 0$).

FIG. 1a. *Undisturbed state in summer half-year with a normal lowering of the phreatic surface and a constant level of the water in the brook.*
Etat tranquille en été avec une abaissement de la nappe phréatique normale et un niveau d'eau constant du ruisseau.

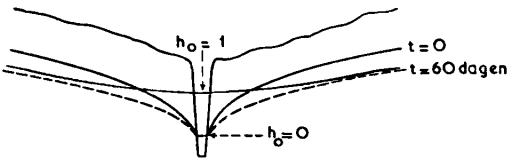


FIG. 1b. Verloop van de grondwater-spiegel indien vanaf $t = 0$ het beekpeil verhoogd wordt tot $h_0 = 1$.

FIG. 1b. *Change of the phreatic surface in the case the level of the water in the brook has been raised from $t = 0$ to $h_0 = 1$.*
Modification de la nappe phréatique en cas le niveau d'eau du ruisseau est élevé de $t = 0$ vers $h_0 = 1$.

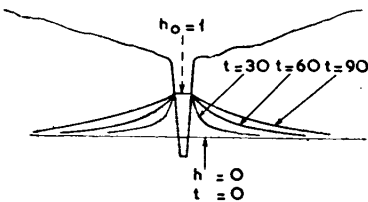


FIG. 1c. Storing, welke op figuur 1a moet worden gesuperponeerd om fig. 1b te krijgen.

FIG. 1c. *Disturbance to be taken into account in figure 1a to get figure 1b.*
Enfin d'obtenir la figure 1b il est nécessaire de transmettre la perturbation en figure 1a.

We beschouwen nu de opstuwung van een beek, waarvan het peil aan het begin van het zomerhalfjaar met een constant bedrag verhoogd wordt. Uit figuur 1 blijkt, dat het alleen nodig is de grondwaterstroming te berekenen, die met 1c overeenkomt (verschil van 1a en 1b). In figuur 1c zijn de invloeden verdwenen van klimaat, plantengroei en de peilbeheersing van de beek voor $t < 0$, welke invloeden de begintoestand mede gevormd hebben. Daar, zoals blijken zal, de grondwaterstandsverhoging zich slechts langzaam in de grond voortplant, mogen we om te beginnen wel veronderstellen, dat de gewenste grondwaterstand niet gehaald wordt en daar dus de onttrekking van water aan de grondwaterspiegel vrijwel niet verandert, stellen we in figuur 1c de capillaire opstijging $C = 0$. In figuur 1c zijn dan alleen nog belangrijk de peilverho-

ging van de beek (hier = 1 gesteld) en de eigenschappen van de bodem. Veronderstellen we de bodem homogeen en verder ter vereenvoudiging de radiale weerstand $w = 0$, dan blijven over de horizontale doorlatendheid (kD -waarde) en het bergend vermogen (p_0). De golfvoortplanting voldoet onder deze voorwaarde aan vergelijking (1). Deze vergelijking heeft een nog vrij eenvoudige vorm, daar we h/h_0 mogen zien als

functie van $\frac{x}{2} \sqrt{\frac{p_0}{kDt}}$.

De voorwaarde $C = 0$ zouden we kunnen laten vervallen. Het is toch juist de bedoeling om door de opstuwung C te doen toenemen. In dit opzicht kunnen we geen veronderstellingen doen omtrent toevallige invloeden van klimaat of maaiveldhoogte. Wel heeft het zin om verband te zoeken tussen de toeneming van het waterverbruik en de verhoging van de grondwaterspiegel ten opzichte van de ongestoorde toestand. Indien we een lineair verband aannemen en wel $C/h = C_0/h_0$, dan kunnen we voor dit geval vergelijking (2) afleiden. Houden we daarentegen vast aan $C = 0$, maar nemen we nu $w \neq 0$, dan krijgen we vergelijking (3). De beide laatste vergelijkingen zijn vrij wat ingewikkelder, maar toch nog wel bruikbaar door een grafische uitzetting.

Golfvoortplanting bij verhoging van het stuwpeil met een constant bedrag h_0

$w = 0 \quad C = 0$
 $\frac{h}{h_0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\alpha\sqrt{t}}} e^{-z^2} dz \quad (1)$

$w = 0 \quad C = C_0 \frac{h}{h_0}$
 $\frac{h}{h_0} = \frac{1}{2} (e^{-g^2} + e^{g^2}) + \frac{e^{-g^2}}{\sqrt{\pi}} \int_0^{ag\sqrt{t} - \frac{x}{2\alpha\sqrt{t}}} e^{-z^2} dz - \frac{e^{g^2}}{\sqrt{\pi}} \int_0^{ag\sqrt{t} + \frac{x}{2\alpha\sqrt{t}}} e^{-z^2} dz \quad (2)$

$w \neq 0 \quad C = 0$
 $\frac{h}{h_0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{z}}} e^{-z^2} dz + e^{\frac{x}{2\sqrt{z}} + \sqrt{z}} \left\{ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{z}} + \sqrt{z}} e^{-z^2} dz \right\} \quad (3)$

Notatie

$a^2 = \frac{k D}{p_0}$

$g^2 = \frac{C_0}{k D h_0}$

$\alpha = \frac{x}{2 k D w}$

$z = \frac{t}{4 p_0 k D w^2}$

Golfvoortplanting bij sinusvormig stuwpeil.

$h_0 = A \cos \frac{2 \pi t}{T} \quad w = 0 \quad C = 0$
 $\frac{h}{A} = \cos \left(\frac{2 \pi t}{T} - \frac{x \sqrt{\pi}}{\alpha \sqrt{t}} \right) e^{\frac{-x \sqrt{\pi}}{\alpha \sqrt{t}}} \quad (4)$

TABLE 1. Wave-transmission by a raise of the weir-level with a constant amount of h_0 . (1), (2) and (3). Transmission d'onde causée par une montée du niveau du déversoir par une augmentation constante h_0 . (1), (2) et (3). Wave-transmission by a sinusoid level of the weir (4). Transmission d'onde causée par une modification en forme de sinus du niveau du déversoir (4).

FIG. 2. Waterschap „Stroomgebied van de Aa”. Voortplanting in de grond van een plotselinge peilverandering in de Aa volgens vergelijking (1).
Geen verhoging van het waterverbruik door het gewas.
 $kD = 700 \text{ m}^2/\text{dag}$; $p_0 = 0,25$.

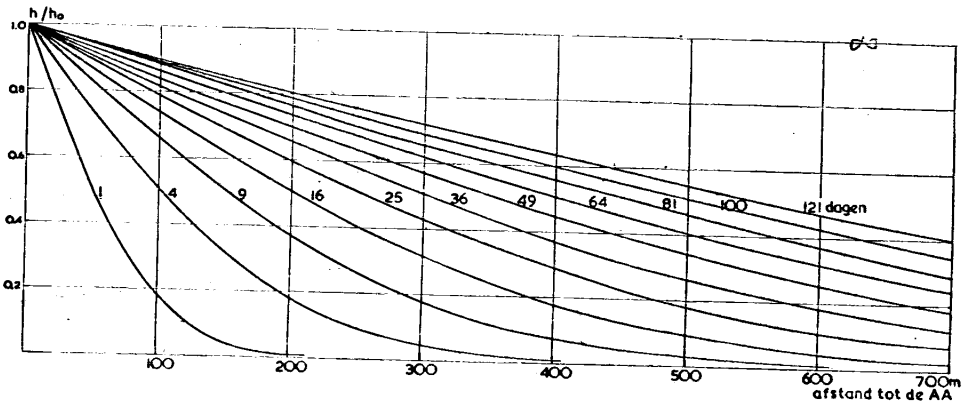


FIG. 2. Transmission in the soil of a sudden change of the water-level of the Aa, according to formula (1).
No increase of the consumption of water by the crop.
Transmission dans la terre d'une modification soudaine du niveau d'eau du ruisseau Aa d'après la formule (1).
La consommation d'eau de la récolte n'est pas augmentée.

FIG. 3. Waterschap „Stroomgebied van de Aa”. Voortplanting in de grond van een plotselinge peilverandering in de Aa volgens vergelijking (2).
Verbruik van water door het gewas is toegenomen.
 $C = 0,004 \frac{h}{h_0} \text{ m}/\text{dag}$; $kD = 700 \text{ m}^2/\text{dag}$; $p_0 = 0,25$.

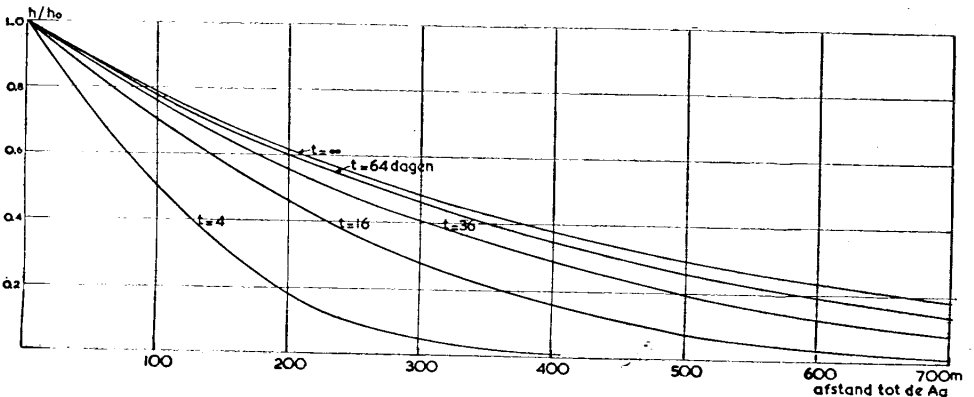


FIG. 3. Transmission in the soil of a sudden change of the water-level of the Aa, according to formula (2).
The consumption of water by the crop has increased.
Transmission dans la terre d'une modification soudaine du niveau d'eau du ruisseau Aa d'après la formule (2).
La consommation d'eau de la récolte est augmentée.

FIG. 4. Waterschap „Stroomgebied van de Aa”. Voortplanting in de grond van een plotselinge peilverhoging in de Aa volgens vergelijking (3).

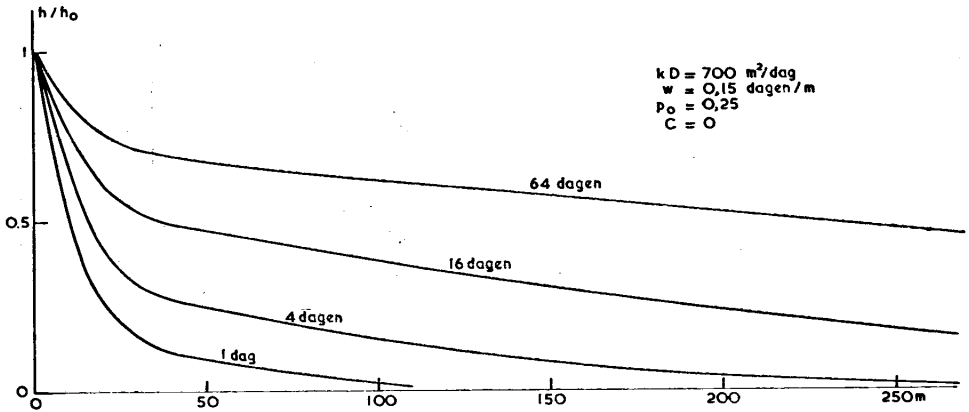


FIG. 4. Transmission in the soil of a sudden raise of the water-level of the Aa, according to formula (3).
 Transmission dans la terre d'une montée soudaine du niveau d'eau du ruisseau Aa d'après la formule (3).

Als voorbeelden kunnen hier dienen de figuren 2, 3 en 4, afkomstig uit het onderzoek in het waterschap „het stroomgebied van de Aa”. In figuur 2 nadert de grondwaterspiegel tot een horizontale eindtoestand. In figuur 3 is de eindtoestand niet horizontaal; voor $t = \infty$ mogen we de toestand als stationair beschouwen en blijft dus na zeer lange tijd nog altijd afhankelijk van de voorgeschreven verhouding tussen C en h . De verhoging van h is door de capillaire opstijging belangrijk kleiner dan in figuur 2. In figuur 4 is de eindtoestand weer horizontaal, maar het duurt aanmerkelijk langer dan in figuur 1 voor de horizontale grondwaterspiegel enigszins benaderd is. Het sterke verval langs de beek hangt samen met de verhouding tussen horizontale en radiale weerstand ($kDw =$ afstand, waarover een horizontale stroming een weerstand ondervindt gelijk aan w). In de zomer van 1949 werden in 7 raaien loodrecht op de Aa twee maal per week de grondwaterstanden waargenomen. Daar af en toe vrij plotselinge peilveranderingen en ook wel periodieke fluctuaties voorkwamen, waren deze waarnemingen voor een deel geschikt om de bruikbaarheid van de vergelijkingen (1) tot en met (4) te controleren. Hoewel wij, gezien de omstandigheden, een goede overeenkomst met vergelijking (3) verwachtten, bleek dit wel iets te wensen over te laten.

Zowel uit deze vergelijkingen als uit de waarnemingen blijkt echter, dat de voortplanting van de grondwaterstandsverhoging zeer langzaam verloopt. Volgens de langste waarnemingsperiode was het effect na 45 dagen op 200 m afstand van de Aa slechts 25 %, op 500 m nog 20 % (vergelijk figuur 4). Op dergelijke afstand van de opgestuwde beek zal in het algemeen een merkbare winst eerst na 2 tot 3 maanden bereikt worden (zie figuur 5); de grootste winst valt op het einde van de opstuwingsperiode. Hieruit volgt, dat het wel de vraag is, of met opstuwung alleen gedurende de

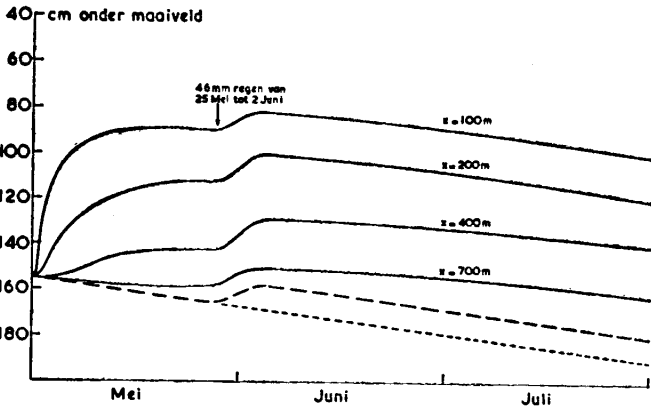


FIG. 5. Waterschap „Stroomgebied van de Aa”.

— — — = verloop van de grondwaterstand vanaf 1 mei 1949 tot 31 juli 1949 gemiddeld over 27 grondwaterstandsbuizen tussen Kokse brug en Erpse brug met een afstand variërend van 100 tot 2000 m uit de Aa.

= change of the groundwater-level 1-5-'49—31-7-'49.
= modification de la nappe souterraine.

— — — — = verloop van de grondwaterstand voor verschillende afstanden x tot de Aa, indien op 1 mei het peil in de Aa met 1 meter wordt verhoogd. Waterverbruik neemt toe evenredig met grondwaterstandsverhoging. ($C = 4$ mm/dag bij $h = 1$ m). Toepassing van vergelijking (2).

= change of the groundwater-level 1-5-'49—31-7-'49, the water of the brook has been raised 1 meter on the 1st of May.

= modification de la nappe souterraine, le niveau d'eau de ruisseau est élevé 1 mètre le premier jour de mai.

Maaiveld = soil surface = surface de la terre.

zomer voldoende verbetering bereikt zal worden. We moeten de toestand echter ook niet te ongunstig voorstellen en er rekening mede houden, dat in het tweede jaar de opstuwing van het eerste jaar in zekere mate blijft nawerken. Naarmate de grondwaterspiegel in de winter door de opstuwing gedurende de zomer dichtter onder maaiveld komt, zal de ontwatering door de beek en door secundaire waterleidingen intensiever worden.

De invloed van deze secundaire watergangen is nog onvoldoende bekend. We laten deze daarom voorlopig buiten beschouwing en nemen aan, dat het beekpeil gedurende het winterhalfjaar onveranderd blijft en gedurende het zomerhalfjaar met een constant bedrag verhoogd wordt. De toestand kan nu ook met een zekere benadering berekend worden door een peilverhoging gedurende het gehele jaar met $h_0/2$ en een sinusvormige peilverhoging met amplitude $h_0/2$ aan te nemen. Voor een nauwkeuriger aanpassing is een Fourier-analyse nodig. Stellen we het sinusvormige beekpeil voor door $h = 0,5 h_0 \times \sin 2\pi t/T$ en nemen we bovendien aan, dat $C = 0$, dan voldoet de voortplanting van deze golfbeweging in de grondwaterspiegel aan vergelijking (4). Ook bij aanneming

van deze vereenvoudigde voorwaarden is vergelijking (4) eigenlijk nog niet exact, daar we in verband met de langere tijden, die nu optreden, ook met zeer grote x moeten rekenen en dus de afstand L tussen de grote beken van invloed gaat worden. Het is mogelijk, zowel met de grootte van L als met een zekere toeneming in C (eventueel ook afhankelijk van x ; de verhoging van h wordt in ieder geval minder) rekening te houden. Deze vergelijkingen zijn natuurlijk vrij wat ingewikkelder dan (4), maar blijven toch bruikbaar. Een quasi-stationaire benadering van de onder invloed van de overtollige neerslag fluctuerende grondwaterspiegel bij constant beekpeil komt nog ter sprake op pag. 66 (zie vergelijking 6 en 7).

Uit het voorgaande volgt als belangrijkste conclusie, dat men zal moeten nagaan in hoeverre een peilverhoging ook in de winter mogelijk is, wil men een zo groot mogelijk profijt trekken van een aanleg van stuwen. Bij de Aa tussen Kokse brug en Keldonk geeft opstuwing gedurende enkele zomermaanden al een belangrijke verbetering, omdat het zomerpeil van de Aa hier zo ver beneden maaiveld ligt, dat een verhoging met gemiddeld 1 m mogelijk is. Uit figuur 6 blijkt, hoe sterk de toestand in dit gebied na de normalisatie en de aanleg van een afleidingskanaal (Boerdonk-Keldonk, afvoer van het water van Stiphoutse loop en Kleine Aa) zich gewijzigd heeft. We mogen wel aannemen, dat in dit gebied behalve een peilverhoging met 1 m in de zomer, nog 50 cm peilverhoging in de winter mogelijk is. Bij een gemiddelde peilverhoging van 75 cm zal de grondwaterstand minder dan 75 cm en mogelijk zelfs belangrijk minder omhoog gaan. De redenen hiervoor zijn reeds genoemd: daar het gewas meer water kan verbruiken, moet de afvoer lager worden en evenredig daarmee moet de welving in de

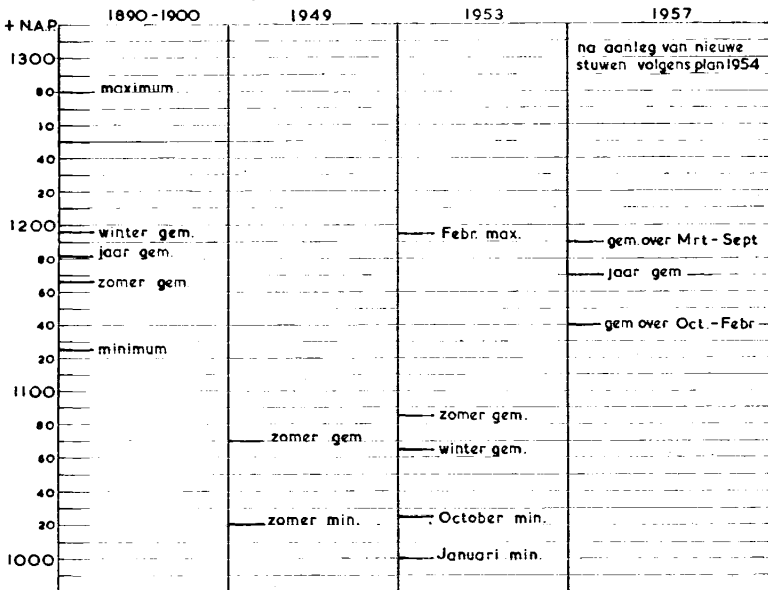


FIG. 6. Waterstanden in de Aa bij de Kokse brug = water-levels of the Aa = niveaux d'eau du Aa.

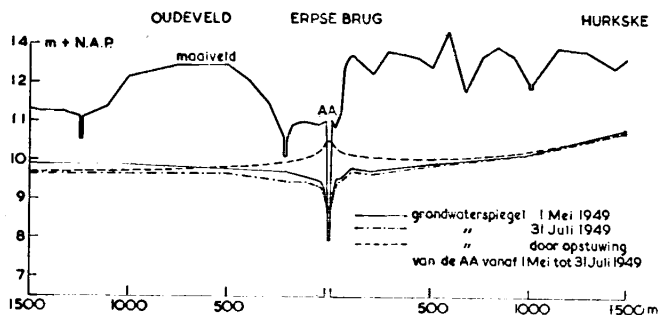


FIG. 7. Waterschap „Stroomgebied van de Aa”. Dwarsprofiel volgens raai 2.

Grondwaterspiegel = *groundwater level (table)*.
= *nappe souterraine (nappe phréatique)*.

grondwaterspiegel minder worden; door de hogere grondwaterstanden kunnen de secundaire watergangen in de winter bij onveranderd peil meer gaan afvoeren en daardoor de besparing van water voor een deel weer te niet doen. De afvoer van deze secundaire watergangen hangt voor een belangrijk deel af van de topografische gesteldheid (geaccidenteertheid) van het terrein en van de gemiddelde grondwaterstandsdiepte in de winter.

Ook bij opstuwing in de zomer alleen is de topografische gesteldheid belangrijk, zoals blijkt uit het dwarsprofiel volgens figuur 7. De maximale peilverhoging hangt af van de maaiveldhoogte in de beemden. De steile rand langs de beemden bepaalt over welk oppervlak een belangrijke verbetering is te bereiken. Deze figuur toont ook, dat ondanks de opstuwing enkele kleine greppels die vroeger in ieder geval in de winter waterhoudend waren, droogblijven. In het algemeen is het echter zo, dat een gunstige grondwaterstandsdiepte zo ondiep is, dat in de lage terreingedeelten waterhoudende leidingen moeten voorkomen en dat de verdeling van secundaire waterleidingen in fig. 8 (afkomstig van de technische dienst van het Waterschap het stroomgebied van de Aa) een indruk geeft van een verdeling in gebieden met een diepe grondwaterstand en gebieden met een minder diepe grondwaterstand. In deze figuur is in de nabijheid van de Aa een aantal waterleidingen gestippeld aangegeven, welke waterleidingen voor de normalisatie van de Aa in de winter water afvoerden, maar nu zelfs in de natste perioden van de laatste jaren droog hebben gestaan. In een van de kleinere stroompjes in het relatief vochtige gebied bij Elsdonk werd de afvoer in een zeer natte periode van de winter geschat op 10 liter per seconde afkomstig uit een gebied haast 100 ha groot. Bij een later bezoek aan dit gebied kon de uitmonding in de Aa niet meer gevonden worden. Het is waarschijnlijk zo, dat dichtbij de Aa de grondwaterstand zo ver onder maaiveld staat, dat deze 10 liter per seconde weer in de grond wegzakken. De foto's 1 tot en met 6 geven verder een indruk van de tegenwoordige toestand in dit gebied.

Vergelijken we de grondwaterstandsdipte kaarten langs de Aa tussen Kokse brug en Erp en in het stroomgebied van de Dommel ten zuiden van Eindhoven met elkaar, dan valt een zeker verschil onmiddellijk op. In het stroomgebied van de Boven-Dommel vindt men de diepste grondwaterstanden op de hoogste gronden. De beemden zijn relatief goed. Langs de Aa vindt men de diepste grondwaterstanden op de hoge rand



FOTO 1.
Buiten het verdrogende gebied. Beek-
peil 50 cm - M.V.

*Outside the desiccating area. The level
of the water in the brook is 50 cm.
below soil surface.*

*Hors du terrain de dessèchement. Le
niveau d'eau dans le ruisseau est 50 cm.
en bas de la surface de la terre.*



FOTO 2.
Beekpeil 2 m - M.V.

*The level of the water in the brook is
2 m. below soil surface.*

*Le niveau d'eau dans le ruisseau est 2
m. en bas de la surface de la terre.*

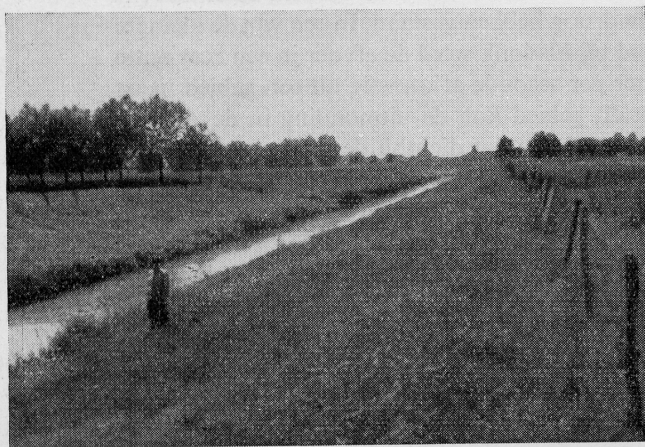


FOTO 3.
Waar raai 2 de Aa snijdt. Beekpeil
2 m - M.V.

*Where profile nr. 2 crosses the Aa.
The waterlevel in the brook is 2 m.
below soil surface.*

*Ligne de mesurage no. 2 croise le ruis-
seau d'Aa ici. Le niveau d'eau dans le
ruisseau est 2 m. en bas de la surface
de la terre.*

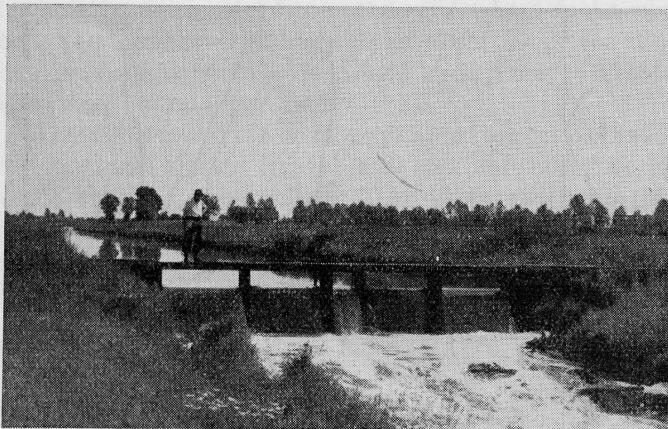


Foto 4.
Een van de beide proefstuwen.
One of the 2 experimental weirs.
Un des deux déversoirs d'expérimentation.

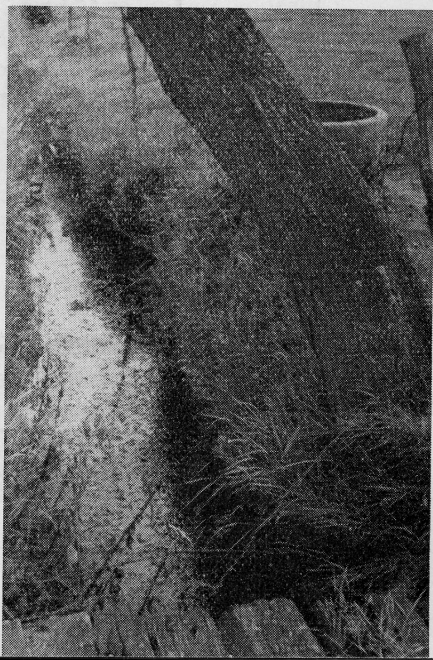


Foto 5.
De steile rand langs de beemden. Het maximale hoogteverschil is hier 2 m.
The steep side (border) of the fields. The maximum difference in height is 2 m. here.
Le bord à pic des champs. Ici la différence en hauteur maximale est 2 m.

Foto 6.
Een van de secundaire waterlopen in dit gebied, die nog regelmatig water afvoeren.

One of the secondary water-courses in this area, still with a discharge.

Un des cours d'eau secondaires dans ce terrain, généralement avec un écoulement d'eau.



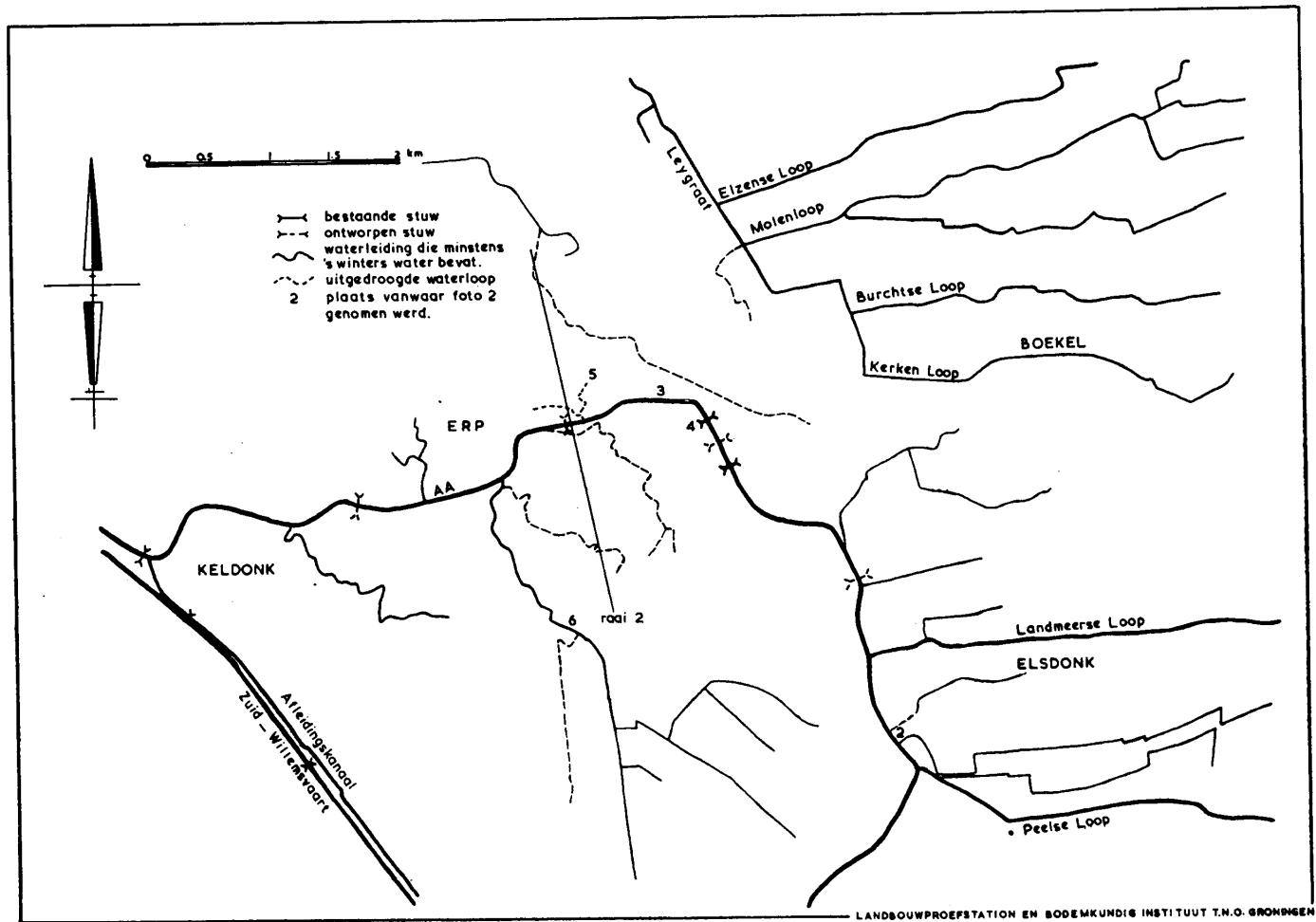


FIG. 8. Waterschap „Stroomgebied van de Aa” tussen Veghel en Gemert. Onderzoek Erp en omgeving.

FIG. 8. *Research Erp and surroundings.
Recherches Erp et environs.*

langs de beemden. Met toenemende afstand tot de Aa wordt de toestand geleidelijk beter. De beemden zijn hier relatief slecht. Door een dikke laag met relatief hoog humusgehalte is het oude bouwland bij Erp niet zo slecht als men op grond van de hoogteligging zou verwachten.

Door dit verschil zijn de mogelijkheden om het peil van Dommel en Tongelreep op te voeren veel kleiner. Het zal in de toekomst misschien mogelijk zijn het winterpeil met 20 cm en het zomerpeil met 30 tot 40 cm te verhogen (bij Waalre en Aalst zelfs met 60 cm). Hiervoor is de aanleg van een afleidingskanaal vanaf de Belgische grens tot dicht bij Eindhoven onmisbaar. Dit afleidingskanaal zou dan de hoge afvoerpieken kunnen opvangen. Het onderzoek in het stroomgebied Boven Dommel is echter nog niet voldoende gevorderd om reeds nauwkeurig te kunnen vaststellen welke de mogelijkheden zijn.

Fig. 9. Stroomgebied van de Dommel.

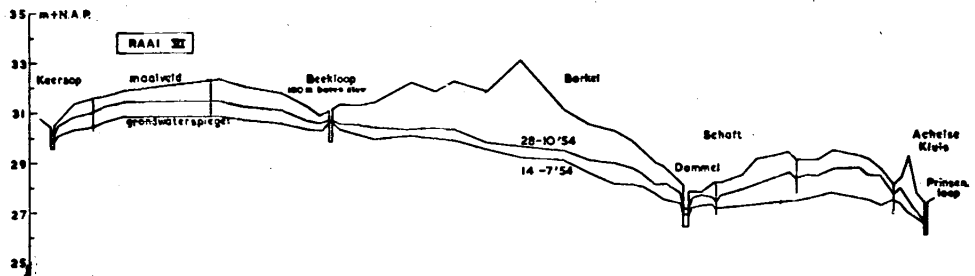


FIG. 9. *Basin of the Dommel.*
Bassin du Dommel.

De figuren 9 en 10 geven de vorm van de grondwaterspiegel in een enkele raai en de loop van de open watergangen in het stroomgebied van de Boven-Dommel (vergelijk met figuren 7 en 8 voor het Waterschap van de Aa). Ook hier blijken ondiepe grondwaterstanden in eerste benadering samen te gaan met korte afstanden tussen de secundaire waterleidingen. Tussen de kleine waterlopen varieert de afstand hier grotendeels van 300 tot 1000 m. Ten aanzien van de afstand tussen de grote beken is de toestand minder duidelijk. Ten zuiden van Eindhoven liggen de grote beken ongeveer evenwijdig, met richting zuid-noord op 1500 tot 4000 m van elkaar. In het waterschap van de Aa is de loop van de beken onregelmatiger. In het verdrogende gebied bij Erp zijn de afstanden meestal groter. Bij St. Oedenrode-Veghel is de afstand tussen Aa en Dommel ongeveer 8 km. Ten zuidoosten van de weg Eindhoven-Nijmegen wordt door Aa, Grote Molenbeek en Maas een gebied groot 80000 ha ingesloten, waarin wel een groot aantal kleine beken, maar geen grote beken wordt aangetroffen. In hoeverre dergelijke verschillen verklaard zullen kunnen worden uit topografische gesteldheid, bodem en klimaat valt moeilijk te zeggen.

Uit de voorafgaande uiteenzetting is gebleken, dat in de nabijheid van de beken door de opstuwing een belangrijke verhoging van de grondwaterstand en daarmee samengaande ook een belangrijke verhoging van het waterverbruik mogelijk is.

Immers, indien het maaiveld in de lage gronden vrij goed horizontaal ligt, kan binnen afzienbare tijd de grondwaterspiegel over een strook van enkele honderden meters breedte op de gewenste diepte onder maaiveld gebracht worden. Voor de hogere gronden ligt de toestand in dit opzicht veel ongunstiger. We kunnen aantonen, dat indien het gebied homogeen is (waarmede bedoeld wordt, dat overal dezelfde overtollige neerslag en dezelfde capillaire opstijging bestaat) en de secundaire waterlopen niets afvoeren, de waterbesparing over dit gebied van beek tot beek een grootte-orde van niet meer dan 50 mm kan hebben. Dit blijkt namelijk uit de volgende vergelijking, welke is afgeleid met behulp van vergelijking (8). Onderstaande vergelijking geeft het verband tussen 2 toestanden (aangeduid door de indices 1 en 2) bij sinusvormige overtollige neerslag ($\bar{N} + A \sin 2\pi t/T$) in betrekking tot het constante beekpeil $h\left(\pm\frac{L}{2}\right)$, de laagste waarde van het hoogste punt in de grondwaterspiegel $h^{\min}(0)$, het gemiddelde verval in de grondwaterspiegel $\bar{\Delta}h$ en de gemiddelde jaarlijkse overtollige neerslag $\bar{N}T$.

$$\left\{h_2\left(\frac{L}{2}\right) - h_1\left(\frac{L}{2}\right)\right\} - \left\{h_2^{\min}(0) - h_1^{\min}(0)\right\} = \frac{\bar{N}_1 - \bar{N}_2}{\bar{N}_1} \bar{\Delta}h_1 + \frac{(A_2 - A_1) T}{4p_0} \quad (5)$$

Op dezelfde manier is de volgende tabel afgeleid, waarbij aangenomen werd, dat $N(\max)$ onveranderd blijft, dat $\bar{\Delta}h$ evenredig met \bar{N} afneemt en dat amplitude Δh evenredig met amplitude N toeneemt. De waterbesparing bedraagt na opstuwing volgens deze tabel 55 mm. De zomergrondwaterstanden komen 30 cm hoger, de wintergrondwaterstanden worden iets meer namelijk met 45 cm verhoogd.

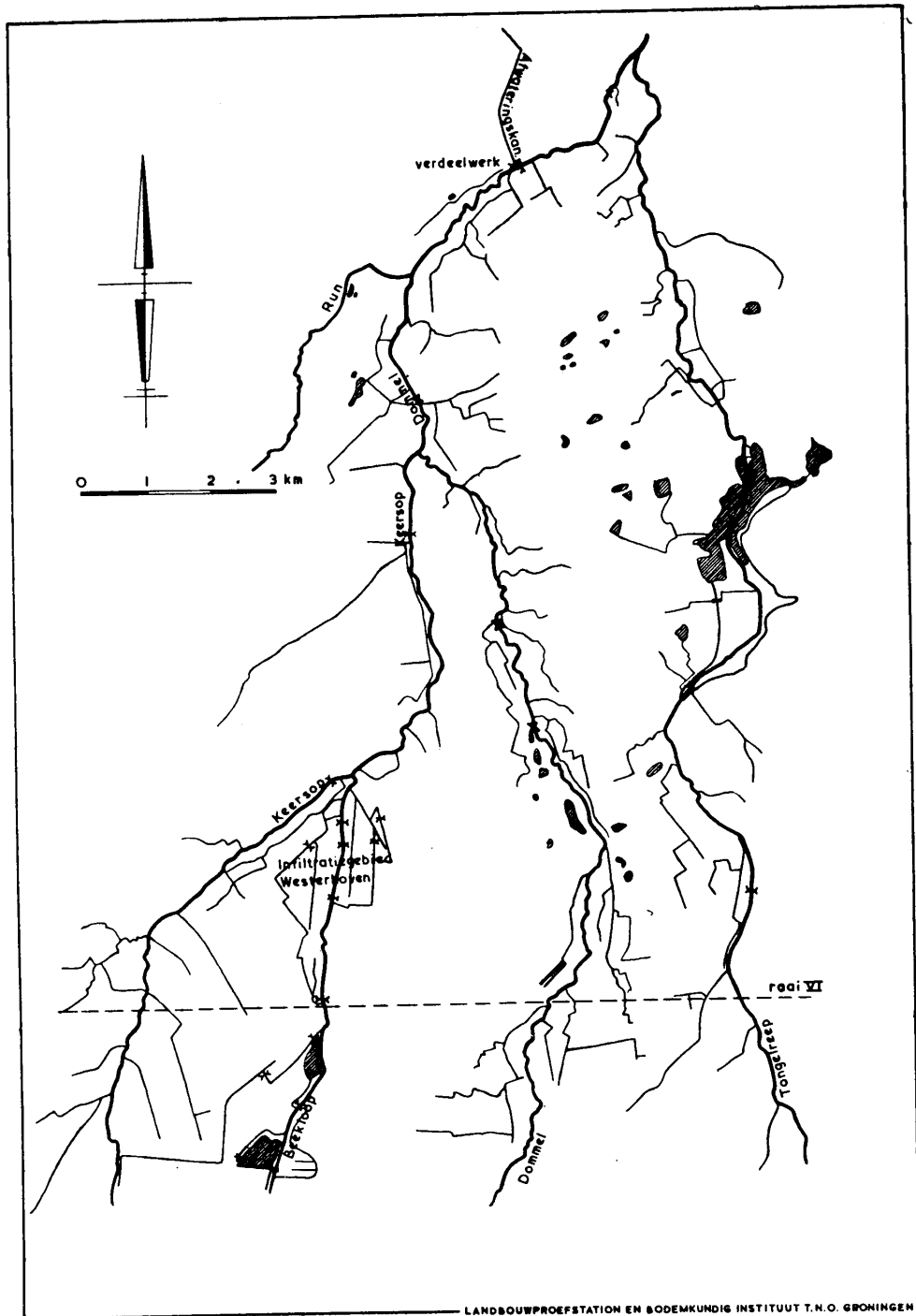
TABEL 2

| Beekpeil $h\left(\pm\frac{L}{2}\right)$ | 0 | 60 cm | 0 | 60 cm | |
|---|--------|--------|--------------------------|-----------------|----------|
| | N_1 | N_2 | $\Delta h_1(0) = h_1(0)$ | $\Delta h_2(0)$ | $h_2(0)$ |
| Maximum | 2,2 | 2,2 | 200 | 185 | 245 |
| Minimum | - 0,2 | - 0,5 | 100 | 70 | 130 |
| Gemiddelde | 1,0 | 0,85 | 150 | 127,5 | 187,5 |
| Amplitude | 1,2 | 1,35 | 50 | 57,5 | 57,5 |
| | mm/dag | mm/dag | cm | cm | cm |

Om aan de beide genoemde voorwaarden te voldoen (geen afvoer door secundaire waterlopen en overal dezelfde capillaire opstijging) zou een ongeveer parabolische vorm van het maaiveld vereist zijn. Bij een dergelijke ideale vorm zouden de grote

FIG. 10. Stroomgebied van de Dommel boven Eindhoven. →

FIG. 10. *Basin of the Dommel upstream Eindhoven.*
Bassin du Dommel en amont d'Eindhoven. →



beken vrij diep moeten insnijden om in de zomer een vrij constante grondwaterstands-diepte (b.v. tussen 1 m en 1,50 m) mogelijk te maken. Voor zover wij dit op dit ogenblik kunnen beoordelen, zijn de werkelijke toestanden veel onregelmatiger. Dit heeft tot gevolg, dat op de lage gronden de besparing boven deze gemiddelde waarde ligt, op de hogere gronden er beneden.

Uit de voorgaande uiteenzetting volgt, dat een methode gewenst is, waarbij men met de volgende omstandigheden rekening kan houden:

- a. invloed van langere tijden, samenhang tussen zomer en winter;
- b. de beekafstand L ;
- c. een grote capillaire opstijging in de beemden, een kleine capillaire opstijging op de hoge gronden (eventueel ook nog de invloed van het vochtdeficit op de afvoer in het najaar);
- d. de radiale weerstanden w ;
- e. de verdeling van de overtollige neerslag;
- f. invloed van de secundaire waterleidingen.

Door de kleine waterloopjes wordt de toestand echter zo gecompliceerd, dat het praktisch alleen mogelijk is met quasi-stationaire toestanden te rekenen. Hetzelfde geldt voor de zeer onregelmatige verdeling van N , die steeds mogelijk is. De voorwaarden (a), (b), (c) en (d) daarentegen hebben wij zowel bij niet-stationaire als quasi-stationaire vergelijkingen in rekening kunnen brengen. De quasi-stationaire berekeningen geven uit de aard der zaak eenvoudiger uitkomsten. Zo vinden wij bij een overtollige neerslag $N = \bar{N} + A \sin 2\pi t/T$ voor de amplitude van h midden tussen de bekende volgende vergelijking:

$$a = \frac{AT}{\sqrt{\left(\frac{8kD}{L^2} \cdot T\right)^2 + (\epsilon p_0)^2}} \quad (6)$$

Voor de najling b van de grondwaterstand ten opzichte van de overtollige neerslag vinden we:

$$\operatorname{tg} \frac{2\pi b}{T} = \frac{p_0 L^2}{2kDT} \quad (7)$$

Bij grote L wordt de eerste term onder het wortelteken in de vergelijking voor a van minder belang. Met enige benadering krijgen we dan het volgende resultaat, dat reeds in vergelijking (5) gebruikt is:

$$a \approx \frac{AT}{4p_0} \quad (8)$$

Nemen we aan, dat $A = 1,2$ mm/dag (zie tabel) en $p_0 = 0,15$, dan volgt uit de laatste vergelijking:

$$h(\max) - h(\min) = 1,16 \text{ m.}$$

Wegens de ingevoerde benadering is deze uitkomst iets te hoog. Dit resultaat komt er dus op neer, dat het amplitude rond 50 cm is. Bij een grondwaterstand in de winter van bijvoorbeeld $-0,80$ m behoort dus een zomergrondwaterstand van $-1,80$ m. Uit vergelijking (6) volgt, dat de uitkomst van het amplitude bij grote L voornamelijk van p_0 afhangt en dan vrijwel omgekeerd evenredig met p_0 is volgens (8).

Vergelijking (7) voor de jaarfluctuatie kunnen we nog benaderen door:

$$\operatorname{tg} \frac{2\pi b}{T} = \frac{4 p_0 \overline{\Delta h}}{NT} \approx 0,15 p_0 \overline{\Delta h} \text{ cm} \quad (9)$$

Onder $\overline{\Delta h}$ cm verstaan we de gemiddelde opbolling van de grondwaterspiegel tussen de beken uitgedrukt in cm. Bij korte sloot- en drainafstanden volgt hieruit voor de naijling rond 7 tot 30 dagen. Voor de hoge gronden kan de naijling variëren van rond 40 tot iets meer dan 80 dagen.

Indien we nu deze resultaten vergelijken met de uitkomsten van de niet-stationaire vergelijkingen, dan blijken wel zekere verschillen. Zo is bijvoorbeeld de vorm van de stijgende grondwaterspiegel niet gelijk aan die van de dalende grondwaterspiegel en daarmee hangt samen, dat de naijling van de stijghoogte ten opzichte van de overtollige neerslag niet overal dezelfde waarde heeft en in afhankelijkheid van de afstand tot de beek enige tijd (maximaal 14 dagen) kan variëren. Deze verschillen zijn praktisch echter niet belangrijk. Zoals tevoren werd opgemerkt zijn immers ook nog van invloed de heterogeniteit van de bodem, de afvoer door secundaire watergangen en het verband tussen C en grondwaterstandsdiepte, terwijl de overtollige neerslag in het algemeen veel sterker fluctueert dan het aangenomen sinusvormige verloop.

Nemen wij nu aan, dat quasi-stationaire berekeningen een voldoende benadering geven, dan is het mogelijk op een betrekkelijk eenvoudige manier het verloop van grondwaterstand en afvoer en de invloed van de secundaire waterleidingen hierop na te gaan. Een voorbeeld hiervan is gegeven in figuur 11. De gegeven regenval volgens het regenstation Venray is geschematiseerd in een blokdiagram. Hierbij werd aangenomen, dat in de zomer alleen de zwaarste regenbuien doorslaan, de capillaire opstijging $0,5$ mm bedraagt en het vochtdeficit niet groter wordt dan ongeveer 30 mm.

De totale verdamping over deze 15 maanden wordt dan 625 mm. Uit een berekening volgens PENMAN, verstrekt door het K.N.M.I., zou de potentiële verdamping van een open wateroppervlak over deze periode 865 mm moeten bedragen. Vermenigvuldigd met $0,8$ levert dit voor begroeide grond 690 mm op.

De aangenomen grootte van de overtollige neerslag is dus wel redelijk, evenals de verdeling. De aangenomen waarden voor L en kD zijn normaal voor Noord-Brabant en Limburg. De waarde voor p_0 kan aan de lage kant zijn. Hierdoor zou dus een te groot verschil tussen de hoogste en de laagste grondwaterstand gevonden zijn. Een dergelijk verschil als in fig. 11 (185 cm) komt in dit gebied inderdaad weinig voor; waarschijnlijk ligt in dit geval de juiste waarde voor p_0 dicht bij $0,15$. De invloed van de secundaire watergangen op de grondwaterstand blijkt vrij gering te zijn. Toch wordt volgens de berekening nog 22% van de over-

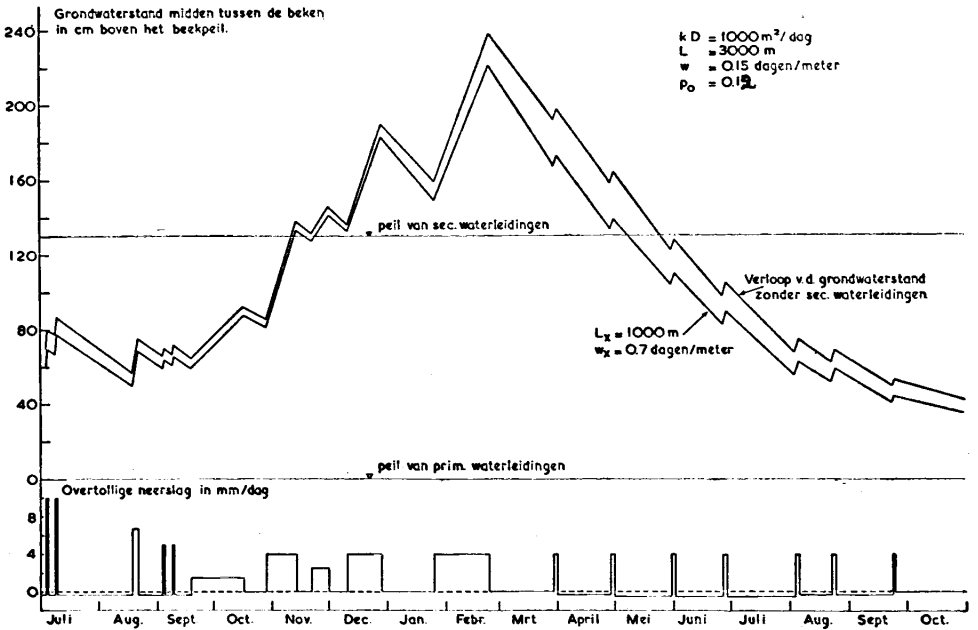


FIG. 11.

Grondwaterstand midden tussen de beken in cm boven het beekpeil = groundwater level between the brooks (in cm. above the water level of the brook.)
= nappe phréatique entre les ruisseaux (en cm. en amont du niveau d'eau du ruisseau).

Peil van sec. waterleidingen = water-level of the secondary watercourses.
= niveau d'eau des courses d'eau secondaires.

Overtollige neerslag in mm/dag = superfluous precipitation.
= précipitation de trop.

Peil van prim. waterleidingen = water-level of the primary watercourses.
= niveau d'eau des courses d'eau primaires.

tollige neerslag in dit geval door deze twee secundaire waterleidingen afgevoerd. Over de verhouding in de totale afvoer tusschen grote en kleine waterlopen (vaak 1:100 of meer) geeft deze figuur natuurlijk geen uitkomst, daar dit behalve van de afstanden tussen de verschillende waterlopen ook van de lengte afhangt.

Vergelijken we ten slotte het berekende verloop van de grondwaterstand met de waarnemingen in een buis uit het onderzoek in het stroomgebied van de Lollebeek bij een grondwaterstandsdiepte van 1,50 m tot 3 m, dan blijkt de overeenkomst (het feit dat 0,5 mm/dag als capillaire opstijging wel mogelijk is bij een grondwaterstandsdiepte van 1,5 m, maar niet bij 3 m, heeft hier weinig invloed) zelfs zeer goed te zijn. De toegepaste rekenmethode is dus wel bruikbaar, hoewel zeker nog voor verbetering vatbaar. De zichtbare verschillen tussen waarnemingen en berekeningen maken het mogelijk in de aangenomen waarden voor de bodem-

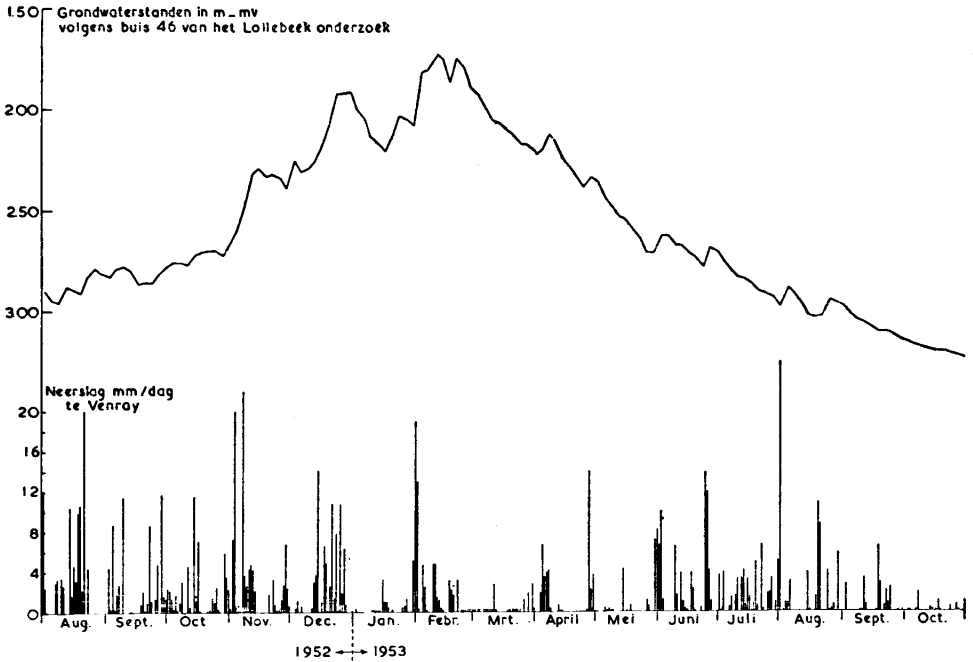


FIG. 12.
 Grondwaterstanden in m.v. = groundwater level in meters below soil surface.
 — m.v. = nappe phréatique (en mètres plus bas que la surface de terre).
 Neerslag mm/dag = precipitation mm/day.
 = précipitation mm/jour.

constanten, peilen van het open water en andere grootheden, die bij de berekening gebruikt zijn, zekere correcties aan te brengen en deze waarden eventueel nog met de tijd te doen variëren. Evenzo wordt het mogelijk, door andere waarden voor de peilen van het open water te substitueren, na te gaan welke verhoging hierdoor in de grondwaterstand ontstaat en welke invloeden de secundaire waterlopen hierop hebben. Hoewel deze invloed in het gegeven voorbeeld slechts gering is, is het niet uitgesloten, dat bij een grotere dichtheid van de secundaire watergangen de invloed wel belangrijk begint te worden.

De in het laatste deel van deze voordracht geschetste rekenmethode kan dus niet alleen betekenis hebben bij het nagaan van de invloed, die het peil van open water en het beheer van eventueel aan te leggen stuwten zullen hebben op het verloop van de grondwaterstand, maar kan ook een bijdrage leveren bij het bepalen van de verschillende, in het begin reeds besproken bodemvariabelen en bij het opstellen van een waterbalans van de grondwaterstroming.

3. RISE OF THE PHREATIC SURFACE AND DECREASE IN RUN-OFF BY DAMMING UP A RIVER

by L. F. ERNST

The propagation of the rise of the groundwater level, caused by the rise of the level of a river, canal or ditch, can be calculated with the equations (1), (2) or (3). When using one of these equations it will be necessary to suppose that the rise of the level of the open water is momentary and that no other changes are being introduced. It results from figures 2, 3 and 4, that a sensible effect at a distance from the open water-course of about 500 meters is reached after some months only. This is caused by the total resistance in the soil over the considered distance. Even in the case of figures 2, 3 and 4 this resistance is rather large, though for these figures, a value of $kD = 700 \text{ m}^2/\text{day}$ was accepted as transmissibility. The slow propagation indicates that the effect during the winter might be retained to a certain extent, even with a lower level in the river with free run-off during the winter-period.

In the case that the favourable effect is lost during the winter by an intensified drainage, the second year might be started again with the equations (1), (2) or (3). However, if at the beginning of the summer period the groundwater elevation of the past year is still working, the calculation of the function $h(x,t)$ becomes much more complicated. In the calculations of groundwater flow-problems comprising rather great distances and periods, it becomes necessary to take into account a rather large number of variables: the distance between rivers, the drainage by secondary water-courses, the distribution of precipitation and evaporation, initial conditions, etc. For the practicability it is desirable to use a rather simple calculation-method. In this publication a quasi-stationary method is recommended but not discussed in detail. In the first place it is necessary to test whether some approximations are permissible. The comparison of the evolution of the watertable in the riverbasin of the Lollebeek (province of Limburg, Netherlands), as observed in a test well and the calculated fluctuations, shows a satisfactory agreement (fig. 11 and 12).

With some quasi-stationary formulae for the amplitude and the phase-shift it becomes possible to draw some conclusions on the total resistance, the storage-coefficient and the water-balance.

For Dutch circumstances it can be deduced that by damming up a river an average reduction in the run-off of 50 mm/year maximal may be attained.

The publication is illustrated with some data concerning the topography and the possibility of raising the levels of open water in the drainage-area of the river Aa and Dommel in the Dutch province of Noord-Brabant.

3. REHAUSSEMENT DE LA NAPPE PHRÉATIQUE ET DIMINUTION DU DÉCHARGE PAR REFOULEMENT DES COURS DE DRAINAGE

par L. F. ERNST

La propagation du rehaussement de la nappe, causée par un rehaussement du niveau d'une rivière, canal ou émissaire, peut être calculée par les équations (1), (2) ou (3). En utilisant une de ces équations il faut partir de la supposition que le rehaussement du niveau de l'eau libre se produit instantanément et que nul autre changement ne sera introduit. Il résulte des figures 2, 3 et 4 qu'un effet sensible à une distance d'environ 500 mètres de l'émissaire ne peut être atteint d'après quelques mois.

Ce-ci est causé par la résistance totale jusqu'à la distance envisagée, quelle résistance est encore assez grande même dans le cas des figures 2, 3 et 4, où on a accepté comme conductivité horizontale une valeur $kD = 700 \text{ m}^2/\text{jour}$. En plus il ressort de cette propagation lente, que pendant l'hiver l'effet peut être conservé dans un certain mesure malgré un niveau plus bas dans l'émissaire pendant cette période.

Dans le cas que l'effet favorable disparaît pendant l'hiver par une intensification du drainage, ou peut recommencer dans la deuxième année avec une des équations (1), (2) ou (3). Dans l'autre cas cependant, qu'au commencement de la semestre d'été le rehaussement de la nappe phréatique se fait sentir encore, la calculation de la fonction $h(x,t)$ sera plus compliquée. Dans le calcul des courants d'eau souterraine s'étendant sur assez grandes distances et périodes, il faut tenir compte d'un assez grand nombre de variables: la distance des émissaires primaires, le drainage par les émissaires secondaires, la distribution de la précipitation et de l'évaporation, la situation initiale, etc.

Pour la praticabilité une méthode de calcul assez simple est préférable. La méthode quasi-stationnaire, qui est recommandée n'est pas discutée en détail dans cette publication. Premièrement il faut vérifier la permissibilité de certains approximations. La comparaison de l'évolution du niveau de la nappe phréatique comme observée dans un puit de sondage dans le bassin du Lollebeck (petite rivière dans la province de Limbourg, Pays-Bas) avec le développement calculé, montre une concordance satisfaisante (fig. 11 et 12).

Par quelques formules quasi-stationnaires pour l'amplitude et le décalage (équations 6 et 7) on peut déjà tirer des conclusions sur la résistance totale, le coefficient d'emmagasinement et le bilan d'eau. Pour les circonstances dans les Pays-Bas on peut déduire que par le refoulement d'une petite rivière l'économie moyenne peut être 50 mm/année au maximum.

Cette publication est illustrée avec quelques données concernant la topographie et la possibilité du refoulement dans les bassins de la rivière Aa et de la rivière Dommel dans la province de Noord-Brabant (Pays-Bas).