26 OCT. 1957

K O N I N K L I J K   N E D E R L A N D S

M E T E O R O L O G I S C H   I N S T I T U U T

Wetenschappelijk Rapport W.R. 57-005 (III-201)

Dr. H.J. de Boer

Het verband tussen de grondwaterstand en de neerslag en verdamping.

De Bilt, 1957

KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT

Wetenschappelijk Rapport
W.R. 57-005 (III-201)
U.D.C. 551-579 ~~(492)~~

Dr. H.J. de Boer

Het verband tussen de grondwaterstand en de neerslag en verdamping.

Inhoud:

0 Inleiding

Sinds september 1952 zijn op een aantal stations metingen van verdamping en van grondwaterstanden verricht, naast de gewone neerslagmetingen. In de loop van 1953 breidde het aantal stations, waarop dergelijke metingen werden verricht, zich uit tot een 55-tal. Per 1 maart 1956 zijn deze metingen van verdamping en van grondwaterstanden beëindigd.

Deze activiteit was een gevolg van de door de "Commissie Onderzoek Landbouw-waterhuishouding Nederland" (kortweg C.O.L.N.) geuite wenselijkheid om inzicht te verkrijgen in de dagelijkse fluctuaties van het grondwaterpeil onder invloed van de meteorologische factoren neerslag en verdamping.

In samenwerking met het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut is het onderzoek inzake dit vraagstuk opgezet. De metingen werden onder leiding van het K.N.M.I. uitgevoerd, terwijl dit instituut tevens de bewerking van het materiaal op zich nam.

Over de metingen gedaan in het tijdvak van 1 september 1952 tot aan 1 maart 1954 en over de bewerking van dit materiaal is door Dr. C. Kramer verslag uitgebracht in een Wetenschappelijk Rapport W.R. 54-002 (III-135) van het K.N.M.I., De Bilt, 1954, getiteld: "Onderzoek naar de invloed van neerslag en verdamping op de dagelijkse fluctuaties van de grondwaterstand."

In genoemd verslag is o.a. een korte beschrijving van de apparatuur gegeven. Voor ons doel is voldoende als we weten, dat de neerslag in mm wordt gemeten, de verdamping in cc van de verdampingsmeter volgens Piche en dat de grondwaterstanden gemeten worden in cm als hoogten van het grondwaterniveau beneden het maaiveld.

In het laatste deel van het genoemd verslag is door Kramer een verband tussen de grondwaterstand enerzijds en de neerslag en verdamping anderzijds afgeleid uit de hydrologische balans:

$$P - E - A = \Delta G + \Delta T, \qquad (1)$$

waarin P = neerslag; E = verdamping (in feite evapotranspiratie); A = ondergrondse waterafvoer; ΔG = verandering van de subphreatische watervoorraad en ΔT = verandering van de supraphreatische watervoorraad, alle grootheden genomen over eenzelfde tijdvak.

Na het overlijden van Dr. Kramer werd schrijver dezes verzocht een onderzoek in te stellen naar het functioneel verband tussen de grondwaterstand en de neerslag en verdamping.

1 Het functioneel verband.

Bij de bestudering van het in de inleiding genoemde verband, dat door Kramer uit formule (1) was afgeleid, kwam het mij voor, dat dit verband niet voldoende soepel was om gemakkelijk op de gegevens van de neerslag P, de verdamping E en de afstand H van het grondwaterpeil beneden het maaiveld te worden toegepast. Daarom zal uit formule (1) een ander verband worden afgeleid. We moeten bedenken, dat de genoemde hydrologische balans geldig is voor een zeker tijdvak. Daar de metingen van P, E en H elke dag plaats vinden, kiezen we voor het tijdvak, waarvoor formule (1) telkens geldig is, de lengte van een dag.

Als we een aantal dagen P, E en H hebben gemeten, dan kunnen we de grootheden, welke we op de i^{de} dag van de meetreeks hebben gemeten, aanduiden door P_i, E_i en H_i; de grootheden op de $(i+1)^{ste}$ dag door P_{i+1}, E_{i+1} en H_{i+1}. Ook wordt $H_i - H_{i+1}$ aangegeven door ΔH_i, $\Delta H_i - \Delta H_{i+1}$ door $\Delta^2 H_i$, $\Delta^2 H_i - \Delta^2 H_{i+1} = \Delta^3 H_i$, enz.

De ondergrondse water af- of aanvoer A veroorzaakt direct of met enige vertraging een verandering in de grondwaterstand. Daar A zelf niet wordt gemeten, bemerkt men van een eventuele vertraging niets, maar alleen de verandering van H, die wordt gemeten; dus $A = -a\Delta H$.

De verandering van de subphreatische watervoorraad heeft hetzelfde effect op de grondwaterstand als A, zodat gesteld mag worden $\Delta G = b\Delta H$.

De verandering van de supraphreatische watervoorraad ΔT kan in twee delen gesplitst gedacht worden: de verandering van de watervoorraad in de hangwaterzone ΔT_1 (zie fig.1) en de verandering van de watervoorraad in de capillaire zone ΔT_2.

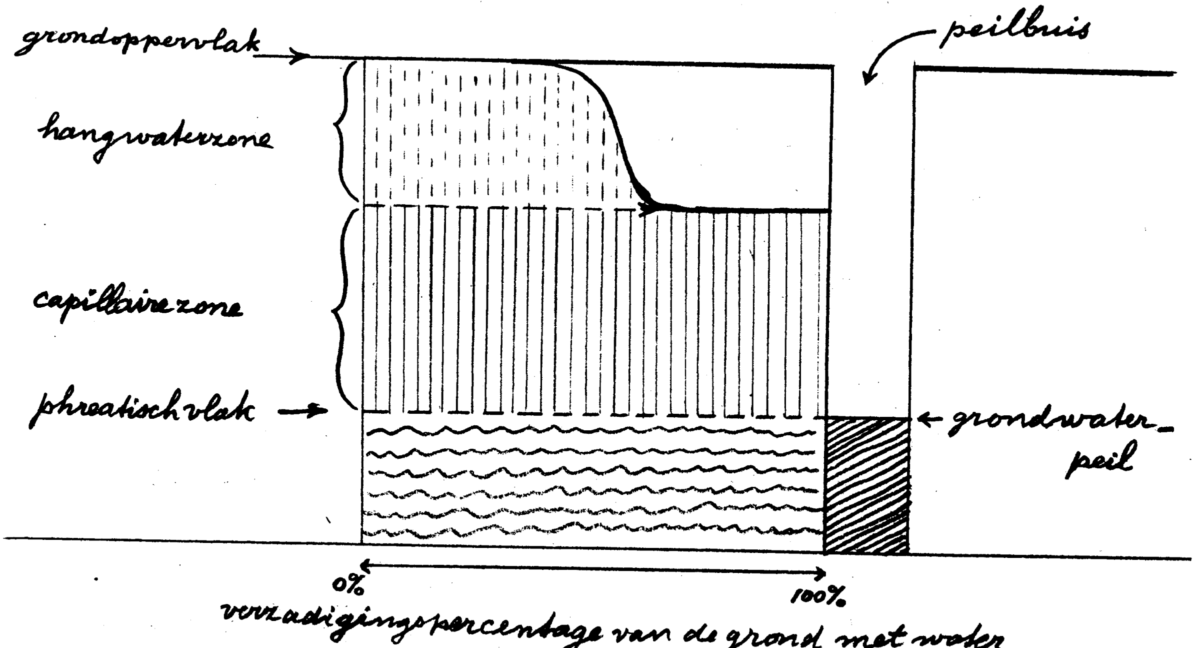

fig. 1

Deze ΔT_2 is slechts een hulpgrootheid, daar de capillaire zone, zij het met enige vertraging, met het grondwaterpeil op en neer gaat. We moeten dus ΔT_1 omzetten in bekende meetbare grootheden.

Voor de beschouwing van ΔT_1, moeten we twee gevallen onderscheiden:

1e de grond is begroeid, terwijl de wortels der gewassen tot in de capillaire zone reiken. ΔT_1 is dan in de eerste plaats evenredig met de neerslag P en met de verdamping E of $\Delta T_1 = c\ P - d\ E$. Maar de watervoorraad in de hangwaterzone verandert ook door lek uit deze zone naar de capillaire zone. Opzuiging van water door de wortels der gewassen uit de capillaire zone verandert slechts de waarde van d. De verandering in de watervoorraad van de hangwaterzone door transport naar de capillaire zone is gelijk maar tegengesteld aan de daardoor veroorzaakte verandering in de watervoorraad van de capillaire zone; dus in totaal wordt $\Delta T_1 = c\ P - d\ E - e\Delta T_2$.

2e de grond is niet begroeid of de grond is wel begroeid, doch de wortels van de begroeiing reiken niet tot in de capillaire zone. Dan is ook ΔT_1 evenredig met P en met de verdamping E, zodat in dit geval eveneens geldt $\Delta T_1 = c\ P - d\ E$. Echter een watervoorraadverandering in de hangwaterzone door lek kan alleen plaats vinden naar de capillaire zone en niet omgekeerd (tenzij misschien in zeer geringe mate door verdamping in de poriën). Dan geldt ook in dit geval voor de totale watervoorraadverandering in de hangwaterzone $\Delta T_1 = c\ P - d\ E - e\ \Delta T_2$. Een vermindering van de watervoorraad in de capillaire zone (niet door verdamping) zal resulteren in een vermeerdering van het grondwaterpeil op dezelfde dag i (in eerste benadering) en ook op de volgende dag i+1 (in tweede benadering) en misschien ook nog op de daarop volgende dag i+2 (in derde benadering) of in formule gebracht:

$-\Delta T_2 = f\Delta H_i + k$ (in eerste benadering) op dag i

$-\Delta T_2 = f\Delta H_i + g\ \Delta H_{i+1} + k$ (in tweede benadering) op dag i en dag (i+1).

$-\Delta T_2 = f\Delta H_i + g\ \Delta H_{i+1} + h\Delta H_{i+2} + k$ (in derde benadering) op dag i, dag(i+1) en dag(i+2)

Hierin kan de constante k beschouwd worden als een restterm wegens het approximatieve karakter van de bovengenoemde vergelijkingen.
Deze uitdrukkingen zijn ook als volgt te schrijven:

$$-\Delta T_2 = f\Delta H_i + k$$
$$-\Delta T_2 = (f+g)\Delta H_i - g.\Delta^2 H_i + k$$
$$-\Delta T_2 = (f+g+h).\Delta H_i - (g+2h).\Delta^2 H_i + h.\Delta^3 H_i + k$$

Tot slot moet nog in beschouwing genomen worden het omgekeerde geval, n.l. de invloed op het supraphreatisch systeem door een verandering van het grondwaterpeil ten gevolge van ondergrondse aan- of afvoer van water en ten gevolge van een verandering van de subphreatische watervoorraad. Een dergelijke verandering van het grondwaterpeil zal resulteren in een niveauverandering van de capillaire zone, waarbij de dikte en inhoud van deze zone niet verandert. Dit heeft tot gevolg, dat de hangwaterzone dikker of dunner wordt. Dan zal, indien de grond onbegroeid is of indien de grond begroeid is, terwijl het wortelstelsel zich steeds in de hangwaterzone blijft bevinden, geen verandering in de verdamping optreden. Ook zal geen verandering in de verdamping optreden, indien het wortelstelsel van de begroeiïng van de grond zich geheel of voor een groot deel in de capillaire zone blijft bevinden bij een op- of neergaande plaatsverandering van de capillaire zone onder invloed van verandering van het grondwaterpeil. In deze gevallen behoeft aan bovenstaande beschouwingen niets te worden toegevoegd.

Slechts in de gevallen, dat door grondwaterpeilverandering een zodanige verandering in de benatting van het wortelsysteem van de begroeiïng optreedt, dat daardoor een verandering in de verdamping uit de begroeiïng ontstaat, schieten onze beschouwingen te kort. We behoeven echter daarin niet te berusten. Immers als we E als de werkelijke plaatsvindende verdamping opvatten, dan gaan onze beschouwingen wel door. Met de verdampingsmeter volgens Piche wordt een potentiële verdamping gemeten. Er wordt verondersteld, dat tussen deze potentiële verdamping en de reële verdamping een lineair verband bestaat. Slechts een wijziging in de coëfficiënt van E moet dan worden aangebracht.

Wij zullen nu de hydrologische balans volgens de hierboven afgeleide formules in de te meten grootheden H, P en E opschrijven. In eerste benadering vinden we dan door substitutie, als H, P en E in dezelfde eenheden worden gemeten:

$$\Delta H = \frac{1-c}{-a+b+ef-f}\,P - \frac{1-d}{-a+b+ef-f}\,E - \frac{(e-1)k}{-a+b+ef-f} \qquad (2)$$

In formule (2) zijn de coëfficiënten van P en E essentiëel verschillend van teken; we kunnen dus meer algemeen schrijven:

$$\Delta H = a_1 P - b_1 E + c_1 \qquad (2a)$$

In tweede benadering vinden we:

$$-\frac{g(e-1)}{-a+b+e(f+g)-(f+g)}\,\Delta^2 H + \Delta H = \left\{(1-c)P - (1-d)E - k(e-1)\right\} \Big/ \left\{-a+b+e(f+g)-(f+g)\right\} \qquad (3)$$

In formule (3) zijn de coëfficiënten van P en E essentiëel verschillend van teken; meer algemeen kunnen we dus schrijven:

$$- d_2 \Delta^2 H + \Delta H = a_2 P - b_2 E + c_2 \tag{3a}$$

In derde benadering vinden we:

$$\frac{(e-1)h}{-a+b+(e-1)(f+g+h)} \Delta^3 H - \frac{(e-1)(g+2h)}{-a+b+(e-1)(f+g+h)} \Delta^2 H + \Delta H = \frac{1-c}{-a+b+(e-1)(f+g+h)} P$$

$$- \frac{1-d}{-a+b+(e-1)(f+g+h)} E - \frac{(e-1)k}{-a+b+(e-1)(f+g+h)} \tag{4}$$

Ook hier zijn de coëfficienten van P en E verschillend van teken. Meer algemeen kan de formule worden geschreven:

$$e_3 \Delta^3 H - d_3 \Delta^2 H + \Delta H = a_3 P - b_3 E + c_3 \tag{4a}$$

Het verband tussen het grondwaterpeil enerzijds en de neerslag en de verdamping anderzijds kan dus in feite worden gegeven, afhankelijk van de benadering, als een differentievergelijking van de eerste orde, resp. tweede of derde orde, waarbij Δt dan de eenheid van tijd, in casu één dag is.

2 Het waarnemingsmateriaal.

Ten einde de theorie in § 1 ontwikkeld te toetsen zullen we de formules (2a) en (3a) toepassen op waarnemingen van P, E en H verricht op een zevental stations gedurende het tijdvak 1 maart tot en met 31 december 1953. Een tijdvak in 1953 is gekozen, omdat de waarnemingsreeksen in 1953 het kleinst aantal hiaten vertonen.

De keuze van het zevental stations, n.l. Gemert, Schagen, Niekerk, Barneveld, De Bilt, Boskoop en Vroomshoop is bepaald door een min of meer gelijkmatig verdeelde ligging over het land in de eerste plaats, het geringe aantal hiaten in de tweede plaats en door het verschil in grondsoort, waarop de diverse stations zijn gelegen in de derde plaats.

In het genoemde tijdvak konden we van Gemert, Niekerk en Boskoop 306 dagwaarden van P, E en H gebruiken; van Schagen 299, van Barneveld 300, van De Bilt 276 en van Vroomshoop 268 dagwaarden.

Voor alle aantallen dagwaarden waren de metingen van H compleet; de metingen van P eveneens op een paar hiaten van Schagen na. De som van de neerslag in de hiaten was bekend en een evenredige interpolatie van de dagsommen is gemaakt met behulp van het nabijgelegen station Groetpolder. Alle stations vertonen hiaten in de waarneming van de verdamping E.

In enkele gevallen was de verdampingssom over twee dagen wel gemeten.

De ontbrekende verdampingscijfers zijn geschat met behulp van omliggende stations in evenredigheid met de afstand van elk dezer stations. Oorspronkelijk hadden we het station Dedemsvaart in plaats van Vroomshoop gekozen. Maar de correlatiecoëfficiënt r_2 bleek slechts 0,56 te bedragen. Bestudering van de gegevens van het grondwaterpeil bracht aan het licht, dat in de maanden september en oktober vooral het peil praktisch niet veranderde, ondanks neerslag of droogte. De oorzaak hiervan was, dat het water in de Dedemsvaart in die maanden altijd op een constant hoog peil wordt gehouden voor de scheepvaart, waardoor het grondwaterpeil ten zeerste wordt beïnvloed. Daarop is de keuze op Vroomshoop gevallen.

3 Resultaten.

Met de 306 dagwaarden van H, P en E van Gemert, de 299 dagwaarden van Schagen, de 306 dagwaarden van Niekerk, de 300 dagwaarden van Barneveld, de 276 dagwaarden van De Bilt, de 306 dagwaarden van Boskoop en de 268 dagwaarden van Vroomshoop gaan we achtereenvolgens de 7 stellen coëfficiënten van het eerste benaderde verband tussen H enerzijds en P en E anderzijds, dat door formule (2a) wordt weergegeven, berekenen met behulp van de methode van de kleinste kwadraten. De resultaten van deze berekeningen zijn als volgt:

1. Gemert	$\Delta H = 0{,}386\ P - 0{,}164\ E + 0{,}1$	$r_1 = 0{,}70$	
2. Schagen	$\Delta H = 0{,}969\ P - 0{,}143\ E - 1{,}0$	$r_1 = 0{,}64$	
3. Niekerk	$\Delta H = 0{,}427\ P - 0{,}182\ E - 0{,}5$	$r_1 = 0{,}67$	
4. Barneveld	$\Delta H = 0{,}919\ P - 0{,}238\ E - 0{,}4$	$r_1 = 0{,}70$	systeem
5. De Bilt	$\Delta H = 0{,}343\ P - 0{,}109\ E - 0{,}1$	$r_1 = 0{,}69$	I
6. Boskoop	$\Delta H = 0{,}948\ P - 0{,}089\ E - 1{,}2$	$r_1 = 0{,}74$	
7. Vroomshoop	$\Delta H = 0{,}505\ P - 0{,}095\ E - 0{,}6$	$r_1 = 0{,}69$	
gemiddeld	$\Delta H = 0{,}642\ P - 0{,}146\ E - 0{,}5$		

De tweede benadering via formule (3a) geeft de volgende resultaten:

1. Gemert	$-0{,}350\ \Delta^2 H + \Delta H = 0{,}386\ P - 0{,}164\ E + 0{,}1$	$r_2 = 0{,}81$	
2. Schagen	$-0{,}325\ \Delta^2 H + \Delta H = 0{,}969\ P - 0{,}143\ E - 0{,}9$	$r_2 = 0{,}78$	
3. Niekerk	$-0{,}410\ \Delta^2 H + \Delta H = 0{,}427\ P - 0{,}182\ E - 0{,}5$	$r_2 = 0{,}78$	
4. Barneveld	$-0{,}342\ \Delta^2 H + \Delta H = 0{,}919\ P - 0{,}238\ E - 0{,}4$	$r_2 = 0{,}84$	systeem
5. De Bilt	$-0{,}337\ \Delta^2 H + \Delta H = 0{,}343\ P - 0{,}109\ E - 0{,}1$	$r_2 = 0{,}82$	II
6. Boskoop	$-0{,}216\ \Delta^2 H + \Delta H = 0{,}948\ P - 0{,}089\ E - 1{,}0$	$r_2 = 0{,}77$	
7. Vroomshoop	$-0{,}304\ \Delta^2 H + \Delta H = 0{,}505\ P - 0{,}095\ E - 0{,}6$	$r_2 = 0{,}80$	
gemiddeld	$-0{,}326\ \Delta^2 H + \Delta H = 0{,}642\ P - 0{,}146\ E - 0{,}5$		

In de bovenstaande 2 systemen van differentievergelijkingen betekenen de waarden van de apart neergeschreven r_1 en r_2 de correlaties, welke er tussen de linker- en rechterleden van de differentievergelijkingen bestaan, wanneer we de waargenomen H-waarden in cm invullen, de P-waarden in mm en de E-waarden in cc.

In § 1 hadden we reeds aangegeven hoe de tekens van de coëfficiënten van P en E moesten luiden. De resultaten laten zien, dat de waarneming de theorie op dit punt bevestigt.

De derde benadering hebben we niet meer toegepast, daar we genoegen nemen met een verband tussen H enerzijds en P en E anderzijds, dat de waarneming gemiddeld over 7 stations tot op 80% benadert.

4 Conclusies.

1e We willen onze formules toetsen op de juistheid. Nemen we bijv. de formule van Gemert van systeem I. We gaan deze sommeren over de 306 dagen, waaruit de formule is berekend geworden. $\sum P$ blijkt 407,3 mm te zijn; $\sum E$ = 1610,7 cc, terwijl $\sum \Delta H = -71$. Dan wordt de sommatie $\sum \Delta H = 0{,}386 \times 407{,}3 - 0{,}164 \times 1610{,}7 + 0{,}120 \times 306$. Het rechterlid van de sommatie blijkt de waarde - 70,3 te hebben, terwijl de waarnemingen van $\sum \Delta H$ de waarde - 71 aangeeft. Met de overige 6 stations voeren we dezelfde bewerking uit. De resultaten staan bijeen in tabel 1.

Tabel 1

	$\sum P$	$\sum E$	aantal dagen	$\sum \Delta H$(wrg)	$\sum \Delta H$(ber.)
Gemert	407,3	1610,7	306	-71	-70,3
Schagen	496,2	1121,3	299	+20	+20,0
Niekerk	612,7	945,9	306	-54	-54,1
Barneveld	442,8	1283,8	300	-27	-27,3
De Bilt	491,3	1270,9	276	+ 9	+ 8,7
Boskoop	530,7	1218,9	306	+12	+12,4
Vroomshoop	501,7	986,6	268	+ 5	+ 5,3

Uit tabel 1 blijkt, dat de formules juist zijn berekend. Bovendien geven de correlatiecoëfficiënten voor de vergelijkingen voor de verschillende stations van systeem I en systeem II aan, dat het werkelijk gebeuren goed door onze formules wordt beschreven.

2e Indien we iets te weten willen komen over de doorlaatbaarheid van water door de verschillende grondsoorten, zouden we deze kunnen berekenen uit het verband tussen de neerslag van heden met de grondwaterpeilverandering van heden en met de grondwaterpeilverandering van morgen en met die van overmorgen, enz; dit verband vinden we in de correlatiecoëfficiënten

$$\frac{\Sigma \Delta H_i P_i}{\Sigma(\Delta H_i)^2 \Sigma P_i^2}, \frac{\Sigma \Delta H_{i+1} P_i}{\Sigma(\Delta H_{i+1})^2 \Sigma P_i^2}, \frac{\Sigma \Delta H_{i+2} P_i}{\Sigma(\Delta H_{i+2})^2 P_i^2}, \text{enz.} \qquad (5)$$

Daar de noemers van deze correlatiecoëfficiënten praktisch alle dezelfde waarde hebben en daar uit het volgende zal blijken dat door dit genoemde feit slechts de waarde van de tellers gebruikt behoeft te worden, kan de berekening van de waarde van de noemers achterwege blijven. We moeten tevens bedenken, dat, daar we iets over de doorlaatbaarheid willen weten, we moeten bepalen hoe de uitstromingssnelheid van de neerslag, gevallen op dag i op de oppervlakte van de grond en door de hangwaterzone en de capillaire zone sijpelende, in het niveau van het grondwater verandert met de tijd (dag i, dag (i+1), dag (i+2), enz.) Als we nu de tellers van de bovengenoemde correlatiecoëfficiënten berekenen bijv. voor De Bilt kunnen we sommeren over 276 dagwaarden in 1953. De grootheden P, E en H werden elke ochtend om 8 uur gemeten. De neerslag kan vallen gedurende de gehele dag i, zodat

$$\left(\sum_1^{276} \Delta H_i P_i - \frac{1}{276} \sum_1^{276} \Delta H_i \sum_1^{276} P_i\right)$$ geldt voor het interval van

t_o tot 24 uur als functie van de tijd, immers het water, dat in de grond dringt, vormt een benattingsfront, dat een tijd t_o nodig heeft om het grondwater te bereiken. Voor De Bilt blijkt deze grootheid de waarde 2207 te hebben. Zo geldt:

$$\sum_1^{276} \Delta H_{i+1} P_i - \frac{1}{276} \sum_1^{276} \Delta H_{i+1} \sum_1^{276} P_i = 1126 \qquad \text{voor het interval } 24 \leq t \leq 48$$

$$\sum_1^{276} \Delta H_{i+2} P_i - \frac{1}{276} \sum_1^{276} \Delta H_{i+2} \sum_1^{276} P_i = 452 \qquad \text{voor het interval } 48 \leq t \leq 72$$

$$\sum_1^{276} \Delta H_{i+3} P_i - \frac{1}{276} \sum_1^{276} \Delta H_{i+3} \sum_1^{276} P_i = 250 \qquad \text{voor het interval } 72 \leq t \leq 96 \qquad (6)$$

$$\sum_1^{276} \Delta H_{i+4} P_i - \frac{1}{276} \sum_1^{276} \Delta H_{i+4} \sum_1^{276} P_i = 0 \qquad \text{voor het interval } 96 \leq t \leq 120$$

Gemiddeld genomen is in De Bilt van de neerslag, op een bepaalde dag gevallen, na 4 dagen geen invloed meer op het grondwaterniveau te bespeuren. Op deze plaats moeten we echter uitdrukkelijk vermelden, dat bij deze beschouwingen geen rekening wordt gehouden met het gepersisteerd zijn van de dagelijkse neerslaghoeveelheden. De in (6) genoemde cijfers kunnen aldus worden opgevat. Van de op één dag gevallen hoeveelheid neerslag is na $(24-t_o)$ uur een gedeelte gelijk aan 2207/(2207+1126+452+250) = 0,547 tot in het grondwater doorgedrongen; zo is na $(48-t_o)$ uur (2207+1126)/(2207+1126+452+250) = 0,826 doorgedrongen; na $(72-t_o)$uur is 0,938 doorgedrongen en na $(96-t_o)$ uur heeft de gehele hoeveelheid neerslag (behalve hetgeen verdampt is en hetgeen door de plantenwortels is opgenomen) het grondwater bereikt. In tabel II hebben we bijeen gebracht gelijksoortige gegevens als boven voor alle 7 stations.

Tabel II

Station	na$(24-t_o)$	na$(48-t_o)$	na$(72-t_o)$	na$(96-t_o)$	$\bar{H}$ in cm.
Gemert	0,618	0,896	1,000		109
Schagen	0,733	1,000			136
Niekerk	0,394	0,728	0,902	1,000	136
Barneveld	0,599	0,878	0,965	1,000	117
De Bilt	0,547	0,826	0,938	1,000	126
Boskoop	0,945	1,000			56
Vroomshoop	0,719	0,945	1,000		53

In tabel II hebben we om een betere indruk te krijgen van de snelheid waarmee het water bij het grondwaterniveau aankomt, de hoogte van het grondwaterniveau beneden het maaiveld $\bar{H}$ in cm, gemiddeld over het aantal waarnemingsdagen, aangegeven in de laatste kolom. Op het oog ziet het er naar uit, dat te Boskoop het water het snelst door de bodem loopt, terwijl dit het langzaamst plaatsvindt te Niekerk en Vroomshoop.

We hebben een empirische formule gevonden, welke aangeeft het deel f van de totale hoeveelheid neerslag (verminderd met hetgeen is verdampt en door de plantenwortels is opgenomen) op de beschouwde dag, dat na t tijdseenheden het grondwater heeft bereikt. Deze formule luidt:

$$f = 1 - e^{-m(t-t_o)} \qquad (7)$$

In formule (7) is t_o het aantal uren, waarna het eerste neerslagwater op de beschouwde dag het grondwater bereikt. Na t_o uren begint het grondwaterniveau dus te veranderen ten gevolge van de neerslag op de beschouwde dag.

We kunnen wel een formule theoretisch afleiden, waarmee we de op tijd t uitgestroomde hoeveelheid neerslag kunnen berekenen. Hierin zullen moeten voorkomen het poriënvolume, de permeabiliteit van de grondlaag, de hoogte van het grondwaterniveau en de capillaire druk in cm. Nu hangen de permeabiliteit en vooral de capillaire druk sterk af van de vochtigheidsgraad van de grondlaag. Als we aannemen, dat de vochtigheidsgraad constant is in de laag, dan zouden we gemakkelijk een theoretische formule kunnen toepassen.

De vochtigheidsgraad is in de praktijk zelden constant met de hoogte, zodat we de voorkeur aan onze empirische formule geven.

We zullen nu formule (7) toepassen op de gegevens van De Bilt in tabel II

$$1 - e^{-m\,(24-t_o)} = 0{,}547$$
$$1 - e^{-m\,(48-t_o)} = 0{,}826$$
$$1 - e^{-m\,(72-t_o)} = 0{,}938$$

Uit de eerste twee vergelijkingen vinden voor m de waarde 0,041 en uit de twee laatste vergelijkingen berekenen we m = 0,044. We stellen daarom dat m de waarde 0,042 heeft. Als we de laatste waarde in de drie vergelijkingen invullen, vinden we voor t_o de waarde 5,4 uren. Zowel m als t_o gelden voor een gemiddelde hoogte van het grondwaterniveau beneden het maaiveld van 126 cm. Ten einde de doorlaatbaarheid voor de verschillende stations beter met elkaar te kunnen vergelijken, zullen we m reduceren op een hoogte H = 100 cm. Als we nu α de doorlaatbaarheidscoëfficiënt noemen bij een grondwaterniveau van 100 cm, dan is voor De Bilt α = 1,26m = 0,054.

Deze berekeningswijze voeren we ook uit voor de overige 6 stations uit tabel II. Dit gelukt echter niet voor Schagen en Boskoop, daar we slechts over één vergelijking met twee onbekenden beschikken. Om enig inzicht in de grootte der constanten te verkrijgen gaan we als volgt te werk. Schagen en Niekerk hebben dezelfde waarde voor H, n.l. 136 cm. Nu zetten we op milimeterpapier de volgende punten voor Niekerk uit: $\{t=t_o= 11{,}8;\ 0\}$, $\{t=24;\ 0{,}394\}$, $\{t=48;\ 0{,}728\}$, $\{t=72;\ 0{,}902\}$, $\{t=96;\ 1{,}000\}$. Door deze punten trekken we met de hand een kromme. Nu zetten we voor Schagen uit de punten $\{t=24; 0{,}733\}$, $\{t=48;\ 1{,}000\}$. Vervolgens trekken door deze twee punten een soortgelijke kromme als voor Niekerk. Dan blijkt dat t_o dan tussen 0 en 4 uren moet liggen. Hieruit berekenen we, dat m moet liggen tussen 0,055 en 0,066 en zo moet α liggen tussen 0,074 en 0,090. Op geheel dezelfde wijze bepalen we bij vergelijking met Vroomshoop, dat voor Boskoop t_o moet liggen tussen 0 en 1 uur. In tabel III hebben we nu m, α, t_o en H voor de 7 stations verzameld.

Tabel III

Station	m	α	t_o in uren	$\bar{H}$ in cm.
Gemert	0,054	0,059	6,2	109
Schagen	0,055-0,066	0,074-0,090	0-4,0	136
Niekerk	0,038	0,052	11,8	136
Barneveld	0,051	0,060	6,2	117
De Bilt	0,042	0,054	5,4	126
Boskoop	0,121-0,126	0,068-0,071	0-1,0	56
Vroomshoop	0,069	0,036	5,5	53

Uit tabel III blijkt, dat te Vroomshoop de bodem het slechtst doorlaatbaar is (α=0,036), terwijl Schagen de best doorlaatbare grond heeft (α tussen 0,074 en 0,090). Gemert en Barneveld, welke stations beide op zandgrond liggen, hebben dezelfde waarde voor α. Bij de beschouwing van de α-waarden valt het op, dat Schagen en Boskoop de best doorlaatbare gronden hebben. De vraag rijst of de bewerking van de grond hierbij van invloed is.

Zoals we boven reeds hebben vermeld is t_o gedefiniëerd als de tijd in uren, welke het benattingsfront nodig heeft om de afstand $\bar{H}$ af te leggen. Het verband tussen t_o en $\bar{H}$ kan beschreven worden met de wet van Darcy: 1)

$$t = \frac{X_p}{K_T} \left(z - \psi \, {}^{e}\log \frac{z+\psi}{\psi}\right) \qquad (8)$$

Hierin is

t = de tijd

z = de afstand tussen het benattingsfront en het bodemoppervlak in cm

ψ = capillaire potentiaal uitgedrukt in cm.

X_p = potentiële watercapaciteit van de grond.

K_T = permeabiliteit van de doorlatende laag in cm/uur.

Als we deze formule nu toepassen bijv. op Gemert, dan vullen we voor z in de waarde van $\bar{H}$ = 109 cm. Voor t vullen we in t_o = 6,2 uur. Als we nu voor ψ een redelijke waarde van 50 cm aannemen en voor X_p een redelijke waarde van 0,33, dan berekenen we dat K_T (de permeabiliteit) een waarde heeft van 2,7 cm/uur.

Hieruit blijkt dat, de waarden van t_o vermeld in tabel III niet abnormaal zijn.

1) R.H.A. van Duin: "Tillage in relation to rainfall intensity and infiltration capacity of soils"
Neth. J. Agr. Sc. 3 (1955), 182-192.

We moeten echter wel bedenken, dat ook bij deze berekening in de praktijk γ niet constant is door de laag heen, daar de vochtigheidsgraad niet constant met de hoogte is. Hoewel we formule (8) niet mogen toepassen, kunnen we met behulp van deze formule wel de grootte-orde van K_T vaststellen.

We willen nog een opmerking maken. Het zou aanbeveling verdienen, dat de waarnemingen van H, P en E te Schagen en Boskoop in elk geval en misschien ook voor de overige stations niet één keer doch 2 of 3 keren per dag zouden geschieden. We zouden dan de verschillende grootheden, zoals de doorstromingssnelheid van de neerslag als functie van de tijd, beter kunnen bepalen.

5 Samenvatting.

Vanaf 1 maart 1953 tot aan 1 maart 1956 zijn de neerslag P, de verdamping E (gemeten met een Piche evaporimeter) en de hoogte van het grondwaterpeil H op een aantal stations gemeten. De waarnemingen in 1953 van een 7-tal stations (Gemert, Schagen, Niekerk, Barneveld, De Bilt, Boskoop en Vroomshoop) zijn bewerkt om het verband tussen H enerzijds en P en E anderzijds op te sporen. Dit verband bleek een eerste orde differentievergelijking in H naar de tijd te zijn in eerste benadering; in tweede benadering bleek het verband een tweede orde differentievergelijking te zijn. Als een maat voor de nauwheid van het verband werd de correlatiecoëfficiënt genomen; de eerste benadering gaf gemiddeld (het rekenkundig gemiddelde van de correlatiecoëfficiënten van de 7 stations) een correlatie van 0,69 en de tweede benadering gemiddeld een correlatie van 0,80.

We waren ook in staat een maat aan te geven voor de doorlaatbaarheid voor neerslagwater van de gronden bij de verschillende stations.

6 **Summary.**

From March 1^{st} 1953 up to March 1^{st} 1956 observations of precipitation P, of evaporation E measured by a Piche evaporimeter and of height of the groundwater level below the soil-surface H have been performed. We have investigated the observations during 1953 of 7 stations (Gemert, Schagen, Niekerk, Barneveld, De Bilt, Boskoop and Vroomshoop) as to whether a relation between H on one hand and P and E on the other hand could be discovered. A first approximation of this relation appeared to be a difference equation in H with respect to t (time) of the first order; a second approximation showed a difference equation of the second order. We have taken the correlation coefficient as a measure of the closeness of the relation; the first approximation showed a correlation attaining a value of 0.69 on the average (the arithmetic mean of the correlation coefficients of the 7 stations), while the second approximation produced a mean value of 0.80 for the correlation.

We were able to define a "seeping coefficient", that is a measure for the passage of precipitation through the soils near the abovementioned stations to the groundwater level.

De Bilt, mei 1957.