

Het onderlinge verband tussen de grondwaterdiepte,
de afvoer en de neerslag

ir. J. Bon

Inleiding

Voor de uitvoering van beekverbeteringen is het van belang, de maatgevende afvoer te kennen, die door een beek afgevoerd moet kunnen worden, zonder dat overstromingen met onaanvaardbare frequentie plaatsvinden.

Afhankelijk van de te dragen risico's zal deze afvoer bijvoorbeeld eens per 10, 20 of 50 jaar mogen voorkomen, op grond van de gedachte, dat men voor zo zeldzaam optredende overstromingen niet te veel geld mag uitgeven. In het volgende wordt uiteengezet hoe deze maatgevende afvoer bepaald zou kunnen worden.

Bij het onderzoek werd gebruikgemaakt van zelfregistrerende meters, zowel voor de bepaling van de grondwaterstanden, als voor de regenhoeveelheden en beekpeilen.

De gegevens die de registratiestroken van de meters ons kunnen leveren werden aan een analyse onderworpen. Als voorbeeld werden van een serie regenbuien van augustus 1961 de drie stroken op een overzichtelijke wijze op een tekening weergegeven. Uit de analyse van de registratiestroken bleek dat de afvoer die een regenbui teweegbracht niet in verband stond met de diepte van het grondwater. Dit maakte het mogelijk een scheiding te maken naar de basisafvoeren en de afvoermeerdering die door een regenbui werd veroorzaakt.

De samenhang tussen de gevallen neerslag en de maximale afvoermeerdering kon worden vastgelegd.

Na een analyse van de regenfrequentie kon worden bepaald welke regenhoeveelheid als maatgevend kan worden aangenomen, om met een zekere frequentie te worden overschreden, opdat de dan optredende schade zo veel mogelijk beperkt blijft.

Met deze aangenomen regenhoeveelheid en de daarbij behorende maximale afvoer is de maatgevende afvoer van het meetpunt te bepalen.



Doordat in een stroomgebied op vele andere meetplaatsen ook afvoermetingen zijn verricht, waardoor de onderlinge afvoerverhoudingen bekend zijn geworden, kan met de bepaalde maatgevende afvoer van het registratiepunt, op de andere meetplaatsen de maatgevende afvoer worden bepaald.

1. Bewerkingswijze van de gegevens

De gebruikelijke wijze van bewerken van samenhangende series gegevens bestaat uit het opstellen van een hypothese van onderlinge samenhang, het door allerlei wiskundige bewerkingen afleiden van betrekkingen, het controleren van de juistheid van deze hypothesen en het uitwerken door een of andere vereffeningstechniek, hetzij grafisch, hetzij als kleinste kwadratenprobleem.

Deze werkwijze berust op de veronderstelling, dat men het probleem in grote trekken overziet, maar dat men alleen de constanten niet kent en dat de waarnemingsfouten de samenhang kunnen versluieren. De ervaring bij de studie van de afvoeren in de laatste jaren heeft echter twijfel aan de juistheid van deze veronderstelling doen rijzen.

De vraag doet zich voor, of men niet inplaats van de onvolkomenheid en de onnauwkeurigheden in de waarnemingen te zoeken, er op verdacht moet zijn, dat het de eigenschappen die de afvoer beheersen zelf zijn, die onvoldoende bekend zijn.

Deze wijze van het stellen van het probleem heeft een bewerkingsmethode doen ontstaan, die afwijkt van de gebruikelijke vereffeningstechniek.

Bij deze techniek wordt de bewijsvoering niet gegeven door fraaie nauwe stippenzwermen en kleine marges van onbetrouwbaarheid. Waar deze optreden valt verder weinig meer te verklaren. De visuele presentatie maakt hier gebruik van vage stippenzwermen, waarin voor de grootte en richting van de afwijkingen van het gemiddelde een verklaring wordt gezocht, die voor zoveel van deze afwijkingen als mogelijk is opgaat. De hier te houden beschouwingen zijn vooral gericht op de vraag, wat van geval tot geval de verklarende eigenschap zou kunnen zijn.

Voor een studie, die met nog onbekende factoren rekening wil houden, verdient de hierna gevolgde techniek, die niet met gemiddelden maar met overschrijdingsgrenzen werkt, aanbeveling.

2. Het verkrijgen van doorlopende afvoergegevens

De afvoeren worden gemeten in l/sec. en kunnen gemakshalve omgerekend worden in mm per etmaal.

Nu doet zich in het gebied van de Lunterse beek de moeilijkheid voor, dat aan het eind van het voorjaar en meestal gedurende de hele zomer de stuwen werden gesteld. Deze stuwen bleven helaas niet op een bepaalde hoogte gehandhaafd, doch werden hoger of lager gesteld, al naar gelang zich een droge of natte periode voordeed. Het gemeten beekpeil was niet langer een eenvoudige maat voor de afvoer. Het stellen van de stuwen verandert het verval te sterk om dit te kunnen verwaarlozen. Wel kon bij een gestuwde beek de afvoer worden gemeten, doch de verkregen afvoeren corresponderden dan niet meer met waterhoogten van de Q-h lijnen, die vervaardigd waren tijdens metingen bij volkomen gestreken stuwen.

Om nu ook voor de zomerperiode bij gestelde stuwen toch de afvoer van de registreerstroken af te lezen, werd van de in vroegere jaren afgelezen waterstanden de stuwhoogte van het afgelezen peil afgetrokken.

Uit enkele controle-metingen bij gestuwde beek is gebleken, dat bij een bepaalde toename van de waterhoogte tengevolge van een regenbui, deze peilsverhoging ongeveer gelijk bleek te zijn aan de peilsverhoging bij gelijke toename van de afvoer, doch nu bij gestreken stuw. Op deze wijze werd het mogelijk voor meetreeksen waarbij het verval niet gemeten was de zomerafvoeren en afvoertoenames bij gestelde stuwen te benaderen. De afvoeren werden dan beschouwd als afvoeren zonder stuwen. Het is duidelijk dat deze techniek onzekerheden bevat en een verhangmeter wordt thans geconstrueerd om aan de bezwaren van de ontoereikende afvoermeting te ontkomen.

De invloed van het stuwen van de beek had op de grondwaterstand op het meetpunt - 100 m van de beek - praktisch geen invloed. Gebleken is dat in een regenloze periode bij het stellen van de stuw, waarbij het beekpeil met ruim 80 cm was opgelopen, pas na twee dagen de langzaam dalende grondwaterstand overging in een constant niveau. Bij een onveranderde toestand van gestreken stuw zou de grondwaterstands-daling nog 2,5 cm hebben bedragen. Doordat hieruit bleek dat het beekpeil weinig betekenis had voor de grondwaterstand bij het meetpunt, werd er van afgezien om het beekpeil bij gestelde stuwen als factor te gebruiken.

In ons klimaat komen langdurige droge perioden weinig voor en in de korte perioden reageert de grondwaterstroom blijkbaar te traag om in deze studie veel invloed te kunnen uitoefenen. Binnen 100 m afstand heeft het stuwpeil een steeds grotere invloed op het grondwaterpeil naarmate de afstand tot de beek kleiner wordt. Als belangrijke factoren werden in deze studie gebruikt: de diepte van het grondwater op 100 m van de beek, het ongestuwde beekpeil en de afvoer.

3. Een voorbeeld van neerslag, afvoer en grondwaterdiepte in een regenperiode

Om een duidelijk inzicht te krijgen van het verloop van de grondwaterspiegel, het beekpeil en de beekafvoer, welke door de regens van augustus 1961 zijn veroorzaakt, is de figuur 1 vervaardigd. Het cijfermateriaal van deze buien staat in tabel 2 vermeld.

Bovenaan staan de overgetekende regenhoeveelheden van de regenstroken. Daaronder de hoogteverandering van het grondwater op N.A.P.-schaal uitgezet, die door de regens werden veroorzaakt.

Onderaan in de figuur is de waterspiegel van de beek eveneens op N.A.P.-hoogte aangegeven. Beide N.A.P.-schalen lopen niet in elkaar over, het beekpeil is namelijk een halve meter opgeschoven om de tekening een kleiner formaat te geven. Aan de rechter benedenzijde is nog een schaal aangebracht die de afvoer van de beek in mm weergeeft en correspondeert met de N.A.P.-hoogte.

In deze tekening komt duidelijk naar voren het snel oplopen van de grondwaterstand en de matige stijging van het beekpeil dat veel sneller dan het grondwater, na het bereiken van de top terugvalt tot een laag peil, van 8,60 m + N.A.P.

Herhaaldelijk worden de toppen van beekafvoer ook eerder bereikt dan de top van de grondwaterstijging. Was bij het begin van deze regen-serie het verschil tussen het beekpeil en de grondwaterstand slechts 77 cm, namelijk 9,27 m - 8,50 m, aan het einde bedroeg het verschil 9,58 m - 8,55 m = 1,03 m. Na de laatste bui op 25 augustus 1961 was de grondwaterstand 9,85 m en het beekpeil 8,67 m + N.A.P. Het verschil bedroeg dus 1,18 m. De afstand tussen de grondwaterstandsbuis en de beek bedroeg 100 m.

Wat nu hier door een serie buien aan waterstandsstijging is opgetreden, komt in de winterperiode normaal voor. Door de regelmatige kleine regenbuien in de winter, zonder dat veel verdamping optreedt,

wordt het verschil tussen het grondwaterpeil en het beekpeil groot.

Hoge grondwaterstanden worden dan aangetroffen bij geringe beekafvoeren en lage beekpeilen.

4. De frequentie-verdeling van de neerslag

Alvorens de gevolgen van de neerslag op de afvoer te behandelen, wordt eerst nagegaan hoeveel regen in de opeenvolgende maanden van het jaar verwacht kan worden. Door de overschrijdingskans vast te stellen, bepaalt men de maatgevende neerslag. De grootte van de maatgevende afvoer, als gevolg van de maatgevende neerslag bepaalt de afmetingen van de te graven en de te verbeteren leidingen. Van groot belang is echter, dat men er rekening medehoudt of overschrijding van deze berekende toelaatbare afvoer tijdens een groei- of oogstseizoen optreedt of gedurende de wintermaanden, waarbij praktisch geen schade van kortstondige wateroverlast aan de dan te velde staande gewassen kan worden aangebracht.

Om een indruk te krijgen van de regenhoeveelheden die per maand vallen zijn de gegevens van het regenstation Putten, voor de jaren 1967 - 1953 gekozen. Het station is aan de rand van de Gelderse vallei gelegen, weliswaar wat noordelijker dan het stroomgebied van de Lunterse beek.

Daar er geen gegevens bekend zijn van de regenhoeveelheden van de enkele bui, werd noodgedwongen van de ééndagse regencijfers de frequentie aangegeven van de regenhoeveelheden die eens per 10, 20 of 50 jaar vallen. De meeste buien in het Lunterse beekgebied vallen wel binnen een enkele dag. Ter illustratie is ook de frequentieverdeling gemaakt van de 30-daagse regenval. Tabel 1 geeft hiervan een overzicht.

Tabel 1

Frequentieverdeling van 1-daagse en 30-daagse regenval. Regenstation Putten. Neerslag in mm die wordt overschreden met de aangegeven kans.

maand	1 x 10 jaar		1 x 20 jaar		1 x 50 jaar		maximum
	dagregen	maandregen	dagregen	maandregen	dagregen	maandregen	
jan.	22	94	24	108	30	129	40
febr.	22	84	29	107	43	135	53
maart	21	77	24	83	25	105	26
april	20	81	25	92	28	109	30
mei	27	90	32	96	34	122	34
juni	29	105	32	112	36	142	41
juli	36	134	43	153	61	169	62
aug.	<u>41</u>	<u>145</u>	<u>55</u>	<u>161</u>	<u>81</u>	<u>199</u>	<u>110</u>
sept.	30	128	36	151	52	163	58
okt.	27	119	33	144	36	170	39
nov.	22	107	26	125	32	150	41
dec.	23	104	26	120	30	144	36

Als diagram is tabel 1 weergegeven in de figuur 2a voor de één-daagse regenvallen en in 2b voor de maandregenvallen. Duidelijk blijkt dat de zomermaanden juli, augustus en september de maanden zijn, niet alleen met de grootste maandregens, doch vooral met grote en zware regenbuien.

Wordt een afvoerleiding berekend op 8 mm afvoer per dag en er valt eens in de 10 jaar op één dag in augustus 41 mm regen, dan is de kans groot dat niet alleen een groot deel van het terrein overstroomd wordt, doch dat het te lang duurt eer de grondwaterstand, uit landbouwkundig oogpunt bezien, weer tot een gewenst peil terugkeert.

De schade zou dan vrij groot kunnen zijn. Gaat men uit van maandsom regenvallen, dan zal als gemiddelde afvoer over de maand augustus deze 8 mm ruim voldoende zijn, daar een maandtotaal van 240 mm niet eens in de 50 jaar wordt bereikt. Er dient te worden nagegaan wat het verband is tussen de neerslag en de afvoer.

5. Het verband grondwaterdiepte en afvoer

Uit de registratiestroken van de beekpeilmeter bleek, dat afhankelijk van het beekpeil en de regenintensiteit, een regenbui welke 3 à 4 uur na een vorige valt, een aparte afvoergolftop laat registreren.

In de bovenlopen kan reeds een nieuwe top na een uur gevormd worden. Niet alleen stijgt na een bui het beekpeil vrij snel, doch de beek daalt ook weer snel, wanneer geen tweede bui erop volgt.

Bij buien die de 30 mm niet te boven gaan, komt de afvoer meestal binnen een etmaal weer op een waarde terug die slechts iets hoger is dan de beginwaarde. Dit kan niet van de grondwaterstand gezegd worden. Daarom mag worden aangenomen dat de grootte van de afvoergolf niet bepaald wordt door de grondwaterhoogte. Het is ook gebleken, dat soms de stijging van het beekpeil eerder plaatsvindt dan die van het grondwaterpeil.

Het leek ook daarom gewenst een splitsing te maken tussen de grootte van de beginafvoer q of basisafvoer, vlak voor de stijging van het beekpeil en de afvoervermeerdering Δq , die door de bui werd veroorzaakt.

Deze afvoervermeerdering welke de enkele bui veroorzaakt, dient men te leren kennen. De studie van de afvoer moet zich richten op de gevolgen van een afzonderlijke bui en niet op wat in een gehele dag of in meerdere dagen in totaal aan regen en afvoer optreedt. Dagregenvallen en eenmaal daagse afvoerbepalingen omvatten voor de kleine Nederlandse beken een te lang tijdvak.

Het vaststellen van de basisafvoeren geeft geen moeilijkheden. Deze hebben zeer kleine waarden, die uiteenlopen van 0 - 3 mm per etmaal. De topafvoeren zullen de criteria vormen waarop de verbeteringsplannen en de maatgevende afvoer moeten worden gebaseerd.

De grootte van de basisafvoeren werd uit directe metingen bepaald, of bepaald uit de registreerstroken door af te lezen wat de hoogte van het beekpeil was. Voor het omzetten van de beekpeilen in afvoeren dient dan de $q - h$ kromme. Deze basisafvoeren werden vastgesteld op de momenten dat nog geen regen was gevallen en nog geen stijging van het beekpeil optrad. Tijdens de sterke daling van de afvoergolf werden zo min mogelijk afvoeren bepaald daar deze niet representatief zijn voor een basisafvoer. De basisafvoer werd geacht weer te zijn bereikt wanneer de daling van de afvoergolf sterk was afgezwakt. Op deze momenten werd dan ook de grondwaterdiepte bepaald. De overeenkomstige

gegevens van de grondwaterdiepte en de waarden van de basisafvoer, uitgedrukt in mm, werden in een grafiek tegen elkaar uitgezet en weergegeven in figuur 3.

Een onderscheid werd gemaakt tussen de gegevens voor het voorjaar en die voor de zomer. De voorjaarsgegevens hebben betrekking op de periode van maart tot en met half mei over de jaren 1961 en 1962. De zomergegevens omvatten de periode van half mei tot half december 1961.

De overige maanden van december tot maart hebben geen cijfers opgeleverd in verband met kleine, door langdurige regens en vorstperiodes.

Er treedt in de waarnemingspunten een zekere spreiding op zowel voor die van de zomer, welke aangegeven zijn met kruisjes, als voor die van de winter, aangegeven met stippen. Deze spreiding van punten ontstaat, doordat voor de meting niet steeds een moment van stationaire toestand van grondwater en afvoer kan worden gekozen. In ons klimaat duren de droge tijden nooit zo lang dat een evenwichtstoestand wordt verkregen. De minimum waarden van de basisafvoeren gedurende de zomer of het voorjaar zijn in figuur 3 weergegeven door de twee kromme lijnen.

Het blijkt nu dat het verschil tussen de minimum basisafvoeren van de zomer en het voorjaar bij eenzelfde grondwaterdiepte beneden maaiveld 0,75 mm bedraagt. Verder blijkt, dat bij een grondwaterdiepte van 75 cm in de zomer geen afvoer door de beek meer plaatsvindt. Bij een hoge voorjaarsgrondwaterstand van 35 cm beneden maaiveld bedraagt de minimum basisafvoer bijna 2 mm. Het verschil tussen de voorjaars- en zomerafvoeren van 0,75 mm bij eenzelfde grondwaterstand op het meetpunt, zou verklaard kunnen worden door het verschil in de grotere verdamping in de zomer, waardoor een capillaire nalevering vanuit het grondwater plaatsvindt en een praktisch te verwaarlozen verdamping in het vroege voorjaar met een nazakkend bodemvocht uit de bijna verzadigde bovenlagen.

Ook werd vaak waargenomen, dat bij een bepaald beekpeil in hetzelfde jaargetijde zeer sterk variërende grondwaterstanden kunnen optreden.

Door het niet stationair zijn van de grondwaterstromingen kunnen bij eenzelfde drukhoogte verschillende afvoeren optreden en ook bij eenzelfde afvoer verschillende drukhoogten voorkomen. Variaties in het grondwater bij gelijke afvoer van meer dan 12 cm treden op.

De spreiding van de kruisjes en stippen in figuur 3, die de gegevens van de zomer- en voorjaarsafvoeren aangeven, wordt veelal veroorzaakt doordat na een voorafgaande regenbui de afvoer nog niet geheel op de oorspronkelijke waarde is teruggekomen, doch dat nog water van verder gelegen plaatsen wordt afgevoerd. Zo kan het voorkomen dat bijvoorbeeld in een natte zomer, wat betreft de verzadiging van de grond, hydrologisch gezien de voorjaarstoestand wordt bereikt.

De gevolgen hiervan zijn een vergrote basisafvoer, die soms groter kan zijn dan de minimale voorjaarsbasisafvoer.

Valt nu een regenbui op een grond met een bepaalde grondwaterdiepte, dan zal niet alleen het grondwater, tengevolge van de regen, stijgen maar ook zal de afvoer in de beek toenemen. Deze afvoer blijkt nu niet meer samen te hangen met de hoogte van de grondwaterstand.

Worden van de geregistreeerde buien, evenals in figuur 3, de beginafvoeren uitgezet tegen de grondwaterstanden, doch nu aangevuld met de topafvoer die door de bui teweeg wordt gebracht, dan wordt figuur 4a verkregen. De afvoervermeerdering Δq is met een pijl aangegeven, waarvan de punt de grootte van de topafvoer aangeeft. Reeds uit figuur en de volgende tabellen 2 en 3 valt de snelle daling van de topafvoer op die zich veelal na een enkele dag laat waarnemen. Deze topafvoergolven staan dan ook niet in verband met de hoogte van het grondwaterniveau. Dit doet ook niet aan de snelle dalingen mee.

Als voorbeelden zijn de gegevens van twee reeksen buien in de figuur 4b aangegeven, die uit de figuur 4a zijn gelicht.

Tabel 2

a. De augustusregen van 1961

datum	neerslag mm	grondwater diepte in cm voor de stijging	stijging grondwater cm	intensiteit afvoer mm/ etm. voor de bui	topafvoer intensi- teit mm/etm.
15/8	12,2	74,-	12,5	0,1	0,5
16/8	10,6	61,5	12,-	0,5	1,9
18-19/8	2,-	49,5	0	1,5	1,5
19/8	17,-	49,5	23,5	1,5	3,9
21/8	28,-	35,-	24,-	1,5	14,5
22/8	7,5	12,-	1,-	8,8	8,8
24/8	4,8	28,-	3,5	2,-	2,4
25/8	6,5	24,5	8,5	2,4	3,8

Ten aanzien van de cijfers voor de afvoeren uit tabel 2 valt op te merken, dat de topafvoer slechts kort van duur is en dan snel daalt (zie fig. 1).

De bui op 19 augustus had een topafvoerintensiteit van 3,9 mm/etm. doch op 21 augustus was voor de regenval de afvoer weer op het beginpeil van 1,5 mm/etm. gedaald. De bui op 21 augustus, gaf een topafvoerintensiteit van 14,5 mm/etm. Het grondwater was intussen met 24 cm opgelopen en stond toen op 35 - 24 = 11 cm beneden maaiveld.

Op het terrein stonden toen overal plassen. Dit maakt oppervlakte afstroming waarschijnlijk. De volgende dag was de afvoerintensiteit weer teruggelopen van 14,5 tot 8,8 mm/etm, terwijl het grondwater slechts 1 cm was gezakt toen de volgende bui van 7,5 mm viel. Deze 7,5 mm regen veroorzaakte door de grote afvoerintensiteit van 8,8 mm op dat moment geen volgende beekpeilstijging, doch een tijdelijk constant blijven van de afvoer. De reden hiervan is, dat de aanvoerintensiteit van het sloot- en grondwater naar de beek gelijk was aan de afvoerintensiteit van de beek. De neerslagintensiteit was van de 7,5 mm regen slechts 1,9 mm/uur, terwijl die van de vorige bui van 28 mm, 7 mm/uur bedroeg. Twee dagen later was de afvoer nog verder afgenomen en tot 2 mm/etm. gedaald.

Als tweede voorbeeld werd genomen de bekende december-regen van 1961. De gegevens over deze regens zijn in de tabel 3 weergegeven.

Hoewel dergelijke zware regens van begin december 1961 volgens de frequentieverdeling zeer zeldzaam in de maanden november-december optreden, kan deze neerslag in de augustusmaand zeker niet tot de grote uitzonderingen behoren. In vergelijking met het vorige geval was op eind november de begin grondwaterstand 16 cm hoger en de buien veel groter, doch deze vielen met iets grotere tussenpozen na elkaar.

Tabel 3

b. De december-regen 1961

datum	neerslag mm	grondwater diepte in cm voor de stijging	stijging grondwater cm	intensiteit afvoer mm/ etm. voor de bui	topafvoer intensi- teit mm/etm.
26-27/11	21,4	58,-	27,-	1,2	6,8
30/11- 1/12	49,7	31,-	41,-	3,3	73,3
4-5/12	20,7	+ 1,5	- 1,5	4,-	46,-
12/12	12,6	9,-	3,-	4,5	16,5

Evenals in het vorige voorbeeld blijkt ook uit dit praktijkgeval, dat de hoge topafvoerintensiteiten, welke door de tuien werden veroorzaakt betrekkelijk snel weer daalden tot geringe waarden.

Even voor de bui van 49,7 mm viel bedroeg het grondwater 31 cm beneden maaiveld, en de afvoerintensiteit was gedaald tot 3,3 mm/etm. Door de 49,7 mm regen heeft het land ter plaatse 10 cm onder water gestaan. Deze **inundatie**, die zich op vele plaatsen en over grote oppervlakten voordeed, veroorzaakte een topafvoerintensiteit van 73,3 mm. Na drie dagen was deze afvoer weer teruggelopen tot 4 mm/etm. toen de volgende regen zich aanmelde. Wel was ook het inundatie water in die drie dagen gezakt tot 1,5 cm boven maaiveld doch van **grondwaterberging** was geen sprake. Vandaar dat door de bui van 20,7 mm de topafvoerintensiteit ook opliep van 4 tot 46 mm/dag. Pas na een week was de afvoer weer teruggelopen tot het bedrag van 4,5 mm/etm.

Het grondwater daalde in die zelfde tijd slechts tot 9 cm, zie figuur 4b.

Opgemerkt dient te worden, dat het beekpeil op het moment van de hoogste topafvoerintensiteit van 73,3 mm/etm. nog 61 cm beneden het maaiveld stond.

De vraag doet zich voor, of gezien deze hoge topafvoer, die toch zelden voorkomt, het beekprofiel niet wat erg groot is. Van overstromingen vanuit de beken is in het hele gebied geen sprake geweest. Wel heeft het land tussen de beken en sloten grotendeels blank gestaan door de geringe grondwaterdiepte en de te grote onderlinge afstanden van de sloten. De grondwaterberging was gering en de grondwater opbolling reeds groot.

6. Het verband tussen de neerslag en de afvoervermeerdering

Om een inzicht te krijgen in het verband tussen de neerslag en de afvoervermeerdering, die zich bij iedere basisafvoer kan ontwikkelen werden in een grafiek de neerslaghoeveelheden N van de jaren 1961 en 1962 uitgezet tegen de afvoervermeerdering Δq . Beide zijn uitgedrukt in mm's. De uitgezette stippen werden ook weer onderscheiden naar zomer- en voorjaarsgegevens zie figuur 5a. Deze afvoervermeerdering heeft zich ontwikkeld op een beginafvoer. Deze beginafvoer kan soms de topafvoer zijn van een voorgaande bui of halverwege de daling van een afvoergolf. In vele gevallen heeft de ontwikkeling van de afvoer-

vermeerdering echter plaatsgevonden op een basisafvoer.

Bovendien zijn in deze figuur 5a niet de grondwaterdiepten verwerkt, die volgens figuur 4a ongeveer overeenkomen met lage basisafvoeren. Tevens wordt opgemerkt dat in natte zomers tijdens langdurige regenperioden of bij een reeks buien, hydrologisch de voorjaarstoestand wordt benaderd ook wat de afvoer betreft. Dit komt vooral tot uiting in de gegevens van het eerste halfjaar 1962. Hydrologisch gezien, kan over 1962 niet worden gesproken van een typische zomertoestand.

In de figuur 5a is een lijn getrokken die voor voorjaarsomstandigheden zo goed mogelijk de maximale afvoervermeerdering bij een bepaalde neerslag aangeeft. Ofschoon in de winter tijdens het onderzoek geen grote buien zijn gevallen, is de winterlijn doorgetrokken naar hoge afvoervermeerderingen. Deze vermeerderingen ontstaan door zeer grote buien die in de zomer bij hoge grondwaterstanden zijn gevallen, waarbij wordt aangenomen dat de voorjaarstoestand werd benaderd. Deze techniek van het benaderen van een afvoerlijn kan de indruk wekken, minder exact te zijn. Het lijkt echter de juiste weg, de benaderingen, die bij afvoerstudies toch gemaakt moeten worden, te maken als onderdeel van een afvoeranalyse, ook wanneer het aantal gegevens wat klein is. Voor het verzamelen van langere tijdreeksen zal veelal geen tijd zijn. Benaderingen op grond van een afvoeranalyse zullen dan toch meer vertrouwen verdienen, dan een schatting van de afvoerfactor zonder differentiatie.

Het blijkt nu dat deze afvoerlijn door een exponentiële functie kan worden weergegeven die voldoet aan de formule:

$$y = e^{0,06x + 1,38} - 3,9$$

Hierdoor wordt het extrapoleren van afvoeren naar hoge neerslagen zeer vergemakkelijkt. In de figuur 5b zijn de zelfde punten uitgezet, doch nu op half logaritmisch papier, waarbij het punt van de 0-afvoer op de logaritmische y-as 3,9 is verschoven. De lijn van de maximale afvoervermeerdering als gevolg van de regen wordt nu een rechte.

De overgang van de natte voorjaarstoestand tot een aangenomen "normale" zomertoestand zal geleidelijk zijn en kan onder alle omstandigheden - zoals bij laag of hoog water, diepe en hoge grondwaterstanden - plaatsvinden. Voor de zomerafvoer is in figuur 5a ongeacht dit verschil in begintoestanden een streeplijn getrokken, welke bij benadering het verband geeft tussen de neerslag en de afvoerver-

meerdering in de zomermaanden.

In de zomer zal dan een zekere mate van uitdroging van de bovenste grondlagen opgetreden zijn. De zomerlijn zal bij hoge neerslaghoeveelheden - ongeveer vanaf 30 mm - de winterlijn gaan benaderen. Zo blijkt een bui van 22 mm bij een grondwaterstand van 57 cm beneden maaiveld ongeveer 1,5 mm afvoervermeerdering te geven en een regenbui van 20,9 mm bij een grondwaterstand van 25 cm onder maaiveld een afvoer van 8,4 mm

Door de meestal diepere grondwaterstanden in de zomer en de daarmee gepaard gaande uitdroging van de bovengrond, wordt een deel van de neerslag, die op het land valt, gebruikt voor de aanvulling van het vochtdeficit of verdeeld over het onverzadigde profiel. Hierdoor zal dan ook een kleinere afvoer voor de zomer worden gevonden dan voor de winter of het voorjaar.

Uit de frequentieverdeling van de ééndaagse regens van het regestation Putten is gebleken dat de grote regenbuien in de maanden juli, augustus en september zijn te verwachten. Men kan bij een aanname van een te verwachten regenval van éénmaal in de 10, 20 of 50 jaar, die bijvoorbeeld voor augustus respectievelijk 42, 55 en 82 mm bedraagt, uitgaan van de lijn die het verband geeft tussen de neerslag en de afvoervermeerdering in het voorjaar. Dat hier van de voorjaarslijn gebruikgemaakt wordt vindt zijn reden daarin, dat bij deze hoge neerslagen de voorjaarsvochttoestand van het terrein wordt bereikt, waardoor grote hoeveelheden tot afstroming komen.

Bij de gevonden afvoervermeerdering dient de basisafvoer uit figuur 4a te worden opgeteld, om de totale afvoer te weten te komen. Deze waarde kan dan dienen om het profiel van de beken te berekenen.

Zo werd gevonden dat een bui van 50 mm regen op 30 november - 1 december 1961 bij een grondwaterstand van 31 cm beneden maaiveld, een afvoervermeerdering gaf van ongeveer 70 mm. De beginafvoer bedroeg op dat moment 3,3 mm, zodat een topafvoer van 73,3 mm werd bereikt. Weliswaar viel deze bui in november - december, doch in de maand augustus kunnen dergelijke buien veel frequenter voorkomen, terwijl eenzelfde kleine waarde voor de bergingsmogelijkheid niet uitgesloten kan worden. Meestal zullen de grondwaterstanden dan echter dieper zijn en blijft de afvoer lager.

De begin-grondwaterstand bedroeg ongeveer 30 cm in begin december 1961 toen de regen viel van bijna 50 mm. Deze grondwaterstand komt volgens de frequentieverdeling over gegevens van 8 winters éénmaal in de 3 winters voor.

Deze decemberregen kan geschat worden voor te komen met een frequentie van éénmaal in de 500 jaar. Deze combinatie voor december kan zich dus eens in de 1500 jaar herhalen.

Indien de grondwaterstand in december 50 cm diep staat, komt dit vijfmaal per winter voor, waardoor de herhalingstijd van een neerslag van 50 mm bij een grondwaterdiepte van 50 cm, éénmaal per 100 jaar voorkomt.

Voor augustus komt een grondwaterstand van 30 en 50 cm diepte ongeveer éénmaal in de 20 en éénmaal in de 3 jaar voor. De herhalingstijd dat bij deze grondwaterdiepten een bui van 50 mm valt met een frequentie van ongeveer éénmaal in de 20 jaar, bedraagt dan respectievelijk 400 en 60 jaar.

In onderstaande tabel zijn deze gegevens kort weergegeven.

Tabel 4

De herhalingstijden van een regenbui van 50 mm bij grondwaterstanden van 30 en 50 cm diepte, in december en augustus

	Kansen in jaren		Herhalingstijd in jaren	
	Neerslag 50 mm	Grondwater 30 50	Grondwater 30 50	
december	500 jr.	3 0,2	1500 100	
augustus	20 jr.	20 3	400 60	

Uit deze tabel ziet men dat bij grote regenbuien de verhouding van de herhalingstijden bij 30 cm grondwaterdiepten bijna 4 bedraagt en bij 50 cm grondwaterdiepte bijna 2 is geworden.

De regen van 25 mm komt in de winter ongeveer éénmaal per 20 jaar voor, en bij deze frequentie is de regen in augustus ongeveer 50 mm.

De gemiddelde grondwaterstanden bedragen voor de winter en zomer 30 en 50 cm en komen beide voor met een frequentie van éénmaal per 3 jaar. De herhalingstijden zijn echter voor beide gevallen 60 jaar.

Op 8 juli 1960 bijvoorbeeld zette, na een zeer lange droge tijd de regentijd van het natte jaar 1960 in. Na een bui van 12,6 mm op 7 juli, viel op 8 en 9 juli 49,9 mm bij een grondwaterstand van 92 cm diepte.

De basisafvoer bedroeg toen 0,1 mm, terwijl de toename van de afvoer bij een grondwaterstijging van 60 cm 10,9 mm bedroeg.

Deze regen was net zo groot als de regen die gevallen was op 30 november - 1 december 1961. De grondwaterstand liep door de bui in juli 1960 op tot 30 cm beneden maaiveld, terwijl de bui van 1961 viel toen het grondwater al op 31 cm stond.

De topafvoer werd hierdoor dus bijna zevenmaal zo groot.

7. Richtlijn voor onderzoek naar de afvoercoëfficiënt voor praktisch gebruik

Het lijkt thans mogelijk op korte termijn een stevige basis aan het vaststellen van een afvoercoëfficiënt te geven. Het meetprogramma zou dan als volgt moeten zijn.

1. Binnen de duur van een zomer en winter kan men in een stroomgebied op een aantal plaatsen afvoermetingen verrichten, waardoor van die meetpunten de volgende gegevens verkregen kunnen worden:
 - a. de afvoerkromme van ieder meetpunt
 - b. de afvoerverhoudingen van het gebied achter het meetpunt, onafhankelijk van de grootte van het stroomgebied en de maatgevende afvoer.
 - c. de afvoerverhoudingen van de tussen twee meetpunten afwaterende oppervlakten.
2. Door het plaatsen van een zelfregistrerende regenmeter, een zelfregistrerende peilschaal en verhangmeter en een grondwaterstandsmeter in de benedenloop kan uit de gegevens van deze instrumenten het verband worden bepaald tussen de afvoer en de regen.
3. Uit de gegevens van een bestaand regenstation kan de regenfrequentie van het stroomgebied worden onderzocht.
4. Een aanvullend veldonderzoek naar de samenhang tussen de schade die door afvoeroverschrijdingen kunnen worden veroorzaakt levert de sluitsteen van het onderzoek naar de afvoercoëfficiënt.

8. Samenvatting en conclusies

1. Voor het verkrijgen van doorlopende gegevens over de afvoer, grondwaterdiepte en neerslag zal gebruikgemaakt dienen te worden van zelfregistrerende meters. Bij verbeterde beken waarin stuwen zijn geplaatst zal men meetmethoden moeten toepassen die het debiet kunnen geven onafhankelijk van de stand van de stuwen.
2. Gebleken is dat in kleine stroomgebieden de enkele bui beslissend is voor een afvoergolf. Meerdaagse regenvallen en afvoeren zijn geen maatstaf om in de berekeningen op te nemen, daar de topafvoer meestal binnen 24 uur verdwenen is.
3. Voor de bepaling van de maatgevende afvoer gaat het om het verband tussen maximale afvoer welke door regenbuien van opklimmende sterkte wordt veroorzaakt en die met bekende frequenties kunnen worden overschreden.
4. Uit het frequentie onderzoek naar de ééndaagse regenval van het regenstation Putten blijkt dat in de zomermaanden juli, augustus en september, niet alleen de meeste neerslag valt, doch dat de buien ook groter en intenser zijn.
5. Een splitsing dient gemaakt te worden tussen de basisafvoer, die een zeker verband geeft met de grondwaterstand in regenloze tijden, en de afvoervermeerdering, die door een regenbui wordt veroorzaakt. Tussen de grondwaterdiepte en de topafvoer bestaat geen directe samenhang, omdat randafstroming, oppervlakte berging en afstroming plaats kan vinden.
6. Het grondwater bergend vermogen in de zomer van 7,5% dat wat groter is dan het bergend vermogen in de winter van 3 à 4% wordt door de 20 tot 30 mm zwaardere zomerregens te niet gedaan wanneer tussen winter- en zomerwaterstand een verschil gelijk of kleiner dan + 30 cm bestaat.
7. Uit de gegevens van regenval en de afvoervermeerdering bestaat een zeker exponentieel verband. Hierdoor is het mogelijk om uit een korte waarnemingstijd verzamelde gegevens door extrapoleren de afvoer bij grote, zelden voorkomende regens te vinden.