

or Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

VERWERKING, INTERPRETATIE EN TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN VAN
GRONDWATERSTANDSGEGEVENS MET BEHULP VAN OVERSCHRIJDINGSDUURLIJNEN

ing. P.C. Jansen

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking

I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. OVERSCHRIJDINGSDUURLIJNEN VAN HET GRONDWATER	2
2.1. Constructie	2
2.2. Interpretatie	3
2.3. Beperkingen	6
3. STATISTISCHE VERWERKING VAN DUURLIJNEN	7
3.1. U-test	7
4. KARAKTERISTIEKEN VOOR DE VORM VAN OVERSCHRIJDINGS- DUURLIJNEN	12
4.1. z/x-waarde als karakteristiek	12
4.2. Oppervlaktemaat als karakteristiek	13
4.3. Conclusies	16
5. RELATIE TUSSEN OVERSCHRIJDINGSDUURLIJNEN EN HET GRONDWATERREGIME	16
5.1. Toepassingsmogelijkheden	16
6. SAMENVATTING	25
7. LITERATUUR	27

1. INLEIDING

Bij het onderzoek naar de verklaring van verschillen in vegetatiepatronen in ruimte en in tijd speelt het onderzoek naar de waterhuishouding een belangrijke rol. Zo is het niveau van het grondwater in afhankelijkheid van de eigenschappen van de grond, van belang voor de vochtvoorziening van de vegetatie en het optreden van anaërobie in de wortelzone, terwijl onder andere de herkomst en de verblijftijd van het grondwater in de bodem bepalend zijn voor de waterkwaliteit.

Het bepalen van de diepte van het freatisch vlak met behulp van grondwaterstandsbuizen is bij het onderzoek naar de waterhuishouding in natuurgebieden relatief eenvoudig. De verwerking van deze waarnemingen blijft echter vaak beperkt tot tijd-stijghoogte diagrammen en de interpretatie daarvan. De omzetting van dergelijke diagrammen tot overschrijdingsduurlijnen biedt een snelle mogelijkheid om het inzicht in het grondwaterregime te vergroten. In deze nota is daartoe een aantal facetten van deze wijze van werken samengevat.

Van de weinige literatuur over duurlijnen van het grondwater (NIEMANN, 1973; YERLI, 1970 en KLÖTZLI, 1969) is in de hoofdstukken 2 en 3 gebruik gemaakt. Verder zijn de voorbeelden in deze nota waarbij geen bronvermelding is aangegeven afkomstig van een onderzoek naar de relatie tussen de vegetatie en de waterhuishouding in een natuurreservaat in de Gelderse Vallei (JANSEN en KEMMERS, 1980 en 1981). De bodem in het betreffende reservaat bestaat uit lemig en leemarm fijn zand.

2. OVERSCHRIJDINGSDUURLIJNEN VAN HET GRONDWATER

Een overschrijdingsduurlijn is een cumulatieve bewerking van grondwaterstanden waarbij de duur wordt aangegeven waarmee de in de in beschouwing genomen periode voorkomende grondwaterstanden worden overschreden.

Bij de constructie van een overschrijdingsduurlijn zal blijken dat een deel van de informatie van de tijd-stijghoogtelijn wegvalt, terwijl andere informatie overzichtelijker wordt. Daarnaast biedt een duurlijn nieuwe mogelijkheden tot interpretatie en is mathematische verwerking mogelijk.

2.1. C o n s t r u c t i e

Bij een tijd-stijghoogtelijn staat op de abscis de datum en op de ordinaat de diepte van het grondwater ten opzichte van het maaiveld of van NAP. Als voorbeeld is voor een hydrologisch jaar (april t/m april) de lijn in fig. 1a weergegeven.

Bij een overschrijdingsduurlijn is op de ordinaat eveneens de diepte van het grondwater ten opzichte van het maaiveld of van NAP aangegeven, terwijl op de abscis het aantal dagen van de in beschouwing genomen periode, in dit geval 0-365 dagen is uitgezet. Door in het tijd-stijghoogtediagram voor een aantal dieptes van het grondwater (bijvoorbeeld met intervallen van 5 cm) het aantal dagen te sommeren waarop de betreffende stand wordt bereikt of overschreden, kan de overschrijdingsduurlijn geconstrueerd worden (fig. 1b).

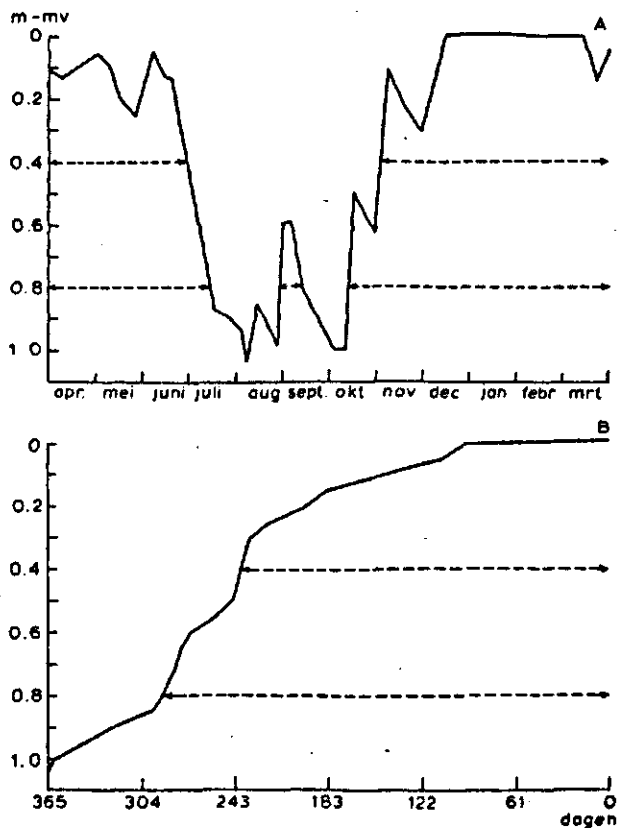


Fig. 1. Constructie van een overschrijdingsduurlijn uit een tijd-stijghoogtelijn

A. Tijd-stijghoogtelijn

B. Overschrijdingsduurlijn

2.2. Interpretatie

Door het cumulatieve karakter van een duurlijn worden veel onregelmatigheden en toevalligheden vereffend. Daardoor kan het grondwaterstandsverloop van één plek van een aantal verschillende jaren of van één jaar van een aantal verschillende plaatsen beter met elkaar worden vergeleken. Meerdere lijnen kunnen in één figuur afgebeeld worden zonder dat de overzichtelijkheid verloren gaat.

Het verloop van de duurlijn kan verschillende vormen aannemen. Deze vorm is afhankelijk van een aantal factoren, waaronder de termen van de waterbalans:

$$N - E - \Delta V = A - K$$


Hierin is: N = neerslag

E = verdamping

ΔV = verandering van de vochtinhoud van het profiel

A = afvoer

K = kwel

Bij afwezigheid van kwel zal de grondwaterstand gemiddeld volgens een sinusfunctie in de tijd verlopen. Omgezet tot een duurlijn levert dit een  - vorm op (fig. 5), welke als grondvorm beschouwd kan worden. Afwijkingen van deze grondvorm worden bepaald door de eigenschappen van de bodem en het grondwaterniveau. Vooral de berging in de onverzadigde zone is van belang. Zo zal blijken dat in gronden met een overeenkomstige samenstelling de jaarlijkse amplitudo van het grondwater meestal groter is naarmate de gemiddelde grondwaterstand dieper is en dat in grofzandige gronden de grondwaterstanden minder sterke, maar wel snellere, fluctuaties vertonen dan in slechter doorlatende, fijnzandige gronden. Dit komt in de vorm van de duurlijn tot uiting in een relatief holle (concave) vorm voor de grofzandige gronden ten opzichte van een wat meer bolle (convexe) vorm voor de fijnzandige gronden.

Een convexe duurlijn vorm, ontstaan door een langduriger verblijf van het grondwater hoog in het profiel, duidt niet alleen op een relatief grote aanvoer van water in de vorm van een neerslagoverschot of van kwel, maar ook op een zekere samenstelling van de grond. Bij een concave duurlijn vorm verblijft het grondwaterniveau langduriger dieper in het profiel. Dit is het gevolg van een relatief grote afvoer in de winterperiode. Deze vormaspecten worden in hoofdstuk 4 verder uitgewerkt.

Duidelijke, op dezelfde diepte jaarlijks terugkerende knikken in de duurlijn zijn het gevolg van een gelaagde opbouw van het profiel. In fig. 2a is als voorbeeld het effect van een goed doorlatende

tussenlaag weergegeven. In fig. 2b is dit voor een slecht doorlatende tussenlaag gedaan.

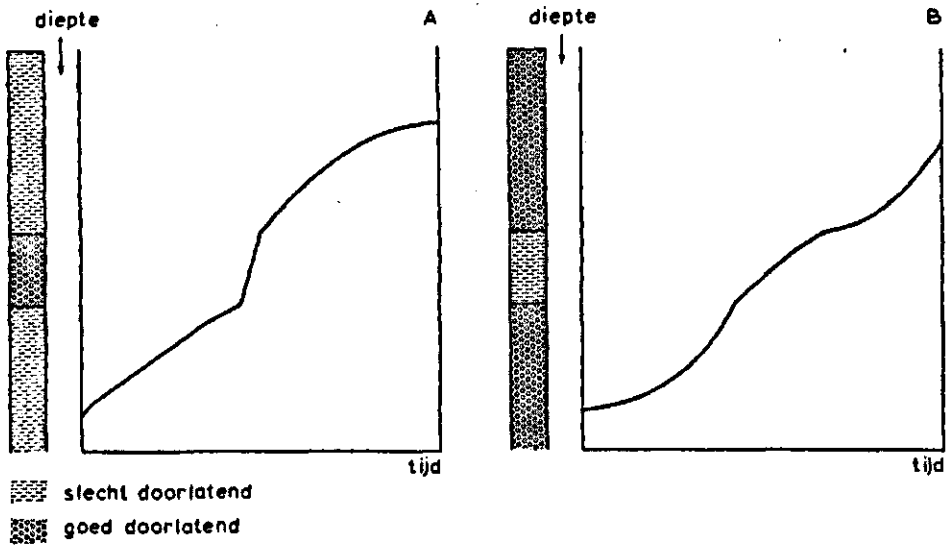


Fig. 2. Het effect van een afwijkende laag in het profiel op de duurlijnform

- A. Een goed doorlatende laag in een slecht doorlatend profiel
 B. " slecht " " " " goed " "

Voor de vegetatie-typen die uitsluitend onder invloed van het grondwater kunnen voortbestaan kan soms tot op associatie-niveau een relatie met het door de duurlijnen gekarakteriseerde grondwaterregime worden gevonden. Hierbij is het veelal niet nodig een duurlijn over een geheel (hydrologisch) jaar te construeren, maar kan worden volstaan met een zomerperiode welke overeenkomt met het vegetatieseeizoen en die duurt van 1 april tot 1 november. 's Winters zal het niveau van het grondwater meestal hoog zijn, zodat dit weinig invloed zal hebben op de vorm van de duurlijn. De duur waarover dergelijke hoge grondwaterstanden in het vegetatieseeizoen optreden is echter wel van belang. Door zuurstofgebrek, een geringe mineralisatie en lage temperaturen zal zich een hieraan aangepaste vegetatie ontwikkelen.

2.3. B e p e r k i n g e n

Bij het verwerken van tijd-stijghoogtelijnen tot overschrijdingsduurlijnen zullen niet alle mogelijkheden en voordelen van deze techniek, zoals genoemd in hoofdstuk 2.2 even duidelijk zijn.

Veel zal afhangen van de grootte en de verdeling van de neerslag. Als voorbeeld zijn in fig. 3 van eenzelfde plek de overschrijdingsduurlijnen van het groeiseizoen van 1978, 1979 en van 1980 afgebeeld. Dit voorbeeld betreft een grond met een humeus dek, geleidelijk overgaand in een fijnzandige ondergrond. De sterk afwijkende vorm van de duurlijn van 1979 is het gevolg van een neerslagrijk voorjaar.

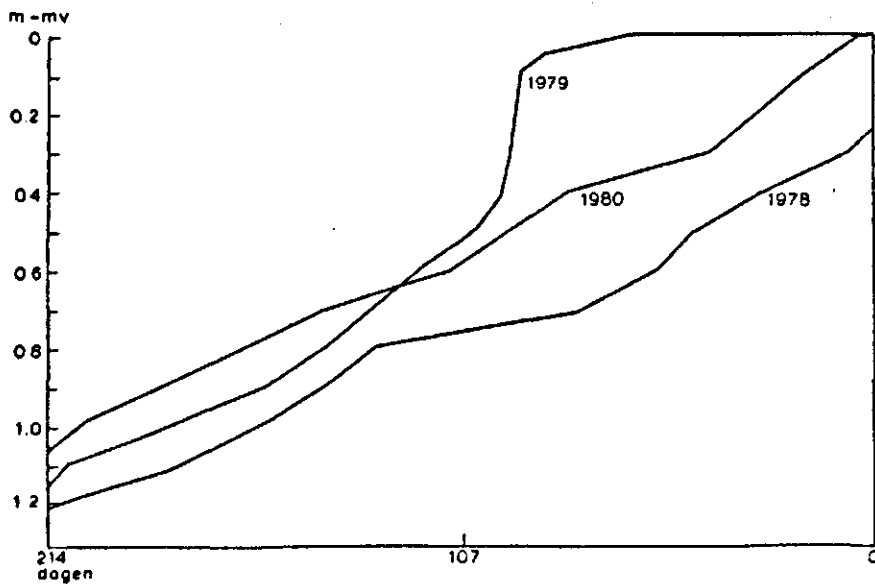


Fig. 3. Overschrijdingsduurlijnen van het grondwater op één plek in verschillende groeiseizoenen

Ondanks de verschillen tussen de duurlijnen daalt het grondwater-niveau ieder jaar tot een zelfde (regionale) hydrologische basis. Voor het voorbeeld uit fig. 3 is deze basis op ongeveer 1.1 m. beneden maaiveld gelegen. Maxima van verschillende jaren zullen bij duurlijnen van het gehele hydrologische jaar eerder gelijke waarden aannemen dan bij duurlijnen van alleen het zomerhalfjaar.

Een daling van de hydrologische basis is van belang voor de vochtvoorziening van de vegetatie. Ook zal dan de duur waarover de hoogste grondwaterstanden optreden afnemen.

Het effect van een grondwaterstandsverlaging op grondwatergebonden vegetatie-typen zal op grofzandige, leemarme gronden eerder merkbaar zijn dan op lemige fijnzandige gronden.

Verder zijn geografische en klimatologische omstandigheden van het gebied van belang voor de duurlijnvorm. Uitgaande van natte natuurgebieden blijken gegevens van NIEMANN (1973) niet met Nederlandse situaties vergelijkbaar door verschillen in bodem, klimaat en geaccidenteerdheid van het terrein. Zelfs vergelijkbare vegetatie-typen binnen Nederland kunnen verschillende grondwaterregimes hebben als gevolg van bijvoorbeeld verschillen in bodemsamenstelling.

Tenslotte heeft een duurlijn als nadeel dat er niet aan kan worden afgelezen wanneer en hoelang achtereen bepaalde standen zijn opgetreden. Zo zal het effect van één langdurige periode met diepe grondwaterstanden anders zijn dan meerdere perioden met diepe standen. Deze informatie gaat bij de verwerking van de tijd-stijghoogte tot overschrijdingsduurlijn verloren.

3. STATISTISCHE VERWERKING VAN DUURLIJNEN

De in de hydrologie gangbare verwerkingsmethoden van grondwaterstandsgegevens staan niet in dit hoofdstuk vermeld. Wel vermeld is een methode die meer specifiek voor de duurlijntechniek is.

3.1. U - t e s t

Duurlijnen die in vorm overeenkomen kunnen tot een bundel samengevoegd worden. Ook duurlijnen van bijvoorbeeld verschillende plaatsen met overeenkomstige vegetatie-typen of lijnen van meerdere jaren van één plek kunnen worden samengevoegd tot een bundel.

Twee bundels welke in vorm verschillen of worden verondersteld te kunnen verschillen, zijn met elkaar te vergelijken door statistisch te toetsen op significantie in hun verschillen. Naast toetsing over

de abscis is het mogelijk om over de ordinaat te toetsen. In het eerste geval worden uitspraken gedaan over significante verschillen in grondwaterstanden bij een bepaalde overschrijdingsduur. Bij toetsing over de ordinaat worden significante verschillen in overschrijdingsduur bij bepaalde grondwaterstanden bepaald. Bij de abscis is toetsing over zeven op gelijke afstand verdeelde punten vaak voldoende terwijl bij de ordinaat toetsing met intervallen van 0,1 m gebruikelijk is. Vanuit deze punten op de abscis of ordinaat worden loodlijnen opgericht. De snijpunten van een loodlijn met de duurlijnen van beide bundels worden beschouwd als steekproefuitkomsten. Vervolgens kan voor elk punt op abscis of ordinaat getoetst worden of de steekproefuitkomsten (uitgedrukt in m. -mv of in dagen) afkomstig zijn uit dezelfde massa. Verwerping van deze nul-hypothese geeft aan dat de steekproefuitkomsten uit verschillende massa's afkomstig zijn. Dit betekent dat er een significant verschil optreedt tussen beide bundels. Er kan bijvoorbeeld worden nagegaan of en voor welke grondwaterstandsdiepte bij bepaalde vegetatie-typen verschillen in overschrijdingsduur optreden. Ook is het mogelijk een vroeger en een huidig grondwaterregime met elkaar te vergelijken.

Afhankelijk van de norm die gekozen wordt of een verschil uitzonderlijk is kan voor verschillende significantie gebieden of -niveau's (α) worden aangegeven of de nul-hypothese al dan niet wordt verworpen. De significantie-niveau's kunnen in het diagram met de beide bundels weergegeven worden. In fig. 4 is hiervan een voorbeeld gegeven welke afkomstig is van een onderzoek naar de relatie tussen de vegetatie en de waterhuishouding in het komgrondenreservaat 'Tielerwaard-West' (KEMMERS en JANSEN, 1979). Het voorbeeld laat het verschil zien tussen het grondwaterregime aan de randen en het middengedeelte van de percelen tijdens het groeiseizoen van 1977. Tussen deze perceelsgedeelten waren verschillen in vegetatie waargenomen. Bundel A bestaat uit 15 duurlijnen die afkomstig zijn van gegevens van grondwaterstandswaarnemingen op maximaal 5 m vanaf een sloot. Bundel B telt eveneens 15 duurlijnen. Deze lijnen zijn afkomstig van gegevens welke op meer dan 10 m. vanuit de slootkant zijn waargenomen.

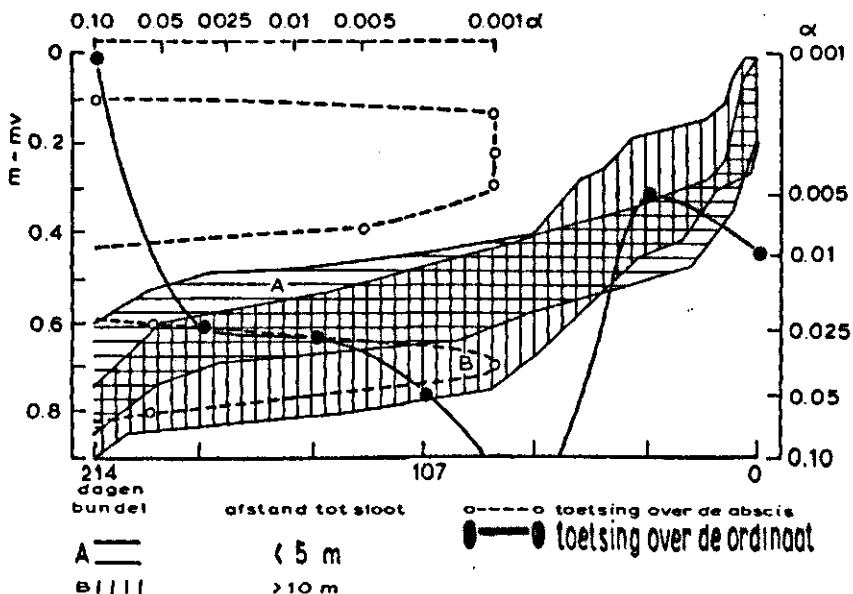


Fig. 4. Twee duurlijnbundels met de significantieniveau's (α) van verschillen tussen de grondwaterstanden en tussen de overschrijdingsduur

In fig. 4 zijn alleen de grenzen van de bundels aangegeven. Vergelijking van de beide bundels doet vermoeden dat als gevolg van de afstand tot de sloot de ontwateringssnelheid bij hoge grondwaterstanden en de infiltratie vanuit de sloot bij diepe grondwaterstanden bij bundel A groter is geweest dan bij bundel B. In de bundels komt dit tot uiting doordat bij bundel A significant lagere grondwaterstanden optreden bij een overschrijdingsduur van ongeveer 35 dagen, terwijl bij een overschrijdingsduur van 214 dagen bij bundel A significant hogere grondwaterstanden optreden.

De U-test toetst de volgende nul-hypothese: twee onafhankelijke steekproefuitkomsten zijn afkomstig uit één bundel duurlijnen: $F_1(x) = F_2(x)$. Deze hypothese impliceert tevens gelijke mediaanwaarden $\tilde{u}_1 = \tilde{u}_2$ en gelijke gemiddelde waarden, $U_1 = U_2$.

Voor de berekening van de toetsingsgrootte U worden de $(m+n)$ steekproefuitkomsten in een gemeenschappelijke, opklimmende reeks gerangschikt waarbij vermeld wordt uit welke van de twee steekproeven elk rangnummer afkomstig is. Indien de som van de rangnummers van steekproef 1 gelijk aan R_1 en de som van de rangnummers van steekproef

2 gelijk aan R_2 gesteld wordt, kunnen U_1 en U_2 berekend worden volgens:

$$U_1 = m \cdot n + \frac{m(m+1)}{2} - R_1 \quad \text{en} \quad U_2 = m \cdot n + \frac{n(n+1)}{2} - R_2$$

Deze berekening is te controleren, daar moet gelden: $U_1 + U_2 = m \cdot n$
 De gezochte toetsingsgrootte is de U met de kleinste waarde.
 De nulhypothese wordt verworpen indien de waarde van de gezochte toetsingsgrootte U kleiner is dan of gelijk is aan de kritische waarde van U ($m, n; \alpha$) uit tabel 1. Voor steekproeven met meer dan 40 waarnemingen ($m+n > 40$) wordt verwezen naar SACHS (1968).

Voorbeeld:

Van de bundels A en B uit fig. 4 zijn de grondwaterstanden in cm - maaiveld bij een overschrijdingsduur van 107 dagen:

bundel A: 44 44,5 50,5 52,5 53 55,5 56,5 57 59 61 61 61 61,5 62 63 (m=15)

bundel B: 48,5 49 51,5 56 58 61 61 61,5 62 62 63 63,5 70 74,5 77,5 (n=15)

Verwerking van deze gegevens geeft:

rangnummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	17
grondwaterstand	44	44,5	48,5	49	50,5	51,5	52,5	53	55,5	56	56,5	57	58	59	61
bundel	A	A	B	B	A	B	A	A	A	B	A	A	B	A	A
	17	17	17	17	20,5	20,5	23	23	23	25,5	25,5	27	28	29	30
	61	61	61	61	61,5	61,5	62	62	62	63	63	63,5	70	74,5	77,5
	A	A	B	B	A	B	A	B	B	A	B	B	B	B	B

$$R_1 = 1+2+5+7+8+9+11+12+14+17+17+17+20,5+23+25,5 = 189$$

$$R_2 = 3+4+6+10+13+17+17+20,5+23+23+25,5+27+28+29+30 = 276$$

$$\text{dan is } U_1 = 15 \cdot 15 + \frac{15(15+1)}{2} - 189 = 156$$

en

$$U_2 = 15 \cdot 15 + \frac{15(15+1)}{2} - 276 = 69$$

$$\text{ter controle: } U_1 + U_2 = 225 = m \cdot n$$

De kleinste waarde, $U_1 = 69$. Bij deze berekende U wordt de nulhypothese verworpen voor $\alpha = 0,05$ (zie tabel 1), dit wil zeggen dat bij een overschrijdingsduur van 107 dagen op een significantieniveau van 5% bundel A van bundel B verschilt.

4. KARAKTERISTIEKEN VOOR DE VORM VAN OVERSCHRIJDINGSDUURLIJNEN

Een nadere beschouwing van de vorm van duurlijnen maakt het mogelijk een snel inzicht te krijgen in bepaalde aspecten van het grondwaterregime. Deze vorm kan getalsmatig vastgelegd worden, wat wiskundige verwerking mogelijk maakt.

4.1. z/x - waarde als karakteristiek

De vorm van een duurlijn kan worden uitgedrukt in de z/x -waarde (NIEMANN, 1973). Hierin is z de grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld na de helft van de beschouwde periode, terwijl x de gemiddelde stand ten opzichte van het maaiveld over de gehele periode voorstelt. Door de mediaanwaarde z te delen door x wordt een coëfficiënt (z/x) verkregen waarmee de vorm van de duurlijn is vastgelegd. Een waarde $\frac{z}{x} < 1$ betekent een convexe duurlijn, terwijl $\frac{z}{x} > 1$ de coëfficiënt van een concave duurlijn is. Zowel de $\frac{z}{x}$ -waarde van een concave als van een convexe duurlijn naderen tot 1 naarmate de duurlijn rechter van vorm is en/of op een lager niveau ten opzichte van het maaiveld gelegen is.

Er gaan veel details verloren indien een duurlijn uitsluitend als $\frac{z}{x}$ -waarde is vastgelegd. Indien van één plek de coëfficiënten van meerdere jaren met elkaar vergeleken worden blijken zij door verschillen in duurlijnform als gevolg van de verdeling en de grootte van het neerslagoverschot uiteenlopende waarden aan te nemen, hetgeen de betrouwbaarheid van de z/x -waarde als karakteristiek van het grondwaterregime vermindert. Zo geldt voor de duurlijnen uit fig. 3 een $\frac{z}{x}$ -waarde van 0,98 voor 1978, van 1,10 voor 1979 en van 1,04 voor 1980.

Over een gelijke periode zijn de $\frac{z}{x}$ -waarden van meerdere plekken met een vergelijkbare bodemopbouw onderling wel goed vergelijkbaar. Hierbij heeft de plek met de grootste $\frac{z}{x}$ -waarde (>1) het sterkste infiltratie- en de plek met de kleinste $\frac{z}{x}$ -waarde (<1) het sterkste kwelkarakter. De rangorde van de $\frac{z}{x}$ -waarden van de verschillende plekken blijft voor verschillende perioden vrijwel gelijk.

4.2. O p p e r v l a k t e m a a t a l s k a r a k t e r i s t i e k

Het gemiddelde fictieve verloop van een grondwaterstand in een aantal jaren staat in fig. 5a afgebeeld. Door een grotere afvoer dan aanvoer van water daalt het grondwaterniveau in de zomerperiode. Dit niveau stijgt weer als de aanvoer de afvoer in het winterhalfjaar overtreft. Bij de hoogste en de laagste stand van het grondwater zijn aan- en afvoer aan elkaar gelijk.

Het aangevoerde water is afkomstig van: - neerslag

- kwel

- horizontale toestroming

Het afgevoerde water is verdwenen via: - capillaire nalevering als gevolg van evapotranspiratie

- infiltratie

- horizontale afstroming

Indien de daling van het grondwater het gevolg zou zijn van een constant verschil tussen aan- en afvoer van water, zou het verloop van deze daling éénparig zijn. Hetzelfde zou gelden voor het verloop van de stijging van het grondwater. Dit is in fig. 5a aangegeven. Door de ongelijke verdeling van neerslag, evapotranspiratie en andere factoren zoals het verhang van het grondwater, verlopen daling en stijging van de grondwaterstand niet éénparig. De verschillende trajecten van het grondwaterstandsverloop zijn in fig. 5a genummerd van 1 t/m 9. Bij de hoogste en laagste standen (1, 5 en 9) zijn aan- en afvoer aan elkaar gelijk. Tijdens het trajectgedeelte 2 t/m 4 is de afvoer groter dan de aanvoer. In traject 2 wordt het verschil tussen afvoer en aanvoer in toenemende mate groter. Bij punt 3 is dit verschil maximaal om tijdens traject 4

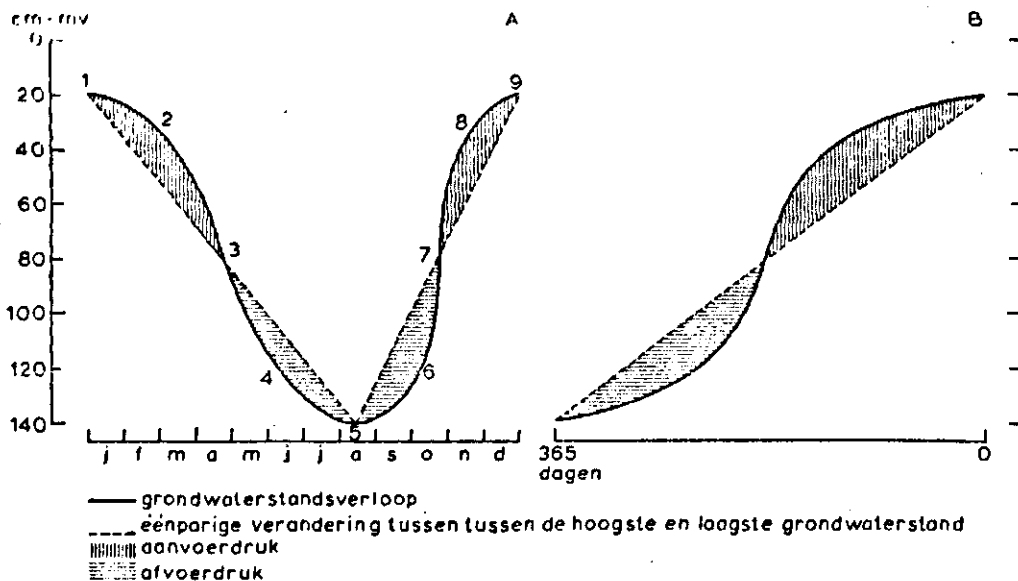


Fig. 5.a. Verloop van de grondwaterstand als gemiddelde over een aantal jaren
 b. Duurlijn van het verloop van de grondwaterstand als gemiddelde over een aantal jaren

in toenemende mate kleiner te worden. Tijdens het trajectgedeelte 6 t/m 8 overheerst de aanvoer. In traject 6 neemt deze in toenemende mate toe ten opzichte van de afvoer. Bij punt 7 is het verschil maximaal om bij 8 in toenemende mate kleiner te worden. Het grondwaterstandsverloop en het fictieve éénparige verloop uit fig. 5a zijn verwerkt tot overschrijdingsduurlijnen (fig. 5b).

Ten opzichte van de éénparige verandering in het grondwaterstandsverloop van fig. 5b (d.i. de lijn die de hoogste en de laagste stand met elkaar verbindt) duidt een bolle vorm op een extra aangevoerde hoeveelheid water, terwijl een holle vorm op een extra afgevoerde hoeveelheid duidt. De gearceerde vlakken uit fig. 5b vormen een maat voor deze extra aan- en afgevoerde hoeveelheden. De grootte van het gearceerde vlak is een produkt van lengte en tijd, waarbij de tijd eveneens als een lengte dimensie is voorgesteld. Door de aldus verkregen oppervlakte te delen door de lengte welke de tijd voorstelt wordt een gemiddelde lengte voor één dag uit de betreffende periode verkregen. Het produkt van deze lengte, uitgedrukt in meters, met het aantal dagen geeft de uiteindelijke waarde. Deze waarde is in

feite de som van de afstanden tussen de duurlijn en de lijn die de éénparige verandering aangeeft van de dagen dat de duurlijn een hol- of bolvormig verloop heeft. De lengtemaat geeft als het ware een druk (pressure) over een periode (time) aan en wordt in het vervolg pt-waarde genoemd. Deze waarde is positief voor het bolvormige gedeelte van de duurlijn en kan dan gezien worden als een aanvoerdruk. Bij een holvormig gedeelte van de duurlijn is de pt-waarde negatief en geeft dan een afvoerdruk aan. De uiteindelijke pt-waarde ontstaat door de positieve en een negatieve pt-waarde binnen één periode te sommeren.

Voor het voorbeeld uit fig. 5b geldt een pt-waarde van 28,7 m voor de periode van 0-185 dagen en een waarde van -25,4 m voor de periode van 185-365 dagen. Voor het bepalen van deze waarden zijn oppervlaktes van de gearceerde vlakten met behulp van een planimeter bepaald en omgerekend tot een gemiddelde aanvoerdruk van 0,155 m en een gemiddelde afvoerdruk van -0,136 m per etmaal. Deze waarden vermenigvuldigd met 185, respectievelijk 180 dagen resulteren in de bovengenoemde aan- en afvoerdruk. Op deze wijze worden drukken in meters berekend die onafhankelijk van de schaal van de tekening zijn. De rechte lijn die de hoogste en laagste stand met elkaar verbindt zal de duurlijn, bij het voorkomen van een buigpunt hierin, niet altijd door dit punt snijden. Dit betekent dat bijvoorbeeld een deel van een convexe vorm eveneens als afvoerdruk beschouwd wordt. Een duurlijn kan ook een afwisseling in concave en convexe trajecten vertonen. Voor een homogene grond zal het voorkomen van een dergelijke afwisseling voornamelijk het gevolg zijn van de verdeling van het neerslagoverschot. Deze wisselingen en het niet samenvallen van een duurlijn en het snijpunt van de rechte lijn met deze duurlijn zijn echter ondergeschikt aan de hoofdvorm van de duurlijn.

In plaats van de hoogste en de laagste stand met elkaar te verbinden kan ook de gemiddeld hoogste grondwaterstand (G.H.G.) met de gemiddeld laagste grondwaterstand (G.L.G.) verbonden worden. Indien de G.H.G. en de G.L.G. erg betrouwbaar zijn valt de lijn welke deze twee punten verbindt te prefereren. In de praktijk zullen de G.H.G. en de G.L.G. zoals deze onder andere op de bodemkaarten van Stiboka vermeld staan, te onnauwkeurig zijn. Bovendien kunnen deze in de loop der tijd door bijvoorbeeld een verbetering in de afwatering veranderd zijn.

4.3. C o n c l u s i e s

Zowel de $\frac{z}{x}$ - waarde als de pt-waarde geven een karakteristiek van de vorm van een duurlijn. De uitgangspunten voor de vaststelling van deze waarden zijn verschillend. Na de constructie van een duurlijn is voor het bepalen van de $\frac{z}{x}$ -waarde de grootte van z rechtstreeks uit het figuur af te lezen. De grootte van x dient aan de hand van de grondwaterstandswaarnemingen te worden bepaald, wat bij periodieke waarnemingen weinig problemen zal opleveren. Voor het bepalen van de pt-waarde kan de tijd rechtstreeks uit het figuur worden afgelezen, terwijl de aan- en afvoerdruk met behulp van een planimeter snel kan worden bepaald. In de praktijk zal blijken dat zowel de $\frac{z}{x}$ - als de pt-waarde van een duurlijn snel bepaald kunnen worden.

Het verschil en daarmee samenhangend de toepasbaarheid van beide methoden komt erop neer dat de $\frac{z}{x}$ -waarde uitsluitend geeft over de vorm van de duurlijn in combinatie met de diepteligging beneden het maaiveld ervan, terwijl de pt-waarde uitsluitend, maar wel gedetailleerdere, informatie over de vorm geeft. De pt-waarde met eventueel een indicatie van de diepteligging van de duurlijn, bijvoorbeeld door het aangeven van de grondwatertrap, geeft meer informatie dan de $\frac{z}{x}$ -waarde. Daarentegen kan voor het vergelijken van veel duurlijnen de $\frac{z}{x}$ -waarde de voorkeur verdienen omdat iedere lijn door slechts één waarde gekarakteriseerd wordt.

5. RELATIE TUSSEN OVERSCHRIJDINGSDUURLIJNEN EN HET GRONDWATERREGIME

Naast de voor- en nadelen welke grondwaterstandsduurlijnen voor het onderzoek naar het grondwaterregime hebben (hoofdstuk 2) biedt met name de methode van verwerking waarbij een pt-waarde wordt vastgesteld een aantal toepassingsmogelijkheden.

5.1. T o e p a s s i n g s m o g e l i j k h e d e n

Er kan, door van een grondwaterstandsduurlijn de hoogste en de laagste voorkomende stand met elkaar te verbinden, afgelezen worden hoeveel dagen en op welke diepte er een aan- of afvoerdruk optreedt,

zonder dat er een pt-waarde vastgesteld is. Daarentegen wordt door het bepalen van een pt-waarde een maat verkregen waarmee grondwaterregimes in identieke bodems met elkaar vergeleken kunnen worden. Indien het neerslagoverschot op zulke vergelijkbare plaatsen even groot is en het effect ervan op de duurlijnform hetzelve is kan er het relatieve verschil in kwel/afvoer aangegeven worden. Als voorbeeld zijn in fig. 6 de duurlijnen van april 1978 tot april 1979 van een hooggelegen plek (1) en van een laaggelegen plek (2) van een natuurreserveaat uit de Gelderse Vallei weergegeven.

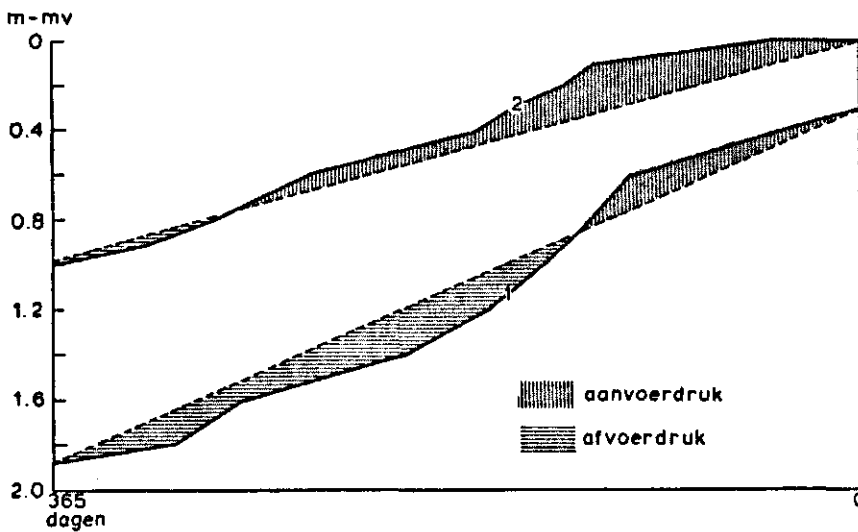


Fig. 6. Duurlijn van een hooggelegen plek (lijn 2) en van een laaggelegen plek (lijn 1)

Plek 1 ligt op een waterscheiding. De vorm van de duurlijn wordt hier bepaald door het neerslagoverschot en de mate van infiltratie. Bij plek 2 bestaat de aanvoer behalve uit het neerslagoverschot eveneens uit een hoeveelheid kwel. De aanvoerdruk bij plek 1 overheerst vooral in tijden met hoge grondwaterstanden. Dit zal voornamelijk het gevolg zijn van het neerslagoverschot in de herfst en in de winter. De pt-waarde bedraagt over 365 dagen de som van 11,2 m (0 - 129 dagen) en - 30,0 m (129 - 365 dagen), dit is - 18,8 m. Bij plek 2 overheerst een zeer geringe afvoerdruk bij de laagste grondwaterstanden (-1,6 m voor de periode van 282-365 dagen). De rest van de periode (0-282 dagen) overheerst een aanvoerdruk van 30,4 m.

Over de hele periode bedraagt de pt-waarde van plek 2: 28,8 m. Het verschil tussen de pt-waarde van de lijnen 2 en 1 over de hele periode bedraagt $28,8 - (-18,8) = 47,6$ m. Op deze wijze wordt het effect van de neerslag en de verdamping gelijkgesteld, zodat het verschil een maat is voor de ondergrondse toestroming (kwel) naar plek 2.

Door in een gebied van een aantal plekken het verschil in de mate van infiltratie en kwel als variabele te beschouwen wordt een parameter verkregen waaraan de waterkwaliteit, met name de hardheid, gekoppeld kan worden. Er bestaat immers een éénduidige relatie tussen de waterkwaliteit en de positie van een locatie in een veld tussen een infiltratie- en een kwelzone.

Aan de hand van het verschil in de mate van infiltratie en kwel kan een indicatie over de stromingsrichting van het bovenste grondwater verkregen worden. De stroming zal in een gebied met een vrij homogene bodemsamenstelling gericht zijn van de plekken met de kleinste pt-waarde (infiltratiezone) naar de plekken met de grootste pt-waarde (kwelzone). Op deze wijze kan een globaal stromingspatroon vastgesteld worden, zonder dat een isohypsenbeeld van het grondwater noodzakelijk is.

Bovengenoemde toepassingsmogelijkheden kunnen voor natuurgebieden een eerste inzicht geven wat betreft de relaties tussen vegetatie, waterkwaliteit en waterkwantiteit zonder dat een diepgaand onderzoek nodig is.

Als beschouwde periode is steeds een jaar genomen. Dit kan een kalenderjaar of een hydrologisch jaar zijn. Deze periode is geschikt voor het verkrijgen van inzicht in het stromingspatroon van het grondwater en de verschillen in pt-waarden voor gebieden met een homogene bodemsamenstelling.

Voor gebieden met (half-)natuurlijke vegetaties is vooral het verloop van het niveau van het freatisch vlak gedurende het groeiseizoen van belang. Het groeiseizoen loopt van 1 april tot 1 november. Deze periode telt 214 dagen. Er wordt een grotere differentiatie in de aan- en afvoerdruk van water verkregen indien de duurlijn over een kortere periode bewerkt wordt.

In fig. 7 zijn duurlijnen getekend van het grondwater in een buis die tussen de plekken 1 en 2 uit fig. 6 is gelegen.

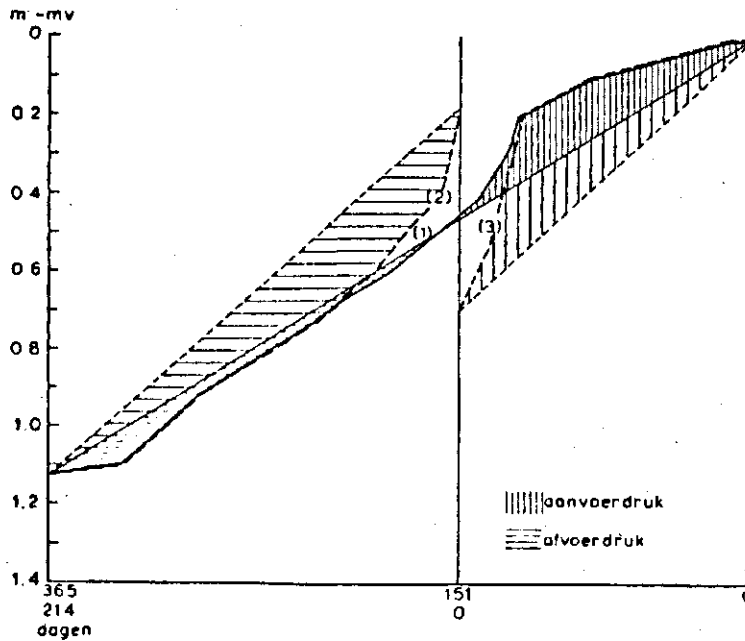


Fig. 7. Durlijn van een hydrologisch jaar (1), het bijbehorende groeiseizoen (2) en het bijbehorende winterseizoen (3)

Van deze plek zijn de duurlijnen van het gehele hydrologische jaar (1), april 1978 tot april 1979, het groeiseizoen (2), april 1978 tot november 1978 en de winterperiode (3), november 1978 tot april 1979 met elkaar vergeleken. Hiertoe is in tabel 2 een overzicht gegeven van de pt-waarden en de dieptes waarop deze gelden.

Uit de tabel blijkt dat gedurende het winterseizoen een aanvoerdruk overheerst (pt-waarde 28,8 m over 151 dagen) en dat tijdens het groeiseizoen de afvoerdruk domineert (pt-waarde -34,4 m over 214 dagen). De afvoerdruk domineert in het hele hydrologische jaar over een kortere periode dan het groeiseizoen. Hieruit blijkt de relativiteit van de pt-waarde. Aan aan- of afvoerdruk mag derhalve slechts waarde gehecht worden als de periode waarover deze druk optreedt, bekend is. Bovendien blijkt dat alleen van gelijke periodes de duurlijnvormen van verschillende plekken met elkaar vergeleken mogen worden. De pt-waarde over een heel jaar hoeft daarom niet gelijk te zijn aan de som van de pt-waarden in het groeiseizoen en de winterperiode.

Tabel 2. Vergelijking van pt-waarden van een plek in het natuurreservaat 'Groot-Zandbrink' over periodes tussen april 1978 en april 1979

Periode	pt-waarde		diepte (m -mv.)	
	aanvoerdruk (m)	afvoerdruk (m)	aanvoer	afvoer
hydrologisch jaar (april '78-april '79)	15,2 (0-161 dagen)	- 8,2 (151-365 dagen)	0-0,50	0,50-1,12
groeiseizoen (april '78-november '78)	0	-34,4 (0-214 dagen)		0,18-1,12
winterseizoen (nov. '78-april '79)	28,8 (0-151 dagen)	0	0-0,70	

De verdeling van het neerslagoverschot gedurende een jaar zal een ander verloop hebben dan het gemiddelde verloop ervan dat aan de hand van een langjarig gemiddelde is vastgesteld. De veranderingen in de basisvorm van een duurlijn zijn het gevolg van het verschil in de verdeling van het neerslagoverschot, aannemende dat factoren zoals ontwatering, kwel en het type vegetatie (transpiratie) constant zijn gebleven.

Door BUYS (1979) is de invloed van het neerslagoverschot op de vorm van de duurlijn onderzocht. Hij heeft voor de grootte van het neerslagoverschot op jaarbasis, zomerhalfjaar basis en winterhalfjaar basis de mate van horizontale of verticale verschuiving van de basisvorm van de duurlijn op een veldpodzolgrond bepaald. Verder constateert hij dat het verloop van het neerslagoverschot ook over kortere perioden dan een half jaar van invloed is op de vorm van een duurlijn. Onderstaand voorbeeld toont aan dat er een globale relatie aanwezig is tussen de duurlijn vorm en de grootte van het neerslagoverschot dat eveneens naar toenemende grootte gerangschikt is.

Van een tweetal groeiseizoenen (april 1978 tot november 1978 en van april 1979 tot november 1979) staan in fig. 8a het neerslagoverschot en de tijdstijghoogtelijn van het grondwater en staan in fig. 8b de cumulatieve weergaven hiervan. Voor het neerslagoverschot is $N - 0,8E_0$ genomen. Hierin is N de neerslag in mm/decade en E_0 is de open water verdamping, eveneens in mm/decade. De grondwaterstandsgegevens zijn afkomstig van het natuurgebied in de Gelderse Vallei.

Om de relatie tussen het grondwaterstandsverloop en het neerslagoverschot te beschrijven bestaan modellen (o.a. WIND, 1979). Naast aan- en afvoer zijn de eigenschappen van de grond hierbij van belang.

Door de verwerking tot duurlijnen (fig. 8b) wordt het geheel weliswaar overzichtelijker, maar verdwijnt het verband tussen het grondwaterstandsverloop en het neerslagoverschot zoals in onderstaande gevallen zal blijken.

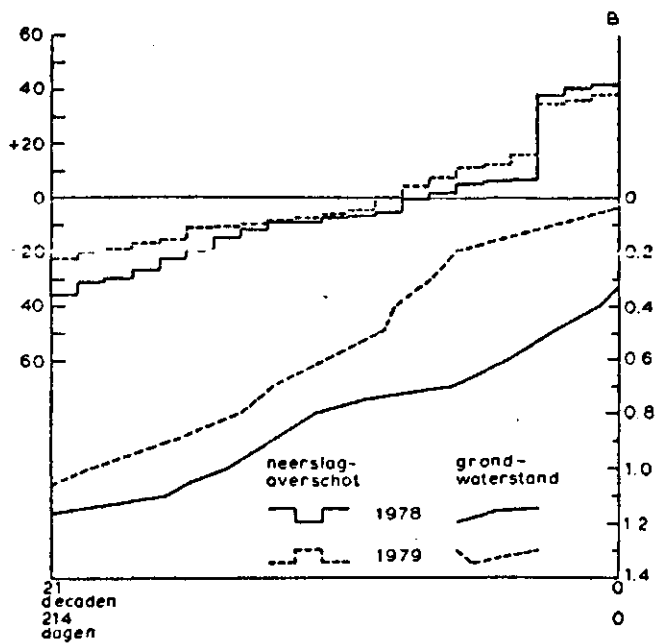
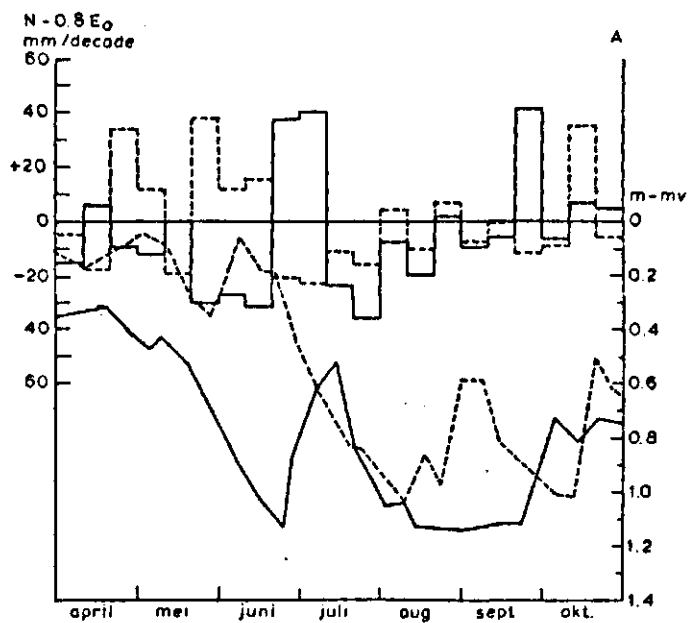


Fig. 8a. Neerslagoverschot en het grondwaterstandsverloop van de groeiseizoenen van 1978 en 1979

b. Cumulatieve frequentieverdeling van het neerslagoverschot en het grondwaterniveau van de groeiseizoenen van 1978 en 1979

In 1978 komen de drie decades met het grootste neerslagoverschot, te weten eind juni, begin juli en begin september, niet overeen met de hoogste grondwaterstanden. Deze worden in april aangetroffen als gevolg van het overschot in de voorafgaande winter. Verder heeft de grondwaterstandsduurlijn van 1979 van 4 tot 50 cm -mv. een bol karakter als gevolg van een grote hoeveelheid neerslag in het voorjaar. Dit blijkt niet uit de cumulatieve verdeling van het neerslagoverschot.

Het is mogelijk om met behulp van de duurlijntechniek veranderingen in het grondwaterregime aan te tonen. Vaak zal dit een daling zijn als gevolg van een verbeterde afwatering of onttrekking van water uit de ondergrond. Door de duurlijnen van een aantal jaren voor een dergelijke ingreep met behulp van de U-test (hoofdstuk 3.1) te vergelijken met de duurlijnen van een aantal jaren daarna, is het mogelijk het significantieniveau vast te stellen waarop beide bundels van elkaar verschillen. Bovendien kan aangegeven worden voor welke grondwaterstanden verschillen optreden.

Een variant op deze methode is toegepast door BOTH (1979) voor een drietal 'natte' natuurgebiedjes. Hij heeft de duurlijnen van 1952 tot 1965 en van 1965 tot 1978 gemiddeld en de overschrijdingsduur niet in dagen, maar in procenten van het aantal dagen in een jaar uitgedrukt (fig. 9). De gegevens zijn ontleend aan het C.O.L.N.-onderzoek (C.O.L.N.-1958).

De lijnen van A en B zijn afkomstig uit de Nijkampsheide en Koolmansdijk, twee gebiedjes in de Achterhoek en de lijnen van C uit de Empese en Tondense heide, gelegen nabij Eerbeek in het dal van de Gelderse IJssel.

In alle drie de gevallen overheerst voor de diepere standen de convexe vorm, wat erop duidt dat er een aanvoer (kwel) van grondwater aanwezig is. Dit is verklaarbaar, gezien de lage ligging van de terreintjes in de regio.

Door de lijn over de periode van 1952 tot 1966 te vergelijken met de lijn over de periode van 1966 tot 1978, kan de verandering van de hoogste, de laagste en de gemiddelde stand berekend worden.

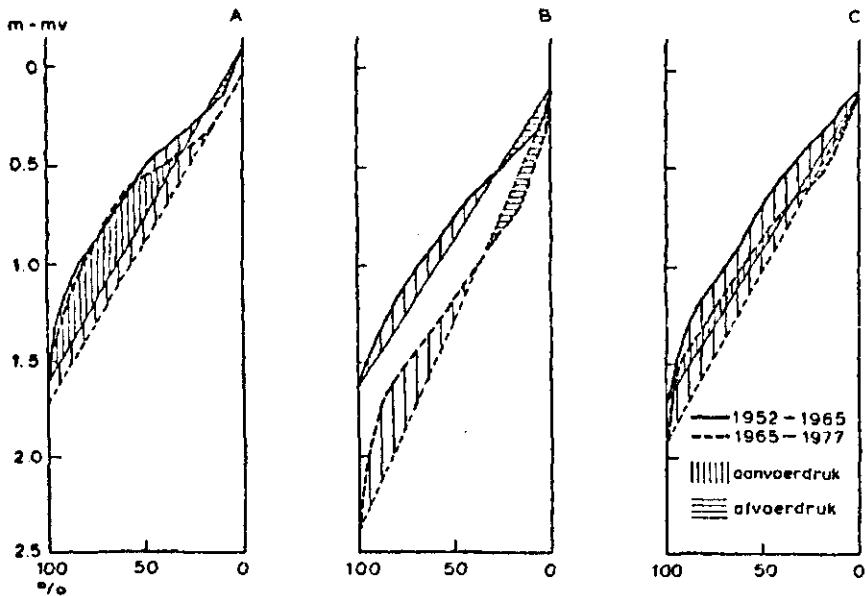


Fig. 9. Cumulatieve frequentieverdeling van de gemiddelde grondwaterstanden van 1952 tot 1965 en van 1965 tot 1978.

A. Nijkampsheide; B. Koolmansdijk; C. Empese en Tondense heide

Deze gegevens kunnen worden aangevuld door de aan- en afvoerdruk in de oude situatie en die in de nieuwe situatie met elkaar te vergelijken. Voor de Nijkampsheide (A) blijkt naast een geringe daling van de grondwaterstand de vorm van de duurlijn en daarmee samenhangend de druk nauwelijks veranderd te zijn. Voor Koolmansdijk (B) is de aanvoerdruk bij de sterk gedaalde diepste grondwaterstanden blijven bestaan, maar duurt de afvoerdruk langer en is deze eveneens gaan overheersen bij grondwaterstanden van 0,50 tot 1,00 m beneden maaiveld. Dit kan het gevolg zijn van het verlagen van het peil in de waterlopen, waardoor het freatisch vlak in het reservaat een relatief grotere opbolling en daarmee samenhangend een grotere afvoer, vertoont. Dit wordt bevestigd door de snelle daling van de hoogste standen van het grondwater.

In het geval van de Empese en Tondense heide (C) valt een soortgelijke situatie als bij Koolmansdijk (B) te constateren. De overheersende aanvoerdruk is hier voor grondwaterstanden van 0,10 tot 0,55 m beneden maaiveld voor 25% van de tijd in een afvoerdruk veranderd.

Bij dergelijke methoden, waar lange reeksen van jaren worden vergeleken, dient rekening te worden gehouden met de verdeling van het aantal droge en natte jaren over de beschouwde periodes.

6. SAMENVATTING

Uitgaande van een tijd-stijghoogtelijn is het mogelijk een overschrijdingsduurlijn van het grondwater te construeren. Door het cumulatieve karakter van een duurlijn worden veel onregelmatigheden vereffend, waardoor meerdere lijnen in één figuur met elkaar vergeleken kunnen worden.

Twee groepen duurlijnen welke in vorm verschillen of worden verondersteld te kunnen verschillen, kunnen met elkaar vergeleken worden door statistisch te toetsen op significantie in hun verschillen. Hiervoor is de parameter vrije U-test de meest geschikte toets.

Een wat meer bolle (convexe) vorm ten opzichte van de basisvorm, een \int -vorm, van een duurlijn is het gevolg van een langduriger verblijf van het grondwater hoog in het profiel. Dit kan het gevolg zijn van een groot neerslagoverschot, het optreden van kwel of een bodem bestaande uit fijne bestanddelen. Een holle (concave) duurlijn duidt op een langduriger verblijf van het grondwaterniveau dieper in het profiel als gevolg van een relatief grote winterafvoer of van een bodem bestaande uit grovere bodembestanddelen.

De vorm van een duurlijn kan vastgelegd worden in de $\frac{z}{x}$ -waarde. Hierin is z de grondwaterstand na de helft van de beschouwde periode en x de gemiddelde grondwaterstand over de hele periode, beide ten opzichte van het maaiveld. De $\frac{z}{x}$ -waarde is groter dan 1 voor concave en kleiner dan 1 voor convexe duurlijnen.

Een andere waarde om het door een duurlijn gekarakteriseerde grondwaterregime vast te leggen is de pt -waarde. Ten opzichte van de rechte lijn welke de hoogste en de laagste grondwaterstand van een duurlijn verbindt, duidt een bol traject op een aanvoerdruk en heeft een positieve pt -waarde. Deze waarde wordt uitgedrukt in meters over de betreffende periode. Een hol duurlijngedeelte is het gevolg van een afvoerdruk en heeft een negatieve pt -waarde. De som

van deze waarden geeft de uiteindelijke pt-waarde over de hele periode.

De pt-waarden van verschillende plekken met een gelijke bodemopbouw lenen er zich goed voor de grondwaterregimes ervan met elkaar te vergelijken. Hierdoor is het mogelijk relatieve verschillen in kwel/infiltratie zowel in plaats als in tijd, aan te geven. Aan de hand hiervan kan ook een globaal stromingspatroon van het bovenste grondwater samengesteld worden.