

DI: 814661

Enkele bijzondere aspecten van het kwantitatieve waterbeheer van de Maas

(samenvattend rapport)

Joop Gerretsen

Maastricht, oktober 2002
Herzien december 2002

INHOUD:

	Inleiding	pag. 1
	Samenvatting	pag. 2
	Hoofdstuk I Herhalingstijden van hoogwatergolven te Borgharen en hetmaatgevend hoogwater	pag. 4
1.1	Aanleiding en doel van het onderzoek	
1.2	Hydrologische en theoretische achtergronden	
1.3	Data	
1.4	Gevolgen voor de herhalingstijden van hoogwatergolven te Borgharen	
1.5	Resultaat van het onderzoek	
1.6	Conclusies en aanbevelingen	
	Hoofdstuk II Vorm van de afvoergolven te Borgharen	pag. 15
2.1	Probleem en doel van de analyse, hydrologie en theorie	
2.2	Empirische golven te Borgharen	
2.3	Gesimuleerde golven te Borgharen	
2.4	Vergelijking van golfkenmerken en waterstanden uit empirie en Simulatie	
2.5	Frequenties van Locale waterstanden	
2.6	Conclusies en aanbevelingen	
	Hoofdstuk III Waterbeheer op de Maas gedurende vorstperioden	pag. 23
3.1	Probleem en doel van de analyse	
3.2	Algemeen	
3.3	Voorspelling van de watertemperatuur bij Lith	
3.4	Het vullen van de stuwpanden na een vorstperiode	
3.5	Het genereren van watertemperaturen voor de vorstperioden van 1940-1980	
3.6	Karakteristieken van vorstperioden	
3.7	Conclusies en aanbevelingen	

- Annex 1** Statistische Verdelingen; Toetsen; Betrouwbaarheid
- Annex 2** Uitputtingsverloop van de afvoer; Momenten; Trends
- Annex 3** Multipiele- en partiële correlatie van golfkenmerken; Invloed van
variabele eerste momenten op de waterstanden; Hysterese effect;
Invloed van de duur van de golfafloop (ná de top), op de waterstanden

FIGUREN

- 1 Overschrijdingskansen van gemeten jaarlijkse maximale afvoer
- 2 Frequentieverdeling van de meetwaarden en aangepaste theoretische verdelingen
- 3 Exponentiële verdelingen aangepast aan de extreme meetwaarden
- 4 Overschrijdingskansen van de afvoer met 95 % betrouwbaarheidsgebied
- 5 Afvoerkromme Borgharen (Q-H relatie)
- 6 Aangepaste theoretische verdeling van de golf- en afvoerkenmerken
- 7 Empirisch onderzoek naar de invloed van inhoud en kurtosis op de waterstanden
- 8 Gesimuleerde relatieve golven (Q') te Borgharen
- 9 Simulatie onderzoek naar de invloed van inhoud, kurtosis en basisafvoer op de waterstanden van Venlo en Mook
- 10 Simulatie onderzoek naar de invloed van inhoud en kurtosis op de waterstanden van Venlo en Mook voor piekafvoeren van $1500 \text{ m}^3/\text{s}$, $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ en $3150 \text{ m}^3/\text{s}$
- 11 Simulatie onderzoek naar de invloed van de basisafvoer op de waterstanden van Venlo en Mook
- 12 Waterstanden uit Empirie en Simulatie
- 13 Waterstanden uit Sobek en uit metingen
- 14 Lijnen van gelijke waterstand te Venlo bij konstante kurtosis en basisafvoer
- 15 Relatie tussen piekafvoer ($Q_{08u.\max}$) en inhoud van de golf (μ_0) te Borgharen
- 16 Relatie tussen de relevante golfparameters

- 17 Verloop van de lucht- en watertemperatuur
- 18 Verloop van het driedaags voortschrijdend gemiddelde van de luchttemperatuur $[T(l)3dvg]$, de watertemperatuur $T(w)$ en de daggradient van de watertemperatuur $[dT(w)/dt]$
- 19 Luchttemperatuur en de terugloop van de watertemperatuur
- 20 Vultijden van de Nederlandse Maaspanden bij gegeven afvoer te Borgharen en hun onderschrijdingskansen
- 21 Evaluatie van de vroegere watertemperaturen
- 22 Vergelijking van vroegere- met huidige watertemperaturen uit tabel 18
- 23 Vorstperioden in de winters 1940-2000
- 24 Vorstperioden en geopende stuwen
- 25 Onderschrijdingskansen van de afvoer te Borgharen tijdens vorst en bij invallende dooi, evenals de onderschrijdingskansen van de duur van de "geopende stuw" situatie

TABELLEN

- 1 Jaarlijkse afvoertoppen te Borgharen
- 2 Overschrijdingskansen van de gemeten afvoertoppen
- 3 Uit de metingen geschatte parameters voor de theoretische verdelingen
- 4 Reeks van alle golven Q' (1931 – 2000) met hun kenmerken
- 5 Gemeten afvoeren en berekende waterstanden, Empirische golfkenmerken met hun klassificaties
- 6 Parameterwaarden van de verdelingen van de golfkenmerken
- 7 Gevoeligheden van de waterstanden voor binnen hun klassebreedte variërende inhoud en kurtosis
- 8 Gesimuleerde golven en waterstanden
- 9 Vorstperioden met afvoer en karakteristieken te Lith
- 10 Karakteristieken van de winter 1984/1985
- 11 Karakteristieken van de winter 1986/1987
- 12 Karakteristieken van de winter 1996/1997
- 13 Toetsing van berekende $T(w)$ aan waargenomen $T(w)$
- 14 Relaties $T(w+3)$ en $T(l)$
- 15 Teruglooptijd van de watertemperaturen
- 16 Toetsing van voorspelde watertemperaturen
- 17 Vultijden van Nederlandse stuwpannen
- 18 Gemiddelde $T(l)$ en $T(w+3)$ van alle vorstperioden uit 1940-2000

LITERATUUR

Hoofdstuk I:

- [1] Boertien Cie. *Onderzoek Watersnood Maas, deelrapport 4*. WL/Hydraulics, december 1994
- [5] Chow. *Handbook of applied Hydrology*, McGraw-Hill, 1964
- [9] Dalrymple T. *Flood frequency analysis*, Manual of Hydrology, part 3 flood-flow techniques, U.S.Geological Survey , 1960
- [10A] Gerretsen J.H. *Herhalingstijden van hoogwatergolven te Borgharen*, U-Twente/RWS dir.Limburg, Maastricht, april 1999
- [4] Yevjevich, *Probability and Statistics in Hydrologie*, Water Resources Publications, Ford Collins, Colorado, USA 1972
- [3] KNMI, *Toestand van het klimaat in Nederland*, de Bilt 1996
- [7] Klopstra D, *Gevoeligheidsanalyse maatgevende afvoer Maas*, Rijkswaterstaat dir. Limburg, ANWR, maart 1998
- [8] Lorenz N. *Historische hoogwaters Rijn en Maas vóór 1900*. Delft hydraulics, Civiele Techniek, 1997
- [2] *Rapport Cie Rivierdijken*, Hoofddirectie van de Waterstaat, den Haag, maart 1977
- [6] Weingärtner. *Fortbildungslehrgang für Hydrologie*, Karlsruhe 1974
- [10] Wijvekate M.L. *Verlarende statistiek*. Aula 39/1972

Hoofdstuk II :

- [17] Delden van H. *Historische afvoergolven te Borgharen*, Universiteit Twente, CiT, Enschede, 1999
 - [12] Dixhoorn van K. *Onderzoek afvoerloop tijdens hoge afvoergolven te Borgharen*, dir.Waterhuishouding & Waterbeweging RWS, Arnhem 1978
 - [13] Gerretsen J.H. *Vorm van de norm afvoergolven*, U-Twente/RWS dir.Limburg Maastricht 1999
 - [16] Yevjevich V. *Probability and Statistics in Hydrology*, Water Resources Publications, Ford Collins, Colorado, USA 1972
-

- [11] Made van der J.W. *Hoogwatergolven op de Maas*, dir.Waterhuishouding & Waterbeweging RWS, Den Haag, 1968
- [18] Made van der J.W. *Kwantitatieve analyse van rivierafvoeren*, dir.Waterhuishouding & Waterbeweging RWS, Den Haag, 1982
- [15] Mc. Clave J.T. *Statistics*, Prentice-Hall International, UK, London 1997
- [14] Wildt de P. *Globaal voorspellingsmodel voor lage Maasafvoeren*, dir.Waterhuishouding & Waterbeweging RWS, Maastricht 1983

Hoofdstuk III :

- [25] Anoniem, *Vultijden stuwpanden en grindgaten*, District Zuidoost afd. Maas juni1979, bijl. 5 en 6 met (concept)correcties van januari 1997
- [27] Gerretsen J.H, *Waterbeheer op de Maas gedurende vorstperioden*, U-Twente/RWS dir.Limburg, Maastricht, mei 2000
- [19] Haas. de A.W, *Ijsafvoer problematiek voor de Grote Rivieren en de Rijndelta*, deel 2, Rijkswaterstaat Directie Benedenrivieren, april 1986
- [24] Rijkswaterstaat, *Tienjarige Overzichten der Waterhoogten, Afvoeren en Watertemperaturen*, den Haag, vanaf 1961
- [21] Rijkswaterstaat, *Ijsverslagen*, Directie W&W, den Haag, 1950-1985
- [22] Rijkswaterstaat, *Ijsverslagen*, Rikz, den Haag, 1985-1988
- [23] Rijkswaterstaat, *Ijsverslagen*, Riza, Lelystad, vanaf 1988
- [20] Staatsdrukkerij, *Verslagen Openbare Werken*, den Haag, 1940-1950
- [26] Wemelsfelder. P.J, *Gegevens ijsbezetting in Nederland*, 14-de Binnenscheepvaart congres, den Haag, juli 1948

Inleiding

Buiten het overwegend normale rivierbeheer komen er incidenteel korte perioden voor, waarin zorgelijke situaties voor het waterbeheer optreden. Deze omstandigheden worden veroorzaakt door bijzondere meteorologische gebeurtenissen, waarvoor de Maas, vooral in de winter, erg gevoelig is.

Zoals bekend kan overvloedige regenval plotseling zodanige hoge waterstanden in het stroomgebied van de Maas veroorzaken, dat daardoor ernstige schade wordt aangericht aan have en goed. Om in de toekomst de schade te beperken zijn beschermende maatregelen voor het achterland nodig.

In *hoofdstuk I* komt het probleem van het maatgevend hoogwater aan de orde, d.i. de afvoer te Borgharen waartegen, volgens maatschappelijke normen, het achterland dient te worden beschermd.

Niet iedere hoogwatergolf te Borgharen heeft dezelfde vorm, maar haar gedaante is o.a. afhankelijk van de regenintensiteit en de regenduur. De golfvorm te Borgharen is speciaal voor de Limburgse Maas van belang voor de waterstanden in deze provincie. Vanwege het specifieke hoogwaterbed, zonder hoogwaterdijken, kunnen namelijk voor twee hoogwatergolven met gelijke afvoer (en dus ook gelijke waterstanden) te Borgharen de waterstanden benedenstrooms toch anders zijn, doordat de golven verschillen van inhoud, spitsheid en/of basisafvoer. In *hoofdstuk II* wordt deze problematiek behandeld.

Lage watertemperaturen in de Maas en daardoor dreigende- of feitelijke ijsvorming, dat altijd gepaard gaat met het noodzakelijk vrij plotseling strijken van de met vastvriezen bedreigde stuwen, waardoor de waterstanden in snel tempo aanzienlijk dalen, hebben regelmatig veel schade aan woonboten, schepen, havenaccomodaties en andere aan de rivier gebonden kunstwerken veroorzaakt. In *hoofdstuk III* wordt een model ontwikkeld om daarmee tijdig een weloverwogen voorspelling te doen van lage watertemperaturen en dus van te verwachten veranderingen in de vaarwater situatie. Daardoor kan belanghebbenden meer tijd worden geboden om schadebeperkende maatregelen te nemen.

Aan het einde van ieder hoofdstuk is een paragraaf met conclusies en aanbevelingen opgenomen.

Samenvatting

De wateroverlast op de Maas en de mogelijke bescherming daartegen heeft, vooral na de hoogwaters van december 1993 en januari 1995, grote aandacht gekregen. Hoewel iets minder algemeen bekend, geldt dit ook voor een periode met vorst, die grote schade kan toebrengen aan de met de rivier verbonden activiteiten, zoals bleek in onder meer de winter van 1996/1997.

Enkele aspecten van bijzondere situaties worden in onderhavig rapport behandeld.

Het eerste aspect betreft de extrapolatie van opgetreden afvoeren te Borgharen naar normafvoeren. Normafvoeren zijn zeer hoge afvoeren, die zeldzaam zijn en die op bestuurlijke gronden als een nog juist acceptabele maat worden beschouwd. Voor de Maas in Nederland zijn deze normen de afvoerkansen van 1/50 en 1/250 voor resp. de huidige- en toekomstige situatie in het onbedijkte gebied en 1/1250 voor het huidige bedijkte gebied.

De gangbare maat voor de afvoerkans 1/1250 bedraagt $3800 \text{ m}^3/\text{s}$ te Borgharen met een nauwkeurigheid van 20%. *In het onderhavige onderzoek wordt echter voor deze norm een maat voor de afvoer gevonden van $3435 \text{ m}^3/\text{s}$ met een nauwkeurigheid van 6%.* Voor de waterstand in Borgharen maakt dit ca. 0,2m uit, terwijl het verschil te Venlo en te Mook 0,4m is. Dergelijke verschillen gelden ook voor de norm 1/250 en in mindere mate (de helft) voor de norm 1/50. Het betekent, dat de dijken en kaden op een hoger nivo liggen, of zijn ontworpen, dan volgens onderhavige analyse noodzakelijk wordt geacht.

Het verschil met de gangbare maten is ontstaan doordat de afvoerreeks 1911-2000 is uitgebreid met hoogwatergegevens uit vroegere eeuwen, alsmede door toepassing van de exponentiële verdeling op de afvoeren vanaf $2350 \text{ m}^3/\text{s}$ te Borgharen. Het argument voor de keuze van deze hoge benedengrens van de afvoer is, dat pas dan gesproken kan worden van een vrij afstromende (Waalse Maas) met gevolgen voor de afvoeren te Borgharen.

Het tweede aspect is, dat bij gelijke piekafvoeren te Borgharen, benedenstrooms toch verschillende waterstanden kunnen optreden doordat de golven te Borgharen verschillende vormen hebben. De gedaante van de golf is onder meer afhankelijk van de regenduur en de regenintensiteit. De golf zal in haar loop door de Maas vanaf Borgharen, als gevolg van de geometrie- en de begroeiing van het hoogwaterbed, voortdurend vervormen. *Uit het onderhavige onderzoek blijkt, dat de mate van de golfvervorming niet alleen samenhangt met de piekafvoer te Borgharen maar ook met de inhoud- en spitsheid van de golf en bovendien met de basisafvoer.* Daardoor zijn de waterstanden voor iedere locatie langs de Maas een functie van deze vier onafhankelijk gebleken grootheden, terwijl deze grootheden zelve hun eigen kansverdeling hebben. Door een groot aantal Monte Carlo trekkingen toe te passen op de kansverdelingen zullen combinaties van de functie met de kansverdelingswaarden leiden tot een grote hoeveelheid waterstanden voor een bepaalde locatie, waaruit vervolgens de kansverdeling kan worden bepaald. *Door onderhavige methode uit te voeren voor enkele locaties wordt beter inzicht verkregen in de plaatselijke frequenties van de waterstanden, die een primaire betekenis hebben voor de hoogwaterproblematiek.* Dit in tegenstelling met de gangbare methode, waarbij de locale waterstanden worden gekoppeld aan de niet éénduidige relatie met de piekafvoer van Borgharen.

Het derde aspect betreft de lage watertemperaturen in de Maas, waarbij ijsvorming dreigt met als consequentie het strijken (openen) van de stuwen, waardoor de Maas (grotendeels) onbevaarbaar wordt. Er ontstaan dan hachelijke situaties in havens met veel schade aan schepen, woonboten, aanlegsteigers en andere voorzieningen. *Tot dusver zijn dergelijke situaties niet onderzocht of geëvalueerd en wordt door de stuwbeheerder gehandeld naar bevind van zaken.* Om groter onheil te voorkomen moeten gebruikers van de vaarweg en andere aan de rivier verbonden belanghebbenden binnen een dag hun maatregelen treffen, hetgeen vaak onmogelijk blijkt. *Om in de toekomst de schade te kunnen beperken wordt in onderhavig onderzoek een waarschuwingssysteem ontwikkeld in de vorm van een modelmatige voorspelling, met een zichttijd van minstens enkele dagen, van de watertemperatuur bij de stuw van Lith, het maatgevend object voor het strijken van de stuwen op de Nederlandse Maas bij 0,5 °C watertemperatuur en verdere vorstvooruitzichten.* Er zijn, voor de ontwikkeling van een voorspellingsmodel, een aantal methoden toegepast, waarvan methode 4 (3.3) de beste keuze is. Uitgaande van de polynoom door het driedaags voortschrijdend gemiddelde van de luchttemperaturen en van de dagelijkse watertemperatuur is onderzocht hoe lang het duurt voordat een watertemperatuurverlaging van één graad Celsius wordt gerealiseerd, beginnend bij 4 °C. Uitgaande van 5 dagen geprognostiseerde luchttemperaturen blijkt, dat de watertemperatuur minstens 3 dagen tevoren kan worden voorspeld met een nauwkeurigheid van 0,3 à 0,4 graad en dat is nogal bescheiden als het gaat om de voorspelling van 0,5 °C. Karakteristieken van vorstperioden, alsmede de problemen bij het vullen van stuwpannen en ontgrindingen, na het invallen van de dooi, komen aan de orde.

Hoofdstuk I

Herhalingstijden van hoogwatergolven te Borgharen; het maatgevend hoogwater

1.1 Aanleiding en doel van het onderzoek

Tot dusver zijn er vele beschouwingen gewijd aan de bepaling van de maatgevende afvoer voor de Maas te Borgharen. Laatstelijk door de Commissie Boertien [1] in het kader van het Onderzoek Watersnood Maas, waarbij van de meetreeks van afvoeren te Borgharen 1911-1994 gebruik werd gemaakt. De maatgevende afvoer werd met een nauwkeurigheid van ca. 25% bepaald. In de praktijk betekent dit, dat de marge in de maatgevende waterstand te Borgharen, evenals op andere plaatsen, wel een halve meter kan zijn.

De maatgevende afvoer te Borgharen is het debiet, dat een jaarlijkse kans van voorkomen heeft van 1:1250. Deze norm is maatgevend voor de dijken van o.a. de Maas. De mogelijkheid wordt open gelaten om in onbedijkte gebieden, zoals in Limburg, de maatvoering te nuanceren. E.e.a. is medio 70-er jaren door de Minister van Verkeer en Waterstaat vastgesteld op advies van de Commissie Rivierdijken [2]. Mochten de afvoeren toch nog hoger worden dan de maatgevende dan zullen dijken en kaden overstromen en wordt dit maatschappelijk als risico aanvaard.

Het probleem is, dat er op basis van een relatief korte waarnemingsperiode van afvoeren te Borgharen, nl. van de laatste 90 jaren, een schatting moest worden gedaan naar de grootte van de afvoer, die eens per 250 jaar (in Limburg) en zelfs eens per 1250 jaar (benedenstrooms van Mook) wordt verwacht. Aan grove onnauwkeurigheden in de schatting valt daardoor niet te ontkomen. Toch is tot op heden op deze basis de veiligheid van de waterkeringen bepaald.

Het doel van onderhavig deelonderzoek (hoofdstuk I) beoogt aanbevelingen te doen ter vergroting van de voorspellingsnauwkeurigheid van zeer hoge afvoeren, zoals de maatgevende afvoer, en de daarbij behorende herhalingstijden. Dit wordt bewerkstelligd door de reeks van continu geregistreerde hoogwaters uit te breiden met enkele bekende heftige hoge afvoeren in vroegere eeuwen en daarop een speciale frequentietechniek toe te passen. Bovendien worden de hoogwaters voor de ongestuwde Waalse Maas gescheiden van de gestuwde situatie.

1.2 Hydrologische en theoretische achtergronden

De oorspronkelijke meetgegevens van de afvoeren uit de officiële data-bank van Rijkswaterstaat worden in dit kader kritisch beschouwd met het oog op de invloed van :

1. de rivierverruimende maatregelen hoofdzakelijk in de 20-ste eeuw, bovenstrooms van het meetstation Borgharen.
2. de wijzigingen in de bovenstroomse wateronttrekkingen in dezelfde periode.
3. de correcties als gevolg van het gebruik van verschillende meettechnieken.
4. de herleiding van 08-uur afvoerwaarden naar absolute topwaarden.

Geen invloed op de afvoer is er van bebossing, verharding en mogelijke wijziging in het neerslagpatroon [1], immers :

- i. de afremmende invloed op de afstroming van meer bebossing in de laatste twee eeuwen enerzijds en het veranderde landgebruik anderzijds, wegen tegen elkaar op.
- ii. de invloed van het vergrote harde oppervlak van aanvankelijk gemiddeld 0 à 1 % van het totale stroomgebied is de laatste dertig jaar weliswaar toegenomen tot enkele procenten, maar voor de allerhoogste afvoeren, waarbij de ondergrond toch reeds verzadigd is, is deze invloed te verwaarlozen.
- iii. de neerslaghoeveelheden vertonen "door de voorbije eeuwen heen" geen significante trend. [3]
- iv. het aspect van mogelijke toekomstige veranderingen in het mondiale klimaat met gevolgen voor de waterstanden, waarbij het nog zeer de vraag is of dit ook geldt voor het kleinschalige Maasbekken, valt buiten dit kader.

De reeks van gemeten afvoeren, rekening houdend met de aspecten 1 t/m 4, met daaraan toegevoegd de opmerkelijk hoge afvoeren sinds het jaar 1571 vormen het onderzoeksobject. De gegevens zijn vermeld in tabel 1 en gerangschikt in tabel 2.

Vanaf het begin van de 19-de eeuw, toen de Maas deel ging uitmaken van het Europese riviercommunicatienet, is er in België en in Frankrijk sprake van rivierverbeteringswerken ten behoeve van de scheepvaart [1]. Op plaatsen waar dit niet meer het geval was moest namelijk een diepgang voor de scheepvaart van 1,20 meter worden nagestreefd. Vóór de 19-de eeuw was er weinig aandacht voor de waterwegen en lag het accent op de aanleg en de verbetering van spoor- en verkeerswegen, waarover de meeste vracht vervoerd werd.

De kleinschalige verbeteringen van de rivier in de 19-de eeuw worden niet van invloed geacht op de vorm en hoogte van de hoogwatergolven te Borgharen. Anders is dit met de latere omvangrijke modernisering van de Waalse Maas ten behoeve van de scheepvaart met grotere diepgang en laadvermogen en ten behoeve van de vermindering van de hoogwater overlast, die door de toenemende bebouwing steeds groter werd. Vanaf het begin van de 20-ste eeuw werden zowel rivierverdiepingen als -verbredingen en -versmallingen uitgevoerd. Ook is de berging buiten het zomerbed gereduceerd. Nog andere, overigens geringere wijzigingen in de infrastructuur spelen een rol, zoals hierna wordt beschreven. De veranderingen in de infrastructuur en andere maatregelen worden herleid naar de huidige situatie om tot vergelijkbare jaartopafvoeren te geraken. Aan het einde van de grote rivierverbeteringen (1980) resulteerde dit in een correctie van de vroegere afvoergolven, te weten een verhoging van de hoogste afvoeren ($> 2500 \text{ m}^3/\text{s}$) te Borgharen, uit de meetreeks sinds 1911, van ca. 5% en tot een vermindering van de looptijd van dit soort golven vanaf de Franse- tot de Nederlandse grens met ca. 10 uren (de golven lopen dus heden ten dage veel sneller). Voor de lagere- ($1200\text{-}1800 \text{ m}^3/\text{s}$) en gemiddelde ($1800\text{-}2500 \text{ m}^3/\text{s}$) hoogwaters zou dit ca. 2% en 3 uren in looptijdverschil bedragen ten opzichte van vroeger.

De Waalse rivieringrepen zijn op kleine schaal begonnen omstreeks 1880. Na de eerste wereldoorlog (1918) is er ingrijpender gewerkt aan de Waalse Maas, mede samenhangend met de bloei van de Waalse kolen- en staalindustrie. Zo is het aantal van 23 stuwen, waarvan de eerste gebouwd werden in 1840, met de helft vermindert met als gevolg dat er op verschillende riviertrajecten wel 4 à 5 meter bodemverlaging moest worden gerealiseerd. Voorts zijn er ongeveer 25 eilandjes uit het zomerbed gebaggerd, waardoor de bodemruwheid is afgenomen en het rivierwater in de loop der tijd versneld naar Nederland is afgestroomd. De grote Waalse steden hebben na het hoogwater van januari 1926 bescherming gekregen door de aanleg van kaden,

alleen al te Luik werd 30 kilometer kade aangelegd. Deze maatregelen hebben het bergend vermogen en dus ook de hoge afvoer naar Nederland ongunstig beïnvloed. Overigens zijn er nog andere correcties van toepassing op de oudere afvoergegevens, met de hedendaagse situatie als referentie. Samengevat spelen de volgende aspecten min of meer een rol:

- a) Aangezien de statistische verwerkingen van de gegevens uitgaan van absolute jaartoppen, moeten de gemeten 08-uur jaartoppen uit de periode 1911-1950 gecorrigeerd worden om absolute toppen te genereren.
- b) In verband met het gebruik van andere meetinstrumenten sinds 1933, te weten van stokdrijvers naar Ottmolens, werden de vroeger gemeten afvoeren gecorrigeerd met 0 à 10 % afhankelijk van de grootte van de afvoer. Deze correcties op de afvoer zijn gebleken uit vergelijking met Ottmolen afvoermetingen te Visé, die daar reeds sinds 1880 werden uitgevoerd, alsmede uit het verschil in de afvoerkrommen van Borgharen 1911-1932 en 1933-1950.
- c) De invloeden van in de tijd voortschrijdende rivierwerken in de Waalse Maas op de afvoer te Borgharen werden met behulp van een hydro-dynamisch rekenmodel ingeschat in het kader van het Boertien onderzoek (1994). Door in het model zowel historische- als recente bodemgegevens van de Waalse Maas aan te brengen kon tot een indicatie worden gekomen van de gevoeligheden van de achtereenvolgende grotere ingrepen. Als afvoer zijn de golven van 1980; 1984; 1990 en 1993 gebruikt. Hieruit blijkt, bovenvermelde afvoertoename en looptijd verkorting in de hedendaagse situatie.
De voor de correctie belangrijkste breekpunten in de tijd, voornamelijk samenhangend met het gereed komen van onderdelen van grotere rivieraanpassingen, blijken bij benadering te liggen bij de jaren: 1928 (vóór dat jaar 100% corrigeren van bovengenoemde percentages van 2à5%); 1940 (58%); 1955 (58%); 1973 (43%); en 1990 (0%).
- d) Behalve de bijtellingen uit a), b) en c) met de hedendaagse situatie als referentie, is er ook een correctie, die verminderingen inhoudt, te weten de in de tijd plaats gevonden verhoogde onttrekkingen van Maaswater tussen het Albert kanaal en Borgharen. In de periode 1911- 1938 was dit nog maar 19 m³/s hoofdzakelijk ten behoeve van de Zuid Willemsvaart, maar thans is dit al 43 m³/s. Een verschil derhalve van 24 m³/s als gevolg van vooral steeds meer schutwater verbruik van het Julianakanaal en het in 1938 in gebruik genomen Albertkanaal, maar ook vanwege watergebruik voor riviermilieu functies.
Bij afvoeren, die hoger zijn dan 1800 m³/s is er geen scheepvaart meer mogelijk c.q. verboden. Ook de onttrekkingen ten behoeve van andere functies zijn er onder deze omstandigheden nagenoeg niet, zodat in deze situatie bij benadering alle onttrekkingen en dus ook de correcties voor de hogere afvoeren achterwege gelaten kunnen worden.

Aan de hand van de correcties a t/m d kunnen de oorspronkelijke meetwaarden uit de periode 1911-1999 worden aangepast om met elkaar vergelijkbare, dus gehomogeniseerde, meetwaarden te hebben.

Ontbossingen in het stroomgebied van de Maas in de laatste eeuwen kunnen niet de oorzaak zijn van de afvoertoename te Borgharen. De bebossing is sinds 1820 gemiddeld zelfs met 8% van het stroomgebied-areaal toegenomen, alleen in het Sambre stroomgebied is de hoeveelheid bos enigszins afgenomen door gebruik van hout in de mijnschachten van Wallonië (Borinage). Het verwachte gunstige effect van

het toegenomen totale bosareaal, te weten een vertraagde afvoer naar de hoofdrivier, valt echter weg tegen het effect van een ander landgebruik dan vroeger, zoals een andere manier van ploegen en beplanten, waardoor de waterafvoer sneller de rivier bereikt. Ook doordat de hoogwater periode in de winter valt, een periode waarin de invloed van bos sowieso kleiner is en zeker voor extreem hoge afvoeren, heffen de invloed van het toegenomen bosareaal enerzijds en die van een gewijzigd landgebruik anderzijds, elkaar op, zodat de extra watertoevoer naar de hoofdrivier te verwaarlozen is te achten.

De verharding door bebouwing en wegeaanleg is sinds 1830 toegenomen van 2% naar 4% van de oppervlakte van het stroomgebied in Wallonië. Vóór ±1800 is er niets bekend over verharding en ontbossing. Op de extreme afvoeren ($T > 50$ jr.) zal de invloed van de verharding naar schatting 0 à 1% zijn geweest sinds het begin van de 20-ste eeuw en daar zullen nog enkele procenten bij komen voor de laatste veertig jaren. Evenals dat voor de bebouwing geldt, zal de invloed van de verharding op de zeer extreme afvoeren, waarbij de ondergrond toch al met water verzadigd is, verwaarloosbaar zijn.

De hoeveelheid neerslag in het stroomgebied zou in de laatste eeuwen kunnen zijn gewijzigd, maar met zekerheid is dat niet te zeggen, omdat de meetinstrumenten van vóór de 20-ste eeuw te onbetrouwbaar waren om daarop een significante verandering te kunnen baseren. In de 20-ste eeuw hebben er zoveel veranderingen in de opstelhoogte van de instrumenten plaats gevonden, dat de daartoe gehomogeniseerde waarden eveneens onzeker zijn. Bovendien zit er zoveel variabiliteit in de natte- en droge perioden - in een nat jaar kan er wel twee maal zoveel neerslag vallen als in een droog jaar - dat er door de eeuwen heen geen duidelijke trend in het verloop van de neerslaghoeveelheden aanwezig lijkt te zijn en de incidentele grote schommelingen als een natuurlijk verschil moeten worden beschouwd. (KNMI "Toestand van het klimaat in Nederland", 1996).

Op grond van hydrologisch onderzoek in het stroomgebied van de Ourthe en van de Lesse, uitgevoerd door de Universiteit van Gent (B), werd aannemelijk gemaakt, dat bij een verwachte verhoging van de gemiddelde luchttemperatuur met 2 °C aan het einde van de 21-ste eeuw, waardoor de neerslaghoeveelheid met 20% zal zijn toegenomen, een afvoertoe name te Borgharen van 17% te verwachten is. Zoals eerder vermeld wordt het ongewisse aspect van klimaatveranderingen buiten het kader van dit onderzoek gelaten.

Welke theoretische verdelingsfunctie [4] het beste past bij de gemeten jaarpieken wordt beoordeeld m.b.v. Annex 1 (punt 1 t/m 7). De theoretische aanpassing is nodig om buiten het domein van de empirie voorspellingen te kunnen doen over de herhalingstijd van te verwachten doch nog niet eerder voorgekomen zeer extreme afvoeren.

Als de overschrijdingskansen uit tabel 2 op een logaritmische schaal worden uitgezet tegen de gemeten afvoertoppen uit tabel 2 op een lineaire schaal (fig.1a) en we bepalen daarvan de trendlijn dan zien we daaromheen een onregelmatig verloop van de meetwaarden. Deze ruis is per afvoerinterval als volgt verklaarbaar:

- $Q < 1200 \text{ m}^3/\text{s}$: de Maas is volledig gestuwd, zodat er door stuwmanipulaties kunstmatig veel ruis wordt geïntroduceerd in de afvoer, bovendien is er geen sprake van een hoogwater situatie.
- $1200 < Q < 1500$: de stuw van Borgharen is gestreken, maar de Luikse Maas is nog gestuwd.

- $1500 < Q < 1950$: de stuwpannen in Wallonië worden op een lager peil gebracht teneinde nog hogere afvoeren beter te kunnen opvangen. Door het deels ledigen van de stuwpannen neemt de afvoer te Borgharen toe.
- $1950 < Q < \text{ca.} 2300$: ondanks voorgaande maatregel gaat het officiële stuwpeil geleidelijk toch overschreden worden en vanaf $\text{ca.} 2300 \text{ m}^3/\text{s}$ is het niet meer mogelijk om de stuwen in de Luikse Maas te Monsin en te Lixhe nog langer in bedrijf te houden. Tot dusver was dit wél zinvol in verband met de energie opwekking voor de stad Luik en het zo lang mogelijk handhaven van het peil op het Albertkanaal, door de stuw van Monsin.
- $Q > 2350$: de gehele Waalse Maas is nu ongestuwd.

De verschillende stadia met de relatie “afvoer-overschrijdingskansen” zijn afgebeeld in fig.1b en 1c. Fig.1a vertoont bij de afvoer van $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ een knik. Dit lijkt door de gekozen schaal ernstig, doch een onnauwkeurigheid in de afvoer voor de betreffende stroomjaren, te weten 1925 en 1643 van resp. 4% en 1% , is niet bijzonder te achten en deze correctie zou de punten op de rechte terugvoeren. Een tweede reden om af te zien van een deelrelatie voor $3000 < Q < 3175$ is het geringe aantal van 4 metingen, waaruit geen betrouwbare extrapolatie t.a.v. de maatgevende afvoer wordt verwacht. In de derde plaats zou de maatgevende afvoer (kans 1/1250) onderschat, en dus onveiliger kunnen zijn door hantering van de knik. Deze zou nl. $\text{ca.} 3300 \text{ m}^3/\text{s}$ worden.

1.3 Data

De Meetreeks

De afvoeren van de Meetreeks worden bepaald door de afvoer- waterstand relatie te Borgharen. Deze relatie is een Q/H kromme, die zo goed mogelijk door de puntenwolk van metingen loopt, figuur 5 is er een voorbeeld van. Met 95% betrouwbaarheid is te stellen, dat de afwijking van de metingen ten opzichte van de afvoerkromme 0 à 5% is. Indien blijkt, dat de metingen meer gaan afwijken van deze “afvoerkromme” wordt namelijk aan de hand van nieuwe metingen de afvoerkromme onderzocht en zonodig herzien. De “gemeten” afvoeren worden indirect bepaald nl. door de (top)waterstanden aan de peilschaal Borgharen af te lezen en deze via de Q/H kromme te transformeren naar de afvoerwaarden.

Voor de periode 1911-1950 werden de uit de Tienjarige Overzichten van Rijkswaterstaat afkomstige 08-uur topafvoeren herleid tot absolute topafvoeren (punt a van 1.2). Dit kon worden gedaan aan de hand van de relatie tussen 08-uur toppen en absolute toppen uit de periode vanaf 1960, waarin beide waarden wél werden bepaald. De relaties tussen 08-uur toppen (X) en absolute toppen (Y) voor verschillende afvoerintervallen zijn volgens [10A]:

Voor het interval $500 \leq Q \leq 1200$ geldt: $Y = 1,0707 X - 38$ en $R^2 = 0,99$ (1)

Voor het interval $1200 \leq Q \leq 2300$ geldt $Y = 1,0419 X - 10$ en $R^2 = 0,97$ (2)

Voor het interval $2300 \leq Q \leq 3100$ geldt $Y = 0,9896 X + 39$ en $R^2 = 0,99$ (3)

De opsplitsing in intervallen is gedaan vanwege kunstmatige invloeden in Wallonië en te Borgharen. Voor (1) geldt namelijk, dat zowel de stuwen als de

waterkrachtcentrales in Wallonië als de stuw te Borgharen in bedrijf zijn. Voor (2) geldt, dat de stuwen en centrales in een deel van Wallonië nog in werking zijn, terwijl voor (3) de vrij afstromende situatie is bereikt, dus dat in het gehele stroomgebied alle stuwen open en centrales buiten werking zijn.

De correcties, die nodig zijn vanwege de evolutie in de meettechnieken en -instrumenten (punt b van 1.2) werden destijds reeds aangebracht in de officiële afvoercijfers van de eerder vermelde Tienjarige Overzichten van Rijkswaterstaat.

De Boertien-reeks

In het onderzoek Watersnood Maas (1994), dat plaats vond naar aanleiding van het desastreuze hoogwater van december 1993, heeft de Onderzoekscommissie Boertien II de Rijkswaterstaatsreeks uit de Tienjarige Overzichten enigszins aangepast naar aanleiding van de opmerkingen in de punten punten c en d. Er ontstond daardoor een nieuwe reeks te weten de Boertien II-reeks waarin de in de tijd voortschrijdende grote rivierwerken in de Waalse Maas, die invloed hebben gehad op de afvoer te Borgharen en voorts de in de loop der tijden verhoogde onttrekkingen van Maaswater tussen Luik en Borgharen zijn verdisconteerd.

Enkele grote verschillen tussen de Meetreeks, die vrijwel overeenkomt met de Rijkswaterstaatsreeks, en de Boertienreeks vallen op. Dit is het geval voor de stroomjaren 1919 en 1925. Het zijn de oudste en hoogste gemeten afvoeren, die de grootste correcties hebben ondergaan van ca. 5%. Voorts zijn de verschillen in de jaren 1943 en 1973 toe te schrijven aan de definitie van het begin van het stroomjaar, dat Boertien stelt op 1 oktober in plaats van op 1 november volgens de officiële definitie van Rijkswaterstaat. Het (beperkte) verschil in het jaar 1963 komt door de afleiding van de topafvoer uit de daggemiddelde afvoer. Het verschil voor de jaren 1992 t/m 1994 is te wijten aan een achteraf gewijzigde Q/H relatie Borgharen [7], waardoor de onderbroken lijn van fig.5 van kracht werd. De waarden van de Meetreeks, d.i. de RWS reeks 1911-2000 met correcties n.a.v. het eerder genoemde Boertien II onderzoek voor de stroomjaarpieken uit 1919 en 1925, zullen voor het onderhavige onderzoek worden gebruikt. Deze piekafvoerwaarden zijn vermeld in tabel 1.

Met behulp van de rangcorrelatietoets van Spearman is aangetoond, dat er geen sprake is van een trend in de afvoermaxima: de toetsingsgrootheid $t=1,0$ bij een kritieke $2^{1/2}$ % drempelwaarde van 2,0. Dit neemt niet weg, dat bij vergelijking van een zeer droge- met een zeer natte periode, bij voorbeeld de 70-er jaren met de 90-er jaren, beide reeksen wel degelijk significant verschillen.

Als de vroegere periode 1911-1980, waarin in Wallonië tot 1930 op zeer uitgebreide schaal en daarna tot 1980 op minder uitgebreide schaal riviercorrecties plaats vonden, wordt vergeleken met de recente twintig jaren, waarin geen noemenswaardige rivierverruiming is uitgevoerd, dan blijkt dat er tussen beide perioden geen significant verschil ten aanzien van de afvoer is.

Toevoeging van historische gegevens vóór 1911

Om een steviger basis te ontwerpen voor de extrapolatie naar zeldzaam hoge (norm) afvoeren, die tot dusver nog niet zijn voorgekomen en waarvoor toch een voorspelling noodzakelijk is in verband met beleids- en beheersaspecten, zoals de vaststelling van hoogte van dijken en beschermende kaden, van rivieronderhoud en van ruimte voor de rivier, is de continue meetreeks 1911-1999 van afvoer jaartoppen te Borgharen uitgebreid met enkele oude, uit de geschiedschrijving bekende

hoogwaters, die niet door ijsblokkades werden beïnvloed. Lang niet alle jaartoppen uit het verre verleden zijn bekend. Alleen de meest indrukwekkende hoogwater gebeurtenissen, gekenmerkt door een spoor van grote schade zijn beschreven [8]. De daarbij opgetreden waterhoogten werden meestal gerelateerd aan een voorgaand hoogwater en aan kenmerken op gebouwen of bruggen. Er ontstonden zo doende door de eeuwen heen voor hoge hoogwaters verhanglijnen voor de Luikse Maas tot aan Visé. Door de waargenomen verhanglijnen verstandig te interpreteren en te relateren aan de eerste afvoermetingen, rond 1880, te Visé, konden de afvoeren vóór die tijd worden ingeschat, mede doordat het rivierprofiel en andere hydrologische omstandigheden niet significant wijzigden tot aan ongeveer de twintigste eeuw. De Maas werd in die periode van ca. 300 jaar, toen nog geen deel uitmakend van het Europese riviercommunicatienet, onderhouden op de scheepvaartdiepte van 1,2m. Het accent lag op de aanleg en verbetering van spoor- en verkeerswegen, waarover de meeste vracht werd vervoerd. De kleinschalige riviervverbeteringen van eeuwen geleden worden dan ook geacht niet van invloed te zijn geweest op de vorm en hoogte van de afvoer te Borgharen [1]. Er zijn vanaf het jaar 1571, toen er een hoogwater was van ca. 2900 m³/s, tot aan het begin van de continue registratie van hoogwaters in 1911, vier zeer hoge golven geweest, dat wil zeggen tussen 2750 m³/s en 3100 m³/s te Borgharen. Van de "drempelwaarde" 2750 m³/s moet noodgedwongen worden uitgegaan, omdat afvoeren lager dan die drempel in het algemeen niet zodanige schade veroorzaakten, dat daarover geschiedenis werd geschreven. Voor een goed begrip zij gememoreerd, dat de drempelwaarde van 2750 m³/s te Borgharen het nivo is waarop de in 1995 in het winterbed van de Limburgse Maas aangelegde kaden geacht worden het water nog juist te kunnen keren. In volgorde van afvoergrootte is de drempelwaarde vanaf het jaar 1571 overstegen in de jaren 1643; 1740; 1880 en 1850 met respectievelijk uit de waterstanden geschatte afvoeren [8], inclusief 5% correctie (1.2, punt c), van 3075-, 3020-, 2950-, en 2850 m³/s. De correctie van 5% toeslag op de in de geschiedschrijving vermelde afvoeren kan enigszins overschat zijn, derhalve een veilige aanname, als wordt bedacht, dat vanaf de 16-de tot de 18-de eeuw op kleine schaal ontbossingen hebben plaats gevonden waardoor de afstroming vermoedelijk enigszins zal zijn toegenomen.

In de jongste periode 1911-1999 zijn er drie zeer hoge afvoeren opgetreden, te weten in de stroomjaren 1925; 1993 en 1994 met resp. afvoeren van 3175-, 3039- en 2750 m³/s, zodat geacht kan worden dat sinds het jaar 1571 de drempel van 2750 m³/s zes maal is overschreden en eenmaal is bereikt, derhalve een kans van ca. 1,5% per jaar.

Het valt op, dat in de 16-de, 17-de en 18-de eeuw er slechts één extreme afvoer, d.w.z. groter dan 2750 m³/s te Borgharen, per eeuw is voorgekomen. In de 19-de eeuw zijn het er twee, terwijl in de twintigste eeuw er vier van dergelijke hoge afvoeren zijn opgetreden.

Bepaling van de herhalingstijden van de gemeten afvoeren

De naar grootte gerangschikte afvoeren met de daaraan gerelateerde herhalingstijden worden gegeven in tabel 2. De werkwijze ter bepaling van de getransformeerde rangnummers voor de afvoeren is als volgt:

De reeks van 1571-1999 heeft een lengte van 429 jaren en bevat 93 topafvoeren nl. 89 uit de periode 1911-1999 en 4 toegevoegde uit de periode 1571-1910. In 429

jaren zijn er 7 jaartopafvoeren gelijk aan of boven de drempelwaarde van 2750 m³/s voorgekomen en in 429 - 7 = 422 jaren was de afvoer lager, hetgeen geldt voor 93 - 7 = 86 geregistreeerde hoogwaters beneden de drempel. Er zijn dus 422 / 86 = 4,91 maal zoveel niet beschikbare (niet geregistreeerde) afvoerwaarden beneden de drempelwaarde van 2750 m³/s als er meetgegevens zijn. De 89 continu geregistreeerde jaarmaxima (1911 - 1999) worden beschouwd als een representatieve steekproef uit de jaarmaxima in de historische reeks van 429 jaren. De herhalingstijden (T) voor de jaarlijks geregistreeerde hoogwaters uit de periode 1911 - 1999 worden volgens de methode uit [9] afgestemd op de langere historische periode (1571 - 1999). De afvoeren beneden de drempelwaarde krijgen een getransformeerd rangnummer. Voor de getransformeerde rangnummers geldt :

$m_{trans} = 7 + 4,91(m-7)$. Hierin is "m" het rangnummer en m_{trans} het getransformeerde rangnummer.

De herhalingstijd (T) in jaren wordt volgens Weibull [5,table 8-I-2] gevonden uit $T = (n + 1)/m_{trans}$

en de overschrijdingskans $P = m_{trans} / (n + 1)$

1.4 Gevolgen voor de herhalingstijden van hoogwatergolven te Borgharen

Met behulp van de gemeten afvoergegevens en getransformeerde rangnummers uit tabel 2 zijn de frequentiehistogrammen in fig.2 tot stand gekomen. De kolomindeling is volgens annex 1 (punt 9). De ingetekende theoretische verdelingen, met parameterschattingen uit de gemeten afvoeren, zijn uit annex 1 (punten 1 t/m 5). De schattingen zijn vermeld in tabel 3. Bij toetsing van de theoretische verdelingen aan de meetwaarden met behulp van de toetsen genoemd in annex 1 (ptn.6 en 7) blijkt, dat er geen redenen zijn om één van de verdelingen te verwerpen. Dit is trouwens ook visueel aannemelijk blijkens fig.2.

Vanwege het nog tot tamelijk hoge afvoeren gestuwd zijn van het benedenstroomse deel van de Luikse Maas, wordt de meetreeks verdeeld in twee deelreeksen, te weten één voor de gestuwde situatie en één voor de ongestuwde situatie. De scheiding tussen beide tekent zich niet zo scherp af. Gesteld kan worden, dat er een diffuus afvoergebied is tussen ca. 1900 m³/s en ca. 2400 m³/s te Borgharen, waarin zowel de gestuwde- als de ongestuwde situatie op het benedenstroomse deel van de Luikse Maas is voorgekomen. Vanaf het jaar 1930, toen de nieuwe stuw van Monsin (Luik-noord) in gebruik is genomen werd er op een hoger afvoernivo gestuwd, terwijl dit vroeger ca. 500 m³/s lager moet zijn geweest.

Het stuwregime is mede afhankelijk van de ernst (mate van stijging van de waterstanden), waarmee het hoogwater zich aandient en voorts van initiatieven van de stuwbeheerders, die tot 1980 geen bijzondere voorschriften hadden en naar bevind van zaken handelden. De invloed van het stuwbeheer in Wallonië kan voor de afvoer bij het meetstation Borgharen aanzienlijke consequenties hebben. Met behulp van een hydro-dynamisch model is in het kader van het Boertien II onderzoek (1994) met een worst-case benadering aangetoond [1] dat in reacties op de komst van de golf van december 1993 (afvoer te Borgharen ruim 3000 m³/s) door grove uurlijkse

bijstelling van de stuwen in de Waalse Maas van 0,5 meter, de afvoer te Borgharen daardoor vrij plotseling zou kunnen toenemen met $800 \text{ m}^3/\text{s}$. Bijstelling van 0,1 meter per uur geeft een verwaarloosbare variatie nl. van slechts $30 \text{ m}^3/\text{s}$. Uit de praktijk van de laatste decennia is gebleken dat, als gevolg van het Waalse stuwbedrijf, met een plotselinge schommeling van de afvoer te Borgharen van hoogstens $200 \text{ m}^3/\text{s}$ rekening moet worden gehouden.

Als gevolg van de gestuwde- of ongestuwde situatie en de daarmee samenhangende waterberging buiten en binnen het zomerbed ontstaan er twee verschillende situaties voor de frequentieverdeling van de afvoeren, waarbij die voor de hoge afvoeren bij ongestuwde omstandigheden onderwerp van deze studie is. Opgemerkt zij, dat de frequentieverdelingen op de piekafvoeren in het Boertien II onderzoek in het kader van de Watersnood Maas, deelrapport 4, pag. 8-2 t/m pag. 8-4, dit verschijnsel, achteraf gezien, ook reeds indiceerden, maar daaraan is verder geen aandacht geschonken en werd het afwijkende gedrag van de zeer hoge afvoeren vervat in het 95% betrouwbaarheidsinterval van de regressielijn. In het onderhavige onderzoek is het aantal zeer hoge gemeten afvoeren verdubbeld kunnen worden vanwege uitbreiding van de waarnemingsperiode, waardoor het gedrag van de hoogste afvoeren zich nog beter onderscheidt.

Er zijn een drietal berekeningen gemaakt om de ondergrens van de ongestuwde afvoer in te schatten. Daarbij werden de grenzen gelegd op $1975 \text{ m}^3/\text{s}$, $2225 \text{ m}^3/\text{s}$ en $2350 \text{ m}^3/\text{s}$. Fig.3 geeft een beeld van de meetwaarden en de daaraan- op theoretische gronden geëigende¹-aangepaste Exponentiële verdelingen, waarvan de parameters zijn vermeld in tabel 3.

De afvoerclassen hebben een breedte van $125 \text{ m}^3/\text{s}$ (fig.3a) en omdat hierbij ook lege klassen zijn, is er een versie (fig.3b) met klassebreedten van $250 \text{ m}^3/\text{s}$, waarbij geen lege klassen optreden. Uit de toetsen (annex 1) is gebleken, dat voor de figuren 3a noch voor de figuren 3b de Exponentiële aangepaste verdelingen ten aanzien van de meetwaarden kunnen worden verworpen, zodat geen uitsluitel wordt verkregen welke ondergrens voor de afvoer het best gekozen kan worden. In onderstaand overzicht zijn de (norm)afvoerwaarden weergegeven voor bepaalde (norm)herhalingstijden, afhankelijk van de variabele ondergrenzen van de afvoer en twee verschillende klassebreedten uit de frequentieverdeling van fig.3.

Herhalingstijd 50 jaar:

Ondergrens van de afvoer (m^3/s)	Normafvoer Klassebreedte $125 \text{ m}^3/\text{s}$	Normafvoer Klassebreedte $250 \text{ m}^3/\text{s}$
1975	2675	2770
2225	2630	2675
2350	2715	2665

¹ Hoogwatergolven op de Maas, pag.9 t/m 23, J.W. van der Made, dir. Waterhuishouding en Waterbeweging, den Haag, 1968.

De Exponentiële verdeling heeft de eigenschap, dat de kans op het voorkomen van afvoer X_1 altijd groter is dan die op een hogere afvoer X_2 , m.a.w. $p(X_1) > p(X_2)$ mits $X_1 < X_2$. Op grond van deze eigenschap is de Exponentiële funktie zeker niet toepasbaar op de totale groep van jaarmaxima, aangezien de frequentie van de lagere maxima weer afneemt voor de laagste maxima. Zie voorts Annex 1 punt 5.

Herhalingstijd 250 jaar:

Ondergrens van de afvoer (m ³ /s)	Normafvoer Klassebreedte 125 m ³ /s	Normafvoer Klassebreedte 250 m ³ /s
1975	3165	3275
2225	3110	3135
2350	3050	3050

Herhalingstijd 1250 jaar:

Ondergrens van de afvoer (m ³ /s)	Normafvoer Klassebreedte 125 m ³ /s	Normafvoer Klassebreedte 250 m ³ /s
1975	3650	3780
2225	3590	3590
2350	3385	3435

Hieruit blijkt, dat voor de grenzen 2225 en 2350 de klassebreedte geen of nagenoeg geen invloed heeft op de normafvoeren, terwijl dit voor 1975 wél het geval is. Voor de grens op 1975 m³/s moet derhalve niet worden gekozen.

De voorkeur gaat uit naar de grenswaarde van 2350 m³/s, omdat is gebleken, dat de stuw van Lixhe (d.i. de meest benedenstroomse Waalse stuw aan de Nederlandse grens) die in 1980 in bedrijf is gesteld nog tot zeer hoge afvoeren in bedrijf blijft. Zelfs bij de hoge afvoer (ruim 3000 m³/s) van december 1993 is deze slechts korte tijd geopend geweest, te weten voor de afvoeren hoger dan 2300 à 2400 m³/s. Behalve dat de stuw zolang mogelijk energie blijft leveren voor de stad Luik is er ook de koppeling met de bovenstrooms gelegen waterkrachtcentrale en het stuwbedrijf van Monsin, welke laatste, na de rivieroeveraanpassingen omstreeks 1980, het peil op het Albertkanaal konstant dient te houden, nadat de hiertoe vroegere hoogwaterkering in de toegang van het kanaal werd gesloopt.

De voorkeur gaat voorts uit naar hantering van de klassebreedte van 250 m³/s vanwege de afnemende afvoerwaarden bij toenemende ondergrens van de afvoer voor de verschillende herhalingstijden. Voor de klassebreedte van 125 m³/s en herhalingstijd 50 jaar is dat bijvoorbeeld niet het geval.

1.5 Resultaat herhalingstijden van hoge afvoeren te Borgharen

In voorgaande paragraaf werd op fysische gronden onderbouwd waarom het verantwoord is om voor de frequentie verdeling van hoge Maasafvoeren te Borgharen uit te gaan van de afvoer-ondergrens van de volledig ongestuwde Maas in haar Waalse stroomgebied. Deze ondergrens correspondeert met de afvoer te Borgharen van ca. 2350 m³/s.

De Exponentiële verdeling is de meest bruikbare funktie voor de benadering van de gemeten afvoeren boven bepaalde grenzen, zoals werd vermeld in de voetnoot van 1.4. Hogere afvoeren te Borgharen dan 3175 m³/s zijn er niet waargenomen in de 429-jarige periode (tabel 1). Toch wordt geëist, dat er een voorspelling wordt gedaan naar de hoogte van de afvoer, die een herhalingskans heeft van 1250 jaar. Dit is de reden waarom de theoretische verdeling wordt toegepast, zodat daarmee een onafhankelijke extrapolatie van meetgegevens kan worden verwezenlijkt.

Uit fig.4 volgen, voor de gegeven herhalingstijden, de in onderstaand overzicht vermelde afvoeren te Borgharen. Met behulp van de residuele variantie (annex 1, punt 8) van de metingen ten opzichte van de theoretische lijn is het 95% betrouwbaarheidsgebied van de lijn bepaald. Het aantal opgetreden afvoeren $> 2350 \text{ m}^3/\text{s}$ zal, volgens de theorie van Dalrymple [9], 16 zijn geweest (tabel 2 en fig.3b). Er zijn 4 klassen met de klassebreedte van $250 \text{ m}^3/\text{s}$, waarvan 3 klassen met ieder 5 afvoeren en 1 klasse met 1 afvoer (het laatste plaatje van fig.3b). Binnen iedere klasse worden de afvoeren geacht een normale verdeling te hebben met het klassemidden als gemiddelde (μ) en met $\sigma = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ (immers $6\sigma \approx 250 \text{ m}^3/\text{s}$). 68% van 5 afvoeren ligt tussen het midden en plus of min σ , terwijl $16\% > \sigma$ en $16\% < \sigma$ (gekozen is voor 2σ uit het midden. Zo ontstaan de 16 ingetekende afvoerpunten in fig.4. Te zien is, dat bijvoorbeeld het betrouwbaarheidsgebied van de afvoer met de herhalingstijd van 50 jaar (0,02) loopt van $2564 \text{ m}^3/\text{s}$ tot $2746 \text{ m}^3/\text{s}$ d.i. dus een nauwkeurigheid van $3\frac{1}{2} \%$ (zowel naar boven als naar beneden). De nauwkeurigheden van de afvoeren worden eveneens in onderstaand overzicht vermeld, alsook de betekenis daarvan voor de marges in de herhalingstijden.

Herhalingstijd (jrn.)	Afvoer (m^3/s)	Nauwkeurigheid van de afvoer (%)	95%-marge in de herhalingstijd (jrn.)
50	2655	$3\frac{1}{2}$	30 – 70
250	3050	4	145 – 370
1250	3435	6	500 – 3030

1.6 Conclusies en aanbevelingen

- Omdat de afvoer te Borgharen wordt beïnvloed door het stuwregime op de Luikse Maas worden in onderhavige analyse alleen die hoogwater situaties beschouwd, die overeenkomen met afvoeren te Borgharen vanaf $2350 \text{ m}^3/\text{s}$. In die gevallen kan nl. gesproken worden van een volledig vrij afstromende rivier. Dit zijn de afvoeren, die ernstig genomen moeten worden in verband met de veiligheid achter de kaden en eens per 50 jaar of minder vaak vóórkomen.

De Exponentiële verdeling, die de voorkeur heeft boven andere verdelingen, zoals de Lognormale- Gumbel- en Pearson (Gamma III) verdeling geeft volgens onderhavig onderzoek als voorspellingsresultaat voor de maatgevende afvoer te Borgharen, die gemiddeld eens per 1250 jaar wordt bereikt of overschreden $3435 \text{ m}^3/\text{s}$, met een nauwkeurigheid van plus of min 6 %.

Deze maat wijkt ca. $350 \text{ m}^3/\text{s}$ af van de huidig gangbare maatgevende afvoer, hetgeen vertaald naar de waterstand bij Borgharen (incl. de in 1995 aangelegde kaden) 0,2m verschilt, terwijl het waterstandverschil in Venlo gemiddeld 0,4m is, evenals bijvoorbeeld in Mook. Dergelijke verschillen gelden niet alleen voor een zeer extreem hoogwater met een herhalingstijd van 1250 jaar, maar ook voor een hoogwater met een herhalingstijd van 250 jaar. Voor een hoogwater met een herhalingstijd van 50 jaar zijn de verschillen echter de helft van de eerder genoemde. Het betekent, dat de dijken en kaden, die in 1995 zijn gerenoveerd resp. zijn aangelegd, op een hoger nivo zijn ontworpen dan volgens onderhavige analyse noodzakelijk wordt geacht.

De onnauwkeurigheid in de gangbare maatgevende afvoer bedraagt plm. 20 % d.i.

ruim 3 keer zo groot als bovengenoemde 6 % voor de in het onderhavig onderzoek bepaalde maatgevende afvoer.

- Doordat in de analyse de afvoerpieken boven de drempelwaarde van $2750 \text{ m}^3/\text{s}$ uit vorige eeuwen zijn toegevoegd werd het aantal continu geregistreerde jaarmaxima (1911-2000) uitgebreid. Dit was mogelijk tot het jaar 1571. Door toepassing van de methode Dalrymple [9] krijgen de hoogwaters beneden de genoemde drempelwaarde van $2750 \text{ m}^3/\text{s}$ naar grootte gerangschikte getransformeerde rangnummers, die bepalend zijn voor de overschrijdingskansen van de afvoeren. Volgens deze methode zijn er, sinds 1571, 16 afvoeroptredens geweest waarvoor de Maas vrij afstromend kan worden geacht, te weten voor afvoeren groter dan $2350 \text{ m}^3/\text{s}$. Aan te bevelen is om zo mogelijk nog andere theorieën te raadplegen dan die van Dalrymple.
- Onderzoek ware te overwegen naar de gevolgen voor de overschrijdingskansen van de afvoer, indien -hoewel niet aannemelijk- in vroegere eeuwen een afvoer boven de drempelwaarde van $2750 \text{ m}^3/\text{s}$ door omstandigheden niet geregistreerd of bewaard gebleven zou zijn.

Hoofdstuk II

Vorm van de afvoergolven te Borgharen

2.1 Probleem en doel van de analyse; hydrologie en theorie

Niet iedere hoogwatergolf te Borgharen heeft dezelfde vorm, maar haar gedaante is ondermeer afhankelijk van de regenintensiteit en de regenduur. De golfvorm is belangrijk voor de waterstanden benedenstrooms van Borgharen. Zo kunnen twee gelijke piekafvoeren van de golf te Borgharen verschillende waterstanden benedenstrooms veroorzaken vanwege verschil in de overige relevante golfkenmerken, te weten slankheid, inhoud en basisafvoer (d.i. de afvoer bij de aanzet van de golf). Andere golfkenmerken, zoals duur, zwaartepunt, scheefheid etc. blijken geen significante betekenis voor de hoogste waterstanden te hebben (Annex 2 en 3). *Het probleem is derhalve, dat langs de Maas de relatie piekafvoer (Borgharen) – waterstand (elders, benedenstrooms) niet eenduidig is en het doel van onderhavige analyse is om in aanvulling op de heersende opinie, dat behalve de piekafvoer slechts de spitsheid van de golf (bepaald uit een dag vóór-, tijdens- en ná de top) van betekenis is voor de waterstanden benedenstrooms, daarbij ook de inhoud van de golf, de basisafvoer en de bredere betekenis van de spitsheid (μ_4 van Annex 2) te betrekken.* Er dienen combinaties van de vier genoemde golfkenmerken te worden gevonden, die op gewenste benedenstroomse locaties dezelfde waterstand veroorzaken met de daarbij behorende overschrijdingskansen of herhalingstijd.

Daar de omvangrijke bovenstrooms van Borgharen gelegen rivierwerken vooral in de eerste decennia van de twintigste eeuw invloed hebben gehad op de golfvormen wordt onderhavige analyse uitgevoerd voor golven te Borgharen vanaf 1931. In de periode 1931-2000 zijn er 50 hoogwatergolven van betekenis voorgekomen. Deze zijn, na enkele aanpassingen, ontleend aan [17].

In het algemeen hebben de solitaire golven een steile oploop van 3 à 6 dagen, terwijl de afloop een tweemaal minder steile helling vertoont als gevolg van de naloop van

vooral water uit het winterbed en uit grondwaterafvoer. Het komt nogal eens voor, dat een golf een gecompliceerde vorm heeft doordat twee elkaar snel opvolgende regenfronten, op de Maas een interferentiebeeld veroorzaken van twee afvoergolven. Omdat er geen duidelijke fysische criteria zijn om te beoordelen wat een solitaire- en een gecompliceerde golf is geldt, op basis van ervaring en vroegere gesprekken met onderzoekers (J.van der Made, Rikz [11] en K.van Dixhoorn Riza [12]), per definitie voor de solitaire golf, dat de marge tot de volgende golftop 8 dagen of meer moet zijn.

Als er binnen de marge van 8 dagen meerdere toppen zijn ontstaan kan dit zijn veroorzaakt door:

- a) twee of meer elkaar in korte tijd opvolgende regenfronten, zoals boven vermeld, of
- b) manipulaties met bovenstrooms van Borgharen gelegen stuwen, waardoor het natuurlijke verloop wordt verstoord.

In het onderzoek Watersnood Maas, Boertien II (1994) wordt met behulp van een hydrodynamisch rekenmodel aangetoond, dat voor b) de afvoer te Borgharen in het ongunstigste geval een schommeling van $800 \text{ m}^3/\text{s}$ kan ondervinden [1]. Uit de praktijk van de laatste decennia blijkt, dat een fluctuatie van maximaal $200 \text{ m}^3/\text{s}$ nog wel realistisch is te achten, doch in de meeste gevallen is dit minder.

In geval a) geldt het één golf en wordt de laagste top als fluctuatie in de gehele golf aangemerkt. In geval b) worden beide afvoerpieken gecorrigeerd naar één piek met de top op het tijdstip van de hoogste oorspronkelijke piek en de inhoud gelijk latend. Dit is het geval met 10 % van de hoogwatergolven.

De golven worden gedefinieerd op het tijdinterval vanaf de basisafvoer (d.i. het begin van de was) tot aan het einde van de val, te weten het snijpunt van de verloopplijn van de afvoer met het uitputtingsverloop van de basisafvoer (als ware er geen regen gevallen), echter met een begrensde valperiode van tweemaal de wasperiode, zoals boven vermeld.

Opgemerkt zij, dat voor de Maas het uitputtingsverloop van de basisafvoer 2 à $6 \text{ m}^3/\text{s}$ per dag bedraagt (Annex 2), hetgeen in tijden van hoogwater van verwaarloosbare betekenis is.

Bepalend voor de waterstanden die voortvloeien uit de golf zijn de kenmerken piekafvoer ($Q_{08u.max.}$) en basisafvoer (Q_{basis}), maar ook volume (μ_0) en slankheid of, in statistische termen, kurtosis (μ_4). Beide laatste worden bepaald met de daarvoor bekende formules volgens de momentenmethode (Annex 2). Annex 3 laat zien, dat overige kenmerken niet zo relevant zijn voor de waterstanden.

Onderzoek naar de trends in deze kenmerken wordt gedaan met de Spearman toets. Significante verschillen tussen de deelreeksen van een kenmerk worden gecorrigeerd door homogenisatie naar de hedendaagse toestand. Dit blijkt nodig te zijn voor de kurtosis, die in 1980 een trendbreuk te zien geeft (zie 2.2) en waarvoor ook de gemiddelden van de deelreeksen 1931-1980 en 1980-2000 significant verschillen.

De gelijk/ongelijkwaardigheid van de deelreeksen wordt getoetst met de F-toets (variantie quotiënten) en de t-toets (Student) met $2\frac{1}{2}$ % eenzijdige overschrijdingskansen [15]. Aan de vier genoemde empirische reeksen van kenmerken worden de meest waarschijnlijke theoretische verdelingen [Annex 1] aangepast om daarmee per kenmerk de kwalificatie klein, gemiddeld of groot te kunnen aangeven.

2.2 Empirische golven² te Borgharen

De golven zijn beschouwd sinds 1931, toen er een nieuwe situatie op de Maas ontstond doordat de stuw van Borgharen en de vernieuwde stuw van Monsin (Luik noord) annex waterkrachtcentrale in gebruik werden genomen. Ook waren de rivierwerken in de Waalse Maas reeds een eind gevorderd.

Tijdens het optreden van een hoogwatergolf zijn de dagelijkse 08-uur afvoeren te Borgharen bepaald en geregistreerd. Daarvan zijn de golven (Q') boven de basisafvoer geanalyseerd. Onderscheid is gemaakt tussen de perioden 1931-1980 en 1980-2000, omdat rond 1980 de grote rivierwerken als voltooid kunnen worden beschouwd.

De conclusie van het trendonderzoek voor de periode 1931-1980 is, dat de kurtosis (μ_4) een trendmatig verloop in de tijd vertoont. Deze trend wordt opgeheven volgens de procedure, zoals in Annex 2 vermeld. De correctie van het gemiddelde, die afwijkt van het gemiddelde uit de periode 1980-2000 wordt daarin eveneens beschreven.

Uit het onderzoek naar de relaties tussen alle golfparameters (μ_0 t/m μ_4 alsmede golfduur), waaronder m.b.t. de waterstanden ook minder relevante, bleek dat er slechts één goede lineaire relatie is nl. tussen de golfduur en de gemiddelde tijd μ_1 (zwaartepunt van de golf) met de spreiding er omheen (μ_2)^{0,5} ($R^2=0,81$ resp. $0,90$). De overige parameters zijn als onafhankelijk van elkaar te beschouwen. Hetzelfde geldt trouwens ook voor de afvoeren, zowel ten opzichte van elkaar als ten opzichte van de golfkenmerken en golfduur.

De meest waarschijnlijke theoretische verdelingen van de vier voor de waterstanden relevante golfkenmerken zijn opgenomen in fig.6, terwijl tabel 6 de parameterwaarden van deze verdelingen vermeldt.

Dat van de vier genoemde golfkenmerken de piekafvoer ($Q_{08u.max.}$) en de basisafvoer (Q_{basis}) relevant zijn voor de benedenstrooms van Borgharen optredende waterstanden is vanzelfsprekend. Dat deze relevantie ook geldt voor het volume (μ_0) en de slankheid of kurtosis (μ_4) wordt aangetoond in Annex 3, Par I.

Het Empirisch onderzoek³ naar de invloed van μ_0 , μ_4 en basisafvoer op de waterstanden langs de Nederlandse Maas, waarvoor een beperkt aantal gegevens zijn, levert voor Venlo blijkens tabel 5 het beeld op van fig.7. Zo geldt bijvoorbeeld voor de golf van 8-2-84: een piekafvoer van 2550 m³/s, een grote basisafvoer (979 m³/s), een gemiddelde inhoud ($615 \cdot 10^6$ m³) en een grote kurtosis van 3,00 (d.i. slank of spits). Het valt op, dat de zeer hoge pieken een grotere basisafvoer hebben (22-12-93; 30-1-95 en 8-2-84) en dat de lagere pieken (<2000 m³/s) i.h.a. kleine- en gemiddelde basisafvoeren hebben.

Het betekent voor konstante gemiddelde inhoud en variabele kurtosis en basisafvoer:

- Een grote basisafvoer in combinatie met een kleine kurtosis (stompe golf) geeft een groot waterstandverhogend effect (30-1-95 en 5-1-91).
- Een grote basisafvoer met grote kurtosis (spitse golf) werken elkaar tegen, waterstandverhogend gezien (8-2-84).
- Voor lagere hoogwaters overheerst de grote kurtosis de gemiddelde- en kleine basisafvoeren (27-12-99 en 2-11-98).
- Voor de lagere hoogwaters werken gemiddelde kurtosis en kleinere basisafvoer reeds sterk verlagend op de waterstanden (16-2-90).

² Sinds 1931 gemeten dagelijkse 08-uur golfafvoeren.

³ Het onderzoek van de Empirische golven wordt in het vervolg "Empirisch onderzoek" genoemd.

Het betekent voor konstante gemiddelde kurtosis en variabele inhoud en basisafvoer:

- Voor grote basisafvoer lijkt de grote inhoud weinig effect op de waterstanden te hebben (22-12-93).
- Voor gemiddelde basisafvoer heeft de grote inhoud een waterstandverhogende invloed (17-3-88).

Voor Mook gelden de resultaten in gelijke mate als voor Venlo.

2.3 Gesimuleerde golven te Borgharen

Uit de metingen wordt een globale kwalitatieve indruk verkregen van de invloed van een combinatie van inhoud, kurtosis en basisafvoer van de golf te Borgharen op de waterstanden elders langs de Nederlandse Maas. De verscheidenheid in μ_0 en μ_4 voor golven met gelijke $Q_{08u,max}$ is te gering om daaraan kwantitatieve conclusies te kunnen verbinden t.a.v. de effecten van de afzonderlijke golfkenmerken op de waterstanden benedenstrooms. Daarom zijn er golven gesimuleerd, waarmee de afzonderlijke invloed van (piekafvoer) $Q_{08u,max}$, Q_{basis} , μ_0 en μ_4 op de waterstanden is onderzocht.

Om een indruk te krijgen hoe de simulatie zou kunnen worden opgezet werd in eerste instantie gebruik gemaakt van de parameterklassificatie uit tabel 5. De gesimuleerde golven Q' zijn iteratief tot stand gekomen, daarbij rekening houdend met de golfdefinities uit 2.1. De golven Q' zijn uitgebeeld in fig.8.

De klassificatie "gemiddelde" voor μ_0 en μ_4 heeft een bepaalde klassebreedte. Hoewel in eerste instantie voor deze klassebreedte de middenwaarde is beschouwd, wordt de invloed van de breedtemarge op de marge in de waterstand nader onderzocht voor $Q_{08u,max} = 1500$ -, 2500 - en $3150 \text{ m}^3/\text{s}$. In tabel 7 zijn de resultaten van dit "gevoeligheidsonderzoek" vermeld door voor $0,01\text{m}$ waterstandverschil de variatie in μ_0 en μ_4 te bepalen. Eén en ander is verdisconteerd in tabel 8. De resultaten uit tabel 8 zijn voor Venlo en Mook in beeld gebracht met fig.9. Daarbij zijn ook de lijnen van gelijke basisafvoer (Q_{basis}) ingetekend. Voor bijvoorbeeld gemiddelde μ_0 en μ_4 (resp. driehoeken en bollen) zullen de waterstanden verschillen naarmate de basisafvoer verschilt. Voor de interpretatie zijn tabel 8 en fig.9 gezamenlijk te gebruiken.

Samengevat :

- Uit het gevoeligheidsonderzoek voor de zojuist genoemde klassebreedte en waarvan de resultaten zijn vermeld in tabel 7 blijkt, dat combinaties van μ_0 en μ_4 i.v.m. hun marges binnen de klassebreedte tot afwijkingen kunnen leiden van minder dan $0,1\text{m}$ voor $Q_{08u,max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, minder dan $0,05\text{m}$ voor $Q_{08u,max} = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ en minder dan $0,03\text{m}$ voor $Q_{08u,max} = 3150 \text{ m}^3/\text{s}$.
- De waterstandverhogende invloed van een kleine- naar een grote inhoud van de golf te Borgharen bedraagt $0,45$ à $0,55$ te Venlo en voor Mook varieert dit van $0,4\text{m}$ naar $0,9\text{m}$ en naar $0,6\text{m}$ al naar gelang de piekafvoer resp. $1500 \text{ m}^3/\text{s}$, $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ of $3150 \text{ m}^3/\text{s}$ is (fig.10). De grote variatie in de waterstandverhogende invloed te Mook is waarschijnlijk toe te schrijven aan de verkleinde rivierinhoud (geometrie) bij de overgang van het onbedijkte naar het bedijkte gebied, terwijl voor de allerhoogste afvoer er nog bergingsmogelijkheden zijn in het bekken van de Niers (lob van Gennep).

- De waterstandverlagende invloed te Venlo en te Mook van een kleine- naar een grote kurtosis van de golf te Borgharen is ca. 0,3m en verloopt naar afvoeren van $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ en hoger naar vrijwel nul (fig. 10).
- Een lagere basisafvoer geeft grotere damping aan de golf dan een hogere basisafvoer (fig. 11) voor gemiddelde inhoud en kurtosis. Zo hebben te Venlo de basisafvoeren, die lager zijn dan $700 \text{ m}^3/\text{s}$ een waterstandverlagende invloed van minstens 0,35m bij de hoogste afvoer en die hoger zijn dan $1250 \text{ m}^3/\text{s}$ hebben een waterstandverhogende invloed van minstens 0,3m bij de laagste afvoer. Voor Mook is dit $850 \text{ m}^3/\text{s}$ resp. eveneens $1250 \text{ m}^3/\text{s}$ met een waterstandverlaging van minstens 0,4m resp. een waterstandverhoging van minstens 0,25m.

2.4 Vergelijking van golfkenmerken en waterstanden uit Empirie⁴ en Simulatie

Vanwege de stabiele riviergeometrie werden voor het empirische onderzoek de hoogwatergolven ($Q_{08u, \max.} > 1350 \text{ m}^3/\text{s}$) gebruikt uit de periode 1980-2000, die onderdeel zijn van het totale gegevensbestand 1931-2000. Bij vergelijking van de golfkenmerken uit beide perioden blijken deze goed met elkaar overeen te stemmen. De gegevens voor het empirisch onderzoek zijn te vinden in tabel 5 en de gegevens voor het simulatie onderzoek zijn vermeld in tabel 8.

In fig. 12 is te zien, dat de waterstanden te Venlo met Sobek bepaald uit de empirische golfkenmerken, overeenstemmen met de waterstanden die met Sobek uit de gesimuleerde golfkenmerken zijn berekend. Door ieder van de beide puntenreeksen is de (tweede) machtsfunctie bepaald, de getrokken- resp. de onderbroken kromme voorstellend. De verschillen tussen beide is hoogstens 0,1m. Naar analogie van Venlo is voor Mook dezelfde procedure gevolgd en het resultaat is, zoals te zien in fig. 12, minstens zo goed als voor Venlo.

In fig. 13 is te zien, dat er een afwijking van 0,2m kan zijn tussen de gemeten waterstanden en de met Sobek berekende. Dit is te wijten aan schematisaties in Sobek, aan het negeren van zijdelingse toevoer en het volledig afsluiten van het winterbed achter de kaden. Bij lagere hoogwaters zal de invloed van de zijdelingse toestroming op de waterstanden groter zijn dan bij hogere hoogwaters, terwijl de invloed van de kades er bij lagere hoogwaters (nog) niet is. In die gevallen zal dus de gemeten waterstand hoger zijn en des te hoger naarmate de locatie meer benedenstrooms gelegen is. Uit vergelijking met de diagonaal van de figuur is dit te zien. Voor hogere afvoeren zullen beide genoemde effecten elkaar min of meer opheffen.

De gebruikte parameters μ_0 en μ_4 voor de empirie en μ_0 en μ_4 voor de simulatie zijn onderzocht op gelijkwaardigheid. De daarvoor gebruikte testen zijn de Wilcoxon-toets [10] en de toets voor gemiddelden (Variantiequotiënt-toets in combinatie met de Student-toets [10]).

Voor μ_0 is de toetswaarde bij Wilcoxon = 6, terwijl de kritieke waarde ($W_{0,025}^{16;5}$) = 47, zodat er geen reden is om de gelijkheid van de reeksen van inhouden (μ_0) te verwerpen. Voor de toets voor gemiddelden is de toetswaarde van het variantiequotiënt 1,34 en de kritieke waarde $F_{0,025}^{19} = 3,8$, terwijl de Student toetswaarde = 0,06 en de kritieke waarde $t_{0,025}^{19} = 2,1$. Er is derhalve geen reden om de gelijke gemiddelde inhouden van empirie en simulatie te verwerpen.

⁴ Dagelijks gemeten 08-uur golfafvoeren

Een zelfde conclusie geldt voor de kurtosisreeksen van beide, waarvoor de Wilcoxon toetswaarde =5, bij $W_{0,025}^{16;5} = 47$. De toetswaarde van het variantiequotiënt =1,47 bij $F_{0,025}^{19} = 3,8$, terwijl de Student toetswaarde =0,35 bij de kritieke waarde $t_{0,025}^{19} = 2,1$.

Synthese:

- Op grond van het voorgaande kan gesteld worden, dat zowel voor de waterstanden te Venlo en te Mook (fig.12) als voor de golfkenmerken te Borgharen (Wilcoxon en "gemiddelden" toets) er geen significante verschillen zijn tussen Empirische- en Simulatie resultaten. Onderhavige simulatie is derhalve een goed middel gebleken om daarmee golven te Borgharen en (m.b.v Sobek) waterstanden langs de Nederlandse Maas te genereren om daarmee de ontoereikendheid van meetgegevens aan te vullen en dus meer inzicht te verkrijgen in het effect van inhoud, basisafvoer en kurtosis (vorm) van de golf te Borgharen op de waterstanden benedenstrooms van Borgharen.
- Buiten de piekafvoeren ($Q_{08u.max.}$) en het nivo van de basisafvoeren Q_{basis} (aan het begin van de golven) zijn zowel de inhoud als de kurtosis van de golf te Borgharen mede bepalend voor de waterstanden.

Uit de simulatie blijkt:

- dat de invloed van de kurtosis, die voor afvoeren rond $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ 0,2 à 0,3m bedraagt, afneemt tot vrijwel nihil naarmate de afvoeren hoger worden dan $2500 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit als gevolg van het steeds minder wordende uitsluitend bergend gebied, ten gunste van het stroomvoerend gebied.
- dat de invloed van de golfinhoud te Borgharen op de waterstanden benedenstrooms varieert met de plaatselijke riviergeometrie en minder met de hoogte van de afvoer en kan wel $\frac{1}{2}$ à $\frac{3}{4}$ m op de waterstand uitmaken.
- dat de basisafvoer te Borgharen van wezenlijke betekenis is voor de benedenstroomse waterstanden.
- dat de invloed van de overige parameters (2.1) op de waterstanden, volgens annex 2 en annex 3 niet significant is.

2.5 Frequentie van Locale waterstanden

Het doel van de inschatting van de locale waterstanden langs de Nederlandse Maas, voor herhalingstijden van 50-, 250- en 1250 jaar, is om de hoogten te kunnen bepalen van beschermende kaden en dijken. De herhalingstijden zijn op bestuurlijk nivo vastgesteld en hebben betrekking op de huidige riviersituatie van het bekade deel van de Maas resp. de toekomstige riviersituatie voor het bekade deel van de Maas resp. het bedijkte deel van de Maas.

Van de golven en afvoeren te Borgharen zijn, zoals uit het voorgaande blijkt, vele karakteristieke kenmerken bekend. Ook werd duidelijk, dat niet alleen de piekafvoer te Borgharen de waterstand benedenstrooms bepaalt, maar dat deze mede wordt bepaald door de inhoud, de kurtosis en de basisafvoer van de golf te Borgharen.

$Q_{08u.max}$ = piekafvoer om 08:00

Q_{basis} = afvoer aan het begin van de golf

μ_0 = inhoud van de golf (dus boven Q_{basis})

μ_4 = kurtosis (slankheid van de golf)

Het probleem is, de frequentieverdeling te bepalen van de benedenstroomse waterstand (locatie X) uitgaande van combinaties van de, onafhankelijk van elkaar gebleken, golfkenmerken piekafvoer, inhoud, kurtosis en basisafvoer van hoogwatergolven te Borgharen, waarvan voor ieder kenmerk de kansverdeling bekend is.

Omdat een vier dimensionale kansverdeling complex is, zal eerst aan de hand van een 2-D kansverdeling, te weten voor piekafvoer en inhoud, de bedoeling van e.e.a. worden verduidelijkt. De relevante Sobek berekeningen voor de waterstanden zijn reeds uitgewerkt in tabel 8, evenals de empirische gegevens in tabel 5 en het resultaat voor de waterstand te Venlo is afgebeeld in fig.14. Van de betrekkinglijnen (relaties van waterstanden langs de rivier) kan onvoldoende gebruik worden gemaakt vanwege te weinig variaties in de kenmerkende (waterstandbepalende) parameters van opgetreden hoogwater golven, vandaar de simulatie berekeningen.

Twee dimensionale verdeling:

Voor de locatie X langs de rivier wordt Venlo gekozen, halverwege de Zandmaas. De basisafvoer en de kurtosis worden konstant gehouden (1000 resp. 2,82), terwijl de piekafvoer en de inhoud variëren. Een combinatie van beide ($Q_{08\text{uurmax.}}$ en μ_0) leidt tot een bepaalde waterstand te Venlo. Zo ontstaat fig. 14 uit empirie en simulaties (tabel 5 resp. tabel 8). De waterstand van bijvoorbeeld NAP + 17,50m te Venlo is te schrijven als:

$$H_{\text{Venlo}} = f(p, v) \dots\dots\dots(0) \quad \text{waarbij } p=\text{piekafvoer} \quad v=\text{golfvolume}$$

Uit de kansverdelingen van fig.6 (voor $Q_{08\text{uurmax.}}$ en μ_0) kunnen 2 aan 2 een groot aantal Monte Carlo trekkingen worden gedaan. Deze gepaarde waarden invullen in (0) geeft een groot aantal waterstanden H_{Venlo} . De frequentieverdeling hiervan geeft de kansen voor de waterstanden te Venlo.

Fig.15 laat zien in hoeverre de combinaties tussen $Q_{08uurmax}$ en μ_0 zinvol zijn te achten. Daartoe is de "relatie" tussen beide combinaties uitgebeeld van de 50 beschikbare golven uit de periode 1930-2000, waarvoor 3x de standaardfout van de schatting (SFS) is aangegeven met de onderbroken lijnen. Combinaties hoger of lager dan 3 x SFS worden uitgesloten geacht. Naar analogie met fig.15 is dit ook voor de overige combinaties van golfkenmerken gedaan (fig.16).

Vier dimensionale verdeling:

Het probleem is hierboven beschreven, te weten:

de frequentieverdeling te bepalen van de benedenstroomse waterstand (locatie X) uitgaande van combinaties van piekafvoer, inhoud, kurtosis en basisafvoer van hoogwatergolven te Borgharen, waarvan de kansverdelingen bekend zijn.

De oplossing verloopt met een 4-D functie van de parameters $Q(\text{piek})$, volume, kurtosis en $Q(\text{basis})$, alsmede met de kansverdelingen van die parameters, volgens onderstaande stappen a) en b).

a)...De waterstand H te X is een functie van de vier parameters, dus

$H(X) = f(p, v, k, b)$(1), waarbij p =piekafvoer v =golfvolume
 k =kurtosis b =basisafvoer

Het voordeel van een funktievorm is, dat de 4-D integraal gemakkelijk kan worden uitgeschreven en dan in een "tool" is uit te werken.

b)...Aangezien de 4 parameters statistisch onafhankelijk geacht kunnen worden is het doen van een trekking in series van 4 (uit fig.6) eenvoudig. Met behulp van de funktie (1) is dan de waterstand H te X te berekenen door invulling van de getrokken waarden.

Om een goede benadering te krijgen van de waterstanden is het aantal trekkingen een lastig punt. Daarbij ware de Monte Carlo analyse stapsgewijs uit te voeren, dus met telkens toenemend aantal trekkingen net zo lang totdat de frequentieverdeling van de waterstand convergeert. Dit zal nog verder uitgewerkt worden.

2.6 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies:

1. Van groot belang voor de bepaling van de locale waterstanden benedenstrooms van Borgharen zijn de piekafvoer, de inhoud en de kurtosis (slankheid) van de hoogwatergolf, alsmede de basisafvoer (de beginafvoer van de golf). Een hogere piekafvoer bij Borgharen behoeft niet altijd te leiden tot een hogere waterstand benedenstrooms.
2. In de 50 golven uit de periode 1931-2000 is bij één parameter, te weten de kurtosis (μ_4), een inhomogeniteit in de reeks geconstateerd als gevolg van omvangrijke rivierwerken in de Waalse Maas. Deze reeks is gehomogeniseerd.
3. Bij de empirische golven is de verscheidenheid in μ_0 en μ_4 (inhoud resp. kurtosis) alsmede basisafvoer, voor gelijke piekafvoeren te Borgharen, te gering om daaraan degelijke conclusies te kunnen verbinden voor de waterstanden benedenstrooms.
Daarom zijn er golven gesimuleerd. Deze geven geen significant verschillende waterstanden en overigens ook geen verschil in karakteristieke kenmerken van golven te Borgharen als wordt getoetst aan de meetgegevens.
4. De invloed van een kleine- naar een grote kurtosis (bij konstante gemiddelde inhoud en gelijke basisafvoeren) bedraagt voor Venlo en Mook ca. 0,3m bij afvoeren vanaf 1500 m³/s en verloopt naar vrijwel nihil voor afvoeren van 2500 m³/s en hoger.
5. De invloed van een kleine- naar een grote inhoud (bij een konstante gemiddelde kurtosis en gelijke basisafvoeren) bedraagt ½ à ¾m voor Venlo resp. Mook.
6. Een lagere basisafvoer (< 700 m³/s) geeft voor Venlo minstens 0,35m verlaging van de waterstand voor de hoogste afvoer (3150 m³/s), terwijl een hogere basisafvoer (>1250 m³/s) minstens 0,3m verhoging van de waterstand geeft voor de lagere afvoeren (1500 m³/s). Voor Mook zijn de bedragen minstens 0,4m verlaging resp. minstens 0,25m verhoging.

Aanbeveling:

De 4-D kansverdeling van golfkenmerken ter bepaling van de overschrijdings-frequentie van locale waterstanden op de Nederlandse Maas ware nader uit te werken volgens de procedure, zoals beschreven in 2.5.

Hoofdstuk III

Waterbeheer op de Maas gedurende vorstperioden

3.1 Probleem en doel van de analyse

Dreigende en feitelijke ijsvorming op de Maas is een erg wisselvallig fenomeen. Gemiddeld genomen doet zich eens per vier jaar een dergelijke periode voor, waardoor de scheepvaart en alle aan de rivier gebonden activiteiten ernstig worden geschaad of belemmerd.

Het grote probleem is niet slechts de vorming van vast rivierijs, doch vooral de ijsafzetting en de dreiging tot vastvriezen van stuwschuiven en -kleppen, waardoor de afvoerregulatie niet meer zou kunnen plaatsvinden, hetgeen bij toename van de afvoer, na het invallen van de dooi, zelfs kan leiden tot overstromingen.

Daarenboven zal, als gevolg van drijfijis en ijsdruk, schade aan stuwen en sluizen kunnen worden veroorzaakt, waardoor de operationaliteit van deze kunstwerken lang zou stagneren in verband met reparatiewerkzaamheden.

Om deze redenen worden de stuwen uit voorzorg geopend (gestreken) even voordat drijfijis wordt verwacht, dat wil in concreto zeggen bij een watertemperatuur van 0,5 °C te Lith en aanhoudende vorst. De laagste watertemperaturen treden op in de Beneden Maas, mede door de lagere watersnelheden en vooral omdat, in tegenstelling tot bovenstrooms, de warmtelozingen van industrieën te verwaarlozen zijn. Voorts ligt dit deel van de Maas in de strijklengte van de koude oostelijke wind.

Het gevolg van het openen van de stuwen is, dat de waterstanden 3 à 5 meter zullen dalen, waardoor er geen sprake meer kan zijn van scheepvaart. De zich in de havens bevindende schepen, woonboten e.d. alsmede aanlegsteigers en andere voorzieningen komen in een hachelijke positie te verkeren en uit ervaring blijkt, dat er voor miljoenen euro's schade optreedt, doordat de veranderingen in de riviersituatie zo plotseling optreden.

Het doel van deze studie is om de schade zoveel mogelijk beperkt te houden door belanghebbenden vroegtijdig te kunnen informeren over een voorgenomen stremming van de scheepvaart ten gevolge van peilverlagingen. Daartoe dient de waterbeheerder, Rijkswaterstaat directie Limburg, initiatieven te nemen. Vanwege de grote economische- en materiele belangen is het zaak de berichtgeving en de daaruit voortvloeiende maatregelen te ondersteunen door een onderbouwde modelmatige voorspelling van de watertemperatuur. Op de dag dat wordt verwacht, dat de watertemperatuur de 0,5 °C te Lith zal bereiken zullen de stuwen worden gestreken en zal er dus ruim tevoren, via de media, een bericht moeten worden verspreid. Uit ervaring is gebleken, dat de tijdspanne tussen berichtgeving en uitvoering van de aangekondigde maatregelen minstens twee dagen moet zijn om belanghebbenden voldoende gelegenheid te geven om schadebeperkende voorzorgen te treffen.

Om de doelstelling van het dit onderzoek te bereiken zullen geregistreerde gegevens dienen te worden verzameld over lucht- en watertemperaturen, ten behoeve van een te ontwerpen voorspellingsmodel voor lage watertemperaturen. De voorspelling dient voor een "zichttijd" van twee dagen nauwkeurig te zijn en voorts indicatief voor de volgende drie dagen. Door als waterbeheerder tijdig te waarschuwen voor mogelijke calamiteiten op de rivier en de daarmee in verbinding staande wateren, als gevolg van de ingetreden vorst, wordt belanghebbenden de gelegenheid geboden om schade aan vaartuigen, woonboten, aanlegsteigers, kunstwerken e.d. maximaal te beperken.

Omdat het vaste ijs benedenstrooms gevormd wordt en van hieruit in bovenstroomse richting aangroeit [19], zal het onderzoek van ijswinters zich richten op de situatie bij de meest benedenstrooms gelegen Maasstuw nl. die van Lith.

Het betekent overigens, dat het openen (strijken) van deze stuw tot gevolg heeft, dat ook de bovenstrooms daarvan gelegen stuw Grave noodgedwongen moet worden geopend, vanwege de ontstane ontoelaatbare hydraulische omstandigheden aldaar. De opening te Grave heeft vervolgens weer waterstandverlagende consequenties voor het Maas-Waal kanaal, zodat de Noord-Zuid vaarroute wordt gestremd. Kortom, het openen van de stuw Lith, ten gevolge van een winterse situatie betekent bij aanhoudende vorst dat alle stuwen (behoudens wellicht te Borgharen) moeten worden geopend en derhalve dat de Nederlandse Maas grotendeels onbevaarbaar wordt.

Voor zoveel als mogelijk zijn de basisgegevens van water- en luchttemperatuur te Lith, alsmede van windrichting en windkracht van alle betekenisvolle vorstperioden uit het tijdvak 1940-2000 ontleend aan [20 t/m 24] waarvan de meest volledige reeksen, te weten die van de vorstperioden sinds 1984, kunnen worden gevonden in de tabellen 10 t/m 12. In de winter van 1939/1940 deed de eerste ernstige ijsperiode zich voor na het in bedrijf stellen van de stuw te Lith op 13 maart 1936.

3.2 Algemeen

De gegevens en andere wetenswaardigheden over vorstperioden, zoals het verloop van een winter in vergelijking met de langjarige gegevens, de ijsbezetting van rivieren en kanalen, scheepvaartmogelijkheden, waterstanden als gevolg van ijsgang en ijssdammen, opruiming van ijs, berichten van de Ijsberichten Dienst, windkracht en -richting, neerslag en luchtdruk zijn door Rijkswaterstaat vastgelegd, in samenwerking met het KNMI. Aanvankelijk gebeurde dat in de "Verslagen over de Openbare Werken" uitgegeven door het Staatsdrukkerij- en Uitgeversbedrijf te Den Haag, vanaf medio 50-er jaren door de Directie Waterhuishouding en Waterbeweging (Den Haag), sinds 1985 door RIKZ (den Haag) en sinds 1988 door RIZA (Lelystad).

Voor de waarnemingen van de gemiddelde etmaal luchttemperatuur te Lith is gebruik gemaakt van het 40 kilometer ten noorden daarvan gelegen weerstation te de Bilt, omdat de gegevens van de Bilt zeer gedetailleerd en gemakkelijk toegankelijk zijn. Zo blijkt, dat de luchttemperatuur in de maanden december, januari en februari te Lith gelijk te achten is aan die van de Bilt. Naarmate de winter naar het einde loopt draait de luchtcirculatie vanuit het noorden naar een meer westelijke richting, waardoor te Lith de maand maart gemiddeld bijna een halve graad warmer is dan die te de Bilt. Bij het toekomstig gebruik van een voorspellingsmodel voor de watertemperatuur te Lith zal kunnen worden gebruik gemaakt van de via de media (o.a. TV) verspreide 5-daagse voorspelling van de luchttemperatuur te de Bilt.

Zo volledig als de luchttemperaturen worden weergegeven zo onvolledig zijn de waarnemingen van de locale watertemperaturen in winterse omstandigheden. Men vond de noodzaak en het nut van dergelijke metingen vroeger niet van belang, omdat de scheepvaart s'winters toch vrijwel stil lag of bij dreigende ijsvorming men al snel een vluchthaven opzocht, omdat reeds bij het begin van ijsvorming het risico om door te varen alras te groot werd wegens het geringe motorvermogen. Met het strijken van de stuwen (sinds de 30-er jaren aanwezig) had men in dergelijke

omstandigheden vrijwel geen ervaring en werden deze uit veiligheidsoverwegingen dan ook vroegtijdig geopend, terwijl preventieve maatregelen al zeker niet in aanmerking kwamen. De maatschappelijke acceptatie ten aanzien van ongemakken was in die tijden erg groot in vergelijking met heden ten dage.

Vroeger was het beleid ten aanzien van ijstoestanden op de rivier, dat het vaste ijs gebroken werd benedenstrooms van Lith, zodra er uitzicht op dooi of geringe vorst was, maar in de laatste decennia is dit beleid gewijzigd, omdat het plotseling breken van ijs tot veel opeenhoping en daardoor schade in het Benedenrivieren (Delta) gebied leidde en er daardoor duur schadeherstel aan constructies en andere voorzieningen moest worden uitgevoerd. Dit beleid kon vooral gewijzigd worden, omdat het motorvermogen van de schepen allengs zodanig toenam, dat lang kan worden doorgevaren, zodat het breken van ijs gaandeweg toch al door de scheepvaart zelve plaats vindt.

Als er al watertemperaturen werden gemeten waren de problemen ondermeer, dat door het stromende water het niet zeker was dat de thermometer goed onder water gehouden kon worden, dat een meting in een emmer rivierwater vanwege de beïnvloeding van de buitenlucht, vooral bij grote koude, niet zo betrouwbaar bleek en dat de schaalverdeling van de ongeëikte thermometer zodanig grof was, dat daardoor de aflezing als globaal moet worden opgevat. Hierdoor was vergelijking van temperaturen van verschillende locaties nogal hachelijk. In de laatste decennia blijkt daarin verbetering te zijn gekomen, getuige de meer uitgebreide analoge weergave van de 08-uur watertemperaturen (fig. 17). Toch zijn in de winter 1996/1997 wederom geen watertemperaturen in het betreffende IJverslag te vinden omdat het RIZA waterkwaliteit meetstation te Lith is opgeheven. Er kon gelukkig van de opgetekende waarnemingen van het sluispersoneel te Lith gebruik worden gemaakt. Dat de kwaliteit van de watertemperatuur waarnemingen in het verre verleden minder was blijkt uit een opmerking in het door Rijkswaterstaat (den Haag) uitgegeven "Tienjarig Overzicht 1961-1970" der waterhoogten, afvoeren en watertemperaturen. Op pagina 339 van dit Overzicht wordt melding gemaakt van het feit, dat *"tijdens strenge vorst de fout in de watertemperatuur relatief groot kan zijn. Dit verklaart, dat in de periode vóór 1961 watertemperaturen zijn gemeten, die lager liggen dan wat natuurkundig gezien mogelijk is. De mogelijk laagste temperaturen zijn voor de grote rivieren bij relatief zeer grote vervuiling -0,2 ° C. In verband hiermee zijn voor de periode 1961-1970 de aan de stations van de grote rivieren gemeten watertemperaturen lager dan 0 ° C afgerond op 0 ° C"* (einde citaat). Helaas schijnt de waarnemingssituatie van vóór 1961 weer terug te komen, gezien de ervaringen in de reeds genoemde winter van 1996/1997.

Aandacht dient te worden geschonken aan de invloed van de in de loop der jaren opgetreden warmtelozingen als gevolg van de exploitatie van electriciteitcentrales en in mindere mate van industrieën. Voor de Maas zijn de koelwatercentrales van Maasbracht en Buggenum (Roermond) van belang voor de middenloop van de Nederlandse Maas. Bij Lith wordt de invloed van centrales en industrieën alsmede van diffuse warmte lozingen (beken e.d.) voorshands nihil geacht, maar nader onderzoek moet dit nog bevestigen.

In tabel 9 worden vanaf 1940 de winters vermeld, waarin één of meerdere belangrijke vorstperioden zijn voorgekomen. Fig. 23 geeft daarvan een indruk. Er wordt van een vorstperiode gesproken, indien de etmaalgemiddelde luchttemperatuur van minstens vijf aaneengesloten dagen dagelijks minder dan nul graden Celsius bedraagt. In lange vorstperioden van minstens drie weken mag er een onderbreking zijn in die zin, dat de etmaaltemperatuur gedurende maximaal zeven dagen achtereenvolgens tussen nul en vijf graden ligt of ook, indien gedurende maximaal drie aaneengesloten dagen de etmaaltemperatuur gelijk of hoger is dan vijf graden, maar minder dan tien graden.

Onder deze condities worden de temperaturen boven nul graden gerekend tot de vorstperiode te behoren. Overigens kwamen deze gevallen in het onderzoek slechts bij uitzondering voor en leidden dan niet tot een dubieuze interpretatie. Er kan dan ook algemeen gesteld worden, dat in de onderzochte vorstperioden de gemiddelde etmaal luchttemperaturen onder 0°C blijven. Derhalve bestaat de "vorstperiode karakteristiek" in tabel 9 uit een getal, dat de som vormt van alle gemiddelde etmaal luchttemperaturen beneden het vriespunt. Naast dit getal wordt het aantal dagen vermeld, waarin deze som bereikt is (voorbeeld winter 1939/1940 \Rightarrow -260/69) waaruit volgt, dat de gemiddelde luchttemperatuur over de periode van 69 dagen $-260 : 69 = -3,8^{\circ}\text{C}$ is. De vorstperioden zijn langer dan de "geopende stuw" perioden. Er zijn ook perioden met hetzij geringe vorst hetzij zeer kort, zonder dat de stuw geopend hoeft te worden.

In de periode tussen het strijken (openen) van de stuw en het weer zetten (sluiten) van de stuw stelt zich, afhankelijk van de afvoer, het ongestuwde rivierverschiet in, soms gestoord door ijsschelden e.d.

In verband met het maken van prognoses inzake het weer bevaarbaar worden van de rivier ná de vorstperiode, is het van belang om de duur van het opvullen van de stuwpannen en ontgrindingsplassen te kennen. De opvullingsduur is uiteraard afhankelijk van de afvoer na iedere vorstperiode. De basisgegevens daarvoor zijn eveneens vermeld in tabel 9. Met behulp van [25] kunnen hieruit vulscenario's worden ontwikkeld.

3.3 Voorspelling van de watertemperatuur bij Lith

In vroeger tijden was er aan ijsvoorspelling en aan prognoses van lage Maaswater temperaturen geen behoefte. Er werd gevaren totdat het schip strandde in het ijs en daarin bleef het vervolgens wekenlang steken.

De incidentele metingen van watertemperaturen berustten niet op een vooraf opgezet meetplan. Na verloop van tijd zijn de opvattingen daarover evenwel gewijzigd en zo kon tijdens de ijswinters van de 80-er en 90-er jaren over continue registraties dan wel regelmatige waarnemingen o.m. te Lith worden beschikt. Zoals aan de hoogwater voorspelling in de loop der tijden hogere eisen worden gesteld, zo is vooral in de laatste decennia vanuit de beroeps- en recreatievaart de wens geuit om minstens twee dagen tevoren op de hoogte te worden gebracht van voorgenomen stuwmaatregelen als gevolg van een grote dreiging tot ijsvorming. Door een zo vroeg mogelijke waarschuwing met betrekking tot het uitvoeren van een bijzonder waterbeheer kunnen belanghebbenden maatregelen nemen, die de materiële schade, als gevolg van grote veranderingen in de vaarpeilen, zoveel mogelijk beperken.

Om tot een waarschuwingssysteem te komen voor ijstoestanden worden enkele methoden onderzocht. Bij een gegeven voorspelling van de luchttemperatuur, zijn er empirische⁵- en fysische benaderingen denkbaar.

⁵ berustend op gemeten water- en luchttemperaturen

a) de empirische benadering : $T_{wj} = \sum a_i T_{l(j-i)} + b$

i van 0 tot n ; T_{wj} watertemperatuur op dag j ;

a_i empirisch te bepalen coëfficiënten ;

T_l luchttemperatuur ; b een konstante

Dus de watertemperatuur op zekere dag hangt af van de luchttemperatuur van de voorafgaande dagen.

Ter bepaling van a en b zijn de reeksen gebruikt van dagelijkse waarnemingen van lucht- en watertemperatuur tijdens vorst in de winters van 84/85 (twee perioden), 86/87 (twee perioden) en 96/97 (één periode).

Afhankelijk van het aantal waarnemingen per periode zijn er een aantal vergelijkingen a) met evenzoveel onbekenden a_i opgelost met behulp van determinanten. De resultaten worden hierna weergegeven.

Periode	aant. waarnemingen	T_l gemiddeld	T_w minimaal	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	A 10
84/85 I	12	-6,6	0,0	0,043	0,053	0,067	0,098	0,119	0,091	0,055	-0,021	0,070	0,032	0,129
84/85 II	14	-4,3	1,3	0,4	-0,5	1,9	-4,5	10,5	-23	53	-122,3	282,9	-654,2	1515,1
86/87 I	7	-8,7	0,0	0,025	0,050	0,044	0,041	0,103	0,096					
86/87 II	8	-2,8	3,0	0,20	0,60	1,00	-0,30	-8,1	-25,7	-33	64,6			
96/97	16	-5,63	0,0	0,025	0,063	0,050	0,047	0,017	0,016	0,024	0,048	0,058	0,067	0,083

*

**

*vanaf $T_l = 0^\circ\text{C}$ en lager, tot $T_w = 0,5^\circ\text{C}$ (of minimaal), zie tabel 10 t/m 12

**over het aantal waarnemingen, zoals gegeven in kolom 2

Te zien is, dat de waarden van a_i per periode kolomsgewijs nogal uiteenlopen, vooral ten aanzien van de gearceerde rijen. Dit zijn ook de perioden, waarvoor de minimale watertemperatuur relatief veel boven $0,5^\circ\text{C}$ ligt en de gemiddelde luchttemperatuur T_l niet erg laag te noemen is. In die perioden hoefden de stuwen dan ook niet geopend te worden. Voor de bepaling van de gemiddelde a_i waarden over de vorstperioden zijn de gegevens van de perioden 84/85 II en 86/87 II buiten beschouwing gelaten.

De berekende gemiddelde a_i waarden over de andere vorstperioden te weten 84/85 I, 86/87 I en 96/97 zijn :

$a_0 = 0,031$; $a_1 = 0,055$; $a_2 = 0,054$; $a_3 = 0,062$; $a_4 = 0,080$; $a_5 = 0,068$; $a_6 = 0,040$;
 $a_7 = 0,014$; $a_8 = 0,064$; $a_9 = 0,050$; $a_{10} = 0,106$.

Voor genoemde drie reeksen werden de watertemperaturen berekend en getoetst aan de waargenomen watertemperaturen. De resultaten zijn te vinden in tabel 13. Voor de meetreeks van bijvoorbeeld 84/85 I, (tabel 10), geldt nu, dat $T_{w1} = a_0 T_{l1} + b$ en dus $b = 5,1$ en de berekende watertemperatuur op dag 5 is :

$$T_{w5} = a_0 T_{l5} + a_1 T_{l4} + a_2 T_{l3} + a_3 T_{l2} + a_4 T_{l1} + b =$$

$$(-11 \cdot 0,031) + (-7 \cdot 0,055) + (-10 \cdot 0,054) + (-7 \cdot 0,062) + (-0 \cdot 0,080) + 5,1 = 3,4^\circ\text{C}$$

terwijl op dag 5 de waargenomen watertemperatuur $2,9^\circ\text{C}$ bedraagt.

Het resultaat van de toetsingen in tabel 13a laat zien dat de gemiddelde verschillen tussen waarnemingen en berekeningen in de drie perioden variëren van 0,1 tot 0,6 °C, met voor de eerste periode van 84/85 twee dagelijkse uitschieters tot ca. 1 °C en dat is te onnauwkeurig voor de voorspelling van de watertemperatuur van 0,5 °C, hoewel de twee overige perioden nog niet zo slecht zijn.

b) de fysische benadering : $h (\Delta T_w / \Delta t) = k (T_w - T_l)$,

waar k (m/s) de warmte uitwisselingscoëfficiënt is en h de waterdiepte.

De formule is gebaseerd op de warmte balans voor een rivier segment.

De verschillen tussen de waargenomen- en berekende watertemperaturen blijken zo groot te zijn, namelijk 1 à 2 °C, dat op deze methode (in eerste instantie) niet verder wordt ingegaan. Denkelijk, dat de grote verschillen ontstaan doordat de fysische omstandigheden nabij de stuw van Lith moeilijk te beschrijven zijn, en dat geldt algemeen nabij stuwen. We hebben ondermeer van doen met grote verschillen in waterdiepte h bovenstrooms en benedenstrooms van de stuw en mede daardoor erg turbulent water in de omgeving van deze kunstwerken. Dit beïnvloedt de beluchting.

Zoals in het voorgaande is getracht om, gebruik makend van de empirie en van fysische achtergronden, een voorspellingsmodel voor de watertemperatuur te Lith te ontwikkelen, wordt in het volgende onderzocht in hoeverre met andere methoden, waarbij de empirie bruikbaar is, een voorspelling van de watertemperatuur kan worden afgeleid.

Aanvullende methoden, toegepast op gemeten water- en luchttemperaturen:

Methode 1

Aan de hand van de dagelijks geregistreerde water- en luchttemperaturen tijdens de vorstperioden in de winters van 1984/1985 ; 1986/1987 en 1996/1997 zal worden getracht een relatie te vinden tussen de watertemperatuur en de luchttemperatuur :

$$T(w_{+x}) = a \cdot T(l) + b$$

Hierbij worden, in vergelijking met **a)**, niet alle voorgaande dagen beschouwd, doch de watertemperatuur van de dag die de beste correlatie heeft met de luchttemperatuur. Er doen zich hierbij twee feiten voor, waardoor gelijktijdige vergelijking van lucht- en watertemperaturen niet erg zinvol is, te weten :

- 1) De watertemperatuur neemt niet meteen de luchttemperatuur aan.
- 2) In tegenstelling tot de watertemperatuur varieert de luchttemperatuur van dag tot dag i.h.a. zeer sterk.

Om de naijling van de watertemperatuur ten opzichte van de luchttemperatuur te onderzoeken is voor de eerder genoemde vorstperioden bepaald hoe de temperaturen van dag tot dag verlopen. In fig.17 is dit te zien. Door te schuiven met de waarden van de watertemperatuur kan de beste correlatie tussen de minimale luchttemperatuur en de minimale watertemperatuur worden gevonden. Dit leidt tot een indicatie van het naijlen van de watertemperatuur. Dat de correlatie "matig" is en dus slechts indicatief te achten, is te wijten aan de grote spreiding in de dagwaarden van de luchttemperatuur. De resultaten van de beste relatie, te weten tussen $T(w_{+3})$ en $T(l)$ zijn samengevat in tabel 14. Door de vertraagde aanpassing van de watertemperatuur bij wijzigingen van de luchttemperatuur bleek uit het voorgaande,

dat de "minst slechte" relatie tussen beide wordt bereikt door verschuiving van de watertemperatuur over een periode van 3 dagen. De eerste periode 86/87 heeft de beste correlatie tussen $T(w+3)$ en $T(l)$

Indien de dagwaarden van $T(l)$ en $T(w+3)$ worden gemiddeld over een langere periode, dan ontstaat er een goede lineaire relatie tussen beide temperaturen nl. :

$$T(w+3) = 0,64 T(l) + 5,28 \text{ met } R^2 = 0,88 \dots \dots \dots (\text{tabel 14})$$

Maar, dit zegt nog weinig over de dagelijkse samenhang van $T(w+3)$ en $T(l)$, zoals de formules (1) t/m (5) van tabel 14 laten zien. Vandaar, dat deze methode wordt verworpen.

Methode 2

Het gepiekte beeld van het gedrag van de dagelijkse luchttemperatuur nodigt uit om, voor het min of meer gladstrijken daarvan, een voortschrijdend gemiddelde te kiezen. Op grond van het voorgaande bestaat de voorkeur om daarvoor in eerste instantie het drie-daags voortschrijdend gemiddelde $[T(l)3dvg]$ te hanteren.

Volledigheidshalve is ook nog het één-daags en het vijf-daags voortschrijdend gemiddelde $[T(l)]$ resp. $T(l)5dvg$] onderzocht en gebleken is, dat het driedaags voortschrijdend gemiddelde $[T(l)3dvg]$ inderdaad de minst slechte lineaire relatie is. De relatie:

$$dT(w)/dt = \alpha [T(l)3dvg - T(w)] + \beta \cdot *$$

geeft slechte R^2 waarden van 0,21; 0,43 en 0,01 voor resp. de ijswinters 84/85; 86/87 en 96/97, zodat deze methode 2 moet worden verworpen.

Methode 3

In fig. 18 zijn in de vorm van vijfdegraads polynomen de verlopen in beeld gebracht van het driedaags voortschrijdend gemiddelde van de luchttemperatuur $[T(l)3dvg]$, alsmede de watertemperatuur $[T(w)]$ en de daggradiënt van de watertemperatuur $[dT(w)/dt]$ en wel van twee ijsperiodes in de winter van 84/85, twee vorstperiodes in de winter van 86/87 en de vorstperiode van de winter 96/97.

De tweedegraads polynoom door de relatie $[T(l)3dvg - T(w)]$ en $dT(w)/dt$ voor de dalende watertemperaturen lijkt de beste perspectieven te bieden voor de indicatie van de daggradiënt van de watertemperatuur. Voor de eerste ijsperiode van 1984/1985 wordt dit in beeld gebracht in fig. 18b, onderste plaatje.

- Voor de andere perioden ware dit eveneens nader uit te werken.
- Een tweede aanbeveling is om voor de verschillende ijsperiodes de aan het water onttrokken warmte $\Sigma [T(w) - T(l)]dt$ uit fig. 17 te relateren aan de watertemperatuur $T(w)$ en te onderzoeken of hiertussen een verband bestaat.

In afwachting van nader onderzoek wordt, op basis van de resultaten voor de eerste vorstperiode van 84/85, deze methode voorshands niet verworpen.

* Hierbij wordt de eerste waarde van $T(l)3dvg$ gekoppeld aan dag 3, de eerste waarde van $T(l)5dvg$ aan dag 5, de eerste waarde van $T(l)$ en $T(w)$ aan dag 1 en de eerste waarde van $dT(w)/dt$ aan dag 2. De gegevens zijn vermeld in de grijze arcering van de tabellen 10 t/m 12.

Methode 4

Het verloop van de in methode 3 vermelde temperaturen volgens fig. 18 leidt tot een manier om de watertemperaturen te voorspellen.

Door namelijk bij elke figuur voor $T(w) = 4; 3; 2; 1; 0,5$ °C de overeenkomstige vereffende $T(l)3dvg$ - en de vereffende $dT(w)/dt$ waarde af te lezen (dat zijn dus de polynoomwaarden) ontstaat tabel 15, waaruit de terugloop van de watertemperaturen in combinatie met de luchttemperaturen blijkt. Een toelichting daarbij wordt gegeven in de tabel. De tabel is verbeeld in fig. 19, met behulp waarvan de duur van de verlaging van de watertemperatuur vanaf 4 °C voorspelbaar is, mits de luchttemperatuur, voor een aantal dagen vooruit, bekend is. We zien, dat de relaties in fig. 19 een redelijke tot goede samenhang vertonen nl. $0,72 < R^2 < 0,92$ maar ook dat het aantal meetreeksen beperkt is.

Als voorbeeld volgt hierna de inschatting van de terugloop van de watertemperatuur als gevolg van een fictieve vorstperiode:

Nadat de gemiddelde dagtemperatuur van de lucht eergister en gister 0 resp. -8 °C is geweest voorspelt het KNMI voor heden (dagnr.1) en de komende dagen gemiddelde dagtemperaturen van -12 ; -10 ; -14 ; -10 ; -7 en -7 °C. Op dagnr.1 is de watertemperatuur te Lith om 08-uur, 4 °C.

Gevraagd wordt de prognose voor de watertemperatuur op de volgende dagen.

In onderstaand overzicht worden de voorspellingen van de watertemperatuur verder uitgewerkt.

dagnummer	T(l) in °C	T(l)3dvg	gem T(l)3dvg	T(w) in °C	bereikt op dag
	0				
	-8				
1	-12	-6,7	dgn.	4	1 (gegeven)
2	-10	-10	-8,4 (1+2)	3	1,8
3	-14	-12	-11 (2+3)	2	2,5
4	-10	-11,3	-11,7 (3+4)	1	3,4
5	-7	-10,3	-10,8 (4+5)	0,5	4,4

Van 4 °C naar 3 °C

$T(l)3dvg$ is $(0-8-12)/3 = -6,7$ etc.

Voor dag 1 naar dag 2 is de gem. $T(l)3dvg$, $(-6,7-10)/2 = -8,4$. Volgens figuur 19 behoort hierbij een terugloopduur van 0,8 dag. De 3 °C wordt dus op dag 1,8 bereikt.

Van 3 °C naar 2 °C

Van dag 2 naar dag 3 is gem $T(l)3dvg$ $(-10-12)/2 = -11$. Volgens figuur 19 behoort hierbij een terugloopduur van 0,7 dag. De 2 °C wordt dus op dag 2,5 bereikt.

Van 2 °C naar 1 °C

Van dag 3 naar dag 4 is gem $T(l)3dvg$ $(-12-11,3)/2 = -11,7$ Volgens figuur 19 behoort hierbij een terugloopduur van 0,9 dag. De 1 °C wordt dus op dag 3,4 bereikt.

Van 1 °C naar 0,5 °C

Van dag 4 naar dag 5 is gem $T(l)3dvg$ $(-11,3-10,3)/2 = -10,8$. Volgens figuur 19 behoort hierbij een terugloopduur van 1,0 dag. De 0,5 °C wordt dus op dag 4,4 bereikt.

In dit voorbeeld verschilt de luchttemperatuur van dag tot dag weinig, zo ook de gem. $T(l)3dvg$, waardoor de dagelijkse watertemperatuur voor alle plaatjes van fig.19, in dit geval, met ca. 0,9 °C terugzakt, nl. achtereenvolgens 0,8; 0,7; 0,9 en 1,0

Dus circa 3½ dag nadat op dag 1 om 08-uur de 4°C is bereikt zal, onder deze (geprognostiseerde) luchttemperaturen, de watertemperatuur dalen van 4°C naar 0,5°C en zal er derhalve 3 dagen tevoren kunnen worden gewaarschuwd voor het openen van de stuw, waarvoor het criterium voor de watertemperatuur 0,5°C is. Door vereffende waarden te gebruiken van de voorspelde luchttemperaturen kan de tijd en de daarbij behorende watertemperatuur nog nauwkeuriger worden voorspeld.

Als de eerste vorstperioden van de winters 84/85 ; 86/87 en de vorstperiode van de winter 96/97 volgens bovenstaand voorbeeld getoetst worden aan de waargenomen watertemperaturen, dan zien we in tabel 13b hun verschillen in dagen en in temperatuur. In het gegeven voorbeeld van deze tabel is bovendien uitgelegd hoe het verschil in de watertemperatuur is berekend.

De dagelijkse 08-uur waarnemingen zijn tot in tiende graden ontleend aan de tabellen 10 t/m 12 (grijze arcering). Bij de waargenomen terugloop van bijvoorbeeld 3,8 °C naar 2,9 °C (tabel 10, winter 84/85) wordt voor de berekening gebruik gemaakt van de terugloop in de categorie van 4- naar 3 graden volgens tabel 15.

Samenvatting van 3.3

Er worden 6 methoden onderzocht om tot een voorspelling te komen van de watertemperatuur te Lith tijdens perioden van vorst.

Er is uitgegaan van twee principes namelijk:

a), het empirische principe, waarbij het (lineaire) verband wordt gelegd tussen de watertemperatuur op een bepaalde dag en de luchttemperatuur op de voorafgaande dagen. De toetsingsresultaten ervan zijn vermeld in tabel 13a. Het voorspellingsresultaat is tamelijk onnauwkeurig, om daarmee een watertemperatuur van 0,5 °C goed te kunnen voorspellen, omdat incidenteel afwijkingen t.a.v. de waargenomen temperaturen ontstaan tot ca. 1 °C.

b), het fysische principe, gebaseerd op de warmtebalans voor een riviertraject leidt tot te grote verschillen van 1 °C tot 2 °C tussen voorspelde- en waargenomen watertemperaturen, waarschijnlijk als gevolg van ongelijke waterdiepten boven- en benedenstrooms van de stuw, waardoor de toch al turbulente waterbeweging rond de stuw wordt versterkt en de beluchting, derhalve ook windinvloed, een belangrijke rol gaat spelen bij de plaatselijke afkoeling van het water.

Vervolgens is vanuit de empirie verder geëxperimenteerd om een voorspellingsalgorithme voor de watertemperatuur te Lith te ontwikkelen. Daartoe zijn een viertal methoden onderzocht, te weten **methode 1**, de lineaire relatie:

$$T(w_{+x}) = a \cdot T(l) + b$$

Gebleken is (fig.17), dat de watertemperatuur vertraagd reageert op wijzigingen in de luchttemperatuur en dat een acceptabele lineaire relatie tussen de lucht- en de drie dagen naijlende watertemperatuur slechts geldt voor de gemiddelden over langere perioden (fig.17). Indien van dag tot dag met de meest gunstige verschuiving van de watertemperatuur wordt gerekend van drie dagen, dan zijn de lineaire correlatiecoëfficiënten toch nog onder de maat (tabel 14). Dit ligt mede aan het instabiele gedrag van de dagelijkse luchttemperatuur. Deze methode wordt verworpen.

Vervolgens is in **methode 2** uitgegaan van het verschil tussen de watertemperatuur en een voortschrijdend gemiddelde van de luchttemperatuur en deze is vergeleken met de daggradiënt van de watertemperatuur, dus :

$$dT(w)/dt = \alpha [T(l) \times dvg - T(w)] + \beta.$$

Een voortschrijdend gemiddelde van 3 dagen, dus $[T(l)3dvg]$ geeft de minst slechte relatie tussen de $dT(w)/dt$ en $[T(l)3dvg - T(w)]$, maar is, evenals methode 1 toch ook nog onbevredigend en wordt verworpen.

Door toepassing van **methode 3**, die slechts verschilt van de tweede doordat gebruik wordt gemaakt van de vereffende waarden van de meetgegevens $T(l) 3dvg$ en $T(w)$ (zie vijfdegraads polynomen van de fig. 18a en 18b) inplaats van pure meetwaarden, is er sprake van een verbetering. Voor de eerste vorstperiode 1984/1985 geeft fig. 18b als beste relatie de tweedegraads polynoom. Voor de andere perioden waren deze relaties eveneens in beeld te brengen om te zien of hieruit een voldoende nauwkeurig voorspellingsmodel kan worden gevonden. De methode is niet verder uitgewerkt, hoewel dit de moeite waard lijkt op grond van de resultaten met de eerste vorstperiode van 84/85 (fig. 18b).

Er is een 4^{de} **methode** toegepast, eveneens uitgaande van de polynomen door de punten van het dagelijkse verloop van $[T(l)3dvg]$ en $[T(w)]$, (fig. 18). De methode gaat dan niet uit van de dagelijkse gradiënt van de watertemperatuur, maar onderzocht wordt hoe lang het duurt voordat een temperatuurverlaging van één graad Celsius wordt gerealiseerd, beginnend bij 4 °C.

De lineaire relaties van figuur 19, die worden gevonden door de duur van de verlaging met 1°C van de watertemperatuur te relateren aan de over die duur gemiddelde $T(l)3dvg$ uit fig. 18, zijn zodanig ($0,72 < R^2 < 0,92$) dat daarmee de watertemperaturen te Lith met een aantal dagen zichttijd kunnen worden voorspeld, ervan uitgaande dat de luchttemperaturen zijn geprognostiseerd. Uit tabel 13b blijkt, dat geacht mag worden dat de voorspelling van de watertemperatuur 0,3 à 0,4 °C kan afwijken van de dagelijkse waarneming.

Opmerking:

Als in tijden van vorst de watertemperatuurvoorspelling van Lith volgens het principe a), waarvan de resultaten in tabel 13a zijn opgenomen, wordt vergeleken met methode 4, waarvan de resultaten in tabel 13b zijn opgenomen, dan zien we in tabel 16, dat de absolute verschillen met de waargenomen watertemperaturen voor methode 4 kleiner zijn. In de bijlage van deze tabel wordt e.e.a. duidelijk zichtbaar. Of de verschillen in methoden ook significant zijn wordt aangetoond met de t-toets van Student voor verschillen. Als voorbeeld worden hierna de absolute verschillen ten opzichte van de gemeten watertemperaturen uit de vorstperiode van 84/85 getoetst.

Bij 3,8 °C is het absolute verschil met de waargenomen temperatuur 0,2 °C (tabel 16, II-III) en 0,0 °C (tabel 16, II-IV) etc. Voor de berekeningswijze wordt verwezen naar [10], pag. 166.

We krijgen :

	a) methode 4	v	v ²
bij 3,8 °C	0,2.....0,0	0,2	0,04
bij 2,9	0,5.....0,1	0,4	0,16
bij 1,8	0,8.....0,2	0,6	0,36
bij 1,1	1,0.....0,5	0,5	0,25
bij 0,5	0,4.....0,2	0,2	0,04

$$\Sigma v = 1,9 \quad m_v = 1,9/5 = 0,38 \quad \Sigma v^2 = 0,85$$

$$s_v = [\Sigma v^2/4 - (\Sigma v)^2/4*5]^{1/2} = 0,18$$

$t = m_v \sqrt{5} / s_v = 4,72$ met $n-1=4$ vrijheidsgraden, terwijl $t_{krit, 4} = 2,78$ (t-tabel, 2½% eenzijdig).

Bij 2½% eenzijdig toetsen geven beide methoden, te weten methode a) en methode 4, derhalve significant verschillende resultaten voor de vorstperiode van 84/85.

Op analoge wijze zijn de vorstperioden van 86/87 en van 96/97 getoetst en gevonden werd, dat beide methoden geen significant verschillende voorspellingsresultaten opleveren als wordt getoetst aan de waarnemingen. De aan tabel 16 toegevoegde bijlage laat dit ook zien.

Omdat de verschillen met de waarnemingen iets kleiner zijn volgens methode 4, wordt deze laatste aanbevolen.

3.4 Het vullen van de Nederlandse stuwpanden na een vorstperiode

De afvoer die optreedt bij het intreden van de dooi is van belang voor de voorspelling van de vultijd van de Maaspanden. Een lage afvoer is slecht voor het spoedig op gang komen van de scheepvaart. Afhankelijk van de hoeveelheid regen en de sneeuws melt in het stroomgebied is het echter ook mogelijk, dat er een overvloed aan water beschikbaar komt en er derhalve na de vorstperiode een hoogwater optreedt, hetgeen eveneens slecht is voor het op gang komen van de scheepvaart. Dit laatste is in de 20 vorstperioden, tussen 1940 en 2000, zes maal voorgekomen te weten na de vorstperioden met volgnummers 3, 5, 7, 10, 12 en 18 (zie tabel 17).

Voor de opvulling van de stuwpanden en aangrenzende havens en ontgrindingen zijn de gegevens ontleend aan literatuur [25]. Daaruit is de "Vultijd-kromme" van figuur 20 ontstaan. Daarin wordt, bij gegeven afvoer, de vultijd bepaald van de Maaspanden, inclusief aangrenzend water. De aanvulling begint vanaf de bij de afvoer behorende "natuurlijke verhanglijn", d.i. de verhanglijn van de vrij afstromende rivier aan het einde van de vorstperiode, waarbij niet van opstuwing als gevolg van ijs wordt uitgegaan. Bij verhoging / verlaging van de afvoer tijdens de dooi zal de aanvulling sneller / trager gaan. Een en ander is verwerkt in tabel 17, waarvan de verschillen tussen de kolommen (3) en (5) blijken geven.

Het op peil brengen van de Maaspanden geschiedt vanaf benedenstrooms. De stuw van Lith wordt daarbij nagenoeg geheel gesloten, alleen de voor het Beneden-Rivieren gebied noodzakelijke waterbehoefte (ca. 25 m³/s) wordt doorgelaten. Afhankelijk van de voortgang van het proces van het op peil brengen van de achtereenvolgende Maaspanden, kunnen de overige stuwen geleidelijk worden gesloten.

De benodigde vultijden voor het gebied tussen Lith en Eijsden (200 kilometer), zoals in tabel 17 aangegeven, zijn enigszins onderschat te achten. Dit komt, omdat is gebleken dat tijdens de vulling aan allerlei randvoorwaarden moet worden voldaan,

zoals eerst gedeeltelijke opvulling van een stuwpand i.v.m. het geleidelijk losgeraken van ijs en het transporteren ervan alsook het langzaam doen losraken van vastgevroren woonboten, steigers etc. Deze zaken kunnen het snelle op peil brengen van de Maas frustreren, ondanks voldoende wateraanbod*. Op grond van de ervaringen met de laatste ijswinters is een verlenging van de (theoretische) vultijden met ca. 35% reëel te achten. Daarmee is in fig.20 rekening gehouden. In figuur 20 is te zien, dat voor 50% van de ijswinters, na het invallen van de dooi, de Maas in circa één dag weer gevuld is en dat dit voor de overige 50% van de ijswinters vrijwel altijd binnen twee weken het geval is.

3.5 Het genereren van watertemperaturen voor de vorstperioden tussen 1940 en 1980

De kwaliteit van het waarnemen van de watertemperatuur tijdens vorstperioden is in de jaren vóór 1984 gebrekkig te noemen, zowel technisch als planmatig. Dit wordt in de literatuur onderkend [literatuur 24, pag. 339 van deel 1961-1970].

Voor de analyse van vroegere watertemperaturen (periode 1936 tot 1984) waren slechts enkele waarnemingen van lucht- en watertemperaturen beschikbaar waarvan de meeste uit de winter van 1939/1940. Hieruit is de relatie gevormd, die luidt :

$T(w)=0,08T(l)+0,156$ met de helaas slechte correlatiecoëfficiënt $R=0,5$.

Zo ontstonden in eerste instantie de dagelijkse indicatieve lage watertemperaturen voor de periode vóór 1984. Een andere indicatie van de vroeger opgetreden watertemperatuur tijdens vorst wordt verkregen door uit te gaan van de wél dagelijks verrichte watertemperatuur waarnemingen tijdens vorstperioden uit de laatste twee decennia van de 20-ste eeuw en hieruit die van vroeger te reconstrueren. Hiertoe volgt onderstaand een toelichting.

Eerder bleek (tabel 14), dat als gevolg van naijling van de watertemperatuur, de maximale lineaire correlatiecoëfficiënt R van de temperatuur van lucht en water wordt verkregen door de methode toe te passen van verschuiving van de watertemperatuur ten opzichte van de luchttemperatuur over de tijd van 3 dagen.

De methode lijkt praktisch het maximaal haalbare om de dagelijkse watertemperatuur tijdens vorst uit vroegere perioden met enige indicatieve waarde te kunnen genereren.

In de fig. 21 wordt het beeld getoond van de verschoven waargenomen watertemperatuur $T(w+3)$ uit de tabellen 10 t/m 12. Door de waargenomen temperaturen is de tweedegraads polynoom getekend. De berekende watertemperaturen, $T(w+3)$, volgen uit de betreffende regressielijnen van tabel 14. Hierdoor is eveneens de tweedegraads polynoom getekend. In figuur 21a, vertonen de waargenomen reeks en de berekende reeks van watertemperaturen significante verschillen voor de eerste vorstperiode 84/85. Dat blijkt ook uit $R^2=0,31$ (tabel 14)

* Dit geldt trouwens ook voor het laten dalen van de waterstanden bij het openen van de stuwen aan het begin van een vorstperiode : niet te snelle dalingen (max. 0,25m/h) in verband met de stabiliteit van de oevers.

en wordt mede bevestigd door de variantie coëfficiënt van beide, te weten $F=(1,3/0,7)^2 = 3,45$ terwijl voor gegeven vrijheidsgraden (15x15) de kritieke waarde voor een 2½ % eenzijdige overschrijdingskans geldt $F_k=2,86$.

Daar $F > F_k$ betekent dit, dat met behulp van de gegevens uit de eerste vorstperiode van 1984/1985 geen goede watertemperaturen kunnen worden gegenereerd. Voor de tweede periode (fig.21a) geldt, dat $F=2,30$ en voor de kritieke waarde geldt $F_k=3,72$. Deze reeksen van waargenomen- en berekende watertemperaturen kunnen dus als gelijkwaardig worden beschouwd. Derhalve is de tweede periode van de winter 1984/1985 wél te gebruiken voor het genereren van niet gemeten watertemperaturen uit het verre verleden.

Hierna wordt een overzicht gegeven van de F-waarden en de F_k -waarden:

Figuur	F	$F_{kritiek}$	Voldoet, ja/nee
21 a	3,45	2,86	Nee
21 a	2,30	3,72	Ja
21 a	1,29	3,72	Ja
21 b	1,94	4,76	Ja
21 b	2,30	2,46	Ja

De conclusie is, dat alleen de eerste vorstperiode 84/85 onvoldoende mogelijkheid biedt voor het genereren van $T(w+3)$ -waarden uit $T(l)$ -waarden en dat derhalve formule (1) van tabel 14 zeker niet bruikbaar is.

Bij het kiezen van één der overige formules (2 t/m 5) van tabel 14 wordt, voor een betreffende vroegere periode, gekeken naar de grootste overeenkomst tussen de gemiddelde luchttemperatuur van vroeger en de gemiddelde luchttemperatuur uit één der perioden (2) t/m (5).

- De vraag of er te Lith van homogeniteit kan worden gesproken in de reeks van watertemperaturen van vroeger met die van de laatste twee decades, moet nader onderzocht worden.

In feite zou de methode van bepaling van de watertemperatuur voor vroegere tijden betrouwbaarder zijn, indien dit zou geschieden met behulp van **methode 4**, zoals is beschreven in 3.3. Aangezien er echter nauwelijks aanknopingspunten zijn vanwege het nagenoeg ontbreken van waargenomen watertemperaturen in vroeger tijden, ontbreken ook de uitgangspunten voor de berekeningen, te weten $T(l)=0\text{ °C}$ voor de bepaling van de faktor b, alsook de dag waarop $T(w)=4\text{ °C}$. Daarom is de in de aanvang van deze paragraaf gehanteerde evaluatie de minst slechte en de eenvoudigste benadering voor vroegere (1936-1984) watertemperaturen tijdens vorstperioden. Daarbij wordt dus de watertemperatuur ten opzichte van de luchttemperatuur over de tijd van 3 dagen verschoven en de relaties gelegd volgens een der formules uit tabel 14, al naar gelang de overeenkomst met de luchttemperatuur.

De omschreven benaderingswijze voor het genereren van de dagelijkse watertemperaturen van de vroegere winters (1936-1984) houdt niet in, dat de dagelijkse waarden erg betrouwbaar zijn te reproduceren.

In verband met de voortzetting van het onderzoek naar de vorming- en de afsmelting van ijs op de rivier [26], kunnen de "gegenereerde" gegevens voor de vorstperioden

vóór 1984 van nut zijn, samen met de in de tabellen [27] vermelde gegevens over windkracht- en richting, stuw openen en -zetten, ijsvorming e.d.

3.6 Karakteristieken van vorstperioden

Ten behoeve van het waterbeleid vóór, tijdens en ná een vorstperiode is het gewenst om frequenties van vorstperioden, eventuele trends, alsmede lengten van vorstperioden en duren van de geopende stuw, verdeling van vorstkansen over de wintermaanden en afvoerkansen tijdens en na een vorstperiode te analyseren.

Het gemiddeld aantal vorstdagen per jaar, dat wil zeggen de dagen waarvan de gemiddelde dagtemperatuur te de Bilt kleiner is dan $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, bedraagt, over de periode 1940-2000, per jaar $500/60 = 8,3$ dagen, terwijl het aantal dagen per jaar, dat de stuw Lith is geopend geweest ten gevolge van ijs ruim de helft is te weten $277/60 = 4,6$ dagen (tabel 9). Dit geldt grosso modo ook voor de overige stuwen. Gemiddeld komt een vorstperiode- daartoe wordt een periode van minstens 5 dagen beschouwd- eens per 3 jaar voor, terwijl de periode, waarin de stuw geopend wordt vanwege ijs, of de dreiging daarvan, eens per 4 jaar voor komt.

In de 60-jarige periode 1940-2000 zijn er 20 vorstperioden met een gemiddelde luchttemperatuur van $-4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ geweest. Daarvan werd in 14 gevallen, met een gemiddelde temperatuur van $-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de stuw te Lith geopend. In de 6 overige vorstperioden, met een gemiddelde temperatuur van $-2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, behoeft de stuw niet geopend te worden.

Opvallend is, zoals uit tabel 9 blijkt, dat in het tijdvak 1940-1970 er 13 langdurige vorstperioden geweest zijn met een gemiddelde duur van 30 dagen tegen 7 kortstondige vorstperioden met een gemiddelde duur van circa 14 dagen in het tijdvak 1970-2000. De decade 1971-1980 ging zelfs voorbij zonder vorst van betekenis, evenals zonder hoogwater.

Er is geen significant verschil in de luchttemperatuur van de vorstperioden uit 1940-1970 en 1970-2000, terwijl de watertemperatuur te Lith in de eerste periode gemiddeld $0,7^{\circ}\text{C}$ hoger was. Het lijkt er op, dat die locatie buiten de invloedsfeer ligt van industriële warmtelozingen van de laatste 30 jaar.

Als reeds vroeg in de winter de stuw moet worden geopend wegens vorst, betekent dit niet, dat de winter streng zal worden, integendeel zoals figuur 24(a) toont. Bij een winterse situatie in december, die slechts weinig voor komt, is de duur dat de stuw geopend is slechts 3 à 7 dagen.

De langste duren komen voor, waar de begindatum van de opening van de stuw ligt tussen 30 à 60 dagen na 1 december, d.i. vanaf begin januari tot eind januari. De lengte van de periode met geopende stuw kan dan wel 40 à 50 dagen zijn en derhalve duren tot eind februari/begin maart.

Een laat begin van de winter (half februari) kan betekenen, dat de stuw tot de tweede week van maart geopend blijft, maar dit komt zelden voor.

De kans is het grootst, dat de vorstperiode ligt tussen half januari en begin februari, zoals figuur 24(b) toont.

Van de winters met geopende stuw is de duur van de situatie "open stuw" gemiddeld twee à drie weken. In figuur 25 (b) wordt de onderschrijdingskans van de duur van de geopende stuw getoond. De situatie "geopende stuw" te Lith- dat geldt in vrijwel gelijke mate voor de overige stuwen in de Nederlandse Maas, behoudens te Borgharen- ten gevolge van een vorstperiode, kan een vervolg krijgen, indien bij het invallen van de dooi de waterafvoer zo hoog oploopt, dat de stuw open moet blijven wegens hoogwater gevaar, d.i. in 30% van de keren het geval. Anderzijds kan de waterafvoer zodanig laag zijn, dat het geruime tijd kan duren, voordat de stuwpanen, na de vorstperiode, weer op het goede vaarpeil zijn.

In figuur 25 (a) worden naar aanleiding van tabel 17, kolommen (2) en (4), de kansverdelingen getoond van de gemiddelde afvoeren, welke de voorbije 60 jaren zijn voorgekomen tijdens de opgetreden vorstperioden, alsmede van de afvoeren welke na het invallen van de dooi optraden. In het algemeen zijn de afvoeren kort na de vorstperiode veel hoger dan tijdens de vorst, maar voor 20% is dat niet het geval. In dat geval is de afvoer echter weinig minder dan tijdens de vorst.

Het is merkwaardig, dat voor de vorstperioden in de loop der tijden een zekere regelmaat niet uit te sluiten is, terwijl het geopend zijn van de stuwen t.g.v. ijs(dreiging) zuiver toeval is (Poisson). Blijkbaar komt dit doordat het niet altijd nodig wordt gevonden om tijdens iedere vorstperiode de stuwen te openen, zoals dat bijvoorbeeld wél het geval is voor vorstperioden met gemiddelde luchttemperaturen van -3°C of lager.

3.7 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies:

1. In vroeger jaren zijn er vrijwel geen temperaturen van het Maaswater (te Lith) bepaald tijdens perioden met vorst. Het ontwikkelen van een voorspellingsmodel voor de dagelijkse watertemperatuur te Lith op basis van de gegevens van de vorstperioden vóór 1984 is dan ook niet mogelijk. Er is daartoe een andere (globale) benadering gekozen (3.5).
2. Een goede manier om in de toekomst lage watertemperaturen van het Maaswater te Lith te voorspellen wordt verkregen door uit te gaan van de KNMI-voorspellingen van de dagelijkse luchttemperaturen en deze te bewerken met behulp van methode 4, behandeld in 3.3. Een goede temperatuurregistratie is noodzakelijk.
3. Methode a) en methode 4 (beide uit 3.3) geven, m.u.v. 1984/1985, geen significant verschillende toetsingsresultaten als wordt getoetst aan de waarnemingen uit de vorstperioden van 84/85 ; 86/87 ; 96/97. Er is voorkeur voor methode 4 omdat de daarmee verkregen rekenresultaten de waarnemingen iets dichter benaderen. De toetsingsresultaten zijn samengevat in tabel 16 met bijlage.
4. Vorstperioden- per definitie met een lengte van minstens 5 aaneengesloten dagen, waarbij de dagelijkse daggemiddelde temperatuur beneden nul graden Celcius blijft- komen gemiddeld eens per 3 jaar voor. Het openen van stuwen ten gevolge van vorstperioden, die het functioneren van de stuwen in gevaar brengen, komt gemiddeld eens per 4 jaar voor. De nadelige gevolgen ervan voor

de scheepvaart en andere met de rivier verbonden activiteiten zijn groot.

Aanbevelingen:

1. Ter verificatie en verfijning van toekomstige voorspellingen van de watertemperatuur te Lith is het noodzakelijk, dat tijdens vorstperioden ter plaatse dagelijkse lucht- en watertemperaturen worden geregistreerd en opgeslagen. Bij voorkeur zou dit een analoge registratie moeten zijn om de resultaten van verschillende vorstperioden beter met elkaar te kunnen vergelijken. Dit geldt trouwens ook voor de overige stuwen.
2. Het huidige onderzoek heeft zich in voornamelijk toegespitst op potentiële ijstoestanden, die het in verband met de watertemperatuur, noodzakelijk maakten de stuwen, vooruitlopend op mogelijke ijsvorming, alvast te openen en waarvoor de locatie Lith toonaangevend is. De kritieke watertemperatuur ter plaatse is 0,5 °C.
In het vervolgonderzoek zal echter aandacht moeten worden besteed aan de concrete ijsvorming op de rivier, die in het Benedenrivieren gebied begint en zich vervolgens in bovenstroomse richting uitbreidt en mede afhankelijk is van de stroomsnelheden en de afvoeren. Omdat boven bepaalde afvoeren lokaal ook nog zonder stuwinvloed gevaren kan worden, eventueel met een beperkte diepgang, kan het zijn, dat in die gevallen niet de waterstand maar het aanwezig zijn van drijfs of vast ijs maatgevend wordt. Onderzoek naar de aangroei van de ijsbedekking is in het algemeen en zeker in die gevallen van belang.
3. In samenhang met punt 2 zal de invloed van opwarming van het rvierwater door koelwaterlozingen, die zich hoofdzakelijk in het Bovenmaas gebied bevinden, de aandacht vragen. Ook onderzoek naar de opwarming door diffuse bronnen is van belang.
4. Zoals de voorspelling van de ontwikkeling van het ijsdek van belang is, geldt dat ook voor de afbraak van het ijsdek. Voor deze onderzoeken kan ook gebruik gemaakt worden van de reeds verzamelde gegevens uit de perioden vóór 1984, waarvoor de watertemperaturen gegist zijn [27].
5. Het ontwerpen van optimale vulscenario's voor de stuwpannen en ontgrindingsplassen, afhankelijk van randvoorwaarden als afvoer, stijgsnelheid van het water, plaatselijke situaties in havens, ijstoestanden op de oevers etc. is van belang voor het weer op gang brengen van de scheepvaart.
6. Het is raadzaam om te onderzoeken of het loont om de grote ontgrindingsplassen afsluitbaar van de hoofdriever te maken, waardoor de vultijd van de panden aanzienlijk (met de helft) kan worden bekort.
7. In combinatie met punt 6 zou kunnen worden overwogen om deze ontgrindingsplassen ook te gebruiken als retentiebekkens voor zeer hoog water.
8. Methode 3 ware verder uit te werken en te toetsen op de wijze van tabel 16.
9. De aan het water onttrokken warmte $\Sigma[T(w)-T(l)]dt$ uit fig.17 ware te onderzoeken op de relatie met $T(w)$.

Annex 1

1. Normale Verdeling :

$$f(x) = [1 / \sigma \sqrt{2\pi}] \cdot \exp [-(x-\mu)^2 / 2\sigma^2]$$

kansdichtheidsfunctie
 μ is het gemiddelde van
de afvoeren x_i
 σ is de standaardafwijking van
de afvoeren x_i

$$F(x) = [1 / \sigma \sqrt{2\pi}] \cdot \int_{-\infty}^x \exp [-(x-\mu)^2 / 2\sigma^2] dx$$

waarschijnlijkheidsverdeling

2. Lognormale verdeling :

$$f(x) = [1 / x \cdot \sigma_{\ln} \sqrt{2\pi}] \cdot \exp [-\frac{1}{2} \{(\ln x - \mu_{\ln}) / \sigma_{\ln}\}^2]$$

μ_{\ln} is het gemiddelde van de
 $\ln x$ -waarden
 σ_{\ln} is de standaardafwijking van
de $\ln x$ -waarden

$$F(x) = [1 / \sigma_{\ln} \sqrt{2\pi}] \cdot \int_0^x (1/x) \cdot \exp [-\frac{1}{2} \{(\ln x - \mu_{\ln}) / \sigma_{\ln}\}^2] dx$$

$$\mu_{\ln} = \frac{1}{2} \cdot \ln [\mu^4 / (\mu^2 + \sigma^2)]$$

$$\sigma_{\ln}^2 = \ln [(\mu^2 + \sigma^2) / \mu^2]$$

3. Gumbel verdeling (dubbel exponentieel) :

$$f(x) = \alpha \cdot \exp \{[-\alpha(x-\beta)] - \exp [-\alpha(x-\beta)]\}$$

$$F(x) = \exp \{-\exp [-\alpha(x-\beta)]\}$$

$$\alpha = \pi / s \cdot \sqrt{6}$$

$$\beta = x_{\text{gem}} - \gamma / \alpha$$

$$\gamma = 0,57721 \text{ (const.v.Euler)}$$

4. Pearson III verdeling :

$$f(x) = [1 / \beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)] \cdot (x-\gamma)^{\alpha-1} \cdot \exp [-(x-\gamma) / \beta]$$

$$E(x) = \mu = \alpha\beta$$

$$\text{Var}(x) = \alpha\beta^2$$

x =afvoer

γ =ondergrens van de afvoer

5. Lineaire Exponentiële verdeling :

Door in de Gumbelverdeling $F(x) = \exp \{-\exp [-\lambda(x-\beta)]\}$ te stellen $\theta = \exp [-\lambda(x-\beta)]$

komt er $F(x) = \exp -\theta$, welke door reeksontwikkeling over gaat in

$F(x) = 1 - \theta + \theta^2 / 2! - \theta^3 / 3! + \theta^4 / 4! + \dots$ Door verwaarlozing van de termen θ^k voor $k \geq 2$ wordt bij benadering

$F(x) = 1 - \theta = 1 - \exp[-\lambda(x-\beta)]$. Door een bepaalde konstante vermindering

(verschuiving) van de afvoer (x) wordt de plaatsparameter $\beta = 0$, waardoor

$F(x) = 1 - \exp[-\lambda x]$ d.i. de lineaire exponentiële verdeling met de dichtheidsfunctie:

$$f(x) = \lambda \exp[-\lambda x]$$

Deze verdeling bezit de eigenschap, dat door de verschuiving van de afvoer de oorspronkelijke verdeling niet wijzigt. De parameter λ wordt geschat uit

$$\lambda = 1 / x_{\text{gem}}^* = 1 / \text{std.}x, \text{ waar } x^* \text{ de verschoven afvoer is.}$$

6. Kolmogorof-Smirnov toets :

Behoudens door observatie van fig.2 wordt de mate van aanpassing van de theoretische verdeling aan de waarnemingen objectief bepaald met de verdelingsvrije toets van Kolmogorof-Smirnov [4]. Berekend wordt het maximale absolute verschil tussen de theoretische overschrijdingskans F en de overschrijdingskans P volgens de meetwaarden. Dit maximum:

$$D_0 = \max |F(x_i) - P(x_i)| \text{ wordt getoetst aan de drempelwaarde } D_\alpha. \text{ Indien } D_0 > D_\alpha$$

dan wordt de nulhypothese (metingen en theorie passen bij elkaar) verworpen. De kritieke waarde voor D_α , die afhangt van het aantal metingen, kan worden gevonden in een statistische tafel bijvoorbeeld in [4].

7. Ook de Wilcoxon toets en de Tekentoets, beide uit [10] worden toegepast.

8. In welke mate, bij gelijke overschrijdingskansen (x), de meetwaarden (y) afwijken van de theoretische waarden zal blijken uit het 95% betrouwbaarheidsgebied van de theoretische verdeling in relatie met de metingen.

Voor het punt:

$y_i = ax_i + b$ van de rechte lijn voor de Exponentiële verdeling op Logx-as schaal en lineaire y-as schaal, zijn de

betrouwbaarheidsgrenzen:

$$\pm t_{n-2}^{1/2\alpha} s_{\text{res.}} \{[(x_i - x_{\text{gem.}})^2 / \sum (x_i - x_{\text{gem.}})^2] + 1/n\}^{0.5}, \text{ met:}$$

$s_{\text{res.}}^2$ de residuele variantie van de meetwaarden y_i ten opzichte van de rechte,

$t_{n-2}^{1/2\alpha}$ de Student verdeling met $n-2$ vrijheidsgraden en eenzijdige drempelwaarde $1/2\alpha$,

en n het aantal waarnemingen.

$$s^2_{\text{res.}} = 1/(n-2) \sum \{ y_i - ax_i - b \}^2$$

9. De verdelingen zijn uitgebeeld in fig.2. Daarbij werden de gemeten afvoeren verdeeld in klassen, waarbij het aantal klassen (\sqrt{n}) wordt bepaald uit het aantal waarnemingen "n".

De klassebreedte wordt bepaald uit de wijde van de afvoer (verschil tussen hoogste en laagste) en het aantal klassen.

Het klassemidden van de laagste klasse ligt op de helft van de klassebreedte van de laagste afvoer.

De frequenties f_i in iedere klasse worden geteld uit de waarnemingen en gerelateerd aan het klassemidden.

De relatieve frequentie van klasse i bedraagt f_i / n .

De dichtheid (sec / m³)- of relatieve frequentie gedeeld door de klassebreedte- van klasse i bedraagt $f_i / n \times \text{afvoerklassebreedte}$, waarbij de afvoerklassebreedte in m³/s.

Annex 2

Om te komen tot het uitputtingsverloop van de basisafvoer wordt vanaf het (basis) afvoernivo waarop de was begint de uitputting berekend tot aan het afvoernivo in de val-periode d.i. na t dagen ($t < 12$ dagen) na de top. Het uitputtingsverloop is de schatting van het basisafvoer verloop, alsof er dus geen nieuwe neerslag zou zijn gevallen.

$$Q_b(t) = Q_b(t_0) * \exp\left[-\frac{t - t_0}{T}\right] \quad (\text{van der Made 1982 [18]}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$Q_b(t)$ = de basisafvoer op tijd t

$Q_b(t_0)$ = de basisafvoer op begintijd t_0

t_0 = begin van de periode met oppervlakte afvoer

t = tijdsvariabele

T = teruglooptijd

Uit (1) volgt: $\ln Q_b(t) - \ln Q_b(t_0) = -\frac{t - t_0}{T}$ Voor $t - t_0 = T$ geldt dus $\frac{Q_b(t)}{Q_b(t_0)} = e^{-1}$

Uit onderzoek van De Wildt [14] is gebleken, dat $T=105$ dagen in de praktijk gemiddeld genomen een goede benadering is voor de terugloop m.a.w. na 105 dagen droogte is de basisafvoer gereduceerd met een factor e .

De relatie tussen Q_b (log-schaal) en t (lineaire-schaal) is de rechte door $Q_b(t_0)$. Over de waarde $T=105$ dagen voor het gemiddelde verloop van de basisafvoer op de lange termijn (maanden) is discussie mogelijk als het gaat om het korte termijn verloop (weken) tijdens hoogwatersituaties. Een kortere T -waarde is in dit geval betrouwbaarder. In onderstaand overzicht wordt de basisafvoer na 10 dagen berekend voor zowel $T=105$ - als $T=70$ dagen.

$Q_b(t_0)$	500	1000	1500
T	$Q_b(t_{10})$	$Q_b(t_{10})$	$Q_b(t_{10})$
105	455	909	1364
70	433	867	1300

Te zien is, dat de verschillen gering zijn bij toepassing van $T=105$ dagen of $T=70$ dagen, te weten 2 à 6 m³/s per dag en dus te verwaarlozen voor hoogwater golven.

De berekeningen van het nulde- tot en met het vierde gestandaardiseerde moment resp. voorstellend de inhoud, de gemiddelde tijd (zwaartepunt van de golf) met de spreiding, de scheefheid en de vorm (slankheid of kurtosis) van de relatieve golf Q' te Borgharen, hebben betrekking op de invloed van de nieuwe neerslag op het verloop van de afvoer boven de basisafvoer. De dagelijkse 08-uur afvoer voor de relatieve golf wordt berekend uit:

$$Q' = Q_{\text{totaal}} - Q_{\text{basis}}$$

De momenten μ_k ($k=0\dots4$) zijn:

$$\mu_0 = \sum Q_i \, dt$$

inhoud (hierbij en in het volgende worde voor Q_i gelezen Q'_i)

$$\mu_1 = t_{\text{gem}} = \frac{\sum t_i Q_i}{\sum Q_i}$$

gemiddelde, loodlijn door het
zwaartepunt op de t-as

$$\mu_2 = S_t^2 = \frac{\sum \{(t_i - t_{\text{gem}})^2 \cdot Q_i\}}{\sum Q_i}; \text{ terwyl } S_t = \sqrt{S_t^2}$$

variantie om het gemiddelde

$$\mu_3 = \frac{\sum \left\{ \left(\frac{t_i - t_{\text{gem}}}{S_t} \right)^3 \cdot Q_i \right\}}{\sum Q_i}$$

scheefheid

$$\mu_4 = \frac{\sum \left\{ \left(\frac{t_i - t_{\text{gem}}}{S_t} \right)^4 \cdot Q_i \right\}}{\sum Q_i}$$

kurtosis (slankheid)

Het trend onderzoek voor de golfkenmerken wordt gedaan met behulp van de rangcorrelatietoets van Spearman. Het onderzoek naar de gelijkheid van gemiddelden uit de deelperioden van 1931-1999 wordt gedaan met behulp van de variantie-toets (F-toets) en de Student-toets (t-toets). Als drempelwaarde wordt de 2½% eenzijdige overschrijdingskans gekozen. De toetsen, alsmede de statistische tafels zijn ontleend aan [15]. Mogelijke significante verschillen tussen de deelreeksen kunnen worden gecorrigeerd door homogenisatie naar de hedendaagse toestand van de rivier. Dit zal blijken het geval te zijn voor de kurtoses van de periode 1931-1980, omdat zowel trend als gemiddelde significant verschilt van die van de reeks 1980-1999.

De trend in μ_4 voor de periode 1931-1980 wordt opgeheven door de regressielijn door de oorspronkelijke punten $\{t_i; (\mu_4)_i\}$, waarbij $i=1 \dots 34$ te bepalen. De berekening daarvan leidt tot: $(\mu_4)_i = -0,0133 t_i + 2,6834$. Voor $t_i=1,2, \dots, 34$ geeft dit $(\mu_4)_i^1$. Door de oorspronkelijke μ_4 waarden te vermenigvuldigen met $2,45 / (\mu_4)_i^1$ ontstaan gecorrigeerde waarden μ_4^* , waardoor de reeks trendvrij is geworden.

Door vervolgens deze waarden te vermenigvuldigen met $2,77 / 2,45$ waarbij de teller en de noemer de gemiddelde waarde van μ_4 voor resp. de periode 1980-1999 en 1931-1980 is, ontstaat de naar de meest recente periode gehomogeniseerde reeks μ_4^{**} (tabel 4)

De aangepaste theoretische frequentieverdelingen aan de reeksen van golfkenmerken worden bepaald met behulp van [16] en zijn ook te vinden in Annex 1. Specifieke golfkwalificaties, zoals klein, gemiddeld en groot² kunnen hierdoor worden onderscheiden.

² Zie tabel 5, onderste subtabel