
Toename hoogwaterfrequentie in de Maas

Verandert het klimaat of verandert het stroomgebied?

Pieter de Laat, Min Tu, Marcel de Wit en Stefan Uhlenbrook

Onlangs is Tu Min bij UNESCO-IHE gepromoveerd op een onderzoek naar veranderingen in het afvoerregime van de Maas (Tu, 2006). In haar promotieonderzoek wordt aangetoond dat de omvang en frequentie van hoogwater in de Maas is toegenomen. Deze toename lijkt te kunnen worden toegeschreven aan een verandering van het neerslagpatroon. Er is geen overtuigend bewijs dat een veranderd landgebruik binnen het stroomgebied hierbij een rol van betekenis heeft gespeeld. In dit artikel worden een aantal resultaten van het promotieonderzoek toegelicht.

Inleiding

Recente hoogwaters in de Maas hebben bij velen de indruk gewekt dat het overstromingsgevaar gedurende de laatste eeuw beduidend is toegenomen. Vijf van de zeven grootste afvoerpieken in de periode 1911 – 2003 deden zich voor in het laatste decennium. Ook elders in Europa lijkt er een toename te zijn van de frequentie waarmee rivieren buiten de oevers treden. Overstromingen van de Elbe in Duitsland in 2002 en 2006, en van de Donau in Hongarije en Roemenië in 2006 liggen nog vers in het geheugen.

De toename van de wateroverlast in Europa wordt algemeen toegeschreven aan een veranderd neerslagpatroon tengevolge van klimaatsverandering (Houghton e.a., 2001). Daarnaast doet zich de vraag voor in hoeverre de grootte en de frequentie van de extreme afvoeren worden beïnvloed door veranderingen in het stroomgebied zelf, zoals ontbossing, verstedelijking, verbetering van de infrastructuur en de mechanisering van werkzaamheden in bos- en landbouw. De ontwerpafvoer van het bedijkte deel van de Maas is gebaseerd op een frequentieanalyse van de piekafvoer bij Borgharen. Chbab (1995) heeft aangetoond wat het effect is van het toevoegen van de extreme hoogwaters van 1993 en 1995 aan de afvoerreeks op de ontwerpafvoer van de Maas bij Borgharen. Deze twee hoogwaters hebben ertoe geleid dat de maatgevende afvoer van de Maas werd verhoogd van 3650 m³/s naar 3800 m³/s (Parmet e.a., 2001). Inmiddels is de meetreeks van Borgharen uitgebreid met de

Pieter J.M. de Laat, Stefan Uhlenbrook en **Min Tu** zijn werkzaam bij het UNESCO-IHE Institute for Water Education, Postbus 3015, 2601 DA Delft, tel: (015) 215 18 26, e-mail: p.delaat@unesco-ihe.org.

Marcel J.M. de Wit is werkzaam bij RIZA, afdeling Rivieren, Arnhem.

hoogwaters van 2002 en 2003 wat leidt tot een maatgevende afvoer van 4000 m³/s (WL|Delft Hydraulics, 2004). Hierbij doet zich de vraag voor of de aanpassing van de maatgevende afvoer nodig is vanwege klimaatverandering, c.q. klimaatvariabiliteit of dat er ook rekening gehouden moet worden met veranderingen in het stroomgebied van de Maas.

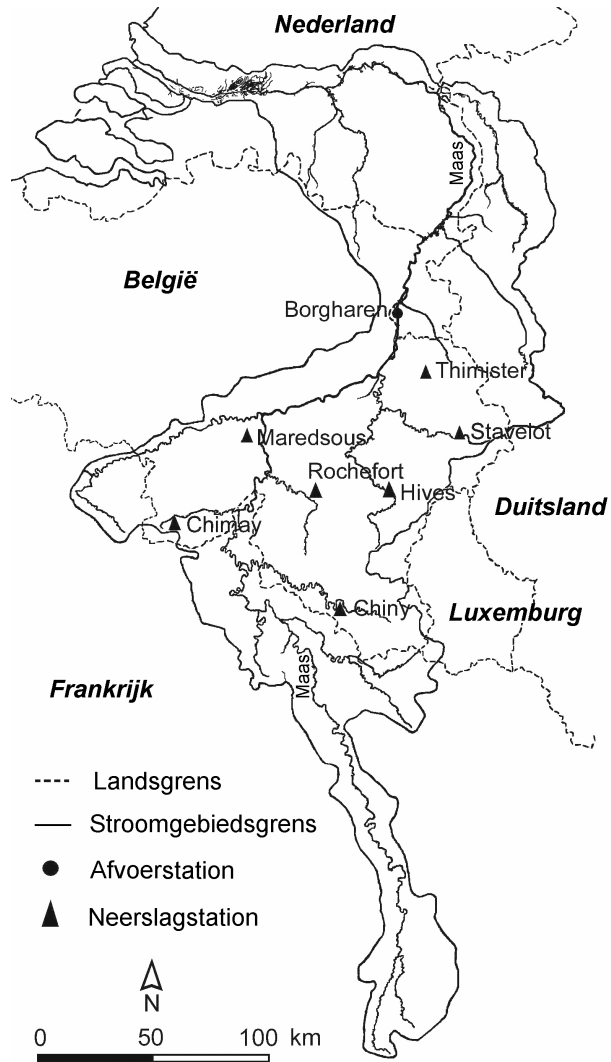
Diverse onderzoekers (bijvoorbeeld WL|Delft Hydraulics, 1994, De Wit e.a., 2001, Tu e.a., 2004) hebben het afvoerregime van de Maas in relatie tot de neerslag onderzocht, waarbij gebruik is gemaakt van de langst mogelijke afvoerreeks van Borgharen (dagwaarden sinds 1911). Eveneens is veel onderzoek gedaan naar mogelijke veranderingen in diverse parameters van waargenomen neerslagreeksen van zowel individuele stations als wel van gebiedsgemiddelden neerslag (b.v. WL|Delft Hydraulics, 1994, Gellens, 2000, De Wit e.a., 2001 en Vaes e.a., 2002). Recentelijk hebben Tu e.a. (2005a) een poging gedaan de verandering in het neerslagpatroon te relateren aan de globale atmosferische circulatie. Modelstudies op stroomgebiedschaal zijn gebruikt om het effect van veranderingen in het klimaat en het landgebruik op de afvoer te voorspellen. De Roo e.a. (2002) hebben het model LISFLOOD gebruikt met landgebruik van de jaren 1975 en 1992. Booij (2002) heeft het HBV-model toegepast om het effect van klimaatverandering op het hoogwaterregime van de Maas te voorspellen.

In deze studie wordt een analyse gemaakt van de afvoer van de Maas bovenstrooms van Borgharen in relatie tot de neerslag in dit gebied. De aandacht gaat met name uit naar de detectie van veranderingen in de waargenomen extreme waarden van neerslag en afvoer. Ook de middelhoge afvoergolven worden geanalyseerd omdat veranderingen in landgebruik in het stroomgebied van de Maas met name van invloed zouden zijn op de meer frequent voorkomende hoogwaters (WL|Delft Hydraulics, 1994; Middelkoop en Van Hasselen, 1999). Naast de statistische analyse van neerslag- en afvoerreksen is het HBV-model gebruikt voor een simulatie van neerslag/afvoer in het Maasstroomgebied voor de periode 1911-2000. Doel van deze hydrologische modellering is om na te gaan of de relatie tussen neerslag en afvoer wezenlijk is veranderd.

Belangrijke kanttekening bij dit onderzoek is dat enkel is gekeken naar daggemiddelde waarden van neerslag en afvoer. De bevindingen hebben vooral betrekking op veranderingen in neerslag- en afvoervolume en niet op de vorm van de afvoergolf.

Gegevens en methodiek

Het onderzoek richt zich op het gedeelte van het stroomgebied van de Maas bovenstrooms van Borgharen, een gebied ter grootte van 21000 km² (figuur 1). De hoogte van het gebied varieert van zo'n 50 m nabij Borgharen tot bijna 700 m in de Ardennen. De Maas ontspringt in Frankrijk in een glooiend landschap. Een groot deel van het stroomgebied ligt echter in de Belgische Ardennen, met zijrivieren die snel reageren op neerslag en aldus sterk bijdragen aan de piekafvoeren van de Maas. De gemiddelde afvoer bedraagt 250 m³/s en de waargenomen afvoer varieert tussen 20 en 3000 m³/s. Het gebied kent een gematigd zeeklimaat met milde winters en koele zomers. De neerslag is relatief gelijkmatig over het jaar verdeeld en heeft een frontaal karakter in de winter en is dikwijls convectief in de zomer. De gemiddelde jaarsom varieert van 800 tot 1300 mm, afhankelijk van de hoogteligging.



Figuur 1: Stroomgebied van de Maas.

Afvoerreeksen

Voor de analyse van de afvoer van de Maas is gebruik gemaakt van afvoergegevens van Borgharen voor de periode 1911–2002 die door Rijkswaterstaat ter beschikking zijn gesteld. Deze waarden zijn tot 1975 gebaseerd op één waarneming per dag (om 08:00 uur) en daarna op het daggemiddelde van uurwaarnemingen. De afvoergegevens worden beïnvloed door onttrekkingen voor diverse kanalen tussen Monsin en Borgharen. De grootte van de onttrekkingen is in de loop van de tijd opgelopen van zo'n 20 m³/s aan het begin van de 20^e eeuw tot meer dan 70 m³/s gedurende de laatste decennia. Voor het onderzoek naar piekafvoeren speelt dit echter een geringe rol. Tijdens een hoogwater is het

deel van de afvoergolf dat via de kanalen wordt afgevoerd relatief klein.

Voor het onderzoek naar tijdsafhankelijke veranderingen in de piekafvoer is gebruik gemaakt van jaarlijkse- en winter daggemiddelde maxima (AMAXD/WMAXD), en partiële series (Peaks-Over-Threshold, POT) voor drie verschillende drempelwaarden. De wintermaxima werden apart onderzocht omdat de meeste piekafvoeren plaats vinden in de winter (november t/m april). De jaarlijkse serie is de reeks met per hydrologisch jaar (november t/m oktober) de hoogste dagafvoer. De partiële reeksen hebben het voordeel dat alle afvoerpieken boven een bepaalde drempelwaarde in beschouwing worden genomen, maar hierdoor is de onafhankelijkheid van de reeks waarnemingen niet gegarandeerd, wat wel vereist is voor statistische analyses. Om de onafhankelijkheid te waarborgen is een minimum tijd van 10 dagen genomen tussen twee afvoerpieken. Dit criterium is afgeleid uit een eerdere studie (Tu e.a., 2005b) waarin is gebleken dat de maximum dagafvoer in de winter het beste correleert met een antecedente neerslaghoeveelheid over een periode van 7 tot 10 dagen. De drie gehanteerde drempelwaarden zijn 800, 1217 en 1500 m³/s en de series worden aangeduid met POT₈₀₀, POT₁₂₁₇ en POT₁₅₀₀. De waarden 800 en 1500 zijn juist iets groter dan, respectievelijk het 90^e en het 99^e percentiel, en de drempelwaarde 1217 is de laagste piekafvoer van de 91 hoogste waarden in de periode 1911-2002. De reeks POT₁₂₁₇ kent evenals de reeks met jaarmaxima 91 waarden, terwijl POT₈₀₀ en POT₁₅₀₀ respectievelijk 219 en 50 extreme waarden bevatten. De reeksen POT-waarden die alleen betrekking hebben op de winter worden aangeduid met WPOT. Een andere reden voor het gebruik van partiële reeksen is het vermoeden dat veranderingen in het landgebruik gevolgen hebben voor de frequentie en de grootte van minder extreme afvoeren (b.v. die tussen 800 en 1500 m³/s).

Neerslagreeksen

Het Koninklijk Meteorologisch Instituut (KMI) van België heeft dagwaarden van de neerslag van zeven stations in het stroomgebied beschikbaar gesteld (zie figuur 1). Er zijn niet veel neerslagstations met lange waarnemingsreeksen die terug gaan tot het begin van de 20^e eeuw. De beschikbare reeksen blijken vanaf 1911 homogeen te zijn en dus geschikt voor een lange termijn onderzoek van de neerslagontwikkeling (Gellens, 2000). Omdat afvoeren beschikbaar zijn voor de periode 1911–2002, is ook de neerslag over dezelfde periode statistisch onderzocht. Dit is gebeurd aan de hand van de gemiddelde waarde van de zeven stations. Van deze serie zijn naast de jaarsommen APT (november t/m oktober) ook maand- en seizoenstotalen onderzocht. Verder zijn reeksen met extreme waarden samengesteld, zoals de serie AMAX k P met de jaarlijkse maximum k -daagse neerslag, waarbij $k = 1, 3, 5, 7, 10, 15$ en 30 dagen. Soortgelijke dataseries werden ook afgeleid voor zowel de winter- als de zomerperiode.

Voor het onderzoek naar de frequentie en grootte van zware buien werden reeksen samengesteld met, per jaar en per halfjaar, het aantal natte dagen (> 1 mm/d) en zeer natte dagen (> 10 mm/d), verder aangeduid met WD_{>1 mm} en WD_{>10 mm}, respectievelijk. De hiermee geassocieerde neerslaghoeveelheid wordt weergegeven met respectievelijk PWD_{>1 mm} en PWD_{>10 mm}. Dagen met een nog grotere hoeveelheid neerslag werden statistisch niet onderzocht omdat ze te weinig frequent voorkomen.

Hoogwater wordt voorafgegaan door zware neerslag in het stroomgebied. Vooral in de winter, wanneer de vochtopname capaciteit van de bodem gering is, kan er een relatie

worden verwacht tussen de grootte van de piekafvoer en de antecedente neerslag. De hoeveelheid neerslag gedurende 10 dagen voorafgaand aan hoogwater in de winter zal worden aangeduid met A10P-WMAXD en A10P-WPOT voor, respectievelijk de reeks jaarlijkse maxima en de POT extremen.

Overige meteorologische gegevens

Potentiële verdamping is berekend op dagbasis met de formule van Penman-Monteith. De hiervoor benodigde gegevens (relatieve zonneschijnduur, relatieve vochtigheid, temperatuur en windsnelheid) werden verkregen van het KNMI voor De Bilt, eveneens voor de periode 1911–2002. De meteorologische gegevens moesten eerst bewerkt worden omdat gedurende de waarnemingsperiode de meetinstrumenten en de opstelling herhaaldelijk werden gewijzigd. Bij voorkeur was gebruik gemaakt van de gegevens van Maastricht omdat dit station in het stroomgebied is gelegen. Het station werd in 1950 verplaatst van uit de stad naar vliegveld Beek wat ernstig afbreuk heeft gedaan aan de homogeniteit van de tijdreeksen.

Statistische methoden

In het onderzoek lag de nadruk in de analyse van de tijdreeksen op de identificatie van sprongen, breekpunten of plotselinge veranderingen (vergeleken met de gemiddelde waarde), die het gevolg kunnen zijn van klimaatsvariabiliteit of menselijk handelen. Hierbij is gebruik gemaakt van de niet-parametrische Pettitt-test (Pettitt, 1979). Indien de waarschijnlijkheid van de plotselinge verandering gelijk of groter was dan 80 % werd de sprong als significant beoordeeld. Vervolgens werd de significantie getest (*split-record test*) door de gemiddelden (*t*-test) en de varianties (*F*-test) van de reeks waarden vóór en na het jaar van de plotselinge verandering statistisch met elkaar te vergelijken op een betrouwbaarheidsniveau van 5 %. Uiteraard werd de serie eerst onderzocht op seriële correlatie, maar hiervan was slechts in een uitzonderlijk geval sprake. Voor de statistische berekeningen werd gebruik gemaakt van de SPELL-Stat software (Guzman en Chu, 2003). In dit artikel is het jaar van verandering (het breekpunt) het jaar nadat de verandering is opgetreden.

Resultaten

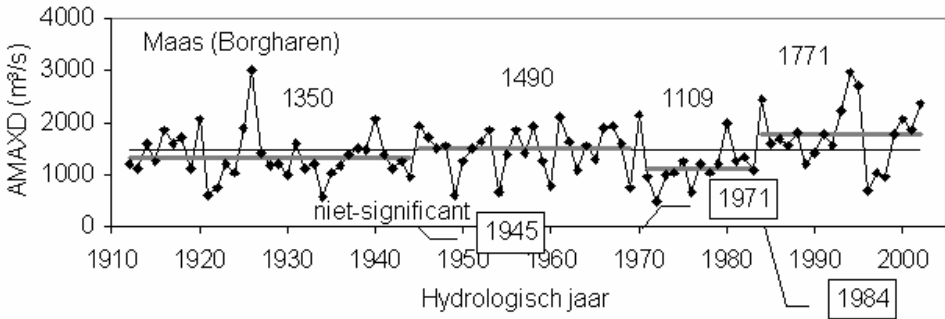
Afvoerreeksen

De gemiddelde jaarlijkse afvoer van de Maas blijkt over de onderzochte periode (1912–2002) niet te zijn veranderd. Hierbij is rekening gehouden met de onttrekkingen door de kanalen tussen Luik en Borgharen. Er werd geen lineaire trend waargenomen met de test van Spearman en er werden geen breekpunten geïdentificeerd met de Pettitt-test.

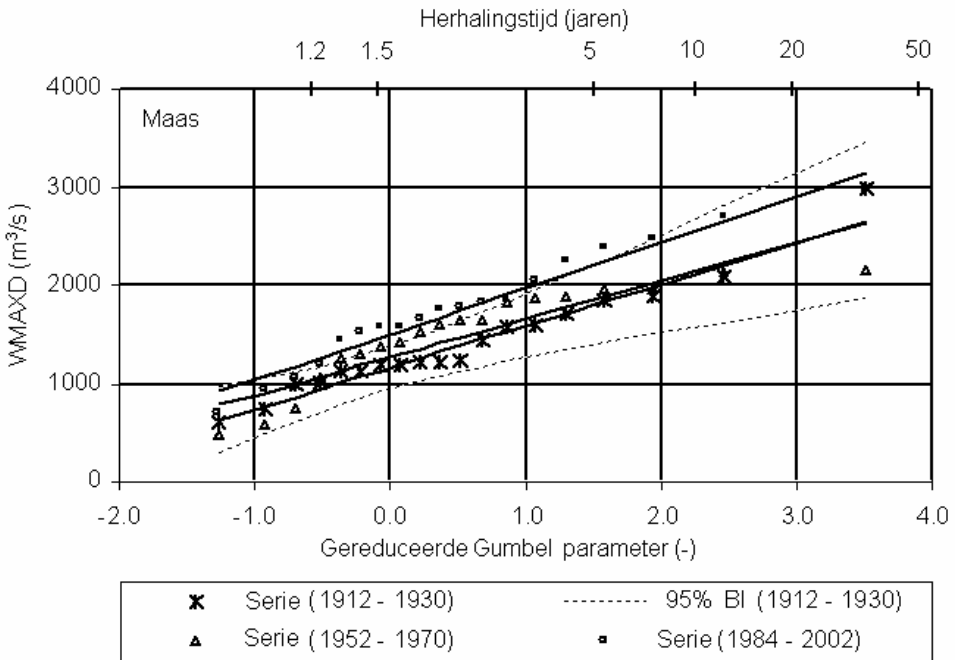
Dit in tegenstelling tot de jaarlijkse- en winter extreme dagafvoer (AMAXD/WMAXD) voor Borgharen die voor beide een significante toename (meer dan 90 % waarschijnlijkheid

met de Pettitt-test) aan toont vanaf 1984. Nader onderzoek van de AMAXD-serie laat ook een significante afname zien rond 1971 en niet significante verandering in 1945 (figuur 2). Verder is gebleken dat sinds 1942 de maximum jaarlijkse afvoer zich gemiddeld 22 dagen later in het hydrologische jaar voordoet.

Interessant is ook om na te gaan of de kansverdeling van extreme waarden volgens de Gumbel verdeling zich in de loop van de vorige eeuw heeft gewijzigd. Hiertoe zijn drie perioden van 19 jaar met elkaar vergeleken. Behalve de eerste en de laatste 19 jaar is ook de kansverdeling voor de periode 1952–1970 berekend.



Figuur 2: Geïdentificeerde breekpunten voor de serie van jaarlijkse extreme dagafvoeren AMAXD (Borgharen reeks). De dunne zwarte lijn is de gemiddelde waarde over de gehele studieperiode. De dikke grijze lijnen zijn de gemiddelden van iedere deelperiode en het getal is de gemiddelde waarde. Deze definitie geldt ook voor de volgende figuren.

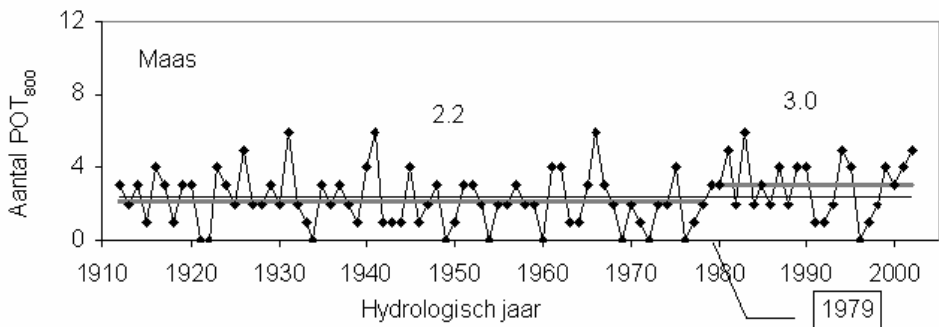


Figuur 3: Gumbel-kansverdelingen van WMAXD van de afvoerreeks van Borgharen voor verschillende

perioden: 1912–1930, 1952–1970 en 1984–2002. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval (BI) voor de beginperiode 1912–1930 is ook weergegeven.

In figuur 3 is voor de ‘ongestoorde’ periode 1912–1930 ook het 95 % betrouwbaarheidsinterval weergegeven. De theoretische Gumbel-verdeling blijkt de extreme dagafvoeren WMAXD van Borgharen goed weer te geven. Vergeleken met de beginperiode 1912–1930, blijkt de kansverdeling voor de latere perioden duidelijk anders. Met name voor de middel-hoge afvoerpieken (zeg tussen 1300 en 2500 m³/s) is er een afwijking naar boven. Met andere woorden, de middelhoge afvoerpieken in de periode 1984–2002 zijn statistisch significant toegenomen ten opzichte van de beginperiode (overigens ook t.o.v. de periode 1952–1970, maar dat wordt hier niet getoond).

De partiële series (POT) zijn gebruikt om na te gaan of de jaarlijkse frequentie waarmee afvoerpieken voorkomen is veranderd. T.a.v. de reeks met een drempelwaarde van 800 m³/s (POT₈₀₀) is gebleken dat de jaarlijkse frequentie significant is toegenomen sinds 1979 (figuur 4). Voor POT-reeksen met hogere drempelwaarden is de Pettitt-test niet toegepast vanwege het relatief grote aantal jaren zonder afvoeren boven 1217 m³/s. Ook de serie met afvoeren tussen 800 en 1500 m³/s bleek geen significante breekpunten te hebben voor de jaarlijkse frequentie van POT₈₀₀₋₁₅₀₀ afvoerpieken. Analyse van de grootte van de afvoerpieken laat voor POT₈₀₀ een decennia-lange fluctuatie zien met hogere waarden voor ruwweg het midden van de veertiger jaren tot het einde van de zestiger jaren en vanaf 1984, en lagere waarden gedurende de eerste dertig jaar en de zeventiger jaren. De grootte van de piekafvoeren boven 1217 m³/s zijn toegenomen sinds 1984 en de POT₁₅₀₀ serie laat een niet-significante verhoging zien vanaf 1993. Er werd geen breekpunt voor de grootte van de piekafvoeren gevonden voor de serie afvoeren tussen 800 en 1500 m³/s.

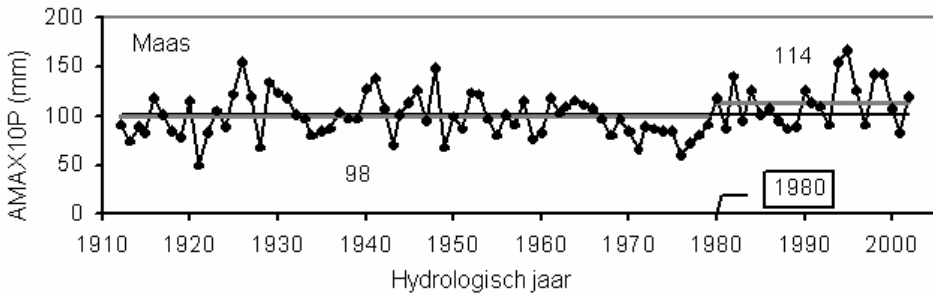


Figuur 4: Resultaat analyse Pettitt-test voor de jaarlijkse frequentie van POT800 afvoerpieken.

Neerslagreeksen

De jaarlijkse neerslag (APT) in het studiegebied is volgens de Pettitt-test significant toegenomen sinds 1980. De gemiddelden vóór en na 1980 zijn, respectievelijk 1015 en 1093 mm/jaar, dus een toename van bijna 8%. Analyse van de seizoensneerslag toont voor drie seizoenen een (niet-significante) opwaartse trend, maar voor het zomer seizoen (juni t/m augustus) is de trend (eveneens niet-significant) neerwaarts. Analyse van de maandtotalen voor een lineaire trend laat voor maart een opwaartse en voor augustus een neerwaartse trend zien. Beide trends zijn significant en voor geen van de andere maanden kon een

trend in de maandelijkse neerslagsom worden waargenomen.

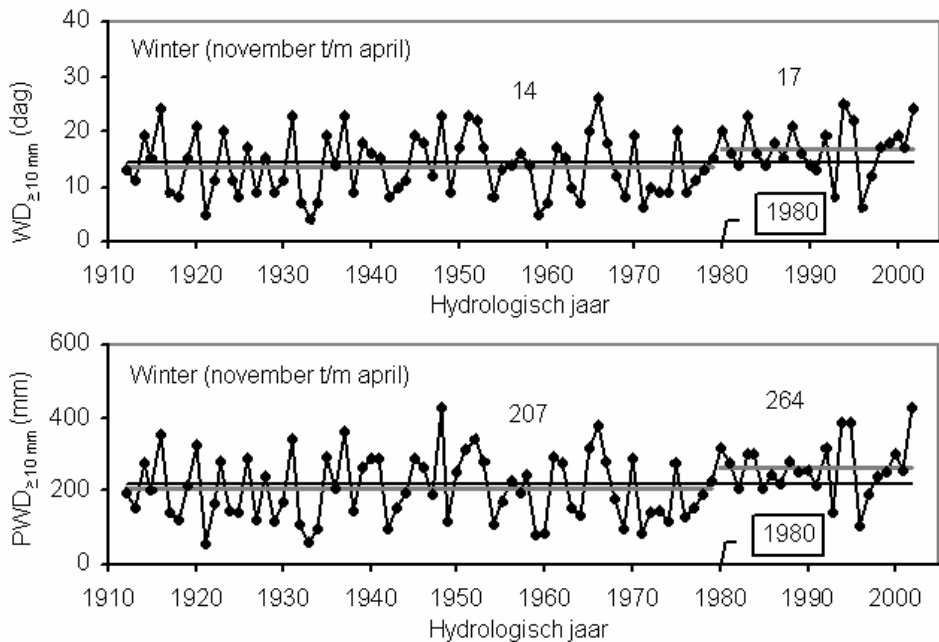


Figuur 5: Resultaat analyse Pettitt-test voor de jaarlijkse maximum 10-daagse neerslag (AMAX10P).

Interessanter voor dit onderzoek is de temporele verandering in het voorkomen van extreme neerslag. Analyse van breekpunten in de reeksen met jaarlijkse k -daagse maxima (AMAX k P) laat een significante toename zien van extreme neerslag vanaf 1980 voor alle series behalve voor AMAX1P en AMAX30P. Voor deze laatste reeksen werden wel vergelijkbare breekpunten gevonden, maar die bleken na toetsing met de t -test niet significant. Onderzoek van soortgelijke series voor de zomer en winter periode leverde weinig relevante resultaten op. Figuur 5 geeft als voorbeeld de analysesresultaten van de reeks AMAX10P.

Voor het onderzoek naar een verandering in de frequentie en intensiteit van buien is gekeken naar de reeksen met jaarlijkse en (winter) halfjaarlijkse frequentie van natte en zeer natte dagen, respectievelijk $WD_{>1\text{mm}}$ en $WD_{>10\text{mm}}$. Gebleken is dat er een lichte toename is sinds 1972 in het voorkomen van natte dagen ($WD_{>1\text{mm}}$) en dat de gemiddelde intensiteit $PWD_{>1\text{mm}}$ sinds 1980 significant is toegenomen van 5,9 mm/d naar 6,4 mm/d. Voor zeer natte dagen ($> 10\text{ mm}$) geldt een toename sinds 1980 van zowel de frequentie (19%) als de hoeveelheid (20%). Voor het winterhalfjaar was er weinig verandering voor natte dagen, maar de frequentie van zeer natte dagen $WD_{>10\text{mm}}$ nam significant toe met 3 dagen/winterhalfjaar en de corresponderende intensiteit $PWD_{>10\text{mm}}$ met 57 mm/winterhalfjaar (zie figuur 6). Deze resultaten laten zien dat gedurende de laatste decennia natte en zeer natte dagen natter zijn geworden en in aantal zijn toegenomen.

Het gedrag van de neerslag voorafgaand aan de winter piekafvoer WMAXD werd ook onderzocht. Deze antecedente neerslag AkP -WMAXD werd berekend als de som van de neerslag op de dag van de afvoerpiek en de $k-1$ voorgaande dagen. Er blijkt een goede correlatie te zijn ($r > 0,70$) tussen de antecedente neerslaghoeveelheid AkP en het winter maximum WMAXD voor $k = 5, 7, 10$ en 15 dagen. Breekpuntanalyse van de reeks A10P-WMAXD laat een verlaging zien in de zeventiger jaren en een toename van de antecedente neerslag sinds 1984 met zo'n 20% vergeleken met de periode 1911–1969. De A10P-WPOT₈₀₀ laat een soortgelijk beeld zien als de POT₈₀₀ serie in figuur 4. In de andere A10P-WPOT series werden geen significante breekpunten gevonden.



Figuur 6: Resultaat analyse Pettitt-test voor de frequentie van zeer natte dagen in de winter $WD > 10$ mm en de daarmee geassocieerde hoeveelheid $PWD > 10$ mm.

Simulaties met het HBV-model

Bovenstaande resultaten laten een verband zien tussen de toegenomen grootte en frequentie van afvoerpieken van de Maas en de toegenomen grootte en frequentie van extreme neerslag in m.n. de winterperiode. In hoeverre veranderingen in het stroomgebied van de Maas een bijdrage hebben geleverd aan de toename van hoogwater in de Maas is minder eenvoudig vast te stellen. Indien het mogelijk is de neerslag-afvoer relatie in het stroomgebied van de Maas goed te simuleren, zou een systematische temporele afwijking tussen gesimuleerde en gemeten afvoeren in de periode 1911–2000 kunnen wijzen op invloed van veranderingen in het stroomgebied. Vanuit deze gedachte is gekozen om een simulatie uit te voeren met het semi-gedistribueerde conceptuele HBV-model. Een uitgebreide beschrijving van deze simulatie wordt gegeven in Ashagrie e.a. (2006).

Modelbeschrijving

Het HBV-model werd in de zeventiger jaren ontwikkeld bij het Zweedse Meteorologisch en Hydrologisch Instituut SMHI (Bergström en Forsman, 1973). Het HBV-model beschrijft de afvoer genererende processen op een eenvoudige en robuuste wijze. Accumulatie en afsmelten van sneeuw is gemodelleerd in een sneeuwmodule die gebruik maakt van een temperatuurindex. De bodemvochtmodule simuleert welk deel van de neerslag en het smeltwater

wordt afgevoerd als neerslagoverschot, hoeveel er wordt geborgen en wat er kan verdampen. De afvoer genererende module bestaat uit een bovenliggend, niet-lineair reservoir voor de snelle afvoercomponent en een lager gelegen, lineair reservoir voor de basisafvoer. De open waterafvoer wordt benaderd met een vereenvoudigde Muskingum-methode. Het stroomgebied kan worden opgedeeld in deelgebiedjes, waarbij voor ieder deelgebiedje het neerslag-afvoerproces afzonderlijk wordt gesimuleerd.

Een belangrijke reden om voor het HBV-model te kiezen is dat het eerder met succes werd toegepast voor de periode 1968–1998 (Booij, 2002 en 2005) en dat het later nauwkeurig werd bijgesteld (Van Deursen, 2004, Leander e.a., 2005). In de hierboven vermelde studies werd het stroomgebied van de Maas, bovenstrooms van Borgharen opgedeeld in 15 deelgebiedjes en de simulaties werden uitgevoerd met gedetailleerde data voor neerslag, temperatuur en verdamping. De resultaten werden beoordeeld met o.a. de Nash-Sutcliffe efficiëntiecoëfficiënt RE (Nash en Sutcliffe, 1970) waarvoor waarden werden gevonden van om en nabij 0,9 voor de verschillende deelstroomgebiedjes.

Modeltoepassing

Toepassing van het gekalibreerde en gevalideerde HBV-model voor de periode 1911–2000 was niet eenvoudig vanwege het ontbreken van gedetailleerde gegevens buiten de periode 1968–1998. Met behulp van meervoudige lineaire regressie werd voor de periode 1968–1998 de dagelijkse neerslag in ieder deelgebiedje gerelateerd aan de neerslag van de beschikbare zeven neerslagstations (figuur 1). Op soortgelijke wijze zijn regressievergelijkingen afgeleid voor de dagelijkse temperatuur waarbij gebruik gemaakt werd van dagwaarnemingen van vijf omringende meteorologische stations. De daggemiddelde potentiële evapotranspiratie is niet afgeleid via de gemiddelde dagtemperatuur omdat met de stijging van de temperatuur gedurende de laatste decennia automatisch een hogere verdamping zou worden berekend. Potentiële evapotranspiratie kan beter worden benaderd met de vergelijking van Penman-Monteith, die voor een belangrijk deel een fysische grondslag heeft. Daarnaast biedt deze aanpak de mogelijkheid een onderscheid te maken tussen de evapotranspiratie van verschillende soorten vegetatie.

Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van de verdampingsmodule van het model voor onverzadigde stroming en verdamping MUST (De Laat en Varoonchotikul, 1996). In het stroomgebied van de Maas werden de volgende soorten landgebruik onderscheiden: loofbos, naaldbos, grasland, granen, open water en stedelijk gebied. Voor ieder landgebruik werd met het model de potentiële evapotranspiratie berekend over de periode 1911–2000 met gebruikmaking van de meteorologische gegevens van De Bilt. Verdamping in het stedelijk gebied werd gelijk gesteld aan de helft van de waarde die voor grasland werd berekend. Het model houdt rekening met interceptieverdamping, dat voor een belangrijk deel afhangt van het neerslagregime. Hiervoor werd de gebiedsgemiddelde neerslag van het stroomgebied gebruikt. De potentiële evapotranspiratie voor het gehele stroomgebied werd vervolgens berekend als het gewogen gemiddelde van de gesimuleerde waarden voor de diverse soorten landgebruik. De gevonden waarden voor de potentiële evapotranspiratie voor de periode 1968–1998 zijn vergeleken met de waarden uit de gedetailleerde dataset (Leander e.a., 2005). De gemiddelde waarde voor 1968–1998 bedroeg respectievelijk 555 en 546 mm/jaar.

Nauwkeurige informatie betreffende het landgebruik in het stroomgebied is alleen

beschikbaar voor het laatste decennium (CORINE-database). Tu e.a. (2005b) hebben met gegevens uit diverse bronnen een globale reconstructie kunnen maken van het landgebruik gedurende de 20^e eeuw. Hieruit blijkt dat het percentage bos (35%) zich nauwelijks heeft gewijzigd, maar wel dat loofbos plaats heeft moeten maken voor naaldbos. Tabel 1 geeft een overzicht van het landgebruik zoals dat werd ingevoerd in het HBV-model. Behalve voor naald- en loofbos werd het landgebruik gelijk gehouden aan de huidige situatie.

Het HBV-model werd toegepast voor diverse soorten landgebruik: vroeger landgebruik, huidig landgebruik, historisch (geleidelijk veranderend) landgebruik, het gehele bosareaal beplant met naaldbos en het gehele bosareaal beplant met loofbos.

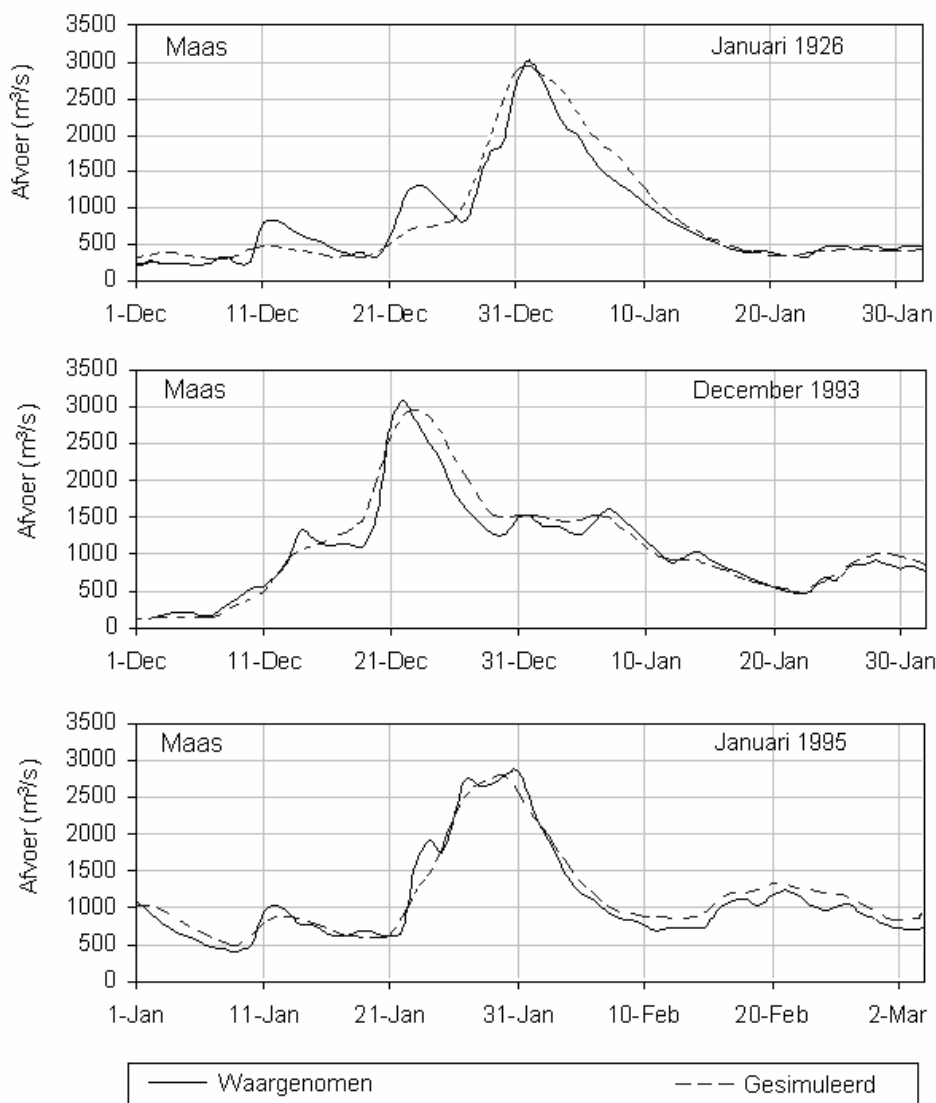
Tabel 1: Gereconstrueerd landgebruik in het stroomgebied van de Maas in de 20^e eeuw.

Landgebruik	1912-1932	1933-1967	1968-2000
	Vroeger		Huidig
Loofbos	25	21	19
Naaldbos	10	14	16
Weiland	20	20	20
Akkerbouw	34	34	34
Stedelijk gebied	9	9	9
Open water	2	2	2

Simulatieresultaten

Met het historisch landgebruik blijkt het model de afvoer van de Maas bij Monsin goed te simuleren (RE = 0,89). Voor de periode 1968–1998 zijn de RE-waarden verkregen met de grove dataset nauwelijks lager dan de RE-waarden verkregen met de gedetailleerde dataset (Van Deursen, 2004). Gezien het beperkte aantal neerslag- en temperatuurstations en de geheel andere wijze waarop de potentiële evapotranspiratie is benaderd, is dit resultaat zeer bevredigend. Ook de nauwkeurigheid waarmee de hoogste afvoerpieken worden gesimuleerd mag goed genoemd worden (figuur 7). Echter, voor veel van de waargenomen middelhoge afvoergolven onderschat HBV de piekafvoer. Daarnaast blijkt dat HBV het volume van de hoogwatergolf in de regel goed berekent, maar dat de precieze vorm van de afvoergolf niet altijd goed wordt gesimuleerd (zie ook Leander e.a., 2005).

Om het effect vast te stellen van veranderd landgebruik op de grootte van de afvoerpiek werd van de gesimuleerde afvoer voor ieder scenario de reeks met jaarlijkse maxima bepaald. Indien het simulatieresultaat met het vroegere landgebruik (1912–1932) als referentie wordt gebruikt, blijkt er weinig verandering in de piekafvoer vergeleken met de overige vier scenario's (tabel 2). De relatieve toename van het areaal met naaldbos resulteert in een hogere evapotranspiratie en leidt tot een afname van de afvoer. Het effect op de piekafvoer is nauwelijks waarneembaar en alleen significant indien het gehele bosareaal zou zijn omgevormd naar naaldbos. Verder blijkt het effect van een toename van het areaal naaldbos op extreme afvoerpieken geringer dan op de middelgrote en lagere hoogwaters.



Figuur 7: Gesimuleerde (Historisch landgebruik) en waargenomen drie grootste afvoerpieken in de Monsin afvoerreeks van de Maas.

Tabel 2: Procentueel verschil tussen de grootte van de gesimuleerde afvoerpiek voor vier scenario's en de referentie situatie (vroeger landgebruik).

Grootte afvoerpiek (m ³ /s)	Huidig landgebruik	Historisch landgebruik	100 % naaldbos	100% loofbos
> 2000	-1,7	-1,1	-6,3	2,3
1000 - 2000	-2,4	-1,5	-8,7	3,2
< 1000	-3,6	-2,5	-13,0	4,8

Uit een vergelijking tussen waargenomen en gesimuleerde afvoeren blijkt dat er een systematische overschatting van de gesimuleerde afvoer was voor de periode 1935-1965. Deze afwijking trad zowel in de zomer als in de winter op. Een duidelijke oorzaak voor deze afwijking valt niet te geven. Mogelijk spelen systematische fouten in de beschikbare neerslag- en afvoergegevens een rol. Samenvattend kan gesteld worden dat een mogelijke invloed van landgebruikverandering op de ratio tussen neerslag en afvoer te klein is om aangetoond te kunnen worden met de beschikbare gegevens.

Conclusies

Het vermoeden dat de hoogwaterfrequentie van de Maas is toegenomen, wordt door dit onderzoek bevestigd. Statistisch is aangetoond dat er sprake is van een significante toename van extreme afvoer sinds het begin van de tachtiger jaren. Dit geldt zowel voor jaar-extremen, winter hoogwaters en afvoeren groter dan 800 m³/s. Frequentieverdelingen van extreme afvoer voor verschillende perioden in de 20^e eeuw laten ook een toename zien van de middelgrote afvoerpieken gedurende de laatste twee decennia.

Statistische analyse van extreme neerslag voor dezelfde periode (1912–2002) toont aan dat de jaarlijkse maxima gedurende 3, 5, 7, 10 en 15 dagen sinds 1980 significant zijn toegenomen. Dat geldt ook voor de frequentie waarmee natte en zeer natte dagen voorkomen. Ook is er een significante toename van de hoeveelheid neerslag gedurende zeer natte dagen in het winterhalfjaar sinds 1980. Verder blijkt er een goede correlatie te bestaan tussen de antecedente neerslaghoeveelheid en de maximum winterafvoer.

De toename van de hoogwaterfrequentie lijkt eenvoudig te verklaren uit de toename van extreme neerslaghoeveelheden. Een mogelijke invloed van veranderingen in het stroomgebied van de Maas kan niet worden aangetoond. De belangrijkste verandering in landgebruik is een verschuiving van het areaal loofbos naar naaldbos. De simulatieresultaten laten zien dat dit nauwelijks van invloed is geweest op het voorkomen van extreem hoogwater in de Maas.

Literatuur

- Ashagrie, A.G., P.J.M. de Laat, M.J.M. de Wit, M. Tu en S. Uhlenbrook (2006)** Detecting the influence of land use changes on Floods in the Meuse River Basin: the predictive power of a ninety-year rainfall-runoff relation; in: *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 3, pag 529–559.
- Bergström, S. en A. Forsman (1973)** Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model; in: *Nordic Hydrology*, 4, pag 147–170.
- Booij, M.J. (2002)** Appropriate modelling of climate change impacts on river flooding; proefschrift, Technische Universiteit Twente.
- Booij, M.J. (2005)** Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions; in: *Journal of Hydrology*, vol 303, pag 176–198.
- Chbab, E.H. (1995)** How extreme were the 1995 flood waves on the rivers Rhine and Meuse?; in: *Phys. Chem. Earth*, vol 20 (5–6), pag 455–458.
- Deursen, W. van (2004)** Afregelen HBV-model Maasstroomgebied; Rapportage aan Rijks-

- waterstaat RIZA; Carthago Consultancy, Rotterdam.
- Gellens, D. (2000)** Trend and correlation analysis of k-day extreme precipitation over Belgium; in: *Theor. Appl. Climatol.*, vol 66 (1–2), pag 117–129.
- Guzman, J.A. en M.L. Chu (2003)** SPELL-Stat statistical analysis program; Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguier, M., Van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. en Johnson, C.A. (red) (2001)** Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press; http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm.
- Laat, P.J.M. de, en P. Varoonchotikul (1996)** Modelling evapotranspiration of dune vegetation; in: V.P. Singh en B. Kumar (red), *Surface-Water Hydrology*; Kluwer, 1, pag 19–27.
- Leander, R., T.A. Buishand, P. Aalders en M.J.M. de Wit (2005)** Estimation of extreme floods of the river Meuse using a stochastic weather generator and a rainfall-runoff model; in: *Hydrol. Sci. J.*, vol 50 (6), pag 1089–1103.
- Middelkoop, H. en C.O.G. van Haselen (red) (1999)** Twice a river: Rhine and Meuse in The Netherlands; RIZA-rapport no. 99.003, RIZA, Arnhem.
- Nash, J.E. en J.V. Sutcliffe (1970)** River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion on principles; in: *Journal of Hydrology*, vol 10, pag 282–290.
- Parmet, B., W. van de Langemheen, E.H. Chbab, J.C.J. Kwadijk, N.N. Lorenz en D.K. Parmet (2001)** Analyse van de maatgevende afvoer van de Maas te Borgharen; RIZA-rapport 2002.013, RIZA, Arnhem.
- Pettitt, A.N. (1979)** A non-parametric approach to the change-point problem; in: *Appl. Statist.*, vol 28 (2), pag 126–135.
- Roo, A.P.J. de, M. Odijk, G. Schmuck, E. Koster en A. Lucieer (2002)** Assessing the effects of land-use changes on floods in the Meuse and Oder catchment; in: *Phys. Chem. Earth (B)*, 26, pag 593–599.
- Tu, M. (2006)** Assessment of the effects of climate variability and land use change on the hydrology of the Meuse river basin; proefschrift, UNESCO-IHE, Delft.
- Tu, M., P.J.M. de Laat, M.J. Hall en M.J.M. de Wit (2005a)** Precipitation variability in the Meuse basin in relation to atmospheric circulation; in: *Water Sci. Technol.*, vol 51 (5), pag 5–14.
- Tu, M., M.J. Hall, P.J.M. de Laat en M.J.M. de Wit (2005b)** Extreme floods in the Meuse river over the past century: aggravated by land-use changes?; *Phys. Chem. Earth*, vol 30 (4–5), pag 267–276.
- Vaes, G., P. Willems en J. Berlamont (2002)** 100 years of Belgian rainfall: are there trends?; in: *Water Sci. Technol.*, vol 45 (2), pag 55–61.
- Wit, M.J.M. de, P.M.M. Warmerdam, P.J.J.F. Torfs, R. Uijlenhoet, E. Roulin, A. Cheymol, W.P.A. van Deursen, P.E.V. van Walsum, M. Ververs, J.C.J. Kwadijk en H. Buiteveld (2001)** Effect of climate change on the hydrology of the river Meuse; Rapport no. 104, WUR, Wageningen.
- WL | Delft Hydraulics (1994)** Onderzoek watersnood Maas, Deelrapport 4: Hydrologische aspecten; WL | Delft Hydraulics, Delft.
- WL | Delft Hydraulics (2004)** HR 2006 herberekening werklijn Maas; WL | Delft Hydraulics, Delft.