



Heeft de Rijnafvoer bij Lobith een maximum?

oktober 2016

Samenvatting

Vertoont de Rijnafvoer bij Lobith een bovengrens die ook bij extreme condities niet wordt overschreden? In het Deltaprogramma is uitgegaan van een bovengrens. Recente modelstudies met het modelsysteem GRADE, dat neerslag in het stroomgebied vertaalt naar hoogwater in de rivier, laten dit niet zien. Een internationale groep experts zegt dat de modellering van de overstromingen in Duitsland niet geheel juist is en concludeert dat er wel degelijk sprake is van een bovengrens (Hegnauer et al., 2015a).

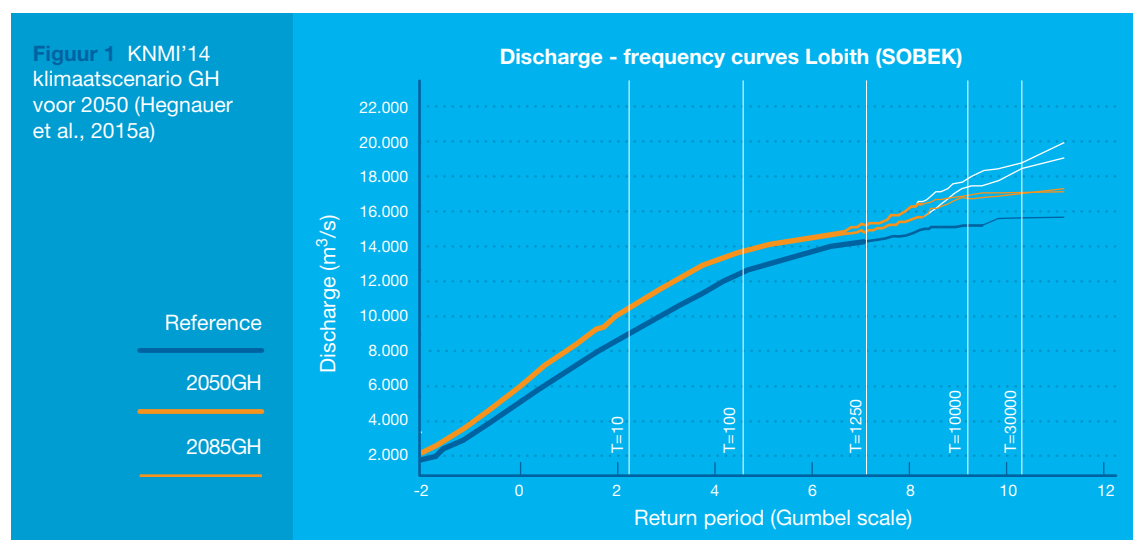
Deze notitie gaat nader in op de modellering van overstromingen in Duitsland en komt tot de conclusie dat er – binnen het beschouwde bereik van afvoeren bij Andernach – inderdaad sprake is van een bovengrens in de afvoer bij Lobith en dat die ligt op ongeveer 17.500 m³/s. Deze waarde is consistent met de conclusies van de expertgroep (bovengrens tussen 17.000 en 18.000 m³/s) en wijkt – gezien de onzekerheden – niet wezenlijk af van de 18.000 m³/s die het Deltaprogramma heeft gehanteerd. De waarde van 17.500 m³/s is gebaseerd op de situatie dat de waterkeringen langs het traject Wesel-Lobith versterkt zijn conform de plannen die volgens de huidige planning uiterlijk in 2025 geïmplementeerd zijn. Cruciaal voor het bestaan van dit maximum is de ‘ventielwerking’ van de dijkringen 42 en 48, die bij extreme afvoeren bij Wesel grote hoeveelheden water te verwerken krijgen.

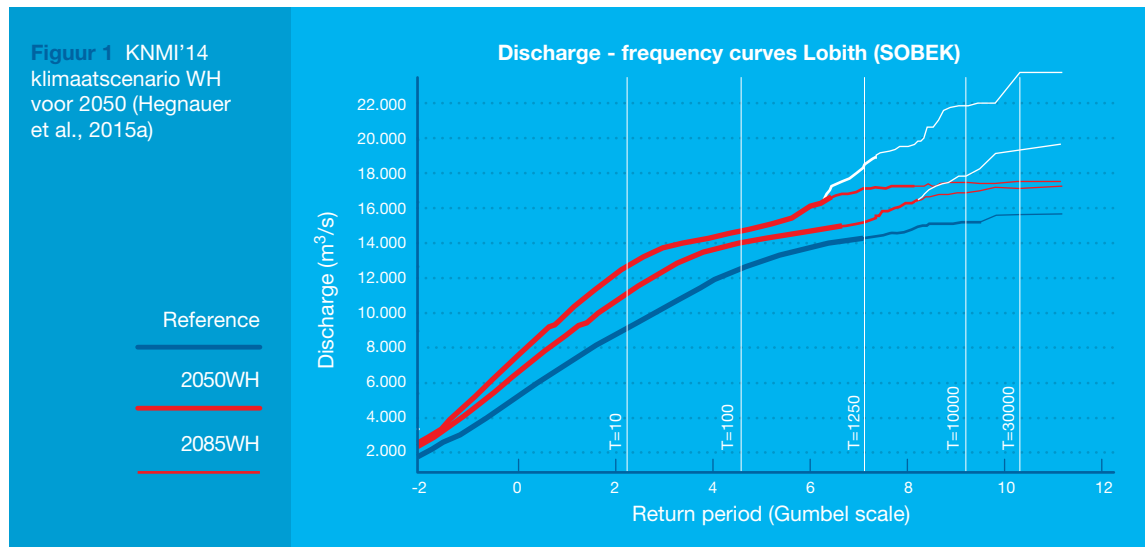
1 Inleiding

De Rijnafvoer bij Lobith is een belangrijk gegeven voor berekeningen met betrekking tot veiligheid tegen overstroming in Nederland. Een vraag die daarbij telkens opkomt, is of die afvoer een bovengrens (soms 'fysisch maximum' of 'hydraulisch maximum' genoemd) kent, met als logische vervolgvragen waar die bovengrens dan ligt en waarom de afvoer niet groter kan worden. Om daarover zinvol te kunnen adviseren, heeft het ENW inzicht nodig in de wijze waarop extreme hoogwaters in het Rijnstroomgebied tot stand komen en wat er onderweg naar Lobith met het water gebeurt. Daarvoor hebben studies met het model-systeem GRADE, zowel voor de huidige klimaatomstandigheden (Hegnauer et al., 2014) als voor de effecten van klimaatverandering, belangrijk uitgangsmateriaal geleverd. Ook een expert-discussie georganiseerd door Deltares (Hegnauer et al., 2015a) heeft sterk bijgedragen aan dit inzicht. Niettemin resteert een aantal open einden, met name over de effecten van overstromingen in Duitsland en de doorstroming van dijkringen 42 en 48 naar respectievelijk de Waal en de IJssel. Om hierover meer duidelijkheid te krijgen heeft het ENW dit onderzoek uit laten voeren, onder leiding van prof.dr.ir. H.J. de Vriend (voorzitter ENW-werkgroep Rivieren) en prof.dr.ir. M. Kok (voorzitter ENW-werkgroep Veiligheid), door ir. J. Pol (HKV), met steun van ir. M. Hegnauer (Deltares).

GRADE (Generator of Rainfall and Discharge Extremes) is een modelsysteem dat bestaat uit een neerslag-generator, een hydrologisch model (HBV) en een hydraulisch model (SOBEK). Dit systeem is gebruikt om de kans op extreme afvoeren in Rijn en Maas te onderzoeken, al dan niet inclusief de effecten van klimaatverandering. De resultaten van die verkenningen, noch die van de bovengenoemde expert-discussie, geven aanleiding om aan te nemen dat de gesimuleerde neerslag en de afvoer uit de deelstroomgebieden aan een maximum zijn gebonden. Als er dus sprake is van een bovengrens in de afvoer bij Lobith, moet dit samenhangen met het gedrag van de hoogwatergolf in de Rijn zelf (vandaar de benaming 'hydraulisch maximum') en de hoogte van de waterkeringen in het stroomgebied (vandaar de benaming 'fysisch maximum'). Deze notitie gaat daarom alleen in op aspecten van het hydraulische model (inclusief de hoogte van de waterkeringen) die van invloed zouden kunnen zijn op de maximale afvoer bij Lobith, met speciale aandacht voor de effecten van overstromingen langs de verschillende trajecten van de Rijn.

Ter illustratie van de problematiek: het Deltaprogramma neemt aan dat de afvoer bij Lobith een bovengrens kent en gaat uit van een waarde van 18.000 m³/s. Berekeningen met het modelsysteem GRADE (Hegnauer et al., 2014) bij de huidige klimaatomstandigheden laten zien dat zelfs bij zeer kleine kansen van voorkomen (10⁻⁵) deze waarde niet wordt gehaald, maar ook dat de resulterende werklijn niet afbuigt naar een eindige limietwaarde (zie ook ENW-advies 'GRADE en afvoerstatistiek'd.d. 1 mei 2015). Dit is nog sterker het geval als effecten van de klimaatverandering worden meegenomen. Figuur 1 toont de afvoeren volgens GRADE als functie van de terugkeertijd: de witte lijnen zijn zonder correctie, de gekleurde lijnen zijn met een correctie die uitgaat van een maximale afvoer van 18.000 m³/s bij Lobith. Twijfel over de wijze waarop in GRADE wordt omgegaan met overstromingen, vooral bij de dijkringen 42 en 48, rechtvaardigt een nadere studie naar de effecten van deze overstromingen en de vraag of de afvoer bij Lobith wellicht niet toch een bovengrens kent.





Deze notitie beschouwt achtereenvolgens de verschillende trajecten van de Rijn (Figuur 2). In elke paragraaf wordt een karakterisering gegeven van het traject, een beschrijving van de modellering van overstromingen in GRADE en een reflectie op de gedane aannamen en de effecten daarvan op de resulterende afvoeren. Ten slotte volgt een paragraaf met overige aandachtspunten en de belangrijkste conclusies met betrekking tot een mogelijke bovengrens aan de afvoer bij Lobith.



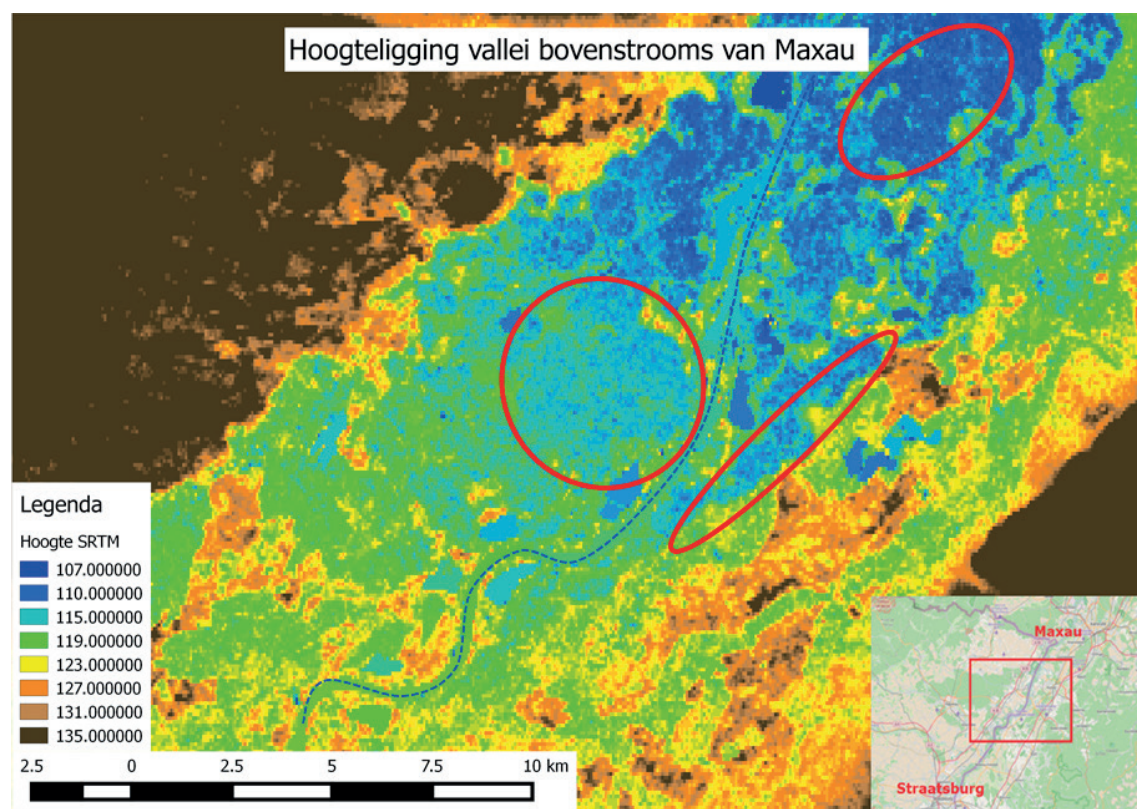
Figuur 2 Overzichtskaat Rijnstroomgebied (bron: http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/sondersam/hochwa/hochwa_s18.pdf)

2 Oberrhein tussen Basel en Maxau

Vanaf Basel gaat de Rijn over van een steile bergrivier naar een ondiep ingesneden rivier in een breed dal met enkele bedijkte gebieden.

Het deel tussen Basel (Rijn-km 160) en Maxau (Rijn-km 360) is nog niet opgenomen in de Sobek modellen, maar de voortplanting van een afvoergolf is gemodelleerd met hydrologische Muskingum routing. De voortplanting van een afvoergolf met Muskingum routing wordt bepaald door de looptijd (K) en demping (x) in vijf riviersecties tussen Basel en Maxau. In GRADE is gekozen voor $K=0,3$ dagen en $x=0,2$ (Hegnauer, 2015b) voor iedere sectie. Deze methode houdt geen rekening met overstromingen. De resultaten zijn niet gevalideerd met een geavanceerder hydraulisch model zoals Sobek of een 2D model.

Bij afvoeren tot circa $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ spelen overstromingen hier een beperkte rol. Dat blijkt uit kaarten van de waterdiepten voor een gemiddelde terugkeertijd van ongeveer 200 jaar, oftewel een piekafvoer van zo'n $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (IKSR, 2015). Daarom lijkt de Muskingum methode te volstaan voor afvoeren tot dit niveau. In GRADE komen veel hogere afvoeren voor, tot $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Maxau, waarbij de waterstand tot enkele meters hoger zou worden dan bij $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Uit analyse van een hoogtemodel blijkt dat in de vallei laaggelegen gebieden aanwezig zijn (Figuur 3). Bij dergelijk hoge waterstanden zullen deze gebieden waarschijnlijk overstromen, waardoor de piekafvoer bij Maxau wordt gereduceerd. Deze analyse is gebaseerd op een tamelijk onnauwkeurig hoogtemodel, zonder rekening te houden met volumes van gebieden en het tijdsverloop van de zijdelingse afvoer naar die gebieden toe. Daardoor is een precieze kwantificering van het effect op de afvoeren lastig te geven. Het valt echter te verwachten dat de reductie van de piekafvoer relatief klein is ten opzichte van de effecten van overstromingen verder benedenstrooms.



Figuur 3 Hoogte net bovenstrooms van Maxau uit SRTM data, 30 m resolutie, zonder correcties voor bos of bebouwing (http://www.opendem.info/download_srtm.html)

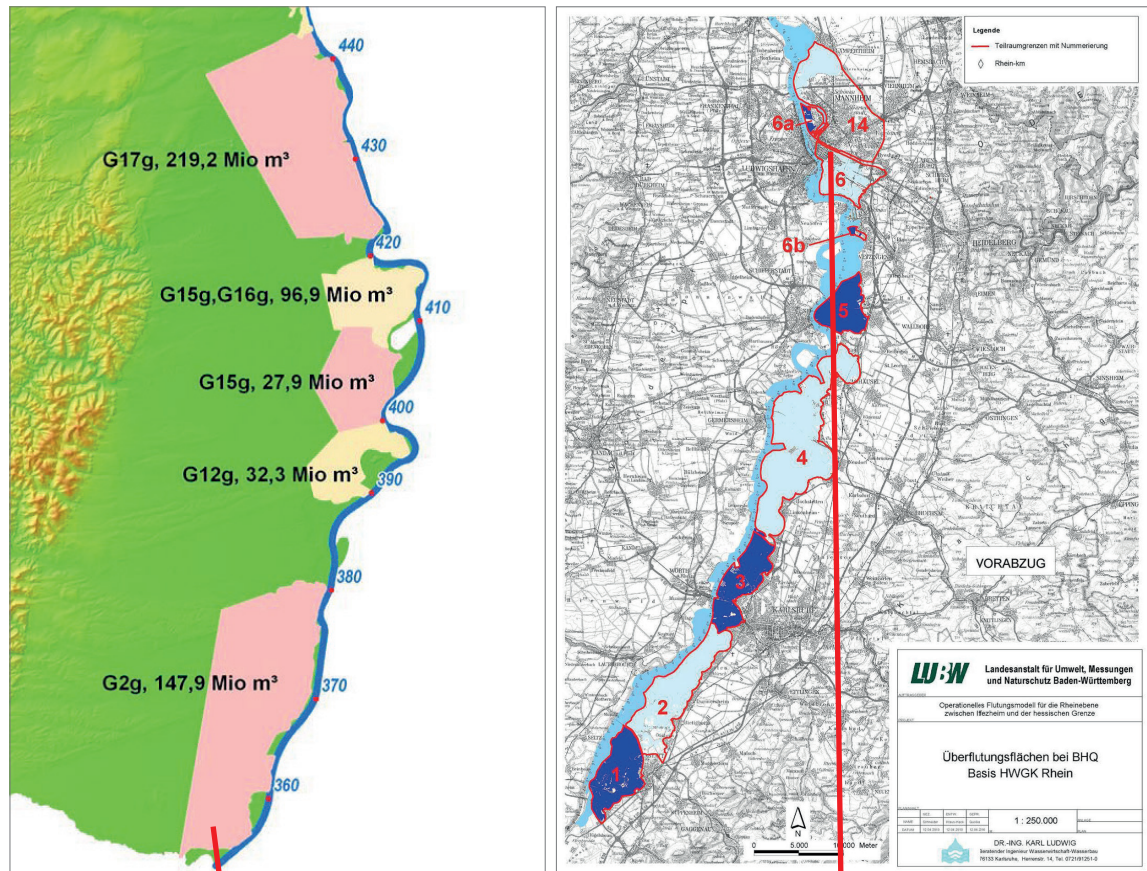
3 Oberrhein tussen Maxau en Kaub

Het rivierdal tussen Maxau en Kaub (Rijn-km 540) is relatief vlak en aan beide zijden zijn achter de dijken grote gebieden aanwezig die kunnen inunderen als de dijken doorbreken of overstromen. Belangrijke zijrivieren zijn de Neckar, Main en Nahe.

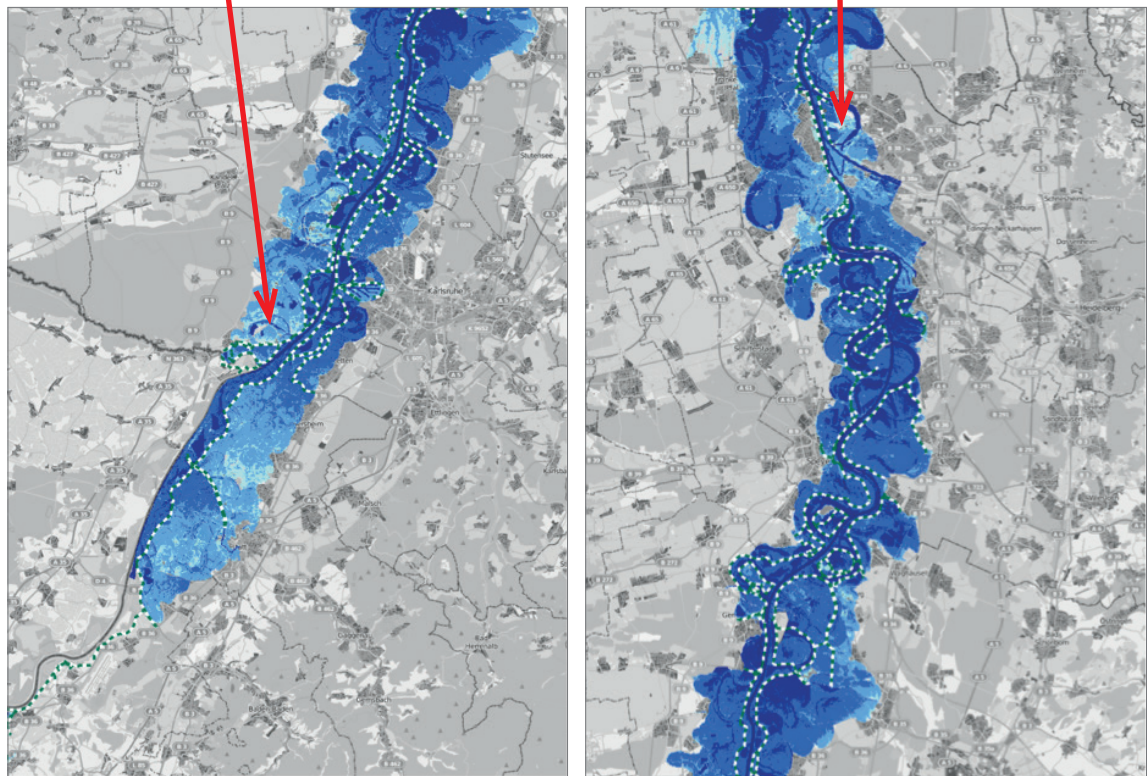
Vanaf Maxau maakt GRADE gebruik van het 1D SOBEK model, waarin overstromingsgebieden zijn gemodelleerd met 'bakjes', gebieden naast de rivier met een vaste oppervlakte waar water kan instromen en uitstromen via een inlaatwerk. Informatie over de oppervlakte, de gemiddelde bodemligging en het maximale volume van de gebieden is toegeleverd door Duitse overheden (Barneveld, 2011). Er is aangenomen dat de gebieden instromen bij de waterstand behorend bij de lokale ontwerpafvoer $+500 \text{ m}^3/\text{s}$ (ontwerpafoer bij Maxau is circa $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$), en over een breedte van 10% van de dijk lengte langs het gebied. Als het maximale volume in de polder is bereikt, gaat in het SOBEK-model de inlaat dicht en volgt de waterstand in het gebied niet langer die in de rivier. Voor dit maximale volume is 50% van het potentiële volume gekozen, enerzijds omdat niet het hele gebied kan vullen vanwege bijvoorbeeld een hellende bodem, anderzijds omdat een deel van het water achter de dijk langs terug zal stromen naar de rivier. De manier waarop het potentiële overstromingsvolume is bepaald, en de nauwkeurigheid daarvan, verschilt per deelstaat (Figuur 4 en Figuur 5). In Baden-Württemberg is het volume relatief nauwkeurig berekend met een stationaire afvoer van $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ in een operationeel 2D model. In Rheinland-Pfalz is het volume berekend met een GIS analyse. De werkwijze daarvan is niet bekend, maar de vorm van enkele gebieden lijkt niet goed overeen te komen met wat verwacht kan worden op basis van het hoogtemodel en de waterdieptekaarten van IKS. Dit suggereert een minder nauwkeurige bepaling of een compensatie van andere effecten. De manier waarop de oppervlaktes en volumes in Hessen zijn bepaald, is niet bekend.

De overstromingsgebieden zijn in SOBEK gedimensioneerd op basis van de ontwerpcondities ter plaatse ($5.000 - 6.000 \text{ m}^3/\text{s}$). Bij de extreme afvoeren (vanaf ca. $8.000 \text{ m}^3/\text{s}$) is het voorgeschreven maximale volume bereikt en wordt de inlaat gesloten voordat de piekafvoer optreedt. Als de inlaat niet zou worden gesloten, zou meer water in de gebieden geborgen kunnen worden naarmate de waterspiegel verder stijgt. Berekeningen met een specifieke afvoergolf laten zien dat in dat geval tot $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ extra reductie van de piekafvoer bereikt kan worden (Barneveld, 2011), hoewel dit afhankelijk van de golfvorm ook meer of minder kan zijn. Bij dergelijke afvoeren zijn alle dijken overstroomd, maar deze extra berging wordt in het model niet gemodelleerd.

Het eerder sluiten van de inlaat, de 50% op het volume, de 10% op de dijk lengte en het verwaarlozen van een toenemende overstromingsoppervlakte bij toenemende afvoeren, zorgen bij extreme afvoeren voor onzekerheden in de geschatte overstromingsvolumes. In hoeverre de schematisatie van de overstromingsgebieden representatief is, kan alleen worden gevalideerd met een 2D model gebaseerd op een nauwkeurig hoogtemodel. Daardoor is ook op dit traject een kwantificering van het effect op de afvoeren lastig te geven. Een overschatting van de piekafvoer in de orde van grootte van duizend kubieke meters per seconde voor de hoogste afvoeren lijkt echter niet onredelijk.



Figuur 4 Toegeleverde overstromingsgebieden Rheinland-Pfalz (links) en Baden-Württemberg (rechts). Barneveld (2011)



Figuur 5 Overstromingsgebieden uit IKSR kaarten rond Speyer (links) en Karlsruhe (rechts). IKSR (2015)

4 Mittelrhein tussen Kaub en Bonn

Tussen Kaub en Bonn (Rijn-km 655) ligt de Rijn in een sterk ingesneden vallei. Alleen het gebied tussen Koblenz en Andernach, na de samenvloeiing met de Moezel, is vlakker. Gezien de beperkte oppervlakte van dit vlakke gebied kan worden aangenomen dat overstromingen hier geen belangrijke rol spelen. Ook langs de zijrivieren Moezel en Lahn, die een aanzienlijke bijdrage aan de Rijnafvoeren leveren, ligt weinig areaal aan overstromingsvlaktes.

5 Niederrhein tussen Bonn en Wesel

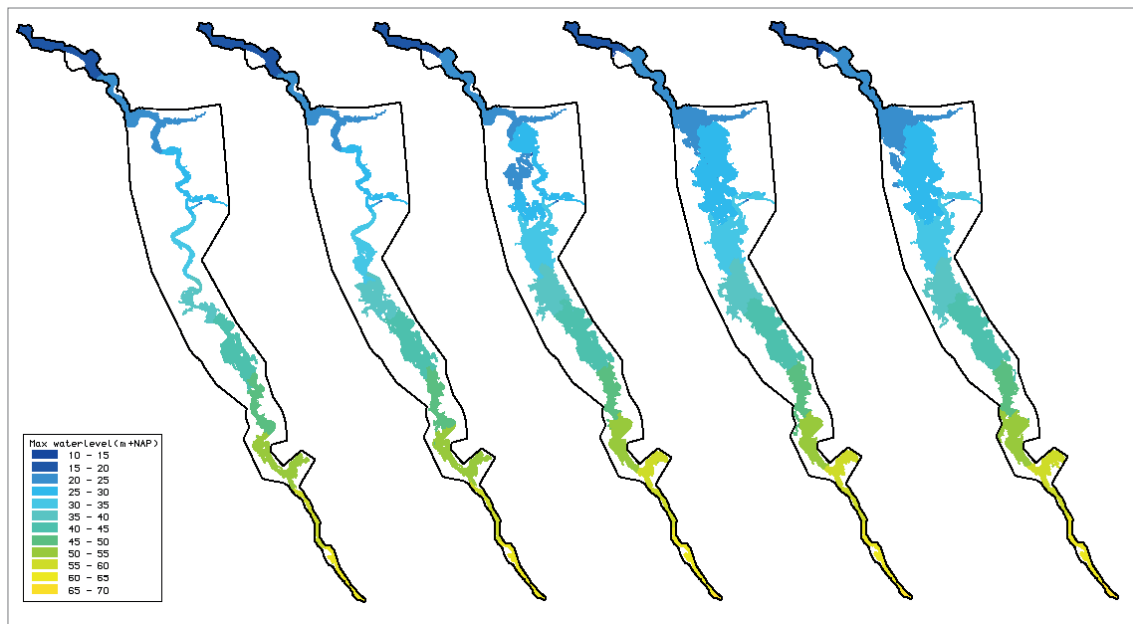
Tussen Bonn en Lobith (Rijn-km 862) liggen langs de Rijn grote overstromingsgebieden achter de dijken. De aanvoer uit zijrivieren zoals de Ruhr en de Lippe is relatief klein, samen circa 1.000 m³/s bij de meeste extreme hoogwaters. Het beschermingsniveau in dit gebied is 1/200 tussen Bonn en Düsseldorf, tot 1/500 vanaf Düsseldorf tot aan de Nederlandse grens.

Ook de overstromingsgebieden tussen Bonn en Wesel zijn in Sobek gemodelleerd als bakjes en bypasses, maar in dit deel is de instroom naar en uitstroom uit de gebieden afgeregeld op basis van 2D-berekeningen met Delft-FLS (Lammersen, 2004; Gudden, 2004; van der Veen et al., 2004) en WAQUA (Brinkmann, 2011) bij afvoergolven van respectievelijk 16.000 m³/s en 17.800 m³/s bij Andernach. Een belangrijk overstromingsgebied in dit traject is een mijnverzakkingsgebied tussen Düsseldorf en Wesel. Dit heeft in Sobek een oppervlakte van 69 km² en kan voor afvoergolven van 15.000 – 18.000 m³/s tot een afvoerreductie van 1.000 - 3.000 m³/s leiden. Bij de hoogste golven uit GRADE is het gebied echter al vol voordat de afvoer maximaal is, waardoor het nauwelijks effect heeft op de piekafvoer benedenstrooms van dit gebied. Deze kan daardoor oplopen tot 24.000 m³/s.

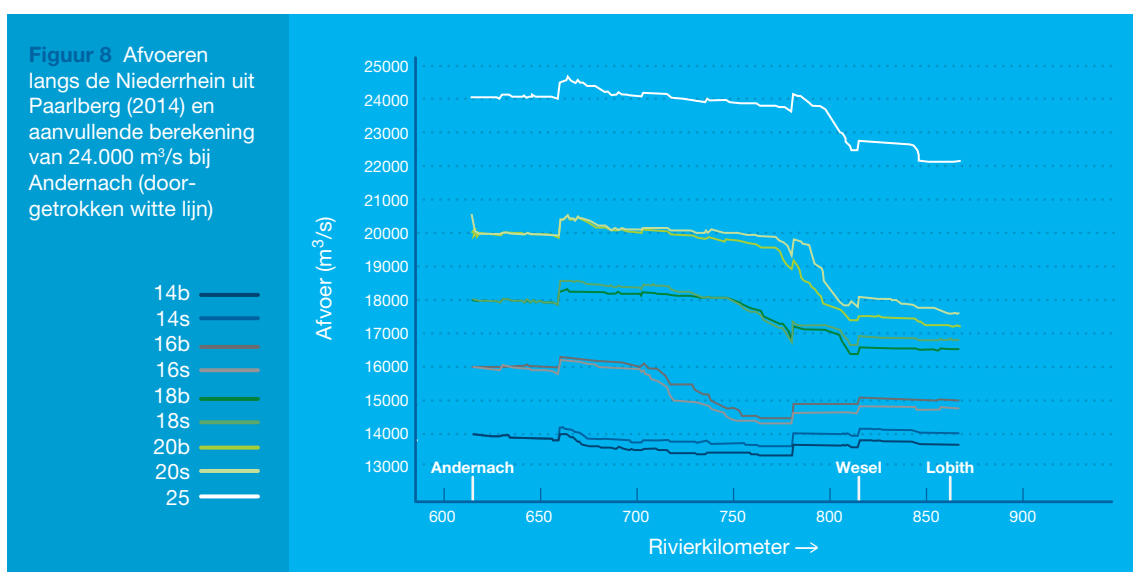
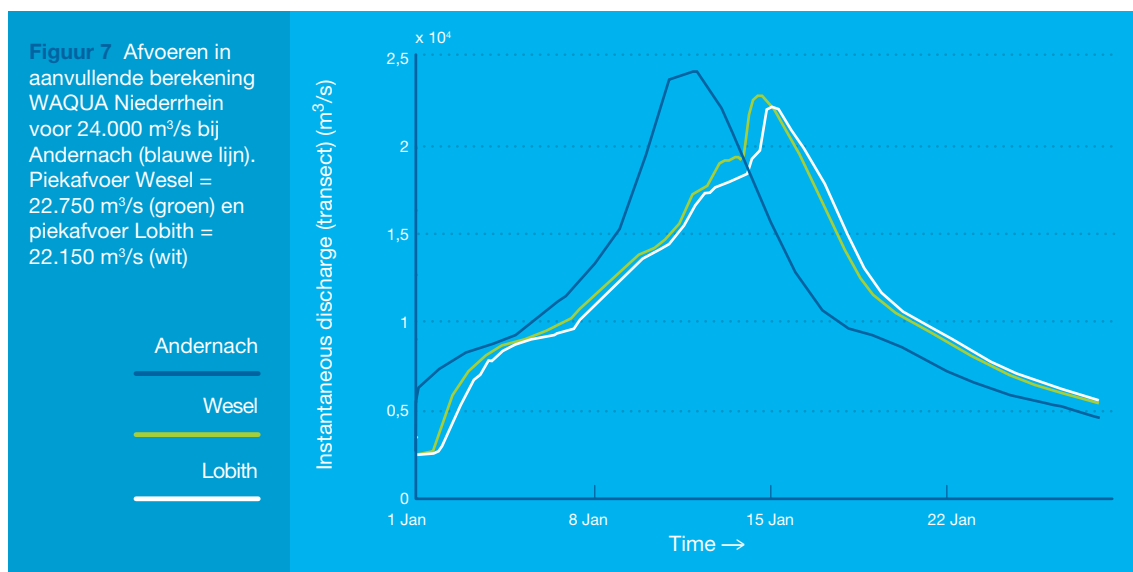
Tot afvoeren van 17.800 m³/s bij Andernach (circa 17.000 m³/s bij Lobith) komt het Sobek model goed overeen met het WAQUA model, maar bij hogere afvoeren van 19.000 en 20.000 m³/s bij Andernach geeft Sobek hogere waarden voor de afvoer bij Lobith (Vieira da Silva et al., 2013). Bij deze hogere afvoeren overstroomt in het WAQUA-model nog meer gebieden tussen Düsseldorf en Wesel. Omdat in de afregeling van Sobek op WAQUA slechts golven tot 17.800 m³/s zijn gebruikt, zitten deze overstromingsgebieden niet in Sobek, terwijl ze wel voor extra aftopping zorgen. De 19.000 en 20.000 m³/s golven leveren in WAQUA beide een afvoer van ca. 18.000 m³/s bij Lobith op wat overeenkomt met een afvoer van 18.500 m³/s bij Wesel. Uit de studie blijkt niet in hoeverre deze aftopping doorzet bij hogere afvoeren. Ook zijn de WAQUA-berekeningen uitgevoerd met afvoergolven met een standaardvorm, zodat ze geen inzicht bieden in het aftoppingsgedrag bij complexere afvoergolven zoals die in SOBEK zijn doorgerekend.

Om een prognose te kunnen maken van hoe de aftopping doorzet bij hogere afvoeren, is een verkennende berekening uitgevoerd met een golf van 24.000 m³/s bij Andernach in het WAQUA model. Hiervoor is de schematisatie met doorbraken uit Paarlberg (2014) gebruikt. De afvoer bij Andernach is vervangen door de hogere golf uit GRADE (Figuur 7), maar de lateralen zijn om praktische redenen gelijk gehouden aan die van de '20s'-golf (smalle 20.000 m³/s golf) uit Paarlberg (2014). Figuur 6 laat zien dat de oppervlakte van het overstroomde gebied nog toeneemt ten opzichte van de berekening met de 20.000 m³/s golf. Op enkele plaatsen komt het water zelfs tot aan de modelbegrenzing, waardoor het effect van overstromingen op de afvoer op die plaatsen onderschat kan zijn. Bij deze golf wordt de afvoer echter niet meer begrensd op 18.000 m³/s, maar neemt deze toe tot 22.200 m³/s bij Lobith (22.700 m³/s bij Wesel), (Figuur 7 en Figuur 8). Merk daarbij echter op dat het WAQUA model bijna geen overstromingen berekent langs het traject Wesel-Lobith, omdat het binnendijkse gebied daar (dijkkringen 42 en 48) niet is opgenomen in het model. De berekende afvoeren op dit traject zijn daarom niet representatief (zie ook punt 6).

Overstromingen tussen Bonn en Wesel hebben duidelijk een effect op de piekafvoeren, met name rond 16.000 m³/s, maar bij de meest extreme golven uit GRADE zijn de meeste overstromingsgebieden al vol, voordat de piekafvoer wordt bereikt. Dit leidt er toe dat in het geval van een golf van 24.000 m³/s bij Andernach een afvoer van 22.000 - 23.000 m³/s bij Wesel mogelijk is.



Figuur 6 Overstroomd gebied voor piekafvoeren van v.l.n.r. 14.406 m³/s, 15.323 m³/s, 17.822 m³/s, 19.000 m³/s en 20.000 m³/s bij Andernach (bron: Vieira da Silva et al., 2013). Aangevuld met resultaten van bovengenoemde 24.000 m³/s golf (uiterst rechts).



6 Niederrhein tussen Wesel en Lobith

Tussen Wesel en Lobith zijn twee overstromingsgebieden opgenomen in het Sobek model: de grens-overschrijdende dijkringen 42 (linkeroever) en 48 (rechteroever). Het eerste is gemodelleerd als bakje met een oppervlakte van 174 km² en een inlaat van 200 m breed. Bij de hoogste GRADE golven stijgt de waterstand in het bakje van dijkkring 42 maximaal een meter, maar het debiet van 700 m³/s door de inlaat is niet genoeg om de golf helemaal af te toppen. Bij afvoeren tot wel 5.000 m³/s boven de afvoercapaciteit (dat is de afvoer waarbij de dijken net niet overstromen) is het niet reëel om uit te gaan van een breedte waarover de dijken overstromen van slechts 200 m. Het water zal dan over een veel grotere lengte over de dijk stromen (als deze al niet doorbreekt) waardoor een veel groter debiet onttrokken wordt. Overstroming van de rechteroever (kademuur in Emmerich) is gemodelleerd als een waterstandsafhankelijke onttrekking van 0 - 60 m³/s. Deze onttrekking lijkt niet realistisch bij de genoemde extreme afvoeren en een kademuur van 2 km lengte en een kruinhoogte van 0,5 - 0,8 m onder die van de naburige dijken. De hieronder beschreven berekeningen geven aan dat het debiet over de kade veeleer in de orde van 600 m³/s ligt.

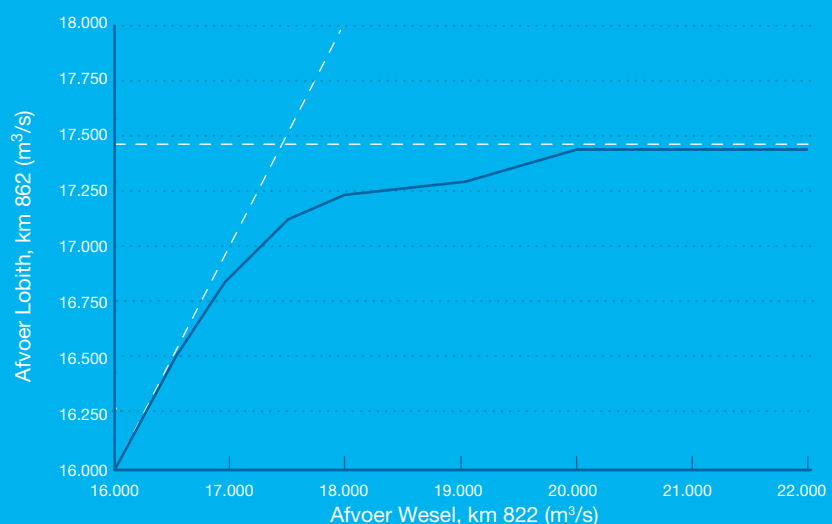
Het WAQUA model van de Niederrhein bevat geen binnendijs gebied benedenstrooms van Wesel. Om een betere inschatting te kunnen maken van de ontwikkeling van de afvoer tussen Wesel en Lobith, is een sterk vereenvoudigd rekenmodel gemaakt op basis van de kruinhoogtes en WAQUA berekeningen uit Paarlberg (2014). Bijlage B geeft een korte beschrijving van de analyse.

Uit de resultaten blijkt dat de dijken op dit traject vanaf 16.500 m³/s beginnen te overstromen. Dit is in overeenstemming met de schatting van Lammersen (2004). Bij toenemende afvoeren gaat een steeds groter deel van de dijk overstromen. Onder de aanname dat het volume van het overstromingsgebied niet beperkend is (grote dijkringen en het water kan weg naar bijvoorbeeld de Achterhoek), is de verwachte maximale afvoer bij Lobith 17.500 m³/s. Om die 17.500 m³/s te bereiken is circa 18.000 - 20.000 m³/s bij Wesel (km 822) nodig (Figuur 9 en Figuur 13).

Bovenstaande berekening is gebaseerd op de situatie waarbij de waterkeringen langs het traject Wesel-Lobith versterkt zijn conform de plannen zoals die in 2005 bekend waren. Volgens de planning moeten de versterkingen in 2025 gereed zijn. Op dit moment zijn nog niet alle geplande dijkversterkingen uitgevoerd, waardoor de huidige maximale afvoer bij Lobith lager kan zijn dan de hierboven op basis van de geplande versterkingen berekende bovengrens van 17.500 m³/s. Het is nog niet zeker wanneer de resterende verbeteringen worden uitgevoerd, maar het lijkt het ENW wel realistisch om bij de bepaling van de maximale afvoer bij Lobith uit te gaan van de versterkte waterkeringen.

Hierbij wordt opgemerkt dat het berekende debiet over de dijken in deze situatie zeer hoog is. Op veel plaatsen is dit groter dan 50 l/s/m, maar op de rechteroever zijn ook uitschieters naar 400 - 500 l/s/m bij Rees en Emmerich. Bij dit debiet is een doorbraak van de kering waarschijnlijk.

Figuur 9 Afvoer Lobith als functie van afvoer Wesel



7 Overige aandachtspunten

Naast de modellering van overstromingen zijn nog enkele andere punten van belang bij het vaststellen van de maximale afvoer.

Samenvallen van piekafvoeren in hoofd- en zijrivieren

Een belangrijke factor in de hoogte van de piekafvoer is het tijdsverschil tussen het optreden van de piekafvoer in de Rijn en die in een grote zijrivier. Bij enkele geanalyseerde extreme afvoergolven vielen piekafvoeren van de Neckar, Main en Moezel vrijwel samen met de piekafvoer op de hoofdrivier (Figuur 12, bijlage A). Deze zijrivieren bereikten hun piek 0 - 2 dagen eerder dan de hoofdrivier. Hieruit kan men concluderen dat de belangrijkste zijrivieren niet via een ongunstigere timing kunnen zorgen voor nog veel hogere extreme afvoeren in de hoofdrivier. De benedenstroomse delen van de zijrivieren (bijvoorbeeld de laatste 52 km van de Moezel) zijn ook opgenomen in het SOBEK-model, zodat opstuwing in de zijrivieren wordt meegenomen.

Overloop of dijkdoorbraken

Bij afvoeren van ruim 20.000 m³/s bij Andernach zal er zoveel water over de dijken stromen dat doorbraken waarschijnlijk zijn. Uit eerder onderzoek (Gudden, 2004; Paarlberg, 2014) blijkt dat het sterk afhankelijk is van de golfvorm en van de doorbraaklocatie of doorbraken tussen Bonn en Wesel tot lagere of juist hogere afvoeren leiden. In het geval van een doorbraak tussen Wesel en Lobith stroomt het water waarschijnlijk niet meer voor Lobith terug in de Rijn. Dan zal een doorbraak tot lagere afvoeren leiden dan alleen overstromen. Omdat de faalkans van de dijken bij een gegeven afvoer niet bekend is, gaan we er voor de maximale afvoer van uit dat er geen doorbraken plaatsvinden tussen Wesel en Lobith. Dat leidt dus tot een conservatieve schatting van de maximale afvoer bij Lobith.

Kortsluiting dijkkringen 42 en 48

Bij Lobith heeft de afvoer een maximum als gevolg van overstromingen in Duitsland. Dit betekent echter niet dat extremere gebeurtenissen niet voorkomen. Deze komen dan echter tot uitdrukking in overstroming van dijkkring 42/48 en mogelijk terugstromen naar de Waal, respectievelijk de IJssel. Hierdoor neemt de belasting op het Nederlandse rivierengebied wel toe, ondanks de gelimiteerde afvoer bij Lobith.

Golfvorm Lobith

Daarnaast moet er rekening mee worden gehouden dat er geen duidelijk maximum is aan het volume van een hoogwater, waardoor de golfvorm wel breder wordt naarmate de kans van voorkomen kleiner wordt. Als slechts wordt gekeken naar de piekafvoer en niet naar de golfvorm als functie van de kans van voorkomen, ontstaat een onvolledig beeld van de belasting op de waterkeringen en worden de effecten van extreme hoogwaterstanden op bijvoorbeeld piping en macrostabiliteit waarschijnlijk onderschat.

Beleidswijzigingen

De Duitse overheden zetten in op gevolgbeperking (Hegnauer et al., 2015a) en niet op verdere verhoging van de dijken. Als zij toch de dijken verhogen, kan dat invloed hebben op de maximale afvoer. In het algemeen zal verdere dijkverhoging tussen Wesel en Lobith leiden tot een hogere maximale afvoer, maar dijkverhoging verder bovenstrooms kan ook zorgen voor betere aftopping van extreme afvoergolven en dus een lagere piekafvoer bij bepaalde kans van voorkomen (doordat overstromingsgebieden niet 'voortijdig' instromen).

8 Conclusie

Door het overstromen van dijken en kademuren tussen Wesel en Lobith, is er – binnen het onderzochte bereik van afvoeren bij Andernach – sprake van een bovengrens in de afvoer bij Lobith, ter grootte van circa 17.500 m³/s. Ook als de dijken niet bezwijken, zal het extra water instromen in de dijkkringen 42 en 48. Om deze bovengrens in de afvoer te bereiken, is een afvoer van minimaal 18.000 - 20.000 m³/s bij Wesel nodig.

Overstromingen tussen Bonn en Wesel reduceren de piekafvoeren. Maar omdat het hier gaat om gebieden met een beperkt volume, zijn de meeste overstromingsgebieden al vol voor de piekafvoer wordt bereikt bij de meest extreme golven uit GRADE. Dit leidt er toe dat bij een afvoer van bijvoorbeeld 24.000 m³/s bij Andernach, een afvoer van 22.000 - 23.000 m³/s bij Wesel mogelijk is. Er is daar dus nog geen sprake van een fysisch of hydraulisch maximum.

Er zijn verschillende redenen om aan te nemen dat GRADE het effect van overstromingen op de Oberrhein onderschat, en dus afvoeren bij Andernach overschat. De bovengrens in de afvoer tussen Wesel en Lobith maakt de afvoer bij Andernach echter minder van belang. Een afvoer van 24.000 m³/s bij Andernach leidt immers tot ongeveer dezelfde afvoer bij Lobith als een afvoer van 22.000 m³/s. Dus zelfs als de afvoeren bij Andernach met 2.000 m³/s zijn overschat, heeft dit bij de hoogste afvoeren geen invloed op de afvoer bij Lobith.

Hieruit volgt dat het traject tussen Wesel en Lobith, met name de 'ventielwerking' van de dijkkringen 42 en 48, doorslaggevend is voor de hoogste afvoeren bij Lobith. De berekende bovengrens van 17.500 m³/s is een 'best estimate' volgens de huidige inzichten, uitgaande van de geplande versterkingen tot 2015 langs dit traject en binnen het bereik van de beschouwde afvoeren. Deze waarde kan veranderen bij wijziging van de uitgangspunten. Belangrijke onzekerheidsbronnen zijn de mate waarin geplande versterkingen daadwerkelijk worden uitgevoerd, de zomerbedruwheid bij extreme afvoeren, het optreden van dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith en de mate waarin het water bij een overstroming vrij kan afstromen.

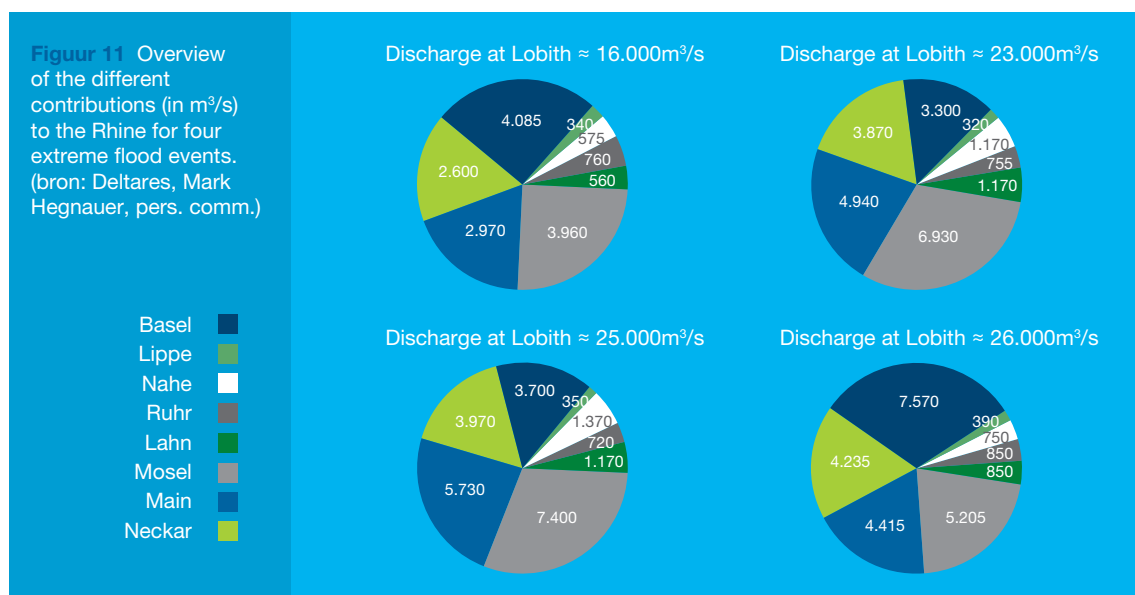
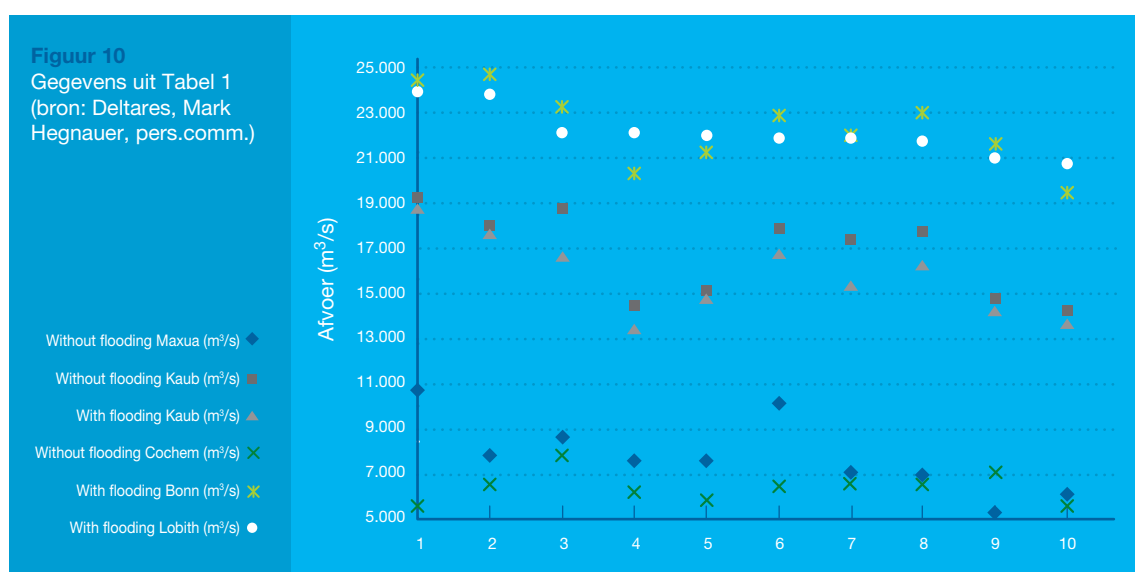
Referenties

- **Barneveld, H.J.** 2011
SOBEK-Models Rhine for Hval and GRADE. Including flood areas behind dikes. HKV Rapport PR2140.10, Oktober 2011, Lelystad.
- **Brinkmann** 2011
SOBEK-Modelle für HVAL: Deichüberströmen Hochwasser reduzierende Maßnahmen. Memo LANUV FB 53 – Martin Brinkmann 8.3. april 15, 2011.
- **Gudden, J.** 2004
Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Nederrijn. Deelrapport: Overstromingen in Nordrhein-Westfalen en Gelderland. ISBN 9036956692, December 2004, Arnhem, Nederland.
- **Gudden, J., Overmars, B.** unpublished
Notitie over herhalingstijden. 16 februari 2004.
- **Hegnauer, M., J.J. Beersma, F.P. van den Boogaard, T.A. Buishand en R.H. Passchier** 2014
Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins - Final report of GRADE 2.0.
- **Hegnauer, M., Klijn, F., Kwadijk, J.** 2015a
The plausibility of extreme high discharges in the River Rhine. Recommendations by an international expert panel and the Scientific Board of Deltares. Draft report v7, Deltares report 1220042-004-ZWS-0008.
- **Hegnauer, M.** 2015b
Pers. communicatie, e-mail 24 november 2015.
- **IKSR** 2015
Rheinatlas 2015, via http://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/ICPR_DE/
- **Lammersen, R.** 2004
Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Nederrijn. Eindrapport voor de Duits-Nederlandse Werkgroep Hoogwater. ISBN 9036956390.
- **Paarlberg, A.** 2014
GRADE Nederrijn: Dijkoverstroming vs dijkdoorbraak. HKV Rapport. PR2942.10, September 2014, Lelystad.
- **Sperna Weiland, F., M. Hegnauer, L. Bouaziz, J. Beersma** 2015
Implications of the KNMI'14 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse comparison with earlier scenario studies. Deltares rapport 1220042-000-ZWS-0004.
- **Vieira da Silva, J., Barneveld, H.J., Wijbenga, J.H.A.** 2013
GRADE. Dijkoverstroming Nederrijn: SOBEK versus WAQUA. HKV Rapport PR2479.20, Maart 2013, Lelystad.
- **Wijbenga, J.H.A., Paarlberg, A.J., Vieira da Silva, J. & van Wijk, G.P.** 2008
Grensoverschrijdende afstemming van waterstandsverlagende maatregelen; 2-D berekeningen met WAQUA. HKV rapport PR1350.10, november 2008.

Bijlage A Extreme afvoergolven uit GRADE

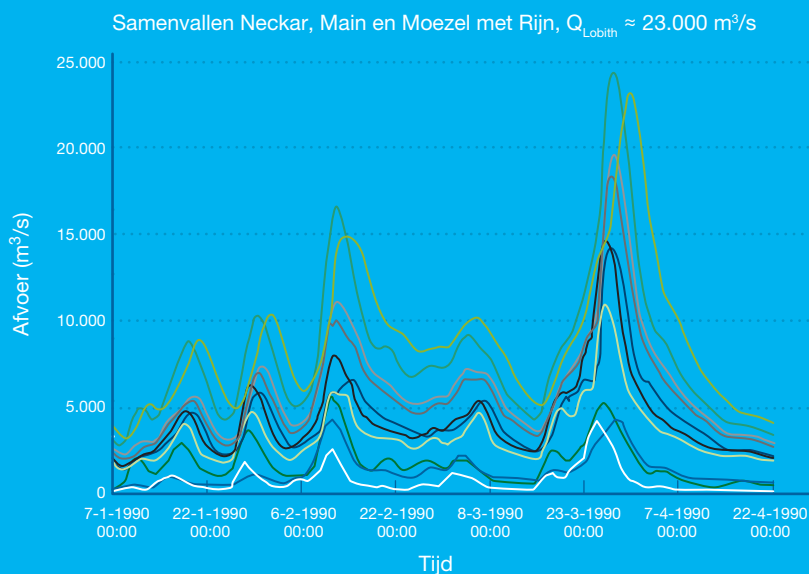
#	WITHOUT flooding Maxau	WITHOUT flooding Kaub	WITH flooding Kaub	WITHOUT flooding Cochern	WITH flooding Bonn	WITH flooding Lobith
1	10.690	19.220	18.810	5.550	24.360	23.850
2	7.770	18.030	17.650	6.540	24.650	23.830
3	8.560	18.800	16.650	7.790	23.280	22.120
4	7.550	14.410	13.430	6.130	20.350	22.120
5	7.560	15.110	14.810	5.850	21.230	21.950
6	10.140	17.810	16.780	6.440	22.830	21.900
7	7.080	17.430	15.380	6.630	22080	21.870
8	6.980	17.690	16.240	6.570	22.910	21.710
9	5.170	14.740	14.200	7.060	21.580	21.120
10	6.060	14.140	13.580	5.590	19.440	20.700

Tabel 1 GRADE output (in m³/s) for climate scenario 2085WH (bron: Deltares, Mark Hegnauer)

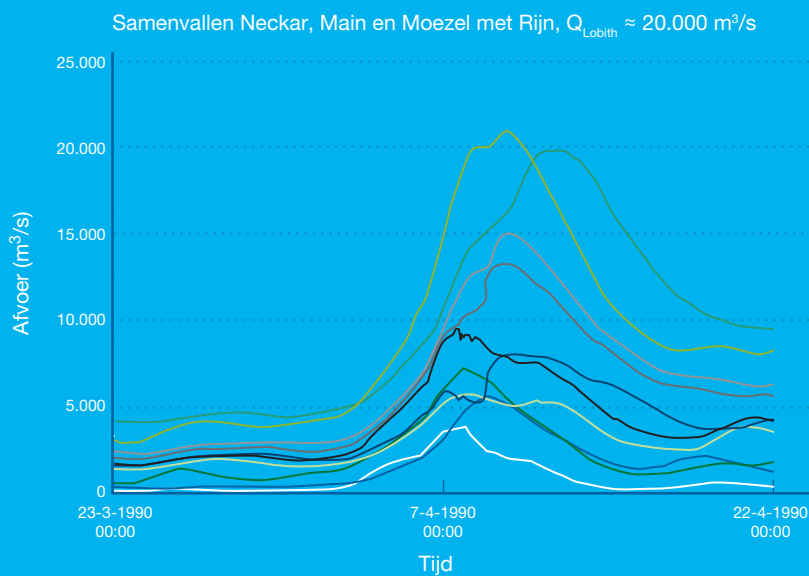


Figuur 12
Samenvallen van
zijrivieren bij twee
extreme GRADE golven

Q voor Main —
Q Main —
Q na Main —
Q voor Mosel —
Q Mosel —
Q na Mosel —
Q Lobith —
Q voor Neckar —
Q Neckar —
Q na Neckar —



Q voor Main —
Q Main —
Q na Main —
Q voor Mosel —
Q Mosel —
Q na Mosel —
Q Lobith —
Q voor Neckar —
Q Neckar —
Q na Neckar —



Bijlage B Afvoerloop Wesel-Lobith

Het traject tussen Wesel en Lobith lijkt doorslaggevend te zijn voor de maximale afvoer bij Lobith, omdat de binnendijkse bergingscapaciteit langs dit traject vrijwel onbegrensd is (Sperna Weiland et al., 2015), in tegenstelling tot bovenstroomse trajecten. Van dit gebied bestaat geen WAQUA model met overstromingsgebieden. Om een snelle inschatting te kunnen geven van de maximale afvoeren in dit traject is een sterk vereenvoudigd model gemaakt. De rivier tussen rivierkm 822 en 862 is opgedeeld in segmenten van 100 m, waarin voor ieder segment wordt berekend hoeveel water er over de dijk stroomt bij een constant debiet:

$$Q_{uit} = Q_{in} - Q_{ov,links} - Q_{ov,rechts}$$

$$Q_{ov} = 1.7 \cdot L \cdot (H - h_{kr})^{1.5}$$

waarin voor ieder segment:

Q_{uit} en Q_{in} zijn respectievelijk het debiet dat uit en in het segment stroomt	[m ³ /s]
Q_{ov} is het debiet dat over de dijken stroomt	[m ³ /s]
L is de dijk lengte	[m]
H is de lokale waterstand bij de dijk	[m+NAP]
h_{kr} is de gemiddelde kruinhoogte	[m+NAP]

De waterstand bij de dijk is gelijk genomen aan de waterstand op de as van de rivier, die is afgeleid uit de afvoerwaterstandsrelaties uit Paarlberg (2014) en Qin. Schematisaties, ruwheden en andere modelkarakteristieken zijn dus gelijk aan het model in de studie van Paarlberg.

Uit Baseline zijn de kruinhoogtes aan beide zijden van de rivier bekend, voor de situatie dat de waterkeringen langs het traject Wesel-Lobith versterkt zijn conform de plannen tot 2015 (aangeduid met dh15 in Wijbenga et al., 2009). Paarlberg (2014) heeft deze dijkpunten toegekend aan hectometers op de as van de rivier. Per hectometer is de dijk lengte L de som van de dijk lengtes van de toegekende punten en is de kruinhoogte h_{kr} het gemiddelde van de kruinhoogtes van de punten.

Figuur 13 en Figuur 14 tonen de resultaten voor verschillende afvoerniveaus. Uit deze berekening volgt dat de maximale afvoer bij Lobith circa 17.500 m³/s is.

Deze maximale afvoer is sterk afhankelijk van de waterstand aan de dijk, bij een bepaalde afvoer. In het geval van hogere waterstanden bij dezelfde afvoer, zal overstromen beginnen bij een lager afvoerniveau, waardoor de maximale afvoer lager wordt. Waterstanden kunnen in werkelijkheid bijvoorbeeld afwijken van de hier gebruikte waarde vanwege:

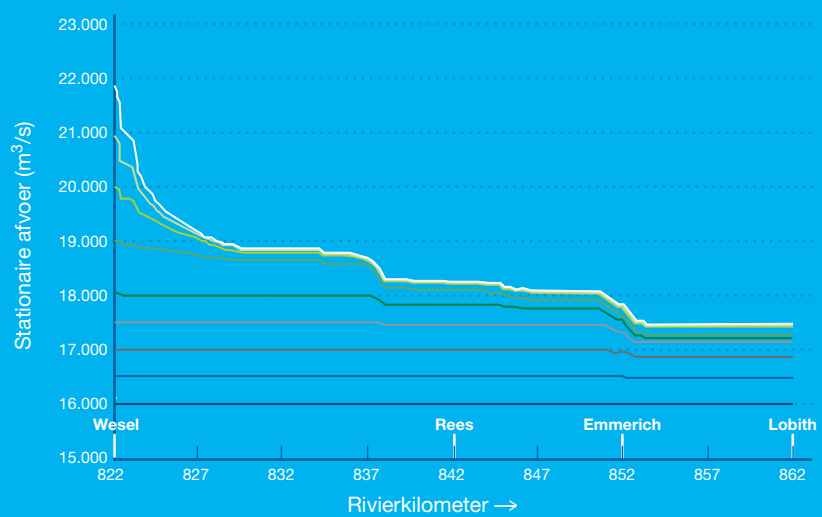
- de eenvoudige benadering: in scherpe bochten met brede uiterwaarden kan de waterstand aan de dijk circa 10 cm afwijken van de as van de rivier.
- ruwheid: de zomerbedruwheid bij zeer extreme afvoeren is relatief onzeker. De WAQUA-modellen zijn afgeregeld aan de hand van waargenomen (dus aanzienlijk lagere) afvoeren. Dat heeft geleid tot verschillende ruwheidswaarden in Nederland en Duitsland. De onderlinge consistentie van de gehanteerde ruwheidswaarden in GRADE en het WBI is een punt van aandacht (zie ook het ENW-advies met betrekking tot GRADE, 12 augustus 2015).

Om inzicht te krijgen in de gevoeligheid van de maximale afvoer voor veranderingen in de waterstand, is de lokale waterstand over het hele traject gevarieerd met ± 10 cm ten opzichte van de WAQUA berekeningen van Paarlberg (2014). Bij een 10 cm lagere waterstand is de maximale afvoer bij Lobith 17.800 m³/s; bij een 10 cm hogere waterstand is dit 17.100 m³/s. Dit is nadrukkelijk geen onzekerheidsband, omdat hierin niet de waarschijnlijkheid van de variaties is meegenomen.

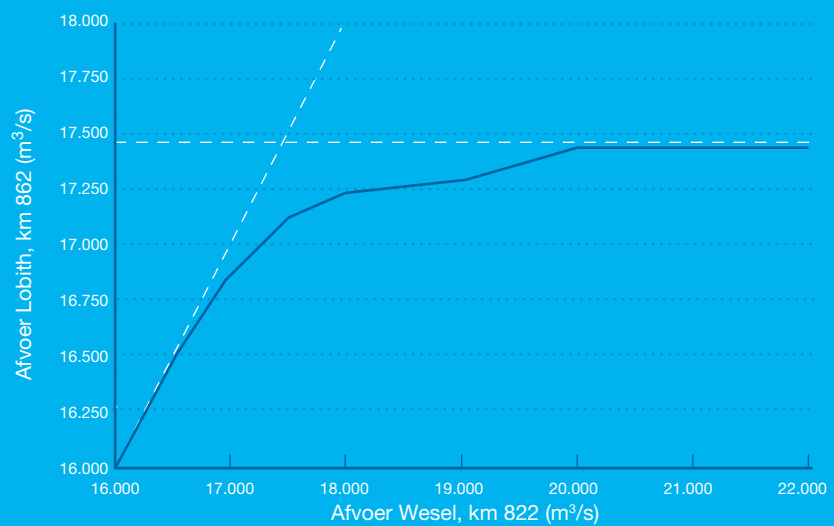
Op dit moment zijn de geplande dijkversterkingen nog niet volledig uitgevoerd. Daardoor is de huidige maximale afvoer bij Lobith lager dan de hierboven berekende waarde van 17.500 m³/s op basis van de geplande versterkingen.

Figuur 13
Afvoer Wesel-Lobith
bij afvoeren van
16.500 - 21.000 m³/s
bij Wesel

Q = 16.000 m³/s
Q = 16.500 m³/s
Q = 17.000 m³/s
Q = 17.500 m³/s
Q = 18.000 m³/s
Q = 19.000 m³/s
Q = 20.000 m³/s
Q = 21.000 m³/s
Q = 22.000 m³/s



Figuur 14 Afvoer
Lobith als functie van
afvoer Wesel



Colofon

Uitgave van het Expertisenetwerk Waterveiligheid
© 2016

Auteurs

prof.dr.ir. H.J. de Vriend, prof.dr.ir. M. Kok
ir. J. Pol, ir. M. Hegnauer

Contactgegevens

Expertisenetwerk Waterveiligheid
p/a Rijkswaterstaat WVL, afdeling Waterkeringen
t.a.v. ir. D. de Bake
Postbus 2232, 3500 GE Utrecht

E enwsecretariaat@rws.nl
I www.enwinfo.nl