

Opdrachtgever: **Deltares**

GRADE Niederrhein

Dijkoverstroming versus dijkdoorbraak



Opdrachtgever: **Deltares**

GRADE Niederrhein

Dijkoverstroming versus dijkdoorbraak



Auteur
Andries Paarlberg

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doelstelling	3
1.3	Leeswijzer	3
2	Uitgangspunten en randvoorwaarden	5
2.1	Inleiding	5
2.2	WAQUA-schematisaties	5
2.3	Randvoorwaarden golfberekeningen.....	6
2.3.1	Golfvormen Andernach	6
2.3.2	Laterale toestromen en onttrekkingen.....	7
2.3.3	Q-h relatie Pannerdensche Kop	8
2.4	Randvoorwaarden permanenties.....	9
3	Dijkoverstroming versus dijkdoorbraken	11
3.1	Inleiding	11
3.2	Maximale afvoeren en waterstanden in as rivier	11
3.3	Effect doorbraken op afvoer Wesel en Lobith.....	13
3.4	Quickscan extra doorbraaklocaties Niederrhein.....	17
4	Afvoercapaciteit Wesel-Lobith	27
4.1	Inleiding	27
4.2	Methode	27
4.3	Resultaat.....	27
5	Conclusies en aanbevelingen	33
6	Referenties	35

Lijst van tabellen

Tabel 1	Piekafvoeren van de WAQUA-berekeningen in dit project. De code van de golfvorm is toegelicht in de tekst.	6
Tabel 2	Effect op maximale afvoer bij Lobith en Wesel.	15
Tabel 3	Samenvatting van de Quicksan naar mogelijke extra doorbraaklocaties op de Niederrhein.	25

Lijst van figuren

Figuur 1	De Duitse Rijn van Andernach tot de Pannerdensche Kop. Getoond zijn de belangrijkste zijrivieren (blauwe lijnen), de dijkdoorbraken in het WAQUA-model van Wijbenga et al. (2008) en de modelgrens van het 'innen'-model (zwarte lijn) en 'ausßen'-model (blauwe arcering).....	2
Figuur 2	Afvoergolven Andernach, breed.	7
Figuur 3	Afvoergolven Andernach, smal.....	7
Figuur 4	Laterale toestroming van de Lippe.....	8
Figuur 5	Qh-relatie Pannerdensche Kop (j05).	9
Figuur 6	Maximale afvoeren in de as van de rivier voor de situatie met en zonder dijkdoorbraken.	11
Figuur 7	Maximale afvoeren in de as van de rivier voor de situatie met en zonder dijkdoorbraken van km 790 tot de Pannerdensche Kop.	12
Figuur 8	Maximale waterstanden in de as van de rivier voor de situatie met en zonder dijkdoorbraken.	12
Figuur 9	Verskil in maximale waterstanden in de as van de rivier voor de situatie met en zonder dijkdoorbraken.	13
Figuur 10	Afvoerverloop bij Wesel en Lobith voor de 8 golven. Getrokken lijnen zijn zonder doorbraak, onderbroken lijnen met doorbraak. De groene lijn geeft ter illustratie de laterale toestroom van de Lippe weer (opgeschaald met een factor 10 ter illustratie).....	14
Figuur 11	Afvoerverloop bij Wesel en Lobith voor de smalle golf met een piekafvoer van 20.000 m ³ /s bij Andernach (20s). Ook de afvoer van de Lippe en de afvoer door de doorbraak bij km 800 zijn getoond (de laatste twee tijdseries zijn opgeschaald met een factor 10 ter illustratie).	16
Figuur 12	Maximale waterstand rond Wesel voor de smalle golf met een piekafvoer van 20.000 m ³ /s bij Andernach (20s).	17
Figuur 13	Mogelijke doorbraak bij km 656-657. Links: waterstand en stroomsnelheid op dag 11 (Q=~17.000 m ³ /s). Rechts: inundatiekaart op het moment dat het gebied begint in te stromen.	19
Figuur 14	Mogelijke doorbraak bij km 662-666. Waterstand en stroomsnelheid op dag 11.....	20
Figuur 15	Mogelijke doorbraak bij km 685. Start van inundatie bandijk.....	21
Figuur 16	Mogelijke doorbraak bij km 685. Maximale waterstand tijdens de afvoergolf.....	21
Figuur 17	Mogelijke doorbraak bij km 704. Waterstand en stroomsnelheid op dag 13.	22
Figuur 18	Overstroomd gebied bij km 734. Bandijken zijn hier zwarte en grijze lijnen.....	23
Figuur 19	Overstroming van kaden bij km 781-783.	24
Figuur 20	Overstroming van dijk bij km 834.	25
Figuur 21	Waterstanden bij permanenties op het traject Wesel-Pannerdensch Kop. In rood en groen zijn de kruinhoogtes van de linker en rechter bandijk getoond.	28
Figuur 22	Locaties met beperkte dijkhoogte, locaties A-D.	29
Figuur 23	Locaties met beperkte dijkhoogte, locaties E-H.	30
Figuur 24	Waterstand bij 18.000 m ³ /s km 810 – km 833.....	31
Figuur 25	Waterstand bij 18.000 m ³ /s km 828 – km 851.....	31
Figuur 26	Waterstand bij 18.000 m ³ /s km 849 – km 867.....	32

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Periodiek wordt in Nederland getoetst of de dijken nog voldoen aan de wettelijk gestelde eisen. Om deze toetsing te kunnen doen zijn zogeheten hydraulische randvoorwaarden nodig. In het Wettelijk Toets Instrumentarium 2017 wordt voor de afleiding van deze hydraulische randvoorwaarden gebruik gemaakt van GRADE (Generator of Rainfall And Discharge Extremes).

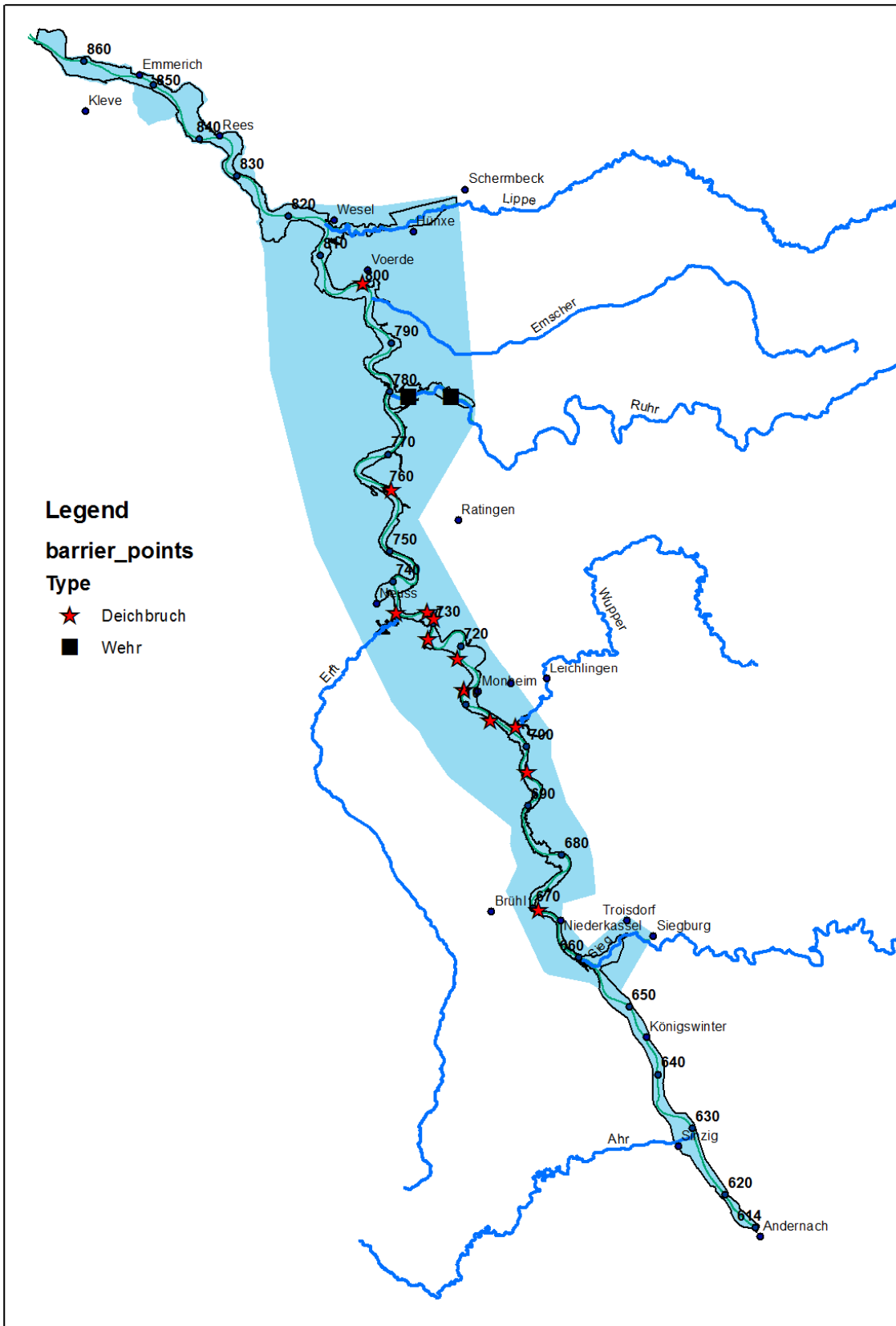
GRADE (Hegnauer et al., 2014) is een nieuwe methode, die op basis van lange, synthetische neerslagreeksen en hydrologische en hydraulische modelberekeningen de afvoerstatistiek bij Lobith (voor de Rijn) en Borgharen (voor de Maas) bepaalt. Onder afvoerstatistiek wordt in dit verband verstaan een werklijn en een (gemiddelde) golfvorm. De werklijn is het verband tussen afvoeren en de bijbehorende herhalingstijd. Via de werklijn kan dus bijvoorbeeld worden afgelezen welke afvoer hoort bij een 1/1250 jaar gebeurtenis (of voor elke andere willekeurige herhalingstijd tussen 1 en 100,000 jaar).

In het kader van de toepassing van GRADE in WT12017 heeft de werkgroep rivieren van het expertisenetwerk waterkeringen (ENW-R) geadviseerd om de afleiding van de werklijn bij Lobith te baseren op realistische, maar wel conservatieve aannames, ofwel de situatie met het grootste verwachte overstromingsrisico van de dijken in Nederland. Dit is door ENW-R uitgewerkt tot: houd wel rekening met overlopen van dijken in Duitsland, maar niet met het doorbreken van de dijken.

De vraag is echter: is het niet meenemen van dijkdoorbraken in Duitsland inderdaad een conservatieve aanname voor de bepaling van de afvoercapaciteit bij Lobith? De systeemwerking waarbij water "achterlangs" de dijken gaat meestromen kan in sommige gevallen immers leiden tot hogere afvoeren bij Lobith (zie bijvoorbeeld Gudden, 2004).

In voorliggend project geven we antwoord op bovenstaande vraag. Dat doen we door gebruik te maken van een bestaand WAQUA-model dat loopt van Andernach in Duitsland tot de Pannerdensche Kop (Figuur 1), waar de Bovenrijn splitst in de Waal en het Pannerdensch Kanaal. In het WAQUA-model is tussen grofweg km 650 en 810 een groot binnendijks gebied opgenomen (het zogenaamde 'ausse-model'), zodat binnendijkse gebieden daadwerkelijk kunnen inunderen en het afvoerloop (en dus waterstanden) in de rivier kunnen beïnvloeden. Daarnaast zijn er twee verschillende WAQUA-schematisaties beschikbaar: één waarbij de dijken kunnen overstromen, en één waarbij de dijken ten gevolge van de overstromingen ook op een aantal locaties doorbreken.

Een belangrijk tweede aspect van dit onderzoek betreft de afvoercapaciteit tussen Wesel en Lobith. Op dit traject is in de WAQUA-schematisatie een vaste buffer van 500 meter aan de binnendijkse zijde van de primaire waterkering (dijken, hoge gronden of andere keringsconstructies) opgenomen; dit betekent dat de schematisatie niet overal het gehele inundeerbare binnendijkse gebied dekt. Daarnaast zijn op dit traject geen dijkdoorbraken geschematiseerd. Gebruik van het 'ausse'-model voor dit traject geeft mogelijk een vertekend beeld van de werkelijkheid. Daarom is met een alternatief model waarbij de modelgrens ter plaatse van de primaire waterkering ligt, het zogenaamde 'innen'-model (Figuur 1), onderzocht wat de afvoercapaciteit is op dit traject.



Figuur 1 De Duitse Rijn van Andernach tot de Pannerdensche Kop. Getoond zijn de belangrijkste zijrivieren (blauwe lijnen), de dijkdoorbraken in het WAQUA-model van Wijbenga et al. (2008) en de modelgrens van het 'innen'-model (zwarte lijn) en 'ausser'-model (blauwe arcering).

1.2 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is om te onderzoeken of de aanname van ENW-R, dat de situatie waarbij geen rekening wordt gehouden met dijkdoorbraken in Duitsland, de hoogste afvoer en waterstanden bij Lobith oplevert. Met andere woorden: is dit inderdaad een conservatieve schatting van de maximale afvoer en waterstand bij Lobith?

De centrale vragen van voorliggend onderzoek zijn:

1. Wat is het verschil in afvoerverloop bij Wesel/Lobith tussen situaties waarbij met of zonder dijkdoorbraken wordt gerekend?
2. Wat is de afvoercapaciteit van het traject Wesel/Lobith?

1.3 Leeswijzer

Voor het beantwoorden van beide vragen zijn WAQUA-berekeningen uitgevoerd. De uitgangspunten en randvoorwaarden van deze berekeningen zijn verwoord in hoofdstuk 2. De beantwoording van de eerste vraag komt aan de orde in hoofdstuk 3 en de beantwoording van de tweede vraag in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 geeft de belangrijkste conclusies en aanbevelingen die volgen uit dit project.

2 Uitgangspunten en randvoorwaarden

2.1 Inleiding

De afvoerreeksen die in voorliggend project worden gebruikt, zijn bepaald met GRADE, dat op basis van lange, synthetische neerslag en temperatuur reeksen en hydrologische en hydraulische modelberekeningen afvoeren genereert voor situaties met zeer hoge herhalingstijden. Binnen GRADE wordt gebruik gemaakt van een 1D Sobek-RE model, waarin via bakjes ook overstromingen kunnen worden gemodelleerd. In het kader van deze studie is het 1D model echter niet voldoende nauwkeurig en wordt in plaats van het 1D Sobek model, gebruik gemaakt van een 2D WAQUA-model. De randvoorwaarden voor het WAQUA model volgen rechtstreeks uit het hydrologische model. Dit betekent dat bovenstrooms van Andernach (i.e. de Oberrhein) in dit geval geen overstromingen zijn aangenomen. Voor verdere details over de werking/aannames van GRADE wordt verwezen naar Hegnauer et al. (2014).

Paragraaf 2.2 geeft een toelichting bij de WAQUA-schematisaties die zijn gebruikt in dit onderzoek. De WAQUA-schematisaties en de basis voor modelinstellingen en randvoorwaarden zijn afgeleid van Wijbenga et al. (2008) en Vieira da Silva et al. (2013). We gebruiken, net als in eerdere studies simona2006-01 (patch level 27) onder linux (32-bit). Specifiek voor dit project zijn de randvoorwaarden voor de afvoer bij Andernach en de laterale toestromen afgeleid van GRADE-resultaten. De randvoorwaarden voor de golfberekeningen (beantwoording vraag 1 uit paragraaf 1.2) zijn te vinden in paragraaf 2.3. De randvoorwaarden voor de afvoercapaciteitsberekeningen op het traject Wesel/Lobith (beantwoording vraag 2 uit paragraaf 1.2) zijn weergegeven in paragraaf 2.4.

2.2 WAQUA-schematisaties

HKV heeft in 2008 WAQUA-modellen van de Niederrhein ontwikkeld (Wijbenga et al. 2008), waarbij rekening is gehouden met dijkdoorbraken. De volgende Baselinevarianten zijn hiervoor beschikbaar:

'J05dh15' en 'J05dh15_db'.

De betekenis van de codering is als volgt:

- J05: modelgeometrie 2005 ¹;
- dh15: dijkhoogte-aanpassing die tussen 2005 en 2015 in Duitsland zou plaatsvinden;
- db: geeft aan dat het de schematisatie is met dijkdoorbraken.

De dijkdoorbraken in het model 'J05dh15_db' zijn iteratief bepaald op basis van WAQUA-resultaten met een golf met maximale afvoer van 18.000 m³/s bij Andernach (zie figuur 4-1 in Wijbenga et al., 2008). Deze afvoergolf (golf "HW158zdr") is afgeleid in het kader van de Niederrhein-studie met een eerdere versie van de neerslaggenerator (zie Lammersen, 2004). In voorliggende studie hanteren we een WAQUA-model zonder ingrepen in Duitsland of in Nederland: WAQUA schematisatie 'F01' uit Wijbenga et al. (2008). In deze WAQUA-schematisatie is een totaal van 12 dijkdoorbraken opgenomen, die ongewijzigd zijn gelaten in dit project.

¹ Dit betekent dat maatregelen in Duitsland na 2005 niet zijn opgenomen.

In dit project beschouwen we effecten van afvoergolven voor piekafvoeren bij Andernach tussen 14.000 m³/s en 20.000 m³/s. Voor simulaties met een piekafvoer van 20.000 m³/s bij Andernach zijn de waterstanden hoger dan de hoogste waterstanden berekend in de studie van Wijbenga et al. (2008) en zijn er waarschijnlijk meer locaties waar de dijken overlopen. Binnen deze opdracht wordt de WAQUA-schematisatie echter niet aangepast voor dit effect, en zijn dus geen extra dijkdoorbraken opgenomen. Dit is consistent met het gebruikte GRADE-instrumentarium, waarbij in het onderliggende Sobek-RE model dezelfde dijkdoorbraaklocaties zijn opgenomen als in het WAQUA-model 'J05dh15_db'.

Tussen Wesel en Lobith is in het 'ausse' model een strook van circa 500 m aan binnendijkse zijde opgenomen in de schematisatie (de grid-enclosure ligt binnendijks). Hierdoor is het model niet zonder meer toepasbaar is voor het bepalen van de afvoer waarbij in het traject Wesel-Lobith de dijken zullen overlopen. Aanpassing van de WAQUA-schematisatie voor het 'ausse'-model maakt geen onderdeel uit van het voorliggend project. Het moment van overlopen in het traject Wesel-Lobith is geschat aan de hand van WAQUA-berekeningen met een constante afvoer (zonder zijdelingse toestromen) en het 'innen'-model (WAQUA-schematisatie 'TM3' uit Wijbenga et al. 2008), waar de modelgrens ter plaatse van de primaire waterkering ligt.

2.3 Randvoorwaarden golfberekeningen

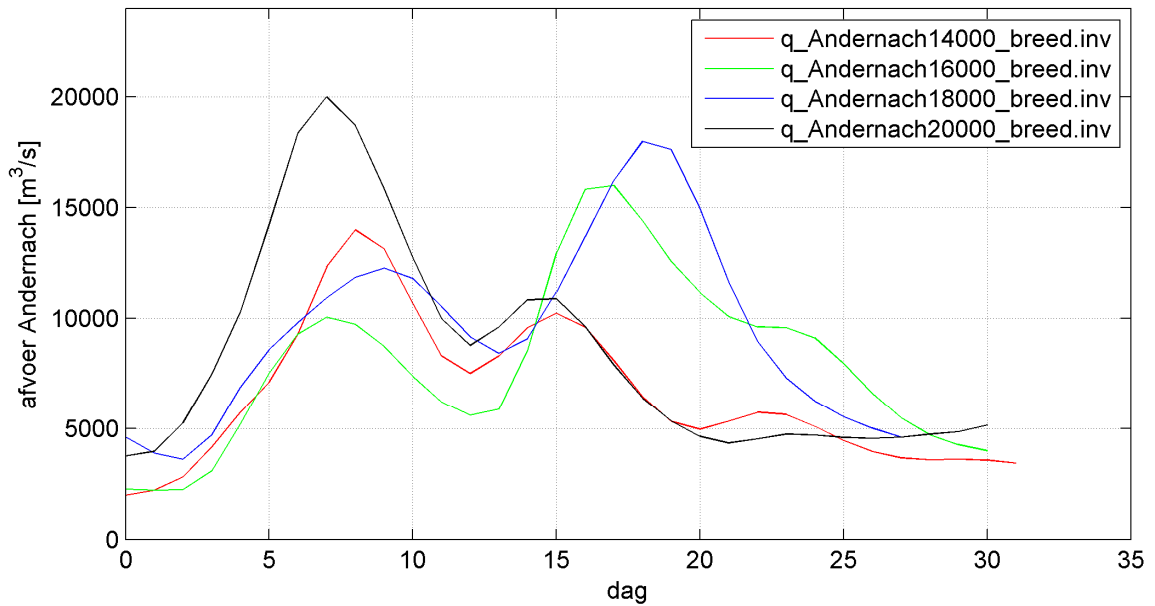
2.3.1 Golfvormen Andernach

In het WAQUA-model dient bij Andernach een golfvorm gespecificeerd te worden. De golven zijn afkomstig uit GRADE en voor dit project toegeleverd door Deltares. Het gaat om in totaal 8 afvoergolven, zie Tabel 1. Voor het afleiden van de golven is GRADE versie 2.0 ('GR2p0') gebruikt, zonder dijkdoorbraken op de Oberrhein (i.e. bovenstrooms van Andernach, 'zdor'). In dit project beschouwen we 4 verschillende piekafvoeren bij Andernach, waarbij onderscheid is gemaakt tussen "smalle" en "brede" afvoergolven (Tabel 1). De afvoergolven zijn weergegeven in Figuur 2 (brede golven) en in Figuur 3 (smalle golven). Een "brede golf" betekent hier dus dat er twee afvoertoppen zijn.

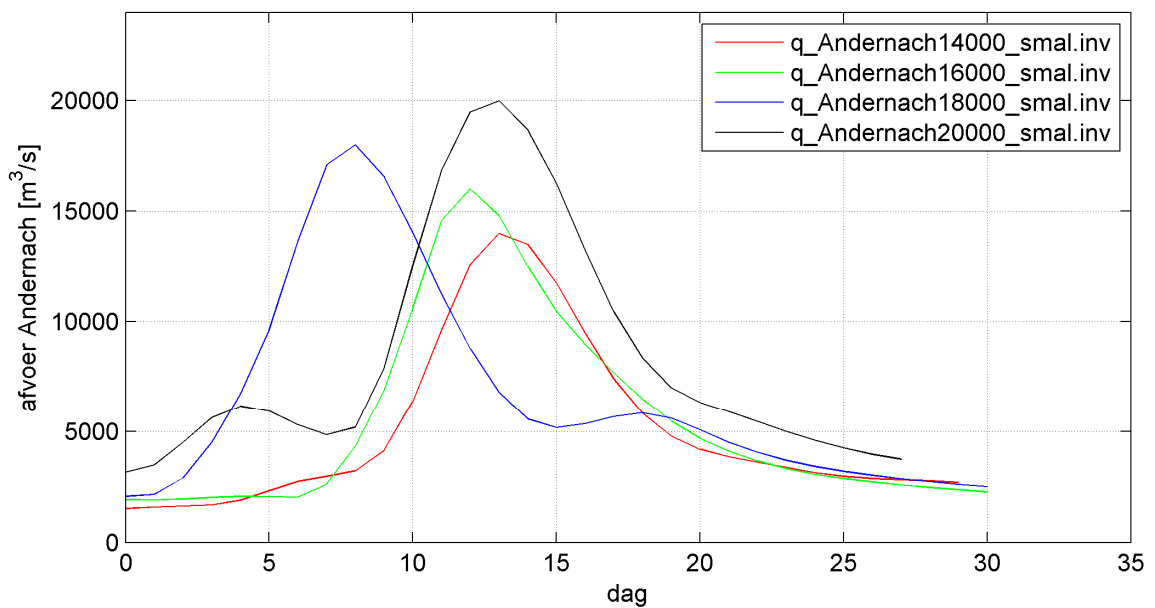
Afvoergolf (maximum bij Andernach)		Met doorbraak	Zonder doorbraak	Code golfvorm
WAQUA schematisatie		J05dh15_db	J05dh15	In GRADE
Benedenstroomse randvoorwaarde		j05	j05	
14.000 (smal)	14s	V	V	
14.000 (breed)	14b	V	V	GR2p0_12955_zdor
16.000 (smal)	16s	V	V	GR2p0_13811_zdor
16.000 (breed)	16b	V	V	GR2p0_06510_zdor
18.000 (smal)	18s	V	V	GR2p0_18976_zdor
18.000 (breed)	18b	V	V	GR2p0_11366_zdor
20.000 (smal)	20s	V	V	GR2p0_10854_zdor
20.000 (breed)	20b	V	V	GR2p0_17821_zdor

Tabel 1 Piekafvoeren van de WAQUA-berekeningen in dit project. De code van de golfvorm is toegelicht in de tekst.

De toegeleverde randvoorwaarden zijn op dagbasis (rekennauwkeurigheid van GRADE). De GRADE-reeksen beslaan 50,000 jaar (in FEWS betekent dit dat de reeksen lopen van het jaar 2000 tot het jaar 52000). In Tabel 1 is in de code voor de golfvorm het jaartal uit de GRADE reeks verwerkt. Via dit getal is de randvoorwaarde terug te vinden in de GRADE-reeks.



Figuur 2 Afvoergolven Andernach, breed.



Figuur 3 Afvoergolven Andernach, smal.

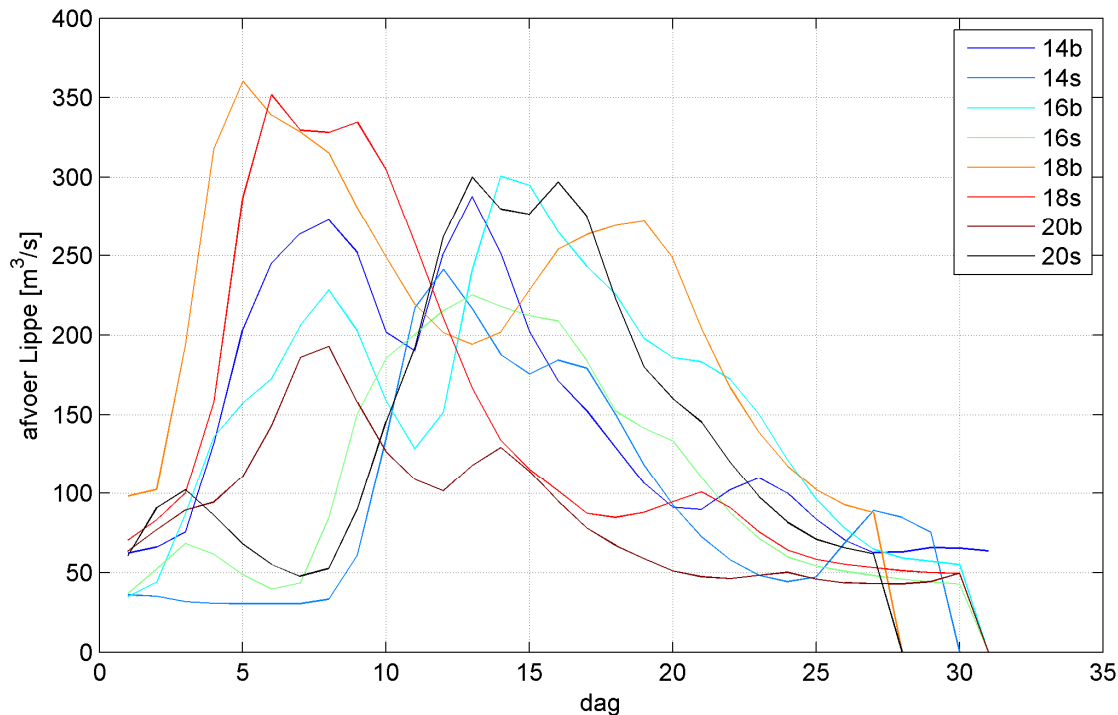
2.3.2 Laterale toestromen en onttrekkingen

In de WAQUA-schematisatie dient invoer voor een aantal laterale/zijdellingse toestromen gespecificeerd te worden. In het model is onderscheid gemaakt in:

- 'AX'-lateralen: laterale toestromen voor de zijrivieren uit Figuur 1.
- 'ZE'-lateralen: "onbemeten" gebieden die rechtstreeks op de Niederrhein afwateren (ook wel "ZWE-gebieden" of "Zwischengebieden" genoemd).
- 'GW'-lateralen: laterale uitwisselingen met het grondwater.

Voor de eerste twee lateralen ('AX' en 'ZE') zijn de randvoorwaarden gegenereerd met GRADE en aan HKV toegeleverd door Deltares. Een illustratie voor de golfvorm van de Lippe (km ~814,

Figuur 1) is weergegeven in Figuur 4. Voor de grondwateruitwisseling zijn geen gegevens beschikbaar vanuit GRADE. In de golfberekeningen is de grondwateruitwisseling daarom gelijk gehouden aan Wijbenga et al. (2008) voor de 'HW158zdor'-golf (i.e. 'q_lateraal_GW.HW158zdor').



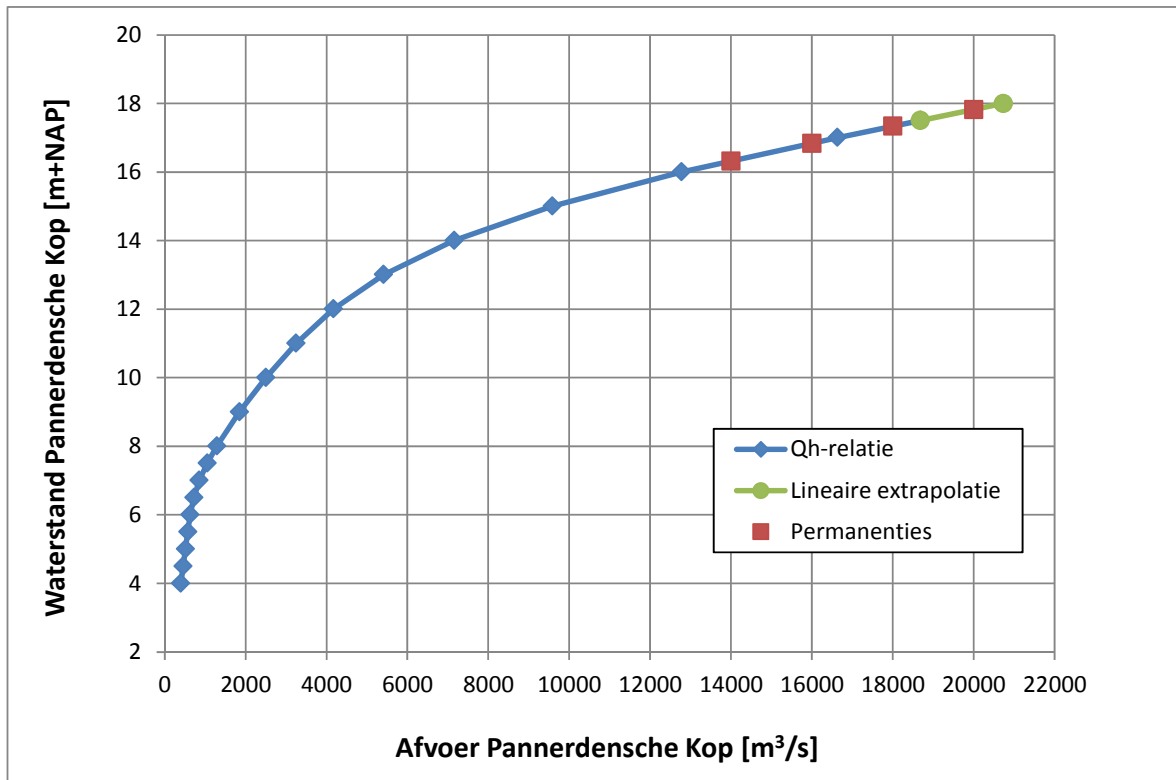
Figuur 4 Laterale toestroming van de Lippe.

2.3.3 Q-h relatie Pannerdensche Kop

Aan de onderrand van het WAQUA-model wordt bij de Pannerdensche Kop een Qh-relatie opgelegd (Q =afvoer, h =waterstand). Voor deze benedenstroomse randvoorwaarde zijn twee alternatieven beschikbaar:

- j05 (=situatie vóór Ruimte voor de Rivier) en
- j15 (=situatie met Ruimte voor de Rivier uitgevoerd).

In overleg met Rita Lammersen (RWS-WVL) is besloten om j05 te hanteren (conform Vieira da Silva et al., 2013 en de Qh-relatie zoals gehanteerd in GRADE). De Qh-relatie is weergegeven in Figuur 5. De Qh-relaties is zo opgebouwd dat er per halve meter waterstand een afvoer is gespecificeerd. In de oorspronkelijke reeks hoort bij de hoogste waterstand van 17,5 m+NAP een afvoer van 18681 m³/s. Omdat in dit project met afvoeren gerekend wordt die groter zijn dan is gedaan door Wijbenga et al. (2008), is op basis van lineaire extrapolatie een punt aan de relatie toegevoegd voor een waterstand van 18 m+NAP bij de Pannerdensche Kop (met een afvoer van 20.734 m³/s). De weergegeven "Permanenties" in de figuur hebben betrekking op berekeningen die zijn beschreven in Hoofdstuk 4.



Figuur 5 Qh-relatie Pannerdensche Kop (j05).

2.4 Randvoorwaarden permanenties

Het moment waarop de primaire keringen overlopen in het traject Wesel-Lobith schatten we aan de hand van berekeningen met een constante afvoer in het 'innen'-model (TM3), waar de modelgrens van de schematisatie ter plaatse van de primaire kering ligt (zie Hoofdstuk 4 voor details). Aan de instroomrand van het model hanteren we een constante afvoer van 14.000 m³/s, 16.000 m³/s, 18.000 m³/s en 20.000 m³/s. De laterale toestromen zijn genegeerd, de benedenstroomse waterstand bij de Pannerdensche Kop is afgeleid uit de Qh-relatie (rode symbolen in Figuur 5).

3 Dijkoverstroming versus dijkdoorbraken

3.1 Inleiding

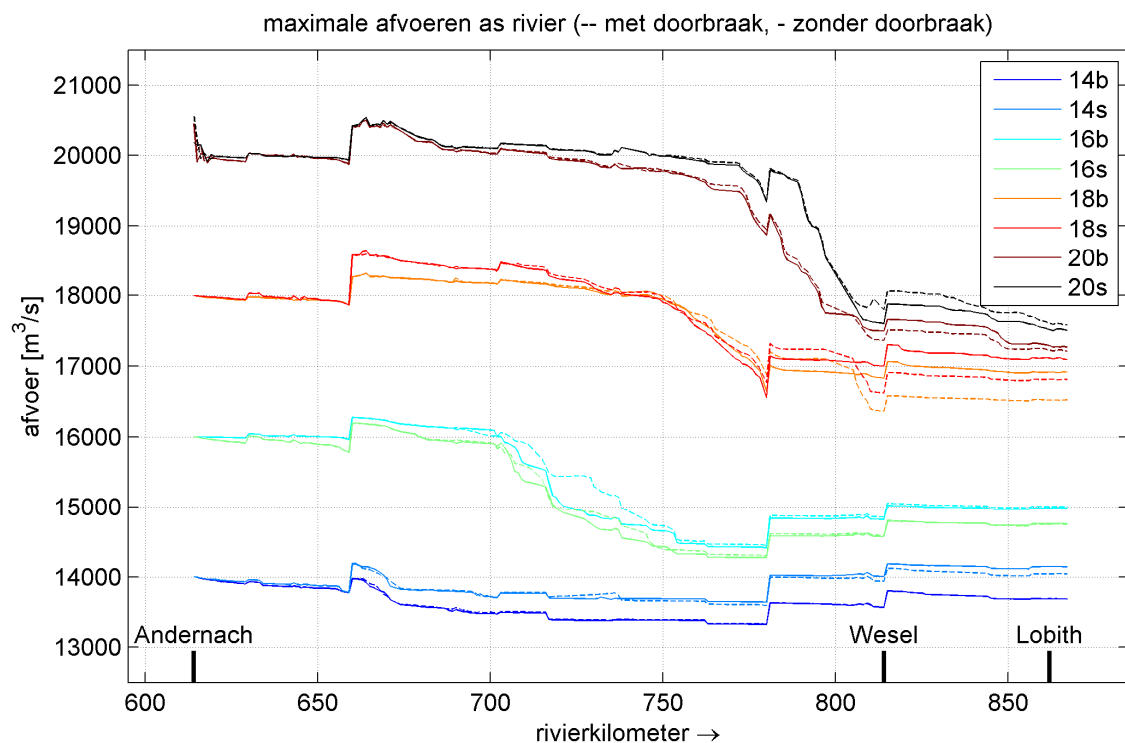
Dit hoofdstuk behandelt de eerste centrale vraag:

Wat is het verschil in afvoerverloop bij Wesel/Lobith tussen situaties waarbij met of zonder dijkdoorbraken wordt gerekend?

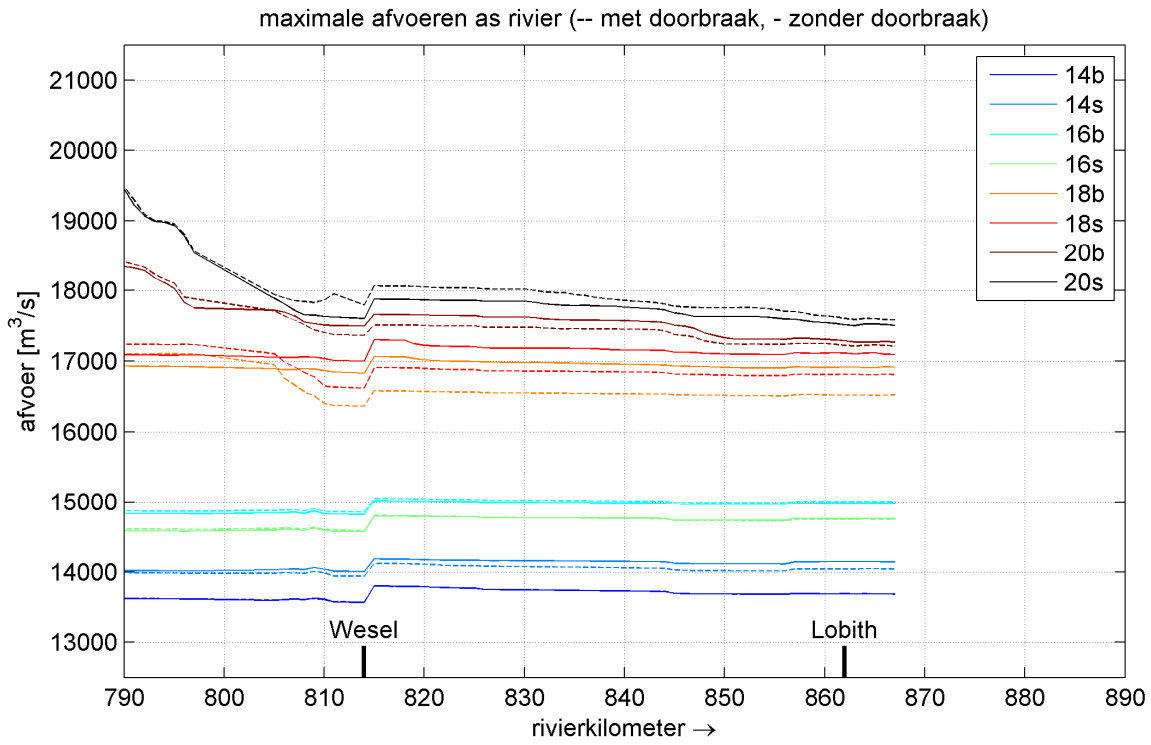
Allereerst geven we in paragraaf 3.2 een beeld van de maximale afvoeren en waterstanden in de as van de rivier. Op basis van deze resultaten gaan we in paragraaf 3.3 nader in op het effect van dijkdoorbraken op de afvoer bij Wesel en Lobith. In paragraaf 3.4 is onderzocht of er extra doorbraaklocaties te verwachten zijn op het traject Andernach-Wesel, die nu niet in de WAQUA-schematisatie zijn opgenomen (zie ook paragraaf 2.2).

3.2 Maximale afvoeren en waterstanden in as rivier

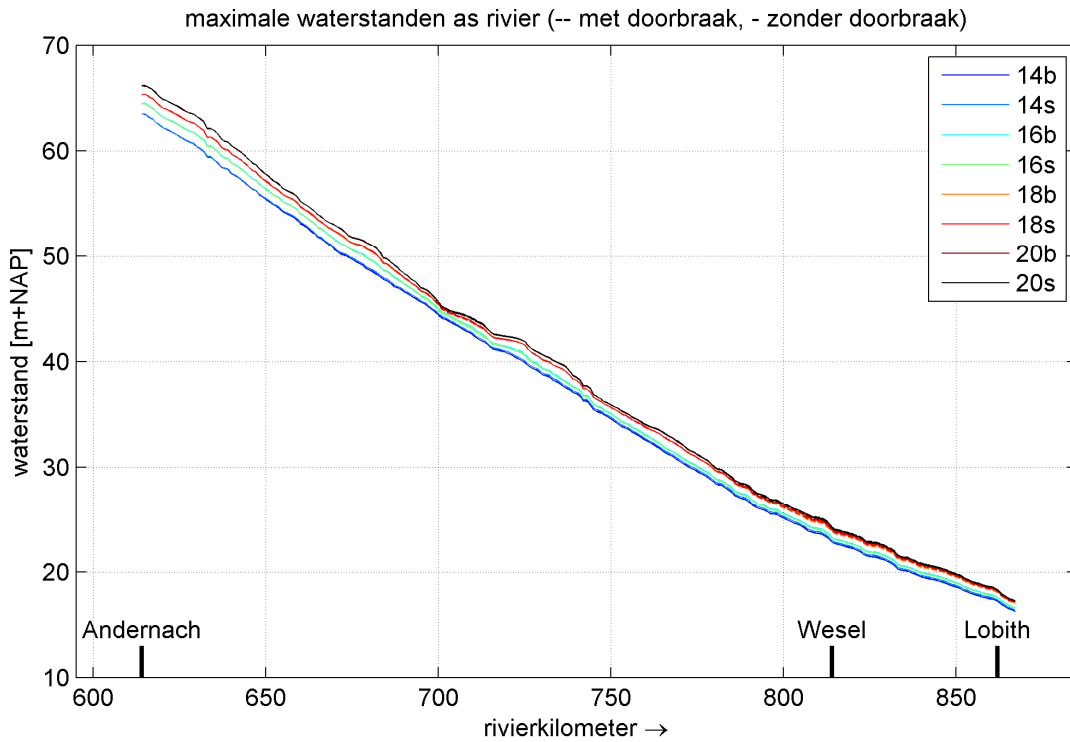
Figuur 6 en Figuur 8 geven respectievelijk het verloop van de maximale afvoer en waterstanden in de as van de rivier weer. Het verschil in maximale waterstanden is gegeven in Figuur 9. In voorliggende studie zijn we voornamelijk geïnteresseerd in het effect van dijkdoorbraken op afvoeren en waterstanden op het traject Wesel (km 814) tot Lobith (km 862). In Figuur 7 is te zien dat op dit traject voor de meeste afvoergolven de maximale afvoer in de situatie met doorbraken kleiner is dan de maximale afvoer zonder dijkdoorbraken. Een uitzondering daarop is de smalle golf met een maximale afvoer van 20.000 m³/s bij Lobith. Deze grotere afvoer resulteert ook in hogere waterstanden voor de meeste afvoergolven op dit traject.



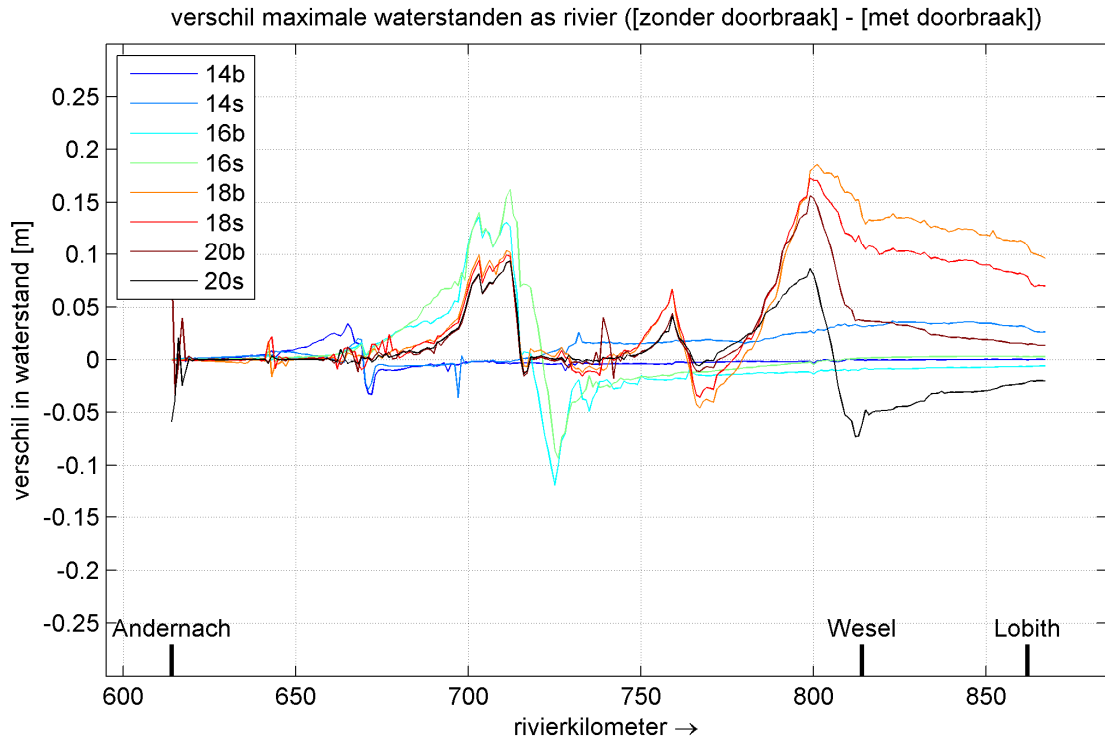
Figuur 6 Maximale afvoeren in de as van de rivier voor de situatie met en zonder dijkdoorbraken.



Figuur 7 Maximale afvoeren in de as van de rivier voor de situatie met en zonder dijkdoorbraken van km 790 tot de Pannerdensche Kop.



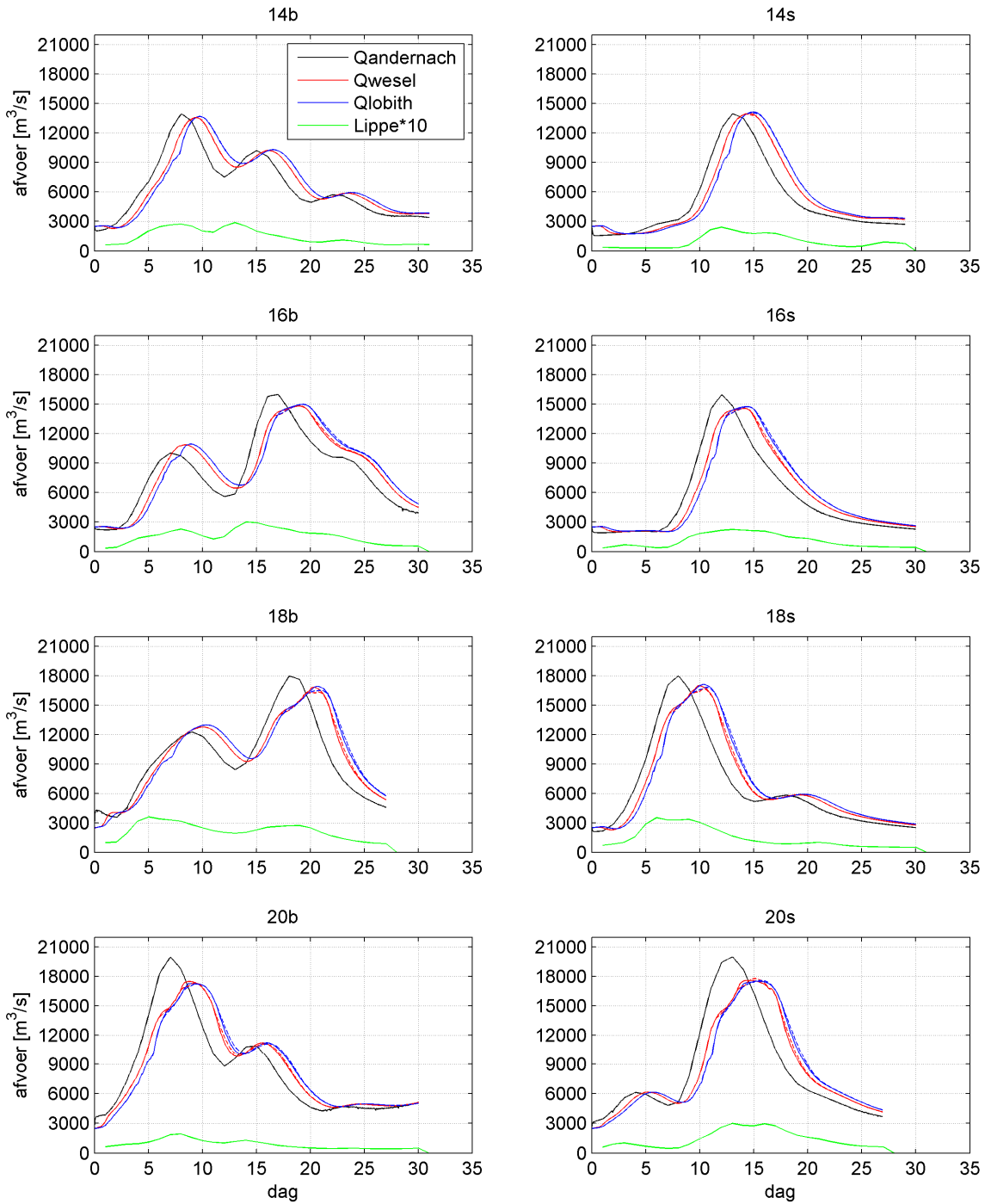
Figuur 8 Maximale waterstanden in de as van de rivier voor de situatie met en zonder dijkdoorbraken.



Figuur 9 Verschil in maximale waterstanden in de as van de rivier voor de situatie met en zonder dijkdoorbraken.

3.3 Effect doorbraken op afvoer Wesel en Lobith

Figuur 10 geeft het afvoerverloop bij Wesel en Lobith voor de verschillende uitgevoerde berekeningen. Ook de afvoer bij Andernach en de laterale toestroom van de Lippe zijn getoond. De golf bij Andernach heeft een looptijd van ca. 1 dag tot aan de monding van de Lippe. Dit verklaart echter niet voor alle scenario's het verschil in verloop tussen de golfvorm bij Andernach en de Lippemonding. Voor de brede golf met een maximale afvoer bij Andernach van $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$, verschilt het moment van de piekafvoer zelfs enkele dagen.



Figuur 10 Afvoerverloop bij Wesel en Lobith voor de 8 golven. Getrokken lijnen zijn zonder doorbraak, onderbroken lijnen met doorbraak. De groene lijn geeft ter illustratie de laterale toestroom van de Lippe weer (opgeschaald met een factor 10 ter illustratie).

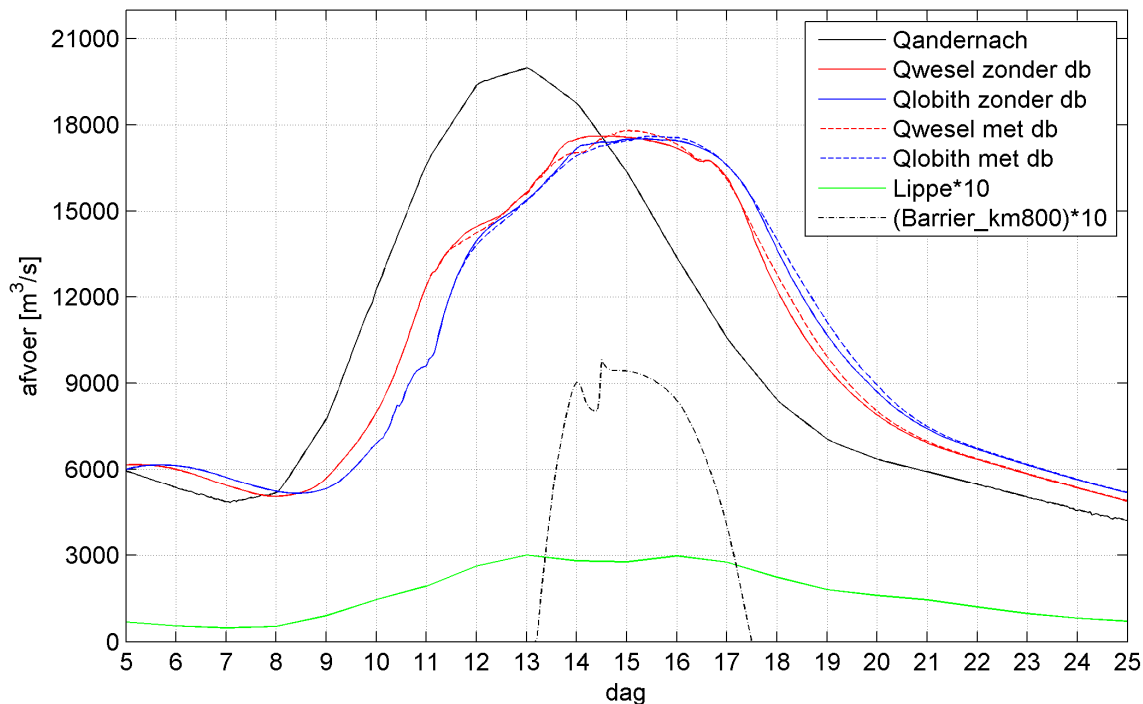
Piekafvoer Andernach [m ³ /s]	Golfvorm	Afvoer Lobith [m ³ /s] (km 862)			Afvoer Wesel [m ³ /s] (km 814)		
		geen doorbraak	wel doorbraak	verschil	geen doorbraak	wel doorbraak	verschil
14.000	breed	13690	13689	-1	13568	13573	5
14.000	smal	14147	14042	-104	14006	13942	-64
16.000	breed	14988	15007	19	14821	14854	33
16.000	smal	14758	14751	-7	14576	14588	12
18.000	breed	16918	16519	-399	16830	16363	-467
18.000	smal	17116	16816	-301	17001	16622	-379
20.000	breed	17289	17222	-67	17500	17366	-134
20.000	smal	17514	17604	90	17606	17798	192

Tabel 2 Effect op maximale afvoer bij Lobith en Wesel.

Tabel 2 geeft een overzicht van de maximale afvoer bij Lobith en Wesel voor de verschillende typen afvoergolf. Bij golven met een piekafvoer van 18.000 m³/s bij Andernach zijn de afvoeren bij Wesel en Lobith tot bijna 400 m³/s *lager* wanneer dijkdoorbraken in beschouwing worden genomen. Bij de smalle golf met een piekafvoer van 20.000 m³/s bij Andernach is de afvoer bij Lobith in het geval van dijkdoorbraken 90 m³/s *hoger* dan wanneer alleen dijkoverloop wordt beschouwd. Net benedenstrooms van Wesel, bij km 815, is de afvoer maximaal 180070 m³/s voor de smalle golf met een piekafvoer van 20.000 m³/s bij Andernach (Figuur 6 en Figuur 7).

Over het algemeen zijn de verschillen tussen wel of geen doorbraak het grootst bij een piekafvoer van 18.000 m³/s bij Andernach. Uit berekeningen met constante afvoer met het 'innen'-model (Hoofdstuk 4) blijkt dat, in ieder geval voor het traject Wesel-Lobith, de dijkhoogtes grofweg op het niveau liggen dat hoort bij een afvoer van 18.000 m³/s. Ofwel, de dijken zijn grofweg gedimensioneerd om een waterniveau te keren dat hoort bij een afvoer van 18.000 m³/s. Het overlopen of doorbreken van dijken leidt min of meer tot hetzelfde effect als een retentiegebied. Retentiegebieden zijn over het algemeen het meest effectief (in termen van waterstandsval bij de piekafvoer) wanneer water uit de piek van het hoogwater wordt geborgen. In deze studie is dat waarschijnlijk het geval bij de golven met een piekafvoer van 18.000 m³/s. Bij hogere afvoeren wordt voornamelijk water uit de was van het hoogwater geborgen, waardoor het gebied achter de dijk al vol is (of in ieder geval verder gevuld) op het moment dat de piek van het hoogwater arriveert. Een andere verklaring voor het relatief kleine effect van dijkdoorbraken bij een piekafvoer van 20.000 m³/s kan zijn dat er bij hogere afvoeren/waterstanden minder verschil in "bresgrote" is tussen een situatie met en zonder doorbraak omdat de waterstand in beide gevallen relatief hoog boven de kruin van de dijk uitkomt.

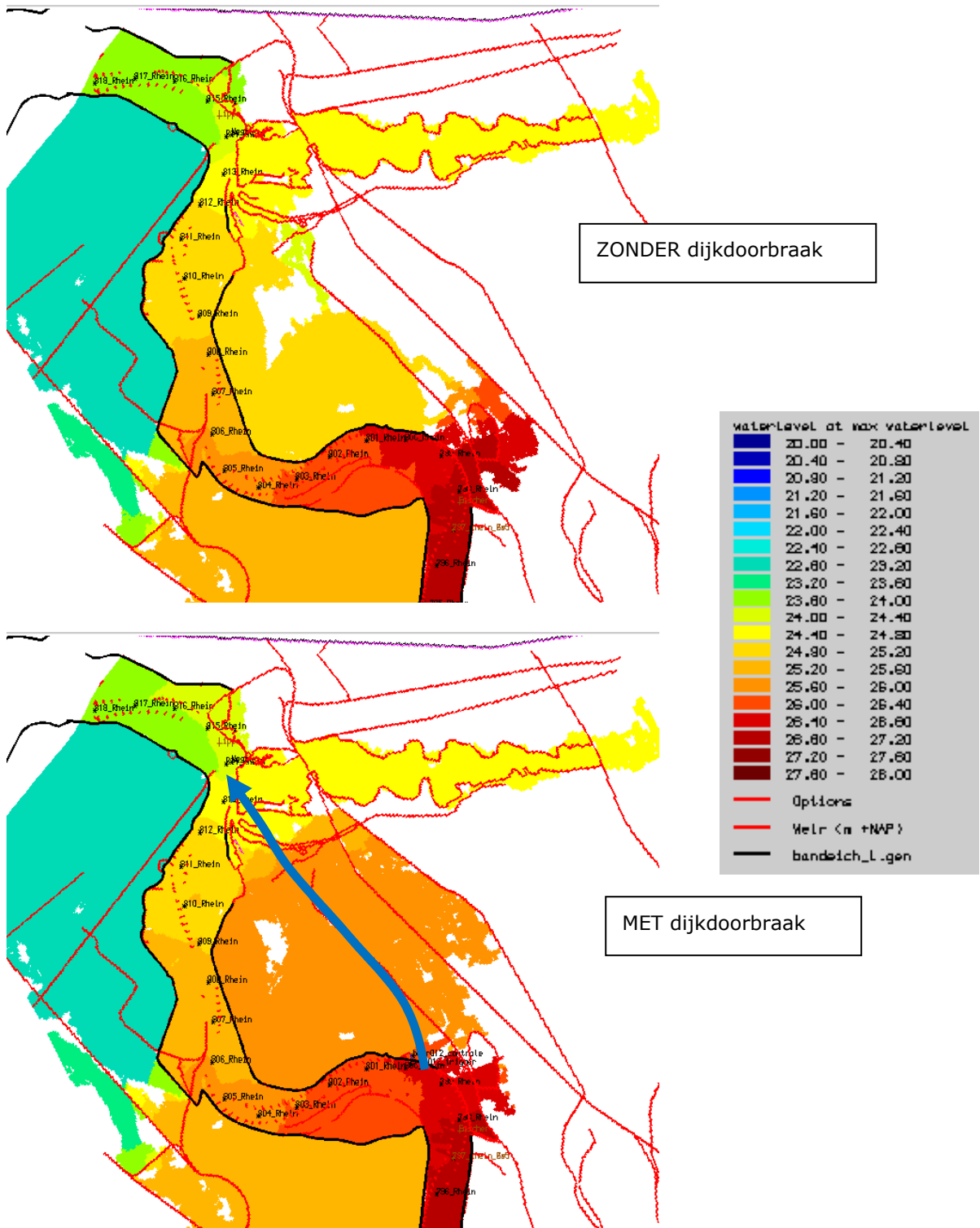
Het effect op de afvoer bij Wesel en Lobith is verschillend voor smalle en brede golven. Dat is vooral goed merkbaar bij een piekafvoer van 20.000 m³/s: voor de brede golf is de maximale afvoer bij Wesel kleiner in de situatie met doorbraken, maar voor de smalle golf is de maximale afvoer bij Wesel juist groter in de situatie met doorbraken (Tabel 2). Op het effect voor de piekafvoer van 20.000 m³/s met een smalle golf gaan we hier verder in. Figuur 11 geeft het afvoerverloop bij Wesel en Lobith, samen met het doorstroomvolume van de bres bij km 800.



Figuur 11 Afvoerverloop bij Wesel en Lobith voor de smalle golf met een piekafvoer van 20.000 m³/s bij Andernach (20s). Ook de afvoer van de Lippe en de afvoer door de doorbraak bij km 800 zijn getoond (de laatste twee tijdseries zijn opgeschaald met een factor 10 ter illustratie).

Zonder dijkdoorbraak loopt de dijk bij km 800 over en vult het gebied achter de dijk met water uit de top van het hoogwater. Hierdoor blijft de piekafvoer voor een aantal dagen min of meer constant. In de WAQUA-berekeningen ontstaat, in het geval van een dijkdoorbraak, een bres in de waterkering. De bres is 200 m breed en schuurt in korte tijd uit tot maaiveld (zie Wijbenga et al. 2008 voor details). Hierdoor stroomt in vergelijking met de situatie zonder dijkdoorbraak meer water in het gebied achter de dijk. Het grotere volume aan water dat door de bres is gestroomd, zorgt in het gebied achter de dijk voor hogere waterstanden dan in de situatie zonder dijkdoorbraak. Hierdoor ontstaat er in de situatie met dijkdoorbraak een bochtafsnijding tussen km 800 en km 813, zie Figuur 12 (onder), terwijl die nog niet is opgetreden in de situatie zonder dijkdoorbraak. De kortsluiting resulteert in een hogere maximale afvoer benedenstrooms van km 813. Ook tussen km 810 en 813 is de maximale afvoer groter omdat de dijkdoorbraak plaatsvindt ruim voordat de piek arriveert (bij $Q \approx 16.000 \text{ m}^3/\text{s}$, Figuur 11), waardoor het golffront steiler wordt, en de looptijd van de golf korter wordt.

Merk op dat de bochtafsnijding tussen km 800 en km 814 ook zal ontstaan bij alleen overlopen van de dijk als de piekafvoer groot genoeg is en de hoogwatergolf lang genoeg aanhoudt.



Figuur 12 Maximale waterstand rond Wesel voor de smalle golf met een piekafvoer van 20.000 m³/s bij Andernach (20s).

3.4 Quickscan extra doorbraaklocaties Niederrhein

Wijbenga et al. (2008) hebben de locaties van dijkdoorbraken bepaald aan de hand van WAQUA-simulaties met een piekafvoer van 18.000 m³/s bij Andernach. Bij 20.000 m³/s zijn de waterstanden orde 75 cm hoger en zijn er naar verwachting meer locaties waar de dijken

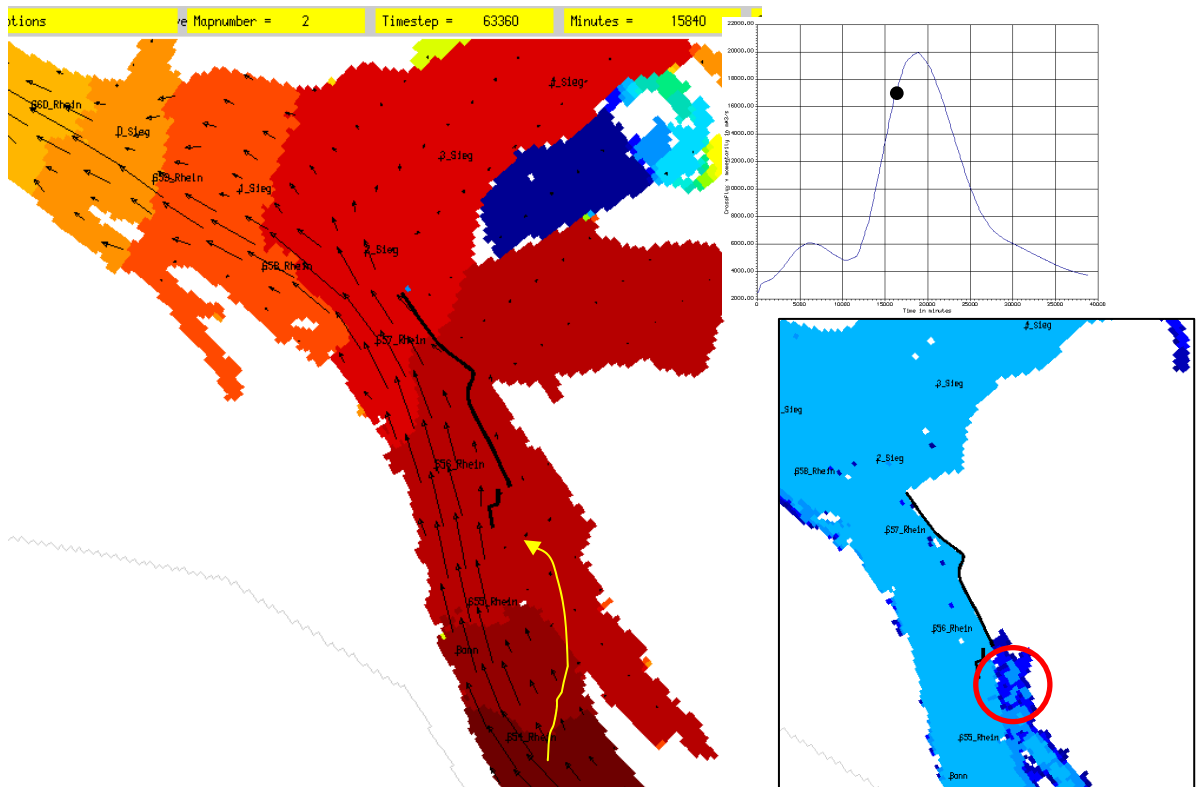
overlopen. Uit WAQUA-berekeningen blijkt dat de simulatie met een smalle golf, met een piekafvoer van 20.000 m³/s bij Andernach, de grootste piekafvoeren en hoogste waterstanden langs de Niederrhein oplevert. Op basis van berekende waterstanden en overstromingspatronen voor dit scenario, is een *Quickscan* uitgevoerd of er extra doorbraaklocaties in de WAQUA-schematisatie verwerkt moeten worden.

Tijdens de WAQUA-berekeningen van Wijbenga et al. (2008) zijn destijds voor iedere rekencel de waterdieptes in klassen (met diepte-grenzen 0.01 m, 0.05 m, 0.50 m, 1.00 m, 2.00 m) opgeslagen. Daarmee is bepaald op welke locaties de dijken overlopen (deze informatie is niet of nauwelijks te herleiden uit kaarten met waterstanden die zijn gemaakt op vaste momenten met een bepaald interval). De, door de opdrachtgever opgelegde, richtlijn was dat er alleen locaties zijn aangemerkt als potentiële doorbraak waar dijken overlopen. Kaden in de uiterwaarden en harde constructies (bijvoorbeeld kademuren) zijn niet aangemerkt als doorbraaklocatie. Als basis voor mogelijke doorbraaklocaties hebben Wijbenga et al. (2008) "bandeich"-lijnen gebruikt die zijn toegeleverd door RWS, voor de situatie omstreeks 2008 (bandeich_I) en de toekomstige 2020-situatie (bandeich_2020_I). Deze zogenaamde "bandijken" zijn de winterdijken langs de rivier die bij hoge afvoeren overstroming van omliggende gebieden dienen te voorkomen. Zaken als kademuren of verstevigde keringen zijn daar (door de opdrachtgever) zoveel mogelijk uitgehaald. De "bandeich"-lijnen betroffen daarmee de basisinformatie voor Wijbenga et al. (2008) om potentiële doorbraaklocaties te identificeren. Die locaties zijn voorgelegd aan de opdrachtgever, die op basis van de benodigde veldkennis heeft besloten op welke locaties een doorbraak mogelijk/realistisch is; die locaties zijn destijds in het WAQUA-model opgenomen.

In voorliggend project volgen we zoveel mogelijk dezelfde redeneerlijn. In het restant van deze paragraaf bespreken we een aantal locaties die in de Quickscan naar voren zijn gekomen. Tabel 3 geeft een samenvatting van de Quickscan. In Figuur 13, Figuur 15 en Figuur 18 t/m Figuur 20 zijn de plots met "blauwe kleurtinten" gemaakt op basis van de waterdiepte-klasseverdeling die hierboven aan de orde is gekomen.

Rkm 656-657 (Figuur 13)

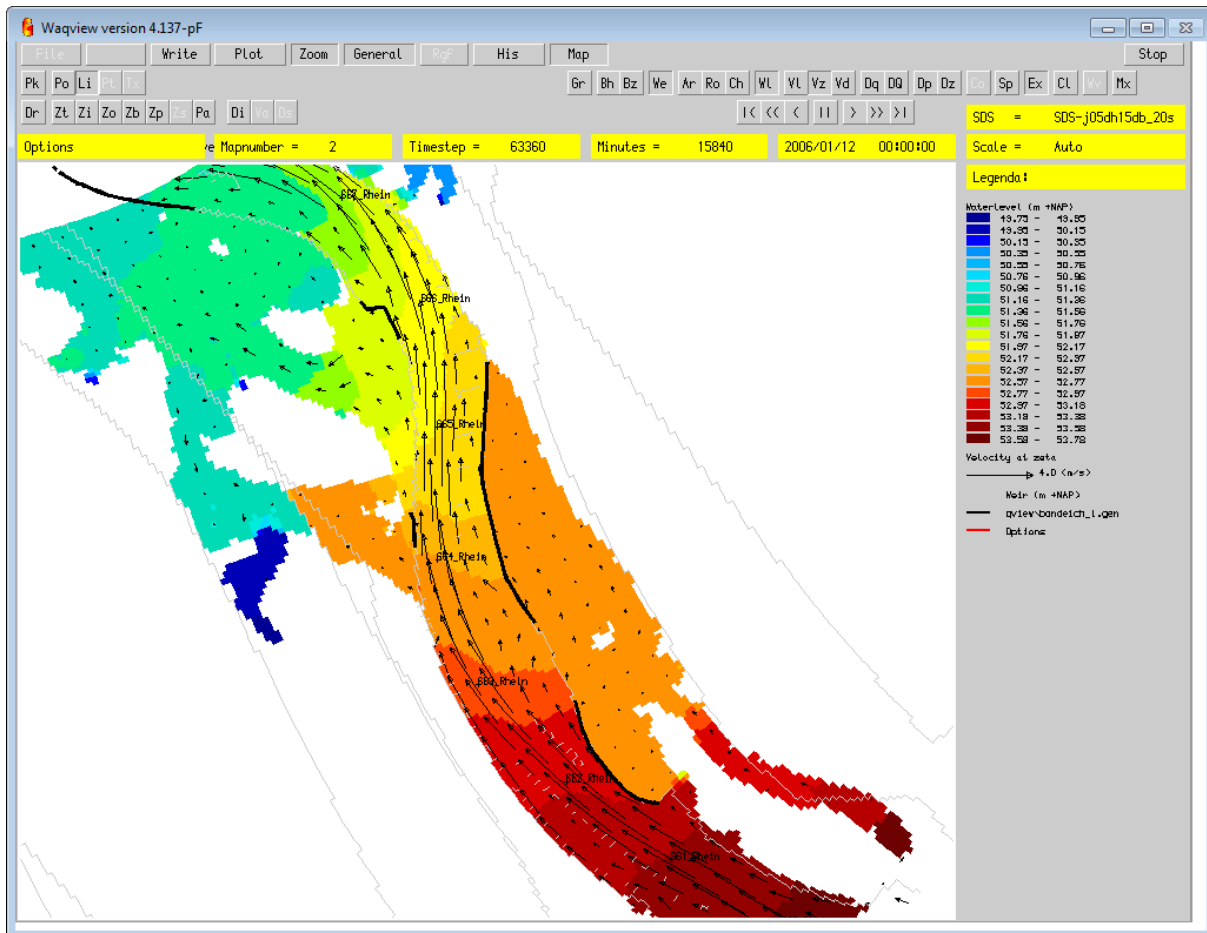
Figuur 13 (links) laat zien dat er op dag 11 (lokale afvoer ca. $Q \sim 17.000 \text{ m}^3/\text{s}$) water achter de bandijk staat. Het betreft hier het instroompunt van de Sieg (zie ook Figuur 1). Een analyse van het overstromingspatroon (Figuur 13, rechts) laat zien dat het gebied achter de dijk instroomt vanuit bovenstroomse richting (gele pijl) en dat het hier waarschijnlijk niet om een dijkdoorbraak gaat.



Figuur 13 Mogelijke doorbraak bij km 656-657. Links: waterstand en stroomsnelheid op dag 11 ($Q \approx 17.000 \text{ m}^3/\text{s}$). Rechts: inundatiekaart op het moment dat het gebied begint in te stromen.

Rkm 662-666 (Figuur 14)

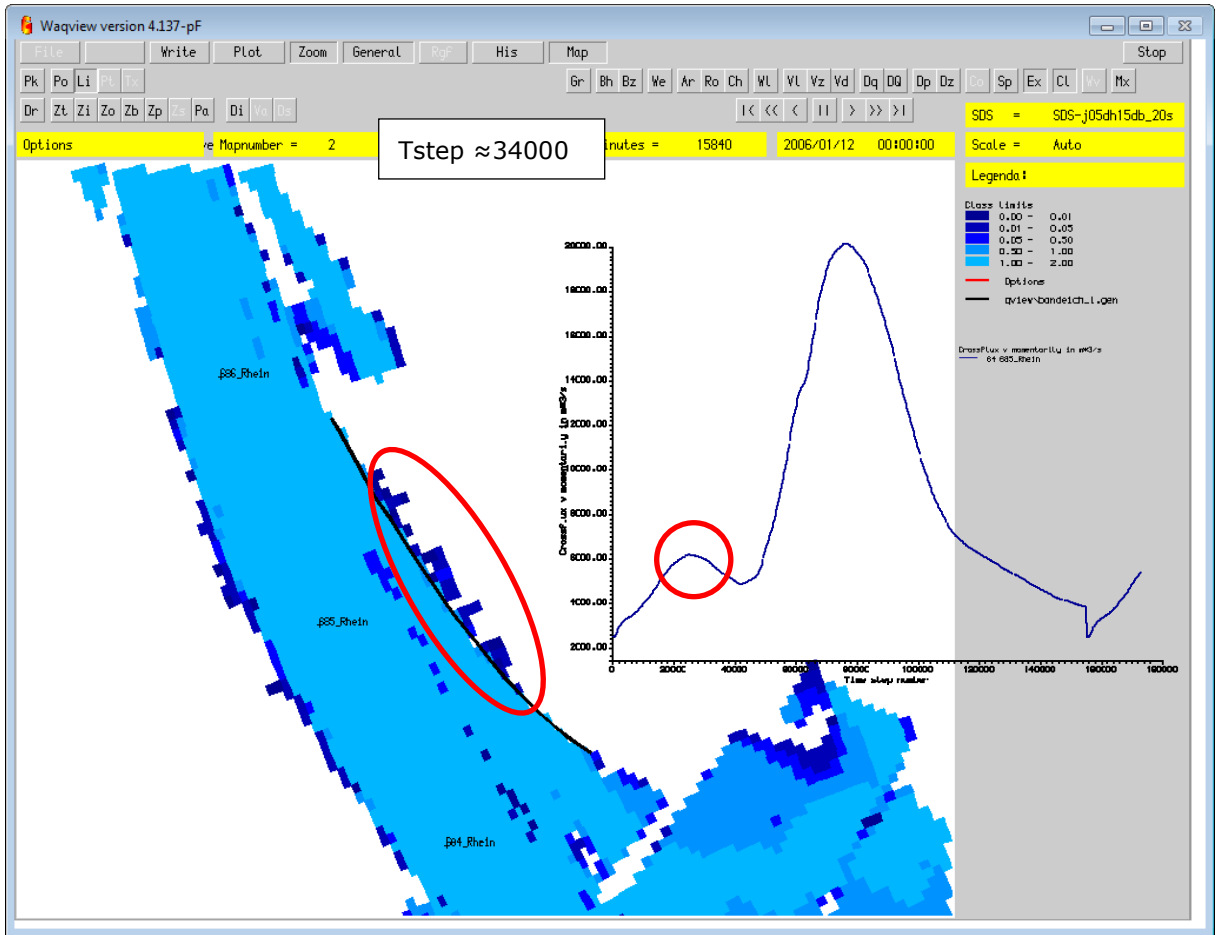
Iets benedenstrooms van de locatie die zojuist is besproken, staat op dag 11 (lokale afvoer ca. $Q \approx 17.000 \text{ m}^3/\text{s}$) op diverse locaties water achter de dijken. Een analyse van het overstromingspatroon heeft laten zien dat de overstromingen steeds starten bij laagtes in kades, die niet als bandijk zijn aangemerkt; ook hier is dus wederom geen sprake van dijkdoorbraken.



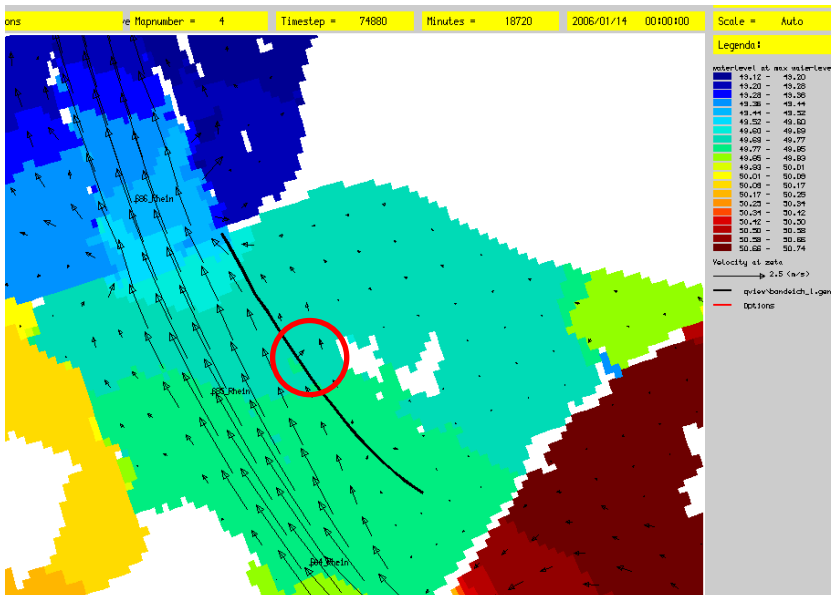
Figuur 14 Mogelijke doorbraak bij km 662-666. Waterstand en stroomsnelheid op dag 11.

Rkm 685 (Figuur 15 en Figuur 16)

De dijk overstroomt op de rechteroever bij km 685 al bij een afvoer van 4.000 m³/s (Figuur 15). Mogelijk breekt de dijk hier door. Wijbenga et al. (2008) hebben op deze locatie echter geen doorbraak geschematiseerd, omdat het geïnundeerde gebied achter de dijk klein is (Figuur 16) en een doorbraak weinig effect heeft op het waterstandsverloop bij de piekafvoer, omdat het gebied achter de dijk al lang voor de piek arriveert volloopt (en vol is).



Figuur 15 Mogelijke doorbraak bij km 685. Start van inundatie banddijk.

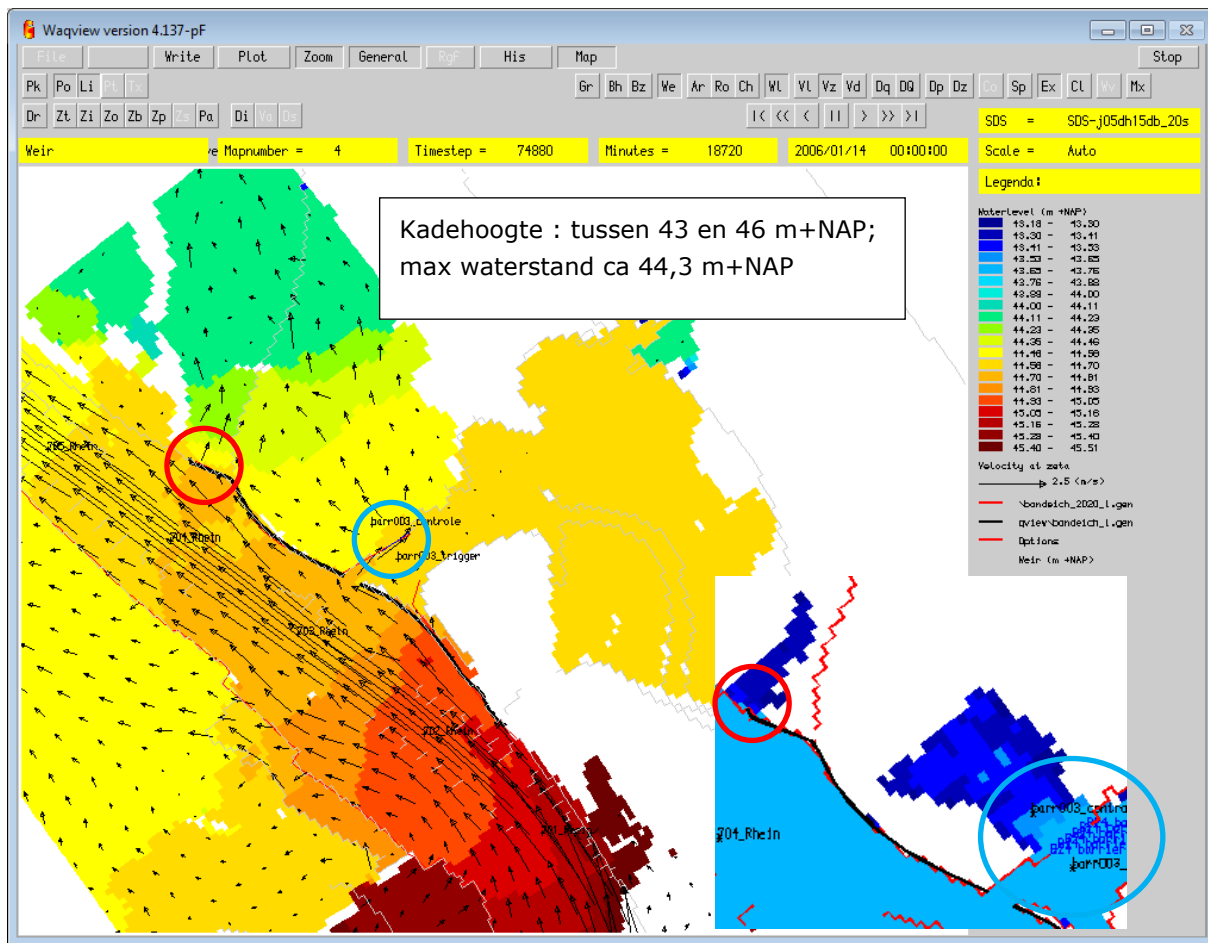


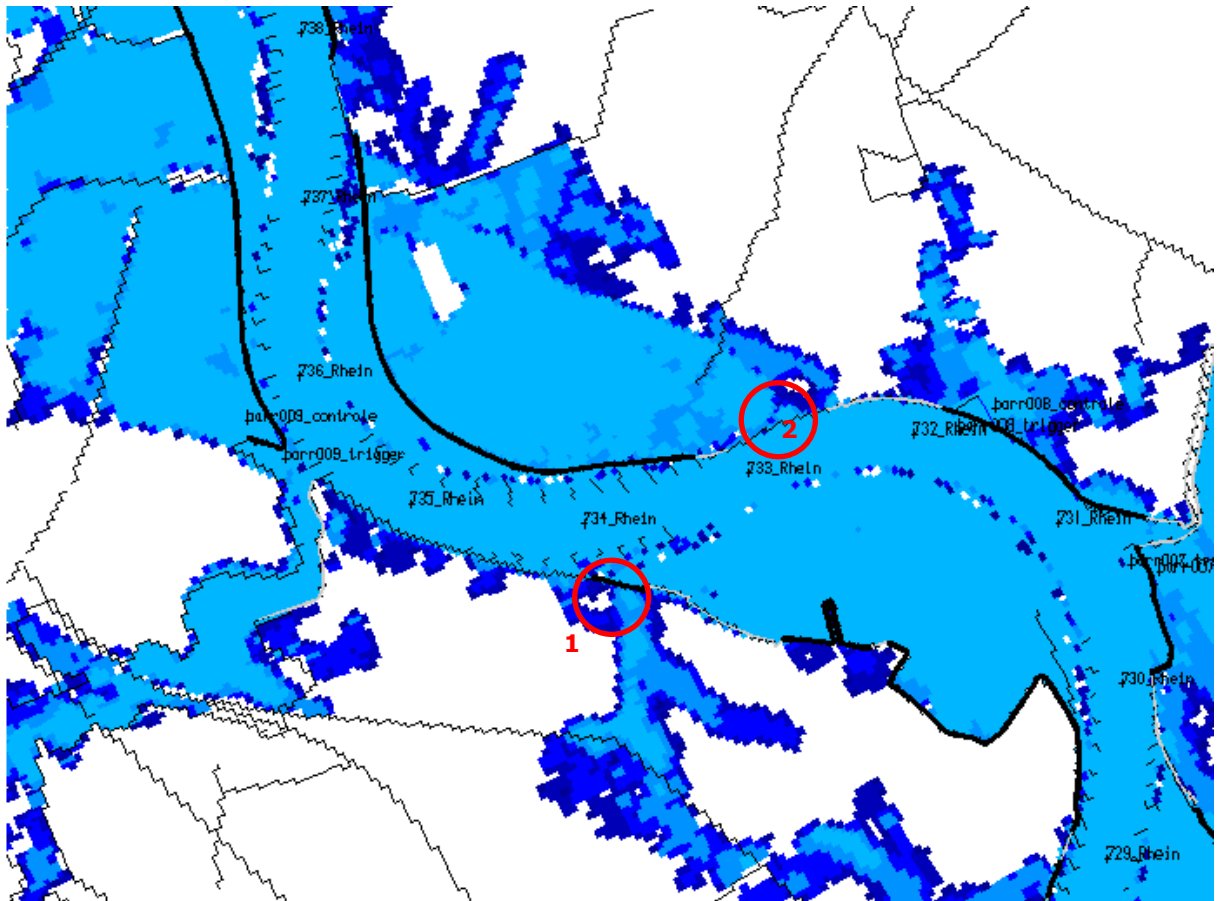
Figuur 16 Mogelijke doorbraak bij km 685. Maximale waterstand tijdens de afvoergolf.

Rkm 704 (Figuur 17)

Ter plaatse van de rode cirkel in Figuur 17 loopt de dijk over met een mogelijke doorbraak tot gevolg. Echter is net bovenstrooms reeds een doorbraaklocatie in de WAQUA-schematisatie

opgenomen (blauwe cirkel in Figuur 17). Een extra dijkdoorbraaklocatie zal derhalve geen significant effect op de resultaten hebben.

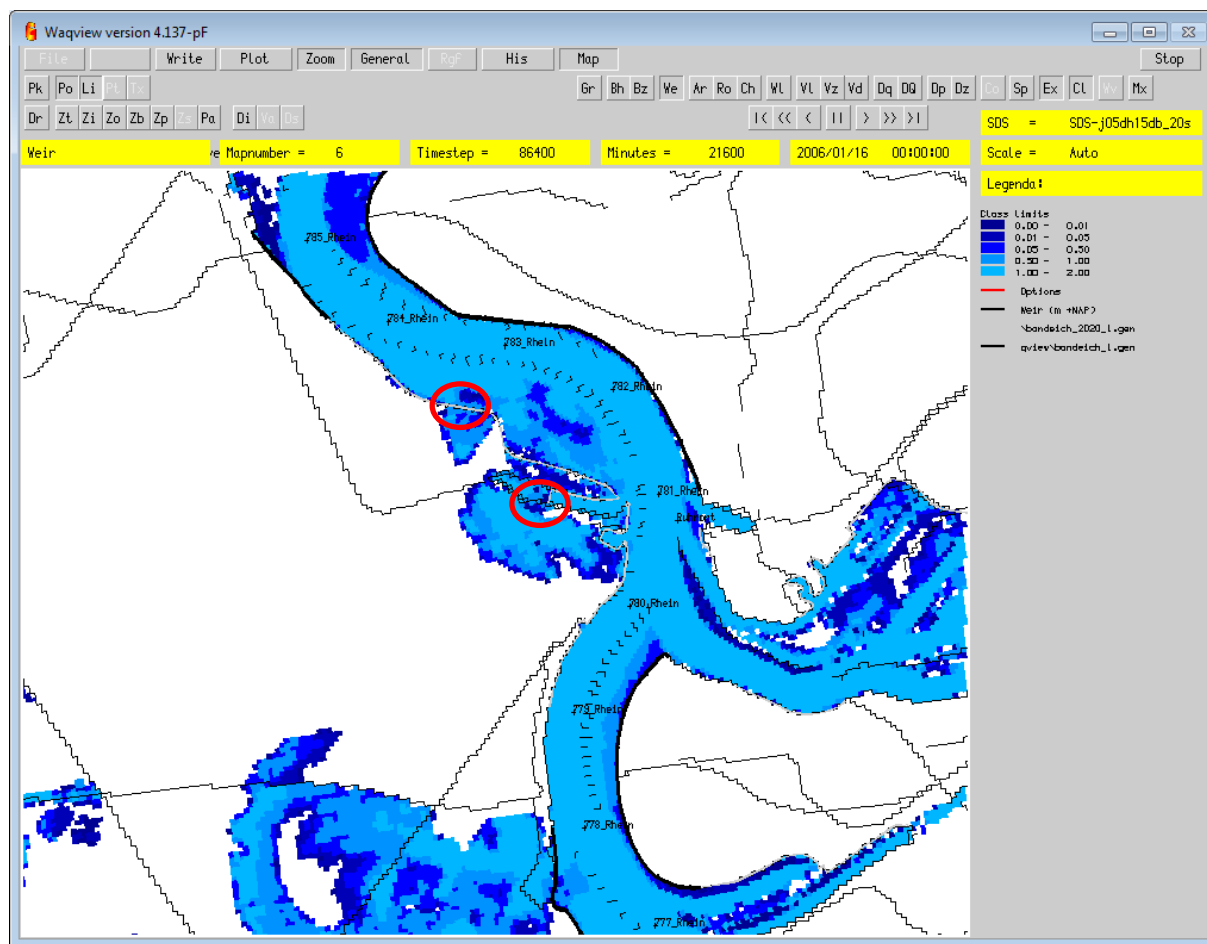




Figuur 18 Overstroomd gebied bij km 734. Bandijken zijn hier zwarte en grijze lijnen.

Rkm 781-783 (Figuur 19)

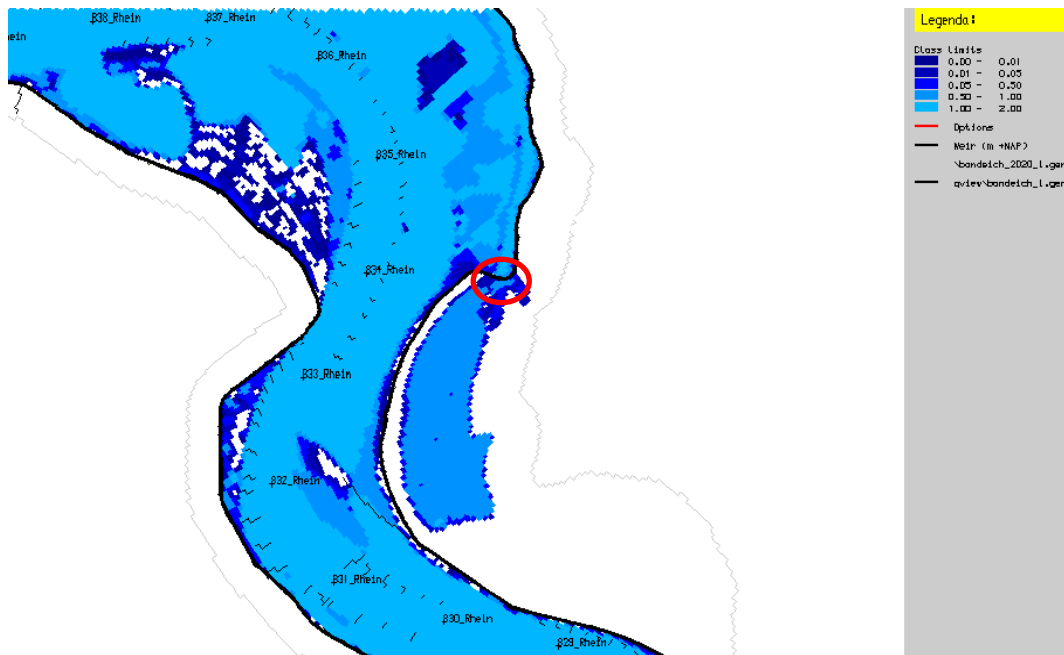
In Figuur 19 zijn twee locaties te zien waar de bandijk overstroomt. Echter is ook een front van water uit zuidelijke richting te zien. Uiteindelijk loopt het binnendijks gebied hier vol vanuit zuidelijke richting. Daarom zijn deze twee locaties niet relevant en is het niet nodig om hier doorbraaklocaties te schematiseren.



Figuur 19 Overstroming van kaden bij km 781-783.

Rkm 834 (Figuur 20)

Deze locatie bevindt zich op het traject Wesel-Lobith. In het volgende hoofdstuk is te zien dat op deze locatie inderdaad een lage zone in de dijk aanwezig is. Mogelijk breekt hier de dijk door en dient een doorbraaklocatie in de WAQUA-schematisatie opgenomen te worden.



Figuur 20 Overstroming van dijk bij km 834.

Locatie	Omschrijving	Doorbraak nodig?
Rkm 656-657	Het gebied achter de dijk stroomt van bovenstrooms in.	Schematiseren doorbraak niet nodig.
Rkm 662-666	Overstroming op locaties die niet zijn aangemerkt als banddijk.	Schematiseren doorbraak niet nodig.
Rkm 685	Dijk stroomt bij 4.000 m ³ /s al over. Er vult een relatief klein gebied.	Geen doorbraak nodig want geen effect op (golfvorm) rond de piekafvoer.
Rkm 704	Dijk loopt over vlak bij een locatie waar reeds een doorbraak is geschematiseerd.	Geen extra doorbraaklocatie nodig.
Rkm 734	Op de linkeroever start de overstroming op een locatie die door de opdrachtgever in 2008 als niet-banddijk is aangemerkt. Op de rechteroever begint de overstroming op een locatie waar geen dijk aanwezig is.	Geen extra doorbraaklocatie nodig.
Rkm 781-783	Het gebied stroomt vanuit bovenstrooms in.	Geen extra doorbraaklocatie nodig.
Rkm 834	De dijk stroomt over op een laag deel van de dijk.	Hier dient mogelijk een doorbraaklocatie opgenomen te worden (inclusief uitbreiding opname binnendijs gebied).

Tabel 3 Samenvatting van de Quickscan naar mogelijke extra doorbraaklocaties op de Niederrhein.

4 Afvoercapaciteit Wesel-Lobith

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt de tweede centrale vraag:

Wat is de afvoercapaciteit van het traject Wesel/Lobith?

Figuur 1 toont de modelgrens van zowel het 'innen' als het 'ausen'-model tussen Andernach en de Pannerdensche Kop. De modelgrens van het 'innen'-model ligt over het algemeen ter plaatse van de bandijk of primaire kering. Tussen grofweg km 650 en 810 dekt het 'ausen'-model het gehele binnendijkse gebied dat kan inunderen wanneer de dijk overloopt (en eventueel doorbreekt). Tussen Wesel (km 814) en de Pannerdensche Kop is dat niet het geval; daar is een buffer van circa 500 m achter de bandijk aangenomen. Die buffer dekt niet overal het gehele binnendijkse gebied dat kan inunderen wanneer de dijk overloopt. Dit betekent dat WAQUA-berekeningen waarbij in dit traject de dijk overloopt een onrealistisch beeld kunnen opleveren van het afvoerverloop, en dus de afvoer bij Lobith.

In dit hoofdstuk analyseren we, op basis van berekeningen met het 'innen'-model, en constante afvoer, hoe waarschijnlijk het is dat de dijken op dit traject overlopen. Met deze informatie kan worden beoordeeld of en in hoeverre de Baseline/Waqua-schematisatie uitgebreid dient te worden op het traject Wesel-Lobith om de afvoercapaciteit bij Lobith in te kunnen schatten.

4.2 Methode

De hoogte van de keringen aan beide oevers is bekend in Baseline (kadehoogte ter plaatse van de winterbedbegrenzing van het 'innen'-model). Die hoogte koppelen we aan de hectometerpunten in de as van de rivier. De hoogte van de keringen vergelijken we met waterstanden in de as van de rivier die zijn berekend met het 'innen'-model, waar de modelgrens van het WAQUA-model op de bandijk ligt.

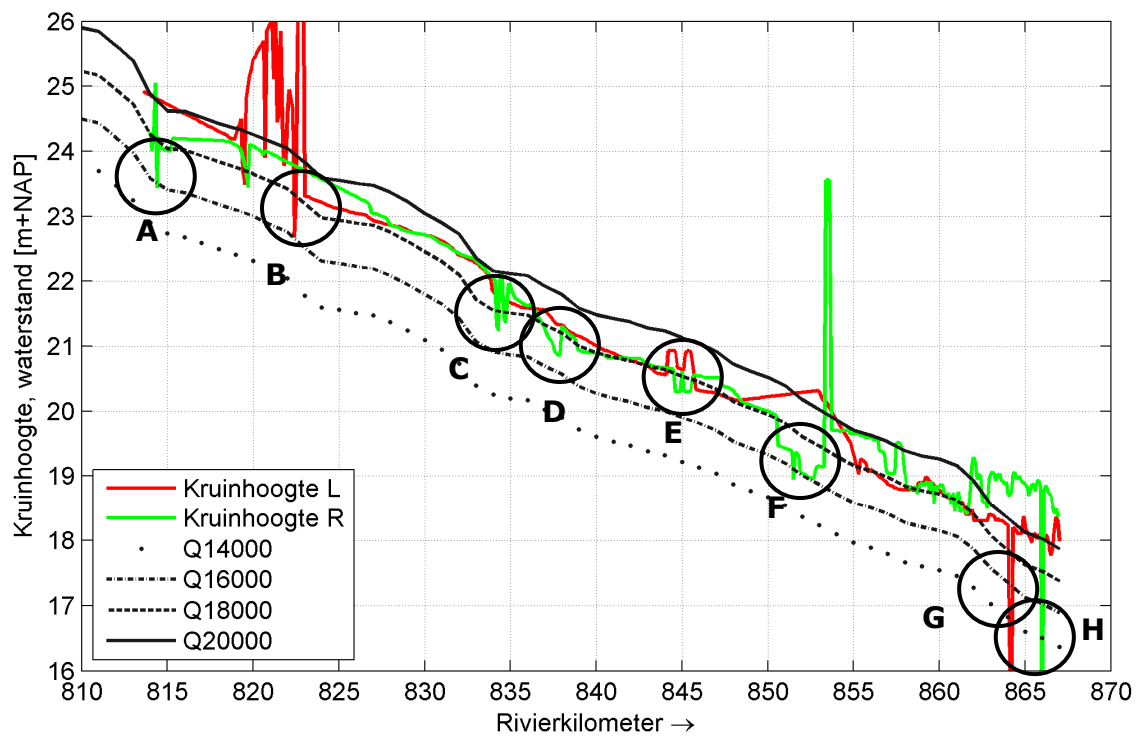
In de berekeningen gebruiken we als bovenrandvoorwaarde een constante afvoer gelijk aan de piekafvoeren van de afvoergolven uit deze studie: 14.000 m³/s, 16.000 m³/s, 18.000 m³/s en 20.000 m³/s. Laterale toestromen zijn niet meegenomen in deze analyse, om de afvoer op het gehele traject gelijk te houden. Als benedenrandvoorwaarde is een constante waterstand opgelegd, gebaseerd op de Qh-relatie bij de Pannerdensche Kop (zie paragraaf 2.4).

4.3 Resultaat

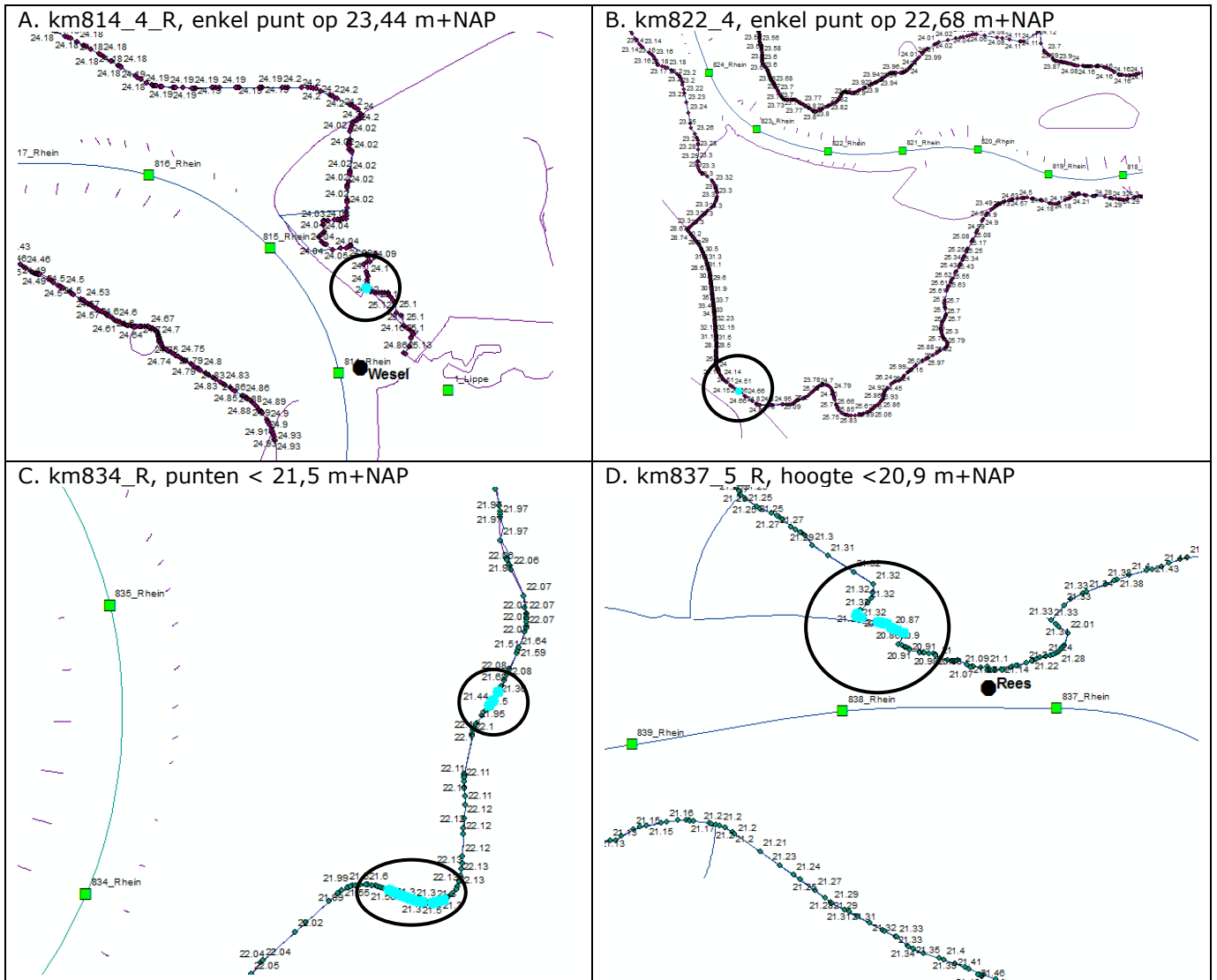
Voor de beschouwde scenario's, is de afvoer bij Wesel maximaal circa 18.000 m³/s, zie Figuur 6. Door golfdemping neemt de maximale afvoer richting Lobith iets af. De verwachting is derhalve dat de maximale afvoer op het traject Wesel-Lobith grofweg tussen de 17.500 en 18.000 m³/s zal liggen. Figuur 21 geeft de waterstand op het traject Wesel-Lobith voor 4 permanenties; tevens zijn de kruinhoogtes van de linker- en rechter bandijk getoond.

De kans op het overstromen en doorbreken van dijken op het traject Wesel (km 814) – Lobith (km 862) is vooral aanwezig op locaties waar de kruinhoogte onder het niveau komt van de

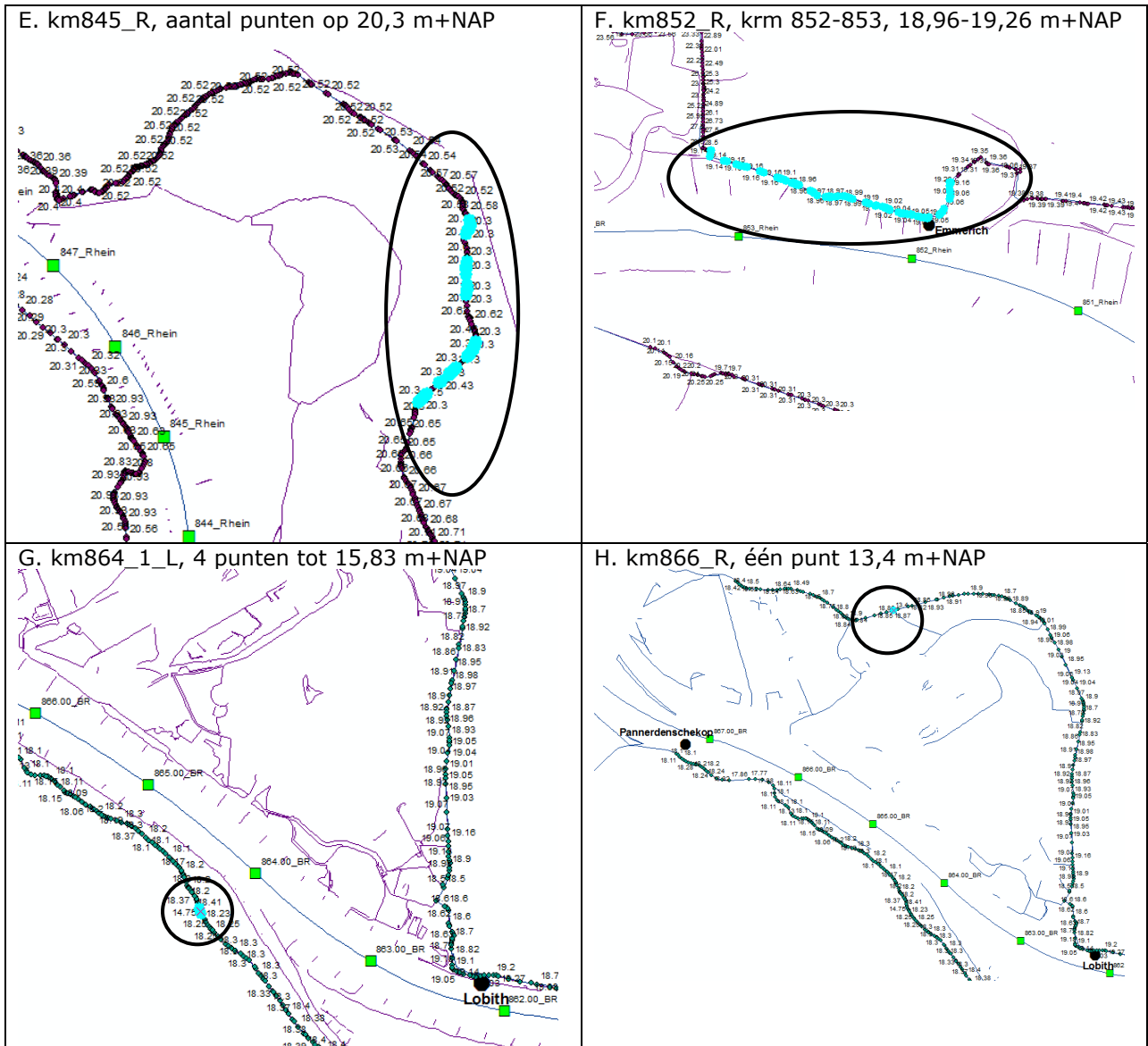
waterstanden bij een afvoer van $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$. De meest kritieke locaties zijn weergegeven in Figuur 21. Deze locaties met beperkte dijkhoogte zijn ook weergegeven in Figuur 22 (locaties A-D) en Figuur 23 (locaties E-H). Om een idee te krijgen van de ruimtelijke variatie in waterstand, is in Figuur 24 t/m Figuur 26 de waterstand bij $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$ in 2-D getoond. Op deze locaties zal bekeken moeten worden hoe waarschijnlijk het is dat de dijken overstromen of doorbreken. Merk op dat, op basis van berekeningen met het 'aussef'-model, op de rechteroever nabij km 834 ook reeds een potentiële doorbraaklocatie is gesignaleerd (paragraaf 3.4 en Tabel 3). Locaties G en H bevinden zich langs de Boven-Rijn in Nederland. Op beide locaties betreft het één of enkele punten waar de kruinhoogte laag is in vergelijking met omliggende punten. Deze punten zijn waarschijnlijk fouten in de model-schematisatie (dit dient geverifieerd te worden).



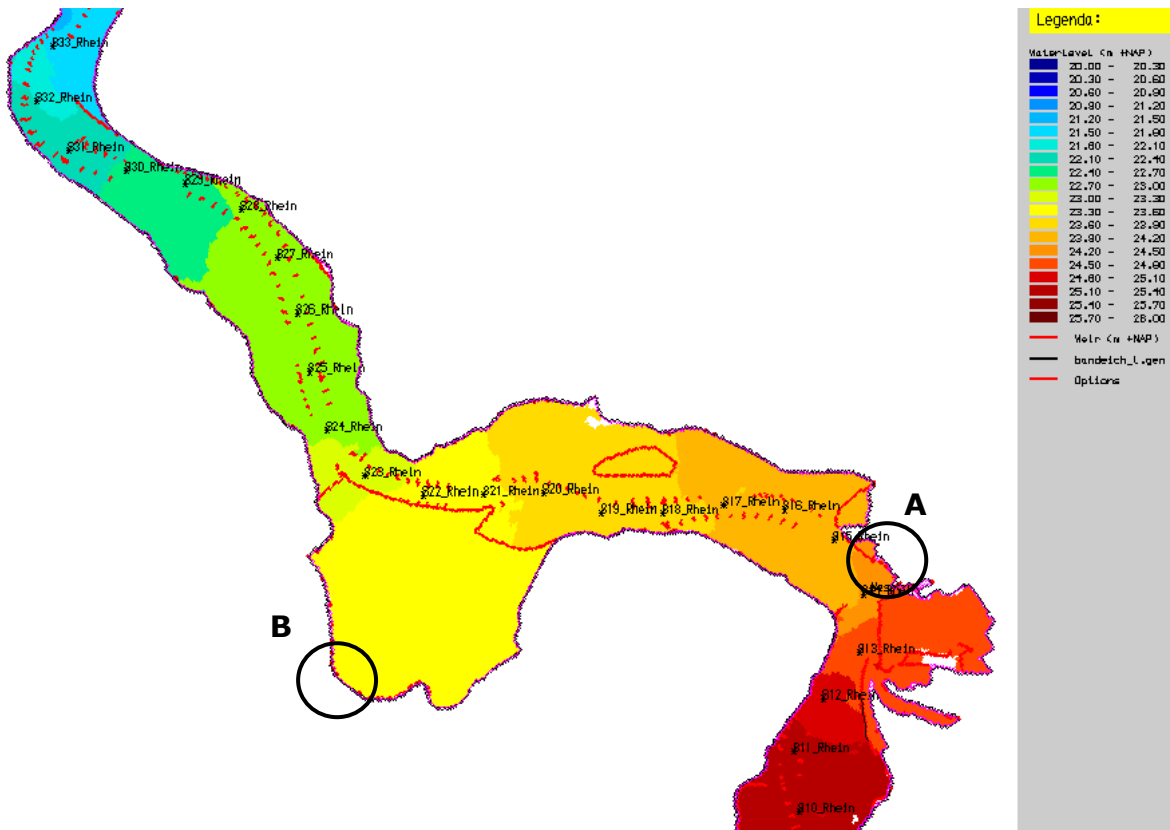
Figuur 21 Waterstanden bij permanenties op het traject Wesel-Pannerdensch Kop. In rood en groen zijn de kruinhoogtes van de linker en rechter bandijk getoond.



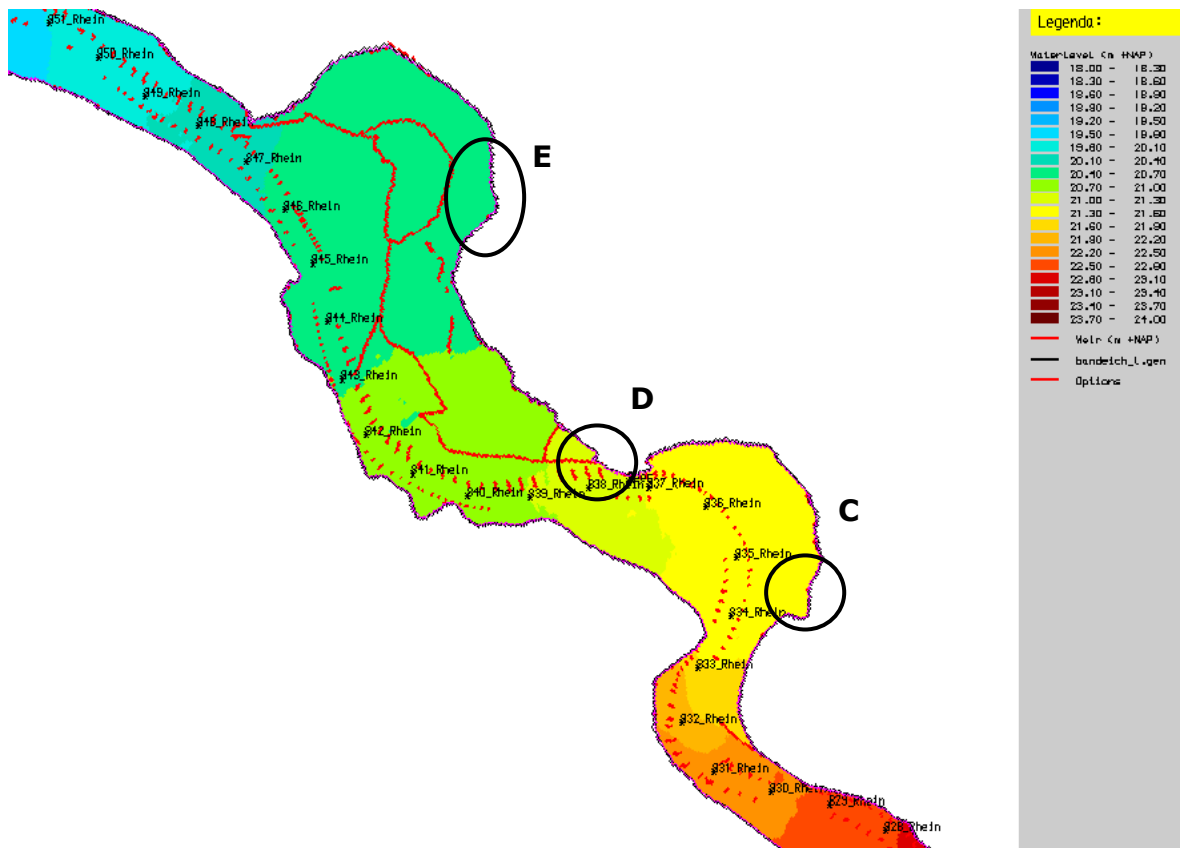
Figuur 22 Locaties met beperkte dijkhogte, locaties A-D.



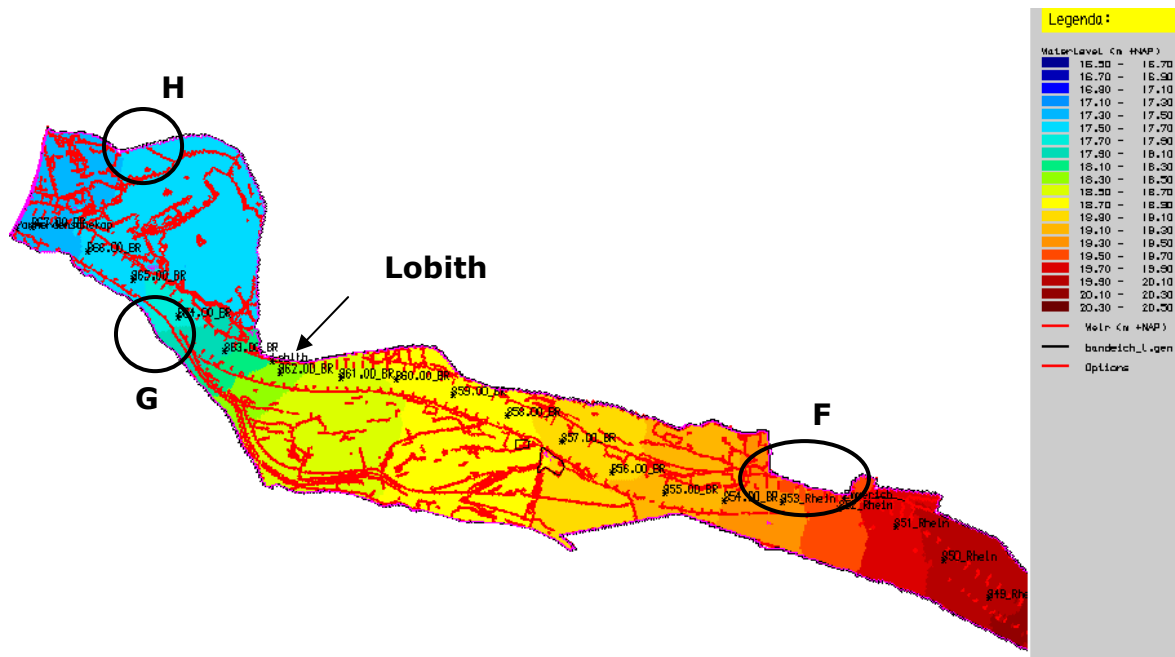
Figuur 23 Locaties met beperkte dijkhogte, locaties E-H.



Figuur 24 Waterstand bij 18.000 m³/s km 810 – km 833.



Figuur 25 Waterstand bij 18.000 m³/s km 828 – km 851.



Figuur 26 Waterstand bij 18.000 m³/s km 849 – km 867.

5 Conclusies en aanbevelingen

De werklijn bij Lobith is bepalend voor het beleid met betrekking tot hoogwaterveiligheid in Nederland. ENW-R heeft geadviseerd om de afleiding van de werklijn bij Lobith te baseren op realistische, maar wel conservatieve aannames, ofwel de situatie met het grootste verwachte overstromingsrisico van de dijken in Nederland. Dit is uitgewerkt tot: houd wel rekening met overlopen van dijken in Duitsland, maar niet met het doorbreken van die dijken.

In Figuur 9 is te zien dat de aanname om geen rekening te houden met dijkdoorbraken voor de meeste van de beschouwde situaties *inderdaad conservatief* is. De waterstand in berekeningen zonder dijkdoorbraak is hoger dan in de situatie met dijkdoorbraak. Echter, er zijn gevallen waarbij dit niet op gaat. Het effect van dijkdoorbraken op het afvoerverloop bij Lobith en Wesel is niet voor alle piekafvoeren en golfvormen gelijk. Het grootste verschil treedt op bij een piekafvoer van 18.000 m³/s bij Andernach. De afvoer bij zowel Wesel als Lobith is dan significant kleiner als rekening wordt gehouden met het doorbreken van dijken. Echter bij een smalle golf met een piekafvoer van 20.000 m³/s bij Andernach is de afvoer bij Wesel en Lobith juist groter bij een dijkdoorbraak (in dit geval door de doorbraak bij km 800).

Op basis van de uitgevoerde berekeningen kan dus niet eenduidig geconcludeerd worden dat een berekeningsmethode zonder doorbraken conservatievere hoogwaterschattingen geeft bij locaties Lobith en Wesel. Deze uitkomst komt overeen met de resultaten uit de studie van Gudden (2004, Tabel 6). Het blijkt dat naast doorbreken van dijken ook andere belangrijke aspecten een rol spelen in de piekafvoer en maximale waterstand tijdens extreem hoogwater. Van belang zijn de grootte van het gebied achter de dijken dat volloopt, de route die het water volgt voordat het weer terugstroomt naar de rivier en de afvoer/waterstand waarbij de dijk overloopt of doorbreekt. Dit laatste aspect is vooral belangrijk wanneer de dijk overloopt ruim voordat de piekafvoer arriveert, omdat dan het golffront zich sneller voortplant in de rivier. Per locatie langs de rivier kunnen verschillende (combinaties) van deze aspecten dominant zijn in de uitwerking op hoogwatergolven, en de daarmee samenhangende af- of toename van piekafvoeren en maximale waterstanden.

Een Quickscan van inundatiepatronen bij een piekafvoer van 20.000 m³/s (smalle golf) geeft aan dat er op het traject waar het 'ausse'-model beschikbaar is (grofweg km 650 – 810, Figuur 1), waarschijnlijk geen extra doorbraaklocaties in de schematisatie nodig zijn voor afvoeren tot in ieder geval 20.000 m³/s. Benedenstrooms van Wesel is mogelijk een doorbraaklocatie in de schematisatie nodig bij op de rechteroever rivierkilometer 834.

Op het traject Wesel-Lobith zijn de inundatiepatronen bij dijkoverlopen mogelijk onrealistisch omdat het 'ausse'-model daar niet het volledige gebied dekt dat kan inunderen. Dit kan invloed hebben op de maximale afvoeren en hoogwaterstanden bij Lobith. Een vergelijking van berekende waterstanden in de as van de rivier en de kruinhoogte van de keringen geeft aan dat er 6 locaties zijn op dit traject waar de dijk mogelijk overloopt (twee locaties langs de Boven-Rijn zijn waarschijnlijk fouten in de WAQUA-schematisatie). Voor deze 6 locaties dient onderzocht te worden of en in hoeverre de Baseline/WAQUA-schematisatie uitbereid dient te worden om de afvoer en waterstand bij Lobith voldoende nauwkeurig te kunnen voorspellen.

6 Referenties

- Gudden, J. (2004). Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein. Deelrapport: Overstromingen in Nordrhein-Westfalen en Gelderland. ISBN 9036956692, december 2004.
- Hegnauer, M., Beersma, J.J., Buishand, T.A., Passchier, R.H., Van de Boogaard, H.F.P. (2014). GRADE Final Report. Deltares report, Delft, The Netherlands
- Lammersen, R. (2004). Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein, Eindrapport. ISBN 9036956390. (Ook in het Duits beschikbaar, ISBN 9036956382).
- Vieira da Silva, J., Barneveld, H.J. & Wijbenga, J.H.A. (2013). Grade. Dijkoverstroming Niederrhein: SOBEK versus WAQUA. HKV rapport PR2479.20, maart 2013.
- 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.



HKV IJN in water BV

Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Botter 11-29
8232 JN Lelystad

0320 29 42 42
info@hkv.nl
www.hkv.nl