

Opdrachtgever:
Rijkswaterstaat, DWW en RIZA

Verkenning van systeemwerking in het bovenriviereengebied van de Rijntakken

rapport

december 2005

Opdrachtgever:
Rijkswaterstaat, DWW en RIZA

Verkenning van systeemwerking in het bovenrivierengebied van de Rijntakken

Thieu van Mierlo

rapport

december 2005

Inhoud

1	Inleiding	1—1
1.1	Achtergrond	1—1
1.2	Omschrijving van de opdrachten	1—1
1.3	Doel van het onderzoek	1—2
1.4	Organisatie van het onderzoek	1—2
1.5	Het begrip Systeemwerking	1—2
1.6	Beknopte beschrijving van DelftFLS	1—2
1.7	Erkenning	1—2
1.8	Leeswijzer	1—3
2	De DelftFLS modellen	2—1
2.1	Omvang van het Rees-Kampen DelftFLS model	2—1
2.2	Bathymetrie en Dijkhoogten in het Rees-Kampen DelftFLS model	2—3
2.3	Calibratie van het Rees-Kampen DelftFLS model	2—3
3	Hydraulische- en dijkdoorbraak aspecten.....	3—1
3.1	Hydraulische randvoorwaarden	3—1
3.2	Hydraulische eigenschappen van de Referentie situatie	3—2
3.3	Dijkdoorbraaklocaties	3—2
3.4	Tijdstip van dijkdoorbraak	3—4
3.5	Bresgroeiscenario	3—4
3.6	Dijken bezwijken enkel op dijkdoorbraaklocaties	3—4
4	Overzicht Dijkdoorbraakberekeningen.....	4—1
5	Resultaten van Dijkdoorbraakberekeningen	5—1
5.1	Scenario L1T6GC (Lobith, rechter Rijndijk).....	5—2

5.2	Scenario L1T30GC (Lobith, rechter Rijndijk).....	5—3
5.3	Scenario L1T70GC (Lobith, rechter Rijndijk).....	5—4
5.4	Scenario L2T6GC (Kekerdom, linker Waaldijk)	5—6
5.5	Scenario L2T20GC (Kekerdom, linker Waaldijk)	5—7
5.6	Scenario L2T34GC (Kekerdom, linker Waaldijk)	5—8
5.7	Scenario L3T6GC (IJzendoorn, rechter Waaldijk).....	5—9
5.8	Scenario L3T6C1 (IJzendoorn, rechter Waaldijk, Dijkkring 43 gecompartmenteerd).....	5—10
5.9	Scenario L4T6GC (Rijswijk, linker Nederrijndijk).....	5—12
5.10	Scenario L5T6GC (Weurt, linker Waaldijk).....	5—13
5.11	Scenario L5T6C2 (Weurt, linker Waaldijk, Dijkkring 41 gecompartmenteerd).....	5—14
5.12	Scenario L6T6GC (Wamel, linker Waaldijk).....	5—15
5.13	Scenario L7T6GC (Vierakker, rechter IJsseldijk)	5—16
5.14	Scenario L8T6GC (Den Nul, rechter IJsseldijk)	5—16
5.15	Scenario L8T6C3 (Den Nul, rechter IJsseldijk, Dijkkring 53 gecompartmenteerd).....	5—18
6	Hydraulische Systeemwerkingseffecten	6—1
6.1	Methode kwantificering Hydraulische Systeemwerkingseffecten	6—1
6.2	Hydraulische effecten van Systeemwerking	6—2
6.3	Evaluatie Hydraulische Systeemwerkingsaspecten.....	6—7
7	Generale uitspraken over hydraulische effecten van systeemwerking	7—1
7.1	Wat wordt bedoeld met “Generale uitspraken” en wanneer en waarom worden ze mogelijk geacht.....	7—1
7.2	Dijkdoorbraakresultaten waarmee is nagegaan in hoeverre “Generale uitspraken” mogelijk zijn	7—2
7.3	Initiële verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken	7—2
7.3.1	Initiële verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken bij Lobith	7—2

7.3.2	Initiële verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken bij Kekerdom	7—4
7.4	Voortplanting van verstoringen in het riviersysteem	7—5
7.4.1	Voortplanting van verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken bij Lobith	7—6
7.4.2	Voortplanting van verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken bij Kekerdom.....	7—10
7.5	In hoeverre zijn Generale uitspraken mogelijk?	7—13
8	Samenvatting en aandachtspunten.....	8—1
8.1	Samenvatting	8—1
8.2	Conclusies.....	8—1
8.3	Aandachtpunten	8—2
9	Literatuur	9—1
Appendix:		
A	Overzicht van digitale databestanden.....	A—1
A.1	Overstromingsfilmpjes.....	A—1
A.2	Overige digitale data.....	A—2

I Inleiding

I.1 Achtergrond

Door de Dienst Weg-en Waterbouwkunde (DWW) van het ministerie van Verkeer en Waterstaat zijn twee opdrachten aan WL|Delft Hydraulics verstrekt, zijnde:

1. Reductie overstromingsschade door systeemwerking (veiligheidsdiscussie), DWW opdrachtnummer AK 053250,
2. Compartimentering van dijkkringgebieden in het bovenrivierengebied: beïnvloeding van systeemwerking en overstromingsschade, DWW opdrachtnummer AK 31520869.

Door het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) is een opdracht aan WL|Delft Hydraulics (opdrachtnummer 8051863) verstrekt om na te gaan of meer generale uitspraken over systeemwerking kunnen worden gemaakt.

Gezien het complementaire karakter van de drie bovengenoemde opdrachten is besloten om de bevindingen van de drie opdrachten in een gezamenlijk rapport vast te leggen.

I.2 Omschrijving van de opdrachten

De eerste opdracht (DWW, AK 053250) betrof het bepalen van de hydraulische gevolgen van een achttal mogelijke dijkdoorbraken in het bovenrivierengebied van de Rijntakken. De tweede opdracht (DWW, AK 31520869) betrof eveneens het bepalen van de hydraulische gevolgen van een drietal mogelijke dijkdoorbraken, waarbij één specifieke dijkkring is gecompartmenteerd. De laatstgenoemde berekeningen zijn slechts beeldvormende (eerste verkennende) berekeningen. In deze berekeningen is bijvoorbeeld de inzet van mogelijke overlagen, welke overtollig ingestroomd rivierwater weer terugvoeren naar de rivier, niet meegenomen. Het terugvoeren van overtollig ingestroomd rivierwater kan gewenst zijn om overstroming van aangrenzende dijk(ring)en te voorkomen. Voorzien is dat de wijze van compartimentering van deze dijkkringen nog nader uitgewerkt zal worden. De derde opdracht (RIZA, 8051863) betrof het nagaan of meer generale uitspraken over systeemwerking kunnen worden gemaakt. Hiertoe zijn een viertal aanvullende dijkdoorbraakberekeningen gemaakt waarin het tijdstip waarop een dijk doorbreekt is gevarieerd. Resumerend zijn in totaal vijftien dijkdoorbraakscenario's doorgerekend. In alle dijkdoorbraakscenario's is aangenomen dat er slechts één dijkdoorbraak optreedt. De hydraulische gevolgen van een dijkdoorbraak zijn bepaald middels DelftFLS berekeningen. Een DelftFLS berekening resulteert in een enorme hoeveelheid data. In overleg met de opdrachtgever is besloten om in dit rapport slechts de meest significante aspecten van de dijkdoorbraakscenario's te benoemen. Het overgrote deel van bewerkte berekeningresultaten is enkel in digitale vorm (c.q. Excel spreadsheets, GIS rasterkaarten en overstromingsfilmpjes) op een DVD aan de opdrachtgever ter beschikking gesteld. In Appendix A wordt een overzicht gegeven van deze digitale databestanden.

1.3 Doel van het onderzoek

Het doel van het onderzoek was het inventariseren en kwantificeren van de hydraulische gevolgen die het bezwijken van een specifiek dijkvak heeft voor veranderingen in de hydraulische belasting langs andere dijk(ring)en. In feite het kwantificeren van de hydraulische effecten van systeemwerking, gegeven de conditionele kans dat er slechts op één locatie langs de Nederlandse Rijnakkendijken een dijkdoorbraak optreedt. Verder is nagegaan of generale uitspraken over de hydraulische effecten van systeemwerking mogelijk zijn.

1.4 Organisatie van het onderzoek

Het onderzoek is uitgevoerd door Thieu van Mierlo (WL | Delft Hydraulics). Het onderhavige onderzoek is namens Rijkswaterstaat begeleid door Wim Silva en Emiel van Velzen (RIZA Arnhem) en Marcel van der Doef (DWW).

1.5 Het begrip Systeemwerking

Ten gevolge van een dijkdoorbraak kan in bepaalde gevallen niet alleen de aangrenzende dijkkring overstroomd, maar kunnen als gevolg van cascadowerking ook andere dijkkringen overstroomd. Als gevolg van een dijkdoorbraak zal een deel van het aanstromende rivierwater in de overstroomde dijkkring(en) worden geborgen. Deze berging van rivierwater kan resulteren in een verlaging van waterstanden langs andere dijk(ring)en, waardoor de veiligheid van deze dijk(ring)en toeneemt. Echter indien de overstroomde dijkkring(en) onvoldoende capaciteit hebben om het ingestroomde rivierwater te bergen, dan is het mogelijk dat het ingestroomde rivierwater naar andere riviertakken wegstroomt. Indien zo'n ontvangende riviertak een kleinere afvoercapaciteit heeft dan de riviertak waarvan het water vandaan komt (b.v. Waalwater naar Maas, Waalwater naar Lek, Rijnwater naar IJssel), dan kan dit leiden tot excessief hoge waterstanden op zo'n ontvangende riviertak en derhalve in een verlaging van de veiligheid voor dijk(ring)en gelegen langs zo'n ontvangende riviertak. Voor nadere informatie omtrent het begrip systeemwerking en de effecten van systeemwerking op het overstromingsrisico (product van de kans op overstrooming en bijbehorende schade) wordt verwezen naar Van Mierlo et al (2003).

1.6 Beknopte beschrijving van DelftFLS

In DelftFLS worden de twee dimensionale diepte-gemiddelde St. Venant vergelijkingen opgelost. DelftFLS is in staat om zowel stationaire als niet stationaire stroming door te rekenen alsmede overgangen van sub-kritische stroming naar super-kritische stroming en visa versa. DelftFLS heeft een robuust rekenschema en kan het inunderen van oorspronkelijk droog land simuleren.

1.7 Erkenning

Door Johan Gudden van de Provincie Gelderland zijn DelftFLS modellen ter beschikking gesteld. Deze DelftFLS modellen zijn zodanig aangepast/ingericht dat hydraulische effecten van systeemwerking konden worden bepaald.

I.8 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van de gebruikte DelftFLS modellen. In hoofdstuk 3 worden de hydraulische uitgangspunten van de DelftFLS berekeningen besproken. In hoofdstuk 4 wordt een overzicht gegeven van de uitgevoerde DelftFLS berekeningen. In hoofdstuk 5 worden de resultaten van de DelftFLS berekeningen besproken. In hoofdstuk 6 worden de hydraulische effecten van systeemwerking gepresenteerd en nader toegelicht. In hoofdstuk 7 wordt nagegaan in hoeverre het mogelijk is om generale uitspraken te doen over te verwachte hydraulische effecten van systeemwerking. In hoofdstuk 1 worden de resultaten van het onderhavige onderzoek samengevat en worden tevens belangrijke aandachtspunten benoemd.

2 De DelftFLS modellen

Voor het bepalen van de hydraulische effecten van systeemwerking is gebruik gemaakt van twee afzonderlijke DelftFLS modellen:

1. Het zogeheten Rees-Hattum DelftFLS model, en
2. Het zogeheten Rees-Kampen DelftFLS model.

In eerste instantie zijn berekeningen uitgevoerd met het Rees-Hattum DelftFLS model. Het Rees-Kampen DelftFLS model is ontwikkeld om de effecten tengevolge van het compartimenteren van dijkkring 53 (Salland) te kunnen bepalen. Het Rees-Kampen DelftFLS model is het grootste model en omvat het Rees-Hattum DelftFLS model. In dit hoofdstuk wordt enkel het Rees-Kampen DelftFLS model nader beschreven.

2.1 Omvang van het Rees-Kampen DelftFLS model

Het Rees-Kampen DelftFLS model heeft een 100 m rastergrid. Het model ligt grotendeels in Nederland en omvat slechts een klein gedeelte van de Duitse Nederrijn (zie Figuur 2-1).

Het Rees-Kampen DelftFLS model omvat de volgende riviertrajecten:

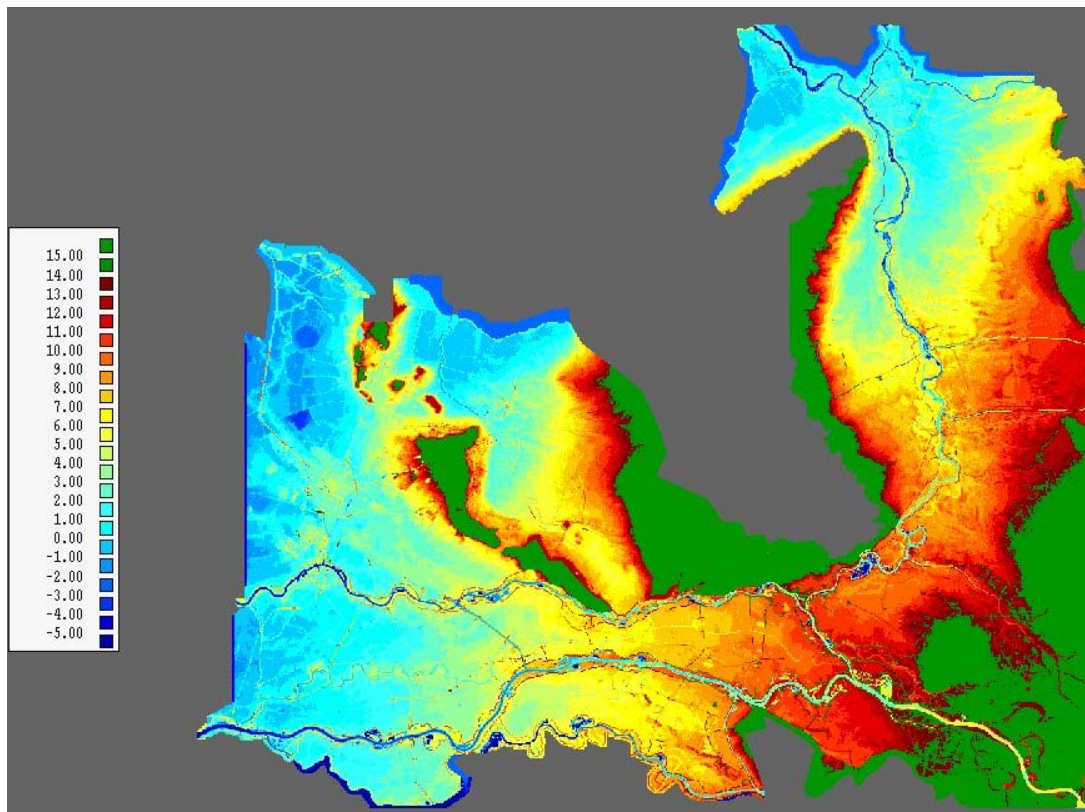
1. Maas van Mook (km 165) tot Sint Andries (km 208),
2. Bovenrijn juist benedenstrooms van Rees (km 841.0) tot aan het splitsingspunt Pannerdensch Kop (km 867.06);
3. Waal van Pannerdensch Kop tot Werkendam (km 960.9);
4. Pannerdensch Kanaal van de Pannerdensch Kop tot aan het splitsingspunt IJsselkop (km 878.59);
5. Nederrijn-Lek van IJsselkop tot Ameide (km 963.2);
6. IJssel van IJsselkop tot Kampen (km 999.46),
7. Het Zwarte Water van Zwolle tot aan Hasselt, en
8. De Overrijsselse Vecht vanaf Vilsteren (halverwege Dalfsen en Ommen) tot aan de samenstroming met het Zwarte Water.

In het gemodelleerde stuk van de Nederrijn bevinden zich stuw Driel (km 891.75), stuw Amerongen (km 922.54) en stuw Hagestein (km 947.11), welke niet in DelftFLS zijn gemodelleerd. Tijdens lage afvoeren te Lobith worden deze drie stuwen gebruikt om zowel de afvoer als waterstanden op de Rijntakken te reguleren. Alle drie genoemde stuwen zijn gestreken voor afvoeren te Lobith hoger dan 3.500 m³/s. Aangezien het Rees-Kampen DelftFLS model enkel wordt gebruikt voor hoogwaterberekeningen, is het niet modelleren van deze drie stuwen toegestaan.

Het Rees-Kampen DelftFLS model omvat de volgende 22 primaire dijkringen:

1. Dijkkring 9 (Vollenhove), slechts gedeeltelijk opgenomen,
2. Dijkkring 10 (Mastenbroek), slechts deels opgenomen,
3. Dijkkring 11 (IJsseldelta), in zijn geheel opgenomen,
4. Dijkkring 14 (Zuid-Holland), slechts deels opgenomen,
5. Dijkkring 15 (Lopiker- en Krimpenerwaard), slechts deels opgenomen,
6. Dijkkring 16 (Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden) slechts deels opgenomen
7. Dijkkring 36 (Land van Heusden / de Maaskant), slechts een kleine strook grenzend aan de Maas tussen Mook (km 165) tot Sint Andries (km 208) is opgenomen,

8. Dijkkring 38 (Bommelerwaard), in zijn geheel opgenomen,
9. Dijkkring 40 (Heerewaarden), in zijn geheel opgenomen,
10. Dijkkring 41 (Land van Maas en Waal), in zijn geheel opgenomen
11. Dijkkring 42 (Ooy en Millingen), in zijn geheel opgenomen inclusief een deel van de Duitse Düffeltpolder
12. Dijkkring 43 (Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden), in zijn geheel opgenomen,
13. Dijkkring 44 (Kromme Rijn), tot aan Diemen opgenomen,
14. Dijkkring 45 (Gelderse Vallei), in zijn geheel opgenomen,
15. Dijkkring 46 (Eempolder), in zijn geheel opgenomen,
16. Dijkkring 47 (Arnhem en Velpsebroek), in zijn geheel opgenomen (opm: een deel van deze dijkkring is opgenomen in de rivier schematisatie),
17. Dijkkring 48 (Rijn en IJssel), in zijn geheel opgenomen,
18. Dijkkring 49 (IJsselland), in zijn geheel opgenomen,
19. Dijkkring 50 (Zutphen), in zijn geheel opgenomen,
20. Dijkkring 51 (Gorssel), in zijn geheel opgenomen,
21. Dijkkring 52 (Oost Veluwe), in zijn geheel opgenomen,
22. Dijkkring 53 (Salland), in zijn geheel opgenomen,



Figuur 2-1 Het Rees-Kampen DelftFLS model

Het Rees-Kampen DelftFLS model is zodanig ingericht dat geanticipeerde hydraulische effecten van systeemwerking zich kunnen manifesteren en tevens zo goed mogelijk kunnen worden gekwantificeerd. Hiertoe zijn onder andere zogenoemde opvangbakken grenzend aan benedenstroomse dijkkringen in de DelftFLS model schematisatie aangebracht.

2.2 Bathymetrie en Dijkhoogten in het Rees-Kampen DelftFLS model

(i) Bathymetrie:

Met uitzondering van het IJssel traject van Hattum naar Kampen komt de bathymetrie van de Rijntakken uit het Rampenbeheersingstrategieën Onderzoek (RBSO) project. Deze RBSO rivier bathymetrie komt qua inrichting overeen met riviersituatie in 2015, zoals voorzien in het project “Ruimte voor de Rivier”(VKA, versie September 2003). De bathymetrie van het IJssel traject van Hattum naar Kampen komt uit het Viking project en komt overeen met de rivier situatie zoals in 2003. De bathymetrie van de Maas komt ook overeen met de rivier situatie zoals in 2003.

(ii) Dijkhoogten:

Alle Nederlandse dijk(ring)en hebben de bij de Provincie Gelderland meest recent bekende dijkhoogte. Deze dijkhoogten zijn conform het DWW Agi bestand 2004 versie 1.1. Langs de Duitse Niederrhein (traject Rees-Lobith) zijn de dijken uitvoorzorg verhoogd teneinde overstromingen voor een permanente afvoer van 17.000 m³/s te voorkomen.

2.3 Calibratie van het Rees-Kampen DelftFLS model

Met uitzondering van het IJssel traject van Hattum naar Kampen zijn de Rijntakken enkel gecalibreerd voor een permanente afvoer van 16.000 m³/s. Hierbij is gebruik gemaakt van de resultaten van een WAQUA berekening, welke door RIZA Arnhem ter beschikking is gesteld. Deze calibratie is uitgevoerd door dhr. Johan Gudden van de Provincie Gelderland. Het IJssel traject van Hattum naar Kampen is ook gecalibreerd door dhr. Johan Gudden van de Provincie Gelderland in het kader van het Viking project (zie Van Mierlo et al, 2005). Het Maas traject van Mook tot Sint Andries is eveneens gecalibreerd door dhr. Johan Gudden van de Provincie Gelderland.

Het Zwarte water en de Overrijsselse Vecht zijn niet gecalibreerd en zijn enkel meegenomen om uitstroming uit dijkkring 53 ten noorden van Zwolle mee te kunnen nemen.

3 Hydraulische- en dijkdoorbraak aspecten

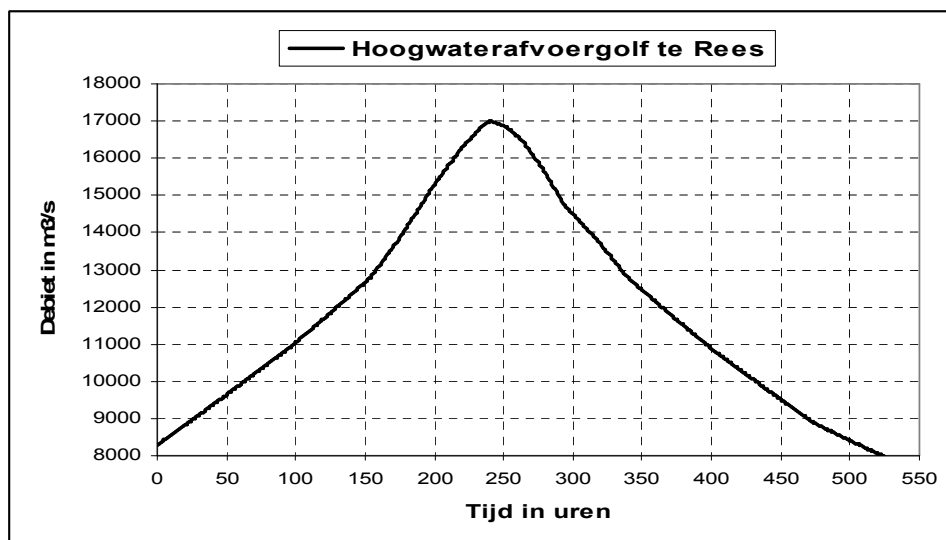
3.1 Hydraulische randvoorwaarden

In alle DelftFLS berekeningen zijn de volgende hydraulische randvoorwaarden gebruikt:

- een hoogwatergolf met een piekafvoer van 17.000 m³/s (zie Figuur 3-1) nabij Rees (Bovenrijn_Km841.0). Deze hoogwatergolf is bepaald middels de zogenoemde golfvormgenerator (HKV, 2003). Als gevolg van topvervlakking bedraagt ter hoogte van Lobith de piekafvoer nog 16.935 m³/s.
- een permanente afvoer van 3.650 m³/s bij Mook (Maas_Km165),
- Q-h relaties (zie Tabel 3-1) bij Sint Andries (Maas_Km208), Werkendam (Waal_Km960.9) en Ameide (Lek_Km 963.2),

In het Rees-Hattum DelftFLS model is additioneel een Q-h relatie (zie Tabel 3-1) bij Hattum (IJssel_Km977.6) opgelegd. In het Rees-Kampen DelftFLS model zijn volgende additionele randvoorwaarden gebruikt:

- Een Q-h relatie (zie Tabel 3-1) nabij Kampen (IJssel_Km 999.46),
- Een constante waterstand van NAP + 0.50 m bij Hasselt op het Zwarte Water,
- Een permanente afvoer van 1.0 m³/s bij Vilsteren op de Overijsselsche Vecht.
Opgemerkt dient te worden dat:
 - deze permanente afvoer van 1.0 m³/s gering is in verhouding tot de gehanteerde afvoer van 17.000 m³/s op de Bovenrijn. Dit omdat hoogwaters op de Overijsselsche Vecht meestal samen vallen met hoogwaters op de IJssel en dus ook met hoogwaters op de Bovenrijn.
 - Deze permanente afvoer van 1.0 m³/s is slechts toegepast in twee dijkdoorbraakberekeningen. Op de mogelijke consequenties hiervan wordt in §5.14 en §5.15 nader ingegaan.



Figuur 3-1 Hoogwaterafvoergolf nabij Rees (Bovenrijn_Km841.0)

Tabel 3-1 Q-h relaties gebruikt als randvoorwaarden in het Rees-Hattum en Rees-Kampen DelftFLS model

Sint Andries Maas_Km208		Werkendam Waal_Km960.9		Ameide Lek_Km963.2		Hattum IJssel_Km977.6		Kampen IJssel_Km999.46	
Waterstand	Debiet	Waterstand	Debiet	Waterstand	Debiet	Waterstand	Debiet	Waterstand	Debiet
<i>m</i>	<i>m³/s</i>	<i>m</i>	<i>m³/s</i>	<i>m</i>	<i>m³/s</i>	<i>m</i>	<i>m³/s</i>	<i>m</i>	<i>m³/s</i>
1.00	300	0.35	682	0.42	19	0.25	250	-0.33	136
1.70	600	0.40	845	0.76	148	1	400	-0.31	176
2.40	900	0.50	1159	0.80	251	1.57	553	-0.28	250
3.30	1250	0.56	1263	0.95	463	2.15	699	-0.27	259
4.50	1750	0.60	1331	1.17	628	2.55	841	-0.25	285
5.35	2250	0.62	1413	1.07	716	2.88	988	-0.21	351
6.11	2750	0.75	1808	1.24	811	3.03	1093	-0.13	465
6.69	3200	0.95	2304	1.45	921	3.18	1251	-0.07	529
7.20	3650	1.04	2609	1.66	1029	3.46	1451	-0.02	598
7.90	4300	1.39	3302	1.97	1207	3.65	1650	0.06	685
8.60	5150	1.54	3710	2.24	1358	3.8	1810	0.14	775
9.25	6250	1.91	4716	2.54	1538	3.9	1975	0.22	876
9.50	7350	2.13	5311	3.15	1891	3.98	2144	0.32	995
9.55	8600	2.49	6195	3.85	2277	4.17	2333	0.38	1084
		2.77	6967	4.28	2507	4.39	2526	0.57	1332
		3.02	7684	4.43	2635	4.66	2712	0.79	1630
		3.17	8101	4.81	2903	5.55	3526	1.01	1918
		3.46	8953	5.08	3082	5.6	5526	1.34	2333
		3.65	9585	5.38	3300			1.50	2526
		3.82	10173	6.10	5000			1.55	3526
		4.02	10775					1.60	5526
		4.50	20000						

3.2 Hydraulische eigenschappen van de Referentie situatie

In de referentie situatie (c.q. géén dijkdoorbraken) kan een permanente Bovenrijnafvoer van 17.000 m³/s en een permanente Maasafvoer van 3.650 m³/s door het riviersysteem worden afgevoerd zonder dat dijkvingen met een normfrequentie van 1/1250 jaar of hoger overstromen. Hiervoor is wel de Wilhelminasluis in de Afgedamde Maas verhoogd tot een niveau van NAP + 7.00 m om te voorkomen dat Waalwater via de Afgedamde Maas wegstroomt. Verder dient te worden opgemerkt dat dijkving 40 (Heerewaarden) met een normfrequentie van 1/500 jaar overstromt voor Maasafvoeren van 3.650 m³/s. In alle berekeningen is een permanente Maasafvoer van 3.650 m³/s opgelegd. Derhalve wordt in alle referentie- en dijkdoorbraakberekeningen dijkving 40 (Heerewaarden) volledig overstromd door Maaswater.

3.3 Dijkdoorbraaklocaties

In totaal zijn acht verschillende dijkdoorbraaklocaties beschouwd (zie Figuur 3-2 en Tabel 3-2). Behalve de locatie Den Nul (rechter IJsseldijk) zijn alle dijkdoorbraaklocaties door RIZA geselecteerd als locaties waar een dijkdoorbraak het meest waarschijnlijk is. Hierbij is gebruik gemaakt van middels Hydra B en Hydra+ berekende overstromingskansen (Stijnen, 2005 en Van den Bosch, 2005).

Tabel 3-2 Overzicht van beschouwde dijkdoorbraaklocaties

Overzicht van beschouwde dijkdoorbraaklocaties		
Code	Locatie	Aangrenzende (primaire) dijkkring
L1	Lobith, Rijn_Km861.4, rechter Bovenrijndijk	Rijn en IJssel (dijkring 48)
L2	Kekerdom, Waal_Km872.7, linker Waaldijk	Ooy en Millingen (dijkring 42)
L3	IJzendoorn, Waal_Km908.4, rechter Waaldijk	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden (dijkring 43)
L4	Rijswijk, Nederrijn_Km928.5, linker N.R.dijk	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden (dijkring 43)
L5	Weurt, Waal_Km889.4, linker Waaldijk	Land van Maas en Waal (dijkring 41)
L6	Wamel, Waal_Km911.5 linker Waaldijk	Land van Maas en Waal (dijkring 41)
L7	Vierakker, IJssel_Km922.5, rechter IJsseldijk	Zutphen (dijkring 50)
L8	Den Nul, IJssel_Km959.1, rechter IJsseldijk	Salland (dijkring 53)



Figuur 3-2 De acht beschouwde dijkdoorbraaklocaties

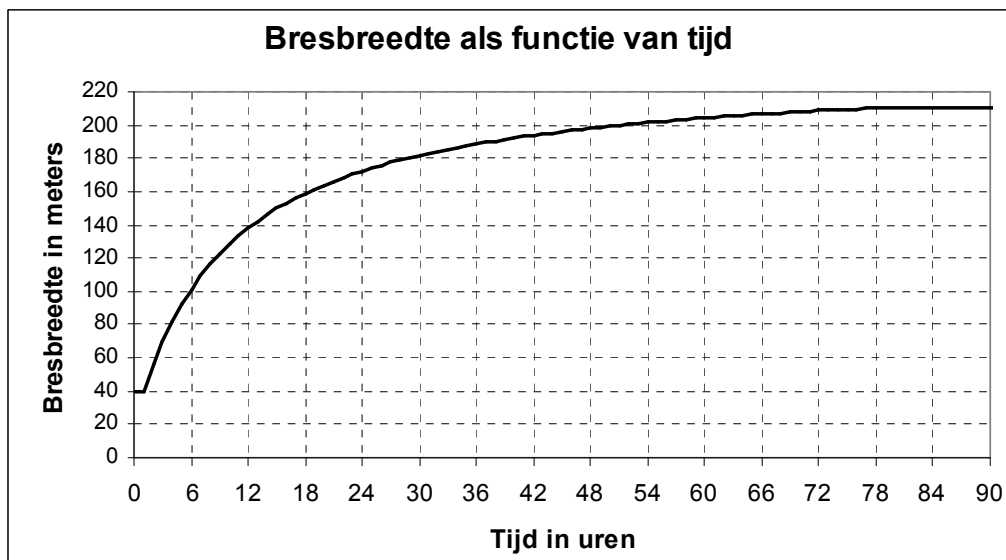
3.4 Tijdstip van dijkdoorbraak

Voor alle acht dijkdoorbraaklocaties (zie Tabel 3-2) zijn berekeningen gemaakt waarin de dijk doorbreekt 6 uur voordat ter plaatse van de dijkdoorbraaklocatie de top van de hoogwatergolf wordt bereikt. Voor een dijkdoorbraak bij Lobith en Kekerdom zijn aanvullende dijkdoorbraaktijdstippen gehanteerd, zijnde:

- Lobith (L1): 30 en 70 uur voor het bereiken van de hoogste rivier waterstand, en
- Kekerdom (L2): 20 en 34 uur voor bereiken van de hoogste rivier waterstand.

3.5 Bresgroeiscenario

In alle dijkdoorbraakberekeningen is aangenomen dat het dijkgat zich ontwikkelt conform het bresgroeiscenario zoals dat is gebruikt in Niederrhein project (Lammersen, 2004). In dit bresgroeiscenario wordt in het eerste uur na doorbraak het dijkgat bij een constante breedte van ca. 39m uitgeschuurd tot maaiveldhoogte (maximum van binnendijkse- en buitendijkse maaiveldhoogte). Daarna groeit het dijkgat enkel nog in de breedte en wordt 78 uur na dijkdoorbraak een maximale dijkgatbreedte van 210 m bereikt (zie Figuur 3-3).



Figuur 3-3 Ontwikkeling van de breedte van een dijkdoorbraak als functie van de tijd na dijkdoorbraak

3.6 Dijken bezwijken enkel op dijkdoorbraaklocaties

Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat in een DelftFLS berekening een dijk(vak) enkel kan bezwijken indien in de DelftFLS schematisatie een dijkdoorbraaklocatie terplaatse van dit dijkvak is opgenomen. Voor alle overige dijkvakken geldt dat deze dijkvakken in een DelftFLS berekening niet kunnen bezwijken. Ook niet indien deze dijkvakken van de achterzijde worden belast dan wel worden overstroomd.

4 Overzicht Dijkdoorbraakberekeningen

In totaal zijn er zeventien DelftFLS berekeningen (zie Tabel 4-1) gemaakt. Referentieberekeningen, waarin géén dijkdoorbraken (GD) optraden, zijn gemaakt met zowel het Rees-Hattum (RH) DelftFLS model als met het Rees-Kampen (RK) DelftFLS model. In totaal zijn er acht potentiële dijkdoorbraaklocaties (L1 t/m L8, zie Figuur 3-2 en Tabel 3-2) beschouwd. In elke dijkdoorbraakberekening is slechts op één van deze acht potentiële dijkdoorbraaklocaties ook daadwerkelijk de dijk doorgebroken. Het tijdstip van dijkdoorbraak varieert per berekening. Het tijdstip van dijkdoorbraak is gedefinieerd als het aantal uren voordat ter plaatse van de dijkdoorbraaklocatie de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Verder kan een onderscheid worden gemaakt naar twaalf dijkdoorbraakberekeningen waarin géén dijkringen zijn gecompartmenteerd (GC) en drie dijkdoorbraakberekeningen waarin slechts één specifieke dijkkring wel is gecompartmenteerd, respectievelijk:

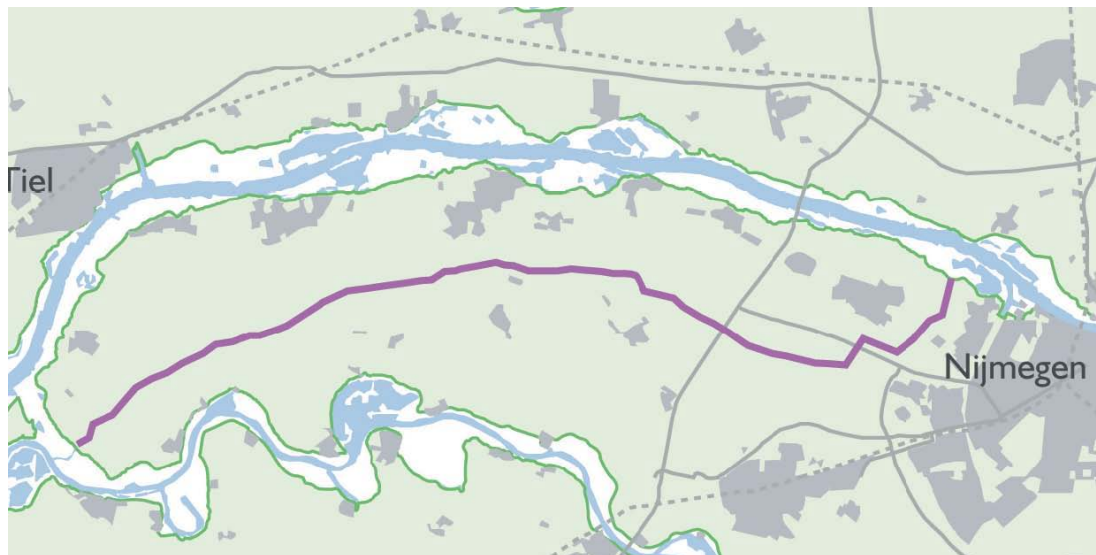
1. C1: Compartimentering van Dijkkring 43 (Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden) middels een verhoging van de oostelijke dijk langs het Amsterdam-Rijn Kanaal tot NAP + 10.5 m (zie Figuur 4-1),
2. C2, Compartimentering van Dijkkring 41 (Land van Maas en Waal) middels een beoogde dijk ten Zuiden/Oosten van de Oude Wetering, de Broekse Leigraaf, de Rijksche Wetering, en de Grote Wetering. Tevens is de Maasdijk vanaf de Grote Wetering tot aan de Waaldijk alsmede een deel van de Westelijke dijk langs het Maas en Waal Kanaal verhoogd. Kruinhoogten zijn zodanig hoog dat er géén overstroming van deze compartimenteringsdijk kan plaats vinden. Het tracé van de bovenomschreven compartimenteringsdijk wijkt ter hoogte van Nijmegen af van het tracé zoals getoond in Figuur 4-2. In Figuur 4-2 sluit de compartimenteringsdijk ten Westen van Weurt aan op de Waaldijk. Dit is ca. 1.5 kilometer ten Westen van de locatie waar de Westelijke dijk langs het Maas en Waal kanaal aansluit op de Waaldijk, en
3. C3: Compartimentering van Dijkkring 53 (Salland) middels een geplande ringweg/ringdijk ten Zuiden/Oosten van Zwolle met kruinhoogten van NAP + 6.5 m (zie Figuur 4-3).

Tabel 4-1 Overzicht van DelftFLS berekeningen

DelftFLS		Rapport Codering en Omschrijving van de DelftFLS berekeningen			
Model	Code	Code	Dijkdoorbraaklocatie en Tijdstip dijkdoorbraak		Compartimentering
RH	Ref	GD	Géén dijkdoorbraken	6	Géén Compartimentering
RK	TydHb	GD	Géén dijkdoorbraken	6	Géén Compartimentering
RH	1_dbr	L1T6GC	L1: Lobith, Rijn_Km861.4, rechter Bovenrijndijk	6	Géén Compartimentering
RH	12dbr	L1T30GC	L1: Lobith, Rijn_Km861.4, rechter Bovenrijndijk	30	Géén Compartimentering
RH	13dbr	L1T70GC	L1: Lobith, Rijn_Km861.4, rechter Bovenrijndijk	70	Géén Compartimentering
RH	2_dbr	L2T6GC	L2: Keerderom, Waal_Km872.7, linker Waaldijk	6	Géén Compartimentering
RH	14dbr	L2T20GC	L2: Keerderom, Waal_Km872.7, linker Waaldijk	20	Géén Compartimentering
RH	15dbr	L2T34GC	L2: Keerderom, Waal_Km872.7, linker Waaldijk	34	Géén Compartimentering
RH	3_dbr	L3T6GC	L3: IJzendoorn, Waal_Km908.4, rechter Waaldijk	6	Géén Compartimentering
RH	8_dbr	L3T6C1	L3: IJzendoorn, Waal_Km908.4, rechter Waaldijk	6	C1 , Compart. Dijkkring 43
RH	4_dbr	L4T6GC	L4: Rijswijk, Nederrijn_Km928.5, linker N.R.dijk	6	Géén Compartimentering
RH	5_dbr	L5T6GC	L5: Weurt, Waal_Km889.4, linker Waaldijk	6	Géén Compartimentering
RH	9_dbr	L5T6C2	L5: Weurt, Waal_Km889.4, linker Waaldijk	6	C2 , Compart. Dijkkring 41
RH	6_dbr	L6T6GC	L6: Wamel, Waal_Km911.5 linker Waaldijk	6	Géén Compartimentering
RH	7_dbr	L7T6GC	L7: Vierakker, IJssel_Km922.5, rechter IJsseldijk	6	Géén Compartimentering
RK	10dbr	L8T6C3	L8: Den Nul, IJssel_Km959.1, rechter IJsseldijk	6	C3 , Compart. Dijkkring 53
RK	11dbr	L8T6GC	L8: Den Nul, IJssel_Km959.1, rechter IJsseldijk	6	Géén Compartimentering



Figuur 4-1 Compartimentering van Dijkkring 43 (Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden) middels een verhoging van de oostelijke dijk langs het Amsterdam-Rijn Kanaal tot NAP + 10.5 m



Figuur 4-2 Compartimentering van Dijkkring 41 (Land van Maas en Waal). Opmerkingen: a) In de DelftFLS berekening zijn kruinhoogten zodanig hoog gekozen opdat de compartimenteringsdijk niet wordt overstroomd; b) In de DelftFLS berekening wijkt het tracé van de compartimenteringsdijk ter hoogte van Nijmegen af van het tracé zoals getoond in de bovenstaande figuur. In de bovenstaande figuur sluit de compartimenteringsdijk ten Westen van Weurt aan op de Waaldijk. Dit is ca. 1.5 kilometer ten Westen van de locatie waar in de DelftFLS berekening de compartimenteringsdijk (c.q. de Westelijke dijk langs het Maas en Waal kanaal) aansluit op de Waaldijk.



Figuur 4-3 Compartimentering van Dijkkring 53 (Salland) middels een geplande ringweg/ringdijk ten Zuiden/Oosten van Zwolle met kruinhoogten van NAP + 6.5 m

5 Resultaten van Dijkdoorbraakberekeningen

In dit hoofdstuk worden enkel de belangrijkste hydraulische aspecten van de dijkdoorbraakberekeningen besproken (zie §5.1 t/m §5.15). In Tabel 5-1 wordt een beknopt overzicht gegeven. Voor een kwantificering van de effecten van systeemwerking wordt verwezen naar hoofdstuk 6. Opgemerkt dient te worden dat de compartimenteringberekeningen (zie §5.8, §5.11 en §5.15) slechts beeldvormende (eerste verkennende) berekeningen zijn. Zo is bijvoorbeeld de inzet van mogelijke overlagen, welke overtollig ingestroomd rivierwater weer terugvoeren naar de rivier, niet meegenomen. Het terugvoeren van overtollig ingestroomd rivierwater kan gewenst zijn om overstroming van aangrenzende dijk(ring)en te voorkomen. Naar verwachting zal de wijze van mogelijke compartimentering van deze dijkringen nog nader worden uitgewerkt.

Tabel 5-1 Overzicht van meest belangrijkste hydraulische aspecten van de dijkdoorbraakberekeningen

Dijkdoorbraakberekening Code Dijkdoorbraaklocatie	Comparti- mentering	Overstroomde Dijkringen		Ingestroomd water stroomt (terug) naar
		Primair ¹⁾	Overige	
L1T6GC: Lobith, rechter Rijndijk	Géén Comp.	48	49 Ellekom	IJssel
L1T30GC: Lobith, rechter Rijndijk	Géén Comp.	48	49 Ellekom	IJssel
L1T70GC: Lobith, rechter Rijndijk	Géén Comp.	48	49,50,51, 52 Ellekom	IJssel
L2T6GC: Kekerdom, linker Waaldijk	Géén Comp.	42	Geen	n.v.t.
L2T20GC: Kekerdom, linker Waaldijk	Géén Comp.	42	Geen	n.v.t.
L2T34GC: Kekerdom, linker Waaldijk	Géén Comp.	42	Geen	Waal
L3T6GC: IJzendoorn, rechter Waaldijk	Géén Comp.	43	16	Waal
L3T6C1: IJzendoorn, rechter Waaldijk	Dijkring 43	43	16	Lek
L4T6GC: Rijswijk, linker Nederrijndijk	Géén Comp.	43	Geen	n.v.t.
L5T6GC: Weurt, linker Waaldijk	Géén Comp.	41	36 (38) ²⁾	Maas
L5T6C2: Weurt, linker Waaldijk	Dijkring 41	41	Geen	Waal
L6T6GC: Wamel, linker Waaldijk	Géén Comp.	41	36 (38) ²⁾	Maas
L7T6GC: Vierakker, rechter IJsseldijk	Géén Comp.	50	Geen	n.v.t.
L8T6GC: Den Nul, rechter IJsseldijk	Géén Comp.	53	Geen	Zwarte Water , Overijsselsche Vecht
L8T6C3: Den Nul, rechter IJsseldijk	Dijkring 53	53	Geen	Overijsselsche Vecht

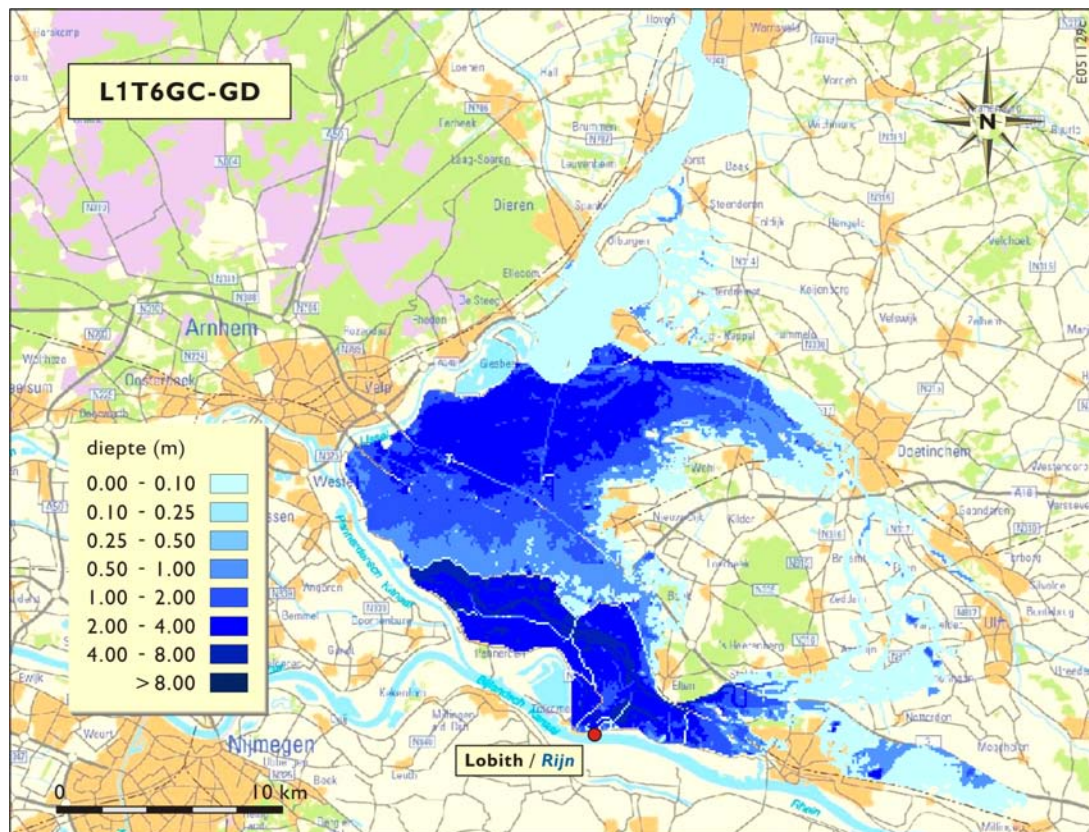
Opm:

1. Primaire dijkring is de dijkring waarin de dijkdoorbraak optreedt,
2. Dijkring 38 zal naar verwachting ook overstromen.

5.1 Scenario L1T6GC (Lobith, rechter Rijndijk)

In scenario L1T6GC breekt op locatie L1 (Lobith, Rijn_Km861.4, rechter Rijndijk) de dijk door 6 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Als gevolg van deze dijkdoorbraak wordt niet enkel de aangrenzende dijkkring 48 (Rijn en IJssel) overstroomd, maar wordt ook in geringe mate dijkkring 49 (IJsselland) overstroomd. Dijkkring 49 overstroomt als gevolg van het overstromen van de primaire dijken (categorie C) langs de Oude IJssel ter hoogte van Drempt. Primaire dijken categorie C zijn niet bestemd tot directe kering van buitenwater. Bovenrijnwater ingestroomd in dijkkring 48 stroomt terug naar de IJssel. Dit gebeurt door het overstromen van de rechter IJsseldijken tussen Km898 (benedenstrooms van Giesbeek) en Km901 (bovenstrooms van Doesburg). In dit IJsseldijktraject liggen de voormalige Liemerse overlaten. Het overstromen van genoemde rechter IJsseldijken leidt tot een toename in maximum afvoeren op de IJssel van ca. 300 m³/s. Indien genoemde IJsseldijken bezwijken, zal deze toename in maximum IJsselafvoer mogelijk nog hoger zijn. De instroming van Rijnwater op de IJssel resulteert in het overstromen van de rechter IJsseldijk (kruinhoogten tussen NAP + 11.25 en NAP +11.50) ter hoogte van IJssel_Km904.5, waardoor de N48 en ook Ellekom wordt overstroomd. In Figuur 5-1 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L1T6GC en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

Opm: voor overstroomde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.

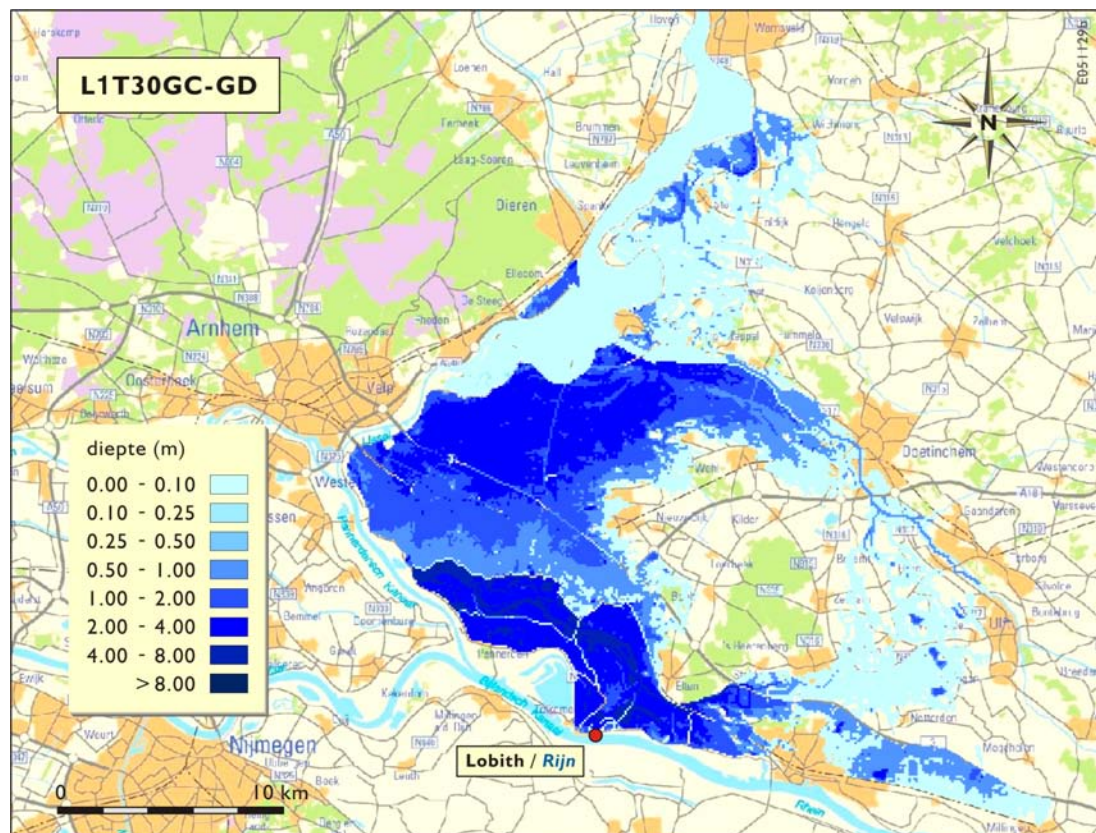


Figuur 5-1 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L1T6GC (dijkdoorbraak bij Lobith 6 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt; geen compartimentering) en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

5.2 Scenario L1T30GC (Lobith, rechter Rijndijk)

In scenario L1T30GC breekt op locatie L1 (Lobith, Rijn_Km861.4, rechter Rijndijk) de dijk door 30 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Evenals in scenario L1T6GC (zie §5.1) wordt de aangrenzende dijkkring 48 (Rijn en IJssel) en in geringe mate ook dijkkring 49 (IJsselland) overstroomd. Dijkkring 49 overstroomt als gevolg van het overstromen van de primaire dijken (categorie C) langs de Oude IJssel ter hoogte van Drempt. Primaire dijken categorie C zijn niet bestemd tot directe kering van buitenwater. Bovenrijnwater ingestroomd in dijkkring 48 stroomt terug naar de IJssel ter hoogte van de voormalige Liemerse overlaten resulterend in een toename van maximum afvoeren op de IJssel van ca. 600 m³/s. Indien de IJsseldijken ter hoogte van de voormalige Liemerse overlaten bezwijken, zal deze toename in maximum IJsselafvoer mogelijk nog hoger zijn. Evenals in scenario L1T6GC wordt ook Ellekom overstroomd. In scenario L1T30GC wordt echter ook Kasteel Middachten overstroomd. In het algemeen geldt dat overstromingsdiepten in scenario L1T30GC groter zijn dan in scenario L1T6GC. In Figuur 5-2 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L1T30GC en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

Opm: voor overstroomde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.

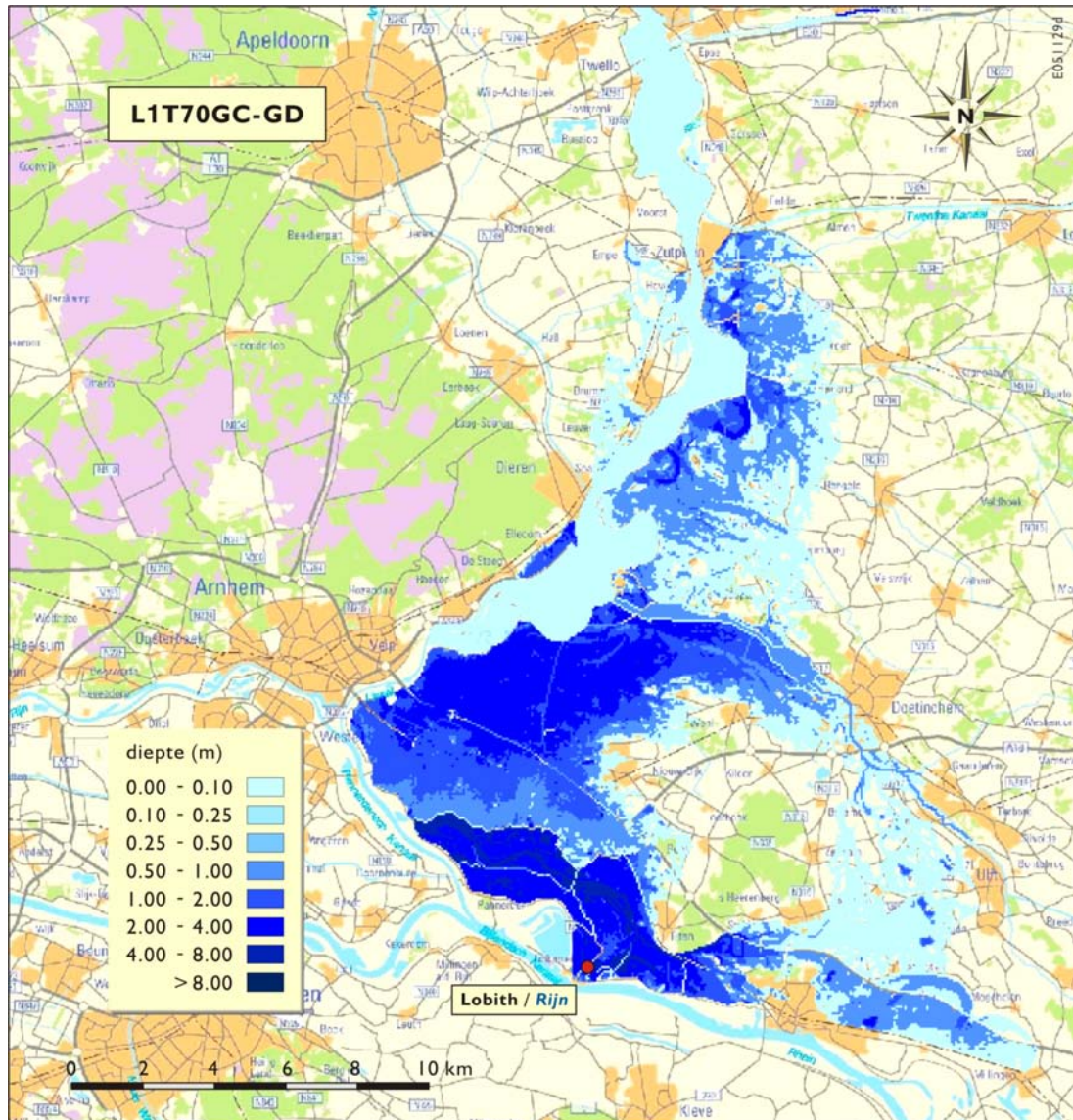


Figuur 5-2 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L1T30GC (dijkdoorbraak bij Lobith 30 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt; geen compartimentering) en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken

5.3 Scenario L1T70GC (Lobith, rechter Rijndijk)

In scenario L1T70GC breekt op locatie L1 (Lobith, Rijn_Km861.4, rechter Rijndijk) de dijk door 70 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Evenals in de scenario's L1T6GC (zie §5.1) en L1T30GC (zie §5.2) wordt de aangrenzende dijkkring 48 (Rijn en IJssel) en ook dijkkring 49 (IJsselland) overstroomd. In scenario L1T70GC overstroomt verder ook dijkkring 50 (Zutphen) en een zeer klein gedeelte van dijkkring 51 (Gorssel) en dijkkring 52 (Oost-Veluwe). Dijkkring 49 overstroomt doordat de rechter IJsseldijken overstroomt op een aantal locaties tussen km 904-913. Verder overstroomt dijkkring 49 ook als gevolg van het overstroomt van de primaire dijken (categorie C) langs de Oude IJssel ter hoogte van Drempt. Primaire dijken categorie C zijn niet bestemd tot directe kering van buitenwater. Het overstroomt van dijkkring 50 is enerzijds het gevolg van het overstroomt van de rechter IJsseldijken ter hoogte van km 922-924 en anderzijds het gevolg van het overstroomt van primaire dijken (categorie C) langs het stroomkanaal van Hackfort ter hoogte van Vorden. Dijkkring 51 overstroomt in zeer geringe mate als gevolg van het overstroomt van de rechter IJsseldijken ter hoogte van km 936 en 938. Dijkkring 52 overstroomt in zeer geringe mate als gevolg van het overstroomt van de linker IJsseldijken tussen km 912-915 en km 926-927. Bovenrijnwater ingestroomd in dijkkring 48 stroomt terug naar de IJssel ter hoogte van de voormalige Liemerse overlaten resulterend in een toename van maximum afvoeren op de IJssel van ca. 900 m³/s. Indien de IJsseldijken ter hoogte van de voormalige Liemerse overlaten bezwijken, zal deze toename in maximum IJsselafoer mogelijk nog hoger zijn. Verder wordt evenals in de scenario L1T30GC ook Ellekom en Kasteel Middachten overstroomd. In het algemeen geldt dat overstromingsdiepten in scenario L1T70GC groter zijn dan in scenario L1T30GC. In Figuur 5-3 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L1T70GC en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

Opmerking: voor overstroomde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.

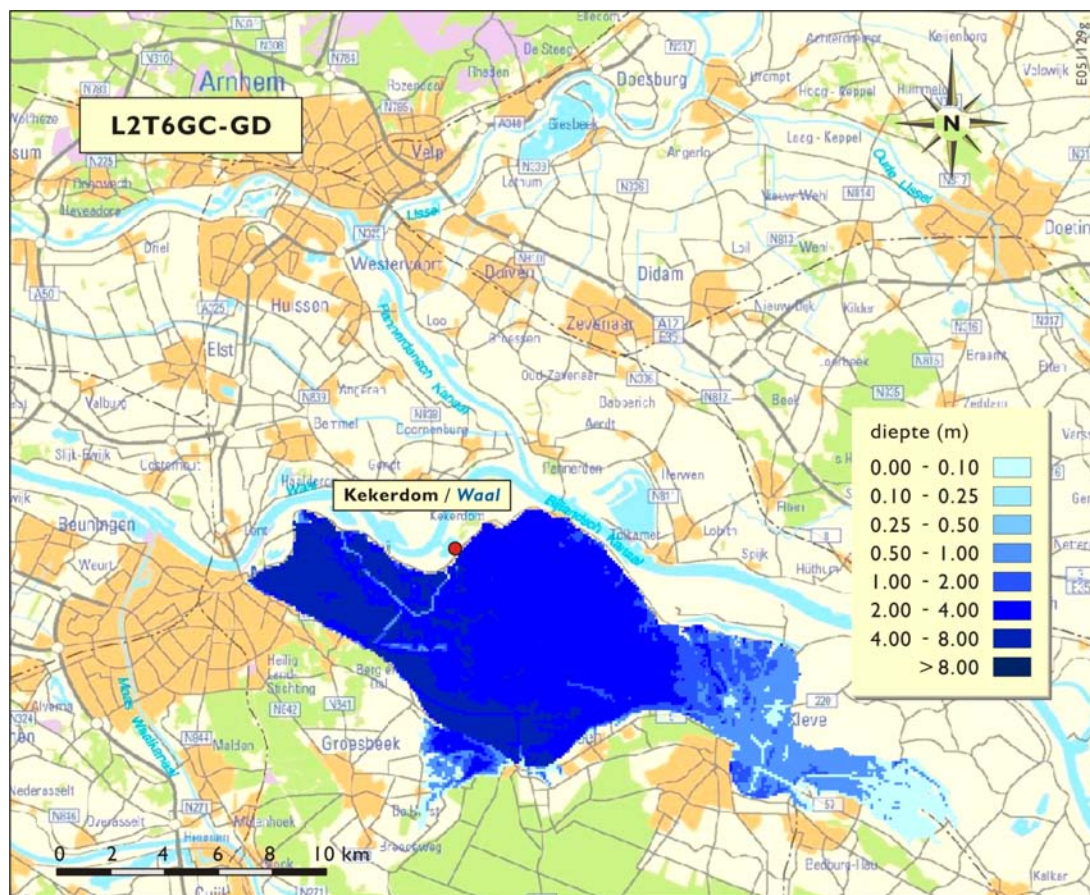


Figuur 5-3 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L1T70GC (dijkdoorbraak bij Lobith 70 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt; geen compartimentering) en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken

5.4 Scenario L2T6GC (Kekerdom, linker Waaldijk)

In scenario L2T6GC breekt op locatie L2 (Kekerdom, Waal_Km872.7, linker Waaldijk) de dijk door 6 uur voordat bij Kekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Als gevolg van deze dijkdoorbraak wordt enkel de aangrenzende dijkring 42 (Ooy en Millingen) overstroomd. De bestaande Duitse compartimenteringsdijk van Griethuizen naar Kalkar voorkomt dat het gebied ten oosten van deze compartimenteringsdijk wordt overstroomd. De bestaande Querdamm op Duits grondgebied verhindert niet het overstroomn van Wercheren, Persingen, Ubbergen en andere dorpen welke ten westen van de Querdamm liggen. Dit komt doordat deze Querdamm niet aansluit op de Kerkdijk, het Wylmermeer niet afsluit en bovendien wordt overstroomd. Als gevolg van de afzuiging/verlaging van waterstanden bij Kekerdom stroomt er bij de Pannerdensche Kop aanzienlijk meer debiet naar de Waal. Met andere woorden tengevolge van de dijkdoorbraak bij Kekerdom verandert tijdelijk de debietverdeling op splitsingspunt Pannerdensche Kop over Waal en het Pannerdensche Kanaal. In Figuur 5-4 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L2T6GC en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

Opm: voor overstroomde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.

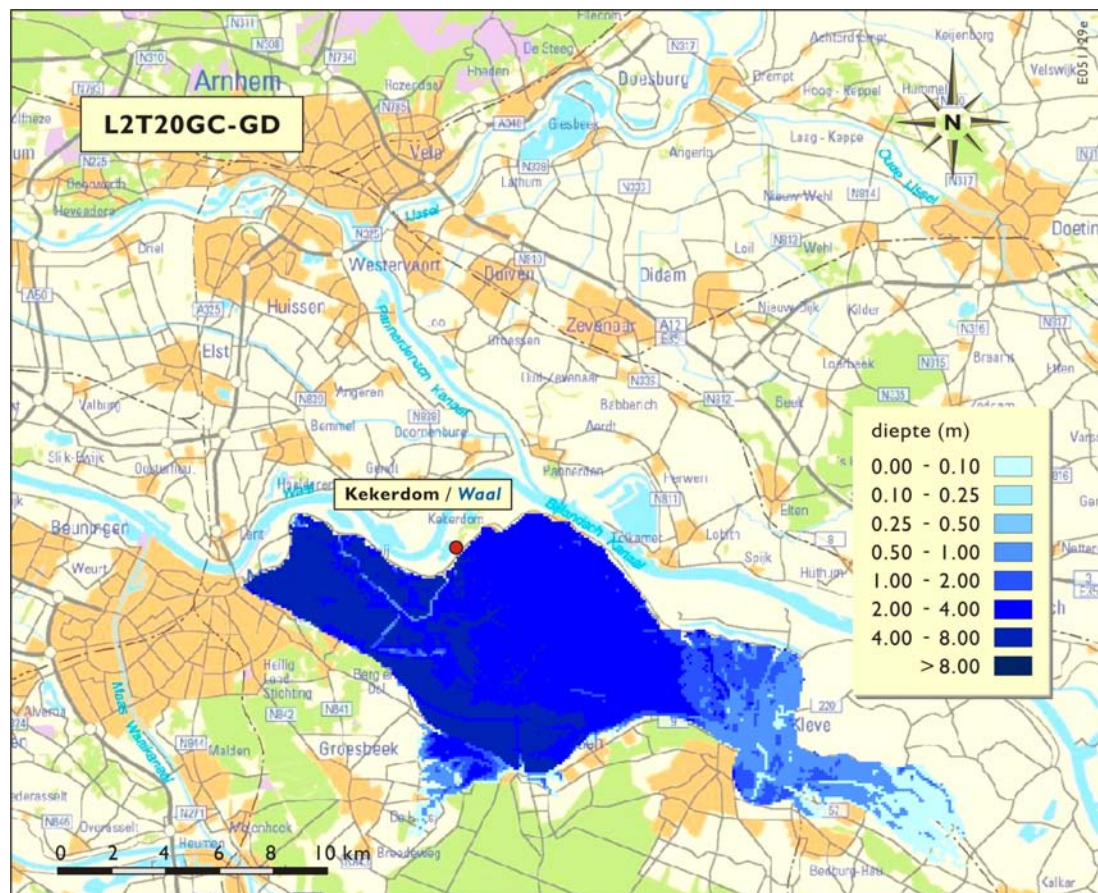


Figuur 5-4 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L2T6GC (dijkdoorbraak bij Kekerdom 6 uur voordat bij Kekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt; geen compartimentering) en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken

5.5 Scenario L2T20GC (Kekerdom, linker Waaldijk)

In scenario L2T20GC breekt op locatie L2 (Kekerdom, Waal_Km872.7, linker Waaldijk) de dijk door 20 uur voordat bij Kekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Evenals in scenario L2T6GC (zie §5.4) wordt enkel de aangrenzende dijkkring 42 (Ooy en Millingen) overstroomd. Evenzo voorkomt de bestaande Duitse compartimenteringsdijk van Griethuizen naar Kalkar dat het gebied ten oosten van deze compartimenteringsdijk wordt overstroomd. Ook verhindert de bestaande Querdamm op Duits grondgebied niet het overstromen van Wercheren, Persingen, Ubbergen en andere dorpen welke ten westen van de Querdamm liggen. Evenals in scenario L2T20GC stroomt er bij de Pannerdensche Kop aanzienlijk meer debiet naar de Waal als gevolg van de afzuiging/verlaging van waterstanden bij Kekerdom. In Figuur 5-5 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L2T20GC en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

Opm: voor overstroomde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.

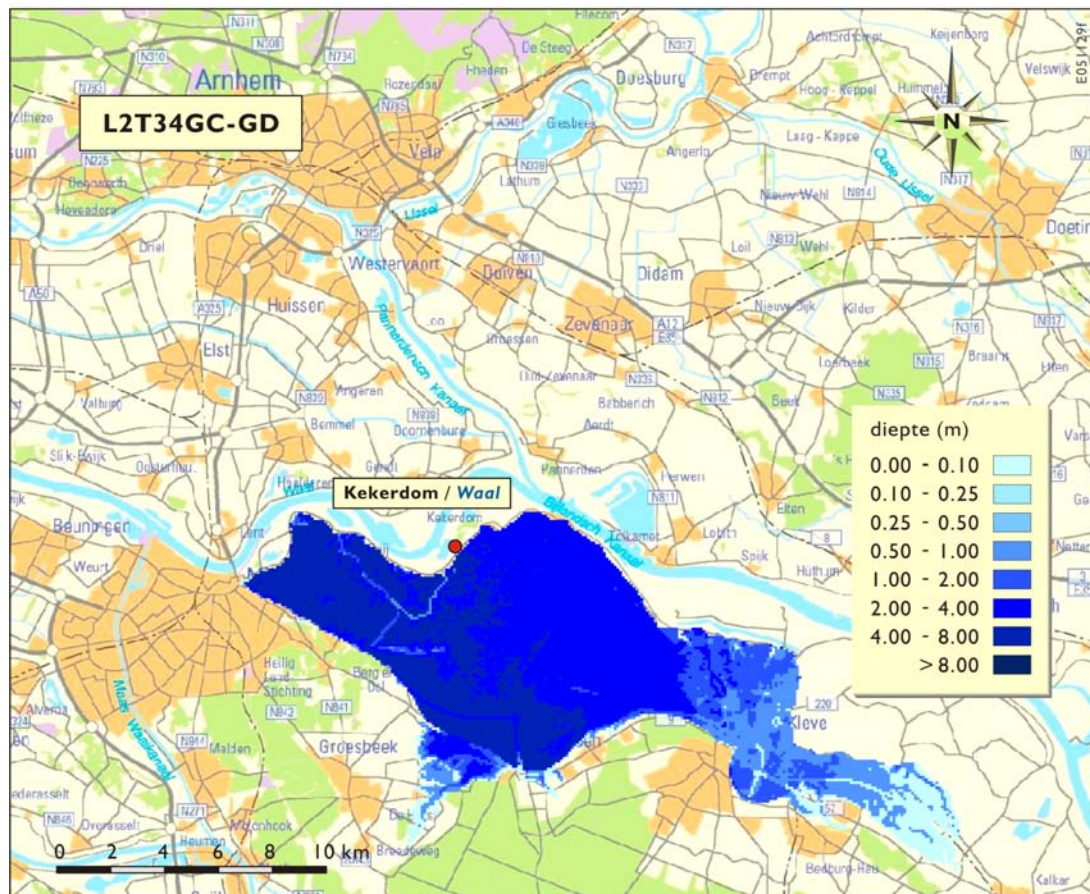


Figuur 5-5 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L2T20GC (dijkdoorbraak bij Kekerdom 20 uur voordat bij Kekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt; geen compartimentering) en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken

5.6 Scenario L2T34GC (Kekerdom, linker Waaldijk)

In scenario L2T34GC breekt op locatie L2 (Kekerdom, Waal_Km872.7, linker Waaldijk) de dijk door 34 uur voordat bij Kekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Evenals in scenario's L2T6GC (zie §5.4) en L2T20GC (zie § 5.5) wordt enkel de aangrenzende dijkkring 42 (Ooy en Millingen) overstroomd. Evenzo voorkomt de bestaande Duitse compartimenteringsdijk van Griethuizen naar Kalkar dat het gebied ten oosten van deze compartimenteringsdijk wordt overstroomd. Ook verhindert de bestaande Querdamm op Duits grondgebied niet het overstromen van Wercheren, Persingen, Ubbergen en andere dorpen welke ten westen van de Querdamm liggen. Verder stroomt in scenario L2T34GC Waalwater dat in dijkkring 42 is ingestroomd weer terug naar de Waal doordat de rechter Waaldijken ter hoogte van km883.5 worden overstroomd. Indien genoemde Waaldijken bezwijken dan zal ter plekke een groter debiet naar de Waal terugstromen. Evenals in scenario L2T6GC en scenario L2T20GC stroomt er bij de Pannerdensch Kop aanzienlijk meer debiet naar de Waal als gevolg van de afzuiging/verlaging van waterstanden bij Kekerdom. In Figuur 5-6 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L2T34GC en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

Opm: voor overstroomde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.

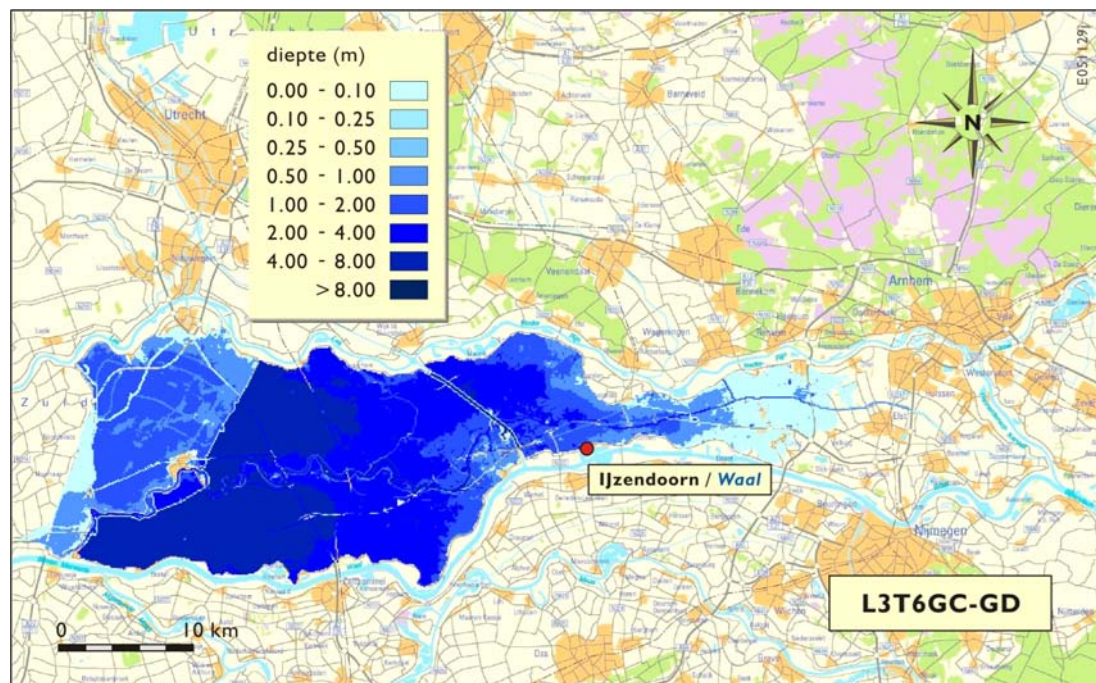


Figuur 5-6 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L2T34GC (dijkdoorbraak bij Kekerdom 34 uur voordat bij Kekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt; geen compartimentering) en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken

5.7 Scenario L3T6GC (IJzendoorn, rechter Waaldijk)

In scenario L3T6GC breekt op locatie L3 (IJzendoorn, Waal_Km908.4, rechter Waaldijk) de dijk door 6 uur voordat bij IJzendoorn de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Als gevolg van deze dijkdoorbraak wordt de aangrenzende dijkkring 43 (Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden) grotendeels overstromd. In dijkkring 43 wordt enkel het gebied ten Oosten van Valburg alsmede de Lede en Oudewaard (gelegen ten Noorden van Leenden en Kesteren) niet overstromd. Ook wordt de Diefdijk (primaire dijk categorie C; niet bestemd tot directe kering van buitenwater) overstromd, hetgeen resulteert in een overstroming van dijkkring 16 (Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden). Dijkkring 16 is niet in zijn geheel in het DelftFLS model opgenomen (zie §2.1). Echter wel is geconstateerd dat een maximum debiet van ca. 1.400 m³/s dijkkring 16 instroomt. In dijkkring 43 ingestroomd Waalwater stroomt ook weer terug naar de Waal over de rechter Waaldijk ter hoogte van Dalem. Op deze locatie bevinden zich in de Waaldijk de zogeheten Dalemse overlaten, welke in geval van overstroming van dijkkring 43 worden ingezet om te voorkomen dat de Diefdijk en derhalve ook dijkkring 16 wordt overstromd. In scenario L3T6GC is de mogelijke inzet van de Dalemse overlaten niet meegenomen. In Figuur 5-7 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L3T6GC en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

Opm: voor overstromde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.

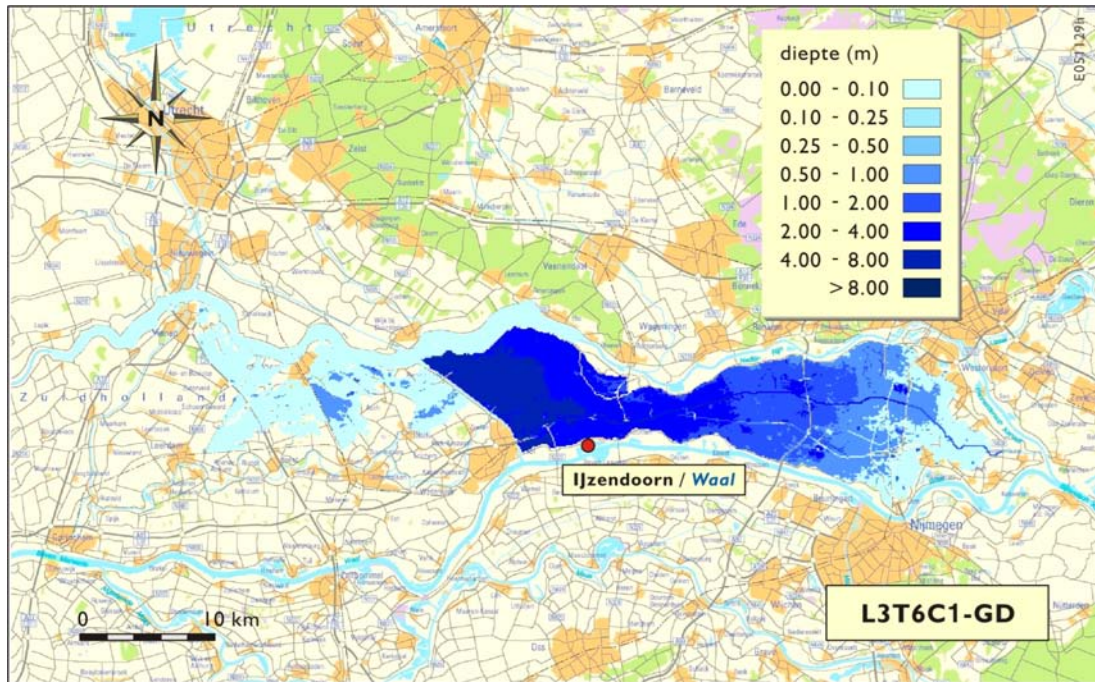


Figuur 5-7 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L3T6GC (dijkdoorbraak bij IJzendoorn 6 uur voordat bij IJzendoorn de hoogste rivier waterstand wordt bereikt, geen compartimentering) en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken

5.8 Scenario L3T6C1 (Ijzendoorn, rechter Waaldijk, Dijkkring 43 gecompartmenteerd)

In L3T6C1 is dijkkring 43 (Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden) gecompartmenteerd middels een verhoging van de oostelijke dijk langs het Amsterdam-Rijn Kanaal tot een niveau van NAP + 10.5 m. In scenario L3T6C1 breekt op locatie L3 (Ijzendoorn, Waal_Km908.4, rechter Waaldijk) de dijk door 6 uur voordat bij Ijzendoorn de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Als gevolg van deze dijkdoorbraak wordt de aangrenzende gecompartmenteerde dijkkring 43 ten oosten van het Amsterdam-Rijn Kanaal vrijwel volledig overstroomd. Slechts een kleine strook direct grenzend aan het Pannerdensch Kanaal en het bovenstroomse deel van de Waal wordt niet overstroomd. Waalwater ingestroomd in dijkkring 43 stroomt naar de Lek. Dit gebeurt door het overstromen van de linker Nederrijndijken tussen Km922 (nabij Maurik) en Km928.7 (nabij Rijswijk). Deze instroming van Waalwater op de Nederrijn leidt tot een verhoging van de maximum afvoer op de Lek met ca. 900 m³/s. Indien deze Nederrijndijken bezwijken, zal dit resulteren in nog hogere Lekafvoeren. Als gevolg van deze toename in Lekafvoer overstroomt een deel van het gebied van dijkkring 43 ten westen van het Amsterdam-Rijn Kanaal en ten noorden van de Lingedijk en de aansluitende Aaldijk. Dit gebied wordt overstroomd doordat de linker Lekdijken tussen Km933 (nabij Beusichem) en Km936 (nabij Culemborg) worden overstroomd. De dijken langs het Amsterdam-Rijn Kanaal worden niet overstroomd. Als gevolg van de genoemde toename in Lekafvoer overstroomt ook een relatief klein deel van dijkkring 16 (Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden) omdat de linker Lekdijken tussen km944 (nabij Everdingen) en km946 (nabij Hagestein) worden overstroomd. Opgemerkt zij dat indien de overstroomde Lekdijken tussen Km933 en Km936 bezwijken, dit zal resulteren in een grotere instroming en derhalve grotere overstroming van dijkkring 43 ten oosten van het Amsterdam-Rijn Kanaal. Indien de laatst genoemde overstroomde Lekdijken bezwijken dan kan dat tot gevolg hebben dat linker Lekdijken tussen Km944 en Km946 niet worden overstroomd met het gevolg dat dijkkring 16 niet wordt overstroomd. In Figuur 5-8 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L3T6C1 en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

Opm: voor overstroomde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.

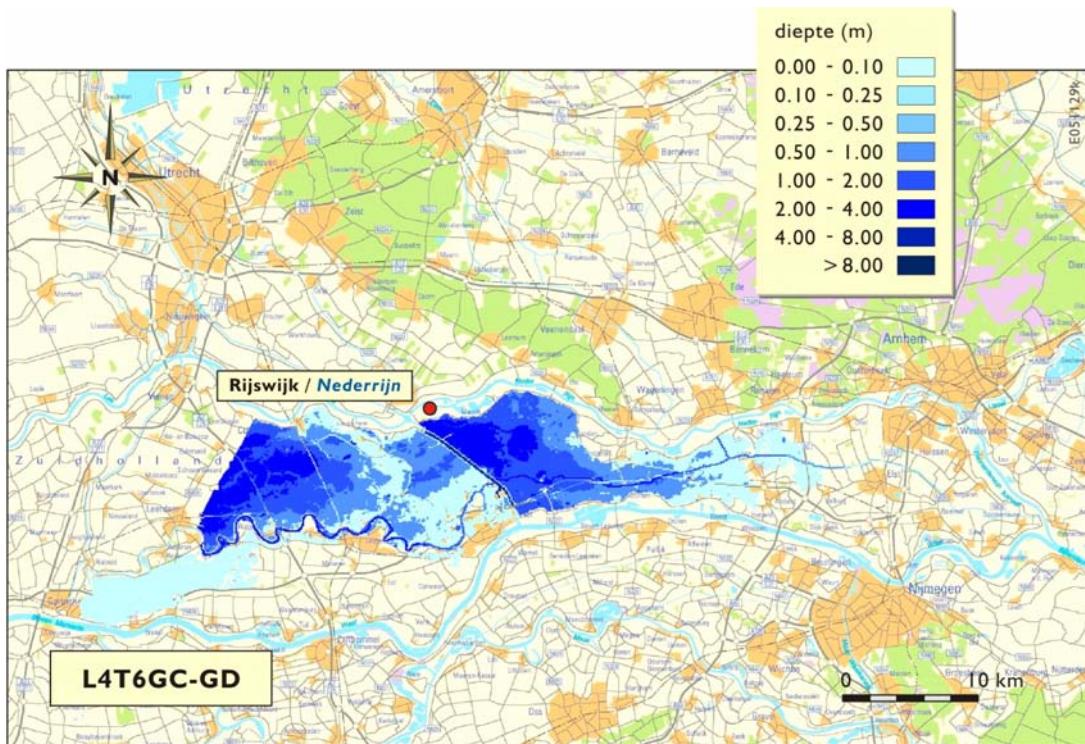


Figuur 5-8 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L3T6C1 (dijkdoorbraak bij IJzendoorn 6 uur voordat bij IJzendoorn de hoogste rivier waterstand wordt bereikt; dijkkring 43 gecompartmenteerd) en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken

5.9 Scenario L4T6GC (Rijswijk, linker Nederrijndijk)

In scenario L4T6GC breekt op locatie L4 (Rijswijk, Nederrijn_Km928.5, linker Nederrijndijk) de dijk door 6 uur voordat bij Rijswijk de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Als gevolg van deze dijkdoorbraak wordt enkel de aangrenzende dijkkring 43 (Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden) overstroomd. Hoewel dijken langs het Amsterdam-Rijn Kanaal worden overstroomd, wordt een aanzienlijk kleiner deel van dijkkring 43 overstroomd dan in scenario L3T6GC (zie §5.7). De reden hiervoor is het feit dat maximum afvoeren op de Nederrijn-Lek aanzienlijk lager zijn dan de maximum afvoeren op de Waal. In Figuur 5-9 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L4T6GC en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

Opm: voor overstroomde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.

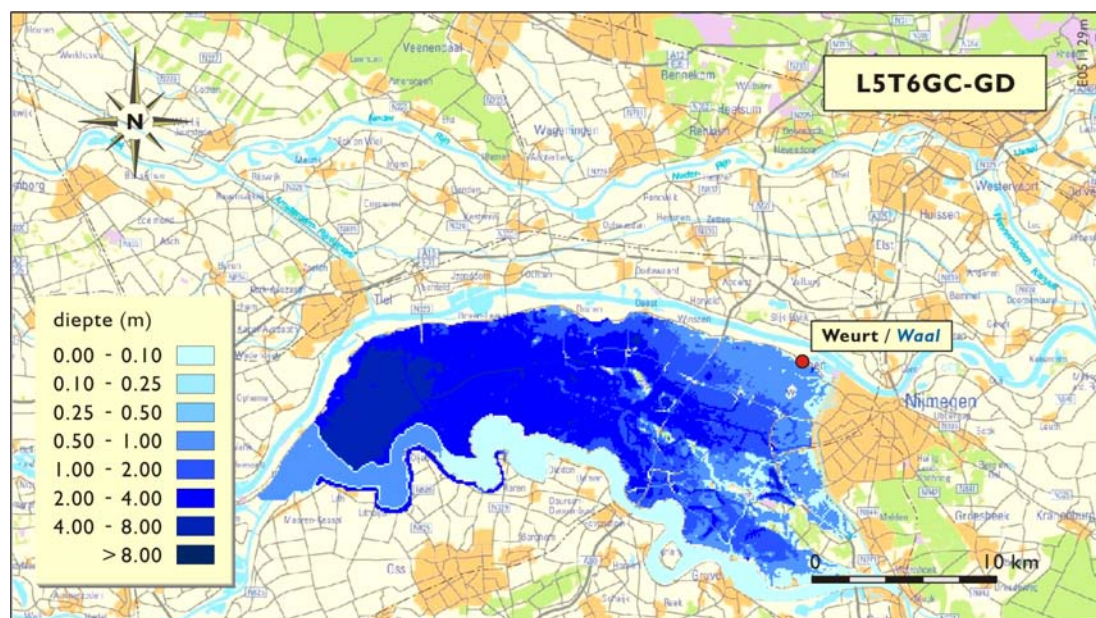


Figuur 5-9 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L4T6GC (dijkdoorbraak bij Rijswijk 6 uur voordat bij Rijswijk de hoogste rivier waterstand wordt bereikt; geen compartimentering) en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken

5.10 Scenario L5T6GC (Weurt, linker Waaldijk)

In scenario L5T6GC breekt op locatie L5 (Weurt, Waal_Km889.4, linker Waaldijk) de dijk door 6 uur voordat bij Weurt de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Als gevolg van deze dijkdoorbraak wordt dijkkring 41 (Land van Maas en Waal) vrijwel geheel overstromd. Waalwater ingestroomd in dijkkring 41 stroomt naar de Maas. Dit gebeurt door het overstromen van de rechter Maasdijken tussen Km196.5 (Nieuwe Schans) tot Km204.5 (aansluiting Maasdijk op Waaldijk). Deze instroming van Waalwater op de Maas resulteert in het overstromen van de aan de linker Maasoever gelegen dijkkring 36 (Land van Heusden/de Maaskant). In werkelijkheid zal mogelijk ook een deel van dijkkring 38 (Bommelerwaard) overstromen. Dit kon echter niet in het DelftFLS model worden geverifieerd omdat het ingestroomde Waalwater al bij Sint Andries (Maas_km 208) via een externe Q-h rand het model verlaat. Wel is geconstateerd dat het overstromen van genoemde Maasdijken leidt tot een toename van ca. 2.000 m³/s in maximum Maasafvoer. Deze toename is zeer groot in verhouding tot een Maasafvoer van 3.650 m³/s, welke correspondeert met een overschrijdingsfrequentie van ca. 1/1250 jaar. Indien de overstromde Maasdijken bezwijken, dan zal deze toename in de maximum Maasafvoer mogelijk nog hoger zijn. In Figuur 5-10 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L5T6GC en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

Opm: voor overstromde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.



Figuur 5-10 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L5T6GC (dijkdoorbraak bij Weurt 6 uur voordat bij Weurt de hoogste rivier waterstand wordt bereikt, geen compartimentering) en de referentieberekening GD (zonder dijkdoorbraken)

5.11 Scenario L5T6C2 (Weurt, linker Waaldijk, Dijkkring 41 gecompartmenteerd)

In scenario L5T6C2 is dijkkring 41 (Land van Maas en Waal) van Oost naar West gecompartmenteerd middels een beoogde dijk ten Zuiden/Oosten van de Oude Wetering, de Broekse Leigraaf, de Rijksche Wetering, en de Grote Wetering. Tevens is de Maasdijk vanaf de Grote Wetering tot aan de Waaldijk alsmede een deel van de Westelijke dijk langs het Maas en Waal Kanaal verhoogd. Kruinhoogten zijn zodanig hoog dat er géén overstroming van deze compartimenteringsdijk kan plaats vinden. In scenario L5T6C2 breekt op locatie L5 (Weurt, Waal_Km889.4, linker Waaldijk) de dijk door 6 uur voordat bij Weurt de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. De compartimenteringsdijk voorkomt dat er Waalwater naar de Maas stroomt. Derhalve wordt dijkkring 36 (Land van Heusden/de Maaskant) niet overstroomd (zie ook §5.10). Wel worden de waterstanden in het gebied ten noorden en westen van de compartimenteringsdijk enkele meters hoger dan in het scenario zonder compartimentering. Verder dient opgemerkt te worden dat een deel van het ingestroomde Waalwater weer naar de Waal terugstroomt. Dit gebeurt door dat de linker Waaldijken tussen Km914 (nabij Wamel) en Km920 (nabij Dreumel) worden overstroomd. In Figuur 5-11 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L5T6C2 en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

Opm: voor overstroomde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.

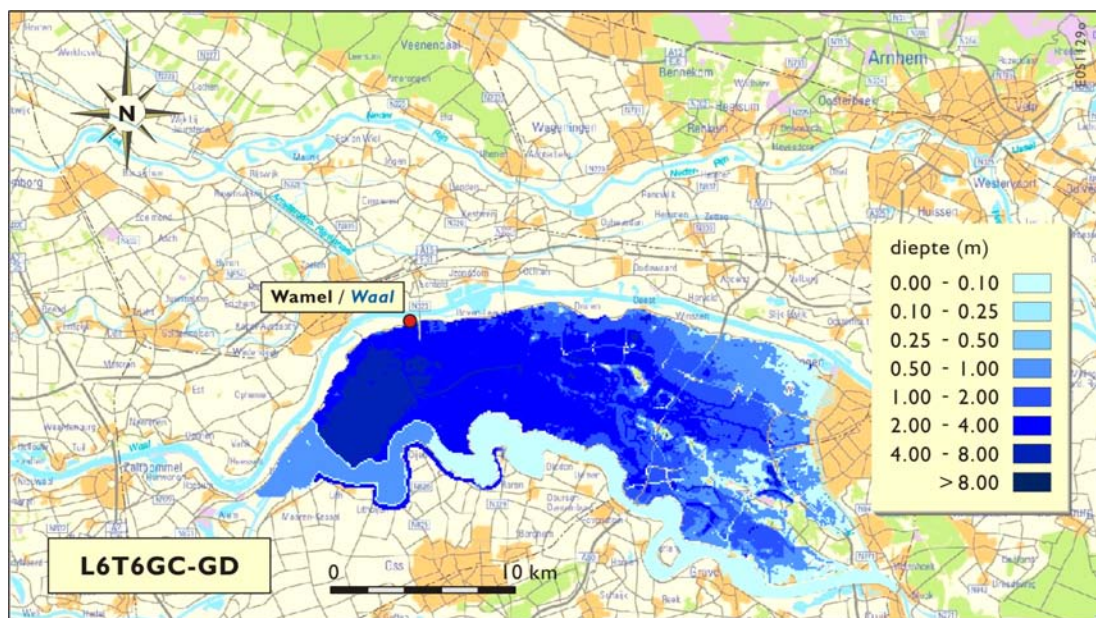


Figuur 5-11 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L5T6C2 (dijkdoorbraak bij Weurt 6 uur voordat bij Weurt de hoogste rivier waterstand wordt bereikt; dijkkring 41 gecompartmenteerd) en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken

5.12 Scenario L6T6GC (Wamel, linker Waaldijk)

In scenario L6T6GC breekt op locatie L6 (Wamel, Waal_Km911.5 linker Waaldijk) de dijk door 6 uur voordat bij Wamel de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Als gevolg van deze dijkdoorbraak wordt de aangrenzende dijkkring 41 (Land van Maas en Waal) vrijwel geheel overstromd. Evenals in scenario L5T6GC (zie §5.10) stroomt Waalwater via dijkkring 41 naar de Maas, hetgeen leidt tot overstroming van dijkkring 36 (Land van Heusden/de Maaskant) en naar verwachting ook van dijkkring 38 (Bommelerwaard). De instroom van Waalwater op de Maas leidt tot een zeer grote toename van ca. 1800 m³/s in de maximum Maasafvoer. Indien de overstromde Maasdijken bezwijken, dan zal deze toename in maximum Maasafvoer mogelijk nog hoger zijn. Genoemde toename in maximum Maasafvoer is ca 200 m³/s minder dan in doorbraakscenario L5T6GC. Dit wordt geacht het gevolg te zijn van het feit dat waterstanden op de Waal bij Wamel lager zijn bij Weurt, zodat ook het verhang richting overstromde Maasdijken bij een dijkdoorbraak bij Wamel geringer is dan bij een dijkdoorbraak bij Weurt. In Figuur 5-12 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L6T6GC en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

Opm: voor overstromde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.

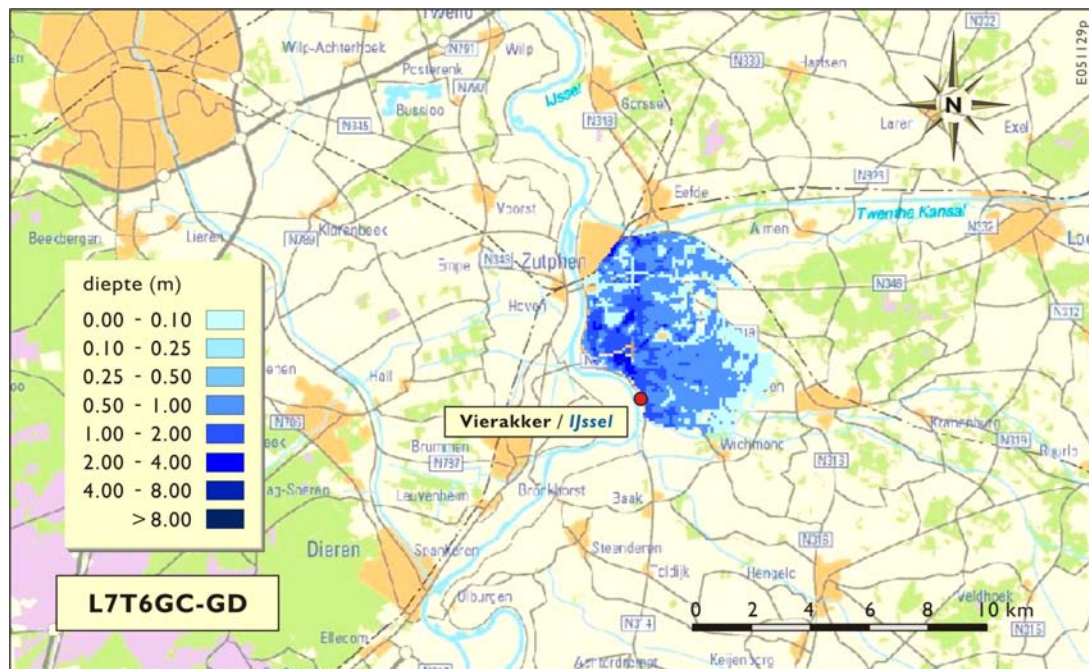


Figuur 5-12 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L6T6GC (dijkdoorbraak bij Wamel 6 uur voordat bij Wamel de hoogste rivier waterstand wordt bereikt, geen compartimentering) en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken

5.13 Scenario L7T6GC (Vierakker, rechter IJsseldijk)

In scenario L7T6GC breekt op locatie L7 (Vierakker, IJssel_Km922.5, rechter IJsseldijk) de dijk door 6 uur voordat bij Vierakker de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Als gevolg van deze dijkdoorbraak wordt enkel de aangrenzende dijkkring 50 (Zutphen) vrijwel geheel overstromd. Echter elders in het stroomgebied van Rijn en Maas worden geen dijk(ring)en overstromd. In Figuur 5-13 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L7T6GC en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

Opm: voor overstroomde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.



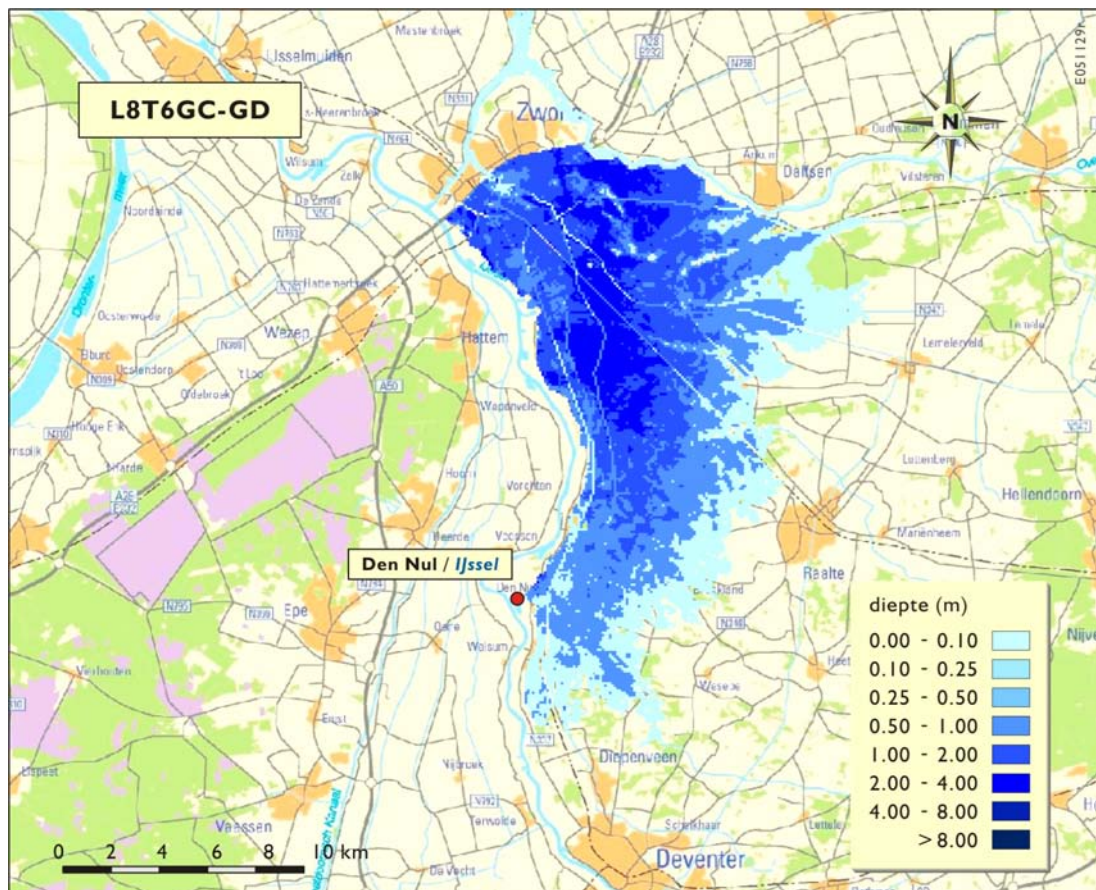
Figuur 5-13 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L7T6GC (dijkdoorbraak bij Vierakker 6 uur voordat bij Vierakker de hoogste rivier waterstand wordt bereikt, geen compartimentering) en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken

5.14 Scenario L8T6GC (Den Nul, rechter IJsseldijk)

In scenario L8T6GC breekt op locatie L8 (Den Nul, IJssel_Km959.1, rechter IJsseldijk) de dijk door 6 uur voordat bij Den Nul de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Als gevolg van deze dijkdoorbraak overstromt enkel de aangrenzende dijkkring 53 (Salland). Het deel van dijkkring 53 dat is gelegen beneden een niveau van ca NAP + 3.0 m wordt vrijwel volledig overstromd. Opgemerkt dient te worden dat in de berekening is aangenomen dat tunnels onder rijksweg A28, welke dwars door Zwolle loopt, zijn afgesloten. Tevens dient opgemerkt te worden dat het kanaal “Nieuwe Wetering”, waar het rijksweg A28 kruist ($x=203350$, $y=503450$), tot een hoogte van NAP+2.55m is afgesloten. In de Nieuwe Wetering bevinden zich ter hoogte van Zwolle twee sluizen, middels welke water uit dijkkring 53 op het Zwarte Water kan worden geloosd. Deze twee sluizen zijn niet in de DelftFLS schematisatie opgenomen. Concreet betekent het bovenstaande dat rijksweg A28 fungeert als een soort compartimenteringsdijk, welke er voor zorgt dat de wijken Holtenbroek, Aa Landen en Brinkhoek, welke ten Noorden van rijksweg A28 liggen, niet

worden overstromd. De woonwijken in Zwolle welke ten Zuiden van rijksweg A28 liggen worden wel overstromd. Verder dient te worden opgemerkt dat een deel van het IJsselwater dat in dijkkring 53 instroomt via de Nieuwe Wetering en de Overijsselse Vecht naar het Zwarte Water wegstroomt. Dit gebeurt enerzijds door het overstroomn van rijksweg A28 ter hoogte van de reeds bovengenoemde kruising met de Nieuw Wetering en anderzijds doordat de linkerdijken van de Overijsselsche Vecht ($x=206450,y=504450$ tot $x=207250,y=504150$) worden overstromd. De maximum toestroming op het Zwarte Water ter hoogte van Hasselt bedraagt ca. $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Opgemerkt dient te worden dat bij Vilsteren op de Overijsselsche Vecht een permanente afvoer van slechts $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ is opgelegd (zie ook §3.1), terwijl tijdens hoogwater op de IJssel de afvoer bij Vilsteren naar verwachting ca. $400 \text{ m}^3/\text{s}$ zal kunnen bedragen. Concreet betekent dit dat in scenario L8T6GC naar alle waarschijnlijkheid iets te veel water vanuit dijkkring 53 via de Overijsselsche Vecht is weggestroomd. Immers een hogere afvoer betekent hogere waterstanden op de Overijsselsche Vecht en dient tengevolge een kleinere afvoercapaciteit van de genoemde overstroomde linkerdijken van de Overijsselsche Vecht. Echter indien de overstroomde dijken van de Overijsselse Vecht bezwijken, dan zal in scenario L8T6GC mogelijk een groter debiet naar het Zwarte Water wegstromen. In Figuur 5-14 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L8T6GC en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken.

Opm: voor overstroomde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.

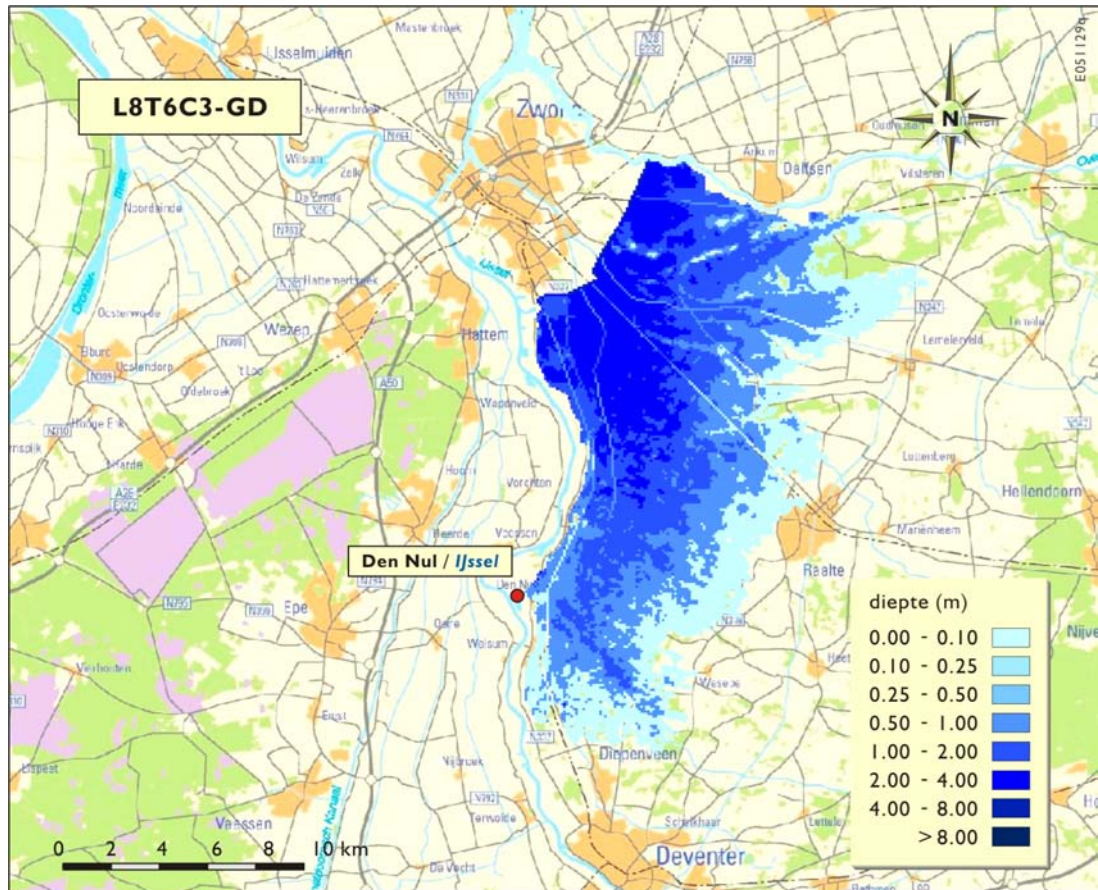


Figuur 5-14 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L8T6GC (dijkdoorbraak bij Den Nul 6 uur voordat bij Den Nul de hoogste rivier waterstand wordt bereikt; geen compartimentering) en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken

5.15 Scenario L8T6C3 (Den Nul, rechter IJsseldijk, Dijkkring 53 gecompartmenteerd)

In dijkdoorbraakscenario L8T6C3 is dijkkring 53 (Salland) gecompartmenteerd middels een geplande ringweg/ringdijk ten Zuiden/Oosten van Zwolle met kruinhoogten van NAP + 6.5 m. In scenario L8T6C3 breekt op locatie L8 (Den Nul, IJssel_Km959.1, rechter IJsseldijk) de dijk door 6 uur voordat bij Den Nul de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Als gevolg van deze dijkdoorbraak wordt enkel de aangrenzende dijkkring 53 (Salland) overstroomd. De genoemde compartimenteringsdijk voorkomt dat Zwolle wordt overstroomd. Opgemerkt dient te worden dat in de berekening het Kanaal "Nieuwe Wetering is dichtgezet ter hoogte van de kruising met genoemde compartimenteringsdijk. Als gevolg hiervan stroomt er géén water vanuit dijkkring 53 via de Nieuwe Wetering naar het Zwarte Water (zie ook §5.14). Wel stroomt er water vanuit dijkkring 53 over de linkerdijken van de Overijsselsche Vecht ($x=209050,y=503950$ tot $x=210450,y=503850$) naar het Zwarte Water. De maximum toestroming op het Zwarte Water ter hoogte van Hasselt bedraagt ca. $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Opgemerkt dient te worden dat bij Vilsteren op de Overijsselsche Vecht een permanente afvoer van slechts $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ is opgelegd (zie ook §3.1), terwijl tijdens hoogwater op de IJssel de afvoer bij Vilsteren naar verwachting ca. $400 \text{ m}^3/\text{s}$ zal kunnen bedragen. Concreet betekent dit dat in scenario L8T6GC naar alle waarschijnlijkheid iets te veel water vanuit dijkkring 53 via de Overijsselsche Vecht is weggestroomd. Immers een hogere afvoer betekent hogere waterstanden op de Overijsselsche Vecht en dient tengevolge een kleinere afvoercapaciteit van de genoemde overstroomde linkerdijken van de Overijsselsche Vecht. Echter indien de overstroomde dijken van de Overijsselse Vecht bezwijken, dan zal in scenario L8T6C3 mogelijk een groter debiet naar het Zwarte Water wegstromen. In Figuur 5-15 worden verschillen in maximaal opgetreden waterstanden getoond tussen scenario L8T6C3 en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken

Opm: voor overstroomde binnendijkse gebieden zijn de verschillen in maximaal opgetreden waterstanden gelijk aan de opgetreden overstromingsdiepten.



Figuur 5-15 Verschillen in maximaal opgetreden waterstanden tussen scenario L8T6C3 (dijkdoorbraak bij Den Nul 6 uur voordat bij Den Nul de hoogste rivier waterstand wordt bereikt; dijkkring 53 gecompartmenteerd) en de referentieberekening GD zonder dijkdoorbraken

6 Hydraulische Systeemwerkingseffecten

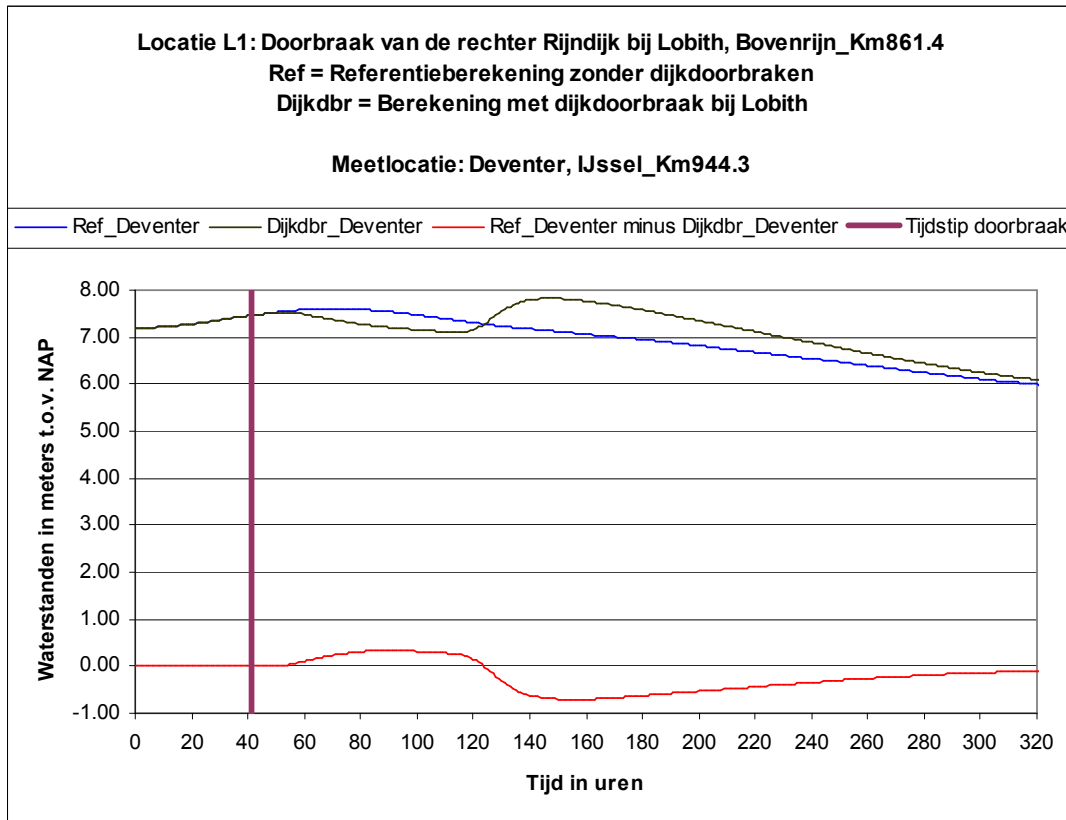
In dit hoofdstuk worden de effecten van systeemwerking enkel gekwantificeerd op basis van verschillen in hydraulische parameters. In §6.1 wordt de gehanteerde methode voor het kwantificeren van de hydraulische effecten van systeemwerking besproken. Vervolgens worden de resultaten in §6.2 gepresenteerd en in §6.3 nader toegelicht.

6.1 Methode kwantificering Hydraulische Systeemwerkingseffecten

De hydraulische effecten van systeemwerking gegeven de conditionele kans dat er slechts op één locatie langs de Rijnakken een dijkdoorbraak optreedt, zijn als volgt bepaald. Per berekening is voor diverse rivierlocaties de hoogst opgetreden waterstand en het hoogst opgetreden debiet bepaald. Vervolgens is per rivierlocatie het *Vershil in de Maximum Waterstand* gedefinieerd als de hoogst opgetreden waterstand in de referentieberekening minus de hoogst opgetreden waterstand in een specifieke dijkdoorbraakberekening. Op gelijke wijze is het *Vershil in het Maximum Debiet* gedefinieerd.

Indien voor een bepaalde rivierlocatie het verschil in de maximum waterstand positief is, dan betekent dit dat de hydraulische effecten van systeemwerking ook positief zijn. Immers in de dijkdoorbraakberekening is de hoogste waterstand lager dan de hoogste waterstand in de referentieberekening zonder dijkdoorbraken. Het moge duidelijk zijn dat voor negatieve verschillen in de maximum waterstand geldt dat de hydraulische effecten van systeemwerking lokaal negatief zijn. Het tijdstip waarop in de dijkdoorbraakberekening de hoogste waterstand optreedt, komt meestal niet overeen met het tijdstip waarop in de referentieberekening de hoogste waterstand optreedt. Dit is duidelijk te zien in Figuur 6-1, waar waterstanden te Deventer (IJssel_Km944.3) worden gegeven voor het geval géén dijkdoorbraken optreden en voor scenario L1T6GC waarin de rechter Bovenrijndijk te Lobith doorbreekt. In Figuur 6-1 bedraagt voor Deventer het verschil in de maximum waterstand $-0.22(=7.60-7.82)$ m. Waterstanden te Deventer tengevolge van een dijkdoorbraak te Lobith zijn hoger dan zonder dijkdoorbraken, doordat Rijnwater uit dijkkring 48 de IJssel opstroomt (zie §5.1)

In de methode van kwantificeren van hydraulische effecten van systeemwerking wordt enkel gekeken naar verschillen in maximaal opgetreden waterstanden en debieten. Het lijkt echter ook interessant om per locatie te kijken naar verschillen in de tijdsduur waarover een specifieke waterstand wordt overschreden.



Figuur 6-1 Berekende waterstanden bij Deventer, IJssel_km944.3 voor de referentie situatie zonder dijkdoorbraken en voor scenario L1T6GC, dijkdoorbraak bij Lobith, Bovenrijn_Km861.4.

6.2 Hydraulische effecten van Systeemwerking

Conform de methode, beschreven in §6.1, zijn verschillen in de maximum waterstand en de verschillen in het maximum debiet bepaald. In Tabel 6-1 en Tabel 6-2 is per meetlocatie een overzicht gegeven van het verschil in de maximum waterstand voor diverse combinaties van referentieberekeningen en dijkdoorbraakberekeningen. In Tabel 6-3 en Tabel 6-4 is per meettraai een overzicht gegeven van het verschil in het maximum debiet. In de koptekst van genoemde vier tabellen is de volgende codering aangehouden:

- *Codering dijkdoorbraaklocaties:*
 - L1:** Lobith, Rijn_Km861.4, rechter Bovenrijndijk,
 - L2:** Kekerdijk, Waal_Km872.7, linker Waaldijk,
 - L3:** IJzendoorn, Waal_Km908.4, rechter Waaldijk,
 - L4:** Rijswijk, Nederrijn_Km928.5, linker Nederrijndijk,
 - L5:** Weurt, Waal_Km889.4, linker Waaldijk,
 - L6:** Wamel, Waal_Km911.5 linker Waaldijk,
 - L7:** Vierakker, IJssel_Km922.5, rechter IJsseldijk, en
 - L8:** Den Nul, IJssel_Km959.1, rechter IJsseldijk
- *Codering van referentieberekening:*
 - GD:** Géén dijkdoorbraken en ook géén compartimentering van dijkringen
- *Codering van dijkdoorbraakberekeningen:*
 - LxTyGC:** Dijkdoorbraak op locatie Lx; Tijdstip van dijkdoorbraak y uur voordat ter plaatse van de dijkdoorbraaklocatie de hoogste rivier waterstand wordt

- bereikt; en Géén compartimentering van dijkringen,
- L3T6C1:** Dijkdoorbraak op locatie L3 (IJzendoorn); Tijdstip van dijkdoorbraak 6 uur voordat bij IJzendoorn de hoogste rivier waterstand wordt bereikt; en Compartimentering van dijkring 43 (Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden) middels een verhoging van de oostelijke dijk langs het Amsterdam-Rijn Kanaal tot NAP + 10.5 m,
- L5T6C2:** Dijkdoorbraak op locatie L5 (Weurt); Tijdstip van dijkdoorbraak 6 uur voordat bij Weurt de hoogste rivier waterstand wordt bereikt; en Compartimentering van dijkring 41 (Land van Maas en Waal) middels een beoogde dijk ten Zuiden/Oosten van de Oude Wetering, de Broekse Leigraaf, de Rijksche Wetering, en de Grote Wetering. Tevens is de Maasdijk vanaf de Grote Wetering tot aan de Waaldijk alsmede een deel van de Westelijke dijk langs het Maas en Waal Kanaal verhoogt. Kruinhoogten zijn zodanig hoog dat er géén overstroming van deze compartimenteringsdijk kan plaats vinden, en
- L8T63:** Dijkdoorbraak op locatie L8 (Den Nul); Tijdstip van dijkdoorbraak 6 uur voordat bij Den Nul de hoogste rivier waterstand wordt bereikt; Compartimentering van dijkring 53 (Salland) middels een geplande weg/dijk ten Zuiden/Oosten van Zwolle met kruinhoogte van NAP+6.5m.

Tabel 6-1 Verschillen in waterstanden als gevolg van dijkdoorbraken bij locaties L1 t/m L8; Dijken breken door 6 uur voordat ter plaatse van de dijkdoorbraaklocatie de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.

Verschillen in de Maximum Waterstand Referentie berekening minus Dijkdoorbraak berekening																		
Dijkdoorbraak locatie	L1		L2		L3			L4		L5			L6		L7		L8	
Referentie berekening	GD	GD	GD	GD	L3 T6GC	GD	GD	GD	GD	L5 T6GC	GD	GD	GD	GD	GD	GD	L8 T6GC	
Dijkdoorbraak berekening	L1 T6GC	L2 T6GC	L3 T6GC	L3 T6C1	L3 T6C1	L4 T6GC	L5 T6GC	L5 T6C2	L5 T6C2	L6 T6GC	L7 T6GC	L8 T6GC	L8 T6C3	L8 T6C3				
MeetLocatie	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m				
<i>Bovenrijn</i>																		
L1 Lobith, Bovenrijn_Km861.19	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
<i>Waal</i>																		
Kekerdom, Waal_Km871.9	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
L2 Kekerdom, Waal_Km872.7	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
L5 Weurt, Waal_Km889.4	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Andelst, Waal_Km897.3	0.05	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
L3 IJzendoorn, Waal_Km908.4	0.06	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00				
L6 Wamel, Waal_Km911.50	0.06	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00				
Dreumel, Waal_Km916.40	0.07	0.05	0.02	0.02	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00				
Gameren, Waal_Km937.10	0.07	0.06	0.03	0.03	0.00	0.00	0.05	0.05	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00				
<i>Nederrijn-Lek</i>																		
Nude, Nederrijn_Km905.10	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
L4 Rijswijk, Nederrijn_Km928.5	0.06	0.04	0.00	-0.55	-0.55	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
De Heul, Lek_Km938.7	0.03	0.03	0.00	-0.52	-0.52	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
<i>IJssel</i>																		
Westervoort, IJssel_Km880.3	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Velperbroek, IJssel_Km882.30	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Fraterwaard, IJssel_Km904	-0.25	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
L7 Vierakker, IJssel_Km922.5	-0.24	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00				
Zutphen, IJssel_Km925.9	-0.23	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00				
Gorsseel, IJssel_Km940.4	-0.22	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00				
Deventer, IJssel_Km944.3	-0.22	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00				
L8 Den Nul, IJssel_Km959.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00				
Wapenveld, IJssel_Km971.7	-0.23	0.10	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.01	0.07	0.02	0.02	0.00				

Tabel 6-2 Verschillen in waterstanden als gevolg van dijkdoorbraken bij locaties L1 en L2; Dijken breken respectievelijk door 6, 30, 70 uur (L1) en 6, 20, 34 uur (L2) voordat ter plaatse van de dijkdoorbraaklocatie de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.

Verschillen in de Maximum Waterstand Referentie minus Dijkdoorbraak						
Dijkdoorbraak locatie	L1			L2		
Referentie berekening	GD	GD	GD	GD	GD	GD
Dijkdoorbraak berekening	L1T6GC	L1T30GC	L1T70GC	L2T6GC	L2T20GC	L2T34GC
MeetLocatie	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
<i>Bovenrijn</i>						
L1_Lobith, Bovenrijn_Km861.19	0.02	0.28	0.65	0.00	0.11	0.25
<i>Waal</i>						
Kekerdom, Waal_Km871.9	0.03	0.27	0.61	0.01	0.13	0.29
L2_Kekerdom, Waal_Km872.7	0.03	0.29	0.63	0.01	0.14	0.31
L5_Weurt, Waal_Km889.4	0.04	0.31	0.65	0.03	0.16	0.34
Andelst, Waal_Km897.3	0.05	0.32	0.61	0.03	0.17	0.35
L3_IJzendoorn, Waal_Km908.4	0.06	0.35	0.66	0.04	0.19	0.38
L6_Wamel, Waal_Km911.50	0.06	0.35	0.66	0.04	0.19	0.39
Dreumel, Waal_Km916.40	0.07	0.36	0.67	0.05	0.20	0.40
Gameren, Waal_Km937.10	0.07	0.37	0.66	0.06	0.21	0.41
<i>Nederrijn-Lek</i>						
Nude, Nederrijn_Km905.10	0.04	0.20	0.28	0.02	0.11	0.21
L4_Rijswijk, Nederrijn_Km928.5	0.06	0.26	0.33	0.04	0.15	0.25
De Heul, Lek_Km938.7	0.03	0.26	0.34	0.03	0.13	0.24
<i>IJssel</i>						
Westervoort, IJssel_Km880.3	0.02	0.21	0.30	0.01	0.10	0.22
Velperbroek, IJssel_Km882.30	0.03	0.21	0.26	0.01	0.11	0.21
Fraterwaard, IJssel_Km904	-0.25	-0.48	-0.76	0.04	0.11	0.24
L7_Vierakker, IJssel_Km922.5	-0.24	-0.48	-0.72	0.05	0.13	0.24
Zutphen, IJssel_Km925.9	-0.23	-0.47	-0.69	0.05	0.12	0.23
Gorssel, IJssel_Km940.4	-0.22	-0.46	-0.65	0.06	0.14	0.24
Deventer, IJssel_Km944.3	-0.22	-0.46	-0.66	0.06	0.14	0.24
L8_Den Nul, IJssel_Km959.10	-	-	-	-	-	-
Wapenveld, IJssel_Km971.7	-0.23	-0.58	-0.78	0.10	0.19	0.27

Tabel 6-3 Verschillen in debieten als gevolg van dijkdoorbraken; Dijken breken door 6 uur voordat ter
plaatse van de dijkdoorbraaklocatie de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.

Verschillen in het Maximum Debiet														
Referentie berekening minus Dijkdoorbraak berekening														
Dijkdoorbraak locatie	L1	L2	L3			L4	L5			L6	L7	L8		
Referentie berekening	GD	GD	GD	GD	L3 T6GC	GD	GD	GD	L5 T6GC	GD	GD	GD	GD	L8 T6GC
Dijkdoorbraak berekening	L1 T6GC	L2 T6GC	L3 T6GC	L3 T6C1	L3 T6C1	L4 T6GC	L5 T6GC	L5 T6C2	L5 T6C2	L6 T6GC	L7 T6GC	L8 T6GC	L8 T6C3	L8 T6C3
MeetLocatie	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
<i>Bovenrijn</i>														
Rees, Bovenrijn_Km837.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L1 Lobith, Bovenrijn_Km861.19	38	-126	0	0	0	0	-11	-11	0	0	0	0	0	0
<i>Waal</i>														
WaalBegin, Waal_Km869.1	23	-735	0	0	0	0	-215	-215	0	0	0	0	0	0
L2 Kekerdom, Waal_Km874.0	36	3	0	0	0	0	-261	-261	0	0	0	0	0	0
L5 Weurt, Waal_Km889.9	62	28	-113	-113	0	0	9	8	0	-92	0	0	0	0
Andelst, Waal_Km897.2	76	34	-193	-193	0	0	16	15	-1	-168	0	0	0	0
L3 IJzendoorn, Waal_Km909.6	101	59	7	7	0	0	43	43	-1	-565	0	0	0	0
L6 Wamel, Waal_Km910.9	108	66	10	10	0	0	47	46	0	5	0	0	0	0
Dreumel, Waal_Km917.9	121	75	18	18	0	0	51	51	0	11	0	0	0	0
Gameren, Waal_Km937.20	155	111	41	41	0	0	88	87	-1	35	0	0	0	0
WaalBeneden, Waal_Km980.9	178	141	72	72	0	0	123	122	-1	59	0	0	0	0
<i>Pannerdensch Kanaal</i>														
PanKanBegin, PanKan_Km870.5	37	10	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
PanKanBeneden, PanKan_Km878.0	48	20	0	0	0	0	4	3	0	0	0	0	0	0
<i>Nederrijn-Lek</i>														
Driel, Nederrijn_Km890.97	25	9	0	0	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0
Nude, Nederrijn_Km905.1	35	23	1	1	0	-6	16	15	0	0	0	0	0	0
L4 Rijswijk, Nederrijn_Km928.0	65	42	3	-879	-882	4	24	24	0	2	0	0	0	0
De Heul, Nederrijn_Km939.0	74	50	4	-696	-700	12	29	29	0	3	0	0	0	0
LekBeneden, Nederrijn_Km963.1	86	59	5	-652	-657	24	31	31	0	4	0	0	0	0
<i>IJssel</i>														
Westervoort, IJssel_Km880.0	28	13	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0
Velperbroek, IJssel_Km882.3	29	13	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0
Fraterwaard, IJssel_Km905.1	-330	41	2	2	0	0	18	16	-3	1	-18	0	0	0
L7 Vierakker, IJssel_Km923.1	-309	51	3	3	0	0	24	21	-3	2	7	0	0	0
Zutphen, IJssel_Km925.9	-308	52	3	3	0	0	25	22	-3	2	8	0	0	0
Gorssel, IJssel_Km940.8	-285	63	5	5	0	0	31	28	-3	3	20	0	0	0
Deventer, IJssel_Km944.5	-272	67	5	5	0	0	33	30	-3	3	27	-12	-12	0
L8 Den Nul, IJssel_Km960.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0
Wapenveld, IJssel_Km971.0	-230	81	8	8	0	0	37	35	-2	7	57	9	9	0
Zwolle-Zuid, IJssel_Km977.6	-228	85	9	9	0	0	38	36	-2	7	64	14	14	0
Zwolle-Oost, IJssel_Km982.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16	16	0
Kampen-Oost, IJssel_Km999.46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	23	0
<i>Overrijn</i>														
Max Instroom door het dijkgat	-2312	-2992	-3106	-3106	0	-1331	-2777	-2780	-3	-3130	-445	-691	-691	0
Max Instroom op Maas Km208-165	0	0	0	0	0	0	-2004	0	2004	-1791	0	0	0	0
Max Uitstroom uit Dijkkring 38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max Instroom op het Zwarte Water	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-120	-78	42
Max Instroom in Dijkkring 9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0
Max Instroom in Dijkkring 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0
Max Uitstroom in Dijkkring 11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0
Max Instroom in Dijkkring 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max Instroom in Dijkkring 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max Instroom in Dijkkring 16	0	0	-1388	0	1388	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max Uitstroom in Dijkkring 44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max Uitstroom in Dijkkring 45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max Uitstroom in Dijkkring 46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 6-4 Verschillen in debieten als gevolg van dijkdoorbraken op locaties L1 en L2, Dijken breken respectievelijk door 6, 30, 70 uur (L1) en 6, 20, 34 uur (L2) voordat ter plaatse van de dijkdoorbraaklocatie de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.

Verschillen in het Maximum Debiet Referentie <i>minus</i> Dijkdoorbraak						
Dijkdoorbraak locatie	L1			L2		
	GD	GD	GD	GD	GD	GD
Dijkdoorbraak berekening	L1T6GC	L1T30GC	L1T70GC	L2T6GC	L2T20GC	L2T34GC
Meetraai	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
<i>Bovenrijn</i>						
Rees, Bovenrijn_Km837.4	0	0	0	0	0	0
L1_Lobith, Bovenrijn_Km861.19	38	1023	2257	-126	-78	-25
<i>Waal</i>						
WaalBegin, Waal_Km869.1	23	605	1492	-735	-837	-886
L2_Kekerdome, Waal_Km874.0	36	617	1496	3	281	659
L5_Weurt, Waal_Km889.9	62	673	1506	28	340	739
Andelst, Waal_Km897.2	76	693	1504	34	340	740
L3_IJzendoorn, Waal_Km909.6	101	745	1500	59	388	811
L6_Wamel, Waal_Km910.9	108	752	1499	66	397	816
Dreumel, Waal_Km917.9	121	771	1498	75	405	836
Gameren, Waal_Km937.20	155	825	1494	111	456	906
WaalBeneden, Waal_Km980.9	178	850	1493	141	490	947
<i>Pannerdensch Kanaal</i>						
PanKanBegin, PanKan_Km870.5	37	455	716	10	194	480
PanKanBeneden, PanKan_Km878.0	48	465	732	20	204	477
<i>Nederrijn-Lek</i>						
Driel, Nederrijn_Km890.97	25	247	364	9	105	249
Nude, Nederrijn_Km905.1	35	257	363	23	127	264
L4_Rijswijk, Nederrijn_Km928.0	65	276	365	42	151	277
De Heul, Nederrijn_Km939.0	74	286	368	50	162	278
LekBeneden, Nederrijn_Km963.1	86	308	380	59	187	285
<i>IJssel</i>						
Westervoort, IJssel_Km880.0	28	235	363	13	106	253
Velperbroek, IJssel_Km882.3	29	225	364	13	108	226
Fraterwaard, IJssel_Km905.1	-330	-613	-947	41	129	274
L7_Vierakker, IJssel_Km923.1	-309	-626	-936	51	141	280
Zutphen, IJssel_Km925.9	-308	-625	-927	52	142	280
Gorssel, IJssel_Km940.8	-285	-610	-888	63	155	277
Deventer, IJssel_Km944.5	-272	-612	-887	67	159	276
L8_Den Nul, IJssel_Km960.0	-	-	-	-	-	-
Wapenveld, IJssel_Km971.0	-230	-579	-880	81	166	260
Zwolle-Zuid, IJssel_Km977.6	-228	-576	-767	85	168	259
<i>Overigen</i>						
Max Instroom door het dijkgat	-2312	-2324	-2280	-2992	-3077	-3085
Max Instroom op Maas Km208-165	0	0	0	0	0	0
Max Uitstroom uit Dijkkring 38	0	0	0	0	0	0
Max Instroom op het Zwarte Water	-	-	-	-	-	-
Max Instroom in Dijkkring 9	-	-	-	-	-	-
Max Instroom in Dijkkring 10	-	-	-	-	-	-
Max Uitstroom in Dijkkring 11	-	-	-	-	-	-
Max Instroom in Dijkkring 14	0	0	0	0	0	0
Max Instroom in Dijkkring 15	0	0	0	0	0	0
Max Instroom in Dijkkring 16	0	0	0	0	0	0
Max Uitstroom in Dijkkring 44	0	0	0	0	0	0
Max Uitstroom in Dijkkring 45	0	0	0	0	0	0
Max Uitstroom in Dijkkring 46	0	0	0	0	0	0

6.3 Evaluatie Hydraulische Systeemwerkingsaspecten

Allereerst wordt met klem opgemerkt dat de orde grootte van de hydraulische effecten van systeemwerking in Tabel 6-1 t/m Tabel 6-4 afhankelijk zijn van:

- De gekozen afvoergolf te Rees met een piekafvoer van 17.000 m³/s,
- De gekozen locaties van mogelijke dijkdoorbraken,
- De aannamen voor het tijdstip van dijkdoorbraak, uitgedrukt als het aantal uren voordat ter plaatse de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.
- Het gekozen bresgroeiscenario, waarin 78 uur na dijkdoorbraak een maximale bresbreedte van 210 m wordt bereikt, en
- De aanname dat nergens anders dijkdoorbraken optreden, ook niet indien dijken worden overstromd.

Afhankelijk van het overheersende systeemwerkingsmechanisme zijn verschillen in de maximum waterstand en verschillen in het maximum debiet lokaal soms positief en soms negatief (zie Tabel 6-1 t/m Tabel 6-4). Dit geldt zowel voor dijkdoorbraakberekeningen zonder compartimentering als voor dijkdoorbraakberekeningen met compartimenteringdijken. In het algemeen kan worden gesteld dat de effecten van systeemwerking tengevolge van een specifieke dijkdoorbraak aanzienlijke proporties kunnen aannemen. Behalve de overstroming van aangrenzende en overige dijkringen zijn waterstandsverlagingen van 0.65 m en waterstandsverhogingen tot 0.75 m op bepaalde Rijnakken substantieel te noemen. Ook een extra afvoer van ca. 2.000 m³/s op de Maas is zeer substantieel te noemen. Kortom hydraulische effecten van systeemwerking kunnen niet worden verwaarloosd.

Met betrekking tot Tabel 6-1 t/m Tabel 6-4 kan het volgende worden opgemerkt:

- In de berekeningsresultaten waarbij een dijkdoorbraak optreedt 6 uur voordat ter plaatse van de dijkdoorbraaklocatie de hoogste rivier waterstand wordt bereikt zijn de positieve hydraulische effecten van systeemwerking marginaal in verhouding tot negatieve hydraulische effecten van systeemwerking.
- Naarmate bij Lobith (L1) en Keerderdom (L2) de dijk eerder doorbreekt worden zowel de positieve als negatieve hydraulische effecten van systeemwerking groter. Tevens zijn de positieve hydraulische effecten van systeemwerking niet meer marginaal vergeleken met de negatieve effecten van systeemwerking. Als gevolg van het eerder doorbreken van een dijk hoeven positieve effecten van systeemwerking echter niet altijd toe te nemen. Stel dat bij Keerderdom de dijk zodanig vroeg doorbreekt dat het totale volume dat in dijkkring 42 geborgen kan worden reeds is ingestroomd voordat de top van de hoogwatergolf Keerderdom passeert. In zo'n geval zullen de hydraulische effecten van systeemwerking nagenoeg nul zijn. Voor nadere informatie over het instromingsproces bij Lobith (L1) en Keerderdom (L2) wordt verwezen naar §7.3.
- Direct bovenstrooms van het dijkgat treedt afzuiging op. Hierdoor wordt het bovenstroomse hydraulische verhang richting dijkgat groter. Derhalve kan voor gelijkblijvende bovenstroomse waterstanden een aanzienlijk groter debiet richting dijkdoorbraaklocatie stromen. Dit fenomeen is het meest prominent voor een dijkdoorbraak bij Keerderdom, waar bij het splitsingspunt Pannerdensche Kop een aanzienlijk groter debiet de Waal instroomt. Dit fenomeen treedt in mindere mate ook op voor een dijkdoorbraak bij Weurt (scenario L2T6GC). Een dijkdoorbraak bij

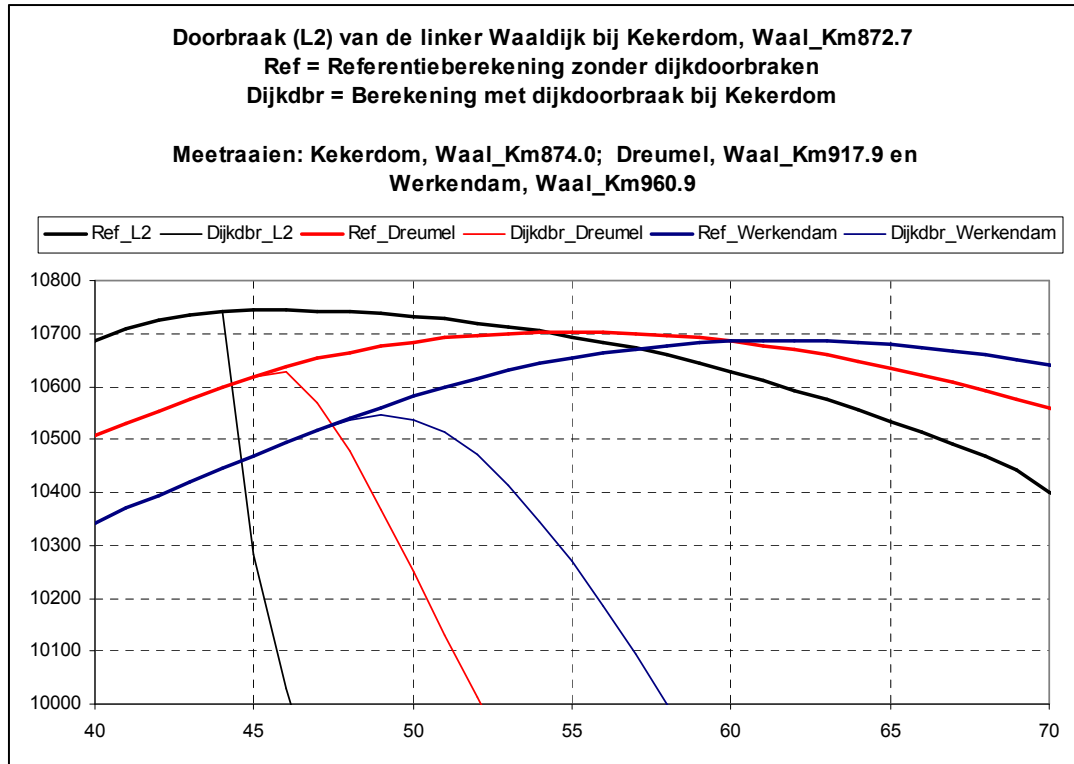
Wamel (scenario L6T6GC) ligt te ver benedenstrooms om nog de debietverdeling bij de Pannerdensche Kop te beïnvloeden.

- Naarmate een meetlocatie verder benedenstrooms van een dijkdoorbraaklocatie ligt en onder voorwaarde dat er géén terugstroming van bovenstrooms ingestroomd rivierwater plaatsvindt, worden de positieve effecten van systeemwerking groter. Zie bijvoorbeeld de resultaten van scenario L2T6GC. Ter plaatse van het dijkgat wordt het volume in de hoogwatergolf sterk gereduceerd, hetgeen resulteert in een sterk smallere (afgeknotte) hoogwaterpiek. De topvervlakking van deze afgeknotte hoogwaterpiek is hoger dan die van de oorspronkelijke hoogwatergolf. Hoe verder benedenstrooms hoe meer topvervlakking er optreedt en hoe groter derhalve het verschil wordt tussen het maximum debiet in de referentieberekening en het maximum debiet in de dijkdoorbraakberekening (zie ook Figuur 6-2).

Verschillen in de maximum waterstand en het maximum debiet zijn zeer indicatief voor het vastleggen van hydraulische effecten die verschillende vormen van systeemwerking met zich meebrengen. Echter een afweging of gegeven een specifieke dijkdoorbraak over het gehele stroomgebied gezien de effecten van systeemwerking positief of negatief zijn, kan niet alleen gemaakt worden door het bestuderen van verschillen in maximale waterstanden en debieten. In zo'n afweging moet de opgetreden overstromingsschade tengevolge van de dijkdoorbraak worden gewogen tegen de verandering in de kans en de bijbehorende schade dat elders in het stroomgebied dijk(ring)en wel of niet overstromen als gevolg van deze dijkdoorbraak. Met andere woorden het jaarlijkse overstromingsrisico van het dijkdoorbraakscenario (=jaarlijkse kans op dijkdoorbraak maal optredende schade) moet vergeleken worden met het jaarlijkse overstromingsrisico voor de conditie dat geen dijkdoorbraak op de beschouwde locatie optreedt.

Voor het bepalen van overstromingsrisico's waarbij effecten van systeemwerking worden meegenomen is een methode ontwikkeld. Deze methode is succesvol toegepast op een sterk geschematiseerde rivierconfiguratie met eenvoudige beschrijvingen van faalmechanismen, een beperkt aantal doorbraaklocaties, en aannamen voor verdelingsfuncties van dijksterkte en bovenstroomse hoogwaterafvoergolven (zie Van Mierlo et al, 2003). In de komende jaren is echter nog veel nader onderzoek nodig om deze methode verder uit te werken, teneinde op een efficiënte en objectieve wijze overstromingsrisico's in Nederland te kunnen bepalen. Voor de acceptatie van deze nieuwe methode is het van belang dat er een vertaalslag wordt gemaakt na de huidige wijze van bepalen van overstromingskansen. Met andere woorden hoe sluiten overstromingskansen volgens de nieuwe methode aan op overstromingskansen volgens de huidige methode. Het bepalen van overstromingskansen is reeds zeer complex vanwege allerlei correlaties. Bijvoorbeeld in dijkdoorbraakscenario L3T6C1 blijkt dat de kans dat een Lekdijk wordt overstroomd (c.q. bezwijkt) is gecorreleerd aan de kans op een dijkdoorbraak van de rechter Waaldijk bij IJzendoorn onder de conditie dat dijkkring 43 is gecompartmenteerd ter plaatse van het Amsterdam-Rijn kanaal (zie ook §5.8). In de bovengenoemde nieuwe methode worden dit soort statistische correlaties automatisch meegenomen. Dit omdat de interactie tussen rivierafvoeren, het bezwijken van dijken en de daaraan gerelateerde overstromingen integraal worden meegenomen.

De complexiteit van systeemwerking ten spijt, tonen de resultaten in Tabel 6-1 t/m Tabel 6-4 aan dat bepaalde vormen van systeemwerking moeten worden meegenomen teneinde een juiste inschatting te kunnen maken voor overstromingskansen en overstromingsrisico's in Nederland. Derhalve is het gewenst om in de huidige methode van het bepalen van overstromingskansen op z'n minst de hydraulische effecten van sommige vormen van systeemwerking mee te kunnen nemen.



Figuur 6-2 Voortplanting op de Waal van de referentie hoogwatergolf en de sterk smallere (afgeknotte) hoogwatergolf welke ontstaat als gevolg van een dijkdoorbraak bij locatie L2 (Kekerdom)

7 Generale uitspraken over hydraulische effecten van systeemwerking

In dit hoofdstuk wordt nagegaan in hoeverre het mogelijk is om generale uitspraken te doen over te verwachten hydraulische effecten van systeemwerking. In §7.1 wordt het begrip “generale uitspraak” omschreven en tevens wordt aangegeven wanneer en waarom generale uitspraken mogelijk worden geacht. In §7.2 wordt de keuze voor dijkdoorbraken bij Lobith (L1) en Kekeerdom (L2) toegelicht, waarmee is nagegaan in hoeverre generale uitspraken mogelijk zijn. In §7.3 worden de initiële verstoringen (c.q. dijkgatdebieten) beschreven welke worden geïnduceerd door dijkdoorbraken bij Lobith en Kekeerdom. In §7.4 wordt de voortplanting door het riviersysteem (c.q. riviertakken en overstroomde gebieden) van genoemde initiële verstoringen geanalyseerd. In §7.5 wordt vervolgens ingegaan op de vraag in hoeverre generale uitspraken over te verwachten hydraulische effecten van systeemwerking mogelijk zijn.

7.1 Wat wordt bedoeld met “Generale uitspraken” en wanneer en waarom worden ze mogelijk geacht.

In §6.3 worden parameters genoemd welke de orde van grootte van optredende hydraulische effecten van systeemwerking bepalen. Onder *generale uitspraken* wordt verstaan het bepalen van hydraulische effecten van systeemwerking als functie van wijzigingen in specifieke parameters zonder dat er aanvullende dijkdoorbraakberekeningen worden gemaakt. Een generale uitspraak is in feite het schatten van hydraulische effecten van systeemwerking door te interpoleren tussen (of het extrapoleren van) resultaten van eerder gemaakte dijkdoorbraakberekeningen. In dit hoofdstuk wordt naar hydraulische effecten van systeemwerking gerefereerd als de lokaal optredende verschillen in de maximum waterstand en verschillen in het maximum debiet (zie §6.1). Het (mogelijke) gebruik van generale uitspraken betekent dat in beleidstudies het aantal benodigde dijkdoorbraakberekeningen sterk kan worden gereduceerd.

Generale uitspraken worden mogelijk geacht zolang het debiet dat een dijkgat instroomt relatief klein is ten opzichte van het heersende afvoerregiem. Verder moeten verschillen in het dijkgatdebiet als gevolg van een gewijzigde parameter (bijvoorbeeld tijdstip van dijkdoorbraak) niet zodanig groot zijn dat niet-lineaire verschijnselen gaan overheersen. Het voorgaande kan als volgt nader worden toegelicht. Het dijkgatdebiet veroorzaakt een *initiële* verstoring op het heersende afvoerregiem. Zo’n initiële verstoring plant zich voort in het riviersysteem (riviertakken inclusief overstroomde gebieden). Indien zulke initiële verstoringen relatief klein zijn ten opzichte van het heersende afvoerregiem, dan zal elk zo’n initiële verstoring zich op vergelijkbare wijze in het riviersysteem voortplanten. Met vergelijkbare wijze van voortplanting wordt bedoeld dat de snelheid van voortplanting en de mate van topvervlakking van initiële verstoringen onderling vergelijkbaar zijn. Vergelijk bijvoorbeeld het werpen van lichte en zwaardere stenen op stilstaand water. Er kunnen echter ook niet-lineaire effecten optreden, bijvoorbeeld tijdens het overstromen van obstakels (dijken, wegen etc), waardoor grotere verschillen in de wijze van voortplanting van initiële verstoringen onderling kunnen optreden. In zo’n geval zal men de resultaten van

reeds gemaakte dijkdoorbraakberekeningen minder ver kunnen interpoleren dan wel extrapoleren.

7.2 Dijkdoorbraakresultaten waarmee is nagegaan in hoeverre “Generale uitspraken” mogelijk zijn

In overleg met de begeleiders van de onderhavige studie (zie §1.4) is besloten om na te gaan in hoeverre *generale uitspraken* mogelijk zijn indien het tijdstip van dijkdoorbraak naar voren wordt geschoven. Met andere woorden de dijk breekt door eerder dan 6 uur voordat ter plaatse van de dijkdoorbraaklocatie de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. Verder is besloten om dit na te gaan voor een dijkdoorbraak waarin enkel positieve hydraulische effecten van systeemwerking optreden en voor een dijkdoorbraak waarin zowel positieve als negatieve effecten van systeemwerking optreden. De resultaten van de volgende dijkdoorbraakberekeningen zijn gebruikt om na te gaan of generale uitspraken mogelijk zijn:

- Dijkdoorbraakberekeningen L1T6GC, L1T30GC en L1T70GC (zie §5.1 t/m §5.3), waarin de rechter Bovenrijndijk bij Lobith (L1) doorbreekt respectievelijk 6, 30 en 70 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. In dijkdoorbraakberekeningen L1T6GC, L1T30GC en L1T70GC treden zowel positieve als negatieve vormen van systeemwerking op (zie Tabel 6-2 en Tabel 6-4),
- Dijkdoorbraakberekeningen L2T6GC, L2T20GC en L2T34GC (zie §5.4 t/m §5.6), waarin de linker Waaldijk bij Kekerdom (L2) doorbreekt respectievelijk 6, 20 en 34 uur voordat bij Kekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. In dijkdoorbraakberekeningen L2T6GC, L2T20GC en L2T34GC treden enkel positieve vormen van systeemwerking op (zie Tabel 6-2 en Tabel 6-4).

7.3 Initiële verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken

In deze paragraaf worden de initiële verstoringen geïnduceerd door dijkbraken bij Lobith (L1) en Kekerdom (L2) nader geanalyseerd.

7.3.1 Initiële verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken bij Lobith

In Figuur 7-1 zijn initiële verstoringen (c.q. het verloop van het dijkgatdebiet) gegeven voor het geval de rechter Bovenrijndijk bij Lobith (L1), doorbreekt respectievelijk 6 (L1T6GC), 30 (L1T30GC) en 70 (L1T70GC) uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. In Tabel 7-1 worden de karakteristieken van het instromingproces van deze drie doorbraakberekeningen gegeven.

In dijkdoorbraakscenario L1T6GC wordt de instroming in het dijkgat onvolkomen (c.q. gestuwde instroming) op het moment dat de top van de hoogwatergolf de dijkdoorbraaklocatie passeert. In scenario's L1T30GC en L1T70GC wordt de instroming in het dijkgat reeds gestuwd, respectievelijk 24 en 66 uur voordat de top van de hoogwatergolf de dijkdoorbraaklocatie passeert. De instroming in het dijkgat raakt relatief snel gestuwd door de aanwezigheid van secundaire dijken/wegen in dijkkring 48 welke direct achter het dijkgat zijn gelegen. Het relatief snel gestuwd raken van de instroming in het dijkgat heeft de volgende effecten tengevolge:

1. Het maximale dijkgatdebiet wordt niet alsmaar groter indien de dijk eerder doorbreekt (zie Tabel 7-1). Dit terwijl in de DelftFLS berekeningen voor een eerdere dijkdoorbraak geldt dat de maximale bresbreedte eerder wordt bereikt (zie §3.5).
2. Er treden niet-lineaire effecten op tijdens het instromingproces. Hiermee wordt bedoeld dat het dijkgatdebiet afhankelijk is van de rivier waterstand voor de dijkdoorbraaklocatie en het volume dat reeds het dijkgat is ingestroomd. Met andere woorden het actuele verloop van het dijkgatdebiet is afhankelijk van het tijdstip van dijkdoorbraak. Dit is het duidelijkst te zien in het verschil in het verloop van het dijkgatdebiet tussen scenario L1T30GC en L1T70GC (zie Figuur 7-1).

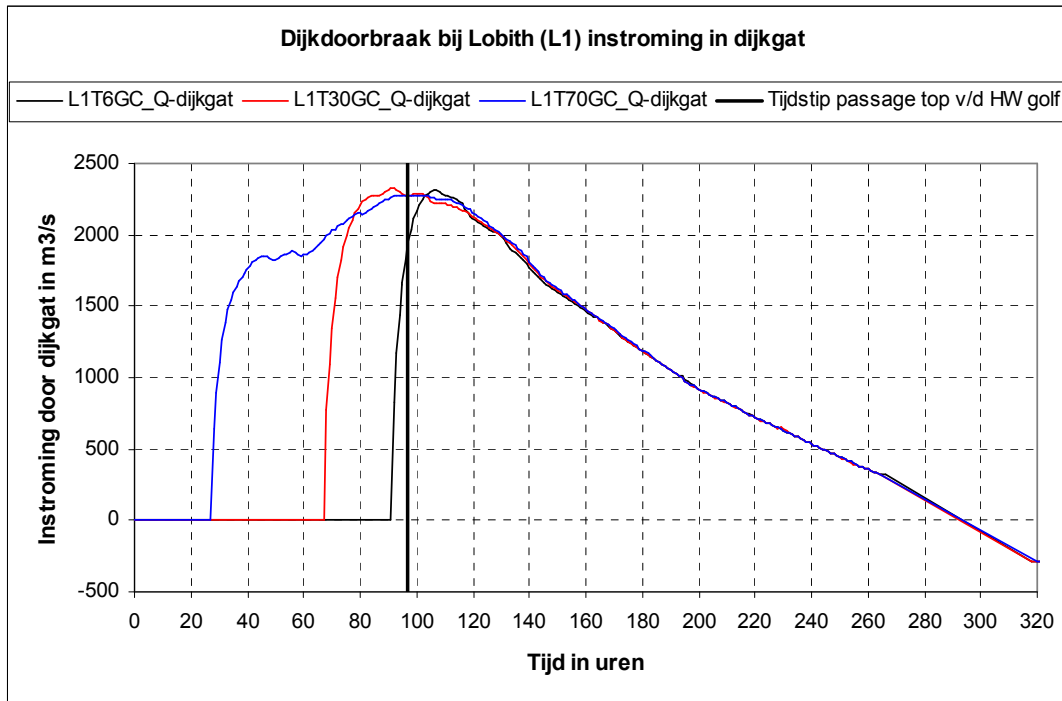
Ingestroomd Bovenrijnwater in de aangrenzende/primaire dijkring 48 stroomt door naar dijkringen 49, 50, 51 en 52 (cascadewerking) en naar de IJssel doordat de rechter IJsseldijken tussen km898 en km901 (ter hoogte voormalige Liemerse overlaten) worden overstroomd (zie §5.1 t/m §5.3). Voor scenario L1T6GC, L1T30GC en L1T70GC geldt dat het wegstromen uit dijkkring 48 van ingestroomd Bovenrijnwater (c.q. dijkkring 48 is maximaal gevuld) respectievelijk pas optreedt 65, 39 en 3 uur nadat de top van de hoogwatergolf de dijkdoorbraaklocatie heeft gepasseerd. Het bovengenoemd wegstromen uit dijkkring 48 van ingestroomd Bovenrijnwater heeft de volgende effecten tengevolge:

1. Naarmate de dijkdoorbraak eerder optreedt, kan er een groter volume het dijkgat instromen, en
2. Het verloop van het dijkgatdebiet van alle drie scenario's valt samen 65 uur nadat de top van de hoogwatergolf de dijkdoorbraaklocatie heeft gepasseerd (zie Figuur 7-1). Dit komt doordat vanaf dit tijdstip voor alle scenario's geldt dat de aandrijvende waterstand op de Bovenrijn bij Lobith, de waterstanden/berging in dijkkring 48 en de uitstroomcapaciteit uit dijkkring 48 nagenoeg gelijk zijn.

Resumerend kan worden gesteld dat tengevolge van cascadewerking en het relatief snel gestuwd raken van de instroming de vorm van het verloop van het dijkgatdebiet sterk varieert als functie van het tijdstip van dijkdoorbraak (zie Figuur 7-1).

Tabel 7-1 Karakteristieken van het dijkgatdebiet bij Lobith (L1) in dijkdoorbraakberekeningen L1T6GC, L1T30GC en L1T70GC

Dijkdoorbraak bij Lobith (locatie L1)			
Code (zie H4)	Instromingkarakteristieken dijkkring 48		
	Onvolkomen instroming x uur na dijkdoorbraak	Maximum Instroomdebiet m ³ /s	Instroomvolume 10 ⁶ m ³
L1T6GC	6	2312	788
L1T30GC	6	2324	978
L1T70GC	4	2280	1242



Figuur 7-1 Verloop van het dijkgatdebiet bij Lobith (L1) indien rechter Bovenrijndijk respectievelijk doorbreekt 6 (L1T6GC), 30 (L1T30GC) en 70 (L1T70GC) uur voordat bij Lobith de hoogste waterstand wordt bereikt

7.3.2 Initiële verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken bij Kekerdom

In Figuur 7-2 zijn initiële verstoringen (c.q. het verloop van het dijkgatdebiet) gegeven indien de linker Waaldijk bij Kekerdom (L2) doorbreekt, respectievelijk 6 (L2T6GC), 20 (L2T20GC) en 34 (L2T34GC) uur voordat bij Kekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt. In Tabel 7-2 worden de karakteristieken van het instromingproces van deze drie dijkdoorbraakberekeningen gegeven.

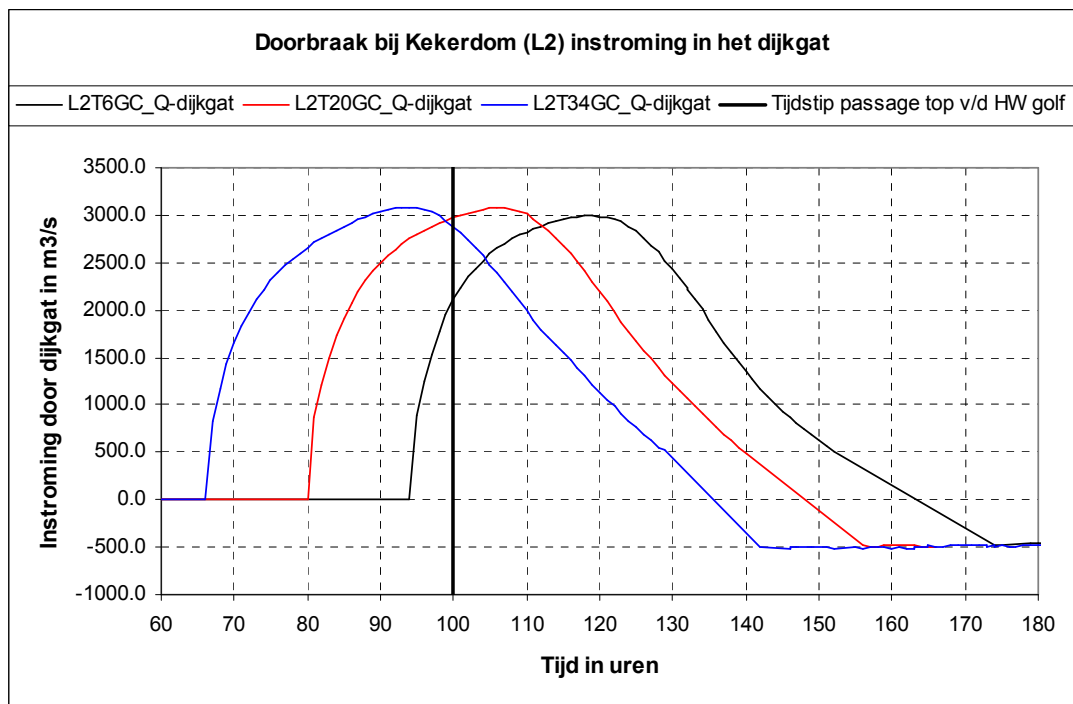
Voor dijkdoorbraakscenario's L2T6GC, L2T20GC en L2T34GC geldt dat de instroming in het dijkgat ongestuwd blijft ruim nadat de top van de hoogwatergolf de dijkdoorbraaklocatie is gepasseerd. Omdat in scenario L2T34GC de bresbreedte (zie §3.5) het grootst is ten tijde van het passeren van de hoogste rivier waterstand is ook het maximale dijkgatdebiet in dit scenario het grootst.

Omdat instromend Waalwater niet naar andere dijkkringen wegstroomt, geldt dat hoe eerder de dijkdoorbraak optreedt, hoe eerder dijkkring 42 maximaal gevuld zal zijn en als gevolg daarvan de stroomrichting in het dijkgat zal kenteren (zie Figuur 7-2). Verder hebben alle scenario's een min of meer identiek verloop van het dijkgatdebiet (c.q. totale tijdsduur van instroming en het maximum dijkgatdebiet).

Voor de volledigheid dient opgemerkt te worden dat in scenario L2T34GC een zeer klein deel van ingestroomde Waalwater over de linker Waaldijken ter hoogte van km883.5 terugstroomt naar de Waal (zie §5.6).

Tabel 7-2 Karakteristieken van het dijkgatdebit bij Kekerdom (L2) in dijkdoorbraakberekeningen L2T6GC, L2T20GC en L2T34GC

Dijkdoorbraak bij Kekerdom (locatie L2)			
Code (zie H4)	Instromingkarakteristieken Dijkkring 42		
	Onvolkomen instroming x uur na dijkdoorbraak	Maximum Instroomdebiet m ³ /s	Instroomvolume 10 ⁶ m ³
L2T6GC	44	2992	436
L2T20GC	45	3077	460
L2T34GC	45	3085	481



Figuur 7-2 Verloop van het dijkgatdebit indien de linker Waaldijk bij Kekerdom (L2) respectievelijk doorbreekt 6 (L2T6GC), 20 (L2T20GC) en 34 (L2T34GC) uur voordat bij Kekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.

7.4 Voortplanting van verstoringen in het riviersysteem

In deze paragraaf wordt nagegaan in hoeverre initiële verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken (zie §7.3) zich op vergelijkbare wijze voortplanten door het riviersysteem (c.q. riviertakken inclusief overstroomde gebieden). Lokale verstoringen zijn gedefinieerd als de afvoer berekend in de referentieberekening (c.q. géén dijkdoorbraken) minus de afvoer berekend in de betreffende dijkdoorbraakberekening.

7.4.1 Voortplanting van verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken bij Lobith

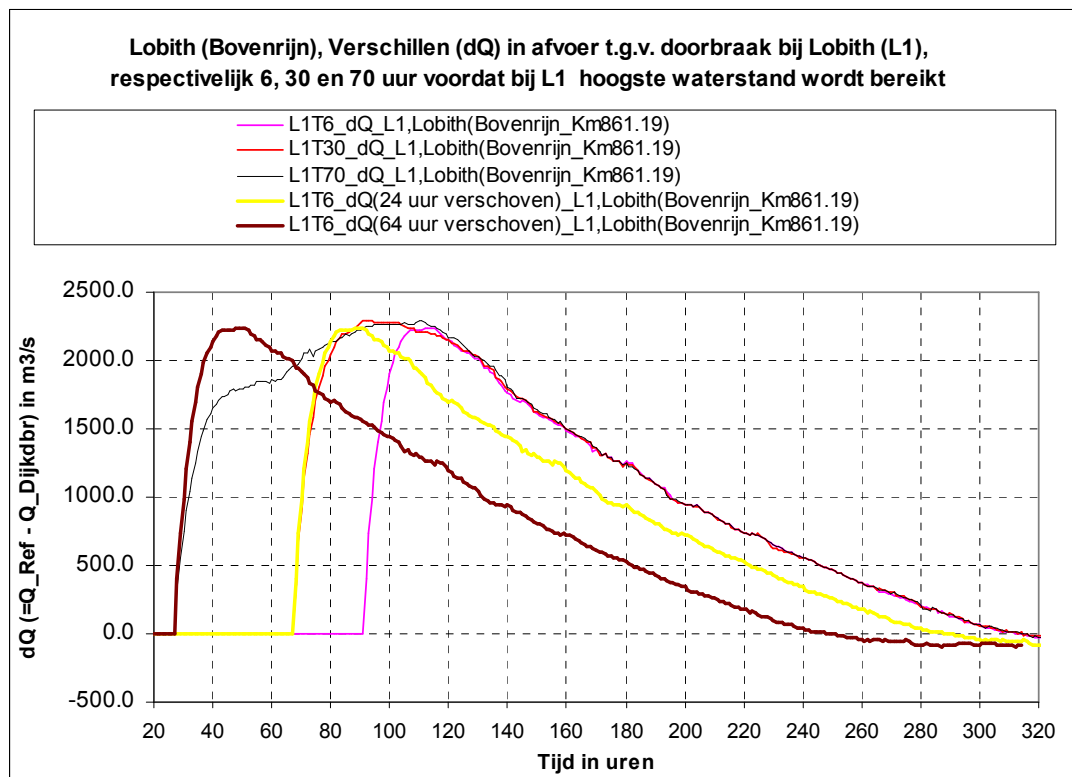
Figuur 7-3 t/m Figuur 7-7 tonen de voortplanting van initiële verstoringen in het riviersysteem als gevolg van dijkdoorbraken bij Lobith (L1). Meer precies, in deze figuren worden de resulterende verstoringen L1T6_dQ, L1T30_dQ en L1T70_dQ te Lobith, Kekerdon, Driel, Velperbroek en Fraterwaard getoond. Deze resulterende verstoringen treden respectievelijk op in dijkdoorbraakberekeningen L1T6GC, L1T30GC en L1T70GC. Tevens zijn toegevoegd L1T6_dQ(24 uur verschoven) en L1T6_dQ(64 uur verschoven), betreffende verstoring L1T6_dQ respectievelijk 24 en 64 uur verschoven in de tijd. Uit Figuur 7-3 t/m Figuur 7-7 blijkt dat met uitzondering van Fraterwaard het 24 uur verschuiven in de tijd van verstoring L1T6_dQ resulteert in een min of meer acceptabele weergave van verstoring L1T30_dQ met betrekking tot het maximale verstoringsdebiet en tijdstip van optreden daarvan. Hetzelfde geldt niet voor het 64 uur in de tijd verschuiven van verstoring L1T6_dQ teneinde verstoring L1T70_dQ weer te geven. De reden hiervoor is gelegen in het feit dat niet-lineaire effecten (zie §7.3.1) in dijkdoorbraakberekening L1T70GC dominant zijn dan in dijkdoorbraakberekeningen L1T6GC en L1T30GC.

In Tabel 7-3 worden voortplantingskarakteristieken van de verstoringen geïnduceerd door de dijkdoorbraken bij Lobith gegeven. Meer precies, in Tabel 7-3 staan per rivier locatie en per dijkdoorbraakberekening maximale verstoringdebieten (Q_{max}) en het tijdstip waarop deze maximale verstoringdebieten (t_{ber} of t_{rel}) optreden. Met uitzondering van L1T6GC induceren dijkdoorbraken bij Lobith verstoringen met relatief brede afgeknotte afvoergolven (zie §7.3.1). Hierdoor zijn in dijkdoorbraken L1T30GC en L1T70GC bij de diverse rivier locaties meer dan een piek in de verstoringdebiet te onderscheiden. In overeenstemming hiermee wordt in Tabel 7-3 per rivier locatie meer dan één maximum verstoringdebiet gegeven voor dijkdoorbraakberekeningen L1T30GC en L1T70GC. In Tabel 7-3 is te zien dat met uitzondering van Fraterwaard voortplantingssnelheden (of wel looptijden in uren) en topvervlakkingen van de initiële verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken L1T6GC en L1T30GC min of meer gelijk zijn. Voor initiële verstoringen geïnduceerd in dijkdoorbraak L1T70GC geldt dit in mindere mate. Vergelijk hiertoe in scenario's L1T30GC en L1T70GC de over de twee verstoringsdebietpieken gemiddelde topvervlakking en relatieve tijdstip (t_{rel}) van optreden van het maximum verstoringsdebiet met waarden zoals deze gelden voor de eenduidige piek in het verstoringsdebiet van scenario L1T6GC. Met andere woorden, met uitzondering van Fraterwaard is de wijze van voortplanting van initiële verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken L1T6GC en L1T30GC bij Lobith min of meer gelijk. Voor de initiële verstoring geïnduceerd door L1T70GC geldt dit in mindere mate. Zoals opgemerkt in §7.1 is gelijke wijze van voortplanting van verstoringen een voorwaarde om generale uitspraken te kunnen doen.

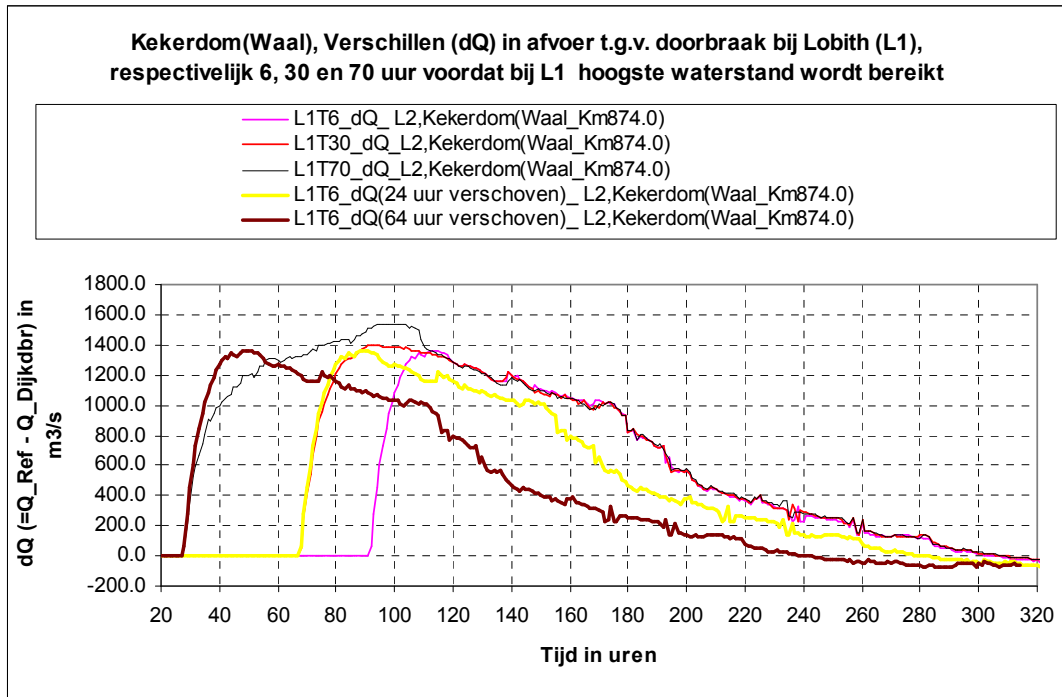
Tabel 7-3 Voortplantingskarakteristieken van verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken bij Lobith (L1), c.q. dijkdoorbraakberekeningen L1T6GC, L1T30GC en L1T70GC

Locatie verstoring	Karakteristieken van de voortplanting van verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken bij Lobith (L1)								
	L1T6GC			L1T30GC			L1T70GC		
	t_{ber}	t_{rel}	Qmax	t_{ber}	t_{rel}	Qmax	t_{ber}	t_{rel}	Qmax
	uren	uren	m3/s	uren	uren	m3/s	uren	uren	m3/s
Dijkgat L1 (nabij Lobith)	106	0	2312	91	0	2324	96	0	2280
Lobith (Bovenrijn_Km861.19)	114	8	2233	92	1	2298	105	9	2276
				102	11	2283	110	14	2295
Kekerdom (Waal_Km874.0)	113	7	1364	93	2	1398	100	4	1542
				104	13	1380	107	11	1515
Driel (Nederrijn_Km890.87)	122	16	461	105	14	461	113	17	440
				123	32	470	123	27	426
Velperbroek (IJssel_Km882.3)	121	15	419	104	13	428	112	16	504
				121	30	428	120	24	513
Fraterwaard (IJssel_Km905.1)	189	83	-860	167	76	-1017	146	50	-1084
				177	86	-1027	164	68	-1058

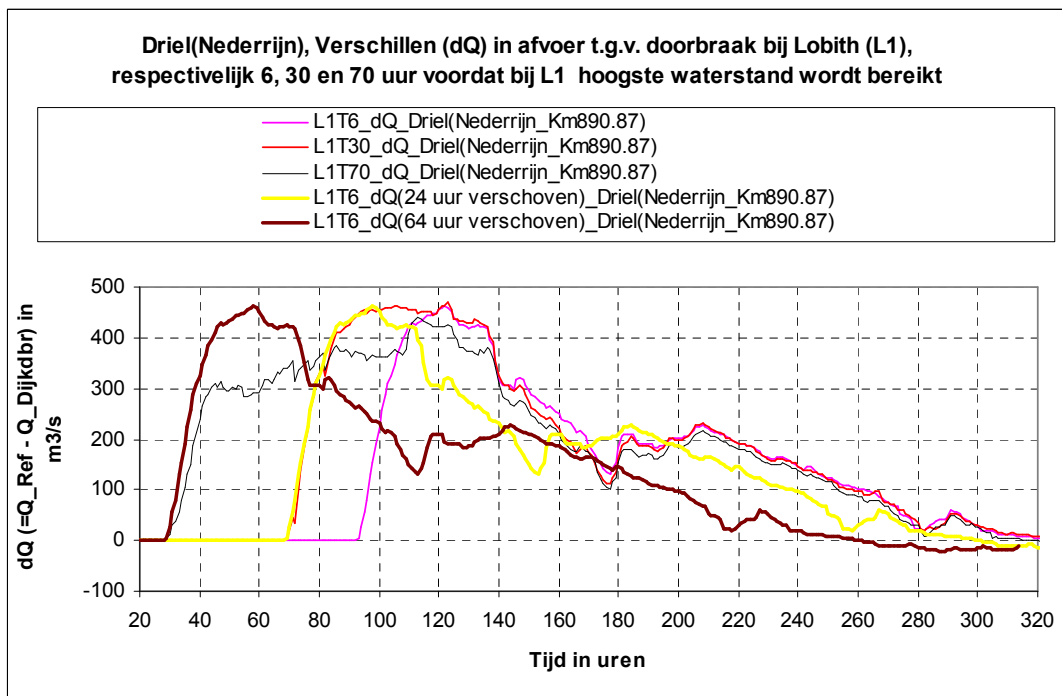
- Opm: 1) t_{ber} = tijdstip in de DelftFLS berekening waarop Qmax optreedt
 2) t_{rel} = relatieve tijdstip waarop Qmax optreedt (= $t_{ber_lokale\ Qmax} - t_{ber_Qmax\ in\ dijkgat}$)
 3) Qmax = het lokale maximum verstoringsdebiet



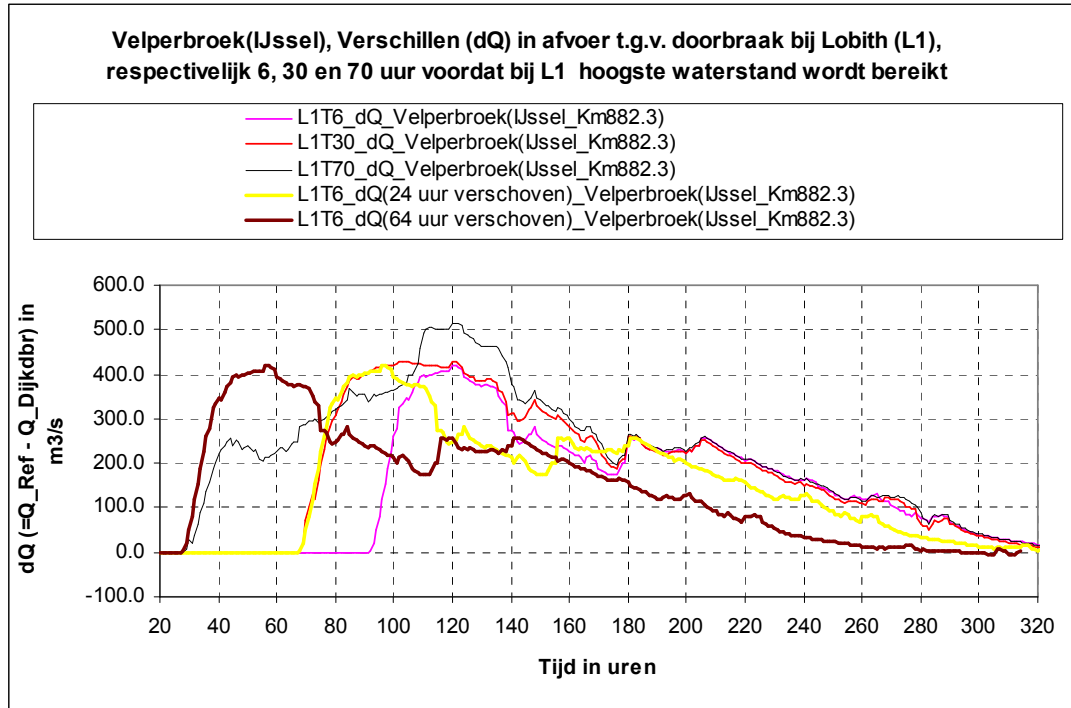
Figuur 7-3 Verstoringen in het afvoerregiem te Lobith(Bovenrijn_Km861.19) tengevolge van dijkdoorbraken bij Lobith (L1), waarin de rechter Bovenrijndijk respectievelijk doorbreekt 6 (L1T6 dQ), 30 (L1T30 dQ) en 70 (L1T70 dQ) uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.



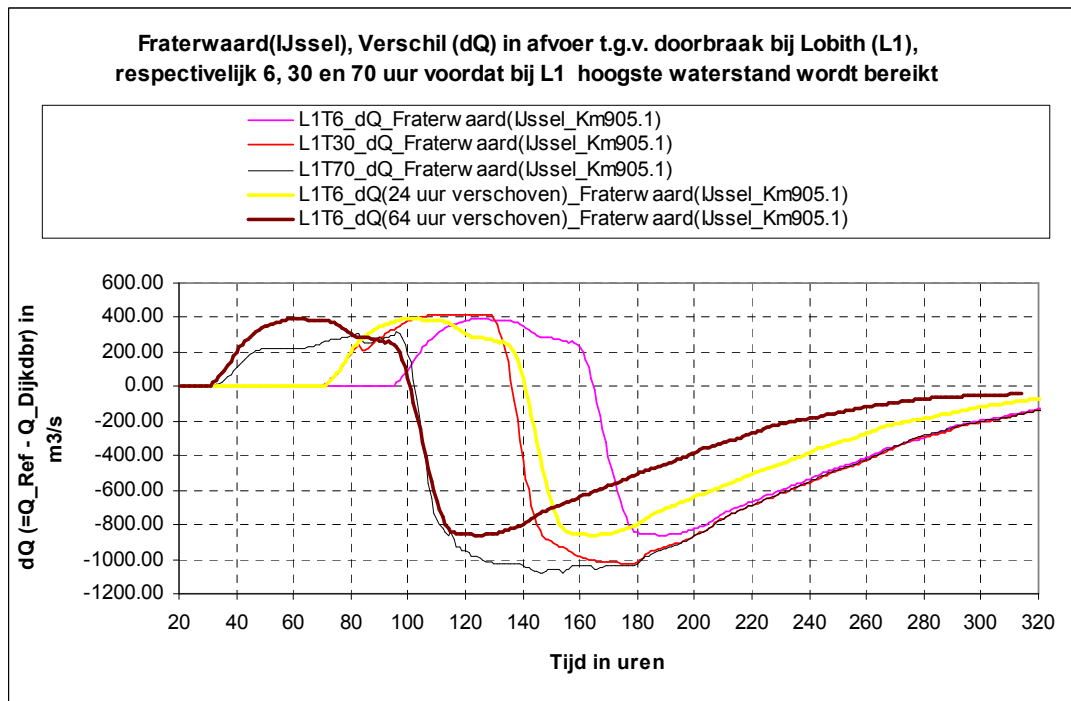
Figuur 7-4 Verstoringen in het afvoerregiem te Kekerdom (Waal_Km874.0) tengevolge van dijkdoorbraken bij Lobith (L1), waarin de rechter Bovenrijndijk respectievelijk doorbreekt 6 (L1T6 dQ), 30 (L1T30 dQ) en 70 (L1T70 dQ) uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.



Figuur 7-5 Verstoringen in het afvoerregiem te Driel (Nederrijn_Km890.87) tengevolge van dijkdoorbraken bij Lobith (L1), waarin de rechter Bovenrijndijk respectievelijk doorbreekt 6 (L1T6 dQ), 30 (L1T30 dQ) en 70 (L1T70 dQ) uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.



Figuur 7-6 Verstoringen in het afvoerregiem te Velperbroek (IJssel_Km882.3) t.g.v. dijkdoorbraken bij Lobith (L1), waarin de rechter Bovenrijndijk respectievelijk doorbreekt 6 (L1T6 dQ), 30 (L1T30 dQ) en 70 (L1T70 dQ) uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.



Figuur 7-7 Verstoringen in het afvoerregiem te Fraterwaard (IJssel_Km905.1) t.g.v. van dijkdoorbraken bij Lobith (L1), waarin de rechter Bovenrijndijk respectievelijk doorbreekt 6 (L1T6 dQ), 30 (L1T30 dQ) en 70 (L1T70 dQ) uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.

7.4.2 Voortplanting van verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken bij Kekerdom

Figuur 7-8 t/m Figuur 7-12 tonen de voortplanting van initiële verstoringen in het riviersysteem als gevolg van dijkdoorbraken bij Kekerdom (L2). Meer precies, in deze figuren worden de resulterende verstoringen L2T6_dQ, L2T20_dQ en L2T34_dQ te Lobith, Kekerdom, Driel, Velperbroek en Fraterwaard getoond. Deze resulterende verstoringen treden respectievelijk op in dijkdoorbraakberekeningen L2T6GC, L2T20GC en L2T34GC. Tevens zijn toegevoegd L2T6_dQ(14 uur verschoven) en L2T6_dQ(28 uur verschoven), betreffende verstoring L2T6_dQ respectievelijk 14 en 28 uur verschoven in de tijd. Uit Figuur 7-8 t/m Figuur 7-12 blijkt dat het 14 uur verschuiven in de tijd van verstoring L2T6_dQ resulteert in een redelijke goede weergave van verstoring L2T20_dQ met betrekking tot het maximale verstoringdebiet en tijdstip van optreden daarvan. Hetzelfde geldt in iets minder mate ook voor het 28 uur in de tijd verschuiven van verstoring L2T6_dQ teneinde verstoring L2T34_dQ weer te geven.

In Tabel 7-4 worden voortplantingskarakteristieken van de verstoringen geïnduceerd door de dijkdoorbraken bij Kekerdom gegeven. Meer precies, in Tabel 7-4 staan per locatie en per dijkdoorbraakberekening het maximum verstoringdebiet (Qmax) en het tijdstip waarop dit maximum verstoringdebiet (t_{ber} of t_{rel}) optreedt. In Tabel 7-4 is te zien dat voortplantingssnelheden (of wel looptijden in uren) en topvervlakkingen van de initiële verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken L2T6GC, L2T20GC en L2T34GC min of meer gelijk zijn. Met andere woorden, de wijze van voortplanting van initiële verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken bij Kekerdom is min of meer gelijk. Zoals opgemerkt in §7.1 is dit een voorwaarde om generale uitspraken te kunnen doen.

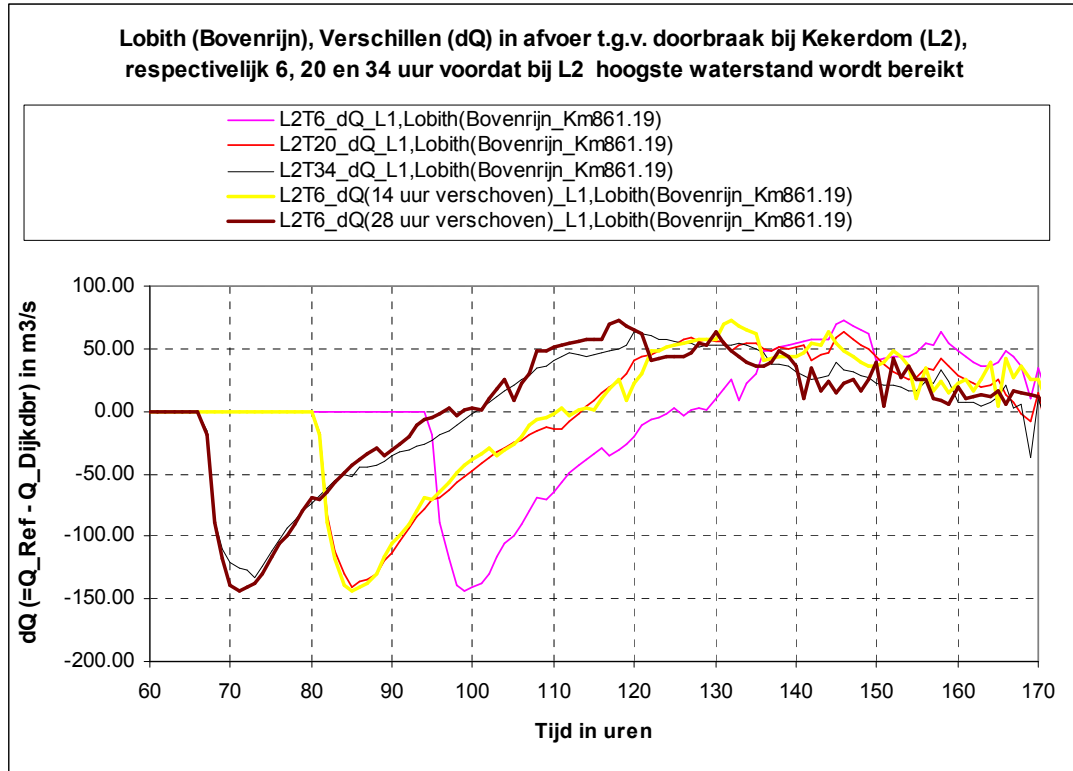
Tabel 7-4 Voortplantingskarakteristieken van verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken bij Kekerdom (L2), c.q. dijkdoorbraakberekeningen L2T6GC, L2T20GC en L2T34GC

Locatie verstoring	Karakteristieken van de voortplanting van verstoringen geïnduceerd door dijkdoorbraken bij Kekerdom (L2)								
	L2T6GC			L2T20GC			L2T34GC		
	t _{ber}	t _{rel}	Qmax	t _{ber}	t _{rel}	Qmax	t _{ber}	t _{rel}	Qmax
	uren	uren	m ³ /s	uren	uren	m ³ /s	uren	uren	m ³ /s
Dijkgat L2 (nabij Kekerdom)	118	0	2992	106	0	3077	94	0	3085
Lobith (Bovenrijn_Km861.19)	99	-19	-144	85	-21	-140	73	-21	-133
Kekerdom (Waal_Km874.0)	119	1	2151	106	0	2182	95	1	2190
Driel (Nederrijn_Km890.87)	125	7	437	110	4	444	98	4	439
Velperbroek (IJssel_Km882.3)	124	6	391	109	3	400	99	5	403
Fraterwaard (IJssel_Km905.1)	128	10	362	116	10	375	106	12	379

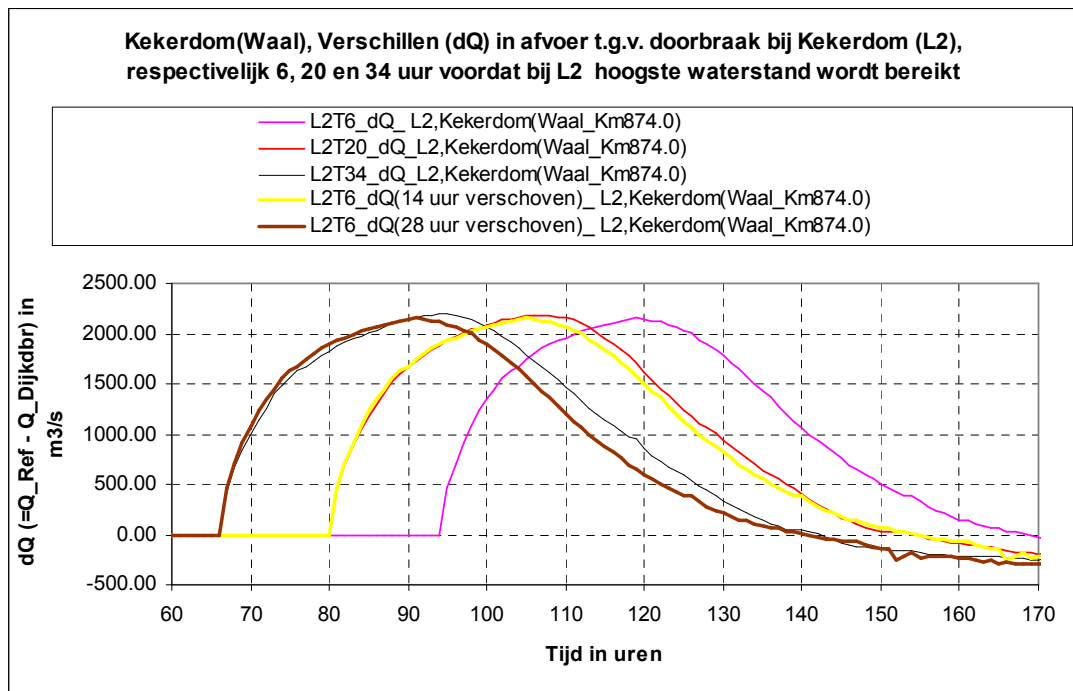
Opm: 1) t_{ber} = tijdstip in de DelftFLS berekening waarop Qmax optreedt

2) t_{rel} = relatieve tijdstip waarop Qmax optreedt (=t_{ber_lokale Qmax} - t_{ber_Qmax in dijkgat})

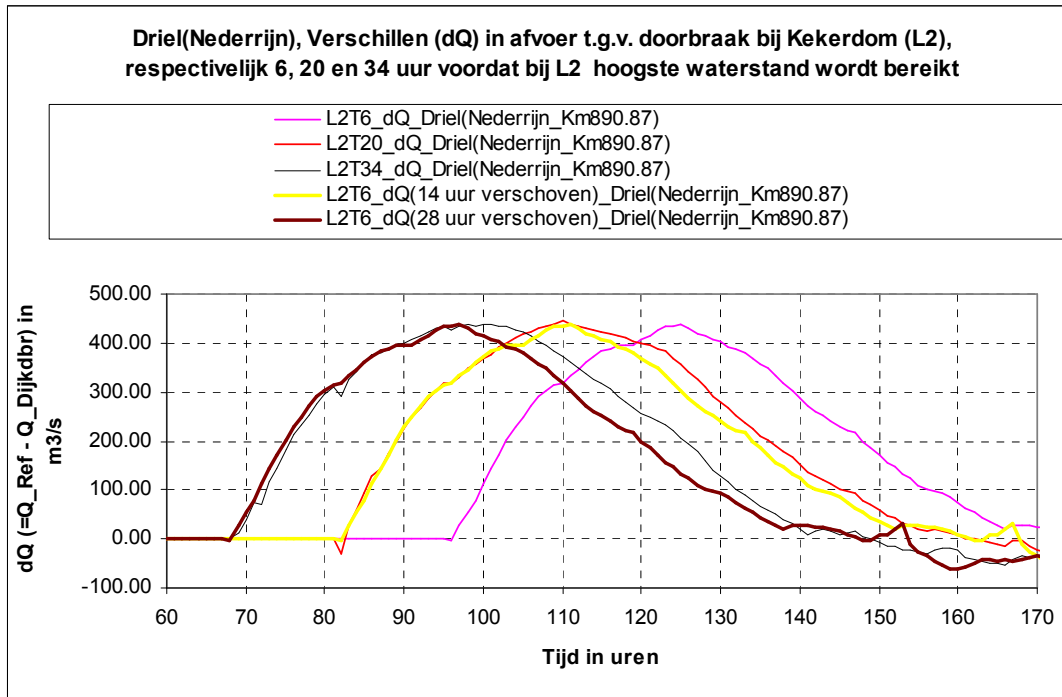
3) Qmax = het lokale maximum verstoringdebiet



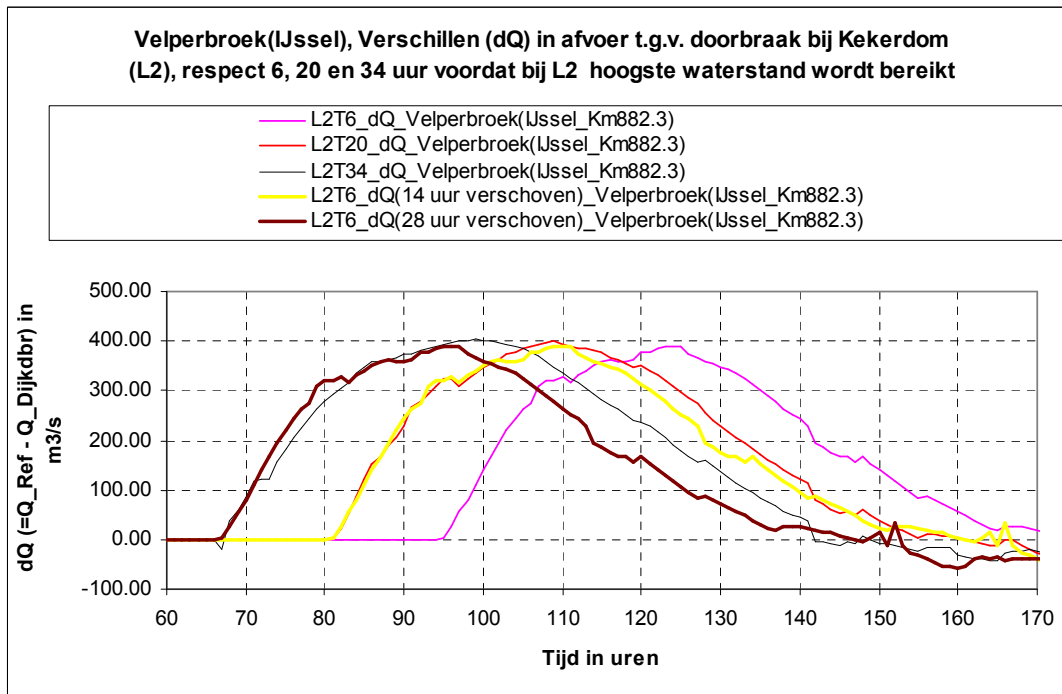
Figuur 7-8 Verstoringen in het afvoerregiem te Lobith(Bovenrijn_Km861.19) tengevolge van dijkdoorbraken bij Kekerdom (L2), waarin de linker Waaldijk respectievelijk doorbreekt 6 (L2T6 dQ), 20 (L2T20 dQ) en 34 (L2T34 dQ) uur voordat bij Kekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.



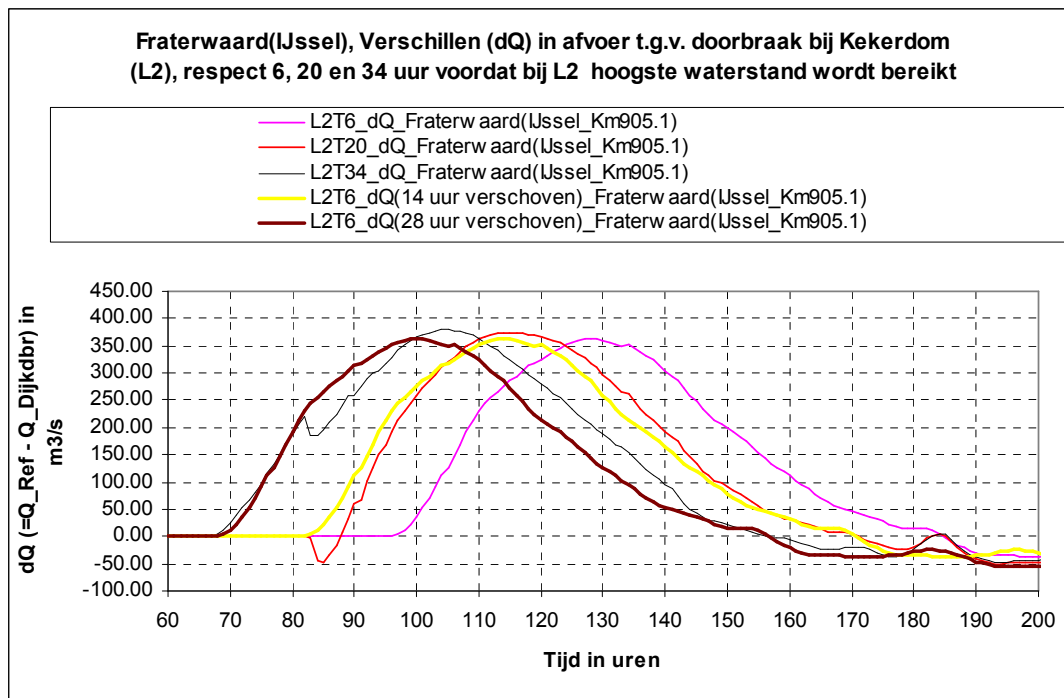
Figuur 7-9 Verstoringen in het afvoerregiem te Kekerdom(Waal_Km874.0) tengevolge van dijkdoorbraken bij Kekerdom (L2), waarin de linker Waaldijk respectievelijk doorbreekt 6 (L2T6 dQ), 20 (L2T20 dQ) en 34 (L2T34 dQ) uur voordat bij Kekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.



Figuur 7-10 Verstoringen in het afvoerregiem te Driel (Nederrijn_Km890.87) tengevolge van dijkdoorbraken bij Keekerdam (L2), waarin de linker Waaldijk respectievelijk doorbreekt 6 (L2T6 dQ), 20 (L2T20 dQ) en 34 (L2T34 dQ) uur voordat bij Keekerdam de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.



Figuur 7-11 Verstoringen in het afvoerregiem te Velperbroek (IJssel_Km882.3) tengevolge van dijkdoorbraken bij Keekerdam (L2), waarin de linker Waaldijk respectievelijk doorbreekt 6 (L2T6 dQ), 20 (L2T20 dQ) en 34 (L2T34 dQ) uur voordat bij Keekerdam de hoogste rivier waterstand wordt bereikt



Figuur 7-12 Verstoringen in het afvoerregiem te Fraterwaard (IJssel_Km905.1) tengevolge van dijkdoorbraken bij Kekeerdom (L2), waarin de linker Waaldijk respectievelijk doorbreekt 6 (L2T6 dQ), 20 (L2T20 dQ) en 34 (L2T34 dQ) uur voordat bij Kekeerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt

7.5 In hoeverre zijn Generale uitspraken mogelijk?

In deze paragraaf wordt ingegaan op de vraag in hoeverre voor dijkdoorbraken bij Lobith (L1) en Kekeerdom (L2) *generale uitspraken* voor verschillen in de maximum waterstand en verschillen in het maximum debiet (zie §6.3) mogelijk zijn indien het tijdstip van dijkdoorbraak wordt gevarieerd. Voor dijkdoorbraak L1T30GC zijn genoemde verschillen bepaald door lineaire interpolatie tussen de resultaten van dijkdoorbraakberekeningen L1T6GC en L1T70GC (c.q. verschillen voor $T=30$ zijn lineair geïnterpoleerd tussen de berekeningsresultaten voor $T=6$ en $T=70$, waar T is het tijdstip van dijkdoorbraak). Voor dijkdoorbraak L2T20GC zijn op gelijke wijze deze verschillen bepaald uit de resultaten van dijkdoorbraakberekeningen L2T6GC en L2T34GC. In Tabel 7-5 staan de bovengenoemde geïnterpoleerde (IP) waarden voor verschillen in de maximale waterstand, berekende (FLS) waarden voor verschillen in de maximale waterstand en het verschil tussen de FLS en IP waarden. Overeenkomstig zijn geïnterpoleerde waarden voor verschillen in het maximum debiet bepaald (zie Tabel 7-6).

Voor dijkdoorbraaklocatie Lobith (L1) varieert het verschil tussen FLS en IP waarden voor verschillen in de maximum waterstand van -14 tot 11 cm en varieert het verschil tussen FLS en IP waarden voor verschillen in het maximum debiet van -109 tot 179 m³/s. Voor dijkdoorbraaklocatie Kekeerdom (L2) zijn geïnterpoleerde (IP) waarden voor verschillen in de maximum waterstand slechts 0 tot 2 cm groter dan berekende (FLS) waarden en varieert het verschil tussen FLS en IP waarden voor verschillen in het maximum debiet slechts van -54 tot 15 m³/s (zie Tabel 7-5 en Tabel 7-6). Kortom voor Kekeerdom (L2) resulteert het interpoleren tussen berekeningsresultaten met een stapgrootte van 28 uur (=34-6, tijdstippen van dijkdoorbraak) in acceptabele waarden voor genoemde verschillen, terwijl dit niet het

geval is voor Lobith (L1) met een interpolatie stapgrootte van 64 uur (=70-6). Interpolatie voor Lobith (L1) resulteert in inacceptabele waarden omdat de stapgrootte (c.q. tijdstippen van dijkdoorbraak) waartussen geïnterpoleerd wordt zodanig groot is dat niet-lineaire effecten overheersen. Naar verwachting zal het verkleinen van de interpolatie stapgrootte voor Lobith (L1) resulteren in acceptabelere waarden. *Resumerend* kan worden gesteld dat het *generale uitspraken* met betrekking tot het tijdstip van dijkdoorbraak mogelijk zijn indien de stapgrootten tussen al gemaakte berekeningen niet zodanig groot zijn dat bij interpolatie of extrapolatie niet lineaire effecten gaan overheersen.

In Figuur 7-13 t/m Figuur 7-28 worden berekende (FLS) waarden voor verschillen in de maximum waterstand en verschillen in het maximum debiet getoond voor locaties op de Bovenrijn, Waal, Nederrijn-Lek en IJssel, respectievelijk behorende bij dijkdoorbraken bij Lobith (L1) en Kekerdome (L2). In Figuur 7-13 t/m Figuur 7-28 is duidelijk te zien dat er voor dijkdoorbraken bij Kekerdome (L2) een meer significant lineair verband bestaat tussen berekende (FLS) waarden dan voor dijkdoorbraken bij Lobith (L1).

Tabel 7-5 Interpolatie van verschillen in maximum waterstanden voor Lobith (L1) en Kekerdom (L2):
Lobith, L1T30GC geïnterpoleerd tussen L1T6GC en L1T70GC; Kekerdom, L2T20GC
geïnterpoleerd tussen L2T6GC en L2T34GC

Verschillen in de Maximum Waterstand Referentie minus Dijkdoorbraak						
Dijkdoorbraak locatie	Lobith (L1)			Kekerdom (L2)		
Referentie berekening	GD			GD		
Dijkdoorbraak berekening	L1T30GC			L2T20GC		
	FLS ¹⁾	IP ²⁾	FLS-IP	FLS ³⁾	IP ⁴⁾	FLS-IP
MeetLocatie	m	m	m	m	m	m
<i>Bovenrijn</i>						
L1 Lobith, Bovenrijn_Km861.19	0.28	0.25	0.02	0.11	0.13	-0.01
<i>Waal</i>						
Kekerdom, Waal_Km871.9	0.27	0.25	0.03	0.13	0.15	-0.02
L2 Kekerdom, Waal_Km872.7	0.29	0.26	0.03	0.14	0.16	-0.02
L5 Weurt, Waal_Km889.4	0.31	0.27	0.04	0.16	0.18	-0.02
Andelst, Waal_Km897.3	0.32	0.26	0.06	0.17	0.19	-0.02
L3 IJzendoorn, Waal_Km908.4	0.35	0.28	0.07	0.19	0.21	-0.02
L6 Wamel, Waal_Km911.50	0.35	0.29	0.07	0.19	0.22	-0.02
Dreumel, Waal_Km916.40	0.36	0.29	0.07	0.20	0.22	-0.02
Gameren, Waal_Km937.10	0.37	0.29	0.07	0.21	0.23	-0.02
<i>Nederrijn-Lek</i>						
Nude, Nederrijn_Km905.10	0.20	0.13	0.08	0.11	0.12	0.00
L4 Rijswijk, Nederrijn_Km928.5	0.26	0.16	0.10	0.15	0.15	0.00
De Heul, Lek_Km938.7	0.26	0.15	0.11	0.13	0.13	-0.01
<i>IJssel</i>						
Westervoort, IJssel_Km880.3	0.21	0.13	0.08	0.10	0.11	-0.02
Velperbroek, IJssel_Km882.30	0.21	0.11	0.09	0.11	0.11	-0.01
Fraterwaard, IJssel_Km904	-0.48	-0.44	-0.05	0.11	0.14	-0.02
L7 Vierakker, IJssel_Km922.5	-0.48	-0.42	-0.07	0.13	0.14	-0.02
Zutphen, IJssel_Km925.9	-0.47	-0.40	-0.07	0.12	0.14	-0.02
Gorssel, IJssel_Km940.4	-0.46	-0.38	-0.07	0.14	0.15	-0.01
Deventer, IJssel_Km944.3	-0.46	-0.38	-0.07	0.14	0.15	-0.01
Wapenveld, IJssel_Km971.7	-0.58	-0.44	-0.14	0.19	0.19	0.00

Opm:

- 1) FLS: Door DelftFLS berekend verschil in max. waterstand [= $h_{max}(GD) - h_{max}(L1T30GC)$]
- 2) IP: Geïnterpoleerd verschil in max waterstand tussen L1T6GC en L1T70GC
- 3) FLS: Door DelftFLS berekend verschil in max. waterstand [= $h_{max}(GD) - h_{max}(L2T20GC)$]
- 4) IP: Geïnterpoleerd verschil in max waterstand tussen L2T6GC en L2T34GC

Tabel 7-6 Interpolatie van Verschillen in Maximum debieten voor Lobith (L1) en Kekerdom (L2):
Lobith, L1T30GC geïnterpoleerd tussen L1T6GC en L1T70GC; Kekerdom, L2T20GC
geïnterpoleerd tussen L2T6GC en L2T34GC

Dijkdoorbraak locatie Referentie berekening Dijkdoorbraak berekening Meetraai	Verschillen in de Maximum Debieten Referentie minus Dijkdoorbraak					
	Lobith (L1)			Kekerdom (L2)		
	GD			GD		
	L1T30GC			L2T20GC		
	FLS ¹⁾	IP ²⁾	FLS-IP	FLS ³⁾	IP ⁴⁾	FLS-IP
	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s
<u>Bovenrijn</u>						
Rees, Bovenrijn_Km837.4	0	0	0	0	0	0
L1_Lobith, Bovenrijn_Km861.19	1023	870	153	-78	-76	-3
<u>Waal</u>						
WaalBegin, Waal_Km869.1	605	574	32	-837	-810	-26
L2_Kekerdom, Waal_Km874.0	617	584	33	281	331	-50
L5_Weurt, Waal_Km889.9	673	603	69	340	383	-43
Andelst, Waal_Km897.2	693	612	81	340	387	-47
L3_IJzendoorn, Waal_Km909.6	745	625	120	388	435	-46
L6_Wamel, Waal_Km910.9	752	629	123	397	441	-43
Dreumel, Waal_Km917.9	771	637	134	405	456	-51
Gameren, Waal_Km937.20	825	657	168	456	508	-52
WaalBeneden, Waal_Km980.9	850	671	179	490	544	-54
<u>Pannerdensch Kanaal</u>						
PanKanBegin, PanKan_Km870.5	455	292	163	194	245	-51
PanKanBeneden, PanKan_Km878.0	465	304	161	204	248	-44
<u>Nederrijn-Lek</u>						
Driel, Nederrijn_Km890.97	247	152	95	105	129	-24
Nude, Nederrijn_Km905.1	257	158	99	127	144	-17
L4_Rijswijk, Nederrijn_Km928.0	276	177	99	151	160	-8
De Heul, Nederrijn_Km939.0	286	184	102	162	164	-2
LekBeneden, Nederrijn_Km963.1	308	196	112	187	172	15
<u>IJssel</u>						
Westervoort, IJssel_Km880.0	235	154	82	106	133	-26
Velperbroek, IJssel_Km882.3	225	154	71	108	119	-11
Fraterwaard, IJssel_Km905.1	-613	-561	-52	129	157	-28
L7_Vierakker, IJssel_Km923.1	-626	-544	-81	141	166	-25
Zutphen, IJssel_Km925.9	-625	-540	-85	142	166	-24
Gorssel, IJssel_Km940.8	-610	-511	-99	155	170	-15
Deventer, IJssel_Km944.5	-612	-503	-109	159	171	-13
Wapenveld, IJssel_Km971.0	-579	-474	-105	166	171	-4

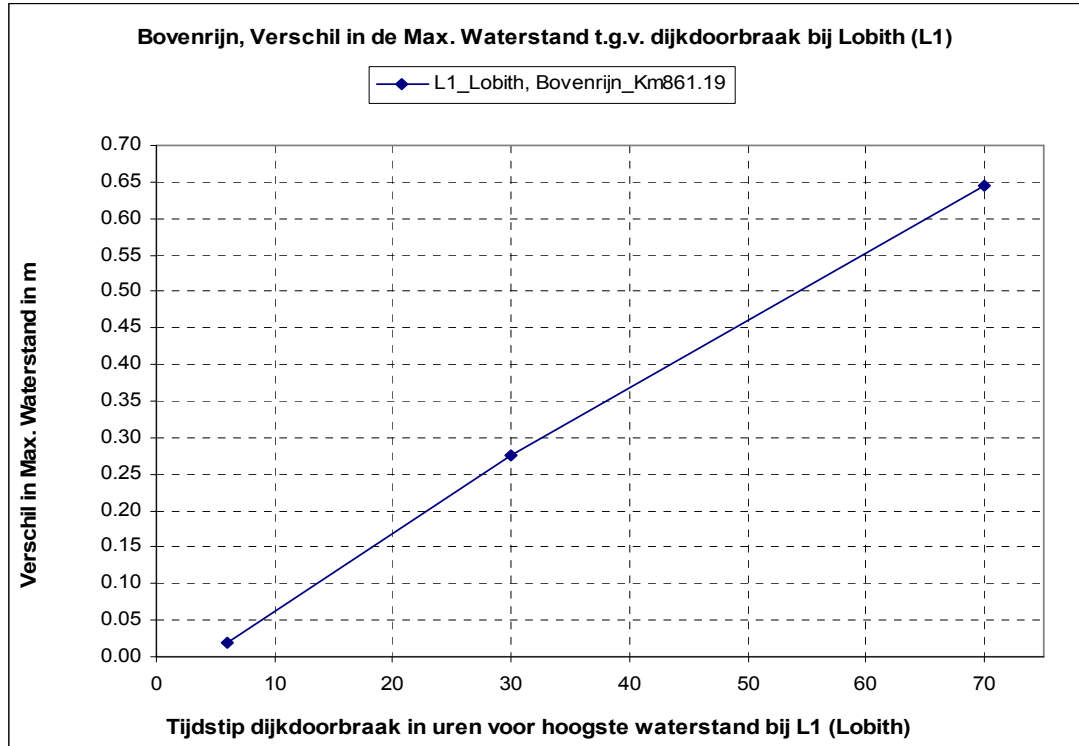
Opm:

1) FLS: Door DelftFLS berekend verschil in max. debiet [= $Q_{max}(GD) - Q_{max}(L1T30GC)$]

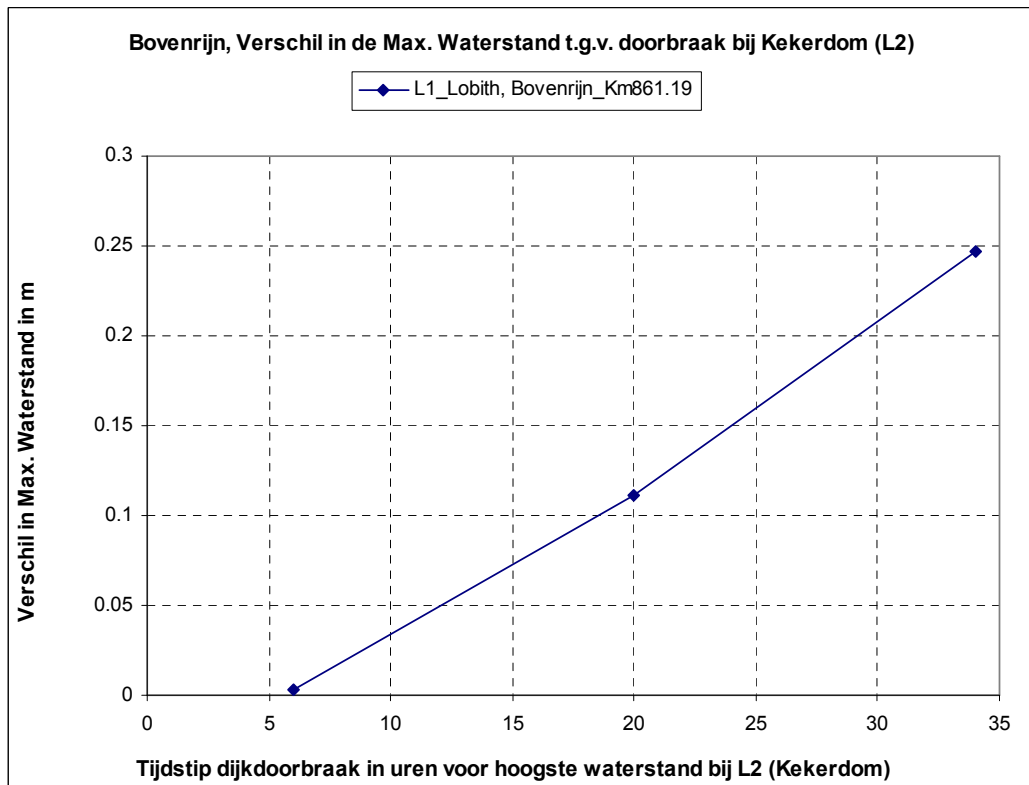
2) IP: Geïnterpoleerd verschil in max debiet tussen L1T6GC en L1T70GC

3) FLS: Door DelftFLS berekend verschil in max. debiet [= $Q_{max}(GD) - Q_{max}(L2T20GC)$]

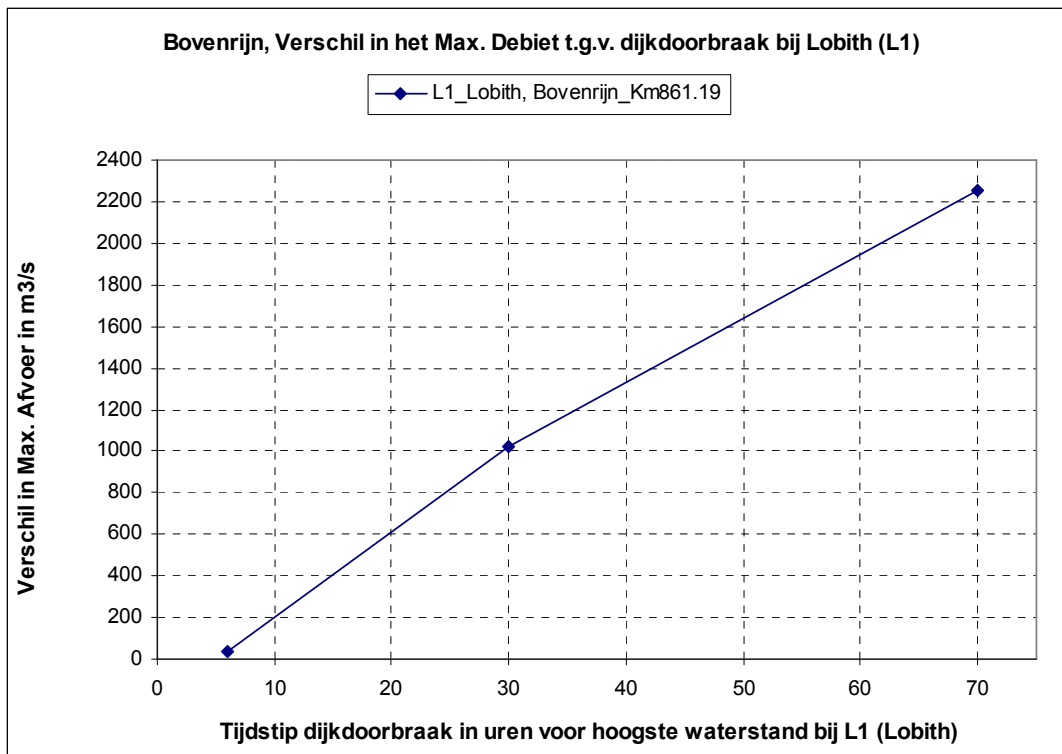
4) IP: Geïnterpoleerd verschil in max debiet tussen L2T6GC en L2T34GC



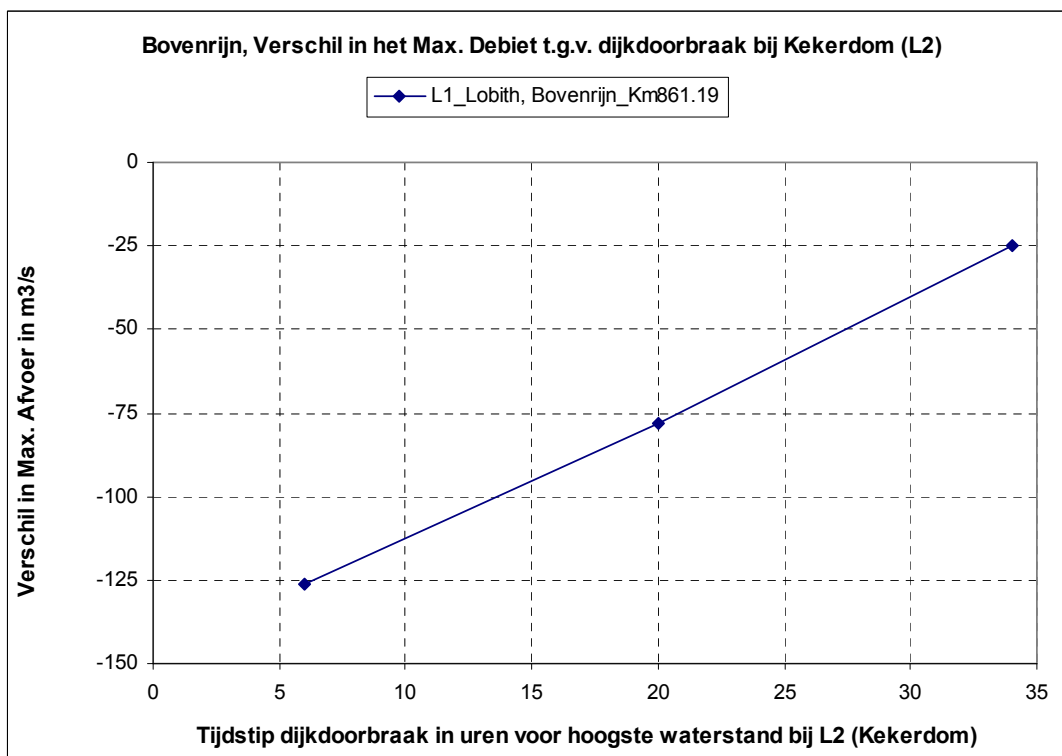
Figuur 7-13 Bovenrijn, berekende verschillen in lokale maximum waterstanden (zie §6.1) tengevolge van dijkdoorbraken bij Lobith (L1), waarin de rechter Bovenrijndijk respectievelijk doorbreekt 6, 30 en 70 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.



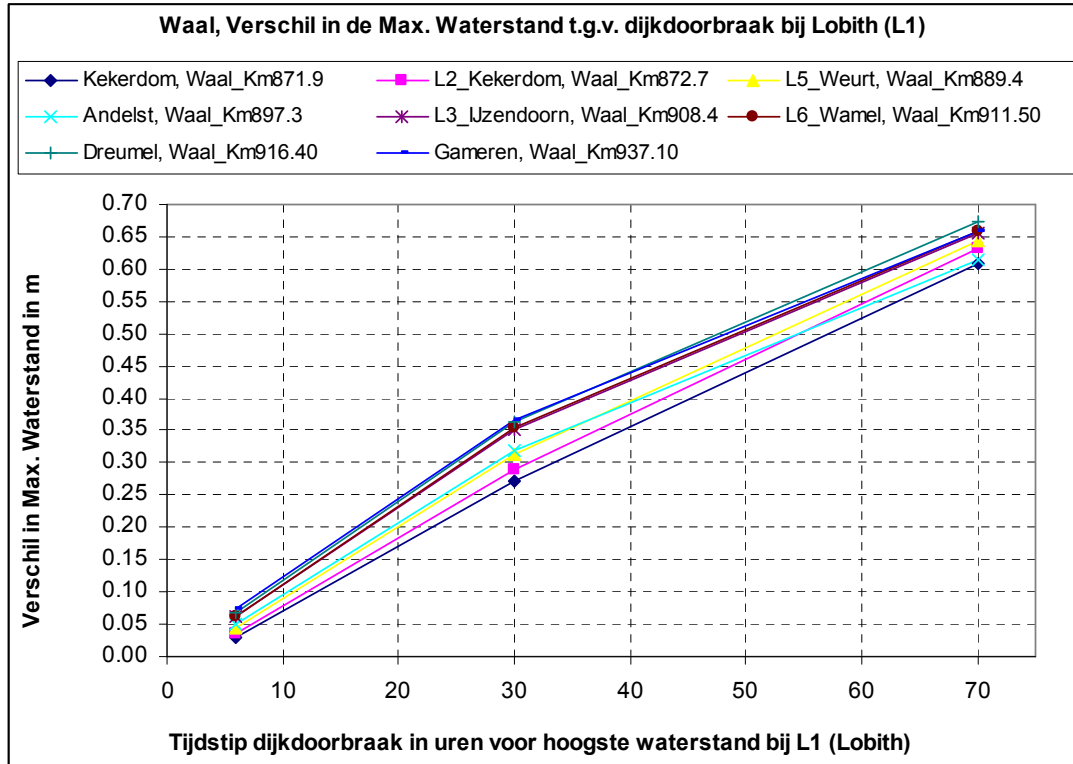
Figuur 7-14 Bovenrijn, berekende verschillen in lokale maximum waterstanden (zie §6.1) tengevolge van dijkbraken bij Keekerdom (L2), waarin de linker Waaldijk respectievelijk doorbreekt 6, 20 en 34 uur voordat bij Keekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.



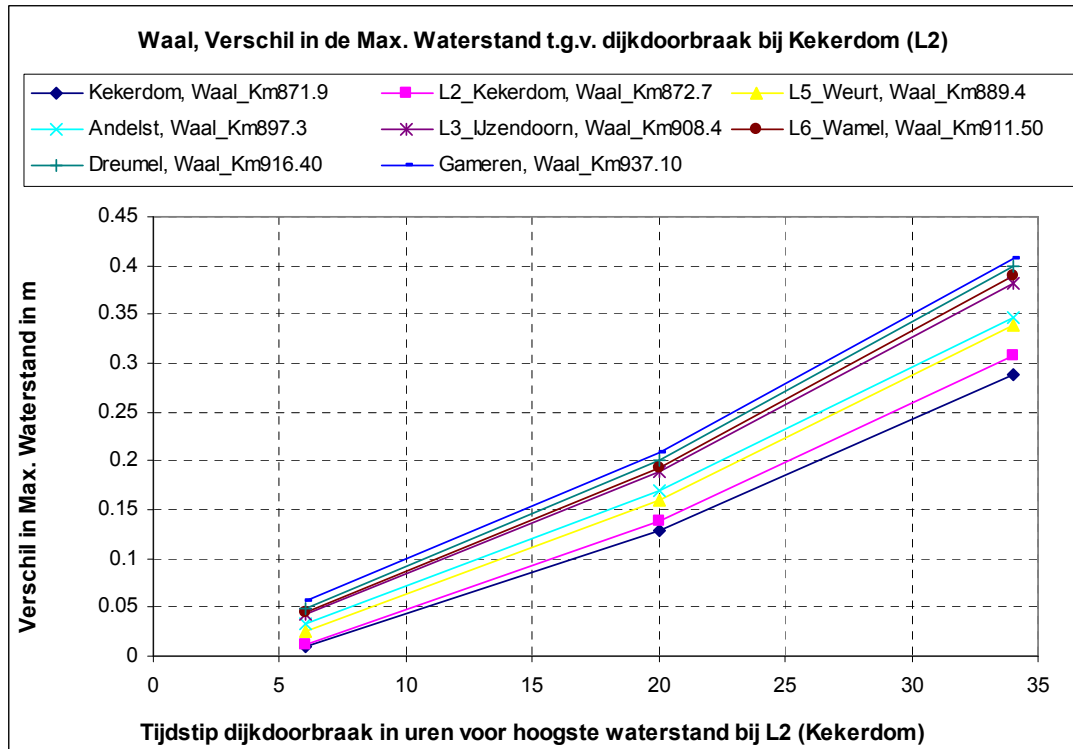
Figuur 7-15 Bovenrijn, berekende verschillen in lokale maximum debieten (zie §6.1) tengevolge van dijkdoorbraken bij Lobith (L1), waarin de rechter Bovenrijndijk respectievelijk doorbreekt 6, 30 en 70 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.



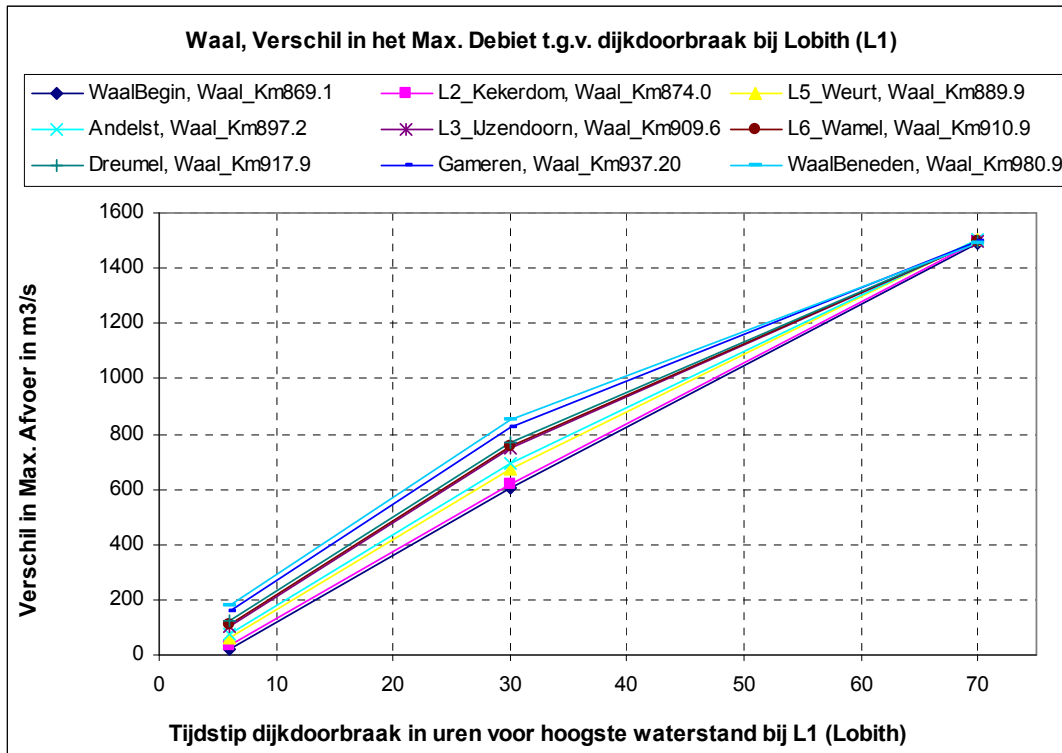
Figuur 7-16 Bovenrijn, berekende verschillen in lokale maximum debieten (zie §6.1) tengevolge van dijkbraken bij Keekerdom (L2), waarin de linker Waaldijk respectievelijk doorbreekt 6, 20 en 34 uur voordat bij Keekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.



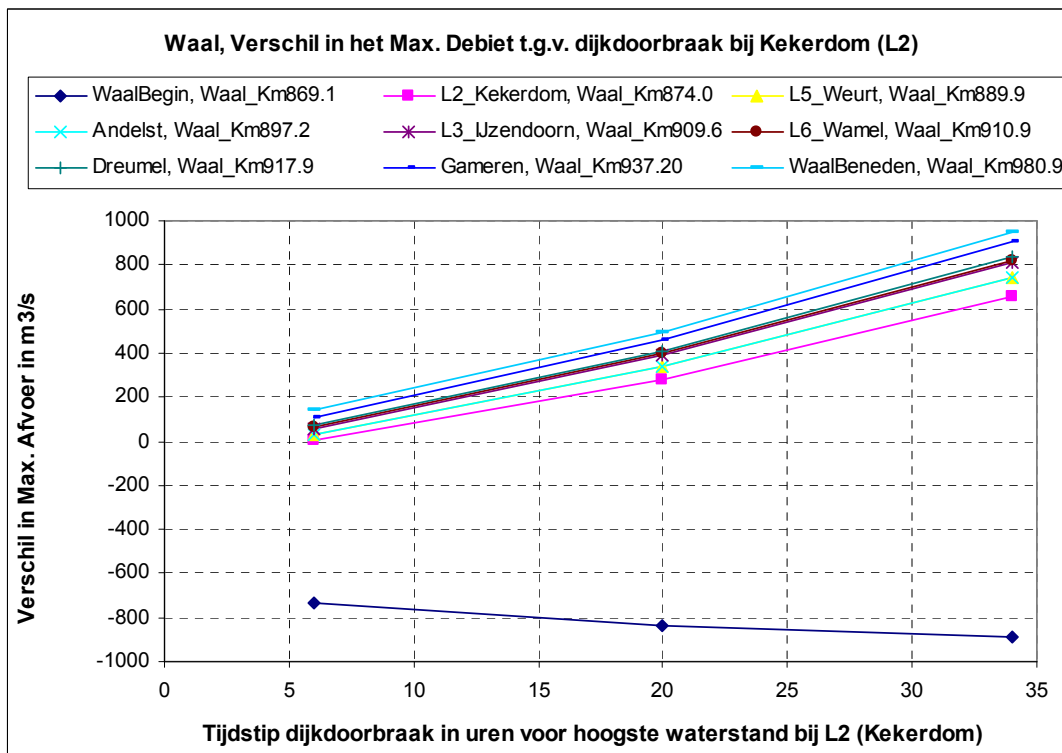
Figuur 7-17 Waal, berekende verschillen in lokale maximum waterstanden (zie §6.1) tengevolge van dijkdoorbraken bij Lobith (L1), waarin de rechter Bovenrijndijk respectievelijk doorbreekt 6, 30 en 70 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt.



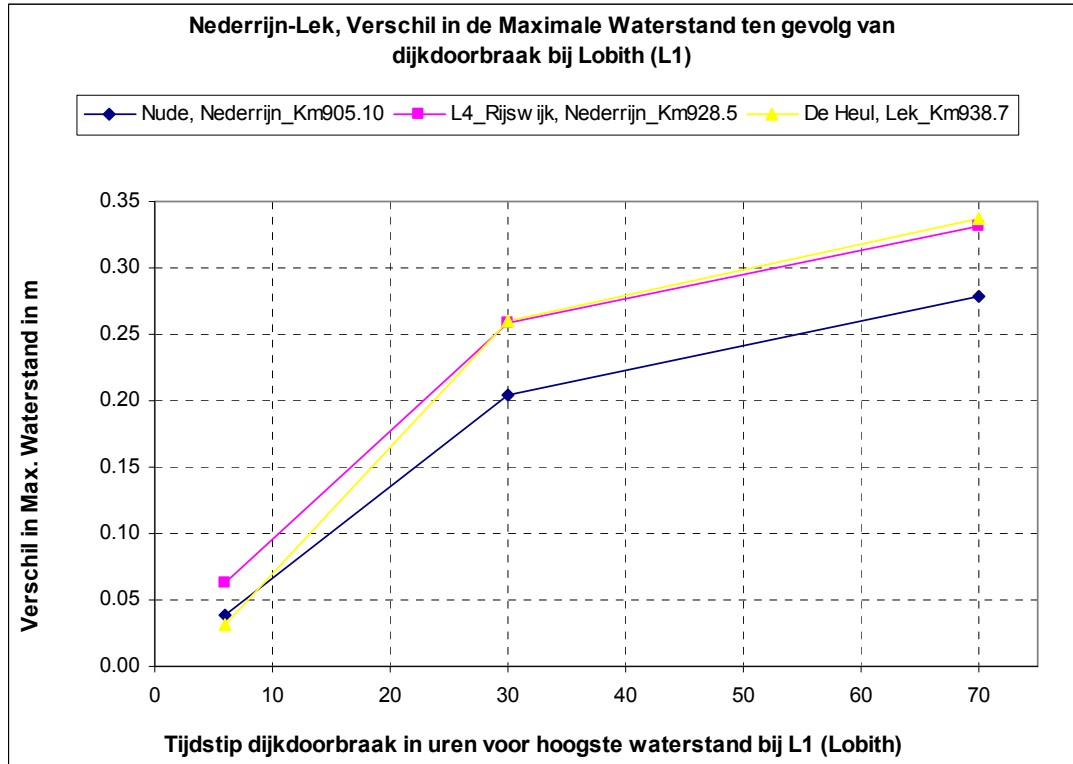
Figuur 7-18 Waal, berekende verschillen in lokale maximum waterstanden (zie §6.1) tengevolge van dijkbraken bij Kekeerdom (L2), waarin de linker Waaldijk respectievelijk doorbreekt 6, 20 en 34 uur voordat bij Kekeerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt



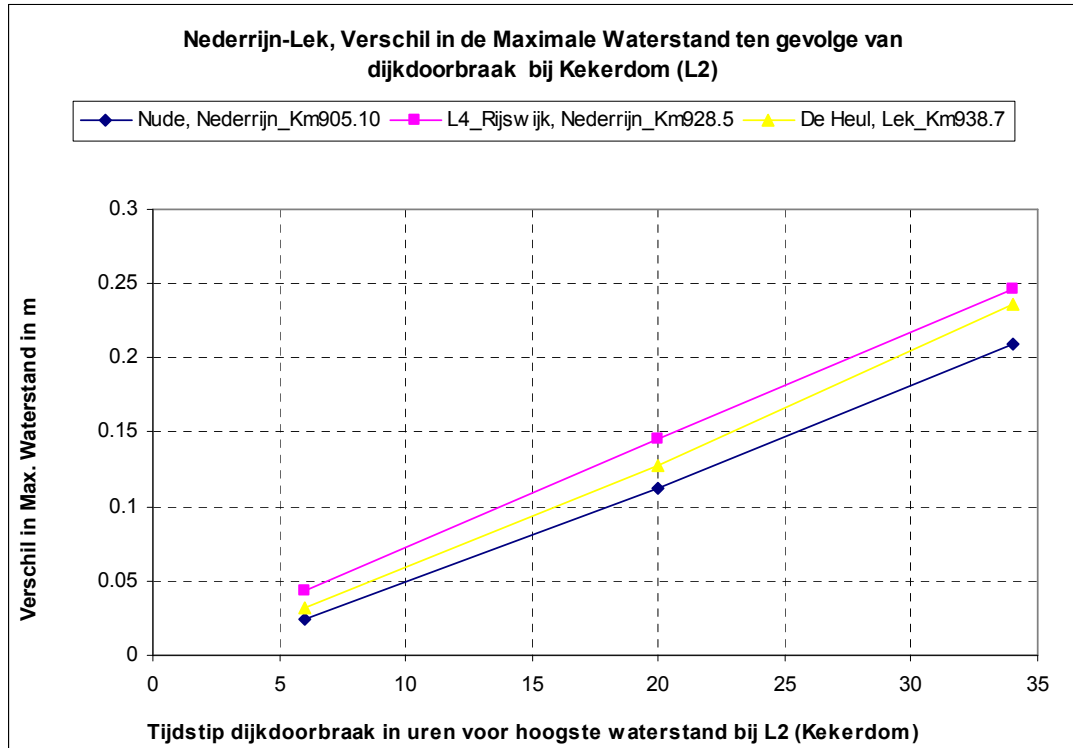
Figuur 7-19 Waal, berekende verschillen in lokale maximum debieten (zie §6.1) tengevolge van dijkdoorbraken bij Lobith (L1), waarin de rechter Bovenrijndijk respectievelijk doorbreekt 6, 30 en 70 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt



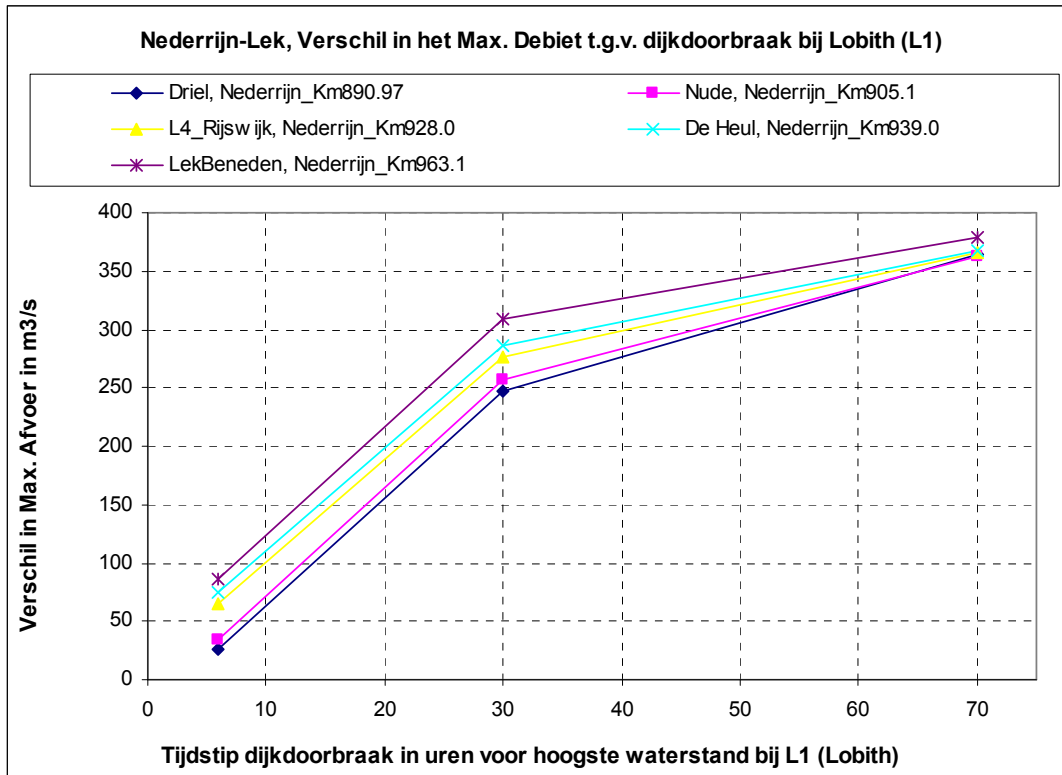
Figuur 7-20 Waal, berekende verschillen in lokale maximum debieten (zie §6.1) tengevolge van dijkbraken bij Kekerdom (L2), waarin de linker Waaldijk respectievelijk doorbreekt 6, 20 en 34 uur voordat bij Kekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt



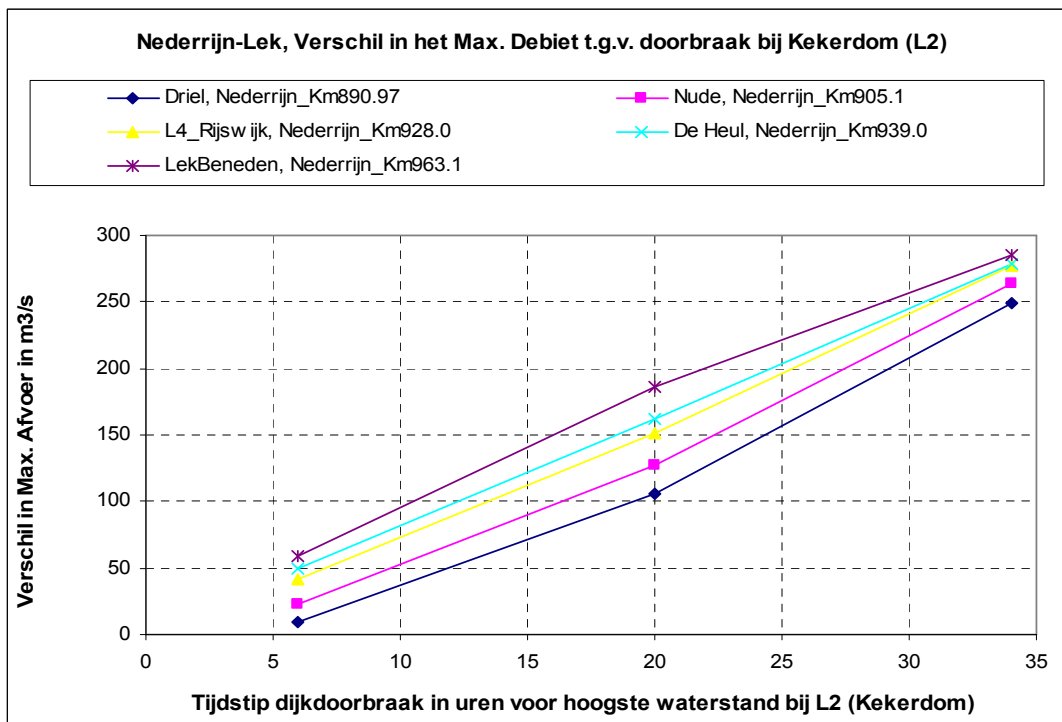
Figuur 7-21 Nederrijn-Lek, berekende verschillen in lokale maximum waterstanden (zie §6.1) tengevolge van dijkdoorbraken bij Lobith (L1), waarin de rechter Bovenrijndijk respectievelijk doorbreekt 6, 30 en 70 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt



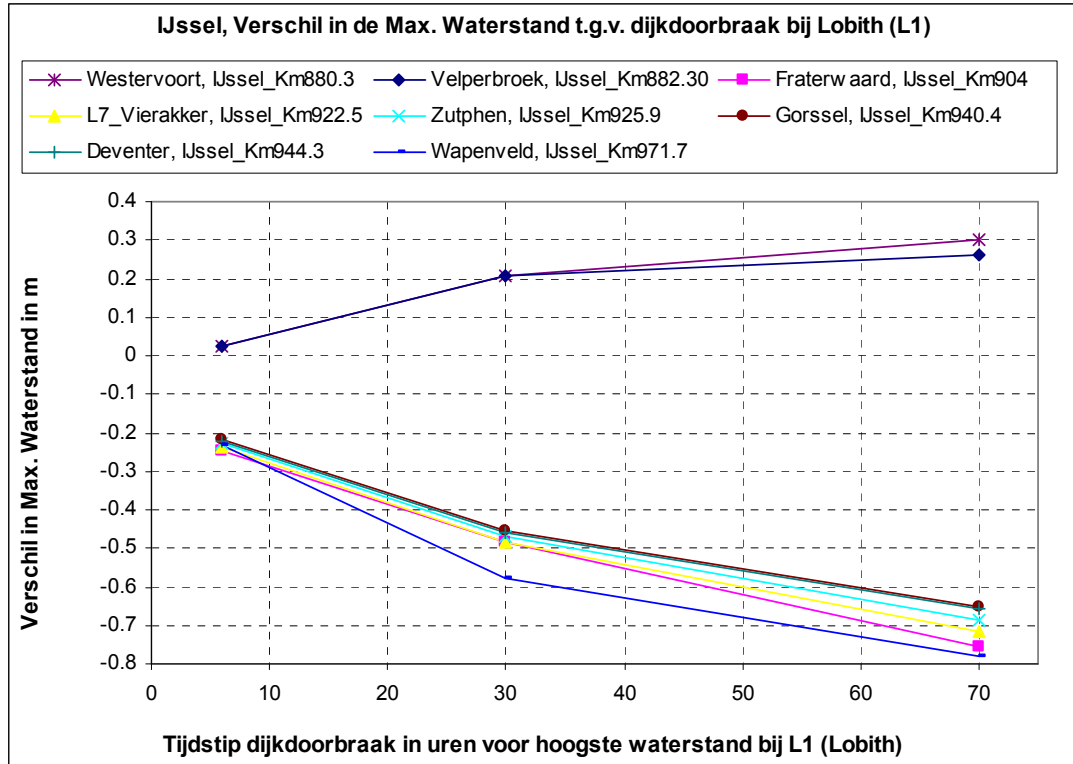
Figuur 7-22 Nederrijn-Lek, berekende verschillen in lokale maximum waterstanden (zie §6.1) tengevolge van dijkbraken bij Keekerdom (L2), waarin de linker Waaldijk respectievelijk doorbreekt 6, 20 en 34 uur voordat bij Keekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt



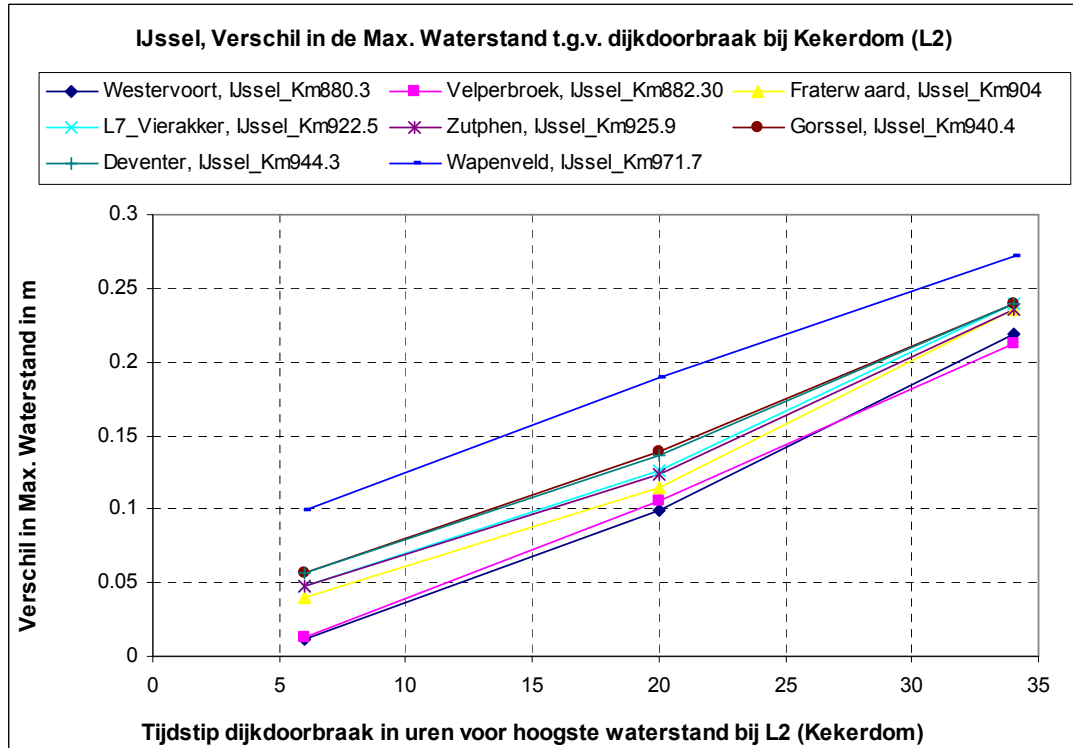
Figuur 7-23 Nederrijn-Lek, berekende verschillen in lokale maximum waterstanden (zie §6.1) tengevolge van dijkdoorbraken bij Lobith (L1), waarin de rechter Bovenrijndijk respectievelijk doorbreekt 6, 30 en 70 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt



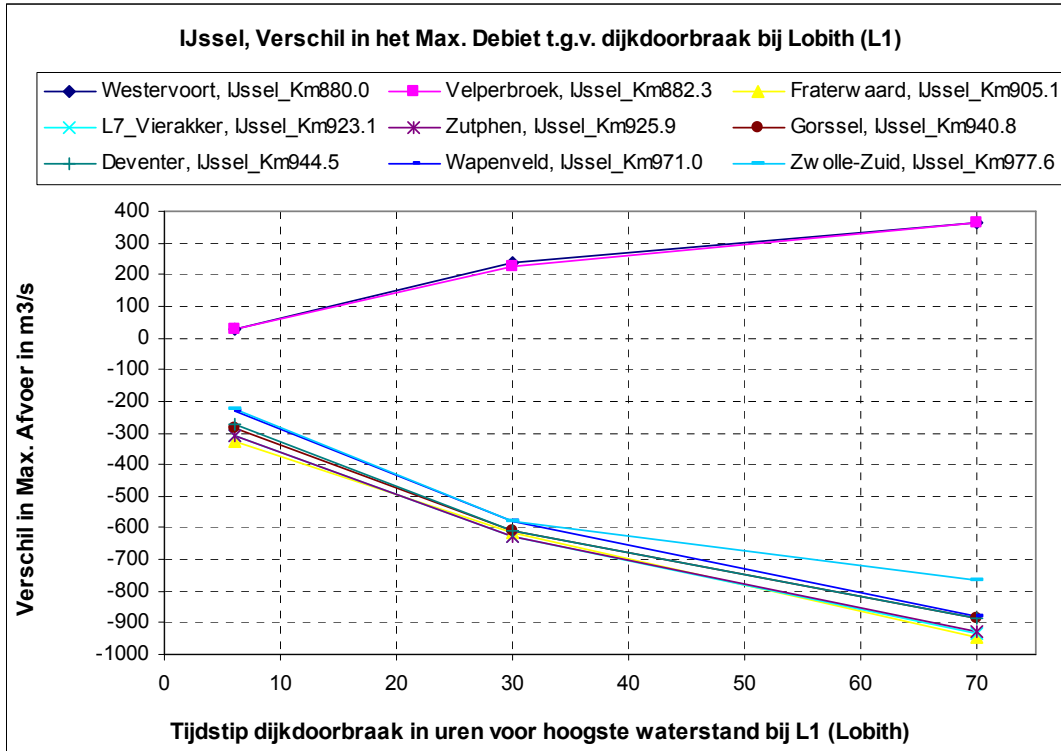
Figuur 7-24 Nederrijn-Lek, berekende verschillen in lokale maximum debieten (zie §6.1) tengevolge van dijkbraken bij Kekerdom (L2), waarin de linker Waaldijk respectievelijk doorbreekt 6, 20 en 34 uur voordat bij Kekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt



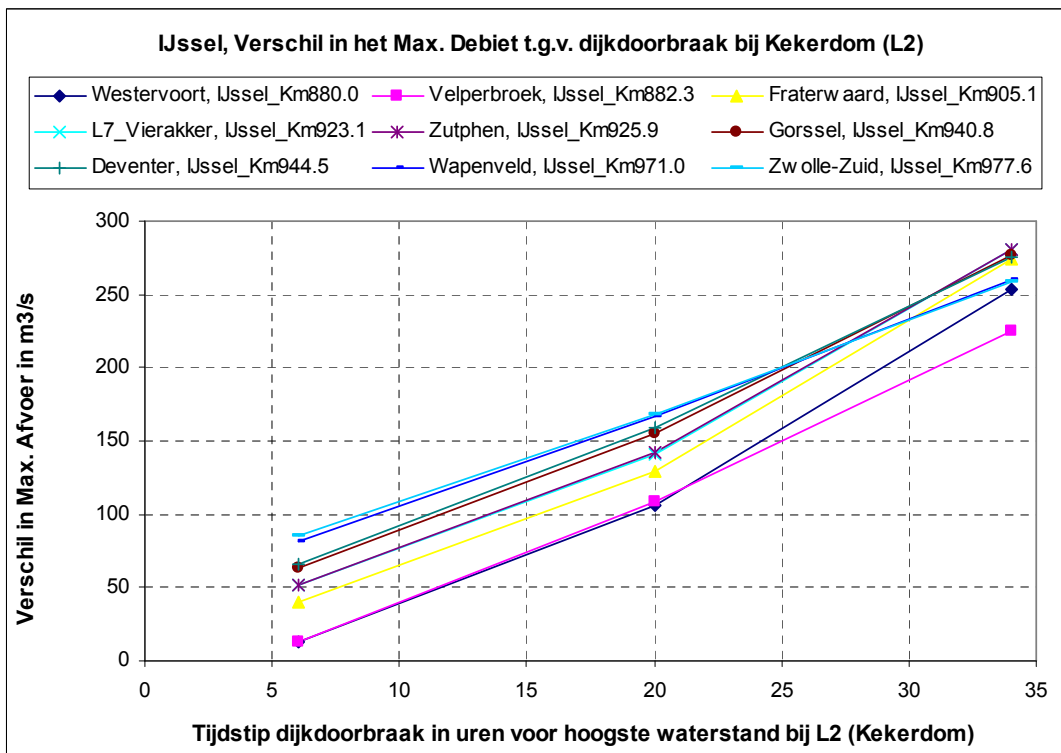
Figuur 7-25 IJssel, berekende verschillen in lokale maximum waterstanden (zie §6.1) tengevolge van dijkdoorbraken bij Lobith (L1), waarin de rechter Bovenrijndijk respectievelijk doorbreekt 6, 30 en 70 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt



Figuur 7-26 IJssel, berekende verschillen in lokale maximum waterstanden (zie §6.1) tengevolge van dijkbraken bij Kekerdom (L2), waarin de linker Waaldijk respectievelijk doorbreekt 6, 20 en 34 uur voordat bij Kekerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt



Figuur 7-27 IJssel, berekende verschillen in lokale maximum debieten (zie §6.1) tengevolge van dijkdoorbraken bij Lobith (L1), waarin de rechter Bovenrijndijk respectievelijk doorbreekt 6, 30 en 70 uur voordat bij Lobith de hoogste rivier waterstand wordt bereikt



Figuur 7-28 IJssel, berekende verschillen in lokale maximum debieten (zie §6.1) tengevolge van dijkbraken bij Kekeerdom (L2), waarin de linker Waaldijk respectievelijk doorbreekt 6, 20 en 34 uur voordat bij Kekeerdom de hoogste rivier waterstand wordt bereikt

8 Samenvatting en aandachtspunten

8.1 Samenvatting

In totaal zijn vijftien dijkdoorbraakberekeningen voor acht verschillende dijkdoorbraaklocaties gemaakt met het DelftFLS software pakket, respectievelijk twaalf berekeningen zonder compartimentering en drie berekeningen waarin één bepaalde dijkkring was gecompartmenteerd. De compartimenteringberekeningen zijn slechts beeldvormende (eerste verkennende) berekeningen. Naar verwachting zal de wijze van de mogelijke compartimentering van deze dijkringen nog nader worden uitgewerkt. In elke berekening is slechts op één locatie langs de Nederlandse Rijnakken een dijk doorgebroken. Aangenomen is dat dijken die elders in het riviersysteem worden overstroomd niet bezwijken. Enkel de hydraulische effecten van systeemwerking als gevolg van een lokale dijkdoorbraak zijn gekwantificeerd. Dit is gedaan door het vergelijken van maximale waterstanden (en debieten) in een referentieberekening zonder dijkdoorbraken met maximale waterstanden (en debieten) in een dijkdoorbraakberekening. Op deze wijze konden de hydraulische gevolgen van systeemwerking overzichtelijk in tabellen worden gepresenteerd. In dit rapport is geen overstromingsschade berekend.

Onder *generale uitspraken* wordt verstaan het schatten van hydraulische effecten van systeemwerking gebruikmakend van reeds gemaakte dijkdoorbraakberekeningen. Het mogelijke gebruik van generale uitspraken zal in beleidstudies het aantal benodigde tijdrovende dijkdoorbraakberekeningen sterk reduceren. In hoeverre generale uitspraken mogelijk zijn is nagegaan gebruikmakend van de resultaten van dijkdoorbraakberekeningen bij Lobith en Kekerdom. In deze berekeningen is het tijdstip van dijkdoorbraak, uitgedrukt als het aantal uren voordat bij de dijkdoorbraaklocatie de hoogste rivier waterstand wordt bereikt, gevarieerd. Met andere woorden nagegaan is in hoeverre generale uitspraken mogelijk zijn indien enkel het tijdstip van dijkdoorbraak wordt gevarieerd.

8.2 Conclusies

Opgemerkt dient te worden dat de orde grootte van de hydraulische effecten van systeemwerking afhankelijk zijn van de gekozen dijkdoorbraaklocaties en de gekozen hydraulische parameters. Voor de gekozen dijkdoorbraaklocaties geldt dat dit de locaties zijn waar een dijkdoorbraak het meest waarschijnlijkst is. Gesteld kan worden dat realistische waarden zijn gekozen voor de gehanteerde hydraulische parameters.

In het merendeel van de berekeningen treden significante vormen van systeemwerking op, welke resulteren in deels verlagingen en deels verhogingen van lokale rivierwaterstanden langs de Maas en de Nederlandse Rijnakken. In de berekeningsresultaten waarbij een dijkdoorbraak optreedt 6 uur voordat ter plaatse van de dijkdoorbraaklocatie de hoogste rivier waterstand wordt bereikt zijn de positieve hydraulische effecten van systeemwerking marginaal in verhouding tot negatieve hydraulische effecten van systeemwerking (zie Tabel 6-1). Echter naarmate het tijdstip van dijkdoorbraak eerder optreedt zijn de positieve hydraulische effecten van systeemwerking vergelijkbaar met de negatieve hydraulische

effecten van systeemwerking (zie Tabel 6-2). Met andere woorden het tijdstip van dijkdoorbraak is een cruciale factor voor de orde van grootte van optredende hydraulische effecten van systeemwerking. In de berekeningen is aangenomen dat overstroomde dijken niet bezwijken, hetgeen echter niet uit te sluiten valt. Het bezwijken van overstroomde dijken zal naar verwachting het systeemwerkingsproces in negatieve zin beïnvloeden. Op basis van de thans voorliggende berekeningsresultaten lijkt het verstandig om in eerste instantie te focussen op het meenemen van negatieve vormen van systeemwerking in veiligheidsbeschouwingen en te trachten deze negatieve effecten van systeemwerking te voorkomen dan wel te minimaliseren.

Gesteld kan worden dat de gemaakte dijkdoorbraakberekeningen hebben bijgedragen aan het inzichtelijker maken van de consequenties van systeemwerking in het bovenrivierengebied van de Rijntakken.

Voor Lobith en Keekdom zijn waarden voor maximale waterstanden (en debieten) bepaald door lineaire interpolatie tussen de resultaten van twee dijkdoorbraakberekeningen met een verschillend tijdstip van dijkdoorbraak. Voor Lobith en Keekdom is geïnterpoleerd tussen berekeningen met een onderlinge stapgrootte in tijdstip van dijkdoorbraak van respectievelijk 64 en 28 uur. De geïnterpoleerde waarden zijn vergeleken met berekende resultaten. Voor Keekdom is het verschil tussen berekende en geïnterpoleerde waarden acceptabel, terwijl dit niet het geval is voor Lobith. Interpolatie voor Lobith resulteert in inacceptabele waarden omdat de interpolatie (tijd)stapgrootte zodanig groot is dat niet-lineaire effecten overheersen. Naar verwachting zal het verkleinen van de interpolatie (tijd)stapgrootte voor Lobith resulteren in acceptabelere waarden. Derhalve wordt gesteld dat *generale uitspraken* met betrekking tot het tijdstip van dijkdoorbraak mogelijk zijn indien de stapgrootten tussen al gemaakte berekeningen niet zodanig groot zijn dat bij interpolatie of extrapolatie niet lineaire effecten gaan overheersen. Naar verwachting zijn generale uitspraken ook mogelijk voor variaties in andere parameters zoals de bresgroeisnelheid.

8.3 Aandachtpunten

Behalve verschillen in maximale waterstanden (en debieten) is de opgetreden overstromingsschade ook van belang. Aanbevolen wordt om de overstromingsschade als gevolg van de beschouwde lokale dijkdoorbraken te bepalen.

De hydraulische effecten van systeemwerking moeten nog worden vertaald naar een verminderd of vermeerderd risico van overstromingen elders in het stroomgebied van de Maas en Nederlandse Rijntakken. Uit de dijkdoorbraakberekeningen is gebleken dat dit een zeer complexe materie is. Het liefst zou men dit willen doen op basis van overstromingsrisico's (het gesommeerde product van kans op allerlei mogelijke overstromingen met hun bijbehorende schade). Echter hiervoor zal de komende jaren nog het nodige onderzoek moeten worden verricht. Voorlopig lijkt het bepalen van overstromingsrisico's in Nederland waarbij effecten van systeemwerking worden meegenomen nog geen haalbare kaart. Het bepalen van overstromingskansen rekeninghoudend met systeemwerkingseffecten is al zeer complex.

Nagegaan is in hoeverre generale uitspraken mogelijk zijn met betrekking tot het tijdstip van dijkdoorbraak. Het lijkt voor de hand te liggen om ook na te gaan in hoeverre generale uitspraken mogelijk zijn indien meerdere parameters tegelijkertijd worden gevarieerd zoals het tijdstip van dijkdoorbraak en het bresgroeiscenario. Verder wordt aanbevolen om na te gaan in hoeverre ruimtelijk gezien generale uitspraken mogelijk zijn. Met ruimtelijk generale uitspraken wordt bedoeld dat voor een mogelijke dijkdoorbraaklocatie de hydraulische effecten van systeemwerking worden bepaald op basis van berekeningsresultaten van één of meerdere nabij gelegen dijkdoorbraaklocaties.

Resumerend verdienen de volgende aandachtspunten nadere uitwerking:

- Het vertalen van de hydraulische effecten van systeemwerking naar een verminderde of vermeerderde overstromingskans van overige dijk(ring)en,
- Het daadwerkelijk laten bezwijken van overstroomde dijken in de gemaakte dijkdoorbraakberekeningen,
- Het analyseren van andere verschillen in hydraulische parameters. Zoals verschillen in de duur dat bepaalde waterstandsniveaus in de referentieberekening en in de dijkdoorbraakberekening worden overschreden,
- Nagaan in hoeverre generale uitspraken mogelijk zijn indien meerdere parameters per dijkdoorbraaklocatie worden gevarieerd, en
- Nagaan in hoeverre ruimtelijk gezien generale uitspraken mogelijk zijn.

9 Literatuur

Aanpassingen golfvormgenerator in opdracht van RWS/RIZA, Lelystad, HKV Lijn in Water, sept 2004.

Lammersen, R., Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein, Eindrapport, juli 2004, ISBN 9036956390.

Stijnen, J.W. Gemaakte berekeningen voor rampenbeheersing (RBSO), HKV Lijn in Water, 2005.

Van den Bosch, P., Bepaling aantal met noodmaatregelen te versterken dijken in 2015, Verslag projectuitvoering, A1475, Alkyon.

Van Mierlo, M.C.L.M., Vrouwenvelder, A.C.W.M.; Calle, E.O.F., Vrijling, J.K.; Jonkman, S.N., De Bruijn, K.M.; Weerts, A.H. (2003), Effects of River System Behaviour on Flood Risk, Delft Cluster Project nr. DC 02.01.01. (<http://www.library.tudelft.nl/delftcluster> Risk due to flooding).

Van Mierlo, M.C.L.M., Gudden, J.J., Overmars, J.M.S., DelftFLS modellen: Krefeld-Kampen en Wesel-Gorcum, WL rapport Q3859, Maart 2005.

A Overzicht van digitale databestanden

In deze Appendix wordt een overzicht gegeven van de digitale data die op een DVD aan RIZA ter beschikking is gesteld. Hieronder is een onderscheid gemaakt tussen overstromingsfilmpjes en overige digitale data:

A.1 Overstromingsfilmpjes

De overstromingsfilmpjes van de diverse dijkdoorbraakberekeningen zijn opgenomen in de HIS Scenario Viewer. In Tabel 9-1 is de codering van overstromingsfilmpjes in de HIS Scenario Viewer gegeven.

Tabel 9-1 Codering van overstromingsfilmpjes in de HIS Scenario Viewer

Code His Viewer	Rapport Codering en Omschrijving van de DelftFLS berekeningen			
	Code	Dijkdoorbraaklocatie en Tijdstip dijkdoorbraak ⁴⁾	Compartimentering	
1_dbr	L1T6GC	L1: Lobith, Rijn_Km861.4, rechter Bovenrijndijk	6	Géén Compartimentering
12dbr	L1T30GC	L1: Lobith, Rijn_Km861.4, rechter Bovenrijndijk	30	Géén Compartimentering
13dbr	L1T70GC	L1: Lobith, Rijn_Km861.4, rechter Bovenrijndijk	70	Géén Compartimentering
2_dbr	L2T6GC	L2: Kekerdom, Waal_Km872.7, linker Waaldijk	6	Géén Compartimentering
14dbr	L2T20GC	L2: Kekerdom, Waal_Km872.7, linker Waaldijk	20	Géén Compartimentering
15dbr	L2T34GC	L2: Kekerdom, Waal_Km872.7, linker Waaldijk	34	Géén Compartimentering
3_dbr	L3T6GC	L3: IJzendoorn, Waal_Km908.4, rechter Waaldijk	6	Géén Compartimentering
8_dbr	L3T6C1	L3: IJzendoorn, Waal_Km908.4, rechter Waaldijk	6	C1 ¹⁾ , Compart. Dijkkring 43
4_dbr	L4T6GC	L4: Rijswijk, Nederrijn_Km928.5, linker N.R.dijk	6	Géén Compartimentering
5_dbr	L5T6GC	L5: Weurt, Waal_Km889.4, linker Waaldijk	6	Géén Compartimentering
9_dbr	L5T6C2	L5: Weurt, Waal_Km889.4, linker Waaldijk	6	C2 ²⁾ , Compart. Dijkkring 41
6_dbr	L6T6GC	L6: Wamel, Waal_Km911.5 linker Waaldijk	6	Géén Compartimentering
7_dbr	L7T6GC	L7: Vierakker, IJssel_Km922.5, rechter IJsseldijk	6	Géén Compartimentering
10dbr	L8T6C3	L8: Den Nul, IJssel_Km959.1, rechter IJsseldijk	6	C3 ³⁾ , Compart. Dijkkring 53
11dbr	L8T6GC	L8: Den Nul, IJssel_Km959.1, rechter IJsseldijk	6	Géén Compartimentering

Notes:

1. C1: Compartimentering van Dijkkring 43 (Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden) middels een verhoging van de oostelijke dijk langs het Amsterdam-Rijn Kanaal tot NAP + 10.5 m,
2. C2, Compartimentering van Dijkkring 41 (Land van Maas en Waal) middels een beoogde dijk ten Zuiden/Oosten van de Oude Wetering, de Broekse Leigraaf, de Rijksche Wetering, en de Grote Wetering. Tevens is de Maasdijk vanaf de Grote Wetering tot aan de Waaldijk alsmede een deel van de Westelijke dijk langs het Maas en Waal Kanaal verhoogd. Kruinhoogten zijn zodanig hoog dat er géén overstroming van deze compartimenteringsdijk kan plaats vinden, en
3. C3: Compartimentering van Dijkkring 53 (Salland) middels een geplande ringweg/ringdijk ten Zuiden/Oosten van Zwolle met kruinhoogten van NAP + 6.5 m.
4. Tijdstip van dijkdoorbraak is uitgedrukt in het aantal uren voordat ter plaatse van de dijkdoorbraaklocatie de hoogste rivier waterstand in de referentieberekening wordt bereikt.

A.2 Overige digitale data

De overige digitale data zijn aangeleverd in 18 afzonderlijke folders, zijnde:

1. GD-L1T6GC Lobith(Rijn)_Ring48
2. GD-L1T30GC Lobith(Rijn)_Ring48
3. GD-L1T70GC Lobith(Rijn)_Ring48
4. GD-L2T6GC Kekerdom(Waal)_Ring42
5. GD-L2T20GC Kekerdom(Waal)_Ring42
6. GD-L2T34GC Kekerdom(Waal)_Ring42
7. GD-L3T6C1 IJzendoorn(Waal)_Ring43
8. GD-L3T6GC IJzendoorn(Waal)_Ring43
9. GD-L4T6GC Rijswijk(Lek)_Ring43
10. GD-L5T6C2 Weurt(Waal)_Ring41
11. GD-L5T6GC Weurt(Waal)_Ring41
12. GD-L6T6GC Wamel(Waal)_Ring41
13. GD-L7T6GC Vierakker(IJssel)_Ring50
14. GD-L8T6C3 DenNul(IJssel)_Ring53
15. GD-L8T6GC DenNul(IJssel)_Ring53
16. L3GC-L3T6C1 IJzendoorn(Waal)_Ring43
17. L5GC-L5T6C2 Weurt(Waal)_Ring53
18. L8GC-L8T6C3 DenNul(IJssel)_Ring53

In de titel “XXXX-YYYY {tekst1}_{tekst2} van bovenstaande folders is de volgende conventie aangehouden:

- XXXX = code van de referentieberekening (zie Tabel 9-1)
- YYYY = code van de dijkdoorbraakberekening (zie Tabel 9-1)
- {tekst1} = Omschrijving dijkdoorbraaklocatie, en
- {tekst2} = Aangrenzende (primair) overstroomde dijkkring

Opm: GD betreft berekening zonder dijkdoorbraken en zonder compartimentering

Elke folder omvat zes of zeven verschillende digitale files. In de file namen is de volgende conventie aangehouden:

- REF = code van de referentie berekening (zie Tabel 9-1),
- DBR = code van de dijkdoorbraakberekening (zie Tabel 9-1),

- Fls(Omschrijving) = In de omschrijving tussen de haakjes worden de bijbehorende codes van de DelftFLS berekeningen gegeven

Per file-type is de volgende data beschikbaar:

1. *DBR_Fls(Fls_DbrCode).acx*:
Deze GIS rasterkaart bevat voor elke 2D gridcel van de dijkdoorbraakberekening (DBR) de maximaal opgetreden resulterende stroomsnelheid $C = \sqrt{U^2 + V^2}$ in m/s.
2. *DBR_Fls(Fls_code).ahx*:
Deze GIS rasterkaart bevat voor elke 2D gridcel van de dijkdoorbraakberekening (DBR) de maximaal opgetreden waterdiepte in m.
3. *DBR_Fls(Fls_code).azx*:
Deze GIS rasterkaart bevat voor elke 2D gridcel van de dijkdoorbraakberekening (DBR) de maximaal opgetreden waterstand in m.
4. *REF-DBR_Fls(Fls_RefCode-Fls_DbrCode) Verschillen.xls*:
Dit spreadsheet bevat voor meetlocaties en meetraaien de maximale opgetreden waterstanden en debieten in de referentie situatie (REF) en in de dijkdoorbraakberekening (DBR). Deze spreadsheet bevat tevens voor meetlocaties figuren met daarin het waterstandsverloop in de referentieberekening en de dijkdoorbraakberekening alsmede het verschil in waterstanden tussen de referentieberekening en de dijkdoorbraakberekening. Idem voor het debietverloop op meetraaien.
5. *REF-DBR_Fls(Fls_RefCode-Fls_DbrCode) azx=ahx.asc*:
Deze GIS rasterkaart bevat voor elke 2D gridcel het verschil tussen de maximaal opgetreden waterstand in de referentieberekening (REF) en de maximaal opgetreden waterstand in de dijkdoorbraakberekening (DBR). Voor dijkdoorbraakscenario's zonder compartimentering zijn de bodemhoogten in de referentieberekening gelijk aan de bodemhoogten in de dijkdoorbraakberekening. Derhalve bevat deze GIS rasterkaart tevens de verschillen in maximaal opgetreden waterdiepten. In geval van een dijkdoorbraakscenario met compartimentering wijken de bodemhoogten enkel ter plaatse van de compartimenteringsdijk af van de bodemhoogten in de referentieberekeningen zonder compartimentering. Echter voor het overige deel van het 2D grid geldt dat verschillen in maximale waterstanden gelijk zijn aan verschillen in maximale waterdiepten.
6. *REF=DBR_Fls(Fls_RefCode=Fls_DbrCode).aht*
Deze GIS rasterkaart bevat de bodemliggingen t.o.v. NAP voor zowel de referentieberekening als voor de dijkdoorbraakberekening.
7. *REF_Fls(Fls_RefCode).aht (enkel indien item no. 6 niet aanwezig is)*:
Deze GIS rasterkaart bevat de bodemliggingen t.o.v. NAP voor de referentieberekening.
8. *DBR_Fls(Fls_DBRcode).aht (enkel indien item no 6 niet aanwezig is)*.
Deze GIS rasterkaart bevat de bodemliggingen t.o.v. NAP voor de dijkdoorbraakberekening