

WAQUA
Productieberekeningen
Bovenrivieren Rijntakken

Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017



WAQUA Productieberekeningen Bovenrivieren Rijntakken

Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017

R. Agtersloot
A.J. Paarlberg

1220082-001

Titel

WAQUA Productieberekeningen Bovenrivieren Rijntakken

Opdrachtgever

RWS-WVL

Project

1220082-001

Kenmerk

1220082-001-HYE-0013

Pagina's

47

Trefwoorden

WTI2017, WAQUA, bovenrivieren, Rijntakken, productieberekeningen

Samenvatting

In het kader van WTI2017 zijn voor een aantal watersystemen productieberekeningen met WAQUA uitgevoerd. Dit rapport betreft de berekeningen die zijn uitgevoerd voor de Bovenrivieren-Rijntakken. Voor de Rijntakken is de piekafvoer bij Lobith de enige stochast waarbij de vorm van de afvoergolf afkomstig is uit GRADE. Het gehanteerde WAQUA modelinstrumentarium en de afleiding van randvoorwaarden en initiële condities is beschreven in dit rapport. De benodigde 11 WAQUA-berekeningen zijn uitgevoerd bij Amazon.

De resultaten van de berekeningen zijn gecontroleerd door fysisch te verwachten patronen te onderzoeken. Het verloop van droogval is consistent en conform verwachting. Het aantal uitvoerpunten waarbij instabiliteiten in de tijdreeksen optreden is beperkt en er zijn geen uitvoerpunten die structureel worden afgekeurd. Van de belangrijkste specifieke elementen in het WAQUA-model, zoals de (regeling van de) afvoerverdeling op de splitsingspunten en de werking van de Bypass Kampen en de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld zijn conform verwachting. Samenvattend zijn de benodigde berekeningen voor de Rijntakken succesvol uitgevoerd en geschikt bevonden voor het vullen van de Relatieve databases.

Referenties

1209433-014-HYE-0002-v1-r-WTI projectplan 2015 Cluster 1 Hydraulische Belastingen_def_v1

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	feb. 2016	R.C. Agtersloot		A. Spruyt		M.R.A. van Gent	
		A.J. Paarlberg					
4	Nov 2016	R.C. Agtersloot		A. Spruyt		M.R.A. van Gent	
		A.J. Paarlberg					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doel	3
1.3 Leeswijzer	3
2 WAQUA modelinstrumentarium	5
2.1 Uitgeleverde modelschematisatie en gebruikte WAQUA versie	5
2.2 Studiegebied en rekenroosters WTI	5
2.3 Modelschematisatie	7
2.4 Partitionering	8
2.5 Uitvoerlocaties	9
2.6 Specifieke elementen in de modelschematisatie	9
2.6.1 Stuwen	9
2.6.2 Regelwerken splitsingspunten	9
2.6.3 Bypass Kampen	11
2.6.4 Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld	12
3 Randvoorwaarden en initiële condities	13
3.1 Afvoeren Rijn	13
3.2 Rivieraafvoer en lateralen	14
3.3 Bypass Kampen implementatie	14
3.4 Benedenranden	15
3.5 Initiële condities en stuwstanden	16
4 Werkwijze uitvoeren productieberekeningen	17
4.1 Testfase	17
4.2 Opzet berekeningen en gebruik Amazon	17
4.2.1 Naamgeving van de berekeningen	17
4.2.2 Benodigde bestanden voor een berekening	17
4.3 Uitvoer van een berekening	18
4.4 Controle of een berekening succesvol is uitgevoerd	19
5 Fysische controle productieberekeningen	21
5.1 Inleiding	21
5.2 Post-processing van de berekeningen	21
5.3 Algemene constatering/bevindingen	21
5.3.1 Meldingen WAQPRE	21
5.3.2 Meldingen WAQPRO	22
5.4 Controle vertaling Emmerich -> Lobith	22
5.5 Analyse maximale waterstanden en afvoeren in de as van de rivier	23
5.6 Analyse functioneren regelwerken, stuwen en hoogwatergeulen	26
5.6.1 Regelwerken Pannerden en Hondsbroeksche Pleij (afvoerdeling Rijntakken)	26
5.6.2 Stuwen	28
5.6.3 Bypass Kampen	28
5.6.4 Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld	29
5.7 Controle max13-waarden	31

5.8	Instabiliteiten in de maximale waterstand	34
5.9	Instabiliteiten in tijdreeksen	39
5.10	Gradiënten in de ruimte (uitvoerpunten)	43
6	Conclusies	45
7	Referenties	47
 Bijlage(n)		
A	DATA-ARCHIEF	A-1
B	Rivierafvoeren en lateralen	B-1
C	Ontbrekende max13-waarden	C-1
D	Locaties instabiliteiten maximale waterstand	D-1
E	Voorbeelden instabiliteiten tijdreeksen	E-1
F	Detailanalyse gradiënten	F-1

Lijst van Tabellen

Tabel 2.1	Effect instelling regelwerk Pannerden op afvoerverdeling.....	11
Tabel 2.2	Effect foutieve instelling regelwerk Pannerden op gemiddelde waterstand (in m) per tak.....	11
Tabel 3.1	Afvoeren Bovenrivieren.....	13
Tabel 3.2	Qh-relaties op de benedenranden van het Rijntakken-model.....	16
Tabel 3.3	Afvoer bij de start van de afvoergolven voor iedere stochastwaarde van de afvoer bij Lobith.....	16
Tabel 4.1	Invoerbestanden die gelijk zijn voor alle berekeningen (ALGwaq).....	17
Tabel 5.1	Afvoerverdeling splitsingspunten.....	27
Tabel 5.2	Afvoer door hoogwatergeul Veessen-Wapenveld.....	30
Tabel 5.3	Uitvoerlocaties die in alle berekeningen droog zijn.....	34
Tabel 5.4	Uitvoerlocaties waarbij het verschil tussen 'max13' en de maximale waterstand meer dan 1 cm is (zonder BU-locaties).....	38
Tabel 5.5	Uitvoerlocaties waarbij voor 1 afvoer een instabiliteit rond de piek optreedt (zonder BU-locaties).....	42
Tabel 5.6	Uitvoerlocaties waarbij voor 3 of meer afvoeren de gradiënt groter is dan 0,005 m/m (= 5 mm/m).....	44
Tabel A.1	Overzicht van gegevens in het data-archief, die zijn gemaakt ter controle van de productieberekeningen.....	A-1

Lijst met Figuren

Figuur 1.1	Normfrequenties voor de primaire waterkeringen.....	1
Figuur 1.2	Organisatie van het WTI2017 project.....	2
Figuur 2.1	Overzicht Rijntakken-model.	6
Figuur 2.2	Bodemhoogte en locaties open randen Rijntakken-model.	7
Figuur 2.3	Verdeling van de Rijntakken in 8 partities.....	9
Figuur 3.1	Afvoergolfvorm Rijn bij Lobith met bovenstroomse overstromingen. Uit: Deltares (2014).	13
Figuur 5.1	Aantal warnings en gebruikte cputijd per berekening (gespecificeerd als piekafvoer bij Lobith).	22
Figuur 5.2	Vertaalslag bovenrand Lobith/Emmerich bij een piekafvoer van 16.000 m ³ /s.	23
Figuur 5.3	Max13-waterstand traject Boven-Rijn (BR) Waal (WL).	24
Figuur 5.4	Max13-waterstand traject Boven-Rijn (BR), Pannerdensch Kanaal (PK), Neder-Rijn (NR) en Lek (LE).	24
Figuur 5.5	Max13-waterstand traject Boven-Rijn (BR), Pannerdensch Kanaal (PK) en IJssel (IJ).	25
Figuur 5.6	Maximale afvoer op de IJssel exclusief hoogwatergeul Veessen-Wapenveld en bypass Kampen.....	25
Figuur 5.7	Standen Regelwerk Pannerden (boven) en Hondsbroeksche Pleij (onder) voor een piekafvoer van 16.000 m ³ /s.....	28
Figuur 5.8	Standen Regelwerk Pannerden (boven) en Hondsbroeksche Pleij voor een piekafvoer van 16.500 m ³ /s.....	28
Figuur 5.9	Functioneren Bypass Kampen voor piekafvoer 16.000 m ³ /s bij Lobith.	29
Figuur 5.10	Functioneren hoogwatergeul Veessen-Wapenveld voor piekafvoer 24.000 m ³ /s bij Lobith.	30
Figuur 5.11	Vergelijking afvoer door de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld tussen IJVD en Bovenrivieren-Rijntakken.	31
Figuur 5.12	Droge punten bij laagste afvoer (boven, 6311 incl. BU-locaties) en hoogste afvoer (onder, 500 incl. BU-locaties). De kleur geeft de maximale waterstand (m+NAP) voor de berekening weer.....	32
Figuur 5.13	Aantal droge punten als functie van de piekafvoer bij Lobith.	33
Figuur 5.14	Voorbeeld van een berekening waarbij het max13-criterium wordt overschreden.....	35
Figuur 5.15	Afwijking in de sepmax, die niet te zien is in het 10-minuten signaal.....	36
Figuur 5.16	Aantal uitvoerlocaties waarbij verschil tussen 'max13' en 'sepmax' meer dan 1 cm is.	37
Figuur 5.17	Aantal uitvoerlocaties waarbij verschil max13/sepmax meer dan 1 cm is uitgesplitst naar afvoeraantal.	37

Figuur 5.18	Ruimtelijk patroon van de locaties waarbij het verschil tussen 'max13' en 'sepmax' meer dan 1 cm is voor $Q=16.000 \text{ m}^3/\text{s}$. De kleur geeft de maximale waterstand (m+NAP) voor de berekening weer.	39
Figuur 5.19	Verskil tussen 2 tijdstappen > 4 cm tijdens vollopen (x-as minuten, y-as waterstand m+NAP) (LE_60m_L_16_66)	40
Figuur 5.20	Verskil tussen 2 tijdstappen > 4 cm binnen 2 uur voor de werkelijke piek (x-as minuten, y-as waterstand m+NAP) (IJ_60m_L_11_186)	40
Figuur 5.21	Aantal voorbeelden van instabiliteiten in tijdreeksen.	41
Figuur 5.22	Aantal uitvoerlocaties met instabiliteit rond de piek per afvoer.	42
Figuur 5.23	Instabiliteiten rond de piek, $Q16000$. De kleur geeft de maximale waterstand voor de berekening weer.	43
Figuur 5.24	Gradiënten tussen in de ruimte opeenvolgende uitvoerpunten bij $Q13000$ (uitgezonderd backup-punten).	44
Figuur C.1	Locatie op de Waal waarbij de waterstand nog stijgt aan het einde van de tijdreeks en geen max13 bepaald kan worden.	C-1
Figuur D.1	Locaties met instabiliteiten in de maximale waterstand ('max13' versus 'sepmax').....	D-5
Figuur D.2	Detailverschil max13/sepmax ter plaatse van Regelwerk Pannerden.	D-6
Figuur E.1	Voorbeelden van tijdreeksen met groot verschil max13/sepmax.....	E-5
Figuur F.1	Voorbeelden locaties met relatief grote waterstandsgradiënten (> 5 mm/m). .	F-4

English summary

Within the framework of WBI-2017, production runs with WAQUA have been performed for a number of water systems. In this report the computations for the Upper rivers - Rhine (Rijntakken) are described. In the Rijntakken model, the peak discharge at Lobith is the only stochastic variable. The shape of the discharge wave is determined with GRADE. This report presents the WAQUA model instrumentation and the determination of boundary and initial conditions. 11 WAQUA runs were performed at the Amazon cluster.

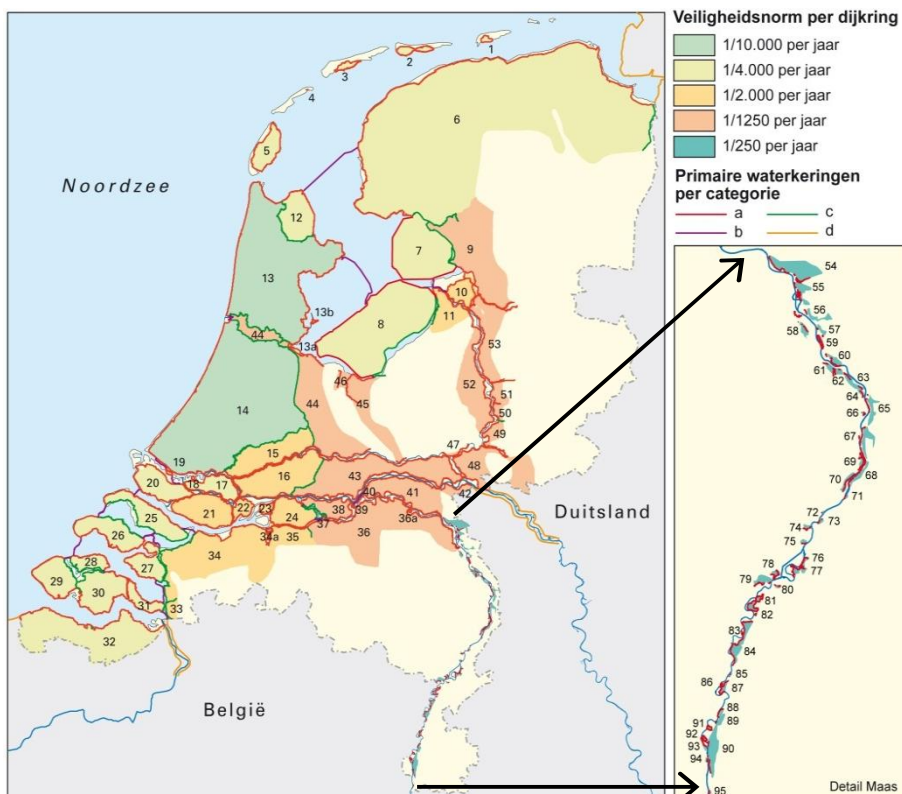
As a check, the physical patterns of these computations have been verified. The occurrence of dry points is consistent and as expected. The number of output locations where instabilities in the time series occur is limited and there are no output locations that have been structurally rejected. The most important elements in the WAQUA-model, e.g. the (control of) the discharge distribution over the bifurcation points and the functioning of the Bypass Kampen and high-water channel Veessen-Wapenveld are in line with expectations. To sum up, it can be concluded that the Rijntakken computations were successfully performed and are considered acceptable to be used in the relational databases.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Volgens de Waterwet (2009) dienen periodiek Hydraulische Randvoorwaarden (HR) voor de primaire keringen te worden afgeleid voor herhalingsstijden van 250 tot 10.000 jaar; zie Figuur 1.1. Volgens de huidige methode (combinatie HR2006 en VTV2006) bestaan de HR per locatie uit een combinatie van waterstand en/of golfhoogte, -periode en –richting, afhankelijk van het beschouwde watersysteem (kust, meer of rivier). Deze wordt op probabilistische wijze met behulp van Hydra modellen bepaald, waarbij statistiek van wind, waterstand, afvoer en/of offshore golfcondities wordt vertaald naar waterstanden en golfcondities aan de teen van de dijk. Met behulp van deze afgeleide randvoorwaarden kan volgens het VTV2006 een toetsing worden uitgevoerd (voor de hoogtetoets wordt een volledig probabilistische toets uitgevoerd). Deze toetsing gaat uit van de overschrijdingskansbenadering, welke kijkt naar de lokale kans van overschrijding van de belasting voor de betreffende waterkeringssectie in relatie tot de sterkte van de waterkering.

In 2017 wordt de overstap van de overschrijdingskansbenadering naar de overstromingskansbenadering gemaakt. Deze laatste gaat niet alleen uit van het feit dat de belasting voor een specifieke waterkeringssectie bij een gegeven kans op overschrijden groter is dan de sterkte, maar neemt ook de kans op falen (rekening houdend met meerdere faalmechanismen) van een waterkeringssectie binnen een dijkkring in beschouwing. Dit laatste wordt de overstromingskansbenadering genoemd. Het beoogde instrument waar deze overstromingskansbenadering in geïmplementeerd gaat worden heet Hydra-RING.



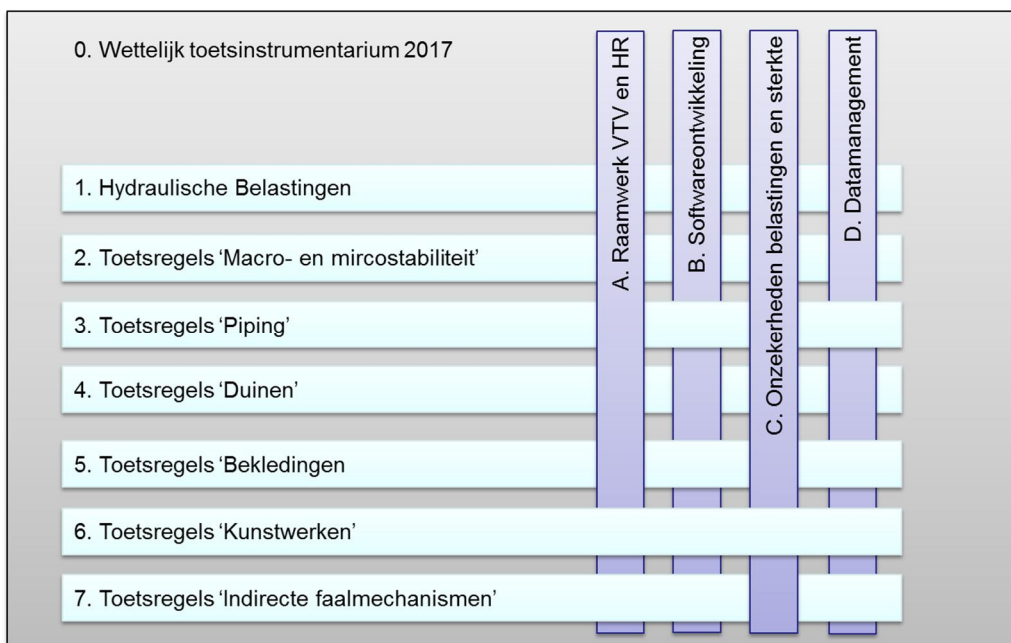
Figuur 1.1 Normfrequenties voor de primaire waterkeringen.

Het onderzoek (voorheen in SBW kader uitgevoerd) en het ontwikkelen van het toetsinstrumentarium (WTI) zijn zodanig met elkaar verbonden dat deze activiteiten vanaf 2012 als één programma "WTI2017" worden uitgevoerd. Daarbij worden zeven inhoudelijke deelprogramma's/onderdelen onderscheiden en vier meer generieke deelprogramma's, respectievelijk de horizontale en verticale clusters in Figuur 1.2.

Het programma wordt uitgevoerd in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Milieu. Het organisatie-onderdeel van Rijkswaterstaat genaamd Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL) is gedelegeerd opdrachtgever. Het programma WTI2017 wordt gefinancierd uit het Infrastructuurfonds, artikel 11, hoofdwatersysteem. Dit maakt lange termijn planning mogelijk. Het Rijk is verantwoordelijk voor het aanleveren van het Wettelijk Toetsinstrumentarium. De waterkeringbeheerders toetsen daarmee of hun primaire waterkeringen aan de normen voldoen. De kwaliteit van het instrumentarium en de uitvoering van de toetsing is van groot belang; maatschappelijk, het gaat immers om de veiligheid van de inwoners en het voorkomen van schade aan de infrastructuur, maar ook vanwege de hoge kosten die gemoeid zijn met het noodzakelijk verbeteren van eventueel afgekeurde dijkvakken.

Het doel van het cluster Hydraulische Belastingen is tweeledig:

1. Uitvoeren van nieuwe productieberekeningen voor de gebieden waar programma's zoals Ruimte voor de River en Maaswerken een grote invloed hebben op de Hydraulische Belastingen;
2. Uitvoeren van onderzoek met als doel het realiseren van meer betrouwbare Hydraulische Randvoorwaarden in 2017 en verder.



Figuur 1.2 Organisatie van het WTI2017 project.

Voor het eerste onderdeel geldt dat de globale planning hiervan is: (i) 2013: Voorbereiden en afbakenen productieberekeningen, (ii) 2014 verzamelen benodigde gegevens en (iii) 2015: uitvoeren productieberekeningen.

Dit rapport is opgesteld in het kader van het eerste onderdeel: productieberekeningen met WAQUA voor het modelleren van de waterbeweging van de Rijntakken.

1.2 Doel

Het voorliggende rapport geeft:

- Een overzicht van het WAQUA modelinstrumentarium dat gebruikt is voor de WAQUA-productieberekeningen voor de Rijntakken.
- Een overzicht van de gehanteerde uitgangspunten.
- Een overzicht van de gehanteerde randvoorwaarden en initiële condities, inclusief hoe deze zijn afgeleid.
- De aanpak voor controle van modelinvoer en -uitvoer, met daarbij een uitspraak over de betrouwbaarheid en kwaliteit van de berekeningen

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bespreekt het WAQUA-model, zoals dat is opgezet door Deltares. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de stochastcombinaties, die vertaald zijn in randvoorwaarden en initiële condities voor het WAQUA-model. Hoofdstuk 4 beschrijft de werkwijze van uitvoeren van de productieberekeningen en in hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de fysische juistheid en consistentie van de berekeningen. Hoofdstuk 6 bevat enkele algemene conclusies ten aanzien van de kwaliteit van de berekeningen en geeft aanbevelingen voor het vullen van databases.

Merk op dat als startpunt voor de activiteiten in het kader van WTI2017 de aanpak en resultaten van WTI2011 worden gebruikt. Dit betekent dat de consequenties van keuzes zoals gespecificeerd in dit rapport ten opzichte van WTI2011 zijn gedefinieerd.

DATA-ARCHIEF

In dit rapport wordt op verschillende plekken verwezen naar een data-archief. Dit data-archief is uitgeleverd op een externe harde schijf en maakt expliciet onderdeel uit van dit rapport. In bijlage A is een overzicht gegeven van de inhoud van het data-archief.

2 WAQUA modelinstrumentarium

2.1 Uitgeleverde modelschematisatie en gebruikte WAQUA versie

Voor de WTI productieberekeningen is gebruik gemaakt van een WAQUA model-schematisatie, die onderdeel is van een door Deltares beheerde gebiedsschematisatie voor de Bovenrivieren-Rijntakken. Eind 2014 zijn in het kader van WTI2017 testberekeningen uitgevoerd door RHDHV (2014). De volgende aanpassingen zijn verwerkt in de uitgeleverde modelschematisatie (Deltares, 2014b): 'oprekken' van Qh-relaties, opname/herstel maatregelen, verleggen uitvoerlocaties, verlegging onttrekkingspunt van de Bypass Kampen. Ten behoeve van de voorliggende WTI-berekeningen zijn ook enkele locatienamen aangepast waarbij spaties zijn vervangen door underscores '_ '.

Op 5 januari 2015 is de volgende gebiedsschematisatie uitgeleverd:

[DATA-ARCHIEF]\1.Bovenrivieren\1.Gebiedsschematisaties\02_Rijntakken\02_Modellen\rijn-hr2017-v2

De daaruit gebruikte WAQUA modelschematisatie is:

rijn-hr2017-v2.zip\rijn-hr2017-v2\modelen\waqua\hr2017_5-v2

Ten opzichte van de standaard meegeleverde Qh-relaties is een aanpassing gemaakt om aan te sluiten bij de resultaten van het Rijn-Maasmonding model. Een beschrijving van de gebruikte Qh-relaties staat in paragraaf 3.4.

Binnen WTI2017 is gebruik gemaakt van WAQUA onder simona2014, patch 8 (Linux, 64 bit).

2.2 Studiegebied en rekenroosters WTI

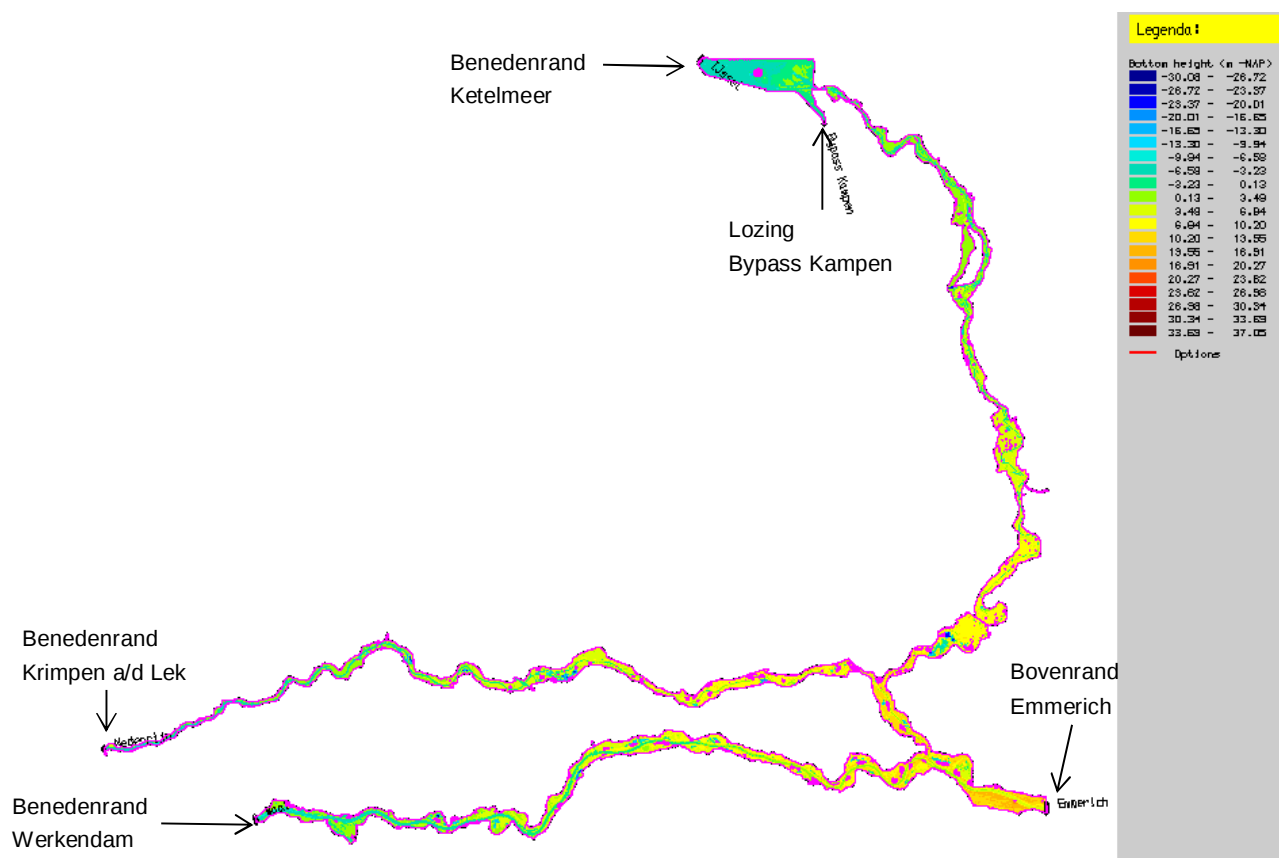
Het studiegebied voor de productieberekeningen voor de Rijntakken omvat:

- De Boven-Rijn van Emmerich tot de Pannerdensche Kop (km 854 t/m 867);
- De Waal van de Pannerdensche Kop tot Boven-Hardinxveld (km 868 t/m 960);
- Het Pannerdensch Kanaal tussen de Pannerdensche Kop en IJsselkop (km 868 t/m 878);
- De Neder-Rijn/Lek van de IJsselkop tot Krimpen a/d Lek (km 878 t/m 988);
- De IJssel van de IJsselkop tot de Ketelbrug (km 878 t/m 1006).

Een overzichtskaart van het Rijntakken-model is weergegeven in Figuur 2.1. Figuur 2.2 geeft de bodemhoogte en locaties van open randen. De lozing van de Bypass Kampen in het Vossemeer is als open rand gedefinieerd. Het rekenrooster van het Rijntakken-model bestaat uit 794x4666 roosterzellen (rijn40m_5-v4.rgf).



Figuur 2.1 Overzicht Rijnakken-model.



Figuur 2.2 Bodemhoogte en locaties open randen Rijntakken-model.

2.3 Modelschematisatie

Als voorbereiding op de productieberekeningen voor WTI2017 zijn in 2013 uitgangspunten vastgelegd met betrekking tot de te hanteren schematisaties. Het gaat daarbij om de bodemgeometrie en vegetatie, maar ook om de mee te nemen Ruimte voor de Rivier maatregelen, vergunningen en dergelijke. In Deltares (2013) is beschreven welke uitgangspunten ten aanzien van de schematisaties zijn vastgelegd. In Deltares (2014a) zijn enige aanvullingen op de uitgangspunten gegeven.

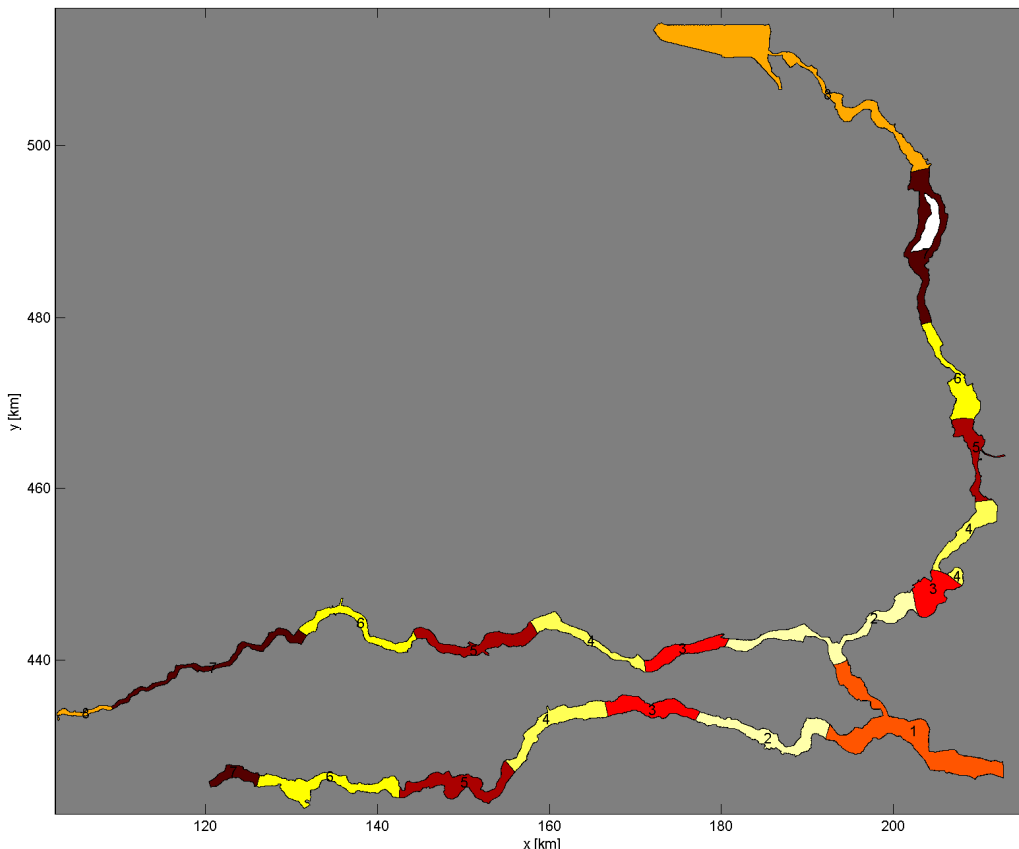
In onderstaand kader volgt een beknopte samenvatting van de uitgangspunten uit Deltares (2013; 2014a). Voor nadere onderbouwing van de verschillende keuzes, zoals bijvoorbeeld voor gehanteerde bodemligging en vegetatie, wordt verwezen naar Deltares (2013; 2014a).

In principe is in 2013 vastgelegd dat alle maatregelen (buiten Ruimte voor de Rivier (RvR) of Maaswerken) met een status MIRT3 of vergelijkbaar meegenomen zouden worden mits deze voor 31 maart 2013 aangeleverd zouden worden. In de eerste helft van 2014 werd duidelijk dat er een aantal maatregelen is welke nog geen MIRT3 status (of vergelijkbaar) hebben, maar waarvan DGRW aangeeft dat de kans op realisatie reëel is. Dit laatste betekent dat deze maatregelen opgenomen zijn in de schematisaties voor WTI2017. Dit is gerealiseerd door het opnemen van deze maatregelen in de BenO schematisatie. Daarnaast bevat de BenO schematisatie ook vigerende en beschikbare vergunningen en zijn zoveel mogelijk uitgevoerde gebiedsveranderingen opgenomen.

Voor de modelgeometrie (bodem/overlaten) geldt dat alle RvR maatregelen zijn meegenomen. Voor bodemligging in het zomerbed geldt dat de meest recent beschikbare bodem wordt meegenomen (zie Figuur 2.2 voor de resulterende bodemligging). Voor vegetatie geldt dat het beeld van 1997 gebruikt is. Ten aanzien van de overige maatregelen geldt dat alle maatregelen waarvoor een MIRT3 besluit (of een vergelijkbaar investeringsbesluit) is genomen en waarvoor een Baseline maatregel beschikbaar is voor 31 maart 2014, zijn meegenomen.

2.4 Partitionering

De WAQUA-schematisatie is opgeleverd zonder voor-gedefinieerde opdeling in partities. De productieberekeningen zijn uitgevoerd bij Amazon op (single) nodes met 8 cores (zie paragraaf 4.2). Daarom is voor het opzetten van de partitionering uitgegaan van 8 partities. De resulterende partitionering is getoond in Figuur 2.3. Deze partitionering is met de default waqpro-opties aangemaakt door Simona en leidt tot een gebalanceerde verdeling van het rekenwerk over 8 cores.



Figuur 2.3 Verdeling van de Rijntakken in 8 partities.

2.5 Uitvoerlocaties

In 2013 zijn voor de productieberekeningen uitgangspunten vastgelegd voor wat betreft de uitvoerlocaties (Deltares, 2013). In onderstaand kader zijn de belangrijkste uitgangspunten uit dit document opgesomd.

Aslocaties

Voor de aslocaties zijn de door Baseline op het rekenrooster geprojecteerde rivierkilometerpunten gebruikt.

Oeverlocaties:

Als uitgangspunt voor de nieuwe uitvoerlocaties is de dijkkringlijn 4.0 van RWS gebruikt. Eventueel zijn locaties aangepast waar in verband met mee te nemen maatregelen dijkverleggingen gepland zijn. Voor het definiëren van uitvoerlocaties zijn dezelfde criteria toegepast als in de vorige WTI cyclus:

- De uitvoerlocaties liggen zo dicht mogelijk bij de dijk, maar in ieder geval niet in de eerste roostercel uit de rand, gebaseerd op het WAQUA model.
- Hooggelegen gebieden, zoals uiterwaarden, zijn ook als oeverlocatie gehanteerd, tenzij het hoge gronden (hooggelegen gebieden die als primaire waterkering dienen) betreft.
- De uitvoerlocaties zijn gedefinieerd met onderlinge afstand van ca. 100 m in de richting langs de dijk.
- Punten zijn verlegd of extra aangemaakt als hiervoor behoefte is bij dijkbeheerders of andere onderdelen van WTI.

Er zijn naast een basisset ook een natte set (vermijden van hooggelegen gebieden, zoals uiterwaarden) en back-up set (110 m uit de dijk) gedefinieerd. De back-up set uitvoerlocaties is verkregen door de basisset 50 m verder van de dijk te leggen in de richting van de rivier. Indien na afloop van de productieberekeningen mocht blijken dat voor een bepaalde dijksectie de basisset uitvoerlocaties niet goed gekozen is en dat die locaties niet geschikt zijn voor de HR bepaling, dan is er op 50 m afstand van de basisset nog een volledige set uitvoerlocaties met WAQUA-Rijntakken uitvoer beschikbaar.

2.6 Specifieke elementen in de modelschematisatie

2.6.1 Stuwen

Het Rijntakken-model bevat de volgende stuwen in de Neder-Rijn/Lek:

- Driel bij km 891,6
- Amerongen bij km 922,4
- Hagestein bij km 946,8

Deze stuwen worden in het Rijn-model automatisch aangestuurd volgens het vigerende stuwprogramma van de Rijntakken.

2.6.2 Regelwerken splitsingspunten

Het Rijn-model bevat twee regelwerken om de afvoerverdeling over de Rijntakken te kunnen regelen (zie Figuur 2.1):

- Regelwerk Pannerden bij de Pannerdensche Kop
- De Hondsbroeksche Pleij bij de IJsselkop

De beoogde instelling van de regelwerken komt overeen met de situatie zoals deze fysiek aanwezig is. Regelwerk Pannerden heeft een vaste instelling waarmee de afvoerverdeling wordt gestuurd bij een afvoer van 16.000 m³/s bij Lobith; terwijl de Hondbroeksche Pleij boven de 16.000 m³/s wordt ingesteld op het ontzien van de Neder-Rijn. Omdat de noodzakelijke instelling(en) afhankelijk zijn van de gerealiseerde rivierverruimende ingrepen zullen de instellingen regelmatig veranderen.

Regelwerk Pannerden heeft een vaste drempelhoogte van 13,83 m+NAP. Met deze vaste hoogte wordt bij een afvoer van 16.000 m³/s bij Lobith gezorgd voor op een maximale afvoer van 10.165 m³/s door de Waal.

De Hondbroeksche Pleij is ingesteld om de Neder-Rijn/Lek te ontzien, dat wil zeggen: zo lang mogelijk de afvoer naar de Neder-Rijn/Lek maximaliseren op 3.380 m³/s.

Het bovenstaande is hoe de berekeningen daadwerkelijk zijn uitgevoerd, maar dit wijkt af van de beoogde instelling volgens Deltares (2014a). Bedoeld was om de bovenstaande instelling te hanteren voor een afvoer van 16.000 m³/s en vervolgens het regelwerk bij Pannerden vast te zetten op de daaruit volgende instelling (hoogte gelijk aan 13.83 m+NAP). Feitelijk is er dan, ten opzichte van Deltares (2014a) een andere instelling gehanteerd voor Pannerden, waardoor het model bij alle berekeningen vast probeert te houden aan een afvoer van 10.165 m³/s door de Waal.

In Tabel 2.1 is het effect van de onjuiste instelling op de afvoerverdeling te zien voor een afvoer van 13.000 en 18.000 m³/s. De andere instelling leidt per definitie (vanwege de aard van de instelling) tot de volgens Deltares (2014a) gewenste afvoerverdeling bij 16.000 m³/s, welke dan ook niet in beeld is gebracht in onderstaande tabel. Duidelijk is dat er bij 13.000 m³/s teveel afvoer naar de Waal gaat als gevolg van het vasthouden van de 10.000 m³/s op de Waal. Bij een afvoer van 18.000 m³/s is sprake van het omgekeerde effect.

Verder heeft een analyse van de resultaten voor een afvoer bij Lobith van 16.500 m³/s laten zien dat hier al ruimschoots voor de piek van de afvoergolf het maximale regelbereik (overlaat gedaald tot op 12.00 m+NAP) wordt gehaald. Hieruit volgt dat de fout zoals geconstateerd bij 18.000 m³/s reeds bij een afvoer van 16.500 m³/s maximaal is en (bij benadering) gelijk is aan de geconstateerde fout bij 18.000 m³/s. De hier gepresenteerde fout in afvoer en waterstanden bij een afvoer van 18.000 m³/s is dan ook representatief voor de fout voor alle doorgerekende afvoerniveau's vanaf 16.500 m³/s.

	Q_13000				
Instelling	Lobith	Waal	Pan.Kanaal	Neder-Rijn	IJssel
Productie	100.00%	64.58%	35.40%	21.05%	14.35%
Deltares (2014a)	100.01%	64.36%	35.61%	21.17%	14.45%
	-0.01%	+0.21%	-0.21%	-0.12%	-0.10%

	Q_18000				
	Lobith	Waal	Pan.Kanaal	Neder-Rijn	IJssel
Productie	100.00%	61.87%	38.12%	20.53%	17.60%
Deltares	100.00%	62.43%	37.56%	20.27%	17.30%

(2014a)					
	0.00%	-0.56%	+0.56%	+0.26%	+0.30%

Tabel 2.1 Effect instelling regelwerk Pannerden op afvoerdeling.

Tabel 2.2 toont het effect van de andere instelling op de gemiddelde waterstanden voor de Rijntakken. De tabel laat zien dat als gevolg van de andere instelling van het regelwerk bij een afvoer van 13.000 m³/s sprake is van een verschil in de waterstanden van orde 1 cm. Bij een afvoer van 18.000 m³/s is dit verschil groter, tot 4 cm, en omgekeerd van teken.

	Q_13000				
	Boven-Rijn	Waal	Pan.Kanaal	Neder-Rijn/Lek	IJssel
Productie	16.98	10.09	14.74	7.59	6.94
Deltares (2014a)	16.97	10.07	14.75	7.61	6.94
	0.01	0.01	-0.01	-0.01	-0.01

	Q_18000				
	Lobith	Waal	Pan.Kanaal	Neder-Rijn	IJssel
Productie	18.33	11.40	15.74	8.46	7.91
Deltares (2014a)	18.36	11.44	15.70	8.42	7.87
	-0.03	-0.05	0.03	0.04	0.04

Tabel 2.2 Effect foutieve instelling regelwerk Pannerden op gemiddelde waterstand (in m) per tak

Op basis van de bovenstaande bevindingen wordt gesteld dat de andere instelling tot een verschil van orde 4 cm leidt bij piekafvoeren van 16.000 tot 18.000 m³/s. Een dergelijke fout in de waterstanden valt weg in de nauwkeurigheid van de uiteindelijk te berekenen hydraulische randvoorwaarden. Daarnaast wordt verwacht dat de kansbijdrage van afvoeren van 18.000 m³/s en hoger klein zal zijn. Voor afvoeren lager dan 16.000 m³/s is de fout aanzienlijk kleiner, orde centimeter of minder, wat in zijn geheel niet terug te zien zal zijn in de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden. Op basis van het beperkte effect van het hanteren van een instelling anders dan beoogd in Deltares (2014a) wordt vooralsnog de gehanteerde instelling gehandhaafd. Mocht er een noodzaak bestaan om de berekeningen opnieuw uit te voeren, dan zal overgestapt worden op de instelling zoals beoogd in Deltares (2014a).

2.6.3 Bypass Kampen

Eén van de Ruimte voor de Riviermaatregelen is de Bypass Kampen (samen met de zomerbedverdieping beneden-IJssel vormt dit de IJsseldelta-Zuid). De maatregel bestaat uit 2 fases. Fase 1 is operationeel vanaf begin 2017 tot (tenminste) 2023 en hiervan is de uitvoering in 2014 gestart. In 2017 zal de bypass geschikt zijn om te worden ingezet bij extreem hoge rivierafvoeren (>15.500 m³/s bij Lobith).

Gebruikmakend van het huidige Roggebotcomplex kan in fase 1a maximaal circa 220 m³/s worden afgevoerd bij een maatgevende afvoer die samenvalt met een eenmaal per jaar stormsituatie of een verhoogd peil op Vossemeer door neerslag of IJsselafoer (0,6 m+NAP). De afvoer van circa 220 m³/s door de bypass veroorzaakt 12,8 cm waterstandsval bij Zwolle bij de maatgevende afvoer (16.655 m³/s). Bij een lagere waterstand dan NAP+0,6 m op het Vossemeer kan desgewenst een groter volume via de bypass worden afgevoerd, mits

het waterpeil bij Roggebotsluis niet het peil van 1,7 m+NAP overschrijdt (Haskoning, 2012). In fase 2 (vanaf 2023) wordt de afvoercapaciteit verder vergroot naar circa 700 m³/s.

In het WTI2017 model is fase 1b verwerkt, met een hogere Bypass-afvoer dan voor fase 1a geldt (Deltares, 2013). Conform de voorschriften van Rijkswaterstaat Oost-Nederland (Beyer, 2014) is in de WAQUA-modellering voor fase 1b rekening gehouden met een maximale afvoer van 340 m³/s door de bypass Kampen. Deze modellering is opgenomen als onttrekking ter hoogte van km 992 in de IJssel en een lozing bij de Roggebotsluis in het Vossemeer. Zie paragraaf 3.3 voor details van de implementatie in de WAQUA-modelschematisatie.

2.6.4 Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld

In het kader van Ruimte voor de Rivier, wordt door de aanleg van twee nieuwe dijken tussen Veessen en Wapenveld een 8 km lange hoogwatergeul gecreëerd (Figuur 2.2). Aan de bovenstroomse zijde bij Veessen krijgt de geul een inlaat, bij Wapenveld een uitlaat. De inlaat gaat alleen open als het waterpeil van de IJssel een hoogte van 5,65 m+NAP heeft bereikt. Het water in de geul gaat dan meestromen met de IJssel (frequentie van ongeveer 1/100 jaar).

Voor de productieberekeningen van de IJssel-Vechtdelta is WAQUA-aansturing van de hoogwatergeul aangepast ten opzichte van de uitgeleverde modelschematisatie (Deltares, 2016c); voor de Bovenrivieren-Rijntakken is deze aanpassing niet nodig.

3 Randvoorwaarden en initiële condities

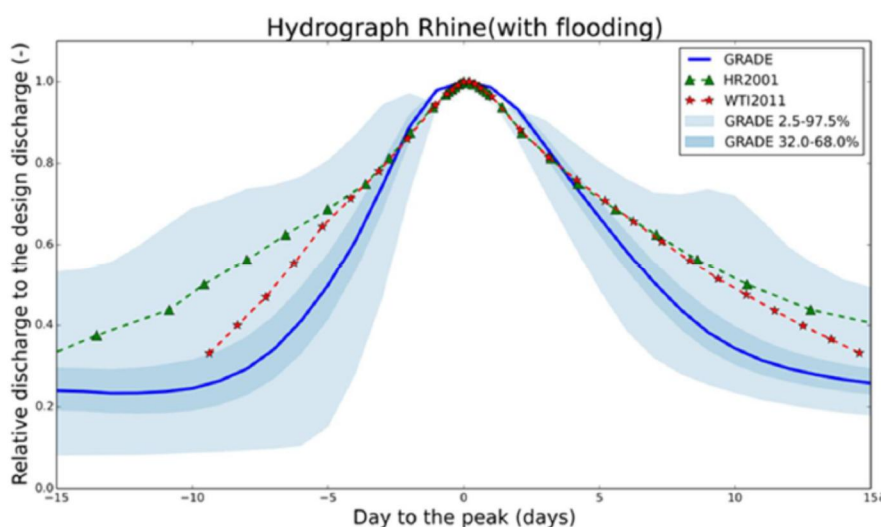
3.1 Afvoeren Rijn

Voor de Bovenrivieren wordt alleen de bovenstroomse afvoer als stochast beschouwd. De berekeningen zijn uitgevoerd zonder wind. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de door te rekenen afvoeren voor de Bovenrivieren (Deltares, 2014a). De waarden uit de tabel zijn piekafvoeren, daar er met afvoergolven wordt gerekend.

Afvoer [m^3/s]	
Rijn (Lobith)	Maas (Borgharen)
6.000	1.300
8.000	2.260
10.000	3.275
13.000	3.394
16.000	3.800
16.500	3.950
17.000	4.000
18.000	4.600
20.000	5.000
22.000	5.500
24.000	6.000
	6.500

Tabel 3.1 Afvoeren Bovenrivieren.

Bovenstaande debieten worden met een standaard (50% betrouwbaarheidsinterval) afvoergolfvorm doorgerekend, zie de blauwe lijn Figuur 3.1. De productieberekeningen voor de Rijn bestaan feitelijk dus uit 11 berekeningen. Conform de gestelde uitgangspunten wordt gerekend met afvoergolven uit GRADE waarbij rekening is gehouden met bovenstroomse overstromingen (Deltares, 2014a).



Figuur 3.1 Afvoergolfvorm Rijn bij Lobith met bovenstroomse overstromingen. Uit: Deltares (2014).

3.2 Rivierafvoer en lateralen

De GRADE-golf (zie Figuur 3.1) beschrijft een golfvorm in de tijd. Op basis van de piekafvoeren uit Tabel 3.1 is de golfvorm omgezet naar een afvoerreeks bij Eijsden. Deze afvoerreeks is vervolgens met de "hulpprogrammatuur 2.20" omgezet naar afvoerrandvoorwaarden bij Emmerich en de lateralen langs de Rijn. Omdat dit proces in een aantal stappen verloopt, en voor alle piekafvoeren bij Lobith nodig is, is een Matlabschil om de hulpprogrammatuur geschreven, zie Bijlage B. Binnen deze Matlabschil is ook de Bypass Kampen verwerkt.

3.3 Bypass Kampen implementatie

De onttrekking/lozing van de Bypass Kampen is afgeleid uit Beyer (2014). Onderstaande beschrijving geeft een voorbeeld van een WAQUA-invoerbestand voor de afvoerlozing bij de Roggebotsluis op het Vossemeer bij een piekafvoer van 16.000 m³/s bij Lobith:

```
# Inzet van de bypass Kampen, lozing Vossemeer bij Roggebotsluis
# Benaderd op basis van de afvoerreeks bij Emmerich
# Criterium voor inzet is als volgt toegepast:
# (rekening houdend met topvervlakking van 6.3 m3/s tussen Em en Lo)
# 1) Als afvoer bij Emmerich < 15.506.3 m3/s dan geen inzet
# 2) Als afvoer bij Emmerich > 15.506.3 m3/s dan
#   a) moment waarop afvoer bij Emmerich > 15.256.3 m3/s
#   => T_Q15250_Em
#   b) tijdstip van overschrijden bij Lobith ~1 uur later
#   => T_Q15520_Lo = T_Q15250_Em + 1 uur
#   c) het kost 6 uur om te openen
#   => T_geopend = T_Q15520_Lo + 6 uur
#   d) moment waarop afvoer bij Emmerich < 13.006.3 m3/s
#   => T_Q13000_Em
#   e) tijdstip van onderschrijden bij Lobith ~1 uur later
#   => T_Q13000_Lo = T_Q13000_Em + 1 uur
#   f) het kost 6 uur om te sluiten
#   => T_gesloten = T_Q13000_Lo + 6 uur
#
S : P1609 , TID = 0. SERIES = 'irregular'
TIME_AND_VALUE = 0 0 0 0
TIME_AND_VALUE = 13 17 0 0
TIME_AND_VALUE = 13 23 0 340
TIME_AND_VALUE = 18 8 0 340
TIME_AND_VALUE = 18 14 0 0
TIME_AND_VALUE = 30 0 0 0
```

Deze lozing is opgenomen binnen de WAQUA-modelschematisatie in het bestand:
 [DATA-ARCHIEF]\1.Bovenrivieren\3.Generatie_produktesommen\1.Waterstanden\
 0.Amazon\ALGwaq\1.WAQUA_Rijn\
 \randvw\flow\Q_<piekafvoer>\q_Bypass-Kampen_lozing-Vossemeer.Q_<piekafvoer>.

De onttrekking op de IJssel is gelijk, maar dan negatief van teken. Deze onttrekking is opgenomen binnen de WAQUA-modelschematisatie in het bestand:
 \randvw\flow\Q_<piekafvoer>\q_lateraal.Q_<piekafvoer>.

3.4 Benedenranden

Op de benedenranden van het WAQUA-model wordt gebruik gemaakt van Qh-relaties zoals beschreven in Deltares (2015). De uitgeleverde Qh-relaties zijn vervangen om aan te sluiten op het probabilistische resultaat in combinatie met Ruimte voor de Rivier-ingrepen.

Toegepaste bestanden zijn:

```
[DATA-ARCHIEF]\1.Bovenrivieren\3.Generatie_productieberekeningen\
1.Waterstanden\0.Amazon\ALGwaq\1.WAQUA_Rijn\randvw\flow\
qh_Ketelbrug_hr2017-v2
qh_krimpen_ad_lek_hr2017-v2
qh_werkendam_hr2017-v2
```

Toelichting Ketelbrug

Basisgegevens beschreven in Deltares (2015).

De waterstand voor de extreme afvoer ($6.000 \text{ m}^3/\text{s}$) is een lineaire extrapolatie vanuit de twee waardes eronder. De Qh-relatie bij de IJsseldelta is ongewijzigd gebleven. De uitstroomrand ligt verder naar het IJsselmeer dan rkm 1002, maar onder relevante omstandigheden ($u < 10 \text{ m/s}$) is er nauwelijks opzet en wordt het geheel gedomineerd door meerpeil en afvoer. Voor rkm 1002 voor Ketelbrug is geen relatie met de afvoer beschikbaar. In plaats daarvan is aangenomen dat het verhang over het Ketelmeer onder condities behorende bij afvoerdominantie op de IJssel verwaarloosbaar is. Voor afvoeren van orde $1.850 \text{ m}^3/\text{s}$ is de fout 15 cm bij rkm 1002 en bij afvoeren van $3.200 \text{ m}^3/\text{s}$ nog slechts 9 cm bij rkm 1002. Een dergelijk verschil op het Ketelmeer heeft geen significante invloed op het omslagpunt voor afvoerdominantie.

Toelichting Krimpen a/d Lek

Basisgegevens beschreven in Deltares (2015).

De waterstand voor de extreme afvoer ($8.000 \text{ m}^3/\text{s}$) is een lineaire extrapolatie vanuit de twee waardes eronder. Op 04/02/2015 is de volgende aanpassing doorgevoerd: locatie van de Qh-relatie op de Lek is verplaatst naar Nieuwe Maas 989 (1 km verder benedenstrooms) als gevolg van een onjuiste aanname in Deltares (2015) met betrekking tot ligging van de modelrand.

Toelichting Werkendam

Basisgegevens beschreven in Deltares (2015).

De waterstand voor de extreme afvoer ($17.000 \text{ m}^3/\text{s}$) is een lineaire extrapolatie vanuit de twee waardes eronder. Op 04/02/2015 is de volgende aanpassing doorgevoerd: locatie van de Qh-relatie op de Waal is verplaatst van Boven-Merwede rkm 959 naar Boven-Merwede rkm 961 (2 km verder benedenstrooms) als gevolg van een onjuiste aanname in Deltares (2015) met betrekking tot ligging van de modelrand.

De resulterende Qh-relaties zijn opgenomen in Tabel 3.2.

Werkendam (Waal)		Krimpen a/d Lek (Lek)		Ketelbrug (IJssel)	
Afvoer [m ³ /s]	Waterstand [m+NAP]	Afvoer [m ³ /s]	Waterstand [m+NAP]	Afvoer [m ³ /s]	Waterstand [m+NAP]
550	1,030	25	1,227	25	-0,025
1.401	1,330	309	1,387	200	0,067
2.697	1,768	753	1,556	400	0,171
3.997	2,276	1.163	1,750	700	0,328
5.296	2,679	1.579	1,932	1.100	0,538
6.473	3,059	2.086	2,108	1.500	0,747
8.285	3,623	2.758	2,319	2.000	1,009
10.165	4,244	3.388	2,527	2.500	1,251
11.435	4,631	3.812	2,688	3.000	1,462
15.400	5,765	6.600	3,748	5.000	2,282
17.000	6,222	8.000	4,280	6.000	2,692

Tabel 3.2 Qh-relaties op de benedenranden van het Rijntakken-model.

3.5 Initiële condities en stuwstanden

Omdat met afvoergolven wordt gerekend, dienen de initiële condities (waterstanden, snelheden, stuwpositie) van de berekeningen te passen bij de afvoer aan het begin van de afvoergolf. Deze afvoeren zijn weergegeven in Tabel 3.3. De initiële condities zijn berekend door 10 dagen stationaire afvoer door te rekenen vanuit een 'droog' model, dat wil zeggen een situatie waarbij enkel het zomerbed stromend is. Voor de lateralen zijn ook de beginwaarden gehanteerd. Merk op dat de instellingen/regelingen van de Bypass Kampen en de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld hier niet relevant zijn, omdat deze nog niet actief zijn. Voor de productieberekeningen zijn de stuwstanden zoals berekend met de stationaire berekeningen overgenomen in de sturingsbestanden. Dit is conform WTI2011.

Piekafvoer Lobith [m ³ /s]	Afvoer beginvoorwaarde [m ³ /s]
6.000	1.440
8.000	1.920
10.000	2.400
13.000	3.120
16.000	3.840
16.500	3.960
17.000	4.080
18.000	4.320
20.000	4.800
22.000	5.280
24.000	5.760

Tabel 3.3 Afvoer bij de start van de afvoergolven voor iedere stochastwaarde van de afvoer bij Lobith.

4 Werkwijze uitvoeren productieberekeningen

4.1 Testfase

Een aantal testberekeningen met de uitgeleverde modelschematisaties als basis zijn succesvol uitgevoerd. De resultaten van de testberekeningen van (RHDHV, 2014) konden worden gereproduceerd. Alle productieberekeningen zijn uiteindelijk allemaal uitgevoerd met exact dezelfde modelschematisatie.

4.2 Opzet berekeningen en gebruik Amazon

4.2.1 Naamgeving van de berekeningen

De productieberekeningen zijn, net als voor de overige watersystemen, uitgevoerd bij Amazon. Er zijn geen berekeningen die afhankelijk van elkaar zijn (geen doorstarts). Daarom is iedere berekening uitgevoerd en opgeslagen onder een unieke mapnaam:

- Bovriv_Rijn_01_Q_<piekafvoer>

Voor iedere piekafvoer is een siminp-file gegenereerd met de verwijzing naar de juiste randvoorwaarden en initiële condities voor die berekening; tevens is een runscript gegenereerd voor de aansturing van de berekening op Amazon.

4.2.2 Benodigde bestanden voor een berekening

Iedere berekening bevat, voor het submitten van de berekening bij Amazon, de volgende bestanden:

```
run
siminp.<somid>
```

Het bestand 'run' wordt gebruikt voor de aansturing van de berekening bij Amazon. De siminp-file is de invoer voor de WAQUA-berekeningen, samen met "ALGwaq". ALGwaq bevat een verzameling invoerbestanden die gelijk zijn voor alle berekeningen:

```
[DATA-ARCHIEF]\1.Bovenrivieren\3.Generatie_productieberekeningen\
1.Waterstanden\0.Amazon\ALGwaq\1.WAQUA_Rijn
```

Tabel 4.1 geeft een overzicht van de inhoud van ALGwaq.

bodem\	Bodemligging
initieel\	Initiële condities: zie paragraaf 3.5
kunstwerken\	Aansturing van stuwen, regelwerken en hoogwatergeul Veessen-Wapenveld
locaties\	Definities van alle locaties, inclusief uitvoerlocaties
overlaten\	Overlaten
randen\	Modelbegrenzing
randvw\	Randvoorwaarden voor stroming en (stof) transport
ruwheid\	Ruwheid
schotjes\	Hoogwatervrije lijnen en vlakken
uitvoer\	Checkpoints
rijn40m_5-v4.rgf	Rekenrooster

Tabel 4.1 Invoerbestanden die gelijk zijn voor alle berekeningen (ALGwaq).

4.3 Uitvoer van een berekening

Alle uitvoer is opgeslagen in het data-archief:

[DATA-ARCHIEF]\1.Bovenrivieren\4.Uitvoeren_productiesommen\1.Waterstanden\
BOVRIV_Rijn_01_Q_<piekafvoer>

Een succesvol uitgevoerde berekening bevat de volgende bestanden in het data-archief:

```
coppre-r.<somid>
<somid>_bypass_CTRV.csv
<somid>_bypass_CTRV.dat
<somid>_ctrvT.nc
<somid>_max25_CTR.txt
<somid>_max25_CTRV.txt
<somid>_max25_ZWL.txt
<somid>_Qverd_CTRV.csv
<somid>_Qverd_CTRV.dat
<somid>_randen_CTRV.csv
<somid>_randen_CTRV.dat
<somid>_SEPMAXTIM
<somid>_SEPMAXVAL
<somid>_WETMAXVAL
<somid>_zwlT.nc
run
siminp.<somid>
waqpre-m.<somid>
waqpro-m.<somid>
BOVRIV_Rijn_01_Q_<piekafvoer>.out
```

Waarbij <somid> de id van de berekening is.

Om zo efficiënt mogelijk met opslagruimte om te gaan zijn de SDS-files van de berekeningen niet bewaard, maar is de benodigde uitvoer met 'getdata' uit de SDS-files uitgelezen. De uitvoer zijn de bestanden die beginnen met <somid>_ en bevatten de volgende informatie:

- Max25: de 'ascii-max25-reeks'-uitvoer van getdata voor de genoemde variabelen (CTR/CTRV/ZWL);
- MAX... en WETMAXVAL zijn boxfiles met WAQUA-registratie van maximale waterstanden, snelheden, etc. Daarbij is WETMAXVAL gelijk aan SEPMAXVAL, maar zijn de droge punten op NaN gezet (door getdata);
- <somid>_bypass_CTRV.* bevat tijdreeksen van de stations bij de in- en uitstroom van de Bypass Kampen;
- <somid>_Qverd_CTRV.* bevat tijdreeksen van de stations in het splitsingspuntengebied (waarmee de afvoerverdeling bepaald kan worden);
- <somid>_randen_CTRV.* bevat tijdreeksen van de open randen van het model;
- De netcdf-files <somid>_<var>T.nc bevatten tijdreeksen van afvoeren (var=ctrv) en waterstanden (var=zwl).

4.4 Controle of een berekening succesvol is uitgevoerd

Een WAQUA-berekening bestaat uit twee onderdelen:

- De preprocessor WAQPRE, waarin de invoer van de berekening (de zogenaamde siminp) wordt gecontroleerd en samengevoegd tot een voor de processor bruikbaar bestand (een SDS-file).
- De processor WAQPRO, waardoor de daadwerkelijke berekening wordt uitgevoerd.

Zowel WAQPRE als WAQPRO levert een message-file. Wanneer de berekening correct is verlopen, eindigt dit bestand met de melding "program ended successfully". De eerste automatische controle is dat Matlab beide message-files doorzoekt op deze melding. Wanneer deze melding niet verschijnt in het message-file van WAQPRE, is er meestal sprake van een fout in de invoer. Wanneer de invoer correct is, en de melding "program ended successfully" niet verschijnt in het message-file van WAQPRO, is het crashen van de berekening veelal de oorzaak. Dit kan het gevolg zijn van een hardwareprobleem (bijvoorbeeld onvoldoende geheugen) of van instabiliteit in de berekening zelf.

De SDS-files zijn niet bewaard; met getdata is een aantal bestanden gegenereerd, zie paragraaf 4.3. Bij de naverwerking van de berekeningen (paragraaf 5.2) is gecontroleerd of alle benodigde getdata-bestanden aanwezig zijn (wanneer dat niet het geval is, is de berekening mislukt).

5 Fysische controle productieberekeningen

5.1 Inleiding

In het voorgaande hoofdstuk is toegelicht hoe de berekeningen zijn opgezet en uitgevoerd bij Amazon. De fysische controle is uitgevoerd door met Matlabscripts de data te verwerken tot figuren en (Excel)tabellen. De basis van het controlescript is beschreven in paragraaf 5.2. Vervolgens is in paragraaf 5.3 een aantal algemene bevindingen beschreven, waaronder ook de meldingen uit de WAQUA-preprocessor (waqpre-m) en –processor (waqpro-m).

In het vervolg van dit hoofdstuk is gecontroleerd of de berekeningen correct en betrouwbaar zijn. Concreet zijn de volgende aspecten geanalyseerd/gecontroleerd:

- Controle vertaalslag afvoer Emmerich naar Lobith (paragraaf 5.4);
- Consistentie in waterstanden en waterstandsverlopen (paragraaf 5.5);
- Functioneren van specifieke elementen in het WAQUA-model (paragraaf 5.6);
- Analyse van zogenaamde 'max13'-waarden, dat een goede maat is voor het aantal droge punten in een berekening (paragraaf 5.7);
- Analyse van instabiliteiten in de maximale waterstand (paragraaf 5.8);
- Analyse van instabiliteiten in het tijdsverloop van waterstandstijdreeksen (paragraaf 5.9);
- Analyse van waterstandgradiënten in het horizontale vlak (paragraaf 5.10).

5.2 Post-processing van de berekeningen

De productieberekeningen zijn, na gereedkomen van de berekening op Amazon, verwerkt met het script 'BOVRIV_FysContr_MAIN.m'. Dit verwerkingsscript gebruikt bestanden die op Amazon met getdata zijn aangemaakt. De uitvoer van deze dataverwerking is opgeslagen in het data-archief (zie Bijlage A). Het Matlabscript gebruikt de "OpenEarthTools" (versie van 30 januari 2015), zie [DATA-ARCHIEF]\7_oet_matlab\ en informatie van de uitvoerlocaties als invoer (stations_rijn_mnxy.xlsx). Een aantal bestanden wordt via import-functies ingelezen in Matlab en vervolgens opgeslagen als mat-files (boxfiles en maximale waterstanden). Deze mat-files zijn opgeslagen in het data-archief onder '4_uitvoeren_productiesommen'.

Alle matlabscripts en de resultaten van de post-processing zijn te vinden in het data-archief, zie Tabel A.1.

5.3 Algemene constatering/bevindingen

5.3.1 Meldingen WAQPRE

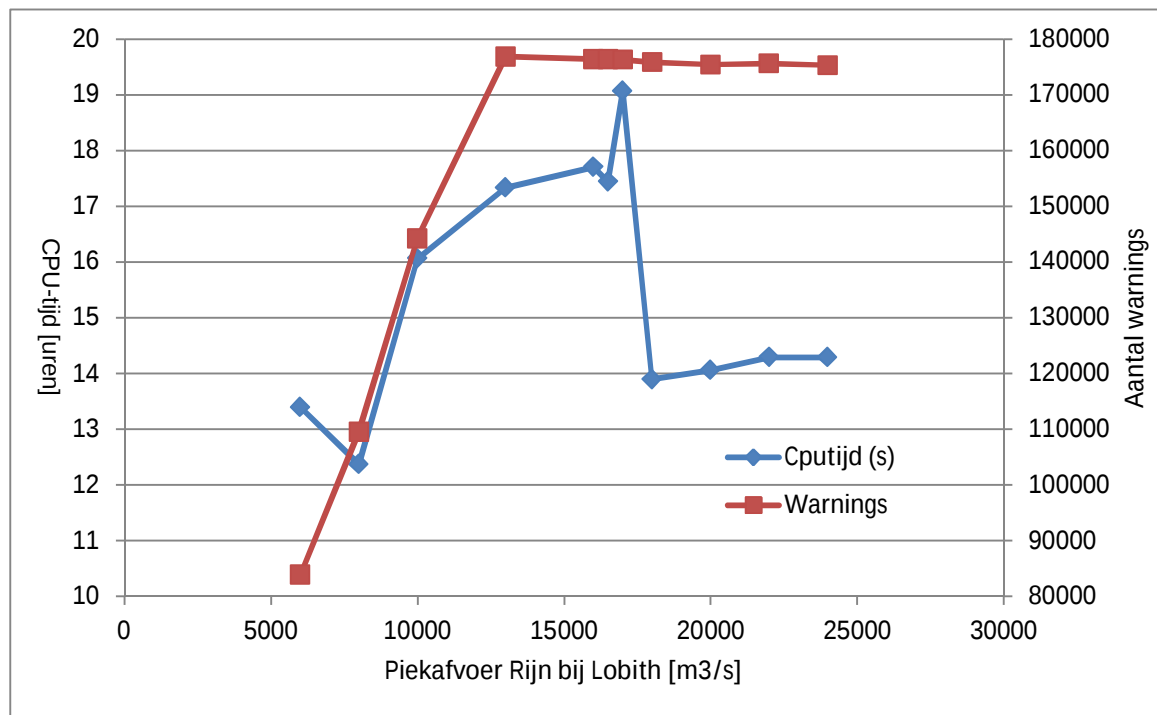
De WAQUA-preprocessor geeft voor alle berekeningen een totaal van 64 warnings:

- 1 melding "The use of the keyword TICVAL is discouraged".
- 3 meldingen die betrekking hebben op cross-secties op dezelfde locatie maar met verschillende namen ('Q-DrielbovDrielben' and 'Q-DrielbeAmerongbo' / 'Q-AmeronboAmeronbe' and 'Q-AmeronbeCulmbbrg' / 'Q-CulmbbrgHagestbo' and 'Q-HagestboHagestbe').
- 60 meldingen "Curve (sequence nr X) is a point-curve".

Deze meldingen zijn allen niet kritisch en geen probleem voor de productieberekeningen.

5.3.2 Meldingen WAQPRO

Het Rijn-model is gedraaid op 8 cores/partities. Voor iedere partitie wordt aan het einde van de berekening het aantal errors, warnings en gebruikte CPU-tijd geregistreerd. Omdat de berekeningen allemaal op dezelfde hardware zijn uitgevoerd, geeft deze informatie een indicatie of de berekeningen consistent zijn verlopen.



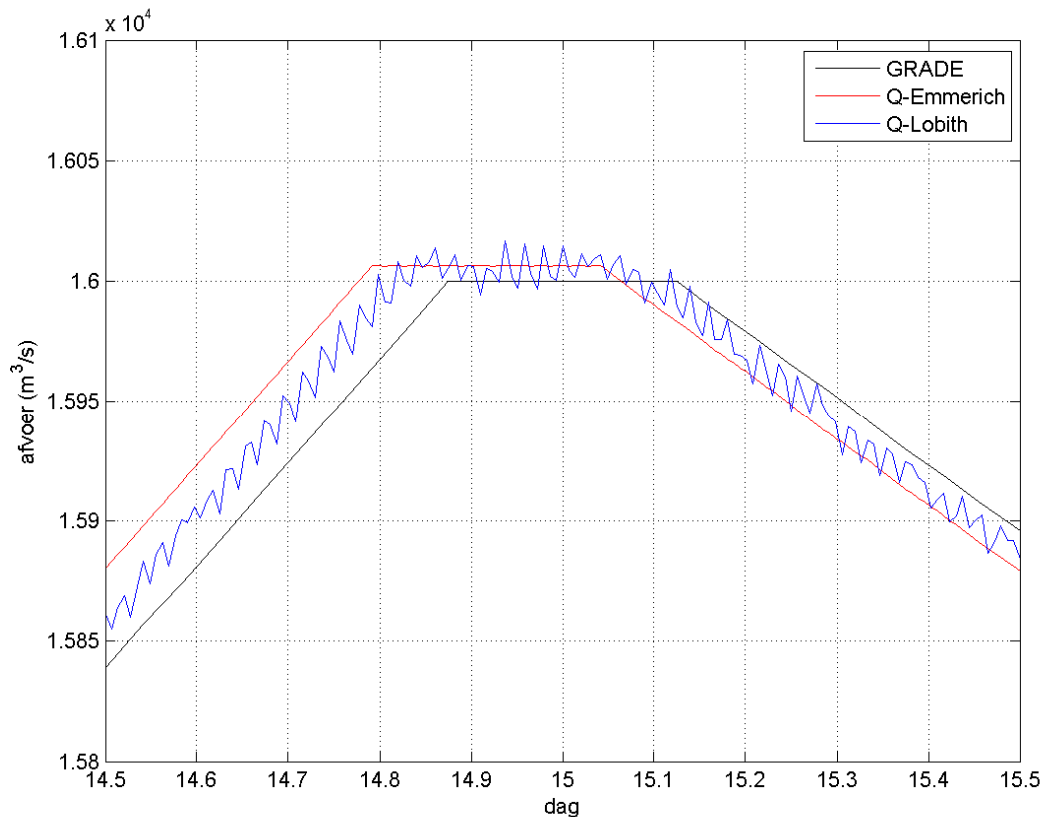
Figuur 5.1 Aantal warnings en gebruikte cputijd per berekening (gespecificeerd als piekaafvoer bij Lobith).

Er zijn geen errors geconstateerd. Figuur 5.1 geeft een overzicht van de rekentijd en het aantal warnings per berekening. De warnings betreffen vooral meldingen dat geen convergentie wordt bereikt binnen het gestelde maximaal aantal iteraties (itermax = 20). Vaak betreft dit locaties in de uiterwaarden (droog/nat worden van punten). Er is dan ook een duidelijk verband tussen het aantal warnings en de piekaafvoer bij Lobith, voor hogere afvoeren neemt het aantal meldingen toe. Wanneer alle uiterwaarden geïnundeerd zijn neemt het aantal warnings niet verder toe.

De gemiddelde rekentijd bedraagt ongeveer 15 uur. De laagste afvoer duurt relatief lang, waarschijnlijk door actieve stuwsturing. Rond 16.000/16.500 m³/s wordt de rekentijd waarschijnlijk beïnvloed door actieve sturing van de regelwerken bij de splitsingspunten. Daarboven neemt de rekentijd weer af, omdat de regelwerken in één positie blijven (i.e., ze zijn volledig geopend).

5.4 Controle vertaling Emmerich -> Lobith

Figuur 5.2 geeft het resultaat van de vertaalslag Emmerich → Lobith met de hulpprogrammatuur bij een piekaafvoer van 16.000 m³/s. In Bijlage B is een beschrijving opgenomen van het proces om de GRADE-uitvoer te vertalen naar invoer voor het WAQUA-model. De GRADE-golf wordt goed benaderd, met een kleine verschuiving bij de was van de golf. De piek komt circa één uur te vroeg aan bij Lobith. Opvallend zijn de instabiliteiten in afvoer (golfbeweging), die bij een piekaafvoer van 24.000 m³/s oplopen tot ca. 50 m³/s. Dit is een bekend modelartefact en is geaccepteerd.



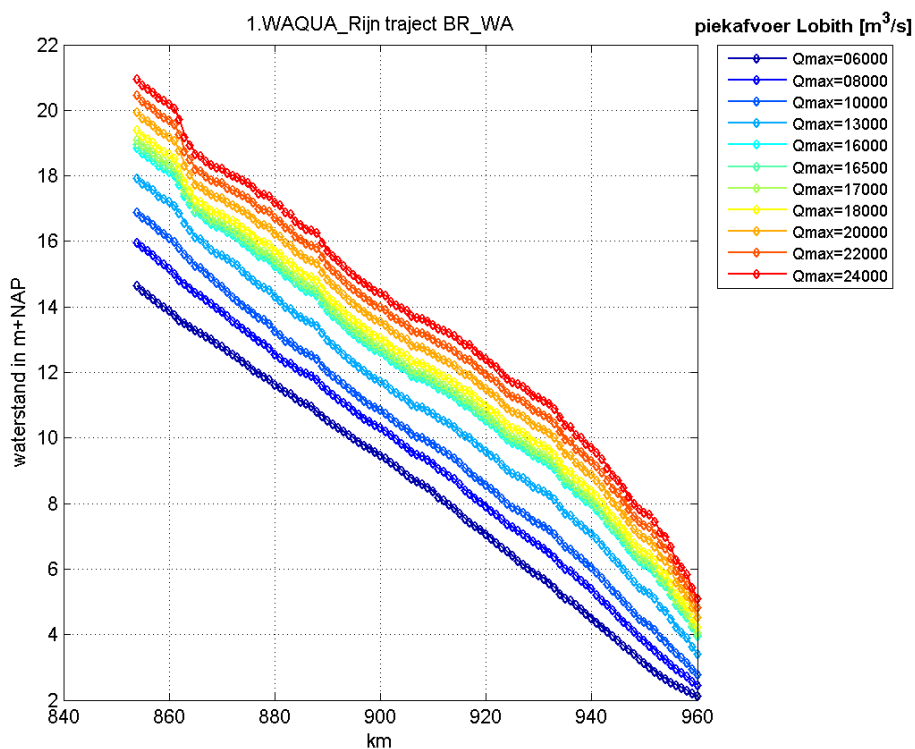
Figuur 5.2 Vertaalslag bovenrand Lobith/Emmerich bij een piekafvoer van 16.000 m³/s.

5.5 Analyse maximale waterstanden en afvoeren in de as van de rivier

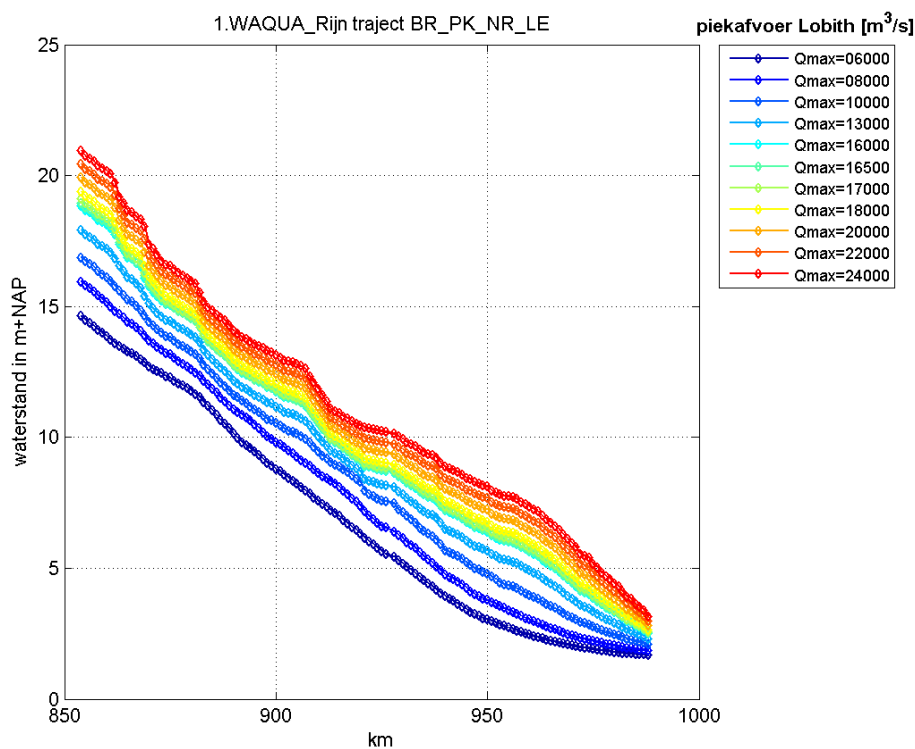
De maximale waterstanden in de as van de rivier en afvoeren in km-raaien geven een goede indicatie of berekeningen betrouwbaar en fysisch realistisch zijn.

Voor deze analyse hanteren we de 'max13'-waarden zoals die door getdata worden bepaald op basis van tijdreeksen van uitvoerlocaties, hier de aslocaties. De 'max13'-waarden worden bepaald door rond de maximale waarde uit de tijdreeks een gemiddelde te berekenen van de zes waarden voor en de zes waarden na de maximale waarde. Dat de parameter 'max13' voorzichtig gebruikt moet worden, blijkt uit (als voorbeeld) Figuur C.1 in Bijlage C.

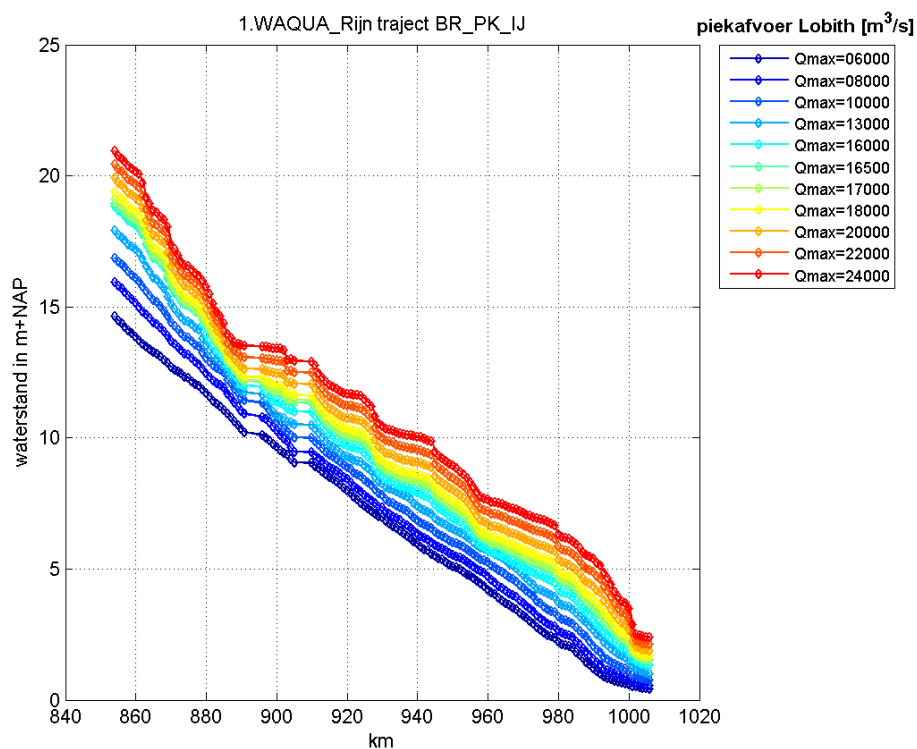
Figuur 5.3 t/m Figuur 5.5 geven de maximale waterstanden (max13) voor de verschillende trajecten in de Rijntakken. Het gedrag is consistent in die zin dat de waterstand toeneemt bij toenemende piekafvoer op de Rijntakken.



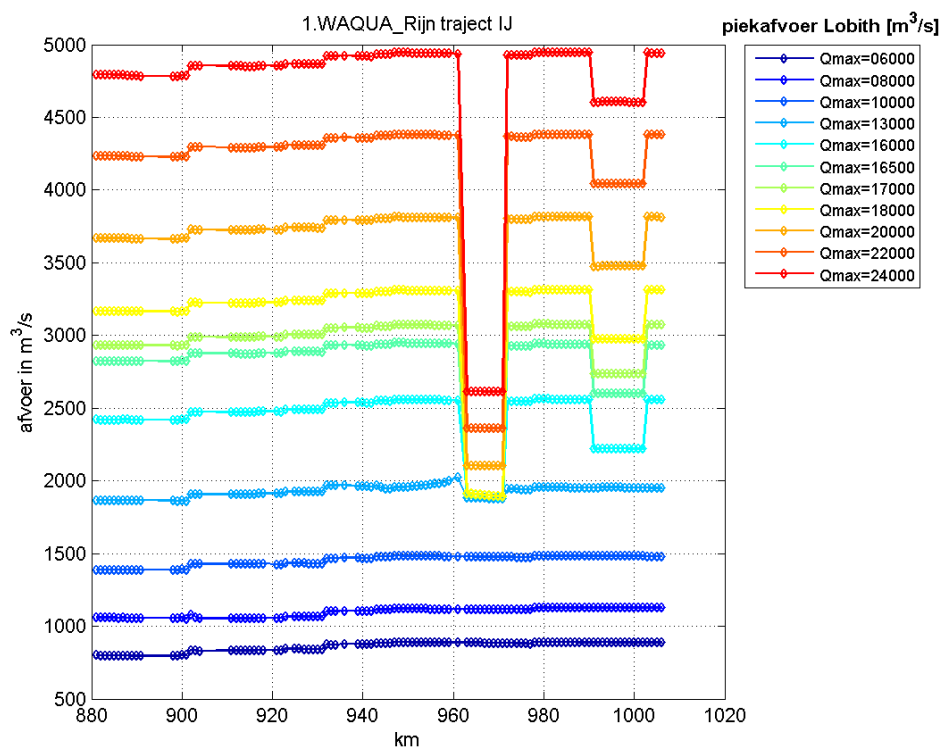
Figuur 5.3 Max13-waterstand traject Boven-Rijn (BR) Waal (WL).



Figuur 5.4 Max13-waterstand traject Boven-Rijn (BR), Pannerdensch Kanaal (PK), Neder-Rijn (NR) en Lek (LE).



Figuur 5.5 Max13-waterstand traject Boven-Rijn (BR), Pannerdensch Kanaal (PK) en IJssel (IJ).



Figuur 5.6 Maximale afvoer op de IJssel exclusief hoogwatergeul Veessen-Wapenveld en bypass Kampen.

Figuur 5.6 geeft de maximale afvoeren (max13) voor de IJssel waarbij de afvoer door de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld en de bypass Kampen niet is meegenomen. Waar de hoogwatergeul en de bypass weer aantakken (rkm 971 respectievelijk rkm 1002) aan de IJssel is klopt de totale afvoer weer. Het gedrag is consistent in die zin dat de afvoer op de IJssel toeneemt bij toenemende piekafvoer bij Lobith. Verder is het effect van laterale toestromingen goed te zien in de kleine stijgingen. Tenslotte is ook het effect van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld en de Bypass Kampen goed te zien in het figuur.

Opmerkingen waterstand-figuren:

- op de Lek ontbreekt km 927 in de WAQUA-invoer
- op de IJssel: twee bochtafsnijdingen tussen km 890 en 910 met ontbrekende rivierkilometers

Opmerkingen afvoer-figuren:

- Op de Boven-Rijn ontbreken km868/869 (resp C2015 en C2016).
- Op de Waal ontbreken km872/873 (resp C2019 en C2020).
- Op de Neder-Rijn ontbreken km879/880 (resp C2119 en C2120)
- Reden bovenstaande: zie de onderstaande toelichting uit de siminp:
 - # km-raaien WA868, WA869, PK868, PK869, NR879, NR880, IJ879
 - # en IJ880 (C2015, C2016, C2108, C2109, C2119, C2120, C2228 en
 - # C2229) zijn verwijderd, omdat deze niet alleen over de eigen
 - # tak gaan, maar ook nog een deel over de andere tak. op de IJssel: twee
 - # bochtafsnijdingen tussen km 890 en 910

Op de IJssel ontbreekt, naast een tweetal bochtafsnijdingen, nog een aantal punten. Dat zijn afvoerraaie die meer dan 90° gedraaid liggen tov het rekenrooster, waardoor deze als "USECTIONS" moeten worden gedefinieerd. In siminp staat hierover:

- # U-secties worden niet gebruikt, deze gaan veelal in langs-
- # richting door de rivier en geven dus geen goed beeld van de
- # afvoer ter plekke van de genoemde kilometerraai

5.6 Analyse functioneren regelwerken, stuwen en hoogwatergeulen

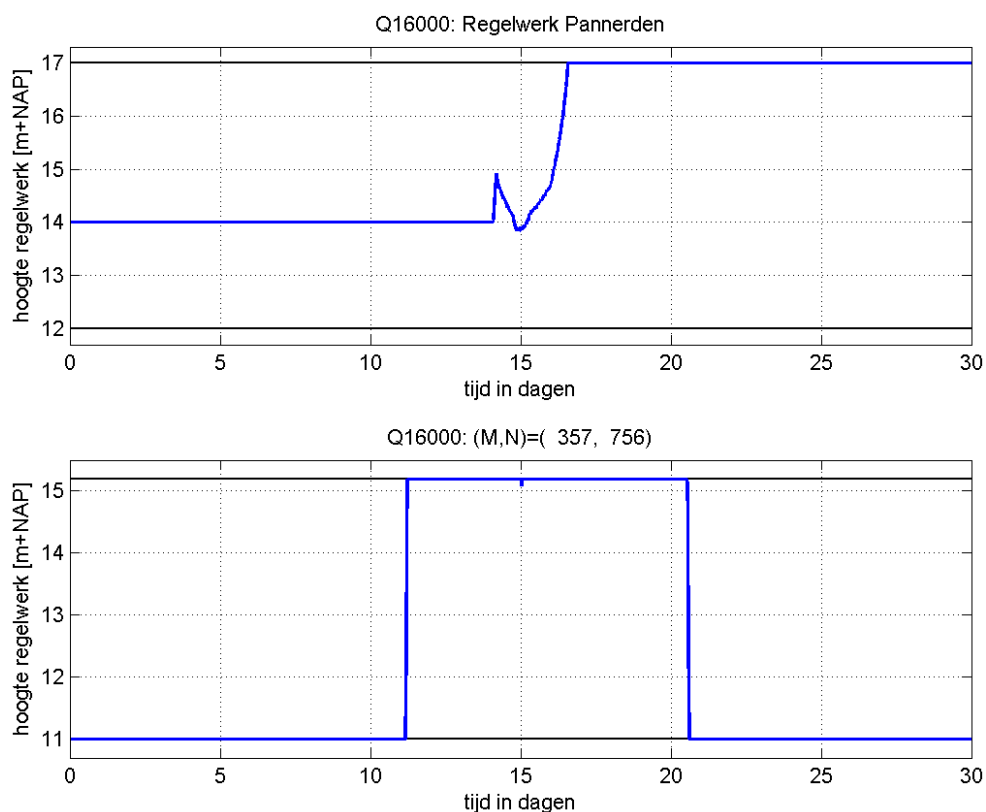
5.6.1 Regelwerken Pannerden en Hondsbroeksche Pleij (afvoerverdeling Rijntakken)

Tabel 5.1 geeft de afvoerverdeling bij de splitsingspunten weer (max13-waarden). Bij een afvoer van 16.000 m³/s wordt de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling in stand gehouden. Daarboven neemt het aandeel van de Waal steeds verder af tot circa 3/5 deel van de afvoer; het restant van 2/5 deel verdeelt zich vrijwel gelijk naar zowel de Neder-Rijn als de IJssel.

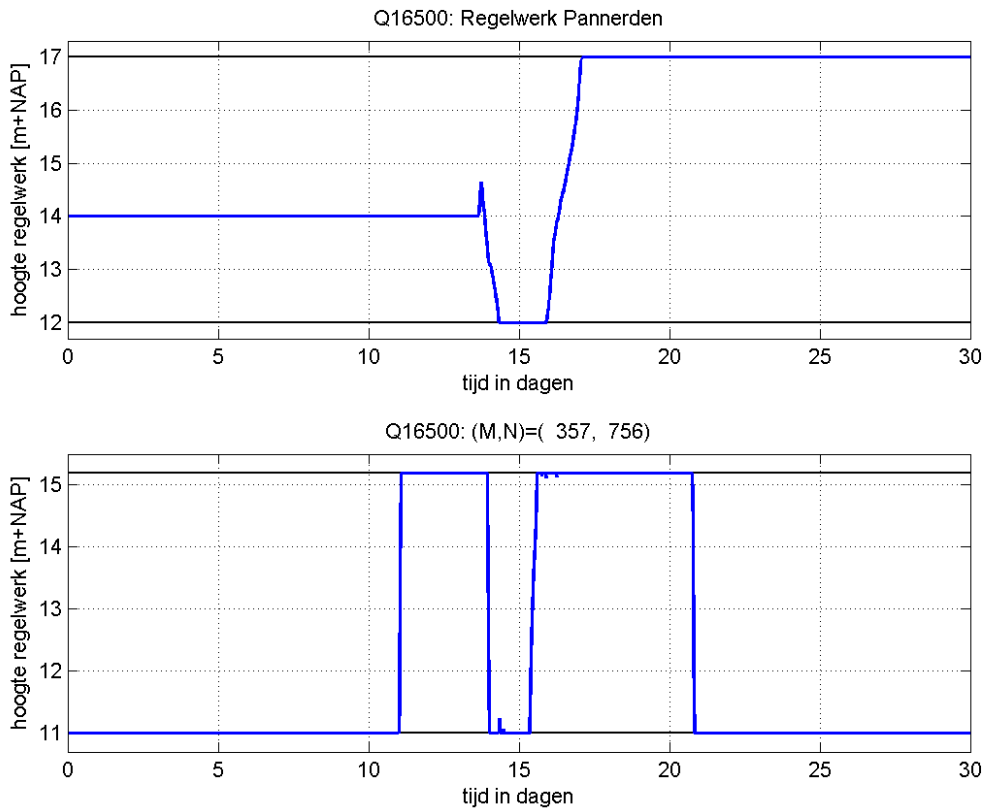
max13	6000	8000	10000	13000	16000	16500	17000	18000	20000	22000	24000
Q-Emmerich	6006.27	8006.28	10006.12	13005.94	16006.31	16506.28	17006.27	18006.29	20006.28	22006.31	24005.61
Q-Lobith	6001.23	7983.34	9996.92	13000.13	16005.79	16501.90	17001.57	18002.00	20001.35	22002.83	23998.01
Q-LobithPannkop	6001.09	7983.08	9996.79	13000.09	16005.74	16502.18	17001.40	18001.67	20001.29	22002.55	23997.95
Q-Waal	4098.91	5375.04	6526.68	8395.17	10174.06	10291.93	10577.33	11136.96	12199.67	13204.83	14198.55
Q-Pankanaal	1894.41	2573.19	3464.41	4601.44	5835.65	6209.77	6418.86	6861.31	7796.36	8795.16	9795.00
Q-Nederrijn	1079.46	1499.02	2083.80	2736.80	3380.50	3383.38	3487.22	3694.95	4129.44	4558.36	5001.58
Q-Yssel	803.69	1060.19	1389.85	1866.09	2421.53	2826.17	2933.15	3167.70	3669.70	4236.43	4794.67
Q-RW-Hpleij	8.14	20.07	21.37	21.22	20.45	871.83	913.25	1002.03	1150.84	1174.12	1183.84
Q-RW-Pannerden			333.25	703.00	1137.16	1586.34	1654.87	1787.10	1970.69	2152.62	2369.17
fracties	6000	8000	10000	13000	16000	16500	17000	18000	20000	22000	24000
Q-Waal	68.30%	67.33%	65.29%	64.58%	63.56%	62.37%	62.21%	61.87%	60.99%	60.01%	59.17%
Q-Pankanaal	31.57%	32.23%	34.65%	35.40%	36.46%	37.63%	37.75%	38.11%	38.98%	39.97%	40.82%
Q-Nederrijn	17.99%	18.78%	20.84%	21.05%	21.12%	20.50%	20.51%	20.53%	20.65%	20.72%	20.84%
Q-Yssel	13.39%	13.28%	13.90%	14.35%	15.13%	17.13%	17.25%	17.60%	18.35%	19.25%	19.98%

Tabel 5.1 Afvoerverdeling splitsingspunten.

Figuur 5.7 en Figuur 5.8 geven de standen van Regelwerk Pannerden en Hondsbroeksche Pleij weer bij piekafvoeren van 16.000 m³/s respectievelijk 16.500 m³/s. Voor de laatste is de 'barrier' getoond die (als enige) open staat vanaf het begin van de berekening en vanaf een Boven-Rijnaafvoer van 10.000 m³/s dicht wordt gezet. In de figuren is te zien dat Regelwerk Pannerden bij 16.000 m³/s nog voldoende regelbereik heeft, maar bij 16.500 m³/s niet meer (de drempel staat in de laagste stand). De Hondsbroeksche Pleij zit bij 16.500 m³/s heel dicht bij het regelbereik (er is nog een kleine schommeling in de drempelstand te zien). Vanaf 16.500 m³/s is dan ook te zien dat de Neder-Rijn/Lek niet meer wordt ontzien en de afvoer toeneemt tot boven de 3.380 m³/s (zie ook Tabel 5.1).



Figuur 5.7 Standen Regelwerk Pannerden (boven) en Hondsbroeksche Pleij (onder) voor een piekafvoer van 16.000 m³/s.



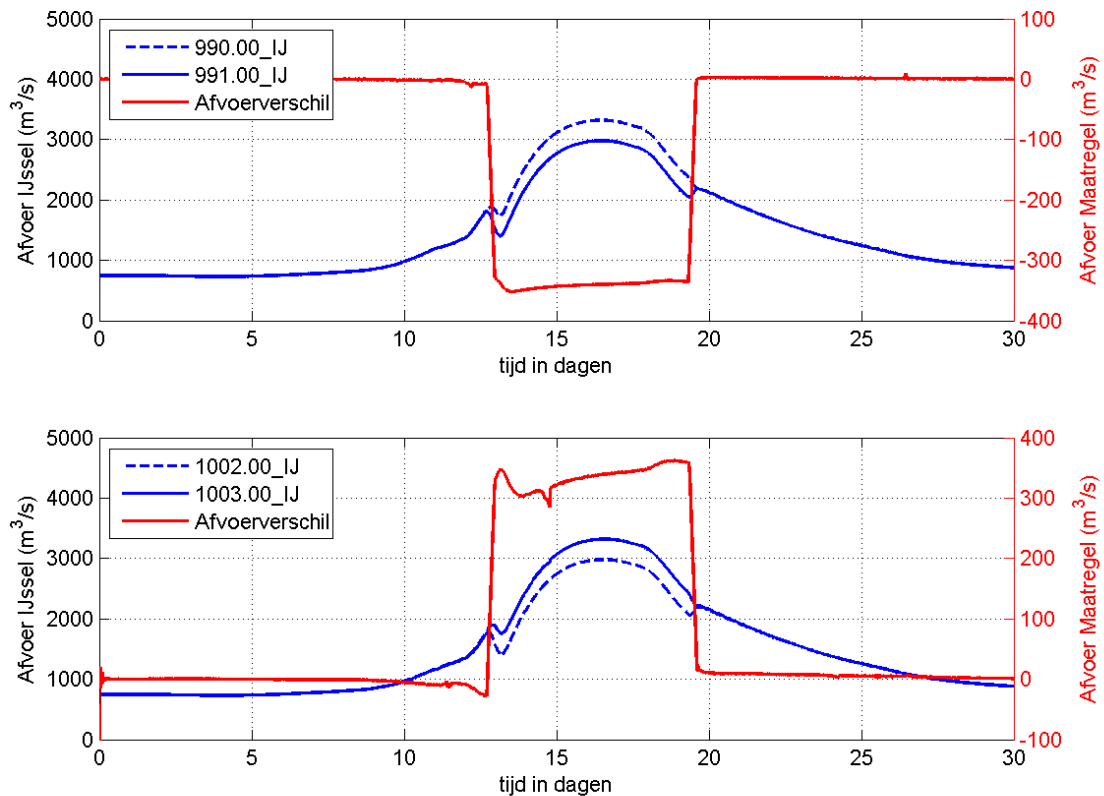
Figuur 5.8 Standen Regelwerk Pannerden (boven) en Hondsbroeksche Pleij voor een piekafvoer van 16.500 m³/s.

5.6.2 Stuwen

De stuwen op de Nederrijn-Lek zijn volledig geopend ten tijde van de piek van de golf (voor de initiële posities zie paragraaf 3.5).

5.6.3 Bypass Kampen

Zie paragraaf 3.3 voor de implementatie van de Bypass Kampen in de WAQUA-schematisatie (die is gebaseerd op Beyer, 2014). In Figuur 5.9 is de afvoer door de Bypass Kampen weergegeven voor een piekafvoer van 16.000 m³/s bij Lobith. Er wordt op correcte wijze 340 m³/s aan de IJssel onttrokken tussen IJssel rkm 990 en 991. Deze hoeveelheid water wordt geloosd bij het Vossemeer en stroomt tussen rkm 1002 en 1003 weer terug in de IJssel. De spike in het afvoerverschil van de lozing rond 4.000 m³/s is structureel; bij deze afvoer inundeert Kampereiland (nabij rkm 1002 – 1003).

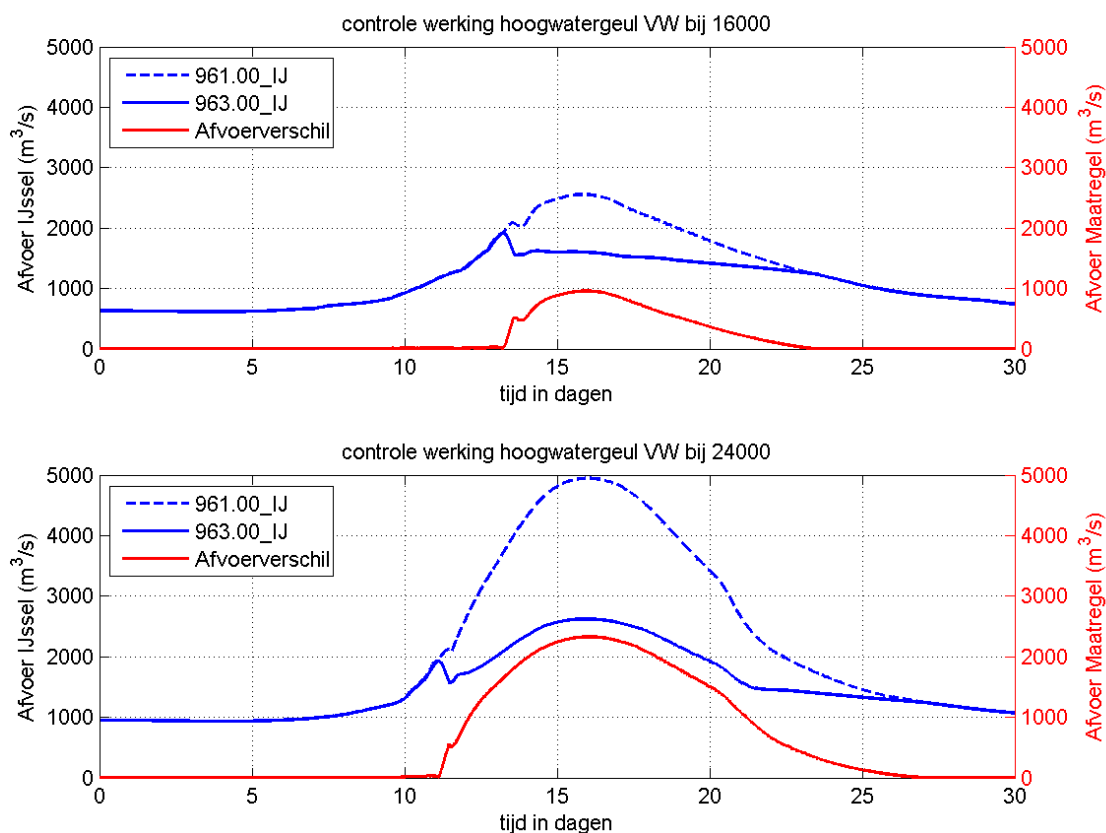


Figuur 5.9 Functioneren Bypass Kampen voor piekafvoer 16.000 m³/s bij Lobith.

5.6.4 Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld

Figuur 5.10 geeft het effect van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld op de IJsselaflow bij twee piekafvoeren te Lobith. Het gedrag is zoals verwacht. Bij een piekafvoer van 24.000 m³/s bij Lobith gaat ongeveer de helft van de IJsselaflow door de hoogwatergeul.

Tabel 5.2 geeft een overzicht van de afvoer door de hoogwatergeul bij de verschillende piekafvoeren bij Lobith. Tot en met een piekafvoer van 10.000 m³/s bij Lobith stroomt er geen water door de hoogwatergeul. Bij een piekafvoer van 24.000 m³/s bij Lobith stroomt 47% van de IJsselaflow door de hoogwatergeul.

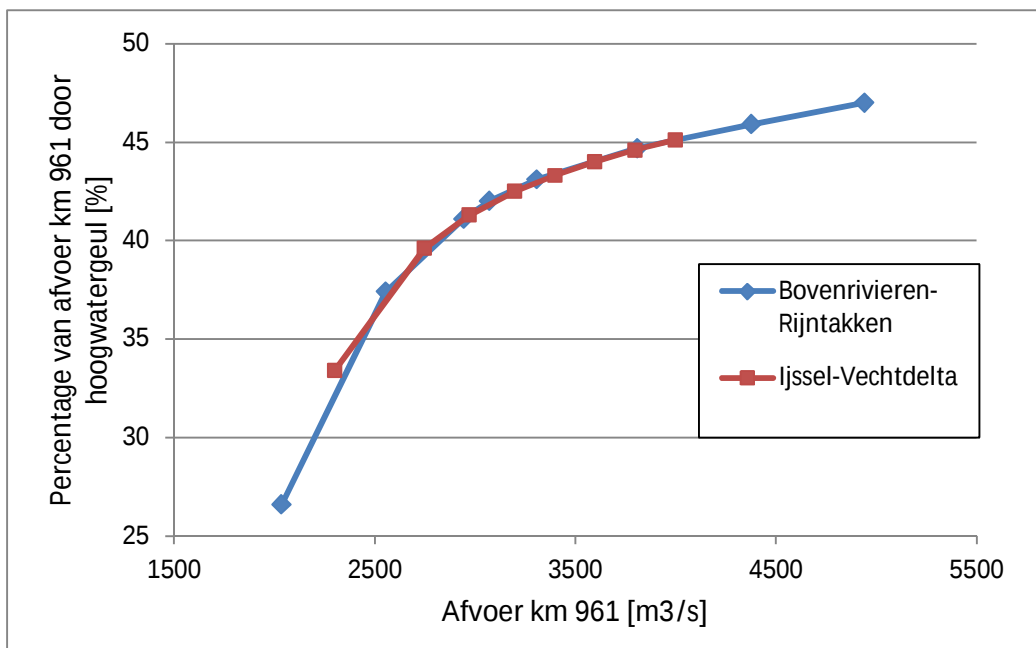


Figuur 5.10 Functioneren hoogwatergeul Veessen-Wapenveld voor piekafvoer 24.000 m³/s bij Lobith.

Piekafvoer Lobith [m ³ /s]	Afvoer rkm 961 [m ³ /s]	Afvoer hoogwater- geul [m ³ /s]	Percentage van afvoer rkm 961 (%)
6.000	888	0	0
8.000	1.120	0	0
10.000	1.481	0	0
13.000	2.036	541	26,6
16.000	2.556	955	37,4
16.500	2.944	1.211	41,1
17.000	3.071	1.289	42,0
18.000	3.308	1.424	43,1
20.000	3.810	1.703	44,7
22.000	4.377	2.009	45,9
24.000	4.940	2.319	47,0

Tabel 5.2 Afvoer door hoogwatergeul Veessen-Wapenveld.

In Figuur 5.11 is het afvoerpercentage dat is berekend in het IJVD-model (zie Deltares, 2016c) vergeleken met het afvoerpercentage zoals dat is berekend met het Rijntakken model. De percentages komen goed overeen, behalve voor een afvoer van 2.300 m³/s. Dat komt omdat bij de berekeningen voor de IJVD bij deze afvoer, de afvoer is geminimaliseerd op 2.300 m³/s, en dat is bij de berekening van de Rijntakken niet het geval.



Figuur 5.11 Vergelijking afvoer door de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld tussen IJVD en Bovenrivieren-Rijntakken.

5.7 Controle max13-waarden

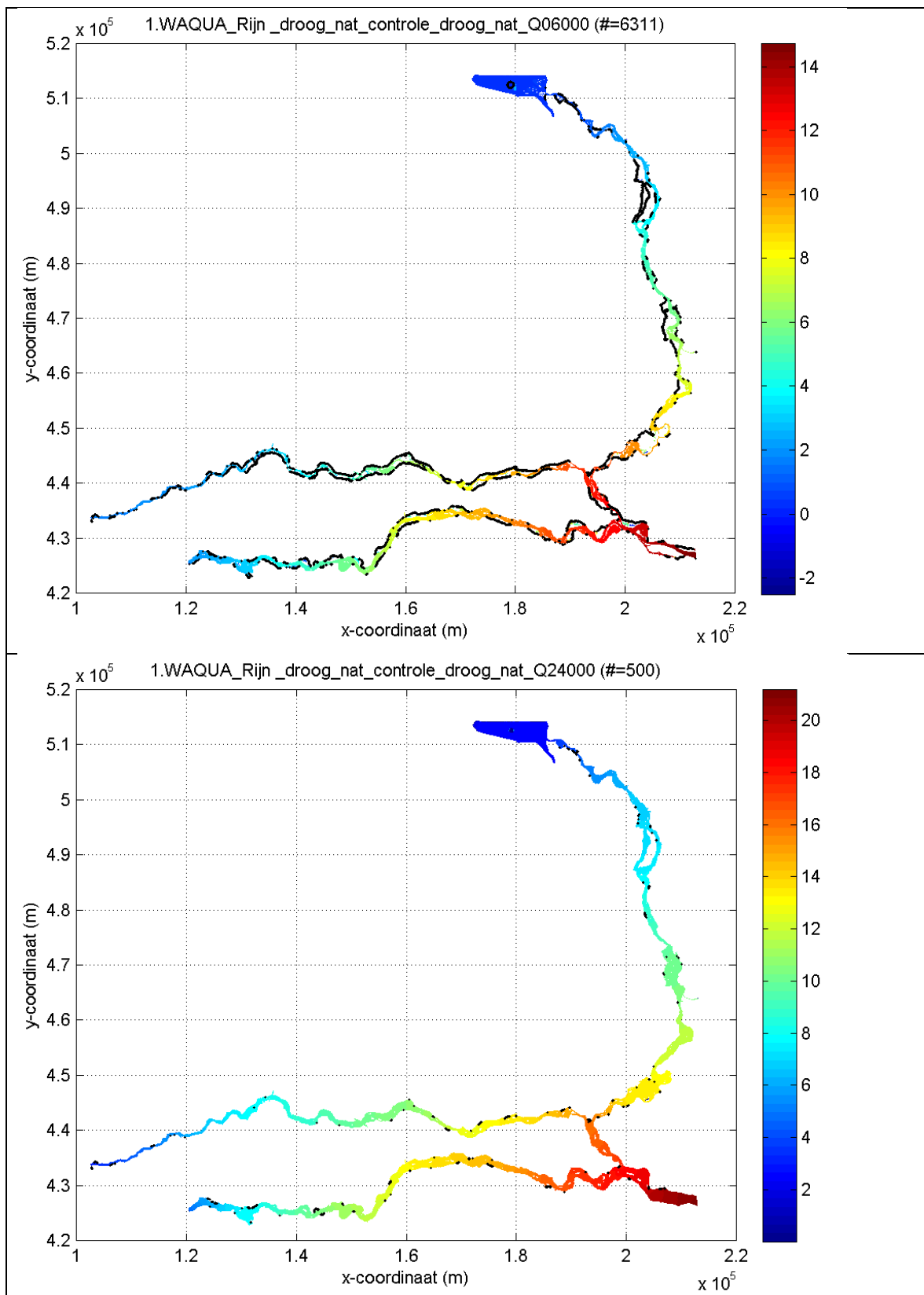
Voor iedere uitvoerlocatie is met 'getdata' de parameter 'max13' bepaald. Dit is het gemiddelde van de 13 uitvoerwaarden rond het maximum in een tijdreeks. De tijdreeks bevat uitvoerwaarden per 10 minuten; de max13-waarde is dan het gemiddelde in een periode van twee uur (één uur voor de maximale en één uur na de maximale waarde). Door verschillende oorzaken kan deze max13-waarde ontbreken (=nan), of anderszins afwijken van het gewenste maximum. Per uitvoerpunt zijn, op basis van de 'ascii-reeks-max25'-uitvoer, de volgende codes toegewezen:

- 0 als default
- 1: max13=nan
- 2: max13=nan & min=max
- 3: min=max=max13
- 4: $\text{abs}(\text{first-max}) < 0.0005$ (waterstand neemt alleen af t.o.v. initiële conditie)

De punten met code 1, 2 of 3 zijn aangemerkt als een potentieel droog punt.

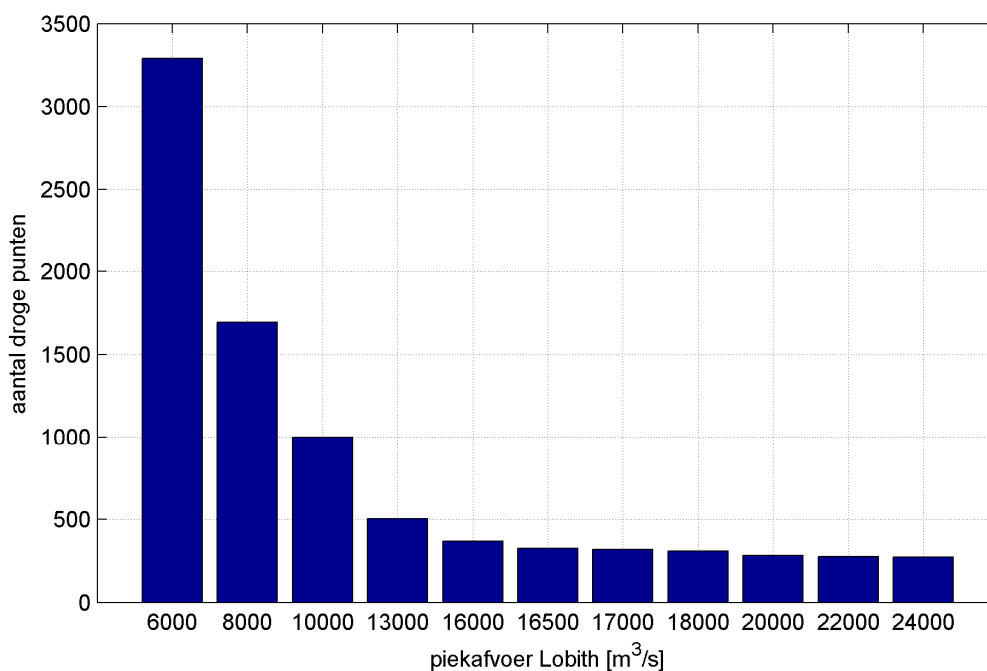
Figuur 5.12 geeft een overzicht van de locaties met minste/meeste droogval.

Er zijn 500 punten (inclusief BU-locaties) die permanent droog blijven. Zonder rekening te houden met de BU-locaties zijn dat er 272.



Figuur 5.12 Droge punten bij laagste afvoer (boven, 6311 incl. BU-locaties) en hoogste afvoer (onder, 500 incl. BU-locaties). De kleur geeft de maximale waterstand (m+NAP) voor de berekening weer.

Figuur 5.13 geeft het aantal droge punten als functie van de piekafvoer bij Lobith. Hier zit duidelijk een te verwachten patroon in: het aantal droge punten neemt af met stijgende afvoer. In totaal 272 uitvoerlocaties (zonder BU-locaties) zijn permanent droog, deze locaties zijn weergegeven in Tabel 5.3.



Figuur 5.13 Aantal droge punten als functie van de piekafvoer bij Lobith.

dijkkring	Nummer van de locatie
BR_60m_L_42	173;174
BR_60m_R_48	209;210;211;215;216;217;218;219;239;240;241;242
IJ_60m_L_11	148;149;184;185;196;197;200;201;203;205;206;207;208;214;215;216;217; 225
IJ_60m_L_47	72
IJ_60m_L_49	199
IJ_60m_L_52	327;328;329;398;402;553;554;555;556;557;558;559;560;562;621;758;765; 766
IJ_60m_L_nvt	62;101
IJ_60m_M_52	73;90
IJ_60m_R_10	142;143;144
IJ_60m_R_25	1
IJ_60m_R_48	22;24;45;46;85;86;96
IJ_60m_R_49	2;3
IJ_60m_R_51	79;94
IJ_60m_R_53	151;152;153;154;285;286;287;288
LE_60m_L_16	1;2;3;4;5;6;7;291;316;323;446;450;451;453;454;456
LE_60m_L_43	68;125
LE_60m_R_15	25;289;291;295;296;411;412;413;414;415;416;417
NR_60m_L_43	1547;1548;1549;1550;1551;1552;1553;1554;1555;1642;1673;1674;1675
NR_60m_R_45	12;14;15;16;17;18;19;20;37
NR_60m_R_47	167;168
NR_60m_R_nvt	268;269;270;271;272;273;274;300;363;364;385;386;387;388;389;390;391; 392;393;394;395;473;474;475;476;517;532
PK_60m_L_43	1127;1128
WA_60m_L_24	42;43
WA_60m_L_38	26;27;28;29;110;114;115;116;117;118;290
WA_60m_L_40	7;8;9
WA_60m_L_41	35;36;37;38;39;40;41;42;43;44;45;46;47;163;164;165;166;167;168;169;170; 171;172;173;174;175;232;234;235;236;237;238;288;329;330;393
WA_60m_L_42	1;2;3;162
WA_60m_R_16	512;515;536
WA_60m_R_43	175;176;177;198;199;200;253;512;519;520;521;593;710;711;712;713;714; 715;716;915;916;917;918;919;920;921;922;923;924;925;926;927;928;929; 1061;1062;1063;1064;1065;1066;1067;1068;1069;1070;1071;1076;1077; 1078;1079;1080;1093

Tabel 5.3 Uitvoerlocaties die in alle berekeningen droog zijn.

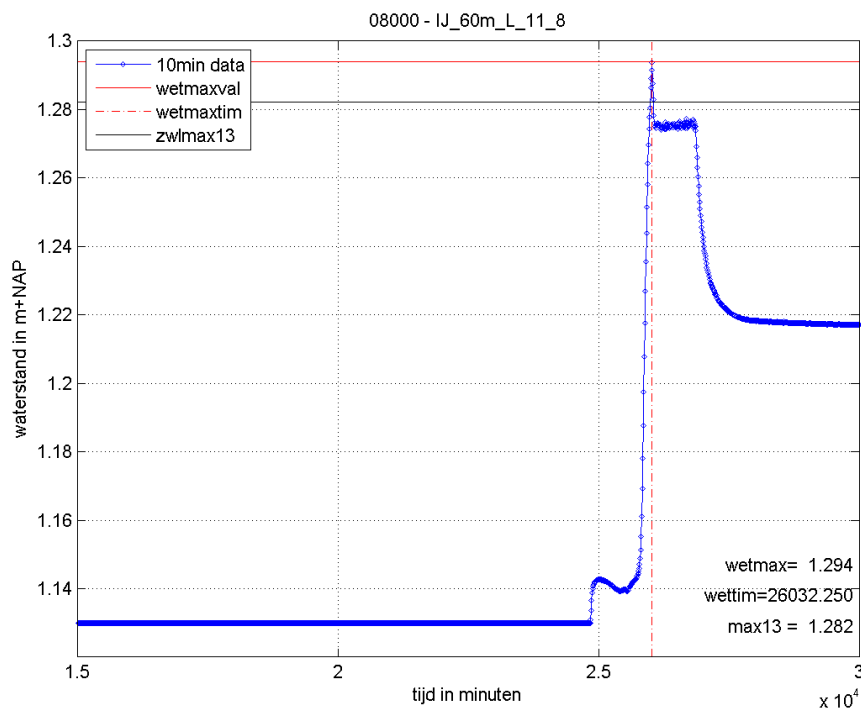
5.8 Instabiliteiten in de maximale waterstand

Voor iedere berekening is per rekenpunt de maximale waterstand op tijdstapniveau (0,125 minuut) bewaard: 'MAXSEPSEP'¹. Daarnaast is per uitvoerpunt een tijdreeks van de waterstand met een interval van 10 minuten opgeslagen. Middels een nabewerking met getdata is het gemiddelde over de 13 waarden rond het maximum uit deze tijdreeks bepaald: 'max13' (zie ook paragraaf 5.7). Wanneer het verschil tussen 'max13' en de daadwerkelijk maximaal berekende waterstand op tijdstapniveau 'MAXSEPSEP' groot is, kan dit duiden op een instabiliteit in de berekening. Daarom is voor iedere uitvoerlocatie de maximale

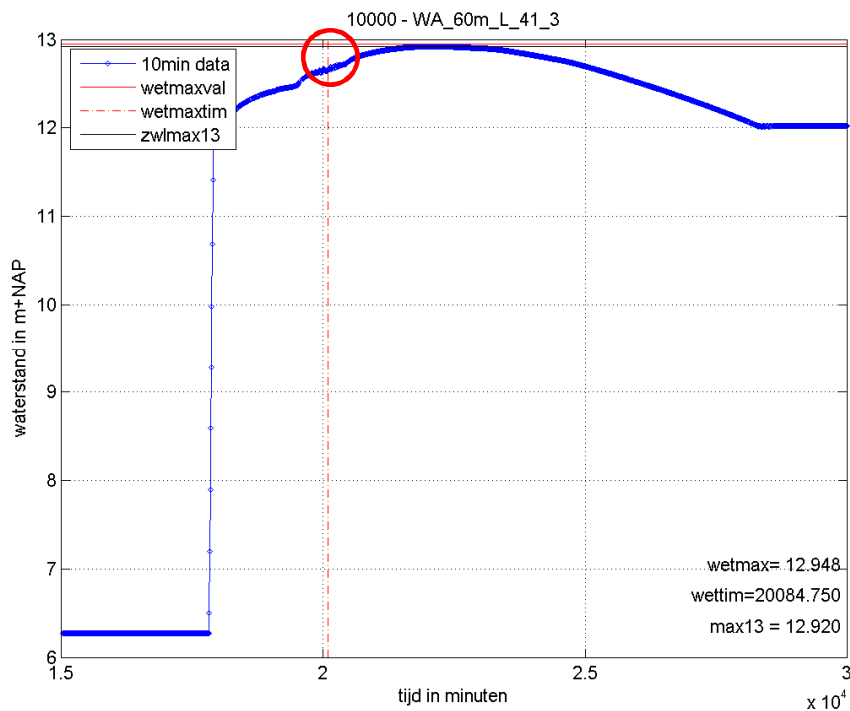
¹ In de data verwerking is dit vervangen door "WETMAXVAL" waardoor droge punten uit het waterstandsveld zijn gefilterd. "MAXSEPSEP" is in de tekst afgekort tot 'sepmax' en in de figuren tot 'wetmax' of 'sepmax'.

waterstand 'sepmax' vergeleken met de 'max13' (max13 minus sepmax). Dit verschil is altijd kleiner dan 0,0 m, als kritieke grens hanteren we $< -0,01$ m voor de Rijn (en ook voor de Maas). Dit criterium blijkt voldoende onderscheidend om alle instabiele locaties zichtbaar te krijgen. Een hogere waarde zou instabiele locaties goedkeuren; terwijl een lagere waarden niet zinvol is omdat dan ook 'natuurlijke' fluctuaties kunnen leiden tot afkeuring.

Een voorbeeld van een locatie waarbij bovenstaand criterium wordt overschreden is gegeven in Figuur 5.14: dit betreft een locatie die snel onderloopt, waardoor de max13 afwijkt van de sepmax. Een tweede voorbeeld is gegeven in Figuur 5.15, waarbij in het 10-minuten signaal geen afwijking te zien is, maar in de sepmax een uitschieter vertoont die kan duiden op instabiel gedrag.

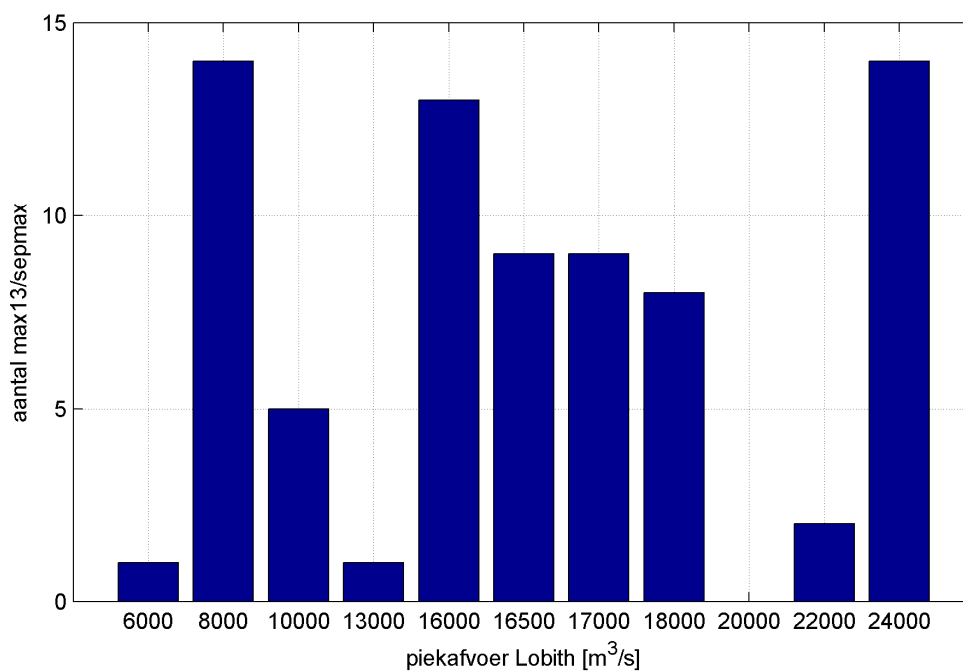


Figuur 5.14 Voorbeeld van een berekening waarbij het max13-criterium wordt overschreden.

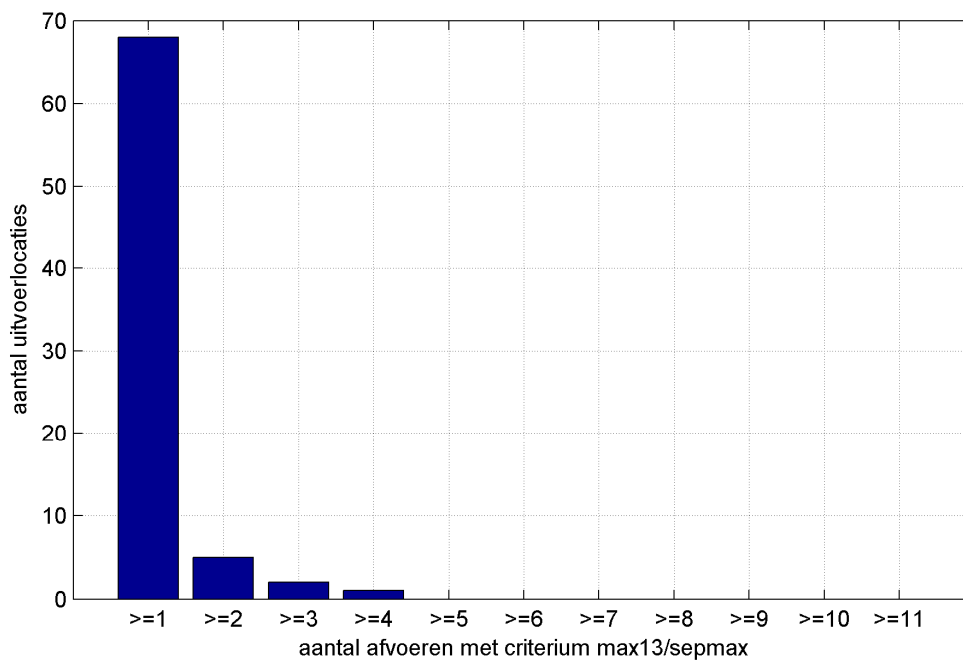


Figuur 5.15 Afwijking in de sepmax, die niet te zien is in het 10-minuten signaal.

Figuur 5.16 geeft een overzicht van het aantal uitvoerpunten dat per afvoer bij Lobith aan het criterium voldoet, ofwel locaties met een (te) groot verschil tussen max13 en sepmax. Het gaat (in vergelijking met RMM en IJVD) om een beperkt aantal locaties en lijkt willekeurig verdeeld over de afvoeren. Figuur 5.17 laat zien dat het vooral locaties betreft met voor één afvoerniveau een grote afwijking. Er is een aantal uitvoerlocaties waarbij voor 2-4 afvoeren een grote afwijking wordt gevonden. Tabel 5.4 geeft een overzicht van de uitvoerlocaties waarbij het max13/sepmax criterium wordt overschreden (zonder BU-locaties).



Figuur 5.16 Aantal uitvoerlocaties waarbij verschil tussen 'max13' en 'sepmax' meer dan 1 cm is.



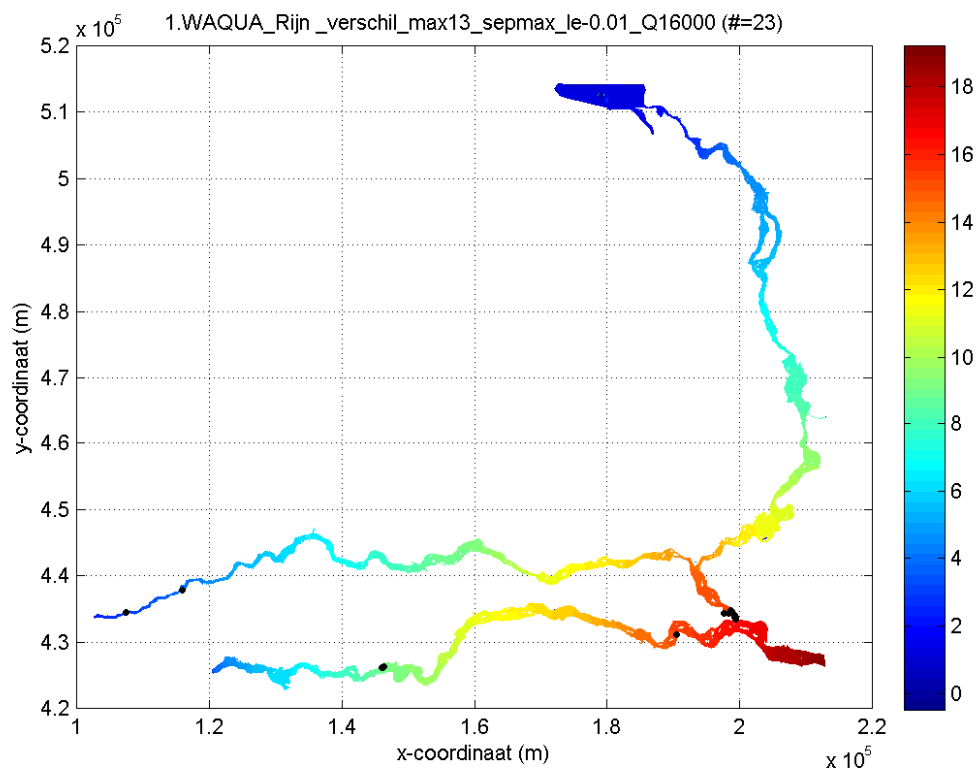
Figuur 5.17 Aantal uitvoerlocaties waarbij verschil max13/sepmax meer dan 1 cm is uitgesplitst naar afvoeraantal.

Locatie of dijkkring	Nummer van de locatie
903.00_IJ	
Doesburgbrug	
BR_60m_L_nvt	158;251;252;253;254;255;256
BR_60m_R_48	243;244;245
IJ_60m_L_11	6;7;8;186
LE_60m_L_16	345
LE_60m_L_43	159
LE_60m_R_15	369
LE_60m_R_44	116
NR_60m_L_43	1404;1409;1410;1411;1412;1413;1414;1415;1416
NR_60m_R_nvt	276;348
PK_60m_L_43	1140;1148;1162;1218;1226
PK_60m_R_48	323;324;325;326;327;328;398;399;400;401;402;417;418;419
WA_60m_L_38	206
WA_60m_L_41	3
WA_60m_L_42	121;126;127
WA_60m_R_16	494;527
WA_60m_R_43	252;332;333;471;472;473;649;673;888;890;891

Tabel 5.4 Uitvoerlocaties waarbij het verschil tussen 'max13' en de maximale waterstand meer dan 1 cm is (zonder BU-locaties).

Figuur 5.18 geeft voor een piekafvoer van 16.000 m³/s bij Lobith de punten met een groot verschil tussen 'max13' en 'sepmax' ruimtelijk weer (zie Figuur D.1 in Bijlage 7D voor de overige afvoeren). Opvallende zaken zijn vooral:

- WA_60m_R_16_527 bij Q6000/8000/10000 (benedenstrooms).
- PK L oever (Figuur D.3): het binnen relatief korte tijd vollopen van locaties, waardoor max13 afwijkt van sepmax.
- PK R oever net benedenstrooms van Regelwerk Pannerden bij 16.000 m³/s (Figuur 5.18 en Figuur D.3). Grote verschillen door actieve sturing van Regelwerk Pannerden.
- Lek linkeroever.
- iets structureels/terugkomends bij Lent (Figuur 5.18).
- iets structureels/terugkomends bij Hondsbroeksche Pleij (17.000 en 18.000 m³/s).



Figuur 5.18 Ruimtelijk patroon van de locaties waarbij het verschil tussen 'max13' en 'sepmax' meer dan 1 cm is voor $Q=16.000 \text{ m}^3/\text{s}$. De kleur geeft de maximale waterstand (m+NAP) voor de berekening weer.

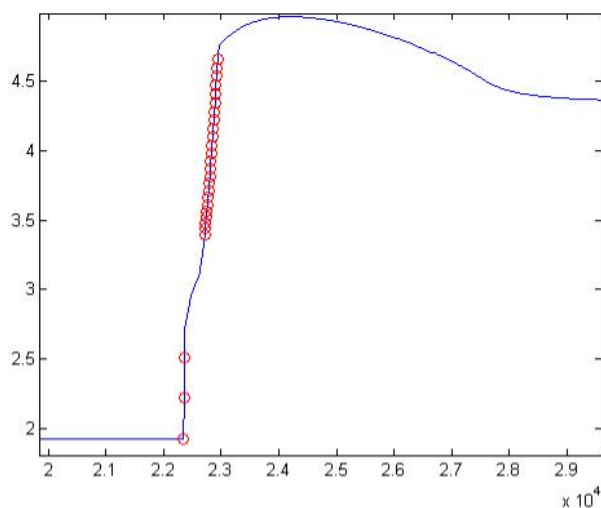
5.9 Instabiliteiten in tijdreeksen

De basis van de controle op instabiliteiten in een tijdreeks is het verschil in waterstand tussen twee opeenvolgende tijdstappen (voor Rijn (en Maas) in tijdstappen van 10 minuten). Voor de Rijn geldt (net als voor de Maas) het criterium dat een tijdreeks als instabiel wordt aangemerkt wanneer de waterstand in 10 minuten meer dan 4 cm wijzigt. Dit criterium blijkt voldoende onderscheidend om alle instabiele locaties zichtbaar te krijgen. Een hogere waarde zou instabiele locaties goedkeuren; terwijl een lagere waarden niet zinvol is omdat dan ook 'natuurlijke' fluctuaties kunnen leiden tot afkeuring.

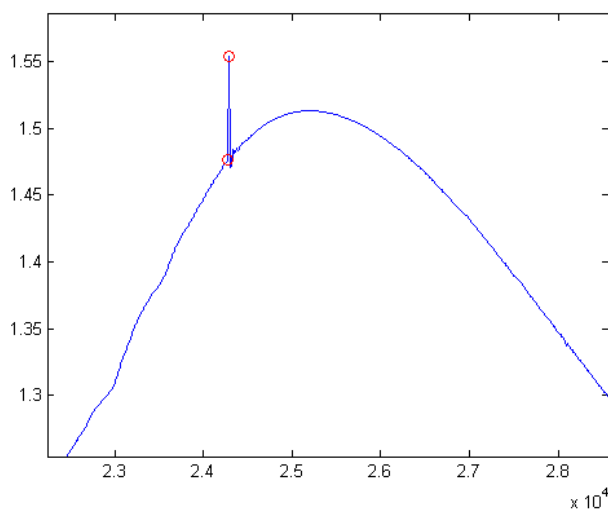
Als tijdsvenster is gekozen voor 4 uur rond de piek (twee uur ervoor en twee uur erna). Als we dat niet doen, worden instabiliteiten in de aanvangfase van de berekeningen in de analyse

meegenomen, die geen reden geven tot afkeur van een locatie. Hiermee worden de onderstaande situaties ondervangen:

- Vollopen van gebieden niet classificeren als instabiliteit (Figuur 5.19) tenzij het vollopen rond de piek optreedt.
- Spike binnen twee uur van de piek wel classificeren als instabiliteit (Figuur 5.20).

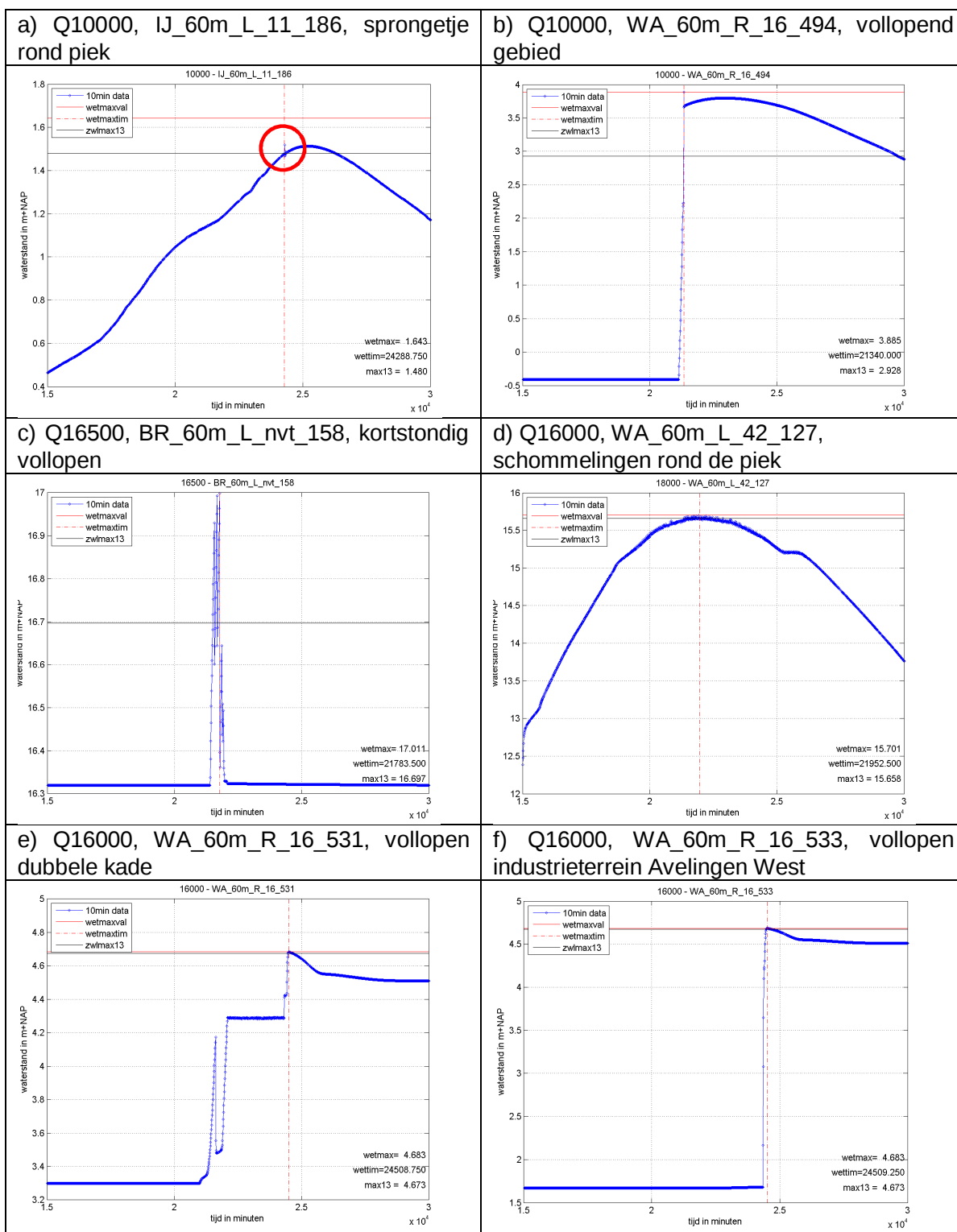


Figuur 5.19 Verschil tussen 2 tijdstappen > 4 cm tijdens vollopen (x-as minuten, y-as waterstand m+NAP) (LE_60m_L_16_66)



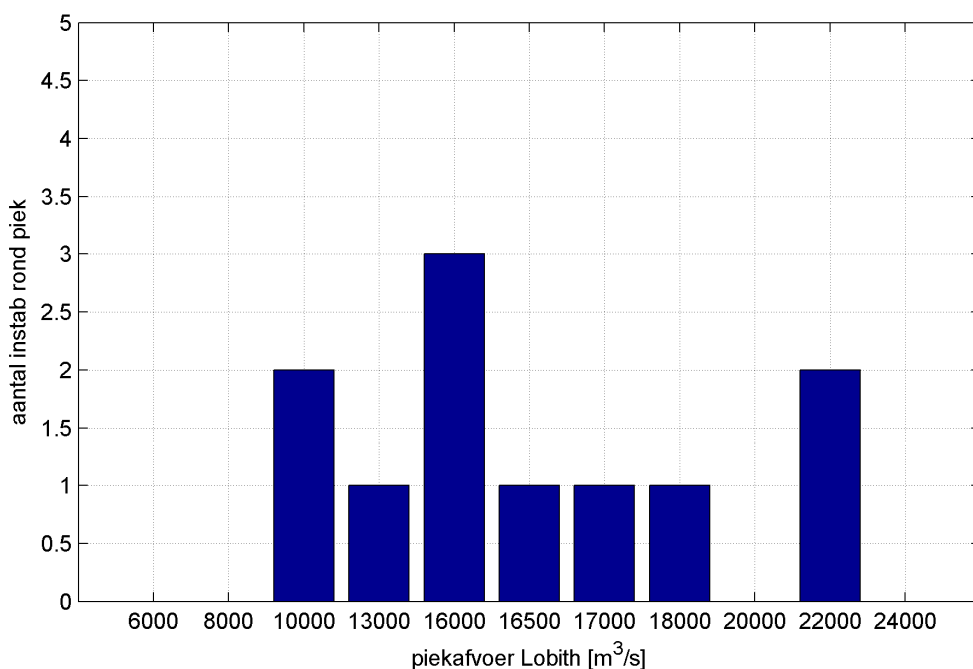
Figuur 5.20 Verschil tussen 2 tijdstappen > 4 cm binnen 2 uur voor de werkelijke piek (x-as minuten, y-as waterstand m+NAP) (IJ_60m_L_11_186)

Figuur 5.21 geeft een aantal voorbeelden van tijdreeksen met instabiliteiten rond de piek. In Bijlage E zijn ook voor andere locaties instabiele tijdreeksen opgenomen.



Figuur 5.21 Aantal voorbeelden van instabiliteiten in tijdreeksen.

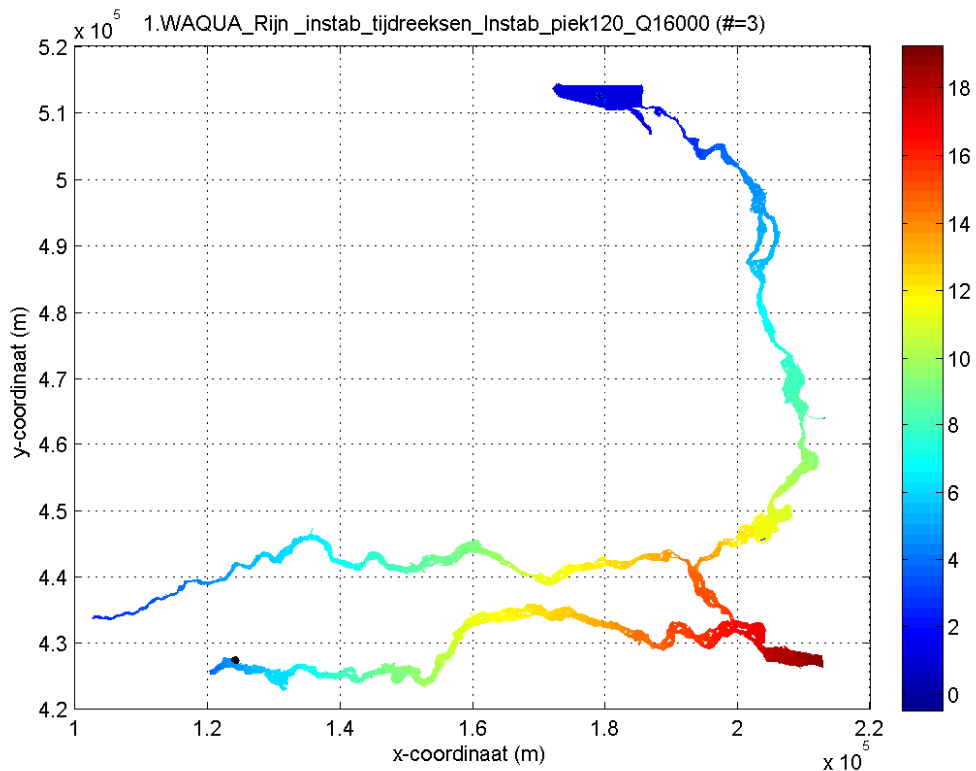
Figuur 5.22 geeft per piekafvoer bij Lobith het aantal uitvoerlocaties met een instabiliteit rond de piek (twee uur voor, twee uur na piek). Bij $Q=16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ is dit voor (slechts) drie uitvoerlocaties het geval. Er zijn geen uitvoerlocatie die voor meer dan 1 piekafvoer bij Lobith een instabiliteit vertonen. De uitvoerlocaties die voor 1 afvoerniveau een instabiliteit vertonen zijn weergegeven in Tabel 5.5. Daar valt vooral dijkkring 'WA_60m_R_16' op met meerdere "instabiele" locaties (zie ook Figuur 5.23). Dit zijn locaties op bedrijventerrein Avelingen West wat van twee kanten op verschillende momenten inundeert, wat vooral goed te zien is in Figuur 5.21e en Figuur 5.21f.



Figuur 5.22 Aantal uitvoerlocaties met instabiliteit rond de piek per afvoer.

dijkkring	Nummer van de locatie
BR_60m_L_nvt	158
IJ_60m_L_11	186
LE_60m_L_16	345
NR_60m_R_nvt	275;276
WA_60m_L_42	127
WA_60m_R_16	494;531;532;533
WA_60m_R_43	471

Tabel 5.5 Uitvoerlocaties waarbij voor 1 afvoer een instabiliteit rond de piek optreedt (zonder BU-locaties).



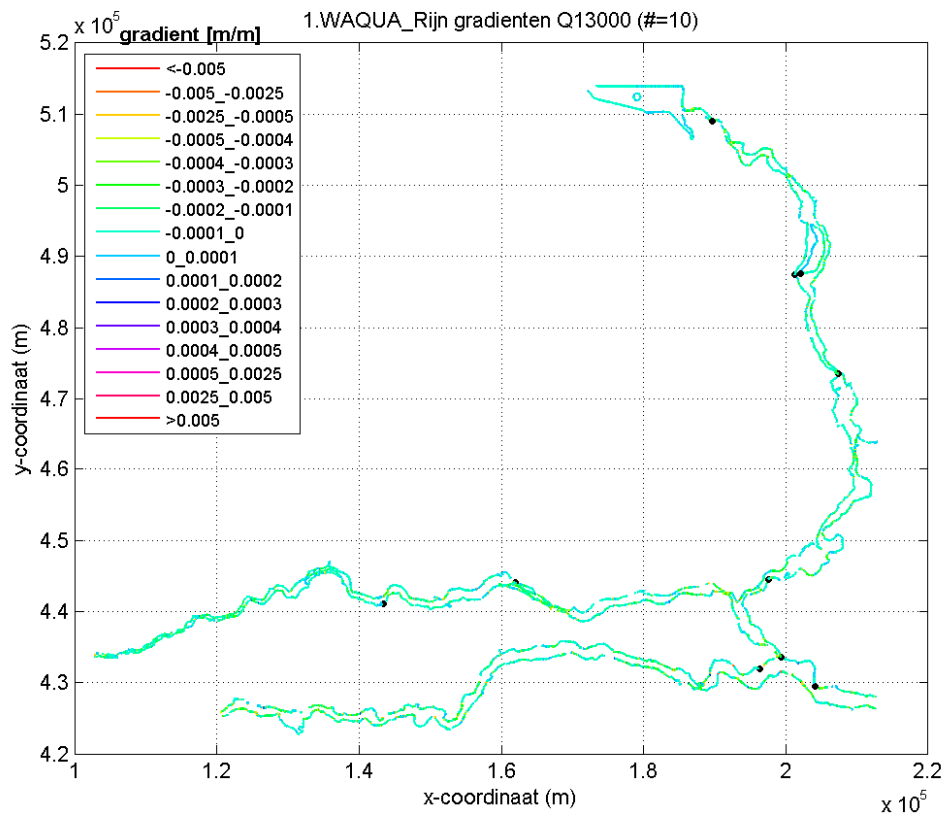
Figuur 5.23 Instabiliteiten rond de piek, Q16000. De kleur geeft de maximale waterstand voor de berekening weer.

5.10 Gradiënten in de ruimte (uitvoerpunten)

Gradiënten in waterstanden in het 2D-vlak zijn op de volgende wijze bepaald:

- Twee opeenvolgende uitvoerpunten worden met elkaar gekoppeld waarna de gradiënt in de waterstand wordt bepaald. Het basisbestand voor deze koppeling is te vinden in het data-archief::
[DATA-ARCHIEF]\1.Bovenrivieren\
5.Controle_produktesommen\1.Waterstanden\stations_maas_mnxy.xlsx
- Daarin staat per uitvoerlocatie de link naar de gekoppelde uitvoerlocatie in de serie.
- Vervolgens met Matlab:
 - Definieer het criterium voor te grote gradiënt, hier 5 mm/m (=gradlim).
 - Selecteer alle uitvoerlocaties, behalve aslocaties en "backup-locaties".
 - De gradiënt wordt uitgerekend als $(w2-w1)/dx$, waarbij $w1$ de waterstand in de geselecteerde uitvoerlocatie, $w2$ de waterstand in de gekoppelde uitvoerlocatie en dx de (rechte) afstand tussen deze punten in meter.
 - Het resultaat is een 2D-plot en een Excel-bestand.
 - Het Excel-bestand bevat de lijst met punten waarvoor geldt dat $abs(gradiënt) > gradlim$. Van deze punten zijn de locatie $w1$, de locatie $w2$ en de waarde van de gradiënt bewaard.

Figuur 5.24 geeft een voorbeeld van locaties met relatief grote gradiënten. Tabel 5.6 geeft een overzicht van de locaties waar structureel grote gradiënten optreden. Deze bevinden zich niet structureel in bijvoorbeeld één uiterwaard. Deze gradiënten kunnen bijvoorbeeld het gevolg zijn van het actief worden van een regelwerk (Inlaatwerk Veessen-Wapenveld) of achter een hoge kade met een groot verval.



Figuur 5.24 Gradiënten tussen in de ruimte opeenvolgende uitvoerpunten bij Q13000 (uitgezonderd backup-punten).

w1	w2
BR_60m_R_48_238	BR_60m_R_48_239
PK_60m_R_48_322	PK_60m_R_48_323
IJ_60m_L_11_212	IJ_60m_L_11_213
IJ_60m_L_52_482	IJ_60m_L_52_483
LE_60m_L_43_131	LE_60m_L_43_132
WA_60m_R_43_204	WA_60m_R_43_205

Tabel 5.6 Uitvoerlocaties waarbij voor 3 of meer afvoeren de gradiënt groter is dan 0,005 m/m (= 5 mm/m).

In Bijlage F staan nog enige opvallende zaken toegelicht. De locaties met relatief grote gradiënten betreffen vooral locaties op “dode punten” in uiterwaarden en geven geen (extra) aanleiding tot afkeur van locaties.

6 Conclusies

In het kader van WTI2017 zijn productieberekeningen uitgevoerd voor de Rijntakken voor 11 afvoergolven met een piekafvoer bij Lobith tussen 6.000 en 24.000 m³/s. De gebruikte WAQUA-modelschematisatie is 'rijn-hr2017-v2'. Met zogenaamde 'hulpprogrammatuur' is de golfvorm bij Lobith uit GRADE vertaald in rivierafvoeren bij Emmerich en lateralen langs de Rijntakken. De Bypass Kampen is gemodelleerd op basis van specificaties van RWS-ON. Voor de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld is de aansturing ongewijzigd ten opzichte van de beschikbaar gestelde modelschematisatie.

De berekeningen zijn uitgevoerd bij Amazon op 8-core machines. De resultaten van de berekeningen zijn opgeslagen in het data-archief bij Deltares en gecontroleerd op fysische consistentie en onrealistische schommelingen in waterstanden. De afvoerverdeling op de splitsingspunten bij de Pannerdensche Kop en IJsselkop is conform verwachting (gegeven de instelling van de regelwerken): bij MHW (16.000 m³/s) is de afvoer naar de Waal circa 2/3 van de Lobith-afvoer, de afvoer op de Neder-Rijn wordt zo lang mogelijk gemaximaliseerd op 3.380 m³/s. Merk op dat de gehanteerde instelling van de regelwerken niet geheel conform uitgangspunten is en dat het effect hiervan beperkt is.

De hoogwatergeul Veessen-Wapenveld voert tot aan 10.000 m³/s Lobith-afvoer geen water. Bij 24.000 m³/s wordt bijna de helft van de IJsselaafvoer door de hoogwatergeul afgevoerd. Het verloop van het aantal droge punten verloopt consistent met de afvoer(toename). Ten opzichte van de WTI2017-productieberekeningen voor de Rijn-Maasmonding en IJssel-Vechtdelta zijn er weinig locaties waar de 'max13' afwijkt van de maximale waterstand op tijdstapniveau. Ook zijn er relatief weinig punten met instabiliteiten in tijdreeksen. Wanneer er toch instabiliteiten optreden heeft dit vooral te maken met schommelingen in waterstanden door actieve sturing van Regelwerk Pannerden en Hondsbroeksche Pleij (bij piekafvoeren rond 16.000/16.500 m³/s) en het onderlopen van locaties nabij het moment dat de maximale waterstand optreedt. De gradiënten van waterstanden in het 2D-vlak vertonen een consistent beeld, met een aantal uitzondering op "dode punten" in uiterwaarden.

De conclusie is dat de berekeningen betrouwbaar zijn en gebruikt kunnen worden voor het vullen van de relationele databases. Wel zijn er locaties die afgekeurd worden op instabiliteiten in de maximale waterstand ("max13 versus sepmax") en/of instabiliteiten in het tijdsverloop van de waterstandsreeksen. Het lijkt in een aantal gevallen te verdedigen om bepaalde afgekeurde locaties goed te keuren, omdat bijvoorbeeld het gedrag van vollopen realistisch is of de instabiliteit een schommeling rond een realistisch maximum betreft. Het advies is om te onderzoeken of er met een filter op de tijdreeksen van afgekeurde punten mogelijk locaties zijn die toch opgenomen kunnen worden in de database. Deze stap valt buiten de scope van dit project maar wel binnen de scope van WTI2017. Dit aspect zal meegenomen worden bij de probabilistische berekeningen. Overigens speelt dit aspect voor het Rijntakken model in beperkte mate vanwege de goede vullingsgraad van de relationele database.

7 Referenties

Beyer, D. (2014). Advies onttrekking inlaat Reevediep afvoergolven. RWS-ON memo, 8 augustus 2014. Concept.

Deltares (2013). Uitgangspunten productieberekeningen WTI2017. Aansturing, schematisaties en uitvoerlocaties. Deltares rapport 1207807 -009-HYE-0006. H. de Waal, A. Spruyt, & A. Smale, oktober 2013.

Deltares (2014a). Uitgangspunten productieberekeningen WTI2017. Aanvulling op uitgangspunten vastgesteld in 2013. Deltares rapport 1209433-001-HYE-0005. A.J. Smale, juli 2014.

Deltares (2014b). Samenvatting bevindingen testberekeningen Bovenrivieren. A.J. Smale, Memo 27 oktober 2014.

Deltares (2015). Qh-relatie voor benedenstroomse randvoorwaarden Rijntakken en Maas. Deltares memo 1220082-001-HYE-0001. A. Smale. Februari 2015.

Deltares (2016a). WAQUA productieberekeningen Bovenrivieren Rijntakken, WTI2017. Deltares rapport 1220082-001-HYE-0013, november 2016.

Deltares (2016b). WAQUA productieberekeningen Bovenrivieren Maas, WTI2017. Deltares rapport 1220082-001-HYE-0012, november 2016.

Deltares (2016c). WAQUA productieberekeningen IJssel-Vechtdelta, WTI2017. Deltares rapport 1220082-001-HYE-0014, november 2016.

Deltares (2016d). WAQUA productieberekeningen Rijn-Maasmonding, WTI2017. Deltares rapport 1220082-001-HYE-0015, november 2016.

Driesen, T.L.A. (2014). Baseline en WAQUA schematisaties Rijntakken 2014. Rapport RHDHV BD1443-101/R0002/904200/Nijm, 4 september 2014.

Haskoning (2012). Deelproduct 9: Hydraulica en Veiligheid, Planstudie IJsseldelta-Zuid, opdrachtgever Provincie Overijssel, Rapport 9V4747.C2, 17 augustus 2012.

RHDHV (2014). Testberekeningen t.b.v. productieberekeningen WTI 2017 Rijntakken. RDCHM_BD3957_R20141208_NL27708_f1.0. Versie 1.0. December 2014.

A DATA-ARCHIEF

In een separaat meegeleverd data-archief is alle informatie vastgelegd die is gebruikt om de productieberekeningen op te zetten, uit te voeren en te controleren:

[DATA-ARCHIEF]\1.Bovenrivieren\
 1.Gebiedsschematisaties\
 2.Initiele_velden_en_randvoorwaarden\1.Waterstanden\
 3.Generatie_productiesommen\1.Waterstanden\
 4.Uitvoeren_productiesommen\1.Waterstanden\
 5.Controle_productiesommen\1.Waterstanden\

De post-processing en analyse van de productieberekeningen (onderdeel 5.Controle_productiesommen) heeft een groot aantal figuren en bestanden opgeleverd, die niet allemaal zijn opgenomen in dit rapport. Tabel A.1 geeft een overzicht van alle opgeleverde controlebestanden in het data-archief.

[DATA-ARCHIEF]\1.Bovenrivieren\5.Controle_productieberekeningen\1.Waterstanden\	
output_xls\	*_droog_nat_controle.xlsx *_gradient_controle.xlsx *_instab_tijdreeksen.xlsx *_verschil_max13_sepmax.xlsx Deze Excel-bestanden bevatten per berekening generieke informatie over droogval, instabiliteiten rond de piek en in de maximale waterstand (verschil tussen max13 en sepmax).
output_figuren\	Max13-verlopen afvoer en waterstand. 2D figuren voor droogval, analyse instabiliteiten en verschillen tussen max13 en sepmax. Ook van gradiënten in waterstanden zijn hier figuren te vinden. Daarnaast zijn er figuren te vinden betreffende de controle van de vertaalslag afvoer Emmerich/Lobith en het functioneren van de Bypass Kampen en hoogwatergeul Veessen-Wapenveld.
output_figuren_tijdreeks\	Tijdreeksen waarbij instabiliteiten optreden of een groot verschil tussen 'max13' en 'sepmax' aanwezig is.

Tabel A.1 Overzicht van gegevens in het data-archief, die zijn gemaakt ter controle van de productieberekeningen.

B Rivierafvoeren en lateralen

De GRADE-golven (paragraaf 3.1) zijn met de “hulpprogrammatuur 2.20” omgezet naar afvoerrandvoorwaarden bij Emmerich en de lateralen langs de Rijn.

Voor de hulpprogrammatuur is de volgende structuur aangehouden:

Bron:

[DATA-ARCHIEF]\1.Bovenrivieren\2.Initiele_velden_en_randvoorwaarden\1.Waterstanden\0.Randvoorwaarden\Toepassing_hulpprogrammatuur\hulpprogrammatuur2.20\

De hulpprogrammatuur is vervolgens lokaal gedraaid door de volgende mappen over te nemen:

\hulpprogrammatuur2.20\bin\

\hulpprogrammatuur2.20\data\

(LET OP: map 'bin' bevat een fix t.o.v. officiële release t.b.v. maken het maken van figuren)

Met Matlab is een schil om de hulpprogrammatuur gemaakt. 3 stappen:

(zie [DATA-ARCHIEF]\

1.Bovenrivieren\2.Initiele_velden_en_randvoorwaarden\1.Waterstanden\0.Randvoorwaarden\Toepassing_hulpprogrammatuur\hulpprogrammatuur2.20\1209433_Rijn_20150129\)

- stap1_klaarmaken_invoerbestanden.m
- stap2_run_rijn_waqua.bat
- stap3_maak_bypassKampen_Qlateraal.m

De volgende instellingen zijn van belang:

\data\Rijn\lateralenafvoergenerator\relaties\rijn_optie_afvoergolf_ini.csv' 601 voor Emmerich vervangen door 1601 ivm consistentie siminp

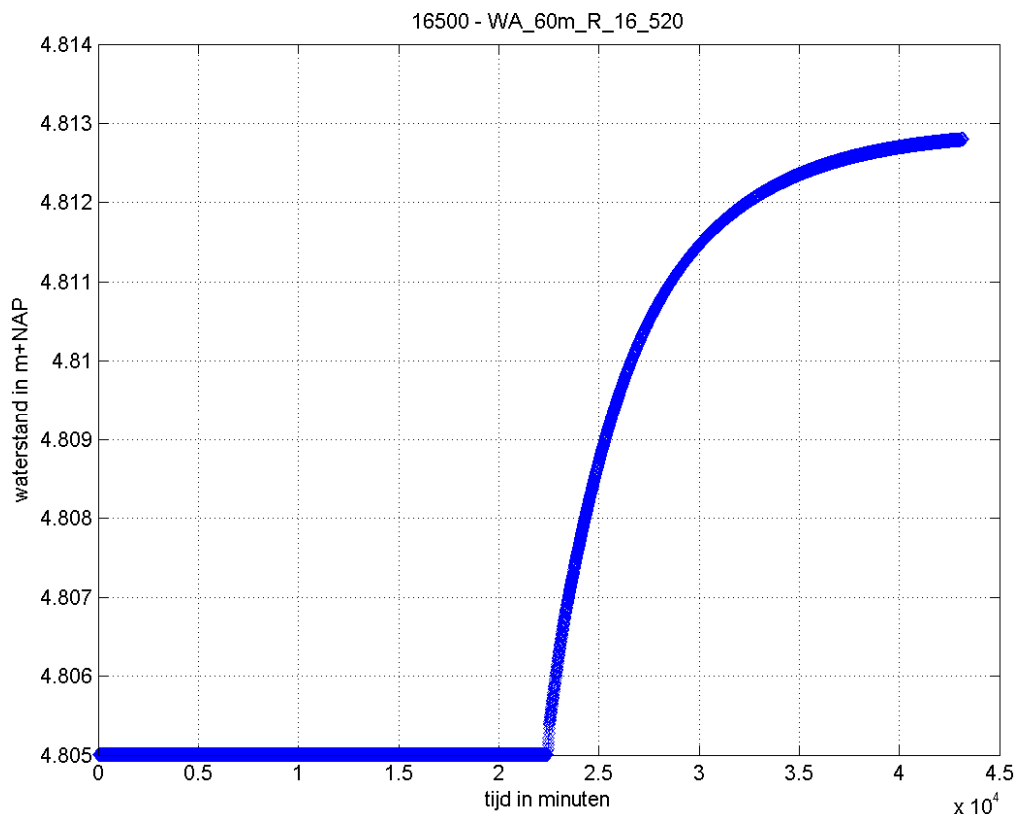
data\Rijn\lateralenafvoergenerator\relaties\rijn_waqua_ini.csv search/replace P601 door P1601

gehanteerde faseverschuiving: 2 uur

In stap 1 worden de invoerbestanden voor de hulpprogrammatuur aangemaakt en in stap 2 wordt de hulpprogrammatuur gedraaid. Stap 3 maakt, op basis van de afvoer bij Emmerich, de benodigde bestanden voor de afvoeronttrekking/lozing van de Bypass Kampen aan. Daarnaast wordt in stap 3 een bestand aangemaakt (q_lateraal.Qvar) dat gebruikt is voor het aanmaken van initiële condities: het bestand bevat per lateraal een tijdserie van steeds de beginwaarde van een golf.

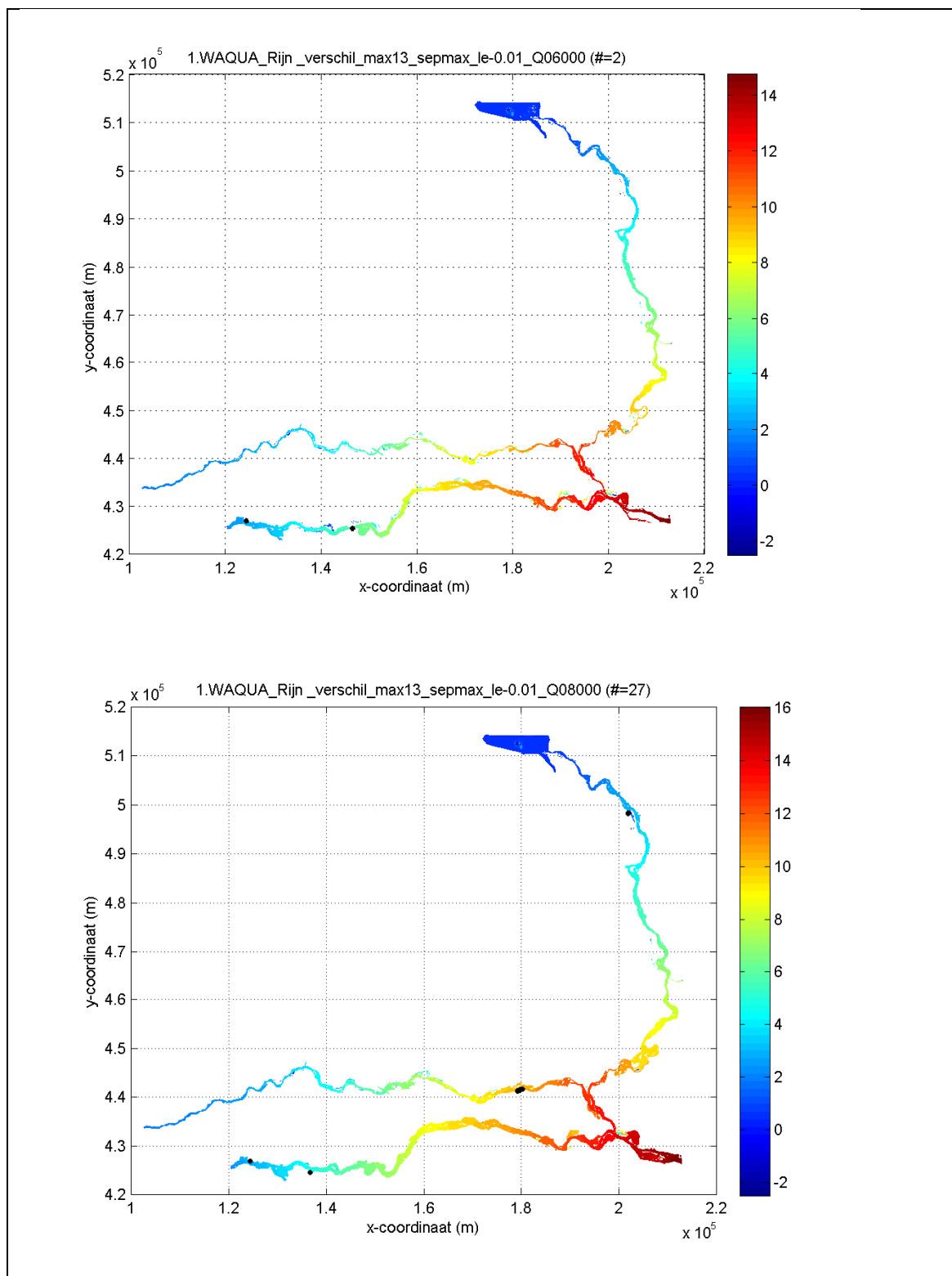
C Ontbrekende max13-waarden

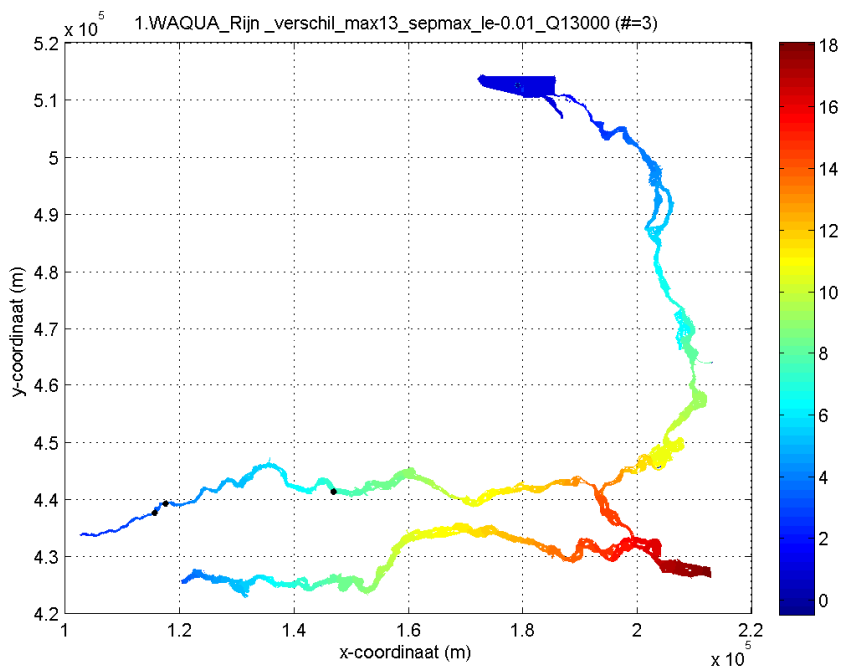
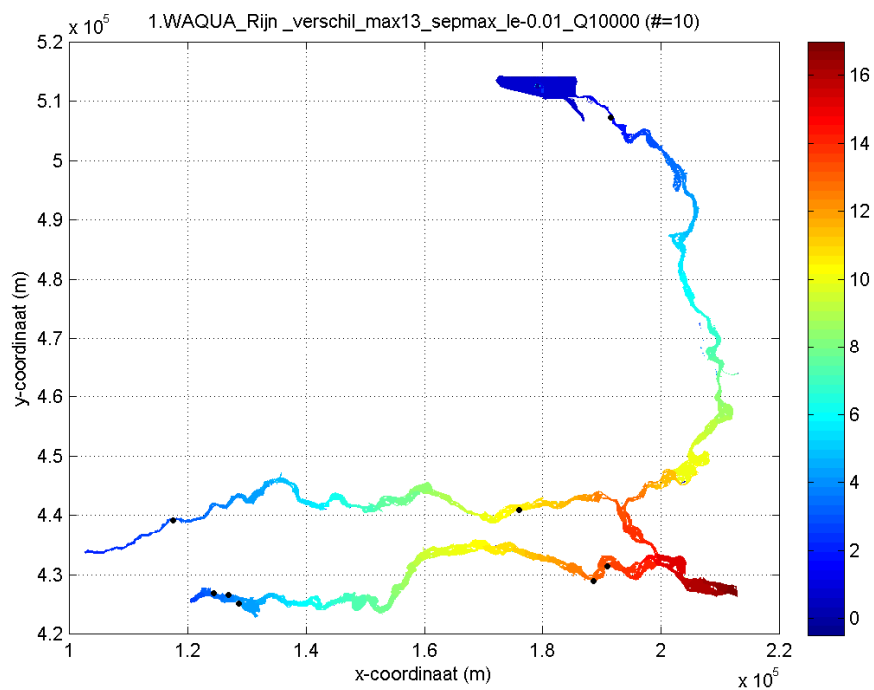
Voor iedere uitvoerlocatie is de grootte 'max13' beschikbaar. Deze variabele wordt, na afloop van een berekening, door getdata bepaald als een nabewerking op de beschikbare tijdreeksen. Voor iedere tijdreeks wordt het gemiddelde van de 13 waarden rond het maximum in die tijdreeks bepaald, om kleine slingeren uit te middelen. Deze nabewerking wordt toegepast op tijdreeksen met het in de siminp opgegeven tijdsinterval (TIHIST), hier 10 minuten. Wanneer het maximum zich direct aan het einde of begin van de tijdreeks bevindt, wordt geen max13 bepaald (zie onderstaande figuur voor een voorbeeld), omdat dit een vertekend beeld van de werkelijkheid kan geven. Dit kan immers betekenen dat het maximum aan het begin van de tijdreeks ligt (mogelijk door een instabiliteit), of juist aan het eind en het maximum dus nog niet is bereikt. Dit verklaart waarom bij gebruik van max13 er soms nans worden gepresenteerd.

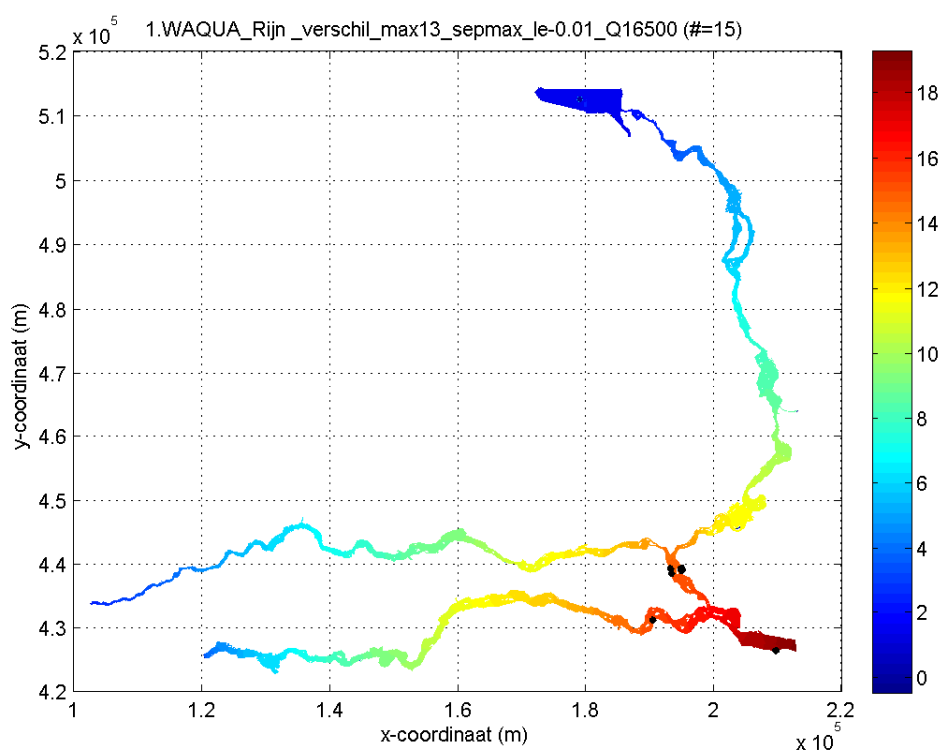


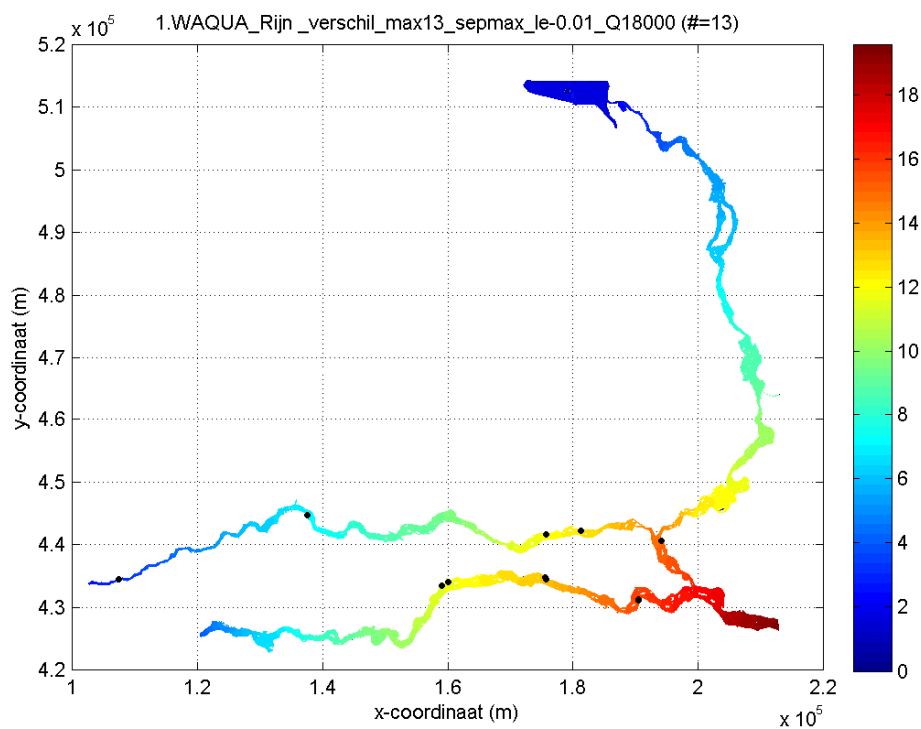
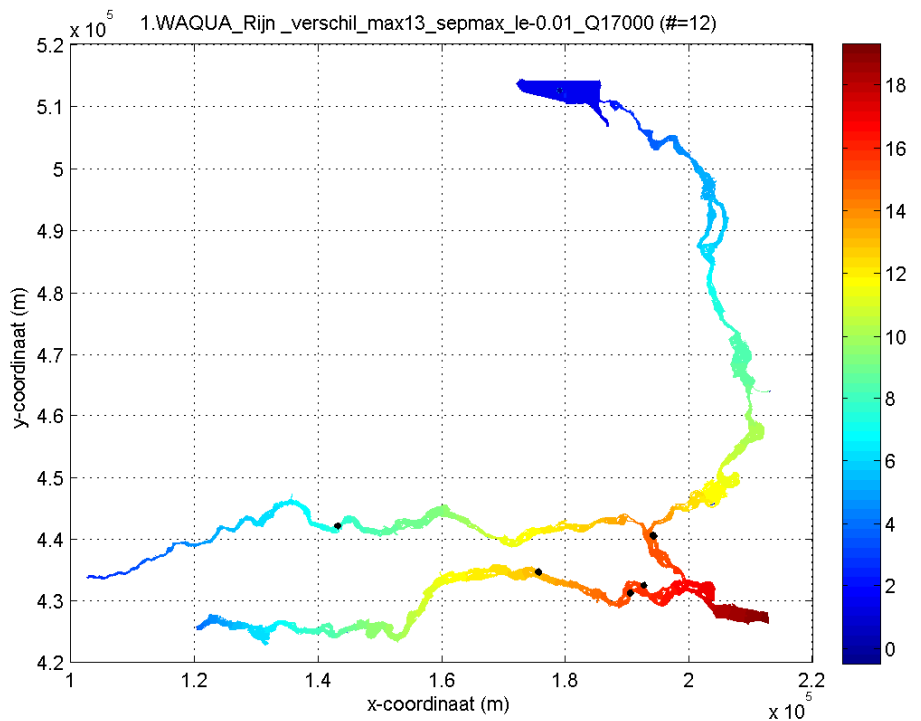
Figuur C.1 Locatie op de Waal waarbij de waterstand nog stijgt aan het einde van de tijdreeks en geen max13 bepaald kan worden.

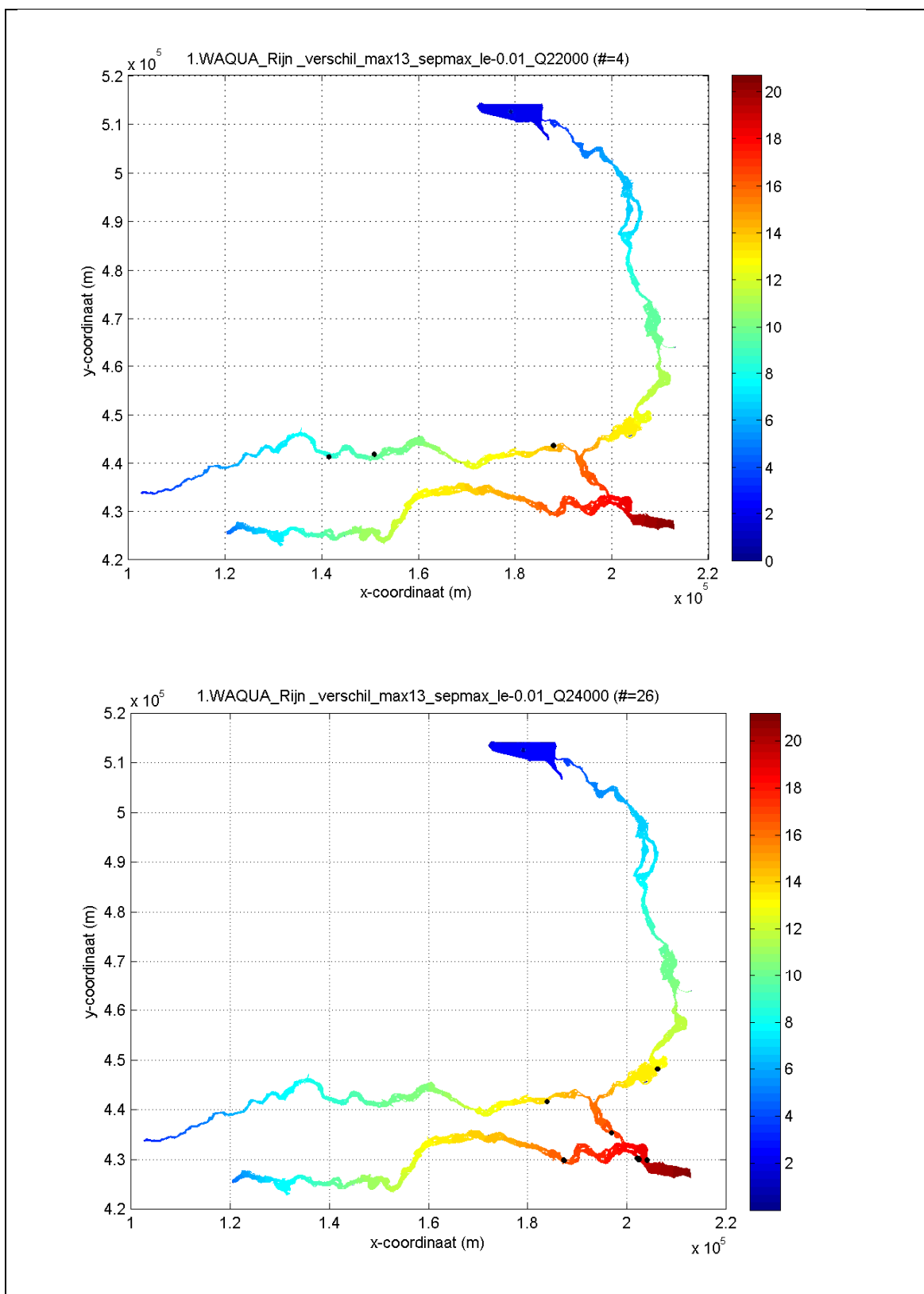
D Locaties instabiliteiten maximale waterstand



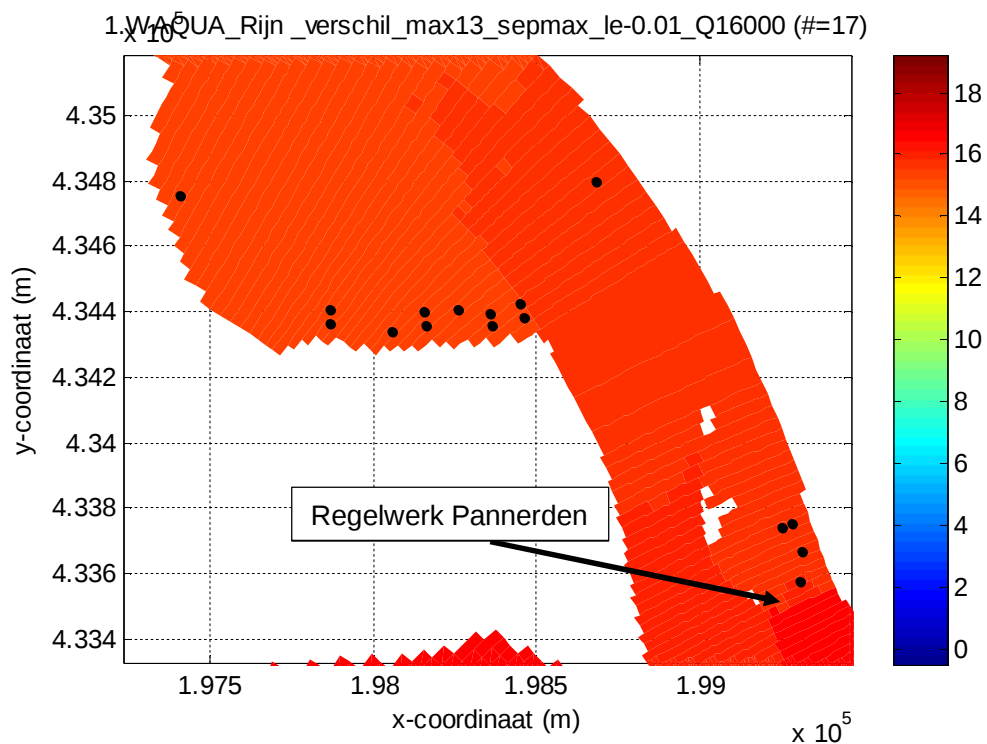






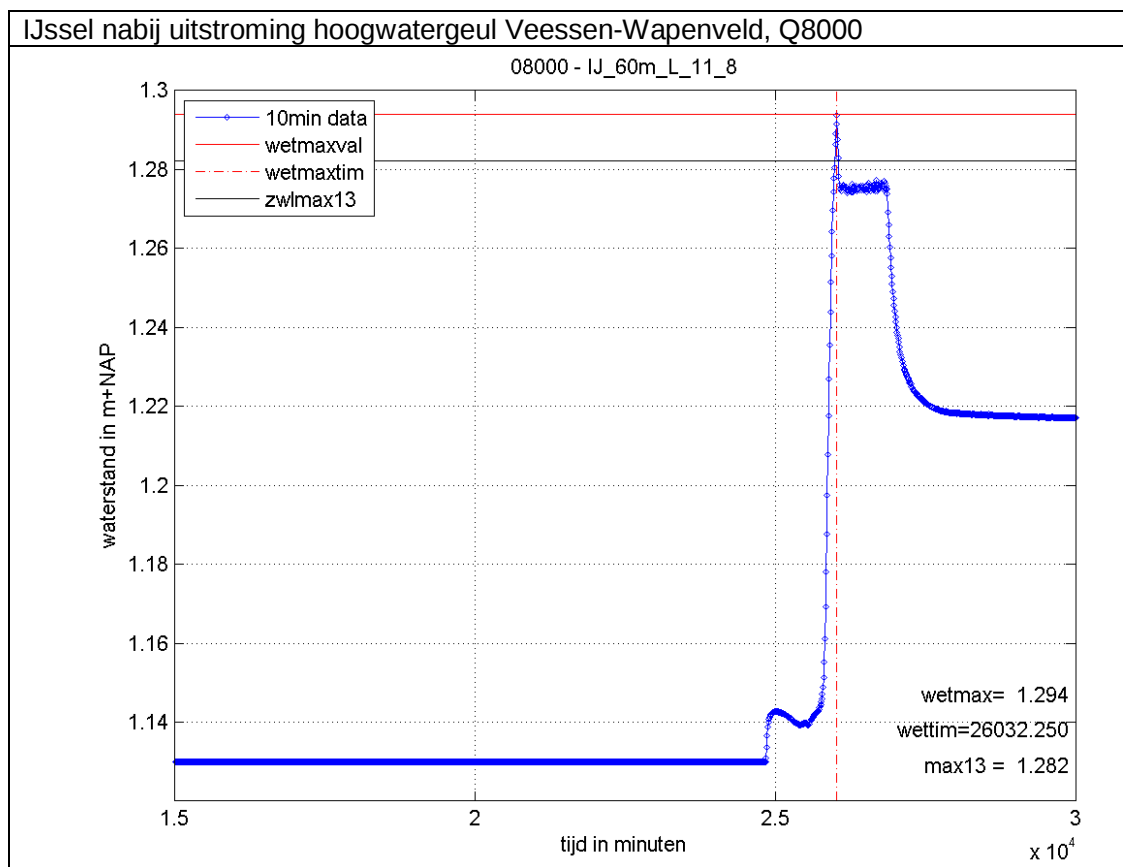


Figuur D.1 Locaties met instabiliteiten in de maximale waterstand ('max13' versus 'sepmax')

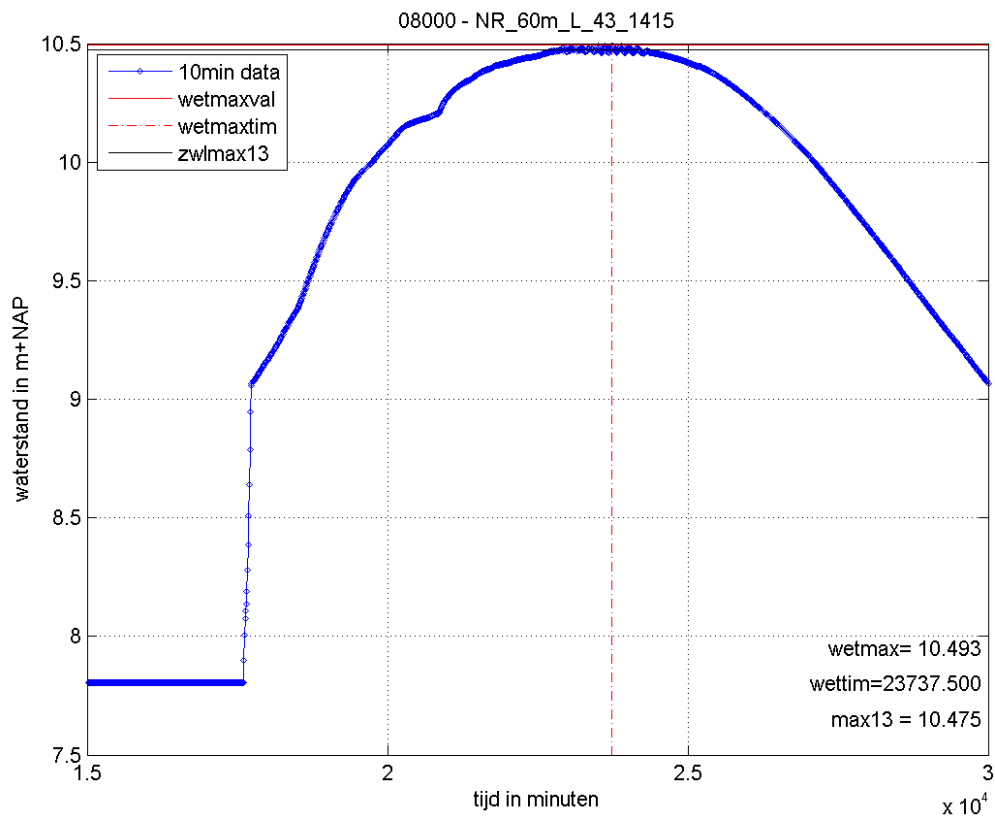


Figuur D.2 Detailverschil max13/sepmax ter plaatse van Regelwerk Pannerden.

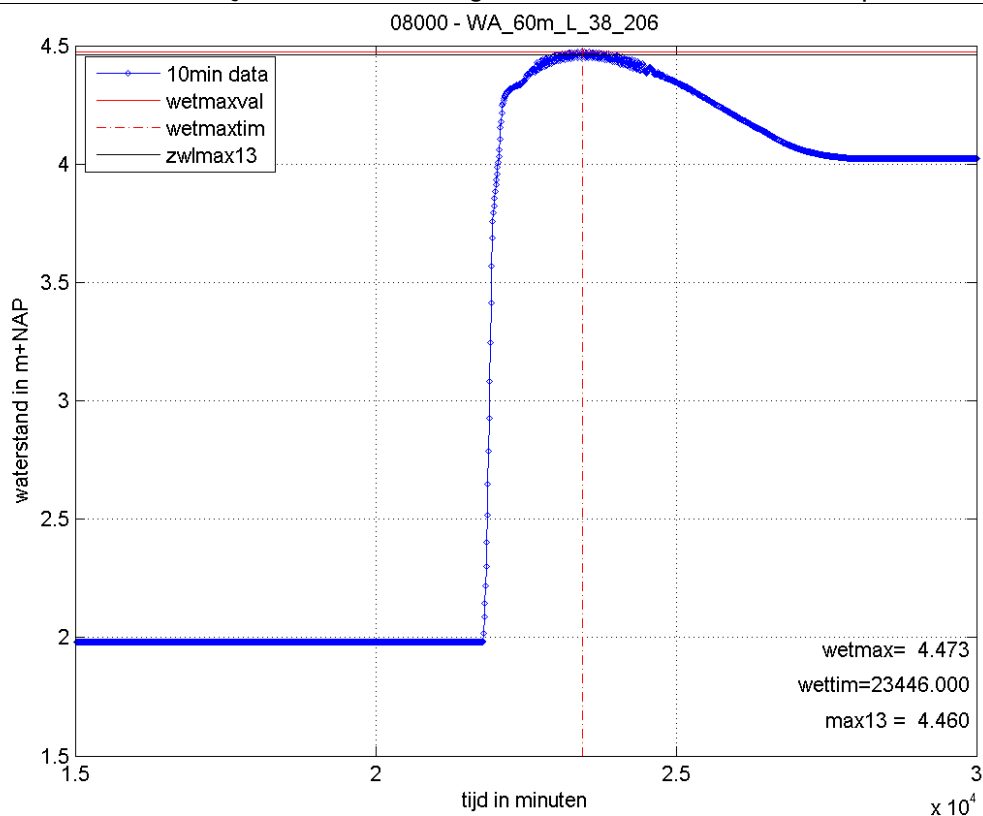
E Voorbeelden instabiliteiten tijdreeksen



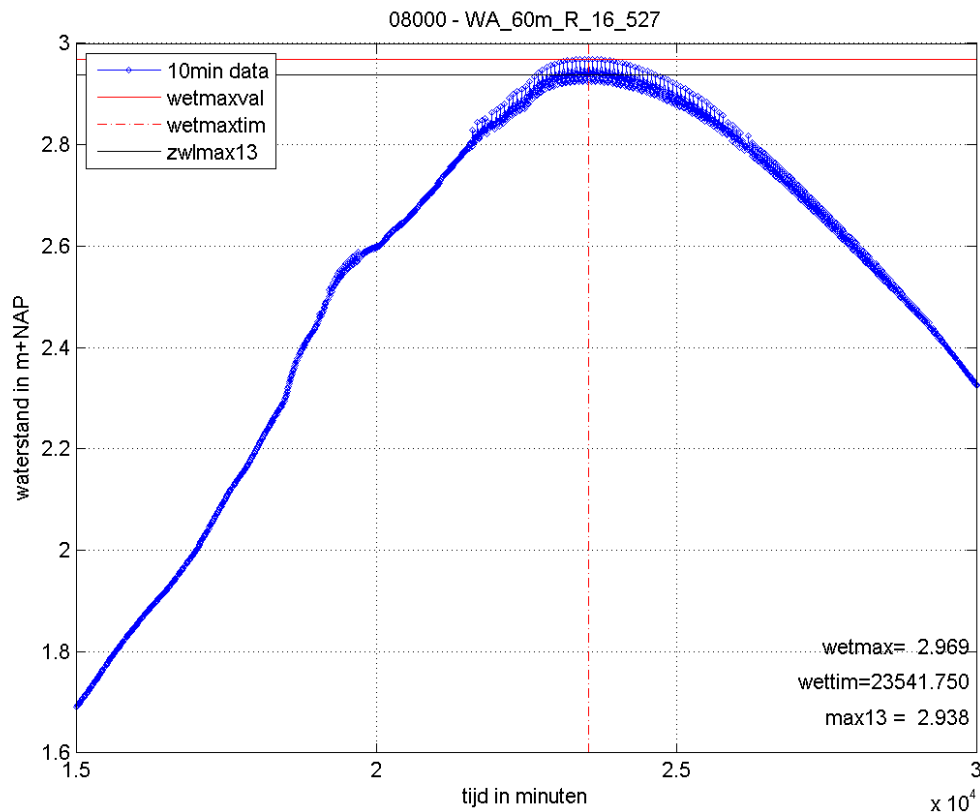
Lek linker oever Q8000: schommelingen van de waterstand rond de piek



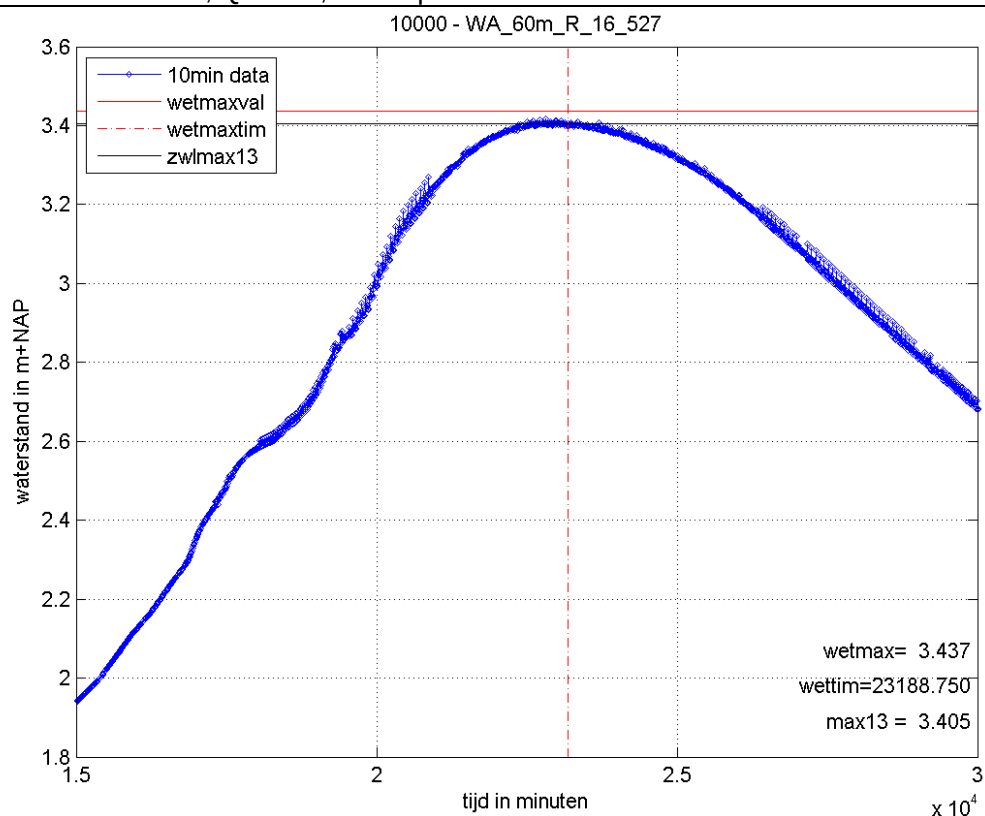
Waal benedenstrooms, Q8000: schommelingen van de waterstand rond de piek



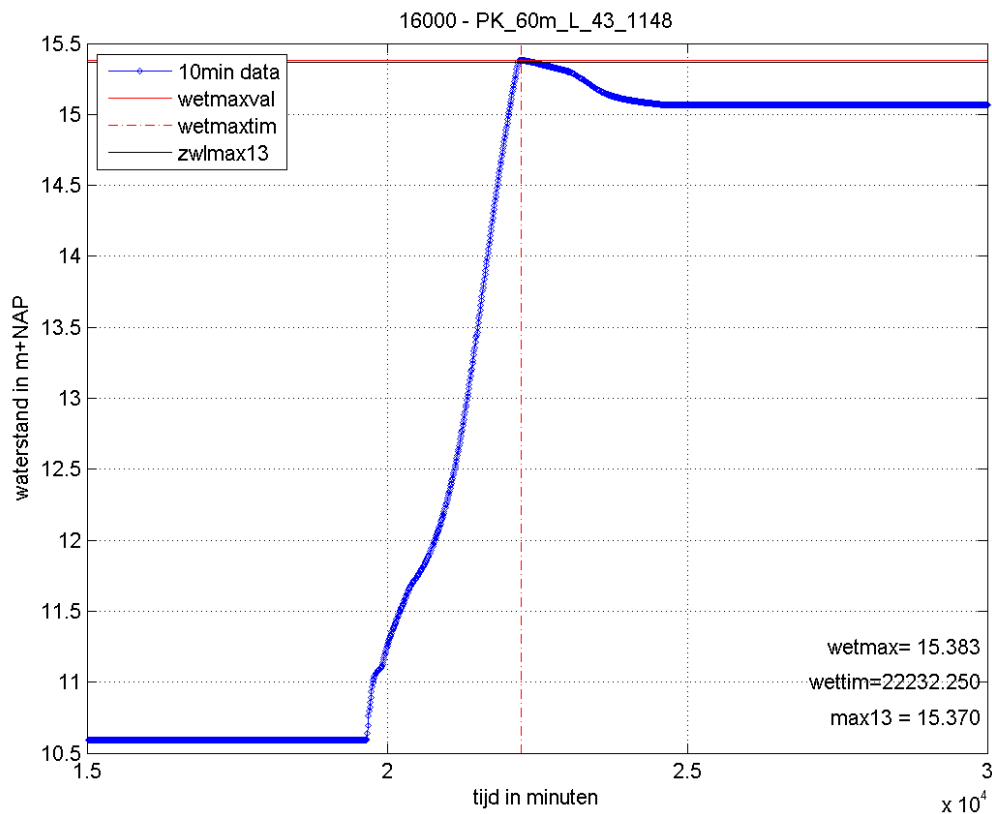
Waal benedenstrooms, Q8000: schommelingen van de waterstand rond de piek



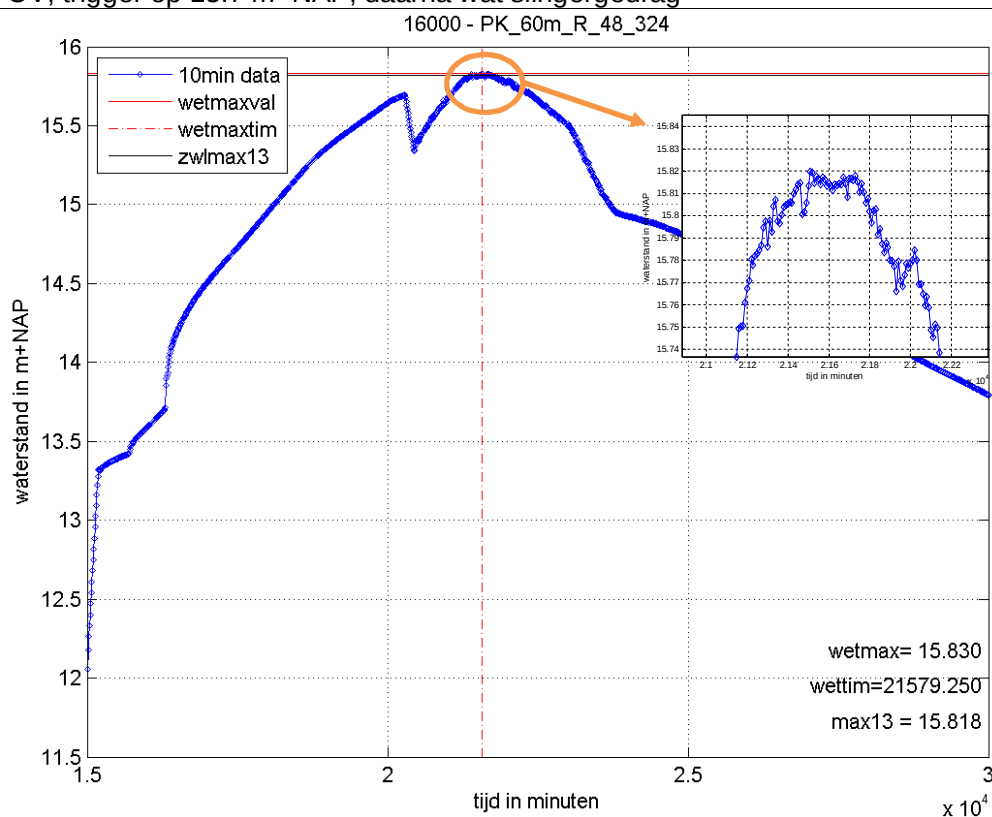
Waal benedenstrooms, Q10000, zelfde punt als hierboven

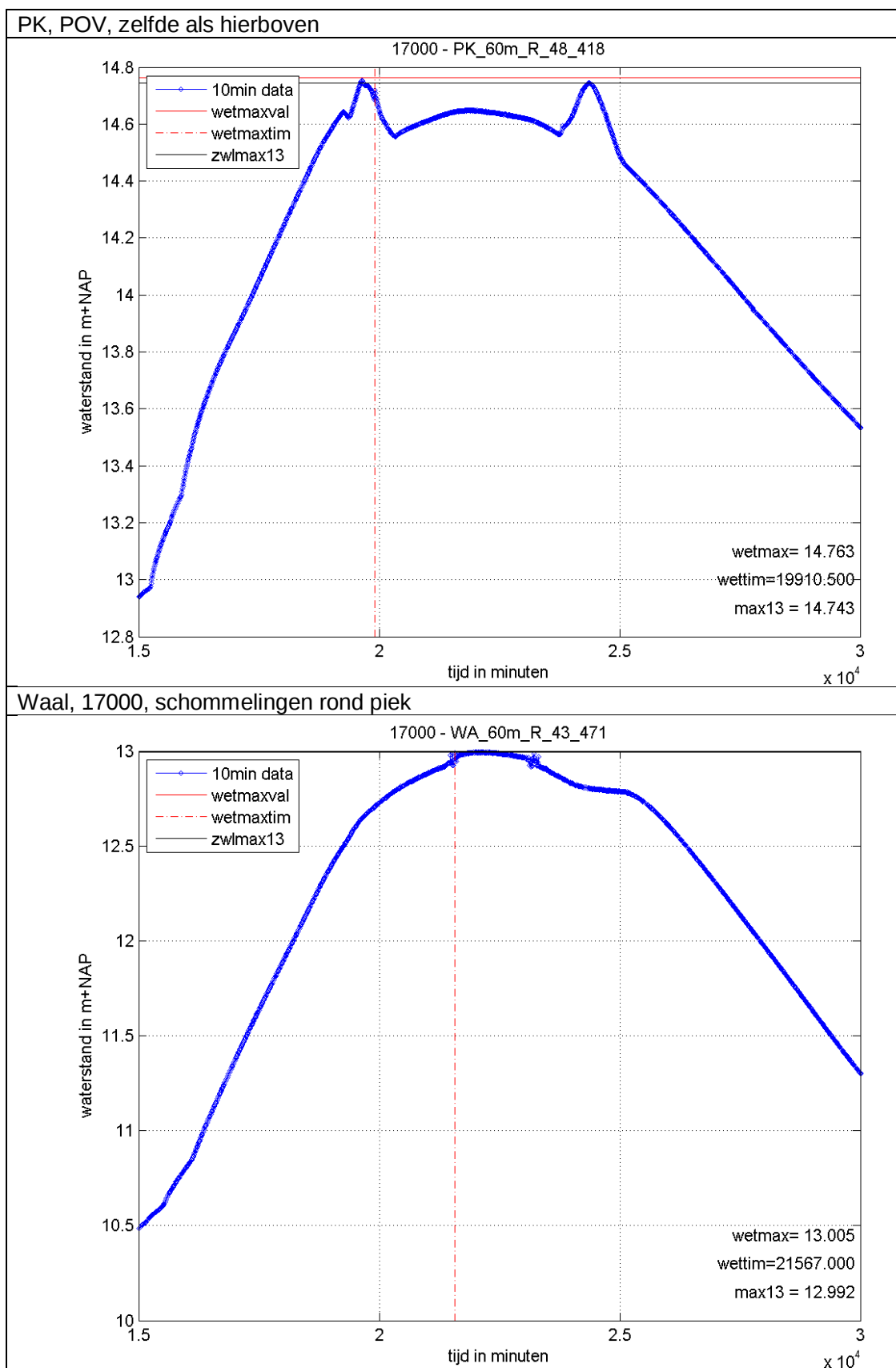


PK, polder aan linker oever, loopt net vol, ook * 1140



PK, POV, trigger op 15.7 m+NAP, daarna wat slingergedrag



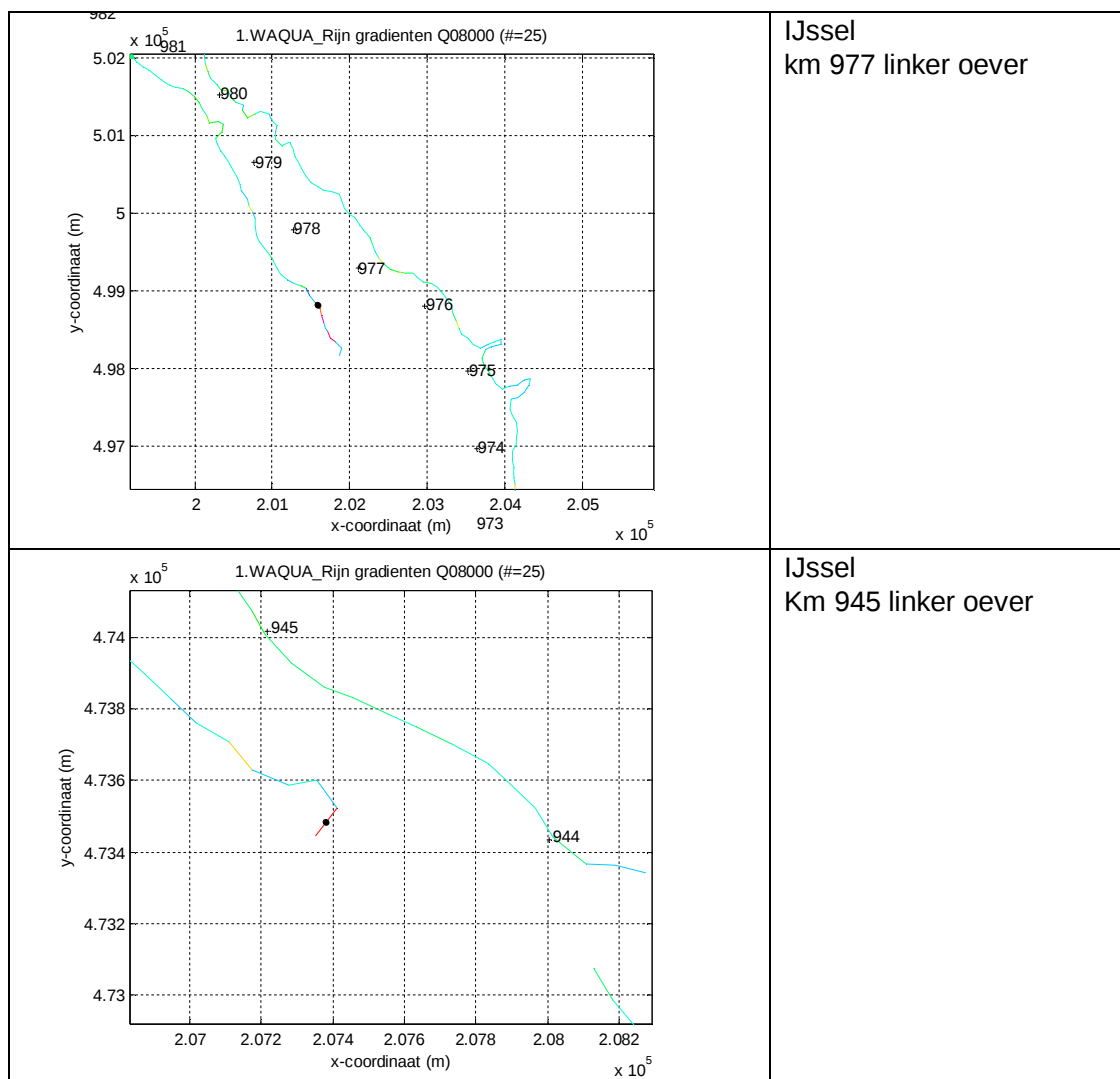


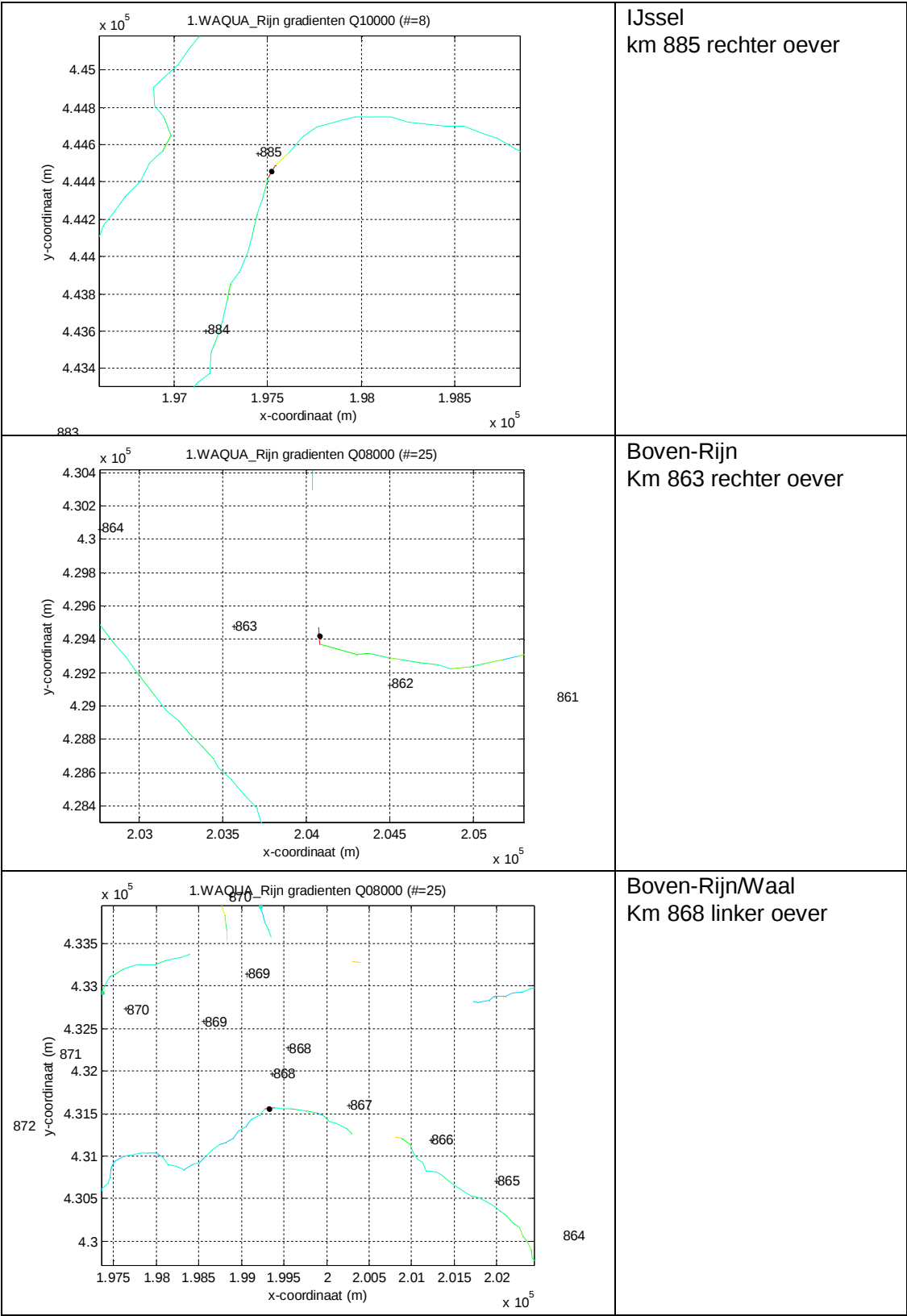
Figuur E.1 Voorbeelden van tijdreeksen met groot verschil max13/sepmax.

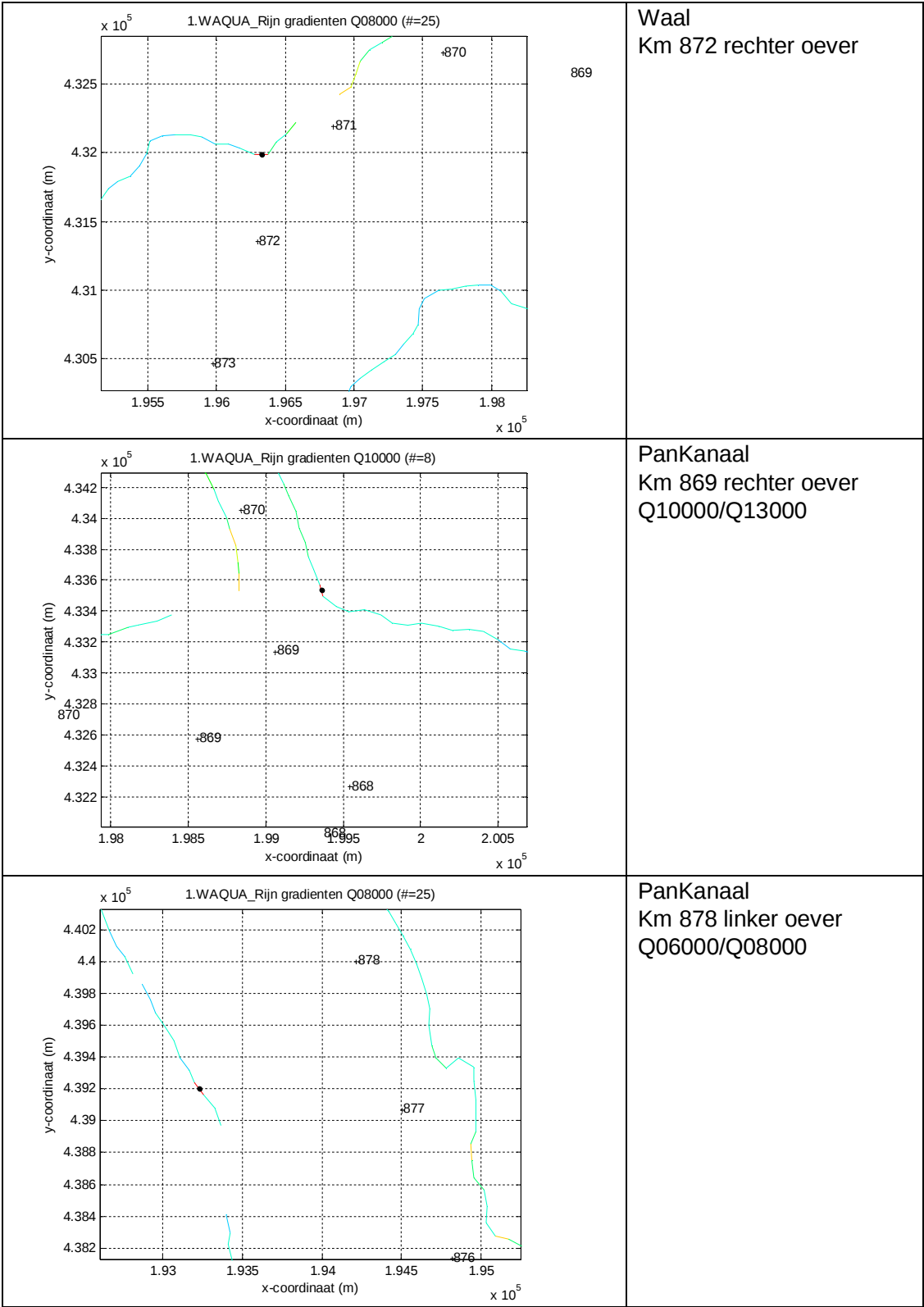
F Detailanalyse gradiënten

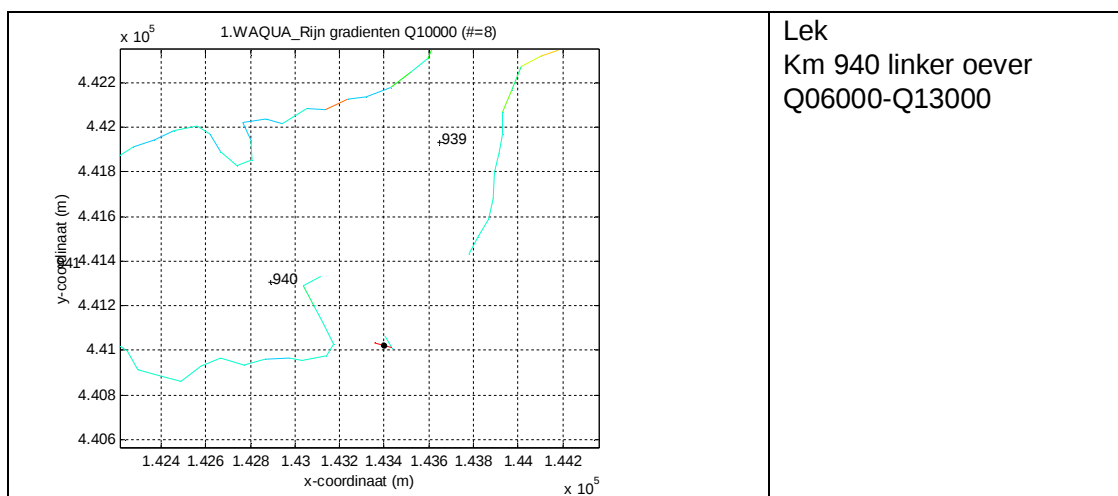
Zie onderstaande figuren voor een aantal locaties met grote gradiënten (zie de beschrijving in paragraaf 5.10). Opvallend zaken daarin zijn:

- Locatie BR_60m_R_48_238 structureel terugkerend (bij $Q_{\text{piek}} \geq 18000$ is dat de enige locatie)
- Locatie PK_60m_R_48_322 voor $Q_{\text{piek}} 10000 - Q_{\text{piek}} 17000$
- Bij $Q 17000$ BR_60m_L_nvt_157 en BR_60m_L_nvt_158
- Bij $Q 6000/8000$: NR_60m_R_45_57, NR_60m_R_45_58, NR_60m_R_45_60
- $Q 16500$: IJ_60m_L_nvt_60
- Overige structurele punten bij $Q 6000/8000/10000/13000$:









Figuur F.1 Voorbeelden locaties met relatief grote waterstandsgradiënten ($> 5 \text{ mm/m}$).