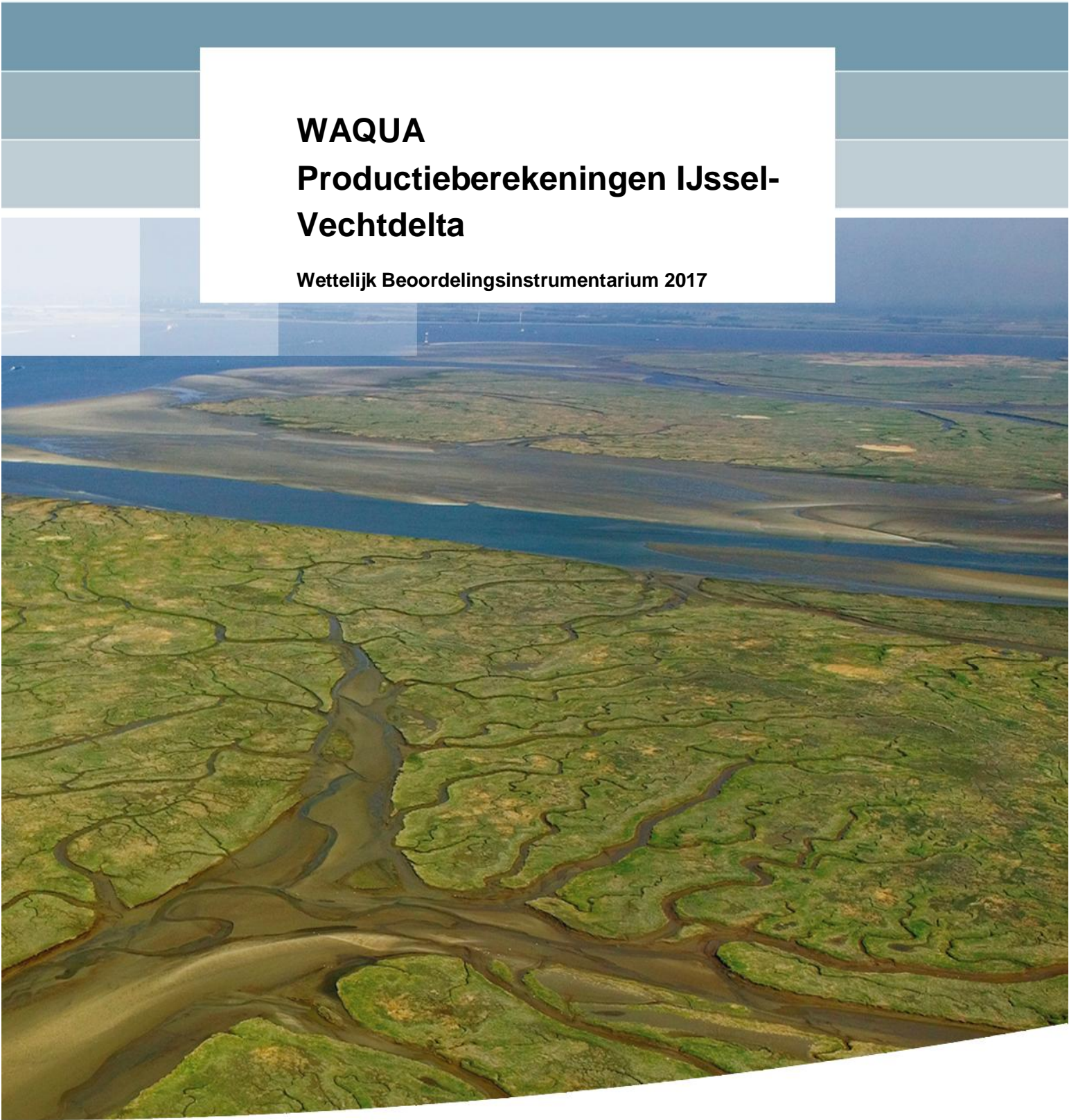


WAQUA
**Productieberekeningen IJssel-
Vechtdelta**

Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017



WAQUA Productieberekeningen IJssel-Vechtdelta

Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017

R. Agtersloot
A.J. Paarlberg

1220082-001

Titel

WAQUA Productieberekeningen IJssel-Vechtdelta

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS-WVL	1220082-001	1220082-001-HYE-0014	74

Trefwoorden

WTI2017, WAQUA, IJssel- Vechtdelta, 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 IJssel-Vechtdelta (IJVD). Het gehanteerde WAQUA-modelinstrumentarium en de afleiding van randvoorwaarden en initiële condities is beschreven. De Ramspolkering maakt onderdeel uit van de WAQUA-schematisatie en sluit bij een waterstand op het Ketelmeer groter dan 0,5 m+NAP en een stroming in oostelijke richting ter plaatse van de kering. De spuisluisen in de Afsluitdijk (Den Oever en Kornwerderzand) en de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld maken ook onderdeel uit van de schematisatie. De Bypass Kampen is gemodelleerd als een debietonttrekking op de IJssel en een debietlozing in het Vossemeer.

De beschouwde stochasten zijn Vecht- en IJssel-afvoer (gecorrigeerd), IJsselmeerpeil, windsnelheid en –richting en toestand van de Ramspolkering. Voor de Ramspolkering zijn twee toestanden beschouwd: 'altijd open' (faalt) en 'sluitregime' (faalt niet). De benodigde ($2 \times 3900 =$) 7800 WAQUA-berekeningen zijn uitgevoerd bij Amazon. De resultaten van de berekeningen (geselecteerde "getdata"-uitvoer) zijn opgeslagen in het data-archief bij Deltares. De modeluitkomsten zijn gecontroleerd op te verwachten fysische patronen en onrealistische schommelingen in waterstanden.

Bij de berekeningen waarbij voor de Ramspolkering het sluitregime is gehanteerd, wordt bij 2849 van de 3900 berekeningen (73%) sluiting gemodelleerd. Het aantal sluitingen vertoont verwachte afhankelijkheden van de verschillende stochasten. Het aantal sluitingen neemt toe bij een toenemend meerpeil en de meeste sluitingen treden op bij harde wind uit windrichtingen W (D270) tot NW (D315), richtingen waarbij het water richting de Ramspolkering wordt gestuwd. De Ramspolkering, de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld, de Bypass Kampen en de spuisluisen in de Afsluitdijk functioneren conform verwachting in het WAQUA-model. In situaties met afwaaiing bij de Afsluitdijk kunnen de uitstroomranden bij de spuisluisen in de Afsluitdijk droogvallen, met als gevolg dat er teveel water in het systeem achterblijft en de volumebalans niet meer klopt. Dit treedt op bij windsnelheden van 34 m/s en hoger en dan vooral voor lage meerpeilen en wind uit noordelijke richting. In de meest extreme situatie is het gemiddelde IJsselmeerpeil 6 cm groter dan in de situatie waarbij droogval niet zou optreden. Als gevolg hiervan zullen de berekende waterstanden te hoog worden uitgerekend. Vanwege de extreme windcondities waarbij dit verschijnsel optreedt is er geen significante invloed op de berekende toetspeilen.

Het aantal droge punten neemt af bij toenemende afvoer en/of meerpeil. Bovenstreams op de Vecht is de waterstand vrijwel onafhankelijk van het meerpeil; meer benedenstreams is er wel een afhankelijkheid. Bij lage afvoer (Q_{02} , $100 \text{ m}^3/\text{s}$ op de Vecht) wordt de waterstand bovenstreams op de Vecht (km35) beïnvloed door het IJsselmeerpeil, omdat de Ramspolkering niet sluit. Tot en met een Vechtafvoer van $100 \text{ m}^3/\text{s}$ is de invloed van de stuwen op de Vecht zichtbaar. De waterstanden op het IJsselmeer zijn conform de ingestelde meerpeilen (behalve voor situaties met droogval bij de spuisluisen). Bij toenemende windsnelheid en/of meerpeil neemt de waterstand op de IJssel toe; bij extreme windsnelheden en hoog meerpeil zijn de effecten nog merkbaar bij Olst (km957).

Titel
WAQUA Productieberekeningen IJssel-Vechtdelta

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS-WVL	1220082-001	1220082-001-HYE-0014	74

Voor alle uitvoerlocaties is gecontroleerd of er grote afwijkingen zijn tussen de 'max13' en 'sepmax' (de maximale waterstand op tijdstapniveau), omdat dit kan duiden op onrealistisch/niet fysisch modelgedrag. Het hierbij gehanteerde criterium is een toegestaan verschil van maximaal 3 cm. Daarnaast is gecontroleerd of de waterstand tussen twee tijdstappen niet te snel verandert (het toegestane verschil is 4 cm per 1 minuut). Wanneer één van de criteria wordt overschreden, is sprake van een afgekeurde locatie.

Ten opzichte van de WTI2017-productieberekeningen voor de Bovenrivieren worden relatief veel locaties afgekeurd. Bij grote windsnelheden is er een relatief groot aantal uitvoerpunten met instabiliteiten rond de piek doordat bij sterke wind veel locaties te maken krijgen met droogval en hieraan gerelateerde numerieke droogval-effecten. Dit is vooral merkbaar in combinatie met een lage rivierafvoer en laag meerpeil omdat er dan relatief weinig water in het systeem aanwezig is, waardoor eventuele instabiliteiten sterker tot uiting komen. Instabiliteiten rond de Ramspolkering treden vooral op in geopende toestand. Op de rechteroever van de IJssel ligt een verbindende kering van het Kampereiland. Deze kering heeft een hoogte van circa 3 m+NAP. Wanneer deze kering tijdens een berekening overstroomt, treden relatief veel instabiliteiten op.

Ondanks dat er een groot aantal uitvoerlocaties wordt afgekeurd, zijn fysisch te verwachten patronen gevonden in het verloop van gemodelleerde waterstanden als functie van de verschillende stochasten en functioneren de specifieke elementen in de WAQUA-schematisatie (Ramspolkering, hoogwatergeul Veessen-Wapenveld, Bypass Kampen en spuisluizen in de Afsluitdijk) conform verwachting. Dit leidt tot de conclusie dat de berekeningen betrouwbaar zijn en gebruikt kunnen worden voor het vullen van de relationale databases. Het verdient wel aanbeveling om te onderzoeken of de afgekeurde locaties wellicht toch bruikbaar zijn voor de relationele databases. Daarnaast kan aanpassing van de criteria door meer fysica te in beschouwing te nemen juist aanleiding geven tot aanvullende af te keuren locaties.

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		M. Genseberger		M.R.A. van Gent	
		A.J. Paarlberg					
4	nov. 2016	R.C. Agtersloot	<i>b.a.</i>	M. Genseberger	<i>MG</i>	M.R.A. van Gent	<i>van</i>
		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	5
2.2	Studiegebied en rekenrooster	5
2.3	Modelschematisatie	7
2.4	Partitionering	8
2.5	Uitvoerlocaties	8
2.6	Specifieke elementen in de modelschematisatie	9
2.6.1	Ramspolkering	9
2.6.2	Spuisluizen IJsselmeer	10
2.6.3	Bypass Kampen	10
2.6.4	Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld	11
2.6.5	Stuwen en keersluizen	11
3	Randvoorwaarden en initiële condities	13
3.1	Stochastcombinaties IJVD	13
3.2	Windsnelheid	14
3.3	Windrichting	15
3.4	Rivierafvoeren	16
3.4.1	Correlatie afvoer IJssel en Vecht	16
3.4.2	Afvoergolf bij Olst (IJssel)	17
3.4.3	Afvoer bij Ommen (Vecht)	17
3.5	Laterale toestromingen	18
3.6	IJsselmeerpeil	19
3.7	Verdeling afvoer Kornwerderzand en Den Oever	19
3.8	Bypass Kampen	19
3.9	Veessen-Wapenveld	20
3.10	Initiële condities en stuwstanden	21
3.11	Controle randvoorwaarden	22
4	Werkwijze uitvoeren productieberekeningen	25
4.1	Testfase	25
4.2	Opzet berekeningen en gebruik Amazon	25
4.2.1	Naamgeving van de berekeningen	25
4.2.2	Benodigde bestanden voor een berekening	25
4.3	Uitvoer van een berekening	26
4.4	Controle of een berekeningssuccesvol is uitgevoerd	27
5	Fysische controle productieberekeningen	29
5.1	Inleiding	29
5.2	Post-processing van de berekeningen	29
5.3	Algemene constatering WAQUA pre-processor en rekenkern	30
5.3.1	Meldingen WAQPRE	30

5.3.2	Meldingen WAQPRO	30
5.4	Analyse maximale waterstanden en afvoeren in de as van de rivier	32
5.4.1	Max13-waterstanden en afvoeren	32
5.4.2	Consistentiechecks waterstanden	36
5.5	Analyse functioneren keringen, regelwerken, stuwen en spuisluizen	41
5.5.1	Ramspolkering (Balgstuw Ramspol)	41
5.5.2	Functioneren Bypass Kampen	48
5.5.3	Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld	50
5.5.4	Stuwen	53
5.5.5	Spuisluizen Afsluitdijk: droogval bij Kornwerderzand en/of Den Oever (volumecheck)	53
5.6	Controle max13-waarden	55
5.7	Instabiliteiten in de maximale waterstand	58
5.8	Instabiliteiten in het tijdsverloop van de waterstandtijdreeksen	62
6	Conclusies	69
7	Referenties	73
Bijlage(n)		
A	DATA-ARCHIEF	A-1
B	Toelichting consistentiechecks	B-1
B.1	Gehanteerde locaties	B-1
B.2	Spreadsheet	B-2
B.2.1	Afvoer	B-3
B.2.2	Windsnelheid	B-4
B.2.3	Windrichting	B-5
B.2.4	Meerpeil	B-6
C	Ontbrekende max13-waarden	C-1
D	Implementatie afleiding randvoorwaarden in Matlab	D-1

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 IJssel-Vechtdelta (IJVD) are described. This report also presents the WAQUA model instrumentation and the determination of boundary and initial conditions. The Ramspol barrier is part of the WAQUA model schematization. The barrier closes for water levels higher than 0.5 m+NAP on Lake Ketel and a current in easterly direction in the proximity of the barrier. The sluices in the Afsluitdijk (Den Oever and Kornwerderzand) and the high-water channel Veessen-Wapenveld are also part of this schematization. The Kampen bypass is schematized as a discharge outlet on the IJssel and a discharge inlet on Lake Vossen.

The stochastic variables that have been considered are: Vecht- and IJssel discharge (correlated), Lake IJssel level, wind velocity and direction and the position of the Ramspol barrier. Two positions were taken into account for the Ramspol barrier: 'always open' (failing) and 'closing regime' (not failing). 7800 (2*3900) WAQUA runs were performed at the Amazon cluster. The results of these runs (selected "getdata"-output) have been stored in the data archive of Deltares. As a check, the physical patterns of these computations have been verified for unrealistic fluctuations of the water level.

Closure of the barrier was modelled in 2849 of the 3900 computations (73%), for which a closing regime for the Ramspol barrier was simulated. The number of closures demonstrates the expected dependencies of the various stochastic variables. The number of closures increases for increasing lake level and most closures occur during strong winds from westerly (D270) and north-westerly (D315) wind directions, directions for which the water is blown towards the Ramspol barrier. The functioning of the Ramspol barrier, the high-water channel Veessen-Wapenveld, the Bypass Kampen and the sluices in the Afsluitdijk in WAQUA is as expected. The modelled outlets of the sluices in the Afsluitdijk run dry in situations where the wind causes a drop in the water level at the Afsluitdijk. This causes an imbalance in the water volume, because too much water is retained in the system. This problem occurs for wind velocities of 34 m/s or higher and in particular when low lake levels in combination with northerly winds occur. The mean lake IJssel level is in the most extreme situation 6 cm higher than in situations when the sluices do not run dry. As a result, the computed water levels will be too high. However, the effect on the assessed water levels ("toetspeilen") is negligible as these situations only occur during extreme wind conditions.

The number of dry points decreases when the discharge and/or lake level increase. The water level is almost independent of the lake level in the upper branches of the Vecht. The water level in the upper branches of the Vecht (km35) is only affected by the lake IJssel level during a low discharge (Q02, 100 m³/s on the Vecht), because the Ramspol barrier is open in this case. The influence of the weirs in the Vecht is visible up to a discharge of 100 m³/s on the Vecht. The water levels on Lake IJssel are in accordance with the set lake levels (except for situations when the sluices run dry). The water level on the IJssel increases with increasing wind velocity and/or lake level; the effects are still apparent at Olst (km957) for extreme wind velocities and high lake levels.

It has been checked for all output locations whether large deviations occur between 'max13' and 'sepmax' (the maximum water level per time step), because this could indicate physically unrealistic model behaviour. A deviation of maximal 3 cm was allowed. In addition the water

level change between two time steps was checked. A maximum change of 4 cm per minute was allowed. The output location was rejected in case one of the aforementioned criteria was not met.

Compared to the WBI-2017 production runs for the Upper rivers, a relative large amount has been rejected. A relative large number of output points show instabilities around the peak for high wind velocities because many locations fall dry when strong winds occur and this leads to numerical problems. These problems occur especially during low river discharges and low lake levels because the water volume in the system is relatively low and therefore potential instabilities are more likely to occur. Instabilities in the vicinity of the Ramspol barrier arise in particular when the barrier is open. On the western banks of the IJssel lies a connecting barrier for the Kamper Island. This barrier is circa 3 m+NAP high. A relative large number of instabilities appear in computations where this barrier is flooded.

Despite the fact that a large amount of output locations have been rejected, physically plausible patterns have been found in the modelled water level series as a function of various stochastic variables. In addition, the operation of specific elements in the WAQUA schematization (Ramspol barrier, high-water channel Veessen-Wapenveld, bypass Kampen and the sluices in the Afsluitdijk) function as expected. Therefore it can be concluded that the computations are reliable and can be used to fill the relational databases. Nevertheless, it is recommended to investigate whether the rejected output locations can be used to fill the relational databases. However, changing the criteria, for example when taking into account more physical processes, could lead to the rejection of more locations.

Lijst van Tabellen

Tabel 3.1	Stochastcombinaties IJVD.	13
Tabel 3.2	Relatie tussen potentiële en openwater windsnelheid.	14
Tabel 3.3	Gemodelleerde windrichtingen.	15
Tabel 3.4	Correlatie tussen afvoer bij Lobith op de Boven-Rijn, bij Olst op de IJssel en bij Ommen op de Vecht.	16
Tabel 3.5	Piekafvoer bij Olst uit berekeningen van de Bovenrivieren-Rijntakken (Deltares, 2016a).	17
Tabel 3.6	Laterale toestromingen op de IJssel en Vecht.	18
Tabel 3.7	Afvoer spuisluizen Afsluitdijk bij IJssel-afvoer 2.300 m ³ /s afhankelijk als functie van het meerpeil.	19
Tabel 4.1	Invoerbestanden die gelijk zijn voor alle berekeningen (ALGwaq).	26
Tabel 5.1	Percentage van de afvoer door de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld.	52
Tabel 5.2	Uitvoerlocaties die in alle berekeningen droog zijn.	56
Tabel 5.3	Uitvoerlocaties waarbij in meer dan 5% van de berekeningen de 'max13' sterk afwijkt van tijdens de berekening geregistreeerde maximale waterstand.	59
Tabel 5.4	Uitvoerlocaties waarbij in meer dan 5% van de berekeningen een instabiliteit optreedt rond de piek-waterstand.	64
Tabel A.1	Overzicht van gegevens in het data-archief, die zijn gemaakt ter controle van de productieberekeningen.	A-2
Tabel B.1	Locaties extra waterstandspunten IJVD waar geen rivieraslocaties beschikbaar zijn.	B-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 rekenrooster IJVD-model. De rode lijn geeft de as van de rivieren (IJssel en Vecht) weer.....	6
Figuur 2.2	Locaties open randen en bodemhoogte IJVD-model.	6
Figuur 2.3	Verdeling van de IJVD in 8 partities, genummerd van 1 t/m 8 en in verschillende kleuren.	8
Figuur 2.4	Ramspolkering inclusief afmetingen van de openingen (gele lijnen).....	10
Figuur 3.1	Schematische weergave van het verloop van de windsnelheid (Sprengers, 2010).....	14
Figuur 3.2	Variabele windschuifspanningscoëfficiënt.	15
Figuur 3.3	Verloop windsnelheid en windrichting voor berekening met afvoergolf voor windrichting D292 (WNW) en windsnelheid U43.	16
Figuur 3.4	Voorbeeld randvoorwaarden met een constante afvoer op de IJssel.	22
Figuur 3.5	Voorbeeld randvoorwaarden met een afvoergolf IJssel op de IJssel.	23
Figuur 5.1	Aantal warnings van partitie 8 uitgesplitst naar hoge afvoer, hoog meerpeil en grote windsnelheid.....	31
Figuur 5.2	Gebruikte cputijd van partitie 8 uitgesplitst naar droogvalsituatie spuisluizen Afsluitdijk.....	31
Figuur 5.3	Stuweffecten op de Vecht bij lage afvoer en laag meerpeil.....	32
Figuur 5.4	Stochastcombinatie met hoogste afvoer op de Vecht, falende balgstuw.	33
Figuur 5.5	Extreme waterstand op de IJssel (YVO).....	33
Figuur 5.6	Effect laterale toestromingen op de Vecht/ het Zwarte Water.	34
Figuur 5.7	max13-afvoeren IJssel (exclusief Veessen-Wapenveld en Bypass Kampen) bij Q07, geen wind.	35
Figuur 5.8	max13-afvoeren IJssel (exclusief Veessen-Wapenveld en Bypass Kampen) bij Q08, geen wind.	35
Figuur 5.9	Afvoerverlopen op de IJssel net voor rkm 990 en net na rkm 991 (de onttrekkingslocatie van de Bypass Kampen). De markers geven het tijdstip en waarde van de max13-afvoer weer.....	36
Figuur 5.10	Consistentiecheck Vecht en noordzijde IJsselmeer, zonder wind.....	38
Figuur 5.11	Consistentiecheck IJssel en zuidzijde IJsselmeer, Q08, D292 (WNW), effect windsnelheid en meerpeil.....	39
Figuur 5.12	Consistentiecheck Vecht en noordzijde IJsselmeer, U43, D292 (WNW), S04, effect afvoer en scenario Ramspolkering (gesloten en open).	39

Figuur 5.13	Effect windrichting bij relatief hoge rivierafvoer (Q10, piekafvoer Olst 3.400 m ³ /s) en meerpeil van 0,9 m+NAP.....	40
Figuur 5.14	Consistentiecheck gedrag Ramspolkering, effect meerpeil en windrichting bij hoogste afvoer.	40
Figuur 5.15	Consistentiecheck, effect van windsnelheid bij hoogste afvoer, hoogste meerpeil en WNW-wind.	41
Figuur 5.16	Aantal berekeningen met sluiting Ramspolkering als functie van de afvoer.....	42
Figuur 5.17	Aantal berekeningen met sluiting Ramspolkering als functie van het meerpeil.	42
Figuur 5.18	Aantal berekeningen met sluiting Ramspolkering als functie van de windsnelheid.	43
Figuur 5.19	Aantal berekeningen met sluiting Ramspolkering als functie van de windrichting.	43
Figuur 5.20	Inzet van de Balgstuw voor berekening Q11U43D225S06.....	44
Figuur 5.21	Sturingspunten Balgstuw. De locatie van de Balgstuw en diverse controlepunten zijn aangegeven.....	45
Figuur 5.22	Verklaring sluitgedrag Balgstuw voor berekening Q11U43D225S06. Zie tekst voor uitleg van het gehanteerde condities voor afvoer en waterstand.....	46
Figuur 5.23	Inzet van de Balgstuw voor berekening Q01U34D225S06.....	47
Figuur 5.24	Verklaring sluitgedrag Balgstuw voor berekening Q01U34D225S06. Zie tekst voor uitleg van het gehanteerde criterium voor afvoer en waterstand.	47
Figuur 5.25	Inzet van de Balgstuw voor berekening Q01U34D225S06.....	48
Figuur 5.26	Voorbeeld functioneren Bypass Kampen, zonder wind.	49
Figuur 5.27	Voorbeeld functioneren Bypass Kampen, met wind.	50
Figuur 5.28	Voorbeeld stochastcombinatie waarbij de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld gaat meestromen.....	50
Figuur 5.29	Waterstandseffect hoogwatergeul Veessen-Wapenveld bij Q05U11D292S06.	51
Figuur 5.30	Afvoerverloop hoogwatergeul Veessen-Wapenveld voor de stochastcombinatie met de hoogste waterstand op km961.	51
Figuur 5.31	Vergelijking afvoer door de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld tussen IJVD en Bovenrivieren-Rijntakken.....	53
Figuur 5.32	Waterdiepte hele model bij windsnelheid 43 m/s.	54
Figuur 5.33	Waterstand bij Den Oever bij windsnelheid 43 m/s.....	54
Figuur 5.34	Analyse droogval spuisluizen Afsluitdijk (berekeningen met sluitregime Ramspolkering).....	55
Figuur 5.35	Aantal uitvoerlocaties met droogval als percentage van het totaal aantal berekeningen.	56
Figuur 5.36	Berekening met grootste aantal droge punten (boven, 2342 zonder backup-locaties) en berekening met kleinste aantal droge punten (onder, 114 zonder backup-locaties).....	57

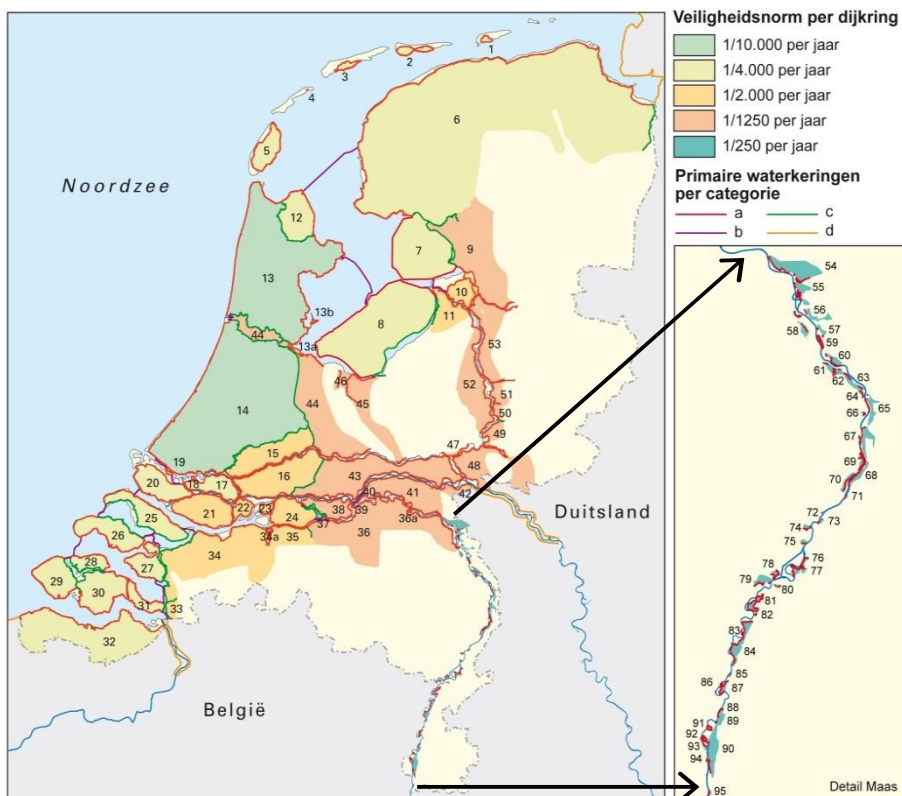
Figuur 5.37	Aantal uitvoerlocaties waarbij max13 sterk afwijkt van sepmax als percentage van het totaal aantal berekeningen.	59
Figuur 5.38	Voorbeeld locatie waarbij het max13-criterium wordt overschreden in het Zwarte Meer.	60
Figuur 5.39	Berekening waarbij het max13-criterium het meeste keer wordt overschreden in de benedenloop van de IJssel (168 met backup-locaties, 90 zonder backup-locaties).	61
Figuur 5.40	Voorbeeld van een berekening waarbij het max13-criterium wordt overschreden op de IJssel.	62
Figuur 5.41	Aantal locaties met instabiliteiten in tijdreeks als percentage van het totaal aantal berekeningen.	63
Figuur 5.42	Voorbeeld van een berekening met instabiliteiten rond de piekwaterstand: onderlopen van een locatie op het Zwarte Water.	65
Figuur 5.43	Aantal voorbeelden van instabiliteiten rond de piek in waterstand.	66
Figuur 5.44	Relatief groot aantal instabiliteiten voor lage rivierafvoer en meerpeil.	67
Figuur B.1	Locaties extra waterstandspunten IJVD waar geen rivieraslocaties beschikbaar zijn.	B-2
Figuur C.1	“Instabiliteit” op IJssel die leidt tot een ongedefinieerde max13-waarde (“NaN”).	C-1

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.



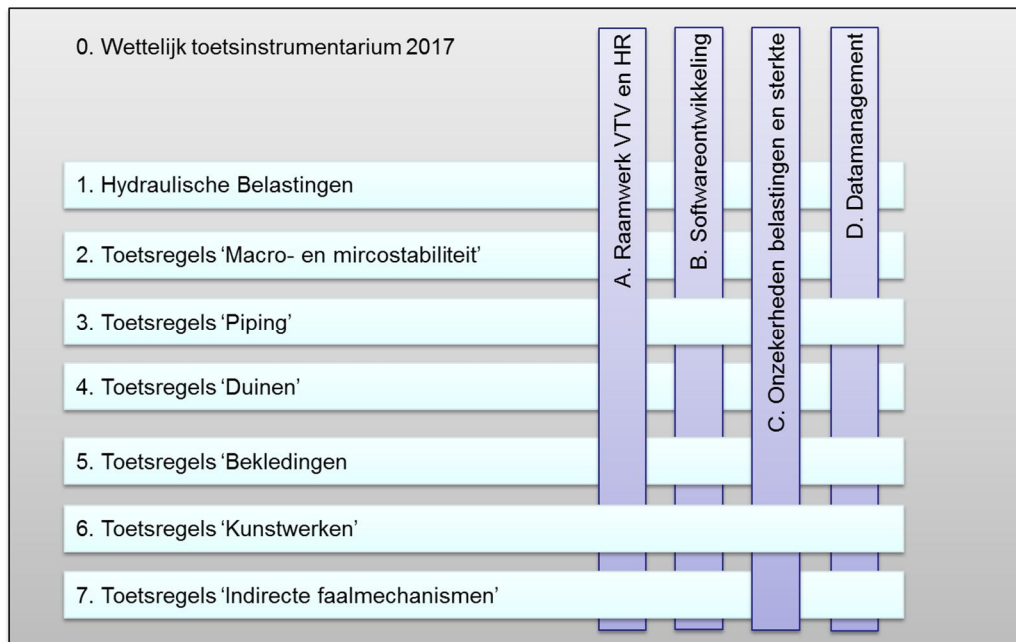
Figuur 1.1 Normfrequenties voor de primaire waterkeringen.

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 IJssel-Vechtdelta (IJVD).

1.2 Doel

Het voorliggende rapport geeft:

- Een overzicht van het WAQUA modelinstrumentarium dat gebruikt is voor de WAQUA-productieberekeningen voor de IJVD.
- 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.

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

Voor de WTI productieberekeningen is gebruik gemaakt van een WAQUA modelschematisatie, die onderdeel is van een door Deltares beheerde gebiedsschematisatie voor de IJssel-Vechtdelta. Eind 2014 zijn in het kader van WTI2017 testberekeningen uitgevoerd door RHDHV (2014). Naar aanleiding van die testen is een aantal uitvoerlocaties aangepast en is de stuwsturing Vechterweerd en Kadoelersluis aangepast. Deze aanpassingen zijn verwerkt in de uitgeleverde modelschematisatie (zie Deltares, 2014b voor details).

Op 24 februari 2015 is de volgende gebiedsschematisatie uitgeleverd:

[DATA-ARCHIEF]2.IJVD\1.Gebiedsschematisaties\02_Modellen\ijvd-hr2017_5-v3.zip

De daaruit gebruikte WAQUA modelschematisatie is:

ijvd-hr2017_5-v3.zip\ijvd-hr2017_5-v3\modelen\waqua\hr2017_5-v3

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

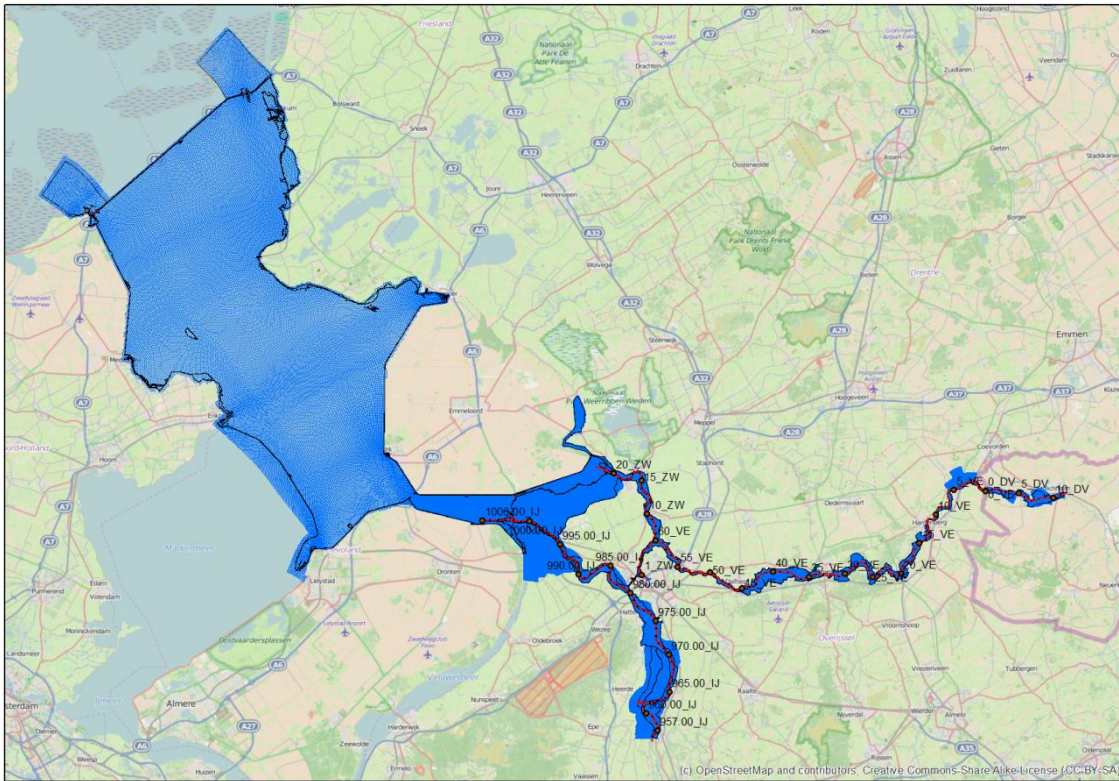
2.2 Studiegebied en rekenrooster

Het studiegebied voor de productieberekeningen voor de IJssel-Vechtdelta omvat de volgende deelgebieden:

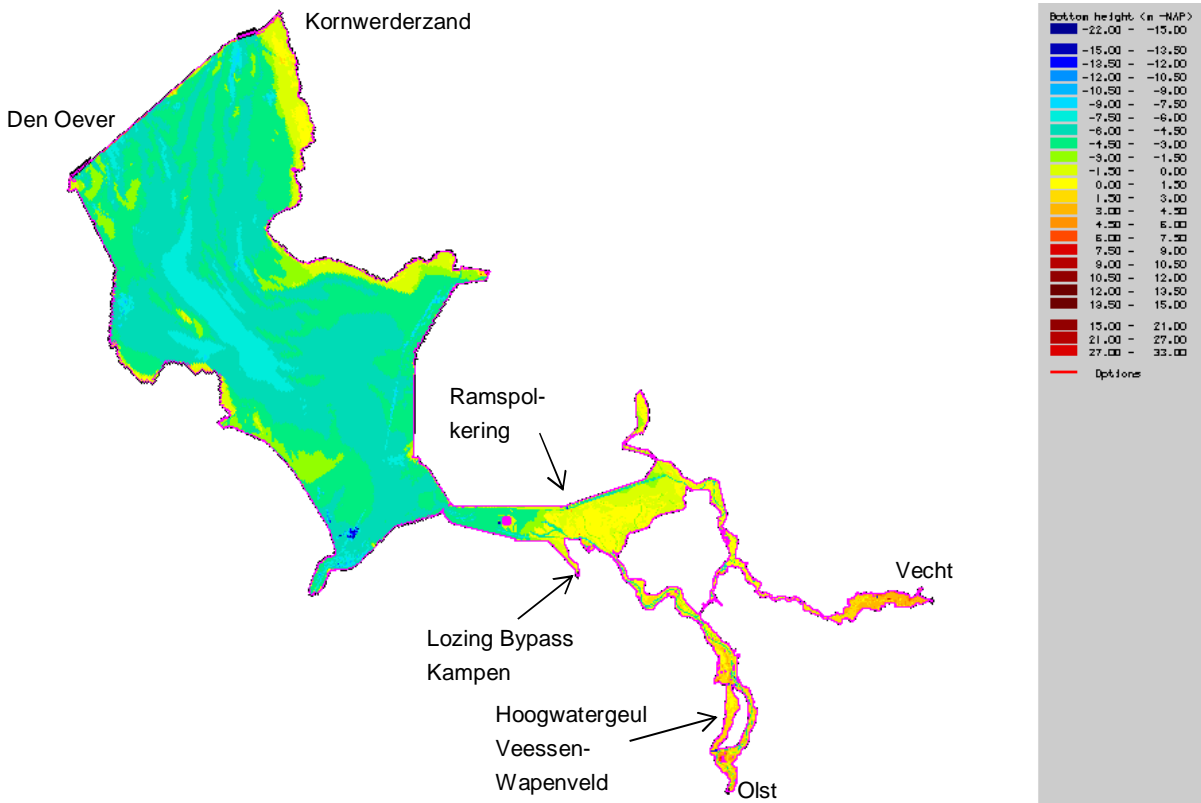
- IJssel benedenstreams van rivierkilometer 956 nabij Olst (km 957)
- de Vecht benedenstreams van rivierkilometer 35 bij de Vasenerbrug nabij Ommen
- het Zwarte Water
- het Zwarte Meer
- het Vollenhovermeer
- het Ketelmeer
- het Vossemeer
- het Kadoelermeer
- het IJsselmeer

Het rekenrooster van het IJVD-model bestaat uit 532x3.732 roostercellen en is weergegeven in Figuur 2.1. Door gebruik te maken van een enclosure zijn er 266.960 actieve cellen. De resolutie in de IJssel-Vechtdelta is aanzienlijk groter dan op het IJsselmeer, waar de roostercellen tot circa 300x300m groot zijn.

In WTI2011 was de IJssel-Vechtdelta opgesplitst in twee afzonderlijke modellen met ieder hun eigen randvoorwaarden: (1) een model bestaande uit IJsselmeer, Ketelmeer en Vossemeer, en (2) een model bestaande uit Vecht, IJssel, Zwarte Meer en Zwarte Water. In WTI2017 zijn de twee modellen samengevoegd. Het IJsselmeer maakt dus integraal onderdeel uit van de gebruikte WAQUA-schematisatie, omdat het IJsselmeer een belangrijke rol speelt bij de modellering van de waterbeweging in de IJssel-Vechtdelta (windopzet, spuisluizen, etc.).



Figuur 2.1 Overzicht rekenrooster IJVD-model. De rode lijn geeft de as van de rivieren (IJssel en Vecht) weer.



Figuur 2.2 Locaties open randen en bodemhoogte IJVD-model.

2.3 Modelschematisatie

Figuur 2.2 geeft de bodemhoogte van het IJVD-model weer, zoals die in de WAQUA-schematisatie is opgenomen. In het figuur zijn ook de locaties van open randen (Vecht, IJssel, lozing Bypass Kampen en spuilsuizen bij Den Oever en Kornwerderzand) en de Ramspolkering weergegeven. Merk op dat de 'boxen' roosterzellen ten noord-westen van de Afsluitdijk bij Den Oever en Kornwerderzand (Figuur 2.1) door toepassen van een enclosure (rekenroosterbegrenzing) geen onderdeel uitmaken van het actieve deel van het rekenrooster. In het IJVD-model is ook een aantal lozingen van gemalen en sluizen opgenomen. Details hieromtrent komen in Hoofdstuk 3 aan de orde.

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 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:

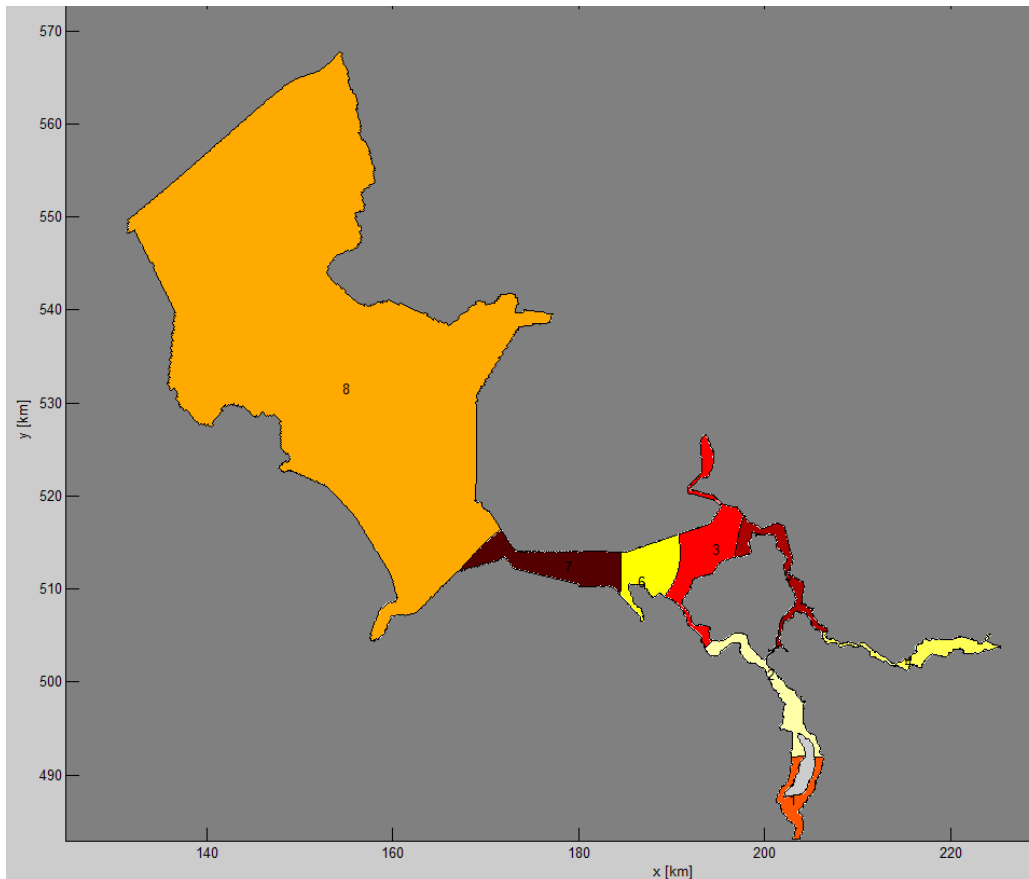
- Becker & van der Mheen (2015): Modelschematisaties IJsselmeer-Vecht-IJsseldelta. B&O-model 2014 en WTI2017-model, en
- van der Mheen (2014): 5de generatie IJVD WAQUA model. Bouw, kalibratie en verificatie.

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 leidt tot een gebalanceerde verdeling van het rekenwerk over 8 cores.



Figuur 2.3 Verdeling van de IJVD in 8 partities, genummerd van 1 t/m 8 en in verschillende kleuren.

2.5 Uitvoerlocaties

Voor de uitvoerlocaties geldt in principe dat de WT12011-set van uitvoer- en HR-locaties gehandhaafd blijft, met uitzondering van de locaties waar dijkkringlijnen zijn veranderd. Eventueel nieuw te definiëren locaties (als gevolg van dijkverleggingen) zijn conform de WT12011 procedure gedefinieerd.

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-IJssel-Vechtdelta uitvoer beschikbaar.

Binnen WTI2017 worden geen nieuwe HR afgeleid voor het IJsselmeer. Een uitgebreide controle van uitvoerpunten langs het IJsselmeer is in dit rapport niet uitgevoerd. Wel is geverifieerd dat waterstanden op het IJsselmeer consistent en verwachte patronen vertonen en dat de spuisluisen in het model functioneren conform opgegeven randvoorwaarden.

2.6 Specifieke elementen in de modelschematisatie

2.6.1 Ramspolkering

De Ramspolkering is de kering die het Ketelmeer scheidt van het Zwarte Meer. In dit kader wordt alleen de stuw in de verbindende kering aangeduid als Ramspolkering. In het WAQUA-model is het werkelijke sluitcriterium voor de Ramspolkering opgenomen:

- De kering sluit bij een waterstand op het Ketelmeer groter dan 0,5 m+NAP en een stroming in oostelijke richting ter plaatse van de kering.
- De kering opent weer wanneer de waterstand aan de buitenzijde lager wordt dan de waterstand aan de binnenzijde.



Figuur 2.4 Ramspolkering inclusief afmetingen van de openingen (gele lijnen).

2.6.2 Spuisluizen IJsselmeer

Bij de Afsluitdijk wordt water geloosd richting de Waddenzee, met behulp van spuisluizen bij Kornwerderzand (KWZ) en Den Oever (DO), zie Figuur 2.2 voor de locaties. Uit “balansdata” van Rijkswaterstaat volgt dat over de periode 1976 t/m 2010 de gemiddelde verhouding tussen de spuidebieten bij KWZ en DO = 2,2 op 3,2. In het WAQUA-model zijn de afvoeren van de spuisluizen afgeregeld om onder specifieke situaties het gemiddeld IJsselmeerpeil constant te houden. In paragraaf 3.7 is een verhouding tussen de spuidebieten bij KWZ en DO van ongeveer 3 op 2 afgeleid voor het WAQUA-model. De in het WAQUA-model berekende verdeling van spuidebieten voor de specifieke condities wijkt hiermee af van de langjarig gemiddelde spuidebieten in de praktijk.

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 ($>15.500 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith). Fase 1 bestaat uit twee subfases; fase 1a met de huidige configuratie van het Roggebotcomplex en fase 1b waarin de spuicapaciteit van het Roggebotcomplex is vergroot.

Gebruikmakend van het huidige Roggebotcomplex kan in fase 1a maximaal circa $220 \text{ m}^3/\text{s}$ worden afgevoerd bij een maatgevende afvoer die samenvalt met een eenmaal per jaar

stormsituatie of een verhoogd peil op Vossemeer door neerslag of IJsselafvoer (0,6 m+NAP). De afvoer van circa 220 m³/s door de bypass veroorzaakt 12,8 cm waterstandsaling bij Zwolle bij een extreme 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. Dit is opgenomen als onttrekking ter hoogte van km 992 in de IJssel en een lozing bij de Roggebotsluis in het Vossemeer. Zie paragraaf 3.8 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). Zie paragraaf 3.9 voor details van de implementatie in de WAQUA-modelschematisatie.

2.6.5 Stuwen en keersluizen

De volgende stuwen en keersluizen zijn opgenomen in de modelschematisatie:

- de stuwen bij Vilsteren
- de stuw bij Vechterweerd
- de Kadoelerkeersluis (=harde rand in het model)

De stuwsturing is niet gewijzigd ten opzichte van de uitgeleverde modelschematisatie (zie paragraaf 2.1). De initiële stuwstanden zijn toegelicht in paragraaf 3.10. Voor stuw Vilsteren betekent dit dat deze open gaat vanaf een waterstand van 2,10 m+NAP en volledig geopend is bij een waterstand van 2,45 m+NAP. Voor stuw Vechterweerd betekent dit dat de stuw open gaat vanaf een waterstand van 0,9m+NAP en volledig geopend is bij een waterstand van 1,1m+NAP.

3 Randvoorwaarden en initiële condities

3.1 Stochastcombinaties IJVD

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de door te rekenen stochastcombinaties voor IJVD.

Vecht [m ³ /s]	IJssel [m ³ /s]	IJsselmeerpeil [m+NAP]	Windsnelheid [m/s]	Windrichting [-]	kering
10	100	-0.4	0	ZW	sluitregime
100	500	-0.1	10	WZW	altijd open
250	950	0.4	16	W	
400	1400	0.9	22	WNW	
550	1850	1.3	27	NW	
700	2300	1.5	32	NNW	
850	2750		37	N	
925	2975		42		
1000	3200				
1067	3400				
1133	3600				
1200	3800				
1267	4000				
13	13	6	8	7	2
				Totaal	7800

Tabel 3.1 Stochastcombinaties IJVD.

De Vecht- en IJsseldebieten zijn afhankelijke stochasten (zie paragraaf 3.4.1). Het totaal van 7800 berekeningen is als volgt opgebouwd:

$$13 \text{ debieten} * 6 \text{ IJsselmeerpeilen} * 7 \text{ windsnelheden} > 0 * 7 \text{ richtingen} * 2 \text{ keringstanden} + 13 \text{ debieten} * 6 \text{ IJsselmeerpeilen} * 1 \text{ windsnelheid} = 0 * 2 \text{ keringstanden} = 7644 + 156 = 7800.$$

Opmerkingen bij deze tabel:

- De IJsselafvoer is de afvoer benedenstrooms van rivierkilometer 957 nabij Olst; de Vechtafvoer is benedenstrooms van rivierkilometer 35 bij de Vasenerbrug nabij Ommen.
- Tot een IJsselafvoer van 2.300 m³/s wordt gerekend met stationaire afvoeren; daarboven met afvoergolven op de IJssel (zie paragraaf 3.4.2).
- Het IJsselmeerpeil is de initiële waterstand op het IJsselmeer. Door middel van een afvoeronttrekking bij Kornwerderzand en Den Oever wordt deze tijdens de berekening constant gehouden (zie paragraaf 3.10).
- De windsnelheid in de tabel is de potentiële windsnelheid, zie paragraaf 3.2 voor de vertaling naar de openwater windsnelheid zoals die in WAQUA wordt gehanteerd.
- Windrichting (Nautisch): 360 (= 0) graden is noordenwind, 90 graden komt uit het oosten, etc.
- Onderaan de tabel is het totaal aantal uit te voeren productieberekeningen opgenomen.

3.2 Windsnelheid

In WAQUA wordt gebruik gemaakt van openwater windsnelheden. De windsnelheid is ruimtelijk uniform over het hele modelgebied. De omzetting van potentiële windsnelheid naar openwater windsnelheid gebeurt volgens de methodiek zoals beschreven in Bijlage D (Open water transformatie van windsnelheid) van De Waal (2003).

Hieronder volgt voor elke voorkomende potentiële windsnelheid stochast (U_{pot}) de bijbehorende open water windsnelheid (U_{ow}).

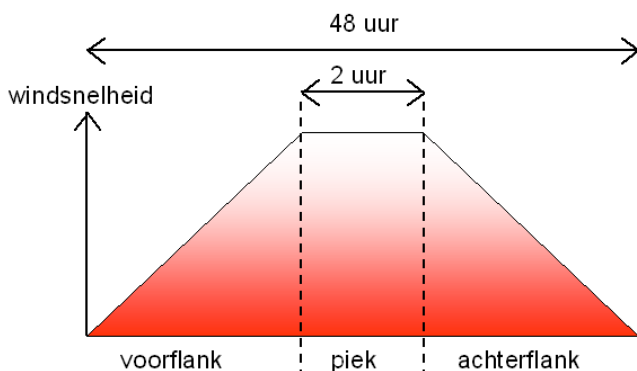
U_{pot} [m/s]	10	16	20	22	27	30	32	37	42	46
U_{ow} [m/s]	11,1	17,5	21,6	23,7	28,7	31,7	33,7	38,5	43,3	47,1

Voor de IJVD zijn, naast een windsnelheid gelijk aan 0,0 m/s, zeven windsnelheden gekozen, zie Tabel 3.2.

Potentielle windsnelheid [m/s]	Openwater windsnelheid op basis van tabel WT12011 [m/s]	In WAQUA [m/s]	Naamgeving in siminp
10,00	11,14	11,1	U11
16,00	17,49	17,5	U18
22,00	23,66	23,7	U24
27,00	28,69	28,7	U29
32,00	33,64	33,6	U34
37,00	38,50	38,5	U39
42,00	43,30	43,3	U43

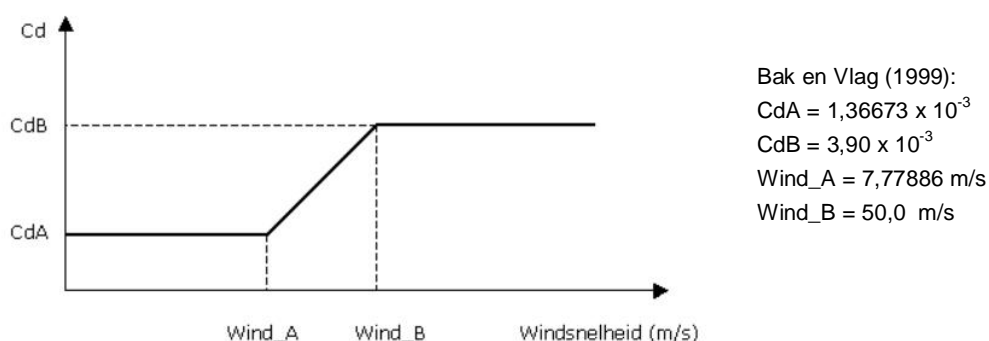
Tabel 3.2 Relatie tussen potentiële en openwater windsnelheid.

Het verloop van de storm is als volgt. In 23 uur loopt de windsnelheid lineair op van nul naar de maximale waarde. De maximale windsnelheid treedt vervolgens gedurende twee uur op. Daarna neemt de windsnelheid in opnieuw 23 uur lineair af tot nul. Figuur 3.1 geeft het windverloop schematisch weer.



Figuur 3.1 Schematische weergave van het verloop van de windsnelheid (Sprengers, 2010).

In het WAQUA-model is een uniform windveld opgelegd, waarbij de (openwater)windsnelheid en de windrichting in de tijd variëren. De schuifspanning die de wind op het wateroppervlak uitoefent, is berekend met behulp van een variabele windschuifspanningscoëfficiënt C_D (Bak en Vlag, 1999), zie Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Variabele windschuifspanningscoëfficiënt.

3.3 Windrichting

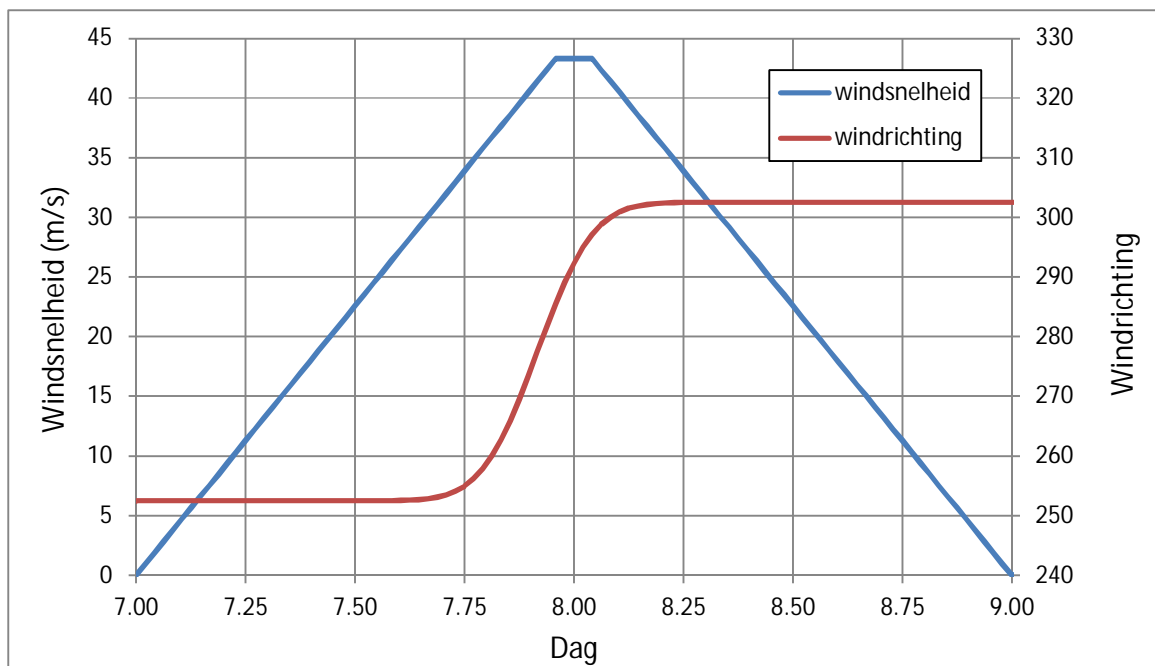
Er zijn 7 windrichtingen onderscheiden, zie Tabel 3.1. Tabel 3.3 geeft een overzicht van de in WAQUA gehanteerde windrichting en de code gebruikt in de berekeningen.

Windrichting	In WAQUA	Code
ZW	225	D225
WZW	247,5	D247
W	270	D270
WNW	292,5	D292
NW	315	D315
NNW	337,5	D337
N	360	D360

Tabel 3.3 Gemodelleerde windrichtingen.

Een voorbeeld van het verloop van windsnelheid (en –richting) voor een afvoergolf is gegeven in Figuur 3.3. Een uur na het bereiken van de maximale windsnelheid¹ heeft de windrichting ook de gewenste waarde. De toegepaste winddraaiing is gelijk aan de draaiing gehanteerd in WTI2011 (Vuik et al. 2011). Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de sector 180-240 graden, 240-300 graden en 300-360 graden ten opzichte van wind uit noordelijke richting.

¹ In dit geval voor een situatie met een afvoergolf waarbij de piek in de windsnelheid valt na 8 dagen omdat er in de berekeningen een inspeeltijd zonder wind van 7 dagen worden gehanteerd. Voor berekeningen met een constante rivierafvoer is deze inspeeltijd 3 dagen.



Figuur 3.3 Verloop windsnelheid en windrichting voor berekening met afvoergolf voor windrichting D292 (WNW) en windsnelheid U43.

3.4 Rivierafvoeren

3.4.1 Correlatie afvoer IJssel en Vecht

De afvoer van de Vecht bij Ommen is gecorreleerd aan de afvoer van de IJssel bij Olst middels een 1:1 relatie, zie Tabel 3.4. Voor de correlatie IJssel en Vecht is dezelfde correlatie gehanteerd als WT2011 (Vuik et al., 2011). Voor WT2017-afvoeren die hoger zijn dan de maximale afvoer in WT2011 (IJsselaflower vanaf 3.200 m³/s en Vechtaflower vanaf 1.000 m³/s) is de lineaire relatie tussen beide afvoeren zoals beschreven in Geerse (2006) gehanteerd.

Boven-Rijn (Lobith) [m ³ /s]	IJssel (Olst) [m ³ /s]	Vecht (Ommen) [m ³ /s]
675	100	10
2.709	500	100
6.536	950	250
9.566	1.400	400
12.215	1.850	550
14.735	2.300	700
16.259	2.750	850
16.661	2.975	925
17.539	3.200	1.000
18.375	3.400	1.067
19.212	3.600	1.133
20.048	3.800	1.200
20.885	4.000	1.267

Tabel 3.4 Correlatie tussen afvoer bij Lobith op de Boven-Rijn, bij Olst op de IJssel en bij Ommen op de Vecht.

3.4.2 Afvoergolf bij Olst (IJssel)

De afvoer bij Olst is constant voor afvoeren lager dan 2.300 m³/s. Vanaf een IJsselafvoer van 2.300 m³/s is een afvoergolf gehanteerd (in verband met de overstromende verbindende keringen bij het Kampereiland). Deze afvoergolven volgen uit de productieberekeningen voor de Bovenrivieren-Rijntakken, zie Tabel 3.5.

Piekafvoer bij Lobith [m ³ /s]	Piekafvoer bij Olst [m ³ /s]
6.000	889
8.000	1.120
10.000	1.483
13.000	1.989
16.000	2.557
16.500	2.947
17.000	3.073
18.000	3.311
20.000	3.812
22.000	4.380
24.000	4.942

Tabel 3.5 Piekafvoer bij Olst uit berekeningen van de Bovenrivieren-Rijntakken (Deltares, 2016a).

Tabel 3.5 geeft per berekening van de Rijntakken de maximale afvoer bij Olst weer. Vervolgens zijn de volgende stappen doorlopen om per gedefinieerde piekafvoer uit de werklijn (Tabel 3.4) de afvoergolf bij Olst te verkrijgen:

- In Tabel 3.5 twee dichtstbijzijnde piekafvoeren bij Olst opzoeken.
- Lineaire interpolatie tussen deze piekafvoeren om de gedefinieerde piekafvoer uit Tabel 3.4 te verkrijgen.
- Omdat de interpolatie is bepaald op basis van het maximum van de individuele reeksen (welke niet perse op hetzelfde moment optreden) is een correctie nodig om de exacte maximum afvoer te verkrijgen. Deze factor is gelijk aan (*gewenste maximale afvoer*)/(*maximum van de hiervoor gevonden reeks*).
- De afvoer is geminimaliseerd op 2.300 m³/s (conform WT12011).
- In berekeningen met afvoergolven moet de afvoerpiek bij Olst samenvallen met de piek in de wind, die na 8 dagen ligt (zie Figuur 3.3). Daarom is de afvoergolf zodanig verschoven dat de piek bij Olst na 8 dagen valt. Effectief betekent dit dus een combinatie van maximale afvoer tijdens de afvoergolf en maximale windopzet. Dit is conform WT12011.

3.4.3 Afvoer bij Ommen (Vecht)

De afvoer op de Vecht is in alle gevallen constant, ook in het geval van een afvoergolf op de IJssel. De afvoer op de Vecht volgt direct uit de werklijn (Tabel 3.4). Alle berekeningen met afvoergolven starten vanuit de initiële condities voor $Q_{Qlst} = 2.300 \text{ m}^3/\text{s}$; de afvoer op de Vecht is dan voor alle gevallen (initieel) 700 m³/s. In WT12011 is voor IJsselafvoeren groter dan 2.300 m³/s de randvoorwaarde op de Vecht bij de start geforceerd op de waarde uit de werklijn. Om instabiliteiten te voorkomen is er in WT12017 voor gekozen om de afvoer op de Vecht bij Ommen lineair op te laten lopen van 700 m³/s tot de waarde uit de werklijn (dat wil zeggen tot het moment dat op de IJssel 2.300 m³/s wordt bereikt, zie ook Figuur 3.5). Dit betekent dat de afvoer op de Vecht de juiste waarde heeft ruimschoots voordat de piek in de waterstanden wordt bereikt als gevolg van IJssel-afvoer en windopzet. Ten opzichte van de aanpak in WT12011 zou dit in theorie kunnen leiden tot iets lagere waterstanden in situaties waarbij de maximale waterstand op de Vecht niet/nauwelijks hoger wordt dan de initiële waterstand, met andere woorden in niet-maatgevende situaties.

3.5 Laterale toestromingen

Voor zowel de IJssel als de Vecht zijn de lateralen constant (lees: stationair) per berekening.

IJssel

Voor de IJssel zijn de lateralen overgenomen uit de productieberekeningen voor de Rijntakken.

Het gaat om:

- diverse_beken_gemalen_km_975_985
- diverse_gemalen_km_987_1002

De productieberekeningen voor de Rijntakken zijn uitgevoerd met afvoergolven; de (maximale) afvoer bij Olst is niet gelijk aan de afvoeren die worden doorgerekend voor de IJVD-berekeningen. Daarom is eerst uit de productieberekeningen van de Rijntakken de (max13) maximale afvoer per berekening bepaald. Vervolgens zijn via lineaire interpolatie de lateralen uit het Rijntakkenmodel (Deltares, 2016a) vertaald naar die voor de IJVD.

Vecht

Voor de lateralen van de Vecht worden dezelfde lateralen gehanteerd als in WT12011, met uitzondering van de afvoer van de Zwolse Grachten. Klopstra et al. (1999) geven aan dat er een fysisch maximum is van 68 m³/s voor deze afvoer. Waterschap Groot Salland geeft aan dat dit maximum mogelijk niet correct is, maar dan vooral bij lage waterstanden op het Zwarte Water. Vanuit de context van het WT12017 (waarbij gekeken wordt naar condities met hoge waterstanden op het Zwarte Water) wordt de aanname van het fysisch maximum als acceptabel verondersteld. Dit laatste vooral ook gegeven het feit dat de kalibratie/validatie van het WAQUA model heeft laten zien dat de nauwkeurigheid van het WAQUA model (voor hindcast periode) beperkt is, nagenoeg alle locaties hebben een sigma groter dan 0,10 meter. Een afwijking van enkele tientallen m³/s in de afvoer van de Zwolse grachten valt hierbij in het niet.

De lateralen voor de IJssel/Vecht zijn gegeven in Tabel 3.6.

IJssel (Olst)	IJ_1	IJ_2	Wester-veld	Klooster-zijl	Streuke-lerzijl	Zede-muden	Kostver-lorenzijl	Zwolse Grachten
100	2,2	0,1	0,0	0,0	0,0	1,7	0,1	2,0*
500	10,4	0,7	0,0	2,5	12,5	16,8	0,9	25,0*
950	20,6	1,1	1,0	5,0	25,0	41,9	2,3	68,0**
1.400	26,4	2,4	1,0	5,0	25,0	67,0	3,7	68,0
1.850	31,5	3,6	1,0	5,0	25,0	92,2	5,1	68,0
2.300	35,8	4,4	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0
2.750	38,0	4,9	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0
2.975	38,2	5,0	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0
3.200	38,3	5,2	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0
3.400	38,1	5,4	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0
3.600	37,7	5,6	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0
3.800	37,3	5,8	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0
4.000	37,4	5,9	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0

* 0,25 maal Vechtafvoer, zie Tabel 3.4 (1/100 Vecht (300) gelijk aan 1/100^e afvoer Weteringen (68 m³/s))

** 1/100^e afvoer Weteringen is 68 m³/s, fysisch maximum bij hoge waterstanden (zie Klopstra et al., 1999)

IJ_1 = diverse_beken_gemalen_km_975_985

IJ_2 = diverse_gemalen_km_987_1002

Tabel 3.6 Laterale toestromingen op de IJssel en Vecht.

3.6 IJsselmeerpeil

Voor de Vecht- en IJsseldelta is het meerpeil een onafhankelijke stochast. In totaal zijn zes verschillende waarden voor het meerpeil beschouwd, zie Tabel 3.1. Het meerpeil wordt in WAQUA opgelegd door middel van de beginvoorwaarde voor de waterstand, zie paragraaf 3.10.

3.7 Verdeling afvoer Kornwerderzand en Den Oever

Op de benedenrand van het IJVD-model wordt een afvoer onttrokken bij Kornwerderzand en Den Oever. In WTI2011 was de verdeling van afvoer over deze locaties niet afhankelijk van het meerpeil. In WTI2017 is deze afhankelijkheid wel meegenomen. Tabel 3.7 geeft de verdeling tussen de twee locaties per meerpeil. De afvoerverdeling is afgeleid voor 36 situaties, namelijk zes meerspeilen en zes afvoercondities op de IJssel/Vecht. In Tabel 2.4 wordt de afvoerverdeling getoond voor de stationaire situaties met een afvoer van 2.300 m³/s op de IJssel. Conform Tabel 3.4 hoort hier een afvoer van 700 m³/s op de Vecht, en in totaal 263 m³/s aan lateralen, zie Tabel 3.6. In paragraaf 2.6.2 is reeds beschreven dat de berekende verdeling van spuidebiet tussen Kornwerderzand en Den Oever afwijkt van de balansdata van Rijkswaterstaat.

meerpeil	Afvoer [m ³ /s]		Afvoer [Procentueel]	
	Kornwerderzand	Den Oever	Kornwerderzand	Den Oever
-0.4	2.098	1.162	64%	36%
-0.1	2.101	1.164	64%	36%
0.4	2.127	1.135	65%	35%
0.9	2.175	1.088	67%	33%
1.3	2.220	1.043	68%	32%
1.5	2.244	1.019	69%	31%

Tabel 3.7 Afvoer spuisluisen Afsluitdijk bij IJssel-afvoer 2.300 m³/s afhankelijk als functie van het meerpeil.

In situaties waarbij sprake is van een afvoergolf op de IJssel is het uitgangspunt dat het 795 minuten duurt voordat deze afvoergolf aankomt bij Kornwerderzand en Den Oever (HKV, 2011). Bij het bepalen van de onttrekking bij Kornwerderzand en Den Oever in de situatie met een afvoergolf op de IJssel is dan ook rekening gehouden met een tijdsvertraging van 795 minuten.

3.8 Bypass Kampen

De aansturing van de Bypass Kampen gebeurt op basis van de afvoer bij Olst. Als deze afvoer groter wordt dan 2.700 m³/s gaat de bypass in werking waarbij de afvoer in zes uur stijgt van 0 naar 340 m³/s. Als de afvoer bij Olst weer is gedaald tot onder de 2.000 m³/s gaat de bypass dicht (wederom in zes uur). N.b. de sturing is gebaseerd op de originele tijdreeks bij Olst, en niet op de aangepaste tijdreeks waarbij de afvoer is geminimaliseerd op 2.300 m³/s. De onttrekking en lozing zijn identiek, dus zonder tijdsverschuiving.

De geïmplementeerde aansturing van de Bypass Kampen in WAQUA is afgeleid uit (Beyer, 2014). De gegenereerde WAQUA-invoer is voor stochastcombinatie S01 (meerpeil -0,4 m+NAP) en Q08 (IJsselafvoer 2.975 m³/s) opgenomen in (bijvoorbeeld):

```
[DATA-ARCHIEF]\
2.IJVD\3.Generatie_productiesommen\1.Waterstanden\ALGwaq\4.WAQUA_YVG\
\randvw\flow\mn040_q2975\qloz_bykamp.001
\randvw\flow\mn040_q2975\qont_bykamp.001
```

Een voorbeeld van de WAQUA-invoer van de onttrekking van de Bypass Kampen (bij Q08 onafhankelijk van het meerpeil) is hieronder weergegeven.

```
# onttrekking Bypass Kampen
TIME_AND_VALUES =    0  0  0  0
TIME_AND_VALUES =    6 17 20  0
TIME_AND_VALUES =    6 23 20 -340
TIME_AND_VALUES =   11  7 20 -340
TIME_AND_VALUES =   11 13 20  0
TIME_AND_VALUES =   12  0  0  0
```

De tijdreeks voor de lozing op het Vossemeer bij de Roggebotsluis is identiek, maar dan +340 (m³/s).

N.b. in de praktijk kan het gebeuren dat als gevolg van windopzet en hoge rivierafvoer de afvoercapaciteit van de bypass Kampen slechts ten dele (of geheel niet) benut kan worden. De hier gekozen aanpak is dus niet conservatief.

3.9 Veessen-Wapenveld

De berekening van de sturing van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld (V-W) is in beginsel niet aangepast ten opzicht van de productieberekeningen voor de Rijntakken. In de berekeningen voor de Rijntakken (Deltares, 2016a) is gerekend met afvoergolven waarbij de hoogwatergeul aan het begin van de berekening nog niet actief is. Voor de IJssel-Vechtdelta wordt óf gerekend met constante afvoer, óf met afvoergolven met een minimale afvoer van 2.300 m³/s op de IJssel. Dit betekent dat vanaf een bepaalde IJsselafvoer de hoogwatergeul bij de start van de berekening reeds mee dient te stromen.

Uit de berekeningen voor het afleiden van initiële condities is geconstateerd dat bij een afvoer van 1.850 m³/s op de IJssel het inlaatwerk nog precies dicht is (waterstand inl_bv5 = 5,63 m+NAP), bij een afvoer van 2.300 m³/s is de waterstand in dit controlepunt 5,43 m+NAP omdat het inlaatwerk openstaat en er 780 m³/s door de hoogwatergeul stroomt. Als het inlaatwerk gesloten zou zijn geweest zou de waterstand circa 6,0 m+NAP bedragen en dan moet het inlaatwerk geopend zijn.

Gebruikmakend van de originele sturing gebeurt het volgende. Bij het basisniveau van 2.300 m³/s staat het inlaatwerk open. Na een dag of vier begint de afvoer op de IJssel te stijgen en hierdoor stijgt de waterstand in het punt inl_bv5. Na ongeveer vijf dagen wordt een waterstand van 5,65 m+NAP bereikt. Nu treedt het openingsregime in werking en gaat de tijdreeks voor V-W aan (TS7). Deze tijdreeks gaat uit van een gesloten initiële positie van het inlaatwerk en dat betekent dat het inlaatwerk in één keer wordt dichtgezet, met een snelle stijging van de waterstand tot gevolg. Vervolgens gaat het inlaatwerk langzaam open, de waterstand daalt en pas wanneer het inlaatwerk volledig is geopend ontstaat een normaal beeld in de waterstanden.

Dit is ondervangen in de sturing door het inlaatwerk in situaties waarbij het inlaatwerk initieel open staat, deze open te houden tijdens de berekening onafhankelijk van de waterstand in het stuurpunt. Dit betekent dat vanaf Q06 (de hoogste constante afvoer) de hoogwatergeul initieel meestroomt en mee blijft stromen. Als de hoogwatergeul eenmaal in werking is getreden, blijft deze gedurende de gehele berekening actief (er is geen sluitregime gedefinieerd).

3.10 Initiële condities en stuwstanden

Voor het uitvoeren van de productieberekeningen zijn 36 initiële condities nodig:

- 6 meerpeilen (van -0,4 m+NAP tot 1,5 m+NAP)
- 6 afvoeren (van 100 tot 2.300 m³/s op de IJssel)

Voor situaties waarin de IJsselafvoer groter is dan 2.300 m³/s zijn de initiële condities gelijk omdat die berekeningen allemaal starten met een afvoer van 2.300 m³/s (de afvoergolf passeert na verloop van tijd zodat de piek samenvalt met de piek in de wind).

Wanneer een afvoergolf op de IJssel wordt doorgerekend moet het totale volume water in het systeem gelijk blijven. Dit wordt bereikt door een afvoeronttrekking bij Kornwerderzand en Den Oever op te leggen. Voor berekeningen zonder in de tijd variërende wind kan in beginsel ook worden gerekend met een qh-relatie, maar er is voor gekozen om voor alle berekeningen uit te gaan van een afvoeronttrekking op de benedenranden. De initiële condities zijn voor alle situaties (zonder wind) in drie stappen bepaald:

- 1 Berekeningen met een qh-relatie op de benedenrand (Kornwerderzand en Den Oever);
- 2 Bepaling van de afvoerverdeling (onttrekking) bij Kornwerderzand en Den Oever op basis van stap 1;
- 3 Berekeningen met een qq-relatie (afgeleid in stap 2) op de benedenranden, waarbij de totale hoeveelheid water in het systeem gelijk blijft.

Voor de twee laagste IJsselafvoeren (100 en 500 m³/s) was uit de qh-berekeningen geen eenduidige relatie af te leiden tussen de onttrekkingen bij Kornwerderzand en Den Oever en de toestromingen. Daarom zijn voor deze situaties de onttrekkingen bij Kornwerderzand en Den Oever kloppend gemaakt aan het totaal van de IJssel- en Vechtafvoer en de laterale toestromingen.

NB: vanaf een IJsselafvoer van 2.300 m³/s zijn de lateralen vrijwel gelijk (zie Tabel 3.6). Hier is bij het bepalen van de initiële condities dan ook geen rekening mee gehouden. Bij de productieberekeningen zijn de lateralen met de waarden bijbehorende bij de IJsselafvoer opgenomen.

Voor alle situaties is het verschil tussen stap 1) en stap 3) beoordeeld en dit bleek verwaarloosbaar klein te zijn. Voor de productieberekeningen is gebruik gemaakt van READ_FROM uit een SDS-file. De stuwstanden worden dan niet uitgelezen en zijn daarom gespecificeerd in de barriesturingsfiles. Enkel in de situatie met een Vechtafvoer van 10 m³/s is sprake van een gestuwde situatie op de Vecht, bij een afvoer op de Vecht van 100 m³/s en hoger staan de stuwen open. De initiële stuwstanden zijn:

- Vilsteren: 2,06 m+NAP
- Vechterweerd: 0,72 m+NAP

In de situaties waarbij het meerpeil 1,3 m+NAP en 1,5 m+NAP bedraagt, functioneert de stuw bij Vechterweerd niet meer (ongeacht de rivierafvoer) omdat deze volledig ondergelopen is.

De berekeningen die zijn uitgevoerd voor het genereren van de initiële condities zijn terug te vinden onder:

[DATA-ARCHIEF]\2.IJVD\

2.Initiele_velden_en_randvoorwaarden\1.Waterstanden\4.Nieuw_initieel\

1.Qh-initieel\ → eerste run qh

2.Qq-initieel\ → Qq berekeningen

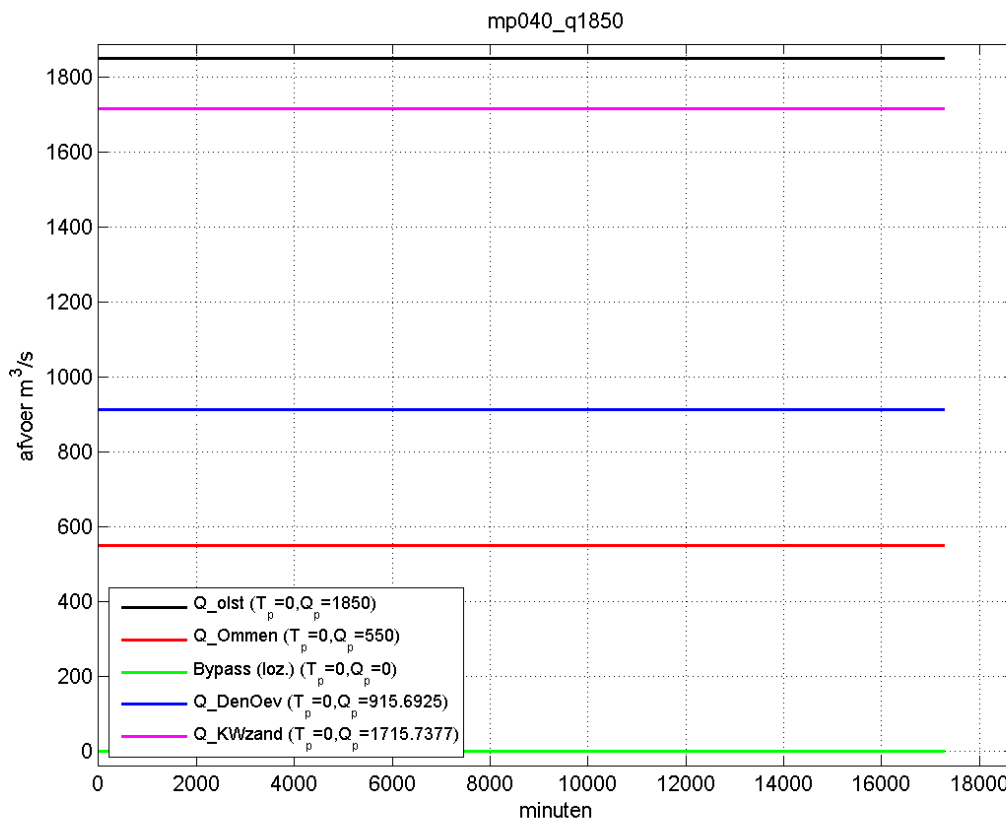
3.Qq-run2-7\ → aantal berekeningen langer doorgerekend totdat alle gebieden “vol zijn gelopen”.

3.11 Controle randvoorwaarden

Het afleiden van de randvoorwaarden voor de IJVD is geautomatiseerd met een aantal Matlabscripts (zie Bijlage D).

Figuur 3.4 geeft een voorbeeld van de randvoorwaarden in het geval van een constante afvoer op de IJssel van $1.850 \text{ m}^3/\text{s}$ en een meerpeil van $+0,40 \text{ m}+\text{NAP}$. De legenda geeft de maximale afvoer (en het tijdstip van maximale afvoer, hier 0 minuten) weer. Uit het figuur valt op te maken dat de waterbalans sluitend is:

- Toevoeging aan model: 1.850 (IJssel) + 550 (Vecht) + $231,4$ (lateralen) = $2631,4 \text{ m}^3/\text{s}$
- Onttrekking uit model: $915,7$ (Den Oever) + $1715,7$ (Kornwerderzand) = $2631,4 \text{ m}^3/\text{s}$



Figuur 3.4 Voorbeeld randvoorwaarden met een constante afvoer op de IJssel.

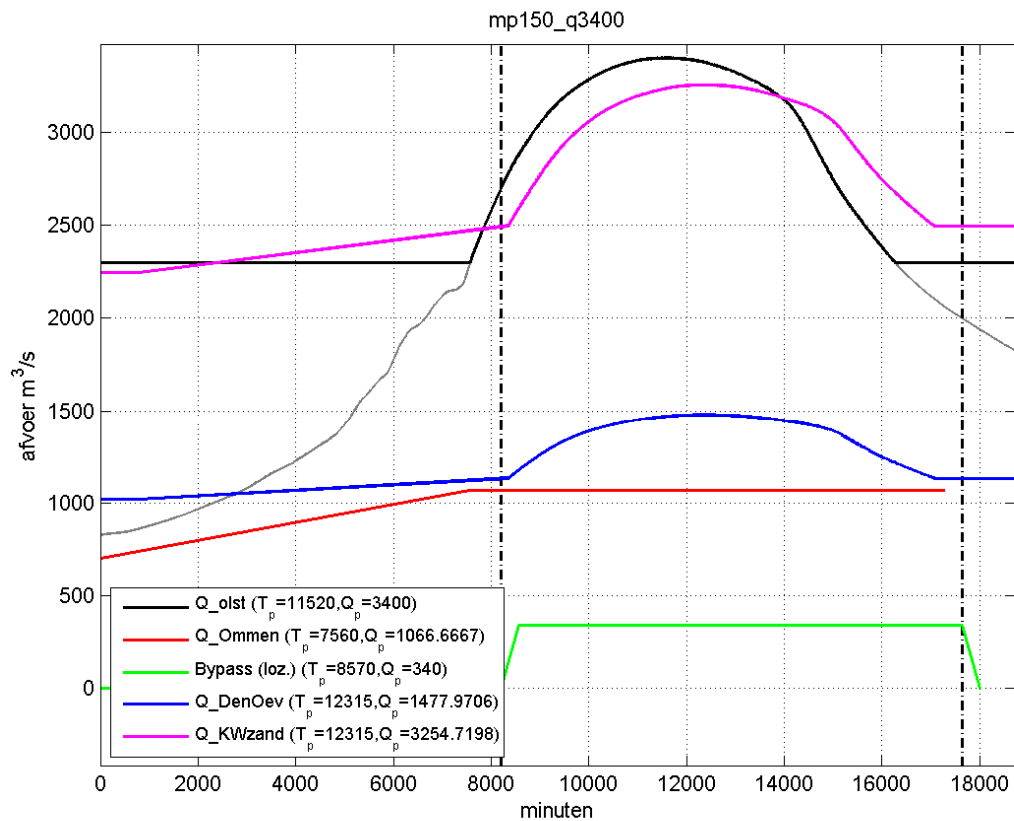
Figuur 3.5 geeft een voorbeeld van de randvoorwaarden voor het geval van een afvoergolf op de IJssel met een piekafvoer van $3.400 \text{ m}^3/\text{s}$ en een meerpeil van $+1,50 \text{ m}+\text{NAP}$. De legenda geeft de maximale afvoer (en het eerste tijdstip van optreden van deze maximale afvoer) weer. In het figuur staat de volgende informatie:

- De grijze lijn geeft de IJsselafvoer voordat deze is geminimaliseerd op $2.300 \text{ m}^3/\text{s}$.
- De verticale lijnen geven het moment van openen en sluiten van de Bypass Kampen weer.

- De afvoer bij Ommen neemt lineair toe van 700 m³/s tot de juiste waarde uit de werklijn (dit moment valt samen met het moment dat op de IJssel 2.300 m³/s wordt bereikt).

Ook voor deze situatie is de balans (nagenoeg) sluitend (op basis van maximale afvoeren):

- Toevoeging aan model: 3.400 (IJssel) + 1.067 (Vecht) + 266 (lateralen) = 4.733 m³/s
- Onttrekking uit model: 1.477 (Den Oever) + 3.252 (Kornwerderzand) = 4.729 m³/s



Figuur 3.5 Voorbeeld randvoorwaarden met een afvoergolf IJssel op de IJssel.

4 Werkwijze uitvoeren productieberekeningen

4.1 Testfase

Voorafgaand aan het uitvoeren van de productieberekeningen heeft RHDHV eind 2014 testberekeningen uitgevoerd, zie paragraaf 2.1. Daarbij is ook de modelschematisatie (inclusief uitvoerlocaties) gecontroleerd. Op basis van de bevindingen zijn door Deltares aanpassingen doorgevoerd aan de modelschematisatie. Daarom is de fase van het uitvoeren van de productieberekeningen gestart met een testfase, waarbij dezelfde test nogmaals is doorgerekend met het aangepaste modelinstrumentarium. Deze testen hebben aanleiding gegeven tot een beperkt aantal aanpassingen aan de naamgeving van de locaties. Alle productieberekeningen zijn uiteindelijk allemaal uitgevoerd met exact dezelfde modelschematisatie, zie paragraaf 2.1.

4.2 Opzet berekeningen en gebruik Amazon

4.2.1 Naamgeving van de berekeningen

De productiesommen zijn, net als voor de overige watersystemen, uitgevoerd bij Amazon op machines met 8 cores. Er zijn geen berekeningen die afhankelijk van elkaar zijn (geen doorstarts). Daarom is iedere berekening uitgevoerd en opgeslagen onder een unieke mapnaam. Voor de IJVD is onderscheid gemaakt tussen falen en niet-falen van de Ramspolkering. Er zijn dus twee sets berekeningen, waarbij de volgende naamgeving is gehanteerd:

- wYVG-Q01U00D360S01 ... wYVG-Q13U43D360S06
- wYVO-Q01U00D360S01 ... wYVO-Q13U43D360S06

In deze naamgeving zijn de volgende afkortingen gebruikt:

- wYVG voor berekeningen met sluitregime van de Ramspolkering, wYVO voor berekeningen met falende Ramspolkering (geforceerd open)
- Q voor afvoer, gevolgd door een volgnummer voor de afvoerstochast,
- U voor windsnelheid, gevolgd door de (open water) windsnelheid in m/s (afgerond),
- D voor windrichting,
- S voor meerpeil, gevolgd door een volgnummer voor de meerpeilstochast.

Met een basis siminp-file is voor alle stochastcombinaties 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 (Tabel 4.1) bevat een verzameling invoerbestanden die gelijk zijn voor alle berekeningen, waarbij wel onderscheid nodig is tussen berekeningen "Ramspol altijd open (YVO)" en "Ramspol met

sluitregime (YVG)". ALGwaq is terug te vinden in het data-archief onder [DATA-ARCHIEF]\2.IJVD\3.Generatie_productiesommen\1.Waterstanden\ALGwaq.

bodem\	Bodemligging
initieel\	Initiële condities: wYVG-Q[01-06]U00D360S[01-06]/SDS (zie paragraaf 3.10 voor details)
kunstwerken\	Sturing stuwen in de Vecht, hoogwatergeul Veessen-Wapenveld en Ramspol (YVO: faalt, YVG: sluitregime)
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
wind\	Invoerbestanden wind
ijvd40m_5-v4.rgf	Rekenrooster
partit.ijvd_8	Partitieverdeling

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

De fysische controle van de berekeningen is "offline" uitgevoerd met Matlab op het h5 rekencluster bij Deltares, zie verder paragraaf 4.4 en hoofdstuk 5.

4.3 Uitvoer van een berekening

Alle uitvoer is centraal opgeslagen in het data-archief:

[DATA-ARCHIEF]:\2.IJVD\4.Uitvoeren_productiesommen\1.Waterstanden\wYV*

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

```

coppre-r.<somid>
data_<somid>.tar.gz
run
siminp.<somid>
waqpre-m.<somid>
waqpro-m.<somid>
<somid>.out

```

Waarbij <somid> de wYVO- of wYVG-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 'data_*tar.gz'-bestanden bevatten de met getdata verkregen data van de berekening:

```

<somid>_barriers.nc
<somid>_max25_CTR.txt
<somid>_max25_CTRV.txt
<somid>_max25_ZWL.txt
<somid>_MAXMGNFLWM
<somid>_MAXMGNSEP
<somid>_MAXSEPFLWM
<somid>_MAXSEPSEP
<somid>_MAXSEPTIM

```

```
<somid>_treeks_ctr.nc
<somid>_treeks_ctrv.nc
<somid>_treeks_zwl.nc
<somid>_WETMAXVAL
```

Hierin is:

- 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 MAXSEPSEP, maar zijn de droge punten op NaN gezet (door getdata).
- *treeks_<variabele>.nc zijn netcdf-files van de genoemde variabelen waarbij ook de stationsnamen zijn opgeslagen op de netcdf-file.
- <somid_barriers.nc bevat de array 'RRSBAH' met history-informatie van de barriers, inclusief NAMBAR, de namen van de barriers.

Na de offline verwerking van de berekeningen, worden een aantal matfiles toegevoegd aan de berekeningsuitvoer in het data-archief:

```
<somid>_max25_CTRV.mat
<somid>_max25_ZWL.mat
<somid>_sepmaxboxes.mat
```

Deze bestanden worden ingelezen met Matlab om zo snel over de "ascii-reeks-max25" data en "boxfiles" te kunnen beschikken.

4.4 Controle of een berekeningsuccesvol 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 een onderdeel 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 de 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 de 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 controle van de productieberekeningen is uitgevoerd op basis van figuren en (Excel)tabellen, die zijn gegenereerd op basis van Matlab post-processing controlescripts (paragraaf 5.2). Paragraaf 5.3 geeft een overzicht van algemene constatering uit de WAQUA pre-processor en rekenkern.

In het vervolg van dit hoofdstuk is gecontroleerd of de berekeningen correct en betrouwbaar zijn. Allereerst is het verloop van de maximale waterstand en afvoer in de rivieras op een aantal trajecten en voor een aantal berekeningen gecontroleerd (paragraaf 5.4.1); vervolgens is geanalyseerd of deze maximale waterstanden consistent tussen verschillende berekeningen verlopen bij het variëren van de stochastcombinatie (paragraaf 5.4.2). Paragraaf 5.5 analyseert het gedrag van een aantal specifieke elementen in de modelschematisatie (Ramspolkering, Bypass Kampen, hoogwatergeul Veessen-Wapenveld en spuisluizen Afsluitdijk).

In de laatste 3 paragrafen van dit hoofdstuk is in meer detail het verloop van de waterstand in de uitvoerpunten die nodig zijn voor de HR geanalyseerd. In paragraaf 5.6 zijn de zogenaamde 'max13'-waarden gecontroleerd, wat een goede maat is voor het aantal droge punten in een berekening. Paragraaf 5.7 en 5.8 betreffen een analyse van instabiliteiten in de maximale waterstand en instabiliteiten in het tijdsverloop van waterstandstijdreeksen.

5.2 Post-processing van de berekeningen

De productieberekeningen zijn, na gereedkomen van de berekening op Amazon, verwerkt op Deltares rekenhardware (het h5 linux-cluster) met het script '[DATA-ARCHIEF]\2.IJVD\5.Controle_productiesommen\1.Waterstanden\IJVD_FysContr_PROD.m'. Dit verwerkingsscript en de uitvoer van de 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_ijvd_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'.

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

5.3 Algemene constatering WAQUA pre-processor en rekenkern

5.3.1 Meldingen WAQPRE

De WAQUA-preprocessor geeft voor alle berekeningen een totaal van 75 warnings:

- 1 melding “The use of the keyword TICVAL is discouraged.”
- 1 melding “The time_last given with the keyword TLROUC is adapted so that it fits within the simulation time frame”.
- 9 meldingen: “The specified 'Roughcombination / ROUGH_CHAR / A' value is less than its minimum. Value is corrected to this boundary-value.”
- 9 meldingen die betrekking hebben op te lange namen voor debiet-raaien (worden getrunceerd). Na truncatie zijn de namen nog uniek.
- 1 melding die betrekking heeft op een cross-sectie op een zelfde locatie, met verschillende naam ('Q-VechterweerdMondde' and 'Q-Berkum_km_55').
- 54 meldingen “Curve xx is a point-curve --- (M = mm, N = nn)!. Therefore, the U-/V-direction cannot be determined”.

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

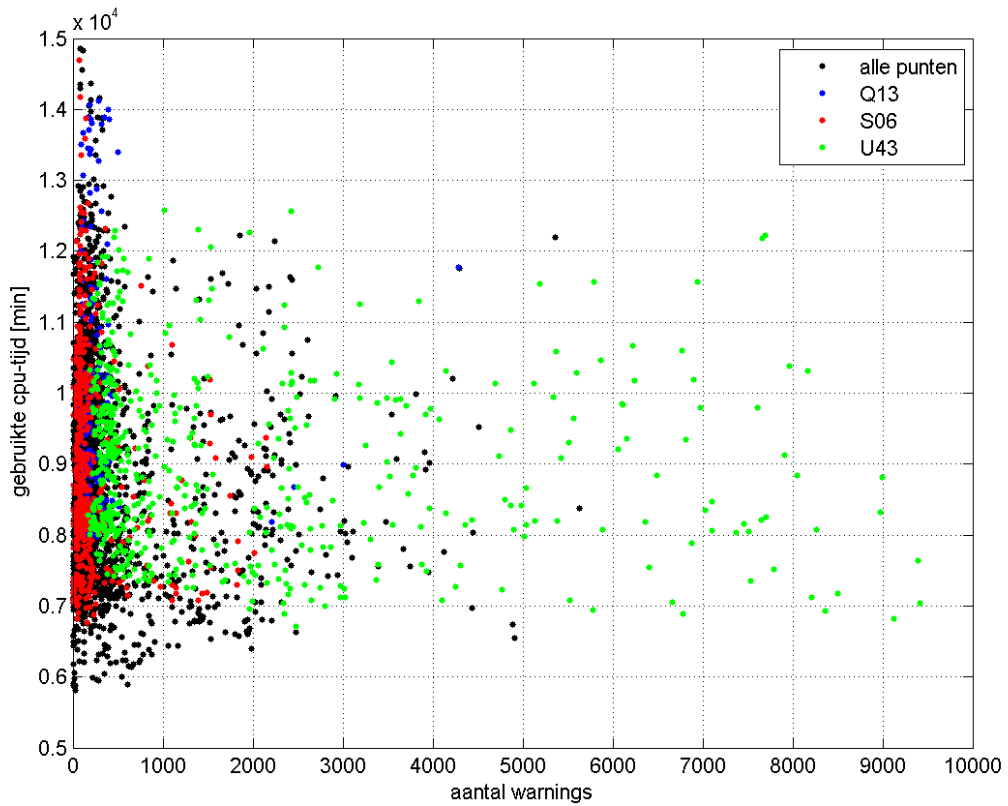
5.3.2 Meldingen WAQPRO

Het IJVD-model is gedraaid op 8 cores/partities. Voor iedere partitie wordt aan het einde van de berekeningen het aantal errors, warnings en gebruikte CPU-tijd geregistreerd. De berekeningen zijn allemaal op dezelfde hardware uitgevoerd. Vergelijking van bovenstaande gegevens geeft een beeld of alle berekeningen zonder fouten zijn verlopen en ook of bepaalde berekeningen afwijkend gedrag vertonen ten opzichte van de gehele set van berekeningen. De gemiddelde rekentijd van alle berekeningen is ongeveer 150 minuten. Berekeningen met lagere afvoer en/of meerpeil duren korter, met hogere afvoer en/of meerpeil juist langer.

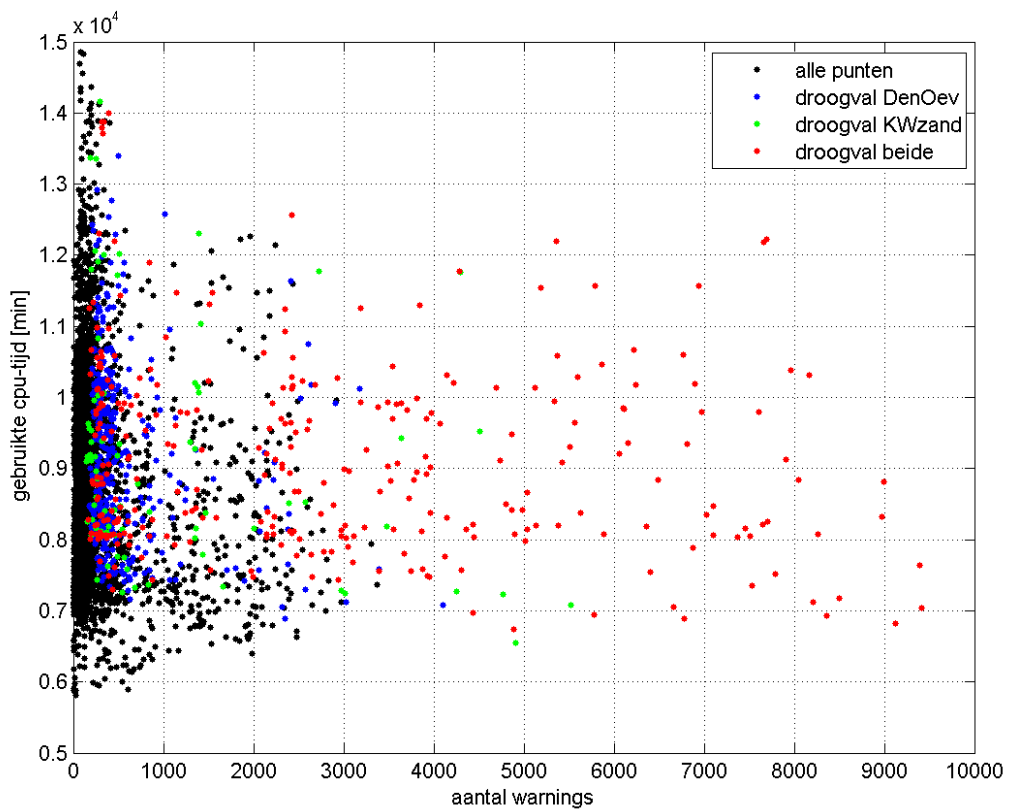
Er zijn tijdens de berekeningen geen errors geconstateerd. Wel is er een groot aantal berekeningen met warnings. Deze warnings betreffen meldingen dat geen convergentie wordt bereikt binnen het gestelde maximaal aantal iteraties (itermax = 20). Vaak betreft dit locaties in de uiterwaarden (droog/nat worden van punten); er is dan ook een duidelijk verband tussen aantal warnings en afvoer/meerpeil: voor hogere afvoer en/of meerpeil neemt het aantal meldingen toe.

Er is één berekening met opvallend veel warnings: wYVG-Q03U24D270S01. Het is niet direct duidelijk waarom deze berekening meer warnings (“Cycle stagnations”) oplevert dan anderen. Visuele controle van waterstandsverlopen en vergelijking van waterstanden voor stochastcombinaties vergelijkbaar met die van deze berekening, geven geen aanleiding om de uitkomsten van deze berekening niet te vertrouwen.

Verder valt op dat de meeste meldingen optreden in partitie 8: het IJsselmeer. Uit Figuur 5.1 en Figuur 5.2 is op te maken dat er geen duidelijk verband is tussen het aantal warnings en de rekentijd, en dat (a) het aantal warnings vooral samenhangt met de windsnelheid (waarschijnlijk gerelateerd aan hogere stroomsnelheden boven bijvoorbeeld overlaten waardoor de WAQUA solvers minder snel convergeren), en (b) sterk samenhangt met droogval bij de spuisluisen in de Afsluitdijk (zie paragraaf 5.5.5). Samenvattend zijn er uit de WAQPRO-meldingen geen bijzondere zaken naar voren gekomen.



Figuur 5.1 Aantal warnings van partitie 8 uitgesplitst naar hoge afvoer, hoog meerpeil en grote windsnelheid.



Figuur 5.2 Gebruikte cputijd van partitie 8 uitgesplitst naar droogvalsituatie spuilsuizen Afsluitdijk.

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

De maximale waterstanden in de as van de rivier geven een indicatie of berekeningen betrouwbaar en fysisch realistisch zijn. Op de volgende trajecten zijn de verlopen van maximale waterstanden en afvoeren gecontroleerd:

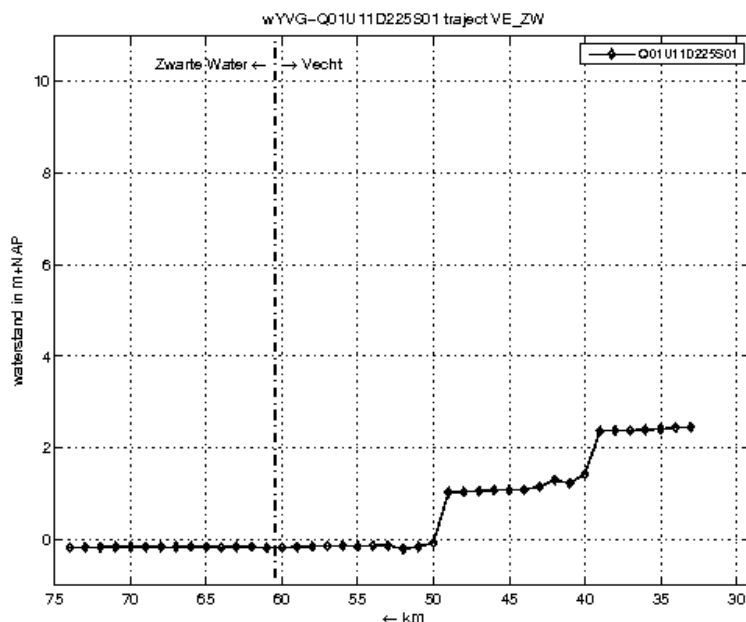
- Vecht en Zwarte Water
- IJssel

Voor deze analyse zijn de 'max13'-waarden gebruikt zoals die door getdata worden bepaald op basis van tijdreeksen van uitvoerlocaties, hier de aslocaties. Dat de parameter 'max13' voorzichtig gebruikt moet worden, blijkt uit enige voorbeelden in Bijlage C.

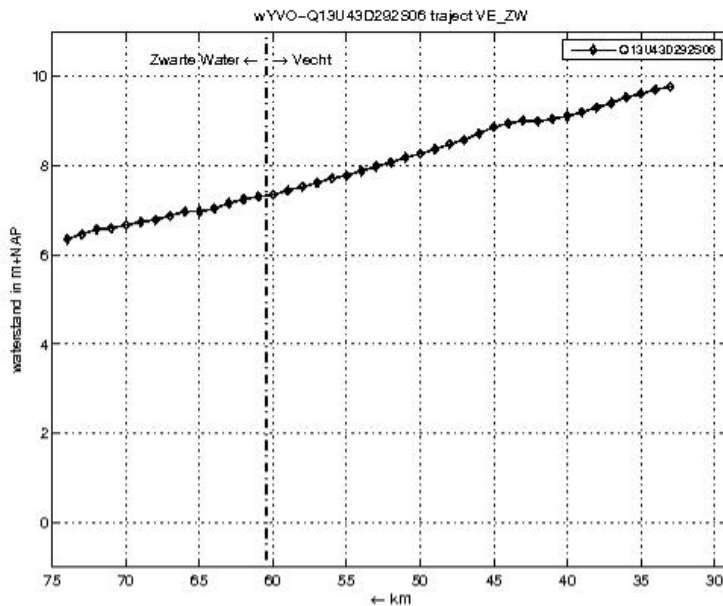
Alle gegenereerde verlopen (die te vinden zijn in het data-archief, zie Bijlage A) zijn visueel gecontroleerd, waarvan hier een aantal opvallende zaken zijn gerapporteerd. Daarnaast is op een aantal punten in de IJVD gecontroleerd of bepaalde, vanuit fysisch oogpunt te verwachten, patronen/verlopen zichtbaar zijn tussen de verschillende stochastcombinaties.

5.4.1 Max13-waterstanden en afvoeren

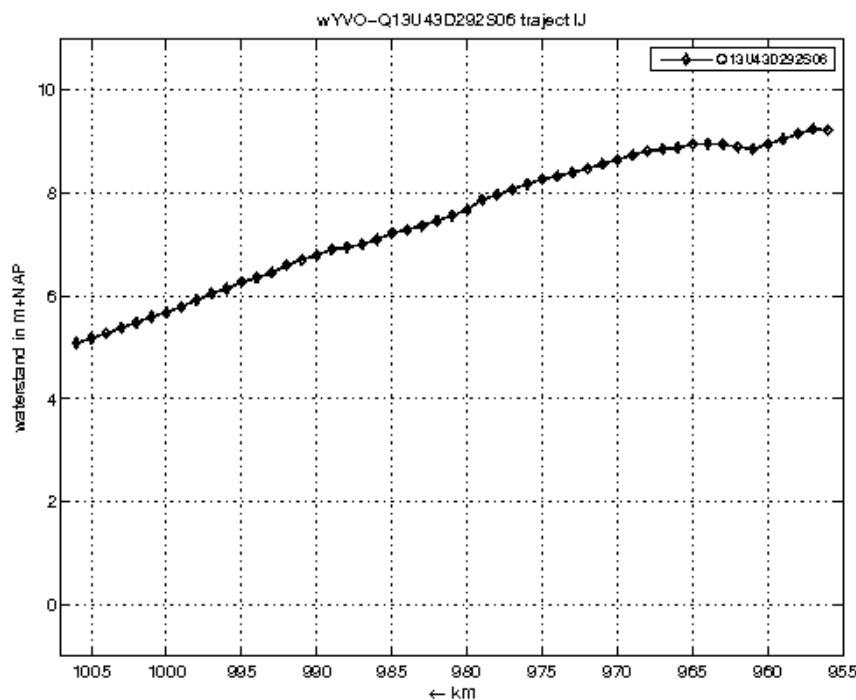
Bij lage afvoeren is op de Vecht goed het effect van de stuwen zichtbaar (de "plateaus" in Figuur 5.3). De maximale waterstanden op de Vecht treden op bij combinatie wYVO-Q13U43D292S06, zie Figuur 5.4. Figuur 5.5 geeft het waterstands- en afvoer-verloop (max13) op de IJssel bij dezelfde extreme conditie. Het effect van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld komt terug in de waterstanden, een effect van de Bypass Kampen is niet zichtbaar. De oorzaak is dat extreme situatie een storm-conditie betreft terwijl de Bypass Kampen vooral in hoge afvoersituaties functioneert. Uit Figuur 5.9 en paragraaf 5.5.2 blijkt dat de bypass wel goed in het model is ingebouwd.



Figuur 5.3 Stuwefecten op de Vecht bij lage afvoer en laag meerpeil.



Figuur 5.4 Stochastcombinatie met hoogste afvoer op de Vecht, falende balgstuw.

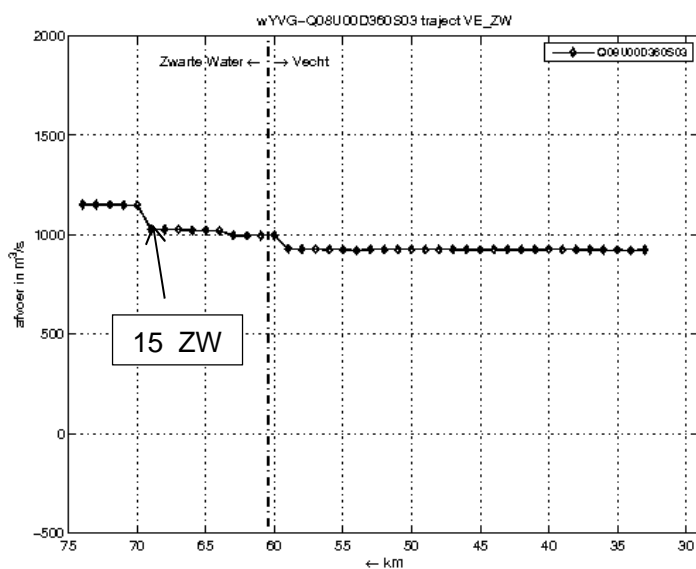


Figuur 5.5 Extreme waterstand op de IJssel (YVO).

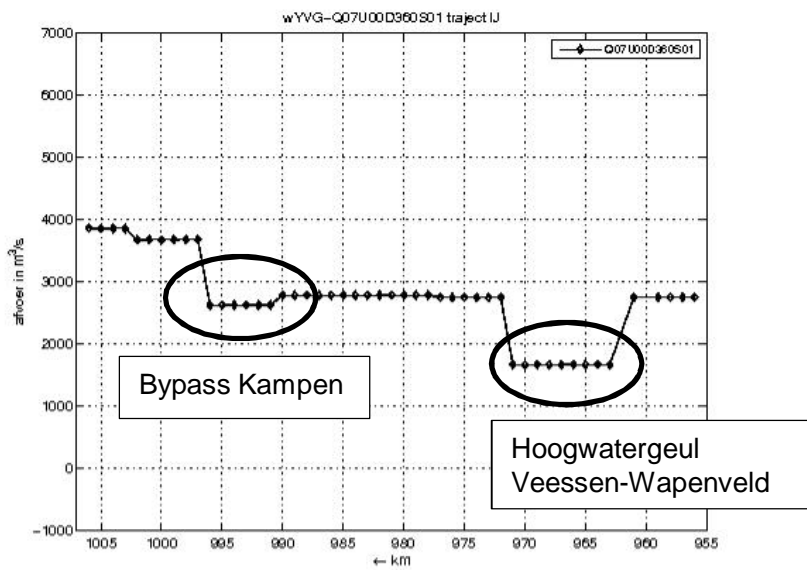
Figuur 5.6 geeft de max13-afvoer weer op de Vecht en het Zwarte Water bij Q08 ($Q_{\text{vecht}} = 925 \text{ m}^3/\text{s}$). Hierin is goed het effect van laterale toestromingen te zien: net benedenstrooms van 60_VE $68 \text{ m}^3/\text{s}$ uit de Zwolse Grachten en tussen 15_ZW en 16_ZW in totaal $123,5 \text{ m}^3/\text{s}$ van Gemalen Zedemuden en Kostverlorenzijl.

Vanaf Q07 wordt er water door de Bypass afgevoerd: $340 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij afvoer Q07 zonder wind is deze afvoeronttrekking minder goed te zien in de max13-afvoeren (Figuur 5.7), terwijl

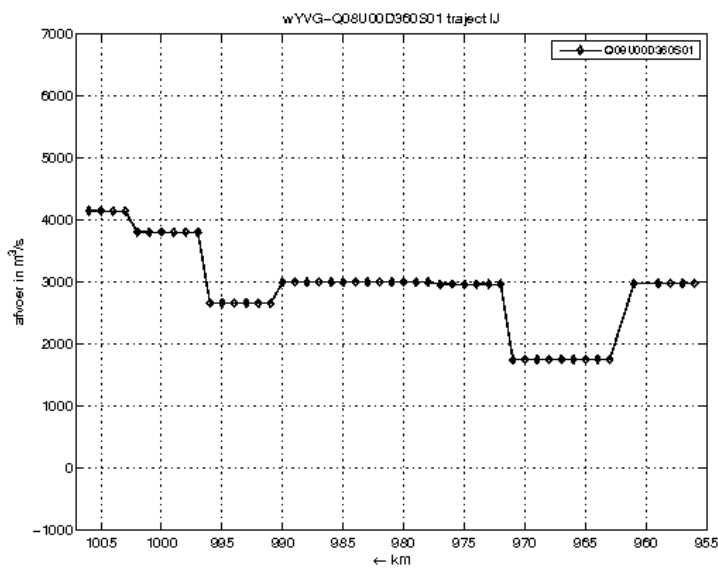
dit voor Q08 zonder wind wel het geval is (Figuur 5.8). Dit is te verklaren aan de hand van de aansturing van de Bypass en de afvoerverlopen uit Figuur 5.9. Als de afvoer bij Olst groter wordt dan $2.700 \text{ m}^3/\text{s}$ treedt de bypass in werking, waarbij in zes uur de onttrekking stijgt van 0 naar $340 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie paragraaf 3.8). De afvoer op km990 stijgt in die tijd iets sneller door een toenemend rivierverhang, op km991 neemt de afvoer ongeveer even snel af. Een belangrijk verschil tussen Q07 en Q08 is de maximale afvoer, ten opzichte van de kritieke grens voor inzet van de Bypass van $2.700 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Olst. Bij Q08 stijgt de afvoer nog door op het moment dat de maximale afvoeronttrekking voor de Bypass is bereikt, bij Q07 is dat nog maar nauwelijks het geval. Hierdoor verandert de vorm van de afvoergolf op km990 en wordt de hoogste afvoer bereikt voordat de echte hoogwaterpiek aankomt. Effectief betekent dit dat het verschil in maximale afvoer tussen km990 en km991 bij Q07 veel kleiner is dan voor Q08 (Figuur 5.9). Dit effect treedt niet op voor alle Q07-berekeningen, omdat de golfvorm sterk kan veranderen wanneer de wind de waterstanden op de IJssel opstuwt.



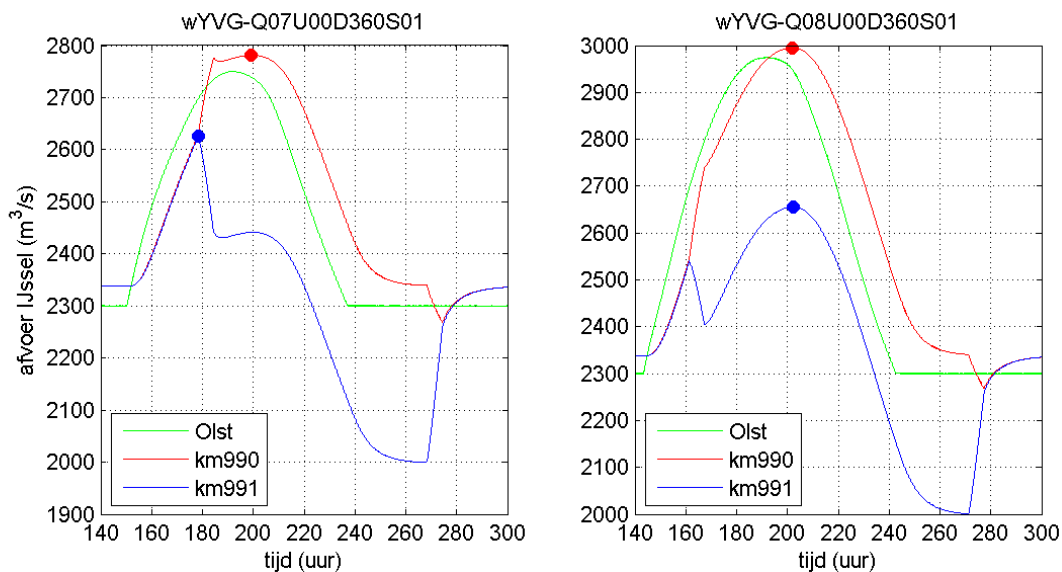
Figuur 5.6 Effect laterale toestromingen op de Vecht/ het Zwarte Water.



Figuur 5.7 max13-afvoeren IJssel (exclusief Veessen-Wapenveld en Bypass Kampen) bij Q07, geen wind.



Figuur 5.8 max13-afvoeren IJssel (exclusief Veessen-Wapenveld en Bypass Kampen) bij Q08, geen wind.



Figuur 5.9 Afvoerverlopen op de IJssel net voor rkm 990 en net na rkm 991 (de onttrekkingslocatie van de Bypass Kampen). De markers geven het tijdstip en waarde van de max13-afvoer weer.

5.4.2 Consistentiechecks waterstanden

Om consistent verloop in waterstanden en andere parameters zoals het aantal droge punten te vergelijken tussen de verschillende berekeningen/stochastcombinaties is een Excel spreadsheet gemaakt. In deze spreadsheet kunnen, voor een subset van alle stochastcombinaties, figuren worden gemaakt waarin waterstanden en andere parameters worden uitgezet tegen deze gekozen stochasten. De Excel spreadsheet is te vinden in het data-archief:

[DATA-ARCHIEF]\2.IJVD\5.Controle_productiesommen\1.Waterstanden\output_bewerkt\
max13zwl_IJVD_20151120.xlsm

In Bijlage B is gespecificeerd welke locaties voor de controle zijn gebruikt, en hoe de figuren die in het vervolg van deze paragraaf staan, geïnterpreteerd dienen te worden.

Allereerst kijken we naar de situatie zonder wind (U00D360). Figuur 5.10 geeft voor de situatie zonder wind en berekeningen met sluitregime voor de Ramspolkering maximale waterstanden op geselecteerde locaties in het IJVD-model. Ook zijn aantal droge punten, instabiele punten en punten met een groot verschil tussen 'max13' en 'sepmax' opgenomen (zie paragraaf 5.6 t/m 5.8). Uit deze figuren is het volgende op te maken:

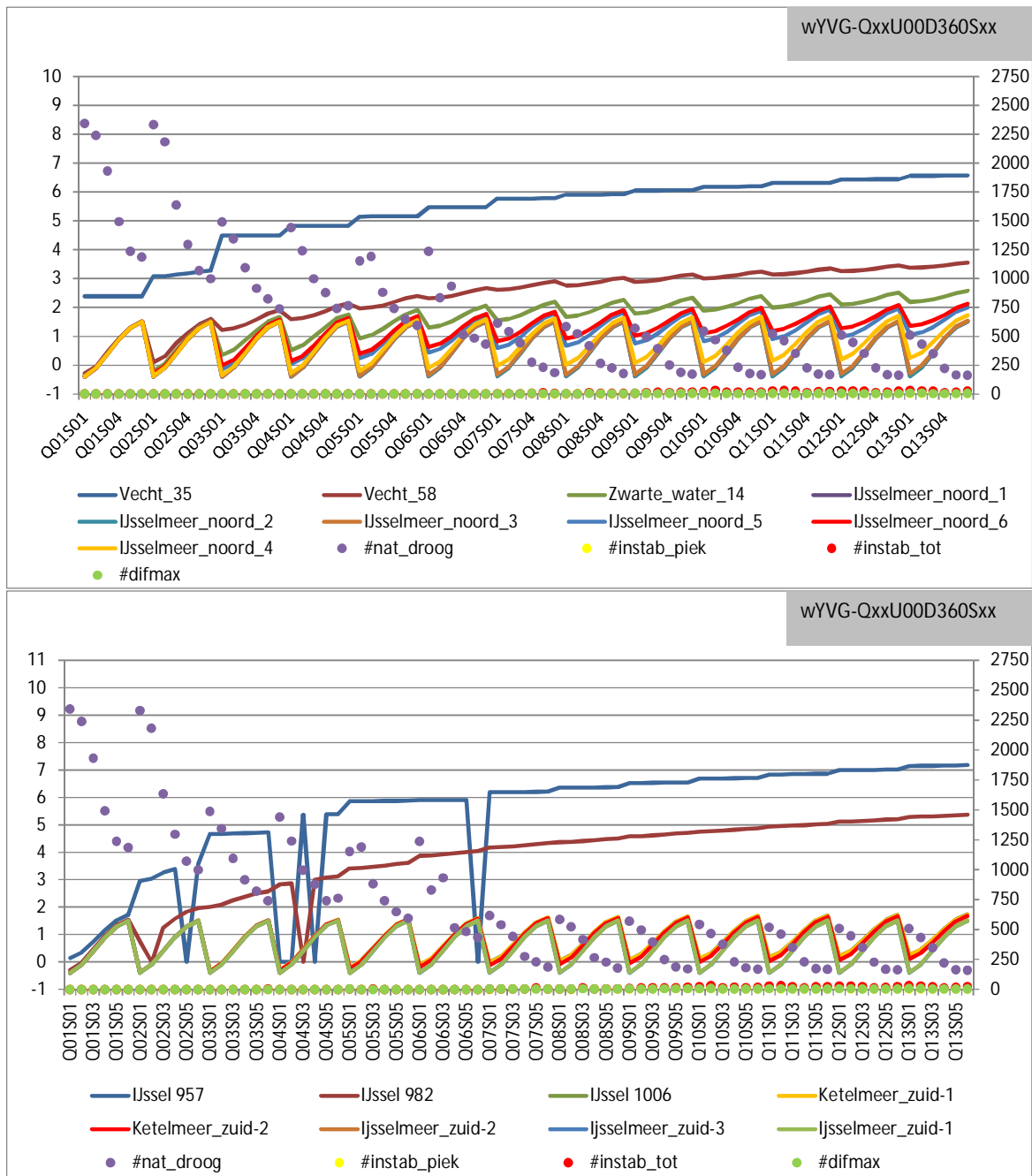
- Het aantal droge punten neemt af bij toenemende afvoer en/of meerpeil.
- Bovenstrooms op de Vecht is de waterstand vrijwel onafhankelijk van het meerpeil; meer benedenstrooms is er wel een afhankelijkheid. Opvallend is dat voor Q02 (100 m³/s op de Vecht) locatie Vecht km35 nog wel afhankelijk is van het meerpeil. Dit komt door de relatief lage rivierafvoer en nog niet sluitende Ramspolkering, waardoor de hoge meerpeilen de waterstand op de Vecht beïnvloeden.
- Op de IJssel is een soortgelijk beeld te zien. De "uitschieters" naar 0 betreffen ontbrekende max13-waarden, zie Bijlage C.
- Bij Q01/Q02 is de invloed van de stuwen op de Vecht zichtbaar.
- De waterstanden op het IJsselmeer zijn conform de ingestelde meerpeilen.

Figuur 5.11 geeft bij een vaste afvoer (Q08, piekafvoer 2.975 m³/s op de IJssel) en windrichting D292 (WNW), de waterstandsverlopen op de IJssel en de “zuidzijde” van het IJsselmeer. De laagste waterstanden treden op bij locatie “IJsselmeer_zuid_3”. Deze locatie is aan de noordzijde van het IJsselmeer gelegen (Figuur B.1), wat bij deze windrichting logisch is. Verder is goed te zien dat bij toenemende windsnelheid en/of meerpeil de waterstand toeneemt; bij extreme windsnelheden en groot meerpeil zijn de effecten nog merkbaar bij Olst (IJssel km 957). Wat verder opvalt is het relatief grote aantal punten met instabiliteiten rond de piek bij grote windsnelheden; dit komt doordat bij sterke wind relatief veel locaties te maken krijgen met droogval en hieraan gerelateerde numerieke droogval-effecten.

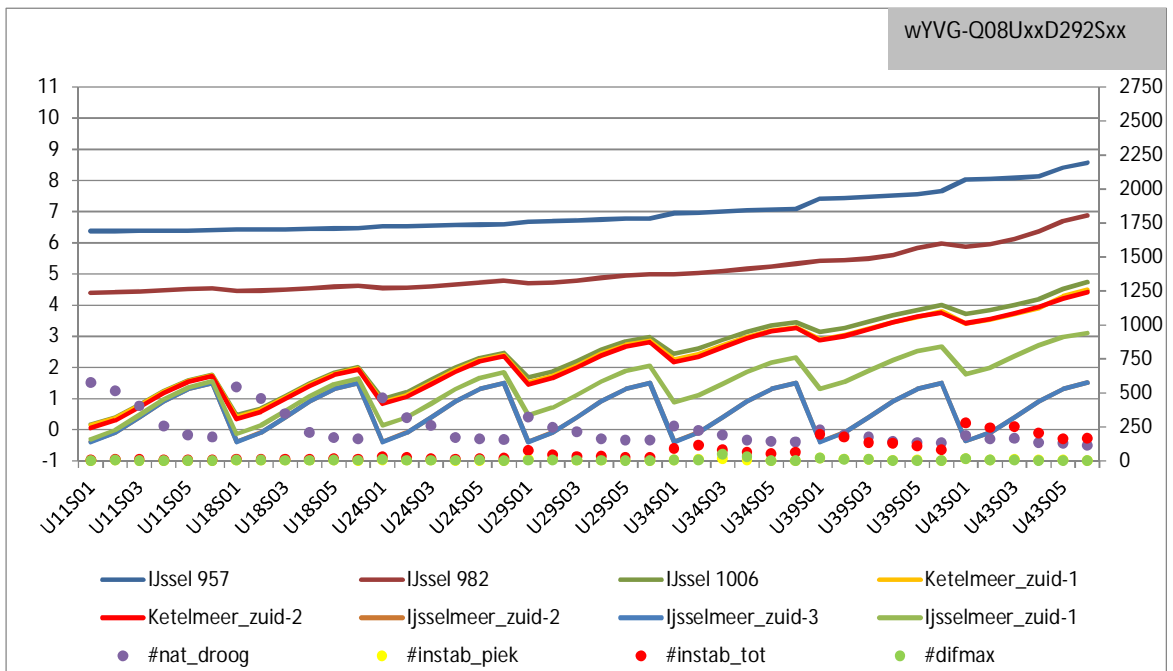
Figuur 5.12 geeft een consistentiecheck voor de Vecht en de noordzijde van het IJsselmeer bij een vaste windsnelheid (U43), windrichting D292 (WNW) en meerpeil (S04), en met variërende afvoer en Ramspolkering “altijd open” (O) of sluitregime (G). In het figuur is goed te zien dat midden op het IJsselmeer de waterstand (0,91 m+NAP) nagenoeg conform het opgegeven meerpeil is (0,90 m+NAP). Verder is te zien dat bij geopende Balgstuw meer water in de Vecht komt, en daardoor ook meer in de IJssel. Het sluitregime van de Ramspolkering heeft vrijwel geen invloed op het aantal uitvoerlocaties met instabiliteiten rond de piek en/of droogval.

Voor een consistentiecheck van de invloed van windrichting focussen we op de noordelijke zijde van het IJsselmeer (en daarmee de Vecht), omdat daar bij windrichtingen ZW-N (D225-D360) wind het grootste effect zichtbaar is. Figuur 5.13 laat zien dat het grootste effect op de Vecht optreedt bij WNW (D292) omdat de wind dan het meeste water over het Kampereiland (stroomt bij deze afvoer over) richting de Vecht laat stromen. Dit laatste effect is ook te zien in Figuur 5.14: afhankelijk van de windrichting is, bij bepaalde meerpeilen en bij gesloten Balgstuw, nog steeds effect helemaal bovenstrooms op de Vecht merkbaar. Dit komt door water dat over het Kampereiland wordt gestuwd.

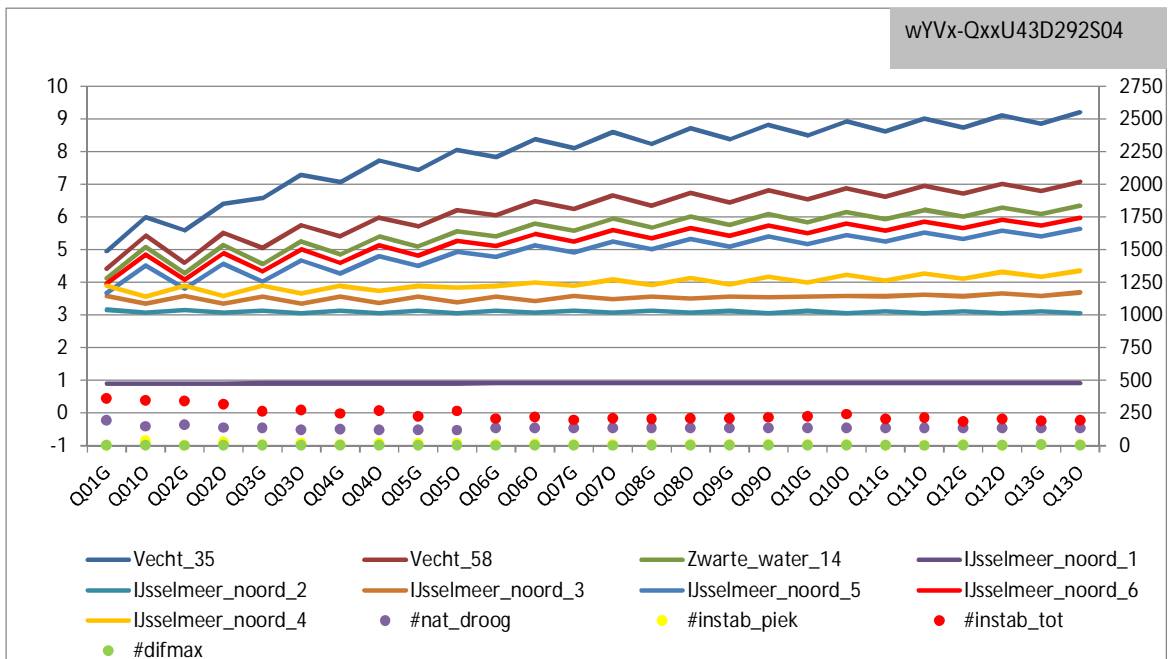
Het effect van windsnelheid is goed te zien in Figuur 5.15: bij toenemende windsnelheid, nemen de waterstanden overall toe.



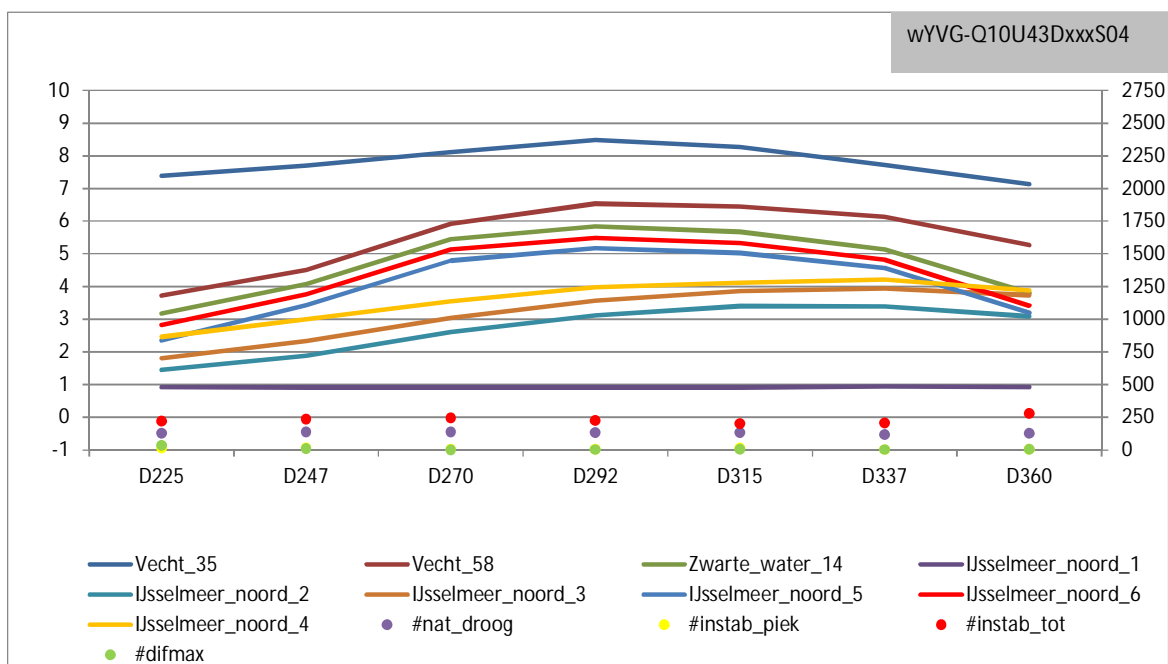
Figuur 5.10 Consistentiecheck Vecht en noordzijde IJsselmeer, zonder wind.



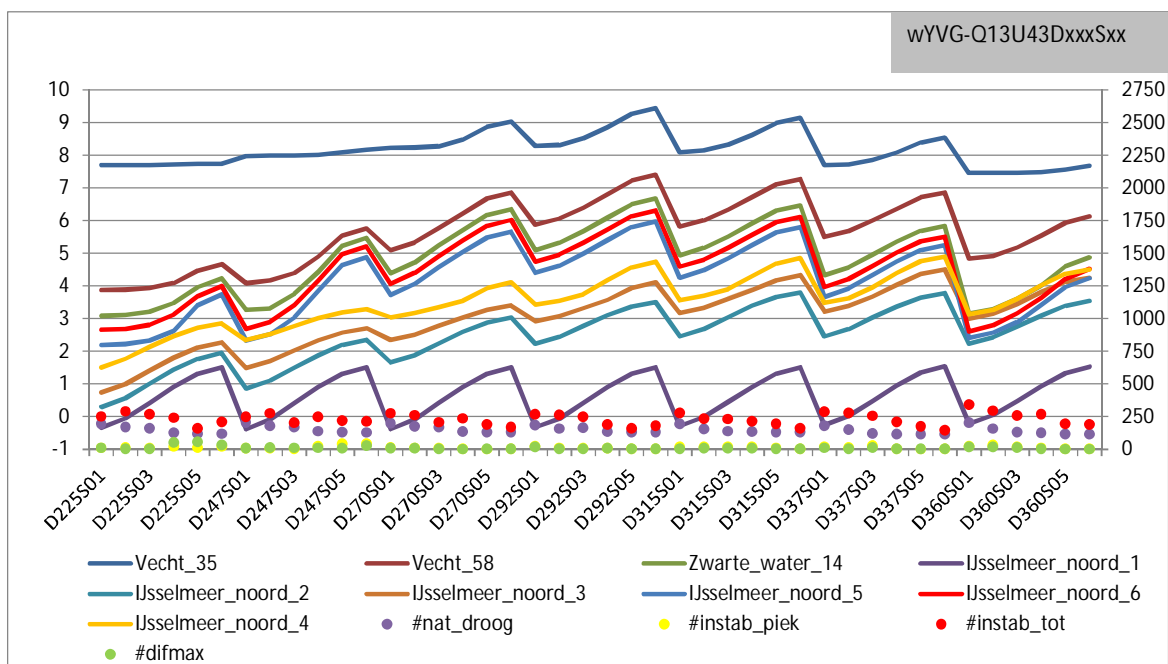
Figuur 5.11 Consistentiecheck IJssel en zuidzijde IJsselmeer, Q08, D292 (WNW), effect windsnelheid en meerpeil.



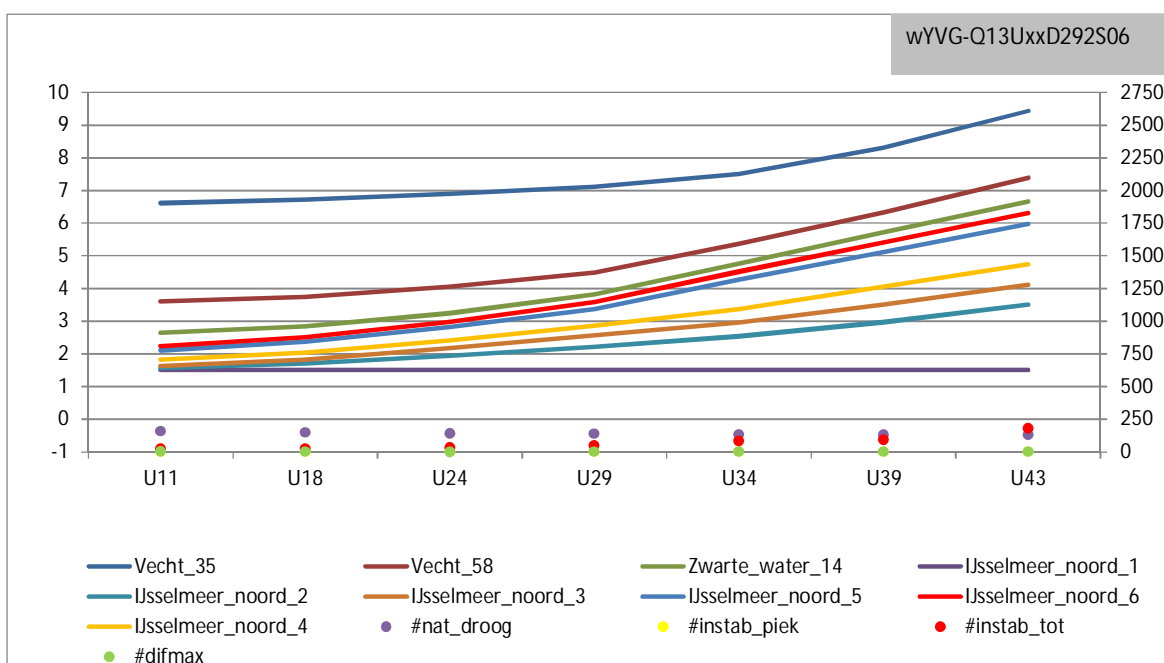
Figuur 5.12 Consistentiecheck Vecht en noordzijde IJsselmeer, U43, D292 (WNW), S04, effect afvoer en scenario Ramspolkering (gesloten en open).



Figuur 5.13 Effect windrichting bij relatief hoge rivierafvoer (Q10, piekafvoer Olst 3.400 m³/s) en meerpeil van 0,9 m+NAP.



Figuur 5.14 Consistentiecheck gedrag Ramspolkering, effect meerpeil en windrichting bij hoogste afvoer.



Figuur 5.15 Consistentiecheck, effect van windsnelheid bij hoogste afvoer, hoogste meerpeil en WNW-wind.

5.5 Analyse functioneren keringen, regelwerken, stuwen en spuisluisen

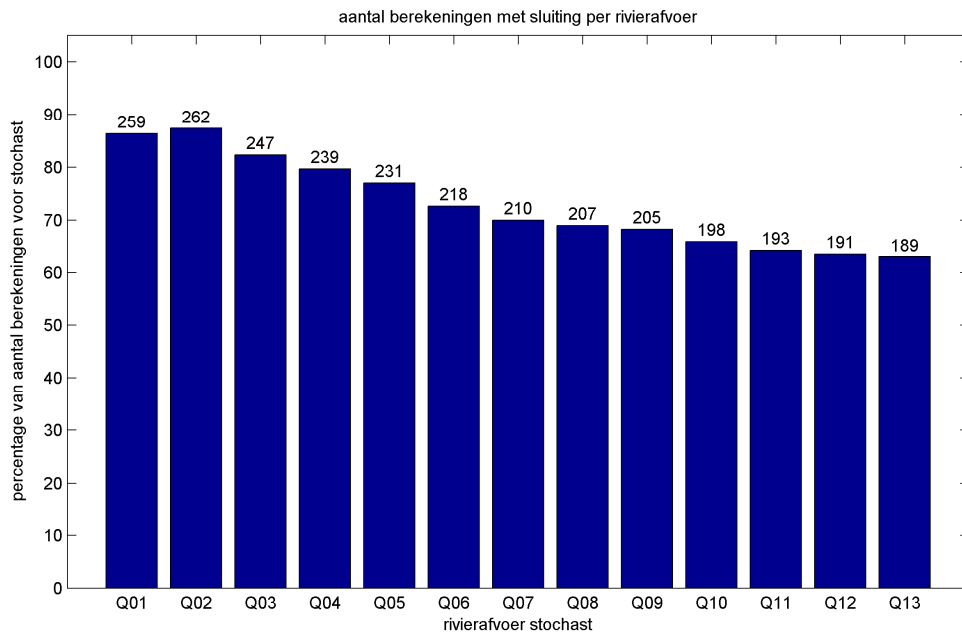
5.5.1 Ramspolkering (Balgstuw Ramspol)

Voor de Ramspolkering zijn twee situaties beschouwd: 'altijd open' (kering faalt) en 'sluitregime' (kering faalt niet). In het laatste geval wordt bij 2849 van de 3900 berekeningen (73%) de Ramspolkering daadwerkelijk ingezet (gesloten).

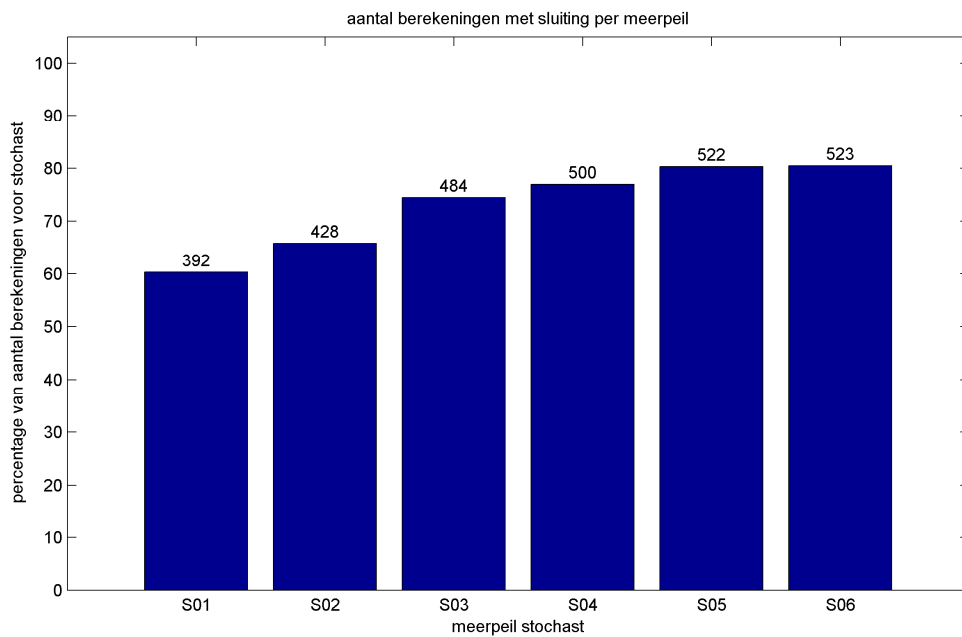
Figuur 5.16 t/m Figuur 5.19 geven een overzicht van het aantal sluitingen afhankelijk van de verschillende stochasten, respectievelijk afvoer, meerpeil, windsnelheid en windrichting.

Het aantal berekeningen met sluiting neemt af met toenemende rivierafvoer. Het sluitingscriterium van de Ramspolkering is niet alleen gebaseerd op een waterstand, maar de afvoer moet ook richting de Vecht gericht zijn. Bij toenemende rivierafvoeren is dat bij steeds minder stochastcombinaties het geval. Logischerwijs neemt bij toenemend meerpeil, het aantal combinaties met sluiting van de Ramspolkering ook toe.

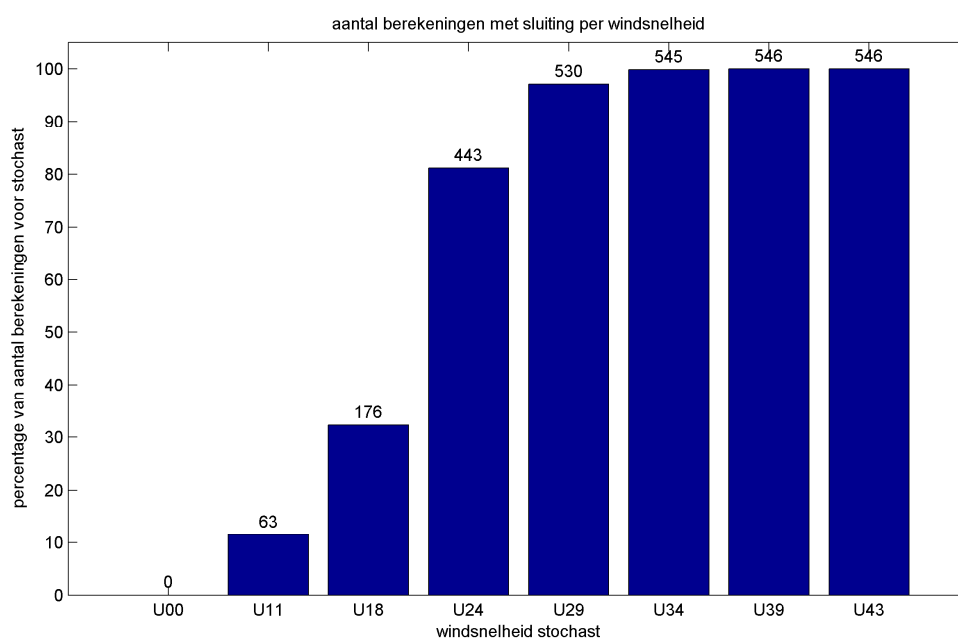
De afhankelijkheid van de windsnelheid en windrichting toont ook verwachte patronen: een toenemend aantal sluitingen bij een toenemende windsnelheid en de meeste sluitingen bij windrichtingen W-NW (D270-D315), richtingen waarbij het water richting de Ramspolkering wordt gestuwd. Bij een windsnelheid van 0 m/s zijn er geen sluitingen, omdat de afvoer ter plaatse van de Ramspolkering dan altijd richting het Ketelmeer is.



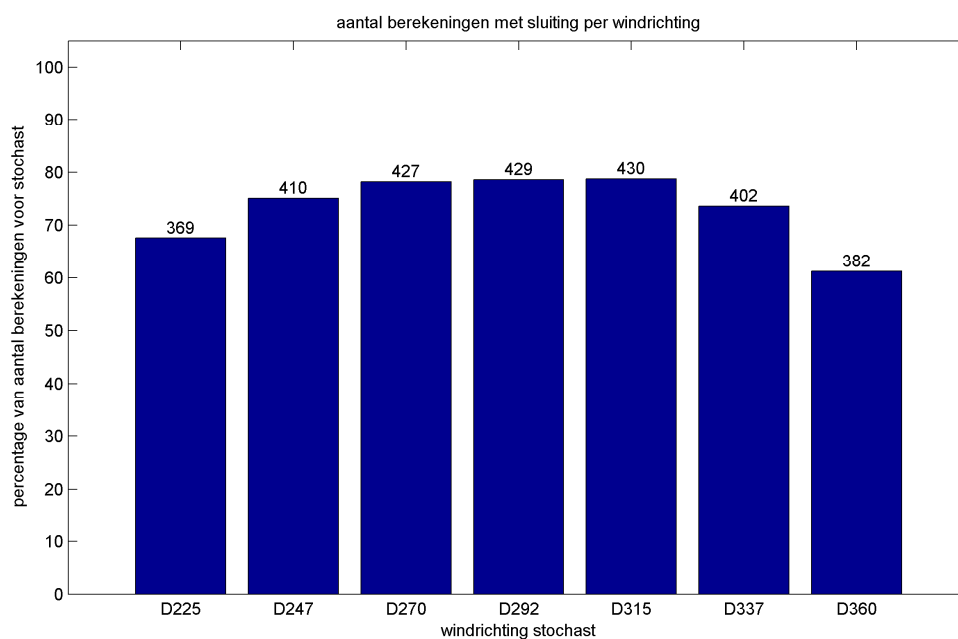
Figuur 5.16 Aantal berekeningen met sluiting Ramspolkering als functie van de afvoer.



Figuur 5.17 Aantal berekeningen met sluiting Ramspolkering als functie van het meerpeil.

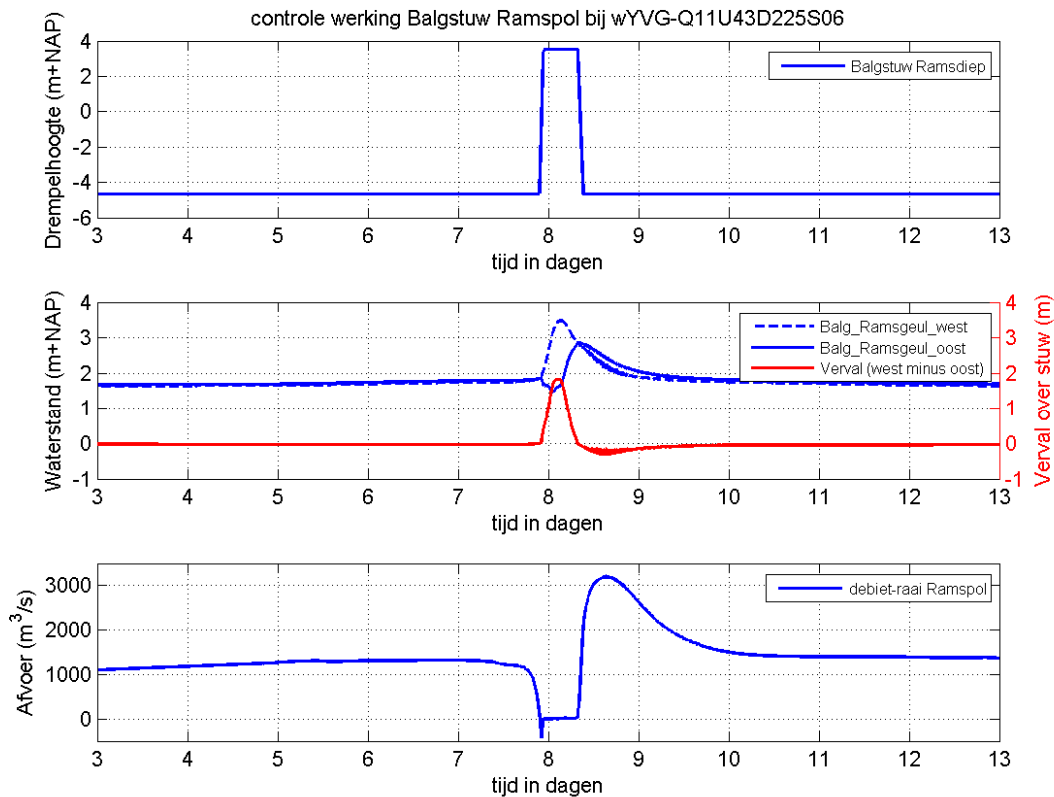


Figuur 5.18 Aantal berekeningen met sluiting Ramspolkering als functie van de windsnelheid.



Figuur 5.19 Aantal berekeningen met sluiting Ramspolkering als functie van de windrichting.

Figuur 5.20 geeft een voorbeeld van de inzet van de Balgstuw (Q11U43D225S06). Ondanks de relatief grote Vechtafvoer ($1.133 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Ommen), ontstaat door de windopzet een positief verval over de Balgstuw wat leidt tot sluiting daarvan. Wanneer de wind weer voldoende is afgenomen daalt de waterstand en zakt de Balgstuw weer.



Figuur 5.20 Inzet van de Balgstuw voor berekening Q11U43D225S06.

Dit kan meer precies worden uitgelegd aan de hand van de exacte (Balg)stuwsturing. Deze is als volgt:

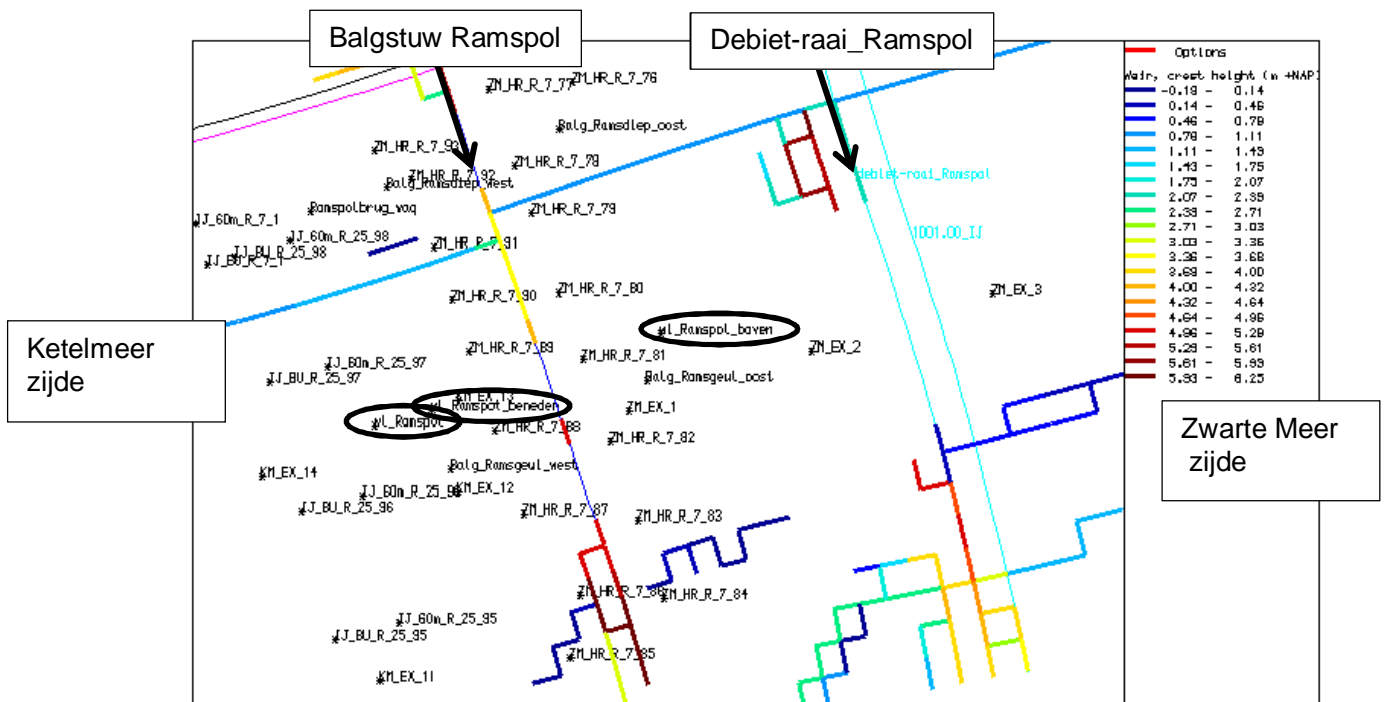
```

if (discharge c301 lt 0) and (level p303 gt 0.5 ) and sill_depth B4 lt -4.64999)
    then TS4 # stroming richting ZM. Balgstuw opblazen
elseif (level p304 (minus) p305 gt 0) and (sill_depth B4 gt 3.54999 )
    then TS5 # Balgstuw laten zakken
endif

```

Waarbij (zie Figuur 5.21):

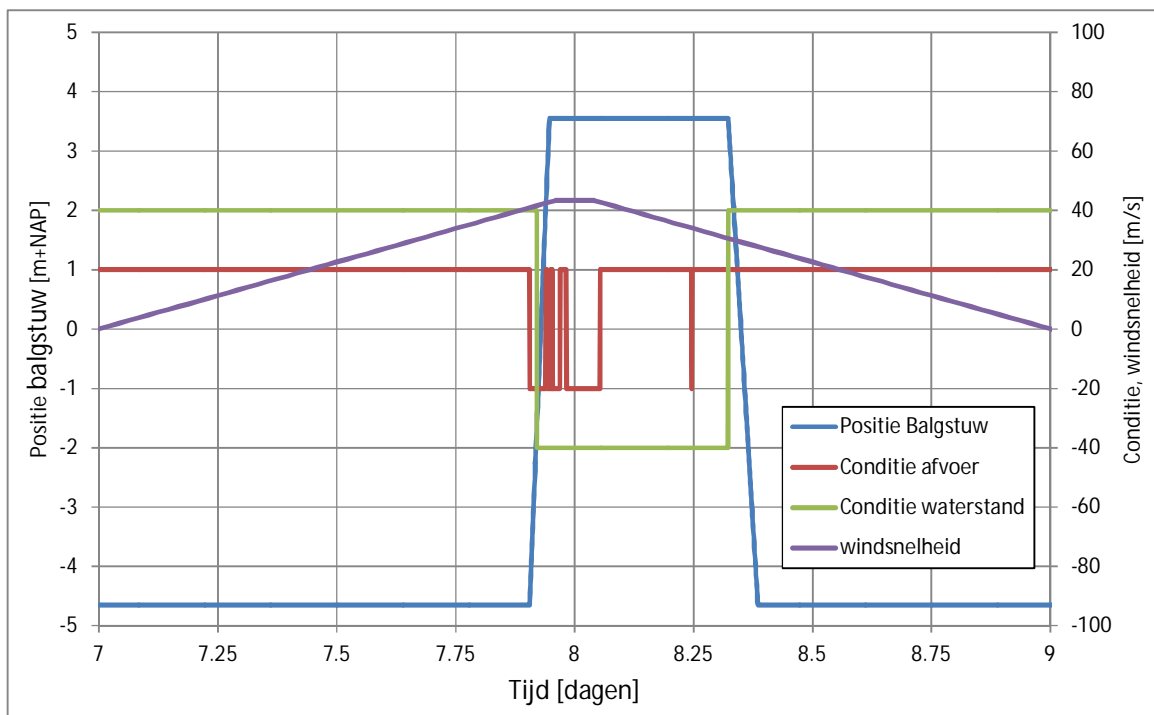
- C301: 'debiet-raai_Ramspol' = afvoer ten oosten van de Balgstuw aan de zijde van het Zwarte Meer, waarbij een positieve afvoer richting het Ketelmeer is.
- P303: 'wl_Ramspol' = waterstand ten westen van de kering in het Ketelmeer.
- P304: 'wl_Ramspol_boven' = waterstand ten oosten van de kering in het Zwarte Meer.
- P305: 'wl_Ramspol_beneden' = waterstand ten westen van de kering in het Ketelmeer.



Figuur 5.21 Sturingspunten Balgstuw. De locatie van de Balgstuw en diverse controlepunten zijn aangegeven.

Voor berekeningen met het hoogste meerpeil ('S06') is de waterstand circa 1,5 m+NAP wat betekent dat altijd aan de conditie 'p303 gt 0.5' wordt voldaan. Figuur 5.22 geeft het sluitgedrag voor berekening Q11U43D225S06. In het figuur staat de volgende informatie:

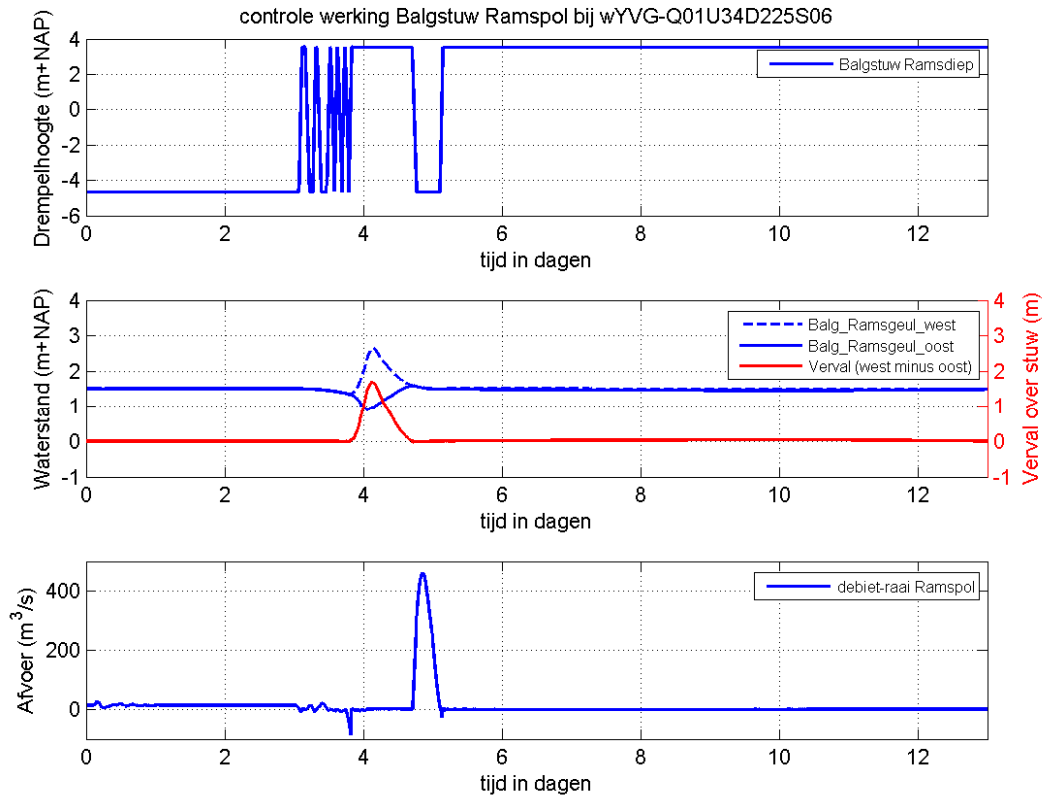
- De positie van de Balgstuw in de blauwe lijn.
- De windsnelheid in de paarse lijn.
- Een conditie voor de afvoer door debiet raai 'C301' in de rode lijn, waarbij geldt:
 - Als 'C301 < 0', waarde = -20 (afvoer richting Zwarte Meer / Vecht)
 - Als 'C301 ≥ 0', waarde = +20 (afvoer richting Ketelmeer of nul)
- Een conditie voor het waterstandsverschil over de Balgstuw in de groene lijn, waarbij geldt:
 - Als 'p304 – p305 > 0', waarde = +40 (waterstand Ketelmeer lager dan waterstand Zwarte Meer)
 - Als 'p304 – p305 ≤ 0', waarde = -40 (waterstand Ketelmeer hoger dan of gelijk aan waterstand Zwarte Meer)



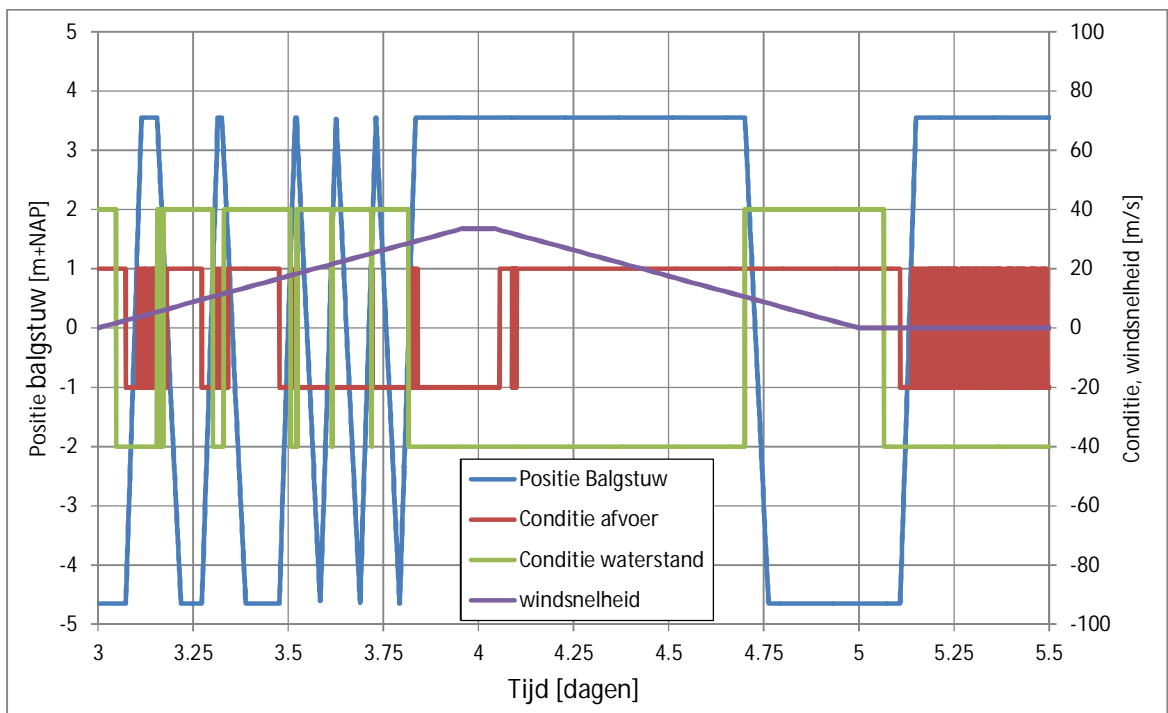
Figuur 5.22 Verklaring sluitgedrag Balgstuw voor berekening Q11U43D225S06. Zie tekst voor uitleg van het gehanteerde condities voor afvoer en waterstand.

Rond $T=7,9$ dag wordt de afvoer negatief (richting Zwarte Meer) en wordt voldaan aan de eerste conditie uit de Balgstuwsturing: de Balgstuw wordt ingezet. Vanaf dit moment wordt dus niet meer aan de eerste conditie voldaan omdat de stuwpositie (hoogte van de Balgstuw) groter is dan $-4,65$ m+NAP. Er wordt nog niet voldaan aan de tweede conditie omdat de stuwpositie lager is dan $3,55$ m+NAP. Op basis van de tijdreeks wordt de Balgstuw in 1 uur geactiveerd. Op $T=7,95$ dag is de Balgstuw volledig gesloten. Op $T=8,3$ dag is sprake van een positief waterstandverschil (zie de groene lijn) en hiermee wordt voldaan aan de tweede conditie wat betekent dat de Balgstuw weer geopend kan worden (dit duurt 1,5 uur).

Er zijn 95 berekeningen waarbij de Balgstuw meer dan 1x wordt ingezet. Dit zijn allemaal berekeningen met de laagste afvoer (Q01) en een meerpeil van $0,9$ m+NAP (S04) of hoger. Het grootste aantal keren inzet treedt op voor berekening wYVG-Q01U34D225S06, zie Figuur 5.23 en Figuur 5.24. In deze berekening is de Vechtafvoer ongeveer 10 m³/s. Dit betekent dat de conditie voor de afvoer (kleiner of groter dan 0) extreem gevoelig is voor variaties veroorzaakt door de wind. Na ruim 3 dagen verandert de conditie van de afvoer door de toenemende windsnelheid: de afvoer is richting het Zwarte Meer en de Balgstuw wordt ingezet. Daardoor neemt de waterstand aan de oostzijde van de Balgstuw toe en deze stijging is sneller dan de stijging aan de westzijde als gevolg van de wind. Dit resulteert in een positief verschil en de Balgstuw kan weer worden geopend. Dit proces herhaalt zich een aantal keer; doordat de windsnelheid steeds verder toeneemt, volgen de sluitingen elkaar steeds sneller op. Wanneer de wind maximaal is (geweest), blijft de Balgstuw gedurende langere tijd gesloten tot het verval over de Balgstuw weer negatief is geworden (Figuur 5.23). Omdat er tijdens de gesloten toestand een bepaald watervolume is opgebouwd achter de Balgstuw gaat het openen van de stuw gepaard met een afvoergolf richting het Ketelmeer. In deze specifieke berekening gaat de Balgstuw nogmaals dicht na iets meer dan 5 dagen. De afvoer van de Vecht is dusdanig laag, waardoor de waterstand aan de Zwarte Meerzijde zo langzaam stijgt, dat de Balgstuw gedurende de rest van de berekening gesloten blijft.

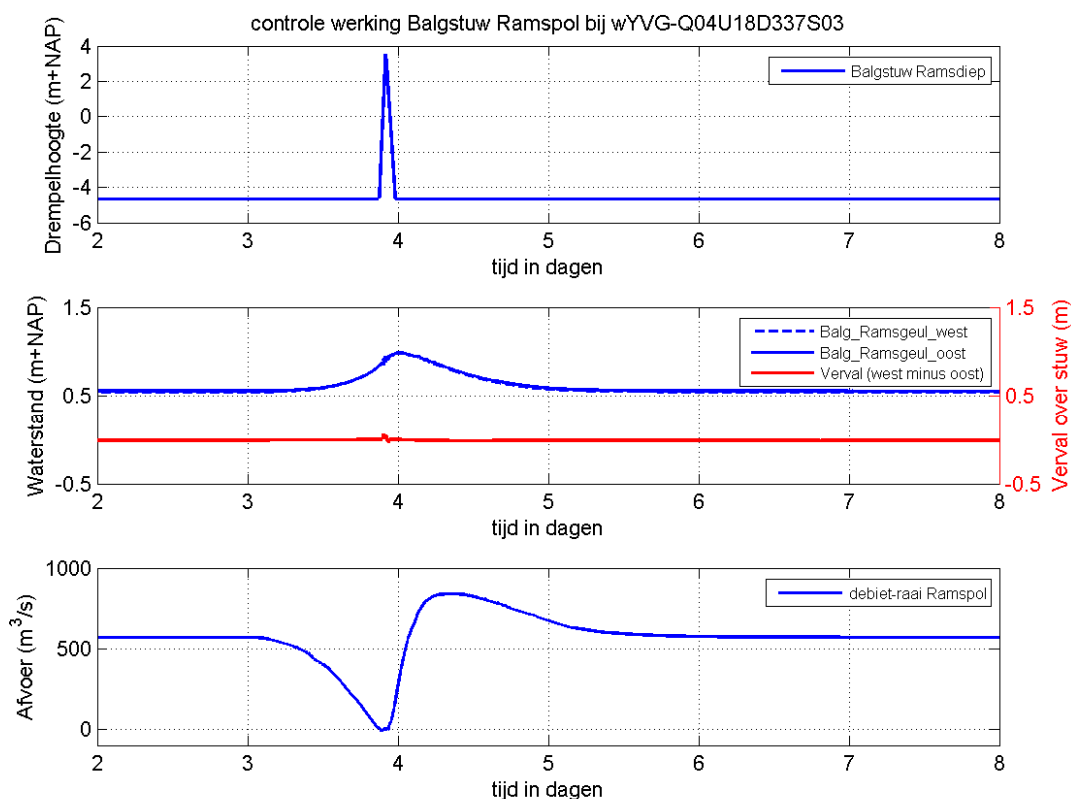


Figuur 5.23 Inzet van de Balgstuw voor berekening Q01U34D225S06.



Figuur 5.24 Verklaring sluitgedrag Balgstuw voor berekening Q01U34D225S06. Zie tekst voor uitleg van het gehanteerde criterium voor afvoer en waterstand.

Er is ook een aantal berekeningen waarbij de Balgstuw, wanneer deze volledig is gesloten, ook meteen weer geopend wordt. Een voorbeeld van één van deze berekeningen is gegeven in Figuur 5.25. Onder invloed van de wind wordt het water opgestuwd richting het Zwarte Meer, waardoor het debiet ter hoogte van de Ramspolkring negatief wordt en de Balgstuw sluit. Door de relatief hoge Vechtafvoer neemt de waterstand aan de zijde van het Zwarte Meer snel toe en zelfs zo snel, dat op het moment dat de Balgstuw volledig gesloten is de waterstand in het Zwarte Meer hoger is geworden dan de waterstand in het Ketelmeer. Effectief betekent dit dat wanneer de Balgstuw volledig gesloten is, deze meteen weer opent op basis van het verval over de stuw.



Figuur 5.25 Inzet van de Balgstuw voor berekening Q01U34D225S06.

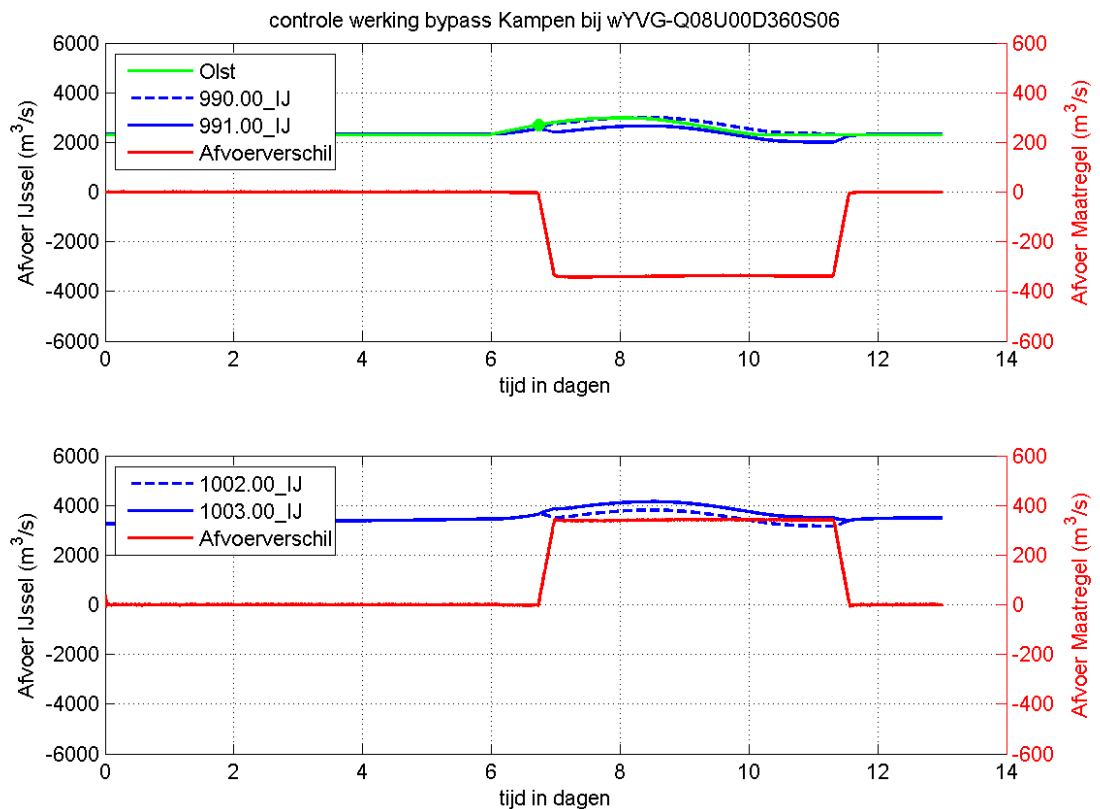
5.5.2 Functioneren Bypass Kampen

De afvoer door de Bypass Kampen volgt niet direct uit de WAQUA-uitvoer. Wanneer de afvoer bij Olst groter wordt dan $2.700 \text{ m}^3/\text{s}$, start de onttrekking van $340 \text{ m}^3/\text{s}$ aan de IJssel tussen IJssel rkm 990 en 991. Dezelfde hoeveelheid water wordt geloosd bij het Vossemeer en stroomt tussen rkm 1002 en 1003 weer terug in de IJssel. Door het verschil in afvoer tussen deze km-raaien te bepalen, is te controleren of de juiste afvoer wordt onttrokken.

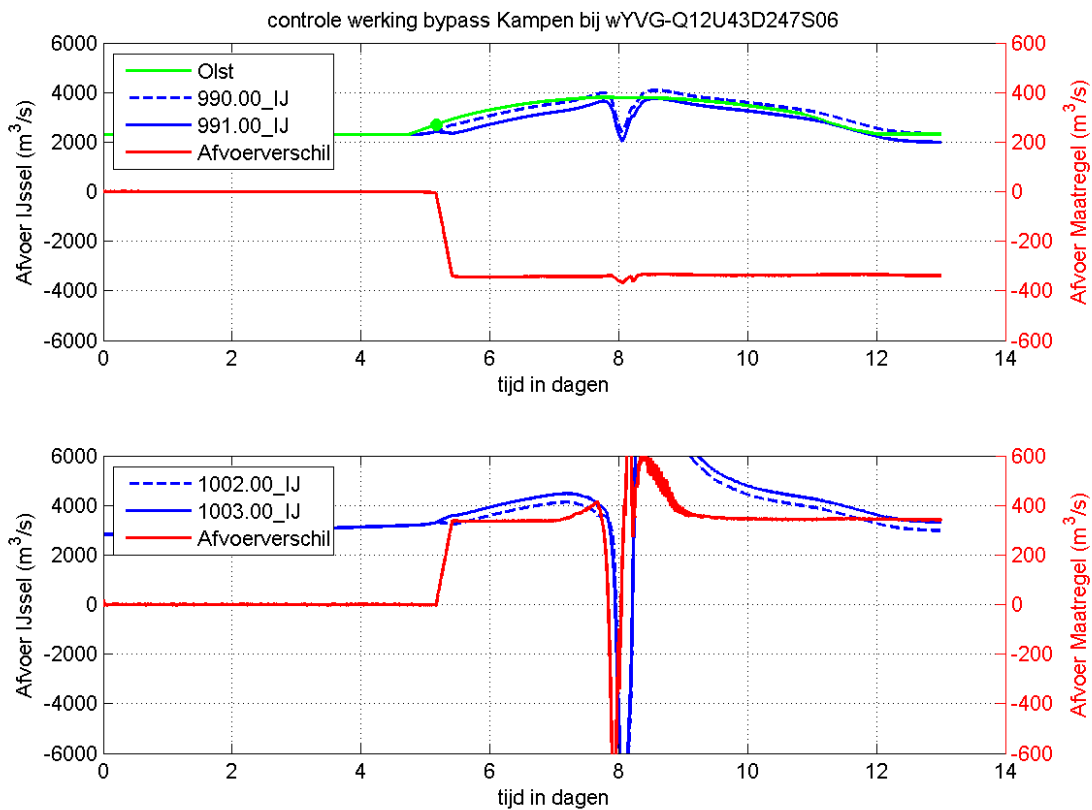
Figuur 5.26 geeft de afvoeronttrekking en lozing door de Bypass Kampen weer, voor een situatie zonder wind bij afvoer Q08 (piekafvoer $Q=2.975 \text{ m}^3/\text{s}$ op IJssel) en het hoogste meerpeil (S06, $1,5 \text{ m+NAP}$). In het figuur is goed te zien dat de onttrekking start wanneer de afvoer bij Olst (bovenste plaatje in Figuur 5.26) boven de $2.700 \text{ m}^3/\text{s}$ komt (groene stip) en de lozing bij het Vossemeer (onderste plaatje in Figuur 5.26) ook op het zelfde moment start.

Figuur 5.27 geeft de afvoeren weer voor Q12 (piekafvoer $Q=3.800 \text{ m}^3/\text{s}$ op IJssel) en een situatie met wind. Ook hier start de onttrekking op het juiste moment. De onttrekking wordt gestopt wanneer de afvoer bij Olst lager wordt dan $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (in de tijdreeks waarbij de afvoer niet op $2.300 \text{ m}^3/\text{s}$ is geminimaliseerd). Bij deze afvoer betekent dit dat de afvoeronttrekking doorloopt tot het einde van de berekening. De lozing is hier bepaald als het verschil tussen rkm 1002 en 1003 op de IJssel. Daar spelen ook windeffecten een rol, die de afvoer beïnvloeden; dit is terug te zien in het figuur.

Het effect op de waterstand is lastig te bepalen uit de berekening en wordt verondersteld correct te zijn, omdat de voorgeschreven afvoer aan de rivier wordt onttrokken. N.b. in de praktijk kan het gebeuren dat als gevolg van windopzet en hoge rivierafvoer de afvoercapaciteit slechts ten dele (of volledig niet) benut kan worden. De hier gekozen aanpak is dus niet conservatief.



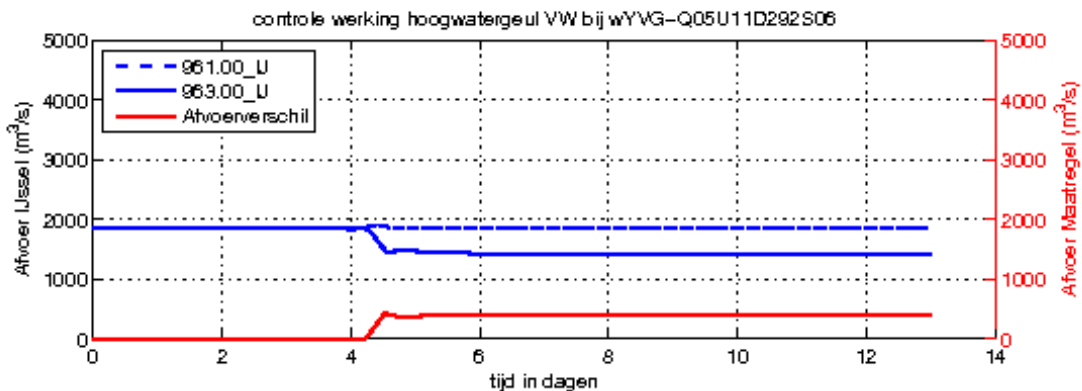
Figuur 5.26 Voorbeeld functioneren Bypass Kampen, zonder wind.



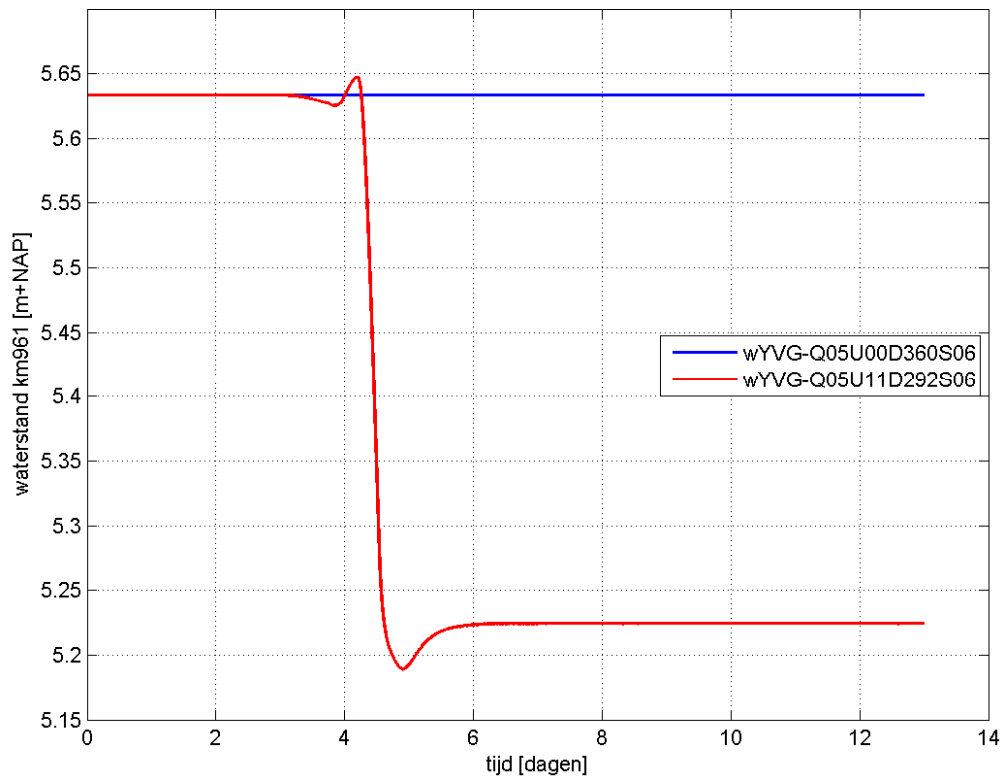
Figuur 5.27 Voorbeeld functioneren Bypass Kampen, met wind.

5.5.3 Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld

De hoogwatergeul Veessen-Wapenveld wordt ingezet wanneer de waterstand bij de inlaat 5,65 m+NAP bedraagt. Deze waterstand wordt vanaf Q05 (constante afvoer van 1.850 m³/s op de IJssel) bereikt. De eerste stochastcombinatie waarbij de geul gaat meestromen is Q05U11D292S06. Het afvoerverloop in de hoogwatergeul voor die situatie is gegeven in Figuur 5.28: ongeveer 1/5^e van de afvoer wordt door de hoogwatergeul afgevoerd. In Figuur 5.29 is te zien dat voor de situatie Q05S06 (Q05 komt overeen met ongeveer 12.000 m³/s Lobith) zonder wind, de waterstand inderdaad net onder de drempel van 5,65 m+NAP ligt; door het windeffect wordt bij U11D292 het waterstandscriterium wel overschreden. Dit leidt tot een waterstandsdaling op de IJssel van ongeveer 40 cm.

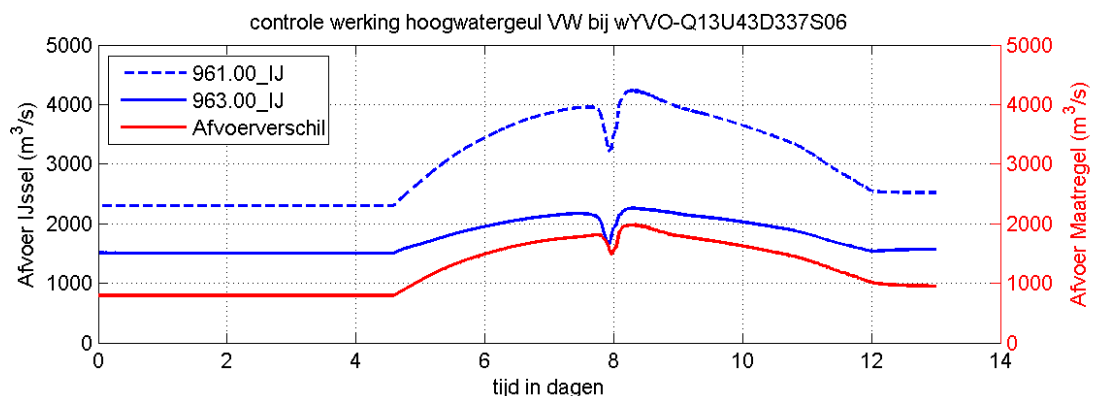


Figuur 5.28 Voorbeeld stochastcombinatie waarbij de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld gaat meestromen.



Figuur 5.29 Waterstandseffect hoogwatergeul Veessen-Wapenveld bij Q05U11D292S06.

Voor Q06 (constante afvoer van $2.300 \text{ m}^3/\text{s}$ op de IJssel) stroomt de Bypass vanaf het begin van de berekening mee. Dat is ook het geval voor afvoergolven (Q07 en hoger) waarbij de afvoer is geminimaliseerd op $2.300 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie ook paragraaf 3.9). De maximale waterstand op km961 treedt op voor de combinatie wYVO-Q13U43D337S06. Figuur 5.30 geeft het afvoerverloop bij de hoogwatergeul voor deze combinatie: bijna de helft van de rivierafvoer wordt door de hoogwatergeul afgevoerd. Als gevolg van de opstuwende werking van de wind is rond de piek ($T = 8$ dagen) sprake van een tijdelijke afname van de afvoer door de geul.

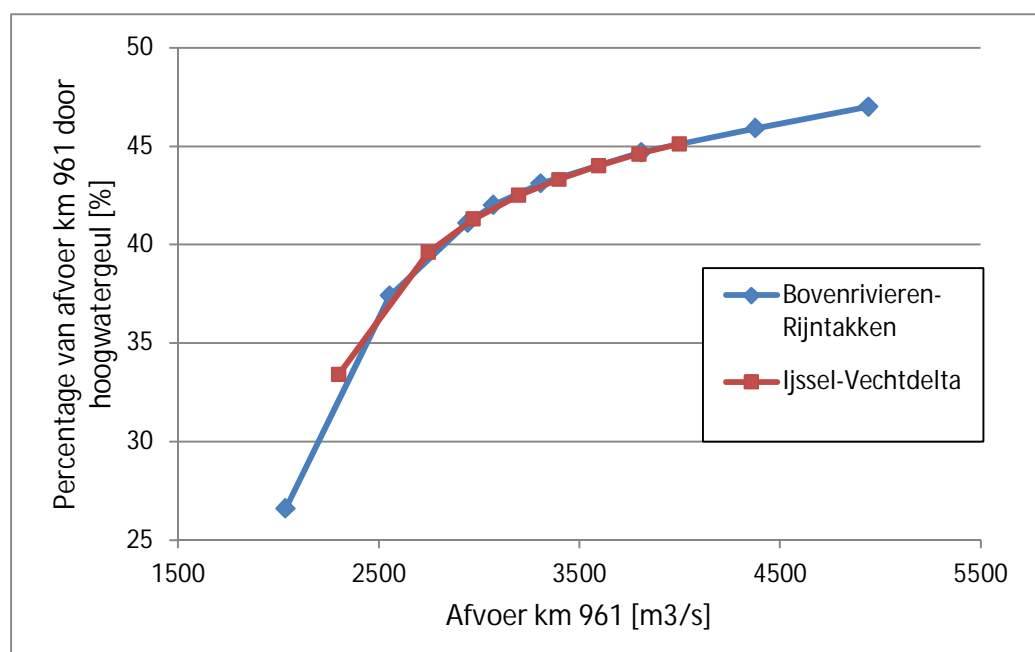


Figuur 5.30 Afvoerverloop hoogwatergeul Veessen-Wapenveld voor de stochastcombinatie met de hoogste waterstand op km961.

In het IJVD-model is geen debiet-raai gedefinieerd in de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld. Door het verschil in afvoer te berekenen tussen km 961 (bovenstrooms instroompunt) en km 963 (benedenstrooms instroompunt) kan een inschatting gemaakt worden van de afvoer door de hoogwatergeul. Dit is een inschatting, omdat er tussen deze twee punten ook piekvervlakking en verandering van de golfvorm optreedt in het geval van afvoergolven. Voor de Bovenrivieren-Rijntakken is deze inschatting ook gemaakt (Deltares, 2016a). Om het hier berekende afvoerpercentage te kunnen vergelijken met dat van de Rijntakken, hanteren we voor de IJVD berekeningen zonder wind (U00D360) en niet falende Ramspolkering. Tabel 5.1 geeft per afvoerstochast de afvoer door de hoogwatergeul als percentage van de afvoer door rkm 961. In Figuur 5.31 is het afvoerpercentage dat is berekend in het IJVD-model vergeleken met het afvoerpercentage dat berekend is in 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 Rijntakken niet het geval.

Piekafvoer (stochast)	Olst	Afvoer km 961	Afvoer hoogwatergeul	Percentage van afvoer km 961
[m ³ /s]		[m ³ /s]	[m ³ /s]	
100		100,0	0,0	0
500		500,3	0,0	0
950		950,1	0,0	0
1.400		1.400,3	0,0	0
1.850		1.850,0	0,0	0
2.300		2.301,7	769,2	33,4
2.750		2.749,9	1.090,0	39,6
2.975		2.973,7	1.227,2	41,3
3.200		3.198,4	1.359,3	42,5
3.400		3.398,2	1.472,8	43,3
3.600		3.597,4	1.582,6	44
3.800		3.797,7	1.692,8	44,6
4.000		3.997,6	1.802,9	45,1

Tabel 5.1 Percentage van de afvoer door de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld.



Figuur 5.31 Vergelijking afvoer door de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld tussen IJVD en Bovenrivieren-Rijntakken.

5.5.4 Stuwen

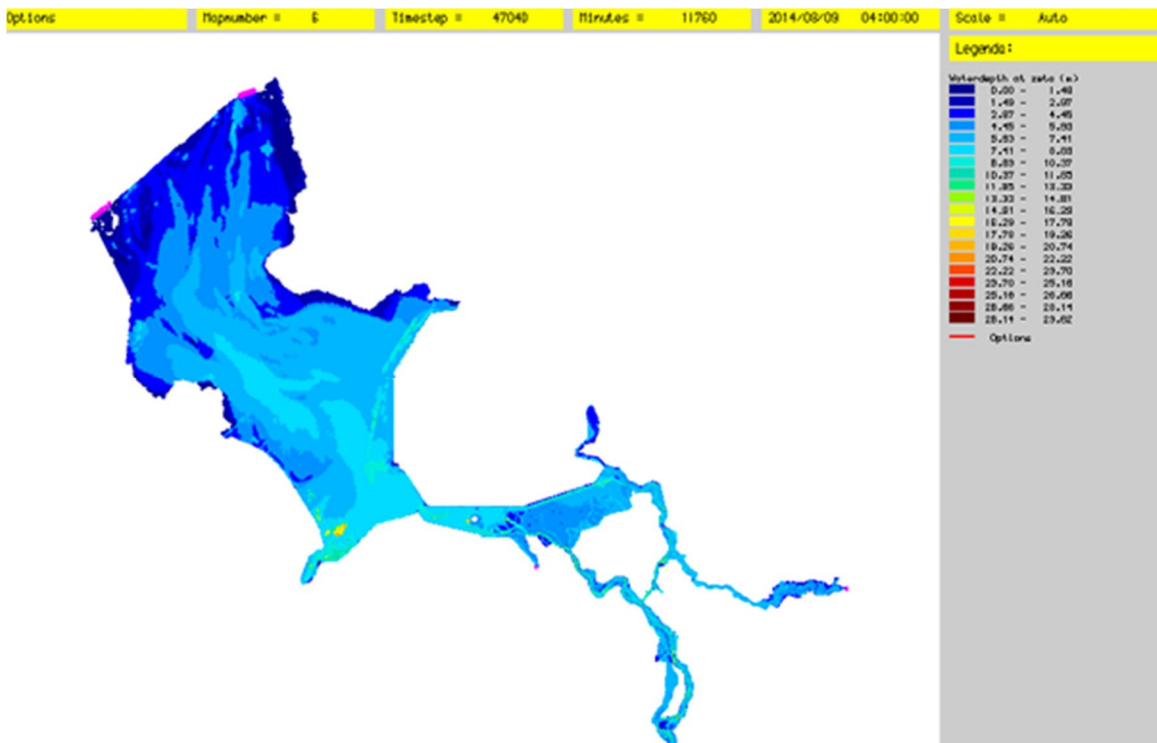
In het IJVD-model zitten twee stuwen: bij Vilsteren en bij Vechterweerd. In paragraaf 5.4.1 is al getoond dat de stuwen goed functioneren, i.e. bij de laagste afvoer wordt de waterstand in de Vecht opgestuwd.

5.5.5 Spuisluizen Afsluitdijk: droogval bij Kornwerderzand en/of Den Oever (volumecheck)

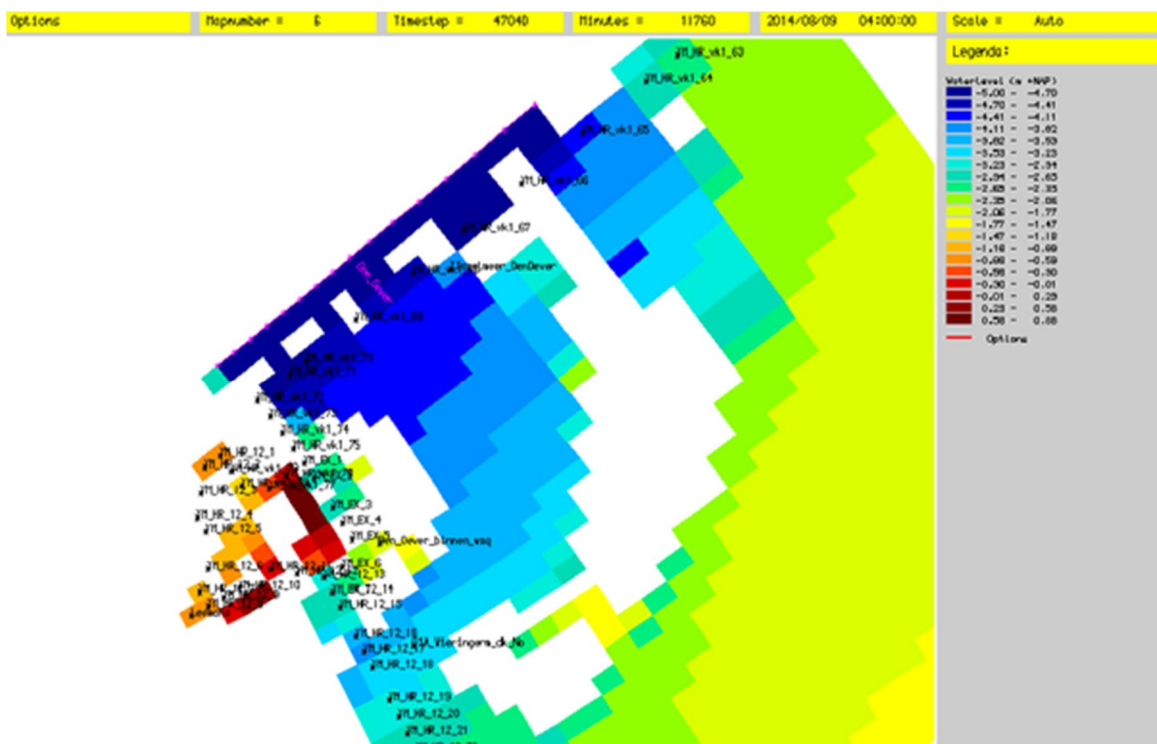
In situaties met extreme wind uit noordelijke richting is het mogelijk dat de afwaaiing bij de Afsluitdijk zo groot wordt dat de uitstroomrand droogvalt. Dit is te zien in Figuur 5.32 en Figuur 5.33 waarin de waterdiepte voor het gehele model (Figuur 5.32) als de waterstand nabij Den Oever (Figuur 5.33) is weergegeven. Door het droogvallen van de uitstroomrand, wordt er gedurende een periode van circa 5 uur te weinig water onttrokken bij Den Oever met als gevolg dat de volumebalans niet meer klopt en er water in het systeem achterblijft. (N.B. dit verschijnsel treedt niet op bij U39 dus is dit in WT12011 waarschijnlijk niet voorgekomen). Deze situatie zou in de praktijk ook kunnen optreden, namelijk dat er bij zeer extreme storm uit het noordwesten niet gespuid kan worden.

Om dit te controleren worden de opgelegde tijdreeksen met onttrekkingen bij Kornwerderzand en Den Oever vergeleken met de daadwerkelijk berekende afvoeren door deze uitstroomranden. In Figuur 5.34 is het gecumuleerde afvoertekort bij Den Oever uitgezet tegen het gecumuleerde afvoertekort bij Kornwerderzand. Tekorten van meer dan 10.000 m³/s treden alleen op bij windsnelheden van 34 m/s en hoger en dan vooral voor lage meerpeilen en wind uit noordelijke richting (Figuur 5.34).

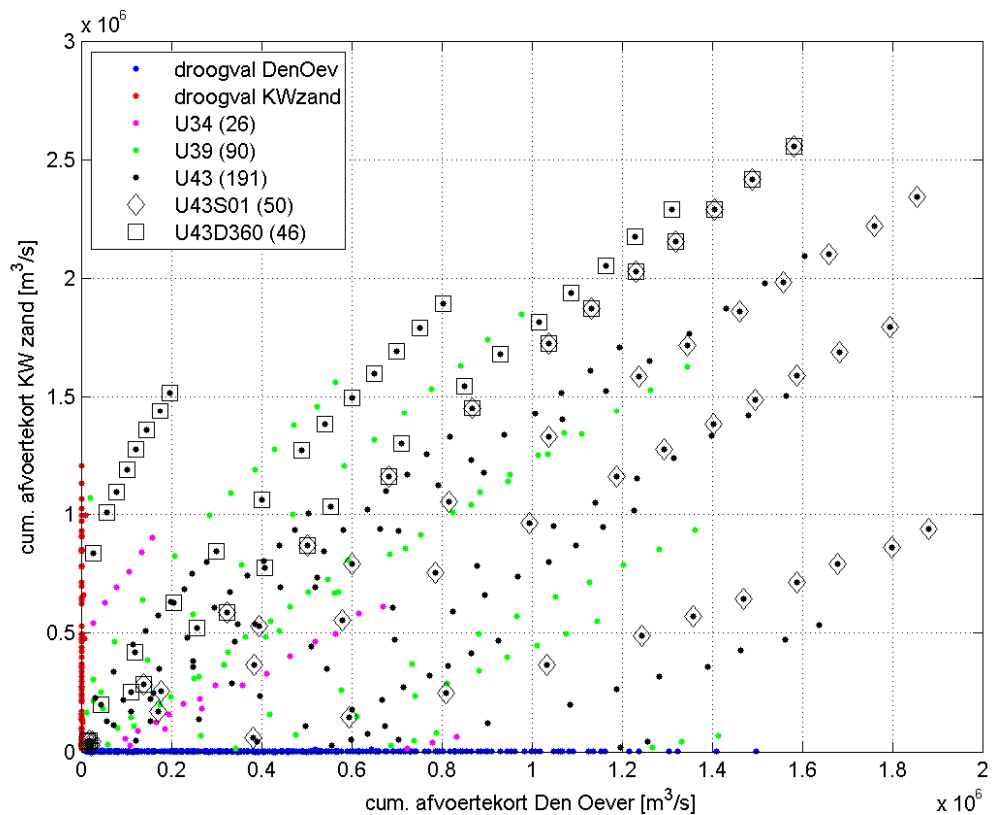
De droogval bij de spuisluizen leidt tot teveel water in het systeem. Dit komt bijvoorbeeld tot uiting bij Q13U43D292S01 waarbij op het IJsselmeer het maximale waterpeil stijgt tot -0,34 m+NAP, terwijl de initiële conditie -0,40 m+NAP bedraagt. Als gevolg hiervan worden de berekende waterstanden te hoog worden uitgerekend. Vanwege de extreme windcondities waarbij dit verschijnsel optreedt is er geen significante invloed op de berekende toetspeilen.



Figuur 5.32 Waterdiepte hele model bij windsnelheid 43 m/s.



Figuur 5.33 Waterstand bij Den Oever bij windsnelheid 43 m/s.



Figuur 5.34 Analyse droogval spuisluizen Afsluitdijk (berekeningen met niet-falende Rampsolkering).

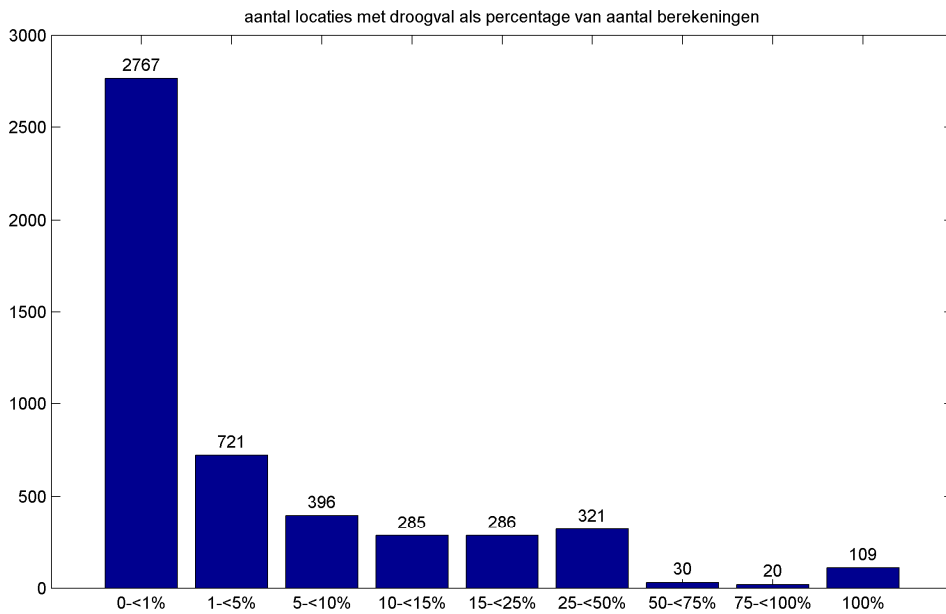
5.6 Controle max13-waarden

Voor iedere uitvoerlocatie wordt met 'getdata' de parameter 'max13' bepaald. Dit is het gemiddelde van de 13 waarden rond het maximum in een tijdreeks. 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.

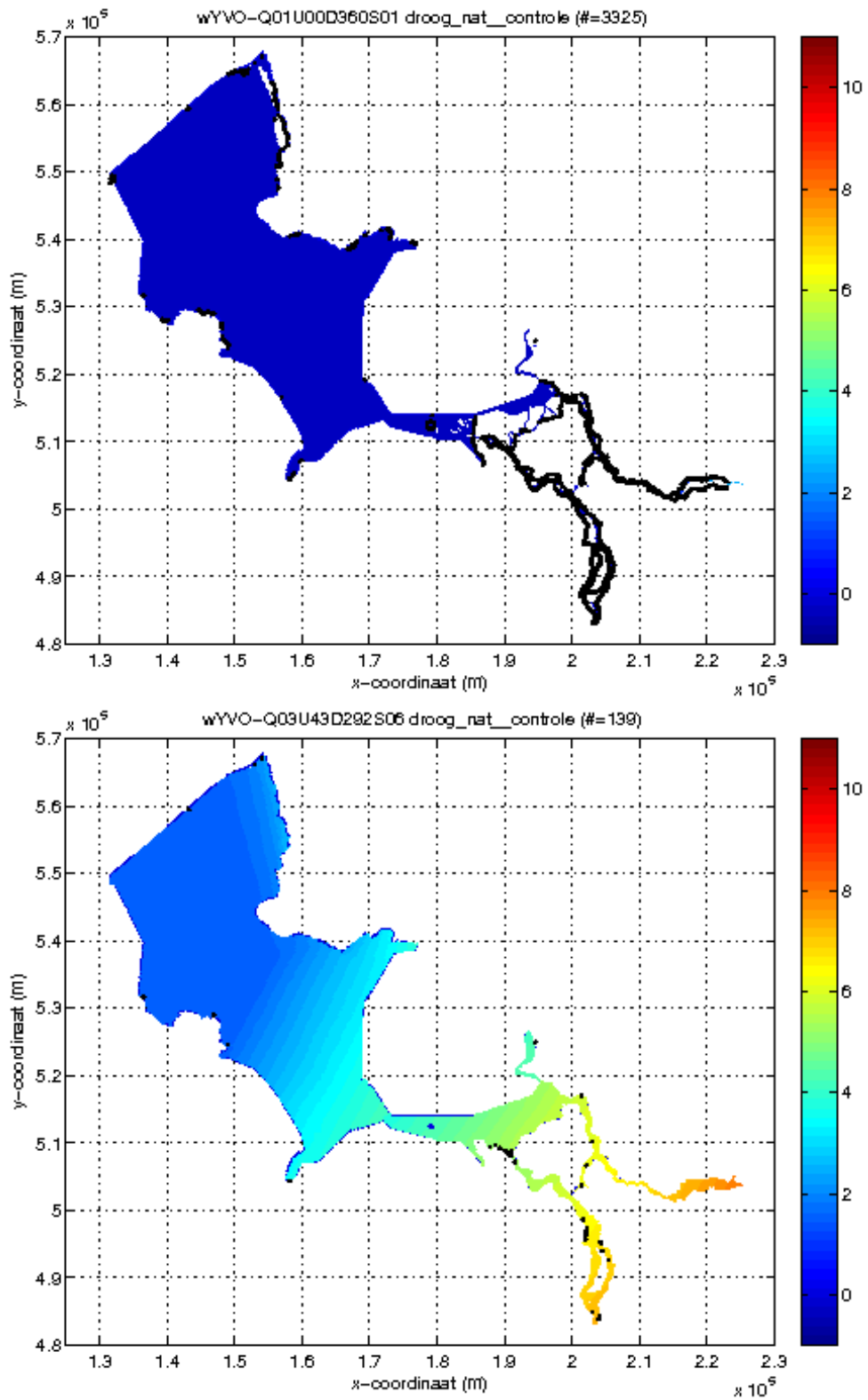
Figuur 5.35 geeft een overzicht van het aantal uitvoerlocaties met droogval als percentage van het totaal aantal berekeningen. 109 locaties zijn in alle berekeningen droog, deze locaties zijn weergegeven in Tabel 5.2. Figuur 5.36 geeft een overzicht van de locaties met minste/meeste droogval. Uit de figuren in paragraaf 5.6 is reeds geconcludeerd dat het aantal droge punten consistent gedrag vertoont met het variëren van de stochasten.



Figuur 5.35 Aantal uitvoerlocaties met droogval als percentage van het totaal aantal berekeningen.

Locatie of dijkkring	Nummer van de locatie
De_Haandrik_beneden	
De_Haandrik_boven	
Den_Oever_buiten_waq	
Kornwerd_buiten_waq	
Marienberg_beneden_w	
IJ_60m_L_11	184;185;196;197;200;201;203;205;206;207;208;214;215;216;217;225
IJ_60m_L_52	621;758;765;766
IJ_60m_M_52	73;90
IJ_60m_R_10	142;143;144
IJ_60m_R_25	1
IJ_60m_R_53	151;152;153;154;285;286;287;288
YM_HR_13	6;7;8;9;10;11
YM_HR_vk1_38	
ZM_HR_L_10	101;102;103
ZW_HR_L_10	85
ZW_HR_L_53	272;273;323
ZW_HR_R_9	383

Tabel 5.2 Uitvoerlocaties die in alle berekeningen droog zijn.



Figuur 5.36 Berekening met grootste aantal droge punten (boven, 2342 zonder backup-locaties) en berekening met kleinste aantal droge punten (onder, 114 zonder backup-locaties).

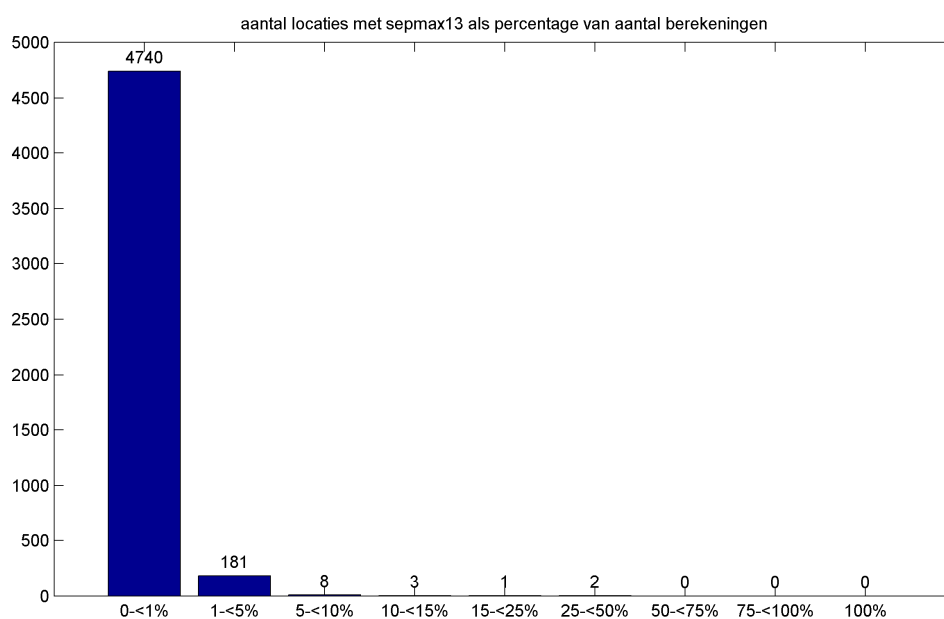
5.7 Instabiliteiten in de maximale waterstand

Voor de IJVD wordt voor iedere berekening per rekenpunt de maximale waterstand op tijdstapniveau (0,125 minuut) bepaald: 'MAXSEPSEP'². Daarnaast wordt per uitvoerpunt een tijdreeks van de waterstand met een interval van 1 minuut opgeslagen. Middels een nabewerking met getdata wordt het gemiddelde over de 13 waarden rond het maximum uit deze tijdreeks bepaald: 'max13'. Wanneer het verschil tussen 'max13' en de daadwerkelijk maximaal berekende waterstand 'sepmax' op tijdstapniveau 'MAXSEPSEP' groot is, kan dit duiden op een instabiliteit in de berekening. Daarom is voor iedere uitvoerlocatie de maximale waterstand vergeleken met de 'max13' (max13 minus sepmax). Dit verschil is altijd kleiner dan 0,0 m, als kritieke grens hanteren we het criterium $<-0,03$ m voor de IJVD. Dit criterium blijkt voldoende onderscheidend om alle instabiele locaties zichtbaar te krijgen. Een hogere waarde zou instabiele locaties goedkeuren; terwijl een lagere waarde niet zinvol is omdat dan ook 'natuurlijke' fluctuaties kunnen leiden tot afkeuring.

Figuur 5.37 geeft een overzicht van het aantal uitvoerlocaties waarbij bovenstaande criterium wordt overschreden als percentage van het totaal aantal berekeningen. In Tabel 5.3 zijn de locaties gegeven waarbij in meer dan 5% van de berekeningen de 'max13' sterk afwijkt van 'sepmax'. Dit is een beperkt aantal locaties; voor het Zwarte Water en het Zwarte Meer geldt dat het criterium vooral wordt overschreden in het geval van geopende Balgstuw, wat natuurlijk niet vreemd is omdat het water dan vrij richting deze wateren kan stromen omdat de Balgstuw faalt. Een voorbeeld van een locatie in het Zwarte Meer is gegeven in Figuur 5.38: door schommelingen in waterstand rond de piek wordt het criterium (maximaal 0,03 m afwijking) overschreden.

Figuur 5.39 geeft, voor de berekening waarbij het max13-criterium het meeste keer wordt overschreden, deze locaties ruimtelijk weer. Overschrijding treedt het meest op in de benedenloop van de IJssel. Op de rechteroever van de IJssel ligt hier een verbindende kering van het Kampereiland. Die kering heeft een hoogte van circa 3 m+NAP. Bij deze stochastcombinatie betekent dit dat deze kering rond de piek overstroomt, met relatief veel droog/nat-gerelateerde instabiliteiten rond overlaten (en een groot verschil tussen max13 en sepmax) tot gevolg, zie ook Figuur 5.40.

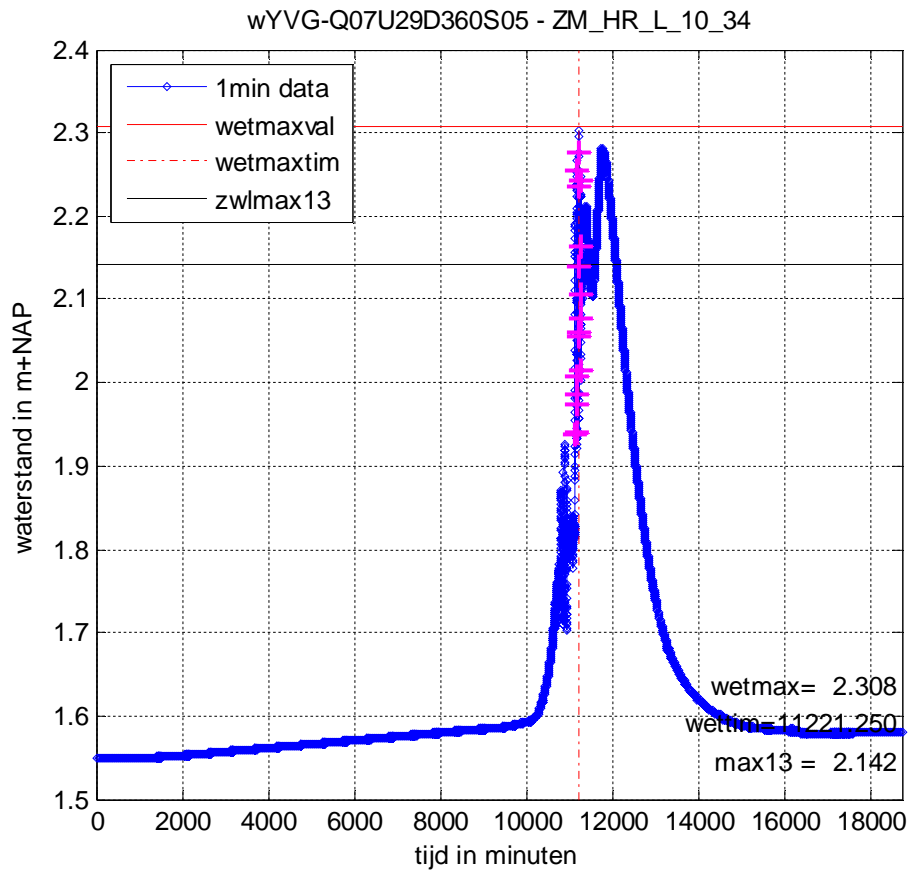
² In de data verwerking is dit vervangen door "WETMAXVAL" waardoor droge punten uit het waterstandsveld zijn gefilterd. "MAXSEPSEP" is in de tekst afgekort tot 'sepmax' en in de figuren tot 'wetmax' of 'sepmax'.



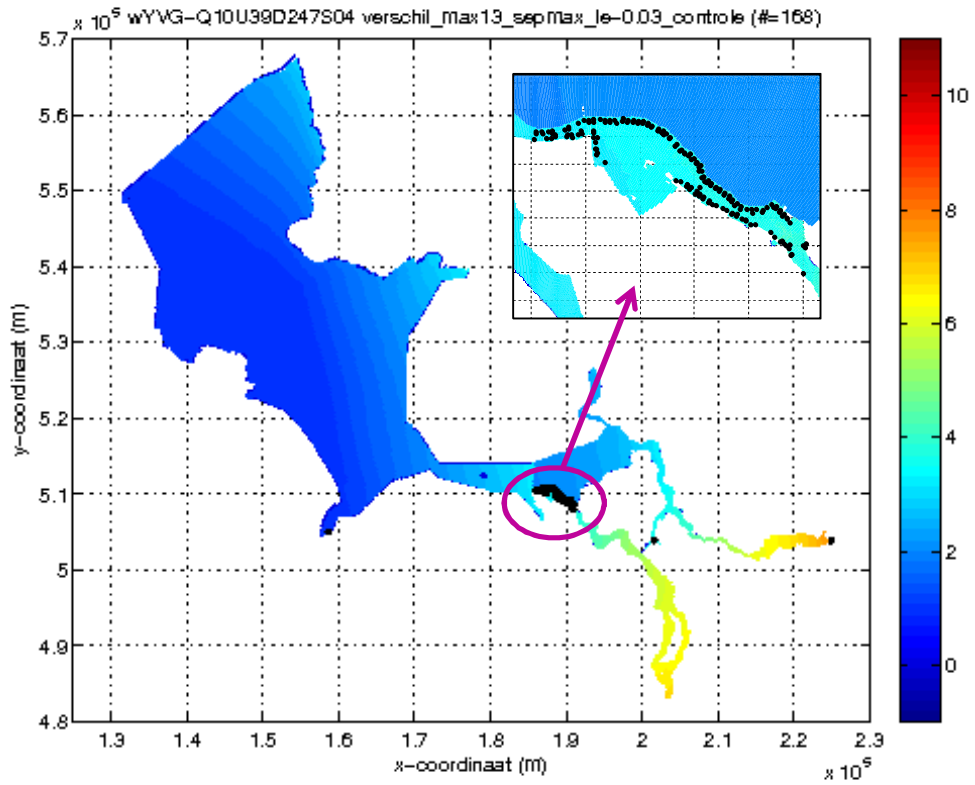
Figuur 5.37 Aantal uitvoerlocaties waarbij max13 sterk afwijkt van sepmax als percentage van het totaal aantal berekeningen.

Locatie of dijkkring	Nummer van de locatie
33_VE	
KM_EX_13	
OV_HR_L_53	208
YM_HR_13_153	
YM_HR_6_1	1;378
YM_HR_7_209	
YM_HR_vk4_79	
ZM_HR_L_10	1;34
ZM_HR_R_7	88;89
ZW_HR_L_53	312

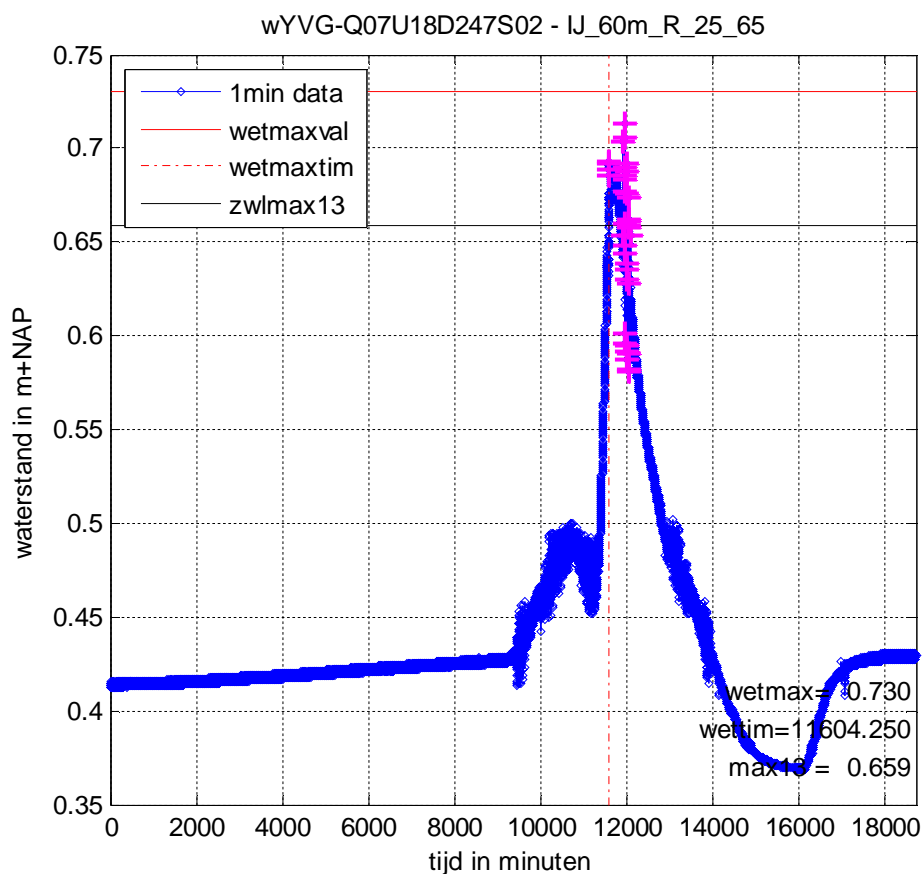
Tabel 5.3 Uitvoerlocaties waarbij in meer dan 5% van de berekeningen de 'max13' sterk afwijkt van tijdens de berekening geregistreeerde maximale waterstand.



Figuur 5.38 Voorbeeld locatie waarbij het max13-criterium wordt overschreden in het Zwarte Meer.



Figuur 5.39 Berekening waarbij het max13-criterium het meeste keer wordt overschreden in de benedenloop van de IJssel (168 met backup-locaties, 90 zonder backup-locaties).



Figuur 5.40 Voorbeeld van een berekening waarbij het max13-criterium wordt overschreden op de IJssel.

5.8 Instabiliteiten in het tijdsverloop van de waterstandtijdreeksen

De basis van de controle op instabiliteiten in een tijdreeks is het verschil in waterstand tussen twee opeenvolgende tijdstappen (voor IJVD in tijdstappen van 1 minuut). Er is een aanscherping van dit criterium nodig omdat het, in geval van onderlopen van een locatie tijdens de berekening en/of snelle waterstandsverandering door windopzet, fysisch correct kan zijn dat de waterstand relatief snel verandert tussen twee opeenvolgende tijdstappen.

De controle op instabiliteiten in tijdreeksen gebeurt door toepassing van de volgende stappen:

- bereken het verschil in waterstand tussen twee opeenvolgende tijdstappen, waarbij de tijdreeks op minuut-basis wordt gehanteerd;
- controle of er verschillen groter van 4 cm zijn onder (a);
- bij het onderlopen van locaties en onder invloed van harde wind kan het fysisch correct zijn dat het verschil tussen twee opeenvolgende stappen groter dan 4 cm is. Daarom wordt een tijdreeks alleen gemarkeerd met een instabiliteit, wanneer er een tekenwissel is in de vijf uitvoerwaarden rond het punt (of meerdere punten) gevonden onder (b).

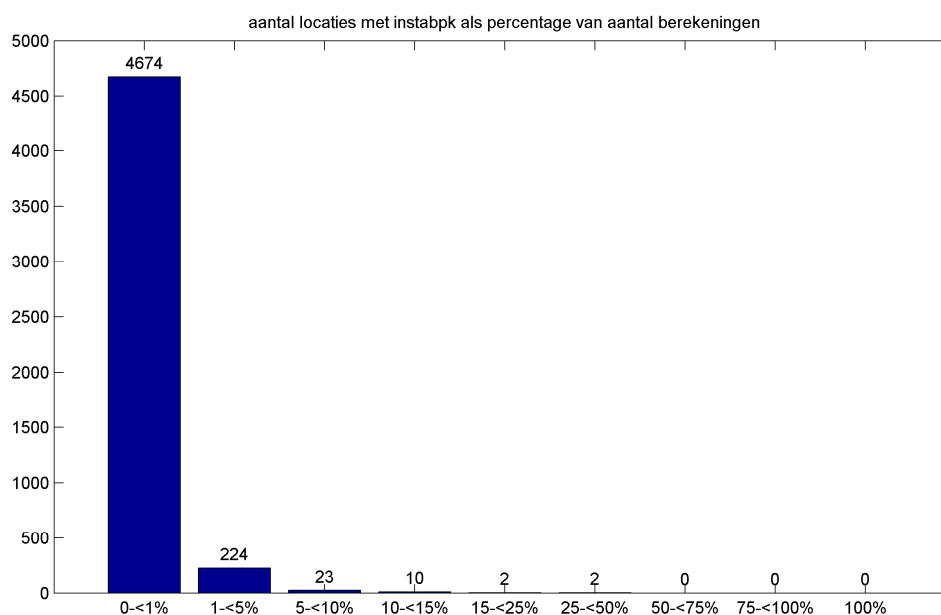
Deze controle is beperkt tot een periode van 240 minuten rond de piek (waarbij de piek het maximum in de tijdreeks is).

Figuur 5.41 geeft een overzicht van het aantal uitvoerlocaties waarbij bovenstaande criterium wordt overschreden als percentage van het totaal aantal berekeningen. Tabel 5.4 geeft een

overzicht van de locaties waarbij voor meer dan 5% van de berekeningen niet aan het criterium wordt voldaan.

Merk op dat er bij toepassing van dit criterium ook locaties aangemerkt kunnen worden met een instabiliteit, wanneer een locatie snel onderloopt in een berekening, zie Figuur 5.42.

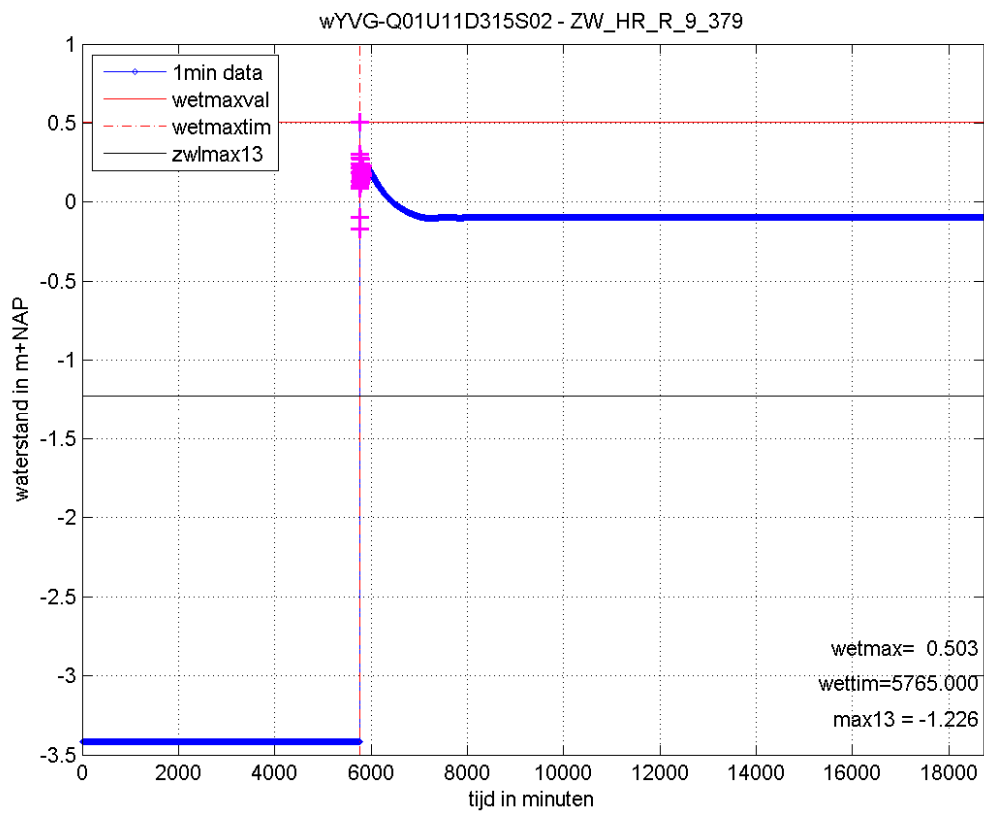
Opvallend zijn de locaties rond de Balgstuw Ramspol; voor locatie Balg_Ramsdiep_oost treedt bij 852 van de 3900 berekeningen met falende kering (YVO) een instabiliteit op. Het treedt op bij relatief harde wind ($\geq U_{29}$), zie Figuur 5.43a. De overige locaties betreffen vooral oeverlocaties waar door een relatief snelle stijging of daling in waterstand, instabiliteiten optreden, zie Figuur 5.43b-d voor een aantal voorbeelden.



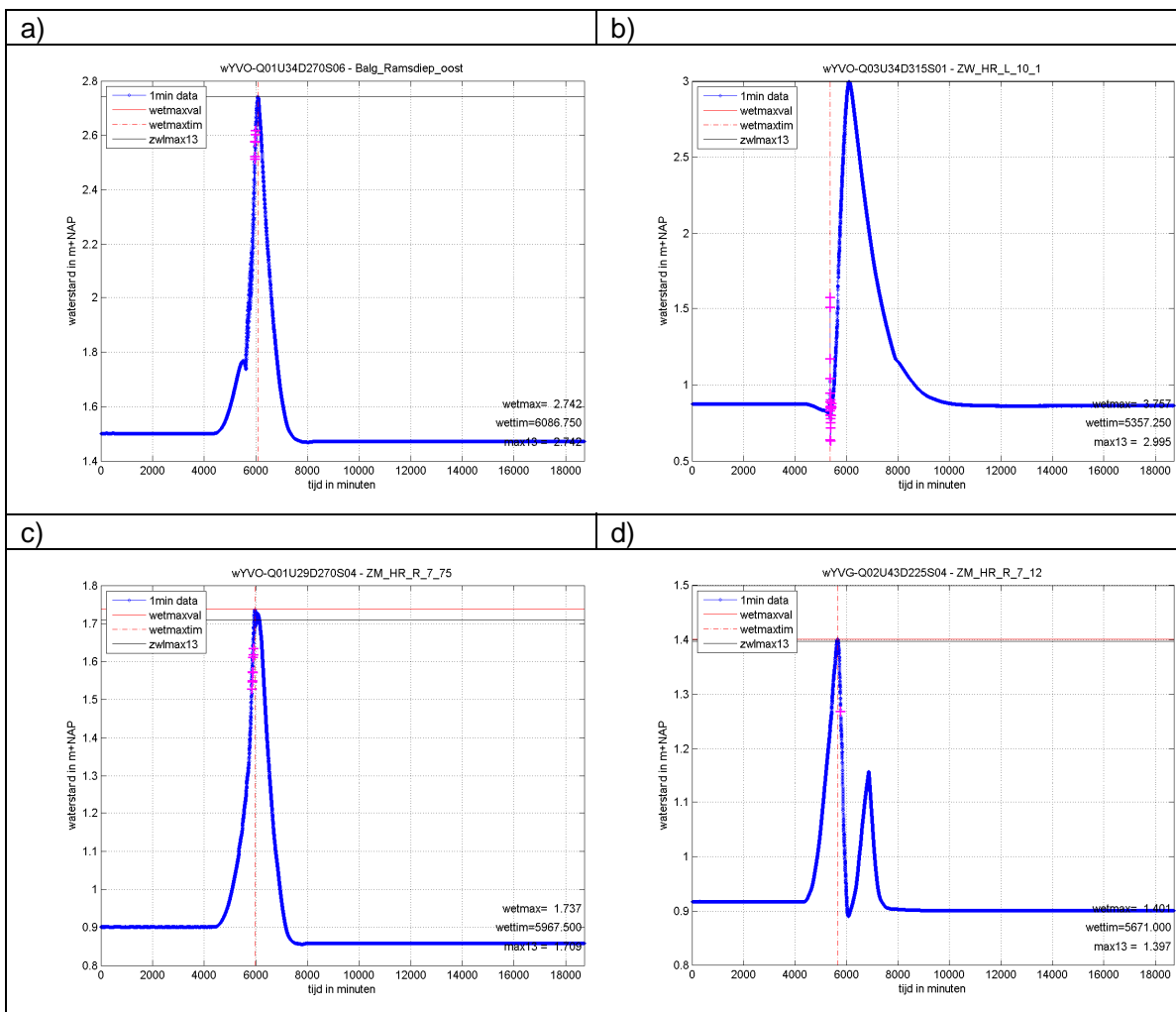
Figuur 5.41 Aantal locaties met instabiliteiten in tijdreeks als percentage van het totaal aantal berekeningen.

Locatie of dijkkring	Nummer van de locatie
Balg_Ramsdiep_oost	
Balg_Ramsgeul_oost	
Balg_Ramsgeul_west	
wl_Ramspol_beneden	
wl_Ramspol_boven	
IJ_60m_M_7	19
IJ_60m_M_8	4;7
KM_EX_12	
KM_EX_13	
OV_HR_L_53	208
YM_HR_13_153	
YM_HR_6_1	
YM_HR_6_378	
YM_HR_7_209	
YM_HR_8_10	
YM_HR_8_3	
YM_HR_8_4	
ZM_EX_2	
ZM_HR_L_10	34
ZM_HR_R_7	75;76;77;78;79;80;81;85;86;87;88;89;91
ZW_HR_L_10	1
ZW_HR_L_53	312

Tabel 5.4 Uitvoerlocaties waarbij in meer dan 5% van de berekeningen een instabiliteit optreedt rond de piekwaterstand.

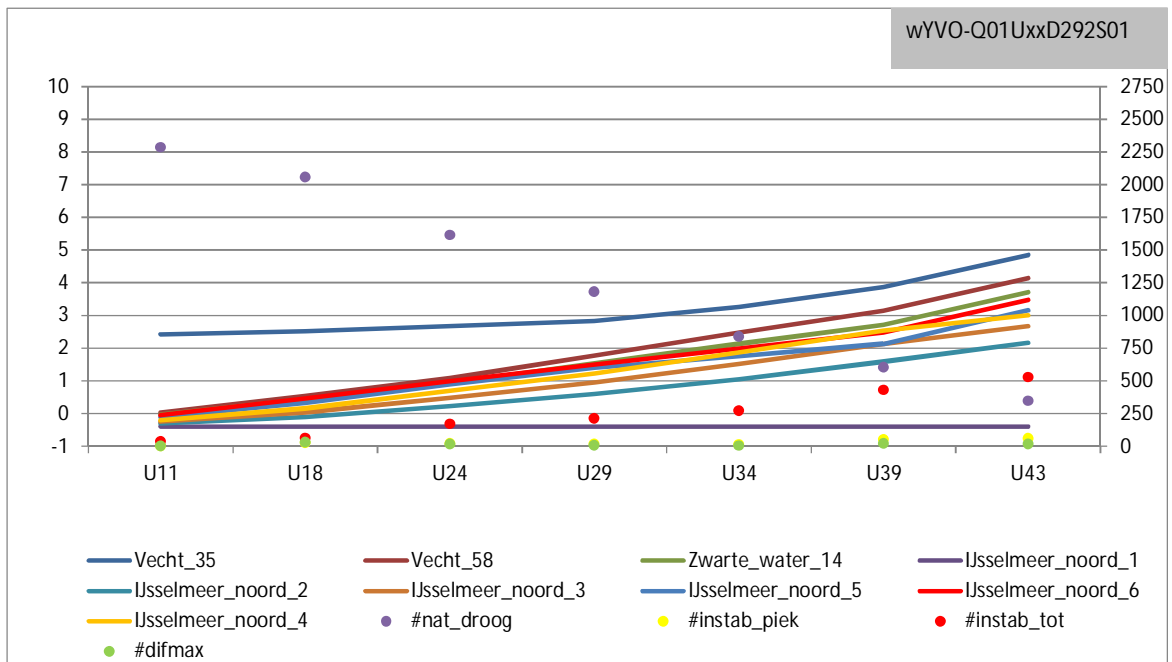


Figuur 5.42 Voorbeeld van een berekening met instabiliteiten rond de piekwaterstand: onderlopen van een locatie op het Zwarte Water.



Figuur 5.43 Aantal voorbeelden van instabiliteiten rond de piek in waterstand.

Wanneer we kijken naar patronen in het aantal punten met instabiliteiten in een tijdreeks, dan valt vooral een verband met de windsnelheid op, in combinatie met een lage rivierafvoer en laag meerpeil (Figuur 5.44). Dit komt vooral doordat er relatief weinig water in het systeem aanwezig is, waardoor eventuele instabiliteiten sterker tot uiting komen. Een toelichting op Figuur 5.44 is gegeven in Bijlage B.



Figuur 5.44 Relatief groot aantal instabiliteiten voor lage rivierafvoer en meerpeil.

6 Conclusies

In het kader van WTI2017 zijn productieberekeningen uitgevoerd voor de IJssel-Vechtdelta. De gebruikte WAQUA-modelschematisatie is 'hr2017_5-v3'. De Ramspolkering maakt onderdeel uit van de WAQUA-schematisatie en sluit bij een waterstand op het Ketelmeer groter dan 0,5 m+NAP en een stroming in oostelijke richting ter plaatse van de kering. De spuisluizen in de Afsluitdijk (Den Oever en Kornwerderzand) en de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld maken ook onderdeel uit van de schematisatie. De Bypass Kampen is gemodelleerd als een debietonttrekking op de IJssel en een waterlozing in het Vossemeer.

De Vechtafvoer is via de werklijn gecorreleerd aan de IJsselafvoer en varieert tussen 10 en 1.267 m³/s (in alle gevallen stationair). De IJsselafvoer varieert tussen 100 en 4.000 m³/s. Voor IJsselafvoeren hoger dan 2.300 m³/s is een afvoergolf gehanteerd (in verband met overstromende verbindende keringen bij het Kampereiland); deze afvoergolf volgt uit de productieberekeningen van de Bovenrivieren-Rijntakken. De initiële waterstand op het IJsselmeer, het IJsselmeerpeil, varieert tussen -0,4m+NAP en 1,5 m+NAP, en wordt door middel van een afvoeronttrekking bij Kornwerderzand en Den Oever tijdens een berekening constant gehouden. De windrichting is gevarieerd tussen ZW en N, waarbij de beschouwde maximale potentiële windsnelheid 42 m/s bedraagt. Voor de Ramspolkering zijn twee toestanden beschouwd: 'altijd open' (faalt) en sluitregime (faalt niet).

De in totaal 7800 benodigde WAQUA-berekeningen zijn uitgevoerd bij Amazon op 8-core machines. De resultaten van de berekeningen (geselecteerde "getdata"-uitvoer) zijn opgeslagen in het data-archief bij Deltares (zie Bijlage A).

Bij de berekeningen waarbij voor de Ramspolkering het sluitregime is gehanteerd, wordt bij 2849 van de 3900 berekeningen (73%) sluiting gemodelleerd. Het aantal sluitingen vertoont verwachte afhankelijkheden van de verschillende stochasten. Het aantal sluitingen neemt toe met een toenemende rivierafvoer, met uitzondering van extreme afvoeren, omdat de afvoer dan niet richting de Vecht is. Verder neemt het aantal sluitingen toe bij een toenemend meerpeil en zijn de meeste sluitingen bij harde wind uit windrichtingen W-NW (D270-D315), richtingen waarbij het water richting de Ramspolkering wordt gestuwd. Door de IJsselafvoer juist vóór en juist ná het onttrekkingspunt van de afvoer te vergelijken, is geconcludeerd dat de Bypass Kampen correct in het WAQUA-model is opgenomen. De hoogwatergeul Veessen-Wapenveld gaat meestromen vanaf Q05 (Lobithafvoer 12.215 m³/s, IJsselafvoer 1.850 m³/s). Bij deze afvoer gaat ongeveer 1/5 van de IJsselafvoer door de hoogwatergeul, wat leidt tot een waterstandsaling in de IJssel van ongeveer 40 cm; dit lijkt realistisch, aangezien deze afvoer nog niet MHW is. De afvoeronttrekkingen in de Afsluitdijk bij Kornwerderzand en Den Oever zijn zo ingesteld dat tijdens een berekening het gemiddelde IJsselmeerpeil (i.e., het volume water in het systeem) constant blijft. In situaties met extreme wind uit noordelijke richting is de afwaaiing bij de Afsluitdijk zo groot dat de uitstroomband kan droogvallen. De in het model opgelegde afvoeronttrekking kan dan niet onttrokken worden met als gevolg dat er water in het systeem achterblijft en de volumebalans niet meer klopt. Een gecumuleerd onttrekkingstekort van meer dan 10.000 m³/s treedt op voor 307 van de 3900 berekeningen met sluitregime Ramspolkering, bij windsnelheden van 34 m/s en hoger en dan vooral voor lage meerpeilen en wind uit noordelijke richting. In de meest extreme situatie (Q13U43D292S01) leidt dit tot een maximale stijging van het waterpeil op het IJsselmeer met 6 cm tot -0,34 m+NAP (initiële conditie bedraagt -0,40 m+NAP). Als gevolg hiervan zullen de berekende waterstanden te hoog worden uitgerekend. Vanwege de

extreme windcondities waarbij dit verschijnsel optreedt is er geen significante invloed op de berekende toetspeilen.

De modeluitkomsten zijn gecontroleerd op te verwachten fysische patronen en onrealistische schommelingen in waterstanden. Het verloop van waterstanden (op basis van max13) is visueel gecontroleerd voor de Vecht/Zwarte Water en de IJssel. Daarnaast is de waterstand op het IJsselmeer op een aantal punten gecontroleerd.

Het aantal droge punten neemt af bij toenemende afvoer en/of meerpeil. Bovenstrooms op de Vecht is de waterstand vrijwel onafhankelijk van het meerpeil; meer benedenstrooms is er wel een afhankelijkheid. Bij lage afvoer (Q_{02} , $100 \text{ m}^3/\text{s}$ op de Vecht) wordt de waterstand bovenstrooms op de Vecht (rkm 35) beïnvloed door het IJsselmeerpeil, omdat de Ramspolkering niet sluit. Tot en met een Vechtafvoer van $100 \text{ m}^3/\text{s}$ is de invloed van de stuwen op de Vecht zichtbaar. De waterstanden op het IJsselmeer zijn conform de ingestelde meerpeilen. Bij toenemende windsnelheid en/of meerpeil neemt de waterstand op de IJssel toe; bij extreme windsnelheden en groot meerpeil zijn de effecten nog merkbaar bij Olst (rkm 957).

Voor alle uitvoerlocaties is gecontroleerd of er grote afwijkingen zijn tussen de 'max13' en de maximale waterstand op tijdstapniveau, omdat dit kan duiden op onrealistisch/niet fysisch modelgedrag (het gehanteerde criterium is een toegestaan verschil van 3 cm). Daarnaast is gecontroleerd of de waterstand tussen twee tijdstappen niet te snel verandert (het toegestane verschil is 4 cm per 1 minuut). Wanneer 1 van de criteria wordt overschreden, is sprake van een afgekeurde locatie.

Ten opzichte van de WT12017-productieberekeningen voor de Bovenrivieren worden relatief veel locaties afgekeurd. Bij grote windsnelheden is er een relatief groot aantal uitvoerpunten met instabiliteiten rond de piek doordat bij sterke wind veel locaties te maken krijgen met droogval en hieraan gerelateerde numerieke droogval-effecten. Dit is vooral merkbaar in combinatie met een lage rivierafvoer en laag meerpeil omdat er dan relatief weinig water in het systeem aanwezig is, waardoor eventuele instabiliteiten sterker tot uiting komen. Instabiliteiten rond de Ramspolkering treden vooral op in geopende toestand. Zelfs in een open toestand is de kering (als barriërs) aanwezig in het WAQUA-model en heeft de kering een invloed op het stroombeeld. Deze invloed is een verstoring van het stroombeeld en hiermee inherent destabiliserend. Op de rechteroever van de IJssel ligt een verbindende kering van het Kampereiland. Deze kering heeft een hoogte van circa 3 m+NAP. Wanneer deze kering tijdens een berekening overstroomt, treden relatief veel instabiliteiten op.

Ondanks dat er een groot aantal uitvoerlocaties wordt afgekeurd, zijn fysisch te verwachten patronen gevonden in het verloop van gemodelleerde waterstanden als functie van de verschillende stochasten. Daarnaast functioneren de Ramspolkering, de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld, de Bypass Kampen en de spuisluisen in de Afsluitdijk conform verwachting. Dit leidt tot de conclusie dat de berekeningen betrouwbaar zijn en gebruikt kunnen worden voor het vullen van de relationale databases. Daarbij is het van wezenlijk belang om de afgekeurde locaties nader te onderzoeken: zijn deze locaties bruikbaar in de database? In deze studie is afkeur van locaties gebaseerd op tijdreeksen van waterstanden. 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. Anderzijds kan aanpassing van de criteria door meer fysica in beschouwing te nemen (bijvoorbeeld het momentum op een bepaalde locatie) betekenen dat er nog meer locaties worden afgekeurd. Deze stappen vallen

buiten de scope van dit project maar wel binnen de scope van WT12017. Dit aspect zal meegenomen worden bij de probabilistische berekeningen.

7 Referenties

Bak, C.I. en D.P. Vlag (1999), 'Achtergronden hydraulische belastingen dijken IJsselmeergebied, deelrapport 5, Modellerings waterbeweging (WAQUA)', RIZA rapport 99.042.

Becker, A. & van der Mheen, M. (2015). Modelschematisaties IJsselmeer-Vecht-IJsseldelta. B&O-model 2014 en WTI2017-model. Deltares rapport 1209449-007-ZWS-0004, versie 2, maart 2015, definitief.

Beyer, D. (2014). Advies onttrekking inlaat Reevediep afvoergolven. RWS 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 produktieberekeningen WTI2017. Aanvulling op uitgangspunten vastgesteld in 2013. Deltares rapport 1209433-001-HYE-0005. A.J. Smale, juli 2014.

Deltares (2014b). Samenvatting bevindingen tresetberekeningen IJVD. Deltares memo 1209433-002-HYE-0003. A.J. Smale, 14 oktober 2014.

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.

Geerse, C.P.M. (2006). Hydraulische randvoorwaarden 2006 Vecht- en IJsseldelta. Statistiek IJsselmeerpeil, afvoeren en stormverlopen voor Hydra-VIJ. RIZA – werkdocument 2006.036x. maart 2006.

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

Klopstra, D., Meijer, D.G., Termes, A.P.P. (1999). Berekeningen waterstanden Sallandse Weteringen. HKV rapport PR153, januari 1999.

RHDHV (2014). Testberekeningen t.b.v. productieberekeningen WTI 2017 Benedenrivieren. RDCHM_BD3957_R20141204_NL27708_f1.0. Versie 1.0. December 2014.

Sprengers, C. (2010), Productierandvoorwaarden IJsselmeer, Vecht- en IJsseldelta, memorandum Deltares, 3 november 2010.

Van der Mheen, M. (2014). 5de generatie IJVD WAQUA model. Bouw, kalibratie en verificatie. Deltares rapport 1209449-007-ZWS-0005, versie 6, september 2014, definitief.

Vuik, V., Collard, E., Rotsaert, M. & Vieira da Silva, J. (2011). WAQUA-productieberekeningen IJsselmeer en Vecht- en IJsseldelta voor WTI-2011: rapportage fase 1. HKV rapport PR1878.10, september 2011.

Waal, J.P. de (2003), Windmodellering voor bepaling waterstanden en golven. Een analyse van de bouwstenen, RIZA-werkdocument 2003.118x, Rijkswaterstaat-RIZA.

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]\2.IJVD\

- 1.Gebiedsschematisaties\
- 2.Initiele_velden_en_randvoorwaarden\1.Waterstanden\
- 3.Generatie_produktiesommen\1.Waterstanden\
- 4.Uitvoeren_produktiesommen\1.Waterstanden\
- 5.Controle_produktiesommen\1.Waterstanden\

De post-processing en analyse van de productieberekeningen (onderdeel 5.Controle_produktiesommen) heeft vele tienduizenden 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]\2.IJVD\5.Controle_produktiesommen\1.Waterstanden\ (verwerkte data)	
output_bewerkt\	<p>sill_Ramspol_controle_PROD.xlsx aantal keer tekenwissel Ramspolkering, waaruit kan worden afgeleid hoeveel keer de Ramspolkering tijdens een berekening in werking is gesteld.</p> <p>Bewerkte data als matfiles: (1) droog_nat__controle_PROD_wti2017.mat (2) instab_tijdreeks_Instab_piek120_controle_PROD_wti2017.mat (3) verschil_max13_sepmax_le-0.03_controle_PROD_wti2017.mat Deze matfiles bevatten per berekening generieke informatie over droogval, instabiliteiten rond de piek en het verschil tussen max13 en sepmax (zie ook volgende punt en readme in de genoemde map). De stations staan opgeslagen in 'statnm'.</p> <p>max13zwl_IJVD_20151120.xlsm Deze Excelfile bevat per berekeningde 'max13'-waterstanden over 2 trajecten en een aantal punten op het IJsselmeer. In de tabel zijn macro's opgenomen om met het tabblad 'figuren' per gekozen variabele figuren te maken waarmee de consistentie van de berekeningen gecontroleerd kan worden.</p> <p>IJVD_FysContr_overzicht.xlsx Deze Excelfile bevat per berekening informatie over het aantal droge punten, het aantal punten met instabiliteiten in de tijdreeks en het aantal punten met locaties waarbij de 'max13' sterk afwijkt van de maximale waterstand 'sepmax'.</p>
output_timeseries\	Folder waarin data van tijdreeksen wordt weggeschreven, met het script IJVD_FysContr_getdata_somid_func.m, zie onder deze tabel voor details.
[DATA-ARCHIEF]\2.IJVD\5.Controle_produktiesommen\1.Waterstanden_YVG\ (figuren)	
[DATA-ARCHIEF]\2.IJVD\5.Controle_produktiesommen\1.Waterstanden_YVO\ (figuren)	
output_figuren_2Dplots_png\	2D figuren voor droogval, analyse instabiliteiten en verschillen

	tussen 'max13' en 'sepmax'. Ook van gradiënten in waterstanden (in dit rapport niet besproken) zijn hier figuren te vinden.
output_figuren_max13_png\ output_figuren_benedenrand_png\ output_figuren_kunstwerken_png\ output_figuren_tijdreeks\ 	1D figuren met maximale waterstanden en afvoeren over 2 trajecten. Op de benedenranden bij de Afsluitdijk wordt water onttrokken aan het model. In deze folder staan figuren van de ingevoerde en berekende afvoer bij Den Oever en Kornwerderzand, wanneer hier, cumulatief, meer dan 10,000 m ³ /s verschil tussen zit (paragraaf 5.5.5). Figuren van tijdsverlopen bij een aantal kunstwerken in het IJVD-model (zie paragraaf 5.5.1 t/m 5.5.3). Figuren van tijdreeksen waarbij aan bepaalde controlecriteria is voldaan, i.e. locaties met instabiliteiten of grote afwijkingen tussen 'max13' en 'sepmax'.

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

Er is een script gemaakt waarmee tijdreeksen van uitvoerlocaties kunnen worden uitgelezen in een Matlab-struct vanuit het data-archief. Tevens wordt de data weggeschreven naar een voor-gedefinieerde Excel-file waarin een figuur van de tijdreeks voor de gevraagde locatie wordt getoond. Het script kan hier gevonden worden:

[DATA-ARCHIEF]\2.IJVD\5.Controle_produktiesommen\1.Waterstanden\
IJVD_FysContr_getdata_[var]_somid_func.m

waarbij [var] zwl (waterstand) of ctrv (afvoer) kan zijn. Aanroep vanuit linux (start putty, ga naar directory waar de berekening staat, type '/opt/matlab/2013a/bin/matlab' en start, voor voorliggend geval, onderstaande commando):

outdta = IJVD_FysContr_getdata_[var]_somid_func(somid, domain, locid, username, write_xls)
waarbij:

- somid = stochastcombinatie, bijvoorbeeld 'Q01U43D292S06'
- locid = naam van de locatie, bijvoorbeeld '35_VE'
- username = username voor inloggen in het data-archief
- write_xls = wel/niet wegschrijven naar xls (filename in .m file opgeven, in ons geval: \output_timeseries\timeseries_out.xlsx)

De Excelfile bevat ook informatie of de cel droog is, en/of instabiele punten bevat. Ook het aantal keer dat de balgstuw van teken wisselt (zie paragraaf 5.5.1) is opgenomen. Tevens is de max13 bepaald (op een iets afwijkende wijze van WAQUA, om ook een 'max13' te kunnen bepalen wanneer het maximum zich aan het begin of einde van een reeks bevindt).

Aanroep van de functie is bijvoorbeeld:

IJVD_FysContr_getdata_zwl_somid_func('Q01U43D292S06','35_VE','paarlber','y')

B Toelichting consistentiechecks

Om het grote aantal berekeningen (7800 voor IJVD, ongeveer 9000 voor RMM) snel op hoofdlijnen te kunnen beoordelen is een ‘fysische controle’ opgezet. Het principe achter de fysische controle is dat bij een veranderende stochast (bijvoorbeeld rivierafvoer, meer- of zeepeil, windkracht) een consistent beeld moet optreden in de berekende waterstanden op enkele vooraf gedefinieerde locaties.

B.1 Gehanteerde locaties

In het IJVD-model zijn hiervoor twee controleraaien gedefinieerd, een zuidelijke raai die door de IJssel en langs de westelijke rand van het IJsselmeer richting Den Oever loopt (acht controlepunten) en een noordelijke raai die door de Vecht, het Zwarte Water en langs de oostelijke rand van het IJsselmeer richting Kornwerderzand (negen controlepunten).

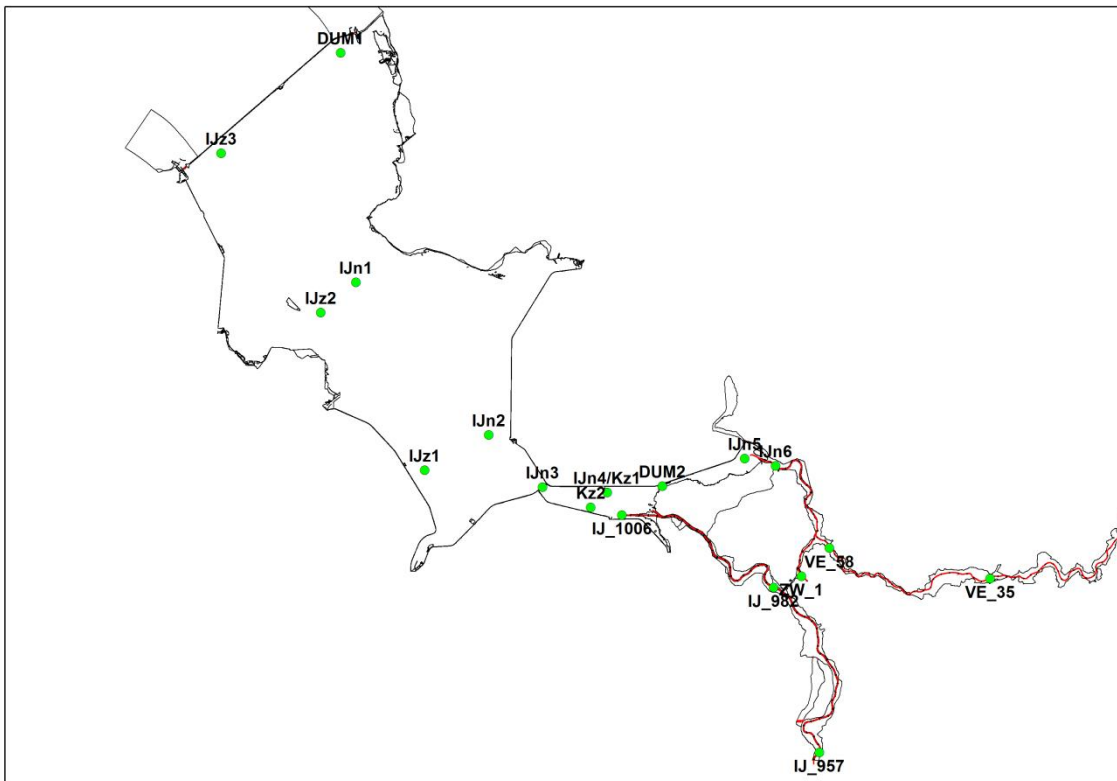
Voor de delen van het IJVD-model waar geen rivierassen en bijbehorende rivierkilometerpunten zijn gedefinieerd, zijn “handmatig” waarden toegevoegd op basis van de ruimtelijke velden van de maximale waterstand (‘sepmax’). Dit gaat om de locaties gegeven in Tabel B.1. In Figuur B.1 zijn de controlepunten weergegeven. De volgende twee “trajecten” zijn met deze punten gedefinieerd:

- Vanaf de IJssel: Kz1, Kz2, IJz1, IJz2, IJz3
- Vanaf de Vecht: IJn6, IJn5, IJn4 (=Kz1), IJn3, IJn2, IJn1

Locaties IJsselmeer_noord_5/6 (IJn5/6) liggen dus in het Zwarte Water en Zwarte Meer. De punten IJn1-3 en IJz1-3 liggen in het IJsselmeer.

m	n	naam	beschrijving	Figuren deze paragraaf	Afgekort
298	3306	EX_298_3306	Brug_A6	IJsselmeer_noord_3	IJn3
280	3400	EX_280_3400	IJsselmeer_oost_1	IJsselmeer_noord_2	IJn2
270	3540	EX_270_3540	IJsselmeer_oost_2	IJsselmeer_noord_1	IJn1
330	3660	EX_330_3660	IJsselmeer_oost_3		DUM1
240	3400	EX_240_3400	IJsselmeer_west_1	IJsselmeer_zuid_1	IJz1
250	3540	EX_250_3540	IJsselmeer_west_2	IJsselmeer_zuid_2	IJz2
250	3660	EX_250_3660	IJsselmeer_west_3	IJsselmeer_zuid_3	IJz3
306	3205	EX_306_3205	Keteloog_noord	IJsselmeer_noord_4/ Ketelmeer_zuid-1	IJn4/Kz1
232	3235	EX_232_3235	Keteloog_zuid	Ketelmeer_zuid-2	Kz2
388	2758	EX_388_2758	Vanaf_de_Vecht_1	IJsselmeer_noord_6	IJn6
392	2860	EX_392_2860	Vanaf_de_Vecht_2	IJsselmeer_noord_5	IJn5
331	3037	EX_331_3037	Vanaf_de_Vecht_3		DUM2

Tabel B.1 Locaties extra waterstandspunten IJVD waar geen rivieraslocaties beschikbaar zijn.



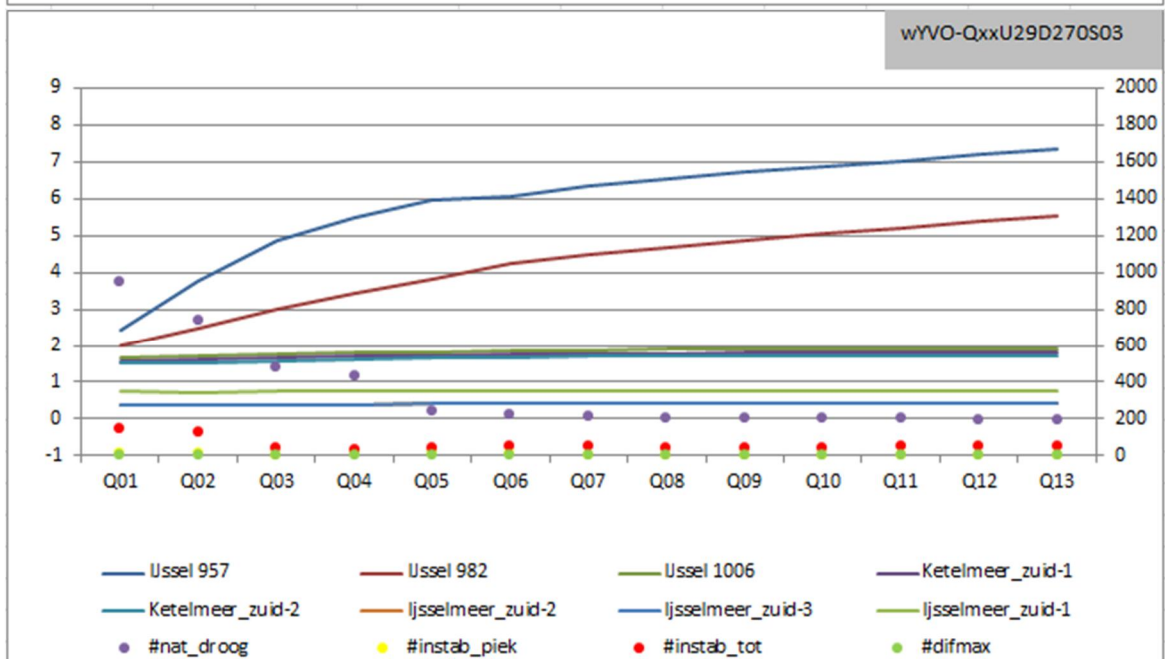
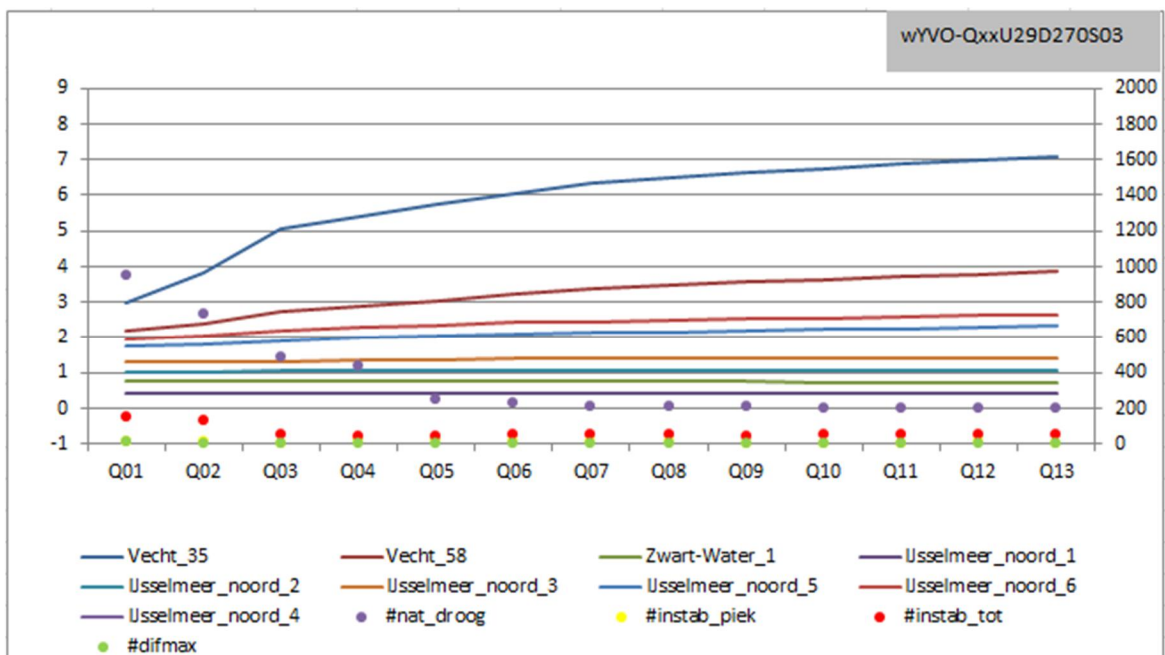
Figuur B.1 Locaties extra waterstandspunten IJVD waar geen rivieraslocaties beschikbaar zijn.

B.2 Spreadsheet

Voor de beoordeling van de consistentie is een spreadsheet gemaakt (zie Bijlage A voor de locatie in het data-archief). Deze spreadsheet bevat voor de gedefinieerde controlepunten de maximale waterstanden van alle berekeningen, tezamen met de aantallen droge punten en instabiele punten. Iedere berekening is een combinatie van de volgende vijf stochasten: rivierafvoer, meerpeil, windkracht, windrichting en de toestand keringen. De gebruiker kan aangeven welke stochast(en) vast zijn; de resterende stochast(en) zijn dan variabel en laten dan alle mogelijke waarden zien. De mogelijke stochastwaarden zijn opgenomen in Tabel 3.1. De onderstaande figuren tonen de fysische controle voor verschillende stochasten.

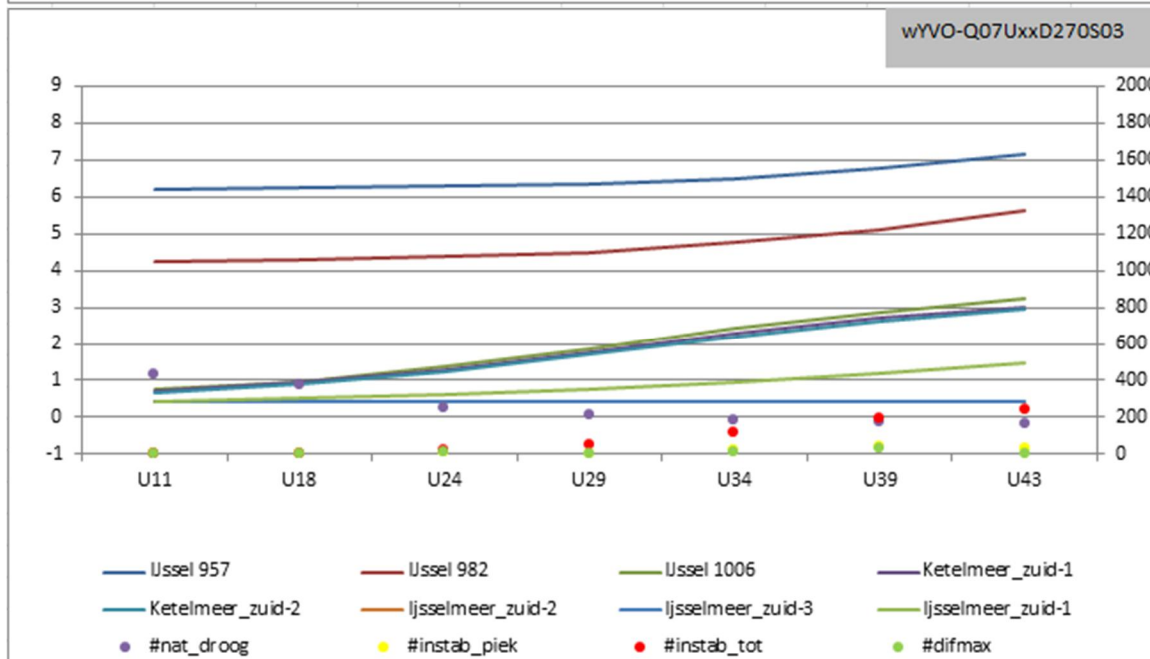
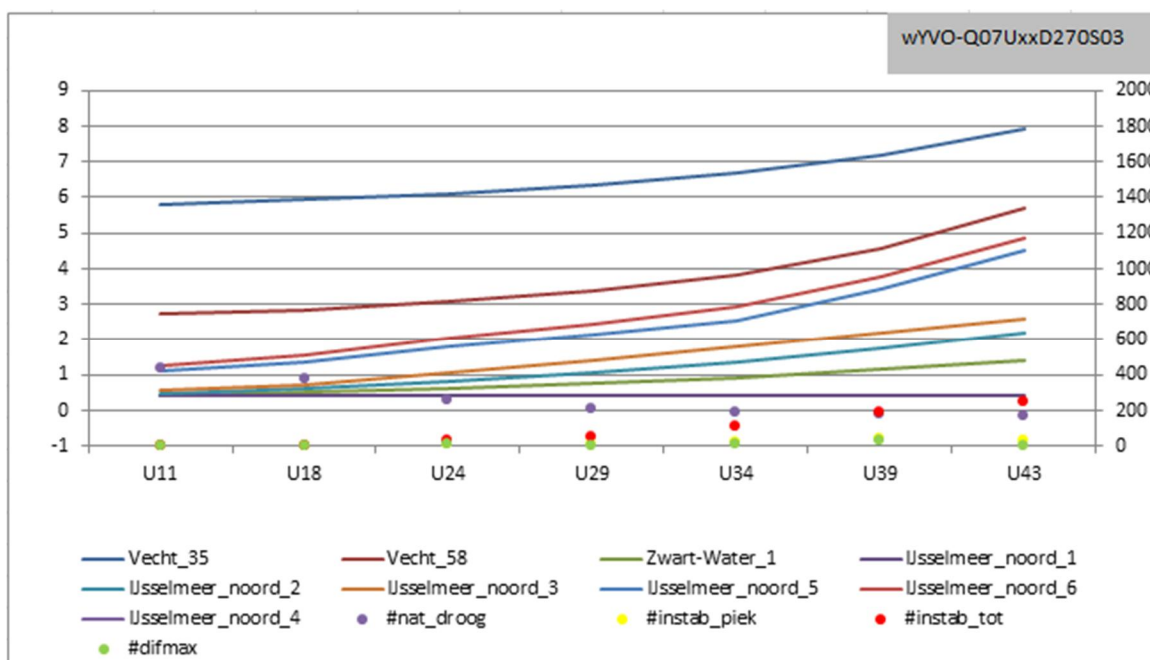
B.2.1 Afvoer

Bij een gekozen combinatie van windkracht, windrichting, meerpeil en keringen krijgt de gebruiker als functie van de stochast rivierafvoer de maximale waterstanden te zien, zie de onderstaande figuren. Deze figuren laten zien dat bij een toenemende rivierafvoer (de horizontale as) de berekende waterstanden hoger worden (de getrokken lijnen). Verder is goed zichtbaar dat het aantal droge punten afneemt met toenemende rivierafvoer. De figuren tonen dus een consistent beeld met betrekking tot de afvoer.



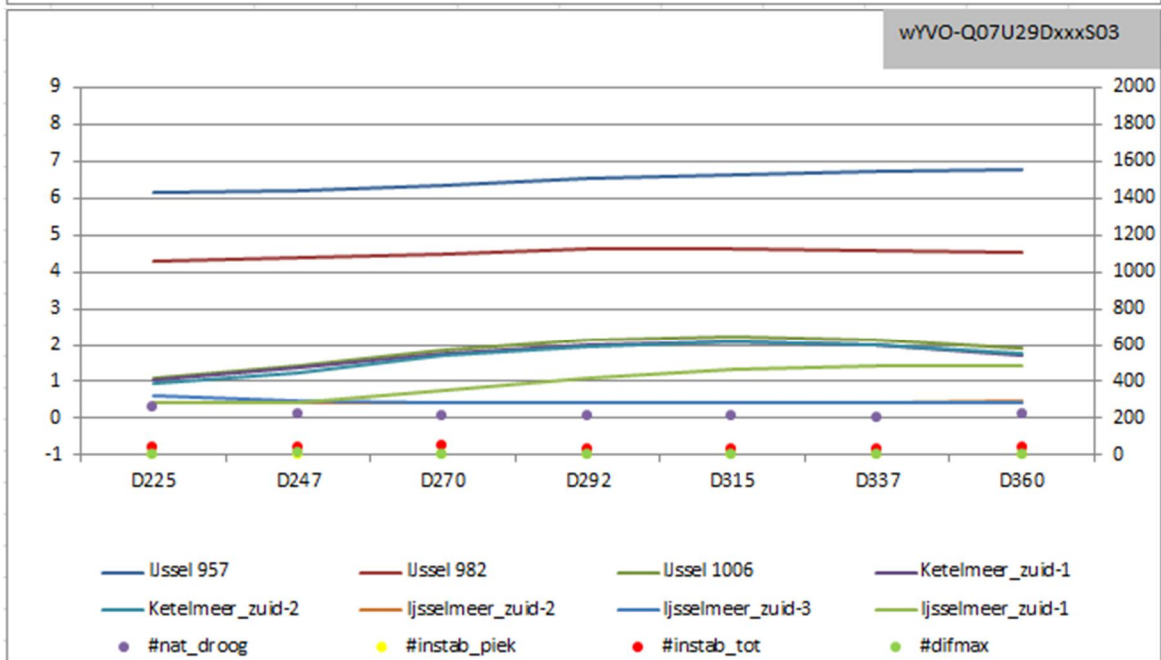
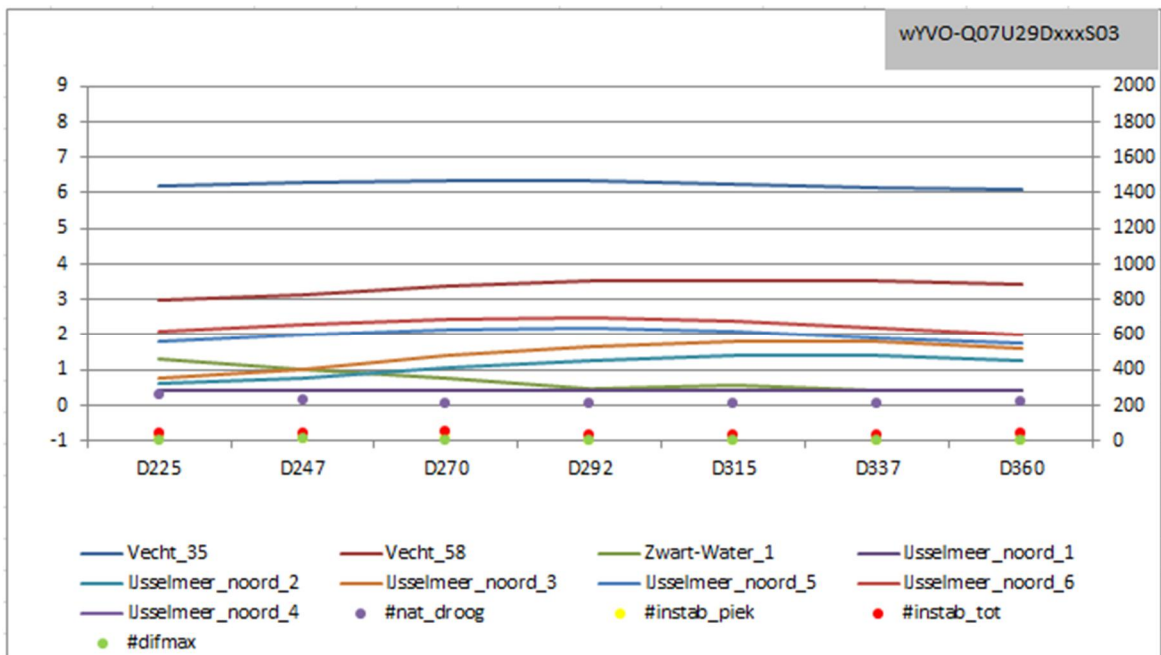
B.2.2 Windsnelheid

Bij een gekozen combinatie van rivierafvoer, windrichting, meerpeil en keringen krijgt de gebruiker als functie van de stochast windsnelheid de maximale waterstanden te zien, zie de onderstaande figuren. Deze figuren laten zien dat bij een toenemende windsnelheid (de horizontale as) de berekende waterstanden hoger worden (de getrokken lijnen). Verder is goed zichtbaar dat het aantal droge punten beperkt afneemt met toenemende windsnelheid (en dus hogere waterstanden). De grootste invloed is in dit voorbeeld zichtbaar aan zuidzijde van het IJsselmeer (punten IJsselmeer_noord_5 en IJsselmeer_noord_6). De figuren tonen dus een consistent beeld met betrekking tot de windsnelheid.



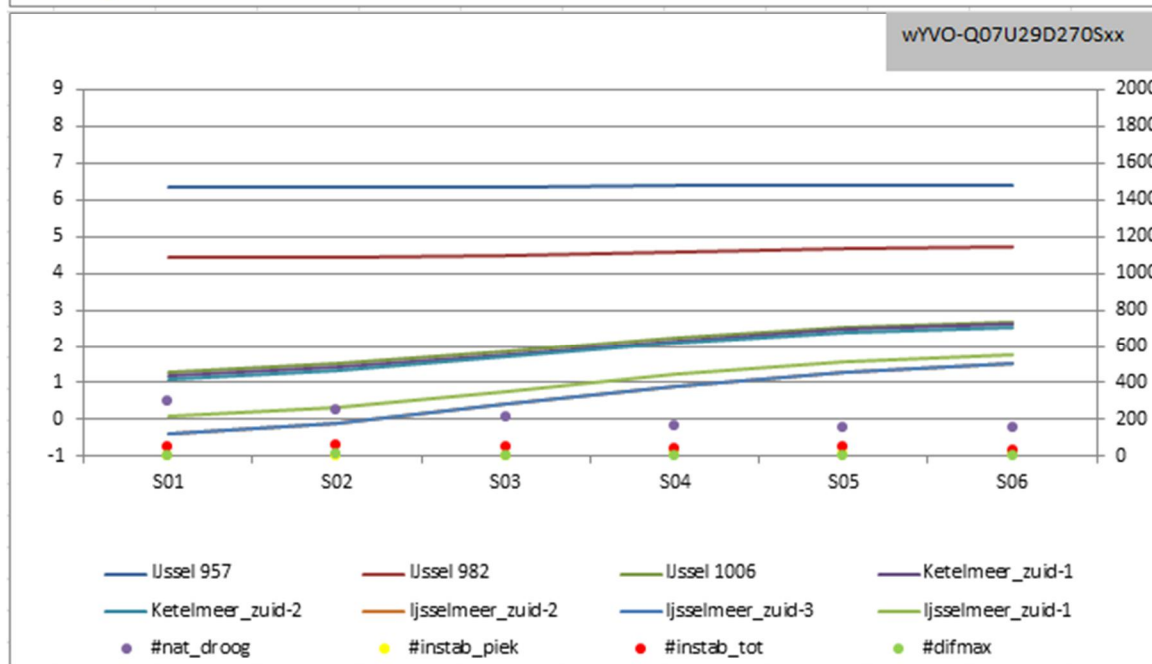
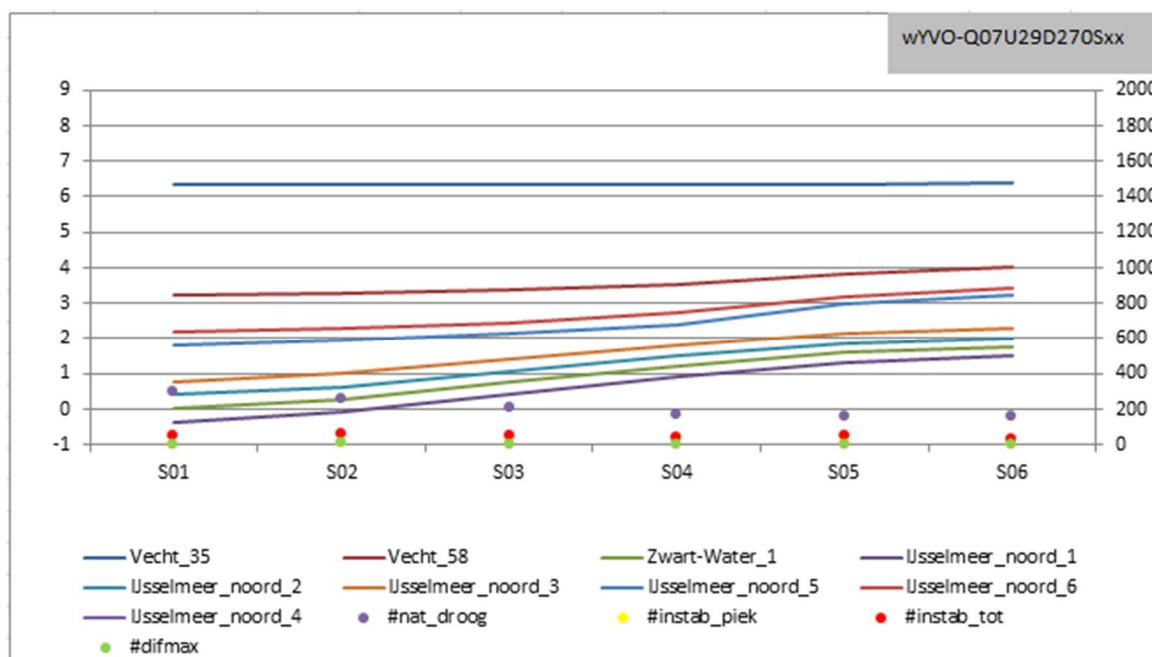
B.2.3 Windrichting

Bij een gekozen combinatie van rivierafvoer, windkracht, meerpeil en keringen krijgt de gebruiker als functie van de stochast windrichting de maximale waterstanden te zien, zie de onderstaande figuren. Deze figuren laten zien hoe bij een draaiende windrichting (de horizontale as) de berekende waterstanden worden beïnvloed (de getrokken lijnen). Om deze figuren goed te kunnen duiden is gekeken waar de gebruikte controlepunten daadwerkelijk in het model liggen en op welke wijze deze punten worden beïnvloed door de wind. Uit deze beoordeling is geconstateerd dat hier sprake is van een consistent beeld.



B.2.4 Meerpeil

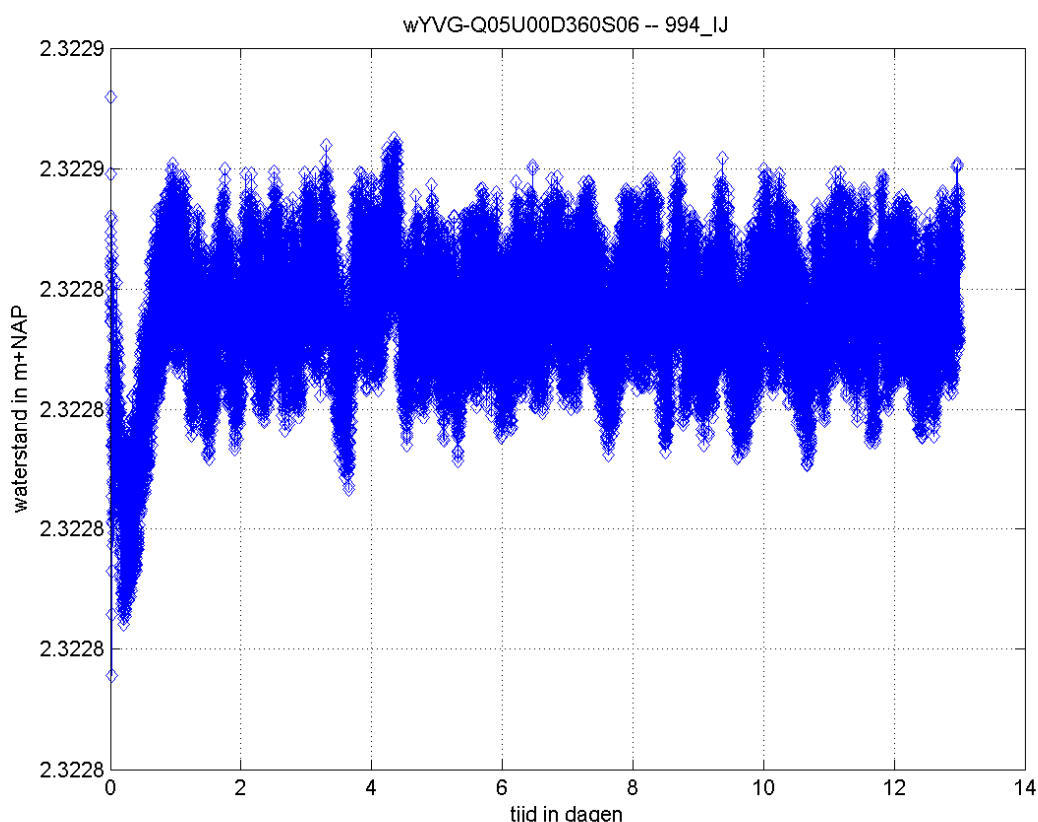
Bij een gekozen combinatie van rivierafvoer, windkracht, windrichting en keringen krijgt de gebruiker als functie van de stochast meerpeil de maximale waterstanden te zien, zie de onderstaande figuren. Deze figuren laten zien hoe bij een stijgend meerpeil (de horizontale as) de berekende waterstanden worden beïnvloed (de getrokken lijnen). Goed zichtbaar is dat de bovenstroomse controlepunten op de Vecht (linker plaatje) en IJssel (rechter plaatje) nauwelijks tot niet worden beïnvloed door een verandering in het meerpeil. Hoe dichterbij de monding van de rivier in het IJsselmeer, hoe groter de invloed van het meerpeil.



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 1 minuut. Wanneer het maximum zich direct aan het einde of begin van de tijdreeks bevindt, wordt geen max13 bepaald, omdat dit mogelijk duidt op een onrealistische waarde. 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 nan's worden gepresenteerd.

Let op, soms is max13 "NaN" bij U00 door "instabiliteiten, zie onderstaande figuur voor een voorbeeld (let op schaal Y-as).



Figuur C.1 "Instabiliteit" op IJssel die leidt tot een ongedefinieerde max13-waarde ("NaN").

D Implementatie afleiding randvoorwaarden in Matlab

De afleiding van de randvoorwaarden is geïmplementeerd in Matlab. Hierbij is gewerkt vanuit:

[DATA-ARCHIEF]\2.IJVD\
2.Initiele_velden_en_randvoorwaarden\1.Waterstanden\3.Genereren_rvw\
2.Initiele_velden_en_randvoorwaarden\1.Waterstanden\3.Genereren_rvw\
2.Initiele_velden_en_randvoorwaarden\1.Waterstanden\3.Genereren_rvw\
2.Initiele_velden_en_randvoorwaarden\1.Waterstanden\3.Genereren_rvw\

Alle data zijn verzameld in de volgende Excel-file:

\20150320_data\Relatie_IJssel_Vecht.xlsx

Het gaat hier bijvoorbeeld om de correlatie tussen de IJssel en Vechtafvoer, afvoerverlopen uit de Rijntakken-berekeningen (afgeleid uit Deltares, 2016a) en de lateralen.

Het afleiden van de initiële condities en randvoorwaarden verloopt in een aantal stappen. Deze stappen zijn verwerkt in de volgende Matlabscripts.

Stap 1.

IJVD_mmaak_rvw.m (qh-optie)

Voor het afleiden van randvoorwaarden voor qh-berekeningen, Bypass onttrekking op 0.

Resultaat in \20150320_randvw_flow_qh

Stap 2.

Aanmaken van randvoorwaardenfiles voor Kornwerderzand en Den Oever op basis van qh-berekeningen (72 files voor 36 berekeningen) met:

IJVD_mmaak_rvw_qq_rand.m

Resultaat in \20150322_randvw_flow_qq_voor_initieel_berekeningen

Stap 3.

Als laatste stap zijn de randvoorwaarden voor de productieberekeningen gemaakt.

IJVD_mmaak_rvw.m (qq-optie)

Hier zijn ook de afvoergolven relevant.

Het resultaat is te vinden in

\20150324_randvw_flow_qq_voor_prod_sommen