

Het effect van negatieve systeemwerking op afvoeren en waterstanden op de Maas

Verkenning voor dijkkring 41, het Land van Maas en Waal



Het effect van negatieve systeemwerking op afvoeren en waterstanden op de Maas
Verkenning voor dijkkring 41, het Land van Maas en Waal

Auteur(s)

Anna Kusters

Karin de Bruijn

Het effect van negatieve systeemwerking op afvoeren en waterstanden op de Maas

Verkenning voor dijkkring 41, het Land van Maas en Waal


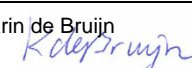
Opdrachtgever	WVL
Contactpersoon	David Kroekenstoel
Referenties	
Trefwoorden	Negatieve systeemwerking, dijkkring 41, hydraulische belasting Maas

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	22-09-2020
Projectnummer	11203684-003
Document ID	11203684-003-ZWS-0008
Pagina's	60
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Anna Kusters	
	Karin de Bruijn	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Anna Kusters	Nathalie Asselman NA	Gerard Blom 	
	Karin de Bruijn 			

Samenvatting

De waterkeringen langs de grote rivieren worden periodiek getoetst aan de normen voor hoogwaterveiligheid. Voor deze beoordeling wordt als invoer onder andere de belasting op de keringen gebruikt welke gegeven wordt als een kansverdeling van waterstanden en golfhoogtes. De waterstanden op de Maas kunnen worden beïnvloed door doorbraken langs de Waal. Omdat de hoogwaterstanden op de Waal zo'n 3m hoger zijn dan op de Maas, kan er in geval van een doorbraak aan de zuidkant van de water vanuit de Waal via de overstroomde dijkkring naar de Maas stromen. We noemen dit domino-effect negatieve systeemwerking. In dit rapport wordt verkend of deze negatieve systeemwerking van de Waal naar de Maas, relevant kan zijn voor de belasting op de waterkeringen langs de Maas. In dit rapport worden hiervoor analyses gedaan van doorbraken in de Waaldijk langs het land van Maas en Waal en worden de resulterende effecten op de afvoer en waterstanden in de Maas berekend.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doel	7
1.3	Aanpak op hoofdlijnen	7
1.4	Leeswijzer	8
2	Aanpak simulaties dijkkring 41	9
2.1	Situatiebeschrijving	9
2.2	Scenario's en varianten	9
2.2.1	Basisscenario's	10
2.2.2	Varianten	10
2.3	SOBEK-model	12
2.4	Rand- en beginvoorwaarden voor het basisscenario	13
2.4.1	Waal	13
2.4.2	Maas	13
2.5	Simulatie van bresgroei in het basisscenario	15
2.6	Validatie	16
2.6.1	Waal	16
2.6.2	Maas	17
3	Resultaten	18
3.1	Basisscenario	19
3.1.1	Met overloop Maasdijk	19
3.1.2	Met bres in Maasdijk	22
3.2	Variant 1 – Bres bij Dreumel	24
3.2.1	Met overloop Maasdijk	24
3.2.2	Met bres bij Maasdijk	25
3.3	Variant 2 – Worst case timing	27
3.3.1	Met overloop Maasdijk	28
3.3.2	Met bres bij Maasdijk	29
3.4	Variant 3 – Hogere afvoer Waal	31
3.4.1	Met overloop Maasdijk	32
3.4.2	Met bres bij Maasdijk	35
3.5	Variant 4 – Hogere afvoer Waal, bres Waal voor piekafvoer	37
3.5.1	Met overloop Maasdijk	37
3.5.2	Met bres bij Maasdijk	40
3.6	Variant 5 – Kleinere bres (minder snelle bresgroei)	42
3.6.1	Met overloop Maasdijk	42
3.6.2	Met bres bij Maasdijk	45

3.7	Overzicht resultaten	47
4	Discussie	49
4.1	Discussie over de aannames en uitkomsten van de simulaties	49
4.2	Potentiële implicaties voor de hydraulische belastingen	50
5	Conclusies en aanbevelingen	54
5.1	Conclusies	54
5.2	Aanbevelingen	55
6	Bibliografie	57
A	Qh-relaties	58

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Binnen het hoogwaterbeschermingsprogramma van Rijkswaterstaat en de waterschappen worden alle primaire waterkeringen in Nederland periodiek getoetst aan de gestelde normen voor hoogwaterveiligheid. Uit deze toetsrondes volgt voor welke keringen versterking nodig is. Dit wordt ook wel de dijkversterkingsopgave genoemd.

In de bepaling van de dijkversterkingsopgave van waterkeringen langs de bovenrivieren wordt onder andere de kansdichtheidsfunctie van de waterstanden gebruikt. De cumulatieve kansdichtheidsfunctie geeft voor de hele range van mogelijke waterstanden de overschrijdingskans van die waterstand. In deze kansverdeling is echter geen rekening gehouden met de mogelijke gevolgen van een dijkdoorbraak op waterstanden elders. Benedenstrooms van een dijkdoorbraak kan de belasting afnemen, doordat een deel van de afvoer wegstroomt naar de naastgelegen dijkkring. Dit effect wordt positieve systeemwerking genoemd. Een verhoging van de hydraulische belasting kan optreden wanneer door een dijkdoorbraak water van de ene rivier of riviertak in een andere riviertak stroomt en de afvoer op de ontvangende riviertak vergroot. Dit wordt negatieve systeemwerking genoemd.

Negatieve systeemwerking kan bijvoorbeeld optreden bij een doorbraak van de dijken op de noordelijke oever langs de Boven-Rijn. In dat geval stroomt water uit de Boven-Rijn 'achterlangs' naar de IJssel. Het kan ook optreden bij een dijkdoorbraak langs de zuidoever van de Waal. In dat geval stroomt water van de Waal naar de Maas.

In deze verkenning wordt gekeken wat de mogelijke gevolgen zijn van negatieve systeemwerking van Waal naar Maas en of dit wel of niet leidt tot een hogere hydraulische belasting van dijken langs de Maas verder benedenstrooms.

1.2 Doel

Eén van de gebieden waar negatieve systeemwerking zou kunnen optreden is dijkkring 41, het Land van Maas en Waal. Dit rapport beschrijft een eerste verkenning van de mogelijke effecten van een dijkdoorbraak langs de zuidkant van de Waal op de hydraulische belastingen voor de dijken langs de Maas.

Het doel van deze verkenning is om te bepalen of de effecten van negatieve systeemwerking op rivierwaterstanden significant kan zijn. Als dit het geval blijkt, kan het effect vervolgens in meer detail in beeld worden gebracht. Op basis van de uitkomsten van deze meer gedetailleerde aanpak kan dan later worden besloten of de effecten van negatieve systeemwerking meegenomen moeten worden in de bepaling van de dijkversterkingsopgave.

Omdat het om een eerste verkenning gaat worden een aantal aannames gedaan die de aanpak vereenvoudigen. De invloed van deze aannames wordt besproken in paragraaf 2.

1.3 Aanpak op hoofdlijnen

Voor dijkkring 41 is geen recent overstromingsmodel beschikbaar. Voor de overstromingssimulaties is daarom gebruik gemaakt van een DelftFLS-model dat in 2008 gemaakt is in het kader van Veiligheid Nederland in Kaart 2 (VKNK2). De bodemhoogte en -ruwheid uit dit oude model zijn geïmporteerd in SOBEK 2 en gebruikt als basis voor een nieuw overstromingsmodel voor dijkkring 41 in de Overland Flow (2D) module.

Met dit nieuwe overstromingsmodel is een standaard afvoergolf op zowel de Waal als de Maas gesimuleerd, met dijkdoorbraken van de zuidelijke Waaldijk op verschillende locaties. Per simulatie vindt één doorbraak van de Waaldijk plaats. Het effect van meerdere doorbraken tegelijk is niet beschouwd. Bij een doorbraak in de zuidelijke Waaldijk loopt het Land van Maas en Waal vol. De Maasdijk is lager dan de Waaldijk waardoor water over de Maasdijk zal gaan stromen wanneer de waterstand hoger wordt dan de kruin van de dijk. Wanneer water vanuit het Land van Maas en Waal over de Maasdijk naar de Maas stroomt, zou hier ook een bres in kunnen ontstaan. De kans op een bres in de Maasdijk door belasting vanuit de landzijde is niet bekend. Daarom is per bres in de Waaldijk zowel een simulatie uitgevoerd waarin alleen overloop van de noordelijke Maasdijk plaatsvindt, alsmede één waarin een bres optreedt ter plaatse van de overlooplocatie vanaf het moment dat de Maasdijk begint over te lopen.

Voor elk scenario wordt aan de hand van de simulaties een schatting gemaakt van het effect van een doorbraak in de Waaldijk langs het Land van Maas en Waal op de afvoer en waterstanden op de Maas. Dit wordt gedaan door simulatieresultaten te vergelijken met een referentiescenario waarin geen doorbraak van de Waaldijk plaatsvindt.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de aanpak in meer detail uitgewerkt. In paragraaf 2.2 worden de gesimuleerde scenario's beschreven. In paragraaf 2.3 wordt de modelschematisatie toegelicht en in paragraaf 0 en 2.5 worden de modelparameters besproken voor het basisscenario. In de verschillende varianten op het basisscenario is van deze instellingen afgeweken. Deze afwijking is dan vermeld in de beschrijving van de variant. Ten slotte wordt de validatie van de resultaten van het referentiescenario besproken in paragraaf 2.6.

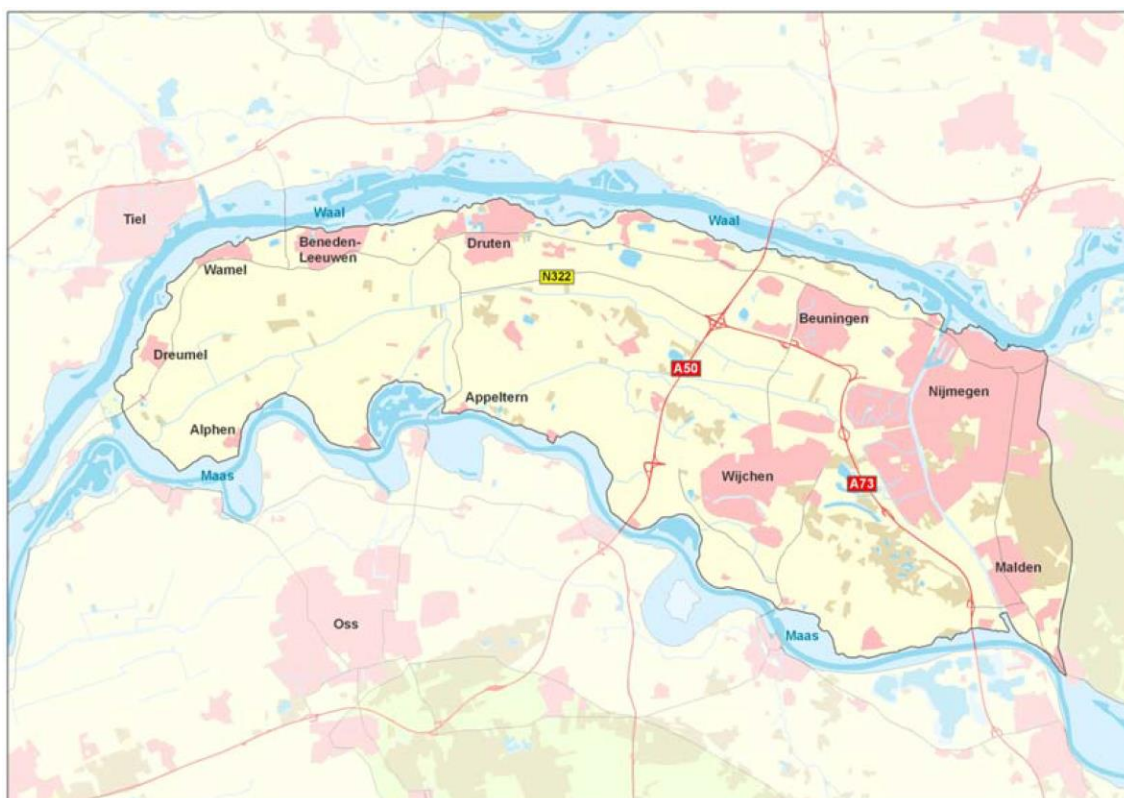
Hoofdstuk 3 gaat in op de resultaten van de verschillende scenario's. Per scenario worden bresgebieden, eventuele overloopsnelheden en effecten op (piek)afvoer en waterstanden op de Maas besproken. Paragraaf 3.7 geeft een overzicht van de belangrijkste resultaten uit de scenario's.

In hoofdstuk 4 volgt een discussie over het effect van de belangrijkste aannames en modelonzekerheden op de resultaten. Vervolgens worden in hoofdstuk 0 conclusies verbonden aan de resultaten, op basis waarvan aanbevelingen voor verder onderzoek worden gedaan.

2 Aanpak simulaties dijkkring 41

2.1 Situatiebeschrijving

De eerste verkennende simulaties zijn uitgevoerd voor dijkkring 41, het Land van Maas en Waal. Deze dijkkring ligt in Gelderland en wordt in het noorden begrensd door de Waal en in het zuiden door de Maas. Aan de oostzijde vormt de hoge grond van Nijmegen een natuurlijke begrenzing, terwijl in het westen het kanaal van Sint-Andries als begrenzing kan worden opgevat. Een overzicht van het gebied is gegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Dijkkring 41, het Land van Maas en Waal (Vergouwe & van der Scheer, 2011).

Wanneer binnen deze dijkkring een doorbraak optreedt aan de Waalzijde, is het mogelijk dat de Maasdijken aan de zuidwestzijde van deze dijkkring overstromen (Van Mierlo, 2005), of zelfs dat ook hier een doorbraak optreedt als gevolg van de toegenomen belasting aan de binnenzijde van de dijk. Dit zou kunnen leiden tot een sterk verhoogde Maasafvoer die vervolgens de dijkringen aan de overzijde en benedenstrooms langs de Maas bedreigt.

2.2 Scenario's en varianten

Om de effecten van deze mogelijke systeemwerking te verkennen zijn twee basisscenario's gesimuleerd. Voor elk van deze scenario's zijn vervolgens 5 varianten gemodelleerd, waarmee de gevoeligheid van de resultaten voor veranderingen in verschillende parameters is onderzocht.

2.2.1 Basisscenario's

In het eerste basisscenario treedt een bres op in de zuidelijke Waaldijk bij Weurt (rkm 888) (zie figuur 2.2). Hierop overstroomt de dijkkring, waardoor op een bepaald moment de waterstand binnen de dijkkring hoger wordt dan het laagste punt van de noordelijke Maasdijk binnen de dijkkring. De noordelijke Maasdijk loopt dan over, waardoor de afvoer en waterstand op de Maas toenemen.

In het tweede basisscenario wordt uitgegaan van eenzelfde bres in de zuidelijke Waaldijk. In dit geval wordt echter aangenomen dat als gevolg van de toegenomen belasting op de binnenzijde van de noordelijke Maasdijk een bres optreedt. Deze bres vormt zich op de locatie waar als eerste sprake is van overloop van water uit de dijkkring naar de Maas. Deze locatie en het moment waarop overloop start is bepaald in het eerste basisscenario. In de simulatie wordt de bres geïnitieerd op het moment dat overloop van de dijk start. Het water stroomt nu voornamelijk door de bres in plaats van over de dijk heen.

2.2.2 Varianten

In deze paragraaf worden 5 varianten op de basisscenario's beschreven. In deze varianten wordt de breslocatie, de timing van de doorbraak op de Waal ten opzichte van de piek op de Maas, de hoogte van de piekafvoer op de Waal, de timing van de bres in de Waaldijk ten opzichte van de piek op de Waal en de snelheid van bresgroei gevarieerd. Elke variant wordt voor zowel het basisscenario met enkel overloop als voor het basisscenario met overloop en doorbraak van de Maasdijk uitgewerkt, waardoor het totale aantal scenario's op 12 uitkomt.

Om de resultaten van de verschillende varianten te interpreteren worden vergelijkingen met referentiescenario's gemaakt, waarin geen bres in de Waaldijk en dus geen systeemwerking optreedt. In totaal zijn 3 referentiescenario's gesimuleerd:

- (1) Referentie 1, uitgaande van een piekafvoer van 10.168 m³/s op de Waal en 3866 m³/s op Maas (gebruikt bij Basisscenario 1 en 2, variant 1 en variant 5),
- (2) Referentie 2, met de zelfde afvoergolven, maar andere timing (gebruikt bij variant 2),
- (3) Referentie 3, met een hogere piekafvoer van 11.344 m³/s op de Waal (gebruikt bij variant 3 en 4).

Een overzicht van de simulaties is opgenomen in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Scenario's voor Dijkkring 41. In de genoemde paragrafen worden de resultaten besproken (de breslocaties zijn weergegeven in figuur 2.2).

	Referentie	Overloop Maasdijk	Bres Maasdijk rkm 204
Basis – Bres Waaldijk bij Weurt (rkm 888)	1	§ 3.1.1	§ 3.1.2
Variant 1 – Bres Waaldijk bij Dreumel (rkm 919)	1	§ 3.2.1	§ 3.2.2
Variant 2 – Worst case timing	2	§ 3.3.1	§ 3.3.2
Variant 3 – Hogere afvoer Waal	3	§ 3.4.1	§ 3.4.2
Variant 4 – Hogere afvoer Waal, bres Waal voor piekafvoer	3	§ 3.5.1	§ 3.5.2
Variant 5 – Kleinere bres (kleinere bresgroeisnelheid)	1	§ 3.6.1	§ 3.6.2

Variant 1 – Bres bij Dreumel

In de eerste variant wordt de breslocatie in de Waaldijk verplaatst van Weurt (rkm 888) naar Dreumel (rkm 919, zie figuur 2.2). Verwacht wordt dat met breslocaties bij Weurt en Dreumel respectievelijk het grootst en het kleinst mogelijke effect op de hydraulische condities in de Maas wordt gesimuleerd. Met andere woorden, een bres in de Waaldijk op een andere locatie zal tot een toestroming naar de Maas leiden die hier qua omvang tussenin ligt. Daarnaast zijn dezelfde twee locaties gebruikt in VNK2, waardoor gemakkelijk een vergelijking met deze studie gemaakt kan worden.



Figuur 2.2 Breslocaties in het model.

Variant 2 – Worst case timing

In de tweede variant wordt gekeken naar een scenario met een 'ongelukkige' timing van de afvoergolf op de Maas. Aangenomen is dat de afvoerpiek op de Maas samenvalt met het moment waarop water uit dijkkring 41 naar de Maas stroomt.

Variant 3 – Hogere afvoer Waal

In deze variant wordt de afvoergolf op de Waal verhoogd van 16.000 m³/s te Lobith naar 18.000 m³/s te Lobith (oftewel van 10.168 m³/s op de Waal naar 11.344 m³/s), waardoor het debiet door de bres in de Waaldijk toeneemt. De piekafvoer op de Maas verandert niet. Aangenomen is dat bresvorming op de Waal begint op het moment dat de maximale waterstand wordt bereikt op de breslocatie.

Variant 4 – Hogere afvoer Waal, bres Waal voor piekafvoer

Deze variant is vergelijkbaar met variant 3, met als verschil dat de bres in de Waaldijk optreedt op het moment dat de afvoer op de Waal de 10.168 m³/s overschrijdt (dit afvoerniveau correspondeert met een piekafvoer van 16.000 m³/s te Lobith). Dit gebeurt al vóór het passeren van de afvoerpiek in de Waal, waardoor het instromend volume veel groter wordt.

Variant 5 – Kleinere bres (minder snelle bresgroei)

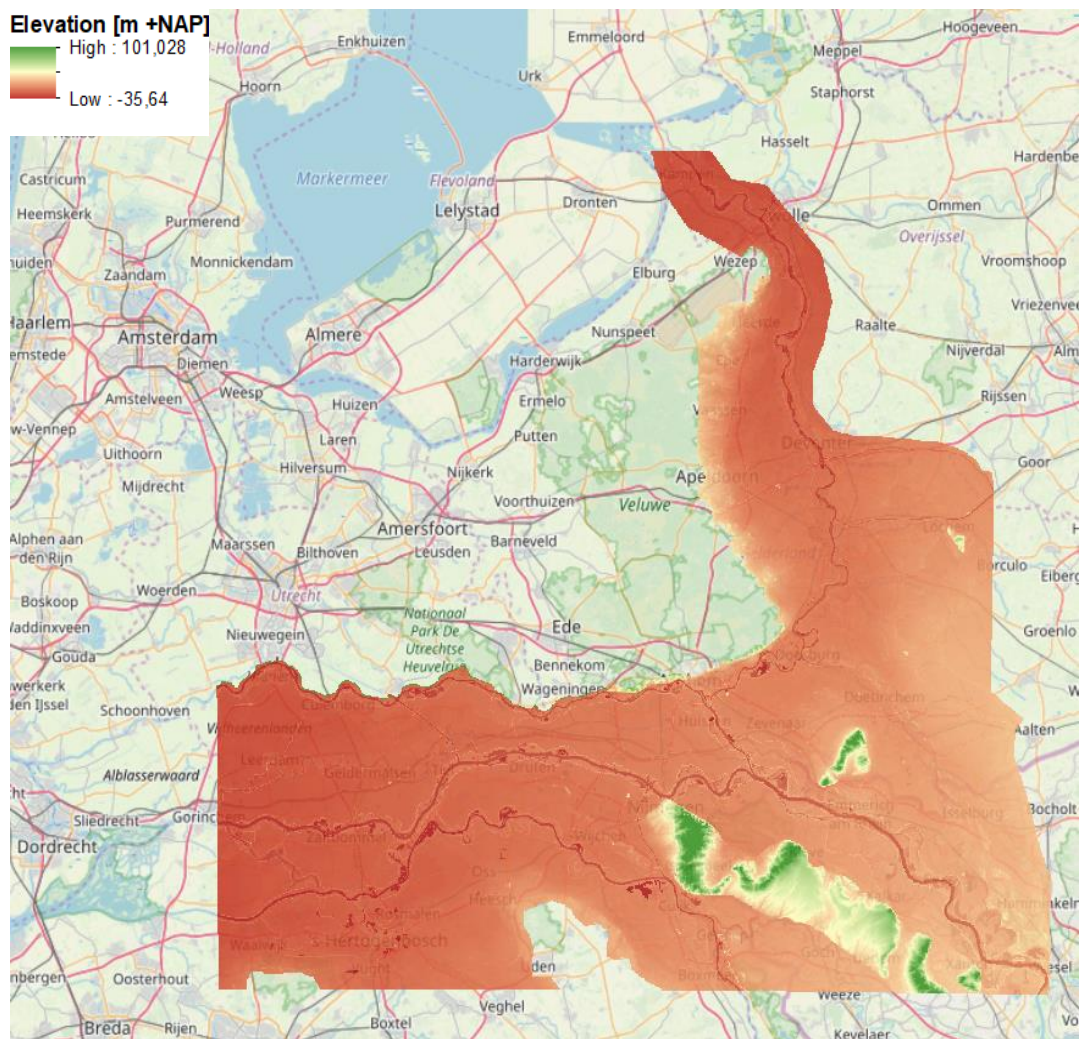
In variant 5 wordt tenslotte gekeken naar de invloed van bresgroei: wanneer de bresgroei minder snel gaat zal de instroom kleiner zijn en zal er minder water naar de Maas stromen. De bresgroei is afhankelijk van de erosiebestendigheid van de dijk. Een zanddijk is minder erosiebestendig dan een kleidijk. In het basisscenario is zowel voor de Waal- als de Maasdijk uitgegaan van een zanddijk, waarmee de bresgroei dus conservatief wordt benaderd.

In Variant 5 kijken we hoeveel kleiner het effect van negatieve systeemwerking wordt wanneer wordt uitgegaan van een kleidijk voor zowel de Waal als de Maas.

2.3 SOBEK-model

De simulaties worden uitgevoerd in SOBEK 2.16.003, waarin zowel de rivieren Maas en Waal als de topografie binnen de dijkkring tweedimensionaal zijn opgenomen. SOBEK berekent de stroming op basis van de complete vergelijkingen van De Saint Venant (1871). Voor tweedimensionale stroming (Overland Flow module) worden drie vergelijkingen opgelost; massabehoud, impulsbehoud in x-richting en impulsbehoud in y-richting.

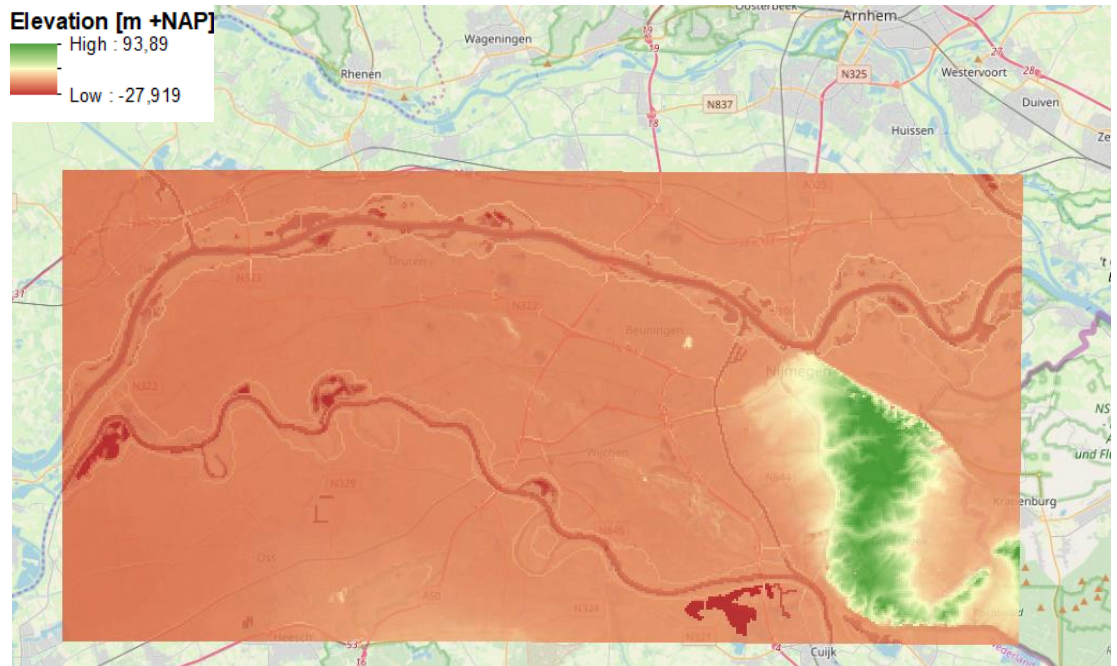
Als basis voor het overstromingsmodel wordt een DelftFLS-model gebruikt dat een veel groter gebied beslaat dan alleen het Land van Maas en Waal, zie Figuur 2.3. De gridcelresolutie van dit model is 100 bij 100 m.



Figuur 2.3 Bodemtopografie van het complete DelftFLS-model. (Bron achtergrondkaart: OpenStreetMap).

Ten behoeve van de rekensnelheid van het model is het FLS-model afgeknipt rond dijkkring 41, zie Figuur 2.4.

Naast de bodemtopografie zijn ook de bodemruwheden (formulering volgens White-Colebrook) overgenomen uit het FLS-model en op dezelfde coördinaten afgeknipt.



Figuur 2.4 Bodemtopografie van het afgeknipte DelftFLS-model. (Bron achtergrondkaart: OpenStreetMap).

2.4 Rand- en beginvoorwaarden voor het basisscenario

Zowel voor de Maas als voor de Waal wordt aan de bovenstroomse rand een afvoertijdreeks opgegeven en aan de benedenstroomse rand een Qh-relatie.

2.4.1 Waal

Voor de Waal is een afvoergolf afgeleid uit resultaten van de Waqua-Rijn-j19_5-v1 modelschematisatie, waarin een standaardafvoergolf met een piek van 16000 m³/s bij Lobith is gesimuleerd (op basis van WBI2017). De afvoer op de Waal die door dit model wordt berekend ter hoogte van het splitsingspunt wordt eens per 10 minuten uitgevoerd. Deze uitvoer is vervolgens gebruikt als randvoorwaarde voor het SOBEK-model. De resulterende afvoergolf op de Waal beslaat een periode van 18 dagen en heeft een piek van 10.168 m³/s.

Voor de Qh-relatie op de benedenstroomse Waalrand (rkm 924) is de Waqua-Rijn-beno15_5-v2 modelschematisatie gebruikt, omdat met dit model al stationaire simulaties met $Q_{Lobith} = 8000, 10.000, 16.000$ en 18.000 m³/s waren uitgevoerd. Door de bovenstrooms opgegeven afvoer bij Lobith te combineren met uitgevoerde waterstanden op rkm 924, kon snel een relatie tussen deze twee variabelen worden afgeleid. Voor het opstellen van de Qh-relatie zijn de afvoeren bij Lobith vervolgens vertaald naar de bijbehorende afvoeren op de Waal. Hiervoor is gebruik gemaakt van de afvoerverdeling volgens het Deltamodel (zichtjaar 2015). De Waalafvoer die volgt uit het Deltamodel wijkt maximaal 4 m³/s af van de bovengenoemde Waqua-modelschematisatie voor afvoeren van 10.000 en 16.000 m³/s bij Lobith. Bij $Q_{Lobith} = 8000$ m³/s is de afwijking iets groter; volgens het Deltamodel gaat hierbij 5370 m³/s naar de Waal, voor het beno-model is dit 5420 m³/s. Omdat het er in deze studie vooral om gaat dat bij de piekafvoeren de waterstand op de Waal correct wordt gesimuleerd, wordt dit verschil acceptabel geacht. De resulterende Qh-relatie is opgenomen in Bijlage A.

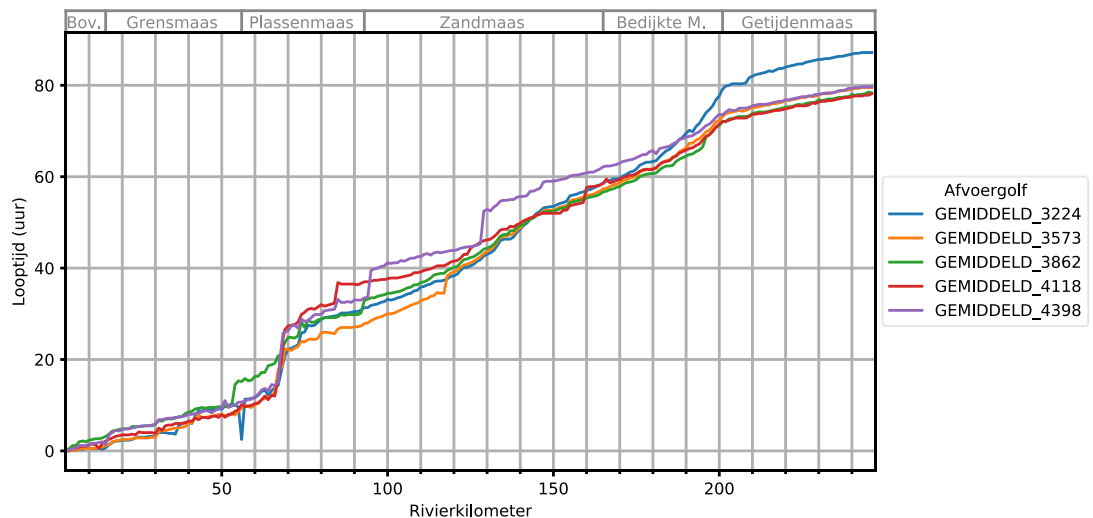
2.4.2 Maas

Ook voor de Maas is gebruik gemaakt van een standaardafvoergolf op basis van WBI2017, nu met een duur van 12 dagen (invoer eens per uur) en een piek van 3866 m³/s.

Dit betreft echter de afvoer bij Eijsden, terwijl de bovenrand van het SOBEK-model meer dan 150 km verder benedenstrooms ligt, bij Gennepe.

Deze afvoergolf is zonder verdere aanpassing overgenomen als bovenstroomse randvoorwaarde, dat wil zeggen zonder rekening te houden met laterale instroming en topvervlakking tussen Eijsden en Gennepe. Door het verwaarlozen van topvervlakking is de golf in het model spitsiger dan in werkelijkheid.

Met de timing van de afvoergolf ten opzichte van die op de Waal is wel rekening gehouden. Hierbij is aangenomen dat de afvoerpieken op de Waal en de Maas tegelijkertijd Nederland binnenkomen (bij Lobith en Eijsden, respectievelijk). Dit is een belangrijk uitgangspunt, dat grote invloed heeft op de uitkomsten van de modelsimulaties. Figuur 2.5 laat zien dat de looptijd tussen Eijsden en Gennepe ongeveer 55 uur bedraagt.



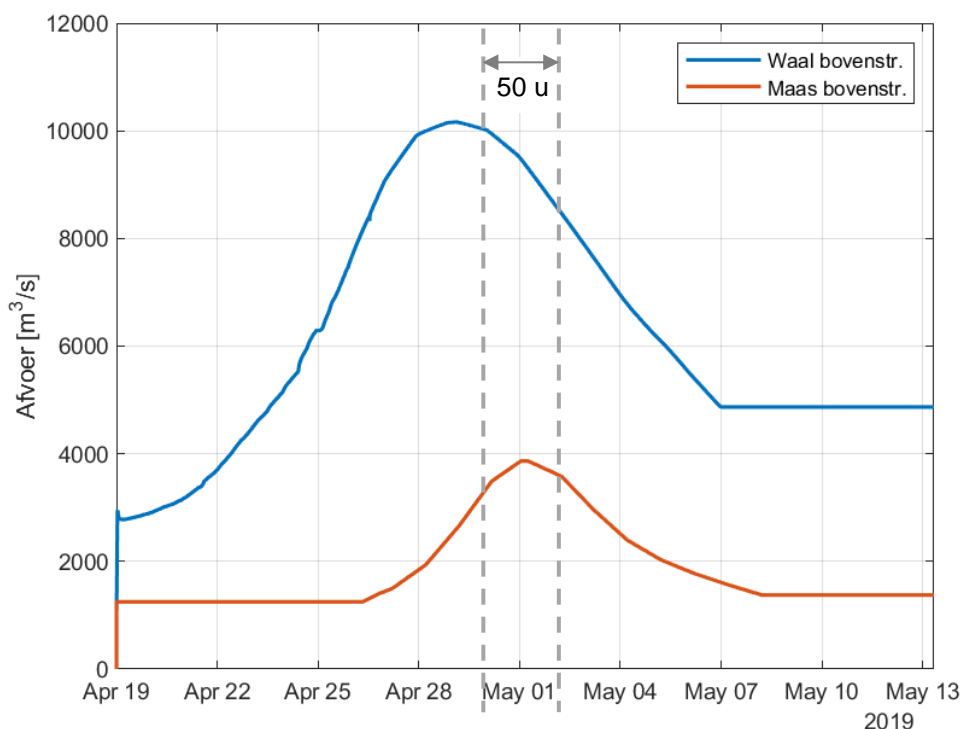
Figuur 2.5 Looptijden op de Maas voor verschillende afvoergolven met gemiddelde golfvorm (De Jong & Asselman, 2019).

Gegeven dat de looptijd tussen Lobith en de Pannerdensch Kop enkele uren bedraagt, zal de piek op de Maas ongeveer 50 uur later het model binnenkomen dan de piek op de Waal. De timing van de twee afvoergolven ten opzichte van elkaar is dan als weergegeven in Figuur 2.6. In de aanloop en na passage van de golf is een constant debiet aansluitend op de afvoergolf aangehouden. Voor de Maas is geen rekening gehouden met eventuele laterale instroming tussen Eijsden en Gennepe.

De Qh-relatie voor de benedenrand van de Maas (rkm 209) is gebaseerd op de betrekkinglijnen 2018-2019. Hierin zijn voor een reeks afvoeren bij het meetpunt Sint Pieter Noord waterstanden ter hoogte van alle rivierkilometers opgenomen. Deze waterstanden zijn bepaald op basis van gemeten waarden (voor veelvoorkomende afvoeren) of Waqua-modelberekeningen (voor extreme afvoeren). De resulterende relatie is opgenomen in Bijlage A. De hoogste afvoer in deze Qh-relatie is 4396 m³/s. In bepaalde bressscenario's kunnen echter hogere afvoeren voorkomen (zie bijvoorbeeld paragraaf 3.3.2). In deze gevallen is de Qh-relatie lineair geëxtrapoleerd op basis van de hoogste afvoer-waterstandcombinatie.

De in paragraaf 2.2 genoemde varianten 4 en 5 zijn in een latere fase van het project uitgevoerd. In deze tweede fase is een verbeterde versie van de Qh-relatie voor de Maas opgesteld, waarbij gebruik wordt gemaakt van Waqua-modeluitvoer op rkm 209 voor zowel de afvoer als de waterstand.

Dit in tegenstelling tot de Qh-relatie op basis van de betrekkinglijnen, waarbij de waterstand op rkm 209 wordt gekoppeld aan de afvoer bij het meetpunt Sint Pieter Noord, waar de Maas Nederland binnenkomt. De verbeterde Qh-relatie wordt in meer detail beschreven in Bijlage A.



Figuur 2.6 Opgelegde afvoergolven op de bovenstroomse randen van het model. De datums weergegeven op de horizontale as zijn fictief.

2.5 Simulatie van bresgroei in het basisscenario

Bresgroei is gesimuleerd op basis van de formulering van Verheij – van de Knaap (Verheij, 2003) met parameters als weergegeven in Tabel 2.2. Voor de minimale breshoogte is steeds het minimum van twee waarden genomen: de hoogte van het voorland en de hoogte van het achterliggend maaiveld ter hoogte van de breslocatie. Verder is voor de kritieke stroomsnelheid gekozen voor een waarde die representatief is voor zanddijken ($u_c = 0.2$ m/s). Wanneer wordt uitgegaan van een kleidijk, zoals is gedaan in Variant 5 (zie paragraaf 2.2.2), is de kritieke stroomsnelheid 0.5 m/s. Een grotere kritieke stroomsnelheid leidt tot een kleinere bresbreedte en daardoor een kleiner bresdebiel. De bres in de Waaldijk treedt op bij de maximale waterstand op de Waal, tenzij anders vermeld. In de Maasdijk treedt de bres steeds op wanneer de Maasdijken over beginnen te lopen op de breslocatie. Het tijdstip verschilt daardoor per scenario.

Tabel 2.2 Parameters behorende bij de bresgroeiformulering van Verheij – van de Knaap.

Parameter	Waarde	Opmerking
A	1.3	default
B	0.04	default
Initiële bresbreedte [m]	10	default
Initiële kruinhoogte [m +NAP]	afh. van scenario	dijkhoogte
Minimale breshoogte [m +NAP]	afh. van scenario	hoogte voorland/achterliggend maaiveld
Kritieke stroomsnelheid [m/s]	0.2 m/s	representatief voor zand
Duur tot bereiken Zmin [min]	10	default
Tijdstip ontstaan bres	afh. van scenario	Waal: bij maximale waterstand. Maas: bij start overloop.

2.6 Validatie

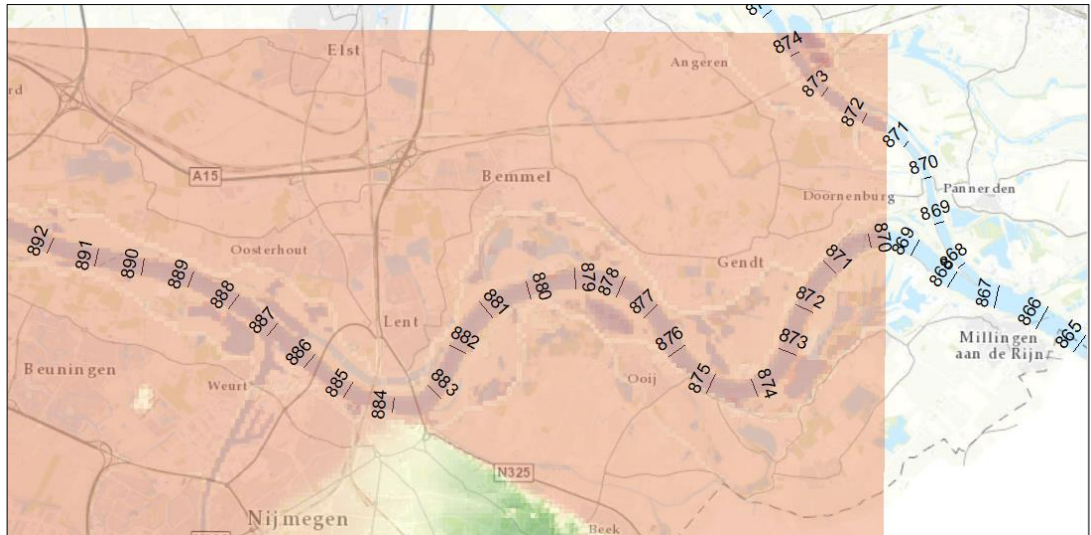
2.6.1 Waal

Voor de Waal is de prestatie van het model gevalideerd door berekende waterstanden op de Waal te vergelijken met waterstanden die zijn berekend met de Waqua-Rijn-beno15_5-v2 modelschematisatie. Dit is gedaan voor twee stationaire afvoerniveaus, namelijk 5370 m³/s en 10170 m³/s op de Waal (equivalent met 8000 m³/s en 16000 m³/s bij Lobith).

Voor het lage afvoerniveau worden waterstanden langs een groot deel van de Waal overschat, gemiddeld met ongeveer 20 cm ten opzichte van het Waqua-model. De maximum afwijking is ongeveer 70 cm en treedt op bij rkm 882 (net bovenstrooms van de bocht bij Nijmegen, zie Figuur 2.7). Deze grote afwijking kan worden verklaard door de lage resolutie van het SOBEK-model, waardoor de stroming in de scherpe Waalbochten in dit deel van het model niet goed berekend kan worden. In het model ontstaat kunstmatige wrijving, waardoor waterstanden opgestuwd worden. Echter, ter hoogte van de breslocaties (Weurt, rkm 888 en Dreumel, rkm 919) is de waterstandoverschatting met respectievelijk ca. 12 en 7 cm relatief klein.

Ook voor het hoge afvoerniveau overschat het model de waterstanden op veel locaties, maar deze overschatting is beperkt. De afwijking is gemiddeld 15 cm, met een maximum van 70 cm, opnieuw ter hoogte van rkm 882 bij Nijmegen. Ter hoogte van Weurt en Dreumel worden waterstanden zelfs onderschat, met 2 en 10 cm, respectievelijk.

Voor het doel van deze studie (een bepaling van de orde grootte van de effecten van negatieve systeemwerking) worden de afwijkingen bij de breslocaties (-10 cm tot +12 cm) acceptabel geacht.



Figuur 2.7 Rivierkilometers op de Waal nabij de bovenstroomse rand van het model.

2.6.2 Maas

De resultaten van het SOBEK-model voor de Maas zijn gevalideerd door de maximale waterstanden uit de simulatie van de afvoergolf (beschreven in paragraaf 2.4.2) te vergelijken met de betrekkinglijnen 2018-2019 voor een afvoer van 3862 m³/s bij Sint Pieter.

Ook hier is over het algemeen sprake van een overschatting van de waterstanden, nu met een gemiddelde afwijking van 17 cm en een maximum van 34 cm vlakbij de bovenstroomse rand van het model.

Ook deze afwijkingen worden acceptabel geacht gezien het doel van deze studie. Het doel is immers niet om de *absolute* waterstanden te bepalen, maar om het *verschil* in afvoer en waterstanden als gevolg van negatieve systeemwerking in beeld te brengen.

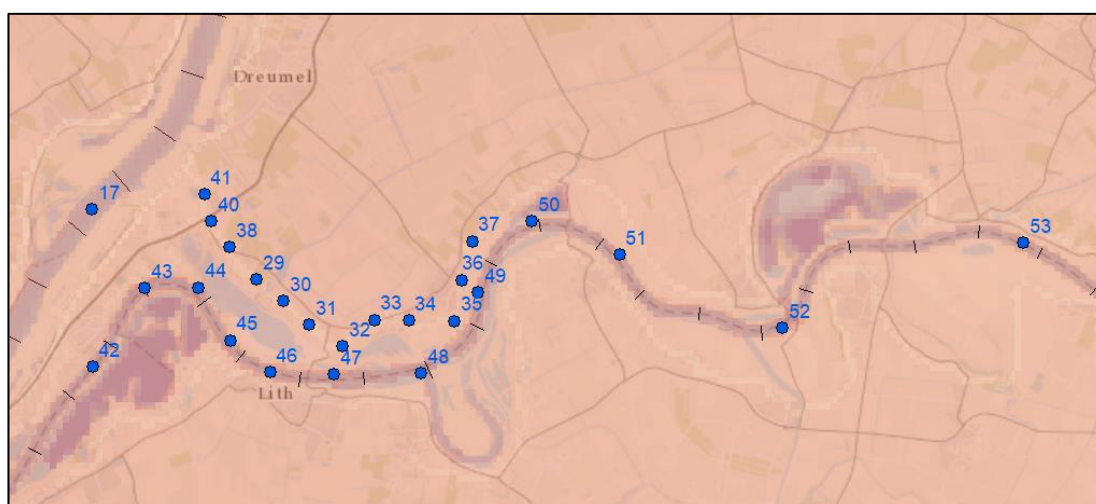
3 Resultaten

De resultaten worden besproken per scenario, zoals weergegeven in Tabel 2.1. In Figuur 3.1 zijn de breslocaties aangegeven die in de verschillende scenario's voorkomen. Zowel de bres bij Weurt als de bres bij Dreumel leidt tot overloop van de Maasdijken tussen ruwweg rkm 197 (bij punt 50 in Figuur 3.2) en 204 (bij punt 44 in Figuur 3.2 en 'bres Maas' in Figuur 3.1). Op dit dijktraject is daarom een aantal modeluitvoerpunten aangebracht in het model, zodat een indicatie kan worden verkregen van de stroomsnelheden over de dijk. Tevens is op de Maas een aantal uitvoerpunten aangegeven waar waterstanden uitgelezen kunnen worden. Een overzicht van deze punten is gegeven in Figuur 3.2.

Na de bespreking van de resultaten per variant wordt in paragraaf 3.7 een overzicht gegeven van de belangrijkste resultaten, zodat de varianten eenvoudig met elkaar vergeleken kunnen worden.



Figuur 3.1 Breslocaties in het model.



Figuur 3.2 Uitvoerpunten in het model.

3.1 Basisscenario

3.1.1 Met overloop Maasdijk

Tabel 3.1 Basisscenario – bres Waal bij Weurt.

Initiële kruinhoogte [m +NAP]	15.04
Minimale breshoogte [m +NAP]	9.23
Tijdstip ontstaan bres [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]	29/04/2019 06:30:00
Maximale bresbreedte [m]	155

Onder de aanname dat de bres bij Weurt ontstaat wanneer hier de maximale waterstand op de Waal wordt bereikt, start de bresgroei op 29 april om 06:30 (Tabel 3.1). Door het ontstaan van de bres neemt de waterstand op de Waal abrupt af, terwijl de waterstand binnen de dijkkring toeneemt. Hierdoor neemt het verval over de bres binnen een uur met 2 meter af. Tegelijkertijd groeit de bres in de breedte. Deze groeisnelheid neemt in de tijd echter logaritmisch af, tot een maximale breedte van ongeveer 155 m is bereikt. Het netto effect is dat het bresdebiet vlak na de start van de bresgroei een maximum van ongeveer 1700 m³/s bereikt, om daarna in ongeveer een week af te nemen tot ca. 350 m³/s. Het debiet blijft vervolgens constant tot het einde van de simulatie, als gevolg van een constante bresbreedte en een constant verval over de bres in deze periode. In werkelijkheid zal de instroom waarschijnlijk doorgaan tot de waterstand in de Waal zodanig gedaald is dat de uiterwaarden van de Waal droogvallen, of tot de bres gedicht is. Het verloop van het bresdebiet is weergegeven in Figuur 3.3.

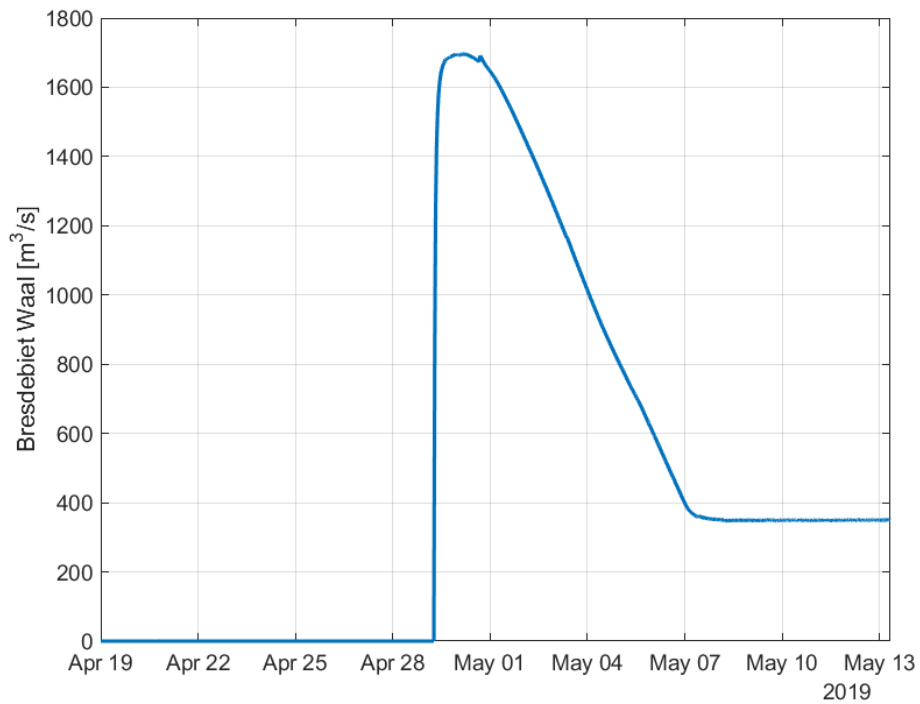
Als gevolg van deze bres beginnen de Maasdijken ruim 80 uur later, op 2 mei om 15:00, over te lopen. In Figuur 3.4 zijn stroomsnelheden op enkele dijklocaties weergegeven (zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten). Deze kunnen oplopen tot ruim 0.5 m/s. Na een piek van ongeveer 6 dagen wordt een constant verval over de dijk bereikt en blijven de stroomsnelheden ongeveer gelijk tot aan het einde van de simulatie.

Het overlopen van de Maasdijken leidt tot een significante toename van de afvoer op de Maas, zoals weergegeven in Figuur 3.5. Door de grote vertraging van het moment van overlopen ten opzichte van de start van de bresgroei in de Waaldijk treedt deze toename pas op nadat de piekafvoer op de Maas gepasseerd is, waardoor de maximale afvoer over de gehele duur van de simulatie niet verandert. Wel neemt de periode waarin de Maasafvoer een grens van bijvoorbeeld 2500 m³/s overschrijdt significant toe. De maximale toename in afvoer is ongeveer 720 m³/s. Wanneer de timing van de piekafvoer op de Maas ten opzichte van de piekafvoer op de Waal anders was geweest, dan zou de maximum afvoer op de Maas ook anders kunnen zijn. Ofwel: wanneer de piekafvoer op de Maas iets later was opgetreden, dan had de overloop van water uit de Waal samen kunnen vallen met de piekafvoer op de Maas, waardoor de piekafvoer op de Maas tijdelijk met ruim 700 m³/s toe had kunnen nemen.

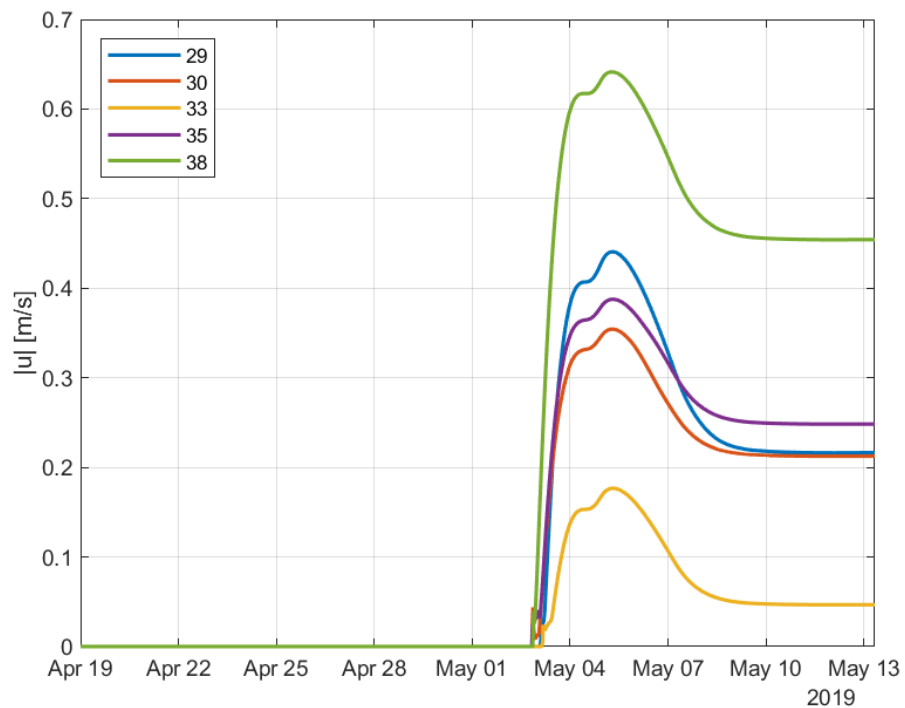
De lengte van het dijksegment waar overloop plaatsvindt is ongeveer 10 km. Een afvoertoeename van 720 m³/s kan dan worden vertaald naar een overloopdebiet van gemiddeld 72 l/m/s, fors meer dan kritische overslagdebieten die worden gebruikt in het dijkontwerp (orde 10 l/m/s). Overloop en overslag zijn echter niet een op een vergelijkbaar.

Verder treedt in de waterstanden op de Maas duidelijk een verlenging van de piek op, zie Figuur 3.6. Het effect op de waterstanden is het grootst op locaties benedenstrooms van de bres, als gevolg van de toename in afvoer.

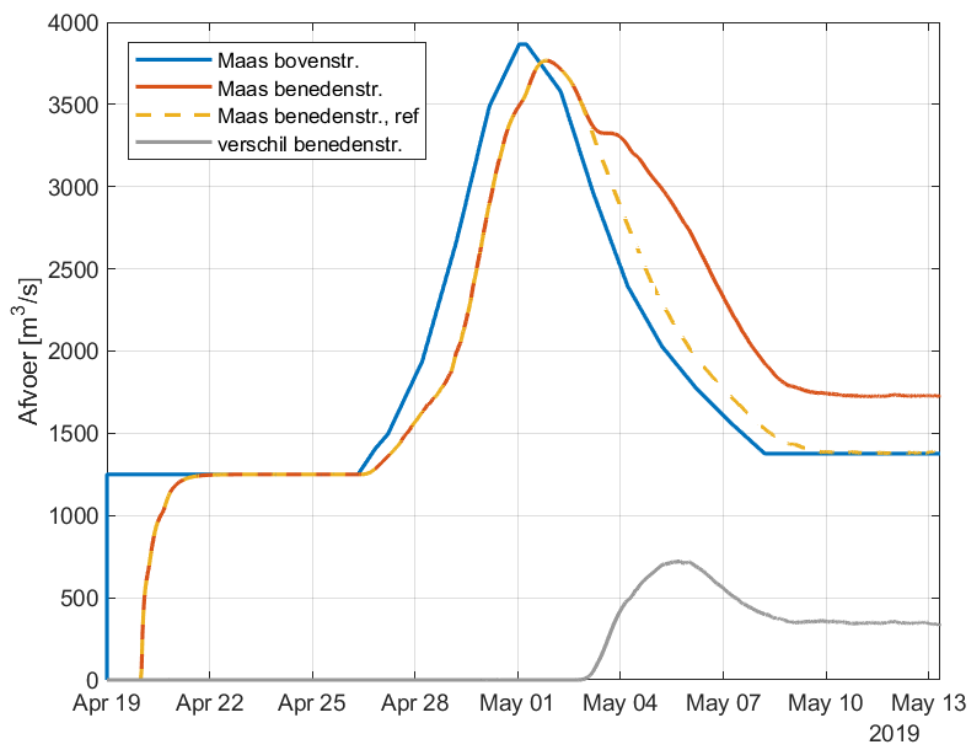
Echter, ook in bovenstroomse richting is het effect duidelijk zichtbaar. In dit geval komt het doordat de hogere waterstanden benedenstrooms leiden tot opstuwing bovenstrooms.



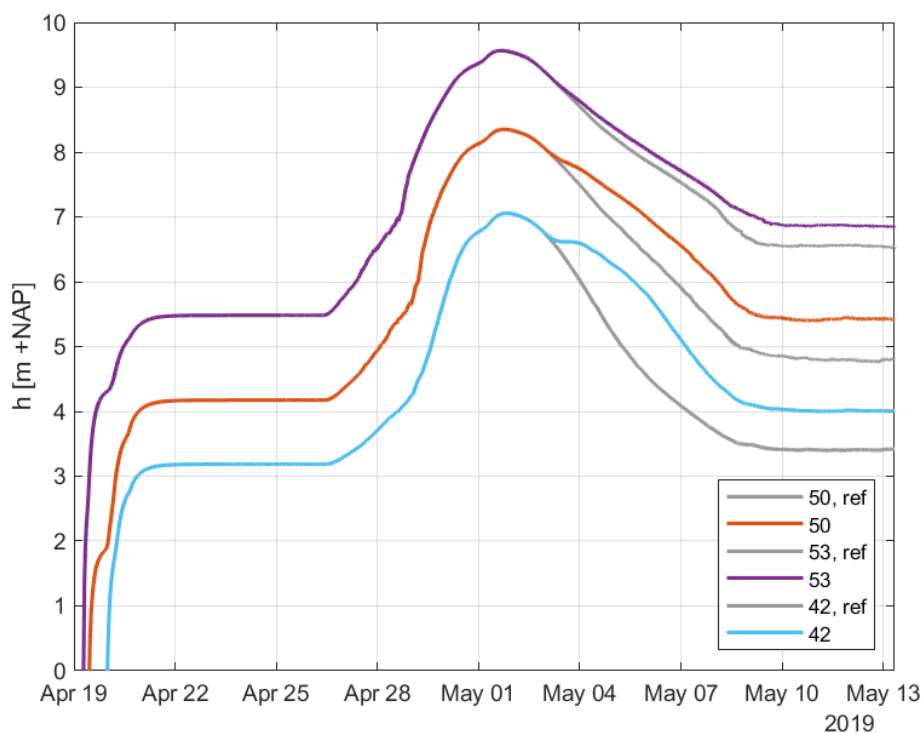
Figuur 3.3 Bresdebiet bij Weert.



Figuur 3.4 Overloopsnelheden op verschillende locaties op de Maasdijken. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten. Het totale overloopdebiet is max 720 m³/s over een lengte van 10km, wat neerkomt op een overloopdebiet van zo'n 72 l/m/s.



Figuur 3.5 Afvoer op de Maas ter hoogte van de modelranden.



Figuur 3.6 Waterstanden op enkele locaties in de Maas. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten. Verhoging van de waterstand bij meetpunt 42 komt door de toename van de afvoer. Verhoging van de waterstanden bij meetpunten 50 en 53 zijn het gevolg van opstuwung.

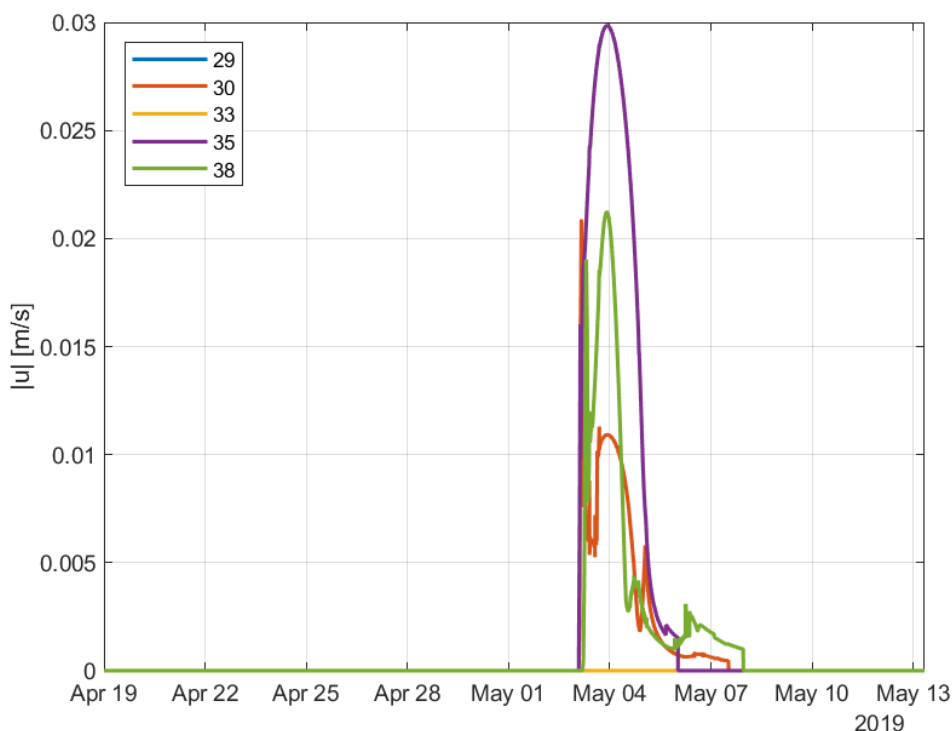
3.1.2 Met bres in Maasdijk

Tabel 3.2 Basisscenario – Bres Maas.

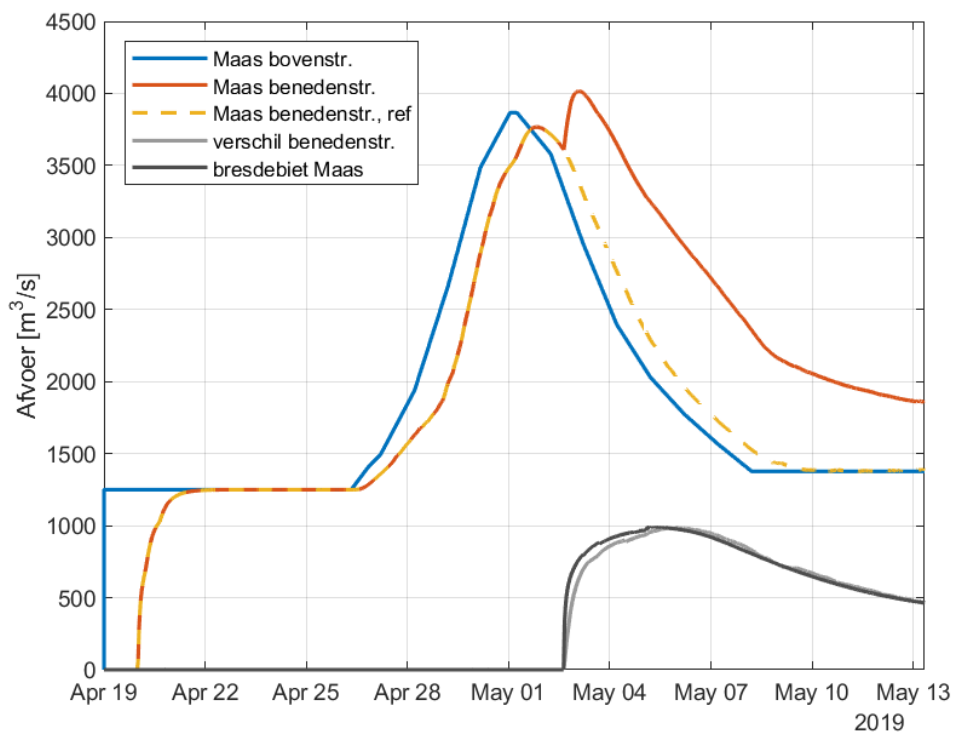
Initiële kruinhoogte [m +NAP]	8.56
Minimale breshoogte [m +NAP]	4.31
Tijdstip ontstaan bres [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]	02/05/2019 15:06:00
Maximale bresbreedte [m]	76

De resultaten worden anders als op de plaats waar als eerste overloop van de dijk optreedt een bres wordt gesimuleerd, die ontstaat op het moment dat de dijk over begint te lopen. In dit geval stroomt vrijwel al het water dat uit dijkkring 41 naar de Maas stroomt, door de bres, terwijl de debieten en de stroomsnelheden over de dijk heen verwaarloosbaar klein zijn, zie Figuur 3.7. Figuur 3.8 toont de verandering in afvoer op de Maas. De zwarte lijn in Figuur 3.8 geeft het debiet door de bres in de Maasdijk aan, terwijl de grijze lijn de toename in het debiet op de benedenstroomse modelrand laat zien. Deze debieten zijn bijna gelijk. Dit duidt er op dat vrijwel al het water door de bres stroomt en niet langer over de dijk.

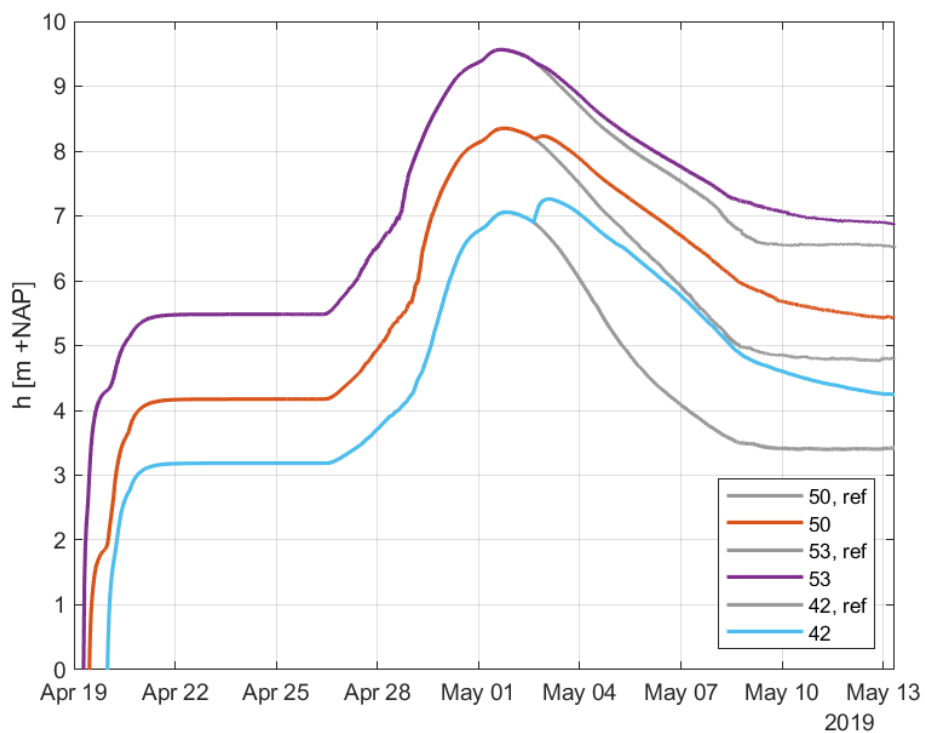
Ook neemt het debiet dat vanuit de overstromde dijkkring de Maas binnenstroomt toe. De maximale afvoertoe name is nu bijna $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. Hierdoor neemt ook de piekafvoer op de Maas toe, van $3766 \text{ m}^3/\text{s}$ naar $4015 \text{ m}^3/\text{s}$. Hetzelfde geldt voor de waterstandspiek benedenstrooms van de bres, die toeneemt van 7.06 naar 7.26 m +NAP, zie de blauwe lijn in Figuur 3.9. Deze waterstandstoename is een direct gevolg van de toename in het debiet. Bovenstrooms van de bres vindt echter ook een toename van waterstanden plaats, die wordt veroorzaakt door opstuwning (rode en paarse lijn in Figuur 3.9).



Figuur 3.7 Overloopsnelheden op verschillende locaties op de Maasdijken. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de uitvoerpunten.



Figuur 3.8 Afvoer op de Maas ter hoogte van de modelranden en het debiet door de bres in de Maasdijk.



Figuur 3.9 Waterstanden op enkele locaties in de Maas. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.

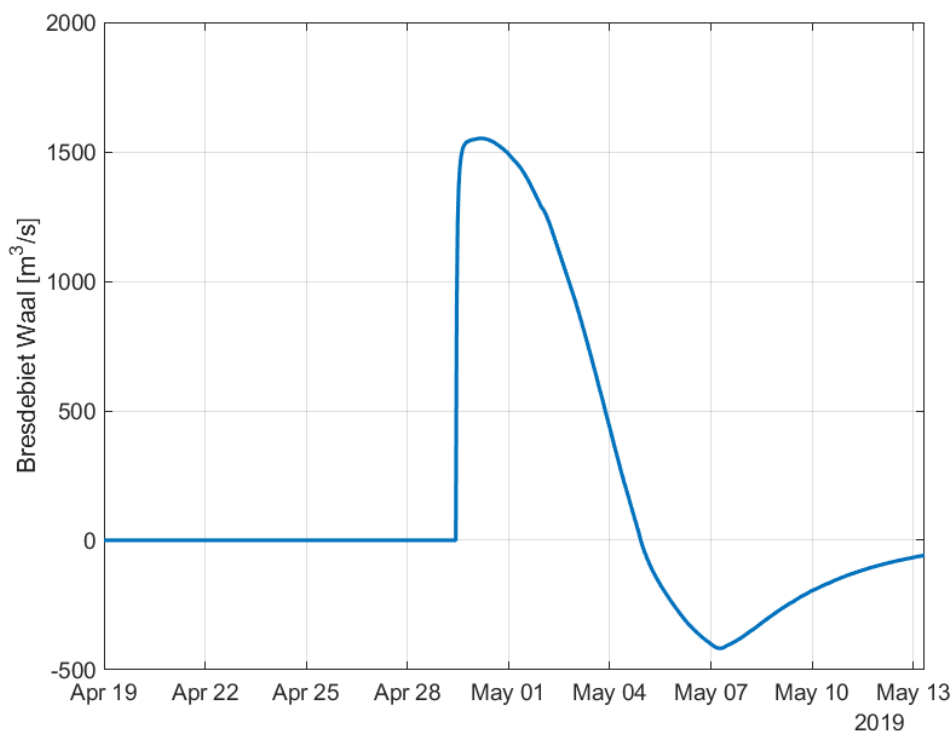
3.2 Variant 1 – Bres bij Dreumel

3.2.1 Met overloop Maasdijk

Tabel 3.3 Variant 1 – Bres Waal bij Dreumel.

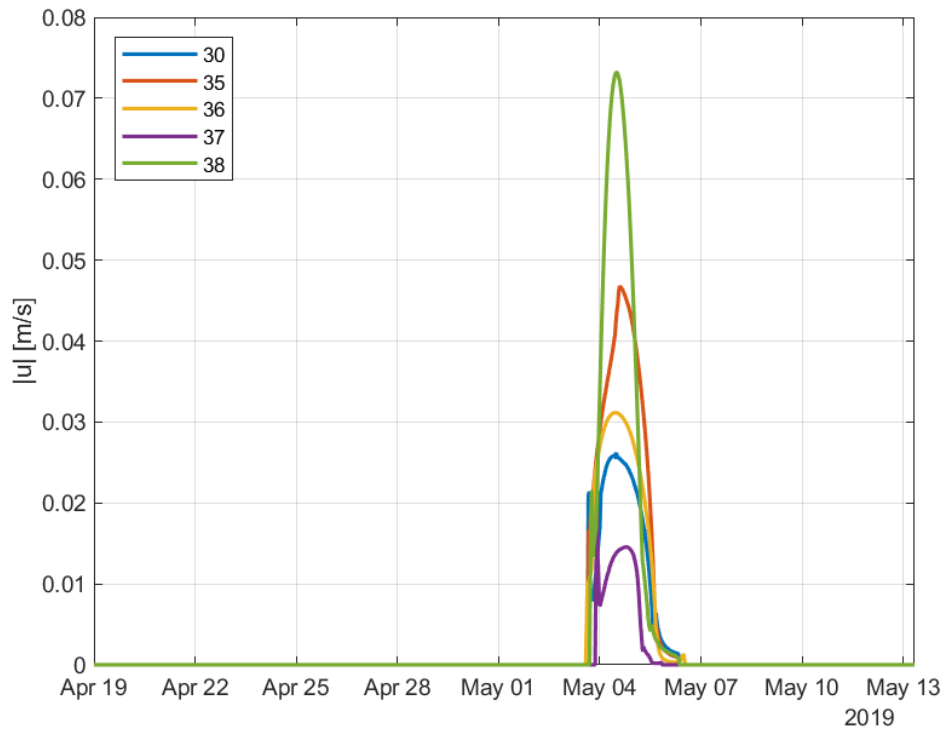
Initiële kruinhoogte [m +NAP]	11.53
Minimale breshoogte [m +NAP]	5.01
Tijdstip ontstaan bres [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]	29/04/2019 10:29:00
Maximale bresbreedte [m]	110

Bij Dreumel (rkm 919) wordt de maximale waterstand op de Waal pas om 10:29 bereikt (in plaats van om 06:30 bij Weurt). De bresgroei start dus ook 4 uur later dan voor Weurt (Tabel 3.3). Direct na het ontstaan van de bres neemt het bresdebiet snel toe tot ongeveer 1550 m³/s, door het nu nog grote verval en de snelle toename van de bresbreedte (zie Figuur 3.10). Hierna neemt het debiet af als gevolg van de afname van het verval. Anders dan voor de bres bij Weurt neemt het verval hier af tot 0. Door de verdere afname van de waterstanden op de Waal na het passeren van de afvoerpiek, wordt het verval hierna zelfs even negatief, waardoor water vanuit de dijkkring terug de Waal instroomt. Het maximale terugstromende debiet is ongeveer 420 m³/s.



Figuur 3.10 Bresdebiet bij Dreumel.

De waterstanden binnen de dijkkring worden nu nauwelijks hoger dan de kruinhoogte van de Maasdijken, waardoor van overloop bijna geen sprake is. De overloop die plaatsvindt begint ongeveer 90 uur na het breken van de Waaldijk (terwijl dit 80 uur was voor de bres bij Weurt). De maximale stroomsnelheden over de Maasdijken zijn nog geen 0.1 m/s, zie Figuur 3.11. Er is voor deze situatie dan ook vrijwel geen toename van het debiet of de waterstanden op de Maas.



Figuur 3.11 Overloopsnelheden op verschillende meetlocaties op de Maasdijken. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten. Let op: dit zijn andere locaties dan weergegeven voor Weurt (Figuur 3.4).

3.2.2 Met bres bij Maasdijk

Tabel 3.4 Variant 1 – Bres Maas.

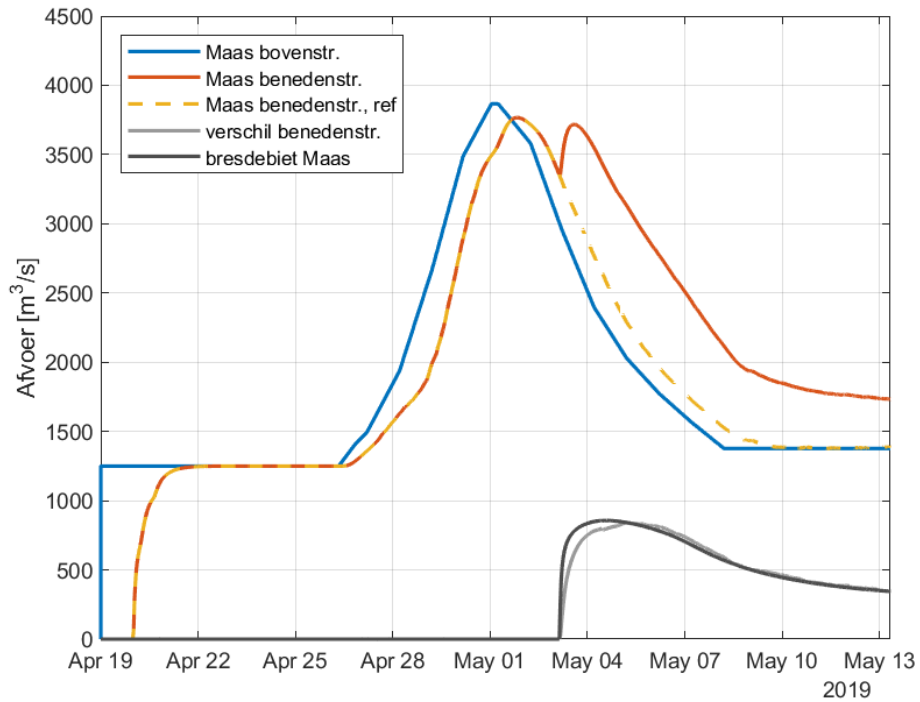
Initiële kruinhoogte [m +NAP]	8.56
Minimale breshoogte [m +NAP]	4.31
Tijdstip ontstaan bres [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]	03/05/2019 03:32:00
Maximale bresbreedte [m]	74

Als echter ter plaatse van de overlooplocatie een bres optreedt (zie Tabel 3.4), dan neemt de afvoer op de Maas wel significant toe. Dit is weergegeven in Figuur 3.12. In dit geval is helemaal geen sprake meer van overloop van de Maasdijken, maar vindt alleen stroming door de bres plaats.

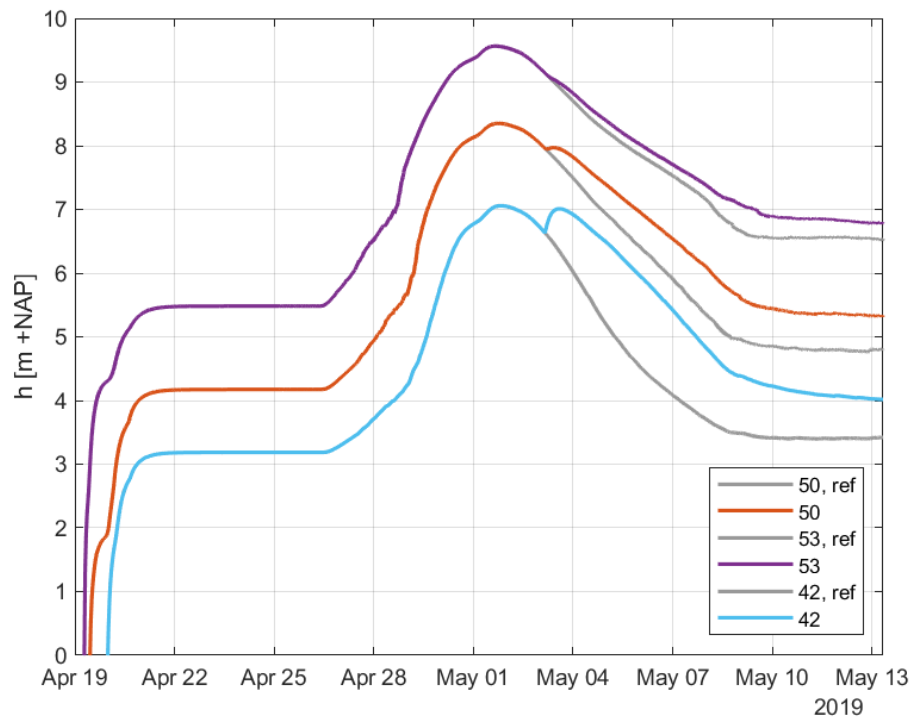
Bij de huidige aanname over het moment waarop de afvoeren op Waal en Maas pieken, leidt de afvoertoeename niet tot een toename van de piekafvoer op de Maas, zoals voor Weurt wel het geval was. Dit komt enerzijds doordat de bres in de Maasdijk nu iets later optreedt, en anderzijds doordat de toename in afvoer nu kleiner is. Ook hier wordt opgemerkt dat de piekafvoer op de Maas wel toe zou kunnen nemen, wanneer de Maasafvoer bij Eijsden op een later moment zou pieken.

Ook de maximale waterstanden op de Maas nemen niet toe, maar de bres leidt wel tot een significante verhoging van waterstanden na de piek (zie Figuur 3.13).

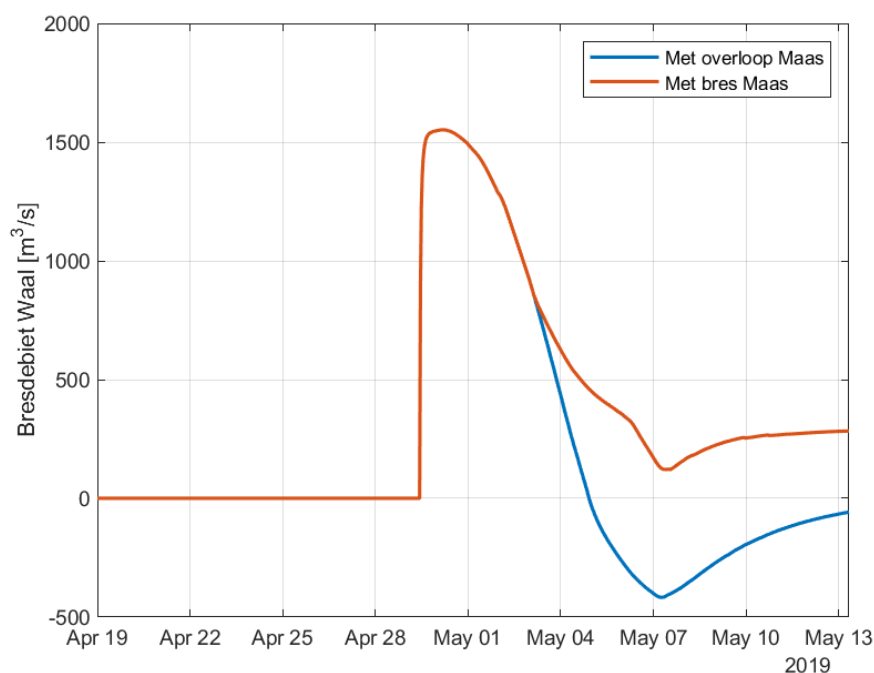
De bres in de Maasdijk heeft daarnaast een interessant effect op de bres in de Waaldijk bij Dreumel, zie Figuur 3.14. Doordat de waterstanden binnen de dijkkring nu sneller afnemen blijft het verval over de bres in de Waaldijk positief en stroomt er dus geen water terug de Waal in.



Figuur 3.12 Afvoer op de Maas ter hoogte van de modelranden en het debiet door de bres in de Maasdijk.



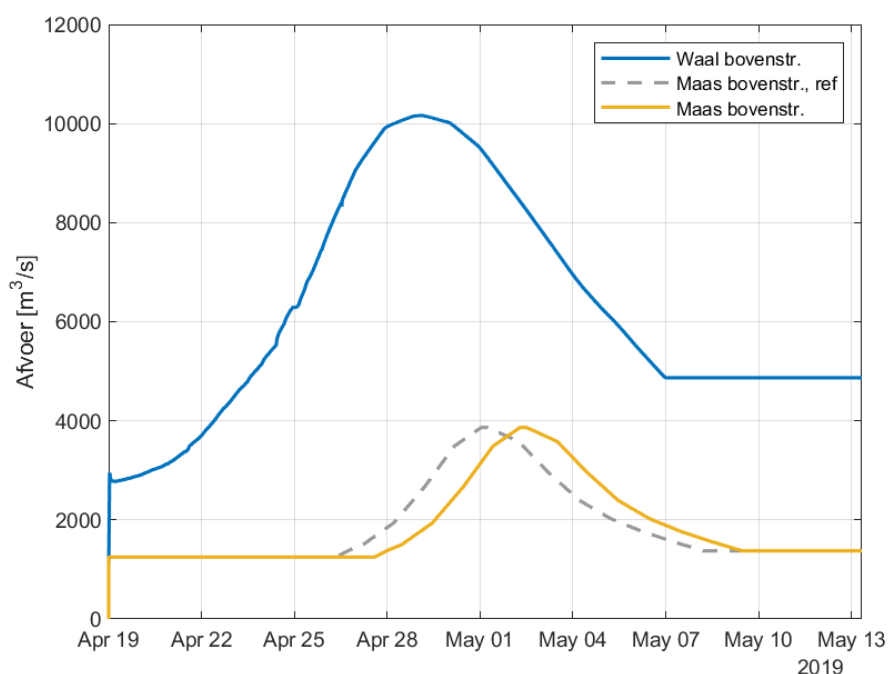
Figuur 3.13 Waterstanden op enkele locaties in de Maas. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.



Figuur 3.14 Bresdebiet bij Dreumel voor de scenario's met overloop en met bres in de Maasdijk.

3.3 Variant 2 – Worst case timing

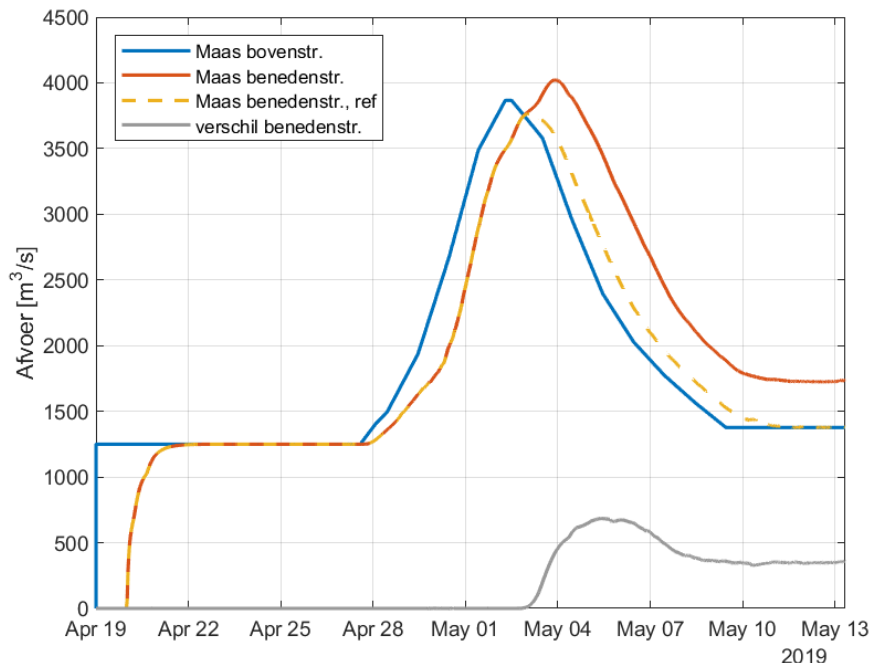
In dit scenario is de afvoerpiek op de Maas 30 uur vertraagd ten opzichte van het basisscenario (zie Figuur 3.15), waardoor, in het geval van een bres bij Weurt, de start van de overstroming of doorbraak van de Maasdijk samenvalt met de maximale afvoer op de Maas.



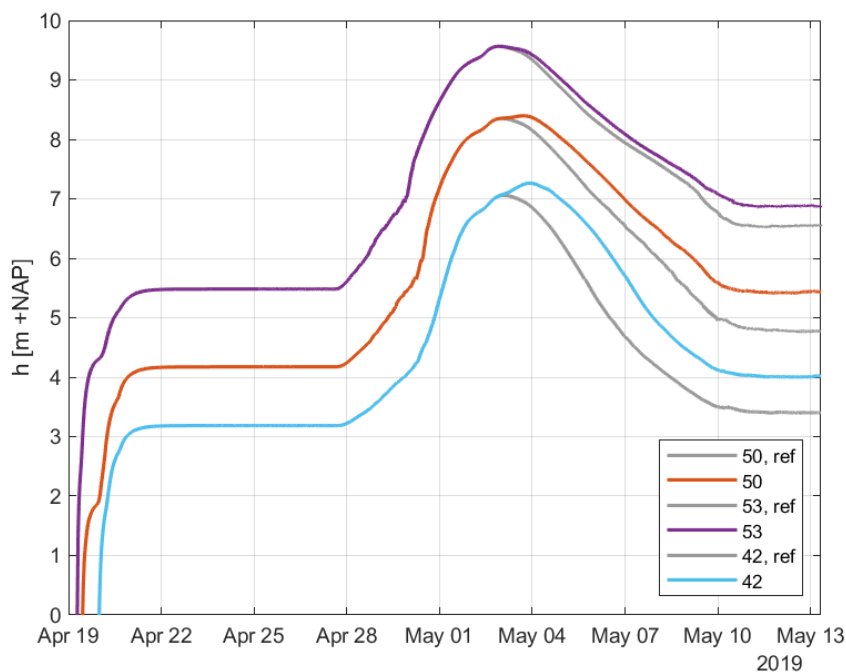
Figuur 3.15 Opgelegde afvoergolven op de bovenstroomse randen van het model. De datums weergegeven op de horizontale as zijn fictief.

3.3.1 Met overloop Maasdijk

De piekafvoer op de Maas neemt in deze variant sterk toe doordat de toestroom vanuit het land van Maas en Waal nu tegelijk optreedt met de passage van de piek in de Maas. De Maasafvoer wordt in deze variant 4022 m³/s, terwijl deze in het basisscenario 3766 m³/s bedroeg. (zie Figuur 3.16). Het maximale verschil in afvoer tussen de referentie met en zonder bres in het Land van Maas & Waal is ongeveer 700 m³/s en treedt op na de piek. De maximale waterstand op de Maas neemt in dit geval toe tot 7.26 m +NAP, in vergelijking met 7.06 m +NAP in het referentiescenario zonder dijkdoorbraken, zie Figuur 3.17.



Figuur 3.16 Afvoer op de Maas ter hoogte van de modelranden.



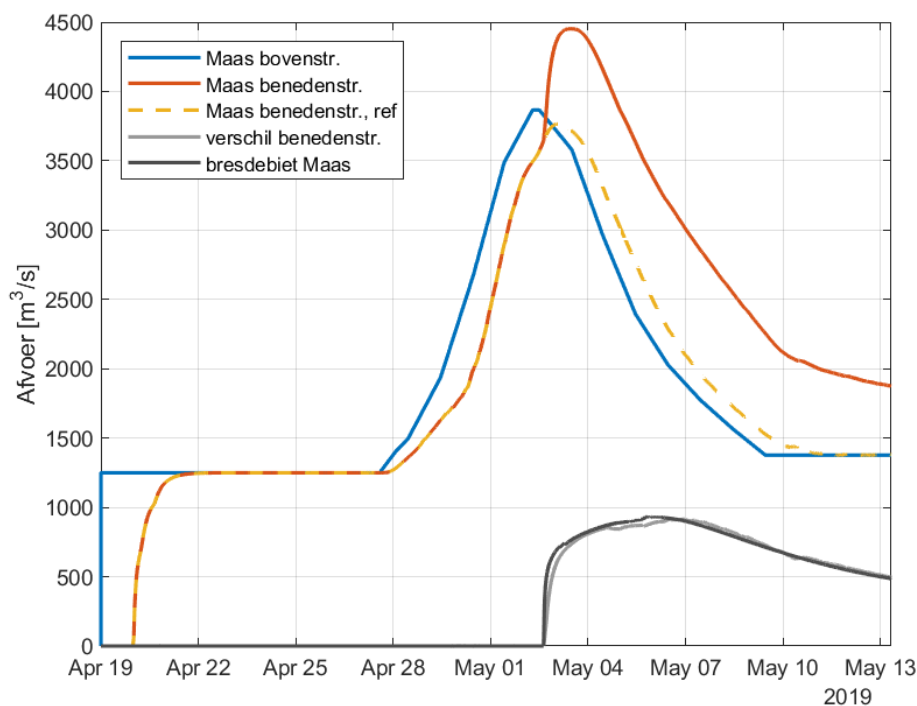
Figuur 3.17 Waterstanden op enkele locaties in de Maas. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.

3.3.2 Met bres bij Maasdijk

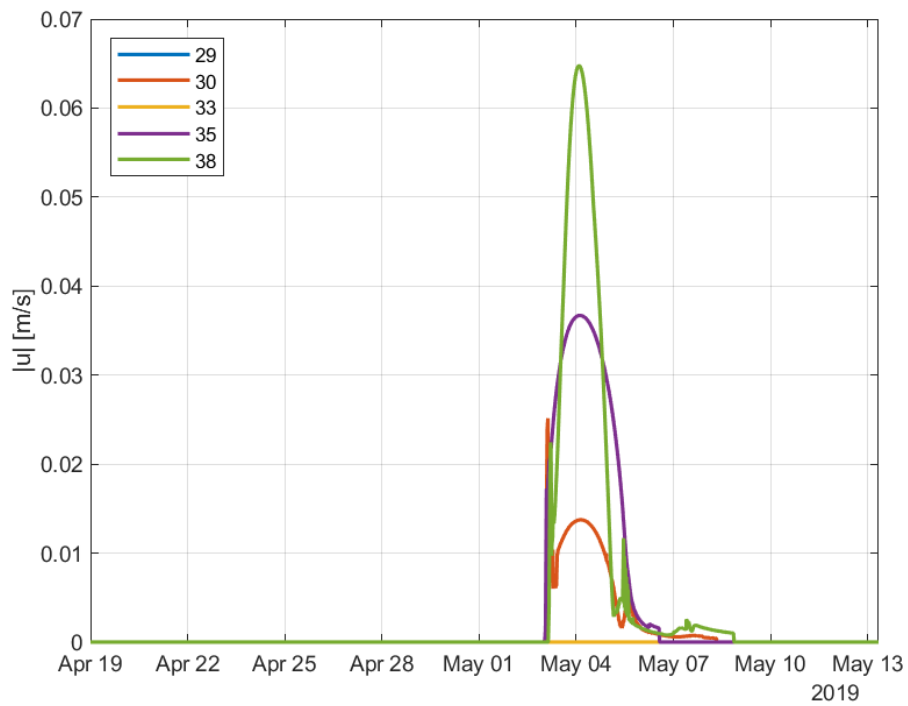
Wanneer met deze 'ongelukkige' timing een bres optreedt in de Maasdijk neemt de piekafvoer op de Maas toe tot 4452 m³/s, zie Figuur 3.18. In ditzelfde geval met andere timing (het basisscenario, zie paragraaf 3.1.2) bedroeg de piekafvoer 'slechts' 4015 m³/s.

Als gevolg van een kleiner verval over de Maasdijk (de waterstanden op de Maas zijn nu immers hoger) stroomt er een kleiner debiet door de bres dan in het scenario waarin de bres pas na de piek op de Maas optreedt, zie paragraaf 3.1.2. Hiermee samenhangend zijn de stroomsnelheden over de dijk heen juist iets groter in dit conservatieve scenario, zoals weergegeven in Figuur 3.19 (vergelijk met Figuur 3.7). Omdat er minder water door de bres stroomt, stroomt er meer water over de kering.

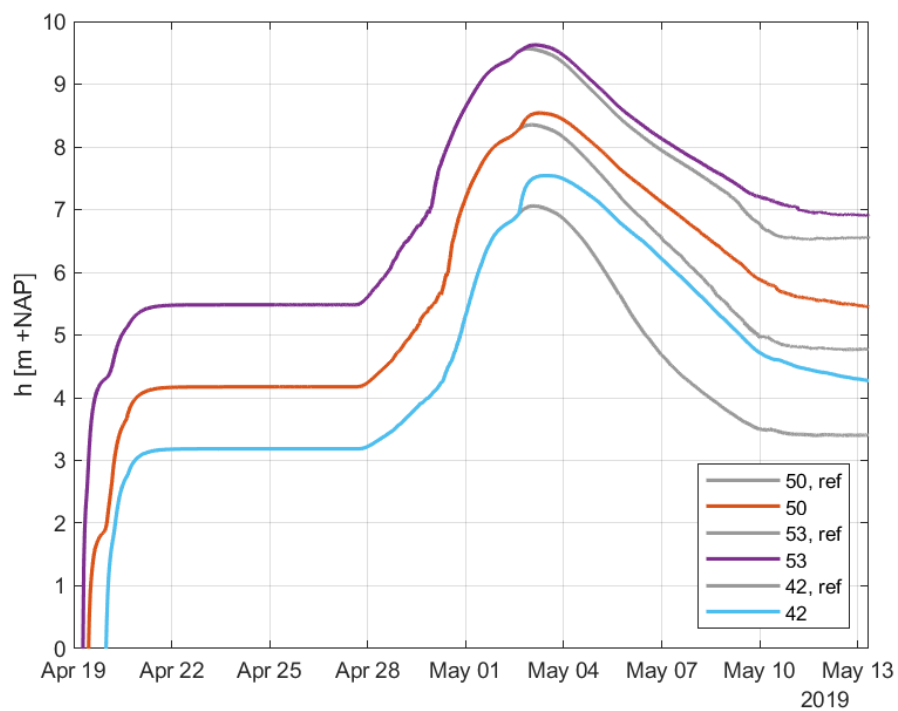
Op meetlocatie 42 (rkm 206.5) neemt de maximale waterstand met bijna 50 cm toe naar 7.54 m +NAP, zie Figuur 3.20.



Figuur 3.18 Afvoer op de Maas ter hoogte van de modelranden en het debiet door de bres in de Maasdijk.



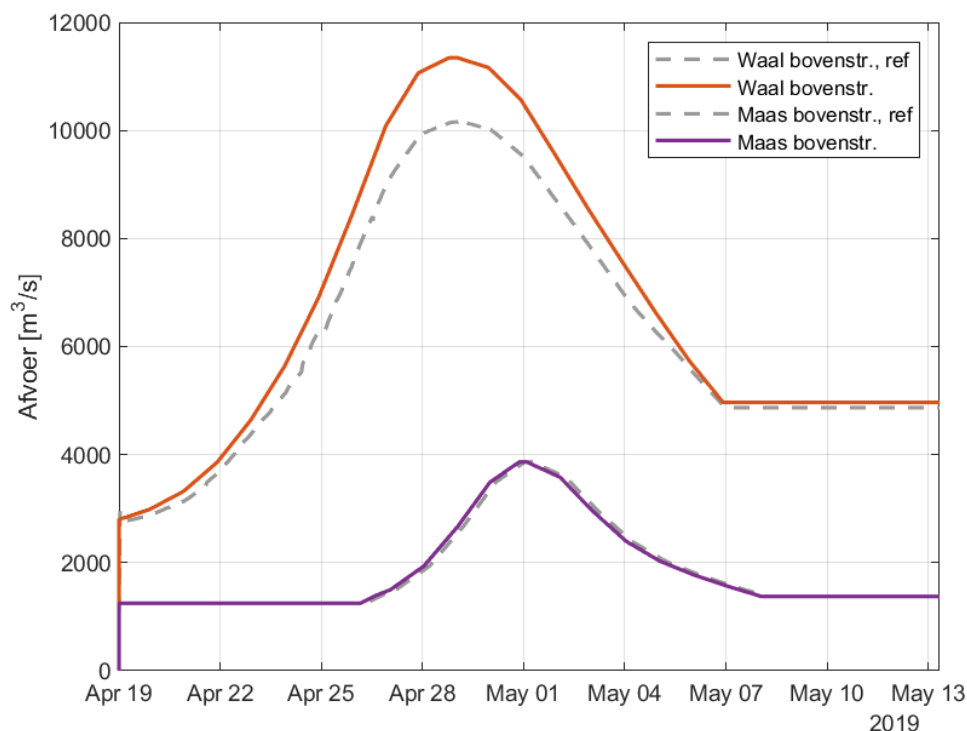
Figuur 3.19 Overloopsnelheden op verschillende meetlocaties op de Maasdijken. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.



Figuur 3.20 Waterstanden op enkele locaties in de Maas. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.

3.4 Variant 3 – Hogere afvoer Waal

Om inzicht te krijgen in de effecten van een nog extremer scenario, zijn twee simulaties uitgevoerd met een hogere piekafvoer op de Waal. Voor deze scenario's is aangenomen dat bij Lobith een afvoergolf met een piek van ongeveer 18000 m³/s (in plaats van 16000 m³/s) binnenkomt (op basis van WBI2017), waarvan 63% naar de Waal gaat. Dit percentage is gebaseerd op de afvoerverdeling voor 18000 m³/s bij Lobith, volgens de Waqua-Rijn-beno15_5-v2 modelschematisatie (regelwerken vast op 16000 m³/s)¹. Ook voor de uitbreiding van de benedenstroomse Qh-relatie naar hogere afvoeren (zie bijlage A) is uitvoer van deze modelschematisatie gebruikt. Deze aanpak resulteert in een afvoergolf bij de bovenrand van het FLS-model als weergegeven in Figuur 3.21, met een piek van 11344 m³/s op de Waal.



Figuur 3.21 Opgelegde afvoergolven op de bovenstroomse randen van het model. De datums weergegeven op de horizontale as zijn fictief.

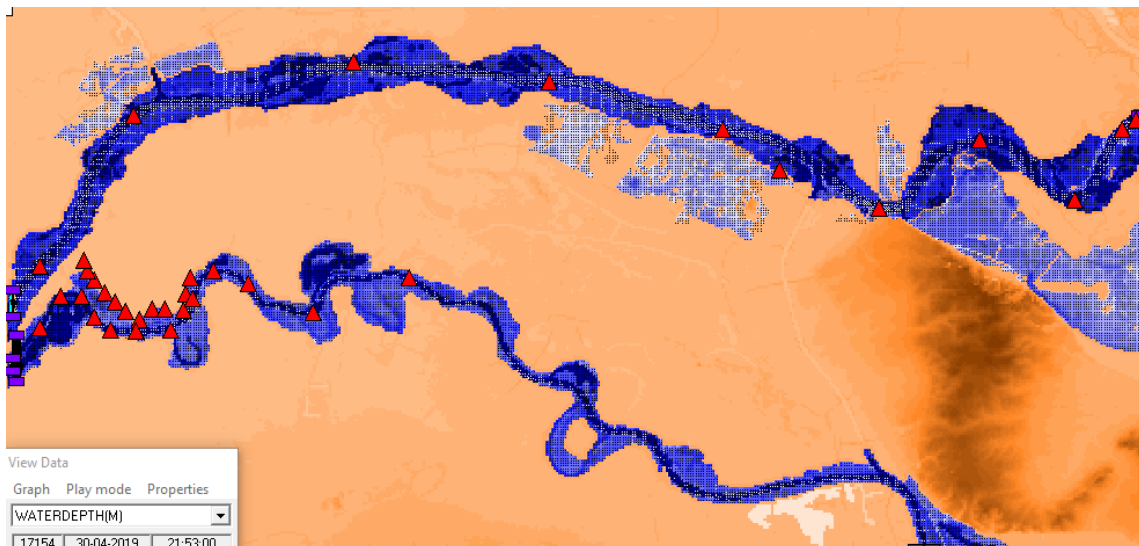
Omdat in dit geval direct gebruik is gemaakt van invoer bij Lobith treedt de piek op de Waal 4 uur eerder op dan in de andere scenario's. Ten behoeve van de consistentie is daarom ook de afvoergolf op de Maas 4 uur naar voren verschoven (zie Figuur 3.21). De maximale waterstand op de Waal bij Weurt wordt hierdoor al op 29 april om 02:10 bereikt. Op dit moment wordt dus ook de bres in de Waaldijk op deze locatie gesimuleerd, zie Tabel 3.5.

Doordat de dijken in het FLS-model niet zijn berekend op zulke hoge afvoeren treedt op verschillende plaatsen overloop van de Waaldijken op, zie Figuur 3.22. Echter, omdat de overloopvolumes klein zijn, is besloten om de invloed hiervan te verwaarlozen bij de interpretatie van de resultaten.

¹ Bij een andere instelling van de regelwerken zou de afvoer op de Waal groter zijn dan hier is aangenomen. Dit verschil kan oplopen tot maximaal ongeveer 400 m³/s.

Tabel 3.5 Variant 3 – Bres Waal bij Weurt.

Initiële kruinhoogte [m +NAP]	15.04
Minimale breshoogte [m +NAP]	9.23
Tijdstip ontstaan bres [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]	29/04/2019 02:10:00



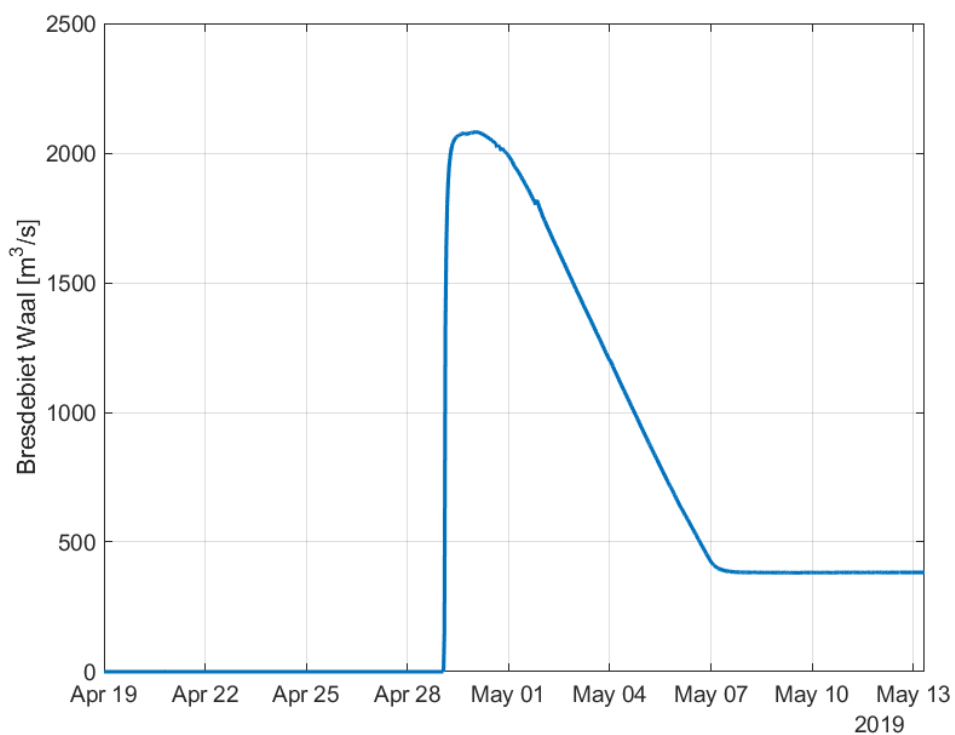
Figuur 3.22 Overstroming van de Waaldijken bij een afvoergolf als weergegeven in Figuur 3.21.

3.4.1 Met overloop Maasdijk

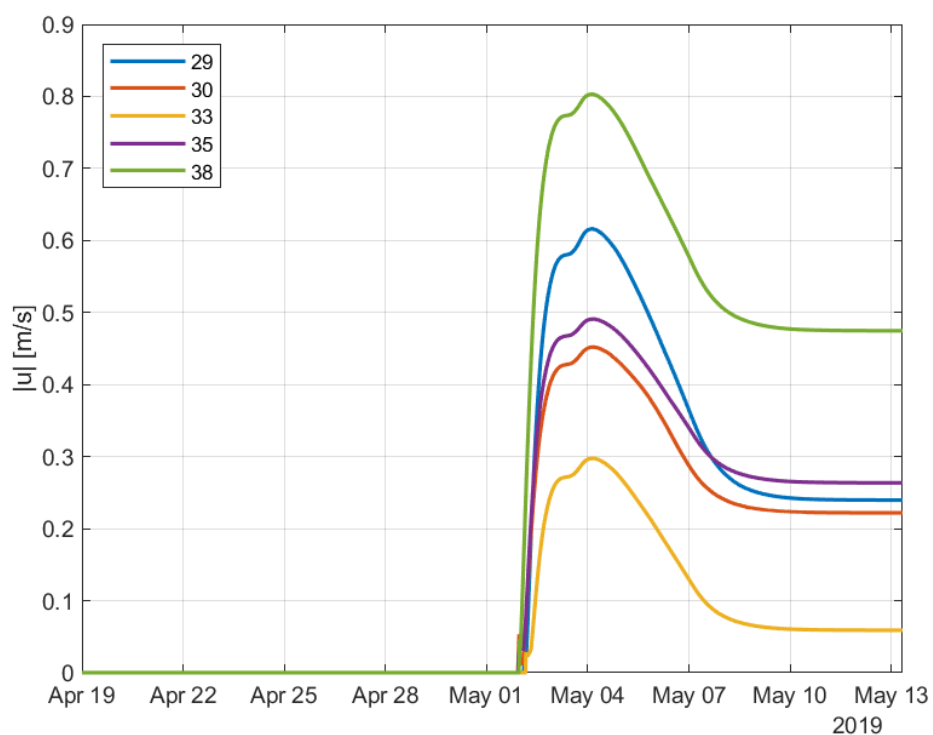
Door het grotere verval over de bres in de Waaldijk is nu ook het bresdebiet hoger dan voor het scenario met lagere Waalafvoer. Zoals te zien in Figuur 3.23 is het maximale bresdebiet nu bijna 2100 m³/s. Met 170 m wordt ook de bresbreedte groter dan in het basisscenario (155 m).

Na het doorbreken van de Waaldijk bij Weurt en het overstromen van de dijkkring, beginnen de Maasdijken op 1 mei om 19:12 over te lopen, dat wil zeggen 65 uur nadat de bres bij Weurt optreedt. Dit is 15 uur eerder dan voor het scenario met een piekafvoer van 10.168 m³/s (16.000 m³/s bij Lobith).

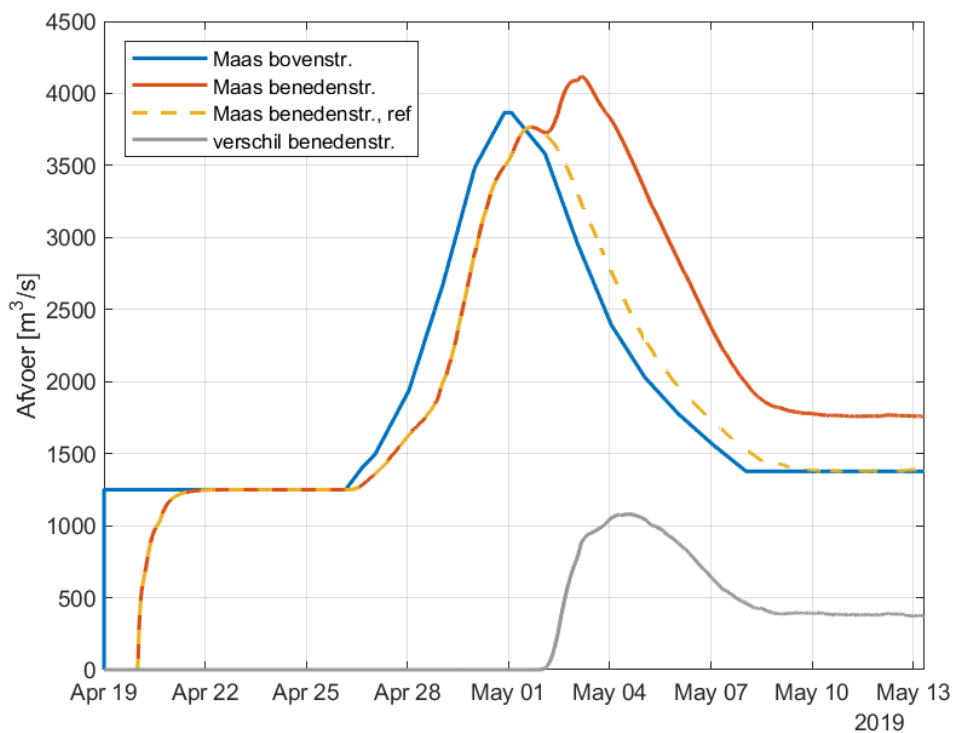
De overloopsnelheden hebben dezelfde ordegrrootte als in het scenario met lagere afvoer, zie Figuur 3.24. Het debiet dat de Maas instroomt is echter een stuk groter. Figuur 3.25 laat zien dat de piekafvoer op de Maas als gevolg van het overstromen van de Maasdijken toeneemt tot 4117 m³/s. Dat is meer dan in variant 2 (ongunstige timing, zie paragraaf 3.3.1). De piekwaterstand op locatie 42 (rkm 206.5) neemt toe met 27 cm ten opzichte van het referentiescenario, zie Figuur 3.26.



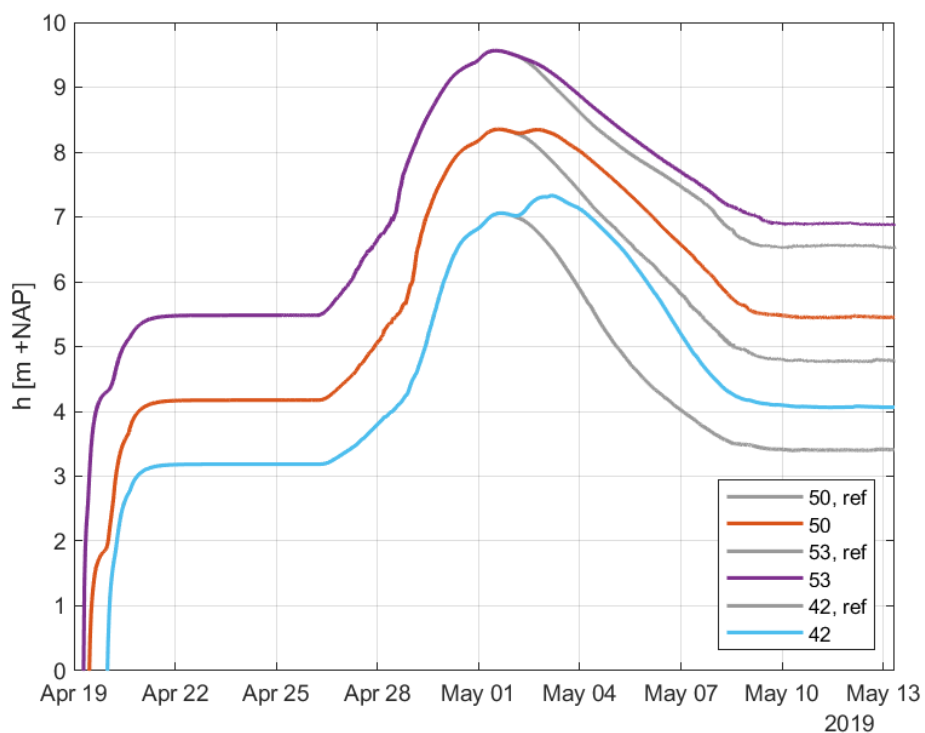
Figuur 3.23 Bresdebiet bij Weert.



Figuur 3.24 Overloopsnelheden op verschillende meetlocaties op de Maasdijken. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.



Figuur 3.25 Afvoer op de Maas ter hoogte van de modelranden.



Figuur 3.26 Waterstanden op enkele locaties in de Maas. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.

3.4.2 Met bres bij Maasdijk

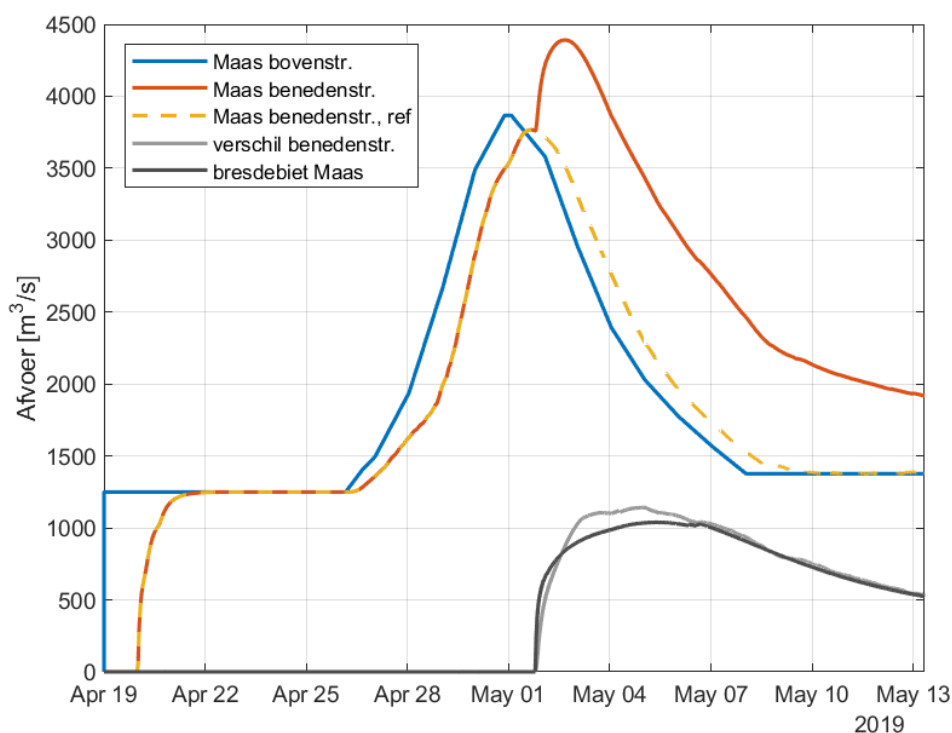
De bres in de Maasdijk treedt nu op 1 mei om 19:12 op, zie Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Variant 3 – Bres Maas.

Initiële kruinhoogte [m +NAP]	8.56
Minimale breshoogte [m +NAP]	4.31
Tijdstip ontstaan bres [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]	01/05/2019 19:12:00

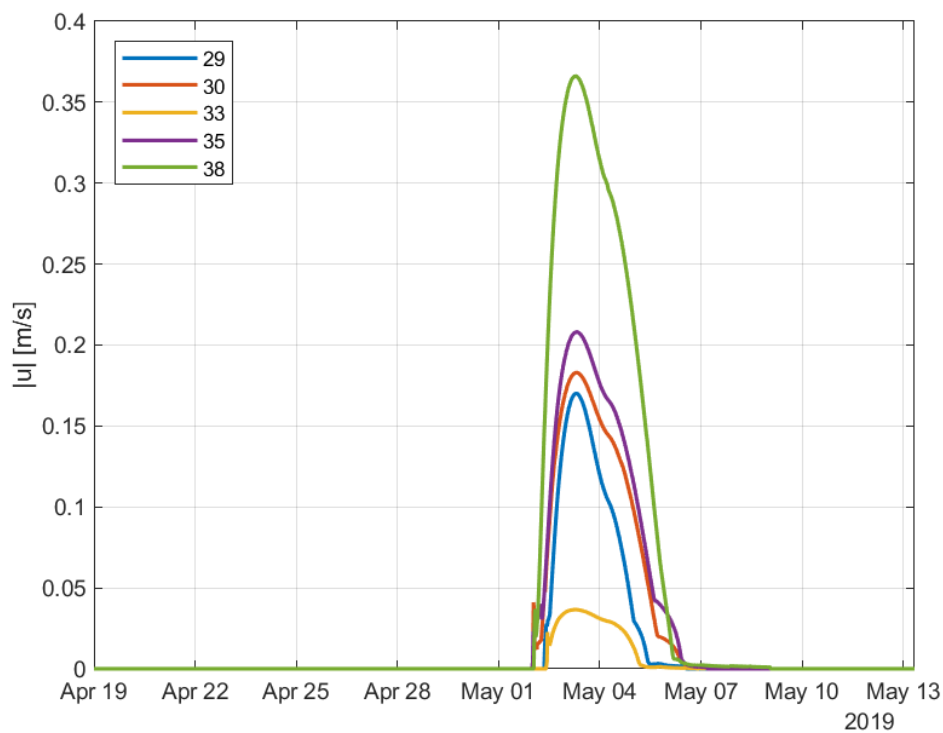
Door de kortere periode tussen de bres bij Weurt en de bres in de Maasdijk (65 uur in plaats van 80 uur in het basisscenario), is de timing van de bres nu ongunstiger ten opzichte van de afvoergolf op de Maas. Figuur 3.27 laat zien dat de afvoerpiek door de bres vlak na de afvoerpiek op de Maas optreedt. In combinatie met het feit dat de bresdebieten ook groter zijn dan in het basisscenario, leidt dit tot een significant hogere afvoerpiek op de Maas (4390 m³/s in vergelijking met 4015 m³/s in het basisscenario). Ook de maximale toename in afvoer is met 1143 m³/s een stuk groter. Deze toename in afvoer komt niet alleen door de stroming door de bres, maar ook door overloop van de Maasdijken. Dit is te zien aan het feit dat de grijze lijn in Figuur 3.27 (afvoertoeename) beduidend hoger ligt dan de zwarte lijn (debiet door de bres in de Maasdijk). Als we vervolgens naar de overloopsnelheden in Figuur 3.28 kijken, zien we dat deze inderdaad groter zijn dan in het basisscenario met een afvoer van 16.000 m³ /s te Lobith.

De piekafvoer op de Maas is in dit scenario echter niet zo groot als in het scenario met nog slechtere timing, zie paragraaf 3.3.2.

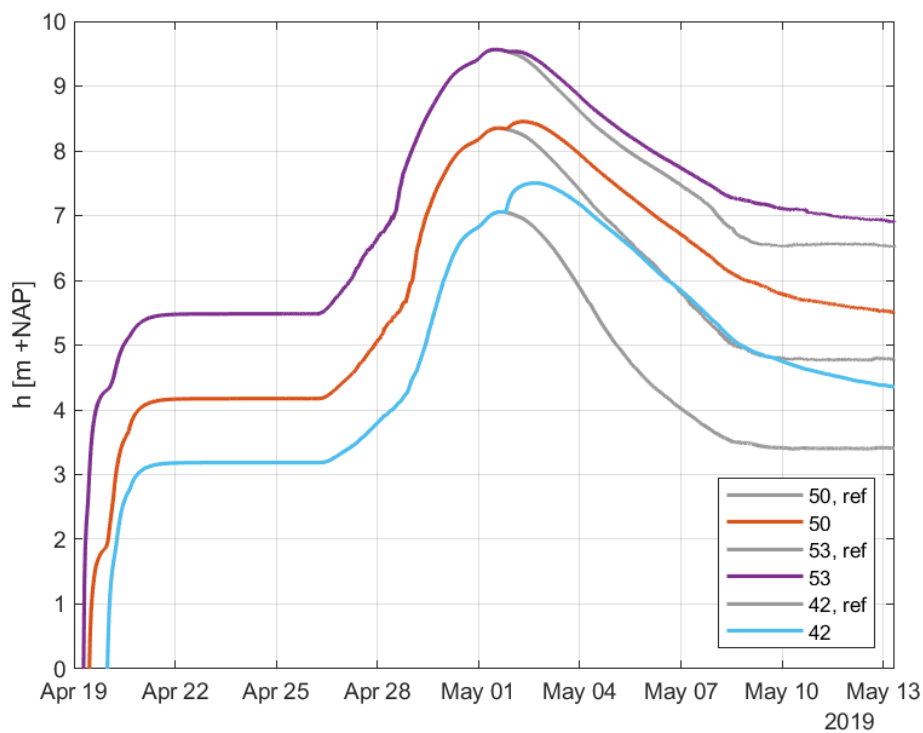


Figuur 3.27 Afvoer op de Maas ter hoogte van de modelranden en het debiet door de bres in de Maasdijk.

De waterstandspiek op meetlocatie 42 (rkm 206.5) neemt in dit geval toe tot 7.50 m +NAP, zie Figuur 3.29.



Figuur 3.28 Overloopsnelheden op verschillende meetlocaties op de Maasdijken. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.

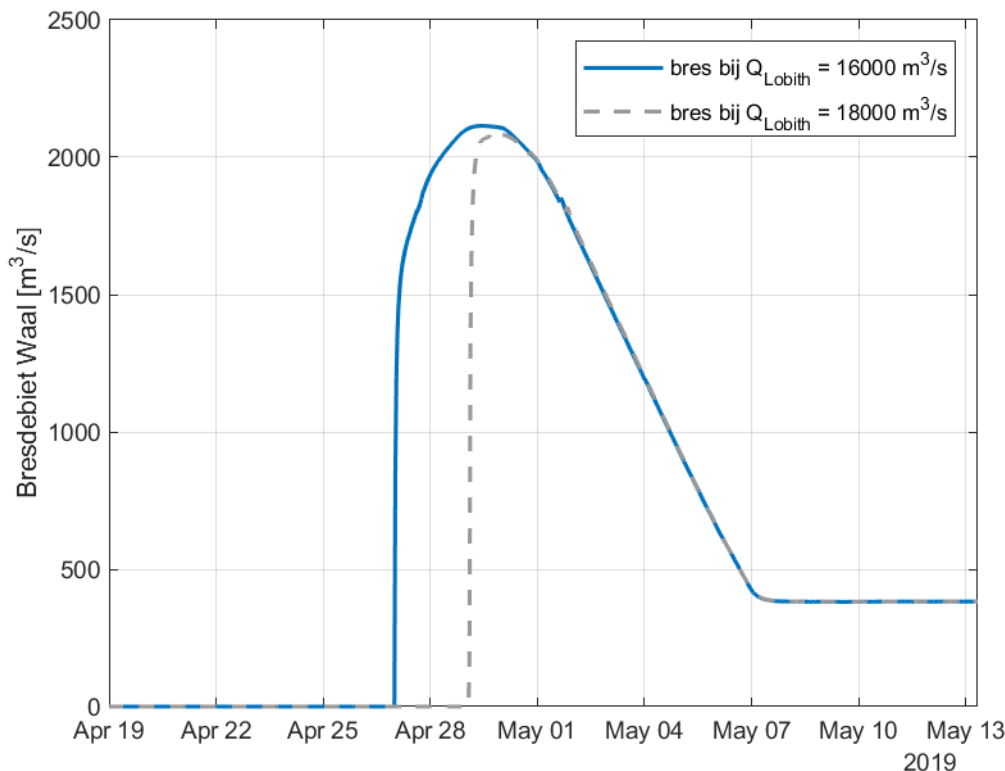


Figuur 3.29 Waterstanden op enkele locaties in de Maas. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.

3.5 Variant 4 – Hogere afvoer Waal, bres Waal voor piekafvoer

3.5.1 Met overloop Maasdijk

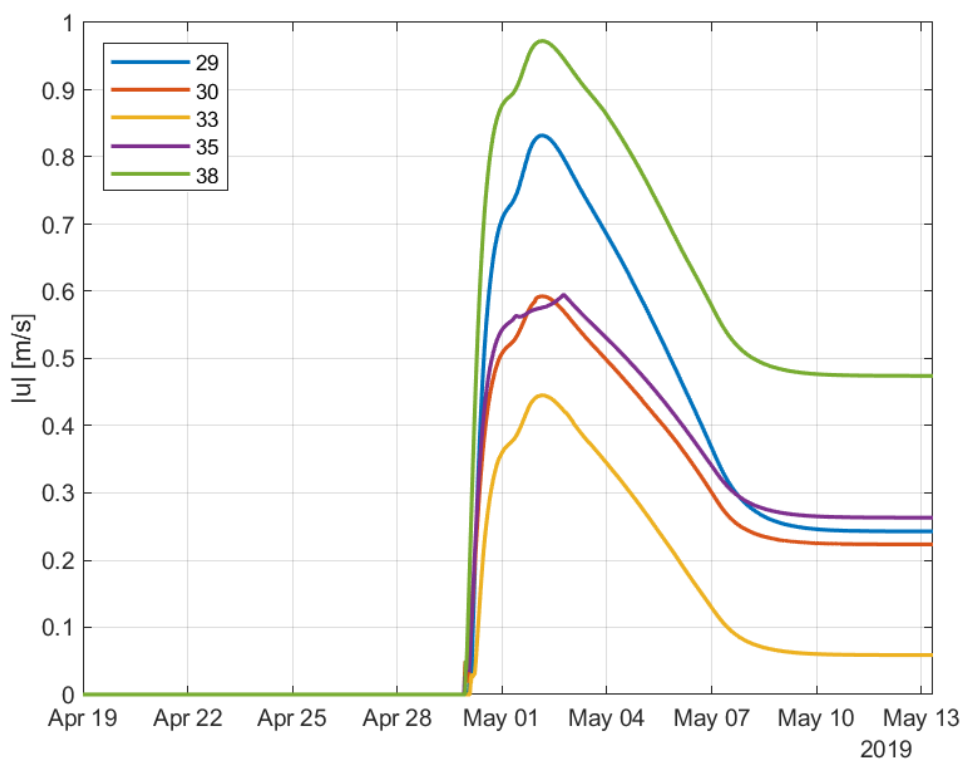
Deze variant bouwt voort op variant 3, zie paragraaf 3.4. In deze variant is aangenomen dat de Waaldijk breekt wanneer een debiet van 16000 m³/s bij Lobith (10170 m³/s op de Waal) wordt overschreden. De dijk breekt in deze variant *voordat* de piekafvoer van 18.000 m³/s arriveert. Met deze aanname breekt de dijk door op 26 april om 23:54, 50 uur voordat de piekwaterstand wordt bereikt. Het maximale bresdebiet door de Waaldijk is vergelijkbaar met dat in variant 3, maar de duur van de instroming is nu veel groter, zie Figuur 3.30. Hierdoor stroomt een groter watervolume de dijkring in.



Figuur 3.30 Bresdebiet bij Weurt.

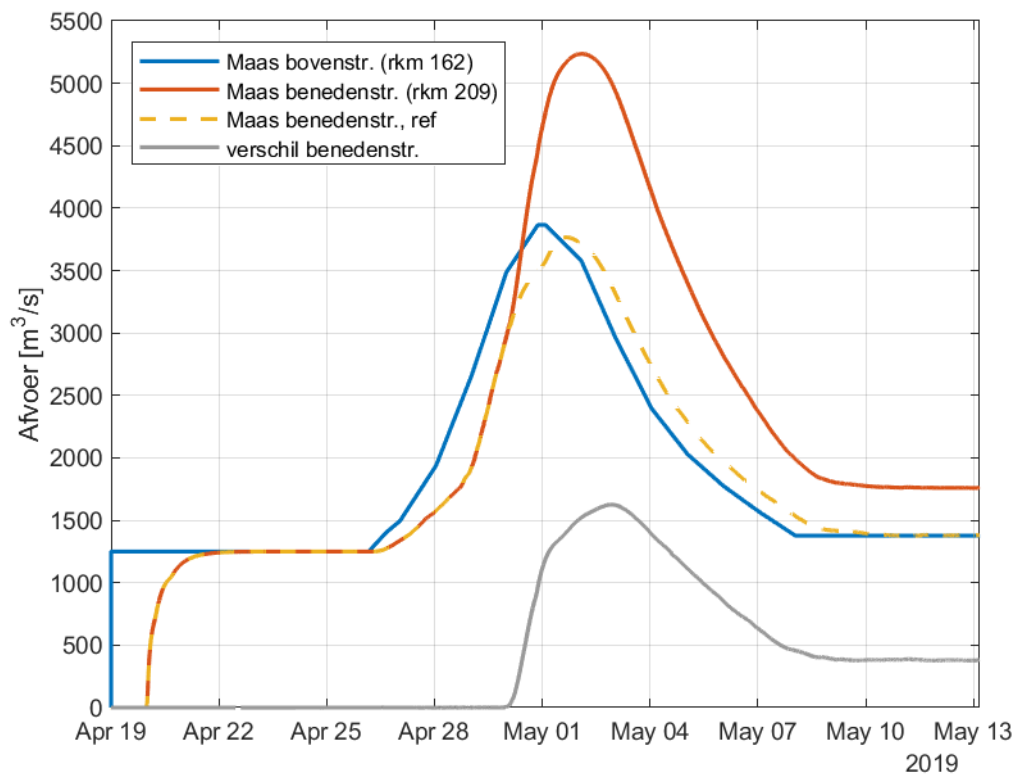
De tijd tussen de bres in de Waaldijk en het overlopen van de Maasdijk is met 67 uur ongeveer net zo groot als in variant 3. Doordat de bres in de Waaldijk echter zoveel eerder optreedt, begint de overloop van de Maasdijk nu ruim voordat op deze locatie de maximale afvoer op de Maas wordt bereikt. Het overlopen houdt in deze variant meer dan een week aan. Na enkele dagen worden overloopsnelheden van bijna 1 m/s bereikt, zie Figuur 3.31. Als gevolg van het overlopen van de dijken wordt de piekafvoer op de Maas nu groter dan in elk ander scenario: 5236 m³/s. Deze extreme waarde wordt bereikt door een grote toename in afvoer, die min of meer samenvalt met de afvoerpiek op de Maas afkomstig van bovenstrooms (Figuur 3.32).

De piekwaterstand op de benedenstroomse rand wordt 8.5 m, zoals te zien in Figuur 3.33. Volgens het model kunnen de Maasdijken deze waterstandstoename van ruim 1.3 m (locatie 42) niet aan: ook de zuidelijke Maasdijken beginnen over te lopen, zie Figuur 3.34².

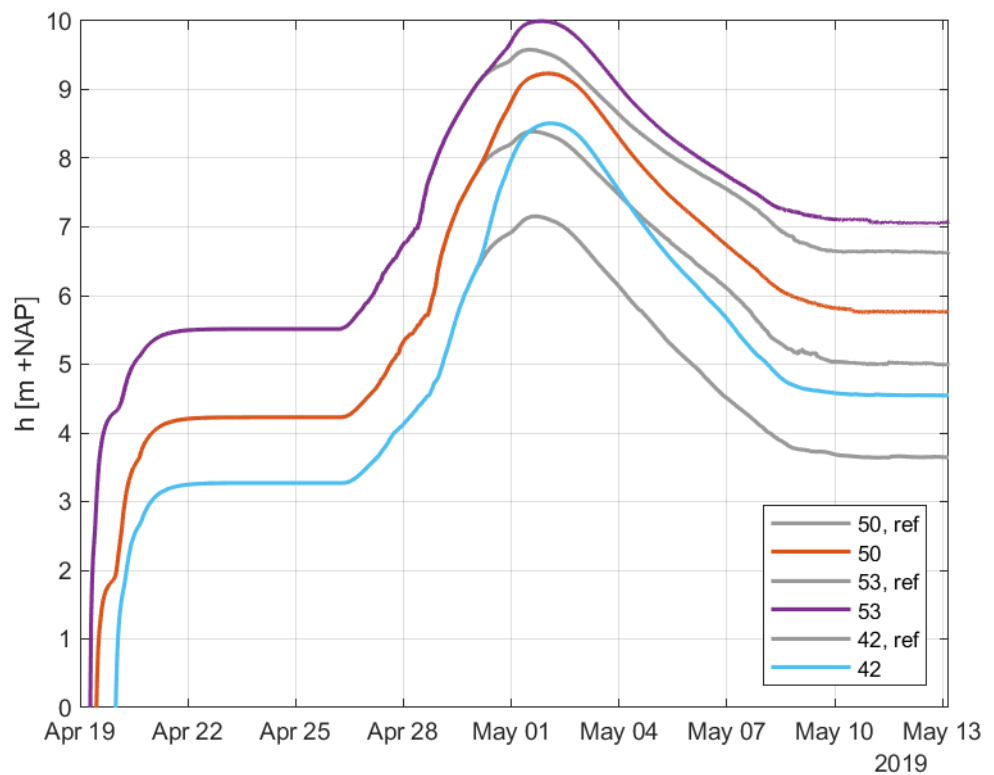


Figuur 3.31 Overloopsnelheden op verschillende meetlocaties op de Maasdijken. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.

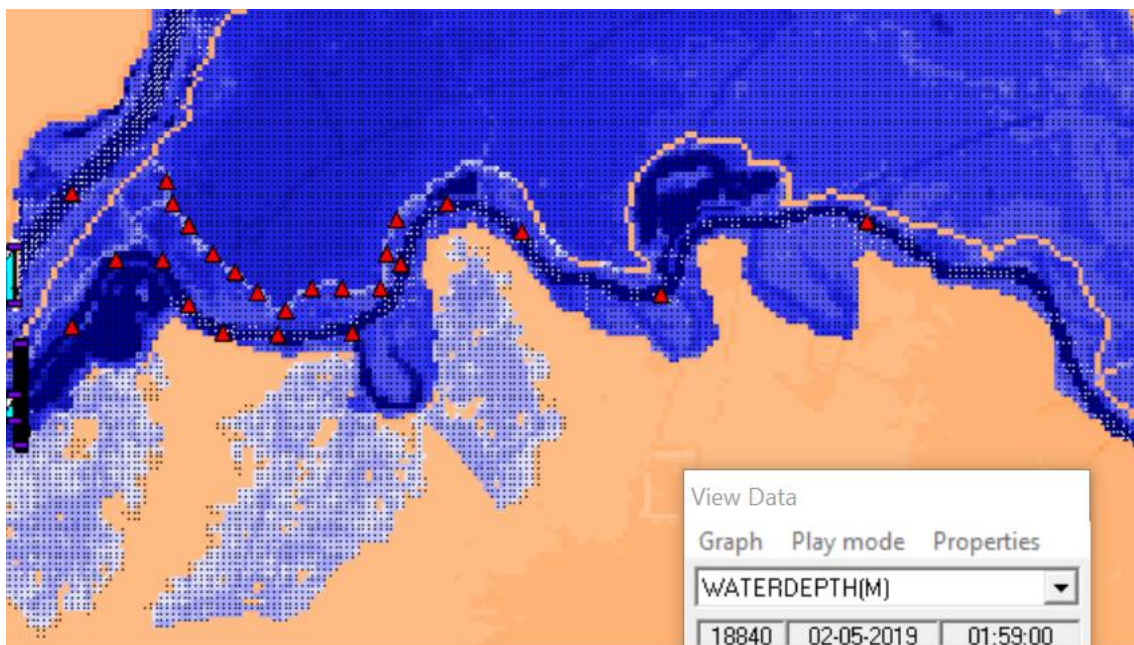
² De Maasdijken zijn qua locatie en hoogte overgenomen uit het FLS model. Er is niet gecontroleerd of de hoogte van de zuidelijke Maasdijk precies klopt daar het doel van dit model niet is om overstromingen ten zuiden van de Maas te simuleren.



Figuur 3.32 Afvoer op de Maas ter hoogte van de modelranden.



Figuur 3.33 Waterstanden op enkele locaties in de Maas. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.

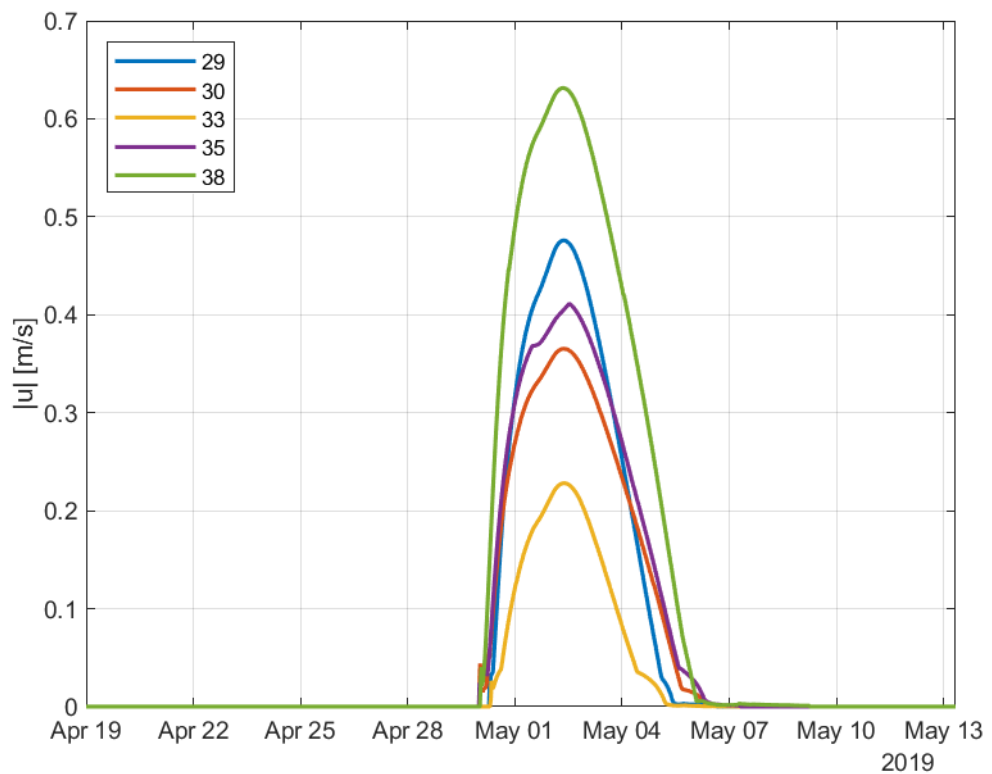


Figuur 3.34 Overloop van de zuidelijke Maasdijk als gevolg van de afvoertoename weergegeven in Figuur 3.32.

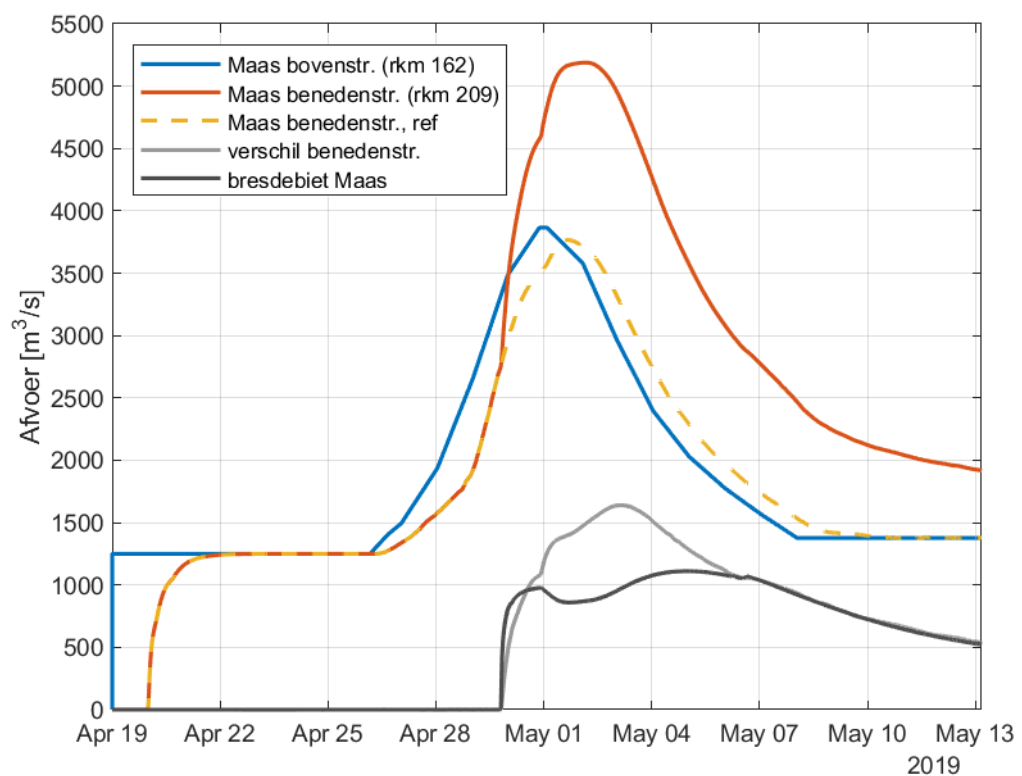
3.5.2 Met bres bij Maasdijk

Onder de aannames van deze variant breekt de noordelijke Maasdijk door op 29 april om 19:19. Het grote volume water dat in deze situatie door de bres in de Waaldijk de dijkkring binnenstroomt kan echter niet helemaal door de bres in de Maasdijk afgevoerd worden. Ook door overloop van de Maasdijk stroomt een significant debiet de Maas in. Het verval over en het debiet door de bres neemt hierdoor af. Figuur 3.35 geeft een beeld van de stroomsnelheden over de dijk heen, terwijl in Figuur 3.36 uit de zwarte en grijze lijn kan worden opgemaakt welk deel van de debietstoeiname voor rekening van de bres komt, en welk deel door overloop van de dijken.

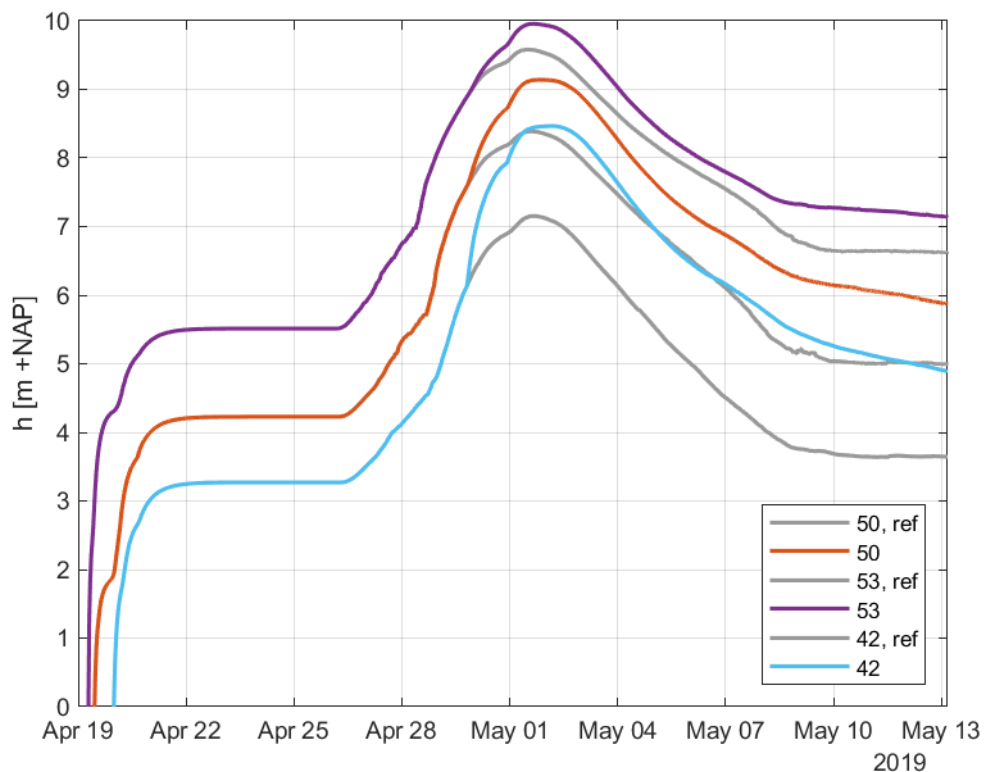
Het doorbreken en overlopen van de Maasdijk leidt tot een debietstoeiname op de Maas van maximaal 1640 m³/s. Het maximale debiet bij de benedenstroomse rand wordt 5189 m³/s, vergelijkbaar met het scenario waarin alleen overloop van de Maasdijken plaatsvindt (paragraaf 3.5.1). De piekwaterstand op locatie 42 wordt 8.47 m +NAP (Figuur 3.37). Ook in deze situatie stromen de zuidelijke Maasdijken in het model over als gevolg van de grote waterstandstoeiname op de Maas.



Figuur 3.35 Overloopsnelheden op verschillende meetlocaties op de Maasdijken. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.



Figuur 3.36 Afvoer op de Maas ter hoogte van de modelranden en het debiet door de bres in de Maasdijk.



Figuur 3.37 Waterstanden op enkele locaties in de Maas. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.

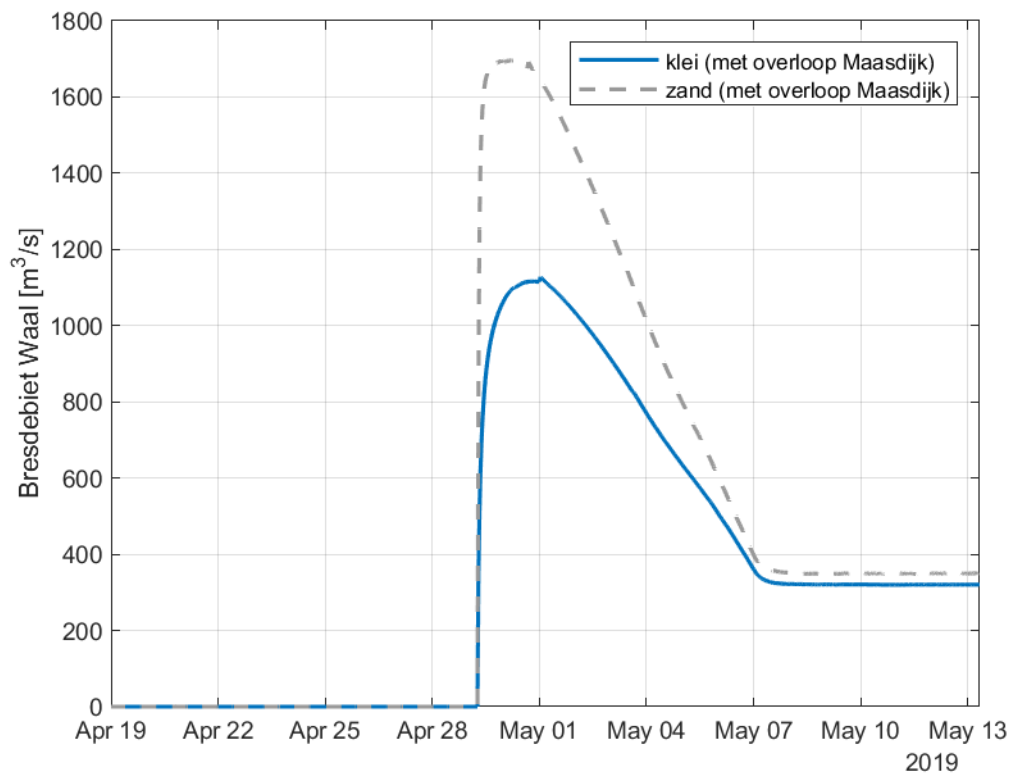
3.6 Variant 5 – Kleinere bres (minder snelle bresgroei)

In deze paragraaf worden twee simulaties beschreven waarmee de invloed van een belangrijke aanname met betrekking tot de bresgroei wordt onderzocht. Tot nu toe is ervan uitgegaan dat we te maken hebben met zanddijken voor zowel de Waal als de Maas. In de formulering van Verheij – van de Knaap voor bresgroei gebruiken we daarom een waarde van $u_c = 0.2$ m/s voor de kritieke stroomsnelheid, die representatief is voor zanddijken. Wanneer de stroomsnelheid door de bres deze waarde overschrijdt groeit de bres in de breedte. Daarnaast beïnvloedt u_c de snelheid waarmee bresgroei plaatsvindt.

Wanneer we er echter vanuit gaan dat we te maken hebben met kleidijken, moet een waarde van $u_c = 0.5$ m/s worden gebruikt in de bresgroeiformulering. Hierdoor zullen de bresgroei en als gevolg daarvan ook de bresbreedte en het bresdebiet afnemen. Om te onderzoeken in hoeverre dit de resultaten beïnvloedt worden de twee basisscenario's opnieuw uitgevoerd met $u_c = 0.5$ m/s voor zowel de Waal- als de Maasdijk.

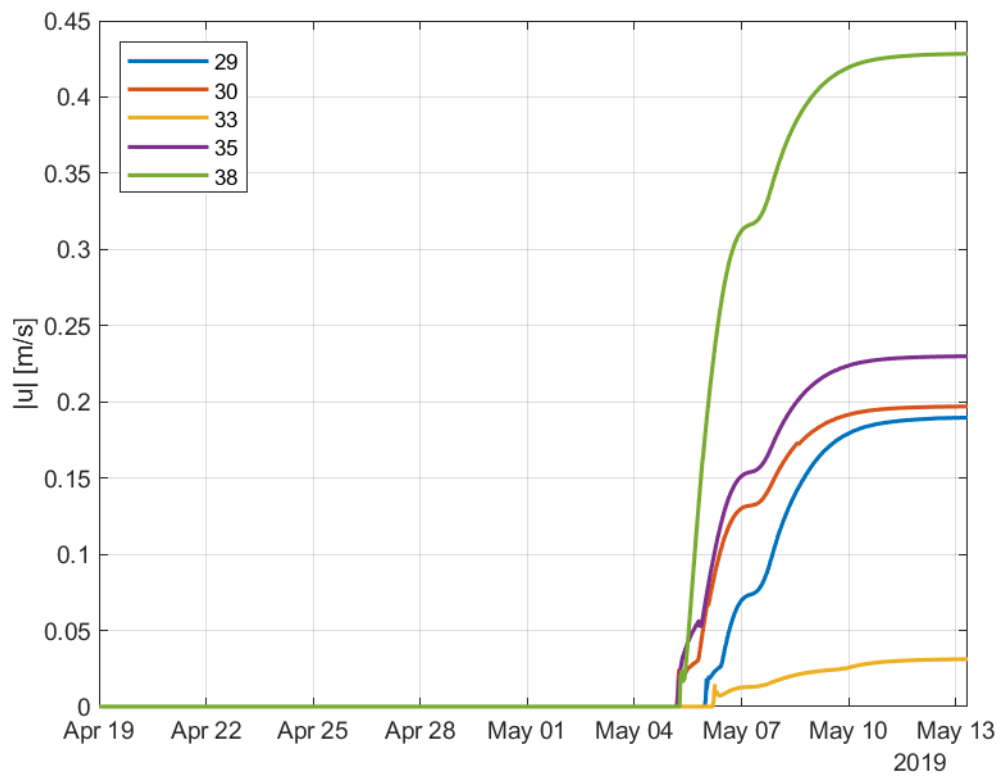
3.6.1 Met overloop Maasdijk

Zoals te zien in Figuur 3.38 neemt het bresdebiet door de Waaldijk inderdaad significant af wanneer wordt uitgegaan van een kleidijk in plaats van een zanddijk. Het maximale bresdebiet is 1127 m³/s in de nieuwe situatie, in vergelijking met bijna 1700 m³/s als sprake is van een zanddijk. De maximale bresbreedte is nu 88 m ten opzichte van 155 m voor een zanddijk.

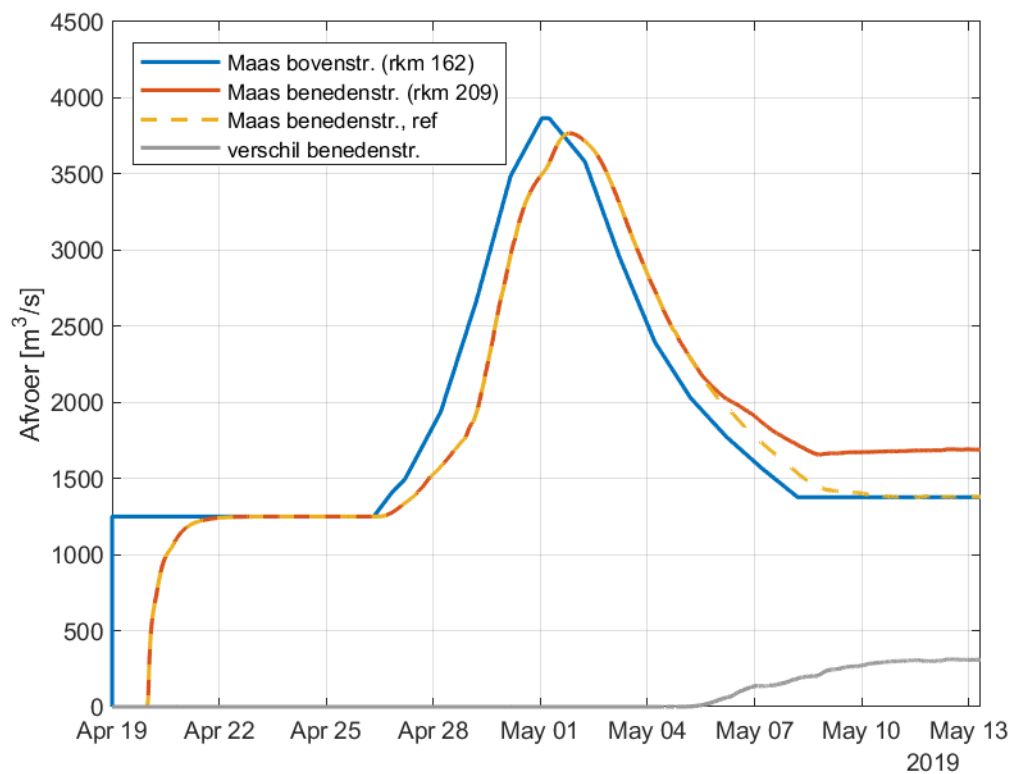


Figuur 3.38 Bresdebiet bij Weurt.

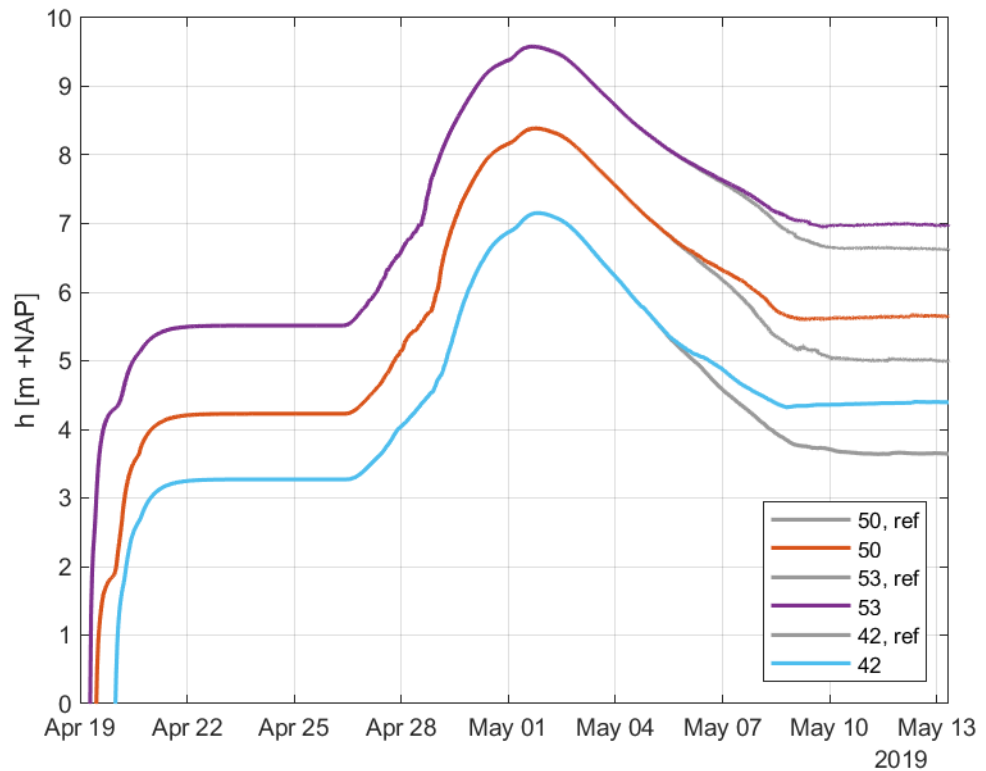
De dijkkring loopt hierdoor minder snel onder, waardoor de Maasdijk pas 130 uur (meer dan 5 dagen) na de bres in de Waaldijk begint over te lopen (Figuur 3.39), ten opzichte van 80 uur na de bres wanneer de Waal zanddijken heeft. Het effect van negatieve systeemwerking treedt in dit geval dus pas ruim na de afvoerpiek op de Maas op, waardoor de hoogwaterperiode in wezen niet wordt verlengd (zie Figuur 3.40 en Figuur 3.41). Ook de toename in afvoer is met maximaal zo'n 300 m³/s beperkt.



Figuur 3.39 Overloopsnelheden op verschillende meetlocaties op de Maasdijken. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.



Figuur 3.40 Afvoer op de Maas ter hoogte van de modelranden.

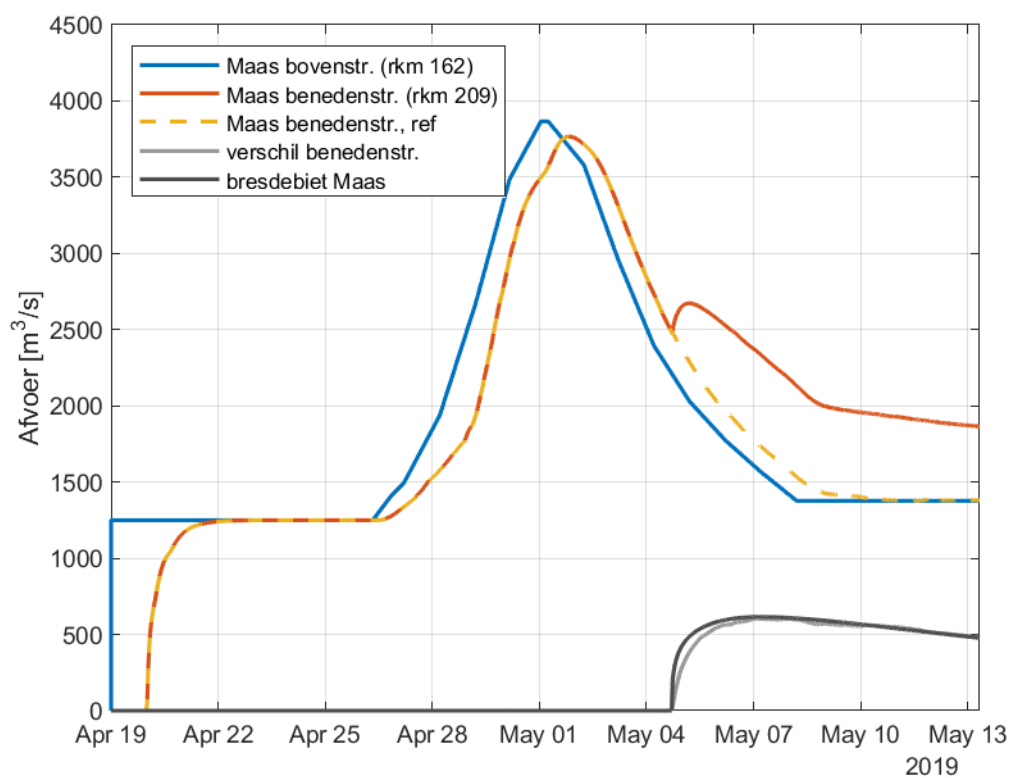


Figuur 3.41 Waterstanden op enkele locaties in de Maas. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.

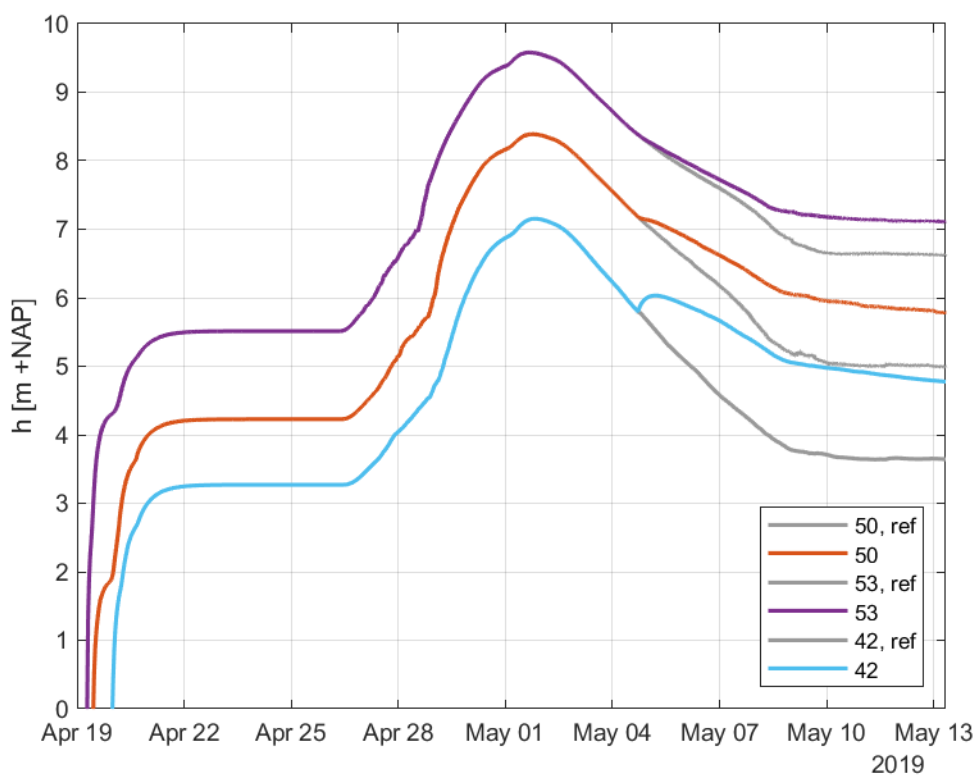
3.6.2 Met bres bij Maasdijk

Als in de Maasdijk een bres optreedt is er van overloop van de Maasdijken geen sprake meer. De toename in afvoer op de Maas (maximaal 605 m³/s) komt dus volledig voor rekening van het debiet door de bres, zoals te zien in Figuur 3.42. Dit is opnieuw een stuk minder dan de bijna 1000 m³/s toename die optreedt voor het basisscenario (met zanddijk). Naast de kleinere toevoer van water door de bres in de Waaldijk wordt deze afname ook veroorzaakt door de kleinere bres in de Maasdijk. De breedte van de bres in de Maasdijk is nu maximaal 49 m, ten opzichte van 76 m in het basisscenario.

Ook in dit geval nemen piekafvoer en piekwaterstand op de Maas niet toe, zie Figuur 3.42 en Figuur 3.43.



Figuur 3.42 Afvoer op de Maas ter hoogte van de modelranden en het debiet door de bres in de Maasdijk.



Figuur 3.43 Waterstanden op enkele locaties in de Maas. Zie Figuur 3.2 voor de ligging van de meetpunten.

3.7 Overzicht resultaten

Onderstaande tabellen geven een overzicht van de resultaten van alle varianten, voor overloop van de Maasdijk (Tabel 3.7) en voor bresvorming in de Maasdijk Tabel 3.8.

Bij de vergelijking van de resultaten die nu gemaakt kan worden valt een aantal zaken op. Ten eerste blijkt uit de resultaten duidelijk het verband tussen het debiet door de bres in de Waaldijk en de tijd die na het ontstaan van de bres verstrijkt voordat overloop van de Maasdijk begint: hoe hoger het debiet, hoe korter deze tijdsduur. Dit verband is voor de hand liggend, maar belangrijk voor het effect van negatieve systeemwerking. Onder de aannames die in deze studie zijn gedaan geldt immers dat hoe sneller de overloop of bres in de Maasdijk optreedt na de bres bij de Waal, hoe meer het effect van negatieve systeemwerking samenvalt met de piek op de Maas. Een toename van het bresdebiet door de Waaldijk werkt dus op twee manieren ongunstig voor de afvoeren en waterstanden op de Maas: niet alleen is de toename in afvoer en waterstand groter, deze toename gebeurt ook op een moment dat de afvoer en waterstand op de Maas al relatief hoog zijn.

Van alle varianten is variant 4 het meest ongunstig. Een hoge Waalafvoer wordt hier gecombineerd met een bres in de Waaldijk die ruim voor de piekafvoer op de Waal optreedt. Over een lange periode stromen hierdoor grote hoeveelheden water de dijkkring in. Na overloop van of bres in de Maasdijk leidt dit tot een grote toename in afvoeren en waterstanden op de Maas, samenvallend met de afvoerpiek op de Maas die bovenstrooms is opgelegd. Opvallend bij deze variant is ook dat het, anders dan voor de andere varianten, niet veel uitmaakt of in de Maasdijk wel of niet een bres optreedt. In beide gevallen is de afvoertoeename op de Maas ongeveer even groot.

Voor variant 1 (bres bij Dreumel) is het verschil tussen de situatie met overloop en die met bres in de Maasdijk juist relatief groot. In de situatie zonder bres in de Maasdijk stroomt nauwelijks water naar de Maas. Dit komt doordat er relatief weinig water de dijkkring instroomt en doordat aan het einde van het hoogwater het verval over de bres bij Dreumel negatief wordt, waardoor water vanuit de dijkkring terug de Waal instroomt in plaats van naar de Maas. Het debiet door de bres bij Weurt wordt in de gesimuleerde scenario's niet beïnvloed door wat er met de Maasdijk gebeurt.

Tabel 3.7 Overzicht resultaten met overloop van de Maasdijk.

	Basis Bres Weurt, Q_{Lobith} 16000 m³/s, piek Waal & Maas gelijktijdig	Variant 1 Bres Dreumel	Variant 2 Worst case timing piek Maas	Variant 3 Q_{Lobith} 18000 m³/s	Variant 4 Q_{Lobith} 18000 m³/s, bres Waal voor de piek	Variant 5 Kleinere bres
Q _{max} door bres Waal [m ³ /s]	1700	1550	1700	2081	2114	1127
Maximale bresbreedte Waal [m]	155	110	155	170	165	88
Start overloop/bres Maas [uren na bres Waal]	80	90	80	65	67	130
Piekafvoer Maas benedenstrooms* [m ³ /s]	3766	3766	4022	4117	5236	3767
Maximale afvoertoename [m ³ /s]	720	25	685	1080	1626	312
Piekwaterstand locatie 42 (rkm 206.5) [m +NAP]	7.06	7.06	7.26	7.33	8.51	7.15

Tabel 3.8 Overzicht resultaten met bres in de Maasdijk.

	Basis Bres Weurt, Q_{Lobith} 16000 m³/s, piek Waal & Maas gelijktijdig	Variant 1 Bres Dreumel	Variant 2 Worst case timing piek Maas	Variant 3 Q_{Lobith} 18000 m³/s	Variant 4 Q_{Lobith} 18000 m³/s, bres Waal voor de piek	Variant 5 Kleinere bres
Q _{max} door bres Waal [m ³ /s]	1700	1550	1700	2081	2114	1127
Maximale bresbreedte Waal [m]	155	110	155	170	165	88
Start overloop/bres Maas [uren na bres Waal]	80	90	80	65	67	130
Piekafvoer Maas benedenstrooms* [m ³ /s]	4015	3766	4452	4390	5189	3767
Maximale afvoertoename [m ³ /s]	985	840	914	1143	1640	605
Piekwaterstand locatie 42 (rkm 206.5) [m +NAP]	7.26	7.06	7.54	7.50	8.47	7.15

4 Discussie

4.1 Discussie over de aannames en uitkomsten van de simulaties

In deze verkennende studie zijn een aantal aannames gedaan. Met de verschillende varianten zijn de hiermee samenhangende onzekerheden verder onderzocht.

Met betrekking tot de timing van verschillende gebeurtenissen zijn in het basisscenario belangrijke aannames gedaan:

- (1) In de simulaties treden de dijkdoorbraken bij Weurt en Dreumel op wanneer de maximale waterstand op de Waal wordt bereikt bij deze locaties, terwijl dit ook eerder of later zou kunnen zijn.
- (2) De afvoerpiek op de Maas komt 50 uur later het model binnen dan de afvoerpiek op de Waal.
- (3) Aangenomen is dat de bres in de Maasdijk optreedt op het moment dat de dijk over begint te lopen. Ook deze gebeurtenis zou eerder of juist later kunnen plaatsvinden.

Het effect van de derde aanname is niet verder onderzocht. De invloed van de eerste twee aannames is onderzocht met varianten 2 (paragraaf 3.3) en 4 (paragraaf 3.5). Met variant 2 is gekeken naar een situatie waarin de afvoerpiek op de Maas samenvalt met het moment dat de Maasdijken over beginnen te lopen, of het moment dat hier een bres optreedt. Dit is gedaan voor het geval van een doorbraak van de Waaldijk bij Weurt. In het geval van overloop van de Maasdijken neemt de piekafvoer met 256 m³/s toe tot 4022 m³/s, terwijl in het basisscenario met overloop van de Maasdijk de piekafvoer niet toeneemt. In het geval van een bres in de Maasdijk wordt de piekafvoer 4452 m³/s, ten opzichte van 4015 m³/s in het basisscenario met bres in de Maasdijk. De timing van het hoogwater op de Maas ten opzichte van de doorbraak langs de Waal is dus van groot belang.

In de vierde variant wordt een hogere afvoerpiek op de Waal gesimuleerd dan in het basisscenario, waarbij de bres in de Waaldijk nog wel bij dezelfde afvoer als in het basisscenario optreedt. In deze situatie stijgt de piekafvoer op de Maas tot 5236 m³/s en 5189 m³/s voor respectievelijk overloop van en bres in de Maasdijk. In variant 3, waar dezelfde hogere afvoerpiek wordt gebruikt maar de bres pas later optreedt (namelijk wanneer de maximale waterstand bij de breslocatie wordt bereikt), worden de piekafvoeren op de Maas 4117 m³/s en 4390 m³/s, voor respectievelijk overloop en bres. Uit het verschil tussen deze twee varianten blijkt de grote invloed van de timing van de bres in de Waaldijk ten opzichte van de afvoer op de Waal.

Daarnaast is voor de afvoergolven op de Waal en de Maas uitgegaan van een *gemiddelde* golfvorm, conform WBI2017. Deze golfvorm is afgeleid op basis van afvoertijdreeksen gegenereerd met GRADE (Chbab, den Bieman, & Groeneweg, 2017). Op basis van deze tijdreeksen kunnen echter ook andere golfvormen afgeleid worden, bijvoorbeeld de smalste golfvorm of de mediaan. Het effect van verschillende golfvormen op de modelresultaten is niet onderzocht. Op basis van andere studies met overstromingsmodellen kan worden aangenomen dat de piekafvoer door de bres in de Waaldijk niet beïnvloed wordt door de golfvorm, wanneer de bres ontstaat op de piek van de golf. De golfvorm heeft wel effect op de duur en het totale volume van de instroom. Bij een smalle golfvorm neemt het instroomdebiet sneller af. Dit zal leiden minder negatieve systeemwerking. Bij een bredere golfvorm gebeurt het omgekeerde.

Ook ten aanzien van de breslocaties zijn belangrijke aannames gedaan. Op slechts twee locaties is een doorbraak van de zuidelijke Waaldijk gesimuleerd. Wel is met de keuze voor deze locaties getracht de twee uitersten van het resultaatbereik te benaderen (meest en minst extreme effect). De verwachting is dus dat een bres op een andere locatie zal leiden tot een toestroming naar de Maas die qua omvang tussen de hier doorgerekende scenario's inzit. Daarnaast is aangenomen dat op slechts één plek tegelijk een bres optreedt. Met de mogelijkheid dat meerdere doorbraken tegelijk optreden is geen rekening gehouden.

Een vierde punt waarop aannames zijn gedaan is de schematisatie van bresgroei in het model. Hiervoor is de bresgroeiformule van Verheij – van de Knaap (Verheij, 2003) gebruikt, waarin 5 parameters (α , β , B_0 , u_c , T_0) door de gebruiker moeten worden gedefinieerd. De waarde voor de kritische stroomsnelheid u_c hangt hierbij af van de samenstelling van de dijk. In het basisscenario is uitgegaan van zanddijken voor zowel de Waal- als de Maasdijk, waarvoor een kritische stroomsnelheid van $u_c = 0.2$ m/s wordt aangenomen. In variant 5 (paragraaf 3.6) zijn twee simulaties uitgevoerd waarbij de kritieke stroomsnelheid voor zowel de Waal- als de Maasdijk is verhoogd naar $u_c = 0.5$ m/s, representatief voor kleidijken. Hierdoor wordt de bres minder breed, waardoor ook het bresdebiet afneemt. Uit de resultaten blijkt dat de invloed van deze parameter op het effect van negatieve systeemwerking groot is. De toename van de afvoer op de Maas is in deze variant niet alleen kleiner (605 m³/s in het geval van een bres in de Maasdijk, versus 985 m³/s in het basisscenario), maar deze treedt ook zo'n 2 dagen later op. De gevoeligheid van de resultaten voor veranderingen in andere parameters dan u_c is niet onderzocht.

4.2 Potentiële implicaties voor de hydraulische belastingen

Uit de analyse blijkt dat doorbraken van de zuidelijke Waaldijk kunnen leiden tot zeer grote piekafvoeren in de Maas. Met deze negatieve systeemwerking kan op diverse manieren rekening gehouden worden:

- 1 Door de gevolgen van eventuele doorbraken langs de Maas mee te nemen in de bepaling van de maximaal toelaatbare overstromingskans van de dijken aan de zuidkant van de Waal (ofwel: bij het vaststellen van de beschermingsnorm voor deze dijken). Dit is reeds gedaan voor dijkkring 41: In de MKBA voor de Waaldijken langs het Land van Maas en Waal is rekening gehouden met falen van de Maasdijk met als gevolg overstromingen langs de Maas. Deze schade is opgeteld bij de gevolgen in het Land van Maas en Waal zelf (wel op een vereenvoudigde wijze).
- 2 Door de kans op en gevolgen van deze negatieve systeemwerking te verkleinen door
 - extra maatregelen aan de Waaldijk te nemen zoals bijvoorbeeld het versterken van de dijken tot kleidijken (waardoor de bres en het bresdebiet kleiner blijven) of tot dijken waar de kans op een bres zeer klein is, maar die eventueel wel kunnen overlopen (overloopbestendige dijk), of
 - door de Maasdijken benedenstreams in het Land van Maas en Waal te versterken zodanig dat deze alleen overlopen en niet breken en het debiet vanuit het Land van Maas en Waal naar de Maas toe beperkt blijft. Dit kan leiden tot dijken die veel sterker zijn dan volgens de lokale norm nodig is.
- 3 Door bij het bepalen van de belasting van de dijken langs de bedijkte Maas rekening te houden met de extra belasting op de Maas ten gevolge van systeemwerking.

Deze laatste optie heeft implicaties voor de hydraulische belastingen op de bedijkte Maas. Om enig gevoel te krijgen voor het belang van systeemwerking voor de hydraulische belastingen, wordt hier een aantal overwegingen gegeven gerelateerd aan de normen van de verschillende trajecten, de sterkte van de Maasdijken bij belasting vanuit de binnenkant, en de timing van de afvoerpieken van de Maas en Waal.

Normhoogtes en faalmechanismen:

Zowel de normtrajecten langs de bedijkte Maas als die langs de Waal hebben een overstromingskansnorm van 1/3000 of 1/10000 per jaar. Deze norm is niet een op een gerelateerd aan de overschrijdingskans van de waterstanden en golfhoogtes die de dijktrajecten zouden moeten kunnen keren. De norm geeft de maximale totale kans op een bres: wanneer voor alle faalmechanismen en voor alle mogelijke condities (waterstanden + golfhoogtes) de kans op een bres wordt bepaald en al deze kansen worden gecombineerd mag de totale kans op een bres niet groter zijn dan deze norm. De kans dat een waterkering met een norm van 1/3000 bij een bepaalde afvoer breekt, mag dus iets groter zijn dan de kans dat een waterkering met een norm van 1/10000 bij diezelfde afvoer breekt. Het is dus niet zo dat een kering met een minder strengere norm gegarandeerd eerder zal falen dan een andere kering met een strengere norm.

De kans op negatieve systeemwerking is klein aangezien de normen van de Waaldijken streng zijn en naast een bres in de Waaldijk ook nog de timing van de bres ongunstig moet zijn en de bresgroei groot. Door deze kleine kans van negatieve systeemwerking is de bijdrage van de omstandigheden met negatieve systeemwerking aan de totale faalkans van de Maaskeringen waarschijnlijk ook klein. Dit moet nader uitgezocht worden.

Stel dat een waterkering breekt bij een relatief lage afvoergolf, dan gebeurt dat waarschijnlijk door het faalmechanisme piping of macrostabiliteit en niet door overloop/overslag. Daar de mechanismen piping en macrostabiliteit een langere duur van hoogwater nodig hebben, is het meer waarschijnlijk dat de kering na het passeren van de top van de afvoergolf breekt dan bij bijvoorbeeld bij een doorbraak veroorzaakt door overslag/overloop. Het instromend volume is in zo'n geval kleiner dan wanneer de dijk eerder zou breken. Bij zeer extreme afvoeren kan falen ook door overloop/overslag plaatsvinden en ook al rond de top van de golf.

Dijksterkte Maasdijk bij belasting vanuit de binnenzijde

De kans op doorbraak van de Maaskering bij belasting vanuit de dijkkring wordt verkleind door meerdere aspecten:

- Indien de Maas ook hoogwater heeft is het verval van de waterstand over de dijk beperkt: immers aan beide zijde staat het water dan hoog. Dijkfaalmechanismen die verval nodig hebben, zoals piping zijn dan onwaarschijnlijk.
- Indien de Maas geen hoogwater heeft, leidt falen van de Maaskering vanuit de binnenzijde waarschijnlijk niet tot problematische systeemwerking: immers de totale Maasafvoer wordt dan zelfs met de instroom vanuit het Land van Maas en Waal waarschijnlijk niet extreem hoog en kan gekeerd worden door de waterkeringen benedenstreams.
- Door dijkenexperts³ is aangegeven dat van waterkeringen met een grasmat die in goede conditie verkeerd de kans op doorbreken door overloop (dus niet overslag) in het algemeen zeer klein is. Wanneer er golven over een dijk slaan, of er overgangen tussen gras en objecten in de dijk aanwezig zijn, is de kans op doorbraak wel groter. Hoge zomerkades in de uiterwaarden kunnen meestal ook overloop aan zonder te breken.
- De stroomsnelheden ter plaatse van de kruin zoals bepaald met het model zijn klein en zouden niet tot doorbraak hoeven te leiden. Het model is echter een 2Dmodel waarin turbulenties, wervels niet meegenomen worden en heeft een grove resolutie.

Analyse door geotechnische experts is nodig om uitspraken te doen over de kans op falen van de Maaskering bij overloop. In deze studie zijn vanwege de onzekerheid in de dijksterkte bij belasting vanuit de binnenzijde steeds zowel simulaties met alleen overloop als simulaties met een bres gedaan.

³ Op basis van kort interview met dijkexpert Han Knoeff van Deltares

Timing

Diermanse (2002) heeft onderzoek gedaan naar de kans op gelijktijdig voorkomen van een hoge Maas- en Waalafvoer en ook naar de aankomsttijd van de piek bij het benedenrivierengebied en het centrale rivierengebied. In het algemeen piekt de Waal 1,5 dag na de Maas. Echter, bij hogere afvoeren neemt het verschil in aankomsttijd in het benedenrivierengebied af. Bij een maatgevend afvoerniveau (1/1250 afvoer) reduceerde het verschil tot vrijwel nul. Indien de Maas en Waal tegelijk zouden pieken, dan komt de instroom vanuit het land van Maas en Waal bij eventuele systeemwerking naar de Maas waarschijnlijk na de piek op de Maas. Immers, na het doorbreken van de Waaldijken duurt het nog zo'n 80 uur voordat de Maasdijken breken (bij de gedane aannames in het basisscenario). Echter, er zijn zeer weinig hoge afvoeren in de meetreeks, waardoor de analyse van de timing zeer onzeker is. Ook is het moment van breken van zowel de Waaldijk als de Maasdijk onzeker. Als de Waaldijk voor de piek breekt, is dat ongunstig voor zowel het instromend watervolume als de timing ten opzichte van de Maasafvoer. Wanneer de Waaldijk na het optreden van de piek op de Waal breekt, dan is dat gunstig voor zowel het volume water en de kans op verhoogde Maasafvoer.

Verdere analyse opties

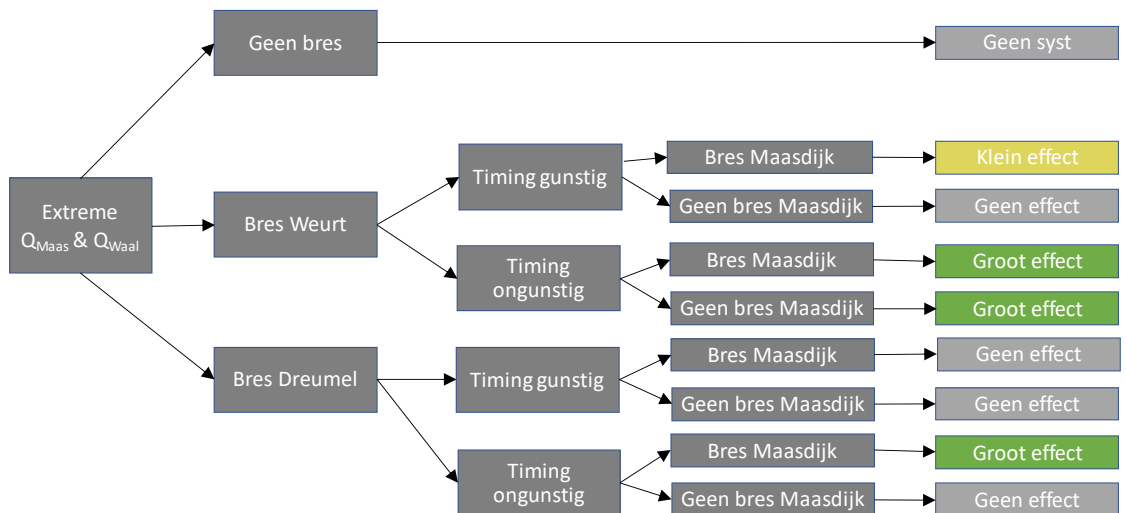
Een eerste globale verkenning van de kans op systeemwerking gegeven een hoge afvoer op zowel Waal als Maas op basis van een faalpad en redenatie is weergegeven in figuur 5.1. Het doel van de figuur is het schematiseren van de redenatie. De belangrijkste voorwaarden zijn:

- een coïncidentie van een piek op de Waal en Maas;
- een bres in de zuidelijke Waaldijk;
- een ongelukkige timing;
- en eventueel nog een bres in de Maasdijk.

Met een ongelukkige timing wordt hier bedoeld: een doorbraakmoment in de Waaldijk die leidt tot het overlopen van de Maasdijken ten tijde van het passeren van de piekafvoer door de Maas. Daarnaast spelen natuurlijk ook de precieze hoogte en golfvorm van de Waalafvoer en bresgroei een rol, maar voor de duidelijkheid is de figuur hier beperkt tot de belangrijkste factoren.

Uit de figuur blijkt dat de kans op een verhoogde afvoer op de Maas ten gevolge van negatieve systeemwerking beperkt is: slechts enkele takken van de boom leiden tot significante systeemwerking. Door met behulp van verdere analyses, statistiek en of experts kansschattingen te geven aan de vertakkingen kan wellicht een eerste grove inschatting van de kans op significante systeemwerking gegeven worden.

De duur van hoogwaters wordt momenteel nog niet heel expliciet meegenomen in de berekeningen van de faalkans, maar heeft wel invloed op deze faalkans. De duur van hoogwaters op de bedijkte Maas kan toenemen door negatieve systeemwerking, waardoor ook de faalkans van de keringen langs de bedijkte Maas groter kan worden.



Figuur 5.1 Eerste schets van een boom waarmee de relevantie van systeemwerking voor belasting van de Maasdijken bediscussieerd kan worden. De 5 paden die leiden tot systeemwerking in deze figuur zijn groen/geel gekleurd (klein effect = waarschijnlijk beperkte invloed op de piekafvoer in de Maas, groot effect = groot effect op de piekafvoer van de Maas, geen effect = de piekafvoer van de Maas neemt niet toe, geen syst = geen instroom in de Maas vanuit het Land van Maas en Waal).

Waal-Maas systeemwerking benedenstrooms van het Land van Maas en Waal

Systeemwerking van de Waal naar de Maas kan ook optreden bij doorbraken in dijkkring 40 (Heerewaarden). Deze dijkkring is vrijwel onmiddellijk vol en de kans op een slechte timing daar is dan ook zeer groot (aannemende dat de pieken gelijktijdig passeren). Ook in dijkkring 38 (Bommelerwaard) zal bij een doorbraak van de Waaldijk water richting het zuiden door kunnen stromen naar de Maas. Zowel voor dijkkring 40 als voor dijkkring 38 is de kans op systeemwerking in de normering van de keringen langs de Waal meegenomen.

5 Conclusies en aanbevelingen

In deze studie is een eerste beeld verkregen van het mogelijke effect van negatieve systeemwerking bij een doorbraak in de zuidelijke Waaldijk ter hoogte van dijkkring 41 op waterstanden en afvoeren op de Maas. Dit is gedaan met een basisscenario en 5 varianten daarop, waarbij een bres in de zuidelijke Waaldijk steeds is gecombineerd met zowel overloop als een doorbraak van de noordelijke Maasdijk. Het doel van deze aanpak is om een eerste beeld te krijgen van de hoeveelheid water die vanuit de Waal naar de Maas kan stromen, zonder (expliciet) in te gaan op de kans van optreden van verschillende scenario's.

5.1 Conclusies

Op basis van deze eerste verkenning kan worden geconcludeerd dat negatieve systeemwerking binnen dijkkring 41 tot een significante verhoging van afvoeren en waterstanden op de Maas kan leiden. Hoe groot dit effect is hangt echter af van een groot aantal variabelen, zoals breslocatie, samenstelling van de dijk ter plaatse van de bres, het verloop van de afvoer op zowel de Waal als de Maas en de timing van de afvoergolven en de bres(sen) ten opzichte van elkaar. Binnen de varianten die in deze studie zijn onderzocht varieert de maximale toename in afvoer op de Maas van 25 tot meer dan 1600 m³/s. Afhankelijk van de timing van deze toename ten opzichte van de afvoergolf op de Maas neemt de piekafvoer toe van 3766 m³/s in het referentiescenario tot maximaal 5236 m³/s. Voor waterstanden geldt een maximum toename (op enig moment) tussen de 0.05 en 1.8 m, en een piekwaterstand die van zo'n 7 m +NAP kan toenemen tot maximaal 8.5 m + NAP aan de benedenstroomse zijde van het Land van Maas en Waal.

Uit de resultaten van de onderzochte varianten blijkt dat het effect van negatieve systeemwerking groter is naarmate de bres in de zuidelijke Waaldijk verder bovenstrooms optreedt. In het geval van een bres bij Weurt (rkm 888) is de maximale afvoertoeename 720 m³/s als gevolg van overlopen van de Maasdijk, terwijl een bres bij Dreumel (rkm 919) in een verder gelijke situatie leidt tot een maximale toename van slechts 25 m³/s. Wanneer ook in de Maasdijk een bres optreedt is het verschil kleiner, met 985 m³/s voor een bres bij Weurt versus 840 m³/s voor Dreumel.

Daarnaast is de samenstelling van de dijk ter plaatse van de bres van belang. Wanneer het een zanddijk betreft groeit de bres sneller en is de maximale breedte en het maximale bresdebiet groter dan in het geval van een kleidijk, voor dezelfde hydraulische belasting. In een scenario waarin zowel de Waal als de Maas kleidijken hebben is het maximale bresdebiet ruim 1100 m³/s tegen 1700 m³/s bij zanddijken en neemt de piekafvoer op de Maas niet toe, terwijl die in de basisvariant met zanddijken toeneemt met ongeveer 200 m³/s.

Het maximale bresdebiet door de Waaldijk neemt ook toe voor een hogere afvoerpiek op de Waal. In een situatie waarbij wordt uitgegaan van een piek van 16000 m³/s bij Lobith is het maximale bresdebiet op de Waal 1700 m³/s. Als echter wordt uitgegaan van een extreem hoogwater met een piek van 18000 m³/s bij Lobith wordt het bresdebiet op de Waal 2081 m³/s (als de dijk doorbreekt bij maximale waterstand).

De timing van de verschillende gebeurtenissen die tot negatieve systeemwerking leiden is bepalend voor het effect op piekafvoeren en piekwaterstanden op de Maas. Deze nemen alleen toe als de toestroom van water als gevolg van negatieve systeemwerking min of meer samenvalt met een afvoerpiek op de Maas. Of dit gebeurt hangt af van meerdere factoren.

Ten eerste is de timing van afvoerpieken op de Waal en de Maas ten opzichte van elkaar van belang. Daarnaast is het belangrijk of de bres in de Waaldijk voor, tijdens of na de piek op de Waal optreedt, omdat dit het starttijdstip van het onderlopen van de dijkkring bepaalt. Ook heeft de timing van deze gebeurtenis, samen met andere variabelen (zoals de samenstelling van de dijk), invloed op het verloop van het debiet door de bres. Dit debiet bepaalt hoe snel de dijkkring onderloopt en dus hoeveel vertraging er zit in het moment van overlopen van de Maasdijk ten opzichte van het ontstaan van de bres in de Waaldijk.

Een zeer ongunstige situatie treedt op bij een extreem hoogwater op de Waal, waarbij een bres optreedt bij Weurt (rkm 888) voordat de maximale waterstand wordt bereikt op deze locatie (variant 4). In iets minder dan 3 dagen stijgt de waterstand binnen de dijkkring tot boven de minimale kruinhoogte van de noordelijke Maasdijk. Onder de aanname dat de piek op de Maas zo'n 50 uur later het model binnenkomt dan de piek op de Waal valt het effect van negatieve systeemwerking samen met de piek op de Maas. Daarnaast is de afvoertoe name op de Maas in deze situatie ook relatief groot. In dit extreme geval neemt de piekafvoer op de Maas toe van 3766 m³/s tot 5236 m³/s.

In andere scenario's kan de timing juist gunstig uitpakken, waardoor de afvoertoe name op de Maas pas plaatsvindt als de afvoerpiek daar al is gepasseerd. Afhankelijk van de grootte van de toename is het mogelijk dat de maximum afvoer en waterstand op de Maas in zo'n geval helemaal niet toenemen. De toestroming van water vanuit dijkkring 41 zal dan alleen resulteren in een langere duur van het hoogwater op de Maas.

5.2 Aanbevelingen

Voor het beantwoorden van de vraag of systeemwerking een belangrijke bijdrage levert aan de belasting van de waterkeringen langs de Maas en meegenomen zou moeten worden bij het beoordelen en ontwerpen van Maaskeringen kan nog niet eenduidig beantwoord worden.

De belangrijkste factoren die voor het beantwoorden verder onderzocht moeten worden zijn: de timing van de afvoerpieken van de Maas en de Waal, de kans op falen van de Maaskering van het Land van Maas en Waal door belasting vanuit de binnenzijde, en de bijdrage van de extra faalkans ten gevolge van de grotere hydraulische belasting op de Maas aan de totale faalkans van de Maaskeringen.

Er zijn meerdere opties om dit nader te bepalen. Een eerste optie is een gevoeligheidsanalyse van de dijkversterkingsopgave voor alternatieve belastingcurves op de Maas waarin het effect van systeemwerking is meegenomen. Hiertoe kan bijvoorbeeld voor de groen/gele takken in figuur 5.1 met experts een belastingcurve worden opgesteld op basis waarvan met bijvoorbeeld OKADER de dijkversterkingsopgave van de bedijkte Maas kan worden bepaald. Hierbij zou bijvoorbeeld een scenario aangenomen kunnen worden dat bij een 1/10000 afvoer op de Waal het pad met doorbraak bij Weurt en ongunstige timing gegarandeerd optreedt en dat bij een 1/3000 afvoer op de Waal het pad met een doorbraak bij Dreumel optreedt. De alternatieve belastingcurve van de Maas zal in het lagere bereik gelijk blijven maar in het extreme bereik toenemen. Indien dit niet of nauwelijks zou leiden tot een andere dijkversterkingsopgave, dan is het niet nodig nader in te gaan op de kans van de paden. De gevoeligheid van de dijkversterkingsopgave voor het optreden van systeemwerking is dan immers klein.

Leidt dit wel tot verschillen dan kan met experts de faalboom waarvan een eerste grove versie is gegeven in figuur 5.1 uitgewerkt worden om zo goed mogelijk de bijdrage van de verschillende mogelijke takken te bepalen.

Hierbij zouden experts op het gebied van hydrologie, dijksterkte, faalkansbepaling en overstromingspatronen samen tot een betere boom en inschatting kunnen komen. Vervolgens kan dan het effect op de afvoerstatistiek en dijkversterkingsopgave van de Maasdijken bepaald worden.

Met betrekking tot modellering

In deze studie is al een grove gevoeligheidsanalyse gedaan van de uitkomsten voor de factoren timing van de afvoerpiek op de Maas (paragraaf 3.3) en de bres in de Waaldijk (paragraaf 3.5). Deze timing is cruciaal. In een uitgebreidere aanpak zou gekeken kunnen worden naar de kansverdeling van het moment van optreden van de verschillende gebeurtenissen in de keten. Op deze manier kan de orde grootte van het risico van negatieve systeemwerking worden bepaald, gegeven dat een bres in de Waaldijk optreedt. Ook de invloed van de breslocatie kan in meer detail worden bepaald door een groter aantal scenario's te simuleren. Hierbij kan prioriteit worden gegeven aan locaties waar de kans op een dijkdoorbraak het grootst is. Daarnaast verdient het aanbeveling om de gevoeligheid van de resultaten voor verschillende golfvormen en verandering in bresgroeiparameters te onderzoeken.

6 Bibliografie

Chbab, H., den Bieman, J., & Groeneweg, J. (2017). Hydraulische belastingen Rijntakken en Maas. Wettelijk beoordelingsinstrumentarium WBI-2017. Deltares.

De Jong, J., & Asselman, N. (2019). Topvervlakking Maas: Het effect van golfvormen, bergingsgebieden en rivierverruiming. Deltares rapport 11203684-003-ZWS-0002.

Van Mierlo, T. (2005). Verkenning van systeemwerking in het bovenrivierengebied van de Rijntakken. WL | Delft Hydraulics.

Vergouwe, R., & van der Scheer, P. (2011). Veiligheid Nederland in Kaart 2 - Overstromingsrisico dijkkring 41 Land van Maas en Waal. Rijkswaterstaat Waterdienst.

Verheij, H. (2003). Aanpassen van het bresgroeimodel in HIS-OM. WL | Delft Hydraulics.

A Qh-relaties

In deze studie zijn Qh-relaties afgeleid voor de benedenstroomse modelranden van zowel de Waal (rkm 924) als de Maas (rkm 209). Voor de Waal is voor alle scenario's dezelfde Qh-relatie gebruikt als weergegeven in Tabel 6.1.

Q_{Waal} [m^3/s]	h_{924} [m]
5370	7.443
6493	8.022
10170	10.02
11317	10.58
12367	11.07

Tabel 6.1 Qh-relatie voor de Waal, rkm 924. De blauw gemarkeerde waarden zijn toegevoegd voor het extreme-afvoerscenario dat wordt gebruikt voor varianten 3 (paragraaf 3.4) en 4 (paragraaf 3.5).

Voor de Maas zijn twee verschillende Qh-relaties gebruikt, zie Tabel 6.2. De eerste (in de linker tabel) is afgeleid uit de betrekkinglijnen 2018-2019. Hiermee wordt de Maasafvoer bij het meetpunt Sint Pieter Noord gerelateerd aan waterstanden ter hoogte van alle rivierkilometers. In dit geval zijn voor de waterstanden dus de waarden bij rkm 209 gebruikt. Met deze aanpak wordt (impliciet) aangenomen dat de afvoer ter hoogte van rkm 209 die bij deze waterstanden hoort gelijk is aan de afvoer bij Sint Pieter Noord. Echter, als gevolg van laterale instroming, berging en topvervlakking tussen Sint Pieter Noord (rkm 11) en rkm 209 (tussen station Lith dorp en Empel beneden) zal de afvoer ter hoogte van rkm 209 anders zijn dan die bij Sint Pieter Noord. Zolang dit verschil niet significant is, is deze aanpak gerechtvaardigd.

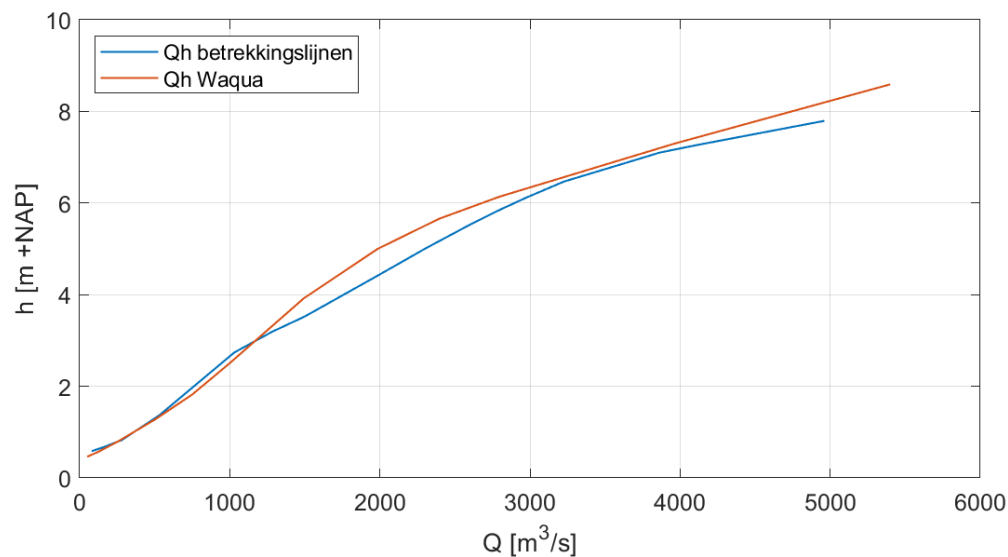
Bovenstaande aanpak is gebruikt gedurende de eerste fase van dit project. Na afloop van deze eerste fase is gekeken op welke punten het model verbeterd kon worden. Daarbij is ook gekeken naar de invloed van de vereenvoudigde afleiding van de Qh-relatie voor de Maas. Hiertoe is een alternatieve Qh-relatie afgeleid op basis van modelresultaten uit Waqua (Waqua-Maas-j19_w2p_ruw), als weergegeven aan de rechterkant van Tabel 6.2. In deze Qh-relatie zijn zowel de afvoer als de bijbehorende waterstand bepaald ter hoogte van rkm 209. Om deze reden kan worden aangenomen dat deze Qh-relatie een betere benadering van de werkelijkheid is dan de relatie op basis van de betrekkinglijnen.

De verschillen tussen de twee Qh-relaties voor de Maas zijn zichtbaar gemaakt in Figuur 6.1. Hier is te zien dat de grootste verschillen tussen de twee relaties optreden voor waterstanden tussen ca. 3.5 en 6 m +NAP. De Qh-relatie op basis van de betrekkinglijnen geeft in dit bereik voor dezelfde waterstand een hogere afvoer dan de Qh-relatie op basis van Waqua. Dit betekent dat het effect van topvervlakking en berging tussen rkm 11 en rkm 209 groter is dan het effect van laterale instroming op dit traject. Verder verloopt de Qh-relatie op basis van de betrekkinglijnen flauwer dan de Waqua-relatie voor afvoeren tussen 1000 en 2000 m^3/s , steiler tussen 2000 en 3200 m^3/s en voor afvoeren groter dan 3900 m^3/s weer flauwer. Een flauwer verloop wil zeggen dat voor dezelfde toename in afvoer de waterstandstoename kleiner is.

Tabel 6.2 Qh-relaties voor de Maas, rkm 209. De oranje gemarkeerde waarden zijn gebaseerd op lineaire extrapolatie en zijn toegevoegd voor varianten 2 (paragraaf 3.3) en 4 (paragraaf 3.5).

Q _{Maas} [m ³ /s]	h ₂₀₉ [m]
80	0.5833
155	0.6662
280	0.8254
530	1.365
1030	2.737
1280	3.187
1500	3.524
1982	4.409
2308	5.016
2609	5.543
2781	5.824
2969	6.109
3226	6.468
3578	6.816
3862	7.099
4113	7.266
4396	7.442
4962	7.794

Q _{Maas} [m ³ /s]	h ₂₀₉ [m]
50	0.4619
125	0.5714
249	0.7839
500	1.2708
750	1.8205
999	2.5021
1493	3.9191
1985	4.9986
2396	5.6583
2798	6.1396
3963	7.2970
4600	7.8702
5400	8.5900



Figuur 6.1 Qh-relaties voor de Maas (rkm 209).

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl