

**Optimalisatie van peilbeheer Getij  
Grevelingen door aansturing van het  
doorlaatmiddel in de Brouwersdam**





**Optimalisatie van peilbeheer Getij  
Grevelingen door aansturing van het  
doorlaatmiddel in de Brouwersdam**

Maike Maarse  
Arno Nolte  
Frank Kleissen  
Bernhard Becker





## Titel

Optimalisatie van peilbeheer Getij Grevelingen door aansturing van het doorlaatmiddel in de Brouwersdam

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Zee en Delta, RIJSWIJK ZH	11203818-001	11203818-001-ZKS-0003	29

## Trefwoorden

Grevelingenmeer, getij, waterstanden, zeespiegelstijging, waterkwaliteit

## Samenvatting

Het project Getij Grevelingen bereidt de beslissing voor over de herintroductie van getij via een doorlaatmiddel in de Brouwersdam, met als één van de doelen om de waterkwaliteit te verbeteren. Het terugbrengen van getij is geïntroduceerd als maatregel om de zuurstofproblematiek in het Grevelingenmeer op te lossen. Met eerdere modelstudies is afgeleid dat een jaargemiddelde getijslag van 50 cm het areaal met langdurig lage zuurstofconcentratie zal beperken tot circa 500 ha. Door herintroductie van getij zal een deel van de huidige terrestische natuur door overstroming met zout water en door salt-spray verdwijnen. Een verkleining van de opgave kan mogelijk worden bewerkstelligd door het peil zo te beheersen dat een getijslag wordt bereikt met zo min mogelijk overstroming van N2000 habitat en soorten, terwijl de doelstelling voor verbetering van de waterkwaliteit ook gerealiseerd wordt.

Deltares heeft in opdracht van Rijkswaterstaat aan de hand van het geschikte en beschikbare modelinstrumentarium een kwantitatieve onderbouwing geleverd voor het peilbeheer en de effecten op waterkwaliteit. De grootte van het doorlaatmiddel en de wijze van operationele bediening van het doorlaatmiddel zijn onderzocht. Bij de inzet van het doorlaatmiddel is klimaatrobustheid meegenomen door in beeld te brengen in hoeverre het peilbeheer wordt beïnvloed door de zeespiegelstijging. In het project Getij Grevelingen is klimaatrobustheid gedefinieerd als het kunnen realiseren van een jaargemiddelde getijslag van 40 cm op het Grevelingenmeer bij 40 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995.

Voor het peilbeheer zijn meerdere peilbeheersscenario's beschouwd, gedefinieerd door een minimale waterstand en een maximale waterstand (peilgrenzen), sommige met onderscheid in winteropzet en broedseizoenen. Ook zijn verschillende manieren om het peilbeheer te optimaliseren onderzocht door te sturen met 1) het aantal geopende kokers per getijfase 2) het aantal geopende kokers en scheefstandcorrectie 3) de reactiegraad van getijturbines 4) de openingsduur van de kokers, en 5) pompen tijdens de ebfase.

De berekeningen zijn gedaan met een 0D model, dat de debieten door de Brouwerssluis, de Flakkeese spuisluis en het nieuwe doorlaatmiddel berekent en de resulterende waterstand in het Grevelingenmeer. Vervolgens is voor een aantal scenario's gerekend met Delft3D-FLOW voor de hydrodynamica en Delft3D-WAQ voor waterkwaliteit zoals zuurstofconcentratie, primaire productie en nutriëntconcentraties. De berekeningen geven de kwantitatieve informatie van het gerealiseerde peilbeheer afhankelijk van 1) het aantal kokers van het nieuwe doorlaatmiddel, 2) de wijze van aansturing van het doorlaatmiddel (optimalisatie van de operationele aansturing) en 3) zeespiegelstijging.




De berekeningen hebben ook laten zien dat een klimaatrobust doorlaatmiddel haalbaar is. Het aantal kokers dat nodig is voor klimaatrobustheid, verschilt wel aanzienlijk tussen de peilbeheersscenario's. Omdat andere overwegingen als kosten een doorslaggevende rol spelen in besluitvorming, gaat dit rapport niet in op keuze of aanbeveling voor bepaalde peilbeheersscenario's.

**Titel**

Optimalisatie van peilbeheer Getij Grevelingen door aansturing van het doorlaatmiddel in de Brouwersdam

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat Zee en Delta, RIJSWIJK ZH	11203818-001	11203818-001-ZKS-0003	29

Voor de waterkwaliteit heeft het doorlaatmiddel twee effecten: 1) De uitwisseling met de Voordelta neemt toe met grotere getijslag, en 2) De menging in het Grevelingenmeer neemt toe met grotere getijslag. De menging die door een grotere uitwisseling wordt gerealiseerd in het Grevelingenmeer, resulteert in een kleiner areaal met een langdurig lage zuurstofconcentratie. Conform eerdere modelstudies wordt bij een jaargemiddelde getijslag van 40 cm tot 50 cm een stabiel niveau van circa 500 ha bereikt. Dit betreft de diepe putten van Scharendijke en Den Osse die door hun diepte en locatie bij de Brouwerssluis niet volledig verticaal gemengd worden bij 50 cm getijslag.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.1	aug. 2019	Maaïke Maarse Arno Nolte Frank Kleissen Bernhard Becker		Joost Stronkhorst		Frank Hoozemans	

**Status**  
definitief

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>1</b>
1.1	Aanleiding	1
1.2	Vraagstelling en leeswijzer	1
<b>2</b>	<b>Structuren van de vraagstelling</b>	<b>3</b>
2.1	Visualisatie van de vraagstelling	3
2.2	Definitie en opbouw van peilbeheerscenario's	5
2.3	Optimalisatie van het peilbeheer door operationele aansturing van het doorlaatmiddel	8
<b>3</b>	<b>Werkwijze modellering</b>	<b>11</b>
3.1	0D modellering op hoofdlijnen	11
3.2	3D modellering Delft3D-FLOW en Delft3D-WAQ	13
<b>4</b>	<b>Resultaten en analyses</b>	<b>15</b>
4.1	Resultaten 0D model	15
4.2	Resultaten 3D waterkwaliteitsmodellering	18
<b>5</b>	<b>Afsluitende overwegingen voor het gebruik en toepasbaarheid van de resultaten</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>29</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A</b>	<b>0D modelresultaten voor alle scenario's (2008)</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Opzet en berekeningen 0D-model (2018)</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Vervolg ontwikkeling en berekeningen 0D-model (2019)</b>	<b>C-1</b>
<b>D</b>	<b>Vergelijking scheefstand tussen metingen en model</b>	<b>D-1</b>
<b>E</b>	<b>Opzet RTC-Tools voor operationeel peilbeheer (2018)</b>	<b>E-1</b>
<b>F</b>	<b>Vervolg ontwikkeling RTC-tools voor operationeel peilbeheer (2019)</b>	<b>F-1</b>
F.1	Ontwikkeling in het RTC-Tools-model voor het Grevelingenmeer met doorlaatmiddel	F-1
F.2	Werkwijze van de correctie voor de scheefstand van het waterpeil in het Grevelingenmeer door windopzet (scheefstandcorrectie)	F-1
F.3	Conclusies en vooruitzichten	F-3



# 1 Introductie

## 1.1 Aanleiding

Het project Getij Grevelingen bereidt de MIRT2 beslissing voor over de herintroductie van getij via een doorlaatmiddel in de Brouwersdam met als één van de doelen om de waterkwaliteit in het Grevelingenmeer te verbeteren. Het terugbrengen van getij is geïntroduceerd als maatregel om de zuurstofproblematiek in het Grevelingenmeer op te lossen. Met modelstudies is afgeleid dat een jaargemiddelde getijslag van 50 cm het areaal met langdurig lage zuurstofconcentratie zal beperken tot circa 500 ha (Deltares 2016; Tangelder et al 2018).

Op basis van de quick-scan 'Haalbaarheid Getij Grevelingen binnen N2000 kaders' is geadviseerd om voor de afronding van de MIRT2-verkenning het peilbeheer te optimaliseren ten behoeve van bestaande N2000 instandhoudingsdoelen. Door herintroductie van getij zou namelijk een deel van de huidige terrestrische natuur door overstroming met zout water en door salt-spray verdwijnen. De N2000 instandhoudingsdoelstellingen vereisen (deels) compensatie of mitigatie.

Een verkleining van de opgave kan mogelijk worden bewerkstelligd door het peil zo te beheersen, dat een getijslag wordt bereikt met zo min mogelijk overstroming van N2000 habitats en soorten, terwijl de doelstelling voor de verbetering van de waterkwaliteit ook gerealiseerd wordt. Het gaat hierbij om verschillende peilbeheerscenario's, in combinatie met normale kokers, turbines voor energieopwekking en pompen. Daarnaast moet er binnen deze optimalisaties rekening gehouden worden met zeespiegelstijging.

## 1.2 Vraagstelling en leeswijzer

Rijkswaterstaat, een van de partners in Getij Grevelingen, heeft Deltares gevraagd om de aan de hand van het geschikte en beschikbare modelinstrumentarium een kwantitatieve onderbouwing te leveren voor het peilbeheer en de effecten op waterkwaliteit. De grootte van het doorlaatmiddel en wijze van operationele bediening van het doorlaatmiddel dienen onderzocht te worden. Bij de inzet van het doorlaatmiddel moet klimaatrobuustheid meegenomen worden, door in beeld te brengen in hoeverre het peilbeheer wordt beïnvloed door de zeespiegelstijging. In het project Getij Grevelingen is klimaatrobuustheid gedefinieerd als het kunnen realiseren van een jaargemiddelde getijslag van 40 cm op het Grevelingenmeer bij 40 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995 (Boeters 2019a).

De uitkomsten van de modelberekeningen zijn input in het traject dat de besluitvorming voorbereidt over de aanleg van het doorlaatmiddel en het daarmee te realiseren peilbeheer. Van januari tot juli 2019 is interactief en iteratief samengewerkt tussen RWS en Deltares. Ook met Wageningen Marine Research (WMR) is samengewerkt ten behoeve van het effect van het peilbeheer op natuur boven- en onderwater en voor de inschatting van de autonome ontwikkeling; over dit onderdeel wordt separaat door WMR gerapporteerd.

Dit rapport is een verslaglegging en verantwoording van de uitgevoerde stappen.

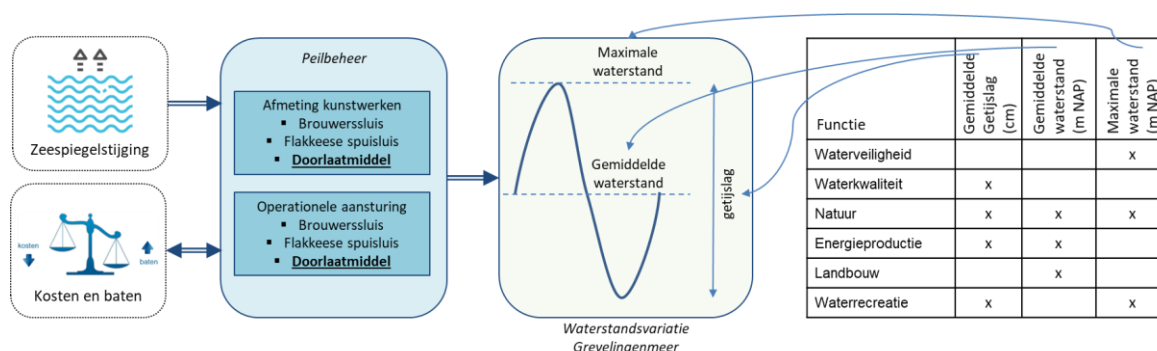
De vraagstelling wordt in hoofdstuk 2 systematisch uitgewerkt. In hoofdstuk 3 worden de gebruikte modellen geïntroduceerd. Hoofdstuk 4 bevat de (model)resultaten en de bijbehorende analyse. In hoofdstuk 5 zijn afsluitende overwegingen en een discussie opgenomen.

Tenslotte wordt hier vermeld dat in deze fase ook het modelinstrumentarium op basis RTC-Tools is getest dat in het kader van het IWP (Instrument voor Waterpeilbeheer) voor operationeel peilbeheer wordt ingezet. Doelstelling in deze fase is om zicht te hebben op de mogelijkheden en eventueel ontbrekende functionaliteit van het IWP-instrumentarium om in de toekomst peilbeheer op basis van getijslag te kunnen uitvoeren. Omdat deze test enigszins buiten de directe verhaallijn van de rapportage valt, is verslaglegging van de test afzonderlijk in 0 toegevoegd.



## 2 Structuren van de vraagstelling

### 2.1 Visualisatie van de vraagstelling



Figuur 2.1 Visualisatie van de vraagstelling – zie tekst voor uitleg

Bovenstaande visualisatie van de vraagstelling omvat vijf onderdelen, te weten:

1. De waterstandsvariatie in het Grevelingenmeer uitgedrukt in de gemiddelde waterstand, de maximale waterstand en de gemiddelde getijslag
2. De zes belangrijkste gebruiksfuncties van de Grevelingen die afhankelijk zijn van de waterstandsvariatie. Met de kruisjes wordt aangegeven welk element van de waterstandsvariatie bepalend is om de gebruiksfunctie mogelijk te maken.
3. Het peilbeheer dat de waterstandsvariatie in het Grevelingenmeer reguleert. Onderscheiden worden de afmeting (dimensies, capaciteit, etc.) van de kunstwerken en de wijze waarop deze operationeel aangestuurd (kunnen) worden met schuiven of getijturbinen en/of pompen. In dit onderzoek staan de afmetingen en aansturing van het doorlaatmiddel centraal, waarbij de afmeting uitsluitend wordt bepaald door het aantal kokers van ieder 8 m bij 8 m.
4. De zeespiegelstijging waarop het peilbeheer zich aanpast en/of voorbereidt door middel van klimaatrobuust ontwerp.
5. De maatschappelijke kosten en baten van de maatregel. Dit onderzoek levert daar informatie aan toe en vice versa komen uit de kosten en baten randvoorwaarden voor dit onderzoek voort.

#### Conflicterende gebruiksfuncties

Verschillende gebruiksfuncties in de Grevelingen zijn afhankelijk van of worden bepaald door de waterstandsvariatie. De optimale waterstandsvariatie is niet voor iedere gebruiksfunctie gelijk. Wat voor de ene gebruiksfunctie optimaal is, kan negatieve effecten hebben voor een andere gebruiksfunctie. Zo is bijvoorbeeld een grotere getijslag positief voor waterkwaliteit, en voor het areaal intergetijdengebied (natuur), maar negatief voor de terrestrische natuur wanneer waterstanden optreden die hoger zijn dan in de huidige situatie<sup>1</sup>. En is een hogere gemiddelde waterstand positief voor energieproductie, maar negatief voor landbouw.

Voor waterveiligheid is de maximale waterstand van belang. Echter, bij de te beschouwen peilbeheerscenario's is de hoogste waterstand dermate laag dat voor de waterveiligheid geen

<sup>1</sup> Voor beschrijving van de huidige situatie zie paragraaf 2.2.

risico optreedt. De golfbelasting is ook van belang, maar deze wordt in deze studie niet meegenomen. Ook deze vormt voor de waterveiligheid geen risico.

De voornaamste indicator voor de waterkwaliteit waarvoor de herintroductie van getij als maatregel dient, is de langdurige zuurstofloosheid van de diepe delen van het Grevelingenmeer. Uit modelonderzoek is gebleken dat het areaal met langdurig lage zuurstofconcentratie afneemt als de getijslag toeneemt. Bij meer dan 50 cm getij neemt het areaal nauwelijks verder af (zie ook paragraaf 4.2 in dit rapport). De getijslag is derhalve van belang voor de waterkwaliteit.

Natuur kan onderscheiden worden in de terrestrische natuur op de eilanden en oevers die afhankelijk is van zoetwater en de zoutwater gerelateerde natuur in de geulen, vooroevers en intergetijdengebieden. Door introductie van getij ontstaan intergetijdengebieden die in de plaats komen van thans aanwezige natuurtypen. Waar intergetijdengebied kan ontstaan wordt door alle drie componenten van de waterstandsvariatie bepaald.

Overwogen wordt om getijdeturbines in het doorlaatmiddel te plaatsen. In algemene zin geldt dat energieproductie hoger is bij een groter waterstandsverschil tussen Grevelingenmeer en Voordelta. Een grotere getijslag, een hogere gemiddelde waterstand en een hogere maximale waterstand resulteren alle drie in een hoger waterstandsverschil en zijn dus alle drie van invloed op de energieproductie.

Kwel van zout water kan binnendijkse landbouwgebieden beïnvloeden, afhankelijk van de ligging en opbouw van de ondergrond. De verwachting is dat de mate van kwel samenhangt met de gemiddelde waterstand, ook in een getijsituatie met variërende waterstand.

Waterrecreatie bestaat uit een breed palet van recreatievaart en tot zwemmen en andere watersporten. De maximale waterstand is van belang voor recreatie-infrastructuur zoals aanlegsteigers. De getijslag is van belang voor bijvoorbeeld vaardiepte.

## **Waterstandsvariatie**

Met het nieuwe doorlaatmiddel en de twee bestaande kunstwerken Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis is de waterstandsvariantie te beheersen. Ofwel via peilbeheer zijn de gemiddelde waterstand, de maximale waterstand en de gemiddelde getijslag in te stellen. Terwijl peilbeheer voor gemiddelde en maximale waterstand gebruikelijk is, is dat niet het geval voor gemiddelde getijslag. In Nederland en wereldwijd zijn geen situaties bekend waar op gemiddelde getijslag wordt gestuurd.

Uit de ontwerp-Rijkstructuurvisie Grevelingen en Volkerak-Zoommeer (2014) zijn de volgende streefwaarden voor het peilbeheer naar voren gekomen:

- Gemiddelde waterstand:       NAP -0,20 m
  - Maximale getijslag:           50 cm
- Combinatie hiervan geeft een maximale waterstand van NAP +0,05 m

## **Afmeting doorlaatmiddel en Zeespiegelstijging**

Als ontwerpeis is gesteld dat het doorlaatmiddel tot 40 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995 moet voldoen aan de volgende streefwaarden:

- Gemiddelde getijslag:       40 cm

De grootte van het doorlaatmiddel, in deze studie gedefinieerd door het aantal kokers van 8 m bij 8 m, is een belangrijke vrijheidsgraad voor het peilbeheer. Een groter doorlaatmiddel, dus

meer kokers, maakt het peilbeheer makkelijker te realiseren en is – dus – klimaatrobuster. Een groter doorlaatmiddel is ook duurder. Gezocht wordt dus naar een balans tussen kosten en behalen van de streefwaarden voor het peilbeheer.

### **Aansturing doorlaatmiddel**

Naast het aantal kokers is het waterstandsverschil tussen Voordelta en Grevelingenmeer van belang voor de hoeveelheid water die tijdens vloed instroomt en tijdens eb uitstroomt. Bij springtij is het waterstandsverschil groter en kan er meer water in- en uitstromen dan bij doottij. Bij springtij zal het doorlaatmiddel dus deels geknepen moeten worden om de getijslag en/of de maximale waterstand niet te groot of te hoog te laten worden. Knijpen kan op verschillende manieren. Een mogelijkheid is bijvoorbeeld om de kokers te sluiten, zodra de maximale of minimale waterstand wordt bereikt (aannemende dat dat technisch mogelijk is bij het waterstandsverschil en de resulterende stroomsnelheden in de kokers op het moment van sluiting<sup>2</sup>. De waterstand kan dan enkele uren op dat peil vastgehouden worden, totdat een volgende eb- of vloedfase inzet. Dit vasthouden van een vaste waterstand wordt als onwenselijk voor de natuur gezien. Dat kan op diverse manieren voorkomen worden zolang het doorlaatmiddel overcapaciteit heeft. Bijvoorbeeld door niet alle kokers open te zetten, maar precies zoveel kokers als nodig is om 50 cm getij in- of uit te laten. We noemen dat een optimalisatiestrategie voor de aansturing.

Uit bovenstaande structurering van de opgave komen vragen voort die met de in dit rapport gepresenteerde resultaten door het Project Getij Grevelingen beantwoord kunnen worden:

- A. Hoeveel kokers zijn nodig om aan het uitgangspunt van klimaatrobustheid te voldoen volgens de definitie binnen project Getij Grevelingen (40 cm getijslag bij een zeespiegelstijging van 40 cm ten opzichte van 1995)?
- B. Hoe kunnen met het doorlaatmiddel, bestaande uit alleen kokers of kokers waarin turbines zijn geplaatst, diverse scenario's voor het peilbeheer worden gerealiseerd?
- C. Hoe dragen optimalisatiestrategieën voor de aansturing van het doorlaatmiddel bij aan het bereiken van de streefwaarden van het peilbeheer en eventueel aanvullende meerwaarde zoals natuurwaarden?
- D. Welke effecten hebben de verschillende peilbeheersscenario's voor de (verbetering van) de waterkwaliteit?

## **2.2 Definitie en opbouw van peilbeheersscenario's**

In overleg met Rijkswaterstaat zijn verschillende peilbeheersscenario's beschouwd. In de loop van de studie zijn peilbeheersscenario's op basis van voortschrijdend inzicht en op basis van informatie uit andere delen van het Getij Grevelingen project doorontwikkeld en toegevoegd. Deze paragraaf beschrijft de einduitkomsten van het interactieve ontwikkelingsproces van peilbeheersscenario's waarvoor (model)resultaten zijn opgeleverd.

In Figuur 2.2 zijn de peilgrenzen van de beschouwde peilbeheersscenario's grafisch weergegeven. Onder het figuur staat van ieder peilbeheersscenario een korte beschrijving. Een peilbeheersscenario wordt beschreven door vijf parameters:

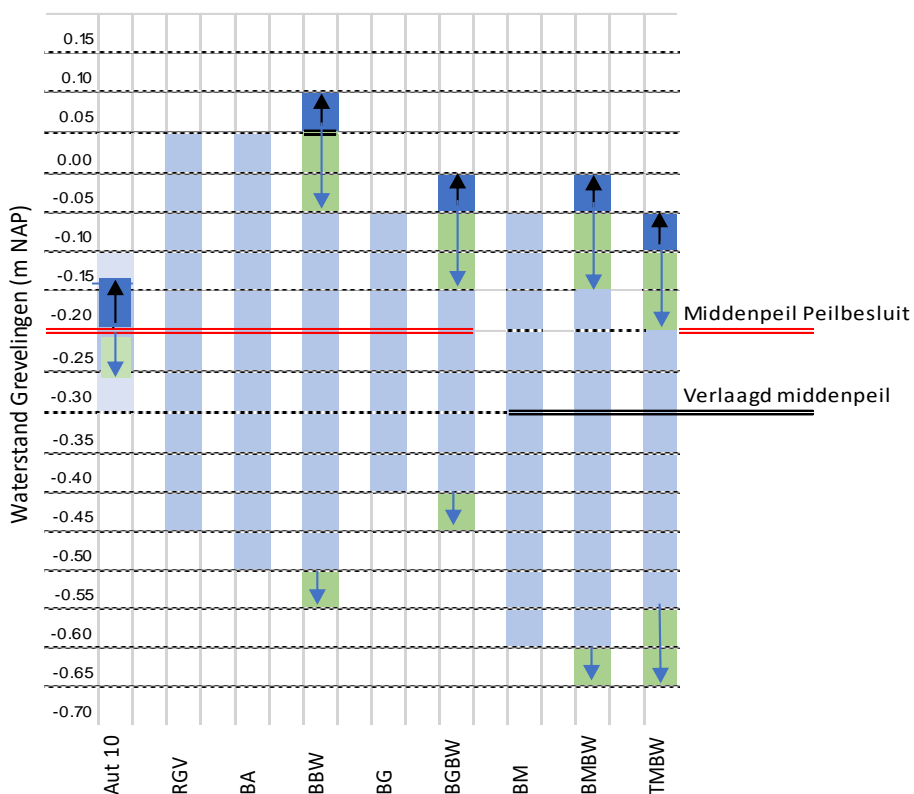
---

<sup>2</sup> Wat betreft optimalisatie is er geen verschil tussen een aantal kokers helemaal sluiten of alle kokers een bepaalde fractie te sluiten. Voorbeeld: bij een doorlaatmiddel van 12 kokers heeft het sluiten van één koker hetzelfde effect op het peilbeheer als alle twaalf kokers 1/12 deel te sluiten. Wel zijn er andere eisen aan de constructie als kokers (ook) deels afgesloten moeten kunnen worden.

1. Maximale waterstand
2. Minimale waterstand
3. Gemiddelde waterstand
4. Gemiddelde getijslag
5. Wel of niet meenemen van peilverlaging tijdens broedseizoen en peilverhoging tijdens winter

De waterpeilen zijn exclusief op- en afwaaiing en gelden voor het meetpunt Bommenede 1 (BOM1) in het midden van het meer<sup>3</sup>.

De debietverdeling door het doorlaatmiddel gedurende een getij om het peilbeheer dan wel de peilgrenzen te realiseren wordt beschreven in de volgende paragraaf over optimalisatie.



Figuur 2.2: Maximale en minimale waterpeilen en resulterende maximale getijslag per scenario. In donkerblauw en de pijl omhoog is de winteropzet weergegeven. In groen met de pijl omlaag is de verlaging van het peil tijdens het broedseizoen weergegeven. De rode lijn representeert het huidige gemiddelde peil (vastgelegd in het peilbesluit). De peilbeheersscenario's RGV, BA, BBW, BG en BGBW gaan uit van het middenpeil volgens het peilbesluit (rode lijn). Scenario's BM, BMBW en TMBW gaan uit van een verlaagd middenpeil rond de NAP -0,30 m (zwarte lijn). Let op dat in deze figuur niet de daadwerkelijk gerealiseerde getijslag en gemiddeld peil weergegeven zijn; Deze zijn afhankelijk van het aantal kokers, de optimalisatie en zeespiegelstijging.

### Huidige peilbeheer en autonome ontwikkeling (Aut10, zonder doorlaatmiddel)

In het huidige peilbeheer (zie Figuur 2.3) wordt er gestuurd op een gemiddeld peil (middenpeil) van NAP -0,20 m. Hierbij wordt een maximale waterstand aangehouden van NAP -0,10 m en een minimaal peil van NAP -0,30 m. Het peil wordt in het broedseizoen van 1 april tot 15 juli zo

<sup>3</sup> Dit is op dezelfde manier opgenomen in het Peilbesluit Grevelingen (RWS nummer: RWS-2013/2682).

veel mogelijk op een middenpeil van NAP -0,26 m gehouden en in de winter wordt het peil drie keer drie weken opgezet tot een middelpil van NAP -0,16 m. Voor de scenario's **Autonome Ontwikkeling** zijn dezelfde streefwaarden gehanteerd.

Sinds de afsluiting in 1971 het peil in het Grevelingenmeer onder normale omstandigheden wordt gehouden tussen maximaal NAP -0,10m en minimaal NAP -0,30m waarbij het middenpeil zoveel mogelijk gehouden wordt op NAP -0,20m.

Sinds het volledig openstellen van de Brouwerssluis in 2004 (voor maximale verversing ten behoeve van de waterkwaliteit):

- a. tijdens het broedseizoen gestuurd wordt op een middenpeil van NAP -0,26m; Dit i.v.m. een ruimer broedareaal voor met name (kust)broedvogels en visetende vogels;
- b. in de periode september – februari in drie perioden van drie weken gestuurd wordt op een middenpeil NAP -0,16m. Dit ter behoud en vergroting van de zone met zoutwatervegetatie (voorkomen van verzuuring en ontzilting).

Figuur 2.3: Gedeeltelijke weergave van het peilbeheer op de Grevelingen volgens het Peilbesluit Grevelingen (RWS-2013/2682)

#### Peilbeheerscenario's (met doorlaatmiddel)

Om een jaargemiddeld getij van maximaal 50 centimeter te bereiken, gaat het **Basisscenario (BA<sup>4</sup>)** uit van een middenpeil van NAP -0,20 m (gelijk aan een huidige situatie), een bovengrens van NAP +0,05 m en een ondergrens van NAP -0,50 m. De ondergrens is hierbij 5 centimeter verlaagd ten opzichte van de voorkeursvariant van de **Rijksstructuurvisie (RGV)**. Een belangrijk verschil tussen het Basisscenario en het RGV scenario is dat dat er in het eerste (BA) wordt gestuurd op een maximale getijslag en bij de laatste (RGV) wordt gestuurd op het gemiddeld peil van NAP -0,20 meter (zie ook paragraaf 2.3).

In het scenario **Kleinere Getijslag (BG)** wordt er gestuurd op een gemiddelde getijslag van 30 centimeter rond een middenpeil van NAP -0,20 m met een ondergrens van NAP -0,40 m en een bovengrens van NAP -0,05 m.

Het scenario **Verlaagd Middenpeil (BM<sup>4</sup>)** is in zijn geheel 10 cm verlaagd ten opzichte van het Basisscenario en hanteert een gemiddeld peil van NAP -0,30 m, een bovengrens van NAP -0,05 m en een ondergrens van NAP -0,60 m.

Het **Tussenscenario (TM<sup>4</sup>)** houdt een bovengrens van NAP -0,10 m aan, gelijk aan de huidige bovengrens en een ondergrens van NAP -0,55 m. De streefwaarde voor het gemiddeld peil is NAP -0,30 m.

<sup>4</sup> Het Project Getij Grevelingen heeft de identificatie van een aantal peilbeheerscenario's aangepast, wat niet meer meegenomen kon worden in dit rapport. Dit rapport hanteert nog de oorspronkelijke identificatie. De nieuwe identificatie is als volgt:

Basis met peilverlaging in het Broedseizoen en Winteropzet (BBW)	→ 50/-20
Verlaagd Middenpeil met peilverlaging in het Broedseizoen en Winteropzet (BMBW)	→ 50/-30
Tussenscenario met peilverlaging in het Broedseizoen en Winteropzet (TMBW)	→ 40/-30

De drie peilbeheersscenario's BA, BG en BM hebben ieder een variant met een **peilverlaging in het Broedseizoen en Winteropzet (BW)**. Hiermee wordt bedoeld dat de maximum- en minimumpeilgrenzen worden verlaagd met respectievelijk 10 cm en 5 cm in het broedseizoen van 1 april tot en met 15 juli om te voorkomen dat de nesten van broedende watervogels overspoeld kunnen raken. In het winterseizoen wordt gedurende drie periodes van drie weken<sup>5</sup> het maximumpeil met 5 cm opgezet om verruiging van de vegetatie te voorkomen. Voor het TM peilbeheersscenario is alleen de variant met broedseizoen en winteropzet gedaan.

### 2.3 Optimalisatie van het peilbeheer door operationele aansturing van het doorlaatmiddel

Zoals in paragraaf 2.1 is toegelicht, zijn er situaties dat het doorlaatmiddel overcapaciteit heeft en (dus) een deel van de tijd geknepen moet worden om de peilgrenzen niet te overschrijden. Er zijn verschillende manieren om te knippen, ofwel om het doorlaatmiddel operationeel aan te sturen. In dit rapport wordt de wijze van operationele aansturing een optimalisatielijze genoemd.

Optimalisatie van het peilbeheer bestaat eruit dat een getijfase vooruit wordt gekeken om te bepalen hoe het doorlaatmiddel moet worden bediend om de gewenste waterstand binnen de peilgrenzen te bereiken. In de praktijk zal het vooruitkijken op basis van modelvoorspelling gebeuren; het heet dan *model predictive control*. In deze studie wordt gebruik gemaakt van tijdreeksen van opgetreden waterstanden (zie verder paragraaf 4.1).

Vijf mogelijkheden om het peilbeheer te optimaliseren door vooruit te kijken zijn onderzocht:

1. Sturen met het aantal geopende kokers per getijfase
2. Sturen met aantal geopende kokers en scheefstandcorrectie
3. Sturen met de reactiegraad van getijturbinen<sup>6</sup>
4. Sturen met de openingsduur van de kokers
5. Sturen met pompen tijdens de ebfase

Deze mogelijkheden worden hierna toegelicht. In gevallen 1, 2 en 3 kan de optimalisatie zowel bij eb als bij vloed, of alleen bij eb, of alleen bij vloed worden toegepast. Als alleen bij eb of alleen bij vloed optimalisatie wordt toegepast, staan bij de respectievelijke daarop volgende vloed of eb alle kokers volledig open en vindt er dus geen optimalisatie plaats.

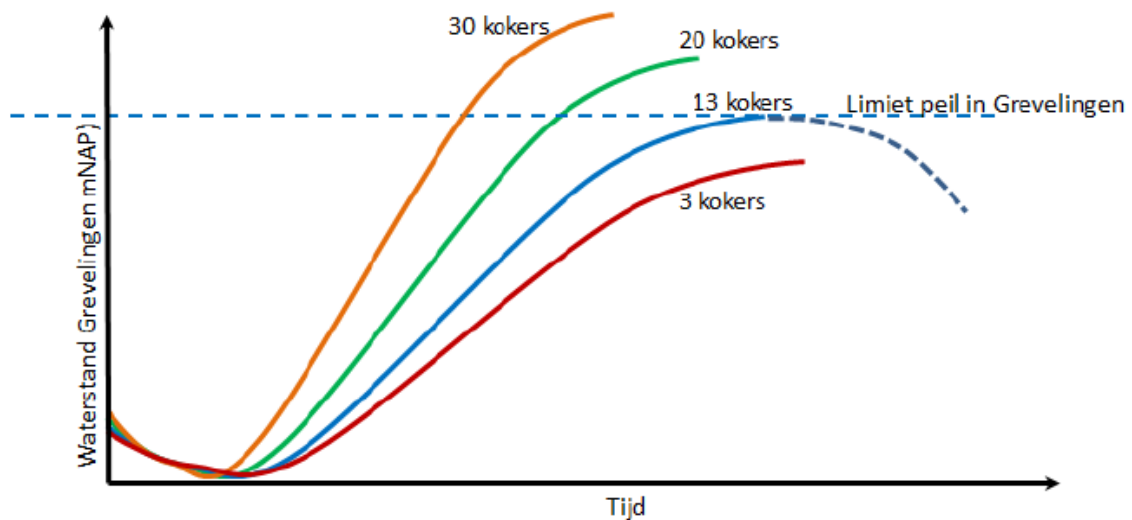
#### Ad 1. Sturen met het aantal geopende kokers per getijfase

Bij deze wijze van peilbeheer worden elke getijfase net zoveel kokers open gezet dat het minimum of maximum streefpeil precies bereikt wordt in respectievelijk de eb- of vloedfase. De tijdsduur waarop geen water wordt in- of uitgelaten en waarop de waterstand dus op een vast peil staat wordt zo geminimaliseerd. Als de eb- of vloedfase te kort is, staan alle kokers open. Het optimalisatieproces is schematisch in Figuur 2.4 weergegeven.

<sup>5</sup> Hierbij is gekozen voor dezelfde periodes als in de door Lievense (2019) uitgevoerde berekeningen, te weten: drie periodes van drie weken 6-27 februari, 1-22 september, 17 november-7 december.

<sup>6</sup> Deze optimalisatielijze is ook met scheefstandcorrectie uitgevoerd. Omdat de resultaten nauwelijks verschilden van optie 2. worden de resultaten werden niet in het hoofdrapport beschreven. In de bijlagen zijn de resultaten wel opgenomen.





Figuur 2.4 Schematische weergave van het optimaliseren van de getijslag met het aantal kokers. In dit voorbeeld worden bij vloed 13 kokers open gezet.

#### Ad 2. Sturen met aantal geopende kokers en scheefstandcorrectie

Windopzet zorgt ervoor dat de waterstand aan de ene kant van het meer hoger is dan aan de andere kant. Dat verschil kan bij harde wind oplopen tot tientallen centimeters (zie Bijlage 6D). Als het maximale peil overal gehaald moet worden, dus dat het nergens boven bijvoorbeeld NAP 0,10 m mag uitkomen, dan moet voor deze zogeheten scheefstand gecorrigeerd worden. Het gemiddeld waterpeil in het midden van het meer moet dan verlaagd worden, om ruimte te creëren voor de windopzet. Hierdoor kan overspoeling en salt-spray van gevoelige terrestrische natuur beperkt worden.

#### Ad 3. Sturen met de reactiegraad van getijturbinen in alle kokers

Als er getijdeturbinen in de kokers zijn geplaatst, kan de zogenaamde reactiegraad van de turbines gebruikt worden. De reactiegraad bepaalt de weerstand. Bij een hogere weerstand wordt de capaciteit van het doorlaatmiddel lager en bij lagere weerstand wordt de capaciteit hoger. Bij deze wijze van optimalisatie wordt de reactiegraad (binnen grenzen 0-0,9) zo ingesteld dat het minimum of maximum streefpeil precies bereikt wordt in respectievelijk de eb- of vloedfase.

#### Ad 4. Sturen met de openingsduur van de kokers voor het bereiken van versnelde vloed

Bij deze wijze van optimalisatie worden de kokers zo kort mogelijk open gezet en staan de kokers (dus) zo lang mogelijk dicht. Deze wijze is in Van Berkel (2018) beschreven met als doel de stroomsnelheid te maximaliseren om menging van de waterkolom te vergroten en daardoor beperking van de zuurstofproblematiek te realiseren. Bij deze wijze wordt het vasthouden van een vast peil dus niet als ongewenst beschouwd. Deze optimalisatie wordt alleen bij opkomende vloed toegepast. Omdat de vloed op de Grevelingen nu sneller opkomt dan bij de andere optimalisaties, wordt gesproken van een versnelde vloed.

#### Ad 5. Sturen met pompen

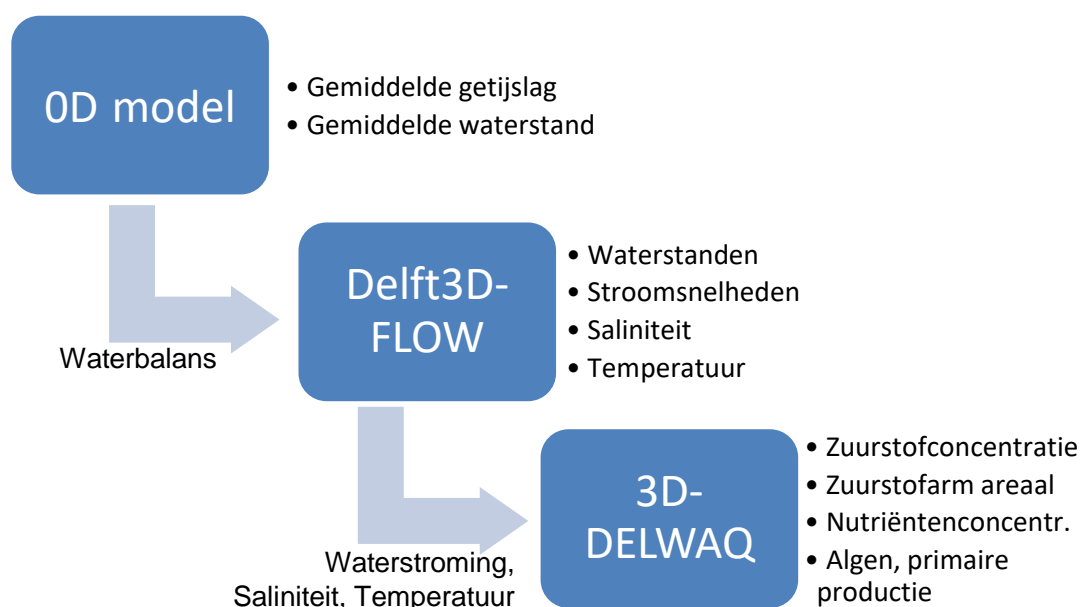
Bij deze wijze van optimalisatie kunnen de getijturbinen ook als pomp worden ingezet, waarbij de pomp tijdens ebfase wordt ingezet als onder vrij verval het minimum peil niet gehaald kan worden (Van Berkel 2019a). De pomp wordt dan zo ingezet dat precies het minimum peil gehaald wordt. Hierbij is vooralsnog alleen spuiend pompen beschouwd en nog niet pompen met positieve opvoerhoogte. Pompen worden alleen ingezet bij de ebfase, omdat de ebfase

korter is dan de vloedfase vanwege het gemiddeld lagere peil van het Grevelingenmeer ten opzichte van de Voordelta. Bij stijgende zeespiegel en gelijkblijvend peil in het Grevelingenmeer wordt de eb fase steeds korter.

### 3 Werkwijze modellering

Om de realisatie van het peilbeheerscenario's en het effect van de wijze van optimalisatie te kwantificeren is gebruikt gemaakt van een OD model (bakjes-model). Een korte beschrijving volgt in paragraaf 3.1. De uitgebreide beschrijving van dit OD model is te vinden in Bijlage C.

Vervolgens is voor een selectie van peilbeheerscenario's de waterkwaliteit van het Grevelingenmeer berekend met het Delft3D model voor hydrodynamica (FLOW) en waterkwaliteit en primaire productie (WAQ). Deze berekeningen zijn alle uitgevoerd voor een doorlaatmiddel met 12 kokers. Een beschrijving van deze modellering is te vinden in paragraaf 3.2. De relatie tussen de modellen is onderstaand schematisch weergegeven.



Tenslotte is voor één peilbeheerscenario een test gedaan met een RTC tools model, waarmee mogelijk in de toekomst de operationele aansturing van het doorlaatmiddel wordt gedaan. De opzet van deze modellering is beschreven in Bijlage 0, omdat deze verder niet voor deze optimalisatiestudie is gebruikt.

#### 3.1 OD modellering op hoofdlijnen

Het OD model van het Grevelingenmeer bevat de Brouwerssluis, de Flakkeese spuisluis en het nieuwe doorlaatmiddel. Het model berekent debieten door deze kunstwerken en berekent de resulterende waterstand in het Grevelingenmeer. Verdamping, regenval en de polderuitlaten worden niet meegenomen, vanwege hun zeer geringe (<1%) bijdrage aan de waterbalans.

Het OD model wordt aangedreven door waterstandstijdreeksen van meetpaal Brouwershavensche Gat 8 voor de Brouwerssluis en het nieuwe doorlaatmiddel en meetpaal Krammersluizen West voor de Flakkeese spuisluis. Deze tijdreeksen geven de waterstand elke 10 minuten. De rekentijdstap van het OD model is hieraan gelijk gesteld.

De tijdreeksen van het jaar 2008 zijn gebruikt, omdat 2008 het jaar is waarvoor de 3D modellen beschikbaar zijn (zie paragraaf 3.2). De resultaten van het 0D model zijn zo over te zetten naar het 3D model. In een eerder stadium zijn de tijdreeksen van het jaar 2009 gebruikt (zie Bijlage 6B).

Het doorlaatmiddel wordt gedefinieerd door:

- Het aantal kokers
- De aanwezigheid van (pomp)turbines (wel/niet)
- De afvoercoëfficiënt
- De wijze van optimalisatie

Voor de debieten van de Brouwerssluis en de Flakkeese spuisluis zijn het doorstromende oppervlak en afvoercoëfficiënt als parameters in de invoer opgenomen. Dit zijn constante waarden (zie Bijlage 6C). De Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis staan open zolang de minimale of maximale peilgrens niet wordt overschreden.

Wanneer er turbines in het doorlaatmiddel aanwezig zijn kan er vermogen worden gegenereerd. De berekening van het vermogen heeft geen effect op de berekende debieten en vormt een post-processing stap. De wiskundige beschrijving van de turbines en pompen is overgenomen uit Van Berkel (2019a, 2019b).

Met het 0D model zijn de volgende combinaties van peilbeheerscenario en wijze van optimalisatie doorgerekend (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Overzicht van met het 0D model uitgevoerde combinaties van Peilbeheerscenario en Wijze van optimalisatie

		Wijze van optimalisatie					
		Geen	Aantal kokers	Aantal kokers en scheefstandcorrectie	Reactiegraad turbines	Versnelde vloed	Pompen
Peilbeheerscenario	Rijksstructuurvisie (RGV)	x					
	Basis (BA)		x	x	x		
	Basis + peilverlaging Broedseizoen en Winteropzet (BBW)		x		x	x	x
	Kleinere Getijslag (BG)		x		x		
	Kleinere Getijslag + peilverlaging Broedseizoen en Winteropzet (BGBW)		x	x	x	x	
	Verlagen middenpeil (BM)		x		x		
	Verlagen middenpeil + peilverlaging Broedseizoen en Winteropzet (BMBW)		x		x		x
	Tussenscenario + peilverlaging Broedseizoen en Winteropzet (TMBW)		x		x	x	x

Iedere combinatie is doorgerekend met:

- 6, 9, 12, 15, 18 en 20 kokers (al dan niet met turbines), en
- 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 en 50 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995

Aangenomen is dat de gemiddelde zeespiegel in 2008 5 cm hoger was dan in 1995, het referentiejaar ten opzichte waarvan de klimaatrobustheid voor zeespiegelstijging is gedefinieerd (Boeters, 2019b). In de discussie in hoofdstuk 5 wordt hierop nader ingegaan.

Voor iedere berekening wordt de gemiddelde getijslag en het gemiddeld peil berekend. In geval van turbines of pompen wordt aanvullend het gegenereerd vermogen berekend. Tenslotte wordt bij pompen ook nog het energieverbruik berekend. De gemiddelde getijslag wordt berekend door elke getijcyclus het verschil tussen de hoogste waterstand en de laagste waterstand op te slaan en daarvan vervolgens het gemiddelde te nemen. Het gemiddelde peil wordt berekend door van alle waarden over het jaar het gemiddelde te nemen. Het maximale en het minimale peil worden niet berekend (maar er wordt op gestuurd), omdat die met het peilbeheerscenario zijn vastgelegd.

Zo is een primaire database opgebouwd van ruim 1.500 berekeningen die voor analyse beschikbaar is.

#### *Gevoeligheidstest afvoercoëfficiënt*

De afvoercoëfficiënt is een belangrijke parameter. Voor alle hierboven aangegeven berekeningen wordt dezelfde afvoercoëfficiënt van 1,10 gehanteerd. Deze waarde is in Deltares (2018) getoetst. Om de gevoeligheid voor de afvoercoëfficiënt te testen is er voor het peilbeheerscenario Basis met kokeroptimalisatie een berekening een lagere afvoercoëfficiënt van 0,95 doorgerekend.

### **3.2 3D modellering Delft3D-FLOW en Delft3D-WAQ**

Een selectie van de peilbeheerscenario's is doorgerekend met het 3D hydrodynamisch model voor de waterbeweging, saliniteit en temperatuur (Delft3D-FLOW) en vervolgens is op basis van de uitkomsten hiervan de waterkwaliteit berekend met het 3D DELWAQ model voor zuurstof, nutriënten en primaire productie. De modellen zijn verkregen via Helpdesk Water<sup>7</sup>. De 3D modellen zijn in diverse stappen ontwikkeld in opdracht van Rijkswaterstaat ten tijde van de MIRT Grevelingen in de periode 2008-2011. Deltares (2010) beschrijft de volledige modelopzet. Deltares (2008, 2011) beschrijft modelresultaten van eerdere scenariostudies.

De modellen zijn gekalibreerd en gevalideerd met metingen uit 2000 en 2008. In deze scenariostudie zijn de peilbeheerscenario's toegepast op het jaar 2008, omdat in dat jaar de zuurstofproblematiek groter was dan in het jaar 2000. Tot op heden is het modelinstrumentarium meerdere keren ingezet, waaronder de Scenariostudie natuurperspectief Grevelingenmeer (Tangelder *et al.*, 2018) als meest recente.

De door peilbeheer en door meteorologische omstandigheden (windopzet) veroorzaakte waterstandsvariatie op het meer zelf, en de variabelen die gekoppeld zijn aan de waterstand zoals het areaal intergetijdengebied en de overstromingsduur kunnen met het Delft3D-FLOW model berekend of afgeleid worden.

Het 3D-model hanteert de waterbalans die door het 0D-model is opgesteld. De waterbalans – dat wil zeggen de debieten door de Brouwerssluis, de Flakkeese spuisluis en de nieuwe doorlaat in de Brouwersdam – zoals berekend met het 0D-model is opgelegd aan het 3D-model. Polderlozingen, neerslag en verdamping zijn ook opgenomen in het 3D-model. Dit wordt in de waterbalans gesloten door deze debieten netto ook via de Brouwersdam uit te laten

---

<sup>7</sup> <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/artikel/>

stromen. Het betreft een kleine term (orde 1-2 m<sup>3</sup>/s) ten opzichte van de debieten door de doorlaat (jaargemiddeld orde 1.000 m<sup>3</sup>/s).

Voor de waterkwaliteitsvariabelen (zuurstof, nutriënten, doorzicht, algen, primaire productie) wordt vervolgens het 3D-model voor waterkwaliteit en primaire productie ingezet. Het 3D-DELWAQ model berekent onder andere het effect van zout- en temperatuurstratificatie op mogelijke uitputting van zuurstof in de onderlaag.

In DELWAQ zijn de Delft3D-FLOW resultaten voor de verschillende peilbeheerscenario's opgelegd en doorgerekend. Vervolgens zijn in de nabewerking verschillende parameters voor locatie Dreischor (= GTSO 13) uit de modelresultaten gehaald. Ook zijn de berekende zuurstofconcentraties nabewerkt om het areaal vast te stellen met zuurstofarme omstandigheden in het Grevelingenmeer, d.w.z. met langdurig (> 7 dagen) lage (< 3 mg/l) zuurstof concentraties.

Voor het autonome peilbeheerscenario is zowel de variant met 10 centimeter als met 40 centimeter zeespiegelstijging ten opzichte van 1995 doorgerekend. Deze waterbalans is door Lieveense (2019) aangeleverd. Alle overige peilbeheerscenario's zijn alleen voor 10 centimeter zeespiegelstijging ten opzichte van 1995 (~2025) doorgerekend. De verwachting is dat als het doorlaatmiddel in gebruik wordt genomen, aangenomen wordt vanaf 2025, de zeespiegel ongeveer 10 cm is gestegen ten opzichte van 1995.

In alle peilbeheerscenario's is uitgegaan van een doorlaatmiddel met 12 kokers en is de optimalisatiemethode op basis van het aantal kokers gehanteerd. Behalve het scenario voor Autonome ontwikkeling, waarin geen sprake is van een doorlaatmiddel, en het RGV scenario, waarin geen kokeroptimalisatie is opgenomen.

Om de relatie tussen getijslag en zuurstofarm areaal beter te kunnen analyseren is nog een extra 0D en 3D som gedaan voor een peilbeheerscenario met een tussenliggende getijslag van ongeveer 20 centimeter: BG2BW.

Tabel 3.2 Overzicht van uitgevoerde 3D modelberekeningen en bijbehorende codering (zie ook Figuur 2.2)

<b>Aut10</b>	Autonome ontwikkeling bij 10 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995
<b>Aut40</b>	Autonome ontwikkeling bij 40 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995
<b>RGV</b>	Voorkeursvariant uit de Rijkstructuurvisie Grevelingen Volkerak-Zoommeer
<b>BA</b>	Basis
<b>BBW</b>	Basis met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet
<b>BS</b>	Basis met scheefstandcorrectie voor windopzet
<b>BM</b>	Basis met verlaagd middenpeil
<b>BMBW</b>	Basis met verlaagd middenpeil en peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet
<b>TMBW</b>	Tussenscenario met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet
<b>BG</b>	Kleinere getijslag van 30 cm
<b>BGBW</b>	Kleinere getijslag met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet
<b>BGS</b>	Kleinere getijslag met scheefstandcorrectie voor windopzet
<b>BG2BW</b>	Kleinere getijslag 20 cm met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet
<b>BPBW</b>	Versnelde vloed met basis met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet
<b>BPTMBW</b>	Versnelde vloed met Tussenscenario en met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet
<b>BPGBW</b>	Versnelde vloed met kleinere getijslag van 30 cm peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet



## 4 Resultaten en analyses

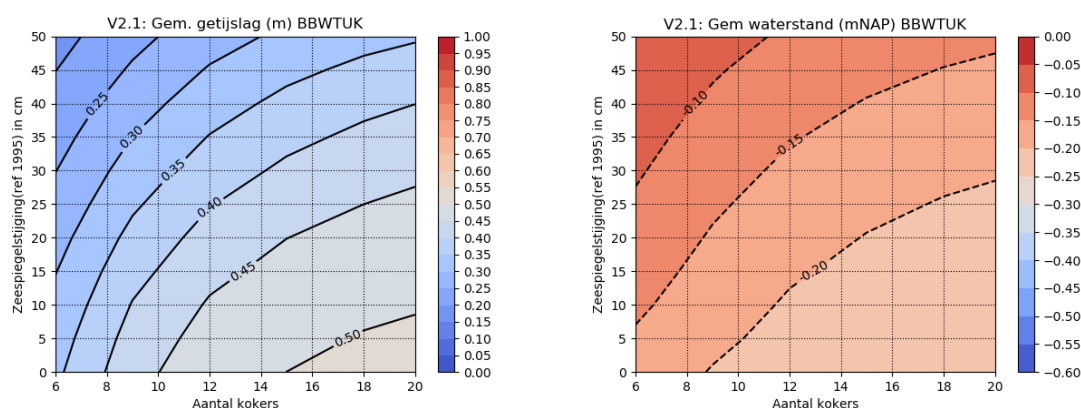
### 4.1 Resultaten 0D model

Voor elke combinatie van peilbeheerscenario en wijze van optimalisatie (Tabel 3.1) zijn zogenaamde regenbooggrafieken geproduceerd (zie voorbeeld Figuur 4.1). Deze grafieken geven voor elke combinatie van het aantal kokers en mate van zeespiegelstijging de gerealiseerde jaargemiddelde getijslag en de jaargemiddelde waterstand weer.

Met deze regenbooggrafieken kunnen vragen beantwoord worden als ‘Hoeveel kokers zijn er nodig om een gemiddelde getijslag van 45 centimeter te behalen bij een zekere mate van zeespiegelstijging?’ en ‘Tot welke mate van zeespiegelstijging kan met 12 kokers een gemiddeld peil dat niet hoger oploopt dan NAP -0,20 m worden gerealiseerd?’

Omdat het doorlaatmiddel niet altijd open kan door bijvoorbeeld stormopzet op de Voordelta, is de behaalde gemiddelde getijslag over het jaar altijd minder dan de maximale getijslag volgens de peilgrenzen. Voor alle peilbeheerscenario's geldt dat naarmate de zeespiegel stijgt de behaalde getijslag afneemt en het gemiddelde peil omhoog gaat. Ook geldt dat met meer kokers een grotere getijslag bereikt kan worden met een lager gemiddeld peil op het Grevelingenmeer.

Zoals eerder aangegeven in Hoofdstuk 3 is zeespiegelstijging weergegeven ten opzichte van 1995. Er is hierbij de aangenomen dat de zeespiegel in 2008 5 centimeter hoger was dan in 1995 (Boeters, 2019a).



Figuur 4.1 Voorbeeld van een regenbooggrafiek voor het scenario BBW (Basis met broedseizoenverlaging en winteropzet, kokers zonder turbines (TUK)). De waarden op de kromme lijnen geven de gerealiseerde getijslag (links) en de gemiddelde waterstand (rechts).

Voor het peilbeheerscenario *Basis met peilverlaging Broedseizoen en Winteropzet* met kokers als wijze van optimalisatie (BBW, zie Figuur 4.1) is te zien dat met 12 kokers en een zeespiegelstijging van 10 centimeter ten opzichte van 1995 een gemiddelde getijslag van ongeveer 46 centimeter wordt gehaald en een gemiddeld peil van iets lager dan NAP -0,20 meter. Bij een stijgende zeespiegel wordt de behaalde getijslag steeds kleiner en bij een stijging van 25 centimeter ten opzichte van 1995 is de getijslag minder dan 40 centimeter en loopt de gemiddelde waterstand op naar ongeveer NAP -0,17 m.

Tabel 4.1 geeft de waarden weer voor de gerealiseerde gemiddelde getijslag en gemiddelde waterstand op het moment dat het doorlaatmiddel in gebruik wordt genomen in 2025. Het betreft de geselecteerde scenario's die ook met het 3D model zijn doorgerkend. De regenbooggrafieken voor alle scenario's zijn te vinden in Bijlage 6A.

Tabel 4.1 Berekende jaargemiddelde getijslag en jaargemiddelde waterstand voor een doorlaatmiddel met 12 kokers bij 10 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995. De laatste kolom geeft de zeespiegelstijging weer waarbij 40 cm getijslag wordt onderschreden.

Code	Omschrijving peilbeheerscenario	Wijze van optimalisatie (zie onder tabel)	Jaargemiddelde waterstand bij 10 cm ZSS t.o.v. 1995 (in cm NAP)	Jaargemiddelde getijslag bij 10 cm ZSS t.o.v. 1995 (in cm)	Zeespiegelstijging t.o.v. 1995 waarbij 40 cm getijslag wordt onderschreden (in cm)
Auto_10	Autonome ontwikkeling bij 10 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995	A	-20 #	7 #	Niet van toepassing
Auto_40	Autonome ontwikkeling bij 40 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995	A	-20 #	5 #	Niet van toepassing
RGV4	Voorkeursvariant uit de Rijkstructuurvisie Grevelingen Volkerak-Zoommeer	A	-20,2	43,0	17
BA	Basis	B	-18,9	46,4	27
BC	Basis met lagere afvoercoëfficiënt	B	-17,7	44,0	20
BBW	Basis met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	B	-20,5	45,5	25
BS	Basis met scheefstandcorrectie voor windopzet	C	-19,0	44,8	24
BPBW	Versnelde vloed met basis peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	D	-24,7	45,5	25
BM	Basis met verlaagd middenpeil	B	-27,0	43,0	17
BMBW	Basis met verlaagd middenpeil en peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	B	-28,6	42,1	15
TMBW	Tussenscenario met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	B	-31,1	37,5	2
BPTMBW	Versnelde vloed met tussenscenario en met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	D	-35,6	37,5	2
BG	Kleinere getijslag van 30 cm	B	-21,3	32,2	Niet van toepassing
BGBW	Kleinere getijslag met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	B	-23,0	31,5	Niet van toepassing
BGS	Kleinere getijslag met scheefstandcorrectie voor windopzet	C	-20,8	29,7	Niet van toepassing
BPGBW	Versnelde vloed met kleinere getijslag van 30 cm met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	D	-28,0	31,5	Niet van toepassing
BG2BW	Kleinere getijslag 20 met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	B	-23,3	22,8	Niet van toepassing

# Pers. comm. P. Lieveense (zie ook Lieveense 2019)

Wijze van optimalisatie:

- A. Gestuurd op de jaargemiddelde waterstand, zodanig dat deze (ongeveer) NAP -20 cm is.
- B. Optimalisatie met het aantal geopende kokers per getijfase
- C. Optimalisatie met aantal geopende kokers per getijfase en scheefstandcorrectie
- D. Optimalisatie met de openingsduur van de kokers voor het bereiken van versnelde vloed

Uit de onderlinge vergelijking tussen de modeluitkomsten voor de peilbeheerscenario's in tabel 4.1 zijn de volgende observaties af te leiden:

- De vergelijking tussen de voorkeursvariant van de ontwerp-Rijksstructuurvisie en de Basis laat zien dat de Basis een ruim 1 cm hogere jaargemiddelde waterstand en een ruim 3 cm grotere jaargemiddelde getijslag heeft. De Basis kan 10 cm meer zeespiegelstijging opvangen dan RGV en is dus aanzienlijk klimaatrobuster.

De minimale peilgrens van Basis is 5 cm lager dan die van de RGV (NAP -50 cm ten opzichte van NAP -45 cm). De maximale peilgrens in Basis is 3 cm hoger dan van RGV (NAP +5 cm ten opzichte van RGV +2 cm), omdat in RGV met de maximale peilgrens wordt gestuurd op het niet overschrijden van de jaargemiddelde waterstand van NAP -20 cm (zie sectie 5.2.1 in Bijlage C voor toelichting). De maximale ruimte voor getij in Basis is dus groter dan in RGV (55 cm ten opzichte van 47 cm). Deze ruimte zorgt ervoor dat een grotere getijslag kan worden gerealiseerd.

- Toevoegen van peilbeheer voor broedseizoen en winteropzet heeft tot gevolg dat de jaargemiddelde waterstand ongeveer 1,5 cm lager wordt. De jaargemiddelde getijslag wordt ongeveer 1 cm kleiner, waardoor 2 cm minder zeespiegelstijging opgevangen kan worden. Omdat de verlaging van de peilgrenzen tijdens het broedseizoen 3,5 maanden duurt en de verhoging van de winteropzet in totaal 9 weken, heeft de langer durende verlaging tijdens het broedseizoen over het jaar gemiddeld een verlaging van de gemiddelde waterstand tot gevolg. Bij een lagere gemiddelde waterstand neemt de jaargemiddelde getijslag iets af, omdat er gedurende het jaar meer getijfasen zijn waarbij de minimale peilgrens bij eb niet gehaald wordt omdat het ebvenster korter is bij lagere gemiddelde waterstand. Om voor dit effect te compenseren zou het doorlaatmiddel met (een) extra koker(s) moeten worden uitgerust.
- Scheefstandcorrectie resulteert in een iets lagere jaargemiddelde getijslag, doordat bij windopzet de maximale peilgrens tijdelijk verlaagd wordt om de scheefstand op te vangen. De benodigde verlaging wordt per getijfase vastgesteld. Over het jaar gemiddeld wordt daardoor de getijslag kleiner. Dit heeft ook tot gevolg dat bij Basis circa 3 cm minder zeespiegelstijging opgevangen kan worden. Scheefstandcorrectie om overspoeling van de terrestrische natuur te voorkomen gaat dus ten koste van klimaatrobustheid.
- Sturing met de openingsduur van de kokers om een versnelde vloed te krijgen heeft een circa 4 tot 5 cm lagere jaargemiddelde waterstand tot gevolg ten opzichte van sturen met het aantal geopende kokers per getijfase. Tijdens het sturen met openingsduur wordt de waterstand zo lang mogelijk op het laagste peil gehouden. Gemiddeld gaat de waterstand daardoor omlaag. Tussen beide optimalisatiewijzen is geen verschil voor de jaargemiddelde getijslag. Als de vloedfase te kort is om de maximale peilgrens te bereiken komen de twee optimalisatiewijzen overeen, namelijk dat alle kokers gedurende de hele vloedfase openstaan. Als de vloedfase lang genoeg is, wordt in beide gevallen de maximale peilgrens bereikt. De optimalisatiewijzen verschillen dus niet in de hoeveelheid instromend water, alleen in de verspreiding over de tijd. Er is daarom ook geen effect voor de mate van zeespiegelstijging die opgevangen kan worden.

### Gevoeligheidstest afvoercoëfficiënt

Voor het peilbeheerscenario Basis is de gevoeligheid van het 0D-modelresultaat getest voor een lagere afvoercoëfficiënt (0,95 in plaats van 1,10). Een lagere afvoercoëfficiënt betekent dat bij hetzelfde aantal kokers minder water in- en uitstroomt door het doorlaatmiddel; de weerstand is hoger. Bij 12 kokers en een zeespiegelstijging van 10 cm ten opzichte van 1995 resulteert dat in een jaargemiddelde waterstand van NAP -17,7 cm en een jaargemiddelde getijslag van 44,0 cm. Een lagere afvoercoëfficiënt heeft dus logischerwijs een hogere jaargemiddelde waterstand en een lagere jaargemiddelde getijslag tot gevolg. Met name voor klimaatrobustheid is het effect vrij groot, omdat bij 20 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995 de 40 cm getijslag onderschreden wordt, terwijl dat bij de Basis bij 27 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995 is. Bij 2 mm/jaar zeespiegelstijging komt dat overeen met een verschil van 35 jaar.

## 4.2 Resultaten 3D waterkwaliteitsmodellering

De modelresultaten worden samengevat in Tabel 4.2. De relatie tussen de jaargemiddelde getijslag en het areaal langdurig lage zuurstofconcentratie wordt getoond in Figuur 4.1-4.3.

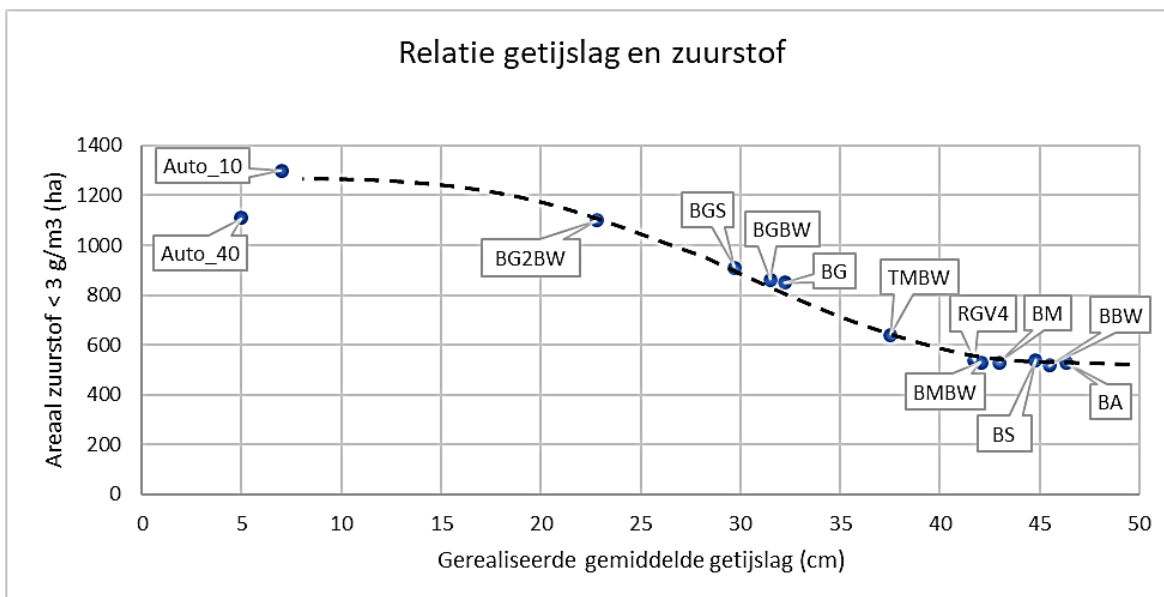
Voor de waterkwaliteit heeft het doorlaatmiddel twee effecten: 1) De uitwisseling met de Voordelta neemt toe met grotere getijslag, en 2) De menging in het Grevelingenmeer neemt toe met grotere getijslag. De grotere uitwisseling zorgt ervoor dat de verblijftijd in het Grevelingenmeer afneemt van enkele maanden tot enkele weken bij 50 cm gemiddelde getijslag. De waterkwaliteit in het Grevelingenmeer gaat daardoor meer overeenkomen met de waterkwaliteit in de Voordelta. Omdat de stikstofconcentraties in de Voordelta iets hoger zijn dan in het huidige Grevelingenmeer, nemen de stikstofconcentraties in het Grevelingenmeer toe bij grotere getijslag.

De primaire productie in het Grevelingenmeer met getij zal circa 75% hoger liggen dan bij autonome ontwikkeling zonder nieuw doorlaatmiddel. Nu is het Grevelingenmeer in de zomer stikstof gelimiteerd, maar er komt meer stikstof beschikbaar in de situatie met een doorlaatmiddel. Dat is ook terug te zien in de hogere chlorofyl- en detritusconcentratie bij hogere getijslag. De fosfaatconcentratie daarentegen neemt af als de uitwisseling toeneemt. Omdat de fosfaatconcentratie op de Voordelta lager is wordt het fosfaat dat door nalevering uit de bodem vrijkomt deels afgevoerd naar de Voordelta.

De menging die door een grotere uitwisseling wordt gerealiseerd in het Grevelingenmeer, resulteert in een kleiner areaal met een langdurig lage zuurstofconcentratie. Dus hoewel de zuurstofvraag toeneemt door hogere primaire productie en hogere import van organisch materiaal uit de Voordelta, is de grotere menging dominant voor het reduceren van het zuurstofarme areaal. Conform eerdere modelstudies wordt bij een jaargemiddelde getijslag van 40 cm tot 50 cm een stabiel niveau van circa 500 ha bereikt. Dit betreft de diepe putten van Scharendijke en Den Osse die door hun diepte en locatie bij de Brouwerssluis, niet volledig verticaal gemengd worden bij 50 cm getijslag. Bij een gemiddelde getijslag kleiner dan circa 40 cm begint het zuurstofarme areaal toe te nemen. Zonder doorlaatmiddel overeenkomend met een gemiddelde getijslag van 5 cm tot 10 cm is het berekende zuurstofarme areaal 1300 ha (autonoom 10). Dit ligt in de range van metingen over de afgelopen 20 jaar die een variatie van circa 800 ha tot 1600 ha laten zien voornamelijk veroorzaakt door variatie in meer en minder warme en windstille zomers.

Tussen 10 cm en 40 cm gemiddelde getijslag neemt het zuurstofarme areaal af (Figuur 4.2). De vorm van de curve is op basis van modelresultaten en expert judgement afgeleid. Omdat er onder 10 cm en boven 40 cm gemiddelde getijslag weinig tot geen verandering in het areaal

is, verwachten we een S-curve. Een relatief kleine afname van de gemiddelde getijslag op het steilere deel van de curve betekent een relatief grote toename van het zuurstofarme areaal. Ofwel het risico op zuurstofproblematiek – tijdens warme, windstille zomerdagen – is groter op het steile deel van de curve. Bij een getijslag van minder dan 10 cm of meer dan 40 cm zal een relatief kleine verandering van getijslag naar verwachting niet resulteren in een grotere zuurstofproblematiek.



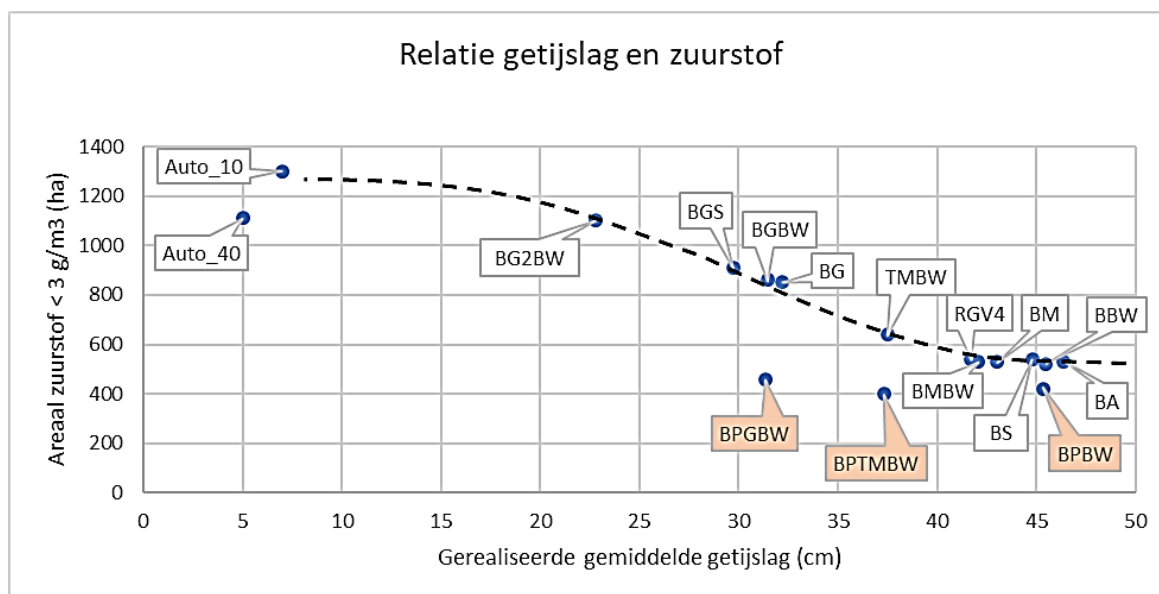
Figuur 4.2 Relatie tussen gerealiseerde gemiddelde getijslag en areaal met langdurig lage zuurstofconcentratie (meer dan 7 dagen) op basis van berekeningen met het 3D model. De lijn is een handmatig gefitte curve op basis van expert judgement, zie tekst voor uitleg.

De vergelijking tussen de autonome ontwikkeling bij 10 cm en bij 40 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995 laat een afwijking zien, namelijk dat minder uitwisseling (bij Auto\_40) een lager zuurstofarm areaal heeft dan bij meer uitwisseling (bij Auto\_10). Bij autonome ontwikkeling 40 cm is de uitwisseling met de Voordelta ongeveer 25% lager dan bij autonome ontwikkeling 10 cm zeespiegelstijging, terwijl toch het zuurstofarme areaal kleiner is. Het areaal met langdurig lage zuurstofconcentratie wordt bepaald door de mate van stratificatie en de zuurstofvraag. Uit de vergelijking van de modelresultaten blijkt dat de mate van stratificatie in beide gevallen vrijwel gelijk is. Het verschil zuurstofareaal moet dus verklaard worden uit een verschil in zuurstofvraag, ofwel de beschikbaarheid van organisch materiaal. Deze zuurstofvraag is lager bij autonome ontwikkeling 40 cm doordat minder stikstof beschikbaar is (door minder uitwisseling) waardoor de primaire productie iets lager is en doordat minder organisch materiaal wordt geïmporteerd uit de Voordelta.

## Versnelde vloed en stratificatie

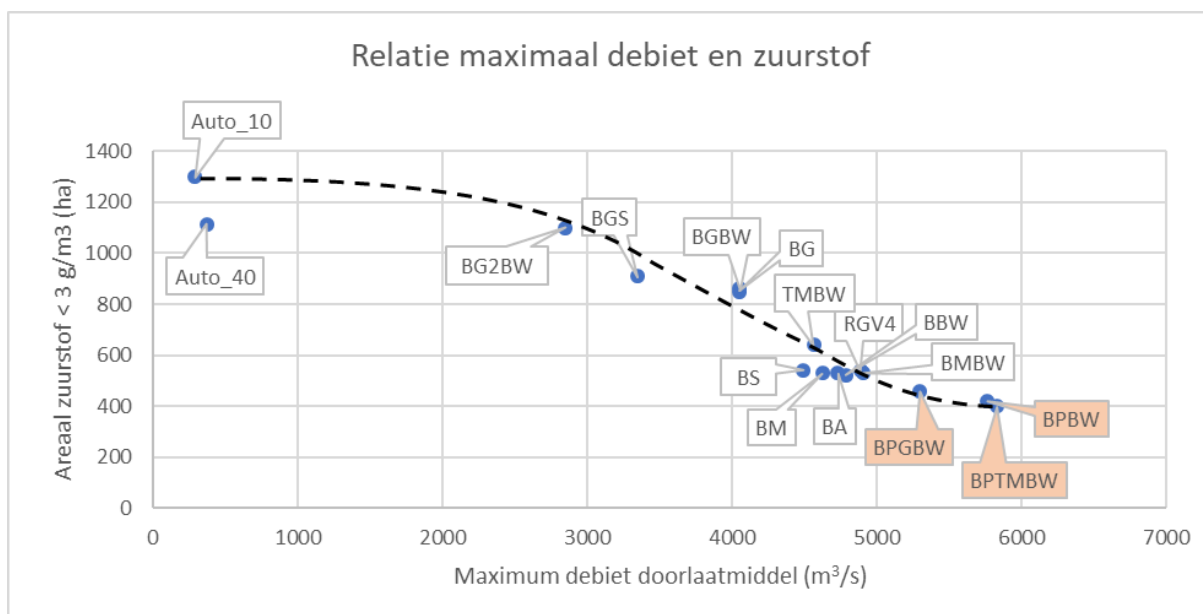
In Figuur 4.3 zijn de drie uitgevoerde berekeningen met sturing op openingsduur om versnelde vloed te realiseren toegevoegd. Gelijk valt op dat deze drie scenario's buiten de getoonde relatie tussen jaargemiddelde getijslag en zuurstofarm areaal vallen. Te zien is dat in deze scenario's een kleiner zuurstofarm areaal optreedt bij een gelijke jaargemiddelde getijslag (vergeleken met de niet-versnelde vloed scenario's). Bijvoorbeeld voor de BPGBW en BGBW scenario's waar de getijslag voor beide gemiddeld 31,5 cm is, maar waarvoor het zuurarme areaal op respectievelijk 460 ha en 860 uitkomt.

In Figuur 4.4 is het zuurstofarme areaal uitgezet tegen het maximale debiet in het doorlaatmiddel. Op deze manier komen de Versnelde Vloed scenario's wél op een lijn te liggen met de overige scenario's. Dit geeft aan dat feitelijk niet de getijslag en daarmee de hoeveelheid water die binnenkomt bepalend is voor de vermindering van stratificatie en zuurstofloosheid, maar eerder de snelheid waarmee dit gebeurt. De snelheid is van invloed op de hoeveelheid kinetische energie die beschikbaar is voor het genereren van turbulentie en daardoor voor het verminderen van de stratificatie in het meer. Omdat dit een niet-lineair verband betreft ( $\sim u^n$ , met  $2 \leq n \leq 3$ ), is het maximale debiet of de pieksnelheid hiervoor een bruikbare maat. Deze maat zou verder verbeterd kunnen worden door de totale hoeveelheid kinetische energie of generatie van turbulentie per inlaatperiode te beschouwen (waarmee bijvoorbeeld ook scenario's met gelijk piekdebiet maar verschillende inlaatduur kunnen worden onderscheiden).



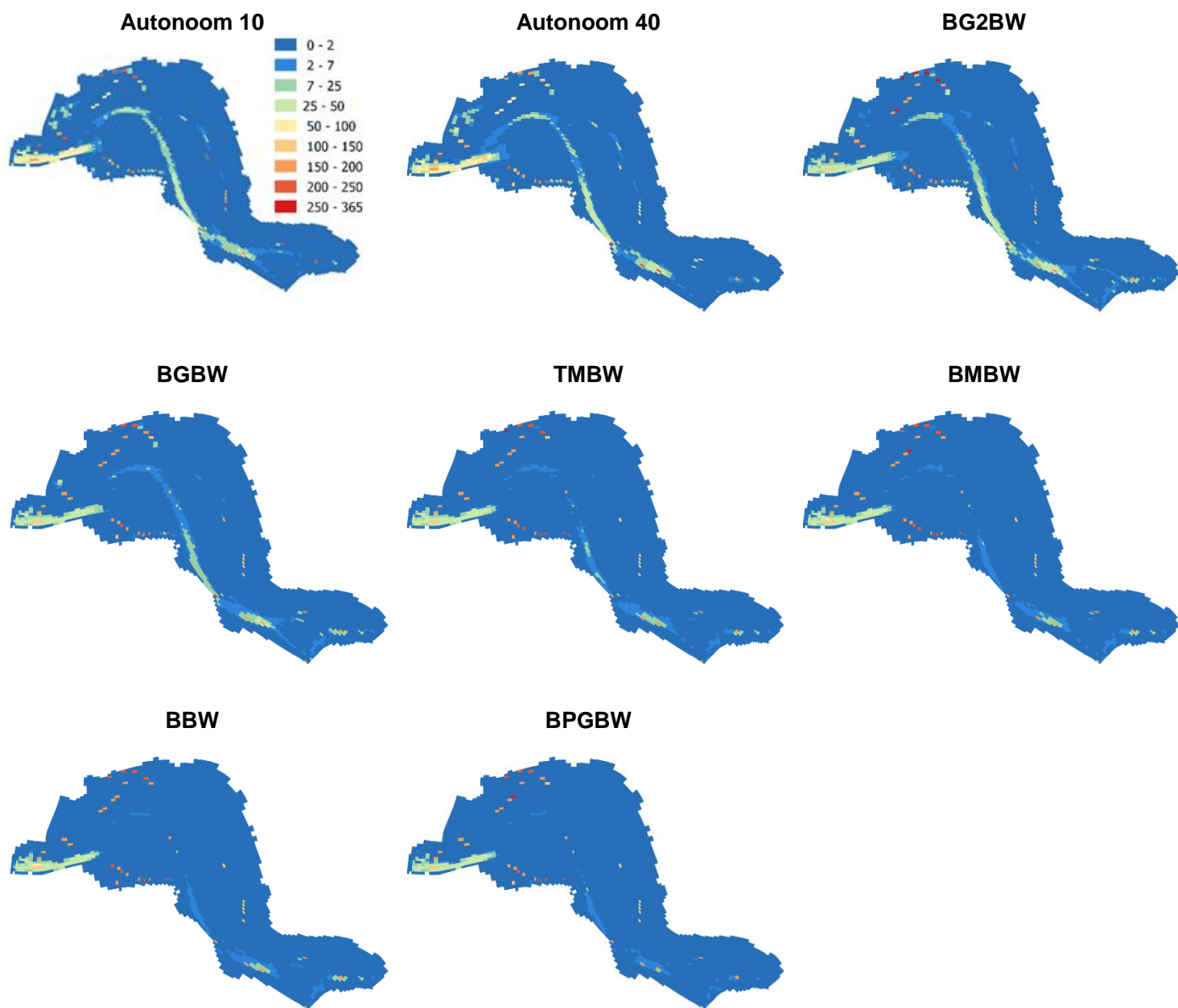
Figuur 4.3 Relatie tussen gerealiseerde gemiddelde getijslag en areaal met langdurig lage zuurstofconcentratie (meer dan 7 dagen) op basis van berekeningen met het 3D model. De lijn is een handmatig gefitte curve op basis van expert judgement, zie tekst voor uitleg. De peilbeheersscenario's met versnelde vloed liggen buiten op de curve.





*Figuur 4.4 Relatie tussen maximaal debiet door het doorlaatmiddel en areaal met langdurig lage zuurstofconcentratie (meer dan 7 dagen) op basis van berekeningen met het 3D model. De lijn is een handmatig gefitte curve op basis van expert judgement, zie tekst voor uitleg. De peilbeheerscenario's met versnelde vloed passen nu wel op de lijn.*

Ter illustratie toont Figuur 4.5 in een kaartbeeld per scenario waar de zuurstofarme gebieden voorkomen. De oude, diepe getijgeulen zijn herkenbaar. De relatie met getijslag of debiet is in de vorige alinea's en figuren beschreven.



*Figuur 4.5 Weergave van het aantal dagen aaneengesloten zuurstofarm areaal ( $< 3 \text{ mg/l}</math>) in de onderlaag van de waterkolom. De figuren geven van linksboven naar rechtsonder een aflopend zuurstofarm areaal voor een aantal van de met het 3D model doorgerekende peilbeheerscenario's (12 kokers, 10 cm ZSS ten opzichte van 1995).$*

Tabel 4.2 Overzicht van modelresultaten peilbeheerscenario's met het 3D waterkwaliteitsmodel

Run ID		Primaire productie	Areaal zuurstof < 3 g/m <sup>3</sup>	Ammonium	Nitraat	Totaal-N	Ortho-fosfaat	Totaal-P	Silicium	Chlorofyl-a	Detritus C	Doorzicht (Secchi)	Saliniteit	Temperatuur
	Peilbeheerscenario	g-C/m <sup>2</sup> /j	ha	g-N/m <sup>3</sup>	g-N/m <sup>3</sup>	g-N/m <sup>3</sup>	g-P/m <sup>3</sup>	g-P/m <sup>3</sup>	g-Si/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	g-C/m <sup>3</sup>	m	psu	°C
<b>Auto_10</b>	Autonome ontwikkeling 10 cm ZSS tov 1995	289	1300	0,037	0,17	0,59	0,027	0,037	0,27	5,3	0,34	2,2	30,1	11,7
<b>Auto_40</b>	Autonome ontwikkeling 40 cm ZSS tov 1995	275	1110	0,034	0,15	0,56	0,029	0,037	0,25	4,8	0,32	2,3	30,2	11,8
<b>RGV</b>	Voorkeursvariant uit de Rijkstructuurvisie Grevelingen Volkerak-Zoommeer	463	540	0,039	0,19	0,65	0,018	0,032	0,26	7,7	0,49	2,1	30,8	11,8
<b>BA</b>	Basis	469	530	0,038	0,19	0,65	0,018	0,032	0,25	7,8	0,50	2,1	30,8	11,8
<b>BBW</b>	Basis met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	465	520	0,038	0,19	0,65	0,018	0,032	0,25	7,8	0,49	2,1	30,8	11,8
<b>BS</b>	Basis met scheefstandcorrectie voor windopzet	467	540	0,038	0,19	0,65	0,018	0,032	0,25	7,7	0,49	2,1	30,8	11,8
<b>BM</b>	Basis met verlaagd Middenpeil	459	530	0,039	0,19	0,65	0,018	0,032	0,25	7,7	0,49	2,1	30,8	11,8
<b>BMBW</b>	Basis met verlaagd Middenpeil en met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	455	530	0,039	0,19	0,65	0,018	0,032	0,25	7,7	0,49	2,1	30,8	11,8
<b>TMBW</b>	Tussenscenario met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	447	640	0,039	0,19	0,65	0,018	0,032	0,25	7,6	0,48	2,1	30,8	11,8
<b>BG</b>	Kleinere Getijslag van 30 cm	445	850	0,038	0,18	0,64	0,018	0,031	0,25	7,5	0,47	2,2	30,8	11,8
<b>BGS</b>	Kleinere Getijslag met scheefstandcorrectie	440	910	0,038	0,18	0,64	0,018	0,031	0,25	7,4	0,46	2,2	30,8	11,8
<b>BGBW</b>	Kleinere Getijslag met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	441	860	0,038	0,18	0,64	0,018	0,032	0,25	7,5	0,47	2,2	30,8	11,8
<b>BG2BW</b>	Kleinere Getijslag van 20 cm met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	422	1100	0,038	0,18	0,63	0,019	0,032	0,25	7,2	0,45	2,2	30,7	11,8
<b>BPBW</b>	Versnelde vloed met basis en met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	466	420	0,038	0,19	0,65	0,018	0,033	0,26	7,7	0,51	2,1	30,8	11,8
<b>BPTMBW</b>	Versnelde vloed met Tussenscenario met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	449	400	0,040	0,19	0,65	0,019	0,033	0,26	7,5	0,50	2,1	30,7	11,8
<b>BPGBW</b>	Versnelde vloed met kleinere Ggetijslag van 30 cm met peilverlaging in Broedseizoen en Winteropzet	443	460	0,040	0,19	0,65	0,019	0,033	0,27	7,4	0,49	2,1	30,7	11,8



## 5 Afsluitende overwegingen voor het gebruik en toepasbaarheid van de resultaten

Dit rapport bevat de verslaglegging van de berekeningen die Rijkswaterstaat en de overige partners in het project Getij Grevelingen in staat stellen om besluitvorming van de MIRT verkenningsfase af te ronden. De berekeningen geven de kwantitatieve informatie van het gerealiseerde peilbeheer afhankelijk van 1) het aantal kokers van het nieuwe doorlaatmiddel, 2) de wijze van aansturing van het doorlaatmiddel (optimalisatie van de operationele aansturing) en 3) zeespiegelstijging. Voor het peilbeheer zijn meerdere peilbeheersscenario's beschouwd gedefinieerd door een minimale waterstand en een maximale waterstand (peilgrenzen), sommige met onderscheid in winteropzet en broedseizoen. Indicatoren voor het peilbeheer zijn de jaargemiddelde waterstand en de jaargemiddelde getijslag.

De kwantitatieve informatie is onder andere bedoeld om de klimaatrobustheid te toetsen, gedefinieerd als het kunnen realiseren van een jaargemiddelde getijslag van 40 cm op het Grevelingenmeer bij 40 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995 (Boeters 2019a). Bij een jaargemiddelde getijslag van 40 cm wordt verwacht dat het areaal met langdurig lage zuurstofconcentratie met circa 500 ha substantieel lager is dan in de huidige situatie (800-1.600 ha) en verbetering van de waterkwaliteit gerealiseerd wordt.

De berekeningen hebben laten zien dat een klimaatrobust doorlaatmiddel haalbaar is, tenzij het verschil tussen de minimale en maximale peilgrenzen in een peilbeheerscenario sowieso al minder dan 40 cm is. Het aantal kokers dat nodig is voor klimaatrobustheid, verschilt wel aanzienlijk tussen de peilbeheerscenario's. Omdat andere overwegingen als kosten een doorslaggevende rol spelen in besluitvorming, gaat dit rapport niet in op keuze of aanbeveling voor bepaalde peilbeheerscenario's. Ook keuzen voor de wijze van operationele aansturing worden bepaald door effecten op natuur die door Wageningen Marine Research in aansluitend onderzoek worden beschouwd en gerapporteerd. In dit afsluitende hoofdstuk worden daarom uitsluitend enkele overwegingen gegeven die meegenomen moeten worden bij het gebruik van de kwantitatieve informatie uit de berekeningen.

Getalswaarden die door modellen berekend worden, moeten te allen tijde bezien worden in het licht van de concepten en aannames die aan het modellen ten grondslag liggen en in het licht van de gegevens die als modelinvoer zijn gebruikt. In alle elementen zit een mate van zekerheid en onzekerheid die bij de interpretatie van de modelresultaten meegenomen moet worden. In dit hoofdstuk wordt kort daarom stilgestaan bij het gebruik en toepasbaarheid van de (model)resultaten gepresenteerd in dit rapport. We reflecteren op drie onderdelen:

- Effect en effectiviteit van optimalisatiewijzen van peilbeheer
- Variatie van de jaargemiddelde zeespiegel in relatie tot klimaatrobustheid
- Bandbreedte en nauwkeurigheid in relatie tot ontwerp van het doorlaatmiddel

### *Effect en effectiviteit van optimalisatiewijzen van peilbeheer*

In dit rapport zijn, naast de voorkeursvariant van de ontwerp Rijksstructuurvisie, de autonome ontwikkeling en zeven peilbeheerscenario's beschouwd en vijf optimalisatiewijzen om het peilbeheer met als belangrijkste indicatoren de jaargemiddelde waterstand en de jaargemiddelde getijslag te realiseren. Dit maakt duidelijk dat een doorlaatmiddel veel mogelijkheden en keuzes biedt voor het realiseren van het gewenste peilbeheer. Het Grevelingenmeer heeft nu twee kunstwerken om het peilbeheer te sturen: de Brouwerssluis en

de Flakkeese spuisluis. Met een doorlaatmiddel is iedere koker in theorie een extra stuurknop. In de praktijk hangt het onder andere af van infrastructurele aspecten en ontwerpkeuzes, zoals de mogelijkheid om kokers individueel aan te kunnen sturen. Hoe dan ook is het aantal mogelijkheden voor peilbeheer groot. Duidelijk is ook dat de mogelijkheden toenemen met het aantal kokers.

Het getij op de Noordzee verschilt van dag tot dag met als meest zichtbaar de 14,8 daagse springtij-doodtijcyclus. Op het Grevelingenmeer wordt in het peilbeheer een getij met veel minder dag tot dag variatie voorzien tussen de vastgestelde minimum en maximum peilgrenzen. Als het doorlaatmiddel bij doodtij, wanneer het waterstandsverschil tussen Grevelingenmeer en Voordelta het kleinst is, de gewenste getijslag realiseert, is er bij springtij wanneer het waterstandsverschil het grootst is, een overcapaciteit. Ofwel het doorlaatmiddel kan meer water in- en uitlaten dan nodig is en zal dus (deels) geknepen moeten worden.

De modelberekeningen laten zien dat operationele aansturing leidt tot de volgende effecten:

- Het is mogelijk een regelmatige getijslag te realiseren, waarbij de waterstand niet langdurig op hetzelfde niveau staat. Dit kan gunstig zijn voor natuur en beperking van erosie.
- Het is mogelijk de jaargemiddelde waterstand te verlagen door operationeel beheer. Ten opzichte van het niet geoptimaliseerd beheer zoals aangenomen in de voorkeursvariant van de ontwerp-Rijksstructuurvisie is een verlaging van enkele centimeters haalbaar. Met optimalisatie op basis van de kortst mogelijke openingsduur ten behoeve van versnelde vloed wordt een verlaging gerealiseerd van de jaargemiddelde waterstand tot 5 cm.
- Corrigeren voor de scheefstand door windopzet waardoor terrestrische natuur niet of minder overspoeld is mogelijk met een relatief klein effect op de jaargemiddelde waterstand en jaargemiddelde getijslag. Indien scheefstandcorrectie alleen bij harde wind wordt toegepast (enkele keren per jaar), zal het effect op peilbeheer minder zijn en kan het effect op terrestrische natuur gunstig zijn.
- Sturen op kortste openingsduur voor versnelde vloed heeft een gunstig effect op de zuurstofproblematiek. De modelberekeningen laten zien dat de hogere stroomsnelheid effectief zorgt voor meer verticale menging. Hogere debieten door het doorlaatmiddel hebben consequenties voor het ontwerp waaronder bijvoorbeeld de bodembescherming. Bij een keuze voor deze wijze van optimalisatie moet daar rekeningen mee gehouden worden.

#### *Variatie van de jaargemiddelde zeespiegel in relatie tot klimaatrobustheid*

Het doorlaatmiddel wordt als klimaatrobust gedefinieerd als het bij 40 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995 jaargemiddeld nog 40 cm getijslag realiseert. De zeespiegelstijging wordt vaak als een gemiddelde gepresenteerd; langs de Nederlandse kust bijvoorbeeld een stijging van 2 mm/jaar over de afgelopen 100 jaar. Deze gemiddelde waarde wordt als statistische trend uit de meetwaarden afgeleid. Van jaar op jaar varieert de jaargemiddelde zeespiegelstand echter vele centimeters vooral als gevolg van meteorologische condities (stormen) en ook volgens de langjarige 18,6-jaar getijcyclus.

In de modelberekeningen in deze rapportage is gewerkt met gemeten tijdreeksen van 2008, terwijl berekeningen in eerdere fases met de gemeten tijdreeksen van 2009 rekenden. De jaargemiddelde waterstand gemeten op station Brouwershavensche Gat 8 bij de Brouwerssluis verschilt 4,4 cm (NAP +3,7 cm in 2008; NAP -0,7 cm in 2009 – zie Boeters (2019a)). Om de klimaatrobustheid te refereren aan het referentiejaar 1995 wordt een correctie toegepast, zie ook Boeters (2019b).

Dit leidt tot de volgende aanbeveling om aan de definitie van klimaatrobustheid toe te voegen: Het doorlaatmiddel is klimaatrobust in een gemiddeld jaar, dat wil zeggen in een jaar waar de jaargemiddelde zeespiegel precies op de langjarige trend ligt. Dat houdt in dat er ongunstige jaren zullen zijn waar de jaargemiddelde zeespiegel boven de trend ligt en dat er gunstige jaren zijn waar de jaargemiddelde zeespiegel onder de trend ligt. Op het moment dat 40 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995 wordt bereikt zullen ongunstige jaren al een jaargemiddelde getijslag van (iets) minder dan 40 cm laten zien en zullen gunstige jaren juist nog een jaargemiddelde getijslag van (iets) groter dan 40 cm laten zien. Wat de verdeling van gunstige en ongunstige jaren is, is nog niet onderzocht.

*Bandbreedte en nauwkeurigheid in relatie tot ontwerp van het doorlaatmiddel*

Los van de hierboven aangegeven bandbreedte van de jaargemiddelde zeespiegel zijn er twee aspecten die we hier tenslotte willen benoemen.

De eerste betreft de relatie tussen getijslag en zuurstofarm areaal. Herintroductie van getij heeft tot doel om de zuurstofproblematiek te verbeteren. De mate van getij die nodig is, was afgeleid uit eerdere modelberekeningen (zie bijvoorbeeld Deltares 2016). Voorliggende rapportage heeft daar nieuwe inzicht aan toegevoegd (zie figuren 4.1-4.4). Hoewel we in hoge mate zeker zijn van de S-vorm van de curve (twee stabiele plateaus onder circa 10 cm en boven circa 40 cm getijslag en een steil gedeelte ertussen), zijn de precieze getalswaarden van de knikpunten niet zeker. 40 cm zou ook 38 cm kunnen zijn, of 42 cm. Dat verschilt ook van jaar tot jaar, waarbij een warme en windstille zomer (veel) ongunstiger is dan een koude en windrijke zomer. Het beter begrijpen van deze variatie om de ontwerpeisen van het doorlaatmiddel beter te kunnen ondersteunen is aan te bevelen, waarbij analyses van metingen in combinatie met modelstudies kunnen helpen. Sowieso moet na ingebruikname van het doorlaatmiddel, in welke vorm of ontwerp dan ook, een monitorings- en toetsend onderzoeksprogramma op deze vraagstelling worden afgestemd.

Het tweede aspect betreft de capaciteit van het doorlaatmiddel, ofwel hoeveel water er doorheen kan stromen. In de modelberekeningen wordt dat vervat in een parameter: de afvoercoëfficiënt. De getalswaarde van deze coëfficiënt is meerdere malen onderzocht, zie bijvoorbeeld Deltares (2018) en heeft een ingeschatte onzekerheid van 10%. Bij een doorlaatmiddel van 12 kokers is dat ruwweg te vertalen in minimaal een koker extra. Aanbevolen wordt om hier ook in het vervolg rekening mee te blijven houden.





## 6 Referenties

- Boeters, René (2019a): Klimaatrobustheid Getij Grevelingen, 2009 versus 2008, Memo Getij Grevelingen, Definitief, 31 juli 2019.
- Boeters, René (2019b): Mogelijke keuzes van uitgangspunten voor Klimaatrobustheid Getij Grevelingen, Memo Getij Grevelingen, aangepaste versie 1 augustus 2019.
- Deltares (2008): Verkenning oplossingsrichtingen voor een betere waterkwaliteit en ecologische toestand van het Grevelingenmeer, Arno Nolte, Tineke Troost, Gerben de Boer, Claudette Spiteri en Bregje van Wesenbeeck, Rapport Z4576, oktober 2008.
- Deltares (2010): Validatie van het 3D model voor het Grevelingenmeer voor hydrodynamica, waterkwaliteit en primaire productie, C. Spiteri en A.J. Nolte, Deltares rapport 1201650-000-ZKS-0016, december 2010.
- Deltares (2011): Effect van herintroductie van getij op waterkwaliteit en ecologische toestand van het Grevelingenmeer, Scenarioberekeningen ten behoeve van de MIRT-Verkenning, A.J. Nolte en C. Spiteri, Deltares rapport 1201650-000-ZKS-0033, juni 2011.
- Deltares (2016): Grevelingenmeer van Stagnant naar Beperkt Getij, Synthesedocument Beschikbare kennis en resterende kennisvragen met betrekking tot het effect van introductie beperkte getijslag op het natuurlijk systeem van Grevelingenmeer en Voordelta, A.J. Nolte en O.G. Lagendijk, Rapportnummer 1230426-000-ZKS-0003, in opdracht van Rijkswaterstaat, november 2016.
- Deltares (2018): Bepaling afvoercoëfficiënt doorlaatmiddel Brouwersdam, Alexander de Loor, Rapportnummer 11202901-002-ZKS-0002, in opdracht van Provincie Zeeland, september 2018.
- Lievense, Piet (2019): Memo Doorlaat Brouwersdam - Autonome ontwikkeling, Toelichting op scenario's waterkwaliteitsmodellering (balansmodel), RWS Zee en Delta, 4 april 2019.
- Tangelder, Marijn, Jeroen Wijsman, John Janssen, Arno Nolte, Brenda Walles en Tom Ysebaert (2018): Scenariostudie natuurspectief Grevelingenmeer, Wageningen University & Research rapport C021/18, in opdracht van Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Wageningen Marine Research Yerseke, augustus 2018.
- Van Berkel, J. (2018): Spui-meng-functie (puls-spuien), rapportage project Getij Grevelingen, Entry Technology Support BV, 12 november 2018
- Van Berkel, J. (2019a): Pompmodellering, rapportage project Getij Grevelingen, Entry Technology Support BV, 18 maart 2019
- Van Berkel, J. (2019b): Pomp-turbine-weerstand, rapportage project Getij Grevelingen, Entry Technology Support BV, 26 april 2019



## A 0D modelresultaten voor alle scenario's (2008)

In deze bijlage worden de 0D modelresultaten getoond in de vorm van regenbooggrafieken. In de grafieken zijn per combinatie van peilbeheerscenario en optimalisatiewijze de berekende gemiddelde waterstand en gemiddelde getijslag getoond en indien van toepassing ook de energieopbrengst (bij turbines) en het energieverbruik (bij pompen), bij een oplopend aantal kokers en zeespiegelstijging.

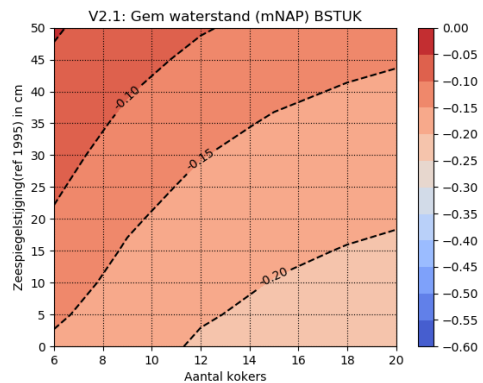
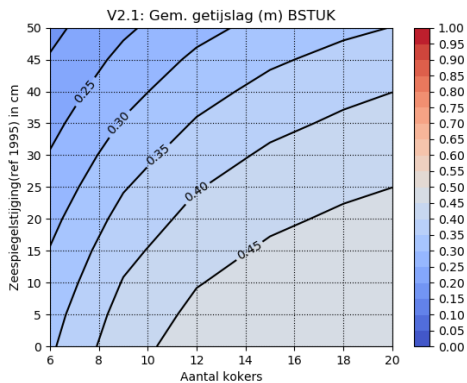
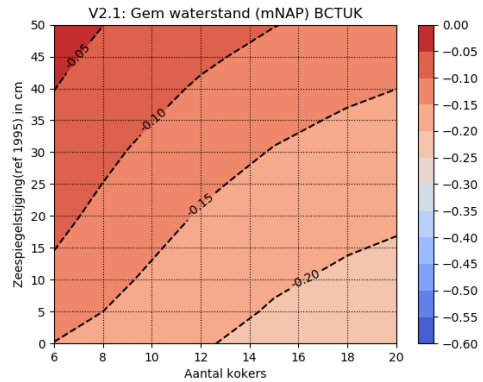
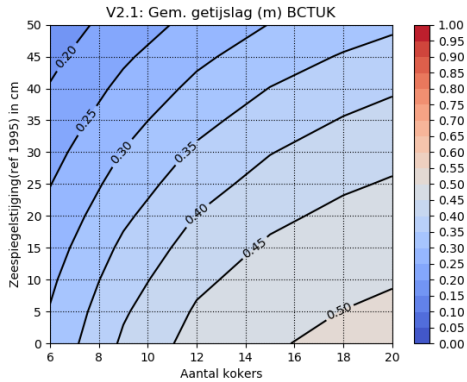
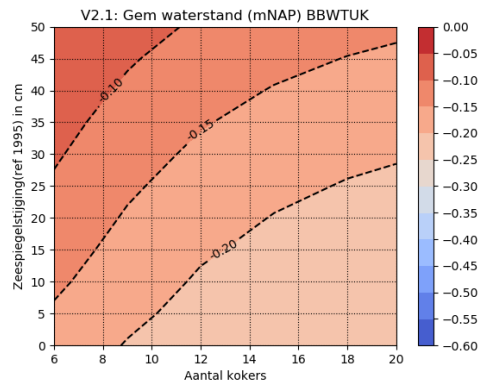
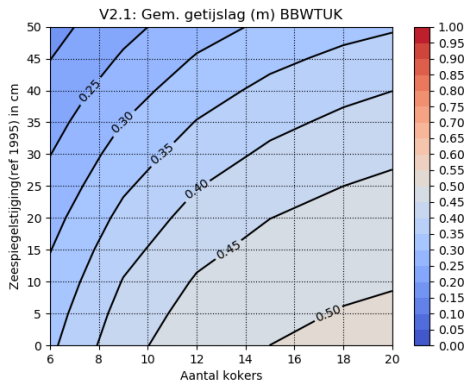
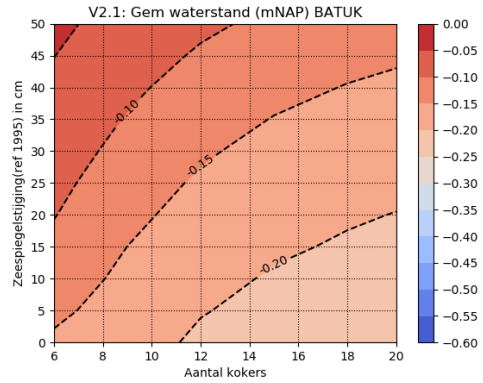
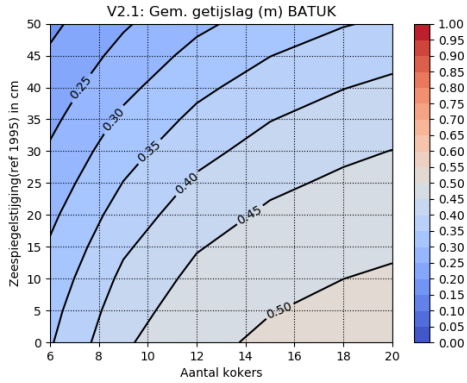
Peilbeheerscenario	Optimalisatiewijze				
	Geen	Aantal kokers	Aantal kokers en scheefstandcorrectie	Reactiegraad turbines	Pompen
Rijksstructuurvisie (RGV)	RGV				
Basis (BA)		BATUK BCTUK*	BSTUK BSTAK	BATAK	
Basis + breedseizoen en winteropzet (BBW)		BBWTUK		BBWTAK	BBWTPK
Kleinere Getijslag (BG)		BGTUK		BGTAK	
Kleinere Getijslag + breedseizoen en winteropzet (BGBW)		BGBWTUK	BGSTUK BGSTUK	BGBWTAK	
Verlagen middenpeil (BM)		BMTUK		BMTAK	
Verlagen middenpeil + breedseizoen en winteropzet (BMBW)		BMBWTUK		BMBWTAK	BMBWTPK
Tussenscenario + breedseizoen en winteropzet (TMBW)		TMBWTUK		TMBWTAK	TMBWTPK

\*Basisvariant met afvoercoëfficiënt van 0,95 in plaats van 1,10

**Datum**  
15 augustus 2019

**Kenmerk**  
Bijlage A

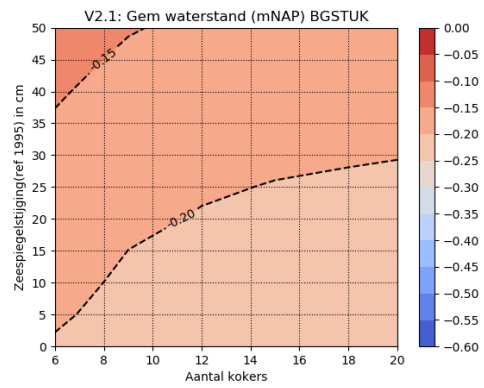
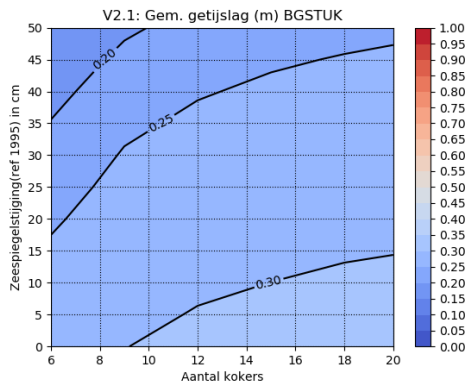
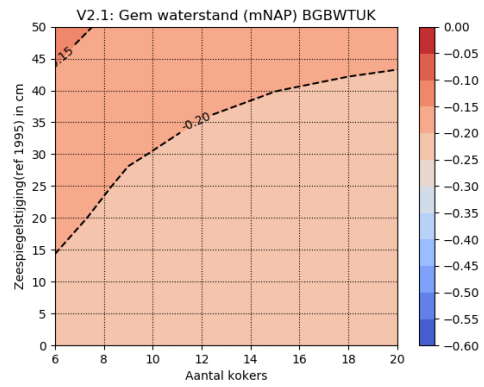
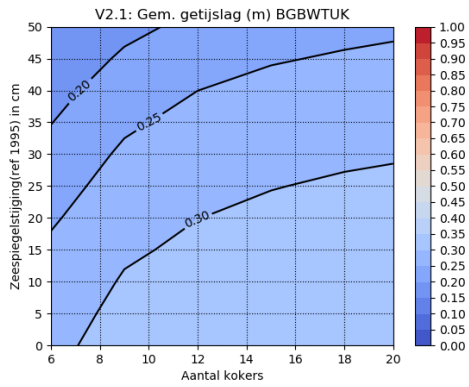
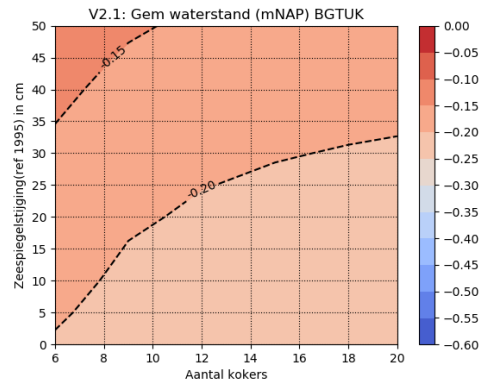
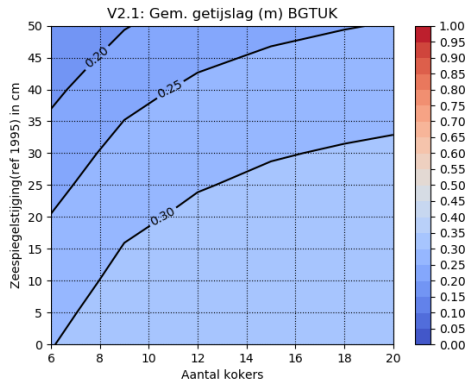
**Pagina**  
2/11

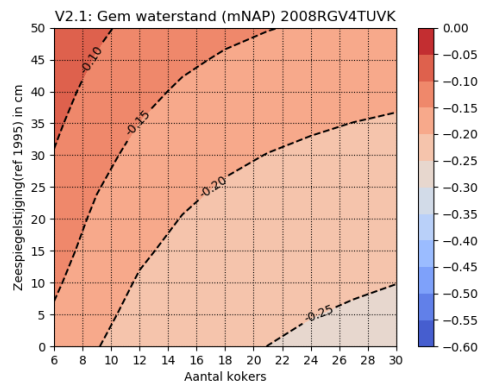
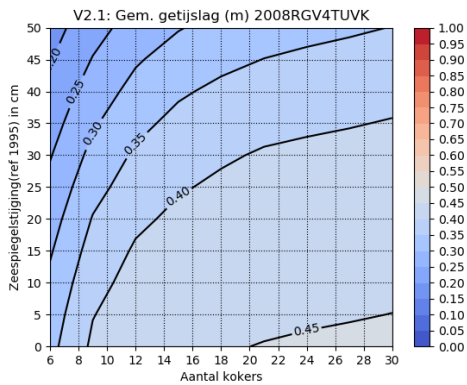
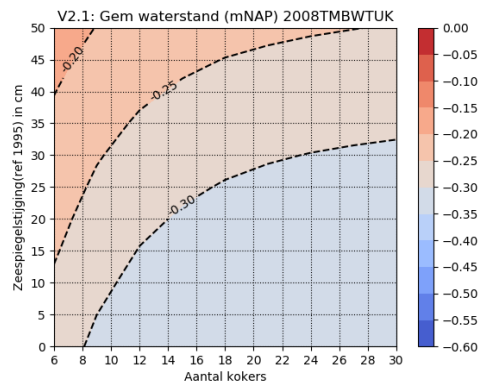
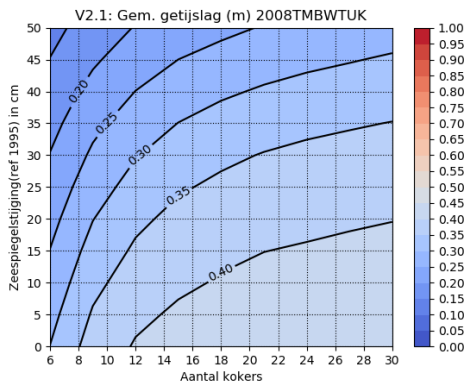
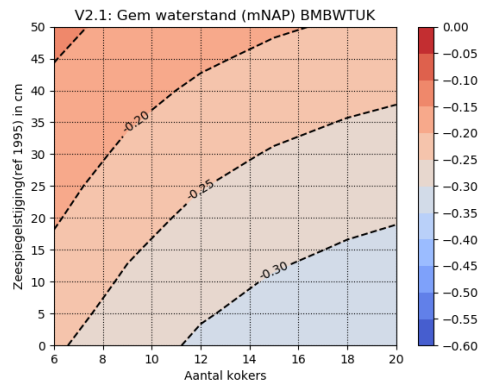
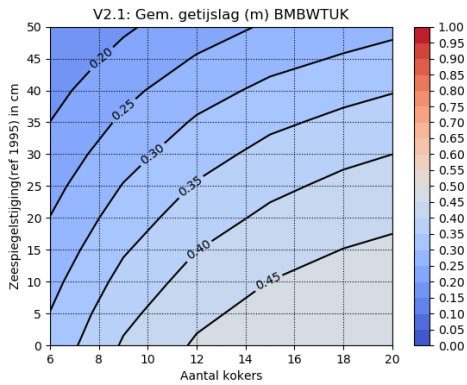
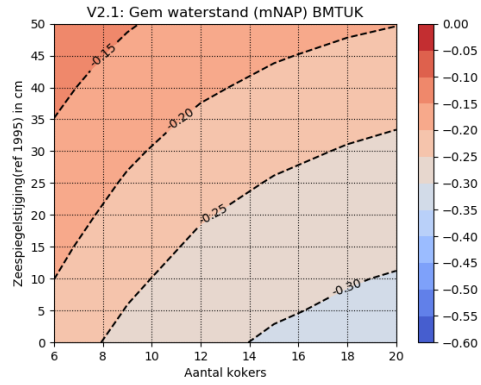
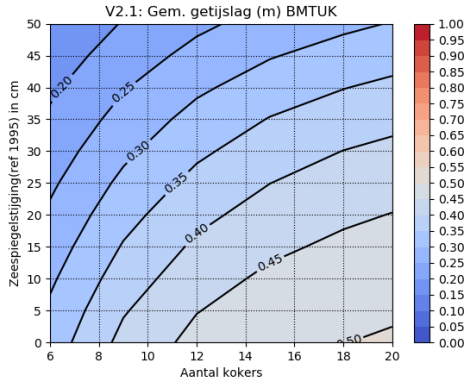


**Datum**  
15 augustus 2019

**Kenmerk**  
Bijlage A

**Pagina**  
3/11

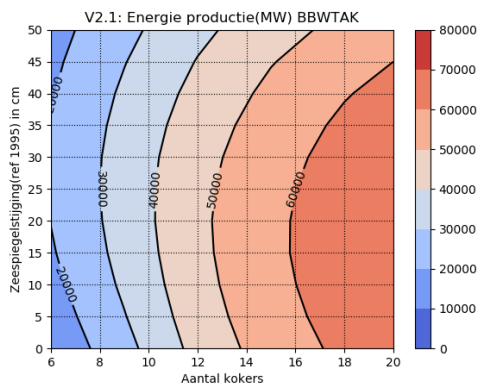
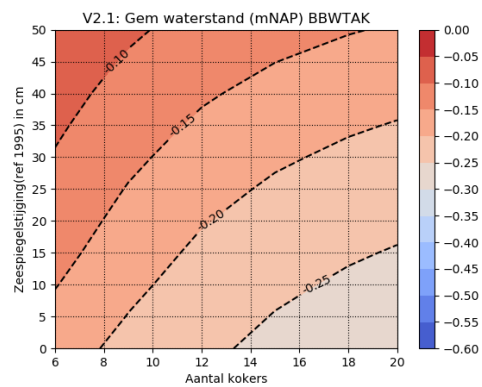
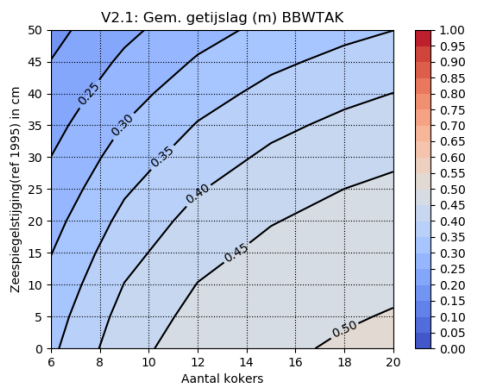
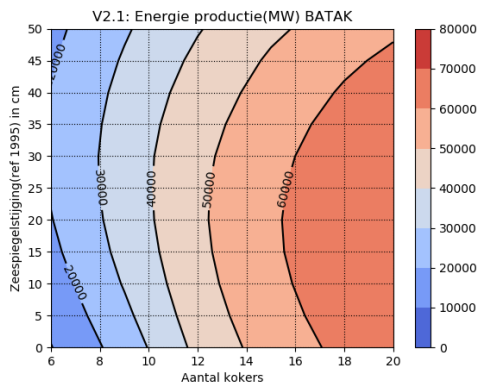
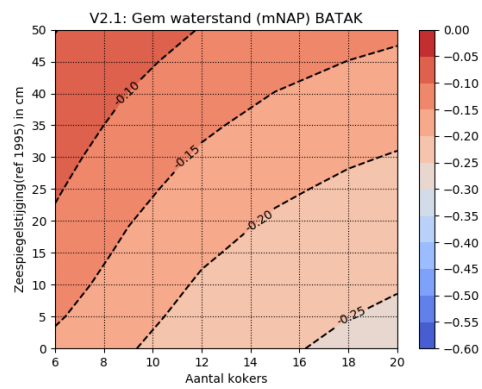
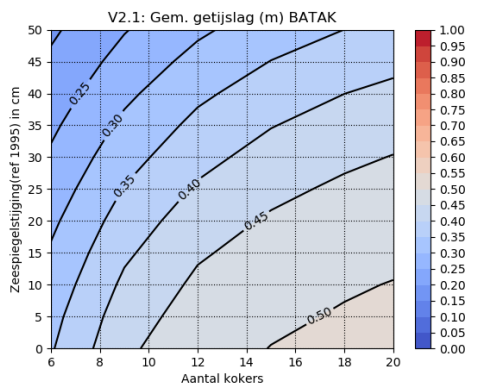


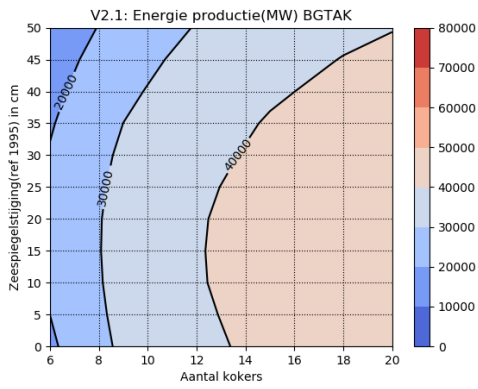
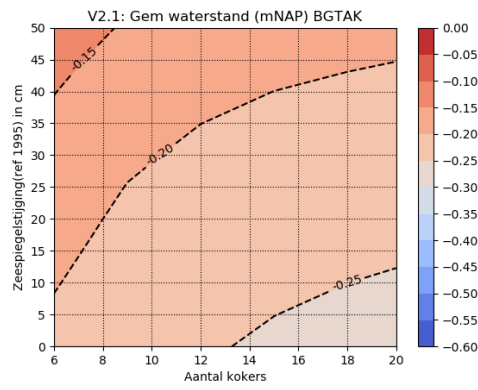
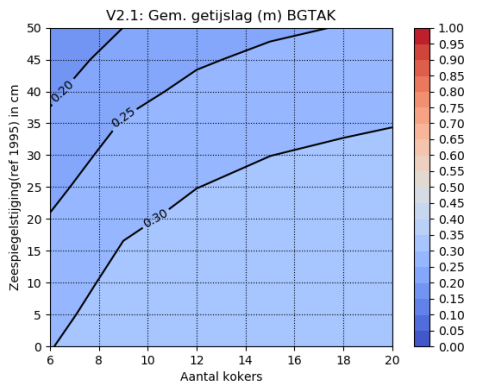
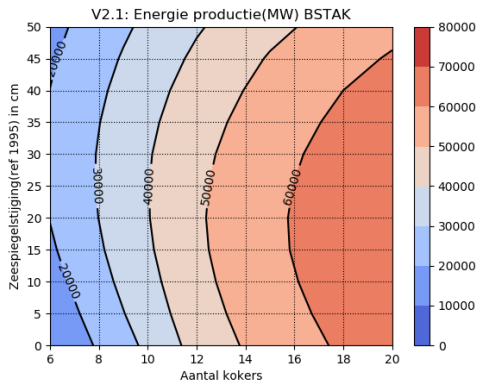
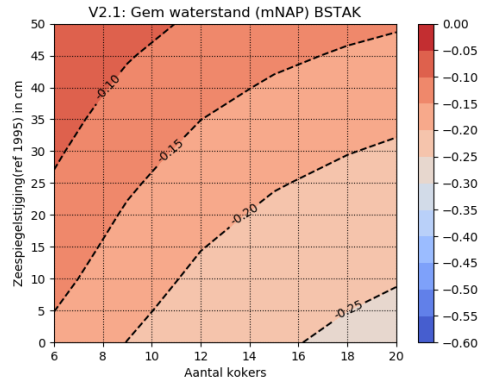
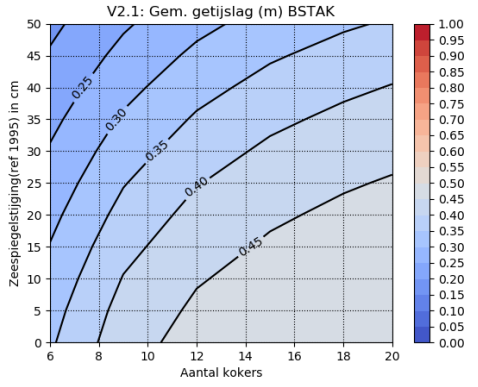


Datum  
15 augustus 2019

Kenmerk  
Bijlage A

Pagina  
5/11



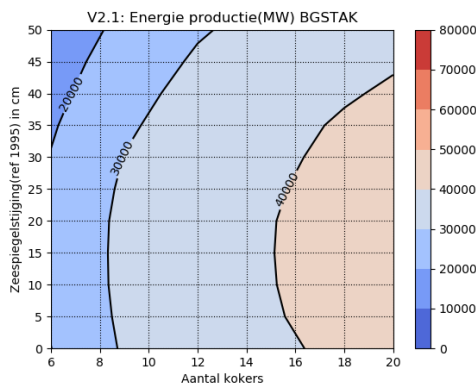
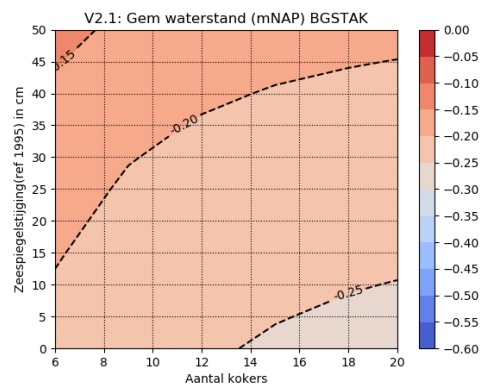
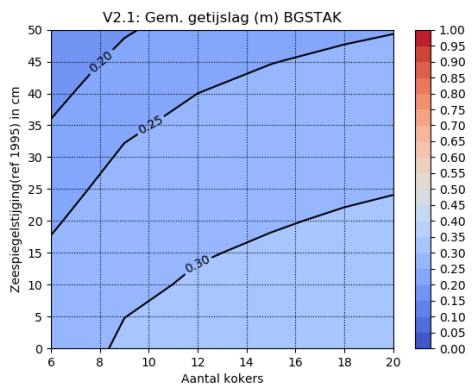
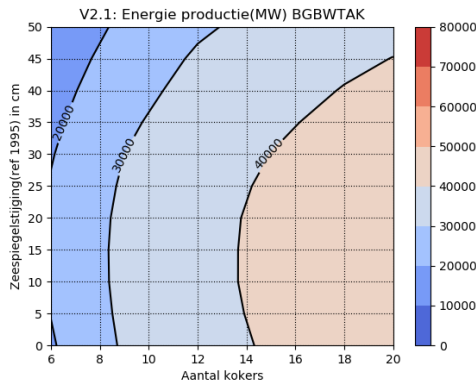
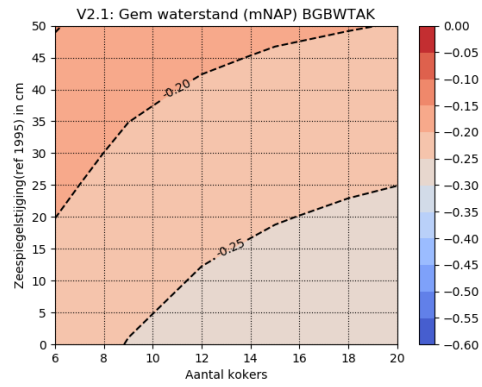
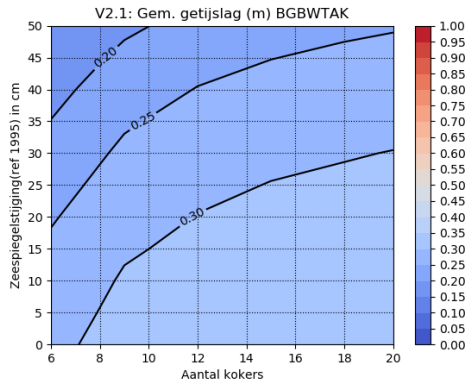


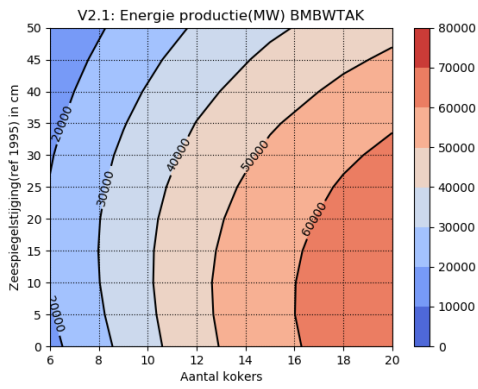
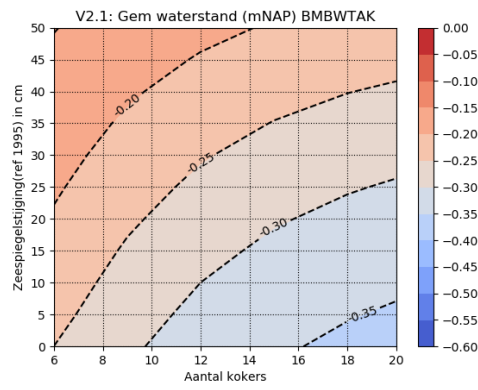
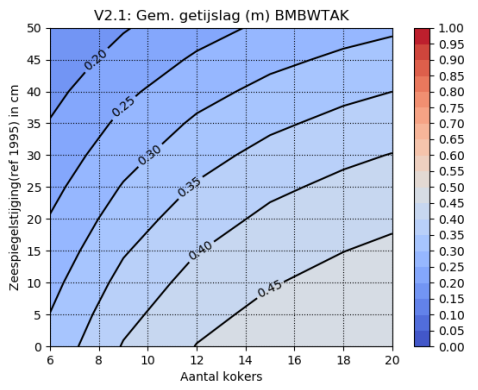
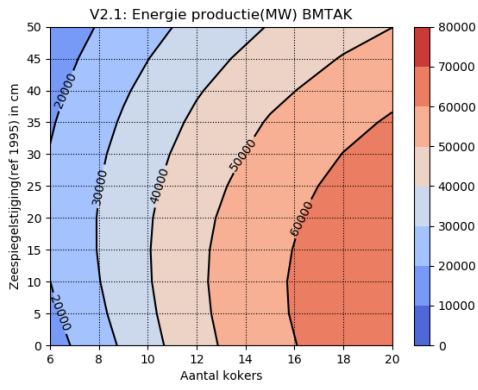
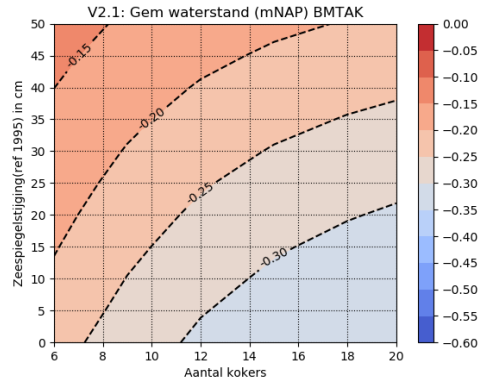
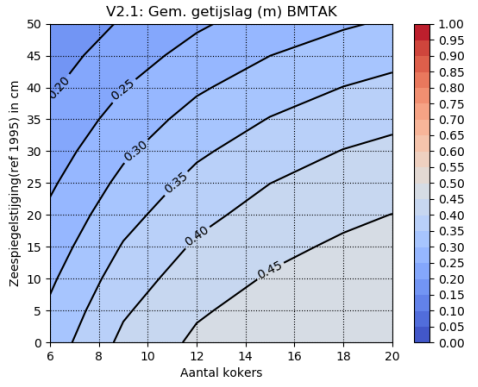


Datum  
15 augustus 2019

Kenmerk  
Bijlage A

Pagina  
7/11

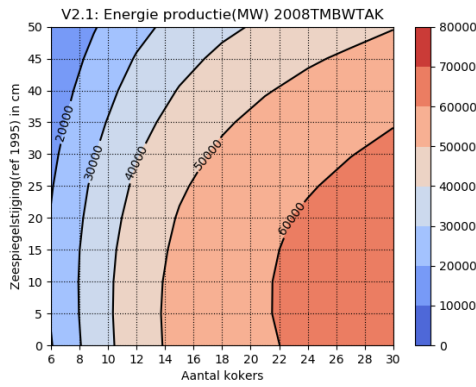
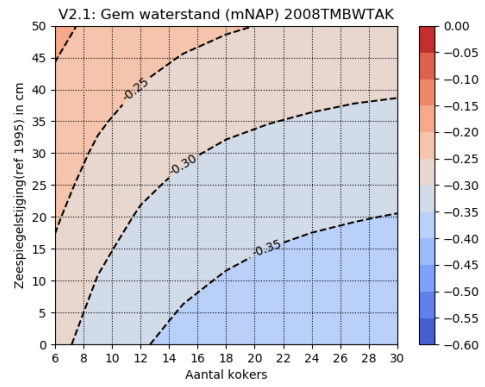
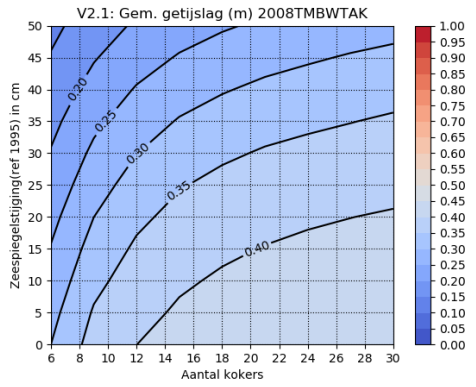


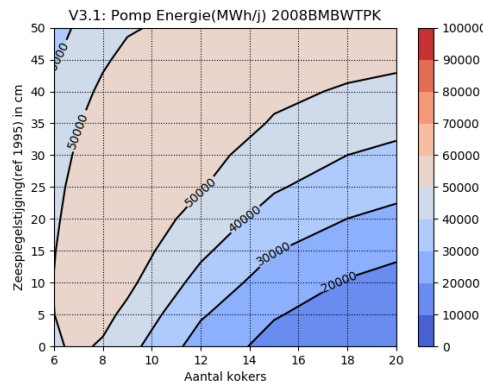
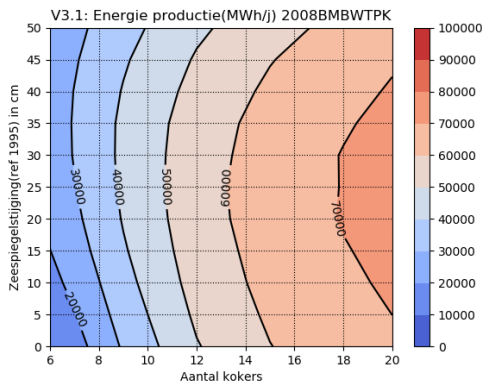
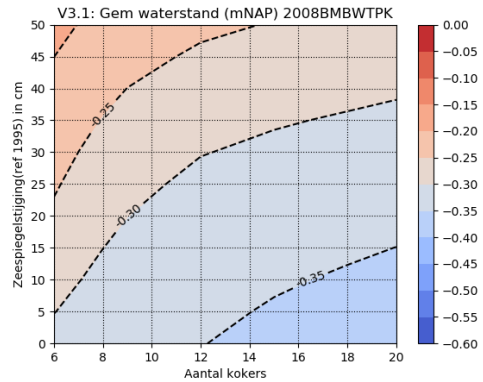
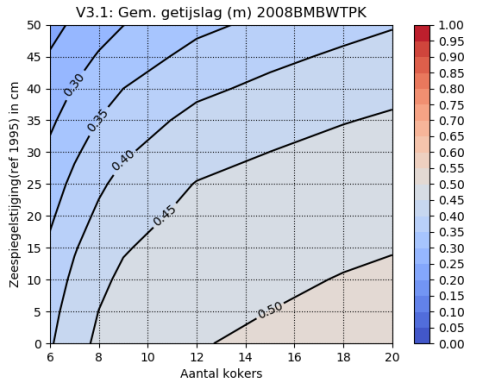
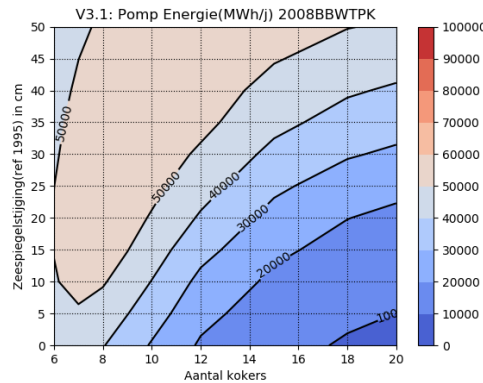
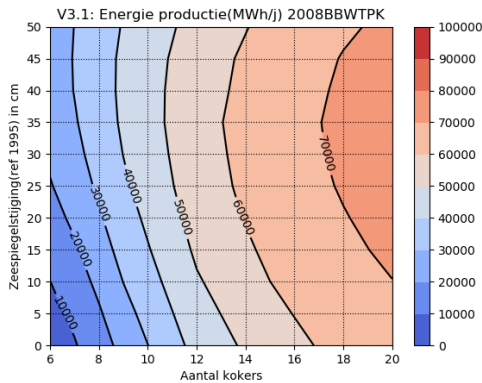
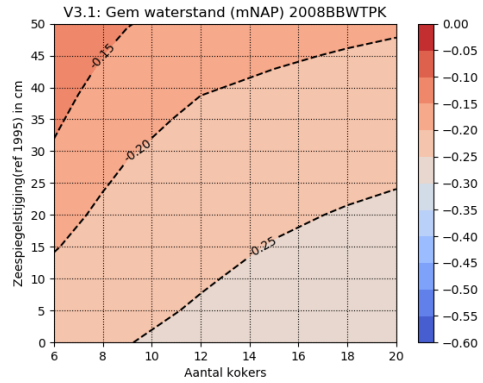
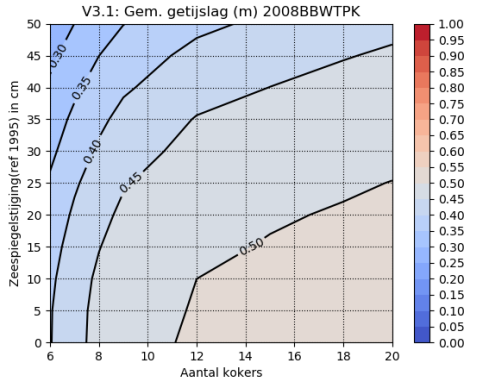


Datum  
15 augustus 2019

Kenmerk  
Bijlage A

Pagina  
9/11

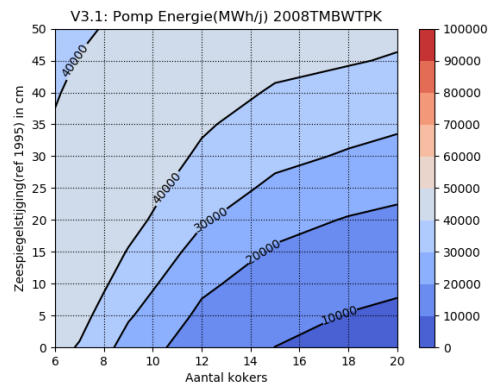
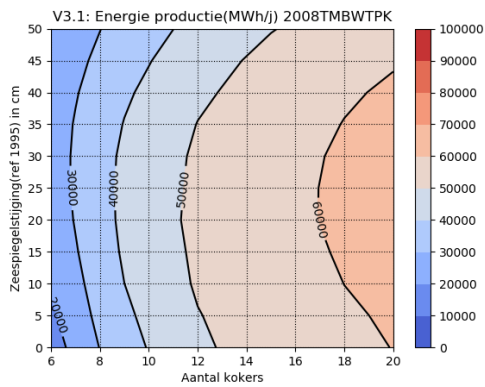
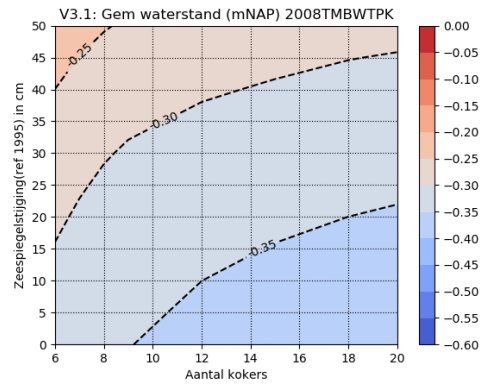
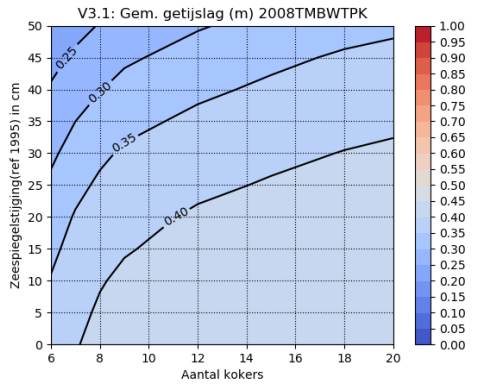




Datum  
15 augustus 2019

Kenmerk  
Bijlage A

Pagina  
11/11



## **B Opzet en berekeningen 0D-model (2018)**

# Memo

**Aan**

René Boeters (RWS-ZD)  
 Paul Paulus (RWS-ZD)  
 Arthur de Boom (RWS-ZD)  
 Piet Lievense (RWS-ZD)

<b>Datum</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Aantal pagina's</b>
18 december 2018	3.1	15
<b>Van</b>	<b>Doorkiesnummer</b>	<b>E-mail</b>
Frank Kleissen		

**Onderwerp**

Grevelingen doorlaatmiddel model en runs

**Kopie aan**

Arno Nolte (Deltares)  
 Maaike Maarse (Deltares)  
 Bernhard Becker (Deltares)

---

## 1 Korte uitleg hydraulisch rekenmodel

De relaties voor het berekenen van de debieten door de kokers zijn direct uit het spreadsheet van gehaald van Jacob van Berkel (symbolen komen niet persé overeen met oorspronkelijke document):

- $WL$  = Waterlevel Grevelingen
- $WLB$  = Waterlevel Brouwersehavengat 8 (wordt gebruikt als randvoorwaarde)
- $\delta t$  = tijdstap van de data. meestal 10 minuten
- $N_t$  = aantal turbines
- $Q_{gate}$  = totale debiet door de turbines
- $A_G$  = Oppervlak van de Grevelingen
- $S$  = boolean (1/0) dat aangeeft of schuif open op dicht is (dus true/false). Sluit als waterstand in Grevelingen  $WLB > G_{max,c}$  en  $WLB < G_{min,c}$
- $H_t$  = Head in m, waterstandsverschil binnen (Grevelingen) en buiten (Noordzee)
- $T_f$  = Turbine reactiegraad (in de laatste spreadsheet bij eb is deze 0, is een parameter)
- $C_t$  = Verlies coëfficiënt (in spreadsheet heet het Conduit loss coefficient)

$$WL(t) = WL(t - \delta t) + \frac{100 \cdot N_t \cdot sQ_{gate} \cdot \delta t}{A_G} \quad (1)$$

waarbij:

$$Q_{gate} = \frac{(1 - S) \cdot 64 \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot ABS(H_t \cdot (1 - T_f))}}{C_l} \cdot SGN \quad (2)$$

*SGN* levert het teken aan voor het debiet naar binnen (+) en naar buiten (-) afhankelijk van het waterstandsverschil (buiten min binnen)

In eerste instantie hoeven we nog geen vermogens en zo uit te rekenen omdat dit buiten de huidige scope valt.

Uit dit model komt dus een tijdreeks van de debieten en de waterstand in de Grevelingen en hiermee kun je dus de gemiddelde en maximale waterstanden berekenen.

## 2 Uitwerking in python

### 2.1 Algemeen

Bij de eerste testen bleek al dat het binnenhalen van de totale datareeks over een langere periode lastig is in verband met de grootte van de file, (10 minuten interval) maar dat het per jaar kan, dus het script is zo opgezet dat het model per jaar kan worden gedraaid en vervolgens meerdere jaren kunnen worden doorgerekend.

In het script zijn ook de debieten van de Brouwerssluis en de Flakkeese spuisluis ingebracht. De vergelijkingen voor de beide sluizen zien er in het algemeen vergelijkbaar uit met die van het doorlaatmiddel. Die vergelijking voor die twee debieten zijn het doorstromende oppervlak en afvoercoëfficiënt als parameters in de invoer opgenomen. De vergelijking voor de sluizen is dan:

$$Q_{sluis} = f_c \cdot A_s \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot ABS(H_t)} \cdot SGN \quad (3)$$

met  $f_c$  de afvoercoëfficiënt en  $A_s$  het doorstromend oppervlak.

Er is dus een directe relatie tussen de afvoercoëfficiënt en de verliescoëfficiënt/reactiegraad:

$$f_c = \frac{\sqrt{(1 - T_f)}}{C_t} \quad (4)$$

De invoer parameters van het model zijn dan (zie Tabel 1):



<b>Parameter</b>	<b>Omschrijving</b>
Nt	aantal turbines
Ntk	aantal kokers zonder turbines
BF	switch voor Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis (altijd open of open/sluiten mee als doorlaatmiddel)
Gmaxc	maximum waterstand voor start sluiten (hoog water)
Gminc	minimale waterstand voor start sluiten (laag water)
Masxlev	beoogde maximale waterstand
Minlev	beoogde minimale waterstand
Tff	reactiegraad bij instromend debiet
Tfe	reactiegraad bij uitstromende debiet
Closs	verliescoefficient
OptKok	boolean voor al dan niet variërend aantal kokers
opp	oppervlak Grevelingen
Fbsluis	afvoercoefficient sluis Brouwersdam
Obsluis	doorstromend oppervlak sluis Brouwersdam
Ffsluis	afvoercoefficient Flakkeese spuisluis
Ofsluis	doorstromend oppervlak Flakkeese spuisluis

*Tabel 1: Model input parameters*

Het oppervlak van de Grevelingen is hier als een parameter weergegeven, maar er is een tabel afgeleid waarbij het wateroppervlak is weergegeven als functie van de waterstand. Het relevante deel van die tabel laat zien dat het oppervlak tussen hoog en laag water (NAP-45 tot 5 cm) in de Grevelingen zo'n 10% kan variëren.

Waterstand(cm)	Oppervlak (ha)	Inhoud (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
20	11881.0	608.17
10	11652.7	596.43
0	11463.6	584.88
-10	11251.9	573.52
-20	11024.8	562.40
-30	10818.8	551.49
-40	10634.6	540.77
-50	10433.4	530.24
-60	10127.3	520.00
-70	9834.6	510.04
-80	9547.2	500.37
-90	9332.1	490.95
-100	9074.3	481.75
-110	8798.4	472.87
-120	8555.9	464.20
-130	8264.9	455.80
-140	8002.7	447.69
-150	7746.0	439.83

Tabel 2: Grevelingen oppervlak en inhoud als functie van waterstand (t.o.v NAP)

Voor de aansturing van het model zijn randvoorwaarden (waterstanden) nodig, te weten buiten de Brouwersdam en bij de Flakkeese spuisluis. De data die van Waterinfo is opgehaald is voor 2009 (10 minuten interval) voor zowel buiten de Brouwersdam (Brouwershavensegat 8) en de Flakkeese spuisluis (Krammersluizen west). Er is data voor meer jaren beschikbaar maar voor deze modeltoepassing is voor 2009 gekozen omdat dit ook in eerdere analyses is gebruikt zodat vergelijkingen met die resultaten mogelijk zijn.

## 2.2 Optimalisatie van het gebruik van kokers

In de huidige modelopzet is in het script een optimalisatieproces ingebouwd. Hierbij wordt gekeken naar het eerstvolgende laag of hoogwater en vervolgens berekend voor welk aantal kokers het opgelegde criterium voor de waterstand (hoog en laag water) deze precies gehaald wordt voordat het stroming van water door de kokers weer omkeert. Het aantal kokers varieert dus per getijslag. In theorie zouden er dan geen periodes voorkomen waarbij geen uitwisseling van water plaatsvindt met alle kokers voor langere tijd gesloten. Dit laatste kan wel voorkomen tijdens bijvoorbeeld periodes met een significante stormopzet. Omdat het aantal open kokers per getijslag vast ligt kan het echter wel voorkomen dat er (kortere) periodes zijn waarbij alle openingen wordt gesloten aan het eind van een getij omdat de maximaal (of minimaal) toelaatbare waterstand is bereikt. Als er geen ondergrens is dan zal het programma het maximaal aantal kokers gebruiken tijdens de uitstroombfase. Een voorbeeld hiervan het gebruik van de kokers met een ondergrens van NAP-45cm is te zien in figuur 9.

Wanneer in het optimalisatie proces de Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis worden meegenomen, dan sluiten zij als laatste, eerste de Flakkeese spuisluis en vervolgens, indien nodig, de Brouwers-

sluis. In dat laatste geval is alles (kokers en sluizen) gesloten.

## 2.3 Scenarios

Met RWS was afgesproken dat de model toepassing voor de planfase zich richt op het mogelijk gebruik van het individueel openen en sluiten van de kokers van het doorlaatmiddel. In het modelscript is dit opgenomen in die zin dat kokers worden gesloten om te komen tot een optimale benadering naar de maximale waterstand (NAP5cm) en minimale waterstand en zo dus zo min mogelijk periodes voorkomen waarbij geen uitwisseling plaatsvindt. Er zijn in overleg een drietal varianten gekozen met een aantal vrijheidsgraden die vervolgens worden doorgerekend voor een divers aantal kokers in het doorlaatmiddel (10-30). Het resultaat is dan een overzicht waarbij de gemiddelde waterstand in de Grevelingen en de gemiddelde getijslag kan worden uitgezet tegen het aantal kokers (dimensionering van het doorlaatmiddel) en de zeespiegelstijging. Piet Lievense heeft deze grafieken al eerder opgezet en ook hier wordt onder andere gebruik gemaakt van een vergelijkbare presentatie.

Voor alle runs geldt dat het voor 6 zeespiegelstijging (SLR) scenario's (tov 1995) is doorgerekend, te weten:

- Geen stijging
- 10 cm stijging
- 20 cm stijging
- 30 cm stijging
- 40 cm stijging
- 50 cm stijging

Dit komt overeen met de range van zeespiegelstijging in het memo van Arthur de Boom (9 september 2018)

De varianten zijn als volgt gedefinieerd:

- 1 Doorlaatmiddel: in eerste instantie kleiner, gedimensioneerd op 20-30cm SLR. Evt. later uit te breiden om tot 40cm SLR te kunnen opvangen
- 2 Breder DL + GTC: Doorlaatmiddel met turbines in een deel van de kokers, gedimensioneerd op 40cm SLR
- 3 Breder DL: Doorlaatmiddel (in eerste instantie) zonder turbines, gedimensioneerd op 40cm SLR

De vrijheidsgraden die zijn gedefinieerd:

- 1 Aantal kokers (met turbines en zonder, dus ook die verhouding) van 10 tot en met 30. Ook een som zonder doorlaat middel, dus alleen Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis. In de huidige fase alleen zonder turbines.
- 2 Individueel openen en sluiten (dus per getij kan dit anders zijn, maar niet binnen het getij) hetgeen voor deze fase betekent alleen met de optimalisatie.
- 3 Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis:

- Beide staan in beginsel altijd open maar sluiten wel bij bereiken toegestane maximale of minimale waterstand (bijvoorbeeld minimaal NAP-45cm).
  - Beide sluizen zijn onderdeel van het optimalisatieproces en kunnen individueel ook sluiten tijdens een getijfase. Wanneer we individueel openen en sluiten gaan de Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis als laatste dicht.
- 4 Ook kan met de reactiegraad worden gewerkt, maar in deze fase wordt hier nog niet mee gevarieerd. Wel kan worden gevarieerd met alleen turbines bij inkomend water (en niet bij uitgaand) of turbines bij zowel in- als uitgaand water. Deze blijft in de huidige fase alleen bij inkomend water. (in de eerste runs wordt het effect van turbines nog niet meegenomen in de sommen)
  - 5 Het al dan niet hanteren van een ondergrens in de waterstand. De te hanteren ondergrens is dan op -45cm. Beide zullen worden gesimuleerd.

Doelstelling voor de Grevelingen zijn als volgt gedefinieerd:

- Gemiddeld peil van NAP-20cm (af en toe lager is geen probleem)
- Getijslag van 50cm (of iets minder)
- Maximale waterstand van NAP+5cm (harde bovengrens)

Wat de modellen leveren aan informatie zal moeten worden toegespitst op deze doelstellingen. Hierbij kan wel worden aangetekend dat de 5cm in het model wordt opgelegd en dus niet overschreden kan worden. Daarmee richt de uitvoer zich dus op het gemiddelde peil en de gemiddelde getijslag en de ontwikkeling als functie van de zeespiegelstijging in stapjes van 5 cm (0 t/m 50cm stijging, met als referentie 1995).

In de huidige fase gaan we alleen uit van het doorlaatmiddel, dus zonder turbines, dus dat betekent varianten 1 en 3.

Uiteindelijk kan worden samengevat dat de volgende sommen worden gedaan.

- 1 Zeespiegelstijging scenario's 0 t/m 50cm in stappen van 5 cm. In deze studie wordt uitgegaan van 1995 als referentie, maar de randvoorwaarden stammen uit 2009 en dan is 0 zks ongeveer gelijk aan -5 ten opzichte van 2009
- 2 Variërend aantal kokers (ie optimalisatie)
- 3 2 varianten (1 en 3)
- 4 Zonder turbines, maar alleen kokers
- 5 Al dan niet met ondergrens van NAP-45cm

De resultaten worden in een "regenboog" grafiek uitgezet. Hierin staan de vrijheidsgraden zks en aantal kokers.

Er wordt uitgegaan van de volgende parametersettings:

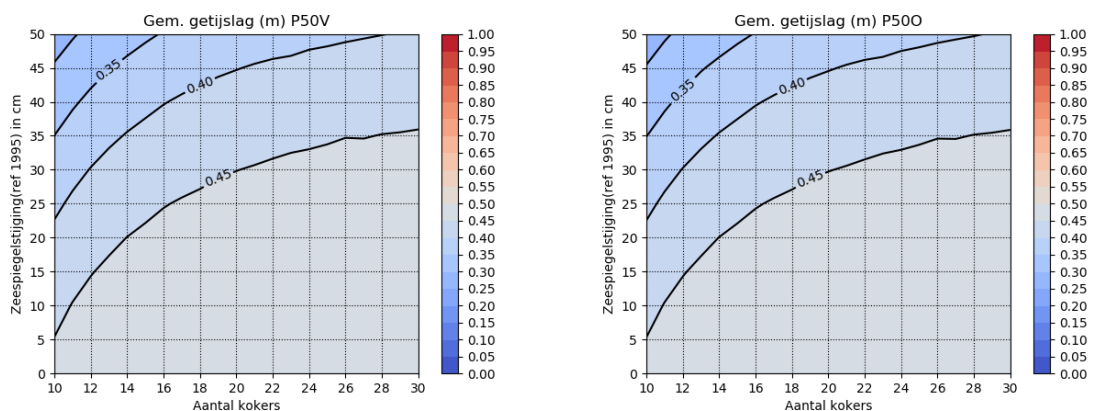
Parameter	waarde
Nt	variëren 10-30.
Gmaxc	5.0
Gminc	-45.0 (of -999)
Maslev	5.0
Minlev	-45.0 (of -999)
Tff	0.0
Tfe	0.0
Closs	0.909 (overeenkomend met een afvoercoëfficiënt van 1.1)
OptKok	1
opp	varierend
Fbsluis	1.35
Obsluis	54.0
Ffsluis	0.7
Ofsluis	61.44

Tabel 3: Model input parameters

## 2.4 Resultaten

Er zijn vier groepen van de runs die in een regenboog grafiek zijn samengevat:

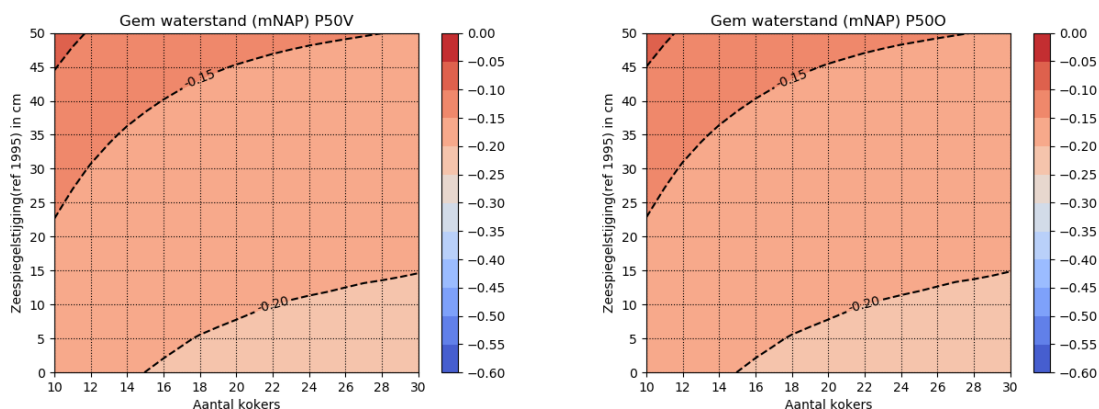
- Ondergrens NAP-45cm, Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis altijd open
- Ondergrens NAP-45cm, Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis meenemen in optimalisatie
- Ondergrens NAP-50cm, Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis altijd open
- Ondergrens NAP-55cm, Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis altijd open
- Geen ondergrens, Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis altijd open
- Geen ondergrens, Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis meenemen in optimalisatie



(a) Varierende Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis

(b) Open Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis

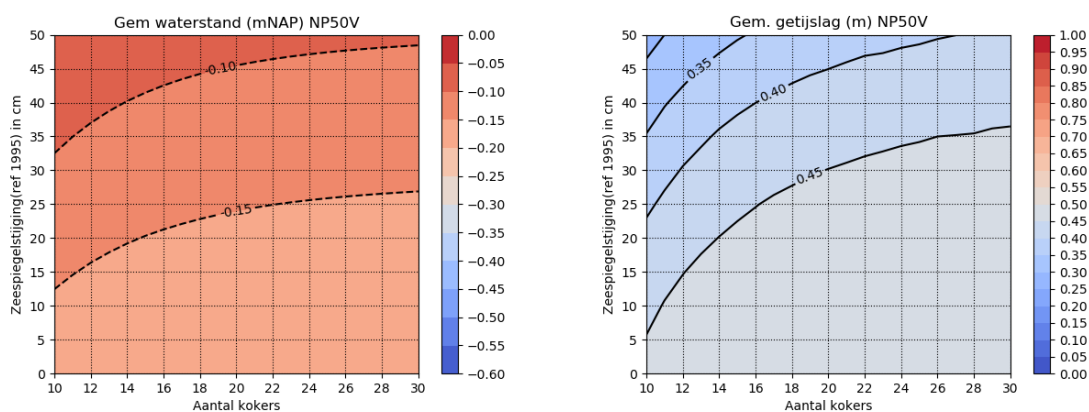
Figuur 1: Getijslag als functie van zzs en aantal kokers met koker optimalisatie, ondergrens van NAP-45cm



(a) *Variërende Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis*      (b) *Open Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis*

*Figuur 2: Waterstand als functie van z.z.s en aantal kokers met koker optimalisatie, ondergrens van NAP-45cm*

Vergelijkbare figuren kunnen ook worden gegenereerd zonder gebruikt te maken van de optimalisatie van het aantal kokers. Bij deze applicatie worden alle kokers gesloten als de boven of ondergrens worden bereikt maar is er geen variatie in het gebruik van het aantal per getij. Uiteraard is er dan geen variatie in de manier waarop de Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis worden bediend.



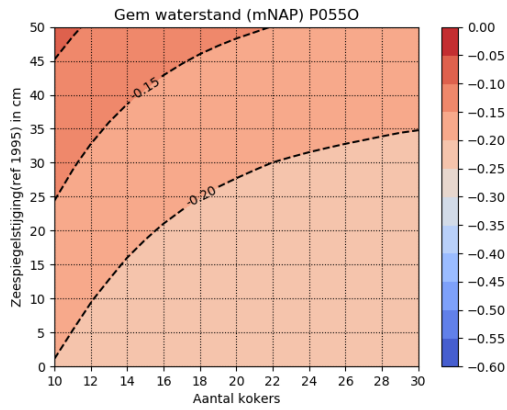
(a) *Gemiddelde waterstand*

(b) *Gemiddelde getijslag*

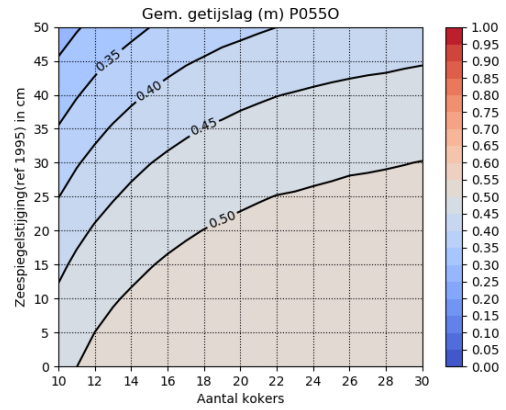
*Figuur 3: Waterstand en getijslag als functie van z.z.s en aantal kokers, ondergrens NAP-45cm, geen koker optimalisatie*

Uit figuren 1 en 2 kan worden afgeleid dat de invloed van het al dan niet meenemen van de Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis in het optimalisatieproces (vrijheidsgraad 3) een kleine invloed heeft op de uiteindelijke resultaten.

De ondergrens heeft wel een significante invloed op de optimalisatie van het gebruik van de kokers en de gemiddelde waterstand en getijslag in de Grevelingen. Hiertoe zijn voor de model simulaties, met koker optimalisatie, een ondergrens van NAP-50cm, NAP-55cm en een simulatie zonder ondergrens toegepast.

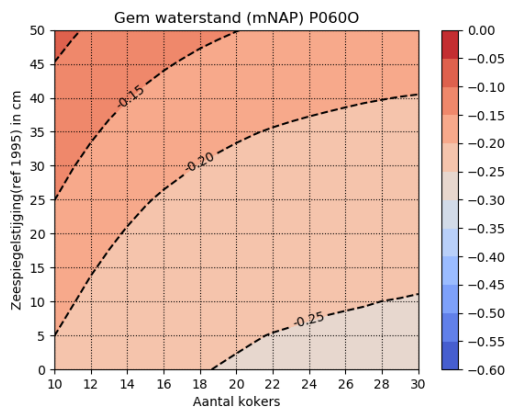


(a) Gemiddelde waterstand

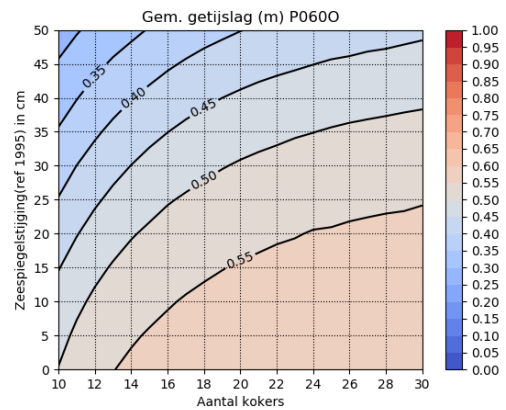


(b) Gemiddelde getijslag

*Figuur 4: Waterstand en getijslag als functie van zzs en aantal kokers, ondergrens NAP-50cm, met koker optimalisatie*

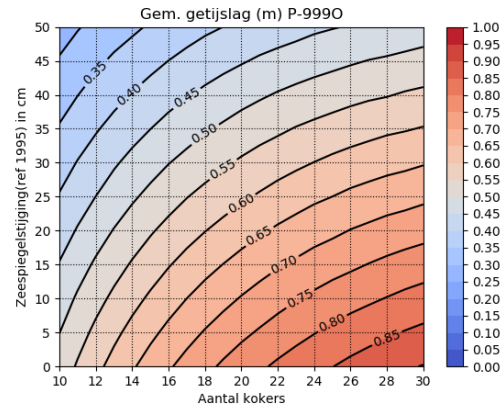
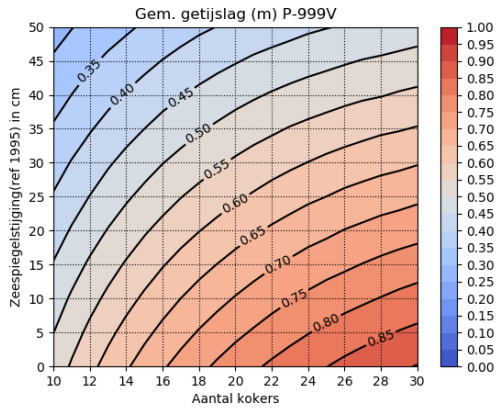


(a) Gemiddelde waterstand



(b) Gemiddelde getijslag

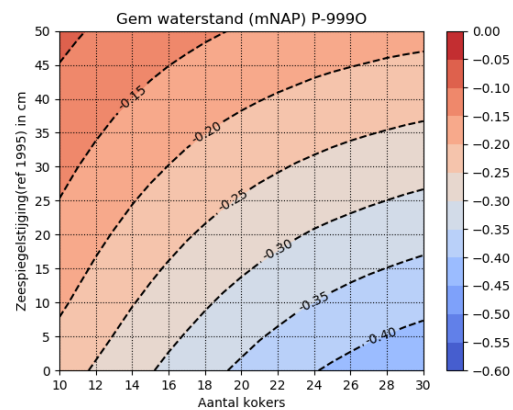
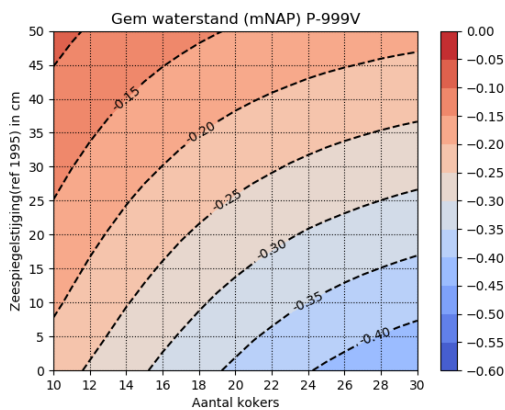
*Figuur 5: Waterstand en getijslag als functie van zzs en aantal kokers, ondergrens NAP-55cm, met koker optimalisatie*



(a) Variërende Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis

(b) Open Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis

*Figuur 6: Getijslag als functie van zzs en aantal kokers met koker optimalisatie, geen ondergrens*



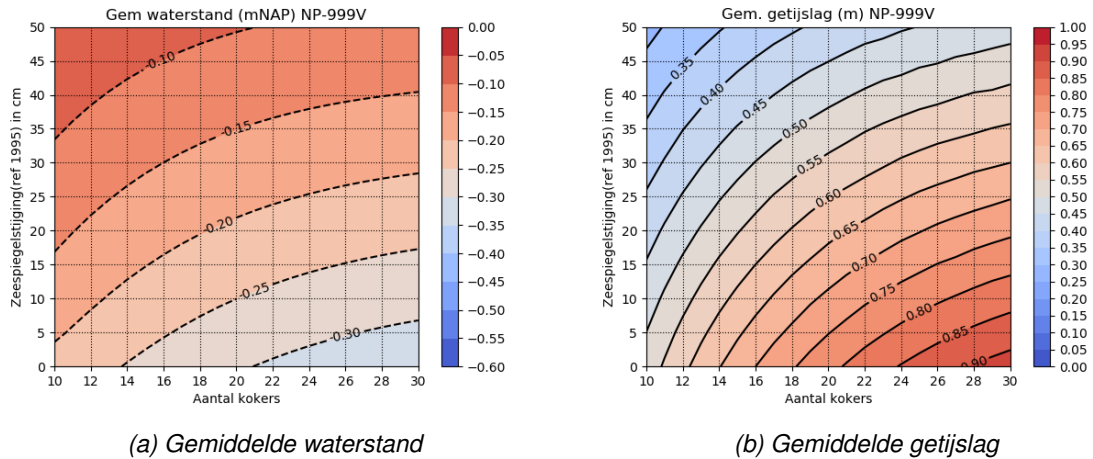
(a) Variërende Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis

(b) Open Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis

*Figuur 7: Waterstand als functie van zzs en aantal kokers met koker optimalisatie, geen ondergrens*

Ook voor de situatie zonder ondergrens is een vergelijkbare set van simulaties uitgevoerd zonder koker optimalisatie.



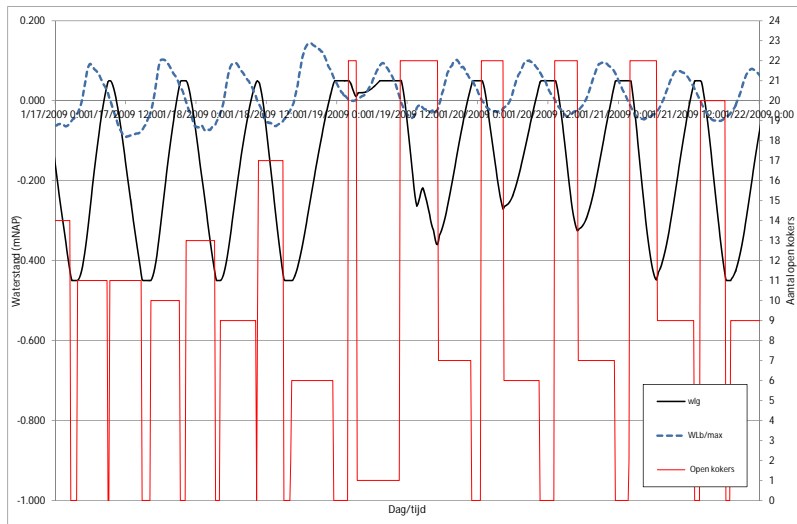


*Figuur 8: Waterstand en getijslag als functie van zzs en aantal kokers, zonder ondergrens, geen koker optimalisatie*

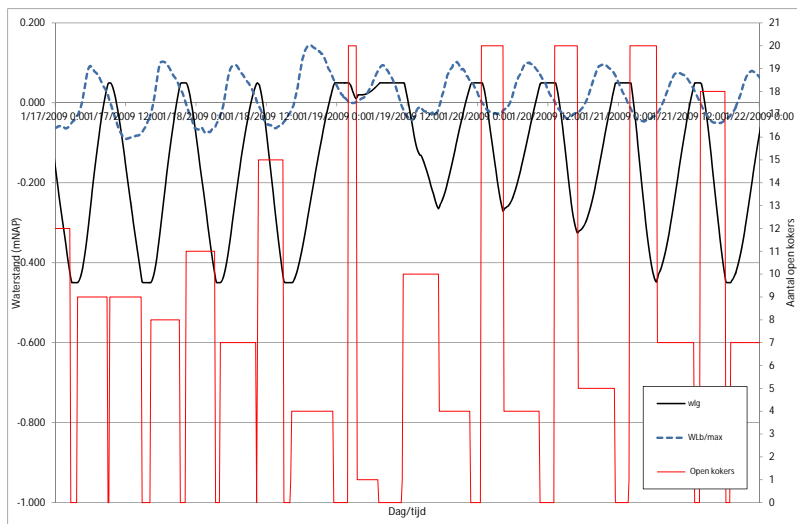
Wanneer de ondergrens wordt losgelaten levert dit aanzienlijk verschillende resultaten op (figuren 6 en 7), voor zowel de getijslag als ook de waterstand in de Grevelingen.

De resultaten van de twee varianten, 1 en 3, zijn beide in bovenstaande resultaatgrafieken opgenomen, omdat de dimensionering van het doorlaatmiddel is vertegenwoordigd door het aantal kokers dat wordt ingezet (op de verticale as).

Om aan te geven hoe het aantal kokers wordt ingezet bij de optimalisatie zijn hieronder twee voorbeelden gepresenteerd.



(a) *Variërende Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis*

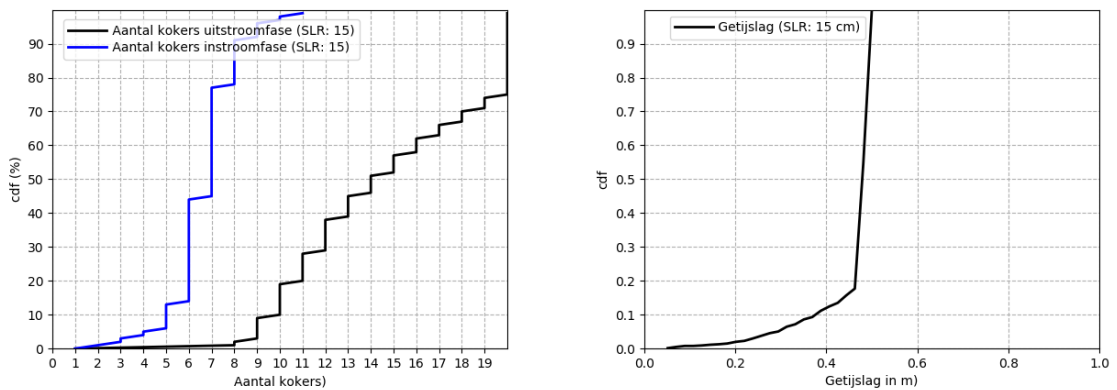


(b) *Open Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis*

*Figuur 9: Voorbeeld variatie gebruik aantal kokers(rood). Waterstand in Grevelingen (zwart), voor een doorlaatmiddel met 20 kokers en een opgelegde ondergrens van NAP-45cm, Noordzee waterstand is geschaald (onderbroken zwarte lijn) en gebaseerd op 20cm zeespiegelstijging tov 1995*

De figuren 9(a) en (b) tonen het aantal kokers dat openstaan (rood). Bij de figuren moet nog worden opgemerkt dat het aantal kokers voor de optimalisatie inclusief de twee sluizen, deze sluizen meenemen. Dus een maximaal aantal kokers van 20 levert voor deze applicatie 22 'kokers' op. Dit verklaart het verschil van het aantal weergegeven kokers in figuur 9(a) en (b). De figuren laten ook zien dat er wel een verschil is in hoeveel kokers open en dicht gaan, maar dat dit zich concentreert op periodes met een stormopzet, zoals op 19 januari 2009. De resterende periodes lijken geen noemenswaardige verschillen op te leveren, waardoor ook het uiteindelijke effect op de waterstand en getijslag zeer beperkt is.

Hoe de kokers worden gebruikt binnen een modelsimulatie kan ook worden geanalyseerd door middel van een cumulatieve verdeling. Ook de waterstand kan binnen een dergelijke simulatie worden bekeken.



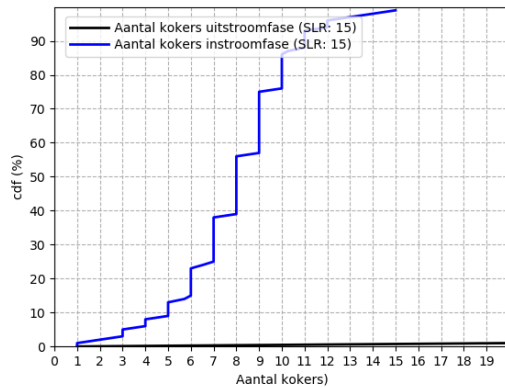
(a) Verdeling in gebruik van het aantal kokers

(b) Waterstands variatie in de Grevelingen

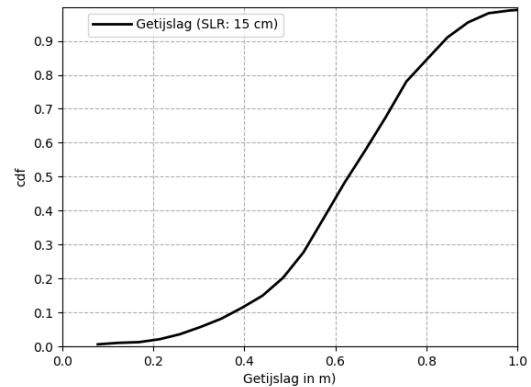
*Figuur 10: Verdelingen voor de simulatie (doorlaatmiddel met 20 kokers) met een ondergrens van NAP-45cm, 'open' sluizen en een zeespiegelstijging van 20cm (tov 1995), de labeling SLR is ten opzichte van 2009*

In figuur 10(a) is te zien dat er een onderscheid is tussen het gebruik van de kokers tijdens de instroom- en uitstroomfase. Voor 50% van de tijd wordt voor deze simulatie 7 kokers gebruikt tijdens de instroomfase en 14 voor de uitstroomfase.

Het effect van het al dan niet gebruiken van een ondergrens is in de onderstaande figuren te zien (figuur 11)



(a) Verdeling in gebruik van het aantal kokers



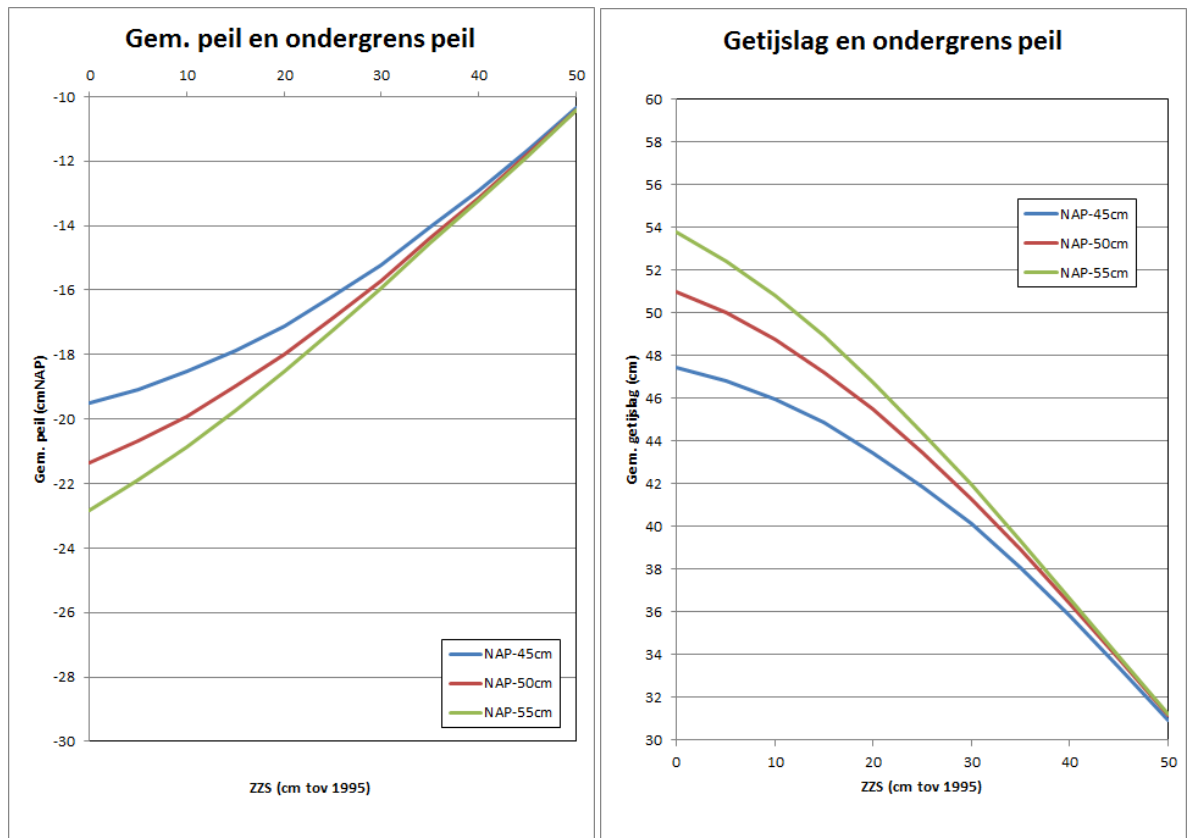
(b) Waterstands variatie in de Grevelingen

*Figuur 11: Verdelingen voor de simulatie (doorlaatmiddel met 20 kokers) zonder ondergrens, 'open' sluizen en een zeespiegelstijging van 20cm (tov 1995), de labeling SLR is ten opzichte van 2009*

In figuur 11(a) is duidelijk te zien dat voor de uitstroombfase er geen beperking wordt opgelegd voor wat betreft het aantal kokers, maar dat maximaal wordt doorgelaten. Het effect op de getijslag in de Grevelingen is aanzienlijk en de 50%-iel gaat van iets onder de 50cm naar ongeveer 65cm voor een doorlaatmiddel met 20kokers en een zzs van 20cm (tov 1995).

## 2.5 Ontwikkeling waterstand en getijslag

Resultaten kunnen ook samengevat worden door specifiek te kijken naar een dimensionering van het doorlaat middel en de gemiddelde getijslag en waterstand in de Grevelingen uit te zetten als functie van de zzs, bij verschillende ondergrenzen van het peil in de Grevelingen. Met name is op basis van de eerste resultaten gekozen om te onderzoeken in welke mate het loslaten van het onderpeil van NAP-45cm invloed heeft op de doelstellingen. Voor een drietal ondergrenzen is dit uitgevoerd en de resultaten zijn uitgezet in onderstaande grafieken (Figuur 12).



(a) Gemiddeld peil in de Grevelingen (cmNAP)

(b) Gemiddelde getijslag in de Grevelingen (cm)

Figuur 12: Ontwikkeling gemiddelde waterstand en getijslag in de Grevelingen voor een doorlaatmiddel met 12 kokers als functie van de zeespiegelstijging (tov 1995) bij drie ondergrenzen voor het peil

Figuur 12 laat zien dat de ondergrens met name belangrijk is bij een relatief kleine zeespiegelstijging. Uit de figuren is ook te zien dat het gemiddelde peil van NAP-20cm niet meer wordt gehaald wanneer een ondergrens van NAP-45cm wordt gehanteerd, maar dat een lagere ondergrens het mogelijk maakt om tot een zeespiegelstijging van ongeveer 10cm deze wel te halen. De maximale getijslag van 50cm wordt langer overschreden wanneer een lagere ondergrens wordt gehanteerd. Een getijslag van meer dan 40 cm kan worden gehandhaafd voor een zeespiegelstijging tot ongeveer 30cm.

## **C Vervolg ontwikkeling en berekeningen 0D-model (2019)**

Dit memo is een vervolg op het memo uit 2018 en geeft een overzicht van het optimalisatieproces voor OD model van de Grevelingen en hoe dit in python is geïmplementeerd, welke peilbeheersscenario's zijn uitgevoerd en een selectie van de resultaten. Voor een volledig overzicht en discussie van resultaten wordt naar het hoofdrapport verwezen.

## Inhoudsopgave

1	Korte uitleg hydraulisch rekenmodel . . . . .	3
1.1	Inleiding . . . . .	3
1.2	Debieten door het doorlaatmiddel al dan niet met turbines . . . . .	3
1.3	Implementatie van pompen . . . . .	4
1.4	Modelaansturing . . . . .	5
2	Uitwerking in python . . . . .	6
2.1	Het optimalisatieproces in het python script . . . . .	6
2.1.1	Het optimaliseren van de het aantal geopende kokers . . . . .	7
2.1.2	Het optimaliseren van de reactiegraad van de turbines . . . . .	7
2.1.3	Versnelde vloed . . . . .	8
3	Gedetailleerde beschrijving van de modelimplementatie in python . . . . .	8
3.1	Korte beschrijving van versieontwikkeling . . . . .	8
3.2	Korte beschrijving van modelparameters . . . . .	9
4	Scenario definities . . . . .	15
5	Beschrijving scenario's voor de Delft3D simulaties . . . . .	16
5.1	Status van modelling runs . . . . .	19
5.2	Inleiding . . . . .	19
5.2.1	RGV scenario . . . . .	19
5.3	Resultaten met pompen . . . . .	21
6	Referenties . . . . .	24

## 1 Korte uitleg hydraulisch rekenmodel

### 1.1 Inleiding

Het model zoals dat is geïmplementeerd is een 0D model van het Grevelingen, inclusief de Brouwerssluis, de Flakkeesse spuisluis en het beoogde doorlaatmiddel. Het model berekent debieten door deze openingen en berekent de waterstand in de Grevelingen. Het model wordt gedreven door tijdreeksen van waterstanden aan de oost- en westkant. Verdamping, regenval en kleinere instromingen worden hierbij niet meegenomen.

### 1.2 Debieten door het doorlaatmiddel al dan niet met turbines

Het doorlaatmiddel bestaat uit een aantal kokers. De relaties voor het berekenen van de debieten door de kokers zijn direct uit het spreadsheet van gehaald van Jacob van Berkel (symbolen komen niet geheel overeen met de oorspronkelijke documenten: Van Berkel (2018, 2019, 2019b)).

$$WL(t) = WL(t - \delta t) + \frac{100 \cdot N_t \cdot sQ_{gate} \cdot \delta t}{A_G} \quad (1)$$

waarbij:

$$Q_{gate} = \frac{(1 - S) \cdot 64 \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot ABS(H_t \cdot (1 - T_f))}}{C_t} \cdot SGN \quad (2)$$

Met:

- $WL$  = Waterlevel Grevelingen
- $WLB$  = Waterlevel Brouwersehavengat 8 (wordt gebruikt als randvoorwaarde)
- $\delta t$  = tijdstap van de data. meestal 10 minuten
- $N_t$  = aantal turbines
- $Q_{gate}$  = totale debiet door de turbines
- $A_G$  = Oppervlak van de Grevelingen
- $S$  = boolean (1/0) dat aangeeft of schuif open op dicht is (dus true/false). Sluit als waterstand in Grevelingen  $WLB > G_{max,c}$  en  $WLB < G_{min,c}$
- $H_t$  = Head in m, waterstandsverschil binnen (Grevelingen) en buiten (Noordzee)
- $T_f$  = Turbine reactiegraad (in de laatste spreadsheet bij eb is deze 0, is een parameter)
- $C_t$  = Verlies coëfficiënt (in het door J. van Berkel geleverde spreadsheet heet het Conduit loss coefficient)

$SGN$  levert het teken aan voor het debiet naar binnen (+) en naar buiten (-) afhankelijk van het waterstandsverschil (buiten min binnen)

In het script zijn ook de debieten van de Brouwerssluis en de Flakkeesse spuisluis ingebracht. De vergelijkingen voor de beide sluisen zien er in het algemeen vergelijkbaar uit met die van



het doorlaatmiddel. Die vergelijking voor die twee debieten zijn het doorstromende oppervlak en afvoercoëfficiënt als parameters in de invoer opgenomen. De vergelijking voor de sluis is dan:

$$Q_{sluis} = f_c \cdot A_s \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot ABS(H_t)} \cdot SGN \quad (3)$$

met  $f_c$  de afvoercoëfficiënt en  $A_s$  het doorstromend oppervlak.

Er is dus een directe relatie tussen de afvoercoëfficiënt en de verliescoëfficiënt/reactiegraad:

$$f_c = \frac{\sqrt{(1 - T_f)}}{C_t} \quad (4)$$

Wanneer er turbines in het doorlaatmiddel aanwezig zijn kan er vermogen worden gegenereerd. De berekening van het vermogen heeft geen effect op de berekende debieten en vormt een post-processing stap. De vergelijking voor het vermogen is:

$$G_p = T_e * \rho_w * 9.81 * T_f * \delta_h * Q_{gate} \quad (5)$$

waarbij  $\rho_w$  is de dichtheid van water,  $T_e$  de efficiëntie van de turbine en  $G_p$  het geleverde vermogen (W). Voor uitvoerverwerking wordt het vermogen omgezet in MW.

Uit dit model komt dus een tijdreeks van de debieten en de waterstand in de Grevelingen en hiermee kun je dus de gemiddelde en maximale waterstanden berekenen.

### 1.3 Implementatie van pompen

Voor de uitwerking van de pompen wordt gebruik gemaakt van een document dat is opgesteld door Jacob van Berkel (Van Berkel 2018).

Er zijn twee manieren van pompen:

- verhang ondersteunend (onder invloed van zwaartekracht)
- normaal pompen

In de debiet vergelijking

$$\Phi = N \cdot A_p \cdot C \sqrt{1 + R_p} \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{sys}} \quad (6)$$

staat een reactiegraad R die iteratief wordt berekent middels:

$$R_p \cdot \sqrt{1 + R_p} = \frac{P_E \cdot \eta}{C \cdot \rho \cdot g \cdot A \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{sys}^3}} \quad (7)$$

De reactiegraad van de pomp wordt iteratief door een intrinsieke functie opgelost. De bovenstaande uitwerking is voor pompen tegen het verhang in. Dit wordt beschouwd als normaal pompen. Het is echter ook mogelijk om te pompen als ondersteuning bij het spuien. Dit betekent dat er wordt

gepompt met het verhang mee. In de pompvergelijkingen (6) en (7) wordt  $1 + R_p$  vervangen door  $R_p - 1$ . Dat betekent dus:

$$\Phi = N \cdot A_p \cdot C \sqrt{R_p - 1} \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{sys}} \quad (8)$$

De reactiegraad R die iteratief wordt berekend door:

$$R_p \cdot \sqrt{R_p - 1} = \frac{P_E \cdot \eta}{C \cdot \rho \cdot g \cdot A \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{sys}^3}} \quad (9)$$

De pompen hebben ook een maximale capaciteit dat is gespecificeerd via de  $P_E$ . In eerste instantie is die waarde gelijk aan de maximale opbrengst van de turbine, maar tijdens de studie wordt ook gekeken naar de verlaging van de getijslag door de maximale pompcapaciteit te beperken. Dit wordt in het script als een aparte parameter gezien in Versie 3.1 van het model.

## 1.4 Modelaansturing

Het model wordt aangedreven door waterstandstijdreeksen (2008 en 2009) die door RWS zijn geleverd voor

- Brouwerhavensegat 08
- Krammersluizen West

Deze tijdreeksen geven de waterstand elke 10 minuten. Dit is dan gebruikt als rekentijdstap in het model.

Het oppervlak van de Grevelingen is in het model als een parameter weergegeven, maar er is door RWS een tabel beschikbaar gemaakt waarbij het wateroppervlak is weergegeven als functie van de waterstand (de hypsometrische curve van de Grevelingen). Het relevante deel van die tabel (Tabel 1) laat zien dat het oppervlak tussen hoog en laag water (NAP-45 tot 5 cm) in de Grevelingen zo'n 10% kan variëren. Met deze variatie van het wateroppervlak als functie van de waterstand wordt in het model rekening gehouden. Dit heeft invloed op het berekenen van de nieuwe waterstand als er een hoeveelheid water is ingelaten.

Waterstand(cm)	Oppervlak (ha)	Inhoud (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
20	11881.0	608.17
10	11652.7	596.43
0	11463.6	584.88
-10	11251.9	573.52
-20	11024.8	562.40
-30	10818.8	551.49
-40	10634.6	540.77
-50	10433.4	530.24
-60	10127.3	520.00
-70	9834.6	510.04
-80	9547.2	500.37
-90	9332.1	490.95
-100	9074.3	481.75
-110	8798.4	472.87
-120	8555.9	464.20
-130	8264.9	455.80
-140	8002.7	447.69
-150	7746.0	439.83

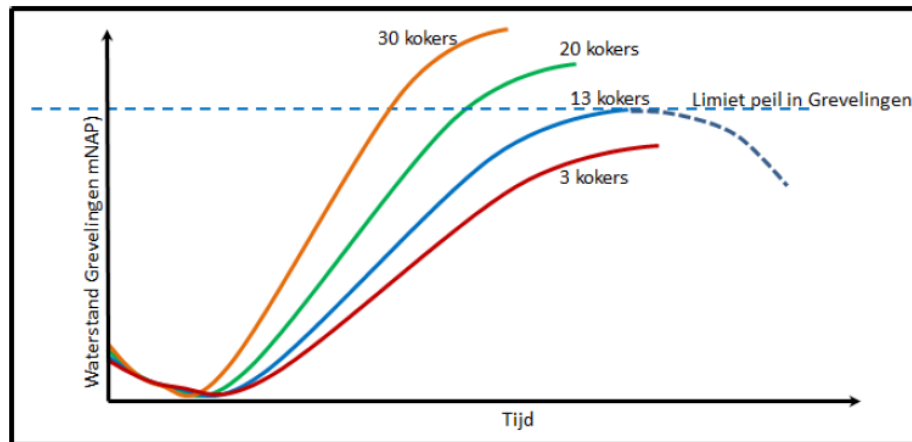
Tabel 1: Grevelingen oppervlak en inhoud als functie van waterstand (t.o.v NAP)

## 2 Uitwerking in python

### 2.1 Het optimalisatieproces in het python script

In het script wordt een optimalisatie uitgevoerd op het gebruik van het aantal kokers per getijslag om een zo optimaal mogelijk getij op het Grevelingenmeer te genereren. Dit betekent dat bij iedere getijslag wordt berekend hoeveel kokers open moeten staan om precies het streefpeil (dat kan het minimum of maximum waterstand in de Grevelingen zijn) te bereiken en zo de tijdsduur dat er geen water wordt in- of uitgelaten wordt geminimaliseerd. In de huidige toepassing wordt van waargenomen tijdreeksen gebruik gemaakt, maar de predictive control van de kokers zou in dit proces kunnen worden toegepast met voorspelde waterstanden als sturende randvoorwaarden.

Het optimalisatieproces is schematisch in Figuur 1 weergegeven.



*Figuur 1: Schematisch van het optimaliseren van het aantal kokers per getijslag met een optimum van 13 kokers*

Er zijn meerdere optimalisatiemogelijkheden ontwikkeld:

- het optimaliseren van het aantal geopende kokers per getij (eb en vloed)
- het optimaliseren van het aantal geopende kokers alleen tijdens de vloed
- het optimaliseren van de reactiegraad van de turbines alleen tijdens de vloed
- het optimaliseren van de reactiegraad van de turbines tijdens de eb en vloed
- het optimaliseren van de openingstijd om versnelde vloed te realiseren

### 2.1.1 Het optimaliseren van de het aantal geopende kokers

Het optimalisatie proces loopt per getijslag (laag naar hoog water of hoog naar laag water) en bepaalt hoeveel kokers er nodig zijn om zo precies mogelijk het limietpeil in de Grevelingen te bereiken. Dit wordt bepaald door te beginnen met 1 koker de getijcurve in de Grevelingen te berekenen vanuit de conditie waarmee de vorige getijslag is geëindigd (tot de maximale waterstand). Zolang dit maximum onder de limiet is wordt vervolgens naar 2 kokers, 3 etc. gegaan. Wanneer de berekende maximale waterstand op of net hoger is dan de limiet, is dat het aantal kokers dat wordt gebruikt voor de simulatie. Het zelfde proces wordt ook gebruikt om het aantal kokers te bepalen voor de situatie van hoog naar laag water.

Er is een mogelijkheid om de optimalisatie uit te voeren voor eb en vloed, maar ook voor alleen tijdens de vloed. Tijdens de eb staan dan alle beschikbare kokers open. Deze kokers sluiten dan allemaal op het moment dat er geen water meer gespuid kan worden (waterstand Noordzee komt boven die van de Grevelingen).

### 2.1.2 Het optimaliseren van de reactiegraad van de turbines

Voor de optimalisatie van de reactiegraad wordt een vergelijkbare procedure gehanteerd die ook voor de kokers wordt gebruikt. Binnen een getijslag wordt een eerste run gedaan met een reactiegraad van 1 (dus zonder een debiet door de turbines) en in stappen van 0.01 terug naar

0. Het optimum wordt bereikt wanneer de maximale waterstand net wordt bereikt aan het eind van de getijslag.

Ook voor de reactiegraad is de mogelijkheid aanwezig om te kiezen voor optimalisatie voor zowel vloed als eb, maar er kan ook gekozen worden voor alleen optimalisatie tijdens de vloed. Tijdens eb is de reactiegraad van de turbines op 1 gezet en wordt dus geen vermogen geleverd.

### 2.1.3 Versnelde vloed

Bij de versnelde vloed is het doel om een zo kort mogelijke periode te gebruiken om het streefpeil voor de hoogste waterstand te bereiken. Dit levert een groter aantal vrijheidsgraden op. De implementatie van de versnelde vloed is op dit moment gericht op het bereiken van het bovenste streefpeil door zo laat mogelijk de kokers te openen. Turbines zijn bij deze optie niet in het doorlaatmiddel opgenomen.

De procedure van optimalisatie is vergelijkbaar met de eerdere optimalisaties. Het referentietijdstip is het moment dat de waterstand in de Noordzee weer is gezakt tot het bovenste streefpeil. Vanuit dit punt wordt het doorlaatmiddel 10 minuten (1 rekentijdstap) eerder opengezet en de waterstand berekend tot dat moment. Wanneer het streefpeil niet wordt gehaald wordt de opening van het doorlaatmiddel weer met 10 minuten vervroegd. Wanneer het waterpeil in de Grevelingen het streefpeil haalt voordat in de Noordzee het waterpeil onder dit streefpeil komt, wordt dit als optimaal gezien. Het effect hiervan is dus dat het doorlaat middel zo laat mogelijk wordt opengezet en het streefpeil net haalt.

## 3 Gedetailleerde beschrijving van de modelimplementatie in python

### 3.1 Korte beschrijving van versieontwikkeling

- `Versie 1`: dit is de versie die is gebruikt voor de sommen en analyses in 2018 en simuleert 2009, optimalisatie van kokergebruik (eb en vloed) en reactiegraad (met turbines)
- `Versie 2`: Kleine wijzigingen voor script voor toepassing op 2008 en introductie van de statistieken voor broedseizoen en herfst/winter. Versnelde vloed is ingevoerd maar in deze versie nog niet goed uitgewerkt. Winteropzet is nog niet voor kortere periodes, maar voor de hele winterperiode
- `Versie 2.1`: Opzet van de definitie van peilscenario's gewijzigd om goed periodes te kunnen aanpassen en combineren. Hiermee is ook de invoer veranderd en een file peilscenario's ingevoerd met periodes en maximum en minimum peil. Lezen van scheefstand is ook ingebracht, maar nog niet in de berekeningen verwerkt. Ook worden in deze versie de tijdreeksen uitgevoerd in de vorm die direct in FLOW kunnen worden ingebracht in de bct file (debiet randvoorwaarden). Het jaar van runnen kan als invoerparameter worden gebruikt. Ook opslag van gelezen data in een pyc file versneld het script.

- *Versie 2.2:* Inbrengen van correctie van de scheefstand. In deze versie is dit nog in ontwikkeling want is nog niet goed geïmplementeerd. Introductie van versnelde
- *Versie 2.3:* Volledige introductie van versnelde vloed.
- *Versie 2.3a:* Kleine aanpassing voor de berekening van de seizoensstatistieken waarbij ze nu apart gedefinieerd zijn van de tijdreeksen van de peilscenario's. In deze versie kunnen meerdere seizoenen individueel worden gedefinieerd (streefpeilen en periodes).
- *Versie 3.0:* Introductie van de optie om ook te gaan pompen. De switch van zwaartekrachtondersteunend naar normaal pompen en terug gaat automatisch. De optimalisatie tijdens de uitstroombfase wordt gedaan op de verliescoëfficiënt. Gedurende instromend water wordt geoptimaliseerd op de reactiegraad van de turbine tijdens turbineren.
- *Versie 3.1:* De optimalisatie is verbeterd ten opzichte van 3.0. Het criterium van het stoppen van het pompen is verbeterd en de berekening van de getijslag wanneer pompen worden gebruikt is verbeterd.

## 3.2 Korte beschrijving van modelparameters

De invoer van het model bestaan uit : data in de [data]directory

- algemene parameterfile <modelparm.csv>
- peilscenario file <peilscenarios.csv>
- runspecifieke file <\*.ini>

In de parameterfile zijn parameters opgenomen die niet gevarieerd worden tijdens het draaien van alle scenario's, een voorbeeld (Versie 3.2) is hieronder weergegeven:

[Parameters]

BF=0

Fbsluis=1.35

Obsluis=54.0

Ffsluis=0.7

Ofsluis=61.44

Uvoor=7.0

MaxTPower=2355000.

TurbEff=0.8

[SLR bereik]

SLR=[-5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45]

[Pompen]

Heff=0.8

Cflow=1.05

Apomp=64.

De definitie van deze parameters is:

Parameter	Omschrijving
BF	Switch voor Brouwerssluis en Flakkeese spuisluis (altijd open of open/sluiten mee als doorlaatmiddel)
Fbsluis	Afvoercoëfficiënt sluis Brouwersdam
Obsluis	Doorstromend oppervlak sluis Brouwersdam
Ffsluis	Afvoercoëfficiënt Flakkeese spuisluis
Ofsluis	Doorstromend oppervlak Flakkeese spuisluis
Uvoor	Tijd in uren voor bepalen hoog of laag water, dus hierin moet in de Noordzee een hoog of laag water vallen
MaxTPower	Maximum vermogen die een turbine kan leveren (In versie tm 2.3 in kW, in Versie 3 in W)
TurbEff	Efficiëntie van leverend vermogen
Hypso	Het al (True) dan niet (False) gebruik maken van de hypsometrische curve van het Grevelingen
SLR	Zeespiegelstijging die door het script wordt doorgerekend t.o.v 2008/2009 het jaar van de randvoorwaarden
Heff Cflow	Pompefficiëntie (0-1) Afvoercoëfficiënt voor de turbines, deze wordt gebruikt voor de kokers waar turbines in zijn opgenomen
Apomp	Dwarsdoorsnede van de turbines (m <sup>2</sup> ) t.o.v 2008/2009 het jaar van de randvoorwaarden

Tabel 2: Vaste model input parameters.

De hypsometrische curve is aangeleverd door RWS en bevat het oppervlak van de Grevelingen in hectare als functie van de waterstand. Deze file staat in de data directory en de naam is in het script opgenomen. Normaal gesproken wordt het script gerund met de hypsometrische curve. Het is gebleken dat de waterbalans wel klopt, maar dat zodra deze debieten worden toegepast als randvoorwaarden voor het model de waterbalans niet meer sluitend is. Dit heeft te maken met de interpolatie van de hypsometrische curve en het expliciete oplossingschema in het script. Ook is de bathymetrie in het 3D model iets anders. Wanneer een constant oppervlak wordt gebruikt treedt deze niet meer op en is de waterbalans voor het 3D model sluitend. Voor het genereren van de randvoorwaarden van het 3D model wordt daarom een oppervlakte gebruikt die hoort bij de gemiddelde waterstand van het 0D model. Dit geeft weliswaar een klein verschil, maar dit is voor de vervolgstappen te verwaarlozen en heeft geen noemenswaardig effect op waterstanden en het waterkwaliteitsmodel.

Het model wordt gevoed met twee input files, de eerste met daarin parameters die niet worden gevarieerd tijdens serie runs. Deze zijn opgeslagen in *modelparm.csv*. De tweede file is een *\*.ini* file met daarin de parameters die tijdens de serie runs gevarieerd kunnen worden. Het script loopt dan vervolgens automatisch door de serie runs. Daarin staat ook de naam van het scenario dat wordt gedraaid. Deze ini file heeft de volgende structuur:

[OptVars]

<b>Datum</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina</b>
15 augustus 2019	Bijlage C	11/24

```

scenario = BBWTUK12
nt = 12
ntk = 12
maxlev = 5 - deze is inmiddels niet meer relevant vanwege de definitie via peilscenario's
minlev = -50 - deze is inmiddels niet meer relevant vanwege de definitie via peilscenario's
closs = 0.909
tff = 0.88
tfe = 0
optkok = 1
maxlevw = 10 - deze is inmiddels niet meer relevant vanwege de definitie via peilscenario's
minlevw = -50 - deze is inmiddels niet meer relevant vanwege de definitie via peilscenario's
peilseizoen = W - deze is inmiddels niet meer relevant vanwege de definitie via peilscenario's
scheefstandcor = False
hypso = True
opp = 11149.53
peilscenarios = BAS,PHW_1,PHW_2,PBR
  
```

In versie 3 worden de alle scenario' s voorbereid in een spreadsheet en uitgevoerd als een csv bestand. Een pre-processor verwerkt dit bestand en genereert de alle benodigde invoer files (\*.ini files). Het csv bestand ziet er als volgt uit:

```

setup,Scenario,Nt,Ntk,Maxlev,Minlev,Closs,Tff,Tfe,OptKok,MaxlevW,MinlevW,PeilSeizoen,Scheefstandcor,Hypso,MaxPPower,opp,Peilscenarios
FALSE,BATUK06,6,6,5,-50,0.909,0.88,0,1,5,-50,A,FALSE,TRUE,2355000,11149.53,"BAS,0,0,0,0"
FALSE,BATUK09,9,9,5,-50,0.909,0.88,0,1,5,-50,A,FALSE,TRUE,2355000,11149.53,"BAS,0,0,0,0"
FALSE,BATUK12,12,12,5,-50,0.909,0.88,0,1,5,-50,A,FALSE,TRUE,2355000,11149.53,"BAS,0,0,0,0"
FALSE,BATUK15,15,15,5,-50,0.909,0.88,0,1,5,-50,A,FALSE,TRUE,2355000,11149.53,"BAS,0,0,0,0"
FALSE,BATUK18,18,18,5,-50,0.909,0.88,0,1,5,-50,A,FALSE,TRUE,2355000,11149.53,"BAS,0,0,0,0"
  
```

Het keyword FALSE geeft aan dat dit scenario niet tot een ini file wordt verwerkt en dus niet wordt uitgevoerd. Dat gebeurt wel als dit keyword TRUE is. De peilscenario file bevat alle mogelijke scenarios waarbij het maximum en minimum waterpeil (in cm ten opzicht van NAP) en de periodes waar dit voor geldt worden gespecificeerd. Deze definities maken de waardes van de maximum en minimum en peilseizoen die nog in de invoer zijn opgenomen overbodig. Alle peilscenario's worden gedefinieerd uit een groot aantal periodes met een minimum en maximum waterstand en die zijn op dit moment is als volgt gedefinieerd:



Period	start	end	Maxlev	Minlev	opm
RGV	01-11-2007 00:00	31-12-2008 23:50	5	-45	RGV variant
RGV_5	01-11-2007 00:00	31-12-2008 23:50	0	-45	RGV variant
RGV_10	01-11-2007 00:00	31-12-2008 23:50	-5	-45	RGV variant
RGV_15	01-11-2007 00:00	31-12-2008 23:50	-10	-45	RGV variant
RGV_2	01-11-2007 00:00	31-12-2008 23:50	2	-45	RGV variant
RGV_40	01-11-2007 00:00	31-12-2008 23:50	-3	-45	RGV variant
BAS	01-11-2007 00:00	31-12-2008 23:50	5	-50	Basis senario
B1	01-11-2007 00:00	31-12-2008 23:50	5	-55	Basis met -55 onderpeil
PHW_1	01-11-2007 00:00	01-03-2008 00:00	10	-50	Winterpeil volledig seizoen 1
PHW_2	01-09-2008 00:00	31-12-2008 23:50	10	-50	Winterpeil volledig seizoen 2
PHW6_1	06-02-2008 00:00	27-02-2008 00:00	10	-60	Winterpeil in 3 periodes van 3 weken (op -60)
PHW6_2	01-09-2008 00:00	22-09-2008 00:00	10	-60	Winterpeil in 3 periodes van 3 weken (op -60)
PHW6_3	17-11-2008 00:00	08-12-2008 00:00	10	-60	Winterpeil in 3 periodes van 3 weken (op -60)
PVM	01-11-2007 00:00	31-12-2008 23:50	-5	-60	Verlaagd middenpeil
PKG	01-11-2007 00:00	31-12-2008 23:50	-5	-40	Kleinere getijslag
PBR	01-04-2008 00:00	16-07-2008 00:00	-5	-55	Broedseizoen voor basis
PBR6	01-04-2008 00:00	16-07-2008 00:00	-5	-60	Broedseizoen voor basis met laag peil op -60
PHWP1	06-02-2008 00:00	27-02-2008 00:00	10	-50	Winterpeil in 3 periodes van 3 weken (op -50)
PHWP2	01-09-2008 00:00	22-09-2008 00:00	10	-50	Winterpeil in 3 periodes van 3 weken (op -50)
PHWP3	17-11-2008 00:00	08-12-2008 00:00	10	-50	Winterpeil in 3 periodes van 3 weken (op -50)
PVWP1	06-02-2008 00:00	27-02-2008 00:00	0	-60	Winterpeil in 3 periodes van 3 weken voor verlaagd middenpeil
PVWP2	01-09-2008 00:00	22-09-2008 00:00	0	-60	Winterpeil in 3 periodes van 3 weken voor verlaagd middenpeil
PVWP3	17-11-2008 00:00	08-12-2008 00:00	0	-60	Winterpeil in 3 periodes van 3 weken voor verlaagd middenpeil
PGWP1	06-02-2008 00:00	27-02-2008 00:00	0	-40	Winterpeil in 3 periodes van 3 weken voor kleinere getijslag
PGWP2	01-09-2008 00:00	22-09-2008 00:00	0	-40	Winterpeil in 3 periodes van 3 weken voor kleinere getijslag
PGWP3	17-11-2008 00:00	08-12-2008 00:00	0	-40	Winterpeil in 3 periodes van 3 weken voor kleinere getijslag
PGBR	01-04-2008 00:00	16-07-2008 00:00	-15	-45	Broedseizoen voor kleinere getijslag
PMBR	01-04-2008 00:00	16-07-2008 00:00	-15	-65	Broedseizoen voor verlaag middenpeil

**Datum**  
15 augustus 2019

**Kenmerk**  
Bijlage C

**Pagina**  
13/24

<b>Period</b>	<b>start</b>	<b>end</b>	<b>Maxlev</b>	<b>Minlev</b>	<b>opm</b>
TM	01-11-2007 00:00	31-12-2008 23:50	-10	-55	Verlaagpeil -10 tm -55
TMBR	01-04-2008 00:00	16-07-2008 00:00	-20	-65	Broedseizoen horend bij TM
TMWP1	06-02-2008 00:00	27-02-2008 00:00	-5	-55	Winteropzet horend bij TM
TMWP2	01-09-2008 00:00	22-09-2008 00:00	-5	-55	Winteropzet horend bij TM
TMWP3	17-11-2008 00:00	08-12-2008 00:00	-5	-55	Winteropzet horend bij TM
BG2	01-11-2007 00:00	31-12-2008 23:50	-10	-35	Opzet voor ong 20cm getijslag [b]
BG2BR	01-04-2008 00:00	16-07-2008 00:00	-20	-40	Broedseizoen horend bij BG2
BG2WP1	06-02-2008 00:00	27-02-2008 00:00	-5	-35	Winteropzet horend bij BG2
BG2WP2	01-09-2008 00:00	22-09-2008 00:00	-5	-35	Winteropzet horend bij BG2
BG2WP3	17-11-2008 00:00	08-12-2008 00:00	-5	-35	Winteropzet horend bij BG2

De peilscenariodefinities komen vervolgens in de invoer van het script <\*.ini>.

De preprocessor genereert de ini files voor het script op basis van de uit excel geëxporteerde scenario definities. De parameters in het model zijn als volgt gedefinieerd: Er wordt uitgegaan van de volgende parameter settings:

Parameter	Omschrijving
Nt	aantal turbines
Ntk	aantal kokers zonder turbines
Maxlev	beoogde maximale waterstand
Minlev	beoogde minimale waterstand
Tff	reactiegraad bij instromend debiet
Tfe	reactiegraad bij uitstromende debiet
Closs	verliescoëfficiënt
OptKok	0 : geen optimalisatie -1 : met koker optimalisatie (alleen vloed) 1 : met koker optimalisatie (eb en vloed) 2 : met optimalisatie reactiegraad alleen vloed 3 : met optimalisatie reactiegraad vloed en eb 4 : met optimalisatie voor puls (versnelde vloed)inlaat
Maxlevw	beoogde maximale waterstand winter/herfst
Minlevw	beoogde minimale waterstand winter/herfst
opp	oppervlak Grevelingen
peilseizoen	welk seisoenscenario (W, Z of A) wordt niet meer in Versie 3 gebruikt
scheefstandcor	Wel of geen scheefstandscorrectie
hypso	boolean voor het gebruik van de hypsometrische curve
opp	oppervlak van de Grevelingen in ha (bij hypso=False)
peilscenarios	lijst van peilscenarios

*Tabel 3: Model input parameters.*

De parameters maxlev en minlev worden vanaf versie 2.2 niet meer gebruikt, maar zijn nodig voor backwards compatibiliteit met versie 2. Deze parameters worden gedefinieerd door de peilscenarios. De volgorde van de peilscenario's is wel van belang. In het script worden de maxlev en minlev gegenereerd als tijdreeks en de vaste array wordt eerst gevuld met het eerste scenario waarna de elementen die horen bij de tijden van de andere scenario's worden opgevuld. Het aantal peilscenario's is in beginsel onbeperkt, zolang voor alle scenario's in de scenario definitie file het zelfde aantal wordt gebruikt. Ongebruikte scenario's moeten in de csv voor de preprocessor dan de waarde 0 krijgen.

Wanneer alle inifiles zijn geprepareerd en in de scenario directory zijn opgenomen als \*.ini zal het script alle ini files als invoer oppakken en in batch draaien. De resultaten van de runs worden in de directory `results` geplaatst. Wanneer de hypsometrische curve niet wordt gebruikt, worden de resultaten in een directory `results_nohypso` gezet. Van elke run worden grafieken gegenereerd en samenvattende resultaten.

Het script maakt gebruik van een pyc file waarin alle data worden opgeslagen. Dit heeft voordelen

voor het runnen omdat het lezen van deze file vele malen sneller is dan het lezen van de originele data die in verschillende files zijn opgeslagen. Wanneer deze file niet bestaat worden de verschillende datasets gelezen vanuit de oorspronkelijke data. Die gelezen data wordt dan in een pyc file weggeschreven zodat deze wordt gebruikt voor andere runs. Dit betekent dat als de data veranderd om welke reden dan ook, de pyc file moet worden verwijderd of hernoemd omdat anders de oude data wordt ingelezen.

## 4 Scenario definities

Van de gedefinieerde scenario's bestaan de Turbines Uit (TUK) optie en de Turbines Aan (TAK) optie, dit is in de naam van het scenario terug te vinden. Verder zijn de scenario's als volgt gedefinieerd:

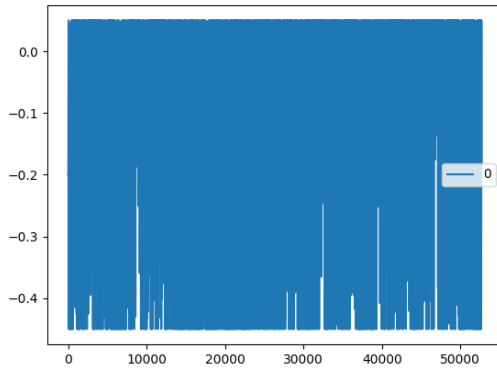
- BA met peilscenario's BAS - Basis scenario
- BB met peilscenario's BAS, PBR, - Basis scenario en broedseizoen
- B6 met peilscenario's BAS, PRB6 - Basis en broedseizoen met lager onderpeil (NAP -60 cm)
- BW met peilscenario's BAS,PHW\_1,PHW\_2,0 - Basis en hoger winterpeil
- RGV met peilscenario's RGV - RGV variant gestuurd op NAP -2 cm, deen winter opzet/broedseizoen
- BBW met peilscenario's BAS, PHWP1, PHWP2, PHWP3, PBR - Gecombineerd Basis, broed en winterpeil
- BS met peilscenario BAS - Basis scenario met scheefstandcorrectie
- BM met peilscenario PVM - Verlaagd middelpeil
- BG met peilscenario PKG - Kleinere getijslag (30cm)
- BC met peilscenario BAS - variatie van verliescoëfficiënt 1.053 ipv 0.909
- BGBW met peilscenario PKG, PGWP1, PGWP2, PGWP3, PGBR - Kleinere getijslag gecombineerd met broedseizoen en winteropzet
- BMBW met peilscenario's PVM, PVWP1, PVWP2, PVWP3, PMBR - Verlaagd gemiddeld peil gecombineerd met broedseizoen en winteropzet
- BGS met peilscenario PKG - als BG maar met scheefstandcorrectie
- BG2 opgezet voor ong 20cm getijslag met broedseizoen en winteropzet
- BP met peilscenario BAS - Basis run, maar met versnelde vloed
- TMBW met peilscenario TMBR, TMWP1, TMWP2 en TMWP3 - run verlaagd peil NAP -10 tot -55 cm, met broedseizoen en winteropzet
- BPTMBW met peilscenario's als TMBW maar met versnelde vloed
- BPBW met peilscenario's als BBW maar met versnelde vloed
- BPGBW met peilscenario's ald BGBW maar met versnelde vloed

## 5 Beschrijving scenario's voor de Delft3D simulaties

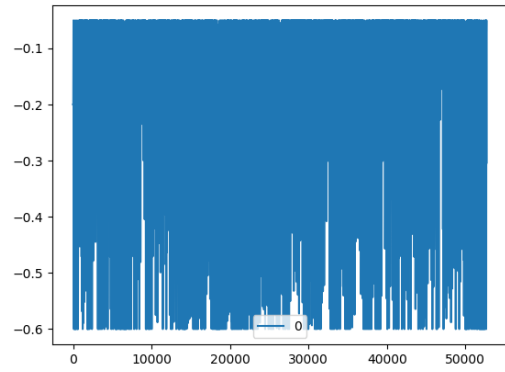
De volgende scenarios zijn gedefinieerd om met 3D door te rekenen, waarbij met 12 kokers zonder turbines wordt gerekend. De specificatie staat ook in de opdrachtomschrijving van RWS. Tussen haakjes staan de definities voor het modelleren:

- 1 Basis (BA)
- 2 RGV variant, ook sturing op middelpeil (RGV)
- 3 Verlaagd middelpeil (BM)
- 4 Basis plus broedseizoen en winteropzet BBW)
- 5 Basis plus scheefstandcorrectie (BS)
- 6 Verminderd getij 30 cm (BG)
- 7 Autonome ontwikkeling (is al inclusief broedseizoen plus winteropzet, waterbalans via Piet Lieveense)
- 8 30 cm getij plus broedseizoen en winteropzet (deze som moet dus ook nog met het waterbalansmodel worden gemaakt) (BGBW)
- 9 Verlaagd gem. peil plus broedseizoen en winteropzet (BMBW))
- 10 30 cm getij met scheefstandcorrectie (BGS)
- 11 TMBW verlaagd peil
- 12 BPTMBW, verlaagd peil met versnelde vloed
- 13 BPGBW kleinere getijslag met versnelde vloed

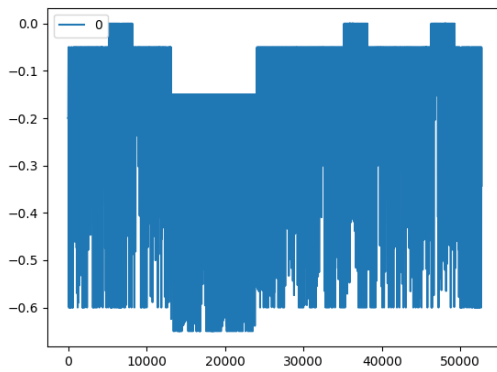
De volledige naamgeving van de runs is een combinatie van de definitie van het scenario gevolgd door of er wel (TA) of geen (TU) turbines opgenomen zijn, waarna een K met een nummer volgt dat aangeeft hoeveel kokers er in het doorlaatmiddel zijn opgenomen. Bijvoorbeeld BMBWTUK12 is een scenario verlaagd peil met winteropzet en broedseizoen zonder turbines en 12 kokers. Voorbeelden van gecombineerde peilscenario's zijn als volgt:



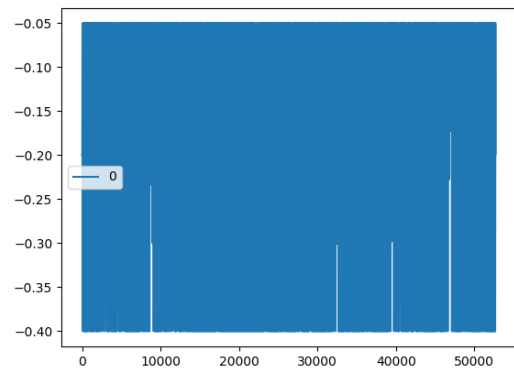
(a) RGVTUK12\_wlg\_2008\_SLR\_5.png



(b) BMTUK12\_wlg\_2008\_SLR\_5.png

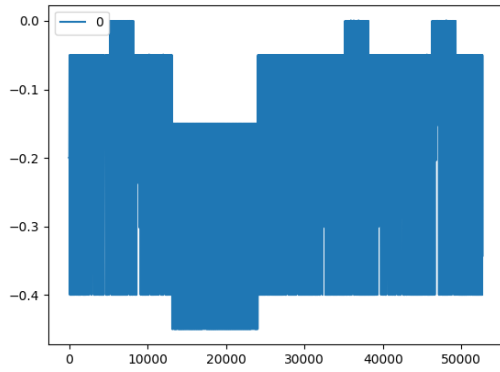


(c) BMBWTUK12\_wlg\_2008\_SLR\_5.png

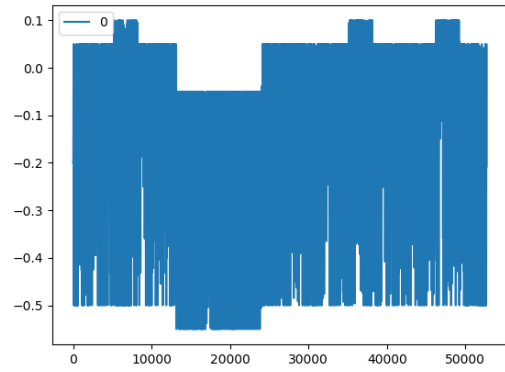


(d) BGTUK12\_wlg\_2008\_SLR\_5.png

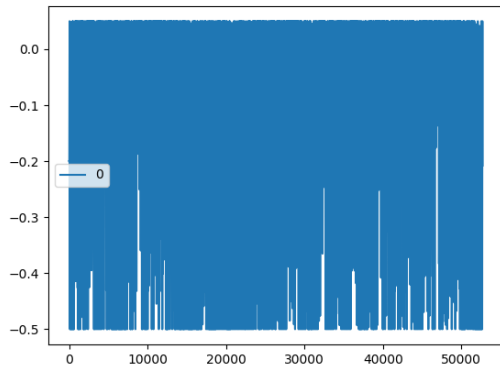
Figuur 2: Peilen voor een aantal Peilscenario's (schaal op verticale as zijn verschillend)



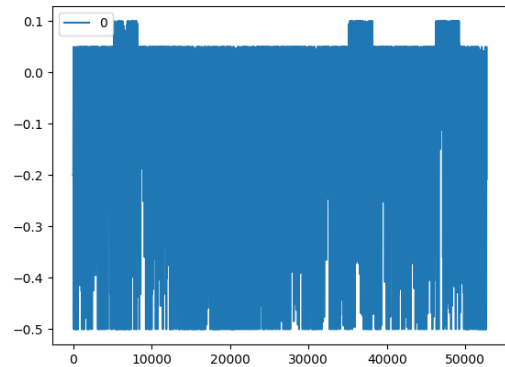
(a) BGBWTUK12\_wlg\_2008\_SLR\_5.png



(b) BBWTUK12\_wlg\_2008\_SLR\_5.png

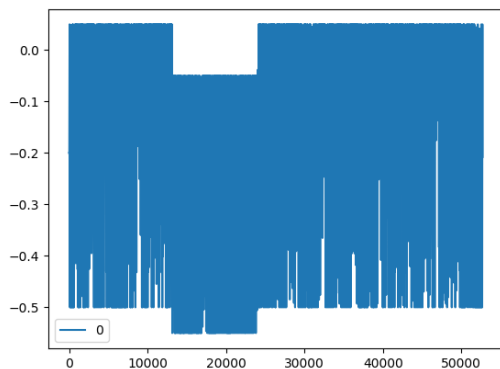


(c) BATUK12\_wlg\_2008\_SLR\_5.png

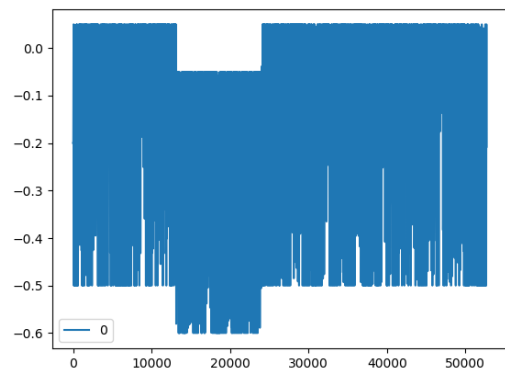


(d) BWTUK12\_wlg\_2008\_SLR\_5.png

Figuur 3: Peilen voor een aantal Peilscenarios (schaal op verticale as zijn verschillend)



(a) BBTUK12\_wlg\_2008\_SLR\_5.png



(b) B6TUK12\_wlg\_2008\_SLR\_5.png

Figuur 4: Peilen voor een aantal Peilscenarios (schaal op verticale as zijn verschillend)

Uit het groot aantal simulaties (per scenario) zijn punten af te leiden voor de waarde van de zeespiegelstijging (ZSS) waarbij een na te streven getijslag niet meer kan worden behaald, afhankelijk van de omvang van het doorlaatmiddel. Voor de afvoercoëfficiënt van de scenario's is 1.1 gehanteerd (verliescoëfficiënt). Bij de aanwezigheid van pompen wordt een afvoercoëfficiënt van 1.05 gehanteerd.

## **5.1 Status van modelling runs**

### **5.2 Inleiding**

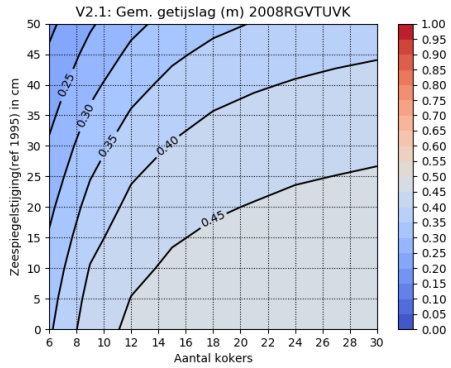
In dit hoofdstuk worden voorbeelden van uitvoer getoond. Voor een volledige beschrijving van resultaten wordt verwezen naar het hoofdrapport.

#### **5.2.1 RGV scenario**

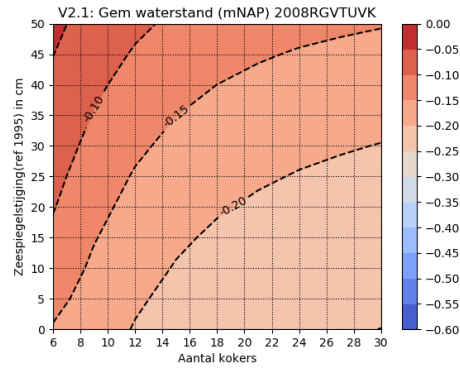
De RGV variant is een scenario waarbij gestuurd wordt op een gemiddelde waterstand van NAP -0.20 m. Dit gemiddelde wordt bereikt door het streefpeil van de maximale waterstand te verlagen vanaf de bovengrens van NAP 5 cm. Dit betekent dat er geen sturing is op getijslag van 40 cm.

Het resultaat van de runs is in onderstaande regenbooggrafieken (Figuur 8) af te lezen. Het resultaat van de verschillende runs is in Figuur 6 samengevat.

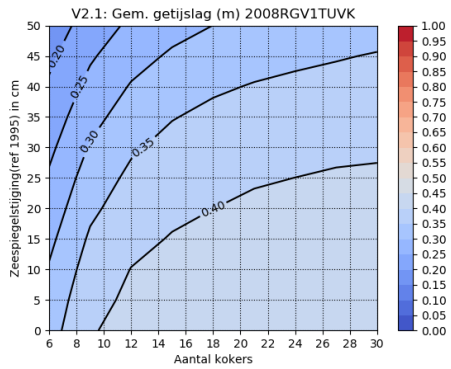




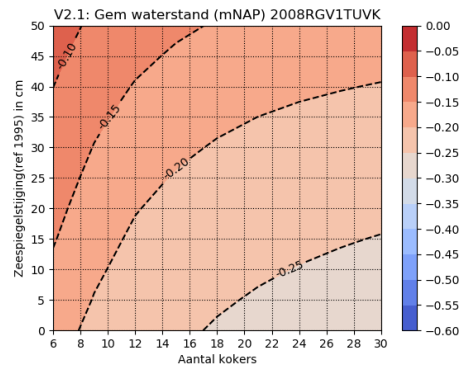
(a) Max peil NAP +0.05 m



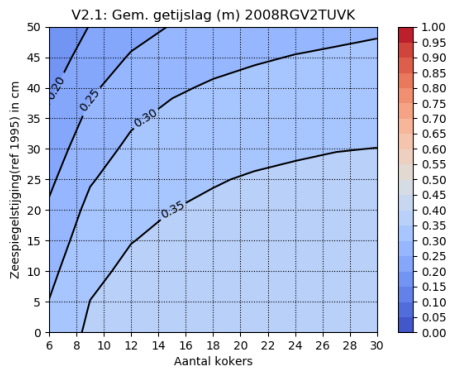
(b) Max peil NAP +0.05 m



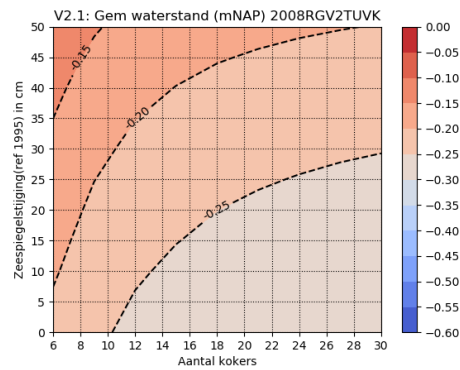
(c) Max peil NAP +0.0 m



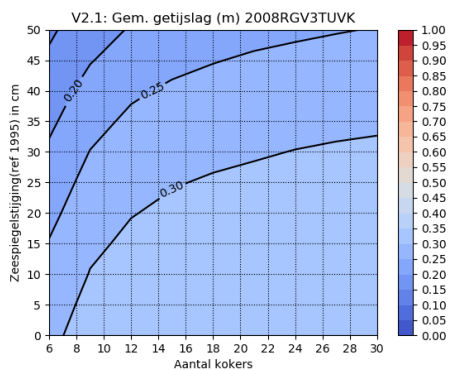
(d) Max peil NAP +0.0 m



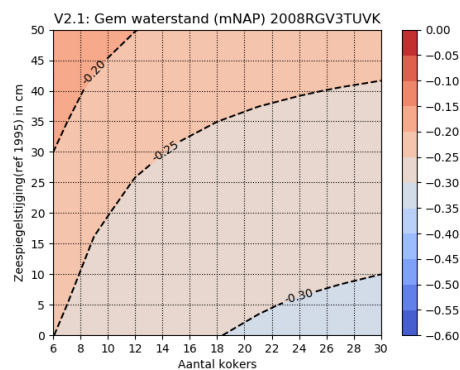
(e) Max peil NAP -0.05 m



(f) Max peil NAP -0.05 m



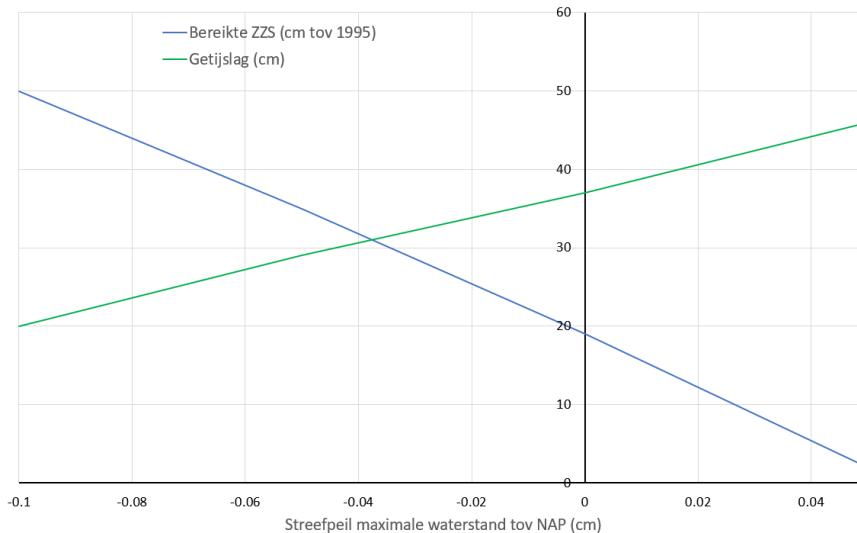
(g) Max peil NAP -0.10 m



(h) Max peil NAP -0.10 m

**Figuur 5: Gemiddelde waterstand en getijslag voor RGV scenario**

Wanneer voor een doorlaatmiddel met 12 kokers het RGV scenario wordt samengevat dan kan een relatie worden afgeleid van streefpeil van de maximale waterstand dat nodig is om de gemiddelde waterstand van NAP -20 cm te halen en welke getijslag daarbij hoort.



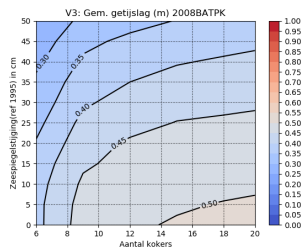
*Figuur 6: De maximaal bereikte zeespiegelstijging en bijbehorende getijslag voor het RGV scenario gestuurd op NAP -20 cm gemiddelde waterstand, met 12 kokers en variërend streefpeil voor maximale waterstand*

Uit bovenstaande figuur 6 is af te leiden dat bij het sturen op een gemiddelde waterstand van NAP -20 cm de minimale getijslag van 40 cm alleen gehaald wordt zonder zeespiegelstijging ten opzichte van 1995.

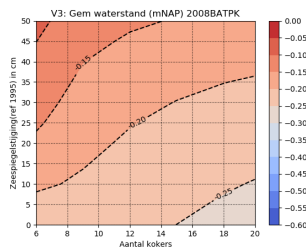
Alle sommen behalve voor verlaagd getij komen uit van een gemiddelde waterstand van tussen NAP -20 en -10 cm en voor het genereren van de randvoorwaarden van het model wordt een wateroppervlak gebruikt voor de Grevelingen die bij -15cm hoort (11149.53 ha). Voor het BM scenario is de gemiddelde waterstand (12 kokers) van tussen -26 cm (10 cm ZZS) en -16 cm (45 cm ZZS) dus op ong. -21 cm en daar hoort dan een oppervlak van 11086.25 ha bij. Het is overigens wel de verwachting dat het effect van de keuze van dit oppervlak beperkt zal zijn.

### 5.3 Resultaten met pompen

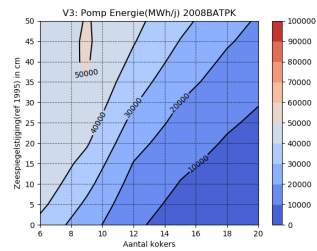
Hieronder zijn de resultaten van simulaties met pompen voor het basis scenario en een basis met alleen winteropzet:



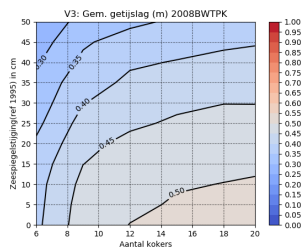
(a) Scenario: BATPK2008



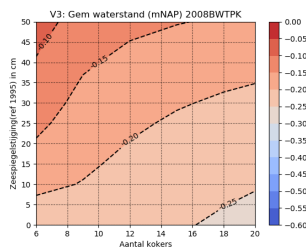
(b) Scenario: BATPK2008



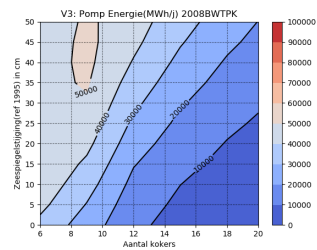
(c) Scenario: BATPK2008



(d) Scenario: BWTPK2008



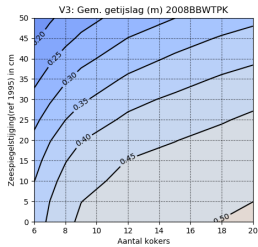
(e) Scenario: BWTPK2008



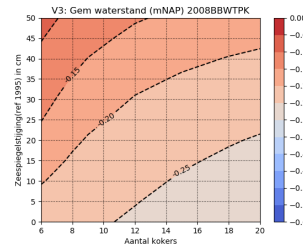
(f) Scenario: BWTPK2008

Figuur 7: Gemiddelde waterstand (m tov NAP), getijslag (m) en pompenergie (MWh/j) voor Pompen scenario's BATPK en BWTPK

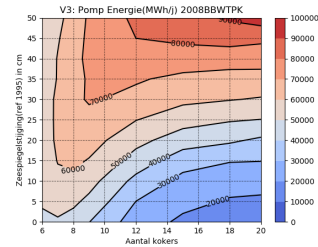
Hieronder zijn de figuren getoond van de basisruns van drie scenario's waarbij het maximale pompvermogen gelijk is aan het maximale energieproductie van de turbine.



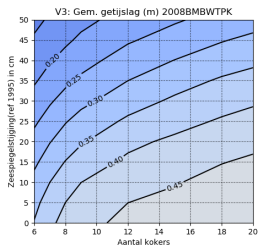
(a) Scenario: BBWTPK2008



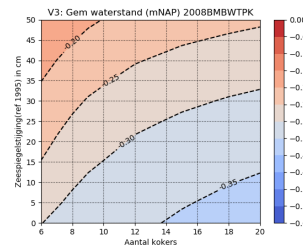
(b) Scenario: BBWTPK2008



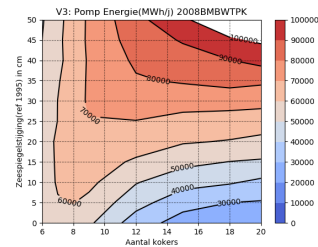
(c) Scenario: BBWTPK2008



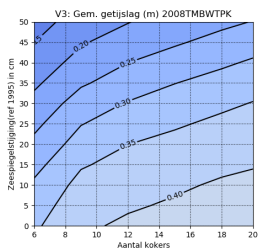
(d) Scenario: BMBWTPK2008



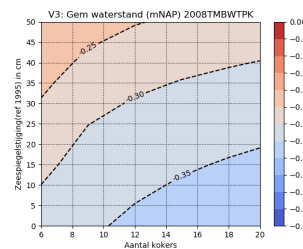
(e) Scenario: BMBWTPK2008



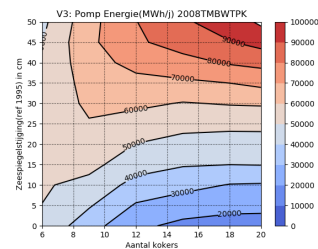
(f) Scenario: BMBWTPK2008



(g) Scenario: TMBWTPK2008



(h) Scenario: TMBWTPK2008



(i) Scenario: TMBWTPK2008

**Figuur 8: Gemiddelde waterstand (m tov NAP), getijslag (m) en pompenergie (MWh/j) voor Pompen scenario's**

## **6 Referenties**

Berkel, J. van, 2018. Spui-meng-functie (puls-spuien), rapportage project Getij Grevelingen. report, Entry Technology Support BV.

Berkel, J. van, 2019a. Pomp-turbine-weerstand, rapportage project Getij Grevelingen. report, Entry Technology Support BV.

Berkel, J. van, 2019b. Pompmodellering, rapportage project Getij Grevelingen. report, Entry Technology Support BV.

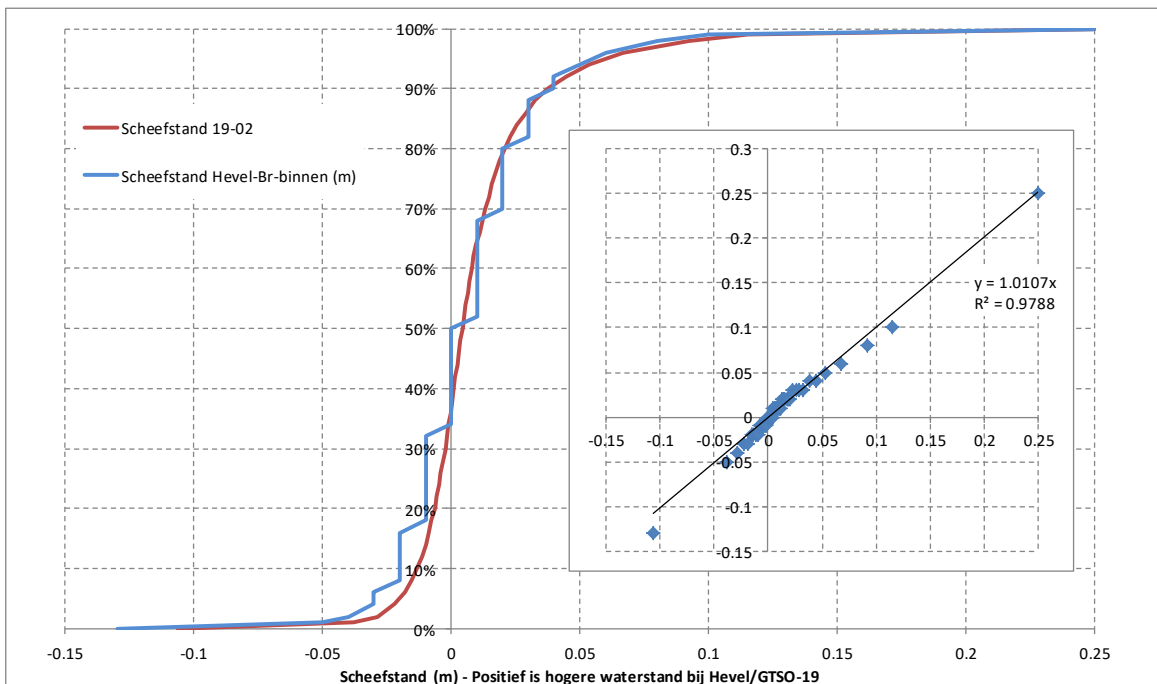
## D Vergelijking scheefstand tussen metingen en model

Het peilbeheer is een belangrijke factor voor het toekomstige Grevelingenmeer. De waterstand is onder andere van belang voor de intergetijdengebieden en de bovenwaternatuur. Windopzet speelt een belangrijke rol bij de maximale waterstand. WMR gebruikt de resultaten van het 3D model (basismodel: Delft3D-FLOW\_Grevelingenmeer\_j00+08\_v01) om ruimtelijk dekkend beeld van de waterstand(svariatie) te vertalen naar overstromingsduur van intergetijdengebieden. Een vergelijking van de gemeten waterstand met de berekende waterstand om te verifiëren dat de windopzet goed door het model gereproduceerd wordt, is nog niet eerder gedaan. Het 3D is toentertijd opgezet met een gereproduceerde peilvariatie op maandniveau.

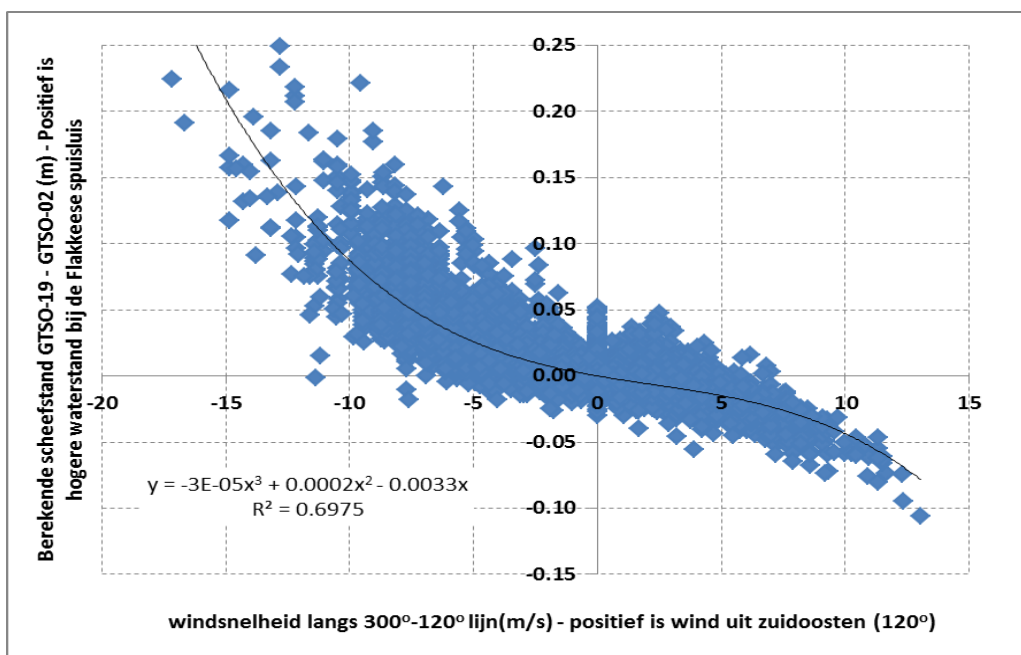
In dit memo wordt de berekende waterstand van de oorspronkelijke kalibratieberekening (code "f06m") op locaties 1) GTSO-02 (bij Brouwerssluis), 2) GTSO-13 (Dreischor) en 3) GTSO-19 (bij Flakkeese spuisluis) vergeleken met gemeten waterstand van locaties 1) Brouwerssluis binnen, 2) Bommenede en 3) Hevel. De vergelijking wordt uitgevoerd voor het jaar 2008, ofwel het jaar waarvoor het 3D model is opgezet en gekalibreerd. De modelresultaten zijn beschikbaar met de resolutie van een uur; de metingen per tien minuten. Met deze locaties kan de scheefstand over de west-oost richting worden afgeleid.

Uit een eerste analyse van de modelresultaten blijkt dat de berekende scheefstand tussen GTSO-02 en GTSO-13 en tussen GTSO-13 en GTSO-19 consistent ongeveer 50% bedraagt van de scheefstand tussen GTSO-02 en GTSO-19. GTSO-13 ligt ongeveer halverwege tussen GTSO-02 en GTSO-19. Dit houdt in dat de berekende scheefstand over het meer nagenoeg constant is. In het vervolg worden daarom alleen de resultaten gepresenteerd van de vergelijking GTSO-02-GTSO-19 en Brouwerssluis binnen-Hevel.

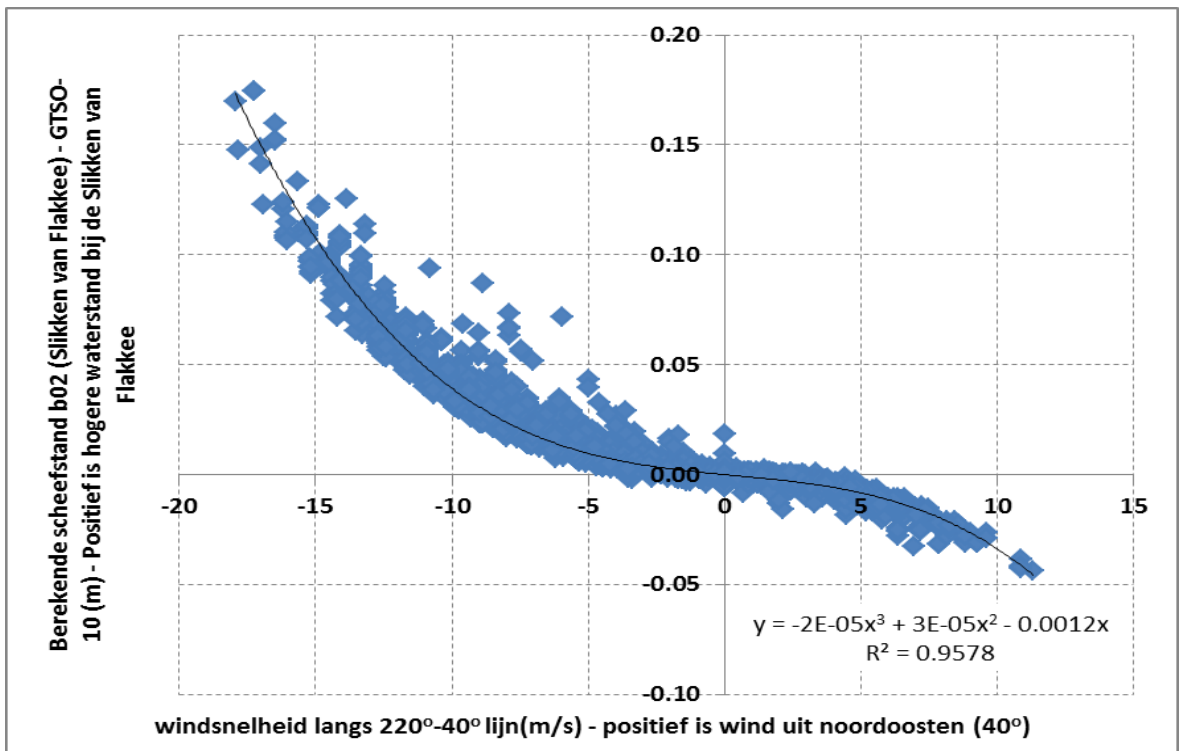
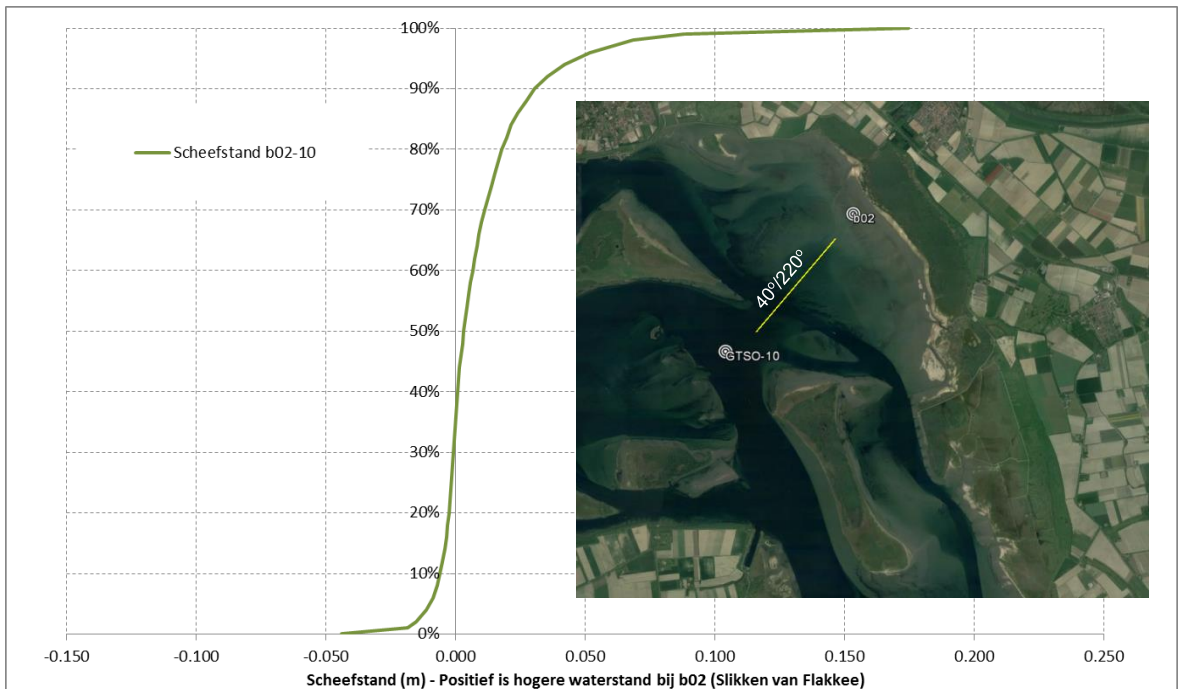
Onderstaande figuur toont de gemeten en berekende cumulatieve verdeling van de scheefstand, waarbij positieve waarden inhouden dat de waterstand in het zuidoosten bij de Flakkeese spuisluis hoger staat dan in het noordwesten bij de Brouwerssluis. De verdeling van de gemeten scheefstand laat stapjes zien, omdat de dataresolutie 1 cm is. Uit de vergelijking blijkt een zeer goede overeenkomst tussen gemeten en berekende scheefstand.



Aan het model is windsnelheid en windrichting van KNMI locatie Vlissingen opgelegd met een resolutie van een uur. Deze windgegevens worden in dit memo gebruikt voor analyse van de scheefstand. De langste strijklenge treedt op bij windrichtingen 300 °N uit het noordwesten of 120 °N uit het zuidoosten. De gemeten windsnelheid is langs deze as genormeerd, ofwel berekend is wat de windsnelheid is langs de noordwest-zuidoost lijn. Gekeken is of er een relatie is tussen windsnelheid genormeerd langs deze as en de scheefstand. Onderstaande figuur laat zien dat er een relatie is, maar dat er ook veel variatie is.



Tenslotte is gekeken naar de berekende scheefstand over de dwarsrichting zuidwest-noordoost. Dit is richting waarbij de Slikken van Flakkee met de grootste windopzet te maken hebben. Het model laat zien dat de Slikken van Flakkee in 2008 maximaal 17,5 cm windopzet heeft gehad. De relatie tussen genormeerde windsnelheid en scheefstand is in dit geval beter, omdat het een korte afstand zonder obstakels betreft.





## Cumulatieve verdeling van gemeten en berekende scheefstand voor 2008

	Berekende Scheefstand GTSO-19 - GTSO-02 (m)	Gemeten Scheefstand Brouwersluis-binnen (m)	Hevel - (m)	Berekende Scheefstand b02 (Slikken van Flakkee) - GTSO-10 (m)
0%	-0.106		-0.13	-0.044
1%	-0.038		-0.05	-0.019
2%	-0.029		-0.04	-0.015
4%	-0.022		-0.03	-0.011
6%	-0.018		-0.03	-0.009
8%	-0.016		-0.02	-0.007
10%	-0.013		-0.02	-0.006
12%	-0.012		-0.02	-0.005
14%	-0.010		-0.02	-0.004
16%	-0.009		-0.02	-0.004
18%	-0.007		-0.01	-0.003
20%	-0.006		-0.01	-0.003
22%	-0.006		-0.01	-0.002
24%	-0.005		-0.01	-0.002
26%	-0.004		-0.01	-0.001
28%	-0.003		-0.01	-0.001
30%	-0.002		-0.01	-0.001
32%	-0.002		-0.01	0.000
34%	-0.001		0	0.000
36%	0.000		0	0.000
38%	0.000		0	0.000
40%	0.001		0	0.001
42%	0.002		0	0.001
44%	0.002		0	0.002
46%	0.003		0	0.002
48%	0.004		0	0.003
50%	0.004		0	0.003
52%	0.005		0.01	0.004
54%	0.006		0.01	0.004
56%	0.007		0.01	0.005
58%	0.007		0.01	0.006
60%	0.008		0.01	0.007
62%	0.009		0.01	0.007
64%	0.010		0.01	0.008
66%	0.011		0.01	0.009
68%	0.012		0.01	0.010
70%	0.013		0.02	0.011
72%	0.015		0.02	0.012
74%	0.016		0.02	0.014
76%	0.017		0.02	0.015
78%	0.019		0.02	0.016
80%	0.021		0.02	0.018
82%	0.023		0.03	0.020
84%	0.026		0.03	0.022
86%	0.029		0.03	0.024
88%	0.033		0.03	0.027
90%	0.038		0.04	0.031
92%	0.045		0.04	0.036
94%	0.053		0.05	0.042
96%	0.067		0.06	0.052
98%	0.093		0.08	0.068
99%	0.115		0.1	0.088
100%	0.250		0.25	0.175

## **E Opzet RTC-Tools voor operationeel peilbeheer (2018)**

# Memo

**Aan**

Arno Nolte, Maaïke Maarse

**Datum**

December 2018

**Kenmerk**

Bijlage E

**Aantal pagina's**

13

**Van**

Bernhard Becker

**Doorkiesnummer**

**E-mail**

**Onderwerp**

RTC-Tools-model voor het Grevelingenmeer

**Kopie aan**

---

## 1 Aanleiding

Op dit moment wordt het peil op het Grevelingenmeer beheerd met NAP -20 cm als gemiddelde waterstand, en NAP-30 cm en NAP -10 cm als onder- en bovengrens. Uit een door Rijkswaterstaat geïnitieerd onderzoek is gebleken dat de ecologische kwaliteit in het Grevelingenmeer gebaat zou zijn door een met het getij variërende waterhoogte. Om dit te realiseren wordt een doorlaatmiddel in de Brouwersdam, die het Grevelingen in het westen naar de Noordzee begrenst, ontworpen.

Rijkswaterstaat heeft Deltares gevraagd een model te maken dat in het Grevelingenmeer de waterstandsvariatie – zowel in ruimte als in tijd – als gevolg van de operationele aansturing van de Brouwersluis, de Flakkeese spuisluis en het nieuwe doorlaatmiddel kan berekenen inclusief het effect van zeespiegelstijging. De operationele aansturing zou door het model zodanig moeten worden bepaald dat een getijdeinvloed ontstaat.

In de situatie met nieuwe doorlaat wordt het waterpeil gestuurd op 50 cm getijslag tweemaal daags en op een gemiddelde waterstand van NAP –20 cm. Daarbovenop zijn nog wensen voor seizoensvariatie, al dan niet verlaagd voor broedgebieden en/of verhoogd voor verzouten van pioniervegetatie.

De buitenwaterstand op de Noordzee en in de Oosterschelde zijn de bepalende randvoorwaarden voor het debiet door het nieuwe doorlaatmiddel en daarmee voor de waterstand in het Grevelingenmeer. Als de waterhoogte bij laagtij niet laag genoeg wordt, bijvoorbeeld in verband met stormopzet, zou het water uit het Grevelingenmeer niet meer terug kunnen stromen. Daarom is het noodzakelijk om de voorspelling van de buitenwaterstanden op de Noordzee en Oosterschelde in de sturing mee te nemen. Idealiter omvat de voorspelhorizon een hele getijcyclus.

Voor het bepalen van sturing op basis van voorspellingen is RTC-Tools ontwikkeld. RTC-Tools gebruikt de methode “model predictive control”. Model predictive control en RTC-Tools worden in de twee volgende hoofdstukken omschreven. Hierna volgt een omschrijving van het RTC-Tools-model voor het Grevelingenmeer met het nieuwe doorlaatmiddel en een analyse van de resultaten.

## 2 Model predictive control

In het algemeen onderscheiden we twee methoden voor sturing:

- Feedback control
- Model predictive control.

Feedback control is een sturing op de actuele situatie. Onder bepaalde condities worden sturingsregels uitgevoerd. Feedback control kan meestal in vorm van een beslisboom worden gestructureerd en kan met een reeks van if-then-statements worden gemodelleerd. Software-pakketten zoals SOBEK3 en D-Hydro ondersteunen feedback control.

Model Predictive Control bepaalt de sturing (control) voor een bepaalde (voorspel-)periode (prediction) onder gebruik van een model van het watersysteem (model) zodanig, dat het systeemgedrag optimaal (zo goed mogelijk) aan de gewenste doelstellingen voldoet. Model predictive control gebruikt optimalisatietechnieken om het sturingspatroon te vinden dat het beste past bij de beheersdoelen (bijvoorbeeld streefpeil, maximum debiet of minimum debiet of getijdewerking). Model Predictive Control is ontwikkeld in de economische sector voor het managen van vermogensassets. In de watersector is het nog vrij nieuw, maar wel al vaker met succes toegepast in Nederland en ook in andere landen.

Voor Model Predictive Control moet een systeemmodel (een hydraulisch model) meedraaien in de optimalisatie. Dit systeemmodel moet naast waterstanden en debieten (waarmee de sturing aan de sturingsdoelen wordt getoetst) ook afgeleiden van sturingsvariablen (bijvoorbeeld de kruinhoogte van een stuw of een pompdebiet) berekenen. De klassieke sturingsprogrammatuur zoals SOBEK of D-Hydro kan dat niet. Om dat de optimalisatie veel rekentijd vraagt, moet het systeemmodel bijzonder eenvoudig zijn.

Anders dan met feedback-control kan met model predictive control worden geanticipeerd op toekomstige gebeurtenissen (bijvoorbeeld een hogere zeewaterstand of een regenbui die in de toekomst verwacht wordt).

## 3 RTC-Tools

RTC-Tools is een door Deltares ontwikkeld Open-Source-Pakket voor modeloptimalisatie van sturing van watersystemen met behulp van model predictive control. Een RTC-Tools-model bestaat daarom uit drie lagen:

- Het watersysteemmodel. Deze laag bevat een schematisatie van het hydraulisch systeem. RTC-Tools gebruikt het Open-Source-pakket Modelica voor het watersysteemmodel. Er is een Deltares-library met objecten waarmee een watersysteemmodel kan worden opgezet. Afgeleiden worden door Modelica automatisch berekend, en daarmee is een Modelica-model geschikt om binnen een optimalisatie te worden gebruikt. Het systeemmodel kan ook zonder optimalisatie gebruikt worden.
- De optimalisatielaag. In deze laag worden de sturingsdoelen gespecificeerd, en samen met het hydraulisch model wordt een optimalisatieprobleem opgezet.

- De data laag bevat tijdsreeksen voor het watersysteemmodel, waaronder randvoorwaarden, en ook tijdsreeksen met sturingsdoelen. De modeluitvoer hoort ook bij de data laag.

RTC-Tools wordt vaak in een operationeel systeem gebruikt en dan is het RTC-Tools-model deel van een beslissondersteunend systeem. Een typische setup van zo'n operationeel systeem is als volgt:

- Een RTC-Tools-model bepaalt de sturing voor een bepaalde forecast-horizon (bijv. 48 uur). Het watersysteem is met een grove resolutie geschematiseerd.
- De sturing (het resultaat van het RTC-Tools-model, bijv. crest level over tijd) wordt vervolgens opgelegd op een SOBEK- of D-Hydro-model met een meer gedetailleerdere resolutie.
- Een Delft-FEWS-systeem zorgt ervoor dat de data klaar wordt gezet en dat de resultaten van RTC-Tools naar SOBEK/D-Hydro gaan. Resultaten worden bewerkt en zodanig aan de gebruiker gepresenteerd dat de gebruiker alle nodige informatie ter beschikking heeft om beslissingen over operationeel beheer in het watersysteem te nemen.

RTC-Tools is met de focus op robuuste optimalisatie ontworpen. Robuustheid betekent dat twee scenario's, die een vergelijkbare situatie (hydraulische randvoorwaarden) weergeven, ook vergelijkbare resultaten moeten opleveren. Juist in een operationele context is robuustheid zeer belangrijk: wordt om de twee uur een optimalisatieberekening met de dan actuele voorspelling gedaan, dan mogen twee op elkaar volgende berekeningen niet twee van elkaar totaal afwijkende sturingsadviezen geven. Robuustheid gaat echter gepaard met bepaalde wiskundige eisen voor het optimalisatieprobleem, en daarmee ook met bijzondere eisen voor het watersysteemmodel. Om te waarborgen dat het optimalisatiealgoritme altijd het globale optimum vindt en niet in een lokaal optimum blijft hangen, moet het optimalisatieprobleem convex zijn. Een convex optimalisatieprobleem kan zonder meer gerealiseerd worden als alleen lineaire vergelijkingen worden gebruikt. Echter zijn vele stromingsvergelijkingen niet-lineair, bijvoorbeeld de Saint-Venant-vergelijkingen. Ook door relaties tussen debiet en waterhoogte of waterhoogte en volume worden vaak niet-lineariteiten in het optimalisatieprobleem geïntroduceerd. Deltares heeft speciale methodes ontwikkeld (piecewise-linear en homotopy) en in RTC-Tools geïntegreerd, om ook met niet-lineaire vergelijkingen te kunnen optimaliseren. Indien mogelijk zou zo veel mogelijk met lineaire vergelijkingen moeten worden gewerkt.

Sturingsvariabelen die niet continu zijn vragen eveneens speciale technieken (zogenoemde mixed-integer-methodes). Discontinuïteiten treden bijvoorbeeld op als een pomp aan of uit gaat, of, zoals in het geval van het doorlaatmiddel, er een keuze is uit een aantal kokers (een of twee of vijf kokers, maar niet 1,3 kokers). Bij voorkeur worden continue sturingsvariabelen gebruikt. Met post-processing kunnen continue sturingsadviezen ook worden omgerekend naar discrete waarden.

## 4 RTC-Tools-model voor het Grevelingenmeer

### 4.1 Uitgangspunt: het IWP-model "Grevelingenmeer"

In het kader van het Instrument voor het waterpeilbeheer (IWP, Rijkswaterstaat) is al een RTC-Tools-model "Grevelingenmeer" ontwikkeld. Dit model is op dit moment in gebruik en heeft daarom uiteraard nog geen nieuw "doorlaatmiddel". Wel zitten de Flakkeese Sluis en de Brouwerssluis in het

model, en ook het Grevelingenmeer zelf. Dit model is als uitgangspunt gebruikt voor de onderhavige studie.

## 4.2 De hydraulische laag: het watersysteemmodel (Modelica)

Figuur 1 geeft de schematisatie van het model “Grevelingenmeer met doorlaatmiddel” weer. Als centraal element is de knoop te zien die het Grevelingenmeer voorstelt. Achter deze knoop zit een eenvoudige storage-vergelijking (bakjesmodel):

$$\frac{\partial V}{\partial t} = V_{\text{in}} - V_{\text{out}} \quad (1)$$

In deze vergelijking staat  $V$  voor het volume in het Grevelingenmeer, en  $V_{\text{in}} - V_{\text{out}}$  is de balans voor het in- en uitstromend volume.

De knoop “Grevelingenmeer” is verbonden aan twee knopen van type “Node”, en deze knopen verzamelen telkens de instromende en de uitstromende debieten. Er is een netto-instroom direct naar het Grevelingenmeer voor neerslag en verdamping.

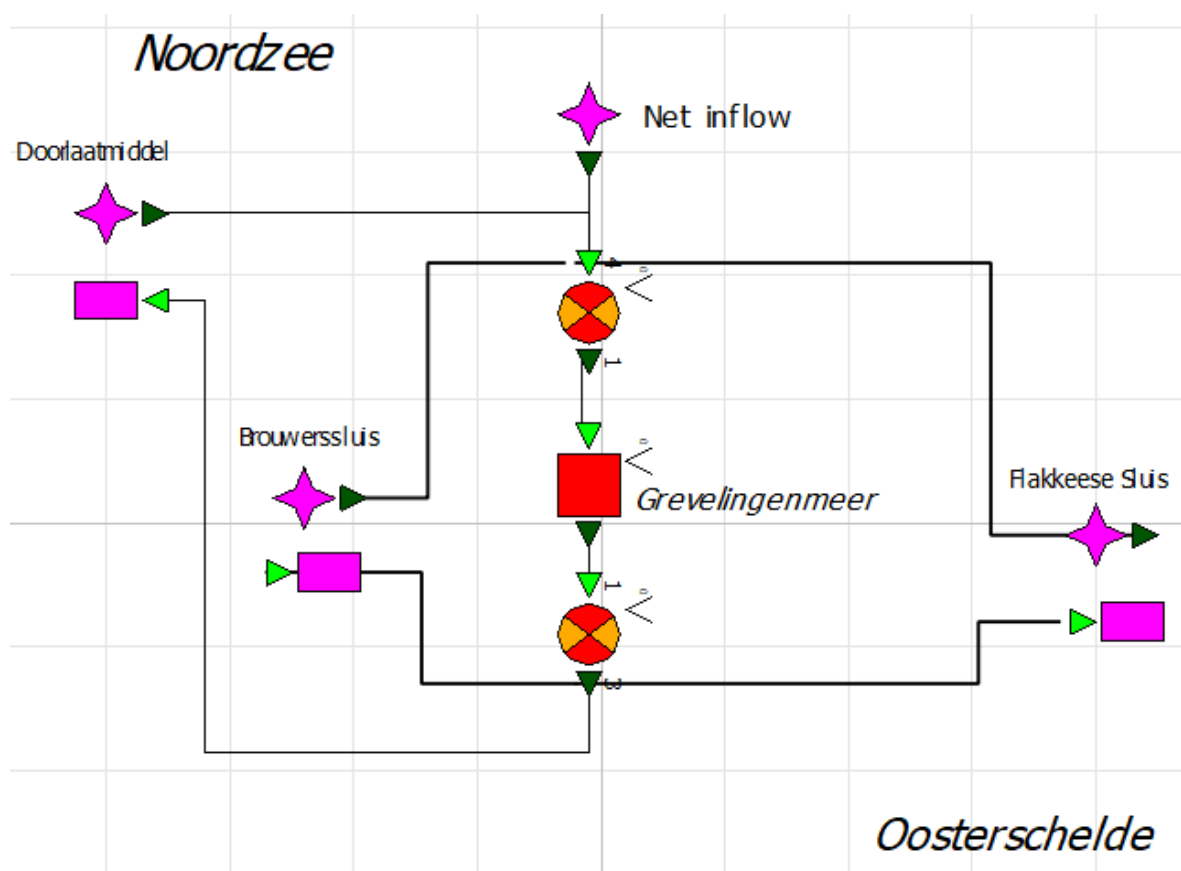
De drie kunstwerken Flakkeese Sluis, Brouwerssluis en het doorlaatmiddel hebben in deze schematisatie telkens twee debieten (een voor instroom en een voor uitstroom) die met een randvoorwaarde-knoop voor instroom en uitstroom corresponderen. De kunstwerken zelf zijn niet geschematiseerd. Dit is dan ook een wezenlijk verschil ten opzichte van een simulatiemodel, waar deze kunstwerken met een doorlaatformule zouden worden gerepresenteerd. De doorlaatformule wordt wel gebruikt, maar dan in de optimalisatielaag als constraint (randvoorwaarde voor het optimalisatieprobleem).

## 4.3 De optimalisatielaag: sturingsdoeleinden en het optimalisatieprobleem

Doelen zijn gesorteerd naar prioriteiten. Voor elke prioriteit wordt een optimalisatieprobleem opgelost, waarbij de vorige optimalisatie de beperkingen levert voor de volgende. Daardoor wordt de situatie in het watersysteem voor een doel dat gehaald is niet meer verslechterd. Voor het model Grevelingen zijn de volgende doelen gebruikt:

- 1 Fysische randvoorwaarden
  - Minimaal en maximaal volume in het Grevelingenmeer
  - Capaciteit van de doorlaatmiddelen, onderverdeeld in
    - instroom
    - uitstroom
- 2 Waterstanden in het Grevelingenmeer, opgegeven als volume
  - Minimum: -0.50 m
  - Maximum: 0 m NAP
- 3 Maximalisatie van het debiet in het doorlaatmiddel
- 4 Maximalisatie van het debiet in de Brouwerssluis en de Flakkeese Sluis.

De fysische randvoorwaarden hebben de hoogste prioriteit. Deze kunnen niet worden overschreden. Laten de omstandigheden het niet toe dat het systeem binnen de fysische grenzen blijft, is



Figuur 1: Schematisatie in Modelica als schermfoto van de OpenModelica Editor

het probleem niet oplosbaar (infeasible). Maximale en minimale waterstanden hebben een hogere prioriteit ten opzichte van de getijslag, omdat het hier over waterveiligheid gaat. Onder bepaalde omstandigheden is het niet mogelijk binnen het bereik van minimale en maximale waterstand te blijven.

Maximalisatie van het debiet in de drie kunstwerken 'Doorlaatmiddel', 'Brouwerssluis' en 'Flakkeese Sluis' is de gekozen aanpak om de maximale getijslag te realiseren. De maximale en de minimale waterstand beperken deze debietmaximalisatie.

Op de debieten  $Q$  door het doorlaatmiddel, de Brouwerssluis en de Flakkeese Sluis ligt een inlaatduiker-formule als optimalisatie-randvoorwaarde (constraint):

$$Q = n \cdot \mu \cdot A \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (2)$$

In deze vergelijking staat  $n$  voor het aantal kokers,  $\mu$  voor een doorlaatcoëfficiënt,  $A$  voor het doorstroomde dwarsdoorsnedeoppervlakt en  $\Delta h$  voor het waterstandsverschil tussen beide kanten van de koker.

Deze constraint waarborgt dat het debiet ook fysisch mogelijk is aangezien het waterstandsverschil tussen het Grevelingenmeer en de buitenwaterstand. Vergelijking (2) is een gebruikelijke formule voor een inlaatduiker onder water (gate flow) (hier geciteerd naar [Bollich, 2000](#), Vergelijking 8.27).

Zo veel mogelijk worden optimalisatie-doelen niet op waterstand, maar als functie van volumes of debiet gespecificeerd. Op deze manier is het makkelijker om aan de wiskundige eisen (convex optimalisatieprobleem) te voldoen. Wiskundige eisen zijn ook de reden waarom de vergelijking voor de kunstwerken als constraint in de optimalisatielaag zijn geïntroduceerd en niet als een kunstwerk-knoop onderdeel van de modelschematisatie, zoals dit gebruikelijk is in simulatiemodellen zoals bijvoorbeeld *SOBEK*-modellen.

In de inlaatformule, die als constraint voor de debieten is gebruikt, wordt de waterhoogte in het Grevelingenmeer gebruikt om het waterstandsverschil te berekenen. Het is daarom niet mogelijk, deze conditie alleen als functie van volume en debiet te formuleren. Als relatie tussen het volume in het Grevelingenmeer  $V$  en de waterhoogte in het Grevelingenmeer  $h_{GM}$  is de volgende lineaire functie geïntroduceerd:

$$V = a \cdot h_{GM} + b \quad (3)$$

In deze formule is  $a = 108\,000\,000$  en  $b = 5 \cdot a$ . De parameter  $a$  staat voor een oppervlakte van 10 800 ha in het Grevelingenmeer bij een waterhoogte van -0.2 m NAP.

## 4.4 Post-processing

Het model berekent voor de kunstwerken (doorlaatmiddel, Brouwerssluis en Flakkeese sluis) telkens een continu debiet over tijd. In een operationeel systeem is dit het debiet dat door het optimalisatiemodel wordt geadviseerd aan de beheerder. Daarom wordt dit debiet ook geadviseerd debiet of  $Q_{advies}$  genoemd.

Het aantal kokers over tijd wordt in een post-processing-stap bepaald. In een eerste stap wordt de simulatieperiode verdeeld in zogeheten sign-periods. Dit zijn periodes waar het geadviseerd debiet hetzelfde teken heeft. De indeling in sign-periods is nodig omdat het wenselijk is om de klepstand



of schuifstand van kunstwerken alleen te veranderen als het verhang klein is. Voor een sign-period is het aantal kokers constant.

Het maximaal debiet ( $Q_{\max}$ ) is het debiet dat met het hoogteverschil en de afmetingen van het kunstwerk kan worden bereikt, of, anders uitgedrukt, de capaciteit van het kunstwerk op een bepaald tijdstip.

$Q_{\text{advies}}$  en  $Q_{\max}$  worden nu voor elke sign-period gesommeerd naar  $Q_{\text{advies,cum}}$  en  $Q_{\max,cum}$ . Het geadviseerd cumulatief debiet gedeeld door het cumulatief maximaal debiet is de debietfractie  $Q_{\text{frac}}$ .

$$Q_{\text{frac}} = \frac{Q_{\text{advies,cum}}}{Q_{\max,cum}} \quad (4)$$

Het geadviseerd aantal kokers voor een sign-period  $n_{\text{advies}}$  is dan

$$n_{\text{advies}} = Q_{\text{frac}} \cdot n \quad (5)$$

$n_{\text{advies}}$  wordt afgerond op gehele getallen.

## 5 Data

Meetgegevens uit het jaar 2009 voor de locaties 'Brouwershavensche Gat 08' en 'Krammersluizen West', respectievelijk voor de Noordzee end de Oosterschelde zijn als randvoorwaarde gebruikt. De meetgegevens zijn waterhoogte ten opzichte van Normaal Amsterdams Peil (NAP) in cm op een resolutie van 10 minuten.

Het doorgerekend scenario betreft de periode van 17 tot 22 januari 2009, waarvoor de instantane uurwaardes (selectie van de waardes voor het volle uur) verhoogd zijn met 20 cm.

Het aantal kokers in het doorlaatmiddel  $n$  is 12, het doorstroomde oppervlak in een koker is  $64 \text{ m}^2$ .

De netto-instroom naar het Grevelingenmeer is 0.

### 5.1 Hulpprogrammatuur

Omdat de meetdata in CSV-format beschikbaar is en het RTC-Tools-model met XML-bestanden werkt, is in het kader van dit project een Python-script ontwikkeld dat uit CSV-bestanden de passende XML-uitvoer samenstelt. De tool kan ook algemeen worden ingezet voor andere RTC-Tools-projecten waar het dataformat XML is.

## 6 Resultaten

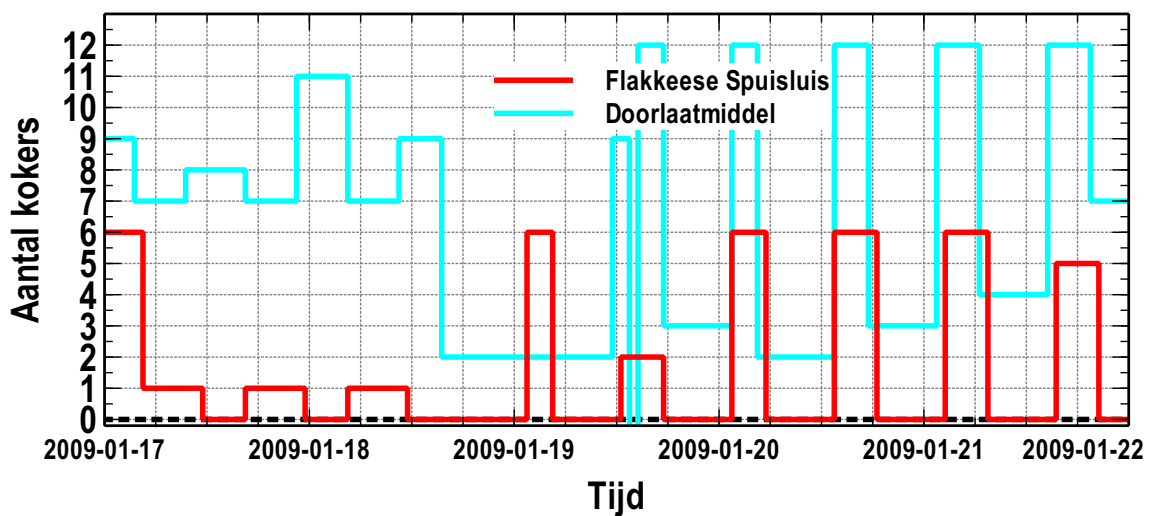
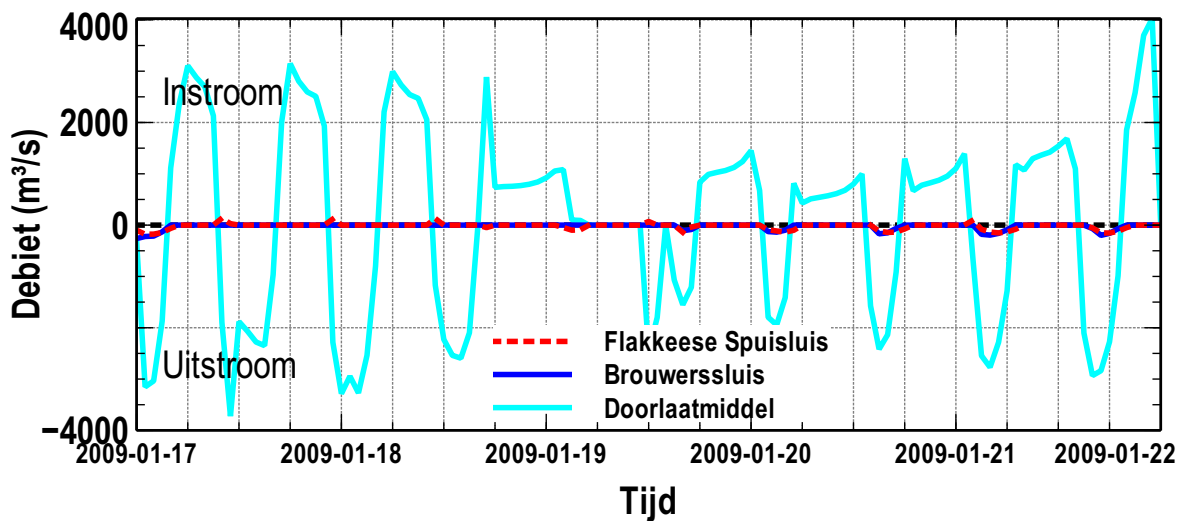
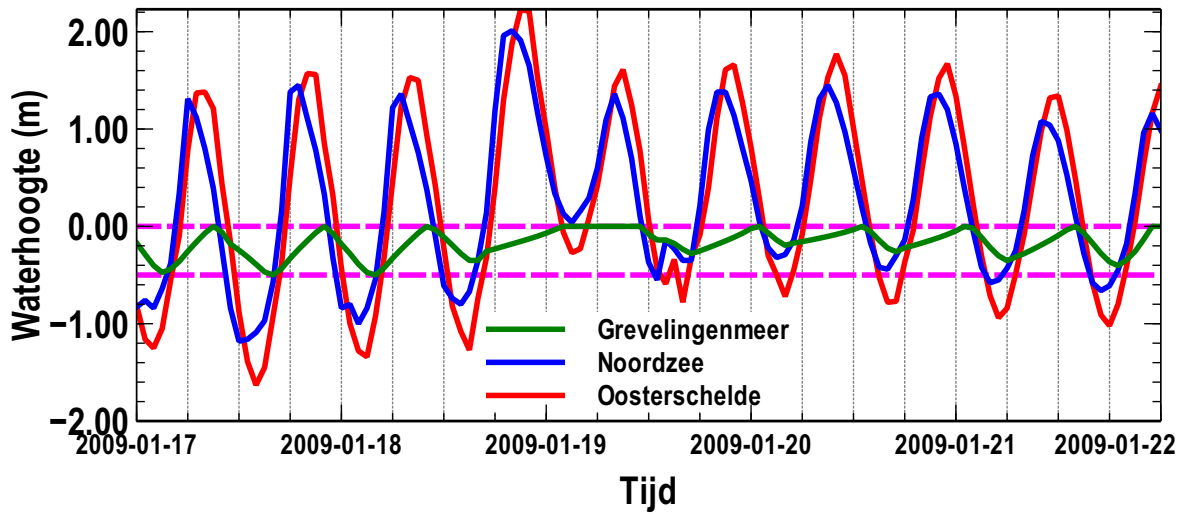
Rekenresultaten voor het in hoofdstuk 5 aangegeven scenario zijn in Figuur 2 getoond. De bovenste figuur bevat de waterhoogte-randvoorwaarde in de Noordzee en de Oosterschelde en de door het

model berekende waterhoogte in het Grevelingenmeer. In paarse kleur zijn de waterstandsgrenzen toegevoegd. De waterstand in het Grevelingenmeer beweegt binnen deze grenzen. In de eerste fase van de simulatieperiode tot ongeveer 18 januari 2009, 12:00 uur wordt het bereik tussen minimale en maximale waterstand nog volledig gebruikt. Dit is vanaf 19 januari niet meer mogelijk, omdat de zeewaterstand niet meer laag genoeg zakt om het water uit het Grevelingenmeer in vrij verval te lozen. De waterstand over tijd in het Grevelingenmeer laat een getijslag zien zoals gewenst.

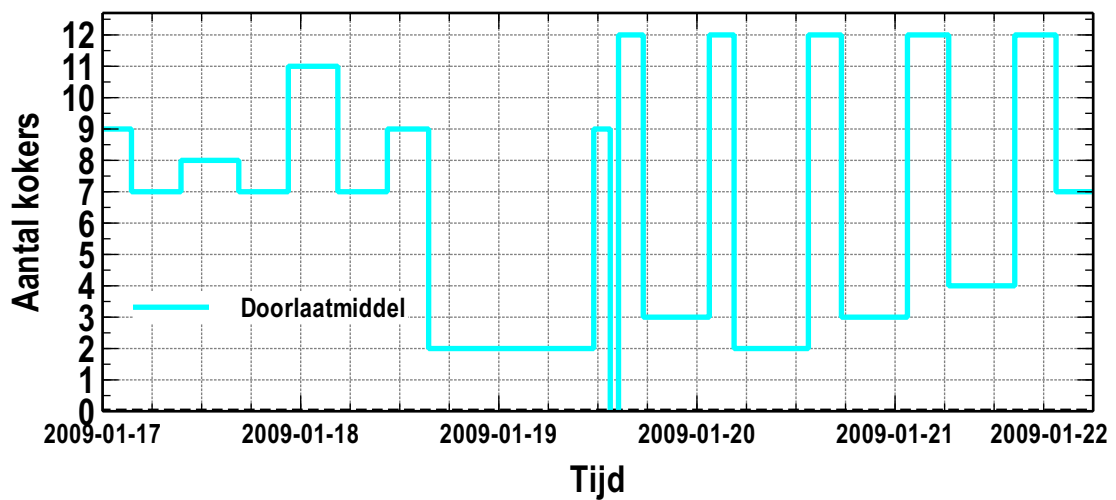
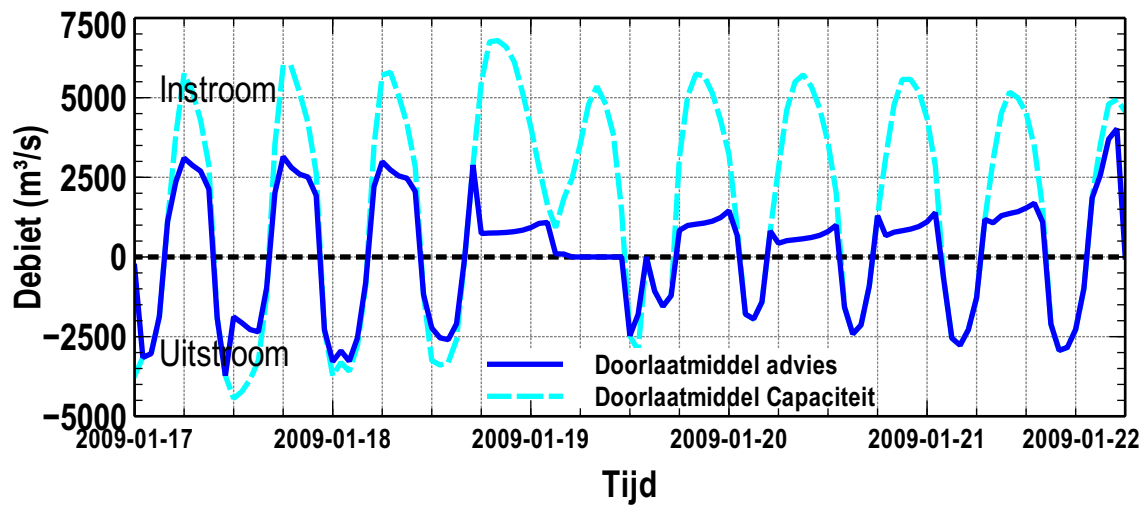
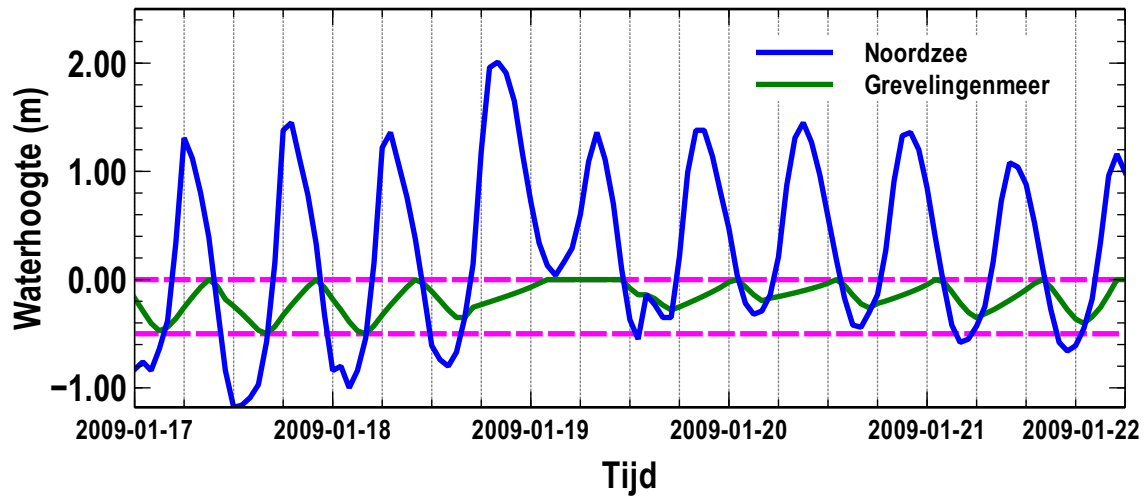
De middelste figuur laat de debieten per kunstwerk (gepland doorlaatmiddel, bestaande sluisen Brouwerssluis en Flakkeese Sluis) zien. Het grootste aandeel in het totaal debiet heeft het geplande doorlaatmiddel. Het debiet door de Flakkeese Sluis levert maar een kleine bijdrage, maar met de Flakkeese Sluis wordt gebruik gemaakt van het feit dat de piek en het dal in de Oosterschelde ten opzichte van de Noordzee verschoven zijn. De Brouwerssluis levert geen bijdrage, omdat het debiet volledig door het doorlaatmiddel stroomt en de capaciteit van de Brouwerssluis ten opzichte van het doorlaatmiddel in verhouding zeer klein is.

De derde grafiek toont het aantal kokers over tijd. Het maximaal aantal kokers in het doorlaatmiddel van 12 wordt bereikt in de laatste fase van de simulatieperiode waar de waterstanden in de zee hoog staan en daarom het hoogteverschil klein is. Ook voor de Flakkeese Sluis wordt in deze fase de capaciteit volledig gebruikt. Het aantal kokers verandert alleen als de debietkromme de nul-lijn kruist.

In Figuur 3 zijn alleen resultaten voor het doorlaatmiddel getoond, en in de onderste figuur is naast het geadviseerd debiet ook het maximaal debiet (de capaciteit) opgenomen. Met deze grafiek kan de post-processing-stap voor het geplande doorlaatmiddel worden achterhaald.



Figuur 2: Rekenresultaten van het RTC-Tools-model Grevelingenmeer



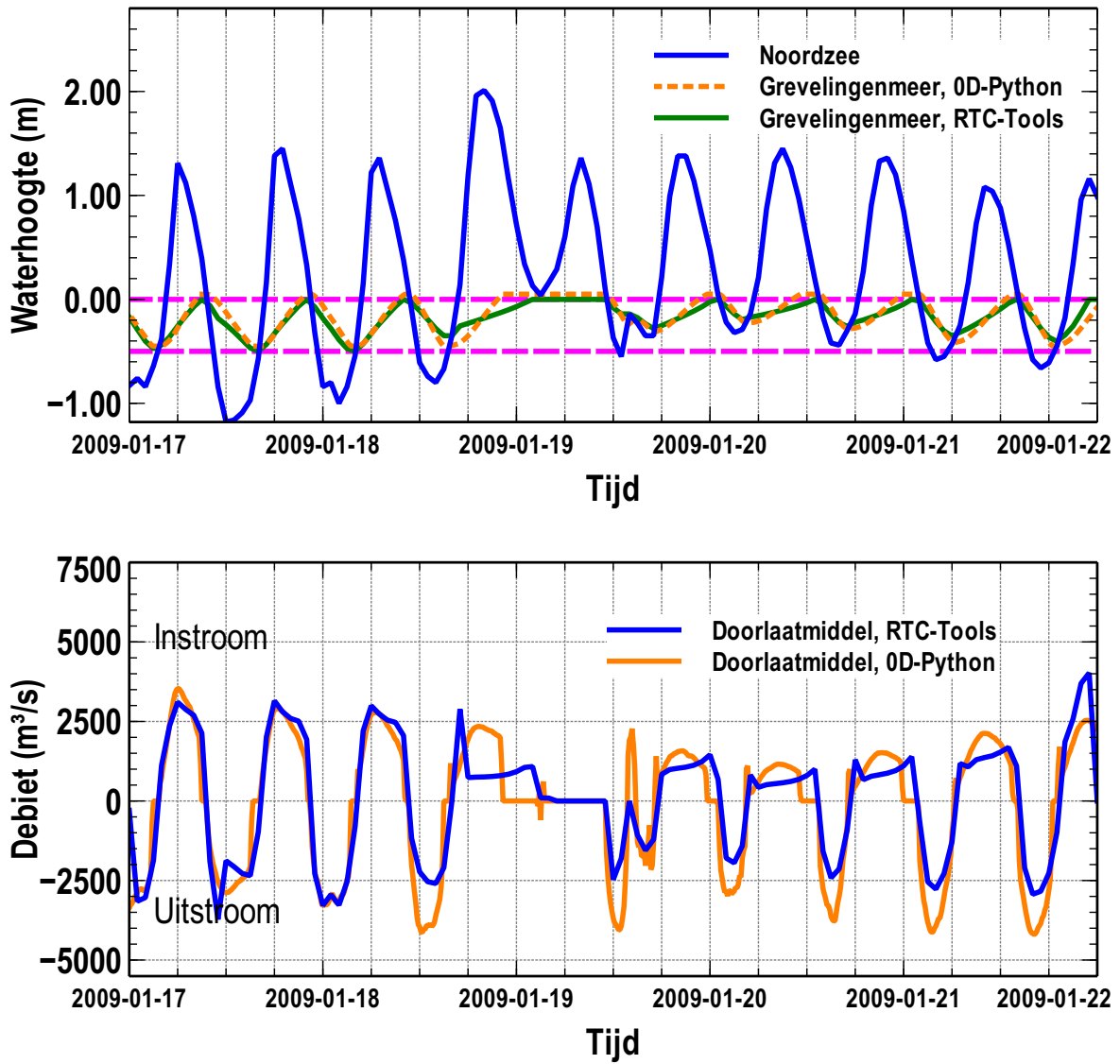
Figuur 3: Resultaten voor het geplande doorlaatmiddel (RTC-Tools-model Grevelingen)

## 7 Vergelijking met het 0D-Python-model

Voor de strategische planning is een Python-model gemaakt (Kleissen, 2018). Dit model is in hydraulisch opzicht vergelijkbaar met het RTC-Tools-model Grevelingen. De sturing is echter niet door middel van optimalisatie bepaald, maar met een heuristisch algoritme op tijdstapbasis.

De vergelijking van de met RTC-Tools berekende resultaten met resultaten van het 0D-Python-model (Fig. 4) voor het scenario januari 2009 + 20 cm laat zien dat de debieten en waterstanden kwalitatief overeen komen. Verschillen zijn met name te verklaren door de twee verschillende algoritmes die zijn gebruikt in de twee modellen. Verder is in het 0D-Python-model een andere relatie gebruikt om het volume in het Grevelingenmeer aan waterhoogtes te koppelen, en het 0D-model werkt met tijdstappen van tien minuten op een fijnere tijdsresolutie.

De optimalisatie met RTC-Tools vraagt veel meer rekentijd, voor het scenario januari 2009 is een rekentijd van ca. 45 min nodig. Voor een operationele inzet kan de rekentijd door verschillende maatregelen worden gereduceerd, dit is ook voor het IWP-model gedaan. De snelheid van de berekening is de grote kracht van het 0D-Python-model. Met het 0D-Python-model kan een heel jaar worden doorgerekend. Het voordeel van het RTC-Tools-model daarentegen is dat de hele simulatieperiode (hier: 5 dagen) wordt meegenomen in de optimalisatie. Daardoor is het mogelijk, op een toekomstig gebeurtenis zoals een hoge zeewaterstand gedurende laagtij te anticiperen, een voordeel dat vooral in een operationele context belangrijk is.



Figuur 4: Vergelijking RTC-Tools-model met 0D-Python voor waterstanden en debieten

**Datum**  
December 2018

**Kenmerk**  
Bijlage E

**Pagina**  
13/13

## **8 References**

Bollrich 2000

Bollrich, G.: *Technische Hydromechanik*. Bd. 1. 5. Aufl. Berlin : Verlag Bauwesen, 2000. – ISBN 3-345-00744-4

Kleissen 2018

Kleissen, Frank: *Grevelingen doorlaatmiddel model en runs* / Deltares. Delft, November 2018 (2.0). – Memo. – 12 S.

## F Vervolg ontwikkeling RTC-tools voor operationeel peilbeheer (2019)

### F.1 Ontwikkeling in het RTC-Tools-model voor het Grevelingenmeer met doorlaatmiddel

In de MIRT2 verkenningfase wordt een RTC-Tools-model getest met als doel al in een vroeg stadium zicht te hebben op een modelinstrumentarium te hebben dat op termijn operationeel kan worden ingezet in het kader van het “Instrument voor het waterpeilbeheer” IWP. Het RTC-Tools-model baseert zich op het IWP-model dat momenteel operationeel in gebruik is. Het IWP-model is in een eerdere fase van dit project uitgebreid met het nog te bouwen doorlaatmiddel naar het RTC-Tools-model voor het Grevelingenmeer met doorlaatmiddel (zie Bijlage E).

In deze fase zijn de volgende aanpassingen aan het RTC-Tools-model uitgevoerd:

- Data van 2008 zijn als invoerdata voor het model beschikbaar gesteld. Hiervoor werden aan het OD-model kleine aanpassingen voor pre-processing doorgevoerd.
- Aan het model is een correctie voor de scheefstand van het waterpeil in het Grevelingenmeer door windopzet toegevoegd (scheefstandcorrectie).
- De peilgrens voor maximale waterhoogte is gecorrigeerd.

Daarmee sluit het RTC-Tools-model voor deze onderwerpen aan bij het OD-optimalisatiemodel. Op de volgende onderdelen verschilt het RTC-Tools-model nog van het OD-model:

- Afvoerformules voor pompen
- Afvoerformules voor turbines

Voor de optimalisatie is het belangrijk dat alle gebruikte formules samen een zogeheten convex optimalisatieprobleem vormen. Met lineaire vergelijkingen is dit zonder meer mogelijk, de te gebruiken afvoerformules voor pompen en turbines bevatten echter termen met een kubische wortel en deze formules zijn dus niet lineair. Deze formules kunnen daarom niet zonder meer in het model geïntegreerd worden. Hiervoor is nader onderzoek noodzakelijk.

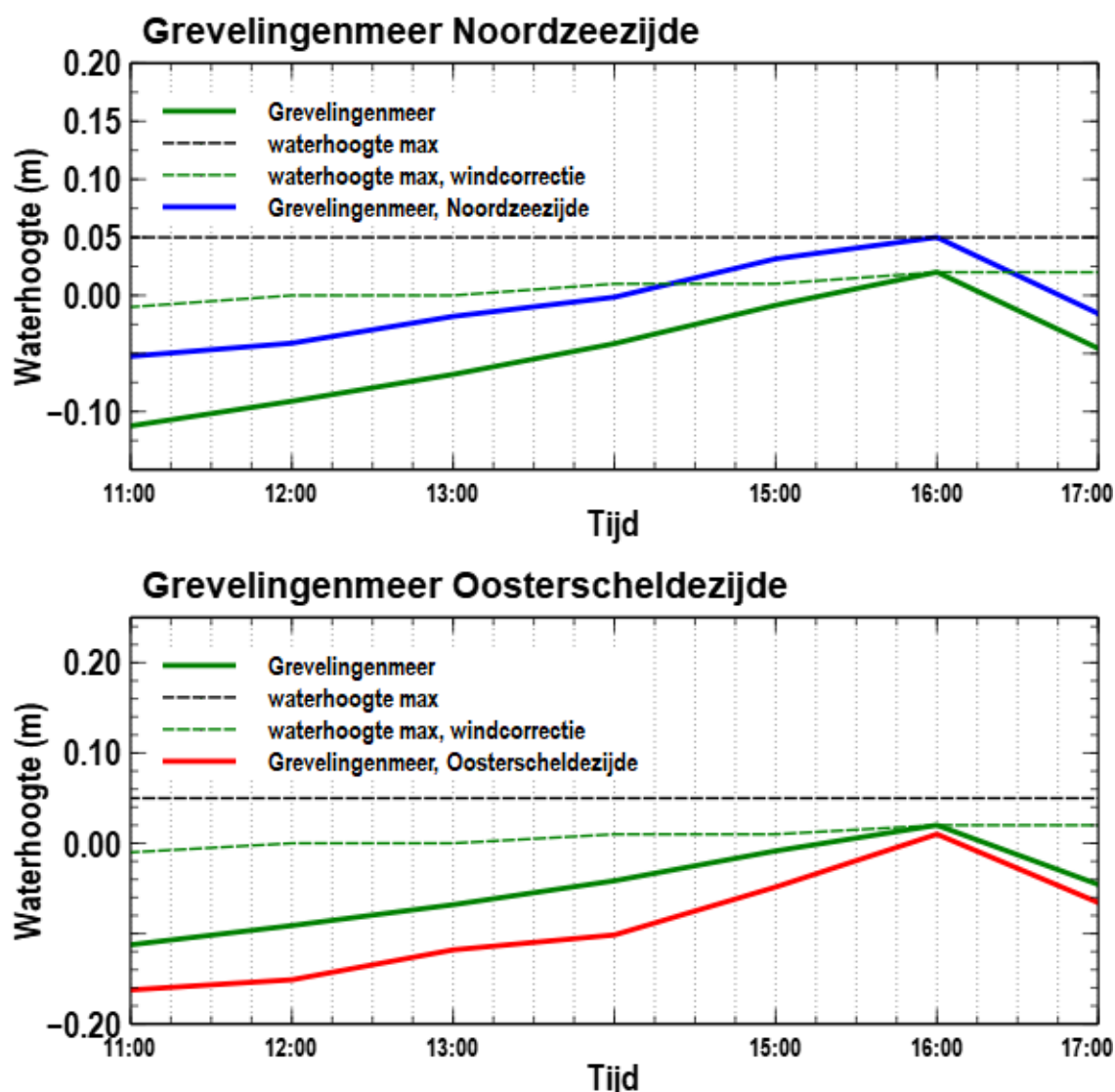
Een korte afstemming met het IWP-team bij Deltares (Olav van Duin, Maarten Smoorenburg) heeft plaatsgevonden. Op dit moment wordt het niet noodzakelijk geacht om de boven genoemde aanpassingen terug te koppelen naar het IWP-model. Wel is er interesse om een scheefstandcorrectie voor windopzet aan het IWP-model toe te voegen. De scheefstandscorrectie van het RTC-Tools-model Grevelingenmeer met doorlaatmiddel zou mogelijk kunnen worden over genomen. Aandachtspunt hierbij is echter de beschikbaarheid van de correctiewaarden voor de voorspelhorizon.

### F.2 Werkwijze van de correctie voor de scheefstand van het waterpeil in het Grevelingenmeer door windopzet (scheefstandcorrectie)

Het Grevelingenmeer is in het RTC-Tools-model als een OD-element gemodelleerd (“bakjesmodel”). De scheefstandcorrectie is in het model daarom door een correctie van de maximale waarde voor de gemiddelde waterhoogte in het Grevelingenmeer gerealiseerd. De correctiewaarde is voor het hier gebruikte historische scenario bekend uit waterhoogtemetingen. Voor de operationele toepassing zou de correctiewaarde uit windvoorspelling moeten worden afgeleid. Figuur F.1 toont resultaten van het RTC-Tools-model onder gebruik van scheefstandcorrectie. De maximale waterhoogte is NAP 0.05 m .



Deze wordt intern naar een maximale waterhoogte (groene stippellijn) gecorrigeerd door van de maximale waterhoogte de maatgevende correctiewaarde die voor het betreffend tijdstip geldig is af te trekken. Voor het Grevelingenmeer is er een correctiewaarde voor de Noordzee en een voor de Oosterschelde bepaald, en maatgevend is de grotere van beide correctiewaarden. RTC-Tools berekent de sturing nu zodanig dat deze maximale waterhoogte met scheefstandcorrectie voor het Grevelingenmeer niet wordt overschreden. Aan de Noordzeezijde bereikt het water in het Grevelingmeer nu door de scheefstand (Figuur F.1 boven, blauwe lijn) net de maximale waterhoogte van NAP 0.05 m. De maximale waterhoogte met scheefstandcorrectie, waarmee RTC-Tools rekt, is voor 16:00 uur NAP 0.02 m (groene stippenlijn). RTC-Tools berekent de sturing voor het Grevelingenmeer zodanig dat het gemiddeld Grevelingenmeerpeil (groene doorgetrokken lijn) deze maximale waterhoogte met scheefstandcorrectie niet overschrijdt. De waterhoogte aan de Oosterscheldezijde (Figuur F.1 beneden, rode lijn) ligt onder het gemiddelde Grevelingenmeerpeil (groene doorgetrokken lijn), in dit voorbeeld is de Oosterscheldezijde dus niet maatgevend. De waterhoogte aan de Noordzeezijde (blauwe lijn in het bovenste diagram) en de Oosterscheldezijde (beneden, rode lijn) van het Grevelingenmeer zijn eveneens met behulp van scheefstandcorrectiewaardes op basis van de door RTC-Tools berekende waterhoogte voor het Grevelingenmeer (groene doorgetrokken lijn) berekend. De groene doorgetrokken lijn representeert dus bij wijze van spreken de waterhoogte in het Grevelingenmeer zonder scheefstandcorrectie.



Figuur F.1 Waterhoogte voor Noordzeezijde en Oosterscheldezijde en Grevelingenmeerpeil berekend met RTC-Tools, rekening houdend met windcorrectie.

### F.3 Conclusies en vooruitzichten

Het RTC-Tools-model "Grevelingenmeer" sluit qua modelobjecten aan bij het OD-model met uitzondering van de turbines en pompen. Daarmee is een model beschikbaar dat in principe operationeel gebruikt kan worden om het nog te bouwen doorlaatmiddel en de andere sluisen aan te sturen. Te nemende stappen zijn dan nog, indien van toepassing, de integratie van de formules voor turbines en pompen voor het doorlaatmiddel.

Als onderdeel van een operationeel systeem (het instrument voor waterpeilbeheer IWP) zou het model dan automatisch met modelrandvoorwaarden voor hydrologie en zeewaterstand die afgeleid zijn van voorspellingen, worden voorzien en automatisch rekenen. Het RTC-Tools-model geeft een advies uit over het optimaal gebruik van middelen (sluisen en kokers) dat dan na acceptatie door de beheerder kan worden toegepast om de kunstwerken (doorlaatmiddel en de sluisen) aan te sturen. Via het operationeel systeem kan de beheerder aangeven of, en

indien ja, hoe veel kokers in onderhoud zijn en daarom niet kunnen worden gebruikt, zodat het model daarmee rekening houdt.

Zoals boven genoemd wordt nu al een RTC-Tools-model voor het Grevelingenmeer operationeel toegepast. De ervaringen uit deze toepassing zouden worden meegenomen in de doorontwikkeling van het model.

Ten opzichte van het 0D-model biedt het RTC-Tools-model een aantal mogelijkheden om het operationeel waterbeheer op ecologische aspecten te ondersteunen en ook de onzekerheden van weersverwachtingen in kaart brengen:

- Meer flexibiliteit om verschillende sturingsdoeleinden operationeel te realiseren, bijvoorbeeld
  - minimalisatie van de tijd om het meer te vullen
  - een bepaalde flow peak te realiseren
  - maximale opening van de doorlaatmiddelen om vismigratie of passage van zoogdieren te faciliteren
  - maximalisatie van energieopwekking (na integratie van pompen en turbines in het model).
- Gebruik van ensembles. Het KNMI stelt ensembles van weersverwachtingen beschikbaar, waarvan voorspellingen voor de hydrologische situatie en de zeespiegel kunnen worden afgeleid. Elk ensemble member is een mogelijk toekomstscenario, en alle ensemble members hebben de zelfde kans van optreden. Door gebruik van ensembles kan de onzekerheid van de toekomst in kaart worden gebracht. RTC-Tools biedt twee methodes waarmee uit een ensemble adviezen voor het beheer van een watersysteem kunnen worden afgeleid:
  - Integrale optimalisatie: een sturingspatroon dat zo goed mogelijk op alle mogelijke scenario's aansluit. Zo'n sturingspatroon dat voor alle scenario's werkt is vaak zeer conservatief, omdat uitschieters het sturingspatroon een bepaalde kant op kunnen duwen.
  - Tree-based optimization: vergelijkbare ensemble members worden gegroepeerd, en zodra de scenario's op een bepaalde manier van elkaar afwijken wordt het sturingspatroon opgesplitst. Uitschieters krijgen zo minder invloed op het sturingspatroon. De beheerder krijgt niet een sturingspatroon, maar een beslisboom met de tijdstippen waar in de toekomst een beslissing over de sturing moet worden genomen.
  - Los van het gebruik van ensemble-technieken is het herhalen van modelberekeningen een belangrijk onderdeel van operationeel omgaan met de onzekerheden van de voorspelling (moving horizon technique). Bij voorkeur gebeurt dit zodra een nieuwe voorspelling beschikbaar is. Deze stap is al genomen door gebruik van het RTC-Tools-model in het operationeel systeem IWP.

Voor de doorontwikkeling van het model zijn er volgende suggesties:

- Toepassen van linearisaties om het model sneller te maken. Op dit gebied zijn recent ervaringen met het RTC-Tools-model voor het Volkerak-Zoommeer opgedaan.
- Uitbreiden van het model voor pompen en turbines in doorlaatmiddelen, zodat de hydraulische weerstand van deze objecten realistisch wordt meegenomen in de berekening. Bij deze uitbreiding dient met de eisen voor convexe optimalisatie rekening te worden gehouden.

- Ervaring opdoen met verschillende sturingsdoeleinden. Om het waterbeheer optimaal in te richten moeten de eisen voor het waterbeheer naar sturingsdoeleinden worden vertaald in het RTC-Tools-model. Het is zinvol om te verkennen hoe eisen voor waterbeheer als sturingsdoeleinden kunnen worden geïntegreerd in het RTC-Tools-model, en te controleren of de resultaten aansluiten bij de verwachtingen.

Verkennen van het samenspel van RTC-Tools met andere modellen zoals een D-HYDRO-model voor 3D-stroming met zoutbeweging. Dit zou bijvoorbeeld in een standalone-Delft-FEWS-applicatie kunnen worden gedaan. De door het RTC-Tools-model bepaalde sturing zou voor een model met meer detailniveau, dat zelf geen optimalisatie uitvoert, opgelegd kunnen worden, om het effect van deze sturing op het Grevelingenmeer in meer detail in kaart te brengen.