

Klimaatrobustheid van het waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer



Klimaatrobustheid van het waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer

Auteur(s)

Arno Nolte

Marc Weeber

David Geurts

Sonja Pans

Diederik Vreeken

Otto Weiler

Klimaatrobustheid van het waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer

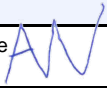


Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer H. Haas (RWS WVL) de heer W. Oorthuysen (RWS Zee en Delta)
Referenties	Onderdeel van het KPP-project Beleidsondersteunend Advies Zuidwestelijke Delta
Trefwoorden	Volkerak-Zoommeer, klimaatverandering, zeespiegelstijging, waterbeheer, zoetwatervoorziening, gebruiksfuncties

Documentgegevens

Versie	0.4
Datum	08-07-2020
Projectnummer	11203741-001
Document ID	11203741-001-ZKS-0005
Pagina's	58
Status	definitief

Auteur(s)

	Arno Nolte	
	Marc Weeber	
	David Geurts	
	Sonja Pans	
	Diederik Vreeken	
	Otto Weiler	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.4 (definitief)	Arno Nolte 	Maaïke Maarse 	Toon Segeren 	
	Marc Weeber			
	David Geurts			
	Sonja Pans			
	Diederik Vreeken			
	Otto Weiler			

Samenvatting

Door klimaatverandering zal de zeespiegel stijgen, de luchttemperatuur toenemen en de neerslag en rivierafvoer wijzigen. Klimaatverandering roept de vraag op hoe “klimaatrobuust” het Volkerak-Zoommeer is. Met klimaatrobuust wordt bedoeld tot welke mate van klimaatverandering de beheerdoelen en/of gebruiksfuncties van het Volkerak-Zoommeer gehandhaafd kunnen blijven. De beheerdoelen zijn waterveiligheid, waterbeheer (waterpeil en chlorideconcentratie), waterkwaliteit (KRW) en natuur (Natura2000, concept aanwijzingsbesluit). Gebruiksfuncties zijn scheepvaart, landbouw, recreatie (zwemmen, recreatievaart, overig), beroepsvisserij, sportvisserij en leefomgeving.

In dit onderzoek is de klimaatrobuustheid van het Volkerak-Zoommeer voor het regulier peilbeheer en de zoetwatervoorziening kwantitatief onderzocht. De overige beheerdoelen en gebruiksfuncties zijn kwalitatief beoordeeld op klimaatrobuustheid. De kwantitatieve analyse maakt gebruik van een model dat de water- en chloridebalans van het Volkerak-Zoommeer doorrekent op basis van aannames voor de in- en uitgaande debieten en bijbehorende chlorideconcentratie en een aantal zoutvrachten.

Op de vraagstelling “Hoe lang kunnen de gebruiksfuncties van het Volkerak-Zoommeer met het huidige waterbeheer gehandhaafd blijven onder invloed van klimaatverandering?” geeft dit rapport als antwoord dat het regulier peilbeheer en de zoetwatervoorziening van het Volkerak-Zoommeer klimaatrobuust zijn tot 1 m zeespiegelstijging (dat wil zeggen tot na 2100 volgens de klimaatscenario's) mits aan drie randvoorwaarden wordt voldaan:

1. De wateraanvoer door de Volkeraksluizen moet jaarrond circa 40 m³/s zijn.
2. De kweldruk mag niet substantieel toenemen boven de huidige (geschatte) waarde van 3 kg chloride/s.
3. Na ingebruikname van de nieuwe IZZS (Innovatieve Zoet-Zout Scheiding) Krammersluizen moet tijdens lerend-implementeren de operationele aansturing worden geoptimaliseerd.

Van de overige beheerdoelen en gebruiksfuncties wordt aangegeven dat ...:

- ... de peilgrenzen voor wateroverlast en watertekort in dit onderzoek niet getoetst zijn, omdat het gebruikte model hiervoor niet geschikt is. Het is aannemelijk dat deze peilgrenzen vaker overschreden dan wel onderschreden worden de frequentie met klimaatverandering.
- ... de functie noodwaterberging waarschijnlijk niet klimaatrobuust is, hoewel een overschrijding van de drempelwaarde voor 2050 niet verwacht wordt.
- ... de functie scheepvaart klimaatrobuust is tot 1 m zeespiegelstijging.
- ... de functies die direct of indirect gerelateerd zijn aan blauwalgen, een licht negatieve toetsing met betrekking tot klimaatrobuustheid met de nodige onzekerheid hebben. Het betreft de functies waterkwaliteit (KRW), zwemwater, waterrecreatie en woonomgeving.
- ... de water-gerelateerde natuur inclusief visstand en vogels als klimaatrobuust wordt beoordeeld voor zover het waterbeheer van invloed is en met onzekerheid over het mogelijke effect van temperatuurstijging. De terrestrische natuur is niet beschouwd, omdat deze niet afhankelijk is van het waterbeheer.
- ... over de klimaatrobuustheid van waterveiligheid in dit rapport geen uitspraak wordt gedaan. Dit is onderwerp van onderzoek in het lopende Hoogwaterbeschermingsprogramma.

Dit rapport verkent het toekomstig waterbeheer op hoofdlijnen. Als de hoofdlijnen klimaatrobuust zijn, is daarbinnen optimalisatie van het (dagelijks) operationeel waterbeheer mogelijk. De toetsing van de hoofdlijnen wordt als zeker ingeschat.

Het rapport doet aanbevelingen om resterende onzekerheden te verkleinen. Deze hebben betrekking op de watervraag aan het Hollands Diep in relatie tot de landelijke waterverdeling onder invloed van klimaatverandering, de relatie tussen zoute kwel en zeespiegelstijging, de werking van de IZZS Krammersluizen na ingebruikname en de toekomstige ontwikkeling van blauwalgen. Het rapport doet ook aanbevelingen voor kwantitatieve toetsing van een aantal beheerdoelen en gebruiksfuncties.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Doelstelling onderzoek klimaatrobustheid waterbeheer Volkerak-Zoommeer	7
1.3	Fasering en aanpak onderzoek	8
1.4	Leeswijzer	8
2	Overzicht waterbeheer en gebruiksfuncties Volkerak-Zoommeer	9
2.1	Waterbeheer zoet Volkerak-Zoommeer met autonome ontwikkeling	9
2.1.1	Beheerdoelen	9
2.1.2	Kunstwerken en operationeel waterbeheer	9
2.1.3	Huidige doelen van het waterbeheer	11
2.1.4	Huidige sturing	12
2.1.5	Effect van klimaatverandering	13
2.2	Beheer- en gebruiksfuncties en drempelwaarden Volkerak-Zoommeer	14
2.2.1	Inventarisatie van beheer- en gebruiksfuncties	14
2.2.2	Inventarisatie knikpunten voor beheer- en gebruiksfuncties	16
3	Klimaatrobustheid peilbeheer en zoetwatervoorziening	19
3.1.1	Selectie van beheer- en gebruiksfuncties voor kwantitatieve analyse	19
3.1.2	Aanpak kwantitatieve analyse	20
3.1.3	Resultaten klimaatrobustheid peilbeheer	24
3.1.4	Resultaten klimaatrobustheid zoetwatervoorziening (chlorideconcentratie)	26
4	Klimaatrobustheid overige beheer- en gebruiksfuncties	29
5	Conclusies en aanbevelingen	33
5.1	Samengevatte inleiding en afbakening van het uitgevoerde onderzoek	33
5.2	Conclusies	34
5.3	Aanbevelingen	36
6	Referenties	37
A	Beschrijving Methode Adaptief Deltamanagement	38
A.1	Adaptief Deltamanagement onder het Deltaprogramma	38
A.2	Integraal adaptief deltamangement	39
A.3	Stappen integrale analyse	39
B	Overzicht beheer- en gebruiksfuncties Volkerak-Zoommeer	40
C	Beschrijving Zeesluisformulering voor zoutvracht Krammersluizen	42
D	Beschrijving bakjesmodel voor waterstand en chlorideconcentratie Volkerak-Zoommeer	51
D.1	Schematisatie Volkerak-Zoommeer in het bakjesmodel	51
D.2	Opzet en stappen berekening	52

D.3	Verificatie van het bakjesmodel	55
D.4	Toepassing voor scenario's	56
D.5	Oordeel geschiktheid	56

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Wereldwijd verandert het klimaat. Dit gebeurt door natuurlijke factoren, maar sinds het midden van de twintigste eeuw vooral door de invloed van de mens. Klimaatverandering uit zich op een aantal manieren: stijging van de temperatuur, stijging van de zeespiegel, verandering in neerslagpatroon en daardoor rivierafvoer en verzuring van het water. De impact van deze factoren verschilt per watersysteem en/of gebied en moeten daarom per watersysteem of gebied bekeken worden.

In het Deltaprogramma Zoetwater worden strategieën en concrete maatregelen uitgewerkt om de zoetwatervoorziening in Nederland robuuster te maken voor de toekomstige effecten van klimaatverandering. Ook voor de Zuidwestelijke Delta is een voorkeursstrategie ontwikkeld die moet bijdragen aan het toekomstbestendig maken van de bestaande zoetwatervoorziening.

1.2 Doelstelling onderzoek klimaatrobustheid waterbeheer Volkerak-Zoommeer

Rijkswaterstaat is als beheerder van het Volkerak-Zoommeer verantwoordelijk voor het waterbeheer en doelen die hieraan zijn verbonden. Omdat het Volkerak-Zoommeer belangrijke functies vervult voor de regio is de klimaatrobustheid van het waterbeheer van het huidige zoete Volkerak-Zoommeer een belangrijk vaagstuk. De vraagstelling is:

Hoe lang kunnen de beheer- en gebruiksfuncties van het Volkerak-Zoommeer met het huidige waterbeheer gehandhaafd blijven onder invloed van klimaatverandering?

Met “hoe lang” wordt beoogd een jaartal aan te geven. Het jaartal is afhankelijk van het klimaatscenario (KNMI, 2015) ofwel van de snelheid van zeespiegelstijging of de toename van de rivierafvoer. Bijvoorbeeld bij een snellere zeespiegelstijging wordt de grens aan de klimaatrobustheid eerder bereikt dan bij een lagere zeespiegelstijging.

Uitgangspunt is het waterbeheer voor het huidige, zoete Volkerak-Zoommeer. Een eventueel toekomstig zout Volkerak-Zoommeer valt niet binnen het kader van de vraagstelling.

Het onderzoek omvat alle beheer- en gebruiksfuncties van het Volkerak-Zoommeer. Aanvullend op waterveiligheid en zoetwatervoorziening – de kernthema's van het Deltaprogramma – zijn dat o.a. scheepvaart, waterkwaliteit en natuur (zie §2.2 voor alle functies).

Er wordt uitgegaan van een autonome ontwikkeling waarin de volgende aspecten zijn gewijzigd ten opzichte van de huidige situatie (peildatum januari 2020):

- Innovatieve Zoet-Zout Scheiding (IZZS) Krammersluizen is in gebruik.
- Wateraanvoer via de Roode Vaart naar de bovenstroom van de Dintel en Steenbergse Vliet is in gebruik.
- Krammer-Volkerak, Zoommeer en Bathse spuikanaal zijn aangewezen als Natura 2000 gebieden.
- Onderhoud Bathse spuisluis is afgerond (afdichting in relatie tot zoutlek).

1.3 Fasering en aanpak onderzoek

Het onderzoek is onderverdeeld in twee fases:

- Fase 1. Inventarisatie en identificatie van beheer- en gebruiksfuncties van het Volkerak-Zoommeer en bijbehorende drempelwaarden
- Fase 2. Kwantitatieve analyse van klimaatrobustheid voor peilbeheer en zoetwatervoorziening en kwalitatieve beschouwing van overige beheer- en gebruiksfuncties

Fase 1 is eind 2019 afgerond. De resultaten zijn niet apart gerapporteerd, maar zijn onderdeel van deze rapportage in paragraaf 2.2 en bijlage B. Dit rapport richt zich op de resultaten van Fase 2.

De aanpak van het onderzoek is de Adaptief Deltamanagement methode (Deltares, 2011a). Deze methode is in het kader van het Deltaprogramma ontwikkeld en wordt daarin nog steeds toegepast en doorontwikkeld¹.

Een kernbegrip in Adaptief Deltamanagement is het **knikpunt** gedefinieerd als “Het moment dat de omvang van de klimaatverandering dusdanig is dat met het (huidige) beheer of beleid de gestelde doelen niet meer kunnen worden bereikt”. Een knikpunt bij een functie wordt beschreven door:

- een **indicator**, die een kwantificeerbare eigenschap van een mogelijk optredend probleem voor een functie betreft (bijvoorbeeld chlorideconcentratie); en
- een bijbehorende **drempelwaarde**, die aangeeft bij welke grenswaarde van deze indicator de functie niet afdoende functioneert (bijvoorbeeld 450 mg/l chloride bij Bathse brug in het groeiseizoen).

Bijlage A bevat een beknopte introductie in de methode. Deltares (2011) is een praktische handleiding. Door dit rapport heen wordt iedere stap ook kort geïntroduceerd en toegelicht.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft het waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer in termen van in- en uitstromende debieten en bronnen van zout (chloride) en geeft een overzicht van alle beheer- en gebruiksfuncties. Bijlage B bevat een overzicht van de beheer- en beleidskaders en referenties waaruit knikpunten, indicatoren en drempelwaarden zijn geïnventariseerd.

Voor de functies peilbeheer en zoetwatervoorziening wordt in Hoofdstuk 3 op basis van de indicatoren waterstand en chlorideconcentratie met modelberekeningen afgeleid wat de klimaatrobustheid is. De beschrijving van de toegepaste modellen is opgenomen in Bijlagen C en D.

De klimaatrobustheid van de overige beheer- en gebruiksfuncties wordt kwalitatief besproken in Hoofdstuk 4.

Hoofdstuk 5 sluit af met conclusies en aanbevelingen.

¹ <https://www.deltacommissaris.nl/deltaprogramma/wat-is-het-deltaprogramma/adaptief-deltamanagement>

2 Overzicht waterbeheer en gebruiksfuncties Volkerak-Zoommeer

2.1 Waterbeheer zoet Volkerak-Zoommeer met autonome ontwikkeling

De beschrijving van het waterbeheer met autonome ontwikkeling is overgenomen uit het functioneel ontwerp voor het beslissingsondersteunend systeem Volkerak-Zoommeer (Deltares, 2020). De redeneerlijnen waterbeheer regio Volkerak Zoommeer zijn een beschrijving van het huidige waterbeheer (Hydrologic, 2017).

2.1.1 Beheerdoelen

De beheerdoelen en afspraken voor het Volkerak-Zoommeer staan vastgelegd in het Waterakkoord (Waterakkoord (2016), Hydrologic (2018)). Er wordt een waterpeil aangehouden dat binnen bepaalde grenzen mag fluctueren. Overtollig water wordt afgevoerd via de Bathse Spuisluis. Er dient echter tegelijkertijd doorgespoeld te worden om zout af te voeren, dat tijdens het schutproces van de verschillende sluisen en via lekken het Volkerak-Zoommeer binnenkomt. Bij (dreigende) overschrijding van maximale waterstanden en gesloten keringen in de Rijn-Maasmonding kan besloten worden om het Volkerak-Zoommeer kortstondig voor waterberging te gebruiken met een waterschijf van ruim 2 m (Ruimte voor de Rivier maatregel). Naast afvoer en berging van water, en watervoorziening naar de regio, wordt het meer ook gebruikt als scheepvaartverbinding tussen Antwerpen en de Rijn. Voor waterkwaliteit en ecologie zijn de beheerdoelen vastgelegd in de beheerplannen van de Kaderrichtlijn water en Natura 2000.

2.1.2 Kunstwerken en operationeel waterbeheer

De volgende kunstwerken hebben invloed op zowel de waterkwantiteit als -kwaliteit (Figuur 2.1). Op de Bergse Diepsluis na worden deze ook gebruikt als “regelkranen” voor het waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer.

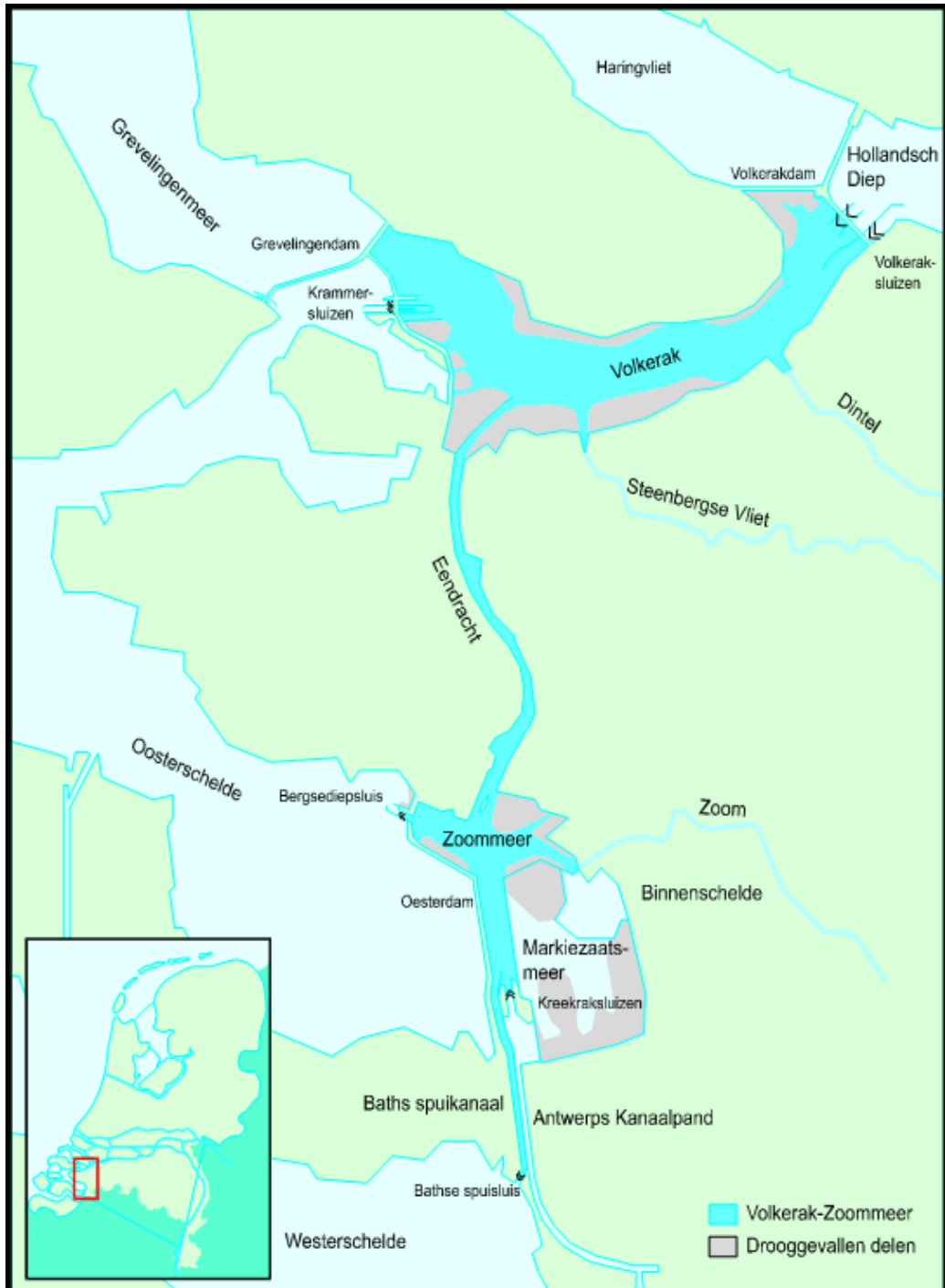
- Volkeraksluisen: De Volkeraksluisen zijn een complex van drie schutsluisen voor de beroepsvaart, vier spuisluisen en een jachtensluis, gelegen in de Volkerakdam tussen het Hollands Diep en het Volkerak bij Willemstad. Via de spuisluisen kan daggemiddeld tot 67,5 m³/s water ingelaten worden in het Volkerak-Zoommeer (volgens huidige doorspoelregime beslisregels, tot 3 kokers bij Bath mogen voor doorspoelen worden gebruikt, waarbij uitgegaan wordt van een daggemiddeld spuidebiet per koker van circa 22,5 m³/s).
- Krammersluisen: De Krammersluisen hebben als belangrijkste functie om scheepvaart door te laten. Bij dreigende overschrijding van NAP +0,50 m op het Volkerak-Zoommeer kan ervoor gekozen worden om extra te spuien via de riolen van de kolk: in dit geval wordt de scheepvaart gestremd (zie 2.1.4). Er zijn twee duwvaartsluisen en twee kleine jachtensluisen. De jachtensluisen hebben als regelkraan nauwelijks betekenis.

Het huidige zoet-zout scheidingsstelsel in de duwvaartsluisen gaat vervangen worden door het Innovatieve Zoet-Zout Scheidingsstelsel (IZZS). In de winter wordt voor het IZZS een maximaal doorspoeldebiet naar de Oosterschelde van 29 m³/s aangehouden. In de zomer is dit gereduceerd naar 9 m³/s. Voor het besturingssysteem van het IZZS wordt momenteel een Beslissingsondersteunend systeem ontwikkeld. De verwachting is dat het geheel in 2025 in bedrijf zal zijn. Voor het besturingssysteem van het IZZS wordt momenteel een beslissingsondersteunend systeem (BOS) ontwikkeld. De verwachting is dat het geheel in 2025 in bedrijf zal zijn.

- Bergse diepsluis: Deze sluis vormt een verbinding voor de (kleine) scheepvaart tussen de kom van de Oosterschelde en het Zoommeer. Door middel van visvriendelijk sluisbeheer

wordt vismigratie bevorderd. Dit heeft een beperkte zoutlast op het Volkerak-Zoommeer tot gevolg.

- Bathse Spuisluis: De Bathse Spuisluis is de belangrijkste kraan van het Volkerak-Zoommeer. Hiermee wordt water afgevoerd voor peilbeheer en voor doorspoeling. De Bathse Spuisluis kan daggemiddeld tot circa 130 m³/s afvoeren (volgens huidige doorspoel- regime beslistabel; persoonlijke correspondentie Stefan Nieuwenhuis). Hierbij worden alle zes spuiokers van de spuisluis ingezet.



Figuur 2.1 Volkerak-Zoommeer met geografische namen en kunstwerken (uit Hydrologic, 2017)

- Kreekrakgemaal: het Kreekrakgemaal is onderdeel van het complex Kreekraksluizen. Door de inzet van een daggemiddelde debieten van 2 tot 4 m³/s wordt zoutlast op het Volkerak-Zoommeer bestreden door een 'zoete bel' in stand te houden aan de zijde van het Antwerps Kanaalpand.

De Brabantse rivieren Dintel en Steenbergse Vliet stromen onder vrij verval uit in het Volkerak. Het gemiddeld debiet is respectievelijk circa 12 m³/s en 1,5 m³/s. Het maximale debiet kan oplopen tot 'respectievelijk zo'n 85 m³/s en 10 m³/3 (periode 2000-2016, bron: HMC). Momentane pieken bij grote neerslag kunnen nog hoger zijn.

2.1.3

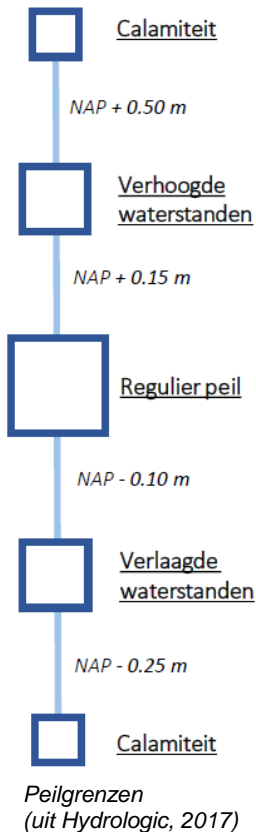
Huidige doelen van het waterbeheer

In het huidige beheer mag de waterstand van het Volkerak-Zoommeer fluctueren volgens een natuurlijk peilverloop tussen de grenzen van NAP +0,15 m en NAP -0,10 m (Waterakkoord, 2016). Binnen deze grenzen wordt getracht het meerpeil de voor natuurbeheer wenselijke peiltrap te laten volgen (Figuur 2.2). Van ernstige wateroverlast is sprake als het meerpeil boven NAP +0,50 m stijgt en van watertekort als het meerpeil onder NAP -0,25 m zakt. Bij een verwachte overschrijding van NAP + 0,50 m gaat de calamiteitenregeling in met extra spuien via de Krammersluizen. In zeer extreme gevallen kan het Volkerak-Zoommeer ingezet worden voor berging van overtollig water uit het Haringvliet/Hollandsch Diep. Het peil kan dan tot NAP +2,30 m stijgen. Deze bergingsoptie bestaat sinds 2016 en is nog nooit toegepast. De kans dat er gebruik van moet worden gemaakt is momenteel gesteld op 1/1400 per jaar, maar als gevolg van zeespiegelstijging neemt deze kans in de toekomst toe.

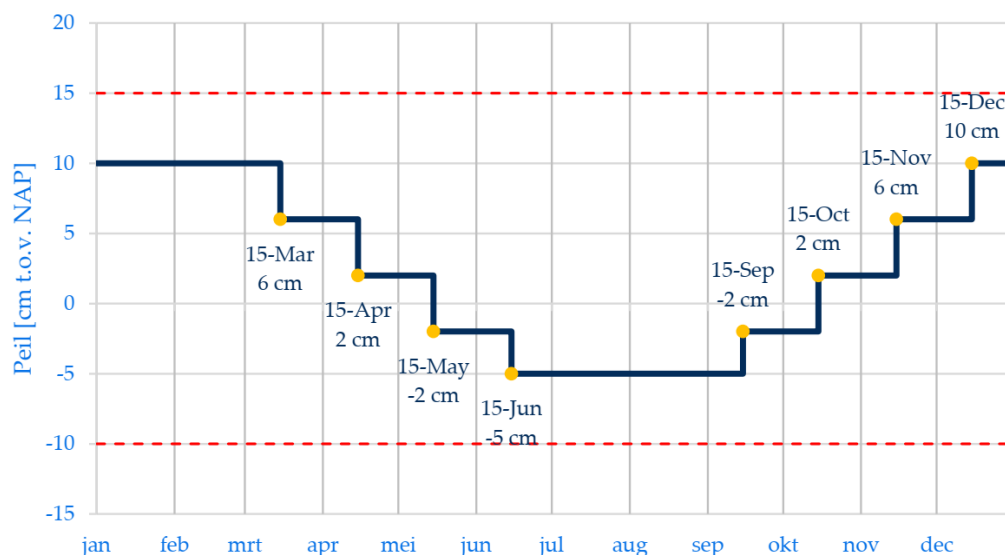
In het groeiseizoen van 15 maart tot 15 september mag het de chlorideconcentratie bij Bathse Brug niet hoger zijn dan 450 mg/l. Buiten het groeiseizoen zijn de KRW doelen maatgevend maar niet limiterend, omdat het zoutgehalte niet zover mag oplopen dat de kans groot is dat het meer bij de start van het groeiseizoen te ver opgeladen is. Voor zover bekend is hier geen maximaal zoutgehalte voor afgesproken.

In het kader van Slim Watermanagement is door de waterschappen en Rijkswaterstaat gewerkt aan redeneerlijnen die weergeven hoe het beheer is geregeld en welke stuurregels gelden (Hydrologic, 2017). In 2020 is tevens gepland om een praktijkproef droogte uit te voeren waarmee nog meer inzicht wordt verkregen in de buffercapaciteit van het meer en de snelheid van oplading met zout.

Sturing op bovenstaande eisen en doelen wordt door de peilbeheerder van het HMC bepaald. Parallel hieraan worden door de waterbeheerder doelen nagestreefd, zoals het bevorderen van vismigratie door middel van visvriendelijk spui- en schutbedrijf. Dit is geen dagelijkse sturing, en heeft nauwelijks invloed op het peilbeheer met regelkranen (§2.1.2).



Peiltrap Volkerak-Zoommeer



Figuur 2.2 Streefpeil voor het Volkerak-Zoommeer gedurende het jaar, zogenaamde 'peiltrap' (bron: Hydrologic, 2018)

2.1.4 Huidige sturing

Momenteel wordt het watersysteem op de volgende wijze gestuurd:

- Volkeraksluizen: aanvoer van zoet water. Het huidig beleid is dat de aanvoer geminimaliseerd wordt en doorspoelen dus voornamelijk gebeurt met aanvoer vanuit Brabant. De aanvoer uit Brabant is juist in het groeiseizoen gering en niet toereikend om het Volkerak-Zoommeer voldoende zoet te houden. Daarom is in het groeiseizoen vaak de aanvoer via het Volkerak van belang. Er wordt volgens het Waterakkoord (2016) alleen geen water worden ingelaten bij te hoge afvoeren op de Rijn (>3500 m³/s bij Lobith) en de Maas (>500 m³/s bij Eijsden), als de Rijnafvoer bij Lobith onder de 800 m³/s zakt (per LCW besluit), en als er sprake is van passerende verontreinigingen.
- Bathse Spuisluis: afvoer van overtollig water naar de Westerschelde. Bij verwachte extreme regenval en hoge afvoer uit Brabant, veelal samenvallend met een beperkte spuicapaciteit door verhoogde waterstanden bij Bath, wordt er anticiperend gespuid. Eventueel komt het peil hierdoor voor minder dan een dag onder NAP -0,10 m.

Er kan extra doorgespoeld worden door extra water in te laten bij de Volkeraksluizen. Dit gebeurt peil-neutraal, dat wil zeggen: er wordt per uur even veel water ingelaten bij de Volkeraksluizen als er voor de doorspoeling via de Bathse Spuisluis wordt uitgelaten. Deze doorspoeling gebeurt reactief; als op basis van het actuele zoutgehalte bij de Bathse Brug meer debiet gewenst is om het zoutgehalte terug te dringen. Dit gebeurt volgens de beslisregels die de waterbeheerder van RWS Zee en Delta opstelt.

- Kreekrakgemaal: terugpompen van zoet water naar het Antwerps Kanaalpand om daar een zoete bel en voldoende zuidwaarts debiet te creëren. Het pompdebiet is afhankelijk van het zoutgehalte op het Antwerps Kanaalpand. Bij hoge uitzondering wordt het gemaal ingezet om water van het Volkerak-Zoommeer af te voeren.
- Krammersluizen: deze sluisen gebruiken bij het reguleren schutproces een gemiddeld debiet van circa 9 m³/s. Daarnaast kunnen de duwvaartsluizen worden gebruikt als spuisluis. Dit speelt alleen een rol bij zeer hoge waterstanden op het Volkerak-

Zoommeer. In zo'n situatie worden de duwvaartsluizen ingezet voor afvoer van water uit het Volkerak-Zoommeer naar de Oosterschelde (zie §2.1.2).

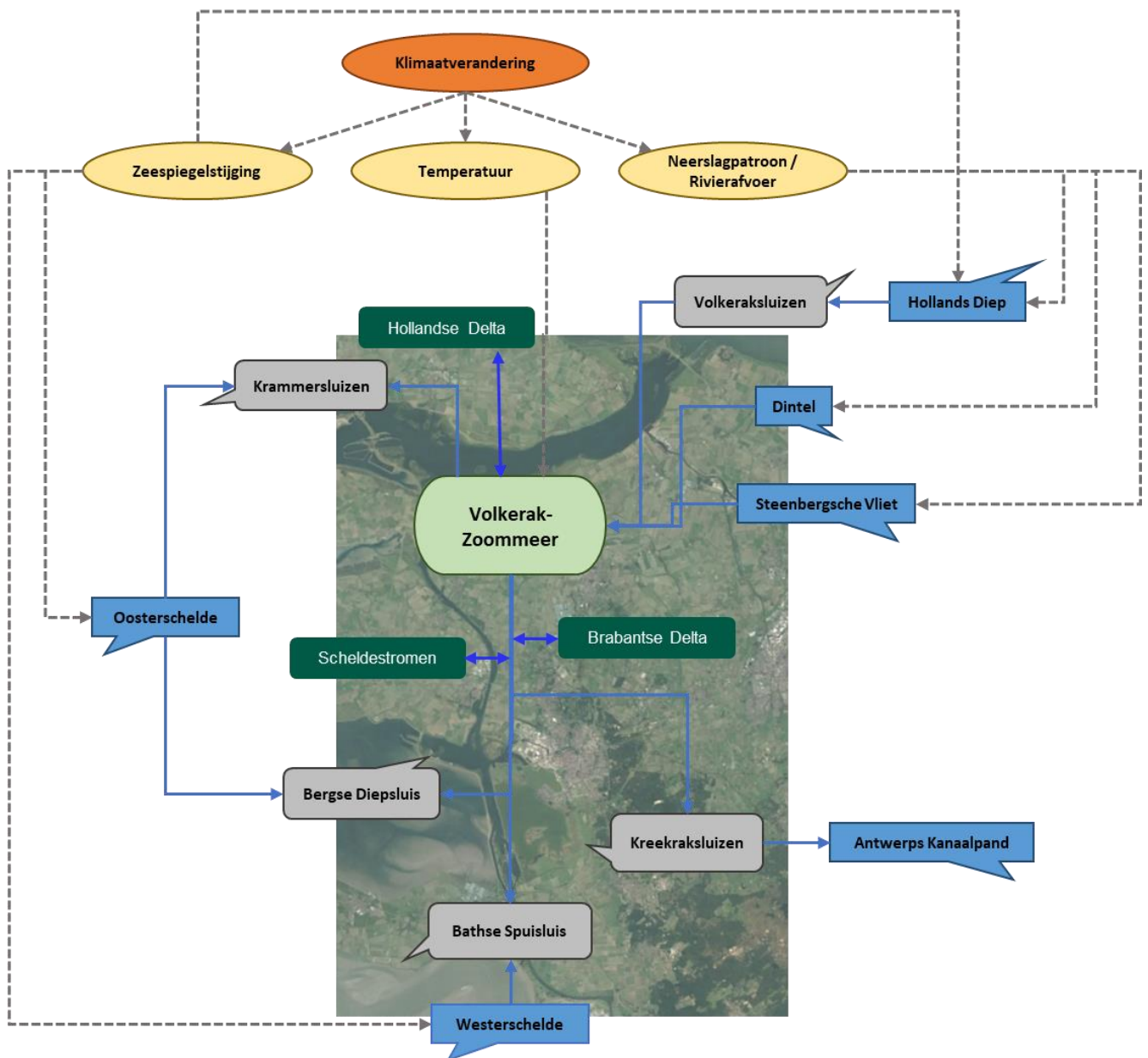
Niet alleen de sturing op zoutgehalte is anticiperend. Er wordt bijvoorbeeld ook geanticipeerd op dreigend wateroverschot door extra buffer te creëren middels tijdelijke peilverlaging, en in droge tijden kan het peil tot NAP +0,15 m worden opgezet om langer in de zoetwaterbehoefte te kunnen voorzien (zie ook redeneerlijnen (Hydrologic, 2017)).

2.1.5 Effect van klimaatverandering

Figuur 2.3 geeft weer hoe klimaatverandering het waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer kan beïnvloeden. Zeespiegelstijging heeft effect op de waterstand in het Hollands Diep, de Oosterschelde en de Westerschelde wat een effect heeft op de aan- of afvoer van water via de Volkeraksluizen, de Krammersluizen, de Bergse diepsluis en de Bathse spuisluis.

Veranderende neerslagpatronen en als gevolg daarvan veranderende rivierafvoeren beïnvloeden de waterbeschikbaarheid bij de Volkeraksluizen, die via operationele regels afhankelijk is van de afvoeren bij Lobith en Eijsden, en de aanvoer via de Dintel en de Steenbergse Vliet. Temperatuurstijging door klimaatverandering heeft relatief beperkt invloed op het waterbeheer door verandering in verdamping en mogelijk door effect op waterkwaliteit en blauwalgen. 1 mm/d extra verdamping komt overeen met een extra waterverlies van 0,7 m³/s.

Veranderingen van windstatistiek zoals windsnelheid en windrichting worden niet meegenomen. Deze kunnen bijvoorbeeld van belang zijn voor waterbeheer via opwaaiing en voor waterveiligheid via golfbelasting.



Figuur 2.3 Visualisatie van het effect klimaatverandering op het waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer

2.2 Beheer- en gebruiksfuncties en drempelwaarden Volkerak-Zoommeer

2.2.1 Inventarisatie van beheer- en gebruiksfuncties

In het Nationaal Waterplan 2016-2021 en het Beheer- en ontwikkelplan voor de Rijkswateren (Bprw) zijn beheer- en gebruiksfuncties benoemd. De beheerfuncties zijn de beheertaken waarvoor Rijkswaterstaat verantwoordelijk is: waterveiligheid, waterbeheer, waterkwaliteit en natuur. Gebruiksfuncties omvatten het menselijk gebruik van het Volkerak-Zoommeer in brede zin. Beheerfuncties en gebruiksfuncties zijn niet strikt te scheiden, omdat beheerfuncties (vaak) tot doel hebben om gebruiksfuncties mogelijk te maken. Waterbeheer regelt bijvoorbeeld het waterpeil voor scheepvaart. Voor het toepassen van de methode is overlap niet erg. Via de indicatoren en drempelwaarden worden ze bij elkaar gebracht.

Als eerste stap worden beheer- en gebruiksfuncties gefilterd door twee vragen te beantwoorden:

1. Komt de beheer- of gebruiksfunctie voor in het Volkerak-Zoommeer?
2. Wordt de beheer- of gebruiksfunctie beïnvloed door klimaatverandering, dat wil zeggen door zeespiegelstijging, temperatuurstijging of veranderende rivierafvoer?

Als beide vragen met ja worden beantwoord, wordt de beheer- of gebruiksfunctie meegenomen in de beoordeling van de klimaatrobustheid. Als een van beide vragen met nee wordt beantwoord, is de beheer- of gebruiksfunctie niet relevant voor de klimaatrobustheid van het Volkerak-Zoommeer.

Tabel 2.1 beantwoordt de twee vragen en geeft per functie een korte toelichting. Op basis van deze filtering blijkt dat de functies Drinkwater, Schelpdierwater, Archeologie/gebouwd erfgoed/historisch landschap, Bouwgrondstoffen, Energieproductie, Kabels en leidingen, en tenslotte Koel- en proceswater niet relevant zijn voor klimaatrobustheid. Dertien beheer- en gebruiksfuncties van het Volkerak-Zoommeer kunnen wel door klimaatverandering beïnvloed worden.

Tabel 2.1 Toetsing beheerfuncties (B) en gebruiksfuncties (G) op voorkomen in het Volkerak-Zoommeer en beïnvloeding door klimaatverandering

Beheerfunctie / Gebruiksfunctie	Komt voor in Volkerak-Zoommeer?	Beïnvloed door klimaatverandering?	Toelichting
Waterveiligheid (B)	Ja	Ja	Waterveiligheid speelt een rol in het Volkerak-Zoommeer en kan beïnvloed worden door stijging van het waterpeil als gevolg van zeespiegelstijging.
Noodwaterberging (B)	Ja	Ja	Het Volkerak-Zoommeer is aangewezen als noodbergingsgebied voor rivierwater. Door een frequentere hoge rivierafvoer en hogere zeespiegelstijging zal naar verwachting noodwaterberging vaker gebruikt moeten worden.
Waterbeheer/ Peilbeheer (B)	Ja	Ja	Het waterpeil wordt beheerd door aan- en afvoer via de kunstwerken. Behalve voor de Kreekraksluizen gebeurt dit onder vrij verval. Door zeespiegelstijging wordt het vrij verval kleiner en duurt korter, waardoor mogelijk de capaciteit beperkend wordt.
Waterkwaliteit (B)	Ja	Ja	Als door het waterbeheer de aan- en afvoer van water verandert en bijvoorbeeld de verblijftijd langer wordt, zal de waterkwaliteit mee veranderen.
Natuurbeheer (B) (G)	Ja	Ja	De oevers en eilanden die onder invloed staan van het waterpeil, worden gebruikt door broedvogels en als foerageergebied. Als het waterpeil verandert, heeft dat gevolgen voor de natuur. Er zijn verschillende maatregelen voor vismigratie die verbindingen maken tussen zoet/zout en het achterland. Veranderende waterstanden kunnen een effect hebben op de mate van passeerbaarheid.
Scheepvaart (beroeps) (G)	Ja	Ja	De mogelijkheid van binnenvaart heeft een sterke relatie met waterpeil vanwege de doorvaarthoogte onder de vaste bruggen in het Schelde-Rijnkanaal en de mogelijkheid om sluisen te schutten. Een gewijzigd waterpeil kan van invloed zijn op het schutregime en/of de doorvaarthoogte.
Drinkwater (G)	Nee	-	Er wordt geen drinkwater gewonnen uit het Volkerak-Zoommeer.
Zwemwater (G)	Ja/Nee	Ja	Er is momenteel geen officiële zwemwaterfunctie. Mogelijk wordt deze in de toekomst wel gebruikt. Deze kan beïnvloed worden door temperatuurstijging en doorspoelmogelijkheid op de waterkwaliteit (blauwalgenbloei).

Schelpdierwater Visserij (aquacultuur) (G)	Nee	-	Er worden geen schelpdieren gekweekt.
Beroepsvisserij (open water) (G)	Ja	Ja	Momenteel zijn vijf beroepsvisserij actief. Deze visserij vist op wolhandkrab, snoekbaars, brasem, bot en aal. Het effect van klimaatverandering op connectiviteit, waterkwaliteit, dynamiek en diversiteit kan de visintrek en visaanwas beperken.
Sportvisserij (G)	Ja	Ja	Het effect van klimaatverandering op connectiviteit, waterkwaliteit, dynamiek en diversiteit kan de visintrek en visaanwas beperken.
Archeologie, gebouwd erfgoed en historisch landschap (G)	Nee	-	Het Volkerak-Zoommeer is niet aangewezen als locatie voor belangrijk cultureel erfgoed.
Bouwgrondstoffen (G)	Nee	-	Er worden geen grondstoffen gewonnen.
Energieproductie (G)	Ja	Nee	Er zijn enkele windturbines in Volkerak-Zoommeergebied. Naar verwachting zal klimaatverandering hier geen effect op hebben.
Kabels en leidingen (G)	Nee	-	Er komen geen kabels en leidingen voor in het Volkerak-Zoommeer.
Koel- en proceswater (G)	Nee	-	Er wordt geen koel- of proceswater gebruikt uit het Volkerak-Zoommeer.
Landbouw (G)	Ja	Ja	Om het polderwatersysteem voldoende zoet te houden en water beschikbaar te stellen voor agrarisch gebruik, wordt water uit het Volkerak-Zoommeer ingelaten bij Nieuw Vossemeer, Auvergne polder, Prins Hendrikpolder, Oostflakkee, Tholen, St. Philipsland en Reigersbergsche polder. Door zeespiegelstijging kan de zoutlast via grondwaterkwel of de zoutlek via de kunstwerken toenemen, waardoor de chlorideconcentratie stijgt en het water niet meer ingelaten kan worden. Bij een lagere rivieraanvoer kan te weinig water beschikbaar zijn voor doorspoeling, waardoor ook de chlorideconcentratie stijgt.
Recreatievaart (G)	Ja	Ja	Er vindt recreatievaart plaats en er is een aantal havens. Klimaatverandering kan hier invloed op uitoefenen door verandering van waterpeil, waterkwaliteit en inzetbaarheid van schutsluizen.
Overige waterrecreatie (G)	Ja	Ja	Er is divers water-gerelateerde recreatie op en langs het Volkerak-Zoommeer. Klimaatverandering kan hier invloed op uitoefenen door verandering van waterpeil en waterkwaliteit.
Woonomgeving (G)	Ja	Ja	Aan het Volkerak-Zoommeer grenzen diverse plaatsen zoals Ooltgensplaat, Oud-Vossemeer en Tholen. De stad Bergen op Zoom ligt aan de Binnenschelde dat voor zijn peilbeheer afhankelijk is van het water uit het Volkerak-Zoommeer. Leefbaarheid van deze plaatsen kan beïnvloed worden onder klimaatverandering door verandering van de waterkwaliteit (blauwalgenbloei) en muggenplagen.

2.2.2 Inventarisatie knikpunten voor beheer- en gebruiksfuncties

Voor de in de vorige paragraaf geïdentificeerde functies dienen knikpunten in de vorm van indicatoren en drempelwaarden geformuleerd te worden. Hiervoor zijn beheer- en beleidsdocumenten geïnventariseerd. De belangrijkste zijn hieronder weergegeven; een uitgebreid overzicht is te vinden in Bijlage B. Aanvullend zijn indicatoren naar voren gekomen uit communicatie met het afstemoverleg zoetwater tussen Rijkswaterstaat, waterschappen en provincies.

- Waterakkoord Volkerak-Zoommeer (Waterakkoord, 2016)
- Redeneerlijn Volkerak-Zoommeer (RWS, 2016)
- Ontwerpaanwijzingsbesluit Natura 2000 (MvEZ, 2017)
- Kaderrichtlijn Water (KRW): Sterk veranderende watertypen (RWS, 2015)

- Kaderrichtlijn Water (KRWS): Natuurlijke watertypen (STOWA, 2018)

Bijlage B bevat een overzicht van alle bronnen waaruit indicatoren en drempelwaarden zijn afgeleid. Het leeuwendeel komt voort uit de eisen van landbouw voor de zoetwatervraag, uit de Kaderrichtlijn Water en uit Natura 2000.

Analyse van de 400 indicatoren wijst uit dat er 36 verschillende watersysteemindicatoren zijn (Tabel 2.2). Meerdere indicatoren zijn bijvoorbeeld gerelateerd aan het waterpeil. Soms is de drempelwaarde het minimum waterpeil, soms het maximum waterpeil, etc. Het waterpeil is in dit voorbeeld de systeemindicator die voor verschillende functie-indicatoren een andere statistiek heeft. Figuur 2.4 laat schematisch zien dat systeemindicatoren niet onafhankelijk van elkaar zijn, maar juist met elkaar in relatie staan.

Tabel 2.2 Overzicht van geïdentificeerde systeemindicatoren

Waterpeil	Doorvaarthoogte	Vogels	Zoutgehalte
Afvoer rivieren	Diepgang	Habitat	Zwevend stof
Verontreiniging rivieren	Passeertijd kunstwerken	Visstand	Fosfaat in het sediment
Debiet Volkeraksluizen	Zoetwaterbeschikbaarheid (Watervraag)	Vismigratie	Chlorofyl-A
Debiet Kreekrakgemaal	Biodiversiteit	Doorzicht	Blauwalgen
Debiet Krammersluis	Fytoplankton	Zuurgraad	Prioritaire stoffen
Debiet Bathse Spuisluis	Quagga-mosselen	Zuurstofverzadigingsgraad	Chemische waterkwaliteit
Zwemwaterkwaliteit	Macrofauna	Temperatuur	Stikstof
Muggenoverlast	Waterflora	Zoutlek	Fosfaat

3 Klimaatrobustheid peilbeheer en zoetwatervoorziening

3.1.1 Selectie van beheer- en gebruiksfuncties voor kwantitatieve analyse

Ten behoeve van fase 2 van het klimaatrobustheidsonderzoek (§1.3) is een selectie gemaakt van functies dan wel indicatoren waarvoor een kwantitatieve onderbouwing prioriteit heeft en waarvoor kwantificering mogelijk is, dat wil zeggen dat voldoende kennis en een modelaanpak beschikbaar zijn. In overleg met Rijkswaterstaat is gekozen voor de functies Peilbeheer en Zoetwatervoorziening en de bijbehorende systeemindicatoren:

- Waterpeil in m NAP
- Zoetwaterbeschikbaarheid in m³/s
- Chlorideconcentratie in mg/l

Uit Tabel 3.1 blijkt dat deze drie watersysteemindicatoren voor andere beheer- en gebruiksfuncties van belang zijn. Naast Peilbeheer en Zoetwatervoorziening is ook voor Landbouw, Scheepvaart, Waterkwaliteit (KRW chloride) en Natuur (deels) een kwantitatieve onderbouwing mogelijk. Een kwalitatieve beoordeling van overige gebruiksfuncties wordt in hoofdstuk 4 gegeven.

Tabel 3.1 *Knikpunten gerelateerd aan systeemindicatoren waterpeil, zoetwaterbeschikbaarheid en chlorideconcentratie*

Systeemindicator	Beheerdoel of gebruiksfunctie	Drempel	Drempel waarde	Richting	Eenheid	Oorsprong
Waterpeil	Waterbeheer	Maximale waterstand (dagelijks)	0,15	>	NAP m	Waterakkoord (2016)
		Minimale waterstand (dagelijks) (ook voor Mark-Dintel-Vliet)	-0,10	<	NAP m	Waterakkoord (2016)
		Wateroverlast	0,5 met 1/100 jaar herhalingsstijd	>	NAP m	Waterakkoord (2016)
		Watertekort	-0,25	<	NAP m	Waterakkoord (2016)
	Landbouw	Inlaat zoetwater onder vrij verval Polder Oude Tonge (WSHD)	0,15	<	NAP m	Redeneerlijn Volkerak-Zoommeer (2017)
	Scheepvaart	Maximale waterstand	0,75	>	NAP m	Verkenning doorvaartprofiel Schelde Rijn corridor in relatie tot variabele waterstanden (2008)
		Minimale waterstand	-0,25	<	NAP m	Waterakkoord (2016) / Raad voor de Waterstaat
	Natura 2000	Habitat	Behoud habitat areaal	=	Ha	Ontwerpaanwijzingsbesluit Krammer-Volkerak (2017)
Soorten Broedvogels		Peiltrap (Figuur 2.2)	=	NAP m	Ontwerpaanwijzingsbesluit Krammer-Volkerak (2017)	
Zoetwater-beschikbaarheid	Landbouw	Zoetwatervraag gezamenlijke polders	6,5	<	m ³ /s	Deltares (2012) Toekomstbestendigheid besluit Volkerak-Zoommeer: een robuuste beslissing?
Chloride-concentratie	Waterbeheer	Maximaal bij Bathse brug in groeiseizoen	450	>	mg Cl/l	Waterakkoord (2016)
	Landbouw	Zoetwatervraag WSHD	300	>	mg Cl/l	Redeneerlijn Volkerak-Zoommeer (2017)
	KRW	Zoutgehalte GEP	450	>	mg Cl/l	Kaderrichtlijn Water (2000)

3.1.2 Aanpak kwantitatieve analyse

Om het waterpeil, de zoetwaterbeschikbaarheid en de chlorideconcentratie te berekenen is een model ingezet dat de water- en zoutbalans van het Volkerak-Zoommeer uitrekent. Voor de Planstudie Krammersluizen is hiervoor een WANDA-Locks model ingezet (Deltares, 2016). Er is voor een nieuwe aanpak gekozen, omdat 1) het WANDA-Locks model niet het Zoommeer bevatte en dus uitgebreid moest worden, 2) het model met een inmiddels verouderde softwareversie werkte en 3) een alternatief model (Zeesluisformulering, ZSF) voor het debiet en het zouttransport door de Krammersluizen beschikbaar is.

De nieuwe aanpak bestaat uit een combinatie van de Zeesluisformulering voor het transport van water en zout door de Krammersluizen en een zogenaamd bakjes-model voor de waterbalans en zoutverspreiding van het Volkerak-Zoommeer. Het bakjes-model verdeelt het Volkerak-Zoommeer in 10 delen en berekent voor ieder deel (bakje) de water- en chloridebalans. Het bakjes-model is gevalideerd op de metingen voor het jaar 2003. De Zeesluisformulering is vergeleken met de resultaten van het WANDA-Locks model. In beide gevallen was de vergelijking bevredigend. Bijlage C bevat een uitgebreide beschrijving van de Zeesluisformulering. Bijlage D bevat een uitgebreide beschrijving van het bakjes-model.

De nieuwe aanpak bestaat uit een aantal stappen:

1. Voor iedere term van de waterbalans en de chloridebalans wordt een aanname gedaan.
2. Met een Python script wordt achtereenvolgens
 - a. Het debiet door de Krammersluizen en de Bathse spuisluis berekend.
 - b. De waterstandvariatie door het jaar heen berekend.
 - c. De wateruitwisseling tussen de 10 bakjes van het bakjes-model berekend.
3. Met de Zeesluisformulering wordt de bijbehorende zoutvracht van de Krammersluizen naar de voorhaven aan de Volkerak-Zoommeer zijde berekend.
4. Met waterkwaliteitssoftware D-WAQ wordt op basis van a) de berekende wateruitwisseling tussen de bakjes, b) de termen van de chloridebalans, en c) de berekende zoutvracht van de Krammersluizen, de chlorideconcentratie in de 10 bakjes van het bakjes-model berekend door het jaar heen.

Op basis van expert judgement van de auteurs wordt ingeschat dat met deze aanpak de waterstand tot op enkele cm nauwkeurig berekend kan worden. De onzekerheid in de berekende chlorideconcentratie is groter en wordt geschat op $\pm 10\%$.

Tabel 3.2 geeft een overzicht van de termen van de water- en chloridebalans en de gebruikte aannames voor de modellering. Voor sommige termen zijn meerdere aannames beschikbaar. Alle combinaties van aannames worden doorgerekend. In totaal betreft het circa 1500 berekeningen die vervolgens geanalyseerd worden.

Het debiet door de Volkeraksluizen is afhankelijk de rivieraanvoer en van de waterstand op het Hollands Diep. Omdat ingelaten wordt onder vrij verval, is dat bij lage waterstand op het Hollands Diep niet (voldoende) mogelijk. Lage waterstand treedt op bij lage rivierafvoer of bij waterstandsverlaging door afwaaiende wind uit (zuid)oostelijke richting. In de huidige situatie is de inlaat via de Volkeraksluizen gekoppeld aan de rivierafvoer bij Lobith. Echter, voor de toekomstige autonome ontwikkeling zijn er signalen dat meer water voor het Volkerak-Zoommeer beschikbaar is door een andere landelijke waterverdeling, ofwel dat tot lagere rivierafvoer bij Lobith ingelaten kan worden bij de Volkeraksluizen. Hoeveel water beschikbaar is en wat de relatie is met klimaatverandering op de rivierafvoer is nog onderwerp van onderzoek en landelijk (waterverdelings)overleg in het kader van het Deltaprogramma. In deze studie wordt een aantal varianten aangehouden van continue, jaarrond beschikbaarheid van 40 m³/s, 25 m³/s en 15 m³/s. De variant met 40 m³/s beschikbaar komt overeen met het uitgangspunt van de Planstudie Krammersluizen (Deltares, 2016). Aanvullend is een variant 25 m³/s met winterdoorspoeling toegevoegd. Winterdoorspoeling wordt in de periode voorafgaand aan het groeiseizoen gedaan

om de chlorideconcentratie op een lager niveau te brengen. In deze variant wordt winterdoorspoeling van 100 m³/s van 15 februari tot 14 maart aangenomen.

Voor de chlorideconcentratie van het Hollandse Diep wordt op basis van historische data een vaste waarde van 100 mg/l aangenomen. Het is aannemelijk dat door zeespiegelstijging de frequentie van achterwaartse verzilting via het Spui toeneemt, waardoor de chlorideconcentratie in het Hollands Diep vaker kan stijgen. Omdat de frequentie en hoogte van de toename niet goed bekend zijn (en afhankelijk van veel factoren), is dit niet meegenomen.

Tabel 3.2 Termen van water- en zoutbalans van het Volkerak-Zoommeer en databron voor modelinvoer

Balansterm	Effect klimaatverandering (Figuur 2.3)	WATERBALANS	CHLORIDEBALANS
Volkeraksluizen	<ul style="list-style-type: none"> Neerslagpatroon/Rivierafvoer Zeespiegelstijging 	<ul style="list-style-type: none"> Op basis van variant: <ul style="list-style-type: none"> 40 m³/s 25 m³/s 25 m³/s met winterdoorspoeling 15 m³/s 	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van 100 mg/l op basis van historische data
Dintel	<ul style="list-style-type: none"> Neerslagpatroon/Rivierafvoer 	<ul style="list-style-type: none"> Historische data (2017, 2018) Inclusief autonome ontwikkeling Roode Vaart (+1,5-2,5 m³/s) Klimaatscenario 2050 en 2085 	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van 80 mg/l op basis van historische data
Vliet	<ul style="list-style-type: none"> Neerslagpatroon/Rivierafvoer 	<ul style="list-style-type: none"> Historische data (2017, 2018) Klimaatscenario 2050 en 2085 	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van 80 mg/l op basis van historische data
Neerslag	<ul style="list-style-type: none"> Neerslagpatroon/Rivierafvoer 	<ul style="list-style-type: none"> Historische data (2017, 2018) Klimaatscenario 	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van 5 mg/l
Krammersluizen	<ul style="list-style-type: none"> Zeespiegelstijging 	<ul style="list-style-type: none"> -9 m³/s in groeiseizoen -29 m³/s buiten groeiseizoen Controle door bakjes-model voor waterbeschikbaarheid 	<ul style="list-style-type: none"> Uitstroom: Uitkomst bakjes-model Instroom: Uitkomst Zeesluisformulering
Bergse Diepsluis	<ul style="list-style-type: none"> Zeespiegelstijging 	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van -1 m³/s op basis van historische data 	<ul style="list-style-type: none"> Uitstroom: Uitkomst bakjes-model Instroom: 0,5 kg/s schatting
Kreekraksluizen	Geen	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van -2 m³/s op basis van historische data 	<ul style="list-style-type: none"> Uitstroom: Uitkomst bakjes-model
Watervraag Hollandse Delta	Geen	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van -0,5 m³/s op basis van opgave Hollandse Delta 	<ul style="list-style-type: none"> Uitstroom: Uitkomst bakjes-model
Watervraag Brabantse Delta	Geen	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van -0,9 m³/s op basis van opgave Brabantse Delta 	<ul style="list-style-type: none"> Uitstroom: Uitkomst bakjes-model
Watervraag Scheldestromen	Geen	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van -3,0 m³/s op basis van opgave Scheldestromen 	<ul style="list-style-type: none"> Uitstroom: Uitkomst bakjes-model
Verdamping	<ul style="list-style-type: none"> Temperatuur 	<ul style="list-style-type: none"> Historische data (2003, 2018) 	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van 0 mg/l
Kwel	<ul style="list-style-type: none"> Zeespiegelstijging 	Geen	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van 3 kg/s op basis van literatuurgegevens 6 kg/s (gevoeligheidsanalyse)
Bathse spuisluis	<ul style="list-style-type: none"> Zeespiegelstijging 	<ul style="list-style-type: none"> Uitkomst van waterbalansmodel 	<ul style="list-style-type: none"> Uitstroom: Uitkomst bakjes-model Instroom: 0,1 kg/s schatting

Voor de Dintel en de Steenbergse Vliet worden gemeten tijdseries van 2017 en 2018 gebruikt, waarbij 2018 geïnterpreteerd is als een droog jaar. In het kader van de autonome ontwikkeling wordt voor de Dintel extra aanvoer via de Roode Vaart meegenomen van 2,5 m³/s van april tot en met juni en 1,5 m³/s van juli tot en met september. Tenslotte zijn voor 2018 de KNMI klimaatscenario's doorvertaald naar de afvoeren in 2050 en 2085:

- 2050: Winter +3%, lente +5%, zomer +1%, herfst +7%
- 2085: Winter +30%, lente +12%, zomer -23%, herfst +12%

De neerslag wordt consistent met Dintel en Steenbergse Vliet voor de jaren 2017 en 2018 genomen. Ook dezelfde klimaatscenario's worden gebruikt. In de modelberekeningen worden voor neerslag, Dintel en Steenbergse Vliet altijd gezamenlijk dezelfde aanname genomen. Deze aannames zijn immers niet onafhankelijk van elkaar te beschouwen.

De Krammersluizen worden conform de Planstudie Krammersluizen gestuurd op een dag-gemiddeld debiet van 9 m³/s in het groeiseizoen en 29 m³/s buiten het groeiseizoen. Het debiet in het groeiseizoen komt overeen met het huidige debiet. Buiten het groeiseizoen wordt een hoger debiet toegepast om de zoutvracht door de Krammersluizen te beperken en om zout af te voeren uit het Volkerak-Zoommeer. In het model wordt getoetst of er 29 m³/s beschikbaar is. Als dat niet het geval is (als de gecombineerde aanvoer van Volkeraksluizen, Dintel en Steenbergse Vliet laag is), wordt het debiet verlaagd tot minimaal 9 m³/s. In deze situatie is er geen afvoer door de Bathse spuisluis.

De zoutvracht van de Krammersluizen naar de voorhaven aan de Volkerak-Zoommeer zijde wordt berekend door de Zeesluisformulering (Bijlage C). Deze zoutvracht is afhankelijk van de waterstand op de Oosterschelde, het scheepvaartaanbod, de waterbeschikbaarheid en de sluisoperatie. In het kader van de autonome ontwikkeling wordt uitgegaan van het in gebruik zijn van het innovatieve zoet-zoutscheidingsysteem (IZZS), welke onder andere gebruik maakt van luchtbellenschermen. In de modellering wordt uitgegaan van maximale, optimale inzet van de luchtbellenschermen en dus van een maximale beperking van de zoutvracht. Er wordt derhalve niet gestuurd op beperking van de energiekosten voor het luchtbellenscherm.

Tabel 3.3 geeft de bruto en netto zoutvracht van de Krammersluizen naar de voorhaven aan de Volkerak-Zoommeer zijde afhankelijk van zeespiegelstijging. De bruto zoutvracht is de hoeveelheid zout die bij openstaande sluisdeuren aan de Volkerakzijde naar de voorhaven wordt getransporteerd. In andere fasen van de schutcyclus stroomt water vanuit het Volkerak-Zoommeer naar de Oosterschelde als nivelleerdebiet en spoeldebiet. Met deze debieten wordt zout afgevoerd. De netto zoutvracht is de bruto zoutvracht gecorrigeerd met het zout dat met het nivelleer- en spoeldebiet wordt afgevoerd.

Tabel 3.3 Gemiddeld debiet en bruto en netto zoutlast van de Krammersluizen naar de voorhaven aan de Volkerak-Zoommeer zijde. Debiet en bruto zoutlast zijn berekend met de Zeesluisformulering. De netto zoutlast is berekend met het bakjesmodel in D-WAQ. Het verschil tussen bruto en netto is dat met het debiet ook chloride uit de voorhaven wordt afgevoerd naar de Oosterschelde.

	Debiet Krammersluizen (m ³ /s)		Bruto zoutlast Krammersluizen (kg chloride/s)		Netto zoutlast Krammersluizen (kg chloride/s)	
	Buiten groeiseizoen	Groeiseizoen	Buiten groeiseizoen	Groeiseizoen	Buiten groeiseizoen	Groeiseizoen
0 cm	29,1	9,2	3,8	16,3	-4,3	10,1
10 cm	29,1	9,2	3,9	16,3	-4,2	10,2
20 cm	29,1	9,2	4,0	16,3	-4,2	10,2
30 cm	29,1	9,2	4,2	16,4	-4,1	10,2
40 cm	29,1	9,2	4,4	16,4	-4,1	10,2
50 cm	29,1	9,2	4,5	16,3	-4,0	10,2
60 cm	29,1	9,3	4,7	16,3	-4,0	10,1
70 cm	29,1	9,3	4,9	16,2	-3,9	10,1
80 cm	29,1	9,3	5,0	16,1	-3,9	10,0
90 cm	29,1	9,3	5,2	16,1	-3,8	9,9
100 cm	29,1	9,3	5,4	16,0	-3,8	9,9

Buiten het groeiseizoen wordt netto zout (chloride) afgevoerd naar de Oosterschelde. Door het hoge spoeldebiet is het IZZS effectief en komt relatief weinig zout in de voorhaven, terwijl het hoge debiet ook chloride afvoert uit de voorhaven (dat wil zeggen met de chlorideconcentratie van de voorhaven). In het groeiseizoen is minder water beschikbaar voor spoelen van de sluiscolken, omdat een limiet van daggemiddeld 9 m³/s wordt aangehouden in verband met natuurwaarden en schelpdierkweek in de Oosterschelde, en neemt de bruto zoutvracht naar de voorhaven toe. Omdat het spoeldebiet lager is, wordt minder zout afgevoerd.

De bruto en netto zoutvrachten blijken in de berekening met de zeeluisformulering vrijwel ongevoelig voor de zeespiegelstijging. Er is een complexe interactie met de sluisoperatie. Bij zeespiegelstijging is minder zoetwater uit het Volkerak-Zoommeer nodig voor nivellering, waardoor meer water beschikbaar is voor doorspoelen van de sluiscolken. Uit de berekening blijkt dat deze effecten elkaar nagenoeg compenseren.

Voor de Bergse diepsluis en de Kreekraksluizen wordt de jaargemiddelde historische data gebruikt. Deze debieten zijn relatief constant door het jaar heen. In de modellering wordt daarom een constante waarde van respectievelijk 1 m³/s en 2 m³/s aangenomen. Voor de Bergse diepsluis wordt daarnaast een zoutvracht van 0,5 kg chloride/s aangenomen. Hier zijn geen gegevens van bekend. De waarde is gebaseerd op modelvalidatie.

De watervraag van de omliggende waterschappen Hollandse Delta, Brabantse Delta en Scheldestromen is eveneens gebaseerd op historische data en is afgestemd met de betreffende deelnemers van het afstemoverleg zoetwater. De waarden zijn consistent met eerdere aannames voor de waterbalans in Deltares (2011b). In het model wordt – als versimpeling van de werkelijkheid – de watervraag jaarrond constant toegepast. Zo wordt de vraag getoetst of het Volkerak-Zoommeer aan de maximale watervraag kan voldoen.

Verdamping is gebaseerd op historische data van het KNMI voor stations Gilze-Rijen (2018) en Wilhelminadorp (2003). Beide jaren zijn droge jaren.

De huidige zoute kwel naar het Volkerak-Zoommeer is niet direct gemeten. De waarde is indirect afgeleid uit de water- en chloridebalans van het Volkerak-Zoommeer. Een waarde van 3 kg chloride/s wordt algemeen aangenomen (Deltares 2011c, 2012, 2013). Hoeveel de zoute kwel toeneemt onder invloed van zeespiegelstijging, is niet bekend. Om de gevoeligheid van het watersysteem te toetsen is als scenario een verdubbeling van de zoutvracht tot 6 kg chloride/s aangenomen.

De Bathse spuisluis wordt in het model gebruikt als de stuurknop om het waterpeil te handhaven. Het debiet door de Bathse spuisluis is gelijk aan het verschil tussen de som van alle instromende bronnen en de som van alle uitstromende bronnen. Als de som van alle uitstromende bronnen groter is dan de som van alle instromende bronnen, staat de Bathse spuisluis dicht en zal de waterstand in het Volkerak-Zoommeer dalen. De afvoercapaciteit van de Bathse spuisluis is afhankelijk van de waterstand op de Westerschelde. Het model toetst op dagbasis hoeveel maximaal afgevoerd kan worden. Als de benodigde afvoer om het waterpeil te handhaven groter is dan de maximale capaciteit, kan niet alles afgevoerd worden en zal de waterstand in het Volkerak-Zoommeer stijgen. Zoals beschreven bij de Krammersluizen wordt buiten het groeiseizoen getoetst of er voldoende water voor de Krammersluizen beschikbaar is. In geval van onvoldoende beschikbaarheid – minder dan 29 m³/s – wordt geen water afgevoerd via de Bathse spuisluis. Afvoer door de Krammersluizen heeft dus voorrang op afvoer door de Bathse spuisluis.

Voor de zoutvracht door de Bathse spuisluis wordt een waarde van 0,1 kg chloride/s aangenomen. In het kader van autonome ontwikkeling is aangenomen dat de rennovatie van de Bathse spuisluis is afgerond. De zoutvracht in deze situatie is niet bekend. De waarde is gebaseerd op indirecte toetsing (validatie) met het model.

3.1.3 Resultaten klimaatrobustheid peilbeheer

De klimaatrobustheid van het Volkerak-Zoommeer wordt kwantitatief getoetst op de grenzen van het dagelijkse streefpeil, namelijk NAP -0,10 m voor de minimale waterstand en NAP +0,15 cm voor de maximale waterstand (Figuur 2.2).

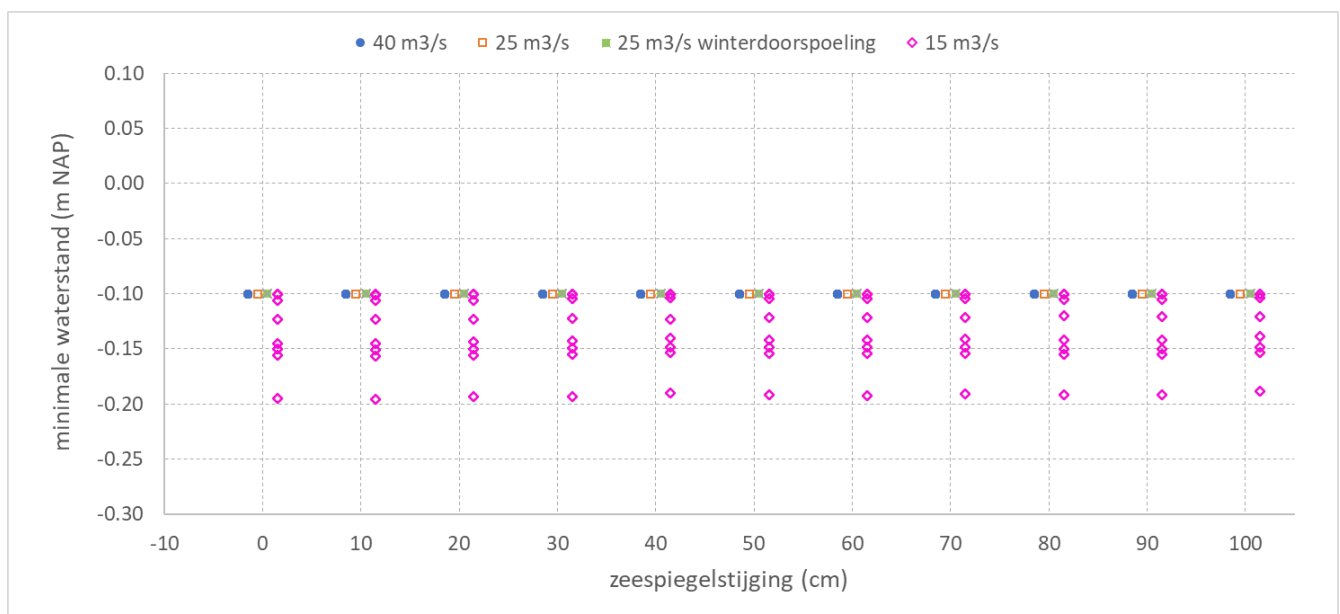
De peilen voor waterveiligheid, watertekort (NAP -0,25 m) en wateroverlast (NAP +0,50 m) kunnen niet kwantitatief getoetst worden, omdat deze peilgrenzen voorkomen in kortdurende, extreme situaties die niet in de aannames van deze modelaanpak zijn meegenomen. Voor toetsing van deze peilgrenzen is door HKV (2018) een studie met een probabilistisch model uitgevoerd. Ook Noodwaterberging kan niet afgeleid worden op basis van deze resultaten, omdat daarvoor andere (statistische) aannames voor de rivieraanvoer nodig zijn die buiten de scope van deze fase vallen. In hoofdstuk 4 wordt op deze beheerfuncties teruggekomen.

Onderschrijding van de minimale waterstand van NAP -0,10 m

Uit Figuur 3.1 blijkt dat alleen bij de laagste aanvoer van 15 m³/s via de Volkeraksluizen een onderschrijding van de minimale waterstand zou kunnen ontstaan. Die onderschrijding is niet afhankelijk van de zeespiegelstijging, want de onderschrijding is voor alle waarden van zeespiegelstijging gelijk.

Onderschrijding treedt op als de wateraanvoer kleiner is dan de waterafvoer. Bij 15 m³/s via de Volkeraksluizen treedt deze situatie op als de aanvoer vanuit Brabant laag is, waardoor niet in de vraag vanuit de Krammersluizen, de watervraag vanuit de waterschappen en verdamping voorzien kan worden.

In de praktijk zijn maatregelen te nemen en worden maatregelen genomen om dergelijke situaties te voorkomen of te ondervangen zoals het opzetten van het waterpeil om een buffer te creëren en/of het tijdelijk inlaten van meer water via de Volkeraksluizen. Bij opzet van het waterpeil tot NAP +0,15 m is een buffer van 25 cm beschikbaar. De berekende onderschrijding bedraagt niet meer dan 10 cm en past derhalve ruim in deze buffer. Deze maatregelen zijn niet in het bakjes-model opgenomen. Geconcludeerd wordt daarom dat onderschrijding van het minimum waterpeil ook bij 15 m³/s via de Volkeraksluizen operationeel vermeden zal kunnen worden.



Figuur 3.1 Relatie tussen zeespiegelstijging en minimale waterstand van het Volkerak-Zoommeer voor verschillende aannames voor aanvoer door de Volkeraksluizen. Niet alle maatregelen om een onderschrijding van de minimale waterstand te voorkomen zijn in het bakjes-model opgenomen (zie tekst).

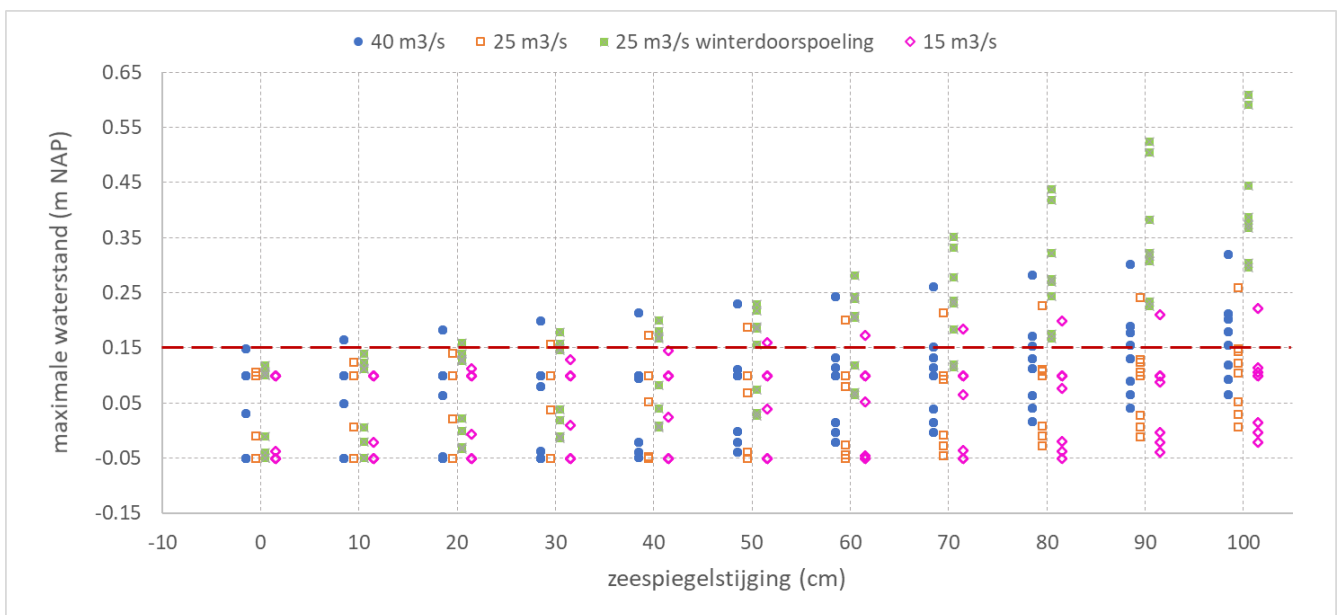
Overschrijding van de maximale waterstand van NAP +0,15 m

Overschrijding van de maximale waterstand treedt op als de wateraanvoer groter is dan de (mogelijkheid tot) waterafvoer. De capaciteit van de Bathse spuisluis is hiervoor bepalend. Deze neemt af van circa 135 m³/s in de huidige situatie tot circa 100 m³/s bij 50 cm zeespiegelstijging en circa 70 m³/s bij 100 cm zeespiegelstijging. Bij hogere aanvoer via de Volkeraksluizen in combinatie met periode van hoge aanvoer vanuit Brabant neemt de frequentie waarin de afvoercapaciteit van de Bathse spuisluis niet voldoende is, toe met grotere zeespiegelstijging (Figuur 3.2).

Bij 40 m³/s aanvoer via de Volkeraksluizen treedt overschrijding van de maximale waterstand bij een kleinere zeespiegelstijging op dan bij een aanvoer van 25 m³/s. Een overschrijding is echter in het operationeel waterbeheer te voorkomen door tijdelijk de aanvoer via de Volkeraksluizen te verminderen. Bij hoge aanvoer van uit Brabant gebeurt dat ook nu al. Ook is aanvullende afvoer via de Krammersluizen mogelijk. Deze mogelijkheden tot operationeel waterbeheer is niet het bakjesmodel opgenomen.

In het scenario met 100 m³/s winterdoorspoeling treedt bij toenemende zeespiegelstijging de grootste overschrijding op. Dit is gerelateerd aan de afnemende capaciteit van de Bathse spuisluis. Bij toenemende zeespiegelstijging zal derhalve het regime van winterdoorspoeling opnieuw ingepast moeten worden. Tot circa 50 cm zeespiegelstijging lijkt dit nog niet aan de orde.

Geconcludeerd wordt dat overschrijding van de maximale waterstand zeer waarschijnlijk niet zal optreden onder invloed van zeespiegelstijging, hoewel in sommige situaties aanpassing van het waterbeheer nodig zal zijn. Verwacht wordt dat de mogelijkheden binnen het operationele waterbeheer hiervoor toereikend zijn.



Figuur 3.2 Relatie tussen zeespiegelstijging en maximale waterstand van het Volkerak-Zoommeer voor verschillende aannames voor aanvoer door de Volkeraksluizen

Afhankelijkheid van zeespiegelstijging

Zowel uit Figuur 3.1 voor de minimale waterstand als uit Figuur 3.2 voor de maximale waterstand blijkt dat de afhankelijkheid van zeespiegelstijging relatief beperkt is. Tot 1 meter zeespiegelstijging wijken de waterstanden niet of beperkt af van de huidige waterstand bij 0 m zeespiegelstijging. De maximale waterstand loopt wel op bij toenemende zeespiegelstijging, maar verwacht wordt dat dit met aanpassing van het waterbeheer te corrigeren en aan te passen is.

Geconcludeerd kan worden dat de waterstand in het Volkerak-Zoommeer afhankelijk is van 1) het operationeel waterbeheer, en 2) de natuurlijke variatie van met name de afvoer van de Dintel en de Steenbergse Vliet, en niet of nauwelijks van zeespiegelstijging.

3.1.4 Resultaten klimaatrobustheid zoetwatervoorziening (chlorideconcentratie)

De zoetwatervoorziening onderscheidt twee componenten: 1) Is er voldoende water?, en 2) Is het water van goede kwaliteit, ofwel is de chlorideconcentratie lager dan 450 mg/l? Het eventuele voorkomen van blauwalgen is niet meegenomen in deze kwantitatieve beschouwing.

Of er voldoende water is, wordt getoetst door te controleren of aan de peilgrenzen en aan de toegestane chlorideconcentratie wordt voldaan. In het model wordt continu de maximale watervraag opgelegd. Als aan de peilgrenzen en aan de toegestane chlorideconcentratie wordt voldaan, houdt dat ook in dat aan de maximale watervraag kan worden voldaan. Figuur 3.3 en Tabel 3.4 laten de relatie tussen zeespiegelstijging en de maximale chlorideconcentratie bij Bathse brug in het groeiseizoen zien voor een zoute kwel van 3 kg chloride/s. De maximale chlorideconcentratie is niet afhankelijk van de zeespiegelstijging. Dit komt omdat de zoutvracht door de Krammersluizen nauwelijks afhankelijk is van de zeespiegelstijging (Tabel 3.3), waardoor de totale zoutvracht vrijwel gelijk blijft. Dit heeft te maken met het schutproces. Bij toenemende zeespiegelstijging is minder zoetwater nodig voor nivellering, waardoor meer water beschikbaar is als spoeldebiet. Beide effecten compenseren elkaar wat betreft de netto zoutvracht (zie §3.1.2).

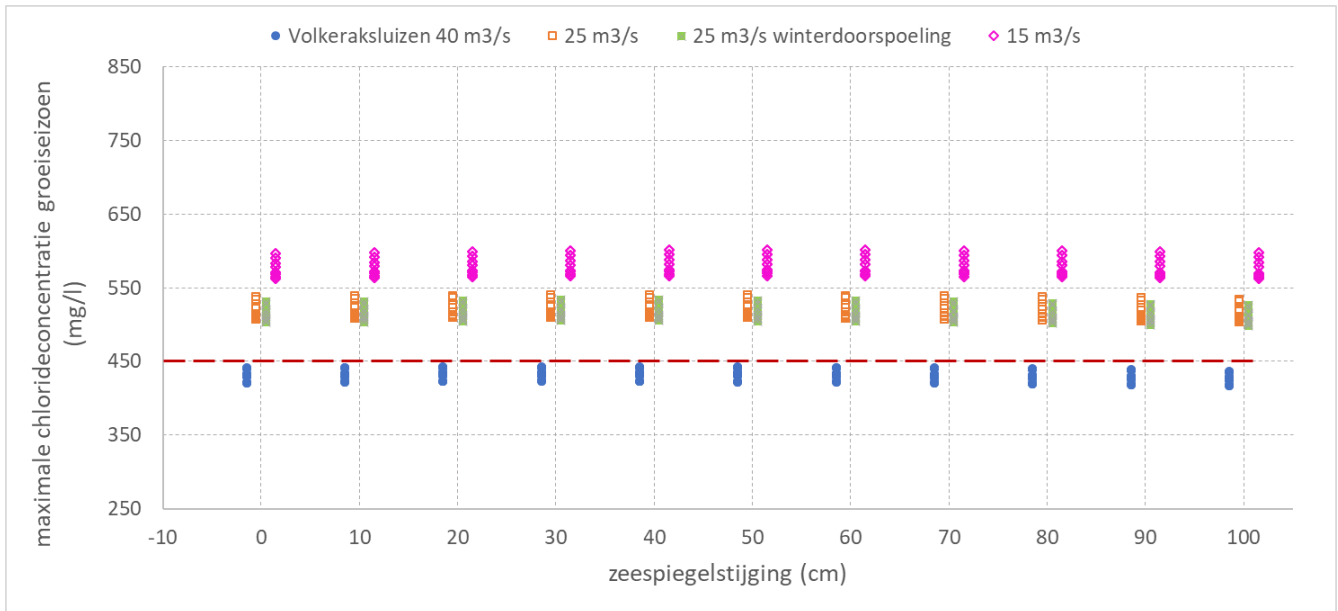
De maximale chlorideconcentratie is daarmee vooral afhankelijk van de zoetwateraanvoer. Bij hogere aanvoer via de Volkeraksluizen is de maximale chlorideconcentratie lager. Bij de voorziene aanvoer van 40 m³/s na ingebruikname van de IZZS blijft de maximale chlorideconcentratie onder de 450 mg/l drempelwaarde. Bij lagere aanvoer van bijvoorbeeld 25 m³/s zal de maximale chlorideconcentratie bij Bathse brug de drempelwaarde overschrijden. Dat is het geval in de huidige situatie (na ingebruikname van IZZS) en bij 100 cm zeespiegelstijging. Overschrijding van de drempelwaarde gebeurt over een lange periode van een tot twee maanden (Tabel 3.5).

Winterdoorspoeling heeft beperkt effect (Figuur 3.3), omdat de maximale chlorideconcentratie aan het eind van het groeiseizoen bereikt wordt. Het effect van de winterdoorspoeling tot 15 maart is dan nagenoeg uitgewerkt.

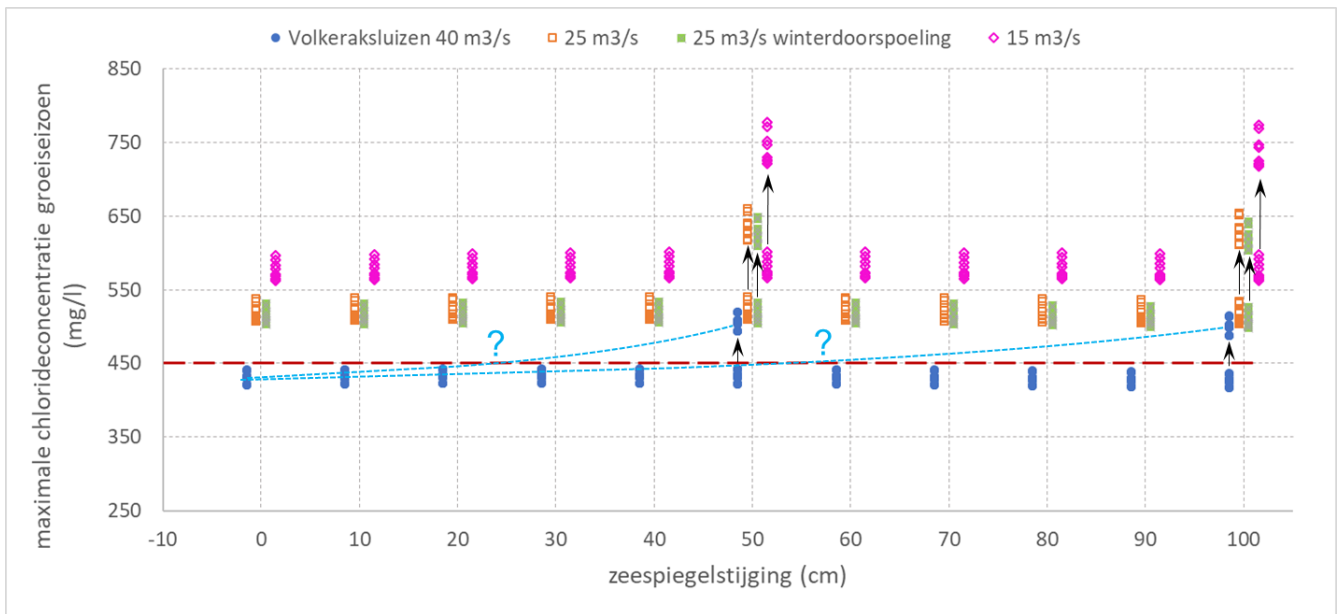
Afhankelijkheid van zoute kwel

Figuur 3.4 en Tabel 3.6 laten het effect zien van een verdubbeling van de zoute kwel van 3 kg/s naar 6 kg/s. Dat de kweldruk toeneemt met zeespiegelstijging is zeker, maar hoeveel en hoe snel is niet bekend. Figuur 3.4 laat daarom twee varianten zien, waarbij de verdubbeling bij 50 cm en bij 100 cm zeespiegelstijging zal optreden. Uit de berekening blijkt de overschrijding van de drempelwaarde bij Bathse brug optreedt als de kweldruk toeneemt. Met de huidige kennis is niet aan te geven bij welke mate van zeespiegelstijging dat zal zijn.

Geconcludeerd wordt dat de maximale chlorideconcentratie onder de 450 mg/l drempelwaarde gehandhaafd kan worden, mits 1) er circa 40 m³/s wateraanvoer is via de Volkeraksluizen, en 2) de zoute kwel niet substantieel toeneemt.



Figuur 3.3 Relatie tussen zeespiegelstijging en maximale chlorideconcentratie bij Bathse brug in het groeiseizoen voor verschillende aannames voor aanvoer door de Volkeraksluizen. De zoute kwel is 3 kg chloride/s.



Figuur 3.4 Effect van zoute kwel op de relatie tussen zeespiegelstijging en maximale chlorideconcentratie bij Bathse brug in het groeiseizoen voor verschillende aannames voor aanvoer door de Volkeraksluizen

Tabel 3.4 Berekende maximale chlorideconcentratie afhankelijk van zeespiegelstijging – In het groeiseizoen bij 40 m³/s aanvoer via de Volkeraksluizen en 3 kg/s kweldruk

Aanvoer Volkeraksluizen	Kweldruk	Volkerak			Eendracht			Bathse Brug		
		0 cm	50 cm	100 cm	0 cm	50 cm	100 cm	0 cm	50 cm	100 cm
40 m ³ /s Uitgangspunt beheer IZZS	3 kg/s	301	302	298	402	403	396	441	443	437

Tabel 3.5 Berekende maximale chlorideconcentratie en aantal dagen overschrijding van 450 mg/l drempelwaarde in het groeiseizoen bij verschillende aanvoer via de Volkeraksluizen en 3 kg/s kweldruk

Aanvoer Volkeraksluizen	Kweldruk	Volkerak		Eendracht		Bathse Brug	
		Maximum chloride	Dagen overschrijding	Maximum chloride	Dagen overschrijding	Maximum chloride	Dagen overschrijding
40 m ³ /s Uitgangspunt beheer IZZS	3 kg/s	301	0	402	0	441	0
25 m ³ /s		406	0	509	50	538	50
15 m ³ /s		519	50	606	70	597	60

Tabel 3.6 Berekende maximale chlorideconcentratie en aantal dagen overschrijding van 450 mg/l drempelwaarde in het groeiseizoen bij 40 m³/s aanvoer via de Volkeraksluizen en verschillende kweldruk

Aanvoer Volkeraksluizen	Kweldruk	Volkerak		Eendracht		Bathse Brug	
		Maximum chloride	Dagen overschrijding	Maximum chloride	Dagen overschrijding	Maximum chloride	Dagen overschrijding
40 m ³ /s Uitgangspunt beheer IZZS	3 kg/s	301	0	402	0	441	0
	6 kg/s	316	0	436	0	520	65

4 Klimaatrobustheid overige beheer- en gebruiksfuncties

In Tabel 2.1 zijn dertien beheer- en gebruiksfuncties geïdentificeerd die voorkomen in het Volkerak-Zoommeer en beïnvloed kunnen worden door klimaatverandering. In hoofdstuk 3 is de beheerfunctie peilbeheer kwantitatief beoordeeld. De beheerfunctie zoetwatervoorziening komt impliciet overeen met de gebruiksfunctie Landbouw.

In Tabel 4.1 wordt voor de overige beheer- en gebruiksfuncties inclusief Landbouw een kwalitatieve beschouwing en toetsing gegeven van de klimaatrobustheid. Uit de tabel blijkt dat de meeste functies als klimaatrobust worden beschouwd, omdat het peilbeheer klimaatrobust gehandhaafd kan blijven tot 1 m zeespiegelstijging.

De enige functie die als niet klimaatrobust wordt beschouwd is Noodwaterberging (waterberging in het kader van Ruimte voor de Rivier). Met stijgende zeespiegel en hogere rivierafvoer zal de frequentie van inzet sterk toenemen tot 1/25 jaar of vaker. Omdat er geen drempelwaarde bekend is, is de klimaatrobustheid niet met zekerheid te toetsen. Overigens wordt niet verwacht dat een drempelwaarde voor 2050 wordt overschreden.






Functies die direct of indirect gerelateerd zijn aan blauwalgen hebben een licht negatieve toetsing met de nodige onzekerheid. Het betreft de functies Waterkwaliteit (KRW), Zwemwater, Waterrecreatie en Woonomgeving. Verwacht wordt dat door temperatuurstijging als gevolg van klimaatverandering gunstigere condities ontstaan voor het voorkomen van blauwalgen. In hoeverre dit (vaker) een drempelwaarde overschrijdt, die ook in de huidige situatie soms overschreden worden, is nog niet aan te geven. Dit is een resterende onzekerheid.

Voor het peilbeheer gerelateerd aan de peilgrenzen voor watertekort en wateroverlast en voor de waterveiligheid kan dit rapport geen uitspraak doen. Om deze op klimaatrobustheid te toetsen dient de gestandaardiseerde Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) voor (peil)toetsing in het kader van hoogwaterveiligheid toegepast te worden. Voor lage waterstanden is voor zover bekend geen standaard instrumentarium beschikbaar.
















Tabel 4.1 Kwalitatieve toetsing van klimaatrobustheid overige beheer- en gebruiksfuncties Volkerak-Zoommeer




Beheerfunctie (B) / Gebruiksfunctie (G)	Kwalitatieve beschouwing klimaatrobustheid	Toetsing
Waterbeheer peilgrenzen calamiteit (B)	Bij overschrijding van NAP +0,50 m is sprake van wateroverlast (Hydrologic, 2017). In HKV (2015) zijn berekeningsresultaten van het waterveiligheidsmodel-instrumentarium Hydra-Zoet getoond. Deze laten zien dat overschrijding van NAP +0,50 m met een kans van 1/80 jaar voorkomt. Het door HKV ontwikkelde probabilistische model laat zien dat met 0,3 m zeespiegelstijging de kans toeneemt tot circa 1/60 jaar ² . Niet bekend is met welke frequentie overschrijding kan optreden bij hogere zeespiegelstijging.	?
	Bij onderschrijding van NAP -0,25 m is sprake van watertekort (Hydrologic, 2017). De berekeningen in dit rapport geven aan dat onderschrijding van deze peilgrens niet beïnvloed wordt door klimaatverandering. Omdat onderschrijding kan ontstaan bij kortdurende calamiteit, zijn in het model niet alle factoren meegenomen, waardoor een harde conclusie niet mogelijk is.	?

² Het probabilistisch model in HKV (2015, Figuur 8-16) toont een toename van circa 1/90 jaar naar circa 1/70 jaar kans op overschrijding van NAP +0,50 m. Het verschil is kwalitatief toegepast op de Hydra-Zoet waarde bij NAP +0,50 m, omdat de Hydra-Zoet berekeningswaarde de standaard is voor waterveiligheid.

Beheerfunctie (B) / Gebruiksfunctie (G)	Kwalitatieve beschouwing klimaatrobustheid	Toetsing
Waterveiligheid (B)	<p>Het effect van klimaatverandering op waterveiligheid is onderwerp van het Deltaprogramma Waterveiligheid. Als onderdeel van het Hoogwaterbeschermingsprogramma worden momenteel alle keringen getoetst op de nieuwe normering, waarbij het zichtjaar 2050 beschouwd wordt. De toetsronde wordt naar verwachting in 2023 afgerond³.</p> <p>In dit rapport wordt geen uitspraak gedaan over de klimaatrobustheid van Waterveiligheid.</p>	
Noodwaterberging (B)	<p>Tijdens de herijking van het Deltaprogramma is vastgesteld dat “bij een zeespiegelstijging van 60 cm en een maatgevende Rijnafoer van 18.000 m³/s de kans op inzet toeneemt tot 1/25 per jaar ten opzichte van 1/1400 per jaar nu (Rijkswaterstaat, 2005). Bij verdere zeespiegelstijging zal de kans op inzet verder toenemen, waardoor de berging niet langer het karakter van noodmaatregel heeft en er structurele consequenties voor gebruiksfuncties zullen zijn” (Deltares, 2019). Deze situatie kan rond 2075 voorkomen in het klimaatscenario Stoom en pas ver na 2100 in het klimaatscenario Rust (KNMI, 2015).</p> <p>Voor zover bekend is er geen drempelwaarde afgesproken voor de frequentie van inzet van de noodwaterberging. Het is aannemelijk dat een frequentie van 1/25 jaar of vaker niet als klimaatrobust beschouwd kan worden. Op welke termijn het knikpunt bereikt wordt afhankelijk van het klimaatscenario voor rivierafvoer is niet aan te geven. Omdat tot 2050 de rivierafvoer nog niet veel toeneemt ten opzichte van heden, is het niet aannemelijk dat voor 2050 een knikpunt wordt bereikt.</p>	 
Waterkwaliteit (B)	<p>Waterkwaliteit wordt getoetst aan de KRW normen. Omdat uitgegaan wordt van de autonome ontwikkeling waarbij met name de ingebruikname van de IZZS Krammersluizen en de daarbij horende hogere aanvoer van circa 40 m³/s door de Volkeraksluizen van belang zijn, is de KRW-toetsing van de huidige situatie maar beperkt toepasbaar. Daarnaast is ook de autonome ontwikkeling van de nutriëntenvracht vanuit Dintel en Steenbergse Vliet van belang. Deze autonome ontwikkeling is niet bekend, maar een afname is waarschijnlijk in het licht van de huidige KRW maatregelen en mogelijk te verwachten maatregelen in het kader van de stikstofproblematiek. Op basis van de nu beschikbare kennis en informatie is toetsing aan de KRW-normen voor de autonome ontwikkeling nog niet mogelijk.</p> <p>Uit de beschrijving van de afhankelijkheden blijkt ook dat de toetsing van de chemische waterkwaliteit niet of nauwelijks afhankelijk is van klimaat gerelateerde factoren. De chemische waterkwaliteit kan derhalve als klimaatrobust worden beoordeeld (wat dus niet hetzelfde is als KRW-robust). Wat betreft de ecologische kwaliteit wordt de beschouwing hier beperkt tot blauwalgen. De overige ecologische componenten (macrofauna, waterplanten, vis) komt bij Natuurbeheer aan de orde.</p>	 

³ <https://www.deltacommissaris.nl/deltaprogramma/gebieden-en-generieke-themas/veiligheid>

Beheerfunctie (B) / Gebruiksfunctie (G)	Kwalitatieve beschouwing klimaatrobustheid	Toetsing
Inclusief blauwalgen	Temperatuurstijging door klimaatverandering zorgt waarschijnlijk voor gunstigere condities voor het voorkomen van blauwalgen. De overige condities die nodig zijn voor blauwalgenbloei, namelijk vrij stagnant of zwak stromend water en voldoende nutriënten, zijn in het huidige Volkerak-Zoommeer aanwezig en blijven dat waarschijnlijk ook in de toekomstige situatie. Er is derhalve vooralsnog geen reden om aan te nemen dat blauwalgenproblematiek verbetert. De klimaatrobustheid wordt als licht negatief beoordeeld met de nodige onzekerheid.	 
Natuurbeheer / Natuur (B) / (G)	Voor natuur wordt onderscheid gemaakt tussen de water-gerelateerde natuur inclusief vissen en vogels en de terrestrische natuur. In §3.1.3 is getoond dat waterstanden niet beïnvloed worden door klimaatverandering. Er wordt vanuit gegaan dat ook de maatregelen voor vismigratie bij de kunstwerken ingezet kunnen blijven worden bij zeespiegelstijging. Voor vissen wordt daarom geen direct effect verwacht. Voor vogels is het klimaatrobust kunnen handhaven van de waterstand gunstig voor bijvoorbeeld broedzones etc. Een hogere watertemperatuur kan voor macrofauna schadelijk zijn, maar of dit gaat optreden in het Volkerak-Zoommeer is vooralsnog niet bekend. Daarom wordt de water-gerelateerde natuur inclusief de visstand en vogels vooralsnog als klimaatrobust beoordeeld met een vraagteken voor het effect van temperatuur. De terrestrische natuur is in deze studie niet beschouwd, omdat deze niet afhankelijk is van het waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer.	  
Scheepvaart (beroeps) (G)	In §3.1.3 is getoond dat waterstanden niet beïnvloed worden door klimaatverandering. Voor scheepvaart op het Volkerak-Zoommeer wordt dan ook geen effect van klimaatverandering verwacht. Een eventuele impact op de schutcapaciteit als gevolg van zeespiegelstijging is niet meegenomen in deze kwalitatieve beschouwing.	
Zwemwater (G)	Voor de zwemwaterkwaliteit wordt verwezen naar de eerdere toetsing voor blauwalgen onder de beheerfunctie Waterkwaliteit.	 
Beroepsvisserij (open water) (G)	In §3.1.3 is getoond dat waterstanden niet beïnvloed worden door klimaatverandering. Er wordt vanuit gegaan dat ook de maatregelen voor vismigratie bij de kunstwerken ingezet kunnen blijven worden bij zeespiegelstijging. Voor vissen wordt daarom geen direct effect verwacht.	
Sportvisserij (G)	In §3.1.3 is getoond dat waterstanden niet beïnvloed worden door klimaatverandering. Er wordt vanuit gegaan dat ook de maatregelen voor vismigratie bij de kunstwerken ingezet kunnen blijven worden bij zeespiegelstijging. Voor vissen wordt daarom geen direct effect verwacht.	
Landbouw (G)	In §3.1.4 is getoond dat de zoetwatervoorziening klimaatrobust is tot 1 m zeespiegelstijging (voldoende water beschikbaar van goede kwaliteit, chlorideconcentratie lager dan 450 mg/l). De kwaliteit ten opzichte van blauwalgen wordt buiten deze toetsing gehouden.	
Recreatievaart (G)	In §3.1.3 is getoond dat waterstanden niet beïnvloed worden door klimaatverandering. Voor recreatievaart op het Volkerak-Zoommeer wordt dan ook geen effect van klimaatverandering verwacht.	
Overige waterrecreatie (G)	In §3.1.3 is getoond dat waterstanden niet beïnvloed worden door klimaatverandering. Zwemwater is als aparte functie eerder beschreven. Voor overige waterrecreatie kan blauwalgen ook een belemmerende factor zijn. De kwalitatieve toetsing voor klimaatrobustheid geeft daarom een gemengd beeld.	  

Beheerfunctie (B) / Gebruiksfunctie (G)	Kwalitatieve beschouwing klimaatrobustheid	Toetsing
Woonomgeving (G)	Omdat het waterpeil klimaatrobust is, zal de woonomgeving grotendeels ook klimaatrobust zijn. Ook hier geeft de onzekerheid over blauwalgen enige twijfel over de klimaatrobustheid.	  

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Samengevatte inleiding en afbakening van het uitgevoerde onderzoek

Door klimaatverandering zal de zeespiegel stijgen, de luchttemperatuur toenemen en de neerslag en rivierafvoer wijzigen, meer in de winter, minder in de zomer. Hoe snel de verandering zal gaan, is niet bekend. Daarom wordt met klimaatscenario's gewerkt (KNMI, 2015).

Klimaatverandering roept de vraag op hoe “*klimaatrobuust*” het Volkerak-Zoommeer is. Met klimaatrobuust wordt bedoeld tot welke mate van klimaatverandering – bijvoorbeeld hoeveel centimeter zeespiegelstijging – de beheerdoelen en/of gebruiksfuncties van het Volkerak-Zoommeer gehandhaafd kunnen blijven. De beheerdoelen zijn waterveiligheid, waterbeheer (waterpeil en chlorideconcentratie), waterkwaliteit (KRW) en natuur (Natura2000, concept aanwijzingsbesluit). Gebruiksfuncties zijn beroepsscheepvaart, landbouw, recreatie (zwemmen, recreatievaart, overig), beroepsvisserij, sportvisserij en leefomgeving.

In dit onderzoek is de klimaatrobuustheid van het Volkerak-Zoommeer voor het regulier peilbeheer en de zoetwatervoorziening kwantitatief onderzocht. De overige beheerdoelen en gebruiksfuncties zijn in dit onderzoek alleen kwalitatief beoordeeld op klimaatrobuustheid.

Het regulier peil houdt de waterstand tussen NAP -0,10 m en NAP +0,25 m (Waterakkoord, 2016). De zoetwatervoorziening onderscheidt of aan de watervraag van de waterschappen kan worden voldaan en of het water van goede kwaliteit is, ofwel dat de chlorideconcentratie bij Bathse Brug in het groeiseizoen (15 maart-15 september) lager dan 450 mg/l is. Het voorkomen van blauwalgen is ook van belang voor de goede kwaliteit. Het voorkomen van blauwalgen is niet kwantitatief onderzocht.

De kwantitatieve analyse maakt gebruik van een model dat de water- en chloridebalans van het Volkerak-Zoommeer doorrekent op basis van aannames voor de in- en uitgaande debieten en bijbehorende chlorideconcentratie. Daarnaast wordt een aantal zoutvrachten meegenomen. Voor de belangrijkste in- en uitgaande termen is een aantal varianten onderscheiden. Onderstaande tabel geeft een overzicht.

Ingaand	Varianten	Uitgaand	Varianten
Volkeraksluizen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 40 m³/s (uitgangspunt IZZS) ▪ 25 m³/s ▪ 25 m³/s met winterdoorspoeling ▪ 15 m³/s 	Krammersluizen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 9 m³/s in groeiseizoen & 29 m³ buiten groeiseizoen
Dintel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tijdreeks 2017 ▪ Tijdreeks 2018 ▪ Tijdreeks 2018 + klimaatscenario 2050 ▪ Tijdreeks 2018 + klimaatscenario 2085 	Bergse diepsluis	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 m³/s
Steenbergse Vliet		Kreekkraksluizen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 m³/s
Neerslag		Watervraag Hollandse Delta	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,5 m³/s
Zoute kwel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3 kg/s (huidige schatting) ▪ 6 kg/s 	Watervraag Brabantse Delta	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,9 m³/s
Zoutvracht Krammersluizen	<i>Berekend met model</i>	Watervraag Scheldestromen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3,0 m³/s
Zoutvracht Bergse diepsluis	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,5 kg/s 	Bathse spuisluis	<i>Berekend met model</i>
Zoutvracht Bathse spuisluis	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,1 kg/s 	Verdamping	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tijdreeks 2003 ▪ Tijdreeks 2018

Met het water- en chloridebalansmodel zijn alle combinaties van bovenstaande varianten doorgerekend voor zeespiegelstijgingen tot 1 m. De berekeningsresultaten zijn getoetst aan het behalen van de reguliere peilgrenzen (NAP -0,10/+0,25 m) en de chlorideconcentratie bij Bathse brug (450 mg/l).

Zekerheden en onzekerheden

Met het water- en chloridebalansmodel kan het regulier peil met een nauwkeurigheid van enkele centimeters en de chlorideconcentratie met een nauwkeurigheid van $\pm 10\%$ berekend worden (inschatting op basis van expert judgement). De extreme waterstanden voor wateroverlast (NAP +0,50 m) en watertekort (NAP -0,25 m) zijn met dit model niet getoetst omdat hiervoor een andere en uitgebreidere set varianten nodig is. Voor de klimaatrobuuste toetsing van waterveiligheid is dit model niet geschikt.

Het operationeel waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer is in de praktijk op dagbasis waarbij enkele dagen tot weken vooruitgekeken wordt naar de verwachte rivierafvoer, neerslag, etc. In de (model)aanpak van dit rapport worden grove aannames genomen zoals een jaarrond debiet door de Volkeraksluizen. In de operationele praktijk is dus (veel) meer mogelijk dan in dit rapport is toegepast. Met de aannames zijn de grote lijnen van het waterbeheer verkend. Als de grote lijnen aan de klimaatrobuustheidstoets voldoen, is daarbinnen optimalisatie en detaillering mogelijk. De toetsing van de grote lijnen wordt als zeker ingeschat. Deze toetsing geeft ook aan welke aannames het meest cruciaal zijn, zoals in onderstaande conclusies is aangegeven.

5.2 Conclusies

De conclusies onderscheiden de kwantitatieve beoordeling van het regulier peilbeheer en de zoetwatervoorziening en de kwalitatieve beoordeling van de overige beheer- en gebruiksfuncties waaronder het peilbeheer van extreme waterstanden, waterveiligheid, waterkwaliteit en natuur.

Op de vraagstelling “Hoe lang kunnen de gebruiksfuncties van het Volkerak-Zoommeer met het huidige waterbeheer gehandhaafd blijven onder invloed van klimaatverandering?” worden de volgende antwoorden gegeven:

- Als voldaan wordt aan drie randvoorwaarden, zijn het regulier peilbeheer en de zoetwatervoorziening van het Volkerak-Zoommeer klimaatrobuust tot 1 m zeespiegelstijging, dat wil zeggen tot na 2100 volgens de klimaatscenario's (KNMI, 2015). Dit betekent dat:
 - Peilbeheer en zoetwatervoorziening blijven dan mogelijk binnen de reguliere grenzen van het Waterakkoord (2016):
 - Maximale chlorideconcentratie in het groeiseizoen (lager dan 450 mg/l)
 - Minimale waterstand (hoger dan NAP -10 cm)
 - Maximale waterstand (lager dan NAP +15 cm)
 - Bij een zeespiegelstijging van meer dan 50 cm is wellicht beperkte aanpassing van het operationeel waterbeheer nodig, omdat de afvoercapaciteit van de Bathse spuisluis beperkend wordt bij veel wateraanvoer via Volkeraksluizen, Dintel en Steenbergse Vliet. Verwacht wordt dat de mogelijkheden voor aanpassing van het operationeel waterbeheer met de huidige kustwerken toereikend zijn.
- De drie randvoorwaarden waaraan voldaan moet worden, zijn:
 1. De wateraanvoer door de Volkeraksluizen moet jaarrond circa 40 m³/s zijn.
 - Dit is meer dan de huidige 20-25 m³/s tijdens het groeiseizoen, maar past binnen de maximale watervraag aan het Hollands Diep van 50 m³/s (Waterakkoord, 2016).

- Optimalisatie van het operationeel waterbeheer is waarschijnlijk mogelijk met tijdelijk minder wateraanvoer. Hoeveel minder en hoe tijdelijk is niet onderzocht.
2. De kweldruk mag niet substantieel toenemen boven de huidige (geschatte) waarde van 3 kg/s.
- Niet bekend is hoe veel en hoe snel de kweldruk stijgt met zeespiegelstijging. Dit is een kennisleemte.
 - Vermoedelijk is het tot 2050 (met een relatief beperkte zeespiegelstijging van 10-20 cm ten opzichte van heden) nog geen knikpunt.
3. Na ingebruikname van de nieuwe IZZS (Innovatieve Zoet-Zout Scheiding) Krammersluizen moet tijdens lerend-implementeren (2025-2030) de operationele aansturing worden geoptimaliseerd.
- De Krammersluizen zijn nu en blijven met IZZS een belangrijke bron van zout.
 - Aannames voor debiet naar de Oosterschelde en zoutvracht naar het Volkerak-Zoommeer zijn gebaseerd op best beschikbare kennis.
 - Pas na ingebruikname IZZS kunnen aannames getoetst worden (lerend implementeren en monitoringsprogramma). Dan kan blijken dat er meer of minder klimaatrobustheid is dan we nu denken.
- De peilgrenzen voor wateroverlast (NAP +0,50 m met 1/100 jaar herhalingstijd) en watertekort (NAP -0,25 m) zijn in dit onderzoek niet getoetst op klimaatrobustheid. Het is aannemelijk dat de frequentie van overschrijding dan wel onderschrijding toeneemt met klimaatverandering, maar in dit rapport is niet onderzocht of en wanneer een drempelwaarde wordt bereikt.
 - De overige beheer- en gebruiksfuncties zijn kwalitatief getoetst:
 - De functie Noodwaterberging is waarschijnlijk niet klimaatrobust. Met 60 cm zeespiegelstijging en 18.000 m³/s rivierafvoer zal de frequentie van inzet toenemen tot 1/25 jaar (Rijkswaterstaat, 2005). Omdat geen drempelwaarde gedefinieerd is voor de frequentie van inzet, kan niet aangegeven hoe lang het Volkerak-Zoommeer nog klimaatrobust is voor Noodwaterberging. Overigens wordt niet verwacht dat een drempelwaarde voor 2050 wordt overschreden, omdat zeespiegelstijging en rivierafvoer tot die tijd volgens de klimaatscenario's relatief beperkt toenemen.
 - Scheepvaart is aan het waterpeil gerelateerd en wordt tot 1 m zeespiegelstijging als klimaatrobust beschouwd.
 - Functies die direct of indirect gerelateerd zijn aan blauwalgen hebben een licht negatieve toetsing met de nodige onzekerheid. Het betreft de functies Waterkwaliteit (KRW), Zwemwater, Waterrecreatie en Woonomgeving. Verwacht wordt dat door temperatuurstijging als gevolg van klimaatverandering gunstigere condities ontstaan voor het voorkomen van blauwalgen. In hoeverre dit (vaker) een drempelwaarde overschrijdt, die ook in de huidige situatie soms overschreden worden, is nog niet aan te geven. Dit is een resterende onzekerheid.
 - Water-gerelateerde natuur inclusief de visstand en vogels worden als klimaatrobust beoordeeld voor zover het waterbeheer van invloed is, met een vraagteken voor het effect van temperatuur. De terrestrische natuur is in deze studie niet beschouwd, omdat deze niet afhankelijk is van het waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer.

- Over de klimaatrobustheid van Waterveiligheid wordt in dit rapport geen uitspraak gedaan. Dit is onderwerp van onderzoek in het Deltaprogramma Waterveiligheid en het Hoogwaterveiligheidsprogramma.

5.3 Aanbevelingen

De aanbevelingen richten zich op de geïdentificeerde randvoorwaarden en kennisleemtes.

- A. Hoewel de watervraag aan het Hollands Diep van jaarrond 40 m³/s binnen de grenzen van het Waterakkoord valt, is nog niet bekend tot welke mate van klimaatverandering deze watervraag gehandhaafd kan worden. Dit hangt ook af van keuzes voor de landelijke waterverdeling. Eventuele toename van de chlorideconcentratie in het Hollands Diep als gevolg van zeespiegelstijging dient ook meegenomen te worden. Aanbevolen wordt daarom om dit vraagstuk mee te nemen in de ontwikkeling van landelijke zoetwaterstrategieën in het kader van het Deltaprogramma.
- B. Aanbevolen wordt om de relatie tussen zeespiegelstijging en zoute kwel naar het Volkerak-Zoommeer te onderzoeken en te kwantificeren.
 - a. Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging is een logische plek voor onderzoek naar deze relatie.
- C. Aanbevolen wordt om de klimaatrobustheid van het handhaven van de extreme waterpeilen voor wateroverlast (NAP +0,50 m met 1/100 jaar herhalingsstijd) en watertekort (NAP -0,25 m) nader te onderzoeken.
 - a. Mogelijk kan dit gedaan worden met het probabilistisch model dat is ontwikkeld door HKV (2015).
- D. Voor Waterveiligheid wordt aanbevolen om aan te sluiten aan bij (de berekeningsmethodiek van) het Deltaprogramma Waterveiligheid en het Hoogwaterbeschermingsprogramma.
- E. Aanbevolen wordt om de vraag rondom klimaatrobustheid van het Volkerak-Zoommeer opnieuw te beschouwen in het kader van het lerend implementeren van de IZZS Krammersluizen, als de kennis over het debiet en de zoutvracht van de Krammersluizen in de praktijk getoetst is. Voor dat moment zijn de onzekerheden te groot om eventuele optimalisatie van het operationeel waterbeheer in relatie tot klimaatrobustheid op te pakken.
- F. Aanbevolen wordt om een plan van aanpak van samenhangende activiteiten en onderzoeken op te stellen om de kennis over de ontwikkeling en het risico van blauwalgen in de toekomst te vergroten. Het plan van aanpak moet zich in eerste instantie richten op (het kwantificeren van) de waarschijnlijkheid dat de blauwalgenproblematiek verbetert, gelijk blijft of verslechtert door autonome ontwikkeling (IZZS, Roode Vaart, nutriëntenvracht). Pas in tweede instantie kan het plan van aanpak zich richten op eventuele maatregelen.
 - a. Er lopen nu diverse activiteiten om het inzicht te vergroten. Het plan van aanpak maakt gebruik van en bouwt voort op de lopende activiteiten en monitoring met betrekking tot een beter begrip van het voorkomen en verspreiding van blauwalgen in het Volkerak-Zoommeer.

6 Referenties

- Deltares (2011a): Werken met knikpunten en adaptatiepaden: handreiking, auteurs A.B.M. Jeuken en A.H. te Linde, Rapport 1202029-000-VEB-0004, maart 2011, 36 p.
http://publications.deltares.nl/1202029_000.pdf
- Deltares (2011b): Waterkwaliteit en water- en nutriëntenbalansen Volkerak-Zoommeer 1996-2009, auteurs I. de Vries, Johannes Smits, Arno Nolte en Chris Sprengers, Deltares rapport 1203266-000-VEB-0003, juli 2011.
- Deltares (2011c): Spoedadvies Verzilting – Volkerak-Zoommeer, auteur Arno Nolte, Deltares memo 1205046-000-VEB-0001, Delft, 31 mei 2011.
- Deltares (2012): Toekomstbestendigheid besluit Volkerak-Zoommeer; een robuuste beslissing, auteurs I. de Vries, G.J. ter Maat en E.H. van Velzen, Deltares rapport 1205971, maart 2012.
- Deltares (2013): Effectiviteit en effect van winterdoorspoeling van het Volkerak-Zoommeer : modelstudie en beknopte data-analyse, auteurs A.J. Nolte, B. Stengs en C.A. Schipper. Deltares rapport 1208550, december 2013.
- Deltares (2016): Prestatie Innovatieve Zout-Zoet Scheiding op de Krammersluizen - Berekeningen met WANDA-Locks, auteurs Tjerk Vreeken en Suzanne Zwanenburg, Deltares rapport 1210765-009-HYE-0002, Delft: Deltares.
- Deltares (2019a): Functioneel Ontwerp, BOS Volkerak-Zoommeer, auteurs Klaas-Jan van Heeringen, Maarten Smoorenburg, Meinard Tiessen en Otto Weiler, Deltares rapport 11203711-000-ZWS-0001, Delft: Deltares.
- Deltares (2019b): Invloed hoge scenario's voor zeespiegelstijging voor Rijn-Maas Delta, Herijking VKS DPRD en DB RMD, onderdelen 1 en 2; auteurs Jarl Kind, Karin de Bruijn, Ferdinand Diermanse, Karolina Wojciechowska, Frans Klijn, Raymond van der Meij, Arno Nolte en Kees Sloff, Deltares rapport 11203724-008-BGS-0002, mei 2019.
- Hydrologic, 2017: Redeneerlijnen waterbeheer regio Volkerak Zoommeer; Gezamenlijke uitwerking van Rijkswaterstaat (WVL, ZD, HMC) en de waterschappen Brabantse Delta, Scheldestromen en Hollandse Delta, auteurs Meike Coonen, Annemarleen Kersbergen en Matthijs van den Brink, december 2017.
https://www.slimwatermanagement.nl/publish/pages/158579/rmm_2017_rapport_redeneerlijnen_volkerak_zoommeer.pdf
- HKV (2015): Probabilistisch model meerpeilstatistiek Volkerak-Zoommeer; Hoofdrapport model DEVO, auteurs Chris Geerse en Dirk van Haaren, Rapport PR3015.10, augustus 2015.
- Hydrologic, 2018: Evaluatie Waterakkoord Volkerak-Zoommeer, Memo voor Rijkswaterstaat Zee en Delta. Hydrologic project P984.
- KNMI (2015): KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, KNMI, De Bilt, 34 pp.
- Rijkswaterstaat (2005): Hoogwaterberging Volkerak-Zoommeer, Verdiepingslag voor Ruimte voor de Rivier, N. Slootjes (RWS RIZA), Rotterdam, juli 2005
- Waterakkoord 2016, Waterakkoord Volkerak-Zoommeer; Actualisatie 1 januari 2016, 2016.

A Beschrijving Methode Adaptief Deltamanagement

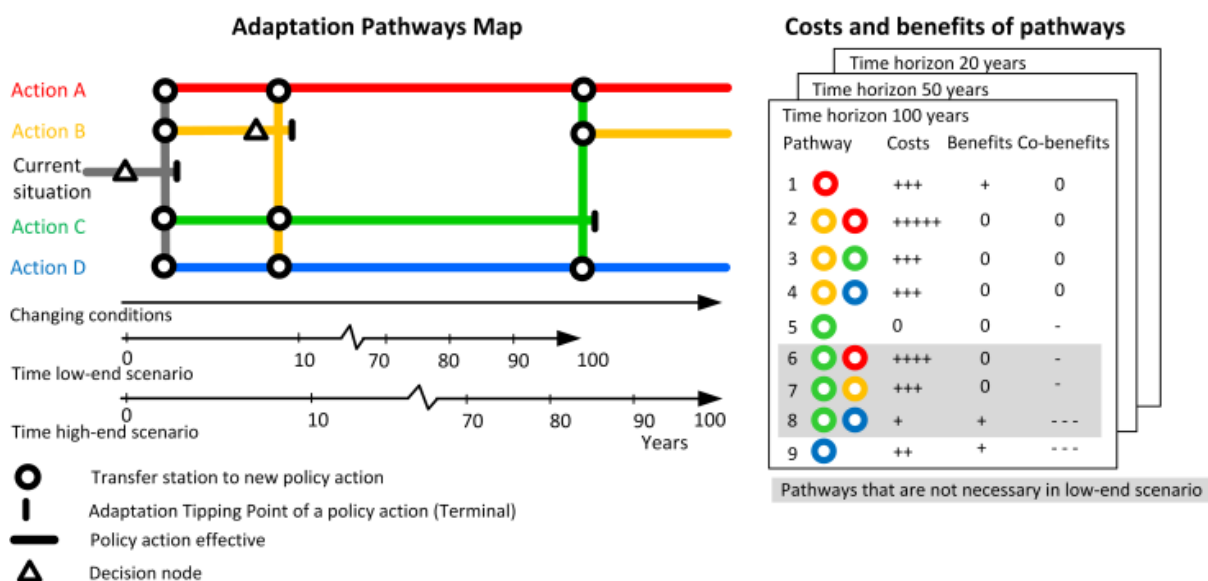
Vraagstellingen rond klimaatrobustheid zijn de kern van het Deltaprogramma. In het Deltaprogramma wordt de methodiek van Adaptief Deltamanagement toegepast. In deze bijlage wordt de methode beknopt geïntroduceerd. Meer informatie is bijvoorbeeld te vinden op <https://www.deltares.nl/en/adaptive-pathways/>.

A.1 Adaptief Deltamanagement onder het Deltaprogramma

Het doel van het Deltaprogramma is dat de waterveiligheid, de zoetwatervoorziening en de ruimtelijke inrichting in 2050 klimaatbestendig en waterrobuust zijn, zodat Nederland de grotere extremen van het klimaat kan blijven opvangen. Het programma is voornamelijk gericht op het voorkomen van een ramp. Er zijn meerdere strategieën ontwikkeld voor meerdere toekomstscenario's, waarin de onzekerheden rond klimaatverandering en sociaal economische ontwikkelingen zijn weerspiegeld. Met de maatregelen en strategieën kan flexibel worden ingespeeld op nieuwe metingen en inzichten in onder meer de ontwikkelingen in het klimaat. In het kader van adaptief deltamangement wordt gedaan wat nu nodig is, en liggen er (plannen voor) aanvullende maatregelen klaar voor het geval deze in de toekomst nodig zijn. Deze manier van werken wordt door betrokken partijen gezien als een nuchtere oplossing voor het omgaan met onzekere ontwikkelingen.

De methode van het Deltaprogramma, die gericht is op waterveiligheid en zoetwatervoorziening in Nederland, kenmerkt zich door de uitwerking van **knikpunten** en **adaptatiepaden** (Deltares, 2011). Een **knikpuntenanalyse** is een gevoeligheidsanalyse waarbij wordt gekeken welke functies en beleidsdoelen in een systeem het meest beïnvloed worden door klimaatverandering en welke mate van klimaatverandering nog acceptabel is. Als het effect van klimaatverandering op een bepaalde functie niet meer acceptabel is dan is een zogenaamd knikpunt bereikt. In Figuur A.1 wordt een visualisatie van de methode gegeven.

Vervolgens kan worden gekeken welke maatregelen genomen kunnen worden zodat dit knikpunt niet, of later bereikt wordt. Hiervoor wordt vervolgens een **adaptieve strategie** voor ontwikkeld, met verschillende maatregelen voor de korte en de lange termijn. Afhankelijk van de mate van klimaatverandering wordt een knikpunt eerder of later bereikt.



Figuur A.1 Schematisch voorbeeld van een adaptatiepad (Deltares, 2015)

Kernpunten van adaptief deltamanagement

- beslissingen die we nu nemen verbinden met de opgaven voor waterveiligheid en zoetwater op de lange termijn;
- zorgen dat oplossingen flexibel zijn;
- meerdere strategieën klaar hebben en ervoor zorgen dat we snel kunnen wisselen als de omstandigheden veranderen (adaptatiepaden);
- investeringen in waterveiligheid en zoetwater verbinden met investeringen in bijvoorbeeld ruimtelijke inrichting en natuur en herontwikkeling waar mogelijk waterrobuust en klimaatbestendig maken.
- Zo zorgen we ervoor dat er nu verstandige maatregelen worden getroffen en dat er tegelijkertijd in de toekomst voldoende mogelijk blijft voor de maatregelen die dan nodig zijn om Nederland te beschermen tegen hoogwater en van voldoende zoetwater te voorzien.

A.2 Integraal adaptief deltamanagement

In deze studie wordt voortgebouwd op de Deltaprogramma-aanpak. Tijdens deze studie worden alle gebruiksfuncties van het watersysteem in kaart gebracht, en niet alleen de gebruiksfuncties waterveiligheid en zoetwatervoorziening. Dit heeft als gevolg dat er meerdere gebruikerseisen aan het watersysteem zijn. Naast knikpunten worden er in deze studie ook **drempelwaarden** gebruikt. Een drempelwaarde staat voor een eis van een gebruiksfunctie die gesteld wordt aan het watersysteem. Wanneer deze drempelwaarde van zulk belang is dat bij het niet behalen hiervan er een andere strategie gevoerd moet worden voor het watersysteem, dan is deze drempelwaarde een knikpunt. Of een drempelwaarde een knikpunt is wordt met name bepaald door het belang dat beleidsmakers aan deze drempelwaarde hechten. Bij deze drempelwaarde-inventarisatie worden niet alleen de functies binnen het watersysteem opgenomen, maar ook omliggende watersystemen en landgebieden die van dit watersysteem afhankelijk zijn.

Een aantal drempelwaarden is afhankelijk van het waterpeil of de afwezigheid van blauwalgen in het systeem (denk bijvoorbeeld aan drempelwaarden voor de gebruiksfuncties sluisbeheer en zwemwater). Zowel waterpeil als blauwalgen zijn in dit geval watersysteemindicatoren. Op deze manier worden de geïnventariseerde drempelwaarden gegroepeerd onder **watersysteemindicatoren**. Door de relaties tussen de beheerfuncties, gebruiksfuncties, watersysteemindicatoren, drempelwaarden en klimaatverandering te visualiseren worden de onderlinge afhankelijkheden duidelijk in een relatieschema. Hierna is het aan de beleidsmakers om te bepalen welke drempelwaarden ook daadwerkelijk een knikpunt zijn.

Om tot de belangrijkste watersysteemindicatoren en de hiermee samenhangende knikpunten te komen wordt de verbindingen uit het relatieschema geanalyseerd.

A.3 Stappen integrale analyse

Om een integrale analyse uit te voeren worden de volgende stappen gevolgd:

1. Vastleggen van de huidige ontwikkelingen in het watersysteem
2. Inventariseren gebruiksfuncties in het watersysteem
3. Vaststellen welke gebruiksfuncties beïnvloedt kunnen worden door klimaatverandering
4. Inventariseren aan welke eisen (d.w.z. doelen, criteria, indicatoren) deze gebruiksfuncties moeten voldoen inclusief getalswaarde voor de drempelwaarde
5. Opstellen van relationeel (oorzaak-effect) overzicht tussen 1) klimaatverandering, 2) huidige (water)beheer van het watersysteem, en 3) eisen aan het watersysteem
6. Prioriteren van meest relevante of meest veelzeggende watersysteemindicatoren
7. Bepaal kwantificeerbaarheid van indicatoren (d.w.z. berekenen bij welke mate van klimaatverandering de drempelwaarde van de indicator overschreden wordt)
8. Vastleggen van de drempelwaarden die als knikpunt fungeren
9. Berekenen overschrijding van drempelwaarde van indicatoren
10. Analyse van klimaatrobuustheid watersysteem

B Overzicht beheer- en gebruiksfuncties Volkerak-Zoommeer

Beheerfuncties Rijkswaterstaat

Waterveiligheid
Noodwaterberging
Waterbeheer (waterkwantiteit: peil en chloride)
Waterkwaliteit
Natuur (water)

Gebruiksfuncties

Beroepsscheepvaart
Landbouw
Natuur (terrestrisch)
Beroepsvisserij
Zwemwater
Sportvisserij
Recreatieve scheepvaart
Overige waterrecreatie
Woonomgeving/woonplezier

Governance en beheer- en beleidskaders

Organisaties:

- Internationaal:
 - o EU
- Nationaal:
 - o Ministerie I en W
 - RWS Zee en Delta
 - RWS West-Nederland Zuid
 - RWS Zuid Nederland
- Provincies:
 - o Noord-Brabant
 - o Zeeland
 - o Zuid-Holland
- Waterschappen
 - o Waterschap Brabantse Delta
 - o Waterschap Hollandse Delta
 - o Waterschap Scheldestromen

Beleidskaders:

- Internationaal:
 - o Traktaat Schelde Rijn (1963)
- EU:
 - o Kaderrichtlijn Water
 - o Zwemwaterrichtlijn
 - o Richtlijn voor Prioritaire Stoffen
 - o Natura 2000
 - Habitatrichtlijn
 - Vogelrichtlijn
- Nationaal
 - o Nationaal Water-plan 2016-2021
 - o Waterwet
 - o Beheer- en Ontwikkelplan voor de Rijkswateren 2016 – 2021
 - o Inzetprotocol Waterberging VKZM (RWS)
 - o Peilbesluit VKZM (RWS)
 - o Besluit Kwaliteitseisen en Monitoring Water 2009
 - o Richtlijn Vaarwegen 2017
- Stroomgebied
 - o Stroomgebiedbeheerplan Maas 2016-2021
 - o Stroomgebiedbeheerplan Schelde 2016-2021
- Provinciaal
 - o Provinciaal Milieu- en Waterplan 2016-2021 (Noord-Brabant)
 - o Omgevingsplan Zeeland 2018 (geldig t/m 2021)
 - o Provinciaal waterplan 2010-2015 (Zuid-Holland)
 - o Voortgangsnota Europese Kaderrichtlijn Water 2016-2021 (Zuid-Holland)
- Waterschappen
 - o Waterbeheerplan 2016-2021 (Brabantse Delta)
 - o Waterbeheerprogramma 2016-2021 (Hollandse Delta)
 - o Waterbeheerplan 2016-2021 (Scheldestromen)
- Overige:
 - o Waterakkoord VKZM
 - o Basisvisie Recreatietoevaartnet 2015-2020

C Beschrijving Zeesluisformulering voor zoutvracht Krammersluizen

Het project Klimaatrobuust Volkerak-Zoommeer brengt in beeld hoe toekomstige ontwikkelingen, met name zeespiegelstijging, ertoe zullen leiden dat met het huidige beheer niet meer voldaan kan worden aan de gestelde criteria, c.q. dat de functies van het watersysteem in het geding komen. Dit heeft alles te maken met het functioneren van de kunstwerken rondom het Volkerak-Zoommeer.

De Krammersluizen spelen een rol in zowel het beheer van het peil, de waterkwantiteit, als het beheer van het zoutgehalte, de waterkwaliteit.

De verkenning gaat uit van de autonome ontwikkeling. Onderdeel hiervan is de voorgenomen ombouw van de Krammersluizen naar een ander systeem van zout-zoetscheiding. Het besluit hiertoe is genomen op basis van een berekening met WANDA-Locks (Deltares, 2016). Deze berekeningen beschrijven de vrij complexe operatie van de Krammersluizen met de effecten van bellenschermen, spoel- en spuidebieten, het gebruik van het Laagbekken etc. en geven als resultaat daarvan (onder andere) de te verwachten hoeveelheden zout die het Volkerak-Zoommeer zullen bereiken. Ook is met dit model, op een vereenvoudigde wijze, de verspreiding van dat zout tot aan het meetpunt bij Nieuw Vossemeer berekend.

Voor de huidige studie is het gebruik van WANDA-Locks niet mogelijk, omdat de rekentijden niet te combineren zijn met het grote aantal scenario's die beschouwd moeten worden. Om die reden is een bakjes-model gemaakt van het Volkerak-Zoommeer, nu tot aan de Kreekraksluizen en de spuisluizen bij Bath, waarmee de verschillende scenario's beschouwd kunnen worden met een tijdstap van 1 dag (zie Bijlage D). De debieten en zoutvrachten bij de Krammersluizen, waarden per dag, moeten aan dat model worden toegeleverd.

Voor dit doel is een alternatieve beschrijving van de operatie van de Krammersluizen gebouwd die veel sneller kan rekenen. Daarbij is gebruik gemaakt van de Zeesluisformulering zoals ontwikkeld in het Kennisprogramma Natte Kunstwerken. De beschrijving van de Krammersluizen met behulp van de ZSF is niet triviaal. Dit heeft een paar oorzaken:

- de ZSF is gebouwd voor 'gewone' sluizen, al of niet met bellenschermen, maar kent bijvoorbeeld niet zoiets als een Laagbekken of een afstand tussen bellenschermen en deuren,
- de ZSF berekent niet op basis van een vaste tijdstap, maar bepaalt de verplaatste volumes met een zoutgehalte per schutfase. Dit is een van de redenen dat de ZSF zoveel sneller rekent dan WANDA-Locks.

Voor het doel van deze verkenning is een aantal elementen toegevoegd aan de ZSF om daarmee een beschrijving van de Krammersluizen te kunnen maken die zo dicht mogelijk de beschrijving in WANDA-Locks benadert. Er blijven logischerwijs verschillen bestaan tussen de resultaten van beide modellen. Deze bijlage geeft een beschrijving van de elementen en, per element, van de verschillen tussen beide modellen.

Inschatting invloed missende elementen op zoutlast en watergebruik

Om de invloed van de missende elementen op de zoutlast en het watergebruik te kunnen inschatten is het Wanda-Locks model van de Krammersluizen versimpeld tot een enkele sluis met vaste randvoorwaarden. De operatie van de sluis, dat wil zeggen de aard en timing van de schuttingen en de inzet van de maatregelen om de zoutlek te beperken, is daarbij ongewijzigd. Hiermee wordt het mogelijk om de resultaten van beide modellen 1-op-1 (eerlijk) te vergelijken.

Het 'Basis-scenario' is dan als volgt:

- Een enkele sluis in plaats van twee;
- De schuttingen van die sluis zoals gehanteerd in de Planstudie (dit betreft de uitkomst van simulaties van de verkeersafhandeling, resulterend in een realistische, onregelmatige reeks schuttingen, voor een verkeersintensiteit volgens een prognose voor 2045);
- Vaste randvoorwaarden net buiten de sluishoofden voor waterstand en zoutgehalte:
 - o Volkerak-Zoommeer: 1 psu en 0 m NAP
 - o Zijpe: 28 psu en variabele waterstand van 2003 (registratie incl. opwaaiing etc.)
- Bellenschermen ter plekke van de deuren met een vaste doorlaatfractie van 25% (het luchtdebiet is dan variabel);
- Er zijn geen riolen beschouwd, dus ook geen effecten van volume of traagheid daarvan;
- Het Laagbekken is aangenomen oneindig groot te zijn (het raakt dus nooit vol)

Vervolgens zijn aan dit Basis-scenario verschillende elementen toegevoegd, namelijk:

- de invloed van de waterverplaatsing (displacement) van de schepen,
- de invloed van de drempel aan het binnenhoofd,
- de invloed van het spoeldebiet door de sluis (momentaan 7,5 m³/s in het groeiseizoen of 20 m³/s in het winterseizoen),
- de invloed van de afstand tussen de bellenschermen en sluisdeuren.

Al deze elementen, zoals destijds ontwikkeld en toegepast in WANDA-Locks, zijn afzonderlijk en in combinaties toegevoegd aan het basis-scenario en doorgerekend. Van alle resultaten daarvan is steeds het cumulatief gemiddelde bepaald over de eerste 30 dagen (van 2003 dus). Dat leidt tot de volgende getallen.

	Netto zoutlast (kg/s)	Netto watergebruik (m ³ /s)
Basis	25.4	0.5
Basis + Displacement	27.8	0.5
Basis + Drempel	23.6	0.5
Basis + Spoelen 7.5	5.7	4.3
Basis + Spoelen 20.0	-6.3	10.5
Basis + Bellenscherm-deur	32.3	0.5
Alles (Spoelen 7.5)	11.4	4.3
Alles (Spoelen 20.0)	-2.4	10.5

De netto zoutlast is de dag-gemiddelde zoutlast die door de sluis naar buiten komt vermindert met het zout dat met het afgevoerde water terug gaat naar de zoute kant. Als de laatste term groter is dan de eerste ontstaat er dus een negatieve zoutlast.

Het netto watergebruik is het daggemiddelde transport van water van de zoete naar de zoute kant. Water dat uit de sluis naar de zoete kant komt, door het invaren van schepen aan de zoete kant, is hiermee verrekenend.

Zoals te zien, zijn er zowel elementen die de zoutlast vergroten als elementen die de zoutlast verkleinen. Verder valt het op dat waterverplaatsing door schepen in Wanda-Locks geen effect heeft op het watergebruik. Dit is een gevolg van de (beperkte) manier waarop dit wordt beschreven in Wanda-Locks. Voor de ZSF mag hier wel een effect worden verwacht.

In onderstaande paragrafen wordt per element (kort) uiteengezet wat er aan de ZSF is toegevoegd en hoe zich dit verhoudt tot hoe het betreffende element is beschreven in Wanda-Locks

Waterverplaatsing door invaren en uitvaren van schepen

De schepen die de sluis uit- en invaren veroorzaken een verplaatsing van water in tegengestelde richting. Dit veroorzaakt een transport van water en zout tussen kolk en voorhaven. De aanwezigheid van een volume aan schepen tijdens nivelleren heeft een invloed op de ontwikkeling van het zoutgehalte van het water in de kolk tijdens het vullen van de kolk bij het omhoog-nivelleren. En dit zoutgehalte heeft weer effect op de kolk-uitwisseling in de fase daarna.

In de ZSF wordt met al deze effecten rekening gehouden, in Wanda-Locks is dit maar beperkt het geval.

- In Wanda-Locks wordt geen rekening gehouden met het volume schip in kolk tijdens nivelleren (c.q. er wordt verondersteld dat de kolk volledig gevuld is met water).
- Bij het in- en uitvaren wordt in Wanda-Locks verder ook geen water verplaatst, maar wordt alleen een hoeveelheid zout getransporteerd gelijk aan het volume van het schip vermenigvuldigd met het dichtheidsverschil.

Drempel aan zoete zijde

Voor een drempel geldt in de ZSF, net zoals in Wanda-Locks, dat de hoogte van de drempel voor 80% meespeelt in het reduceren van aandrijvende hoogte. De formule voor de snelheid van de dichtheidsgolf is:

$$c_t = \frac{1}{2} \sqrt{g'H}$$

De hoogte H wordt hierin dus gereduceerd met 80% van de hoogte van de drempel. Daarnaast is het zo dat, bij het openen van de deuren naar zoete zijde, een zoute onderlaag in de kolk achterblijft. Ook de dikte van deze laag is 80% van de drempelhoogte. Voor de zoute zijde geldt dit niet.

Let wel dat in Wanda-Locks het spoelen altijd losstaat van de dichtheidsgolf en altijd exponentieel verloopt. In Wanda-Locks betekent dat dus dat bij spoelen bij geopende deuren aan zoete zijde de kolk uiteindelijk nog steeds volledig zoet wordt. Dit is in de ZSF niet het geval, omdat de onderlaag niet kan worden uitgewisseld en ook niet gespoeld. Bij spoelen met gesloten deuren is dit wel het geval en kan de kolk dus wel volledig zoet worden: dus zowel in Wanda-Locks als in de ZSF.

Spoelen

Een goede manier om de zoutlek te beperken is het laten stromen van een debiet van zoetwater door de kolk vanaf de zoete voorhaven. Hierdoor wordt het uitstromen van zoutwater tegengegaan en het maakt de kolk relatief zoet, waardoor de kolk-uitwisseling minder snel verloopt. De beschrijving hiervan in de ZSF wijkt af van die in Wanda-Locks.

- In Wanda-Locks wordt elke tijdstap een nieuw gemiddeld zoutgehalte in de kolk berekend. Het debiet dat de kolk richting de zoute kant uitstroomt krijgt dit zoutgehalte mee. Deze 'instantane doormenging' is misschien niet de meest realistische, maar binnen Wanda-Locks is dit de enige logische manier om dit te beschrijven.
- In de ZSF moet het transport per fase worden berekend. Daarbij zijn andere keuzes gemaakt: er wordt niet instantaan doorgemengd, maar de aanvankelijke snelheid van

verzoeting wordt vastgehouden. Het uitstromende debiet houdt dus het zoutgehalte in de kolk van het begin van de betreffende fase totdat de kolk volledig verzoet is. Dit is een overschatting van het effect van een spoeldebiet.

Dit leidt ertoe dat er verschillen zijn in het effect van het spoeldebiet op het zoutgehalte in de kolk aan het eind van de betreffende fase, en daarmee op het transport van zout in het algemeen: bij de ZSF is het effect van spoelen groter dan Wanda-Locks. De ZSF overschat het effect van het spoeldebiet en Wanda-Locks onderschat het effect: daar daalt het afgevoerde zoutgehalte al vanaf het begin. Zeker bij grote deur-opentijden (gerelateerd aan de looptijd van de dichtheidsgolf) kan dit verschil vrij groot worden. Echter, door het afremmen van de dichtheidsgolf door de bellenschermen is de deur-opentijd in het algemeen nog kort ten opzichte van de looptijd van de dichtheidsgolf en zal dit effect niet al te groot worden.

Tussentijds spoelen met gesloten deuren

Bij bestudering van de verschillen kwam er echter nog een ander aspect aan het licht. Tijdens de Planstudie (de berekeningen met WANDA-Locks) bleek het noodzakelijk voor het behalen van een voldoende lage waarde van de zoutlek, dat als het niet druk is met schepen, bijvoorbeeld 's nachts, dat dan de deur tussen uitvaren en invaren gesloten worden. Daarmee wordt de kolk-uitwisseling op die momenten sterk gereduceerd. Destijds is ook aangenomen dat, terwijl beide deuren gesloten zijn, dat er doorgegaan wordt met het spoelen van de kolk. In Wanda-Locks wordt daarbij weer gerekend met een instantane doormenging van het water in de kolk.

De ZSF kende nog geen fase van gesloten deuren tussen uit- en invaren. Deze is toegevoegd. Daarbij is voor het spoelen in die fase hetzelfde uitgangspunt gekozen als in Wanda-Locks, namelijk de instantane doormenging. Hieronder wordt deze keuze uitgewerkt en vergeleken met andere mogelijke aannamen. Uit de uitwerking blijkt dat er ook verschillende argumenten zijn om voor de ene of de andere optie te kiezen.

In deze fase krijgt het zoutgehalte in de kolk, en daarmee de zoutmassa in de kolk, een exponentieel verloop (dit is de wiskundige beschrijving van het instantaan doormengen). De vergelijking is dan:

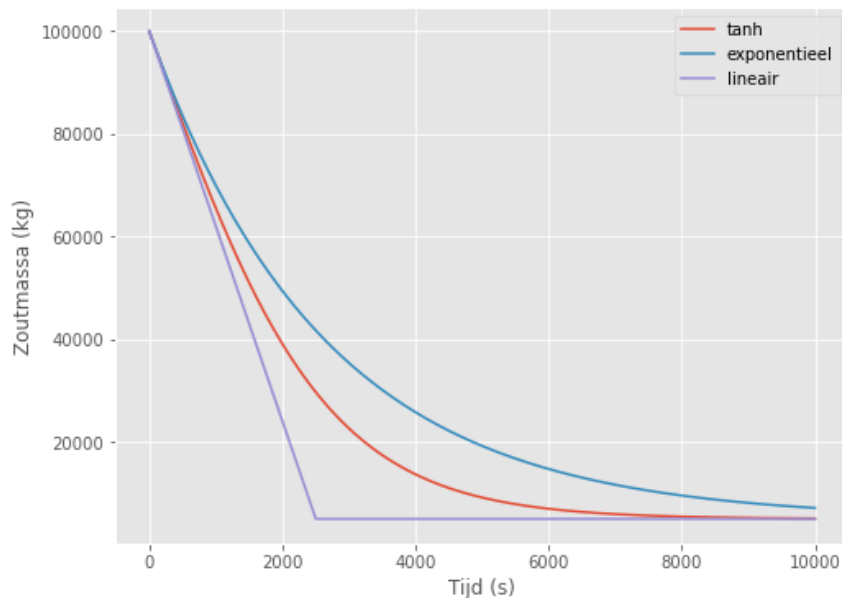
$$M_{kolk} = V_{kolk} \cdot \Delta S \cdot e^{-\lambda t} + V_{kolk} \cdot S_{voorhaven}$$

Waarin M_{kolk} de massa zout in de kolk, V_{kolk} het volume water in de kolk, $\Delta S = S_{kolk} - S_{voorhaven}$ het saliniteitsverschil (in kg/m³) tussen zoete voorhaven en kolk. Voor de exponentiele factor λ geldt dat:

$$\lambda = \frac{Q_{spoel} \cdot \Delta S}{V_{kolk} \cdot S_{kolk}}$$

Als voorbeeld nemen we een kolk van 100 x 10 x 5 (lengte x breedte x diepte). De saliniteit van de voorhaven is 1 kg/m³, en de (aanvankelijke) saliniteit van de kolk is 20 kg/m³. Met een spoeldebiet van 2 m³/s zien we dan in onderstaande grafiek hoe een lineair, exponentieel, en tanh-verloop zich tot elkaar verhouden.

Merk op dat de aanvankelijke snelheid van verzoeting voor alle gevallen hetzelfde is. Op $t = 0$ gaat er namelijk een dV met saliniteit 20 kg/m³ naar buiten, en dezelfde dV met 1 kg/m³ naar binnen. Bij een lineair verloop wordt dit tempo van verzoeting vastgehouden, maar bij exponentieel verloop mengen we telkens de kolk weer volledig door.



Afstand tussen bellenscherm en de deuren

Bij de Krammersluizen zullen de bellenschermen op enige afstand van de deuren worden geplaatst. Dit om het veilig en beheerst afstoppen en afmeren van schepen in de sluis kolk niet te storen. (Dit geldt met name voor de laatste schepen in een volle kolk, die dicht achter de deuren moeten stilliggen.) Het gevolg hiervan is dat het volume water tussen de deuren en de bellenschermen soms bij de kolk hoort, en soms bij de voorhaven. Deze afwisseling maakt de scheiding tussen kolk en voorhaven minder duidelijk en draagt bij aan de uitwisseling van water tussen kolk en voorhaven.

Voor Wanda-Locks is aangenomen dat een deel van het volume tussen deur en bellenscherm instantaan wordt doorgemengd aan het begin van de fase dat de deuren openstaan. Dit geeft een initiële uitwisseling tussen kolk en voorhaven gevolgd door de eigenlijk fase van kolk-uitwisseling, die dan wordt gekenmerkt door een kleiner dichtheidsverschil tussen kolk en voorhaven (als gevolg van die beperkte initiële uitwisseling). Dit is uitgewerkt in [ref].

Voor de ZSF is voor een andere aanpak gekozen, waarbij, gedurende de tijd dat de deur open staat, de snelheid van de kolk-uitwisseling verandert: eerst geldt de ongereduceerde snelheid (zonder effect bellenscherm), maar als het water dat uit de kolk komt het bellenscherm bereikt wordt overgeschakeld op de gereduceerde snelheid. Deze aanpak lijkt fysisch realistischer en kan bij de ZSF wel, en was bij Wanda-Locks niet mogelijk.

Voor de ZSF geldt dat we aannemen dat het verloop van de saliniteit in de kolk volgens een hyperbolische tangente verloopt. Als we het spoeldebiet even verwaarlozen geldt dat:

$$V_U = V_{kolk} \cdot \tanh\left(\frac{\eta T_{open}}{T_{LE}}\right)$$

Waarbij V_U het uitwisselingsvolume is, T_{LE} de theoretische tijd voor een volledige kolkuitwisseling, en T_{open} de tijd dat de deur open staat. Belangrijk om hierbij op te merken is dus het effect van het bellenscherm, uitgedrukt in de doorlaatfractie η , die de snelheid van de dichtheidsgolf remt. Als de bellenschermen op een afstand van de deur staan, dan geldt deze reductiefactor nog niet op het moment dat de deur open gaat, maar pas als een korte tijd later. Voor de ZSF is daarom besloten om, totdat de dichtheidsgolf het bellenscherm bereikt, een uitwisselsnelheid te hanteren zonder reductiefactor. De berekening voor het uitgewisselde volume wordt dan:

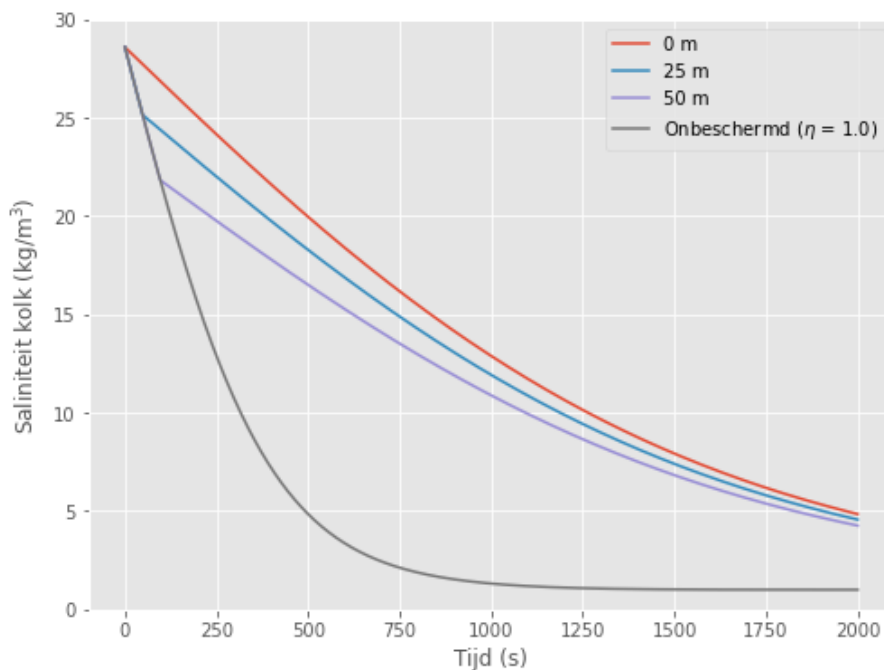
$$V_{U,1} = V_{kolk} \cdot \tanh\left(\frac{T_{bs}}{T_{LE}}\right)$$

$$V_{U,2} = (V_{kolk} - V_{U,1}) \cdot \tanh\left(\frac{\eta(T_{open} - T_{bs})}{T_{LE}}\right)$$

$$V_U = V_{U,1} + V_{U,2}$$

Waarin T_{bs} de tijd die het duurt voordat de (onbeschermde dichtheidsgolf) het bellenscherm bereikt.

Het verloop van het zoutgehalte van de kolk ziet er dan als volgt uit voor een bellenscherm op 0 meter buiten de kolk, op 25 m buiten de kolk, en op 50 meter buiten de kolk. Ter referentie is ook de situatie meegenomen dat er geen bellenscherm is:



Resultaten vergelijking testmodel

Zoals beschreven in de paragrafen hierboven is de ZSF aangevuld met elementen die een rol spelen bij de Krammersluizen. Daarmee is de beschrijving van de sluizen en de processen zoveel mogelijk in overeenstemming gebracht met de beschrijving in Wanda-Locks. In onderstaande tabel worden de met beide modellen berekende resultaten met elkaar vergeleken.

	Netto zoutlast (kg/s)				Netto watergebruik (m3/s)			
	Wanda	ZSF	Verschil		Wanda	ZSF	Verschil	
Basis	25.4	26.5	1.1	4.5%	0.5	0.5	0.0	-1.0%
Basis + Displacement	27.8	29.5	1.7	6.3%	0.5	0.6	0.1	18.9%
Basis + Drempel	23.6	24.7	1.1	4.4%	0.5	0.5	0.0	-1.0%
Basis + Spoelen 7.5	5.7	4.0	-1.7	-29.7%	4.3	4.1	-0.2	-5.3%
Basis + Spoelen 20.0	-6.3	-10.1	-3.8	60.3%	10.5	10.1	-0.4	-3.5%
Basis + BS-deur	32.3	28.8	-3.5	-10.8%	0.5	0.5	0.0	-1.0%
Alles (Spoelen 7.5)	11.4	7.3	-4.1	-35.7%	4.3	4.2	-0.1	-2.9%
Alles (Spoelen 20.0)	-2.4	-7.7	-5.3	215.8%	10.5	10.3	-0.2	-1.6%

- Zoals eerder al opgemerkt kan het deplacement van de schepen wel voor een watergebruik zorgen in de ZSF, waar dit niet mogelijk is in Wanda-Locks. Er is voor de ZSF een kleine toename van het watergebruik door het meenemen van het deplacement.
- Voor de drempel is het absolute en relatieve verschil nagenoeg gelijk aan die van de basis case, duidend op het feit dat de drempelformulering (80% reductie) inderdaad nagenoeg hetzelfde is in Wanda-Locks en de ZSF.
- Voor spoelen zien we een groter verschil ontstaan in de zoutlast, zoals ook al is toegelicht in Paragraaf x van [ref, ZSF rapport over kanttekeningen spoelen]. De ZSF overschat zoals bekend de effectiviteit van spoelen, vooral bij lagere deur-opentijden, omdat de saliniteit in het afgevoerde water hoog blijft. Daarnaast is het zo dat in Wanda-Locks niet wordt gespoeld als de schepen invaren aan zoete zijde: deze uitzondering is in de ZSF niet ingebouwd. In die fase heeft de dichtheidsgolf in Wanda-Locks meer kans om naar buiten te lopen. Het watergebruik is echter wel nagenoeg gelijk.
- De formulering voor de invloed van de afstand tussen bellenscherm en deur is anders in Wanda-Locks en de ZSF. In Wanda-Locks is de compensatie hiervoor opgenomen als 'instantaan', waar het in de ZSF ook afhankelijk is van de tijdsduur van het openen van de deuren en het spoeldebiet. Er is geen effect op het netto watergebruik ten opzichte van de basis case.

Implicaties formulering Krammersluizen rekenjaar 2003

Nadat de effecten afzonderlijk en in combinatie zijn beschouwd voor een enkele sluis en voor beperkte periode (30 dagen), kunnen nu met de ZSF de berekeningen gedaan worden voor het 'fictieve jaar', afgeleid van 2003, zoals destijds beschouwd in de Planstudie.

Watergebruik (m ³ /s)			Bruto zoutlast (kg/s)		
Groeiseizoen	Daarbuiten	Hele jaar	Groeiseizoen	Daarbuiten	Hele jaar
8.99	29.02	18.92	29.52	6.7	18.2

- Het watergebruik in bovenstaande tabel is het netto watergebruik dat bestaat uit de combinatie van watergebruik voor nivelleren, voor spoelen (door de kolk) en water dat wordt afgevoerd door het spuumiddel. Ook de debieten die de kolk in- en uitgaan door het uit- en invaren van schepen worden hierin meegenomen. De waarden die zijn gehanteerd voor het momentane spoeldebiet en het debiet via het spuumiddel zijn als volgt:

Groeiseizoen		Buiten groeiseizoen	
Momentaan Spoeldebiet (m ³ /s)	Daggemiddeld Spuidebiet (m ³ /s)	Momentaan Spoeldebiet (m ³ /s)	Daggemiddeld Spuidebiet (m ³ /s)
6.83	1.0	20.0	8.7

Het daggemiddelde spuidebiet van 1,0 m³/s wordt ingezet voor het creëren van een lokstroom voor de vismigratie door het spuumiddel.

- De bruto zoutlast is het zout dat de sluisverlaat. De netto zoutlast is kleiner: er gaat ook zout terug met alle debieten die van de voorhaven de sluis ingaan. dit zijn dus debieten door nivelleren, spoelen en de retourstroming door uitvarende schepen. De netto zoutlast wordt dus bepaald door het (bruto) watergebruik en het zoutgehalte in de voorhaven. Met een zoutgehalte van 1 – 2 psu en een watergebruik in het groeiseizoen van (iets groter dan) 9

m³/s zal de netto zoutlast tussen de 10 en 20 kg/s liggen. Buiten het groeiseizoen zal de netto zoutlast negatief worden.

Compensatie stijging zeespiegel

Als de zeespiegel stijgt zal, bij gelijke momentane spoeldebieten en dezelfde debieten door het spuumiddel, het watergebruik dalen. De redenen daarvoor zijn:

1. Minder schutdebiet: bij omhoog nivelleren, rond laagwater op de Oosterschelde naar de Volkerak-Zoommeer-zijde, wordt water gebruikt van het Volkerak-Zoommeer, maar deze situatie komt minder vaak voor omdat het water aan de Oosterschelde-zijde minder lang lager staat dan aan op het Volkerak-Zoommeer en ook minder 'diep'.
2. Minder spoeldebiet: dit heeft te maken met de fase waarin de kolk hoger staat dan het Volkerak-Zoommeer, rond hoogwater op de Oosterschelde. Dat zal bij vaker het geval zijn, en in die situatie wordt er niet gespoeld (daarvoor zou een pomp nodig zijn), en dus loopt het watergebruik daarvoor terug.

In onderstaande tabel is te zien hoe, zonder compenserende maatregelen, het watergebruik afneemt binnen en buiten het groeiseizoen.

Zeespiegelstijging (m)	Watergebruik (m ³ /s)	
	Groeiseizoen	Daarbuiten
0	8.99	29.02
0.1	8.75	28.54
0.2	8.5	28.07
0.3	8.25	27.57
0.4	8.01	27.08
0.5	7.78	26.62
0.6	7.57	26.12
0.7	7.36	25.65
0.8	7.16	25.16
0.9	6.96	24.68

Omdat het watergebruik kleiner wordt dan wat er gebruikt mag worden, kan er dus meer water worden ingezet om de zoutlast tegen te gaan. Het gebruik van het extra water is als volgt:

1. Binnen het groeiseizoen extra spoelen tot een maximum van 20.0 m³/s instantaan. Daarna extra water via het spuumiddel (bovenop het lokdebiet van daggemiddeld 1 m³/s).
2. Buiten het groeiseizoen extra water via het spuumiddel.

Met een polynomiale fit en wat trial-and-error is voor binnen en buiten het groeiseizoen een vergelijking afgeleid die het extra spoel- of spuidebiet als functie van de zeespiegelstijging $H_{stijging}$ beschrijft. Deze zijn:

- In het groeiseizoen: $Q_{spoel,extra} = 2.6 \cdot H_{stijging} + 0.3 \cdot H_{stijging}^2$
- Buiten het groeiseizoen: $Q_{spui,extra} = 4.8 \cdot H_{stijging}$

Dat leidt dan tot de volgende vergelijking tussen het watergebruik (en de zoutlast) met en zonder aanpassing van de instellingen voor het watergebruik voor de zeespiegelstijging:

Zeespiegelstijging (m)	Watergebruik (m ³ /s)		Bruto zoutlast (kg/s)	
	Geen compensatie	Compensatie	Geen compensatie	Compensatie
0	18.92	18.92	18.2	18.2
0.1	18.57	18.93	18.94	18.38
0.2	18.2	18.93	19.68	18.54
0.3	17.83	18.92	20.45	18.7
0.4	17.47	18.92	21.21	18.84
0.5	17.12	18.93	21.97	18.96
0.6	16.77	18.93	22.73	19.06
0.7	16.43	18.94	23.49	19.14
0.8	16.09	18.94	24.27	19.22
0.9	15.75	18.95	25.06	19.3

De tabel laat zien dat de compensatie (aanpassingen instellingen voor het op niveau houden van het watergebruik) er toe bijdragen dat de toename van de bruto zoutlast grotendeels worden teruggedrongen. De toename is nog maar gering.

D Beschrijving bakjesmodel voor waterstand en chlorideconcentratie Volkerak-Zoommeer

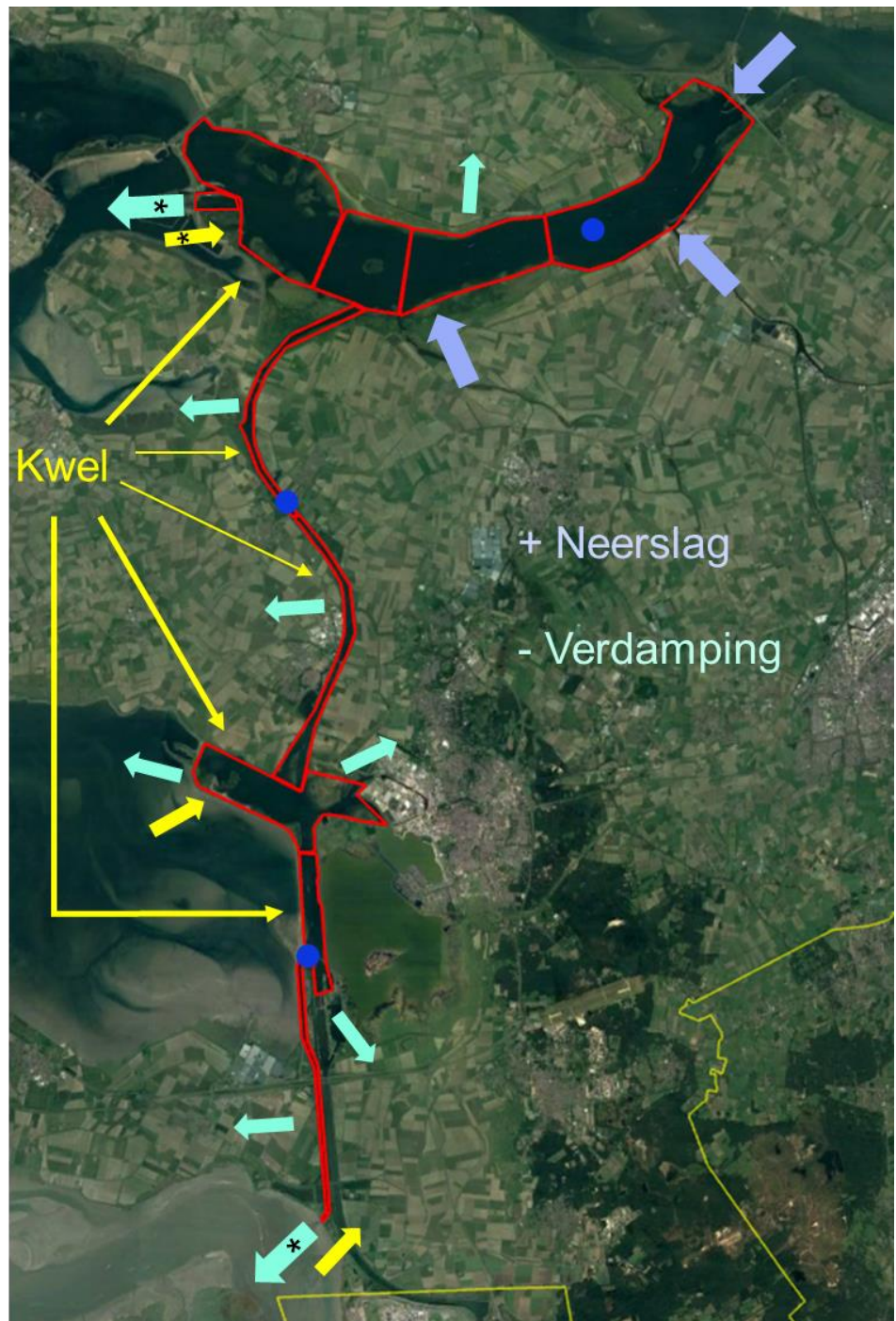
D.1 Schematisatie Volkerak-Zoommeer in het bakjesmodel

Het bakjesmodel verdeelt het Volkerak-Zoommeer in 10 bakjes. De keuze is zodanig dat zowel de oost-west gradiënt over het Krammer-Volkerak als de noord-zuid gradiënt over de Eendracht, het Zoommeer en het Bathse spuikanaal (enigszins) kan worden gereproduceerd. De Krammersluizen voorhaven is als apart bakje gedefinieerd, omdat daarop het debiet en de zoutvracht zoals berekend door de Zeesluisformulering (ZSF) inwerken.

Legenda:

- Rode lijnen: Contouren van de bakjes
- Donkerblauwe pijlen: Ingaande waterdebieten met bijbehorende chlorideconcentratie
- Lichtblauwe pijlen: Uitgaande waterdebieten met bijbehorende chlorideconcentratie
- Gele pijlen: Zoutvracht door kunstwerken
- Blauwe punten: Locaties gepresenteerd in het (hoofd)rapport
- Sterretje (*): Term die berekend wordt door het bakjesmodel

Figuur D.1 Schematisch overzicht van het bakjesmodel



Ieder bakje heeft een volume, horizontaal oppervlak en diepte. Tussen ieder bakje is een uitwisselingsoppervlak, een uitwisselingslengte en een dispersiecoëfficiënt gedefinieerd. De gebruikte waarden zijn hieronder weergegeven.

	Horizontaal oppervlak (m ²)	Diepte (m)	Volume (miljoen m ³)
I. Krammer-Volkerak Oost	15.000.000	5	75
II. Krammer-Volkerak Midden	8.000.000	5	40
III. Krammer-Volkerak Ingang Eendracht	6.500.000	5	32,5
IV. Krammer-Volkerak West	14.000.000	5	70
V. Eendracht Noord	1.750.000	7	12,25
VI. Eendracht Zuid	1.750.000	7	12,25
VII. Zoommeer	8.500.000	10	85
VIII. Zoommeer Zuid	2.500.000	5	12,5
IX. Bathse Spuikanaal	1.500.000	4	6
X. Voorhaven Kramersluizen	550.000	7	3,85
Totaal	60.050.000 (6005 ha)	-	349,35 miljoen m ³

	Uitwisselingsoppervlak (m ²)	Dispersielengte (m)	Dispersiecoëfficiënt (m ² /s)
I. Krammer-Volkerak Oost ↔ II. Krammer-Volkerak Midden	7.500	1000	50
II. Krammer-Volkerak Midden ↔ III. Krammer-Volkerak Ingang Eendracht	12.500	1000	50
III. Krammer-Volkerak Ingang Eendracht ↔ IV. Krammer-Volkerak West	12.500	5000	50
IV. Krammer-Volkerak West ↔ X. Voorhaven Kramersluizen	1.540	1000	50
III. Krammer-Volkerak Ingang Eendracht ↔ V. Eendracht Noord	1.500	1000	50
V. Eendracht Noord ↔ VI. Eendracht Zuid	1.500	2000	50
VI. Eendracht Zuid ↔ VII. Zoommeer	5.000	5000	50
VII. Zoommeer ↔ VIII. Zoommeer Zuid	2.800	1000	50
VIII. Zoommeer Zuid ↔ IX. Bathse Spuikanaal	500	2000	50

D.2 Opzet en stappen berekening

Een berekening met het bakjesmodel doorloopt de volgende stappen:

1. Voor iedere term van de waterbalans en de chloridebalans wordt een aanname gedaan.
2. Met een Python script wordt achtereenvolgens
 - a. Het debiet door de Kramersluizen en de Bathse spuisluis berekend.
 - b. De waterstandvariatie door het jaar heen berekend.

- c. De wateruitwisseling tussen de 10 bakjes van het bakjes-model berekend.
3. Met de Zeesluisformulering wordt de bijbehorende zoutvracht van de Krammersluizen naar de voorhaven aan de Volkerak-Zoommeer zijde berekend.
4. Met waterkwaliteitssoftware D-WAQ wordt op basis van a) de berekende wateruitwisseling tussen de bakjes, b) de termen van de chloridebalans, en c) de berekende zoutvracht van de Krammersluizen, de chlorideconcentratie in de 10 bakjes van het bakjes-model berekend door het jaar heen.

Termen van de water- en chloridebalans

De termen voor de water- en chloridebalans zijn gevisualiseerd in Figuur D.1 en opgenomen in tabel D.1.

Tabel D.1 Termen van water- en zoutbalans van het Volkerak-Zoommeer en databron voor modelinvoer

Balansterm	Effect klimaatverandering (Figuur 2.3)	WATERBALANS	CHLORIDEBALANS
Volkeraksluizen	<ul style="list-style-type: none"> Neerslagpatroon/ Rivierafvoer Zeespiegelstijging 	<ul style="list-style-type: none"> Op basis van variant: <ul style="list-style-type: none"> 40 m³/s 25 m³/s 25 m³/s met winterdoorspoeling 15 m³/s 	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van 100 mg/l op basis van historische data
Dintel	<ul style="list-style-type: none"> Neerslagpatroon/ Rivierafvoer 	<ul style="list-style-type: none"> Historische data (2017, 2018) Inclusief autonome ontwikkeling Roode Vaart (+1,5-2,5 m³/s) Klimaatscenario 2050 en 2085 	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van 80 mg/l op basis van historische data
Vliet	<ul style="list-style-type: none"> Neerslagpatroon/ Rivierafvoer 	<ul style="list-style-type: none"> Historische data (2017, 2018) Klimaatscenario 2050 en 2085 	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van 80 mg/l op basis van historische data
Neerslag	<ul style="list-style-type: none"> Neerslagpatroon/ Rivierafvoer 	<ul style="list-style-type: none"> Historische data (2017, 2018) Klimaatscenario 	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van 5 mg/l
Krammersluizen	<ul style="list-style-type: none"> Zeespiegelstijging 	<ul style="list-style-type: none"> -9 m³/s in groeiseizoen -29 m³/s buiten groeiseizoen Controle door bakjes-model voor waterbeschikbaarheid 	<ul style="list-style-type: none"> Uitstroom: Uitkomst bakjes-model Instream: Uitkomst Zeesluisformulering
Bergse Diepsluis	<ul style="list-style-type: none"> Zeespiegelstijging 	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van -1 m³/s op basis van historische data 	<ul style="list-style-type: none"> Uitstroom: Uitkomst bakjes-model Instream: 0,5 kg/s schatting
Kreekraksluizen	Geen	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van -2 m³/s op basis van historische data 	<ul style="list-style-type: none"> Uitstroom: Uitkomst bakjes-model
Watervraag Hollandse Delta	Geen	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van -0,5 m³/s op basis van opgave Hollandse Delta 	<ul style="list-style-type: none"> Uitstroom: Uitkomst bakjes-model
Watervraag Brabantse Delta	Geen	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van -0,9 m³/s op basis van opgave Brabantse Delta 	<ul style="list-style-type: none"> Uitstroom: Uitkomst bakjes-model
Watervraag Scheldestromen	Geen	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van -3,0 m³/s op basis van opgave Scheldestromen 	<ul style="list-style-type: none"> Uitstroom: Uitkomst bakjes-model
Verdamping	<ul style="list-style-type: none"> Temperatuur 	<ul style="list-style-type: none"> Historische data (2003, 2018) 	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van 0 mg/l
Kwel	<ul style="list-style-type: none"> Zeespiegelstijging 	Geen	<ul style="list-style-type: none"> Vaste waarde van 3 kg/s op basis van literatuurgegevens
Bathse spuisluis	<ul style="list-style-type: none"> Zeespiegelstijging 	<ul style="list-style-type: none"> Uitkomst van waterbalansmodel 	<ul style="list-style-type: none"> Uitstroom: Uitkomst bakjes-model Instream: 0,1 kg/s schatting

Berekening debiet door de Krammersluizen en de Bathse spuisluis

De Bathse spuisluis wordt gebruikt op het opgegeven streefpeil te handhaven. Het debiet door de Bathse spuisluis ($Q_{\text{Bathse spuisluis}}$) is gelijk aan het verschil tussen de som van de instromende en uitstromende debieten met een correctie voor een peilverandering Δh_{VZM} , maar nog niet negatief worden:

$$Q_{\text{Bathse spuisluis}} = \max(0; \Sigma \text{ instromende debieten} - \Sigma \text{ uitstromende debieten} + \Delta h_{\text{VZM}} * \text{wateroppervlak VZM})$$

Er worden twee toetsen uitgevoerd op het berekende debiet door de Bathse spuisluis. Als eerste wordt getoetst of de capaciteit van de Bathse spuisluis voldoende is om het debiet (op dagbasis) af te voeren. Hiervoor wordt een eenvoudige afvoerrelatie gebruikt, waarbij het waterstandsverschil tussen Volkerak-Zoommeer en Westerschelde altijd positief moet zijn:

$$Q_{\text{Bathse spuisluis}} = A \times \mu \times \sqrt{2 \times g \times (h_{\text{VZM}} - h_{\text{Westerschelde}})}$$

Met:

A	= Doorstroomoppervlak van de Bathse spuisluis (85,5 m ² , voor de 6 kokers samen)
μ	= Afvoercoëfficiënt (0,65)
g	= zwaartekrachtsversnelling (9,81 m/s ²)
h _{VZM}	= waterstand Volkerak-Zoommeer (m NAP)
h _{Westerschelde}	= waterstand Westerschelde (m NAP)

Als de benodigde afvoer om het waterpeil te handhaven groter is dan de maximale capaciteit, kan niet alles afgevoerd worden en zal de waterstand in het Volkerak-Zoommeer stijgen.

De tweede toets is of er voldoende water voor de Krammersluizen beschikbaar is. In geval van onvoldoende beschikbaarheid – dus minder dan 29 m³/s – wordt er geen water afgevoerd door de Bathse spuisluis. Afvoer door de Krammersluizen heeft dus voorrang op afvoer door de Bathse spuisluis.

Berekenen van de waterstandsvariatie door het jaar heen

Na het berekenen van de debieten door de Krammersluizen en de Bathse spuisluis zijn alle debieten van de waterbalans bekend en kan de waterstandsvariatie uitgerekend worden. De waterstandsvariatie volgt het streefpeil als:

- de capaciteit van de Bathse spuisluis voldoende is. Als de capaciteit onvoldoende is, loopt de waterstand op.
- Er voldoende wateraanvoer is voor de watervraag van de Krammersluizen, de omliggende waterschappen, Bergse diepsluis, Kreekraksluizen en verdamping. Als de wateraanvoer onvoldoende is, daalt de waterstand.

Berekenen van de wateruitwisseling tussen de bakjes

Na het berekenen van de daadwerkelijk optredende waterstandsvariatie kan voor ieder bakje een waterbalans worden opgesteld. De wateruitwisseling tussen de bakjes is gelijk aan de sluitfout van de waterbalans. De generieke formule is als volgt

$$Q_{\text{wateruitwisseling}} = \Sigma \text{ instromende debieten} - \Sigma \text{ uitstromende debieten} + \Delta h * \text{wateroppervlak}$$

Berekenen zoutvracht met de ZSF

Op basis van het berekende debiet door de Krammersluizen wordt met het de ZSF de zoutvracht door de Krammersluizen naar de voorhaven berekend (of in een vooraf berekende tabel opgezocht).

Berekening chlorideconcentratie

De waterkwaliteitsmodelsoftware D-WAQ berekent de advectie-dispersie vergelijking van het bakjesmodel. Het transport van chloride is opgebouwd uit advectief transport, ofwel het transport van chloride met het waterdebiet, en dispersief transport, ofwel het transport als gevolg van concentratieverschil tussen twee bakjes. Daarnaast worden directe belastingen meegenomen (zoute kwel en zoutvrachten door Krammersluizen, Bergse diepsluis en Bathse spuisluis). De

generieke formule voor de berekening (met een tijdstap van 1 seconde) van de chlorideconcentratie is :

$$Chloride_{t+1} = Chloride_t + \frac{(\sum (Q_{instroom} * Chloride_{instroom}) - \sum (Q_{uitstroom} * Chloride_t) + Zoutlast) / Volume_t + A_{uitwisselingsoppervlak} * D * (Chloride_t - Chloride_{t, aangrenzend}) / Dispersielengte}{1}$$

Met:

Chloride_{t+1} = Chlorideconcentratie op tijdstip t+1, d.w.z. de volgende tijdstap (g/m³ = mg/l)

Chloride_t = Chlorideconcentratie op tijdstip t, d.w.z. de huidige tijdstap (g/m³ = mg/l)

Q_{instroom} = Instromend debiet (m³/s)

Chloride_{instroom} = Chlorideconcentratie van het instromend debiet (g/m³ = mg/l)

Q_{uitstroom} = Uitstromend debiet (m³/s)

Chloride_{uitstroom} = Chlorideconcentratie van het uitstromend debiet (g/m³ = mg/l)

Zoutlast = directe zoutlast (g/s)

Volume_t = Watervolume van het bakje op tijdstip t (m³)

A_{uitwisselingsoppervlak} = Uitwisselingsoppervlak tussen de bakjes (m²)

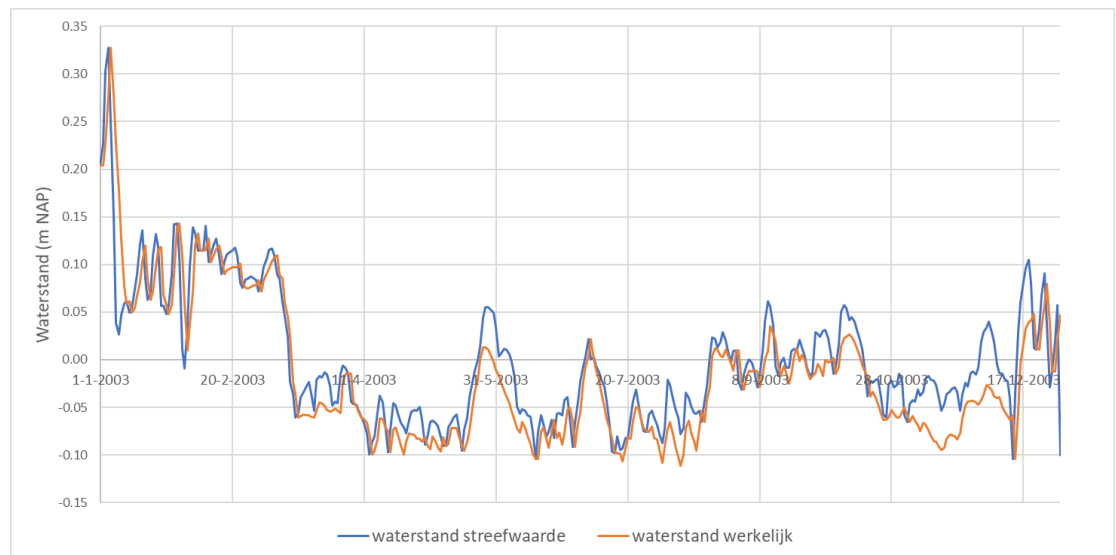
D = Dispersiecoëfficiënt (m²/s)

Chloride_{t, aangrenzend} = Chlorideconcentratie van het aangrenzende bakje op tijdstip t (g/m³)

Dispersielengte = Dispersielengte (m)

D.3 Verificatie van het bakjesmodel

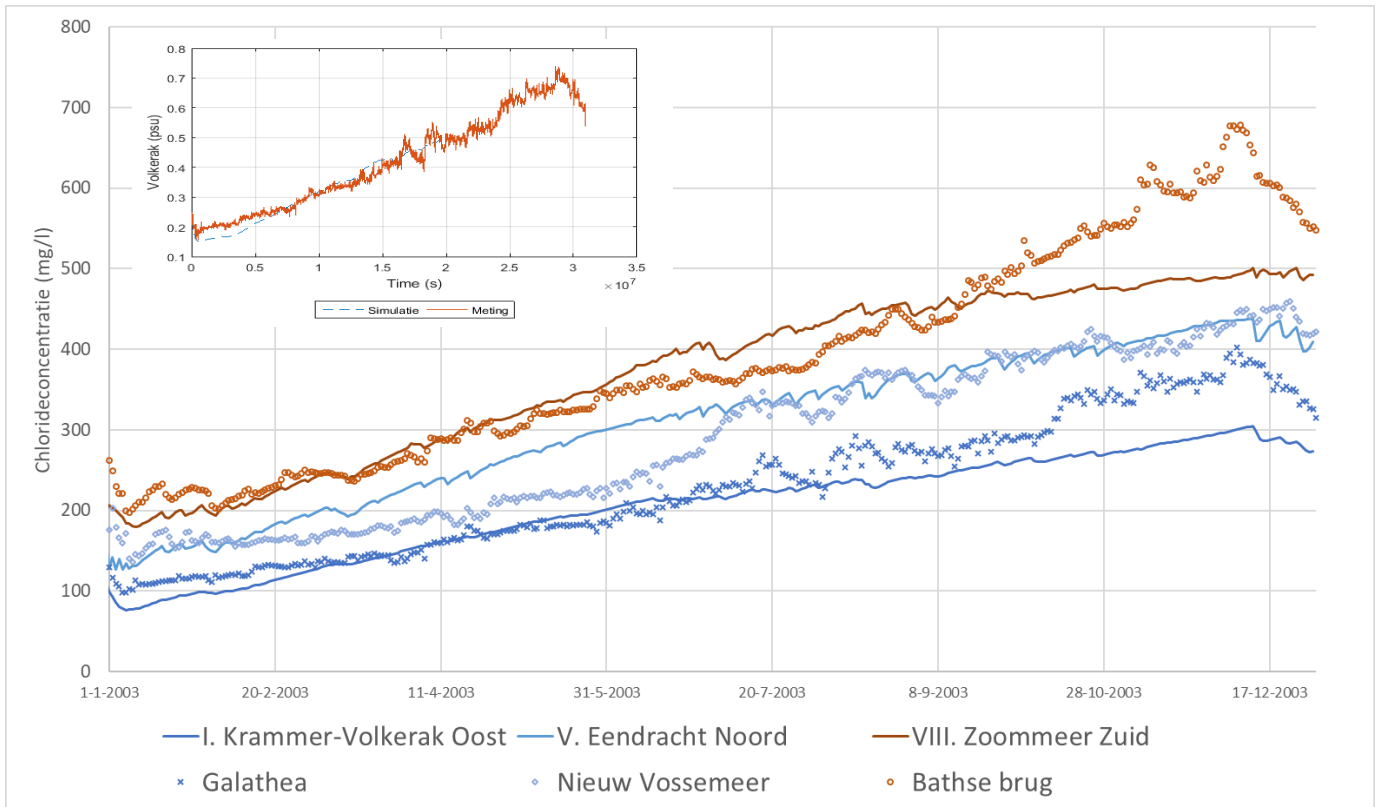
Met het bakjesmodel is dezelfde situatie doorgerekend als met het Wanda-Locks in de Planstudie Krammersluizen (Deltares, 2016). Het betreft het jaar 2003. De tijdreeksen voor de debieten door de Volkeraksluizen, de Dintel en Steenbergse Vliet, de Krammersluizen en neerslag en verdamping zijn overgenomen uit het Wanda-Locks model. De watervraag van de waterschappen en de debieten van de Bergse diepsluis en de Kreekraksluizen zijn conform Tabel D.1 opgenomen. Het debiet door de Bathse spuisluis wordt door het bakjesmodel berekend. Figuur D.2 laat zien dat het bakjesmodel de opgetreden waterstand goed reproduceert.



Figuur D.2 Vergelijking tussen met het bakjesmodel berekende waterstand (rood) en gemeten waterstand (blauw)

Het bakjesmodel is geverifieerd voor de berekende chlorideconcentratie. De berekende chlorideconcentratie is vergeleken met het berekeningsresultaat van Wanda-Locks en met metingen uit 2003. De dispersielengte is als kalibratieparameter gebruikt.

Figuur D.3 laat zien dat de berekende chlorideconcentratie over het algemeen goed overeenkomt met de gemeten chlorideconcentratie. Het niveau en de trend van stijging worden redelijk goed gereproduceerd. Er zijn enkele afwijkingen. Op meetlocatie Nieuw Vossemeer is de stijging in het eerste deel van het jaar iets te snel, terwijl de berekende concentratie in de tweede helft van het jaar goed overeenkomt met de metingen. Voor meetlocaties Galathea en Bathse brug is de overeenkomst in de eerste helft van het jaar goed, terwijl in de tweede helft van het jaar een onderschatting optreedt. De reden voor afwijking is niet onderzocht.



Figuur D.3 Met het bakjesmodel berekende chlorideconcentratie (lijnen) en gemeten chlorideconcentratie op drie meetlocaties in het Volkerak-Zoommeer (symbolen). Inzet is het vergelijkbare resultaat van het Wanda-Locks model op meetlocatie Nieuw Vossemeer (uit Deltares, 2016)

D.4 Toepassing voor scenario's

Voor de scenario's wordt de ZSF gebruikt om de zoutlast door de Krammersluizen te berekenen. Ten opzichte van de verificatie is een aanpassing aan het bakjesmodel gedaan. Het dispersief transport tussen Voorhaven Krammersluizen (bakje X) en Krammer West (bakje IV) is kleiner gemaakt (door de dispersielengte te reduceren), omdat de chlorideconcentratie in het bakjesmodel hoger was dan in het vergelijkbare Wanda-Locks scenario. De dispersielengte is zodanig verlaagd, dat ook bij het scenario de met het bakjesmodel berekende chlorideconcentratie overeenkomt met het Wanda-Locks model dat als referentie dient.

D.5 Oordeel geschiktheid

Het bakjesmodel in combinatie met de ZSF is geschikt voor snelle scenario-berekeningen voor de waterstand en chlorideconcentratie in het Volkerak-Zoommeer. Met deze aanpak kan de waterstand tot op enkele cm nauwkeurig berekend worden. De onzekerheid in de berekende

chlorideconcentratie is groter en wordt geschat op $\pm 10\%$. Het dispersief transport bevat de grootste onzekerheden. De keuzes voor de dispersielengte (of voor uitwisselingsoppervlak of dispersiecoëfficiënt) hebben een relatief grote invloed.

Tijdens de verificatie is daarnaast gebleken dat de verdeling van de zoute kwel over de verschillende bakjes van belang is. De totale zoute kwel van 3 kg/s wordt algemeen gebruikt als expert judgement. De verdeling over het systeem is niet (goed) bekend. In het bakjesmodel is gekozen voor een verdeling van Krammer West (bakje IV, 30%), Eendracht Noord (bakje V, 10%), Eendracht Zuid (bakje VI, 10%), Zoommeer (bakje VII, 25%) en Zoommeer Zuid (bakje VIII, 25%).

Bij verder gebruik van het bakjesmodel wordt aanbevolen om het bakjesmodel op meerdere historische jaren te vergelijken met metingen om de gevoeligheid van het dispersief transport en van de verdeling van de zoute kwel beter inzichtelijk te maken. Probleem is dat de zoutvracht door de Krammersluizen mogelijk niet goed genoeg bekend is in historische jaren.

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

Deltares

www.deltares.nl