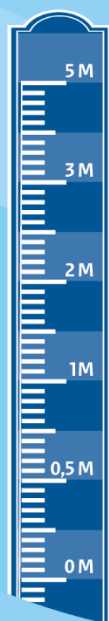




Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Synthese KP ZSS Systemanalyse Zoetwater

Synthese KP ZSS Systeemanalyse Zoetwater

Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS)- Systeemanalyse (voormalig Spoor II) – Thema Zoetwater

Datum	December 2025
Versie	1.1
Status	DEFINITIEF

Colofon

Uitgegeven door Rijkswaterstaat - Water Verkeer en Leefomgeving
Auteurs M. Blaas, J. Hoekstra, Y.F. Friocourt en M. Bonte

Informatie

Telefoon

Mobiel

E-mail

Datum December 2025

Versie 1.1

Status DEFINITIEF

Versiebeheer

0.1	Friocourt en Bonte	Opzet
0.5	Blaas	Deelbare versie voor gesprekken regio en Deltares
0.8	Blaas	Versie eind Fase 1 experts Deltares hebben meegelezen
0.9	Blaas en Hoekstra	Aanvullingen gedaan o.b.v. bevindingen Fase 2
0.95	Blaas en Hoekstra	Commentaar experts Deltares verwerkt
1.0	Blaas en Hoekstra	Commentaar regio-experts verwerkt
1.1	Blaas en Hoekstra	Naar aanleiding van presenteren eindresultaten bij diverse partijen enkele kleine tekstuele aanpassingen gemaakt

Inhoud

Samenvatting 7

1 Inleiding en uitgangspunten 9

- 1.1. Inleiding 9
- 1.2. Hoofdvragen Systeemanalyse Zoetwater 11
- 1.3. Uitgangspunten 12
- 1.4. Leeswijzer 13

2 Werkwijze 14

- 2.1. Inleiding modelinstrumentarium 14
- 2.2. Modelleeraanpak grondwater Fase 1 en 2 14
 - 2.2.1. Grondwater en regionale doorspoelwatervraag 14
 - 2.2.2. Zoetwaterlenzen in de duinen 16
- 2.3. Modelleeraanpak oppervlaktewateren Fase 1 17
 - 2.3.1. Algemene aanpak 17
 - 2.3.2. Aanpak Fase 1 18
- 2.4. Modelleeraanpak oppervlaktewateren Fase 2 20
 - 2.4.1. Verdieping en verbreding 20
 - 2.4.2. Samenstelling zichtwaarden en scenario's 20
- 2.5. Modelleeraanpak bovenregionale waterverdeling en waterbalans 21
 - 2.5.1. Bovenregionale waterverdelingstool 21
 - 2.5.2. Grootschalige waterbalans van Nederland 22
- 2.6. Oprekbaarheden en oprekpakketten 23
 - 2.6.1. Aanpak inventarisatie mogelijke oprekmaatregelen 23
 - 2.6.2. Totstandkoming oprekpakketten 24

3 Grondwaterverzilting en regionale doorspoelvraag 26

- 3.1. Effect zeespiegelstijging op regionale doorspoelvraag 26
- 3.2. Oprekmaatregelen reduceren toename regionale doorspoelvraag 29
- 3.3. Zoetwaterlenzen in de duinen 31
- 3.4. Conclusies houdbaarheid en oprekbaarheid 32

4 Volkerak-Zoommeer (VZM) 34

- 4.1. Essentie systeemwerking zoetwaterbuffer Volkerak-Zoommeer 34
 - 4.1.1. Huidig beheer 34
 - 4.1.2. Uitgangspunten analyse zeespiegelstijging 35
- 4.2. Gevolgen zeespiegelstijging op de zoetwaterbalans van het VZM 36
 - 4.2.1. Zoutvracht sluizen 36
 - 4.2.2. Zoute kwel 38
 - 4.2.3. Aan- en afvoercapaciteiten 39
 - 4.2.4. Beschikbaarheid zoetwater uit Hollands Diep 41
- 4.3. Oprekmaatregelen binnen het VZM-gebied om gevolgen zeespiegelstijging te mitigeren 42
- 4.4. Conclusies houdbaarheid en oprekbaarheid 45

5 Rijn-Maasmonding (RMM) 46

- 5.1. Essentie systeemwerking Rijn-Maasmonding 46
 - 5.1.1. Algemeen 46
 - 5.1.2. Noordrand en Zuidrand 47
 - 5.1.3. Vier strategische deelgebieden en hun beïnvloeding door zeespiegelstijging 49

- 5.2. Gevolgen van zeespiegelstijging en afvoerverandering op verzilting in het HWS van de RMM 52
- 5.2.1. Gemiddelde beeld: intrusielengte 52
- 5.2.2. Benodigde surplussen om zoetwaterdoelen in stand te houden 57
- 5.2.3. Herhalingstijden 59
- 5.3. Oprekmaatregelen om gevolgen zeespiegelstijging te mitigeren 60
- 5.3.1. Vergroten surplus Hollandsche IJssel en Lek 60
- 5.3.2. Accepteren verzilting Hollandsche IJssel en Lek 62
- 5.3.3. Meestijgen bodem NWW en Nieuwe Maas 62
- 5.3.4. Situationele afsluiting (zoutkeringen) 63
- 5.4. Conclusies houdbaarheid, oprekbaarheid RMM 64

6 Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal 67

- 6.1. Essentie systeemwerking 67
- 6.2. Systeemanalyse (gevoeligheidsanalyse) 69
- 6.3. Gevolgen van zeespiegelstijging op zoet ARK 70
- 6.3.1. Afvoer: Houdbaarheid maal/spuisysteem 71
- 6.3.2. Zoutlast: Houdbaarheid chloride 72
- 6.3.3. Houdbaarheid aanvoercapaciteit 73
- 6.4. Oprekmaatregelen om gevolgen zeespiegelstijging te mitigeren 75
- 6.5. Conclusies houdbaarheid en oprekbaarheid 78

7 IJsselmeergebied 80

- 7.1. Essentie systeemwerking zoetwaterbuffer IJsselmeergebied 80
- 7.1.1. Algemene beheerstrategie 80
- 7.1.2. IJsselmeer 81
- 7.1.3. Markermeer 82
- 7.1.4. Zoetwaterfuncties 82
- 7.2. Gevolgen van zeespiegelstijging op de zoetwaterbuffer 82
- 7.2.1. Algemeen 82
- 7.2.2. Doorwerking zeespiegelstijging op de spuicapaciteit 83
- 7.2.3. Doorwerking zeespiegelstijging op zoutvrachten 84
- 7.2.4. Doorwerking zeespiegelstijging op peiluitzakking en watertekort 86
- 7.2.5. Onzekerheden 88
- 7.3. Maatregelen om gevolgen zeespiegelstijging tegen te gaan en houdbaarheid op te rekken. 89
- 7.3.1. Bronmaatregelen op schut- en spuisluisen 89
- 7.3.2. Extra aanvoer en/of waterschijf creëren 91
- 7.3.3. Omgaan met hogere chloridewaardes & verlagen zoutgehalte IJssel 93
- 7.3.4. Samenstelling oprekpakketten IJsselmeergebied 94
- 7.4. Conclusies houdbaarheid en oprekbaarheid 95

8 Maatregelen Oprekpakketten 97

9 Landsbrede waterbalans HWS en hydraulische knelpunten 98

- 9.1. Grootschalige waterbalans van het HWS 98
- 9.1.1. Effect van zeespiegelstijging op het watertekort 98
- 9.1.2. Effect van de oprekpakketten (maatregelen) op het watertekort 103
- 9.2. Hydraulische knelpunten 106

10 Conclusies en discussie 109

- 10.1. Conclusies hoofdvragen 109
- 10.2. Chronologie 111
- 10.3. Discussie: dilemma's binnen en buiten de zoetwatervoorziening 114

10.4. Aanbevelingen voor vervolg 115

11 Referenties 116

Bijlage A Oprekpakketten 119

Bijlage B Beschrijving data en uitgangspunten waterbalans KP ZSS 124

Bijlage C Sankey diagrammen 125

Samenvatting

De eerste effecten van zeespiegelstijging op zoetwaterbeschikbaarheid komen tot uiting in de afnemende afvoercapaciteiten van spuisluizen. Deze zijn niet alleen voor peilbeheer, maar ook voor zoutbeheersing van belang. Al onder 0,5 m zeespiegelstijging moeten de spuisystemen bij de Krammersluizen en IJmuiden aangepast worden om bij hogere zeewaterstanden hun afvoercapaciteit te behouden. Voor het IJsselmeer geldt dat richting 0,5 m zeespiegelstijging de zoutbeheersing via de Afsluitdijk efficiënter en minder zeespiegelgevoelig te maken is, door de erosiekuilen middels gemalen te ontzilten met een afgemeten debiet. Dat is eerder dan dat de gemalen voor behoud van peilbeheersing noodzakelijk zijn.

Tot ca. 1 m zeespiegelstijging is toenemende droogte de sterkste *driver* voor toenemende verzilting in het hoofdwatersysteem (HWS). Die sterke gevoeligheid voor droogte zit vooral in de gevoeligheid voor afnemende afvoer door de Nieuwe Waterweg. De afvoer door de Nieuwe Waterweg neemt sneller af dan de Lobithafvoeren vanwege de simultaan toenemende watervraag aan het HWS. Verzilting in de Rijn-Maasmonding (RMM) neemt vervolgens op zijn beurt ook weer sneller toe naarmate de afvoer lager is. De effecten van toenemende droogte zijn overal in het watersysteem merkbaar, de effecten van toenemende verzilting zijn allereerst in de RMM merkbaar.

Interne verzilting door zoute kwel in met name de polders neemt door zeespiegelstijging gestaag toe. Interne verzilting zelf is niet tegen te gaan en zal ook lang najlen, zelfs als de zeespiegelstijging in de toekomst weer afvlakt. De huidige bestrijding van zoute kwel door regionale systemen door te spoelen, zal steeds meer zoetwater vragen dat steeds minder voorhanden is, omdat rivierafvoeren dalen en andere functies ook steeds meer water vragen.

Vanaf 1 m gaat zeespiegelstijging, in vergelijking met droogte, in het HWS een steeds grotere rol spelen in de waterbalans, vooral door de toenemende watervraag aan het HWS voor bestrijding van interne verzilting (zoute kwel). Bij beperkte zeespiegelstijging leidt doorspoeling van polders en boezems vooral in Noord-Nederland tot toename in doorspoel-behoefte. Vanaf 1 m gaat ook de doorspoel-behoefte van West-Nederland sterker stijgen en drukt ook die watervraag steeds sterker op de waterbalans. Voortzetten van de bestrijding van zoute kwel vraagt bij 1 m enkele tientallen m³/s meer dan nu, bij 3 m ca. 200 m³/s meer.

Het bestrijden van zout in alle delen van het systeem op het huidige niveau, is in zijn totaliteit niet meer houdbaar voorbij 1 m zeespiegelstijging. Oprekmaatregelen bieden enig soelaas, maar ook met vraagbeperking is er ergens tussen 1 en 2 m zeespiegelstijging sowieso onvoldoende zoetwater om alle delen vaak genoeg zo zoet te houden als nu gewenst. De individuele strategische zoetwaterbuffers in het HWS zijn dan nog steeds bruikbaar te houden, zij het met tijdelijk hogere chlorides in droge zomerperioden. Jaarrond zijn ze nog steeds van voldoende kwaliteit voor de functies. Voorwaarde voor het houdbaar houden van één of een aantal van die buffers is wel dat het water daarvoor beschikbaar blijft. Om dat water vrij te spelen is acceptatie van (grotere) variatie in zoutgehalten in regionale systemen en HWS een onvermijdelijke maar ook effectieve keuze, een keuze die echter ook veel gevolgen met zich meebrengt.

Vanaf 2 tot 3 m gaat zeespiegelstijging overal in het HWS voelbaar doorwerken op de water- en zoutbalansen. Er kan zich in de RMM een kantelpunt voordoen indien restdebieten door de Nieuwe Waterweg zodanig dalen dat het Hollands Diep en het Haringvliet langdurig (achterwaarts) verziltten. Daarmee komt ook het Volkerak-Zoommeer onder druk te staan. Afhankelijk van een maatschappelijke kosten- en baten-afweging zijn ingrijpende aanpassingen in de RMM rond deze zeespiegelwaarden te overwegen, variërend van aanpassen van bodemligging en geometrie van het systeem tot situationele afsluitingen door zoutkeringen. Er zal bij die condities sowieso sprake zijn van een ander perspectief op de waterveiligheidsstrategie in de RMM. Daarin kan het concept van zoutkeringen (situationele afsluitingen) in aanvulling op stormvloedkeringen en/of het concept van permanente, gedeeltelijke afsluitingen worden meegenomen in de overweging.

Het handelingsperspectief verschuift gaandeweg steeds meer van omgaan met droogte naar ook omgaan met zout en grotere variaties in zoutgehaltes. Al met al tekent zich een pad af van een hybride strategie van enerzijds aanpassen aan droogte en verzilting in combinatie met anderzijds lokale civieltechnische ingrepen om de pijn te verzachten waar dat effectief is. De systeemanalyses Zoetwater van KP ZSS laten zien dat alle verziltingsgevoelige delen van het HWS en grote delen van het regionale systeem onderling communicerende vaten zijn. Tegelijk zijn ook de afwegingen tussen kwantiteit en kwaliteit van zoetwater communicerende vaten. Deze complexiteit van het zoetwater-vraagstuk vraagt daarom bij alle keuzes -van civieltechnisch tot acceptatie en aanpassing- om landsbrede, integrale afwegingen. Dit geldt niet alleen voor grootschalige maar ook voor regionale keuzes. In stand houden van een specifieke regionale zoetwaterstrategie zal ook een afweging van lokaal rendement versus bovenregionale afwenteling vergen. Het afwentelings-effect geldt tot slot ook voor afwegingen tussen korte-termijn voordelen versus langere termijn nadelen.

1 Inleiding en uitgangspunten

1.1. Inleiding

Achtergrond kennisprogramma

Het kennisprogramma zeespiegelstijging (KP ZSS) onderzoekt wat de gevolgen voor Nederland kunnen zijn als de zeespiegel stijgt tot 5 meter. Het programma levert kennis op waarmee we keuzes kunnen maken voor de bescherming en inrichting van Nederland. Het kennisprogramma bestaat uit verschillende onderdelen. Elk onderdeel kent één centrale vraag:

- I. Zeespiegelstijging en Antarctica
 - i. *Wat kunnen we verwachten en wat zijn de gevolgen hiervan voor de zeespiegelstijging in Nederland?*
- II. Systeemanalyse
 - i. *Tot hoeveel stijging volstaan de voorkeursstrategieën uit het Deltaprogramma en zijn aanpassingen mogelijk om deze strategieën langer vol te houden?*
- III. Signaleringsmethodiek
 - i. *Hoe optimaliseren we de methodiek Meten-Weten-Handelen om signalen op te pikken en tijdig de nodige maatregelen te kunnen nemen?*
- IV. Lange termijn opties
 - i. *Wat is het handelingsperspectief: welke lange-termijn oplossingsrichtingen zijn er mogelijk als de huidige strategie niet meer houdbaar is? En hoe kunnen we daar nu al rekening mee houden?*
- V. Implementatievraagstukken
 - i. *Wat is er nodig om alle relevante partijen te betrekken bij het kennisprogramma en hoe kun je een eventuele verandering naar een andere aanpak voor elkaar krijgen?*

De Systeemanalyse van KP ZSS beogen uiteindelijk de houdbaarheid en oprekbaarheid van de huidige deltabeslissingen en strategieën in beeld te brengen. Dit gebeurt voor de thema's waterveiligheid, zandige kust (het kustfundament) en zoetwater.

Wat staat er in dit rapport?

Dit rapport biedt een samenvatting, reflectie en synthese van de onderzoeken die in opdracht van RWS voor het thema zoetwater binnen de Systeemanalyse zijn uitgevoerd. Het betreft de onderzoeken en rapporten weergegeven in Tabel 1-1.

Tabel 1-1 Overzicht rapporten uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat voor de Systeemanalyse thema zoetwater.

Vorbereidende fase
- Vraagarticulatie en aanzet modelinstrumentarium zoetwater (Deltares 2021)
Fase 1
- Effecten op grondwaterverziltting en watervraag (Deltares 2022)
- Systeemanalyses zoetwater regio Volkerak-Zoommeer (Arcadis/HydroLogic 2023a)
- Systeemanalyses zoetwater regio Rijn-Maasmonding (Arcadis/HydroLogic 2023b)
- Systeemanalyses zoetwater regio Amsterdam-Rijnkanaal –Noordzeekanaal (Arcadis/HydroLogic 2023c)
- Systeemanalyses zoetwater regio IJsselmeer – Markermeer (Arcadis/HydroLogic 2023d)
- Systeemanalyses zoetwater bovenregionale waterverdeling (Arcadis/HydroLogic 2023e)
Fase 2
- Nadere analyse zoetwater Rijn-Maasmonding onder extreme zeespiegelstijging (HKV 2024)
- Nadere analyse effecten zeespiegelstijging Regio IJsselmeer & Markermeer (Arcadis/HydroLogic 2025)
- Verkenning handelingsruimte in doorspoelen polders bij zeespiegelstijging (Deltares 2024b)
- Effecten zeespiegelstijging op zoetwater in de Nederlandse duinen (Deltares 2024c)
- Oprekmogelijkheden door maatregelen op spui- en schutsluizen (Deltares 2025b)
- Beschrijving data en uitgangspunten waterbalans KP ZSS (Deltares memo opgenomen in bijlage B van voorliggende rapportage)

De systeemanalyses zijn modelmatige analyses van de gevolgen van zeespiegelstijging op het grondwatersysteem en het hoofdwatersysteem in Nederland. De systeemanalyses maken het mogelijk om te begrijpen bij welke combinaties van omstandigheden (zeespiegelstijging, wateraanvoer, ruimtelijke ordening, economie, etc.) de zoetwaterbeschikbaarheid in Nederland onder druk komt te staan, en aan welke knoppen eventueel gedraaid zou kunnen worden om de druk te verminderen en/of de effecten van zeespiegelstijging tegen te gaan.

Fasering kennisprogramma

Het onderzoek bestaat uit drie fasen: In fase 1 (2020-2022) is gekeken naar de waterstaatkundige effecten van zeespiegelstijging. De resultaten van deze fase zijn voor alle thema's binnen de Systeemanalyse samengevat in een tussenbalans rapportage. In fase 2 (2023-2025) is gekeken welke maatregelen genomen kunnen worden om de zoetwaterstrategie langer in stand te houden. In fase 3 (2025 – 2026) zijn de resultaten van de verschillende thema's en sporen geïntegreerd zodat een landsdekkend beeld ontstaat. Het resultaat hiervan is samengevat in een eindbalans rapportage.

De resultaten van de Systeemanalyse (huidige voorkeursstrategie en de huidige voorkeursstrategie met oprekmaatregelen) en de lange termijn opties worden beoordeeld op de mate van impact op 18 onderdelen, zoals water, natuur en landbouw. Daarvoor wordt verwezen naar RHDHV (2025a, b). In voorliggende rapportage vindt geen analyse van de impact van maatregelen plaats.

Doel van dit rapport

Naast dat dit rapport een samenvatting geeft van de belangrijkste bevindingen uit bovenstaande rapporten, geeft dit rapport tevens een synthese. Synthese betekent

in dit geval het integreren van de uitgevoerde deelstudies. Zo worden de effecten van zeespiegelstijging op interne verzilting (en daarmee op de regionale watervraag) expliciet meegenomen en wordt er een doorkijk geboden met betrekking tot waterbeschikbaarheid uit het rivierensysteem ten behoeve van de belangrijke zoete delen van het hoofdwatersysteem die verder gaat dan de huidig opgeleverde bovenregionale analyse.

Daarnaast reflecteert dit rapport op de bevindingen vanuit het perspectief van de oorspronkelijke hoofdvragen (zie paragraaf 1.2): Wat is de gecombineerde invloed van zeespiegel, wateraanbod uit de rivieren en regionale watervraag op de waterbeschikbaarheid? En hoe lang is de zoetwaterstrategie nog houdbaar? Dat wil zeggen dat niet alleen in kaart wordt gebracht wat er per regio gebeurt bij diverse meters zeespiegelstijging, rivierafvoer en hoe regionale watervraag daarbij optelt, maar ook wat er aan zoetwater uit het riviersysteem nodig is om de voorkeursstrategie per regio in zijn huidige opzet in stand te houden.

Het rapport is met name bedoeld voor (beleids)adviseur die werkzaam zijn op het gebied van waterbeschikbaarheid, en in het bijzonder voor (beleids)adviseurs die aan de slag gaan met de herijking van de Deltabeslissing Zoetwater 2021.

1.2. Hoofdvragen Systeemanalyse Zoetwater

Deze synthese brengt de kernpunten van de regionale systeemanalyses Zoetwater van KP ZSS bij elkaar en zet ze in het perspectief van de landsbrede waterbalans van het HWS. Als zodanig geeft dit rapport antwoord op de hoofdvragen van de Systeemanalyse KP ZSS vanuit een voornamelijk technisch ('waterstaatkundig') perspectief:

1. Wat zijn de gevolgen van (extreme) zeespiegelstijging voor de waterbeschikbaarheid in Nederland?
2. Wat betekent (extreme) zeespiegelstijging voor de houdbaarheid van de voorkeursstrategie Zoetwater?
3. Hoe en tot wanneer/welke meters zeespiegelstijging is de voorkeursstrategie Zoetwater houdbaar te houden? ('oprekbaar')?

Het 'technische perspectief' betekent dat in deze synthese relatief weinig concreet over impact op zoetwaterafhankelijke functies, kosten, baten en alternatieven wordt gezegd. Een beschouwing over de impact van extreme zeespiegelstijging is te vinden in het eerste deel van de Impact Analyse van KP ZSS (RHDHV 2025a). Ook is niet het volledige palet aan mogelijke oprekmaatregelen en alternatieve strategieën beschouwd. En tot slot ontbreken, zelfs gegeven het overwegend technisch perspectief, scherpe criteria ten aanzien van het doelbereik ('weerbaar tegen watertekort'). Een beschouwing over de oprekbaarheid en het doelbereik onder extreme zeespiegelstijging is te vinden in het tweede deel van de Impact Analyse van KP ZSS (RHDHV 2025b).

Deze synthese van de systeemanalyses beschrijft dus vooral een stresstest (of gevoeligheidsanalyse) van twee belangrijk onderdelen van de zoetwaterstrategie: de KZH en de omgang met interne verzilting in van het HWS afhankelijke regionale watersystemen. Deze uitsnede uit de totale zoetwaterstrategie is gekozen omdat dit de onderdelen zijn die geraakt worden door verzilting, mede veroorzaakt door zeespiegelstijging.

1.3. Uitgangspunten

De uitgangspunten voor de systeemanalyses van het KP ZSS zijn vastgelegd in een memorandum dat is vastgesteld in het opdrachtgevers-opdrachtnemersoverleg (OGON) op 19 november 2020. Hieronder staan de punten die voor zoetwater relevant zijn:

Beleidsuitgangspunt:

- De in de Deltabeslissing 2021 geformuleerde beleidsambitie is leidend geweest voor de systeemanalyse. De Deltabeslissing Zoetwater 2021 stelt als doel dat Nederland in 2050 'weerbaar' is tegen zoetwatertekorten. Hierbij wordt gestreefd naar een gezond en evenwichtig watersysteem, cruciale gebruiksfuncties beschermen, water effectief en zuinig gebruiken, waterkennis, -kunde en -innovaties ontwikkelen en de concurrentiepositie van waterafhankelijke sectoren verbeteren.
- Voor KP ZSS thema Zoetwater geldt de in 2020 aangepaste Zoetwaterstrategie als voorkeursstrategie en referentie (herijking Deltabeslissing Zoetwater in het Deltaprogramma 2021). Deze komt in het kort neer op
 - o Water beter vasthouden, bergen en opslaan in de bodem en in buffers
 - o Water slim verdelen
 - o (Rest)schade accepteren
- De uitwerking van bovenstaande voor het Hoofdwatersysteem (HWS) komt neer op de filosofie van de Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem (KZH). De kern van de KZH-strategie is dat met optimaal benutten van buffermogelijkheden en slimme verdeling van zoetwater binnen het HWS de waterbeschikbaarheid vanuit het HWS minder gevoelig wordt voor klimaatverandering;
- Voor zoetwaterbeschikbaarheid, robuustheid of weerbaarheid tegen droogte en watertekort gelden geen beleidsmatige normen. In 2023 is binnen het Deltaprogramma Zoetwater een bestuurlijke ambitie uitgesproken om te streven naar een beleid waarbij niet vaker dan eens in de 20 jaar een situatie van daadwerkelijk watertekort zal optreden. Deze eens-in-de-20-jaar-frequentie (T20) is het vertrekpunt geweest voor de systeemanalyses zoetwater binnen KP ZSS daar waar herhalingstijden en inschattingen van 'houdbaarheid' aan de orde zijn.

Procesmatige uitgangspunten:

- Het kennisprogramma levert geen op risico's gebaseerde kosten-baten analyse (zoals MKBA WV21) t.a.v. beslissingen/maatregelen op de wijze waarop het Deltaprogramma dat doet.
- De Systeemanalyse sluiten aan bij de Regio-Deltaprogramma's conform de herijkingen, ook voor wat betreft detailniveau van te beantwoorden kennisvragen.

Selectie algemene inhoudelijke uitgangspunten (voor alle thema's):

- 'Houdbaarheid' wordt in de Systeemanalyse onderzocht in termen van waterstaatkundige effecten en de kwalitatieve duiding van de gevolgen daarvan op andere functies. Een grens aan houdbaarheid wordt niet uitgedrukt in termen van een aantal meters stijging of als een punt in de tijd, omdat 'houdbaarheid' ook een politieke afweging is.
- Bij verkennen van de 'oprekbaarheid' van de huidige strategie gaan we ervanuit dat het fundamentele karakter van de Voorkeurstrategie niet wijzigt.

- Zichtwaarden zeespiegelstijging zijn 0.5 m, 1m, 2m, 3m en 5m. De Systeemanalyse maken in eerste instantie geen koppeling met het verwachte moment van optreden.
- Er wordt gewerkt met aannames over de toekomstige (combinatie van) waarden van een beperkte selectie van klimaatvariabelen. Als referentie wordt hierbij uitgegaan van de beschikbare KNMI'14 en KNMI'23 scenario's.
- Omdat de meeste beschouwde zichtwaarden voor zeespiegelstijging verder weg in de tijd liggen dan de KNMI-scenario's, worden in de Systeemanalyse geen uitspraken gedaan over de toekomstige kans van voorkomen en dus ook geen uitspraak over het risico (kans maal gevolg).

Inhoudelijke uitgangspunten specifiek voor zoetwater:

- Uitgangspunt is dat (wat betreft zeespiegelstijging) de houdbaarheid van de strategische zoetwaterbuffers randvoorwaardelijk en maatgevend is voor de houdbaarheid van de regionale zoetwaterstrategieën.
- De zoetweraanpak binnen het kennisprogramma is primair gericht op die delen in het hoofdwatersysteem waar de dreiging van zeespiegelstijging zich het meest direct zal manifesteren; IJsselmeergebied, Amsterdam-Rijnkanaal - Noordzeekanaal gebied, Rijn-Maasmonding en het Volkerak-Zoommeer.
- Bij verkennen van de 'oprekbaarheid' van de huidige strategie gaan we ervan uit dat het fundamentele karakter van de Voorkeurstrategie niet wijzigt (bijvoorbeeld afsluitbaar open van de Maasmond).
- De toename in zoute kwel in polders door zeespiegelstijging en de watervraag aan het hoofdwatersysteem die dit met zich meebrengt wordt op grove ruimtelijke schaal beschouwd.
- Voor zoetwater waren er niet voor alle deelsystemen voldoende bruikbare rekenmodellen beschikbaar. De onderzoeksmethode is exploratief en iteratief ingericht om tot geschikte modellen en inzichten te komen voor verzilting onder extreme zeespiegelstijging.

1.4. Leeswijzer

Het rapport is als volgt opgebouwd:

- In Hoofdstuk 2 wordt de werkwijze en modellerstrategie toegelicht. Gebaseerd op de rapporten uit Tabel 1-1.
- In Hoofdstuk 3 zijn de effecten op grondwaterverzilting en watervraag toegelicht. Gebaseerd op Deltares (2022);
- In Hoofdstuk 4, 5, 6, en 7 zijn de resultaten van de systeemanalyses voor de vier bovengenoemde delen in het hoofdwatersysteem waar de dreiging van zeespiegelstijging zich het meest direct zal manifesteren beschreven. Gebaseerd op de rapporten van fase 1 en 2 uit Tabel 1-1.
- In Hoofdstuk 8 zijn de resultaten van de samengestelde maatregel oprekpakketten weergegeven.
- In Hoofdstuk 9 is de landelijke synthese beschreven aan de hand van een waterbalans van het hoofdwatersysteem geïntegreerd met de resultaten van de bovenstaande deelonderzoeken;
- In Hoofdstuk 10 worden de belangrijkste conclusies en discussiepunten per regio opgenomen.

2 Werkwijze

2.1. Inleiding modelinstrumentarium

In het vraagarticulatie rapport (Deltares 2021) is beoordeeld welke modellen beschikbaar en geschikt zijn. Op basis hiervan is een combinatie van bestaande modellen en nieuw ontwikkelde modellen gebruikt. Tabel 2-1 geeft een overzicht van de gebruikte modellen. In onderstaande wordt verder ingegaan op de drie hoofdcomponenten: grondwater, de belangrijke delen in het hoofdwatersysteem en de bovenregionale waterverdeling.

Tabel 2-1 Overzicht gebruikte modellen per regio.

Deelstudie	Rekenmodel
Grondwater en regionale doorspoelwatervraag	LHM zoet-zout V4.1
Zoetwaterlenzen in de duinen	3D iMOD-WQ (op MODFLOW en SEAWAT gebaseerd) model Dunea en 2D MOCDENS3D (MODFLOW gebaseerd) modellen
Volkerak-Zoommeer (VZM)	Python bakjesmodel i.c.m. Delwaq en zeesluisformulering
Rijn-Maasmonding (RMM)	D-Hydro 3D
Amsterdam-Rijnkanaal - Noordzeekanaal (ARK-NZK)	D-Hydro 3D
IJsselmeer en Markermeer (IJM)	Python bakjesmodel i.c.m. Delwaq en zeesluisformulering
Bovenregionaal	In Excel geconstrueerde waterbalans met posten afgeleid uit diverse (gemodelleerde) bronnen (zie Bijlage C)

2.2. Modelleeraanpak grondwater Fase 1 en 2

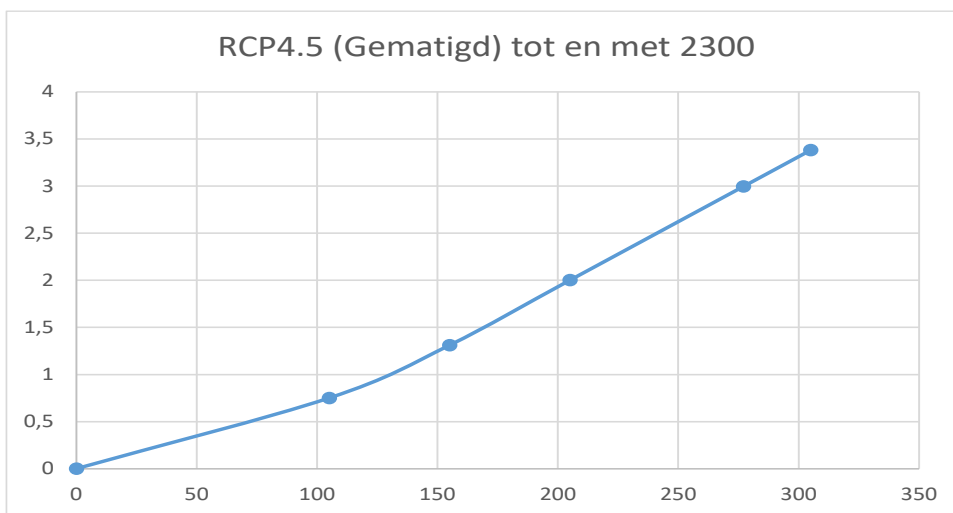
2.2.1. Grondwater en regionale doorspoelwatervraag

Zoals vermeld in Deltares (2022) is voor het onderzoek over de effecten van zeespiegelstijging op het grondwater gebruik gemaakt van het Landelijk Hydrologisch Model (LHM versie 4.1). Het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) modelleert de hydrologie van het grondwater, onverzadigde zone en oppervlaktewater voor heel Nederland. Het LHM berekent daarmee de vraag en het aanbod van water. Daarnaast berekent het LHM ook de uitspoeling van zout naar het oppervlaktewater alsmede het transport van dit zout door het oppervlaktewatersysteem. Concreet bestaat het LHM uit twee (deel)modellen, die in het kader van deze studie consistent zijn gemaakt:

- LHM zoet-zout: voor de berekening van het zouttransport vanuit de ondergrond naar het oppervlaktewater, op basis waarvan de doorspoelbehoefte wordt bepaald
- LHM zoet: voor de berekening van het zouttransport binnen het oppervlakte-watersysteem en het effect van de verandering in de doorspoelbehoefte op de (totale) watervraag

Er is in het onderzoek één scenario voor zeespiegelstijging doorgerekend. Aangezien aanpassingen in het grondwatersysteem zich op dezelfde tijdschaal afspelen als zeespiegelstijging, zou per scenario van snelle of minder snelle zeespiegelstijging een aparte langdurige berekening nodig zijn.

Het toegepaste zeespiegelstijgingsscenario is een compromis dat beoogt voldoende inzicht te bieden gegeven de andere bronnen van onzekerheid. Het gaat uit van een gematigde zeespiegelstijging, gebaseerd op het gematigde IPCC scenario RCP4.5. Gelet op de na-ijlende respons van het grondwatersysteem zijn bij de keuze voor dit gematigde scenario twee tegen elkaar in werkende effecten op de adaptatieopgave afgewogen: een keuze voor een snellere stijging zou een kleinere opgave laten zien bij een gegeven zichtwaarde, een keuze voor een tragere stijging zou een grotere opgave laten zien bij een gegeven zichtwaarde. De keuze geeft ook rekenschap van het feit dat het scenario RCP4.5 waarschijnlijker is dan scenario's die tot tragere of versnelde curves leiden. De bijbehorende zeespiegelcurve wordt weergegeven in Figuur 2-1.



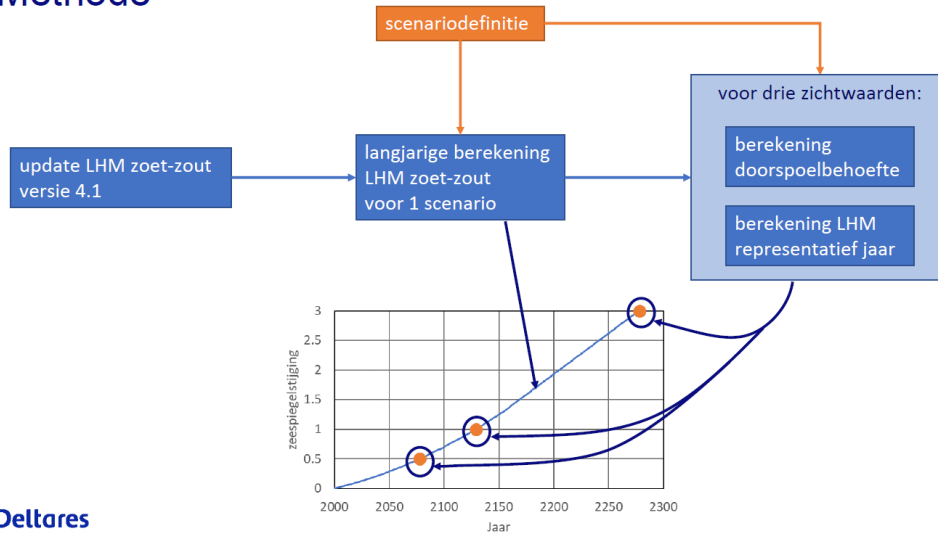
Figuur 2-1 Zeespiegelstijging (m) op de Y-as en jaren vanaf 2050 op de X-as volgens RCP4.5 tot 2300 met een gecombineerde polynoom (Rijkswaterstaat, 2021).

Voor het éne zeespiegelstijgingsscenario zijn drie langjarige (periode 2000 – 2278) modelberekeningen uitgevoerd met het LHM zoet-zout model, om de lange-termijn ontwikkeling van grondwaterverziltning gegeven een stijgende zeespiegel te berekenen:

1. berekening met zeespiegelstijging, bodemdaling en autonome ontwikkeling (d.w.z. na-ijleffecten t.g.v. verleden en antropogene aanpassingen aan het watersysteem);
2. berekening met bodemdaling en autonome ontwikkeling;
3. berekening met alleen autonome ontwikkeling.

Met deze drie berekeningen kan het effect van een stijgende zeespiegel worden onderscheiden van het effect van bodemdaling en van de autonome aanpassing van de zoet-zout verdeling in het grondwater aan ingrepen uit het verleden zoals inpolderingen en afsluiten van zee-armen.

Methode



Deltares

Figuur 2-2 Schematische weergave modelleeraanpak grondwater.

Uit de langjarige modelreeksen worden de zichtjaren geselecteerd waarvoor het verloop van de verzilting van het oppervlaktewater en de ontwikkeling van de watervraag voor een representatief jaar wordt gesimuleerd met behulp van het LHM zoet model (zie Figuur 2-2). Dit model berekent de uitstroming van zout naar het oppervlaktewater over de seizoenen gedurende het jaar, wat belangrijk is omdat bijvoorbeeld in een droog jaar de zoutvrucht kleiner is dan gemiddeld (door minder uitspoeling), maar tegelijkertijd ook minder wordt verdund en dus tot hogere concentraties leidt. Voor het representatieve jaar is gekozen voor een jaar met een herhalingstijd van het cumulatieve neerslagtekort van ca. 1/10 jaar in het huidige klimaat.

In fase 2 is door Deltares (2024b) een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar het handelingsperspectief om de doorspoelvraag te verminderen door te variëren met de chloride streefconcentraties in de regio en in het inlaatwater. Hiervoor zijn de resultaten uit fase 1 (Deltares 2022) opnieuw gebruikt, er is niet opnieuw gemodelleerd.

2.2.2. Zoetwaterlenzen in de duinen

Een bestaand, gekalibreerd en fijnmazig 3D model voor dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld zout transport van het duingebied van drinkwaterleidingbedrijf Dunea (Boonekamp et al., 2019) is gebruikt om effecten op het zoetwatervolume te simuleren. De analyse met het 3D model omvatte scenario's voor zeespiegelstijging (0,5 m, 1 m en 3 m voor de zichtjaren 2100 en 2150), zandsuppletie voor behoud kustlijn, grondwateraanvulling (-3%, +3%, en +8%), bodemdaling (tot 0,4 m) in poldergebieden, en combinaties hiervan. Het hoogteprofiel van de duinen landinwaarts is vastgezet tijdens de simulaties, en groeit niet mee met de zandsuppleties in het kustprofiel. Het oppervlaktewater (in de vorm van watergangen en infiltratieplassen) in de duinen en ook het achterland

zijn meegenomen, terwijl constante grondwateronttrekkingen zijn opgelegd aan het 3D model.

Voor de initiële situatie is gebruik gemaakt van een zoet-zout verdeling gebaseerd op verschillende typen meetgegevens (Deltares 2022).

Voor de analyse langs andere delen van de Hollandse kust en het Waddengebied zijn negen conceptuele 2D zoet-zout profiel modellen opgesteld. Deze modellen bestrijken de kustlijn van Hoek van Holland tot Den Helder en twee Waddeneilanden (Terschelling en Ameland). De modellen bieden inzicht in variabelen zoals de breedte van het duingebied waar infiltratie plaatsvindt, grondwateraanvulling, en polderpeilen. Een zeespiegelstijging tot 3 m in 2150 (en 1,35 m in 2100) is gesimuleerd, met focus op de omvang en vorm van de zoetwaterlenzen en in mindere mate de zoutbelasting in de achterliggende polders.

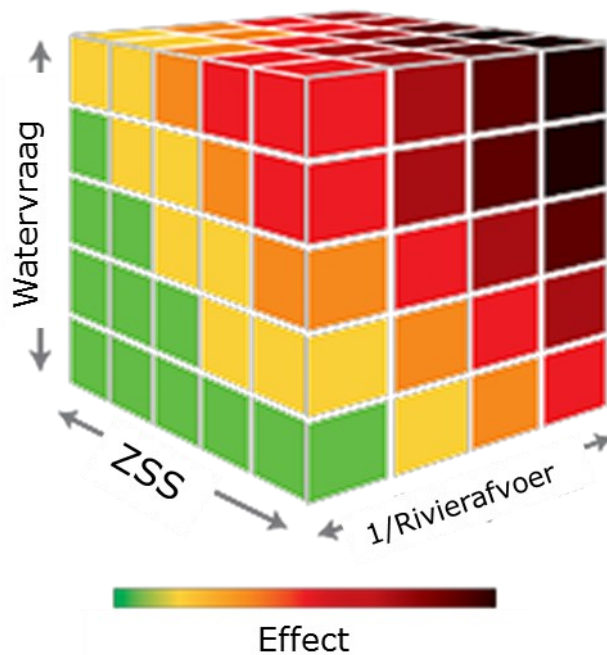
2.3. Modelleeraanpak oppervlaktewateren Fase 1

2.3.1. Algemene aanpak

De werking van de (strategische) zoetwatergebieden in het hoofdwatersysteem is afhankelijk van drie dominante klimaatvariabelen: lage afvoeren van de grote rivieren (zoetwateraanbod); neerslag en verdamping (bepalend voor de zoetwatervraag aan het hoofdwatersysteem); en de mate van zeespiegelstijging (medebepalend voor de mate van interne en externe verzilting). Het is niet mogelijk om deze drie termen in consistente klimaatscenario's te vatten op een tijdschaal van meerdere eeuwen (de verwachte tijdschaal waarop de zeespiegel 5 m toeneemt). Daarbij komt dat de ontwikkeling in watervraag en rivierafvoer niet alleen afhankelijk is van klimaatverandering, maar ook van socio-economische, technologische ontwikkelingen en (internationaal) waterbeheer.

Om deze beperkingen het hoofd te bieden, is in essentie gekozen voor een zogenaamde 'exploratieve' modelleeraanpak. Dit is in essentie een gevoeligheidsanalyse waarin de factoren onafhankelijk van elkaar gevarieerd worden om de kwetsbaarheid onder verschillende combinaties van omstandigheden in beeld te brengen. Er is gekozen om de effecten van zeespiegelstijging door te rekenen voor bepaalde vaste zichtwaarden van de zeespiegel boven het huidige niveau (tussen 0m en 3m) en niet om het tijdspad daarnaartoe expliciet te modelleren.

In Figuur 2-3 wordt geschetst hoe de gevoeligheidsanalyse eruitziet voor variatie van de 3 hoofdfactoren zeespiegel, watervraag en wateraanbod via de rivieren. Een zoekruimte van hogere dimensie (een zogenaamde hyperkubus) is voorstelbaar waarbij ook de gevoeligheid voor systeemp parameters (bijv. representatief voor maatregelen) of bepaalde uitsplitsing in randcondities mogelijk is.



Figuur 2-3 Schets van de voorgestelde gevoeligheidsanalyse in matrixstructuur waarin de hoofdfasen de te onderzoeken factoren (als randvoorwaarden, systeemparemeters) weergeven en de kleuren de waterstaatkundige effecten en in termen van nader te definiëren indicatoren.

De exploratieve benadering heeft geleid tot een aanpak in twee fasen die hieronder worden toegelicht. In fase 1 is de zoekruimte grofstoffelijk verkend, in fase 2 is verder verfijnd op die delen van de zoekruimte die de relevante verandering in indicatoren omvat en waarin ook tijdsvariabel gedrag onderzocht is.

2.3.2. Aanpak Fase 1

In de modelexercitie zijn de primaire variabelen zoals rivierafvoer en watervraag constant in de tijd (stationair) aan het model opgelegd. In de 3D modellen (ARK-NZK en RMM) is de getijdencyclus wel meegenomen. In werkelijkheid vormen tijdsvariaties die zich voordoen in randvoorwaarden een belangrijke factor voor het zoethouden van Hollandsche IJssel, Lek, ARK, VZM en IJM: het seizoensverloop bepaalt de begincondities van waaruit een buffer onder druk komt te staan en bepaalt of een buffer na afloop van tijd weer voldoende herstelt. Deze condities zijn bepalend om een droogte-event van een bepaalde duur en omvang te kunnen weerstaan. In Fase 1 is een eerste indicatie van houdbaarheid afgeleid op basis van stationaire randvoorwaarden: onder welke condities overstijgen de evenwichtsconcentraties en benodigde doorspoeldebieten bepaalde indicatieve waarden? Deze waarden zijn gebruikt om het zoekgebied in Figuur 2-1 in Fase 2 af te bakenen.

In deze modelexercitie zijn de modellen in fase 1 semi-stationair doorgerekend. Dat wil zeggen dat de modellen worden doorgerekend tot er evenwicht in de zoutbalans ontstaat. Deze evenwichtstoestand wordt als indicatief beschouwd. Tijdens de insteltijd wordt de verandering van de doelvariabelen door de ruimte en tijd geëvalueerd. Op deze manier kan onderzocht worden hoe de waterstanden en chlorideconcentraties zich ontwikkelen, maar ook hoe snel deze ontwikkeling gaat.

Daardoor levert deze werkwijze al wel enig inzicht over de ordegrrootte van de eventduur die wel of niet leidt tot verzilting. Hier moet wel worden opgemerkt dat de uitgangssituatie (initiële chlorideconcentratie) bij deze semi-stationaire gevoeligheidsanalyse een bepalende factor is.

Voor de systeemanalyses van de oppervlaktewateren zijn modellen van verschillende complexiteiten gebruikt. Er is een afweging gemaakt tussen de modellen die beschikbaar waren, de geschiktheid ervan (in hoeverre de juiste fysische processen in de beschikbare modellen aanwezig zijn), en de mate van inspanning om tot een geschikt model te komen.

Uiteindelijk heeft dit geresulteerd tot een tweedeling:

- In de RMM en het ARK-NZK is gebruik gemaakt van 3D modellen die in detail de gelaagde stroming simuleren. Omdat de zoutbalans in die deelsystemen zeer sterk beïnvloed wordt door de impuls- en energiebalans (en niet alleen door de volumebalans gedicteerde stromingspatronen) was het noodzakelijk om deze mate van complexiteit expliciet te beschouwen. Het voordeel van deze keuze is meer (noodzakelijk) fysisch realisme, het nadeel is meer complexiteit, langere rekentijden en meer modelparameters. Het was op voorhand niet uit te sluiten dat er modelafwijkingen als gevolg van op het huidige klimaat afgeregelde parameters zouden resterend. Uit de validatie en evaluatie binnen de respectievelijke deelstudies is naderhand geconcludeerd dat de trendmatige respons op de veranderende klimaatcondities onderscheidend is ten opzichte van de parameteronzekerheden.
- In het VZM en IJM is gebruik gemaakt van eenvoudiger bakjesmodellen die alleen de volume- en zoutbalans benaderen zonder de impuls- en energiebalans expliciet te beschouwen. Deze modellen bevatten minder parameters dan de 3D modellen, maar de resultaten zijn wel gevoeliger voor de individuele parameterwaarden. Ook hier is uit de validatie en evaluatie binnen de respectievelijke deelstudies naderhand geconcludeerd dat de trendmatige respons op de veranderende klimaatcondities onderscheidend is ten opzichte van de parameteronzekerheden.

In alle vier regiostudies is geanalyseerd welke grootheden bepalend zijn voor de volumebalans en de zoutverspreiding in de systemen. Daarna is van elke randconditie het voor de gevoeligheidsstudie relevante bereik bepaald, op basis van historisch opgetreden omstandigheden aangevuld met informatie uit de KNMI14 scenario's (Van den Hurk et al. 2014), Deltascenario's (Deltares 2018) en veronderstellingen over extreme economische of klimatologische trends voorbij de zichthorizon van KNMI14. Ten behoeve van de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater zijn uitkomsten van het grondwateronderzoek geaggregeerd en als input op de modellen van de oppervlaktewateren gebruikt. Ten behoeve van de systeemanalyses is de modeluitvoer verwerkt en geaggregeerd tot een beperkt aantal grootheden op specifieke locaties. De volledige modelresultaten bevatten veel meer informatie dan wat daadwerkelijk in de systeemanalyses is gebruikt en kunnen wanneer nodig nader geanalyseerd worden.

Tot slot wordt opgemerkt dat de aanpak van Fase 1 voor Zoetwater gecombineerd met die van Waterveiligheid is samengevat in Friocourt et al. (2025).

2.4. Modelleeraanpak oppervlaktewateren Fase 2

2.4.1. Verdieping en verbreding

In Fase 2 bleek verdiepend inzicht nodig over de doorwerking van zeespiegelstijging en maatregelen op de Rijn-Maasmonding en het IJsselmeergebied. Daarnaast was verbreedend inzicht nodig over maatregelen in de polderdoorspoeling en over specifieke opties voor zogenoemde 'bronmaatregelen': ingrepen op de spuilsluizen, schutsluizen en gemalen. Ook de bovenregionale waterbalans is in Fase 2 opnieuw afgeleid en uitgebreid met chloride-indicatoren. De studies voor deelgebieden ARK-NZK en VZM hadden in fase 1 voldoende inzicht opgeleverd.

In het IJsselmeergebied richt de verdieping zich op de seizoensdynamiek en op de herhalingstijden van bepaalde indicatoren, zoals chlorideconcentraties bij (drinkwater)innamepunten en peiluitzakking van het meer. Inzicht in seizoensdynamiek is niet mogelijk met een stationair bakjesmodel, daarom is in fase 2 de forcering van het bakjesmodel aangepast naar tijdsafhankelijk. Alle invoer is tijdsafhankelijk gemaakt, waarbij gebruik is gemaakt van de KNMI'23 klimaatscenario's voor de meteorologie, de rivierafvoeren en de afgeleide lozingen en onttrekkingen uit de omgeving. De klimaatscenario's zijn gecombineerd met verschillende maten van zeespiegelstijging. Per combinatie van klimaatscenario en zeespiegelstijging zijn de herhalingstijden voor jaar- en zomergemiddelde chloride gehalte en voor het aantal dagen meerpeil uitzakking en chloride overschrijding op jaarbasis bepaald.

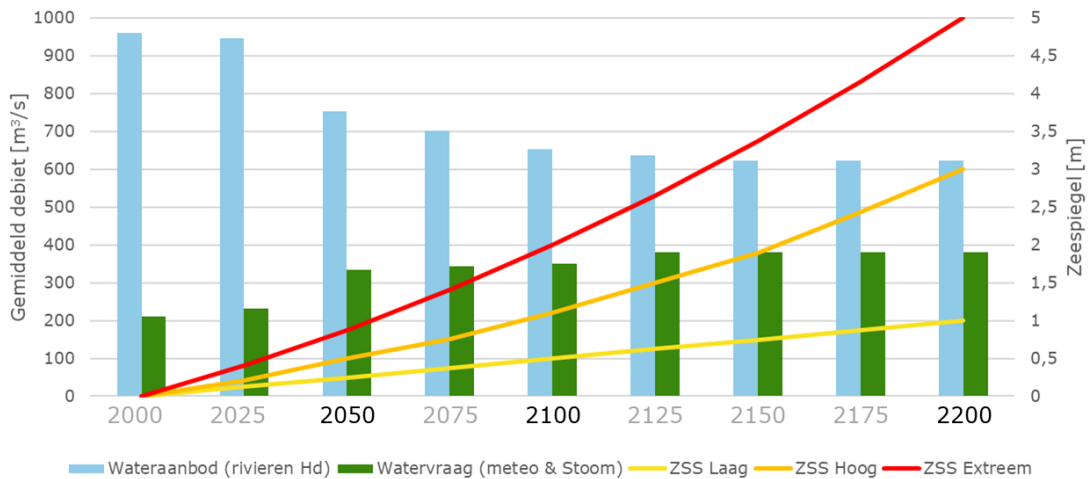
In de Rijn-Maasmonding is de verdieping en verbreding gericht geweest op het verder in beeld brengen van de systeemrespons onder zeer lage rivierafvoeren, het bepalen van herhalingstijden voor verschillende afvoerscenario's, en het bepalen van het effect van beheermaatregelen.

2.4.2. Samenstelling zichtwaarden en scenario's

Om herhalingstijden te kunnen bepalen is in fase 2 zo veel mogelijk gebruik gemaakt van de KNMI'23 scenario's (KNMI 2023) en de daaruit afgeleide scenario's voor afvoer van Rijn en Maas (Deltares 2023b). Om de bandbreedte van scenario-onzekerheid in beeld te houden is in de Systeemanalyse gewerkt met de lage emissie natte (Ln) en de Hoge emissie droge (Hd) varianten. De koppeling tussen zichtwaarden voor zeespiegel en scenario-zichtjaren is gemaakt volgens de volgende definitie die ook voor Systeemanalyse van de thema's waterveiligheid en kust wordt gehanteerd (zie tabel Tabel 2-2):

Tabel 2-2 Definitie van scenario's zoals toegepast binnen de Systeemanalyse van KP ZSS op basis van combinaties van zeespiegelzichtwaarde (Z) & zichtjaar + klimaatscenario (t.b.v. rivierafvoer en meteorologie (Q&M)) & Deltascenario (Bijlage B) t.b.v. de watervraag (Vr).

Scenario (stijgsnelheid)	2050	2100	2200
Referentie	0m & 2050Md & Ref2017		
Laag		0.5m & 2100Hd & Stoom2085	1m & 2150Hd & Stoom2085
Hoog	0.5m & 2050Hd & Stoom2050	1m & 2100Hd & Stoom2085	3m & 2150Hd & Stoom2085
Extreem		2m & 2100Hd & Stoom2085	5m & 2150Hd & Stoom2085



Figuur 2-4 Scenario's voor zeespiegelstijging, rivierafvoer (T20 wateraanbod, KNMI'23 Hd scenario) en Watervraag (T20 droogte en socio-economie Deltascenario Stoom). De in Tabel 2-2 gepresenteerde combinaties corresponderen met de zwart gedrukte jaartallen. NB: de watervraag en rivierafvoer zijn vanaf een gegeven moment constant gehouden omdat er geen aanvullende scenario-informatie beschikbaar is voorbij respectievelijk 2085 en 2150.

Een consequentie van de keuze voor de KNMI'23-scenario's is dat deze uit tijdreeksen bestaan van 8 sets (ensembles) van 30 jaar, per zichtjaar-scenario-combinatie. De 8 ensemble-leden zijn onderling wel verstoord en geven daardoor verschillende realisaties van toekomstig weers- en afvoercondities, maar maken schattingen van herhalingstijden van gebeurtenissen die zeldzamer zijn dan gemiddeld eens per 20 jaar statistisch onvoldoende betrouwbaar.

In de landelijk waterbalans is vanwege de gebleken beperkte betrouwbaarheid van de (oorspronkelijk voor dit doel ontwikkelde) Basisprognoses 2024, uitgeweken naar de Basisprognoses 2018 conform het Deltascenario Stoom (Deltares 2018), zie ook bijlage B.

Omdat de zichtjaren van de KNMI'23 scenario's niet verder reiken dan 2150 en de Basisprognoses niet verder dan 2085, zijn, waar nodig, de gegevens voor deze jaartallen gekopieerd naar latere zichtjaren. De interne consistentie van de scenario's in Tabel 2-2 is door de totale combinatie van scenario's minder gegarandeerd dan bij een op voorhand consistent opgezette verzameling van klimaatscenario's afgeleid uit één enkel klimaatmodel, waarin extreme (versnelde) zeespiegelstijging naar alle waarschijnlijkheid ook vergezeld zal gaan van extreme(re) meteorologische klimaatveranderingen (zie bijv. Van Westen et al. 2024). De rechtvaardiging voor deze aanpak bestaat enerzijds uit dat deze set van consistente scenario's niet voorhanden zijn, en anderzijds dat de Systeemanalyse nog steeds een exploratief karakter hebben gericht op een zeer verre tijdhorizon voor zeer extreme en onzekere (*low likelihood*) mondiale klimaat-scenario's.

2.5. Modelleeraanpak bovenregionale waterverdeling en waterbalans

2.5.1. Bovenregionale waterverdelingstool

De resultaten van de grondwater- en oppervlaktewatermodelleringen uit fase 1 zijn gecombineerd in een bovenregionale waterverdelingstool. In deze bovenregionale analyse zijn feitelijk 'enkel' de uitkomsten van de regionale analyses op een logische

manier aan elkaar geknoopt en in samenhang geanalyseerd. Via deze analyse wordt inzichtelijk wat de behoeftes en knelpunten in de vier regio's zijn, hoe deze zich tot elkaar verhouden en in welke behoefte van een regio kan worden voorzien zonder consequenties voor een andere regio.

Er zijn voor de 4 regio's duizenden berekeningen uitgevoerd om zeer veel verschillende combinaties van omstandigheden te exploreren. Hieruit komen inzichten over de mate van (fysische) houdbaarheid van de zoetwaterbuffers en het zoethouden van Lek en Hollandsche IJssel. In de bovenregionale tool is de output van deze studies als input gebruikt voor de bovenregionale waterverdeling. Om niet met duizenden scenario's te hoeven rekenen, heeft er een clustering plaatsgevonden waarbij de variabelen zeespiegelstijging (0 – 3 m), watervraag (laag-midden-hoog), rivierafvoer (500 – 2000 m³/s) in een beperkt aantal klassen is uitgedrukt, zodanig dat deze de assen van het speelveld voldoende representeren.

2.5.2. *Grootschalige waterbalans van Nederland*

De resultaten van de grondwater- en oppervlaktewatermodellering zijn ook gecombineerd in een waterbalans. Dit is een waterbalans van het hoofdwatersysteem van Nederland op een grootschalig niveau en geeft voor de scenario's uit tabel Tabel 2-2 de waterbalans weer voor een droge zomermaand die circa eens in de 20 jaar te verwachten is. De waterbalans bestaat uit de posten wateraanvoer, watervraag, watertekort en op twee locaties verziltingsindicatoren.

De wateraanvoer bestaat uit de Rijn (Lobith) en de Maas (Sint Pieter). Op basis van de [afvoerstatistiek'24](#) (gepubliceerd op [waterinfo-extra.rws.nl](#)) is de gemiddelde maandafvoer in de zomer bepaald, behorende bij een situatie die statistisch eens in de 20 jaar voorkomt. Dit is gedaan voor het referentieklimaat en voor de klimaatscenario's. De verdeling van de afvoer tussen de Waal, IJssel en Nederrijn is gefixeerd conform de 2018 bodemligging.

De watervraag bestaat uit de doorspoelvraag voor het hoofdwatersysteem en voor de zoetwaterregio's. Het doorspoelen van het hoofdwatersysteem om de verzilting tegen te gaan vraagt om afvoer van zoetwater naar zee. Zeespiegelstijging zorgt voor toename van verzilting. Om deze toename te bestrijden, neemt de watervraag in het hoofdwatersysteem en de zoetwaterregio's toe. Deze getallen representeren het doorspoeldebiet dat omwille van verziltingsbestrijding nodig zou zijn in een droge zomer. De getallen hiervoor zijn bepaald aan de hand van de studies genoemd in Hoofdstuk 3 t/m 7 van deze synthese. Verdamping is geen aparte post in het hoofdwatersysteem. Voor het IJsselmeergebied zit het verdisconteerd in de peiluitzakking en daarmee in de berekende watertekorten en zoutgehaltes van het. In de overige delen van het hoofdwatersysteem is oppervlaktewaterverdamping verwaarloosbaar ten opzichte van de andere posten. De zoetwaterregio's onttrekken tijdens droogte uit het hoofdwatersysteem. Dit water is nodig voor peilbeheer, beregening en doorspoeling. Doorspoeling wordt in gebieden met interne verzilting (zoute kwel) beïnvloed door zeespiegelstijging. De getallen voor peilbeheer en beregening corresponderen in de waterbalans met een eens in de 20-jaar herhalingstijd volgens de Basisprognoses'18 voor huidig klimaat (REF2017) en de zichtjaren 2050 en 2085 onder Deltascenario Stoom. De getallen voor doorspoeling zijn afkomstig uit Deltares 2022.

De tekorten in de waterbalans zijn berekend door de watervraag (verziltingsbestrijding hoofdwatersysteem en watervraag zoetwaterregio's) af te trekken van het wateraanbod (afvoer Rijn en Maas). Hierin is onderscheid gemaakt tussen de regio Noord en de overige regio's. De verziltingsindicatoren in de waterbalans zijn afkomstig uit de deelstudies uit het KP ZSS (Tabel 1-1) De verziltingsindicator voor de Afsluitdijk geeft de eens-in-de-20-jaar chloridewaarde (mg/L) bij Andijk weer die optreedt volgens het gesimuleerde zout- en peilbeheer. De verziltingsindicator voor de RMM is gebaseerd op de intrusielengte van de 250 mg/L chloride contour die optreedt bij het resterende eens-in-de-20-jaar ongestuurde restdebiet door de Nieuwe Waterweg. Verziltingsindicatoren voor het NZK-ARK systeem en het VZM zijn op het grootschalige niveau van deze waterbalans niet onderscheidend genoeg.

De waterbalans is uitgevoerd in een Sankey diagram en is interactief gemaakt in een dashboard, zodat de verschillende scenario's en maatregelen overzichtelijk met elkaar vergeleken kunnen worden. In Hoofdstuk 9 worden de resultaten toegelicht.

Voor verdere technische details over de waterbalans wordt verwezen naar Bijlage B waarin een memo van Deltares is opgenomen over de totstandkoming van de getallen van de waterbalansen.

2.6. Oprekmogelijkheden en oprekpakketten

Na het beschouwen van de waterstaatkundige effecten van zeespiegelstijging op het (zoet)watersysteem, is gekeken naar verschillende maatregelen die de effecten van zeespiegelstijging op de waterbalans kunnen beperken. Het gaat bijvoorbeeld om maatregelen die zout uit het systeem houden, efficiënter terugspoelen of om hogere zoutgehalten te accepteren, maar ook over de vervanging van kunstwerken (m.n. spuiwerken) waarvan de hydraulische werking door zeespiegelstijging wordt beperkt. De onderzoeksvraag is of en in hoeverre deze 'oprekmaatregelen' zorgen voor het uitstellen van grootschalig ingrijpen in de voorkeurstategie.

De zoetwaterstrategie KZH bestaat uit het optimaal sturen en verdelen van het beschikbare rivierwater middels kunstwerken en door de systeemgeometrie welke zorgt voor een bepaalde afvoerverdeling. Omdat het aantal mogelijkheden om strikt binnen de bestaande systeeminrichting te sturen, beperkt is, zijn ook maatregelen beschouwd die grootschaliger ingrepen vereisen en de systeemwerking grootschaliger beïnvloeden maar nog wel in de KZH-filosofie vallen (bijv. doorvoerroute Amsterdam-Rijnkanaal-Noordzeekanaal en situationeel afsluiten van riviertakken in de Rijn-Maas-monding).

2.6.1. Aanpak inventarisatie mogelijke oprekmaatregelen

Voor de vier regio's zijn mogelijke oprekmaatregelen voor zoetwater in kaart gebracht: het Amsterdam-Rijnkanaal - Noordzeekanaal, het IJsselmeergebied, de Rijn-Maasmonding en het Volkerak-Zoommeer. Voor elke regio is in de volgende stappen toegewerkt naar een set aan realistische oprekmaatregelen met een eerste inschatting van effectiviteit en haalbaarheid:

1. Eerste inventarisatie van mogelijke oprekmaatregelen door het technisch team van KP ZSS zoetwater. Deze oprekmaatregelen komen uit verschillende bronnen, zoals rapportages uit Fase 1 van het kennisprogramma, verkenningen van zoetwaterbouwstenen, waterSysteemanalyse, stresstesten en regionale routekaarten. Bij deze inventarisatie is een eerste inschatting gemaakt van de

effectiviteit, haalbaarheid en houdbaarheid van de maatregelen (bij verschillende meters zeespiegelstijging).

2. Aanvulling en aanscherping van de oprekmaatregelen met een expert uit de regio.
3. Aanvulling en aanscherping van de oprekmaatregelen met een grotere groep betrokkenen uit de regio. Tijdens werksessies zijn de lijsten met maatregelen kritisch besproken met als resultaat een scherpere eerste expert beoordeling van de maatregelen op effectiviteit en haalbaarheid en op sommige locaties aanvullingen van oprekmaatregelen.

Om meer grip te krijgen op de oprekmaatregelen zijn de maatregelen ingedeeld in vier categorieën:

1. Efficiënter bestrijden van verzilting: minder zoutvracht op het hoofdwatersysteem met gelijkblijvende spoelbehoefte, c.q. minder zoetwater nodig bij dezelfde zoutvracht.
2. Zoetwater beter vasthouden en verdelen: efficiëntere zoutbestrijding en minder 'verbruik' van zoetwater in het regionale waterbeheer.
3. Minder watergebruik door zoetwaterafhankelijke functies.
4. Verzilting accepteren: adaptatie aan verziltende omstandigheden.

Mede op verzoek van de regio experts is een eerste inschatting gemaakt van de effectiviteit en haalbaarheid van de oprekmaatregelen, om het gesprek tijdens de regionale werksessie (juni-juli 2023) beter te kunnen voeren. Dit is per oprekmaatregel voornamelijk gedaan op basis van expert judgement binnen het technisch team van het KP ZSS zoetwater en de betrokken regio expert.

Bij de expert judgement is voor de mate van effectiviteit voornamelijk gekeken naar de mate op vermindering van zoutindringing in het hoofdwatersysteem en naar de mate van vermindering van de zoetwatervraag vanuit de regio. Voor haalbaarheid is voornamelijk gekeken naar de mate van maakbaarheid; hoeveel impact heeft een oprekmaatregel op de maatschappij (ruimtebeslag, kosten, neveneffecten en sectorale inspanning). Tevens is geprobeerd om een eerste inschatting te maken bij hoeveel meter zeespiegelstijging een oprekmaatregel mogelijk pas aan de orde is, ook deze slag is gemaakt op basis van expert judgement.

2.6.2. *Totstandkoming oprekpakketten*

Voor de landsbrede waterbalans en de impactanalyse is het onwerkbaar om alle geïntermediateerde oprekmaatregelen afzonderlijk en in alle combinaties te beschouwen. Omwille van het overzicht is besloten te werken met maximaal 3 pakketten aan oprekmaatregelen. In deze paragraaf volgt een beschrijving van de totstandkoming van de oprekpakketten.

De werkzaamheden zoals beschreven in paragraaf 2.6.1 resulteerden per regio in een lijst met tientallen oprekmaatregelen geclassificeerd in vier categorieën, met een eerste inschatting van de effectiviteit en haalbaarheid. Op basis van expert judgement van het technisch team van het KP ZSS zoetwater is een deel van deze maatregelen doorgerekend in fase 2 van het KP ZSS (zie resultaten in Hoofdstuk 3 t/m 7). Een deel van de maatregelen zijn in andere programma's onderzocht en voor zover mogelijk gekwantificeerd. En een deel is niet verder onderzocht.

De 3 oprekpakketten voor zoetwater zijn opgesteld door combinaties te maken van oprekmaatregelen uit de vier categorieën uit paragraaf 2.6.1. Daarbij zijn

oprekmaatregelen gekozen door het technisch team van het KP ZSS zoetwater, waarvan het effect op zoetwater überhaupt gekwantificeerd is en welke ook daadwerkelijk direct verzilting door zeespiegelstijging tegengaan. Er worden dus geen maatregelen in reductie van de watervraag voor berekening en peilbeheer meegenomen.

De oprekpakketten bouwen op elkaar voort, pakket II bestaat dus uit de maatregelen van pakket I en aanvullende maatregelen. De pakketten zijn ingedeeld op basis van de ingeschatte mate van impact op voornamelijk functies van een kunstwerk en zoetwater functies. In het eerste pakket worden functies beperkt aangetast en zijn de ingrepen van beperkte omvang. In pakket III worden functies aanzienlijk aangetast en/of zijn de systeemingrepen zeer omvangrijk.

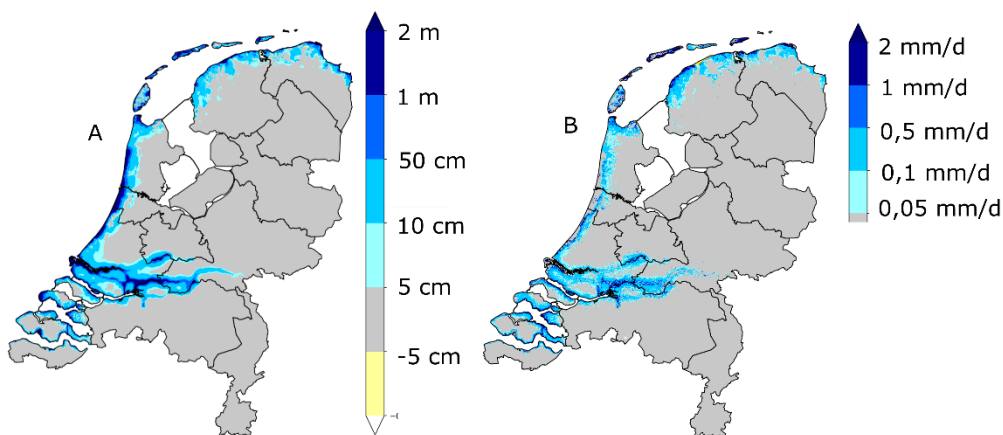
Om de oprekpakketten overzichtelijk en behapbaar te houden is er één type oprekmaatregel (uit de vier categorieën) per regio per oprekpakket opgenomen: Eén per regio in het hoofdwatersysteem (4 regio's, zie hierboven voor de regio's) en één voor de doorspoeling in de polders die te maken hebben of krijgen met verzilting. In regio's waar meerdere oprekmaatregelen mogelijk zijn, is gekozen voor de meest effectieve voor wat betreft het effect op de zoetwaterbeschikbaarheid. Voor de regio's ARK-NZK en het VZM is de oprekmaatregel voor alle 3 pakketten daarom dezelfde. Voor het ARK-NZK is de oprekmaatregel dusdanig effectief dat er in de andere twee pakketten geen extra maatregel nodig is. Dit geldt (in mindere mate) ook voor het VZM.

3 Grondwaterverziltiging en regionale doorspoelvraag

3.1. Effect zeespiegelstijging op regionale doorspoelvraag

Door de combinatie van zeespiegelstijging en bodemdaling verandert de stijghoogte van de eerste twee watervoerende pakketten (zie Figuur 3-1). De directe invloed van zeespiegelstijging beperkt zich gemiddeld tot ongeveer 10 km van de kustlijn en de meestijgende rivierwateren. Vanwege verschillen in de ondergrond is er regionaal variatie: in Friesland is de invloedssfeer bijvoorbeeld groter (ca. 20 km) en op diepte ook sterker dan nabij de oppervlakte, terwijl de invloed in Zeeland juist (veel) beperkter is.

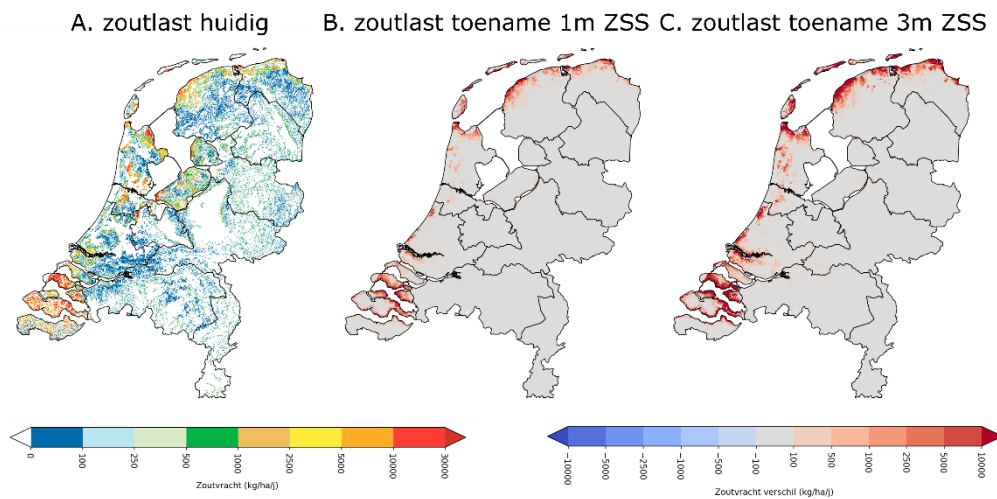
Door de verhoging van de stijghoogte door zeespiegelstijging neemt de opwaartse stroming van grondwater toe. Door bodemdaling en de daarop veelal volgende peilindexatie door de waterschappen van het oppervlaktewater daalt de ondiepe grondwaterstand en in mindere mate ook de stijghoogte, waardoor de kweldruk ook toe neemt. Zeespiegelstijging is vanaf een stijging van zo'n 1 m dominant in deze kweltoename, omdat wordt verondersteld dat de bodemdaling dan door vernattingsmaatregelen is gestopt. Kwel neemt bij 3 m zeespiegelstijging toe met maximaal zo'n 2 mm/d direct langs de kust in gebieden met harde waterkeringen (geen duinen) (zie Figuur 3-1). Hoewel deze toename ook een duidelijke toename van het waterbezwaar betekent (50 tot 100 m³/s landsbreed opgeteld), is deze toename vrij constant over het jaar en neemt de toename snel af met afstand tot de kust. De toename van waterbezwaar lijkt dan ook niet te leiden tot een maatgevende toename in benodigde maalcapaciteit, aangezien gemalen zijn gedimensioneerd op het kunnen uitmalen van een ordegruote groter waterbezwaar dat neerslag met zich meebrengt.



Figuur 3-1 Paneel A (links): verandering stijghoogte eerste watervoerend pakket door een zeespiegelstijging van 3m. Paneel B (rechts): Verandering kwelflux van het eerste watervoerend pakket naar het ondiepe grondwater (Holocene pakket).

In de huidige situatie is er zout aanwezig in het ondiepe grondwater op de Waddeneilanden, de Zeeuwse eilanden, de Kop van Noord-Holland, de Friese en Groningse kustregio en Flevoland (zie Figuur 3-2). De gebieden in de invloedssfeer van zeespiegelstijging laten een duidelijke toename van de zoutvracht zien: de vracht neemt toe en de gebieden worden groter in oppervlakte. Bij 3 m treedt er

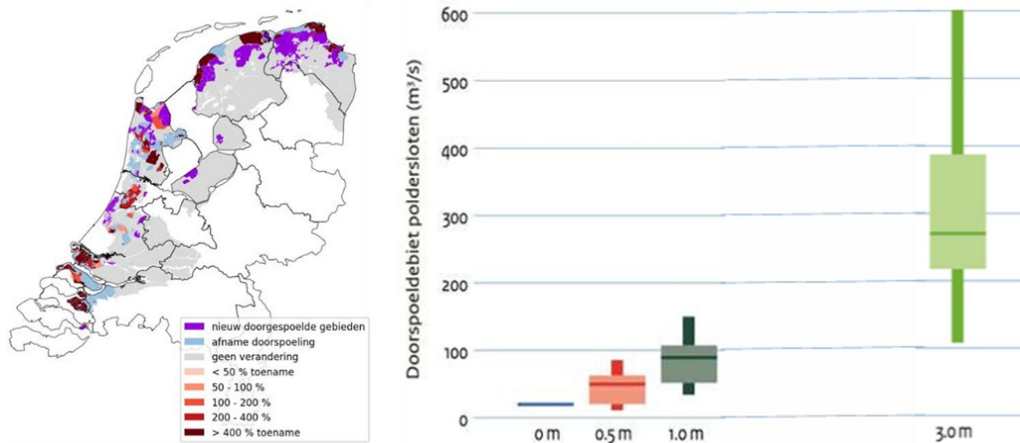
zoute kwel langs de Waddenkust, in het noordelijke deel van Noord-Holland en op de eilanden rondom de Oosterschelde over aaneengesloten gebieden langs de kustlijn op. Er ontstaan bij een stijgende zeespiegel ook nieuwe gebieden die te maken krijgen met een zoutbelasting op het oppervlaktewatersysteem: met name in de bollenstreek in Zuid-Holland en het Westland. Daarnaast treden in het binnenland van Noord-Holland, de Flevopolders en Zeeuwse Eilanden ook veranderingen op in zoutvrucht door autonome processen en bodemdaling. In de kustzone is voor een zeespiegelstijging van 3 m de bijdrage van zeespiegelstijging dominant boven deze andere processen.



Figuur 3-2 Paneel A (links): huidige zoutlast richting het holocene pakket (ondiepe grondwater), legenda linksonder. Paneel B en C (midden en rechts): zoutlast toename door 1 m (paneel B) en 3 m (paneel C) zeespiegelstijging richting het holocene pakket, de veranderingen door bodemdaling en autonome processen zijn in de figuur niet weergegeven, legenda rechtsonder.

De zoutvruchtverandering laat ten opzichte van de zeespiegelstijging een versnelling zien; bij 0,5 m, 1 m, 2 m en 3 m zeespiegelstijging neemt de zoutvrucht met respectievelijk 15%, 50%, 120% en 240% toe. Deze versnelling wordt veroorzaakt door de langzame stroming van grondwater, waardoor onder invloed van zeespiegelstijging dieper, zouter water langzaam naar de oppervlakte stroomt. De zoutvruchtoename is over langere perioden niet langer alleen het gevolg van een toename in kwelvolume, maar ook van gaandeweg zouter wordend grondwater.

Door zeespiegelstijging neemt de doorspoelwatervraag in de polders toe en wordt er ook in nieuwe gebieden doorspoeling noodzakelijk om huidige chlorideconcentraties in het oppervlaktewater te handhaven. De totale landelijke doorspoelwatervraag in polders neemt toe van 20 m³/s in de huidige situatie, tot ongeveer 50, 90 en 270 m³/s voor respectievelijke zichtwaarden 0.5 m, 1 m en 3 m (zie Figuur 3-3). Er wordt opgemerkt dat dit exclusief de doorspoelvraag is van boezemwateren. De berekende doorspoeling in alle beschouwde regionale boezemwateren samen, neemt toe van 40 m³/s in de huidige situatie, tot een kleine 75 m³/s bij 3 m zeespiegelstijging. De toename in doorspoeling van de boezemkanalen is dus relatief beperkt ten opzichte van de toename in doorspoeling van de polderwateren.



Figuur 3-3 Linker figuur: Verandering berekende doorspoelwatervraag vanuit de poldergebieden voor zichtwaarde 3m zeespiegelstijging in procentuele verandering. In witte gebieden wordt geen polderdoorspoeling toegepast. Rechter figuur: Berekende doorspoelbehoefte voor gebieden waar doorgespoeld wordt, met onzekerheidsband. De middelste lijn in de boxplot geeft de mediaan uit de verdeling weer, de whiskers (uiteinden) zijn getekend op de 5 en 95 percentielwaarden van de verdeling.

Samenvattend volgt uit de modelstudie de in Tabel 3-1 weergegeven doorspoelbehoefte voor de regio's (polders) ter bestrijding van zoute kwel, als ervoor gekozen zou worden om de doorspoelstrategie en peilbeheer te houden zoals het nu is.

Tabel 3-1 Berekende regionale doorspoelbehoefte van polders in het groeiseizoen bij behoud van huidige zout- en peilbeheerdoelen per belangrijke zoetwatertak/buffer in het hoofdwatersysteem (m^3/s) als functie van zeespiegelstijging (NB deze indeling wijkt af van de zoetwaterregio's). Deze behoefte ligt hoger dan de effectieve onttrekking uit het hoofdwatersysteem, dit is een worst-case scenario. De cursief gedrukte waardes zijn in het geval van inzet van de KWA en de DKW, deze vervangen dan de niet cursief gedrukte waardes voor de posten Rijn-Maas Monding en Amsterdam Rijnkanaal en Lek.

Regio (voedingsgebied belangrijke zoetwatertak/buffer)	Zeespiegelstijging (m)			
	0	0,5	1	3
	Doorspoelbehoefte (m^3/s)			
IJsselmeergebied	12	38	66	134
Volkerak Zoommeer (VZM)	1	3	9	55
Rijn-Maas Monding (RMM)	6	9	13	82
Amsterdam Rijnkanaal (ARK) en Lek	0	0	0	0
<i>Rijn-Maas Monding (RMM) bij inzet KWA+DKW (via ARK en Lek)</i>	3	5	7	23
<i>Amsterdam Rijnkanaal (ARK) en Lek bij inzet KWA+DKW</i>	3	4	6	59
Totaal (met en zonder inzet KWA+DKW gelijke totaalsom)	20	50	89	270

Deze behoefte doet bij droogte een beroep op het hoofdwatersysteem (HWS) maar het is niet zo dat de hier berekende doorspoelbehoefte van de polders 1 op 1 optelt tot de regionale watervraag aan het HWS, omdat er in veel gebieden sprake is van 'hergebruik' van doorspoelwater benedenstrooms. Bij het bepalen van de totale watervraag aan het HWS moet rekening gehouden worden met de mate van hergebruik binnen het beschouwde polder-boezemsysteem. Deze varieert per gebied en wordt niet nauwkeurig gemodelleerd. De gesommeerde watervraag van

de afzonderlijke polders, zoals in Tabel 3-1 weergegeven, is de bovenwaarde voor de watervraag aan het HWS. Daarnaast is het zo dat tijdens een situatie van watertekort (die zich in de toekomst mogelijk vaker zal voordoen), de watervraag voor doorspoeling van landbouwgebieden als één van de eerste zal worden gekort omdat een groot deel in categorie 4 van de verdringingsreeks zit.

Tot slot moet opgemerkt worden dat het geen vanzelfsprekendheid is dat de hierboven gepresenteerde toekomstige doorspoeldebieten ook daadwerkelijk door een regionaal systeem passen, zowel technisch/hydraulisch als wat betreft mogelijke kosten en neveneffecten van bijvoorbeeld hoge peilen, steile verhanglijnen en van benodigde gemaalcapaciteiten en breedtes van boezemkanalen en sloten. De berekende toekomstige doorspoelbehoeften zijn dus deels een hypothetische watervraag die volgt uit de gekozen benaderwijze van KP ZSS voor een gevoeligheidsanalyse.

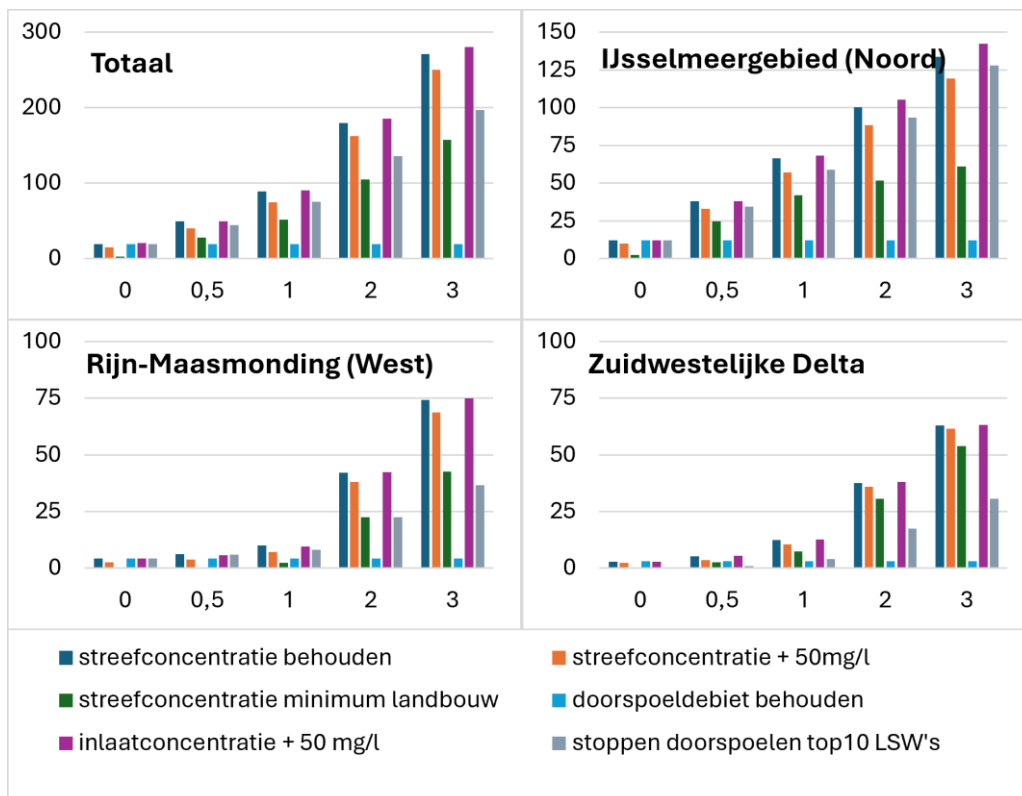
3.2. **Oprekmaatregelen reduceren toename regionale doorspoelvraag**

Verkend is in hoeverre er handelingsruimte is in de berekende toename van de doorspoelbehoefte. Onderstaande handelingsperspectieven zijn daarvoor verkend (zie ook Figuur 3-4):

- *Het beperkt verhogen van de streefconcentratie in de regio (+50 mg/L).* Dit vermindert de doorspoelvraag van met name een groot aantal Hollandse polders en de Fries-Groningse kustregio. Dit handelingsperspectief kan leiden tot een 10% afname in de totale landsbrede regionale doorspoelvraag.
- *Minimale bediening waterkwaliteit op basis van meest voorkomende type landbouw.* Hiervoor zijn de in de literatuur bekende bovenwaarden van de spreiding in zouttolerantie van landbouwgewassen aangenomen (streefconcentratie van 300 mg/L voor hoogwaardige teelten, 1000 mg/L voor akkerbouwgebieden en 2000 mg/L voor weidegronden). Dit beperkt de totale landsbrede doorspoelvraag met 40%. In dit perspectief wordt niet alleen de landbouw minimaal voorzien, maar dit handelingsperspectief heeft ook hogere zoutconcentraties tot gevolg voor andere zoetwater functies zoals ecologie.
- *Constant houden van de doorspoelhoeveelheid.* Door de doorspoelhoeveelheid niet aan te passen aan toenemende zoutvrachten door zeespiegelstijging, nemen zoutconcentraties in het regionale oppervlaktewater toe. In een aantal gebieden kan met het huidige doorspoelbeheer landbouw niet worden voorzien, concentraties nemen hier met zeespiegelstijging sterk toe. Dit geldt voor de bollenstreek, de kop van Noord-Holland, de Fries-Groningse kustregio en Tholen/St Philipsland.
- *Meer operationeel zoutbeheer.* Met het aanpassen van doorspoeling aan meteorologische omstandigheden (minder doorspoelen bij droogte i.v.m. lagere chloridevrachten) lijkt de benodigde polderdoorspoeling in een droge juli-maand met de helft te kunnen worden teruggebracht. Dit perspectief moet wel goed ruimtelijk worden uitgewerkt, er zijn ook gebieden waar de doorspoelvraag in droge perioden juist toeneemt. Onbekend is hoeveel dit op seizoenbasis doet, waarop de andere maatregelen wel zijn gekwantificeerd.
- *Aanpassen van de inlaatconcentratie richting de regio (+ en - 50 mg/L).* Bij beperkte verhoging van de inlaatconcentratie, bijvoorbeeld door toenemende zoutintrusie of beperkte waterbeschikbaarheid voor spoelen van het hoofdwatersysteem, neemt de totale landsbrede polderdoorspoelvraag toe met zo'n 10% (bij behoud van streefconcentratie polder). Andersom kan de polderdoorspoelvraag landsbreed theoretisch met zo'n 10% worden beperkt bij

- verlaging van de inlaatconcentratie met 50 mg/L, bijvoorbeeld door het in bovenstroomse richting verplaatsen van de inlaatlocaties.
- 10 polders (LSW eenheden uit het LHM) welke verhoudingsgewijs de hoogste doorspoelvraag hebben bij 3 m zeespiegelstijging stoppen met doorspoelen. Uit een simpele analyse van RWS o.b.v. de resultaten van Deltares (2022) is gebleken dat de polderdoorspoelvraag landsbreed met bijna 30% gereduceerd kan worden. Deze gebieden omvatten samen nog geen 1% van het totale oppervlak in Nederland waar doorspoeling plaatsvindt. Deze gebieden liggen geclusterd op drie locaties, in de polders direct achter de duinen bij Noordwijk, stukken van Tholen – Oost, Tholen – West en Philipsland en langs de Groningse kust ten noorden van Roodeschool. Hierbij is geen rekening gehouden met de stromingsrichtingen van het lokale watersysteem, en of deze maatregel dus implementeerbaar is.

Over alle onderzochte handelingsperspectieven heen valt vooral op dat er lokaal sterk ruimtelijke verschillen zijn in hoe de handelingsperspectieven uitpakken. Het is dan ook niet eenvoudig om een bepaald handelingsperspectief breed te implementeren, lokaal maatwerk lijkt noodzakelijk.



Figuur 3-4 Doorspoelbehoefte bij behouden van huidige streefconcentratie en voor verschillende maatregelen, voor geheel Nederland (totaal) en 3 gebieden (zoetwaterregio's, deze gebieden zijn anders dan in Tabel 3-1). Horizontale as: mate van zeespiegelstijging, verticale as: doorspoeldebiet in m³/s (NB deze as is overal verschillend). De getallen bij 2 m zeespiegelstijging zijn lineair geïnterpoleerd tussen 1 en 3 m zeespiegelstijging. De maatregel "operationeel beheer juli" is niet opgenomen omdat deze alleen voor de juli-maand geldt. De andere getallen zijn gemiddeld over een groeiseizoen voor een zomer die qua droogte eens in de 10 jaar voorkomt bij huidig klimaat. De getallen zijn afkomstig uit Deltares (2022 en 2024b). De maatregel "stoppen doorspoelen top 10 LSW's" is afkomstig uit eigen analyse van RWS op basis van de resultaten van Deltares (2022 en 2024b).

In de samenstelling van de oprekkpakketten (zie Hoofdstuk 8) is gekozen voor een toenemende mate van impact op de zoetwater gebruiksfuncties, maar nog wel met voldoende behoud van de voorkeursstrategie van doorspoelen. In het eerste pakket is gekozen voor de maatregel om de streefwaarde van het polderwater met 50 mg/L chloride toe te laten nemen. In het tweede pakket is dit verder opgerekt naar het verhogen van de streefconcentratie in de polder wat minimaal voor de landbouw nodig is. In het derde pakket is daaraan toegevoegd het stoppen met doorspoelen van de 10 gebieden (LSWs/polders) welke verhoudingsgewijs de hoogste doorspoelvraag hebben bij 3 m zeespiegelstijging.

3.3. Zoetwaterlenzen in de duinen

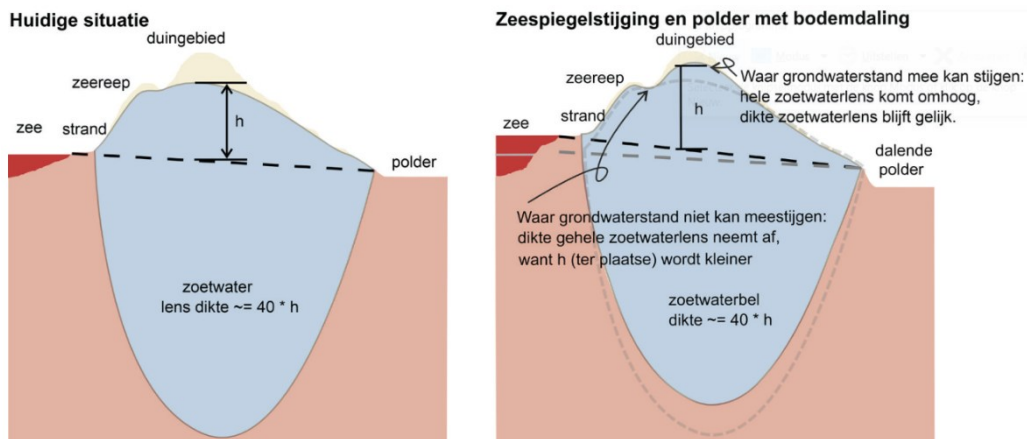
Door Deltares (2024c) is geanalyseerd wat het effect is van zeespiegelstijging op het zoetwatervolume van de zoetwaterlenzen onder de Nederlandse duingebieden, zowel in duingebieden waar voorgezuiverd rivierwater wordt geïnfiltreerd als ook in gebieden met natuurlijke zoetwaterlenzen. Circa 45% van het drinkwater in Nederland wordt gewonnen uit oppervlaktewater uit de Maas, de Lek, het ARK en het IJsselmeer (ca. 16 m³/s o.b.v. Vewin jaarcijfers 2022 (Vewin 2023)). Daarvan wordt minder dan de helft geïnfiltreerd in de duinen als natuurlijke stap in het zuiveringsproces, zoals gebeurt in het drinkwaterwingebied van Dunea, dat is doorgerekend met het 3D model. Naast zeespiegelstijging is ook gekeken naar andere factoren die mogelijk invloed hebben op de verandering van het zoetwatervolume in de duinen, te weten bodemdaling en de daarbij behorende daling van het oppervlaktewaterpeil in poldergebieden in het achterland, zandsuppleties voor handhaving kustfundament, onzekerheid in de aangenomen geologie en variaties in grondwateraanvulling door neerslagoverschot. De hoogte en vorm van het duinprofiel is vanaf de eerste duinvoet landinwaarts gelijk gebleven in de simulaties omdat onbekend is hoe deze zich zal ontwikkelen als de zeespiegel stijgt en het kustfundament door zandsuppleties op zijn plaats wordt gehouden.

Het zoetwatervolume in de kustduinen van het drinkwaterleidingbedrijf Dunea neemt aanzienlijk af naarmate de zeespiegel stijgt. Zonder zeespiegelstijging is de afname in 2100 door het autonome verziltingsproces 2,5 %, terwijl bij een zeespiegelstijging van 0,5 en 1m beide in zichtjaar 2100 respectievelijk 4% en bijna 6% verlies is berekend. Bij een extreme zeespiegelstijging van 3m in zichtjaar 2150 bedraagt het verlies zelfs bijna 34%. Het effect van zandsuppleties is positief op het zoetwatervolume, het zorgt voor extra bergingsruimte. Bij een zeespiegelstijging van 0,5 en 1m zichtjaar beiden in 2100 neemt het zoetwatervolume met respectievelijk 0,3% en 0,5% minder af door zandsuppleties. Bodemdaling en de bijbehorende oppervlaktewaterpeil daling in het achterland heeft juist een negatief effect op het zoetwatervolume. Bodemdaling heeft namelijk een drainerende werking op de zoetwaterlenzen. Zonder zeespiegelstijging is de afname van het zoetwatervolume door bodemdaling 0,8% groter (van 2,5% naar 3,3%). Een combinatie van bodemdaling, 3% minder grondwateraanvulling en een zeespiegelstijging van 0,5m in 2100 zorgt voor een afname van het zoetwatervolume van 4,2%. Als in plaats van een afname van de jaarlijkse grondwateraanvulling een toename van 3% wordt aangenomen (vanwege natter wordende winters), is de afname van het zoetwatervolume enigszins minder, namelijk 3,8%.

Andere duinwaterwingebieden langs de Hollandse kust en de Waddeneilanden, waar met een simpeler conceptueel 2D zoet-zout model is gerekend, worden ook aanzienlijk beïnvloed door zeespiegelstijging. Tot 2100 (zeespiegelstijging 1,35 m)

blijven de meeste lenzen grotendeels intact, maar kleinere lenzen, zoals bij Hoek van Holland en Katwijk krimpen tot 63% van hun oorspronkelijke zoetwatervolume. Tegen 2150 (zeespiegelstijging 3m) nemen de volumes van kleinere lenzen in diverse segmenten, en vooral op de Waddeneilanden (Terschelling), sterk af. Een lage maaiveldhoogte maakt gebieden kwetsbaarder, omdat regenwater bij hogere stijghoogten van de lens oppervlakkig afstroomt in plaats van infiltreert (zie Figuur 3-5).

Geconcludeerd kan worden dat het zoetwatervolume in duingebieden negatief wordt beïnvloed door een stijgende zeespiegel, maar pas bij een extreme zeespiegelstijging is de invloed aanzienlijk. Bij extreme scenario's zoals 3m zeespiegelstijging in 2150 zijn aanvullende maatregelen noodzakelijk. Dit is in principe een worst-case benadering. Als het duinprofiel meegroeit met de zeespiegelstijging, door handhaving van het huidige kustfundament en landwaartse doorstuiving van het duingebied, vermindert dat de afname van het zoetwatervolume. Er is dan meer ruimte voor de zoetwaterbel om mee te stijgen (zie Figuur 3-5).



Figuur 3-5 De vorm van de zoetwaterlens onder een zeespiegelstijging hangt af van de hoogte van het maaiveld. Links een schematisatie van de huidige situatie. Rechts laat de situatie zien onder invloed van zeespiegelstijging. De grondwaterstand in de zee-epeep kan niet volledig overal meestijgen met de zeespiegelstijging en de gehele zoetwaterlens wordt kleiner; het regenwater kan niet infiltreren, een deel van de grondwateraanvulling kan de zoetwaterlens niet voeden en wordt deels afgevangen door oppervlaktewater (Deltares 2024c).

3.4. Conclusies houdbaarheid en oprekbaarheid

Door zeespiegelstijging neemt de zoute kwel richting het oppervlaktewater in de polders van de kustprovincies toe. Dit zorgt voor verzilting van het oppervlaktewater en bij een gelijkblijvend beheer van de waterschappen voor een toename van de watervraag voor doorspoeling van de watergangen. De totale landelijke doorspoelwatervraag voor oppervlaktewater in polders neemt toe van 20 m³/s in de huidige situatie, tot ongeveer 50, 90 en 270 m³/s voor respectievelijke zeespiegelstijging zichtwaarden 0.5 m, 1 m en 3 m. De berekende doorspoeling in alle beschouwde regionale boezemwateren, neemt toe van 40 m³/s in de huidige situatie, tot een kleine 75 m³/s bij 3 m zeespiegelstijging. Deze behoefte doet bij droogte een beroep op het hoofdwatersysteem (HWS) maar het is niet zo dat de hier berekende doorspoelbehoefte van de polders 1 op 1 optelt tot de regionale watervraag aan het HWS, omdat er in veel gebieden sprake is van 'hergebruik' van doorspoelwater benedenstrooms. Deze waarden moeten worden gezien als een bovenwaarde. Bovendien is de doorvertaling van watervraag naar daadwerkelijke te

realiseren debieten deels hypothetisch. De veronderstelde voortzetting van het bestaande regionale beheer gaat immers ook tegen andere grenzen aanlopen dan louter de beperkingen in wateraanbod.

De verkende oprekmaatregelen om de doorspoelvraag naar zoetwater uit het HWS te reduceren gaan er alle vanuit dat de chloridewaarde waar in de polders op gestuurd wordt stijgt. In de maatregel waar de hoogste mate van zoetwater reductie wordt gehaald (40% t.o.v. situatie zonder maatregel) is de toename t.o.v. de huidige situatie zonder zeespiegelstijging nog steeds bijna een ordegrootte groter.

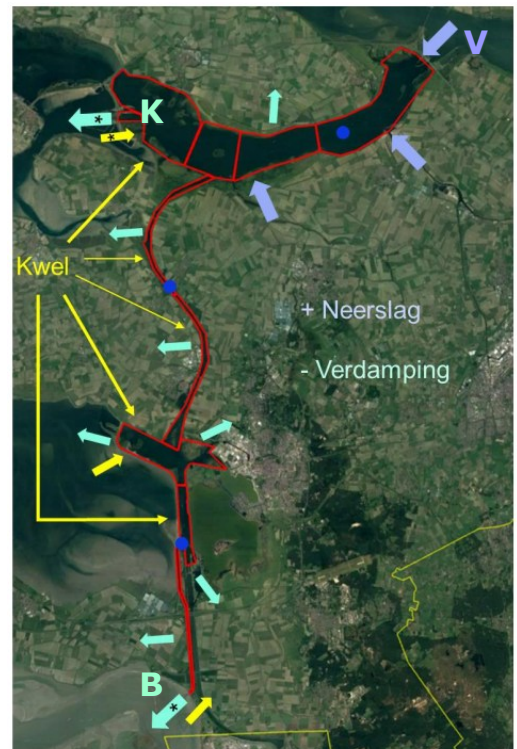
Het zoetwatervolume in duingebieden wordt negatief beïnvloed door een stijgende zeespiegel, maar pas bij een extreme zeespiegelstijging is de invloed aanzienlijk. Bij extreme scenario's zoals 3m zeespiegelstijging in 2150 zijn aanvullende maatregelen noodzakelijk. Dit is in principe een worst-case benadering. Als het duinprofiel meegroeit met de zeespiegelstijging, door handhaving van het huidige kustfundament, verminderd dat de afname van het zoetwatervolume, want er is dan meer ruimte voor de zoetwaterbel om mee te stijgen.

4 Volkerak-Zoommeer (VZM)

4.1. Essentie systeemwerking zoetwaterbuffer Volkerak-Zoommeer

4.1.1. Huidig beheer

Het Volkerak-Zoommeer (VZM) wordt schematisch weergegeven in Figuur 4-1. Zoals beschreven in Arcadis/HydroLogic (2023a), aangevuld met informatie uit Witteveen & Bos (2016) en Deltares (2020a, 2024d) en de [IPLO-factsheet](#) zijn onder reguliere en droge omstandigheden de belangrijkste elementen in het water- en zoutbeheer van het VZM de Volkeraksluizen (V), de Krammersluizen (K) en de Bathse spuisluis (B). De Krammersluizen, die het VZM scheiden van de Oosterschelde, zijn de grootste zoutbron. Andere bronnen van zout zijn de omliggende polders die afwateren, de Bergse Diepsluis bij het Zoommeer en zoute kwel onder de dammen door. Naast het zoveel mogelijk voorkomen dat zout het systeem via sluisen indringt, wordt het systeem zoet gehouden door een zwakke, van noord naar zuid gerichte doorspoelstroming in stand te houden. Deze doorstroming is in beperkte mate ook behulpzaam bij het voorkomen van accumulatie van nutriënten en het beperken van schadelijke algenbloei. Tussen 15 maart en 15 september is het zoetwaterbeheer gericht op het beperken van de chlorideconcentratie tot maximaal 450 mg/L in de bovenlaag van de waterkolom bij Bathse Brug. Via de Volkeraksluizen wordt onder huidige klimaatomstandigheden 15 tot 40 m³/s zoetwater ingenomen uit het Hollands Diep voor de regionale watervraag en doorspoeling van het meer.



Figuur 4-1 Schematische weergave Volkerak-Zoommeer (Deltares, 2020). Paars waterinput, turkoois onttrekkingen, geel zoutlast. V: Volkerak-sluizen, K: Krammersluizen, B: Bathse Spuisluis. Rode lijnen geven de bakjes van het water- en zoutbalansmodel weer.

De Brabantse rivieren de Dintel, de Steenbergse Vliet en de Zoom monden uit in het VZM. Deze dragen onder natte of reguliere omstandigheden bij aan de doorspoeling. Ook Oost-Tholen en zuidoost Flakkee wateren af op het VZM. Tijdens zeer droge zomerperiodes is er per saldo sprake van enkele m³/s onttrekkingen. Deze regionale vraag wordt vooral bepaald door de watervraag voor landbouw.

Wat betreft afvoer verlaat het meeste water het systeem via de Krammersluizen (9 m³/s in het zomerseizoen ten behoeve van de IZZS, tot maximaal 29 m³/s in de winter) en via Bath (orde 10 m³/s daggemiddeld bij droogte, tot maximaal 130 m³/s onder natte omstandigheden en bij inzet van het systeem voor waterberging tijdens hoogwater). Tot slot verlaat een klein deel het systeem via de Kreekraksluizen (ca. 3 m³/s) en de Bergse Diepsluis (netto ca. 1 m³/s richting Oosterschelde vanwege schutbedrijf). Spoelen via de Krammersluizen is effectief om het zout dat in het noordelijke Volkerak-deel indringt ook daar af te voeren. Spoelen via Bath is vooral

effectief tegen het zout aan de zuidzijde. Het pompdebiet via de Kreekraksluizen wordt ingezet om het zout op het Antwerps kanaalpand terug te dringen.

Om de zoutlast vanuit de Krammersluizen te beperken, is het sluizencomplex bij aanleg voorzien van een zoet-zout-scheiding, o.a. met hoog- en laagbekkens. Dit systeem gaat vervangen worden door de IZZS met alleen een laagbekken en bellenschermen in combinatie met het spoelen van de kolken en een spuumiddel (Spui- en Vismigratiemiddel). Dit SPVM wordt aangelegd om de zoutindringing tegen te gaan, vismigratie te bevorderen en de doorspoeling te vergroten. De SPVM kan alleen worden ingezet zo lang mossel- en oesterkweek geen schade ondervinden van zoutlast op de Oosterschelde. In de berekeningen binnen KP ZSS is uitgegaan van de nieuwe IZZS.

Het VZM wordt een zoetwaterbuffer genoemd, maar heeft vergeleken met het IJsselmeer een beperkte volume-buffercapaciteit. Het systeem heeft echter ook een 'zoutbuffer'-werking: de variatie van het zoutgehalte door de loop van het jaar kan strategisch worden benut. De richtwaarde in het zomerhalfjaar is gesteld op 450 mg/L. Het beheer is erop gericht om aan het eind van het winterseizoen (15 maart) een chloride-concentratie lager dan 380 mg/L bereikt te hebben. In dat geval kan vanuit een relatief zoete uitgangssituatie de doorspoeling van het systeem zodanig beheerd worden dat de chloridegehalten slechts geleidelijk oplopen. Sinds 2023 wordt er jaarrond doorgespoeld wanneer de omstandigheden daar ruimte voor bieden. Hierdoor is het zoutgehalte in de afgelopen winters substantieel lager geweest dan 380 mg/L.

Om het zoutgehalte van het VZM zelf bij huidig klimaat te beheersen is in een droge zomer een totaal innamedebiet bij de Volkeraksluizen van ca. 30 m³/s nodig. Deze spoelbehoefte is lager dan de in Deltares (2020a, 2024d) en Arcadis/HydroLogic 2023a gerapporteerde 40 m³/s omdat in die studies respectievelijk jaarronde getallen (Deltares) en overschattingen van zoutvrachten aan de orde waren.

In het verleden werd bij het operationeel beheer van de Volkeraksluizen tijdens lage rivierafvoer (afvoer Lobith lager dan ca. 800 m³/s) rekening gehouden met mogelijke nadelige invloed van inlaten naar het VZM op verziltingsgevoeligheid van de RMM en vaardiepte bij de haven van Moerdijk. In de bijstelling van het Waterakkoord is dit aangepast tot de afspraak om tijdens droogte de inlaat naar VZM te beperken tot maximaal 35 m³/s.

4.1.2. *Uitgangspunten analyse zeespiegelstijging*

De waterbeheerstrategie van het VZM is gericht op peil en chloride (en indirect op de biologische waterkwaliteit). In deze synthese richten we ons op de benodigde debieten om onder-uitzakking van het meerpeil te voorkomen in combinatie met voorkomen van overschrijding van het chloride-criterium onder invloed van zeespiegelstijging.

Voor het beschrijven van de gevolgen van de zeespiegelstijging op de zoetwaterbalans van het VZM, zijn onderstaande uitgangspunten gehanteerd:

- In de systeemanalyse van Arcadis/Hydrologic (2023a) is ervan uitgegaan dat de gerenoveerde IZZS reeds in gebruik is.

- De Oosterschelde blijft als een open-gesloten systeem beheerd, waarbij de gemiddelde waterstand 1 op 1 meestijgt met zeespiegelstijging en de getij-amplitude verandert niet wezenlijk.
- Voor het Antwerps kanaalpand is aangenomen dat het peil aan de Vlaamse zijde niet zal veranderen bij zeespiegelstijging en daardoor de zoutlast en het benodigde pompdebiet door de Kreekraksluizen niet zal wijzigen.
- Indien vanwege waterveiligheid de Oosterschelde of het peil in de Antwerpse dokken vanaf een bepaalde zeespiegel-zichtwaarde anders wordt ingericht, zal dat om een herziening van onderstaande resultaten vragen.

Klimaatrobuustheidstudies VZM

Er zijn in recente jaren diverse studies uitgevoerd aan de klimaatrobuustheid van het VZM. Deltares 2020a en 2024d hebben de water- en zoutbalans in termen van peilbeheer en chloridewaarden beschouwd, echter slechts tot zeespiegelwaarden tot 1 meter, met beperkte doorkijk daar voorbij. De studie van Arcadis/HydroLogic 2023a uit Fase 1 heeft hieraan complementair (voortbouwend op hetzelfde bakjesmodel) tot en met 5m zeespiegelstijging gekeken. Omdat uitgangspunten en indicatoren per studie verschillen, verschillen ook de details van de cijfermatige uitkomsten. Ook moet opgemerkt worden dat de nauwkeurigheid van het model in Arcadis/HydroLogic (2023a) beperkt wordt door achteraf geconstateerde overschattingen van de zoutvrachten en de quasi-stationaire wijze van modelleren. Tot slot zijn in Deltares (2025b) de hydraulische gevolgen van zeespiegelstijging op de afvoercapaciteiten van de kunstwerken samengevat. De ordegrottes van de getallen uit de diverse studies liggen alle in hetzelfde bereik, de details verschillen.

4.2. Gevolgen zeespiegelstijging op de zoetwaterbalans van het VZM

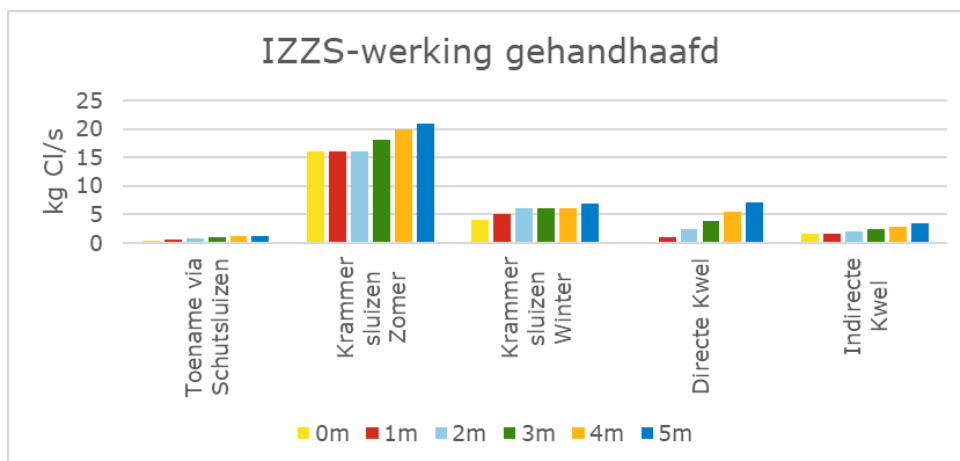
De doorwerking van zeespiegelstijging op het VZM wordt bepaald door:

- Zoutvracht afkomstig uit de schutsluizen, mede i.r.t. het functioneren van de IZZS bij de Krammersluizen.
- De toename van zoutvracht t.g.v. grondwaterkwel.
- Afvoercapaciteit t.b.v. het spoeldebiet, m.n. via Bathse spuisluis en het spuimiddel bij de Krammersluizen.
- Beschikbaarheid van voldoende zoet doorspoelwater uit Hollands Diep (debiet Volkeraksluizen).

4.2.1. Zoutvracht sluizen

Figuur 4-2 laat zien dat de Krammersluizen, ook met de IZZS in werking, de dominante zoutbron zijn en ook blijven bij zeespiegelstijging. Met name in de zomer is de netto zoutlast relatief groot vanwege de beperking in spoeldebiet tot 9 m³/s richting Oosterschelde. Dit resulteert in een netto zoutvracht op het meer vanuit deze sluis van ca. 16 kg/s onder huidige zomerse condities.

Door zeespiegelstijging neemt het debiet naar het laagbekken toe (o.a. het opvangen van de inkomende schutsluif) en neemt de mogelijkheid om het laagbekken te legen naar de Oosterschelde onder vrij verval af. Bij de ombouw is er daarom rekening mee gehouden om pompen te plaatsen op het laagbekken. Ook neemt de capaciteit van het spuumiddel (SPVM) af (zie Figuur 4-5); dit zal met name in de winter tot beperkingen leiden¹. In Fase 1 is afgeleid dat de IZZS zou ophouden te functioneren bij 1,25 m zeespiegelstijging. Een tekort aan afvoercapaciteit bij het spuumiddel (SVPM) zal echter al eerder tot problemen leiden, waarschijnlijk rond 0,5 m zeespiegelstijging (Deltares, 2025b). De SPVM dient namelijk niet alleen het peilbeheer en de natuurfuncties maar ook het zoutbeheer.

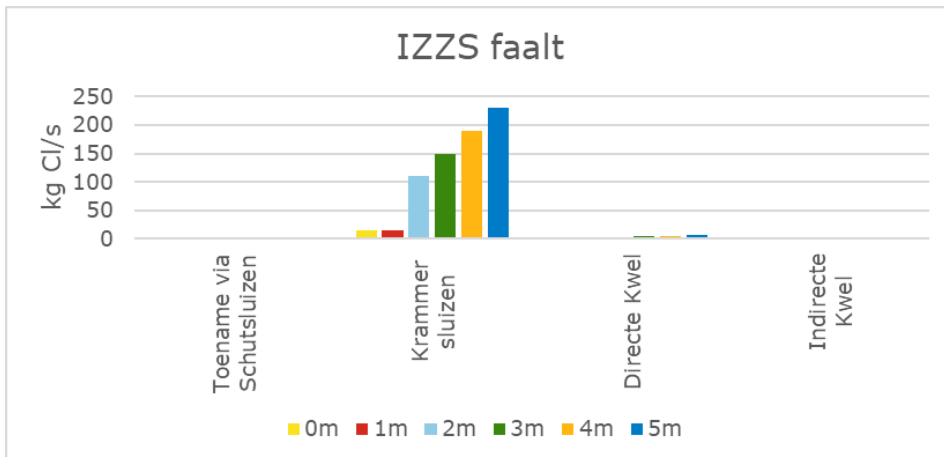


Figuur 4-2 Zoutlast op VZM als functie van ZSS bij instandhouding van de IZZS, geschat op basis van de combinatie van Arcadis/HydroLogic 2023a en Deltares 2022.

Indien ervoor gekozen wordt de IZZS in zijn totaliteit functioneel te houden door alle gerelateerde afvoeren onder vrij verval te vervangen door afvoer middels gemalen, neemt de netto zoutvracht op het VZM via de Krammersluizen relatief slechts beperkt toe als functie van zeespiegelstijging (tot ca 18 kg/s bij 3 m). De zoutvracht uit de andere schutsluizen (Jachtensluis, Bergse Diepsluis) neemt ook toe. Aangezien deze sluisen relatief kleine bijdragen leveren, worden voor die sluisen geen adaptatiemaatregelen beschouwd binnen KP ZSS.

Indien er voor wordt gekozen om de IZZS niet functioneel te houden, neemt de zoutlast via de Krammersluizen drastisch toe tot ca. 150 kg Cl/s bij 3 m zeespiegelstijging zoals te zien is in Figuur 4-3.

¹ Het is op dit moment niet duidelijk in hoeverre er rekening is gehouden met het wegvallen van vrij verval bij zeespiegelstijging in het ontwerp van de IZZS en of bijv. pompen in het ontwerp zijn voorzien.



Figuur 4-3 Zoutlast op VZM als functie van ZSS bij niet in standhouden van de IZSS, geschat op basis van de combinatie van Arcadis/HydroLogic 2023a en Deltares 2022.

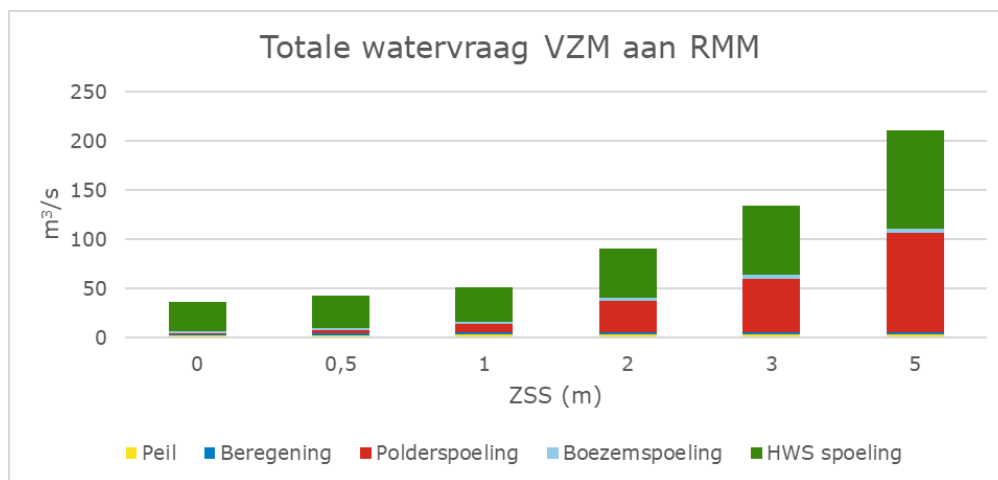
4.2.2. Zoute kwel

Het VZM is de enige van de onderzochte zoetwaterbuffers in de KZH waar zoute kwel, en vooral de toename ervan t.g.v. extreme zeespiegelstijging, een significante bijdrage levert aan de zoutbalans. Dit komt door een combinatie van de nabije blootstelling van het gebied aan getijdenwater en de bodemopbouw (Deltares 2022). De zoute kwel is de optelsom van directe kwel (via de waterbodem en dammen) en indirecte kwel (afwaterende zoutlast uit het omliggend gebied). Uit de grondwaterstudie blijkt dat met name de directe kwel sterk stijgt: van ca. 0,2 kg/s in de huidige situatie naar ca. 4 kg/s bij 3 m zeespiegelstijging. De indirecte kwel uit Oost-Tholen en zuidoost Flakkee is ca 1,7 kg/s onder huidige condities. Deze vracht daalt bij 0,5 m zeespiegelstijging aanvankelijk licht om daarna weer te stijgen tot ca 2,4 kg/s bij 3 m. In deze vrachten zitten onzekerheden van ca. $\pm 30\%$. Zoals te zien in Figuur 4-2 komt bij 3 m zeespiegelstijging de totale kwelvracht op ca. 6,5 kg/s en een extrapolatie naar 5 m zeespiegelstijging komt uit op orde 10 kg/s. Vergelijken met de 15-20 kg/s uit de Krammersluizen bij functionerende IZSS- zijn deze bijdragen significant en niet (directe kwel) of slechts deels (indirecte kwel, middels het regionaal waterbeheer) te beïnvloeden. Opgemerkt wordt dat er in de modelstudie vanuit wordt gegaan dat de zoute kwelvracht uit Oost-Tholen en zuidoost Flakkee nu en in de toekomst ook tijdens droogte op het VZM geloosd wordt. De huidige praktijk is echter dat tijdens droogte het spoelwater van deze gebieden deels op de zoute buitenwateren wordt geloosd en niet wordt teruggevoerd naar het VZM. De voorliggende modelcijfers zijn wat betreft zoutvracht dus relatief worst case. Het voortzetten van deze regionale beheerwijze vraagt om adaptatie van de regionale afvoer naar het meestrijgende buitenwater: waar nu nog bij laagwater onder vrij verval afgewaterd kan worden, zal dat vanaf een bepaald moment door poldergemalen moeten gebeuren. Deze regionale/lokale opgave is binnen KP ZSS niet nader onderzocht.

Zoute kwel zorgt niet alleen voor zoutbelasting van het VZM, het zorgt ook voor toenemende doorspoelbehoefte van de polders op de eilanden indien het bestaande regionaal waterbeheer wordt voortgezet. Bij droogte wordt het hiervoor benodigde water onttrokken uit het VZM. Zoals in Hoofdstuk 3 is beschreven, volgt uit de grondwaterstudie een toename van deze doorspoelbehoefte van ca. 1 m³/s momenteel tot 55 m³/s bij 3 m zeespiegelstijging. Om meervoudig gebruik van

spoelwater binnen het regionaal systeem te verdisconteren, zou een schalingsfactor kunnen worden toegepast. De waarde van deze factor (enkele tientallen tot 50%) hangt af van de inrichting van het regionale waterbeheer. De mate van 'hergebruik' van dit water binnen het regionale watersysteem is in de grondwaterstudie met onzekerheid omgeven. Voor de betreffende gebieden van Scheldestromen en Hollandse Delta is daarom momenteel geen kwantitatieve onderbouwing voor een schalingsfactor voorhanden. De totale waterbehoefte van het VZM en de daarvan afhankelijke regio als functie van zeespiegelstijging, indien de strategie voor beide op de huidige wijze wordt voortgezet, is geïllustreerd in Figuur 4-4. De watervraag ten behoeve van polderdoorspoeling voorbij 1 m zeespiegelstijging loopt op tot tientallen m³/s en wordt van dezelfde orde grootte als de doorspoelwatervraag voor het VZM-systeem zelf. Hierbij moet opgemerkt worden dat het geen vanzelfsprekendheid is dat dergelijke debieten ook daadwerkelijk door een regionaal systeem passen, zowel technisch/hydraulisch als wat betreft mogelijke neveneffecten van bijvoorbeeld hoge peilen, steile verhanglijnen en vergrote breedtes van boezemkanalen en sloten. Merk ook op dat de hier (evenals in de andere regio's) toegepaste lineaire optelling van spoeldebieten voor regio en HWS het effect van de regionale onttrekkingen op de doorstroming van het VZM negeert. Dit effect kan lokaal gunstig of ongunstig zijn, afhankelijk van waar langs het VZM hoeveel debiet wordt onttrokken en welke circulatie dan resulteert in het VZM. (Hoe zuidelijker onttrokken wordt, hoe gunstiger.) Deze details voeren te ver voor de context van KP ZSS, maar het verdient aanbeveling om bij regionale studies dit in ogenschouw te nemen met een meer gedetailleerd model.

4.2.3. Aan- en afvoercapaciteiten



Figuur 4-4 Onttrekkingsdebiet van het VZM aan de RMM benodigd om de huidige strategie in stand te houden voor zowel het zoethouden van het meer zelf (HWS) als het voorzien in alle regionale watervraag. Getallen geschat op basis van de combinatie van Arcadis/HydroLogic (2023a), Deltares (2022) en basisprognoses'18 voor Deltascenario Stoom, onder de aanname dat de IZZS in werking wordt gehouden middels gemalen. In de post 'polderspoeling' is eventueel hergebruik (Deltares 2022)) niet verdisconteerd. De posten 'peil' en 'beregening' nemen na 1 m in tegenstelling tot de verwachting niet verder toe vanwege de beperkte zichttermijn van het toegepaste Deltascenario Stoom (zie Hoofdstuk 2). NB de posten 'peil' en 'beregening' zijn erg klein in vergelijking met de andere posten, waardoor deze niet goed zichtbaar zijn in de grafiek.

Zoals Figuur 4-4 laat zien, is het totale benodigde debiet door de Volkeraksluizen tot aan 3 m zeespiegelstijging in de orde van 150 m³/s. Deze hoeveelheid is nodig om

de zoetwaterstrategie van het VZM en regio in stand te houden, met in standhouden van de IZZS. Technisch en hydraulisch gesproken is er, afgezien van extreme laagwateromstandigheden, bij de Volkeraksluizen bij een stijgende zeespiegel geen belemmering om dit debiet aan te voeren onder vrij verval. De veronderstelling is namelijk dat het meerpeil gehandhaafd blijft op huidig peil en de waterstanden in het Hollands Diep gaan meestijgen met de zeespiegel. Zeespiegelstijging bevordert inname onder vrij verval en neemt een eventueel vaardiepte-knelpunt bij Moerdijk steeds meer weg. Extreem lage rivierafvoeren en aflandige wind doen dit gunstige effect van stijgende zeespiegel echter deels teniet. Er is binnen KP ZSS niet nader gekwantificeerd of en hoe vaak er eventueel een vaardiepte-knelpunt voor zeeschepen op de vaarroute richting Moerdijk zou kunnen optreden als gevolg van extreem lage rivierafvoeren. Onder alle in de systeemanalyse onderzochte omstandigheden zijn de benodigde spoeldebieten voor het VZM hoe dan ook altijd minder dan de benodigde noodcapaciteit ten behoeve van noodberging bij hoogwater (bij huidige zeespiegelstijging tot ca. 300 m³/s). Inzet van die noodcapaciteit zou wel betekenen dat de schutsluizen gestremd moeten worden. Bij ontwerp ten behoeve van eventuele vervanging of renovatie van de Volkeraksluizen verdient het aanbeveling om deze facetten wel in meer detail in ogenschouw te nemen. Voor de huidige context is de conclusie dat er voor zoetwater hydraulisch gezien geen fundamentele beperking zal ontstaan aan de inname-zijde, wel dat de huidige reguliere capaciteit wordt overschreden vanaf 2 m zeespiegelstijging.

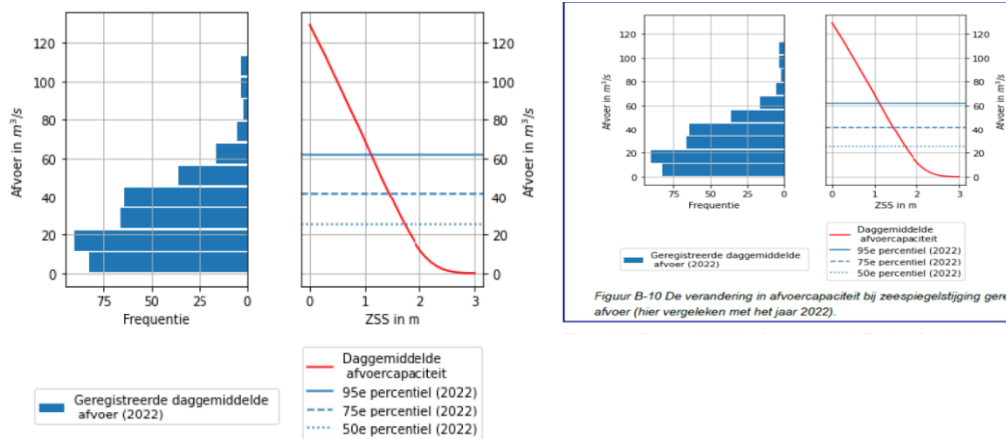
Indien de IZZS niet in werking zou worden gehouden, is ingeschat dat de benodigde debieten om chloride in het meer gedurende 3 maanden onder die omstandigheden voldoende laag te houden toe nemen tot ver boven de 100 m³/s. De exacte waarde is niet bepaald in de systeemanalyse, maar aangezien de zoutvracht bij 3 m zeespiegelstijging meer dan vervijfvoudigt, is het niet uitgesloten dat het spoeldebiet en de regionale watervraag tezamen de huidige maximale (nood)capaciteit van de Volkeraksluizen van 300 m³/s dan overschrijden. In dat geval zou de zoetwaterstrategie voor het VZM niet alleen een relatief grote claim op het beschikbare rivierwater in de RMM leggen, maar ook maatgevend kunnen worden voor de benodigde maximale door-voercapaciteit. In dat geval vergt de strategie voor het VZM, doorspoeldebieten om verzilting tegen te gaan van enkele honderden m³/s omwille van een zoetwatervraag voor de regio van enkele tientallen m³/s.

Los van de aanvoer, is de afvoer vanuit het VZM relevant: niet alleen de werking van het IZZS laagbekken, ook de afvoercapaciteit van het SPVM en de spui bij Bath neemt af met een stijgende zeespiegel, zoals te zien in Figuur 4-5. Ook neemt het inwaartse schutdebiet via de diverse sluizen toe. Door de optelsom van deze factoren wordt het handhaven van het peil en het handhaven van de doorspoeling lastiger naarmate de zeespiegel stijgt, nog los van eventuele door klimaatverandering veroorzaakte toenemende belasting vanuit de afstromende Brabantse rivieren. Deltares (2025b) toont de resultaten voor de diverse aflatlocaties in meer detail en onderlinge samenhang. Samenvattend komt het neer op het volgende:

- Vanaf 0,2 m zeespiegelstijging neemt de capaciteit van het SVPM af onder de beoogde winterwaarde en vanaf ca. 0,5 m zeespiegelstijging is de capaciteit ook in de zomer ontoereikend.

- Vanaf ca. 1 m zeespiegelstijging daalt de maximale afvoercapaciteit bij Bath onder de 60 m³/s en vanaf ca. 2,5 m zeespiegelstijging kan in het geheel niet meer onder vrij verval worden gespuid op de Westerschelde.
- Vanaf ca. 1 m zeespiegelstijging kan het laagbekken van de IZZS onder vrij verval niet meer voldoende functioneren.

Door deze afname in capaciteit en toename in doorspoelbehoefte zal de capaciteit onder vrij verval ontoereikend worden, zowel in Bath als bij het toekomstige spuimiddel bij de Krammersluizen (SPVM). En afhankelijk van de ontwikkeling van de neerslagstatistiek zal ook het peilbeheer vaker falen. Welke van deze twee opgaven eerder komt in de tijd is niet onderzocht omdat neerslagtrends niet in de scope van KP ZSS zitten.



Figuur 4-5 Spuicapaciteit Bath (links) en SPVM Krammersluizen (rechts) afhankelijk van zeespiegel bij gelijkblijvend peil op het VZM (Deltares 2025b). Rode lijn middenpaneel en blauwe lijn rechts geven daggemiddelde afvoercapaciteiten aan. Vanwege het optreden van getijdensters is dit minder dan de nominale maximale capaciteit.

4.2.4. Beschikbaarheid zoetwater uit Hollands Diep

Het onttrekken van debiet aan het Hollands Diep ten behoeve van het VZM (doorspoelbehoefte en watervraag) heeft invloed op de waterbeschikbaarheid in de RMM. Enerzijds omdat het de vaardiepte bij Moerdijk nadelig beïnvloedt en anderzijds omdat het het restdebiet door de Nieuwe Waterweg beperkt en daarmee verzilting van de RMM kan bevorderen (zie Hoofdstuk 5). Andersom beredeneerd is het benodigde of beschikbare debiet richting VZM ook afhankelijk van de systeemtoestand in de RMM. Momenteel zijn vaardiepten richting Moerdijk niet expliciet limiterend voor de waterbeschikbaarheid richting VZM, maar bij extreem lage afvoeren (bijvoorbeeld onder de 400 m³/s Nieuwe Waterweg afvoer) en tegelijk toenemende onttrekkings-behoefte wordt dit effect wellicht wel weer expliciet. De systeem-verkenning RMM in Hoofdstuk 5 laat bovendien zien dat naarmate de zeespiegel stijgt, de RMM steeds verziltingsgevoeliger wordt. Zoals gezegd ondervindt niet alleen de RMM zelf hier effecten van, maar kan dit ook leiden tot het zouter worden van het in te nemen water in het Hollands Diep. Indien die zoutgehalten langdurig en significant oplopen kan dit weer zijn weerslag hebben op de doorspoelstrategie van het VZM. Hoe zouter het ingelaten water hoe meer debiet er nodig is om dezelfde streefconcentratie te behalen. Het blijven nastreven van de

beheerstrategie onder die klimaatcondities leidt tot een zichzelf versterkend effect en is onhoudbaar.

Voor het zo ver is, zal de toenemende verziltingsgevoeligheid van de RMM met voortschrijdende klimaatverandering al steeds meer beperkingen gaan opleveren voor de zoetwaterbeschikbaarheid voor het VZM. De noodzaak tot bovenregionale afweging, in dit geval tussen het ontzien van de RMM ten laste van het VZM of vice versa, zal steeds vaker gaan voorkomen.

Uit de resultaten voor de systeemanalyse RMM (Hoofdstuk 5) is een eerste indicatie af te leiden voor de beperkende condities ten aanzien van verzilting: Bij extreem lage Nieuwe Waterweg afvoeren van ca. 200 m³/s begint namelijk, ook zonder zeespiegelstijging en windopzet, het zout uit de Nieuwe en Oude Maas tijdens vloed het Hollands Diep te bereiken (intrusielenkte 250 mg/L contour ca. 60 km). Bij 3 m zeespiegelstijging treedt deze mate van intrusie al op bij Nieuwe Waterweg afvoeren van ca. 400 m³/s. De RMM systeemanalyse laat zien dat voorbij een intrusielenkte van ca 70 km het Hollands Diep zodanig verzilt dat de chlorideconcentratie bij de Volkeraksluizen gedurende het gehele getij boven de 200 mg/L komt. Een verhoogde chloride-waarde van het ingenomen water gaat de efficiëntie van de doorspoelstrategie van het VZM nadelig beïnvloeden. Naarmate de concentratie van het ingenomen water stijgt, zal meer doorspoeldebiet nodig zijn om eenzelfde zoutgehalte in het VZM te bereiken. En deze toename in debiet zal de verzilting van het Hollands Diep op zijn beurt weer versterken. Zodra het Hollands Diep de doelwaarde van 450 mg/L van het VZM overschrijdt, levert spoelen sowieso niets meer op voor het doelbereik.

Kortom, de huidige zoetwaterstrategie voor het VZM zal, ondanks gebiedseigen robuustheid tegen zoutindringing via de sluizen, vanaf een bepaalde combinatie van rivierafvoer, bovenregionale onttrekkingen, wind en zeespiegelstijging falen omdat er onvoldoende zoetwater beschikbaar is in het Hollands Diep. Binnen KP ZSS is dit *tipping point* (naar verwachting ergens voorbij 70km intrusielenkte) niet in detail gekwantificeerd, maar de resultaten in Hoofdstuk 9, de landsbrede waterbalans van het HWS, geven aan dat dit punt gedomineerd wordt door de afname in restdebiet door de Nieuwe Waterweg. Hoofdstuk 9, laat zien dat intrusielenktes van meer dan 70km -afhankelijk van het bovenstroomse scenario- al kunnen optreden bij een zeespiegelstijging van orde 1 m. De precieze aard en duur van dergelijke intrusies en de doorwerking op het doelbereik van het VZM zijn nog niet in detail onderzocht. KP ZSS beveelt daarom aan om de gecombineerde gevoeligheid van de RMM en het VZM in het afvoerbereik Nieuwe Waterweg onder ca. 400 m³/s in combinatie met windefecten en naleveringseffecten nader te onderzoeken.

4.3. Oprekmaatregelen binnen het VZM-gebied om gevolgen zeespiegelstijging te mitigeren

De algemene conclusie van paragraaf 4.2 is dat de strategie voor het VZM wat betreft zoutbalans en peilbeheer deels al beneden 1m zeespiegelstijging en zeker daarboven om oprekkmaatregelen vraagt: zonder aanpassingen kan het systeembeheer niet aan de huidige gestelde doelen voldoen. Het is daarbij essentieel dat de daartoe benodigde hoeveelheid zoetwater (kwaliteit en kwantiteit) onttrokken kan blijven worden uit het Hollands Diep. Zo lang aan deze voorwaarde wordt voldaan, is er handelingsperspectief binnen het huidige systeem in termen van civieltechnische ingrepen. Samenvattend:

1. Voor het oprekken van het zoutbeheer is het hydraulisch noodzakelijk dat de bestaande IZZS met SPVM wordt aangepast aan zeespiegelstijging door afvoeren onder vrij verval te vervangen door gemalen
2. De houdbaarheid van de strategie is beter naarmate de benodigde onttrekkingen aan het Hollands Diep beperkter blijven.

Om bij het tweede punt te beginnen: zoals in de paragraaf 4.2.4 toegelicht, dient zich bij voortschrijdende afname van het debiet door de Nieuwe Waterweg (versterkt door stijgende zeespiegel) een fysisch eindpunt van de strategie aan, ongeacht civieltechnische aanpassingen. Hieronder worden de oprekmaatregelen tot aan dat fysische eindpunt besproken. Opgemerkt dient te worden dat de voorwaarde of er voldoende debiet beschikbaar is mede wordt bepaald door bovenregionale/interregionale beleidsmatige afwegingen: onttrekkingen richting VZM wentelen namelijk af op de rest van het bovengelegen HWS en onttrekkingen bovenstreams in het HWS wentelen af op het VZM.

Bij besluit tot in stand houden van voldoende water voor onttrekking uit het Hollands Diep, spitsen de maatregelen zich toe op het aanpassen van -in eerste instantie- afvoercapaciteiten aan zeespiegelstijging en -in tweede instantie wellicht- aanvoercapaciteiten bij de kunstwerken. Het uitwerken van maatregelen in dit gebied koppelt ook aan de vraag welke van de beheer- en beleidsopgaven maatgevend zal zijn voor de kunstwerken: hoogwaterbescherming (noodwaterberging met bijbehorende aan en afvoercapaciteiten), peilbeheer (beperken wateroverlast t.g.v. extremere neerslag i.c.m. zeespiegelstijging) of zoetwater.

De afnemende afvoercapaciteiten bij Bath en de Krammersluizen spelen in alle drie de bovengenoemde beheer- en beleidsopgaven een belangrijke rol. De gemeenschappelijke perspectieven van deze opgaven kunnen dan ook gezocht worden in het vergroten van de afvoercapaciteit door over te stappen van vrij verval naar pompen. De gemaalcapaciteiten moeten afgestemd zijn op doorspoeldebieten ten behoeve van zoutbestrijding, maar ook op peilbeheer gegeven toenemend waterbezwaar uit de regio. Zo lang de IZZS in werking wordt gehouden, lijken de benodigde debieten voor zoutbeheer ondergeschikt aan de benodigde debieten voor bestrijding van wateroverlast en de functie van noodberging. Het bij 3 m zeespiegelstijging benodigde afvoerdebiet bij Bath voor zoutbeheer nadert de helft van de huidige maximale spuiafvoer (130 m³/s) die is gedimensioneerd op de andere beheerdoelen (m.n. peilbeheer). Zo lang die andere doelen leidend blijven bij de aanpassing van de afvoercapaciteit, kan de zoetwaterdoorspoelbehoefte ook in de toekomst technisch gesproken worden gerealiseerd. De extra afvoer via het spuumiddel (SPVM c.q. toekomstig gemaal) bij de Krammersluizen kan het systeem verder ontlasten, maar wordt onder huidige omstandigheden beperkt door de fysieke ruimte tussen de huidige sluizen en de vigerende beperkingen van zoetlast t.a.v. kreeftenvisserij in de Oosterschelde.

De samenhang tussen de bovengenoemde drie opgaven (hoogwaterbescherming, peilbeheer en zoetwater) en de vraag of de aanpassingen fysiek en civieltechnisch te realiseren zijn binnen de bestaande contouren, is in KP ZSS niet in detail onderzocht. Zoals gezegd, biedt Deltares (2025b) wel eerste aanknopingspunten voor dergelijk vervolgwerk.

Peilopzet voorafgaand aan een droogteperiode biedt in theorie wat extra mogelijkheden om de doorspoeling en/of regionale watervraag door middel van peiluitzakking langer vol te kunnen houden c.q. de watervraag via de Volkeraksluizen tijdens droogte te beperken. Het VZM heeft echter een beperkte volume-buffer. Het VZM heeft een oppervlak van ca. 60 km²; bij het volledig benutten van de huidige peilmarge van 25 cm (natuureffecten en afwegingen t.a.v. wateroverlast daargelaten), levert dit een waterschijf-volume van 15 Mm³. Het volledig benutten van deze waterschijf zou bijvoorbeeld 6 m³/s gedurende een maand kunnen bieden. Binnen KP ZSS is niet onderzocht hoe effectief inzet van dit extra tijdelijk debiet voor doorspoelen van het meer en/of voorzien in regionale watervraag is, maar ten opzichte van de totale waterbalans bij meerdere meters zeespiegelstijging is het een relatief kleine post. Ook moet opgemerkt worden dat het beperken van de doorspoeling van het meer een na-ijleffect heeft op chlorideconcentraties. Het naderhand weer omlaag brengen van die concentraties zal tegen die tijd om meer doorspoelwater en weken tot maanden geduld vragen. Kortom, oprekken van de doorspoelstrategie door optimalisatie van peilbeheer biedt op termijn weinig soelaas.

Het genoemde na-ijleffect van chloride is een aanwijzing voor een andere, meer vruchtbare manier om het VZM als buffer op te rekken: namelijk in termen van zoutgehalte. Zoals in paragraaf 4.1.1 al benoemd, is er variatie tussen de concentraties in winter en zomer. Het meer mag in de zomer geleidelijk zouter worden (opladen). Door in natte tijden meer door te spoelen (lagere concentraties nastreven) en/of tijdens droogte boven de huidige 450 mg/L op te laten laden, kunnen één of enkele tientallen m³/s bespaard worden op de minimaal benodigde doorspoeldebieten in perioden met (dreigend) watertekort. Nu al wordt er in natte tijden meer gespoeld als daar ruimte voor is en wordt de doorspoeling incidenteel onderbroken. Deze optimalisatie is binnen KP ZSS niet nader uitgewerkt. Het verdient aanbeveling om de te behalen besparing nader te kwantificeren.

Los van optimaliseren van de doorspoeling, staat voor het VZM de vraag centraal of bronmaatregelen de zeespiegelstijging nog beter het hoofd kunnen bieden dan nu al gebeurt: voorkomen van verzilting via de sluizen heeft immers in de huidige strategie al hogere prioriteit dan 'genezen' middels doorspoelen. Van belang hierbij is te realiseren dat bij extreme zeespiegelstijging een aanzienlijk deel (tot ca 30%) van de zoutvrucht veroorzaakt wordt door grondwatereffecten. Hiervan wordt dan weer ca. 2/3 door directe kwel veroorzaakt en is 1/3 een gevolg van waterbeheer op Oost-Tholen en zuidoost Flakkee. Dit laatste is wellicht nog verder te optimaliseren (al wordt het regionale spoelwater naar verwachting nu al deels niet terug geloosd op het VZM) indien met technische maatregelen de afwatering van deze eilanden naar de Oosterschelde kan worden uitgebreid. De directe kwel via de waterbodem en dijklichamen is daarentegen nauwelijks te mitigeren binnen de bestaande kaders en systeeminrichting. Alleen als aan zeer ingrijpende maatregelen gedacht wordt is hier in theorie enig perspectief: bijvoorbeeld diepe damwanden in de huidige dammen plaatsen en/of het ondoorlatend maken van de waterbodem. Peilopzet in het VZM kan een effect hebben tegen directe kwel, maar ook dan moet aan zeer drastische herziening van het peil (meestijgen met de zeespiegel met uiteindelijk meerdere meters) gedacht worden. Praktisch en kosten-baten technisch gezien lijkt het handelingsperspectief tegen zoute kwel dus nihil.

Het verlengen van de duur van functioneren van de IZZS middels installatie van pompen is in de studie van Arcadis/Hydrologic (2023a) in wezen al geïncorporeerd. Het Krammersluizencomplex beschikt als onderdeel van de IZZS al over veel bronmaatregelen zoals een zoetspoeldebiet, bellenschermen, zoutriolen etc. De conclusie van Deltares (2025b) naar aanvullende bronmaatregelen is dan ook dat de Krammersluizen niet noemenswaardig verder geoptimaliseerd kunnen worden. Het SPVM is een punt van aandacht, aangezien ook dat in zijn ontwerp en uitvoering moet kunnen worden aangepast aan zeespiegelstijging en het nu onduidelijk is of dat mogelijk is. Ingrijpen in het schutbedrijf om de zoutlast verder te beperken is een resterende maatregel van een andere categorie. Bij de andere sluizen zijn nog aanvullende maatregelen mogelijk, maar aangezien die zoutvrachten van beperktere omvang zijn, is het de vraag of de kosten tegen de baten op zullen wegen.

De hydraulische innamecapaciteit onder vrij verval bij de Volkeraksluizen zal onder stijgende zeespiegel gemiddeld gesproken toenemen en de benodigde debieten in de meeste gevallen naar verwachting kunnen worden voorzien (mits de IZZS in werking blijft). Extreem lage restdebieten door de Nieuwe Waterweg (als gevolg van lage Rijn- en Maas-afvoer en bovenstroomse onttrekkingen) en afluisterende wind doen het gunstige effect van zeespiegelstijging op de innamecapaciteit echter deels teniet. Als deze effecten domineren, kan beperking van vaardiepte richting Moerdijk in de toekomst ook bij beperkte zeespiegelstijging optreden.

4.4. Conclusies houdbaarheid en oprekbaarheid

De gebiedsspecifieke conclusie is dat, mits de IZZS in werking wordt gehouden en mits voldoende zoetwater beschikbaar is vanuit het Hollands Diep, de zoetwaterfunctie van het VZM met een maximale zomerse chlorideconcentratie van 450 mg/L tot onder 3 m zeespiegelstijging gehandhaafd zou kunnen worden. Het is echter essentieel om hierbij aan te merken dat zodra de intrusielengte van de 250 mg/L contour in de RMM de 70 km passeert en dit tot langdurige verzilting in het Hollands Diep leidt, de hydraulische oprekmaatregelen in het VZM geen soelaas bieden. In Hoofdstuk 9 wordt toegelicht dat indien de doorwerking van zeespiegelstijging en dalende rivierafvoeren op alle delen van het HWS tezamen wordt meegenomen, de beperkingen door zoutindringing in het Hollands Diep zelfs al bij 1 meter zeespiegelstijging kunnen optreden.

In de verzilting van het Hollands Diep speelt de doorspoelbehoefte van het VZM en het regionaal watersysteem een versterkende rol. Inname bij de Volkeraksluizen trekt het zout gaandeweg steeds meer naar het systeem toe. De beheerstrategie voor het VZM is niet onbeperkt voort te zetten. De houdbaarheid van het VZM wordt dus vooral bepaald door de houdbaarheid van de RMM, meer dan door de gebiedseigen inrichting. Dit laatste betekent ook dat de robuustheid van eventuele verdergaande aanpassingen in de Zuidwestelijke Delta, die gebaseerd zijn op onttrekken van debiet uit de RMM tijdens lage afvoercondities, uiteindelijk door dezelfde externe factoren zullen worden begrensd.

5 Rijn-Maasmonding (RMM)

5.1. Essentie systeemwerking Rijn-Maasmonding

5.1.1. Algemeen

De Rijn-Maasmonding (RMM) is een groot, vertakt estuarium met een complexe dynamiek. Het hoofdwatersysteem van de RMM staat via de Nieuwe Waterweg (NWW) in open verbinding met zee en staat daarmee onder directe invloed van getijdewerking en windopzet. In de RMM komt het zoete water van de rivieren samen met het zoute water uit zee.

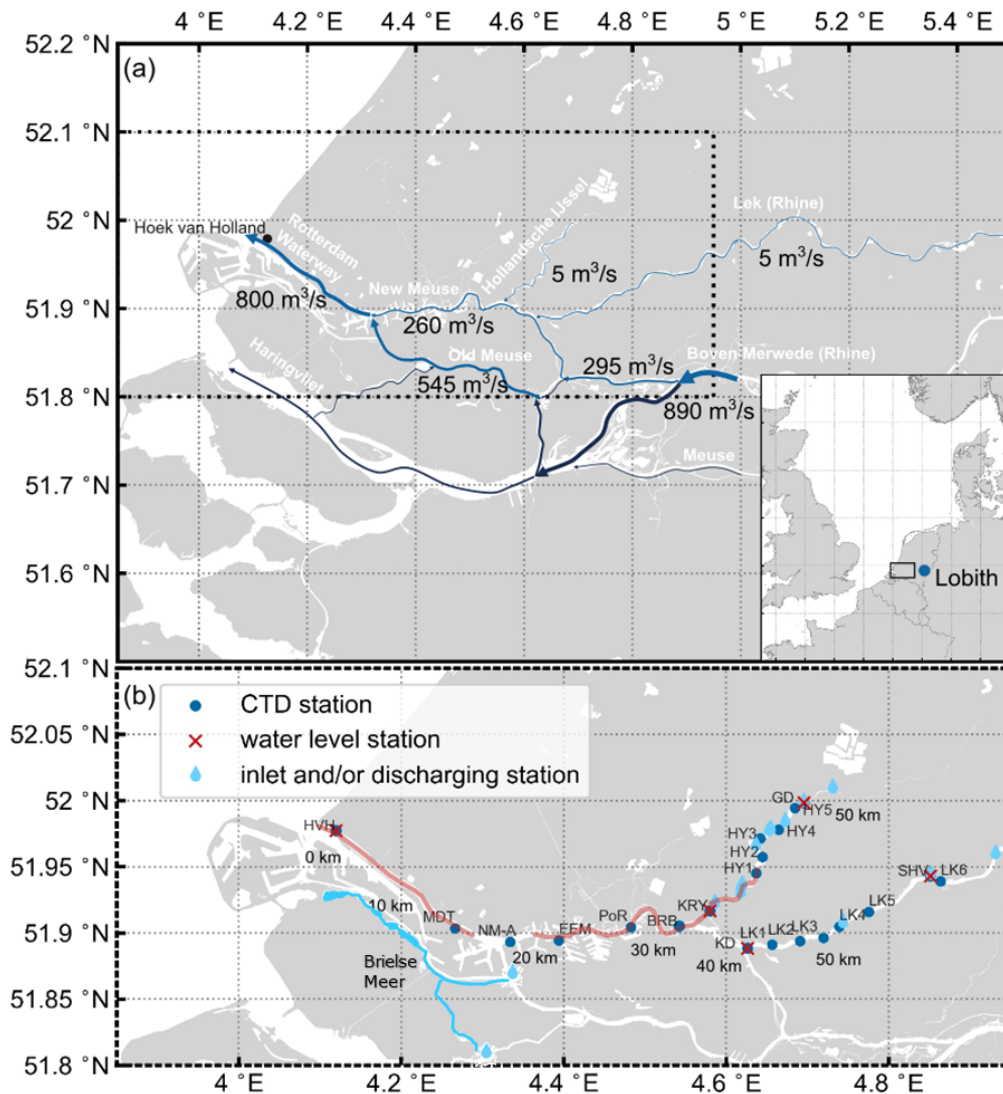
In een estuarium heerst uiteindelijk een dynamisch evenwicht tussen processen die het zout naar binnen brengen en processen die het zout weer afvoeren. De uiteindelijke afvoer van zout wordt voornamelijk door de rivier verzorgd. De stroomsnelheid en het rivierdebiet zijn daarom bepalende factoren voor de verzilting: hoe sterker de uitstroming, hoe beter het zoute water kan worden afgevoerd. De waterverdeling over de rivierarmen is daardoor ook van belang voor verzilting en vaardiepten in de RMM. Wat betreft de aanvoer: het zoute water dringt, vanwege zijn grotere dichtheid, vanuit zee -tegen het uitstromende rivierwater in- naar binnen waarbij zich, in het benedenstroomse deel, een relatief zoute onderlaag kan vormen. Deze gelaagde watermassa beweegt met eb en vloed heen en weer en wordt, indien de getijstrooming krachtig genoeg is, verticaal opgemengd. Naarmate de opmenging krachtiger is, wordt het voor de rivier makkelijker het zout via de bovenlaag af te voeren richting zee: de zoutindringing wordt daarmee beperkt. Tegelijkertijd kan de horizontale waterbeweging door het getij en variaties in wind (vullen van komberging door wind-opzet bij aanlandige wind) het opgemengde zout ook juist verder landinwaarts brengen. Het getij speelt dus een dubbelrol: Een sterker getij kan het zout bij vloed meer landinwaarts brengen, terwijl een sterker getij ook voor meer menging kan zorgen. Welk van deze facetten domineert en hoe sterk de zoutindringing is, hangt van de mate van stratificatie en stroomsnelheden af. De getijdenwerking is de dominante bron van mengingsenergie, de rivierstroming, wind en scheepvaart dragen in beperktere mate bij aan opmenging van de zoute onderlaag. De hier geschetste wisselwerking tussen de diverse processen maakt verzilting van de RMM in respons op ingrepen en klimaatverandering complex, niet altijd eenvoudig te voorspellen en soms zelfs tegen-intuïtief.

Het zoetwaterbeheer in deze regio bestaat uit het optimaal verdelen van de debieten over de diverse takken, waarbij gebruik gemaakt wordt van de balans tussen indringing, menging en afvoer van zout. Op de Hollandsche IJssel en Lek wordt er vanaf bepaalde condities naar gestreefd om, gegeven de onttrekkingen, een restdebiet ('surplus') in stand te houden waarmee de strategische innamelocaties zo veel als mogelijk zoet genoeg blijven. Daarnaast is het beheer van de Haringvlietssluisen (en deels ook de Volkerakssluisen) onder lage afvoercondities ingericht op het zo veel mogelijk in stand houden van de rivierafvoer via de Nieuwe Waterweg. Daarmee wordt zoutindringing zoveel mogelijk beperkt. Hierbij wordt opgemerkt dat er in de regio dus wel een aantal stuurknoppen zijn voor het beheer, maar dat het vanuit de rivieren binnenstromende water een extern (bovenstrooms, bovenregionaal) gegeven is. De zoetwater instroom in de RMM is de

grondstof waarmee de strategie van optimale debietverdeling moet worden vormgegeven.

5.1.2. Noordrand en Zuidrand

Figuur 5-1 geeft het hoofdwatersysteem van de RMM met een bijbehorende indicatie van de afvoerverdeling over de takken bij (nagenoeg) gesloten Haringvliet weer.



Figuur 5-1 Het HWS in de Rijn-Maasmond (RMM) met (bovenste paneel) een typische verdeling van de afvoeren over de takken bij een Lobithafvoer van ca. 1100 m³/s. Debietcijfers van 5 m³/s verwijzen naar orde-groottes op Lek en Hollandsche IJssel. Onderste paneel toont de rivierkilometers en de ligging van enkele belangrijke innameplaatsen voor zoetwater (drinkwater en waterschappen). Het Brielse Meer en de twee bijbehorende inlaatplaatsen Spijkenisse (noord) en Bernisse (zuid) zijn toegevoegd. (Figuur overgenomen uit Wegman et al. 2024)

Figuur 5-2 geeft de ligging van de belangrijkste stuurknoppen en een schets van de regionale doorvoerroutes van de Klimaatbestendige Water Aanvoer (KWA) en Doorvoerroute Krimpenerwaard (DKW). De KWA kan worden ingezet om de regio van zoetwater te voorzien wanneer de Hollandsche IJssel dreigt te verzilt. (Zie

bijvoorbeeld ook de redeneerlijn van [Slim Watermanagement](#)). De aanvoer van het beschikbare rivierwater en de debietverdeling in de RMM wordt geregeld met stuwen en sluisen (zie Figuur 5-2). Stuw Hagestein in de Lek speelt, samen met de Bernhardsluizen in het Betuwepand van Amsterdam-Rijnkanaal, een belangrijke rol bij de verdeling van debieten richting de Lek en richting het Noordpand van het Amsterdam-Rijnkanaal (via de Irenesluizen, zie Hoofdstuk 6). De Waal is ongestuwd, maar de afvoer over de Waal beneden Tiel wordt beïnvloed door hoeveel er via het ARK Betuwepand onttrokken wordt richting ARK Noordpand en Lek.

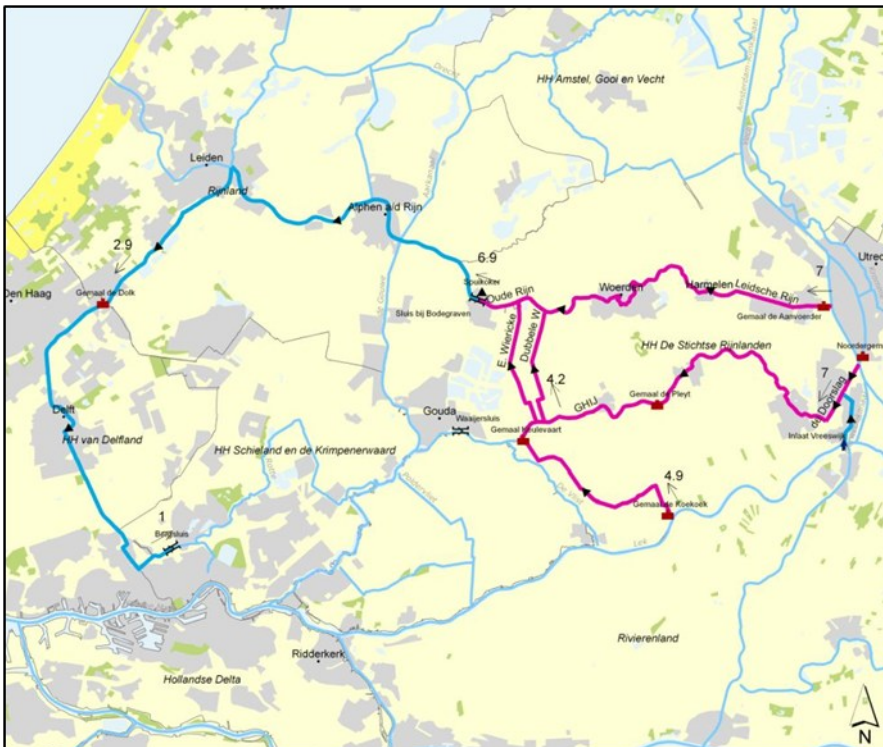


Figuur 5-2 Kaart van de RMM met daarin schematisch de stuwen en sluisen (rode balkjes) die invloed hebben op de waterverdeling en verzilting. De rode cirkels geven aan welke hiervan als reguliere stuurknop voor de RMM-zoetwaterstrategie fungeren. Donkerblauwe pijlen geven globaal de omlleidingen van de KWA weer en de surplus op de Lek en Hollandsche IJssel. Figuur aangepast o.b.v. Arcadis-HydroLogic 2023b. Zie ook Figuur 5-4.

Aan de 'zuidrand' van de RMM spelen de spuisluisen in de Haringvlietdam een centrale rol. Hun beheer is ontworpen om bij dalende Lobithafvoer de afname van het restdebiet van orde $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ via de noordrand (Nieuwe Waterweg) te temperen en zo zoutindringing tegen te gaan en de waterstanden op het Hollands Diep (haven Moerdijk) voldoende hoog te houden voor de zeescheepvaart. Het spuiprotocol houdt in dat de spuien geheel gesloten zijn bij een Lobith-afvoer onder $1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij afvoer dalende onder deze waarde zal het restdebiet door de Nieuwe-Waterweg verder afnemen en het zout meer binnendringen. Tot slot is de inname van zoetwater via de Volkeraksluizen van invloed op het restdebiet door de Nieuwe Waterweg, zoals toegelicht in Hoofdstuk 4.

Naast de geleidelijke verzilting door dalende afvoer kan sprake zijn van verziltingspieken als gevolg van windopzet: verhoging van de waterstand op de Noordzee die het effect van de rivierafvoer tijdelijk domineert. Hierbij kan gedurende een of meer getijden het zout verder de RMM indringen. Omdat de stormopzet tijdelijk van aard is, neemt deze verzilting na de windopzet weer af. Uitzondering hierop zijn de luwe delen in het gebied, zoals de diepe delen in het

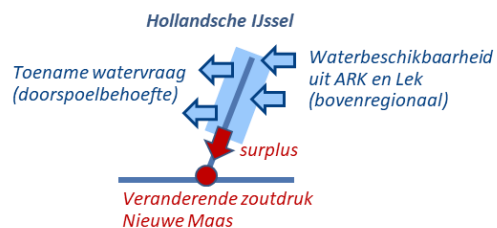
Haringvliet en delen met lage stroomsnelheid waar het zout langer kan blijven hangen, en waar de rivierafvoer de bepalende factor is voor de hersteltijd. Het binnendringen van zout via Spui en Dordtse Kil in Haringvliet en Hollands diep wordt achterwaartse verzilting genoemd. Wanneer de rivierafvoer laag is, en de Haringvlietssluzen dus gesloten zijn, kan zout dat in deze delen terecht komt nog relatief lang (enkele weken) via het Spui naleveren nadat een verziltings-event voorbij is. Aldus verhoogde chlorides kunnen tot beperkingen in zoetwaterbeschikbaarheid bij het innamepunt van de Bernisse leiden.



Figuur 5-3 Detailkaart van de KWA-routes, inclusief de doorvoer naar de waterschappen. Bron: HDSR

5.1.3. Vier strategische deelgebieden en hun beïnvloeding door zeespiegelstijging
 Binnen de RMM is een viertal deelgebieden met een strategisch belang aanwezig waar de systemanalyses van KP ZSS (Arcadis-HydroLogic 2023b en HKV 2024) op gericht zijn. Langs deze delen liggen innameplaatsen voor drinkwater en regionaal waterbeheer. Er gelden per innameplaats verschillende criteria voor het kunnen innemen (drempelwaarden, overschrijdingsduur, mogelijkheid om in vensters in te nemen). De details worden toegelicht in HKV 2024. In dit hoofdstuk worden alleen de hoofdlijnen weergegeven.

De Hollandsche IJssel staat in open verbinding met de Nieuwe Maas en daardoor onder directe invloed van getij en windopzet. Verzilting van de Hollandsche IJssel treedt vooral op als de indringing op de Nieuwe Maas zo sterk is dat niet alleen bij vloed, maar ook bij eb de chlorideconcentraties op de Nieuwe Maas verhoogd raken. Deze



Figuur 5-4 Schematische doorwerking van zeespiegelstijging op de Hollandsche IJssel. (Arcadis/HydroLogic, 2023b).

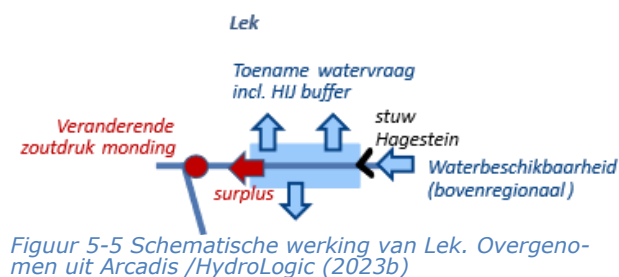
'permanente verzilting' van de monding van de Hollandsche IJssel treedt bij huidige zeespiegel, watervraag en sturing op bij Lobithafvoeren onder ca. 1100 m³/s.

Door de afname van getijsnelheid en zoutgehalte richting bovenloop van de Hollandsche IJssel, is de bovenloop relatief meer te beïnvloeden dan de benedenloop. In de benedenloop, het zogenoemde 'advectief gedomineerde' gedeelte, wordt de verspreiding van zout relatief sterk beïnvloed door de grootschalige waterbeweging (getijden, wind). Meer bovenstrooms is de dichtheidsgedreven instroom zwakker en domineren kleinschalige verspreidingsprocessen. Dit is het zogenoemde 'dispersief gedomineerde' gedeelte. Zoals geschetst in Figuur 5-2 en Figuur 5-3 wordt in periodes van (dreigende) verzilting via de KWA en de DKW, water vanuit het ARK Noordpand en de Lek aangevoerd². Deze aanvoer dient niet alleen om de regionale watervraag te voorzien, maar ook om de Hollandsche IJssel bovenstrooms aan te vullen en een zeewaartse rivierstroom in stand te houden om de zoutindringing in de bovenloop tegen te gaan. Dit beheer richt zich dus op de dynamische balans tussen zoutindringing en retourstroom door middel van een zogenoemd surplusdebiet (restdebiet). De balans verandert als de condities aan de monding veranderen of het restdebiet verandert. Wanneer bijvoorbeeld de zoutconcentraties in de monding hoger worden door zeespiegelstijging en/of lagere afvoer via de Nieuwe Maas, neemt de inwaartse zoutflux toe en is een groter restdebiet nodig om de dynamische balans op dezelfde locatie te handhaven. Evenzo, wanneer er regionaal meer wordt onttrokken zonder dat de bovenstroomse aanvulling daarop wordt aangepast, neemt het restdebiet af en verschuift de verzilting landinwaarts.

Figuur 5-4 vat samen hoe zeespiegelstijging (al dan niet in combinatie met dalende rivierafvoeren) de Hollandsche IJssel onder druk zet. Die druk komt van 3 kanten:

1. Door toenemende verzilting op de Nieuwe Maas zal er sprake zijn van een toename in de zoutdruk op de monding van de Hollandsche IJssel.
2. Zeespiegelstijging beïnvloedt in potentie de regionale watervraag. Zoals is aangegeven in Hoofdstuk 3 zal bij voorzetten (met de huidige beheerdoelen) van het regionaal bestrijden van zoute kwel middels doorspoelen de watervraag voor doorspoeling toenemen.
3. Zowel (1) als (2) het hoofd bieden op de Hollandsche IJssel resulteert in een toenemende behoefte aan water uit KWA en DKW. Zeespiegelstijging oefent echter ook bovenstrooms druk uit op de beschikbaarheid van dit water uit het HWS (bijvoorbeeld vanwege 'competitie' met zoetspoelen van het ARK Noordpand (Hoofdstuk 6) en de Lek, zie hieronder).

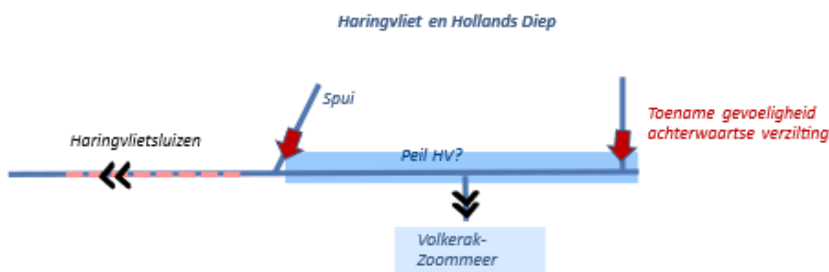
De Lek werkt volgens hetzelfde principe als de Hollandsche IJssel met 'advectieve' getijdewerking en windeffecten in de benedenloop en meer 'dispersief' zouttransport in de bovenloop. Evenals bij de Hollandsche IJssel is de



² Naast bovengenoemde routes is ook de KWA-route via Bodegraven (Leidsche Rijn, Oude Rijn) beschikbaar. Via deze route wordt buiten de Hollandsche IJssel om ook een deel van de watervraag van Rijnland en Delfland voorzien om de onttrekking aan de Hollandsche IJssel te beperken.

verzilting van de monding van de Lek sterk afhankelijk van de verzilting op de Nieuwe Maas. Deze verzilting wordt beïnvloed door de waterverdeling in het rivierengebied, windopzet en getijden. Permanente verzilting van de Lekmonding begint bij huidige zeespiegel, watervraag en sturing onder Lobith-afvoeren van 700 à 800 m³/s. De verzilting van de bovenloop van de Lek wordt in dat geval tegengegaan door een surplusdebiet van orde 5 m³/s via stuw Hagestein in stand te houden. Evenals bij de Hollandsche IJssel is het precieze benodigde debiet om de dynamische zoutbalans te handhaven afhankelijk van zeespiegel en rivierafvoer door de Nieuwe Maas, Oude Maas en Nieuwe Waterweg. De totale benodigde doorvoer via stuw Hagestein is in de surplus-situatie de optelsom van dit surplus, de debieten vanuit de Lek ten behoeve van de KWA Lopikerwaardroute (inlaat de Koekoek) en DKW (inlaat Krimpenerwaard) en water om regionale onttrekkingen voor waterschappen en drinkwaterwinning (Bergambacht) te voorzien. Dit telt in totaal op tot ca. 20 m³/s in het huidige klimaat en bij huidige watervraag en sturing.

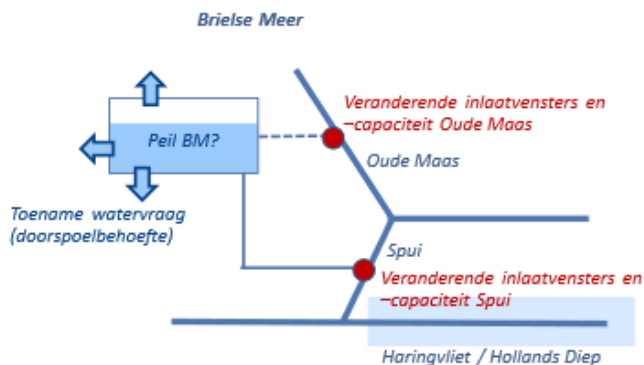
Het Haringvliet en Hollands Diep worden gevoed door de Waal en Maas. De inlaten langs deze tak kunnen tijdelijk verzilten door wind-opzet-gedreven verzilting waarbij zoutwater via de Oude Maas en Spui of (in extremere situaties) via Dordtse Kil richting het Haringvliet en Hollands Diep stroomt. Als verziltingspieken ten gevolge van opzet vanuit de noordrand het Haringvliet en Hollands Diep bereiken, spreekt men van 'achterwaartse verzilting'.



Figuur 5-6 Schematische werking van het Haringvliet en het Hollands Diep. Overgenomen uit Arcadis /HydroLogic (2023b).

Bij gesloten Haringvlietsluizen blijft dit zout langere tijd achter in het Haringvliet en Hollands Diep. Dit leidt tijdens de duur van de (deels) gesloten sluisen tot het terugleveren van zoutwater naar de noordrand via het Spui. Deze 'nalevering' kan tot langdurige verzilting leiden van bijvoorbeeld de Bernisse-inlaat op het Spui waarbij de innamevensters voor het Brielse Meer wegvallen (zie verderop in deze paragraaf). Er wordt in het kader van de Kier gewerkt aan een nieuw spuiprotocol om visintrek mogelijk te maken. Dat protocol zal erop gericht zijn om visintrek te bevorderen door buiten het spuivenster en ook bij lagere Lobithafvoeren de spuideuren deels te openen. Tegelijk moet dit protocol de zoutlast op het Haringvlietsysteem beheersbaar houden en daarmee innamepunten ten oosten van de lijn Middelharnis-Spui en het Spui zelf vrijwaren van verzilting. Het spuiprotocol is geen maatregel tegen nalevering bij achterwaartse verzilting.

Het Brielse Meer is van strategisch belang voor de zoetwatervoorziening van Hollandse Delta, Delfland en drink- en industriewater (Evides). Het meer wordt gevoed via de Bernisse inlaat in het Spui en de inlaat Spijkenisse in de Oude Maas (Zie ook Figuur 5-1 en Figuur 5-7). Bij



Figuur 5-7 Schematische werking van het Brielse Meer. Overgenomen uit Arcadis /HydroLogic (2023b).

innamepunt Spijkenisse is onder gemiddelde omstandigheden al sprake van innamevensters: het zoute water bij vloed wordt afgewisseld door zoetwater bij eb, dat (als het verval het toelaat) kan worden ingenomen. De Spijkenisse-inlaat fungeert onder de huidige omstandigheden als back-up in tijden van nalevering op het Spui. Bij de Bernisse-inlaat ontstaan onder lage afvoercondities ook innamevensters. Afvoergedreven verzilting zal toenemen naarmate de zeespiegel stijgt en de afvoer door de Nieuwe Waterweg afneemt. Dit kan de innamevensters verkleinen. Naast rivierafvoer zorgt windopzet ervoor dat zout het Spui optrekt. Verhoging van de zeespiegel en verlaging van de debieten door de Oude Maas en Nieuwe Waterweg maken het Spui gevoeliger voor windopzet.

Samenvattend is het restdebiet over de Nieuwe Waterweg de belangrijkste indicator voor de kwetsbaarheid van de RMM tijdens lage afvoeren (gesloten Haringvlietsluizen). Hoe lager dit debiet, hoe dieper de zee binnendringt richting de bovengenoemde voor zoetwater belangrijke delen. Dit restdebiet is de resultante van afvoeren van Maas en Rijn en alles wat daar onderweg richting Hoek van Holland vanaf is gegaan om andere delen van het HWS en regionale systemen van zoetwater te voorzien. Omdat dit restdebiet zo bepalend is voor het systeemgedrag en mede beïnvloed wordt door keuzes ten aanzien van de (laag-)waterverdeling in het HWS, zijn bij de gevoeligheidsanalyse (resultaten in paragraaf 5.2) zowel de zeespiegel als het restivierdebiet systematisch gevarieerd.

5.2. Gevolgen van zeespiegelstijging en afvoerverandering op verzilting in het HWS van de RMM

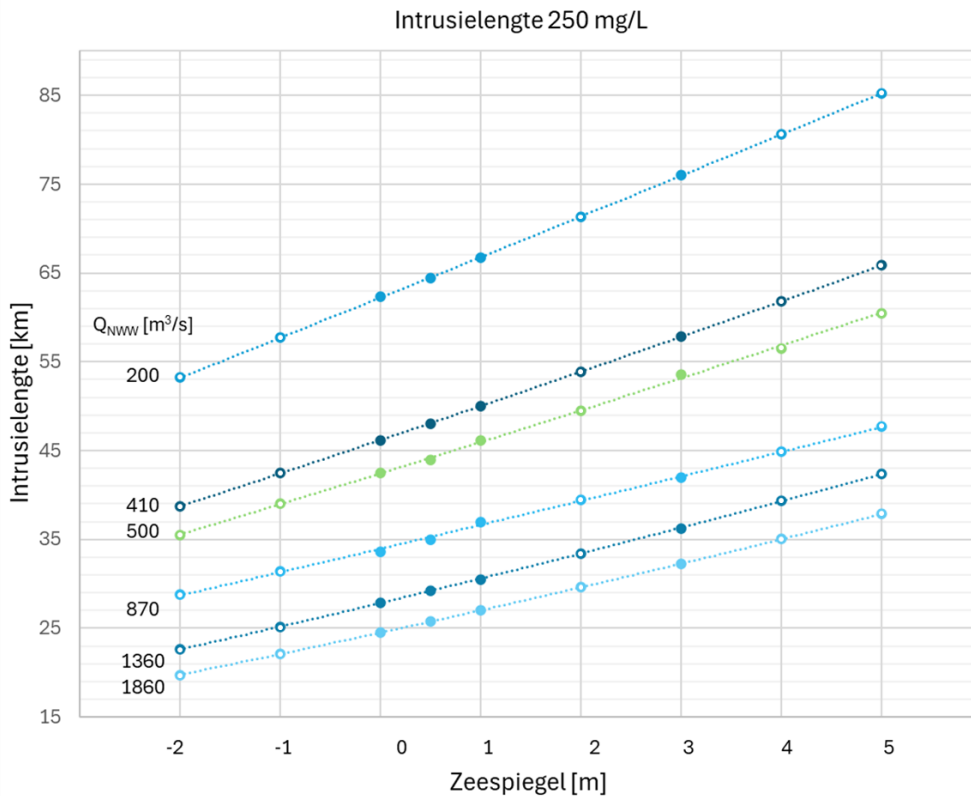
5.2.1. Gemiddelde beeld: intrusielengte

Bij dalende rivierafvoeren en stijgende zeespiegel krijgt de zee in RMM meer invloed. Bij lage afvoeren is de terugspoelende werking van de rivier beperkter; bij stijgende zeespiegel neemt de waterdiepte toe waardoor de zoutdruk toeneemt. Door beide factoren dringt het zoute water dieper naar binnen. De mate van indringing is te karakteriseren in termen van de 'intrusielengte': de afstand van de monding bij Hoek van Holland tot aan het 'zoutfront': de locatie waar getijgemiddeld een bepaalde chlorideconcentratie heerst. Voor de systeemanalyse binnen KP ZSS wordt de getijgemiddelde ligging van de 250 mg/L chloridecontour als indicator gehanteerd: L_{250} . (Zie het intermezzo voor verdere toelichting.)

Ten behoeve van onderstaande analyse is de intrusielengte L_{250} afgeleid uit de Systeemanalyse gepubliceerd in Arcadis/HydroLogic (2023b) en HKV (2024). Hierbij

zijn de getijgemiddelde evenwichts-chloridewaarden uit de quasi-stationaire berekeningen gebruikt en is, daar waar het zout verschillende takken indringt, steeds de langste afstand van monding tot het zoutfront als indicatief beschouwd. Dit is de route via Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas, vanaf daar de Hollandsche IJssel en Lek op, en als de intrusie verder zuidwaarts reikt, via Noord naar Dordtse Kil en Hollands Diep. Bovenop de getijgemiddelde intrusie komt de getij-exkursie: de afstand die de zoutgrens tussen vloed en eb aflegt. Deze getij-exkursie is op de Hollandsche IJssel in de orde van 2 km, op de Lek circa 10 km en op de Oude Maas ruim 15 km. De getij-exkursie is bepalend voor de grootte van eventuele innamevensters: perioden tijdens het getij waarin de concentraties nog laag genoeg zijn om in te laten ondanks dat getijgemiddelde waarden al boven drempelwaarden uitkomen.

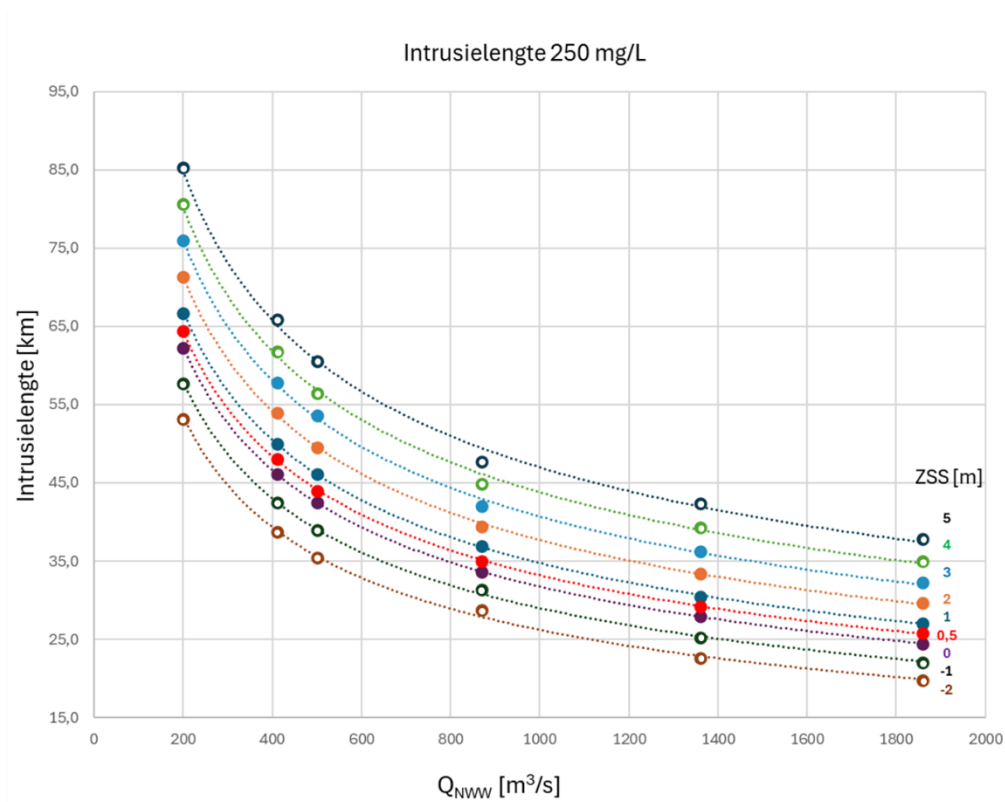
Uit de Systeemanalyse (Arcadis/HydroLogic 2023b en HKV 2024) blijkt dat zeespiegelstijging de gemodelleerde intrusielengte in de RMM beïnvloedt zoals getoond in Figuur 5-8: een iets sneller dan lineair toenemende intrusie als functie van de gemiddelde waterdiepte. Bij gelijkblijvend debiet over de Nieuwe Waterweg gaat de toename in intrusielengte dus ongeveer gelijk op met de zeespiegel: elke meter zeespiegel betekent een verplaatsing van de zoutgrens met 3 tot 5 km landinwaarts. Zoals gezegd, is naast de zeespiegel in de analyses ook de rivierafvoer gevarieerd: in stappen tussen 200 en 1900 m³/s debiet Nieuwe Waterweg (Q_{NWW}).



Figuur 5-8 Intrusielengte van de getijgemiddelde 250 mg/L chloridecontour (L_{250}) als functie van zeespiegel voor verschillende debieten over de Nieuwe Waterweg (Q_{NWW}). Negatieve zeespiegel komt neer op een gelijkwaardige verondieping van de gehele RMM. De stippellijnen geven de fit met een empirische machtsfunctie weer $L \sim H^a$, waarbij H de totale kenmerkende diepte van de RMM is ($15m + ZSS$) en $1 < a < 2$. Waarden voor L_{250} zijn afgeleid uit Arcadis/HydroLogic (2023b) en HKV (2024) door middel van inter- en extrapolatie (open bolletjes). Vooral de extrapolatie $> 3m$ is onzeker.

De in Figuur 5-8 getoonde verschuiving is gevoelig voor de rivierafvoer: naarmate het restdebiet over de Nieuwe Waterweg lager is, reageert de RMM gevoeliger op zeespiegelstijging.

Figuur 5-9 toont dat de ligging van de zout-zoet-overgang volgens een inverse machtsrelatie (*power law*) reageert op de variatie in restdebiet over de Nieuwe Waterweg: bij verlaging in het bereik tot circa 900 m³/s treedt een verschuiving van ca. 1 km per 100 m³/s op, bij een verlaging tussen 900 en 500-400 m³/s is de verschuiving ca. 3 km per 100 m³/s en bij $Q_{NWW} < 400$ m³/s is de verschuiving ca. 7-8 km per 100 m³/s verandering. Deze verschuivingen zijn in beperkte mate afhankelijk van de zeespiegel: hogere zeespiegel dempt de *relatieve* gevoeligheid voor verandering in Q_{NWW} , zij het marginaal.



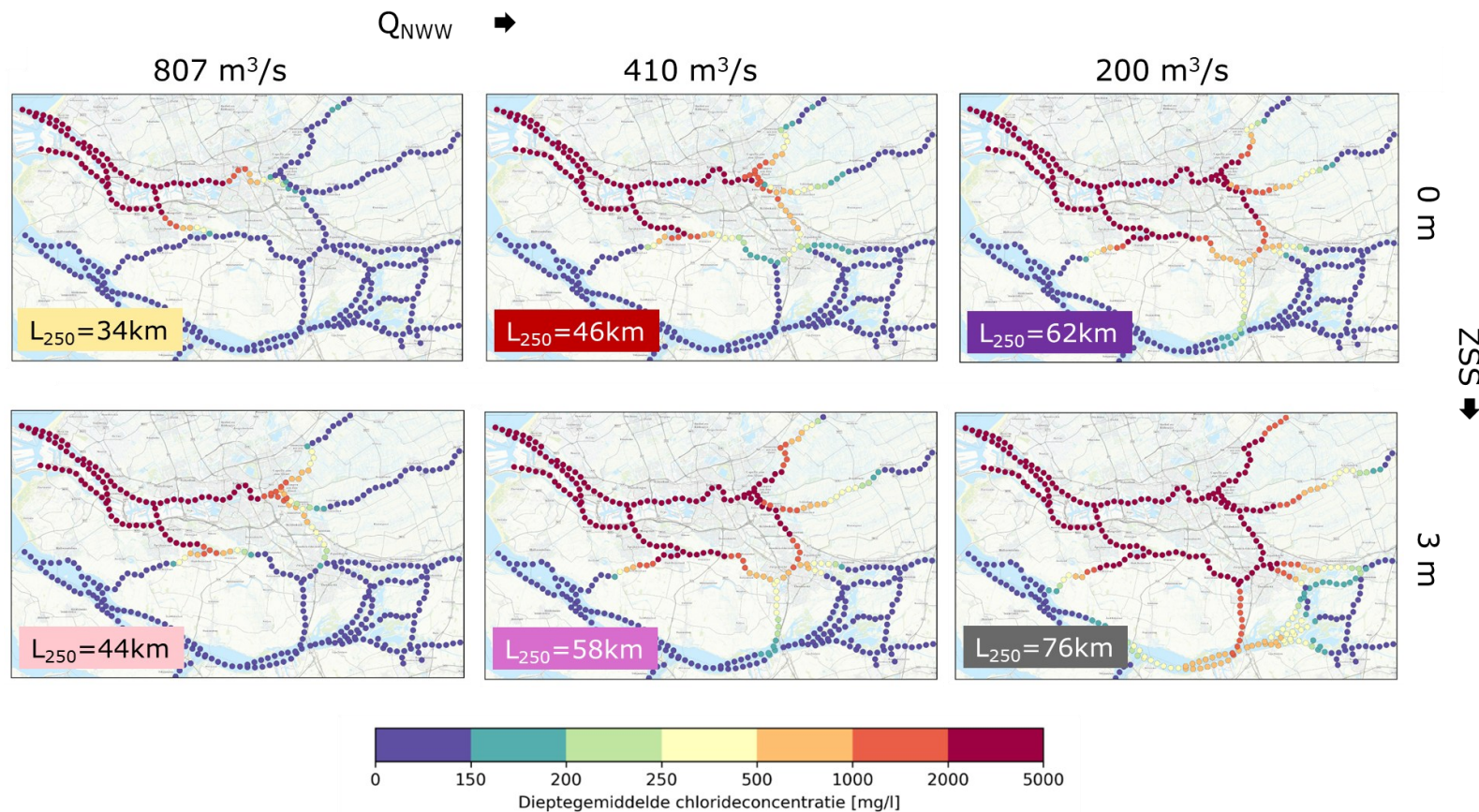
Figuur 5-9 L_{250} , als Figuur 5-8 maar dan als functie van debiet over de Nieuwe Waterweg voor verschillende zeespiegels. De stippelijntjes geven de fit met een empirische machtsfunctie weer ($L \sim Q^{-\beta}$), de open bolletjes zijn extrapolaties; vooral de extrapolatie $> 3m$ is onzeker.

Intrusielengte en schalingsregels

Binnen het KP ZSS wordt als indicator voor de zoutindringing de intrusielengte L_{250} gehanteerd: de afstand vanaf de monding (Hoek van Holland) tot daar waar de chlorideconcentratie getijgemiddeld en dieptegemiddeld 250 mg/L bedraagt. Intrusielengte is een veelgebruikte indicator in estuaria omdat deze eenduidiger is af te leiden dan de (per locatie verschillende) temporele overschrijding van bepaalde (per locatie verschillende) drempelwaarden bij specifieke inlaatlocaties. De intrusielengte blijkt zich (per estuarium) bovendien volgens expliciet af te leiden schalingsregels te gedragen.

De keuze voor 250 mg/L als referentie-chlorideconcentratie is ingegeven als compromis tussen in wetenschappelijke literatuur vaker gebruikte hogere waarden (bijv. 2 PSU, ofwel 1111 mg/L, in Wegman et al. 2024) en in de RMM veel voorkomende drempelwaarden bij inname locaties die variëren tussen 400 en 150 mg/L. Hierbij is 400 mg/L een indicatieve bovengrens voor innames bijvoorbeeld door Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard en 150 mg/L een streefwaarde voor drinkwaterwinning. Hoe hoger de gekozen referentie-concentratie hoe verder weg van de drempelwaarden, dus hoe minder indicatief. Hoe lager de referentie-concentratie hoe onzekerder deze waarde is vast te stellen ten opzichte van modelonzekerheden en de variërende achtergrondconcentratie van het rivierwater. De intrusielengtes van hogere en lagere chlorideconcentraties zijn hoe dan ook sterk gerelateerd aan de L_{250} . Ze reageren slechts marginaal verschillend op veranderende condities van zeespiegelstijging en rivierafvoer.

Volgens algemene schalingsregels, zoals afgeleid voor enkelvoudige estuaria bijvoorbeeld door Monismith et al. (2002) en Ralston & Geyer (2019), schaalt de intrusielengte L als functie van rivierafvoer Q en diepte H als $L \sim H^a Q^{-b}$, met $1 < a < 2$ en $b \sim 0.3$. De gevoeligheid voor zeespiegel (diepte H) volgt uit de regressierelaties in Figuur 5-8. Exponent a varieert tussen de 1,1 (voor lage Q_{NWW}) en 1,5 (voor hoge Q_{NWW}). De gevoeligheid voor rivierafvoer (Figuur 5-9) blijkt (wellicht door de keuze voor de relatief lage waarde van 250 mg/L) iets sterker te zijn dan de typische vuistregelwaarden uit de literatuur: exponent b varieert tussen de 0,44 (bij 2 meter verondieping t.o.v. huidig) en 0,37 (bij 5 m ZSS). Wegman et al. (2024) hebben voor in zomer en najaar van 2022 de relatie voor de intrusielengte voor 2 PSU in de RMM bepaald uit meetdata en kwamen op een exponent $b=0,35 \pm 0,03$. De gevonden schalingen in het 3D model blijken dus goed vergelijkbaar met algemene theorie en recente metingen. Opgemerkt moet worden dat het aantal combinaties van Q en H in de berekeningen beperkt is en de extrapolatie voorbij 3m ZSS zeer onzeker: bij meerdere meters afwijking van de huidige zeespiegel gaan de gedane aannames in de modellering omtrent getijdenwerking, wel of niet overstromen van buitendijks gebied etc. de modelnauwkeurigheid steeds meer beperken.



Figuur 5-10 Evenwichtswaarde van getijgemiddelde, dieptegemiddelde chlorideconcentratie voor 0m (bovenste rij) en 3m zeespiegelstijging (onderste rij). De kolommen corresponderen met 3 verschillende afvoeren over de Nieuwe Waterweg. Resultaten zijn berekend met beperkte windopzet en een constant surplus op de Hollandsche IJssel (2 m³/s) en de Lek (20 m³/s); Bron HKV (2024). De corresponderende intrusielengtes (L₂₅₀) zijn aangegeven in de verschillende panelen, de kleuren corresponderen met Tabel 5-1.

De intrusielengte L_{250} zoals hierboven geïntroduceerd representeert een gemiddelde evenwichtswaarde bij constante afvoer. Het RMM-systeem is complex en niet elke tak reageert even sterk. Figuur 5-10 geeft het ruimtelijk beeld van verschillende intrusielengtes bij verschillende condities. Een waarde van L_{250} van 42 km correspondeert met 0m zeespiegelstijging en ca. 500 m³/s door de Nieuwe Waterweg³: zout bereikt dan de noordkant van het Spui maar nog niet de Bernisse-inlaat., Er treedt verzilting op van de mondingen van Hollandsche IJssel en Lek. Dit zijn de condities waarbij de KWA en surplusen nodig zijn om die twee takken te beschermen en de regio van zoetwater te voorzien. Tabel 5-1 laat de aan de intrusielengte gekoppelde kleur-indicator zien die is toegepast bij het opstellen van de landelijke waterbalans (zie paragraaf 9.1). Een lengte $40 > L_{250} < 45$ km is te interpreteren als 'code rood': typische eens-in-de-20-jaar-condities. Die situatie is - met extra inspanning- nog net beheersbaar. Voorbij $L_{250} > 45$ km zijn kleurcodes 'donkerrood', 'lichtpaars', 'donkerpaars' en 'zwart' geïntroduceerd voor extreme condities die tot op heden nog niet zijn waargenomen, maar wel kunnen optreden onder voortschrijdende daling van debieten en stijging van de zeespiegel. Rond $L_{250}=50$ km bereikt zout elk getij de uitgang van de Dordtse Kil. Rond $L_{250}=60$ km treden concentraties boven de 200 mg/L op in Hollands Diep. Bij $L_{250}>70$ km dringt het zout zo sterk het Hollands Diep en Haringvliet op dat het de vraag is of het systeem nog goed beheersbaar is met de huidige strategie. Immers, het traag reagerende Hollands Diep en Haringvliet zijn bij lage afvoer niet tot nauwelijks zoet te spoelen (zonder de noordrand sterk te verzilten). Innamepunten langs het Haringvliet kunnen daardoor langdurig verzilten en er kunnen bovenregionale cascade-effecten optreden richting VZM. (Zie ook Hoofdstuk 4 voor wat verzilting van het Hollands Diep betekent voor de houdbaarheid van de strategie van het VZM)

Tabel 5-1 laat zien dat bij stijgende zeespiegel het huidige systeem (met huidige bodemligging etc.) een toenemend restdebiet door de Nieuwe Waterweg nodig heeft om dezelfde mate van beheersbaarheid te behouden. Paragraaf 5.3 gaat in op enkele oprekmogelijkheden om de zoetwaterdoelen in stand te houden, anders dan meer debiet door de Nieuwe Waterweg te laten stromen.

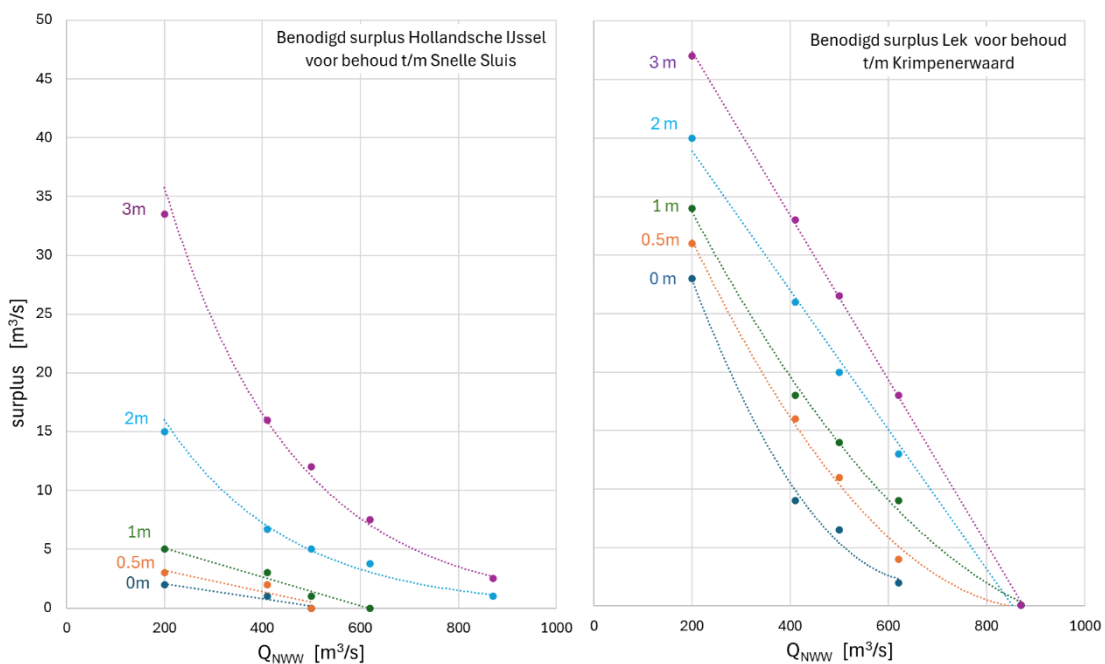
Tabel 5-1 Geïnterpoleerde en voorbij 3m ge-extrapoleerde uitwerking van de 250 mg/L chloride concentratie intrusielengte (L_{250} , km) in de RMM als functie van Q_{NWW} (rivierafvoer in m³/s) en Z (zeespiegelstijging in m). Vetgedrukte combinatie ZSS=0m & $Q_{NWW}=500$ m³/s correspondeert met $L_{250}=42$ km.

Q_{NWW} Z	0	0,5	1	2	3	4	5
200	62	64	67	71	76	81	85
335	50	52	54	58	63	66	70
410	46	48	50	54	58	62	66
500	42	44	46	50	54	57	61
550	41	42	44	48	52	55	59
615	39	41	42	46	49	53	56
740	36	38	39	42	46	49	53
870	34	35	37	40	44	46	48
915	33	34	36	39	42	45	49
1085	31	32	34	36	40	42	46
1360	28	29	31	33	36	39	42
1860	24	26	27	30	32	35	38

5.2.2. Benodigde surplusen om zoetwaterdoelen in stand te houden

³ $Q_{NWW} \approx 500$ m³/s komt overeen met $Q_{Lobith} \approx 700-800$ m³/s onder huidige gemiddelde zomerse condities. Bij extreme droogte geldt $Q_{Lobith} > 850$ m³/s $\Rightarrow Q_{NWW} \approx 500$ m³/s.

Omdat de zoutindringing van Q_{NWW} en zeespiegelstijging afhangt, is het benodigde surplus om de Hollandse IJssel en Lek zoet te houden, afhankelijk van deze twee factoren. In de systeemanalyse is onderzocht hoeveel surplus theoretisch nodig zou zijn om de takken van Hollandse IJssel en Lek voldoende zoet ($C < 250$ mg/L) te houden tot bij de huidige indicatieve locaties langs beide riviertakken, respectievelijk Snelle Sluis (11 km vanaf monding Hollandse IJssel) en inlaat Krimpenerwaard (9 km vanaf monding Lek). Dit is ongeacht de vraag of stuw Hagestein en de KWA dit surplus kunnen faciliteren. De in deze paragraaf getoonde grafieken zijn afgeleid uit de systeemanalyses van HKV (2024), waarin aanvullende informatie te vinden is.



Figuur 5-11 Surplusdebieten op Hollandse IJssel en Lek die nodig zouden zijn om de verzilting te beperken ($C < 250$ mg/L) tot direct benedenstrooms van respectievelijk Snelle Sluis en Krimpenerwaard. Gegevens afgeleid uit (HKV, 2024). Deze resultaten zijn berekend met beperkte windopzet in aparte 3D modellen voor beide riviertakken. Wanneer windopzet een rol speelt, is tijdelijk een hoger surplus nodig.

Figuur 5-11 laat zien dat beide takken sterk verschillend reageren op Q_{NWW} en zeespiegelstijging. De Hollandse IJssel reageert t/m 1m zeespiegelstijging beperkt gevoelig: de benodigde surplusen zijn van vergelijkbare orde grootte als huidige. Tussen 1 en 2m zeespiegelstijging neemt de Q_{NWW} -gevoeligheid sterk toe en loopt het benodigde surplus bij lage rivierafvoeren op naar tientallen m^3/s . De Lek reageert relatief gelijkmatiger op zeespiegelstijging. De relatieve gevoeligheid voor Q_{NWW} is juist bij lage zeespiegelstijging iets sterker dan bij hogere. Toch lopen ook daar de benodigde surplusen voorbij 1m zeespiegelstijging en onder de 400 m^3/s Q_{NWW} op tot een veelvoud van de huidige waarden. Als vuistregel kan gesteld worden dat t/m 2 zeespiegelstijging een daling van 100 m^3/s Q_{NWW} op te vangen is met een totale surplustoename over beide takken van orde 10 m^3/s .

Gelet op de gekozen modelaanpak geldt dat de berekeningen bij 2 en 3m een beperkte nauwkeurigheid hebben. Ook moet worden opgemerkt dat de hier getoonde relaties ook in het lagere deel van het bereik onzeker zijn. Parallel aan KP ZSS uitgevoerde analyses aan op iets andere wijze gemodelleerde relaties tussen verzilting en surplusdebiet in kader van het programma KZH (Deltares 2025c) laten

voor de Lek kwalitatief een vergelijkbaar verloop zien, maar komen wel op een sterkere gevoeligheid voor Q_{NWW} . De verschillen zijn deels te verklaren uit de verschillen in modelopzet, maar ze geven ook aan dat de hier getoonde surplusresultaten vooral in termen van relatieve verschillen en ordegroottes moeten worden gelezen.

De gevoeligheid van de Hollandsche IJssel en Lek zijn binnen KP ZSS onderzocht met aparte 3D modellen gekoppeld aan het model van de gehele RMM. De in deze studie noodzakelijke aannames omtrent deze koppeling en hoe de getijbeweging en de uiterwaarden zich bij extreme zeespiegel exact gaan gedragen, verliezen bij zeer extreme zeespiegelstijging hun geldigheid. Ook de gevoeligheid voor windopzet is niet beschouwd in deze resultaten. Ondanks deze beperkingen geven de resultaten een bruikbare indicatie van de ordegrootte van het benodigd surplus op beide takken.

Tot slot: in HKV (2024) staat, naast de surplusbehoefte om inlaten onder $C=250$ mg/L te houden, vergelijkbare informatie voor $C<400$ mg/L op de Hollandsche IJssel en $C<200$ mg/L op de Lek. Vergelijking met die resultaten laat zien dat het inrichten van het beheer op hogere waarden surplus kan besparen en dat lagere waarden om meer surplus vragen. Op de Hollandsche IJssel zou inrichten op 400 mg/L ca. 30% tot 50% surplus kunnen besparen. Het verschil in benodigde debieten tussen 250 en 200 mg/L op de Lek valt in de orde van 30%. Deze percentages variëren afhankelijk van hoe westelijk de inlaten liggen waar op gericht wordt. Hoe dichter bij de monding, hoe meer surplus nodig is en ook hoe groter de relatieve gevoeligheid voor een keuze voor andere concentratiewaarden. Voor meer details wordt verwezen naar het deelrapporten Arcadis/HydroLogic (2023b) en HKV (2024).

5.2.3. *Herhalingstijden*

De systeemanalyse HKV (2024) in KP ZSS heeft naast voorgaand tijdgemiddeld beeld ook naar herhalingstijden van afvoergedreven verzilting gekeken. De voornaamste indicatoren die in termen van herhalingstijd zijn gekwantificeerd, zijn de inzetfrequentie en duur van de surplussen via KWA en Hagestein en de beschikbaarheid van innamevensters bij de Bernisse Inlaat. Om herhalingstijden te schatten zijn de uit de KNMI23-scenario's afgeleide rivierafvoeren (Deltares 2023) gebruikt, zonder trendmatige ontwikkeling van de watervraag. Voor alle combinaties van klimaatscenario's en zichtjaren met zeespiegelstijging-zichtwaarden is de huidige verhouding tussen Lobithafvoer en afvoer door de Nieuwe Waterweg toegepast om een grove indicatie van herhalingstijden van Q_{NWW} te verkrijgen. Het activeren van de KWA neemt volgens deze analyse toe van gemiddeld eens in de ongeveer 3 jaar bij huidig klimaat naar ongeveer elk jaar bij 1m zeespiegelstijging en 2100Hd. Bij 3m en 2150Hd zou de inzet meerdere keren per jaar worden. De inzet van surplus op de Lek via Hagestein neemt binnen deze berekeningen toe van zelden in het huidige klimaat, naar eens per paar jaar bij 1m zeespiegelstijging in combinatie met 2100Hd klimaat en ongeveer elk jaar bij de combinatie 3m zeespiegelstijging en 2150Hd. De duur van de inzet neemt ook toe. Afvoercondities waarbij de surplussen geactiveerd zijn en die statistisch gezien eens in de 20 jaar voorkomen, nemen voor de Hollandsche IJssel toe van een kleine 2 maanden huidig, naar 3-4 maanden bij 1m en 2100Hd en het gehele zomerhalfjaar bij 3m en 2150Hd. Voor de Lek is de toename in duur relatief vergelijkbaar: tot 2 maanden bij 1m en 2100Hd en 3-4 maanden bij 3m zeespiegelstijging en 2150Hd. Merk op dat de hier gehanteerde methode grofstoffelijk is: bedoeld om de invloed van

zeespiegelstijging op de herhalingstijden te illustreren. De conclusie is dat het effect van de rivierafvoer (Q_{NWW} in het bijzonder) de verzilting en dus ook de inzet van KWA en Hagestein domineert. Zeespiegelstijging versterkt de trends. De wijze waarop KP ZSS de trends in statistiek van de rivierafvoer benaderd heeft is rudimentair: er is geen rekenschap gegeven van trendmatige veranderingen in watervraag en er is dus ook geen volledige consistente stochastische benaderwijze gevolgd. Voor meer details over de methodiek, vergelijking met huidige condities en onzekerheden wordt verwezen naar HKV (2024).

Bij de Bernisse-inlaat wordt de hoeveelheid zoetwater die per getijdenvenster maximaal kan worden ingelaten bepaald door twee factoren: (1) de waterstand op het Spui moet voldoende hoog staan om via het inlaatwerk voldoende volume in te kunnen laten; (2) de chlorideconcentratie op het Spui moet voldoende laag zijn. Vanwege deze dubbele afhankelijkheid doet zich een complexe klimaatgevoeligheid voor: afname in rivierafvoer zorgt voor zoutindringing en daling van de waterstanden, zeespiegelstijging zorgt ook voor zoutindringing, maar ook stijging van de waterstanden. Naast rivierafvoer-gedreven verzilting is ook windgedreven verzilting via Oude Maas en Spui richting Haringvliet van invloed op de Bernisse-inlaat. KP ZSS heeft trends in (risico op) windgedreven verzilting niet nauwkeurig kunnen modelleren, hiervoor is bij nader inzien een complexere aanpak met dynamische (niet-quasi-stationaire) berekeningen nodig gebleken. Het verdient aanbeveling om -bijvoorbeeld ten aanzien van meer gedetailleerde klimaatrobustheidstudies van het Brielse Meer- een dynamische aanpak te vervolgen waarin coïncidenties van lage afvoer en ongunstige wind en daaropvolgende naleveringseffecten wel kunnen worden onderzocht.

Per saldo laten de quasi-stationaire berekeningen van KP ZSS ten aanzien van afvoergedreven verzilting zien dat onder de ca. 0,3m zeespiegelstijging de daling in rivierafvoer bepalend is voor afname van de vensters; boven 0,3m zeespiegelstijging draagt zeespiegelstijging gunstig bij door het riviereffect teniet te doen en neemt de venstercapaciteit toe tot boven huidige waarden, mits Q_{NWW} niet onder de 200 m³/s daalt. Vanaf 3m zeespiegelstijging bepalen de rivierafvoer en zeespiegel samen de vensters die dan door verzilting in omvang weer slinken tot de huidige waarden.

5.3. **Oprekmaatregelen om gevolgen zeespiegelstijging te mitigeren**

In deze paragraaf volgt een verkenning van mogelijke oprekmaatregelen om de voorkeursstrategie zoetwater in deze regio langer vol te kunnen houden. Deze opsomming is zeker niet compleet, het omvat met name maatregelen die gekwantificeerd zijn binnen het KP ZSS en aanpalende programma's. Het verdient aanbeveling om de effectiviteit en neveneffecten van dergelijke maatregelen in vervolgonderzoek nader te kwantificeren en in een breder perspectief van andere mogelijke maatregelen te plaatsen (zie ook HKV 2025a,b).

5.3.1. *Vergroten surplus Hollandsche IJssel en Lek*

Paragraaf 5.2.2 liet zien dat, in theorie, op de Hollandsche IJssel en Lek het effect van zeespiegel en dalend restdebiet door de Nieuwe Waterweg tegengegaan kan worden door het surplus te vergroten. Dit is een voor de hand liggende oprekmaatregel zo lang de baten van een voldoende zoete riviertak opwegen tegen de kosten/nadelen van het vergroten van het surplus. De resultaten laten zien dat voorbij bepaalde condities de benodigde surplussen tot in de orde één tot meerdere

tientallen m³/s oplopen. Om over 'houdbaarheid' of 'oprekbaarheid' te spreken zullen deze hoeveelheden moeten worden afgezet tegen bijvoorbeeld de omvang van regionale onttrekkingen die hier nog mee gefaciliteerd worden en de daarbij gewenste/geaccepteerde zoutconcentraties, maar ook tegenover de vraag of, c.q. in hoeverre, de aanvoercapaciteit kan meegroeien. Het aspect van hogere zoutconcentraties accepteren wordt in de paragraaf 5.3.2 uitgewerkt. Hieronder volgt eerst een analyse van de consequenties van vasthouden aan de huidige doelen of ambities.

Ten eerste moeten de surplus debieten voor de Hollandsche IJssel worden aangevoerd vanuit de Lek via de KWA- en DKW-routes. Een deel van deze routes worden ook ingezet om direct in de regionale watervraag te voorzien. Deze regionale watervraag kan, afhankelijk van de gekozen strategie, ook groeien om interne verzilting en toenemende droogte (peilhandhaving, berekening) tegen te gaan. Opstapeling van debieten loopt vroeg of laat tegen beperkingen in doorvoercapaciteit in het regionaal systeem aan. Indien bij voortzetten van de huidige beheerwijzen de regionale doorvoer beperkend wordt, dient zich de vraag aan hoe de baten van regionaal doorgevoerde debieten ten behoeve van zoethouden van de Hollandsche IJssel zich verhouden tot de baten van overige doelen.

Ten tweede is de aflatcapaciteit van stuw Hagestein beperkt. De huidige cilinderschuif heeft bij een verval van 1m een capaciteit van circa 50 m³/s (Arcadis 2019). Als de bovenafvoer over de Waal daalt en de zeespiegel stijgt zal het verval over de stuw afnemen: dit beperkt gaandeweg de mogelijkheid om in het benodigde surplus te voorzien. Inzet van de vizerbogen in aanvulling op de cilinderschuif zou nog een oprekmogelijkheid kunnen zijn maar, zoals besproken in Deltares (2023c, 2024g), bij een zeespiegelstijging vanaf ca. 1 m zal er bij hoogwater op de Lek beneden de stuw (door getij en/of windopzet) steeds vaker negatief verval over de stuw ontstaan. Hiertegen is de stuw constructief niet bestand en de afname in verval beperkt het te realiseren aflatdebiet. Als de stuw niet wordt vervangen of aangepast zodat negatief verval weerstaan kan worden, verliest hij zijn functie en kan de afvoer op de Lek niet meer worden gerealiseerd. Zoals ook aangegeven in Deltares 2024g verdient het aanbeveling om de aard, omvang en frequentie van negatief verval en het effectief nog te realiseren aflatdebiet onder invloed van gecombineerde trends in rivierafvoer, watervraag, wind en zeespiegelstijging nader te onderzoeken.

Tot slot wentelt de totale watervraag aan het stuwpand Hagestein en het ARK via het Betuwepand en de Nederrijn af op de rest van het HWS. De wisselwerking tussen stuwpand Hagestein en de rest van het riviersysteem onder klimaatverandering en extreme zeespiegelstijging is binnen KP ZSS niet in detail (dynamisch, statistisch) onderzocht. Ook hier resteert een aanbeveling voor nader vervolgonderzoek.

Een eenvoudige optelsom van deze afwenteling is wel te maken op basis van de landsbrede waterbalans in Hoofdstuk 9. De surplusdebieten voor de RMM tellen op bij de debieten die het ARK uit hetzelfde stuwpand Hagestein onttrekt. Deze onttrekkingen zullen via de Nederrijn of Betuwepand aangevoerd moeten worden en respectievelijk tot een afname in vaardiepte op de Waal en een toename in stroomsnelheden bij de Prins Bernhardsluizen leiden en/of drukken op de afvoer van de Gelderse IJssel en de capaciteiten van de stuwen Driel en Amerongen). In beide

gevallen zal deze afwenteling nadelig zijn voor de scheepvaart en de zoetwatervoorziening elders in het HWS.

Oprekken door surplus te vergroten lijkt in de praktijk met de bestaande inrichting van het waterbeheer (regionaal en HWS gecombineerd) dus mogelijk tot 0,5 hooguit 1 m zeespiegelstijging en voor afvoeren Q_{NWW} niet veel lager dan 400 m³/s.

5.3.2. *Accepteren verzilting Hollandsche IJssel en Lek*

Hierboven is getoond dat vergroten van de surplussen op de twee takken niet eindeloos voort te zetten is. De filosofie van surplus sturing is echter wel langer voort te zetten (of: binnen regionaal begrensde capaciteiten te houden) als er gekozen wordt voor een 'strategische terugtrekking': het accepteren van (of aanpassen aan) verzilting bij de relatief benedenstrooms gelegen huidige strategische innamelocaties met behoud van de meer stroomopwaarts gelegen locaties. De systeemanalyse (HKV, 2024) laat zien dat door de indicatieve locatie op de Hollandsche IJssel bijvoorbeeld 3km te verplaatsen van Snelle Sluis naar halverwege Snelle Sluis en Gouda (14km vanaf de monding), ongeveer 50% van het benodigde surplusdebiet bespaard kan worden. Dit betekent wel dat Snelle Sluis vaker verzilt raakt: zoals in HKV (2024) in meer detail te vinden is, betekent een halvering van surplus voor Snelle Sluis globaal gesproken een verdubbeling van overschrijdingsfrequentie en duur van de 400 mg/L drempelwaarde. De te behalen debietbesparing door strategische terugtrekking neemt iets af bij stijgende zeespiegel, richting 40% bij 2m zeespiegelstijging.

Voor de Lek kan door de indicatieve locatie 3km te verschuiven van Inlaat Krimpenerwaard (km 9 vanaf de monding) naar Bergambacht (km 12 vanaf de monding) een surplusbesparing van ongeveer 30% bereikt worden. Zoals te zien is in HKV (2024) betekent een dergelijke strategische terugtrekking ook voor Inlaat Krimpenerwaard grofweg een verdubbeling in overschrijdingen. Strategisch terugtrekking is dus niet zonder gevolgen voor de innamelocaties en functies die daarvan afhankelijk zijn.

5.3.3. *Meestijgen bodem NWW en Nieuwe Maas*

Deze maatregel bestaat uit het 1 op 1 met zeespiegelstijging mee laten stijgen van de bodem van de Nieuwe Waterweg en het diepere deel van de Nieuwe Maas (tot aan de Waalhaven) conform de bouwsteen uitgewerkt in Deltares (2025a). Volgens die laatstgenoemde studie en zoals ook aangegeven in Biemond et al. (2025) kan deze maatregel het effect van zeespiegelstijging voor ongeveer een derde compenseren. In principe kan er ook gekozen worden voor gehele compensatie van de zeespiegelstijging door middel van bodem-aanpassing. In dat geval zou of een veel groter areaal (meer landinwaarts) moeten meegroeien en/of een netto verondieping van de vaarweg tot stand moeten worden gebracht. Voor meer informatie zie Deltares (2025a) en HKV (2025a,b).

Binnen KP ZSS is de maatregel '1 op 1 meestijgen van de diepste delen' niet modelmatig doorgerekend. Op basis van expertoordeel analoog aan Deltares (2025a) is ingeschat dat deze maatregel zeespiegelstijging zodanig compenseert dat de intrusielengte en de benodigde surplussen als functie van Q_{NWW} één klasse zeespiegelstijging-zichtwaarde opschuiven. Hiermee wordt de intrusielengte L_{250} gemiddeld gesproken met enkele kilometers verkort en kunnen de surplusdebieten (ten opzichte van voorgaande maatregel) met maximaal een factor twee teruggebracht worden. Deze maatregel draagt daarmee significant bij aan de

levensduur van de huidige strategie. Zoals uitgebreider besproken in Deltares (2025a) is ook deze ingreep niet vrij van neveneffecten en kosten: de rivierbodem zal vermoedelijk kunstmatig moeten worden gesuppleerd en onderhouden, omdat deze naar verwachting niet volledig op natuurlijke wijze kan meestijgen. Ook is onzeker wat dit meestijgen betekent voor de morfodynamiek en sedimentbalans van de RMM onder klimaatverandering. Meestijgen heeft echter geen nadelig effect op de bevaarbaarheid, aangezien de huidige vaardiepten zo goed als behouden blijven, los van het feit dat zeespiegelstijging hoe dan ook tot effectief lagere brughoogten in het RMM gebied zal leiden.

5.3.4. *Situationele afsluiting (zoutkeringen)*

Deze maatregel is uitgewerkt als bouwsteen in Deltares (2025a) en HKV (2025a,b) en Deltares (2025d). Deze maatregel bestaat uit het situationeel afsluiten door middel van zoutkeringen van Hartelkanaal, Oude Maas en van de mondingen van Hollandsche IJssel en Lek. De laatstgenoemde twee takken zijn in dit scenario zonder schutsluizen uitgevoerd en zullen daardoor niet meer bevaarbaar zijn. Dit betekent dat de bovenstroomse aanvoer via KWA en Hagestein alleen nog maar dient voor het in stand houden van de volumebalans van de afgesloten takken en een beperkte (hier verwaarloosde) afvoer omwille van de algemene waterkwaliteit. Er zal nog wel beperkte zoutlast op de takken zijn afkomstig uit de omliggende polders en zoutlek door de kering. Afsluiten van Hollandsche IJssel en Lek bespaart dus een groot deel van het surplus dat nodig zou zijn in een open systeem (maar ook alleen dat) en houdt die takken vermoedelijk in hun geheel voldoende zoet. Afsluiten tijdens dreigende verzilting van Hartelkanaal en Oude Maas beïnvloedt de routes die getij en rivierstromingen nemen in het overige deel de RMM en kan daardoor de verzilting terugdringen. De meer gedetailleerde studie van Deltares 2025d laat overigens ook zien dat afsluiten van Hartelkanaal en Oude Maas de windgevoeligheid van de Nieuwe Maas en aangrenzende takken vergroot.

De keuze voor deze varianten van afsluitingen is slechts een selectie uit maatregelen gepresenteerd in Deltares (2025a) en HKV(2025a,b). De focus is gelegd op maatregelen die enerzijds als effectief ingeschat zijn en anderzijds niet als de meest ingrijpende, impactvolle voor andere functies zoals waterveiligheid, scheepvaart en natuur. Dit betekent dat permanente afsluitingen (dammen met sluizen) en situationele afsluiting van de Nieuwe Maas of Nieuwe Waterweg (bijv. door een multifunctionele opvolger van de Maeslantkering) niet beschouwd zijn in de Systeemanalyse van KP ZSS. Los van hun kosten en baten voor zoetwater, koppelen besluiten voor dergelijke ingrepen in de praktijk ook aan de vraag of, en zo ja wanneer, de stormvloedkeringen in de RMM vervangen worden en waardoor. Voor een uitgebreidere beschouwing van alle overige anti-verziltings-varianten, hun effecten op de waterbeschikbaarheid, kosten en neveneffecten zie Deltares (2025a) en HKV (2025a,b).

Zoals in Deltares (2025a) wordt beargumenteerd, kan een situationele afsluiting weken tot maanden duren. Om de impact van de situationele afsluiting op de haven en de functie van het Hoofdvaarwegennet nog enigszins te beperken zijn sluizen voorzien. Voor de Oude Maas en Hartelkanaal wordt verondersteld dat er binnenvaartsluizen met zoutbeperkende maatregelen (drempels, bellenschermen en kolkspoeling) in gebruik worden genomen. Deltares (2025a en 2025d) laat zien dat zeesluizen vanwege hun diepte zoveel zoutlast en daarmee een doorspoel-behoefte van het afgesloten gebied teweegbrengen dat dit per saldo niet positief is voor de zoetwaterbalans. Met binnenvaartsluizen komt de maatregel erop neer dat effectief

ca. 50 m³/s spoeldebiet over Oude Maas door de sluisen benodigd is om Oude Maas en Spui zoet te houden. Het overige rivierdebiet wordt dan via Nieuwe Maas geleid.

Voor deze maatregel zijn binnen KP ZSS geen modelberekeningen uitgevoerd, maar is op basis van expertoordeel door Rijkswaterstaat het volgende ingeschat: afsluiten van Hartelkanaal en Oude Maas stuurt het debiet van Oude Maas (los van de benodigde 50 m³/s voor de doorspoeling) over Nieuwe Maas. Het rivierdebiet wordt in dat geval gebundeld en het aantal openingen aan de zeezijde neemt af waardoor de zoutindringing ook afneemt. Op basis van de beschikbare informatie uit Deltares (2025a en d) is door Rijkswaterstaat ingeschat dat het Nieuwe Waterwegdebiet (Q_{NWW}) hierdoor een factor van iets minder dan 2⁽⁴⁾ effectiever wordt in het terugdringen van het zout op de Nieuwe Maas. In de oprekpakketten (zie Hoofdstuk 8) komt deze maatregel bovenop het effect van de meegroeiende bodem. De optelsom van beide maatregelen in termen van intrusielengte L_{250} op de Nieuwe Maas is terug te zien in Tabel 5-2. Let wel, deze inschatting van (gestapelde) maatregelen is gebaseerd op semi-kwantitatieve aannames en expertoordeel, en dient vooral ter indicatie van het mogelijke relatieve effect van de oprekpakketten. Meer gedetailleerd vervolgonderzoek is nodig om de effectiviteit (en neveneffecten) nader te kwantificeren.

Tabel 5-2 Grove schatting intrusielengte van de 250 mg/L chloride-contour via de Nieuwe Maas, in km, voor de combinatie van de maatregelen meestrijgen bodem NWW en Nieuwe Maas en situationele afsluiting Oude Maas en Hartelkanaal.

QNWW Z	0.5	1	2	3	5
200	50	52	54	58	62
335	40	42	44	47	51
410	37	39	40	43	47
500	34	36	37	40	44
550	33	34	36	39	42
615	31	33	34	37	40
740	29	30	32	34	38
870	27	28	30	32	35
915	26	28	29	32	35
1085	25	26	27	30	32
1360	22	24	25	27	30
1860	20	21	22	24	26

5.4. Conclusies houdbaarheid, oprekbaarheid RMM

De intrusielengte van de 250 mg/L chloridecontour vertoont een toenemende gevoeligheid voor dalende Q_{NWW} . De gevoeligheid voor zeespiegelstijging is meer gelijkmatig. Uiteindelijk gaan beide effecten samen opspelen in een toekomstig klimaat. De impact (schade) als gevolg van de intrusie hangt uiteindelijk af van de ligging van de zoutgrens ten opzichte van de gevoelige innamelocaties. De vraag tot welke condities de strategie voor de RMM houdbaar en oprekbaar is, is deels een vraag over de afweging van baten (vermeden schade) versus kosten. Die vraag ligt buiten de scope van deze synthese. Binnen de scope van deze synthese kan wel gereflecteerd worden op de technische houdbaarheid en oprekbaarheid. De mate van waterstaatkundige beïnvloeding die de stuurknoppen en maatregelen in het HWS ons nog bieden om de klimaateffecten te tegen te gaan.

Algemeen kan geconcludeerd worden dat -binnen de strikte interpretatie van de huidige strategie- alleen optimaliseren van de surplusen op de Hollandsche IJssel

⁴ Om precies te zijn een factor 1.7, o.b.v. kalibratie t.a.v. de schattingen in Deltares 2025a

en Lek nog tot de oprekmogelijkheden behoort. De verzilting in de meer westelijke delen (Spui, Nieuwe Maas en Oude Maas) wordt beïnvloed door het beheer van de Haringvlietsluizen, maar dit kan niet verder geoptimaliseerd worden, zoals ook aangetoond in HKV (2024).

Op de Hollandsche IJssel en Lek beperkt het zout zich in deze situatie (zonder windopzet) tot de delen die door het instellen van een surplusdebiet (goed te beïnvloeden zijn). Daarmee zou een deel van de huidige strategie van surplussturing nog als houdbaar te beschouwen zijn tot orde 0,5m zeespiegelstijging onder de voorwaarde dat Q_{NWW} niet veel lager wordt dan ca. 400 m³/s.

Tussen 0,5 en 1 meter zeespiegelstijging en bij Q_{NWW} dalend richting 200 m³/s is de noordrand met de Hollandsche IJssel en Lek, in theorie ook nog beheerbaar. Dit zal echter ofwel een verdubbeling van surplusen vergen of, met behoud van de huidige surplusen, een acceptatie van extra zoutindringing van enkele kilometers in deze takken betekenen. De gevoeligheid voor wind-effecten van de Hollandsche IJssel is hierbij wel een aandachtspunt. Dit maakt dat het nu onzeker is om de houdbaarheid voorbij 0,5m zeespiegelstijging in te schatten. Daarnaast gaan neveneffecten van deze maatregelen (bijvoorbeeld op scheepvaart op het hoofdvaarwegennet en kosten en overlast in het regionale systeem) een steeds grotere rol spelen bij de vraag wat nog als 'houdbaar' of 'oprekbaar' beschouwd wordt.

Zolang de intrusielengte minder is dan 50 km, is de verzilting in de westelijke delen zeer aanzienlijk maar lijkt er nog geen sprake van permanente achterwaartse verzilting van de zuidrand (Haringvliet en Hollands Diep). Voor de zuidrand, Spui, Haringvliet en (als eerste) Hollands Diep ontstaat boven 0,5m zeespiegelstijging en onder Q_{NWW} 400 m³/s wel een aanmerkelijke toename in gevoeligheid voor windopzet die in de Systeemanalyse beperkt is geanalyseerd. De studie laat zien dat bij intrusielengtes boven de ca. 60 km zout ook zonder windopzet via de Dordtse Kil elk getij het Hollands Diep bereikt. De langere-termijn respons van het Hollands Diep en Haringvliet (herstel en nalevering na een periode van lage afvoer) is uit de studie niet af te leiden, maar de verwachting is dat voor indringing voorbij 70 km permanente achterwaartse verzilting kan gaan optreden die impact kan hebben op de Biesbosch (natuur, drinkwater), de inname voor het Volkerak-Zoommeer en de innamelocaties langs het Haringvliet. Het systeem bevindt zich dan in een andere, veel minder goed te beïnvloeden toestand en zal bij herstellende afvoercondities slechts vertraagd terugveren, waarbij het weken of wellicht langer zout kan naleveren. Onder dergelijke condities kunnen bovenregionale cascade-effecten ontstaan richting de het VZM. Recente ervaringen van de regionale beheerders bij afvoeren Q_{NWW} in de orde van 400 m³/s waarbij verzilting van het Spui aanzienlijk was en het feit dat wind-effecten voor langdurende impact kunnen zorgen, geven aan dat nader onderzoek naar de gevoeligheid voor wind in combinatie met scenario's voor de bovenregionale en regionale onttrekkingen nodig is voor een scherper beeld van de impact van intrusielengtes voorbij 40 km.

Indien voorbij de huidige strategie en gebiedsinrichting wordt gekeken, is er nog steeds perspectief voor een open RMM. Het laten meestijgen van (een deel van) de bodem van de RMM mitigeert de effecten van zeespiegelstijging aanzienlijk. De mate waarin hangt sterk af van de omvang van het gebied waarvan de bodem wordt aangepast. Als ervoor gekozen wordt om de bodem met meer dan de zeespiegelstijging omhoog te brengen (de vaardiepte per saldo verminderen), kan

ook een deel van de afvoerdaling in de Nieuwe Waterweg worden gecompenseerd. Bij een dergelijke aanpassing in het gebied spelen vele afwegingen van kosten, baten en neveneffecten. Situationeel afsluiten van delen van de RMM tijdens perioden van lage afvoer, lijkt wat betreft verziltingsbestrijding zeer effectief te zijn. De kosten, neveneffecten etc. zijn echter ook aanzienlijk. Van beide type aanpassingen zijn de mogelijke varianten, kosten, effecten en neveneffecten uitvoeriger beschouwd in Deltares (2025a,d) en HKV (2025a, b).

6 Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal

6.1. Essentie systeemwerking

Het ARK-NZK-systeem⁵ is een peil-gereguleerd deel van het HWS. Het staat in verbinding met zee (IJmuiden), Markermeer (sluizencomplex Schellingwoude, o.a. de Oranjesluizen), Nederrijn-Lek (Beatrixsluizen Nieuwegein, Irenesluizen Wijk bij Duurstede) en regionale doorvoerroutes van de KWA (gemaal de Aanvoerder, Noordergemaal). Het systeem staat onder normale omstandigheden in open verbinding met de Amstelboezem en stadswateren van Amsterdam en is verbonden met de Vechtboezem en daarmee ook met verziltingsgevoelige natuur in de Vechtplassen. Scheepvaartverkeer is intensief en bepaalt veel van de beheer-randvoorwaarden: peilmarges, schutbedrijf aan zeezijde en aan Lekzijde, mogelijkheden om water in te laten etc.

Het systeem bevat ruim tweehonderd water- en zoutbalansposten, variërend van grote schutcomplexen (IJmuiden, Schellingwoude, Wijk bij Duurstede), RWZI's, poldergemalen en inlaten. De voornaamste zoutbron van het ARK-NZK-systeem wordt gevormd door de schutsluizen bij IJmuiden. Bij elke schutting dringt zoutwater het relatief diepe NZK binnen: de hoeveelheid is sterk afhankelijk van scheepvaartparameters: met name welke sluiskolk gebruikt wordt (kolkdimensies) en het aantal schuttingen per etmaal. Daarnaast is het verschil in zoutgehalte aan weerskanten van de sluizen erg bepalend en tot slot levert waterstandverschil (o.a. door zeespiegelstijging) tussen binnen en buiten een vergelijkbaar gevoelige afhankelijkheid als één enkele van de hierboven genoemde factoren.

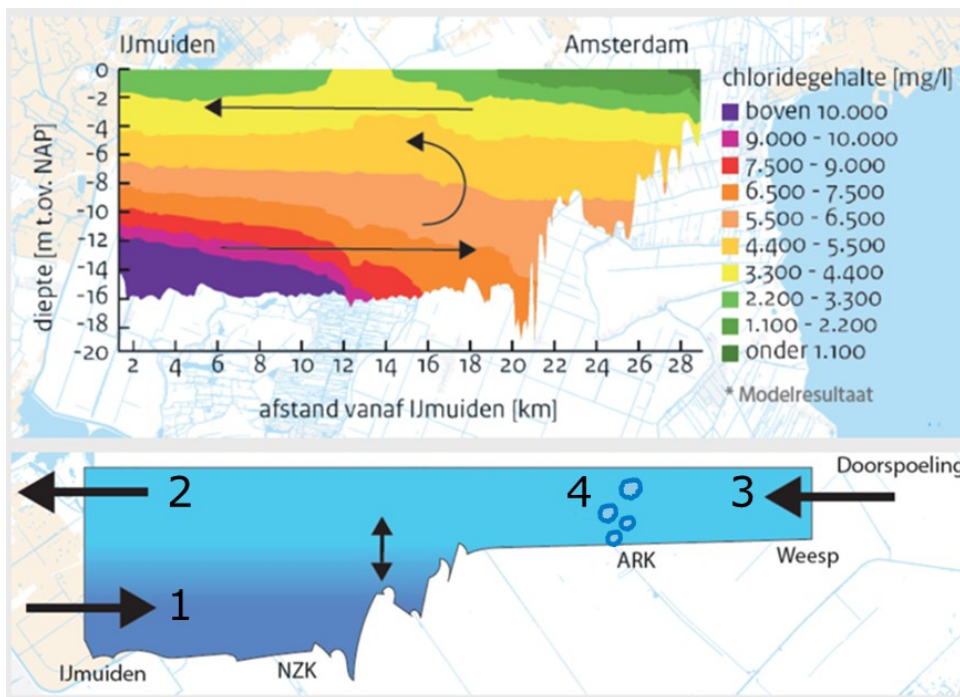
Gegeven een bepaalde zoutvracht bij IJmuiden en bepaalde afvoer via het spui-maalcomplex, ontstaat in het NZK een gelaagde, estuariene structuur (zie Figuur 6-1). Deze structuur bevat een verticale gelaagdheid en een oostwest gradiënt. Deze gradiënten bestaan jaarrond. De concentraties in het westen en nabij de bodem worden vooral bepaald door de combinatie van zoutvracht via de sluizen en de afvoer van dat zout via het spui- maalcomplex. De zoutgehalten in de bovenlaag en in het oosten worden vooral beïnvloed door hoeveel water er via het ARK wordt aangevoerd. In het natte seizoen zijn de concentraties aan het wateroppervlak en in het oosten dus lager dan in een droge zomer. De concentraties in het oosten zijn bepalend voor de zoutdruk op de daadwerkelijke zoetwaterbuffer, het ARK.

De huidige in het beheer gehanteerde indicator voor de zoutdruk van het gehele NZK-ARK systeem is de zogenaamde Z5-waarde: een vijfdaags lopend gemiddelde van de chlorideconcentraties gemeten op vijf locaties (per locatie twee of drie dieptes); vier in het NZK en één op het ARK bij Diemen. Het huidig beheer is erop gericht om de zoutintrusie niet voorbij Diemen te laten komen ($C < 370$ mg/L) en om de Z5 binnen de marges (boven en onder) te houden. De zoutindringing op het ARK wordt beheerst met een noordwaarts surplusdebiet in de ARK-monding. Omdat dit surplusdebiet ook bijdraagt aan het afvoerdebiet bij IJmuiden, is in combinatie met de grote stromingsdynamiek in het kanaal de relatie tussen surplus, Z5 en zoutindringing complex. Vanwege de genoemde koppelingen tussen de diverse factoren is voor dit deelgebied een complex 3D-model toegepast (zie Arcadis/Hydrologic 2023c).

⁵ Met het NZK wordt het Noordzeekanaal zelf inclusief het IJ bedoeld.

De zoutgehalten aan de oostzijde van het NZK leveren de zoutdruk op bij de monding van het zoete ARK en bij het sluiscomplex bij Schellingwoude (verbinding met het zoete Markermeer). De interactie tussen NZK en Markermeer is in deze deelstudie niet nader onderzocht. De interactie tussen NZK en ARK is met het 3D model onderzocht.

Het ARK-NZK is ook van belang voor het afvoeren van zoute kwel met name uit de polders van Haarlemmermeer en Horstermeer, maar de bijdrage van verzilting via grondwater via de regionale waterafvoer is zeer klein (orde 1%) in vergelijking met de zoutvrucht via de sluis bij IJmuiden.



Figuur 6-1 Schematische doorsnede langs het Noordzeekanaal-Amsterdamrijkanaal. Bovenste paneel: typische chlorideverdeling en bijbehorende estuariene circulatie. Onderste paneel: schematisch de zoutlast en het schutdebiet (1), de afvoer van water en zout via het spui-maal-complex (2), het surplusdebiet bij Weesp (3) en het bellenscherm (4) ter hoogte van gemaal Zeeburg op het ARK. Andere laterale lozingen en onttrekkingen zijn niet getoond.

Doordat het ARK ondieper is dan het NZK, en het zwaardere zoute water vooral onderin de waterkolom zit, dringt niet al het zout het ARK binnen. Het NZK is brak. Het aangrenzende ARK wordt middels beheer zoet gehouden en vervult een functie in de zoetwatervoorziening. Het zoutbeheer bestaat uit een combinatie van (optionele) maatregelen:

1. Beperken optrekken van zout vanuit het westen van NZK op het oostelijk deel van NZK middels afvoer van zout via spuien & malen (sinds 2025 met selectieve onttrekking, met zakdeur).
2. Zoetspoelen van de monding van het ARK middels een noordwaarts restdebiet.
3. Beperken van zoutvrucht op het NZK vanuit zee bij IJmuiden (schutbedrijf, keuze in te zetten sluis, geclusterd schutten of mogelijk schutbeperkingen).
4. Het zoetspoelen van de monding van het ARK efficiënter maken door middel van een bellenscherm, ter hoogte van gemaal Zeeburg, indien de zoutdruk vanuit NZK hoog is.

5. Extra zoetspoeling op oostzijde NZK door inzet suatieschuif Schellingwoude, waarmee zoet water van het Markermeer naar het NZK ingelaten kan worden (bij voldoende waterbeschikbaarheid op Markermeer-IJsselmeer).

De mate van zoutintrusie in het ARK hangt voornamelijk af van de mate van verzilting van het oostelijke deel van het NZK en van het debiet bij de monding van het ARK op het NZK. Dit debiet wordt bepaald door de aanvoer van zoetwater via het waterinlaatsysteem (WIS) bij de Irenesluizen te Wijk bij Duurstede en de resultante van regionale watervraag en -afvoer bovenstrooms van de monding. Zo zal tijdens een droge periode een lagere hoeveelheid zoetwater afgevoerd worden vanuit de waterschappen en vanaf het ARK op het NZK, wat leidt tot minder zoetspoelend vermogen. Dit kan resulteren in een toename van de zoutintrusie op het ARK. Daarnaast hebben nog meer factoren invloed op de zoutintrusie van het ARK, zoals wind en scheepvaart. Door deze twee factoren neemt menging toe, waardoor zout beter afgevoerd kan worden richting het oosten. Door (oosten)wind kan echter ook *upwelling* van zout ontstaan op het IJ, wat weer ongunstig is voor de zoutdruk op de monding.

6.2. Systeemanalyse (gevoeligheidsanalyse)

Voor de Systeemanalyse is de vereiste surplus-afvoer bij Weesp verkend die nodig is om het ARK zoet te houden als functie van de zoutvracht bij IJmuiden. De totale benodigde wateraanvoer bij het WIS is gelijk aan de som van deze vereiste surplus-afvoer, de regionale waterafvoer en de regionale watervraag⁶. Droge omstandigheden zijn die omstandigheden waarbij netto door de waterschappen onttrokken wordt ($10 \text{ m}^3/\text{s}$) aan het kanaalpand ten zuiden van Weesp. Deze omstandigheden zijn maatgevend voor de houdbaarheidsvraag aangezien het zoetwaterbeheer in dat geval geheel afhankelijk is van de KZH-strategie voor het HWS (WIS-debiet) en niet kan meeprofiteren van eventuele regionale afvoeren als gevolg van neerslag.

Het Noordpand van het ARK is niet alleen van belang voor de regionale watervraag, het is ook één van de doorvoerroutes van de Klimaatbestendige Wateraanvoer (KWA) naar West Nederland en naar de Hollandsche IJssel. Dit is een voorziening die ongeveer $10 \text{ m}^3/\text{s}$ uit het ARK onttrekt en die in zeer droge situaties wordt ingezet in aanvulling op de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ laterale onttrekking die hierboven is genoemd. De KWA is in de modellering niet beschouwd omdat deze neerkomt op het aanvoeren van aanvullend debiet bij de WIS Irenesluizen bij Wijk bij Duurstede en afvoeren van datzelfde debiet via het Noordergemaal en gemaal de Aanvoerder bij Utrecht, wat geen hydrodynamische invloed heeft op de monding van het ARK.

In kader van de KZH-implementatie wordt verkend of, en zo ja hoe, een aanvullende aanvoer naar het Markermeer vormgegeven kan worden. Het basis-scenario gaat uit van een gemaal in de Diemerzeedijk. Deze zogenoemde 'ARK-route' heeft mogelijk invloed op de werking van de zouttong in de monding van het ARK ter hoogte van Diemen en telt tevens door in het extra debiet dat via de WIS moet worden voorzien. De ARK route is nog in onderzoek en daarom niet meegenomen in de uitgevoerde modelberekeningen voor ARK-NZK.

In de systeemanalyse is de zoutvracht via het schutcomplex IJmuiden als functie van zeespiegel en schutbedrijf in Fase 1 apart geschat met behulp van de

⁶ De modelopzet hanteert een 'WIS-debiet' dat onder droge omstandigheden -in het model- getalsmatig $10 \text{ m}^3/\text{s}$ hoger is dan het effectieve surplusdebiet bij Weesp.

Zeesluisformulering ([ZSF](#)). Daarbij is er nog geen rekening mee gehouden dat een toenemende zoutvracht door zeespiegelstijging zal leiden tot het oplopen van het zoutgehalte aan de binnenzijde bij de Velserskom, wat een dempend effect heeft op de kolkuitwisseling. Hierdoor ontstaat een overschatting van de binnenkomende zoutvracht. De geschatte zoutvracht is opgelegd aan het model dat telkens is doorgerekend tot een stationair evenwicht werd bereikt. Dit is een *worst case* benaderwijze, omdat deze verzadigde toestand in werkelijkheid zelden wordt bereikt. Omdat de Selectieve Onttrekking (SO of 'Zoutdam') bij IJmuiden tijdens het onderzoek binnen KP ZSS nog niet gereed was en er nog geen gevalideerd model voor beschikbaar was, is de modelstudie uitgevoerd zonder de SO, maar wel met de Nieuwe Zeesluis i.p.v. de Noordersluis in bedrijf⁽⁷⁾. Dit valt buiten de vergunde ruimte, en daarmee is ook dit een overschatting van de zoutvracht richting NZK-ARK. Bovenstaande keuzes zijn in hun totaliteit te zien als een *worst-case* aanpak. Verder zijn windeffecten en mogelijke mengeffecten door scheepvaart op het NZK en het ARK ook niet beschouwd.

In de Systeemanalyse is het bellenscherm in de monding van het ARK niet beschouwd. Alleen de beheermaatregelen aan de bron (IJmuiden) en bij de monding (debiet Weesp) zijn beschouwd in de gevoeligheidsanalyse. De gevoeligheidsanalyse heeft, naast de bijdrage van zeespiegelstijging, een aantal andere systeemeigenschappen belicht:

- Scheepvaart-gerelateerde factoren (grootte en gebruik sluizen) zijn van minstens even grote invloed als zeespiegelstijging. Onder toegepaste referentiecondities (3 maanden aanhoudende droogte) laadt het NZK op tot boven-kritieke Z5 waarden. De reactie van de Z5 is asymmetrisch: Verlaging van zoutvracht tot een derde van de referentiewaarde door aanpassingen in sluisgebruik leidt tot een ruime halvering van de Z5 evenwichtswaarde. Een verdrievoudiging in zoutvracht door zeespiegel en sluisgebruik laat de Z5 nog wel stijgen, maar slechts met ongeveer een derde.
- Het opgelegde surplusdebiet is vooral effectief om het ARK zoet te houden (tegendruk en zoetspoelen van een relatief beperkt kanaalvolume). Het effect van hetzelfde debiet op de zouttoestand van het NZK en daarmee op de zoutdruk op de monding is veel beperkter omdat het NZK systeem veel dieper en breder is en er dempende terugkoppelingen bestaan tussen binnen- en buitenzijde van de sluizen.
- De oplaadsnelheid van het NZK is in de orde van 3 maanden: voor gehanteerde bereik aan zoutvrachten en surplusdebieten zit hier een variatie van enkele weken in.

6.3. **Gevolgen van zeespiegelstijging op zoet ARK**

Zeespiegelstijging beïnvloedt het ARK-NZK systeem hoofdzakelijk op de volgende wijze, in afnemende volgorde van gevoeligheid:

- de afvoercapaciteit van het bestaande spui-maalcomplex bij IJmuiden neemt af,
- de zoutvracht vanuit de schutsluizen neemt toe, evenals het inwaartse schutdebiet (schutschijf),
- de grondwaterkwel neemt toe (zoutvracht en watervolume vanuit de polders op het ARK-NZK),
- condities bij de koppellocaties met de Lek (bij Nieuwegein en Wijk bij Duurstede) veranderen.

De laatste term (Lek) is niet expliciet meegenomen in deze deelstudie, maar uit de deelstudie van de regio RMM (Arcadis/HydroLogic 2023b) kan geconcludeerd worden dat zout deze sluislocaties (Nieuwegein en Wijk bij Duurstede) bij 3 m zeespiegelstijging niet bereikt, terwijl (getij-)waterstanden benedenstrooms van Hagestein (Nieuwegein) wel toenemen. Dit grotere verval over de sluis levert dus iets gunstigere condities op voor de waterbalans van het ARK bij droogte. De ontwikkeling van waterstanden bovenstrooms van Hagestein (Wijk bij Duurstede) is niet doorgerekend. Deze hangt van het netto effect van zeespiegel en rivierafvoer af, zoals besproken in Hoofdstuk 5, eveneens heeft het vervallen van stuw Hagestein hier ook een groot effect op.

Grondwaterkwel blijkt niet maatgevend voor de zoutlast: de grondwaterstudie (Deltares 2022) laat zien dat de verzilting van het ARK-NZK systeem er niet noemenswaardig door verergerd wordt. Het toegepaste meest extreme 'wat-als' scenario rekende met een verhoging van de laterale zoutlast met een factor 10 tot 20. Dit leidde tot een totale laterale zoutlast van ca. 17 kg/s, nog geen 2% van de referentievracht bij IJmuiden van ca. 1100 kg/s⁷.

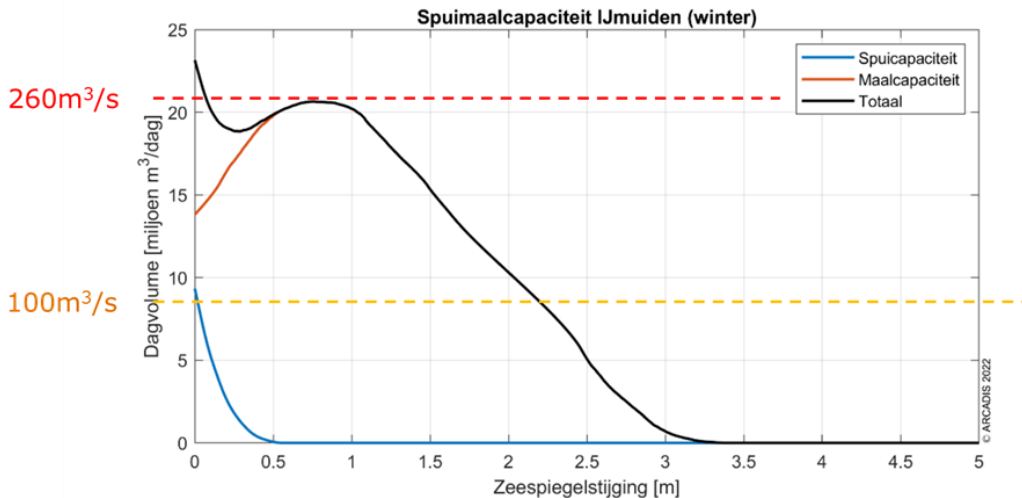
Hieronder worden de resterende twee bovengenoemde invloeden in meer detail besproken.

6.3.1. *Afvoer: Houdbaarheid maal/spuisysteem*

De spuicapaciteit toont zich heel gevoelig voor de verandering van de zeespiegel (zie Figuur 6-2). Zelfs bij een zeespiegelstijging van slechts 0,1 m gaat al ruim een derde van de spuicapaciteit verloren. Bij een zeespiegelstijging van 0,5 m valt de spuicapaciteit volledig weg. De maalcapaciteit neemt aanvankelijk (tot circa 0,8 m zeespiegelstijging) toe door het groeien van het maalvenster: laagwaterperioden met negatieve opvoerhoogtes gaan korter duren. Bij een verdere stijging van de zeespiegel neemt het bereiken van de maximale opvoerhoogte van de huidige pompen echter de overhand en neemt de maalcapaciteit netto af. Als de huidige specificaties voor de pompen worden gehanteerd, zal de pompcapaciteit wegvallen bij circa 3 m zeespiegelstijging.

De implementatie van de SO zal het teruglopen van de spuicapaciteit versnellen waardoor bij een zeespiegelstijging van 0,4 m de spuicapaciteit al verwaarloosbaar is. De implementatie van de SO heeft ook een negatief effect op de maalcapaciteit, doordat de SO de waterstand in het Binnenspuikanaal doet dalen (met grotere opvoerhoogte ten opzichte van de buitenwaterstand tot gevolg) en het water relatief zwaarder zwaarder wordt.

⁷ In Arcadis-Hydrologic (2023c) is als referentie (huidig klimaat) een zoutlast van 1500 kg/s gebruikt. Hierin is onterecht het gelijktijdig gebruik van Noordersluis en Nieuwe Zeesluis meegenomen. De referentievracht van 1100 kg/s is naderhand afgeleid uit het werk van Arcadis/Hydrologic 2023c op basis van realistisch toekomstig gebruik van de Nieuwe Zeesluis en de overige sluzen.



Figuur 6-2 Verloop van afvoercapaciteit bij IJmuiden als functie van zeespiegelstijging, zonder SO. De oranje en rode lijnen geven de afvoerbehoefte weer voor zoutbeheer en peilbeheer (huidige configuratie). Afbeelding overgenomen uit Arcadis/Hydrologic (2023c).

Uit de berekening van de benodigde debieten onder droge omstandigheden voor zoetspoelen van ARK, mitigeren van de zoutvracht bij IJmuiden, afvoer van het schutwater en lozingen ten noorden van de monding is te concluderen dat de benodigde maalcapaciteit in de orde van $100\text{m}^3/\text{s}$ ligt onder extreme condities (5m zeespiegelstijging en toename scheepvaart). Daarmee is de benodigde afvoercapaciteit voor zoetspoelen nog altijd minder dan de huidige gemaalcapaciteit ($260\text{m}^3/\text{s}$). Om in de toekomst klimaatrobuust te zijn en het vervallen van de spui functie op te vangen zal de gemaalcapaciteit vergroot moeten worden.

6.3.2. Zoutlast: Houdbaarheid chloride

Het waterstaatkundige functioneren van de zoetwaterbuffer op het ARK is uitgedrukt als de chlorideconcentratie bij meetpunt Diemen (-1,4 m NAP) en daaraan gekoppelde intrusielengte van de 150 mg/L en 370 mg/L contourlijnen voor verschillende waarden van zeespiegelstijging en surplus-afvoeren. In het huidige beheer wordt gestuurd op een concentratie van maximaal 370 mg/L bij Diemen (-1,4 m NAP). In de gevoeligheidsanalyse zijn zowel intrusielengte als de concentraties bij Diemen (onder oppervlak en nabij de bodem) als indicatoren beschouwd. Het blijkt dat de intrusielengten en kenmerkende concentratie-overschrijdingen niet significant verschillen tussen waarden van 150 of 370 mg/L. Wel blijkt dat –zoals te verwachten– de concentratie-indicator minder lineair reageert dan intrusielengte: concentratie lijkt lang ongevoelig totdat de tong Diemen bereikt en dan is de richtwaarde snel overschreden.

Het voldoende zoet houden van het ARK is afhankelijk van de condities ('zoutdruk') aan de oostzijde van het NZK (bij de monding van het ARK) en van het zoetwater-surplusdebiet door de monding van het ARK bij Weesp om het kanaal zoet te spoelen. De condities op het NZK worden bepaald door de balans tussen zoutvracht via de sluisen, afvoer via het spui-maal-complex en achtergrondstroming deels gedreven door het aangevoerde surplusdebiet uit de ARK-monding en door laterale instroom uit lateralen zoals de Amstel.

- *Zoutvracht*: De binnenkomende hoeveelheid zout neemt door een zeespiegelstijging van 5 meter ongeveer toe met 75% van 1100 kg/s nu naar ruim 1800 kg/s bij 5m (bij dezelfde mate van gebruik van de Nieuwe Zeesluis, Middensluis, Zuidersluis en Kleine sluis). De zoutvracht neemt in de schattingen vrijwel lineair toe met het aantal schuttingen en afhankelijk van de groei in schutintensiteit kan dit in potentie een groter effect hebben dan zeespiegelstijging.
- *WIS Debiet*: Doorgaans (zonder de inzet van de KWA) wordt in tijden van droogte 15 tot 30 m³/s bij de Irenesluizen ingelaten om bij Weesp een dag-gemiddeld debiet te garanderen van ten minste 25 m³/s. Bij IJmuiden resulteert dit in een spui/maal debiet van ruim 40 m³/s. Binnen de huidige beheerstrategie wordt voor de Irenesluizen 100 m³/s gezien als maximale piekcapaciteit en 80 m³/s als dag-gemiddeld maximum (er wordt dan naast het WIS ook via een schutkolk ingelaten). De inlaat bij de Irenesluizen en watervraag en -afvoer vanuit het regionale watersysteem bepalen het surplus bij Weesp dat tegendruk aan verzilting geeft.

Uit de berekeningen blijkt dat de zoutwatertong, bij een WIS debiet van 35 m³/s (Weesp 25 m³/s), 2 km zal opschuiven bij een zeespiegelstijging van 5 m. Dit effect kan worden gecompenseerd door het debiet bij Weesp met ca 12 m³/s te verhogen. Het extra benodigde debiet per meter zeespiegelstijging of per eenheid toename in zoutvracht is redelijk lineair. Als vuistregel kan gesteld worden dat circa 3 m³/s extra surplus per meter zeespiegelstijging nodig is om het effect van zeespiegelstijging tegen te gaan. Dit blijkt ook uit werk van Deltares (2025b) naar de effectiviteit van bronmaatregelen. Uit die meer recente berekeningen volgt eenzelfde toename in surplus om de effecten van zeespiegelstijging te mitigeren, bij gelijk blijven van de schutintensiteit en realistische verdeling van schuttingen over de verschillende sluisen. Indien ook de schutintensiteit sterk groeit (ruim buiten de nu vergunde ruimte zoals bepaald bij de bouw van de Nieuwe Zeesluis en de SO, en ook zelfs buiten de technische capaciteit van de Nieuwe Zeesluis) en de zoutvracht doorgroeit naar 5000 of zelfs 7500 kg/s zijn de belangrijkste innamepunten op het ARK alleen nog zoet te houden als een WIS-debiet van 95 m³/s gerealiseerd kan worden: de zouttong in het ARK komt dan tot Diemen.

6.3.3. *Houdbaarheid aanvoercapaciteit*

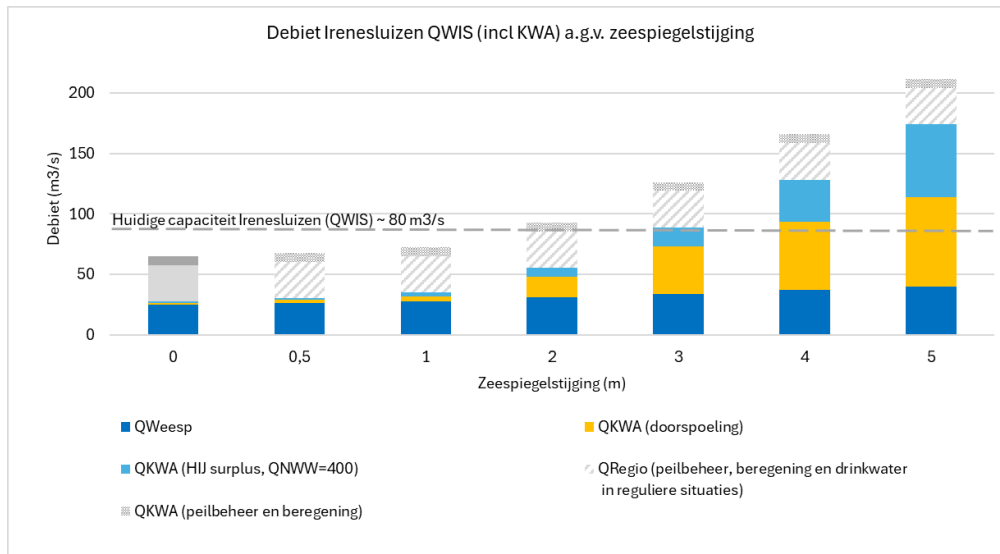
De totale regionale watervraag (voor drinkwater, peilbeheer en beregening) in een droge periode kan onder het huidige klimaat orde 30 m³/s bedragen (waaronder ca. 7,5 m³/s voor drinkwater), wat naar verwachting zal toenemen bij toenemende droogte en voorzien beleid t.a.v. het veenweidegebied. Bij de Irenesluizen komen in de huidige systeemconfiguratie deze opgaven bij elkaar: het doorspoeldebiet voor de monding van het ARK, de regionale watervraag plus het deel van de KWA dat via het gemaal de Aanvoerder de Leidsche Rijn opgaat en via het Noordergemaal de Hollandsche IJssel op gaat richting de waterschappen Rijnland, Delfland en Schieland en Krimpenerwaard om deze van toenemende hoeveelheden zoetwater te voorzien. De doorspoelbehoefte door verzilting van de kwel-gevoelige polders van deze waterschappen groeit ongeveer een factor 2 bij 1m zeespiegelstijging tot een factor 10 bij 3m zeespiegelstijging (zie paragraaf 3.1). Daarnaast neemt de doorspoelbehoefte voor de Hollandsche IJssel (het surplus) van enkele m³/s toe tot orde 10 tot 20 m³/s bij 3m zeespiegelstijging. Deze behoeften hoeven niet enkel via de noordelijke KWA routes voorzien te worden, maar de optelsom van stijgende regionale watervraag en stijgend zoetspoeldebiet vormt desalniettemin het grootste knelpunt voor het ARK-NZK systeem: de doorvoercapaciteit bij de Irenesluizen

wordt onvoldoende om aan de stijgende watervraag te voorzien (bij een gelijkblijvend waterbeheer). Daarnaast wordt zoals ook in Hoofdstuk 5 besproken, in combinatie met toenemende watervraag van de Lek (stuw Hagestein) de doorvoercapaciteit van de Bernhardsluizen (zowel in open als gesloten toestand) een beperkende factor en de waterbeschikbaarheid vanuit de Waal. In het huidige beheer wordt de watervraag voor het noordpand van het ARK en de KWA via het Betuwepand van het ARK uit de Waal voorzien en niet uit de Nederrijn. Bij welke zeespiegel de behoefte de inlaatcapaciteit overschrijdt hangt af van de accumulatie van te maken keuzes binnen de voorkeursstrategie.

Samenvattend:

- De Irenesluizen dienen ook voor het inlaten van water voor een deel van de KWA: het tegengaan van zoutindringing op Hollandsche IJssel als gevolg van zeespiegelstijging (surplus debiet) en het voldoen aan de regionale watervraag bij droogte en het tegengaan van zoute kwel in de westelijke waterschappen leiden tot een aanzienlijke toename van doorvoerbehoefte.
- De overweging om het Markermeer-IJsselmeer via de ARK-route van zoetwater te voorzien wanneer de IJsselafvoer niet toereikend is of het peil- en zoutbeheer tussen Markermeer en IJsselmeer meer gedifferentieerd zou worden, telt ook op bij de benodigde doorvoercapaciteit aan de Lekzijde van het ARK.

Figuur 6-3 laat de watervraag zien voor een scenario waarin de doorwerking van zeespiegelstijging op de KWA (deel surplus HIJ, deel polderdoorspoeling) is meegenomen. Het door zeespiegelstijging toenemende KWA-debiet (voor polderdoorspoeling en surplus HIJ) is volgens bestaande verhouding (2/3 ARK, 1/3 Lopikerwaard) toebedeeld aan de KWA-onttrekking aan het ARK. Voor 4 en 5 m zeespiegelstijging is een extrapolatie gemaakt op basis van de grondwaterstudie en RMM studie. De watervraag voor peilbeheer, beregning en drinkwater neemt in de grafiek niet toe in de tijd. Dit is een aanname vanwege gebrek aan informatie. Het voorgenomen veenweidebeleid, wat naar alle waarschijnlijkheid voor een extra watervraag zorgt, is niet opgenomen in één van de posten. Tevens is de maximale hydraulische capaciteit van de Irenesluizen weergegeven (ca. 80 m³/s). Daarnaast heeft de huidige vorm van de KWA zelf ook een hydraulische beperking (ca. 15 m³/s). Deze gesommeerde watervraag zou geleverd moeten worden vanuit de Waal, via de Bernhardsluizen die in open toestand een maximale capaciteit hebben van ca. 100 m³/s.



Figuur 6-3 Samenstelling debiet Irenesluizen (WIS debiet) in een situatie waarbij de KWA actief is en er een lage rivierafvoer in de RMM is (QNWW=400m³/s) als functie van zeespiegelstijging. De termen QKWA (peilbeheer en beregning) en QRegio (peilbeheer, beregning en drinkwater in reguliere situaties) groeien niet mee met zeespiegelstijging, hier is geen data voor beschikbaar, daarom zijn deze termen vanaf 0,5 m zeespiegelstijging gearceerd weergegeven

Merk op dat indien ervoor gekozen zou worden om een toekomstige toename in KWA niet via het ARK te faciliteren maar om deze via de zuidelijke KWA-routes aan de Lek te onttrekken er nog steeds dilemma's rondom het beschikbare rivierwater en beperkingen in de doorvoer vanuit de Bernardsluizen (ARK Betuwepand) optreden.

Het NZK is in de huidige situatie al brak en vanwege zijn omvang minder gevoelig voor het 'zoetspoelen' met surplus-debiet van het ARK. Zeespiegelstijging en/of een toename van de scheepvaartintensiteit leiden tot een verdere verzilting van het NZK. De toestand van het NZK is vooral te beïnvloeden door de zoutvracht bij de schutsluizen in IJmuiden te beheersen.

Het debiet op het ARK beïnvloedt vooral zout op het ARK zelf. Het grachtenstelsel van Amsterdam en de Amstelboezem staan in een open verbinding met het NZK waardoor deze (verder) verziltten bij verziltend NZK. Bij 5 m zeespiegelstijging, zal de chloridewaarde gemiddeld tot 30% toenemen in de Amsterdamse grachten. Deze verzilting is nauwelijks te mitigeren met een verhoogd Weesp-debiet, maar wel gedeeltelijk te reduceren door middel van toevoer van zoetwater via gemaal Zeeburg en het Lozingskanaal. Dit extra debiet voor de Amstelboezem zou in dat geval ook via het WIS moeten worden voorzien.

6.4. Oprekmaatregelen om gevolgen zeespiegelstijging te mitigeren

Hieronder volgt een opsomming aan mogelijke oprekmaatregelen om de voorkeursstrategie zoetwater in deze regio langer vol te kunnen houden. Deze opsomming is zeker niet compleet, het omvat met name maatregelen die gekwantificeerd zijn binnen het KP ZSS en aanpalende programma's. Het gaat hier voornamelijk om technische maatregelen om de (verdere) zoutindringing te voorkomen en/of spoeldebiet te besparen. Besparen (trachten met minder spoeldebiet te kunnen werken dan in huidige condities) gaat strikt genomen verder

dan regionaal oprekken, maar kan mede een motivatie zijn voor het in overweging nemen van onderstaande maatregelen. De baten in de vorm van verminderde onttrekking aan de Lek komen dan deels elders in het HWS terecht.

Door Deltares (2025b) zijn in fase 2 drie oprekmaatregelen doorgerekend voor het ARK-NZK systeem. Uit de systeemanalyse van Arcadis / HydroLogic (2023b) uit fase 1 valt één oprekmaatregel af te leiden. Daarnaast is buiten het KP ZSS in het programma Klimaat Bestendige Netwerken door HKV (2023) een studie uitgevoerd naar maatregelen in de monding van het ARK, ten gunste van het HWS als geheel. Hierbij is niet gerekend aan de effecten met zeespiegelstijging, in voorliggende studie is aangenomen dat de effecten op de zoutindringing of surplus debieten één-op-één gelden voor zeespiegelstijging. Hieronder volgt een samenvatting van de oprekmaatregelen met een beschrijving van de effectiviteit op zoetwatergebruik. De maatregelen zijn opgedeeld in twee categorieën:

1. Maatregelen IJmuiden
2. Maatregelen ARK monding

1. Maatregelen IJmuiden

- *Zoutvang zoals onderzocht in ontwerpstudie SO-IJ (Deltares 2025b)*. Door de SO bij IJmuiden met een nog effectievere zoutvang (dieper) te combineren in de Velserskom, kan tot 5 m zeespiegelstijging het zoutgehalte in de monding van het ARK gelijk aan nu blijven. Daarvoor is geen extra surplus debiet bij Weesp noodzakelijk.
- *Minder schuttings met de Nieuwe Zeesluis (Deltares 2025b)*. Door het aantal schutcycli in een etmaal van 13,82 (maximaal technisch mogelijk) naar 8 te reduceren, is bij 5 m zeespiegelstijging het zoutgehalte in de monding van het ARK gelijk aan huidig (met SO en gebruik Nieuwe Zeesluis i.p.v. Noordersluis), uitgaande van een zelfde netto afvoer debiet bij IJmuiden (en dus surplus debiet bij Weesp). Dit heeft een direct effect op scheepvaart, maar geen effect op het surplus debiet bij Weesp.
- *Noordersluis in stand houden (naast Nieuwe Zeesluis) (afgeleid uit Arcadis / Hydrologic 2023c)*. Door inzet van de Noordersluis i.p.v. de Nieuwe Zeesluis in tijden van droogte, is bij 5 m zeespiegelstijging minimaal 5 m³/s extra surplus bij Weesp nodig i.p.v. ca. 15 m³/s bij alleen inzet van de Nieuwe Zeesluis. Tijdelijk gebruik van de Noordersluis i.p.v. de Nieuwe Zeesluis kan de extra surplus vraag door zeespiegelstijging bij Weesp dus met ca. 10 m³/s reduceren bij 5m zeespiegelstijging. Dit heeft wel een effect op de scheepvaart, doordat de afmetingen van de Noordersluis kleiner zijn dan de Nieuwe Zeesluis.

2. Maatregelen monding ARK

- *Bellenscherm monding ARK*. Er is al een bellenscherm aanwezig in de monding van het ARK (ter hoogte van Zeeburg). Het huidige scherm is echter beperkt operationeel en het is onzeker hoe effectief het is uitgelegd. In potentie lijkt een goed gedimensioneerd en uitgevoerd bellenscherm op deze locatie een effectieve maatregel om met tientallen procenten minder spoeldebiet een zelfde terugdringing van de zouttong te bewerkstelligen.
- *Surplus debiet verhogen (Deltares 2025b, Arcadis / Hydrologic 2023c)*. Door per 1 meter zeespiegelstijging het surplus debiet bij Weesp met ca. 3 m³/s te verhogen, kan het effect van zeespiegelstijging op de zoutindringing met de monding van het ARK volledig worden gemitigeerd. Bij een zeespiegelstijging van 5m is een extra surplus bij Weesp van 15 m³/s nodig. Uiteraard is de

belangrijkste randvoorwaarde voor deze maatregel de beschikbaarheid van zoetwater.

- *Drempel ARK monding (HKV 2023)*. Een drempel in het smalle deel van de monding van het ARK, waarbij de bodem lokaal wordt verhoogd met 90 cm (waterdiepte 4,4 m), kan voor een afname van de zoutindringing op het ARK met 1 km zorgen. Dit staat gelijk aan een afname van het benodigde debiet bij Weesp van 2 tot 4 m³/s. Door vertaald naar een zeespiegelstijging van 5 m, zou er bij implementatie van deze maatregelen een extra surplus bij Weesp van 11 tot 13 m³/s nodig zijn. Deze maatregel heeft een permanent effect op de vaardiepte voor schepen.
- *Versmalling monding ARK (HKV 2023)*. Een versmalling van de monding van het ARK van 75 naar 46 m zorgt voor een afname van de zoutindringing met 1 – 1,5 km, wat gelijk staat aan een besparing van het debiet bij Weesp van 4 tot 5 m³/s. Door vertaald naar 5 m zeespiegelstijging is door de maatregel geen 15 m³/s extra surplus bij Weesp nodig, maar ca. 10 m³/s. De maatregel heeft een permanent effect op de scheepvaart passage.
- *Vergroten debiet fluctuaties Irenesluizen (HKV 2023)*. Uit het modelonderzoek blijkt dat meer fluctueren van het WIS debiet bij Wijk bij Duurstede kan zorgen voor meer menging in de monding van het ARK, waardoor de zoutindringing met 2 km af kan nemen. Dit is gelijk aan de berekende toename van de zoutindringing bij een zeespiegelstijging van 5m. In de praktijk is hier mee getest, en dit bleek een stuk minder effectief dan verwacht. Deze maatregel heeft geen effect op het dag-gemiddeld debiet bij Weesp, maar mogelijk wel op het schutproces bij de Irenesluizen en de stroomsnelheden op het ARK.
- *Beweegbare zoutkering in het ARK (HKV 2023)*. Een beweegbare zoutkering in de monding van het ARK, waar bij nijpend watertekort een deur het ARK in geschoven kan worden, met een spleet van 2 m hoog bij de bodem om het ARK debiet de zouttong terug te laten persen zorgt indicatief voor een afname van de zoutindringing op het ARK van 10 km. Dit effect staat gelijk aan een verhoging van het WIS debiet met 12 tot 38 m³/s. In de verkenning van deze maatregel is rekening gehouden met het passeren van schepen door de zoutkering afwisselend een half uur te openen en sluiten. In het gunstigste geval kan deze maatregelen meer surplus debiet mitigeren dan het benodigde extra surplus om zeespiegelstijging te mitigeren.
- *Trapjeslijn Binnen-IJ richting monding ARK (HKV 2023)*. Hierbij wordt het Binnen-IJ stapsgewijs verondiept richting de monding van het ARK, tot een bodemhoogte gelijk aan het ARK. Voornamelijk de huidige diepe geulen worden daarbij opgevuld. Dit zorgt voor een afname van de zoutindringing op het ARK met 3 tot 4 km, wat gelijk staat aan een besparing van het debiet bij Weesp met 6 tot 17 m³/s. Door vertaald naar 5 m zeespiegelstijging kan deze maatregel in het gunstigste geval de extra surplus vraag bij Weesp geheel teniet doen.

Het lijkt goed mogelijk om de effecten van zeespiegelstijging bij IJmuiden op de zoutindringing volledig te mitigeren, bij gelijkblijvend aantal schuttingen en schutsluizen. Minder of anders schutten bij het schutcomplex IJmuiden is ook zeer effectief in het voorkomen van de extra zoutindringing. De mitigatie is op verschillende manieren mogelijk. Een toename van het surplus debiet bij de monding van het ARK is in lijn met de huidige voorkeursstrategie strategie, maar dit water moet wel beschikbaar zijn. Uit voorgaande paragraaf blijkt dat vanaf een zeespiegelstijging van 2 m de toename in watervraag voor hydraulische knelpunten

in de bovenstroomse infrastructuur zorgt. Dat is ook nog exclusief de verwachte toename van de watervraag door droogte en het aankomend veenweidebeleid. Technische oplossingen in de monding van het ARK lijken potentieel ook effectief in het beheersen van de zoutindringing. In de huidige situatie is een bellenscherm aanwezig, waarvan de effectiviteit nog wordt onderzocht.

Een andere optie die niet benoemd is in de gebruikte literatuur, maar uit de beschouwing van de resultaten voortkomt, is toestaan dat het ARK tijdelijk of geleidelijk iets meer verzilt. Hier kan vervolgens op verschillende manieren mee omgegaan worden. Binnen het kader van het houdbaar houden van een zoet ARK onder de huidige strategie is een mogelijkheid om dit tijdelijk 'opzouten' van het ARK situationeel terug te dringen met een kortstondig verhoogd surplus. Buiten het kader van de instandhouding van de buffer kan gedacht worden aan het minder kwetsbaar maken van gevoelige functies in dit deel van het ARK.

Voor het samenstellen van de oprekpakketten (zie Hoofdstuk) is voor deze regio in alle drie de oprekpakketten voor één maatregel gekozen, te weten: het verdiepen van de zoutvang onder de SO. Uit onderzoek (zie hierboven) blijkt dat door deze maatregel de extra binnenkomende zoutvracht door de schutsluizen zelfs bij 5 m zeespiegelstijging volledig afgevoerd kan worden. Daarvoor is geen extra surplus debiet bij Weesp noodzakelijk (geen extra zoetwater vraag) en geen maatregelen op het schutbedrijf bij de sluisen. Kiezen voor de maatregel 'extra surplusdebiet bij Weesp' past mogelijk beter bij de huidige voorkeurstrategie, maar lijkt niet realistisch gezien de toenemende druk op de vraag naar zoetwater. Maatregelen op het schutbedrijf kunnen in tijden van watertekort altijd nog worden genomen, maar lijken niet logisch om permanent te nemen om de permanente toename van zoutvracht te compenseren. De beschreven maatregelen in de monding van het ARK zijn in het onderzoek niet verder gekwantificeerd waardoor deze voor de analyse van de oprekpakketten niet goed beschouwd kunnen worden.

6.5. Conclusies houdbaarheid en oprekbaarheid

Zeespiegelstijging beïnvloedt de verzilting van het ARK-NZK systeem met name doordat de zoutvracht vanuit de schutsluizen toe neemt. Het effect van zoute kwel wat vanuit de regio wordt afgevoerd op het NZK lijkt nihil te zijn. Bij 5 m zeespiegelstijging kan, bij behoud van het huidige surplus debiet bij Weesp en het huidige schutbedrijf, de zouttong ca. 2 km verder het ARK optrekken. Om de zouttong niet verder dan de huidige situatie het ARK op te laten trekken is een surplus debiet bij Weesp nodig van ca. 3 m³/m zeespiegelstijging.

Door het verder verdiepen van de zoutvang bij de SO bij IJmuiden lijkt het goed mogelijk te zijn om de toename van zoutindringing op het ARK door zeespiegelstijging volledig te mitigeren. Hiervoor is geen permanente toename van het surplus-debiet bij Weesp nodig en zijn ook geen permanente maatregelen voor het schutbedrijf nodig.

Zeespiegelstijging heeft een direct effect op de afvoercapaciteit van het spui-maalcomplex. Bij 0,4 m zeespiegelstijging zijn er geen spui-mogelijkheden meer, al het water moet verpompt worden. Vanuit het thema wateroverlast zal ook de huidige pompcapaciteit vergoot moeten worden, hiervoor worden reeds plannen gemaakt, deze opgave is maatgevend voor de pompcapaciteit.

Tussen 1 en 2 m zeespiegelstijging gaat de hydraulische aanvoercapaciteit van de Irenesluizen knellen. De capaciteit van het regionale doorvoerstelsel van de KWA gaat reeds eerder knellen. Vanaf 2 m zeespiegelstijging gaat ook de hydraulische capaciteit van de Bernhardsluizen knellen als de deze gelijktijdig moet toeleveren aan de het ARK-Noordpand en het Amerongen-Hagestein pand.

7 IJsselmeergebied

7.1. Essentie systeemwerking zoetwaterbuffer IJsselmeergebied

7.1.1. Algemene beheerstrategie

Het IJsselmeergebied (IJsselmeer en Markermeer) is de spreekwoordelijke nationale regenton van Nederland. Het is de grootste zoetwaterbuffer in het HWS en speelt een sleutelrol in de zoetwaterstrategie. De waterbalans wordt actief en expliciet beheerd door het flexibel peilbeheer, gegeven afvoercondities, neerslag- en verdampingverwachtingen en verwachte regionale watervraag. De IJsselafvoer is in de zomer onder het huidige klimaat het meest bepalend voor het in stand houden van de zoetwaterbuffer van de IJsselmeerregio, zowel in termen van watervolume als zoutgehalte. Als het systeem in dynamisch evenwicht is (d.w.z. als de buffer robuust functioneert), zorgen de IJsselafvoer en regio afvoer en neerslag ervoor dat de oplopende zout concentraties in de zomer worden gecompenseerd door lage zout concentraties in het winterhalfjaar zodat de jaargemiddelde concentratie bij Andijk ruim onder de 150 mg/L blijft. In aanvulling op dit jaargemiddelde zijn langdurige (meerdere maanden) overschrijdingen van deze waarde gedurende de zomer ongewenst, maar geen expliciete norm of beheerdoel.

Door (tijdelijk) peilopzet in het voorjaar of de zomer kunnen perioden van lage rivierafvoer en hoge vraag worden overbrugd. Het grootste dilemma in de beheerstrategie is de afweging tussen volumebeheer en zoutbeheer. Peiluitzakking wordt zo veel mogelijk beperkt of vermeden door zo zuinig mogelijk met het beschikbare volume om te gaan, aangezien te lage peilen tot negatieve impact voor waterveiligheid, regionale inname en buitendijkse natuur leiden. Het zoutbeheer vraagt echter om een minimaal debiet ten behoeve van uitspoeling van de verzilte erosiekuilen nabij de spuisluisen. Ontlasting van de rest van het meer van het zout uit de schutsluisen vraagt ook om een zeewaarts debiet. Te hoge zoutgehalten op het meer leiden tot impact op de drinkwaterwinning bij Andijk, tot verhoogde chloride-waarden van het innamewater van de regio (wat doorwerkt op landbouw en natuur in de regio) en tot impact op zoete aquatische natuur in het meer. Tegelijk fungeren de sluisen en spuien in de Afsluitdijk als passages voor vis, waarbij een bepaalde verzilting aan de binnenzijde nabij de sluiscomplexen onvermijdelijk en vanuit vistrek gezien gewenst is.

Omwille van verziltingsbeperking tijdens droogte zijn minimale spuidebieten vastgesteld waarbij, bij de huidige zeespiegel en spui- en schutsluis-configuratie, het zoutgehalte gedurende een droge zomer geleidelijk oploopt, maar langzaam genoeg om in het huidig klimaat niet te vaak⁸ boven een zomerse chloridewaarde van 150 mg/L te komen. Bij deze minimale debieten wordt een bepaalde mate van zoutindringing richting de rest van het meer dus geaccepteerd. Het beheer wordt in principe niet actief gestuurd op basis van actuele chloridewaarden, zoals dat voor peil en afvoer wel gebeurt. Echter, recentelijk is wel een aanvullend beheerprotocol in geval van watertekort opgesteld, waarbij gebruik wordt gemaakt van een vernieuwd meetnet voor monitoring van het chloridegehalte. In het model van Arcadis/Hydrologic (2025) is dit protocol voor chloride niet geïmplementeerd.

⁸ 'Niet te vaak' is niet expliciet gespecificeerd. De operationeel vastgestelde minimale spui debieten zijn gebaseerd op veldmetingen en ervaringsfeiten uit de recente droge jaren.

7.1.2. *IJsselmeer*

Wat betreft zoutvracht op het IJsselmeer en de invloed van de zee is vooral de zoutintrusie bij de Afsluitdijk van belang. Een deel van de zoutvracht komt binnen via de schutsluizen, het andere deel komt binnen via de spuisluisen, in de vorm van lekkage en in de vorm van visvriendelijk spuien (in de praktijk veelal buiten perioden van droogte). Overige zoutlasten komen uit de omliggende regionale watersystemen, Markermeer en kwel via de waterbodem (m.n. nabij de Afsluitdijk).

Bij voldoende IJsselafvoer wordt met spuien de verzilting beperkt gehouden tot het noordwestelijke deel van het IJsselmeer. De chlorideconcentraties bij Andijk en andere meetpunten verder weg van de Afsluitdijk volgen dan ongeveer die van de IJssel. Als de afvoer daalt, nemen de chlorideconcentraties geleidelijk toe, doordat zout vanuit de spui- en schutsluizen verder binnendringt op het IJsselmeer. In het gebied bij Andijk kunnen de chloridewaarden dan tijdelijk oplopen tot boven de 150 mg/L. Het oplopen van de chlorideconcentratie in de zomer is afhankelijk van de hoeveelheid zout die binnendringt en kan worden teruggespoeld naar de Waddenzee. De zoutlast is maximaal in de zomer als gevolg van het schutten van de recreatieschepen bij de Afsluitdijk en het oplopen van het chloridegehalte aan de Waddenzeezijde doordat er in de zomer gemiddeld minder wordt gespuid. Ook de oplopende chlorideconcentratie van het instromende rivierwater en verdamping dragen ongunstig bij tijdens droogte en hitte. De verdampingsflux heeft in de zomer een typische bandbreedte van ca. 60 ± 20 m³/s (overeenkomend met 3 ± 1 mm/dag). Tot slot speelt wind een rol bij de menging en circulatie in het meer.

Verziltingsbestrijding geschiedt door het afvoeren van verzilt water naar de Waddenzee, voor het overgrote deel via spuien en voor een zeer klein deel via zouthevels. De vastgestelde minimale meerdaags gemiddelde spuidebieten onder normale omstandigheden tijdens de zomer zijn 70 m³/s, evenredig verdeeld over beide spuicomplexen. Deze watervraag ten behoeve van verziltingsbestrijding legt in combinatie met hoge regionale watervraag en verdamping een hoge druk op het systeem in tijden van lage IJsselafvoer. In tijden van (dreigend) watertekort met de verwachting dat het meerpeil daalt tot onder NAP -0,3 m, wordt dit spuidebiet om deze reden tot meerdaags gemiddeld 40 m³/s gereduceerd. "Meerdaags gemiddeld" betekent dat de erosiekuilen om de 5 tot 7 dagen zo veel mogelijk zoet gespuid worden. Om de kuilen zo zoet mogelijk te krijgen is een minimale spuisterkte nodig. Reductie van het meerdaags gemiddelde van 70 naar 40 m³/s betekent dat het interval waarmee de spuien worden toegepast met een paar dagen verlengd wordt waardoor er in de tussentijd meer zout uit de kuilen het meer op trekt. Het betekent niet dat de sterkte van de spui zelf verminderd wordt. Consequentie van deze reductie in spuifrequentie is dat onder omstandigheden van (dreigend) watertekort een sterker oplopende verzilting wordt geaccepteerd.

Er zijn veel ontwikkelingen gaande in het IJsselmeer. Bij Kornwerderzand wordt bijvoorbeeld de vismigratierivier aangelegd. Hierbij is als ontwerpeis meegegeven, dat er geen extra zoutbezwaar richting het IJsselmeer mag optreden. Bij een (dreigend of feitelijk) watertekort kan deze passage tijdelijk worden gesloten. De vismigratierivier is in de Systeemanalyse daarom buiten beschouwing gelaten. Ook de aanleg van een grotere schutsluis bij Kornwerderzand (met mitigerende maatregelen) en mogelijke aanpassingen van de bodemligging en het instellen van brakke zones bij Den Oever ten behoeve van natuur zijn in deze studie niet beschouwd, omdat het nog geen vaststaande besluiten of definitieve ontwerpen betreft. De installatie van gemalen naast en uiteindelijk in plaats van spuien en de

uitbreiding van de spuigroepen bij Den Oever is in de scenario's wel (zij het vereenvoudigd) meegenomen.

7.1.3. *Markermeer*

Voor het Markermeer is kwelwater dat wordt uitgeslagen uit de omliggende poldergebieden één van de belangrijkste bronnen van zout. Daarnaast bereikt zout vanuit het NZK (Binnen-IJ) via sluizencomplex Schellingwoude (o.a. Oranjesluizen) het Markermeer. De verversing van het Markermeer geschiedt via de uitwisseling met het Binnen-IJ en via de sluizen in de Houtribdijk. De verblijftijd in het Markermeer (ca. 18 – 24 maanden) is groter dan in het IJsselmeer (ca. 3 – 4 maanden).

7.1.4. *Zoetwaterfuncties*

De kwetsbaarheid voor verzilting wordt in het gebied sterk bepaald door de functies die afhankelijk zijn van zoetwater. Voor natuur en landbouw varieert de zouttolerantie afhankelijk van het soort natuur of gewas. In het IJsselmeer bij Andijk wordt water ingenomen door drinkwaterbedrijf PWN voor drinkwaterbereiding en proceswater voor industrieel gebruik. Voor beide geldt een jaargemiddelde chloride normwaarde van 150 mg/L. Deze waarde wordt in droge zomers incidenteel overschreden. Omdat het een jaargemiddelde norm betreft, leidt een incidentele overschrijding niet direct tot problemen, behalve als de verzilting lang (meerdere maanden) aanhoudt. Dit was bijvoorbeeld het geval in 2017 en 2018. Het IJsselmeersysteem is bij goed beheer niet erg gevoelig voor overschrijding van waarden van 150 mg/L. Echter, als er zich overschrijdingen voordoen is dat meestal in zeer droge zomers met zeer lage rivierafvoeren waarbij de chlorideconcentratie van het IJsselwater de waarde 150 mg/L kan naderen. Door deze combinatie van factoren neemt de effectiviteit om het meer zoet te spoelen af. Zoetspoelen om het IJsselmeersysteem na een overschrijding van de normwaarde te herstellen kan enkele maanden duren.

Wat betreft gemiddelde innamedebieten zijn de hoeveelheden ten behoeve van drinkwater van de orde van enkele m³/s (maximaal 4 m³/s). De totale innamedebieten uit IJsselmeer en Markermeer voor regionaal gebruik tijdens droogte zijn van de orde 110 m³/s (Basisprognoses'18, ~T20 watervraag), waarvan 10% voor polderdoorspoeling om interne verzilting tegen te gaan (Deltares, 2022).

Op het Markermeer rust een reservering voor de functie drinkwater. Vanwege het hogere chloridegehalte op het Markermeer dan op het IJsselmeer, is deze functie tot op heden nog niet geëffectueerd.

7.2. **Gevolgen van zeespiegelstijging op de zoetwaterbuffer**

7.2.1. *Algemeen*

Zeespiegelstijging werkt op de volgende manieren door op het Markermeer en IJsselmeer.

Rond en in het Markermeer is het effect van zeespiegelstijging beperkter dan rond het IJsselmeer. De zoutvracht als gevolg van zoute kwel neemt rond het Markermeer per saldo slechts zeer beperkt toe en andere directe invloeden zijn er niet. Indirect zijn er wel effecten door afvoer van (potentieel verzilt) IJsselmeerwater richting het Markermeer en door de verbinding met het NZK bij sluizencomplex

Schellingwoude. Voor dit laatste is in de huidige studie verondersteld dat met voldoende doorspoeldebiet en maatregelen bij het spui-maalcomplex bij IJmuiden de oostzijde van het NZK (Binnen-IJ) niet verder verzilt door zeespiegelstijging ten opzichte van huidige condities (zie Hoofdstuk 6).

Voor het IJsselmeer zijn de doorwerkingen van zeespiegelstijging sterker, zowel op peilbeheer als zoutbeheer:

1. De spuicapaciteit van de spuisluizen neemt af. Ter aanvulling of vervanging hiervoor worden spui groepen uitgebreid en zijn pompen nodig. Dit heeft invloed op de instroom en afvoer van zoutwater in en uit de erosiekuilen.
2. Het versterkt de binnenkomende zoutlek via spuien (en gemalen) en schutten. Om dit tegen te gaan, moet de doorspoelbehoefte van het IJsselmeer vergroot worden.
3. Zeespiegelstijging versterkt de zoute kwel in polders nabij de kust in Noord-Holland, Friesland en Groningen. Dit vergroot de regionale watervraag aan het IJsselmeer voor polderdoorspoeling. Een klein deel van het doorgespoelde zoutere water komt in het IJsselmeer terecht, het grootste deel van het zoutere water wordt direct op zee uitgeslagen (bijvoorbeeld de Wieringermeer).
4. Het versterkt de zoute kwel via de bodem van het IJsselmeer nabij de Afsluitdijk.

Een vijfde verziltingsmechanisme dat op dit moment nog geen grote rol speelt, maar in de toekomst wel een grotere rol kan gaan spelen, is overslag van zeewater over de Afsluitdijk tijdens storm. De hieruit volgende extra zoutbelasting van het IJsselmeer in het stormseizoen als functie van zeespiegelstijging is in de systeemanalyses niet nader gekwantificeerd.

Uit de systeemanalyses is gebleken dat de hierboven als vierde genoemde term (directe zoute kwel) van ondergeschikt belang is: momenteel gaat het om minder dan 0,5 kg/s en dit loopt bij 3m zeespiegelstijging op tot ca. 2,5 kg/s, nog steeds niet meer dan enkele procenten ten opzichte van de zoutvracht via de sluisen in de Afsluitdijk.

De drie andere hierboven genoemde termen (nummer 1, 2 en 3) zijn wel bepalend voor de houdbaarheid van de zoetwaterbuffer IJsselmeer, zowel in termen van beschikbare watervolumes als in termen van chloridegehalte. In het kort kan worden gesteld dat de afvoercapaciteit van spuien onder vrij verval het snelst afneemt als gevolg van zeespiegelstijging. De gecombineerde berekeningen van de grondwaterstudie en de regionale analyses laten vervolgens zien dat per meter zeespiegelstijging de doorspoelbehoefte op land sneller toeneemt dan de afvoerbehoefte t.b.v. het tegengaan van de zoutlast via sluisen in de Afsluitdijk. De totale doorwerking van deze aspecten op de statistiek van chlorideconcentraties en peil wordt hieronder toegelicht.

7.2.2. *Doorwerking zeespiegelstijging op de spuicapaciteit*

Het huidige systeem is ingericht op het kunnen afvoeren van water door middel van spuien onder vrij verval. Voor peilbeheer zijn de totale afgevoerde volumes per tijdeenheid bepalend. Zoutbeheer is kritischer. Zoals hierboven al gezegd, vergt zoetspoelen van de erosiekuilen een bepaalde minimale spuisnelheid gedurende een spuingang om de gelaagdheid in de kuilen te overwinnen. Hierbij zijn dus zowel het

verval als de lengte van het spuienster relevant. Bij stijgende zeespiegel zal de effectieve afvoercapaciteit (spuivenster rond laagwater) snel afnemen: bij 0,5 m zeespiegelstijging kan er (vrijwel) niet meer gespuid worden bij Den Oever. Bij 1m zeespiegelstijging lukt dit ook niet meer bij Kornwerderzand (Deltares 2025b). De piekcapaciteit neemt bij lagere zeespiegelstijgingen ook al af.

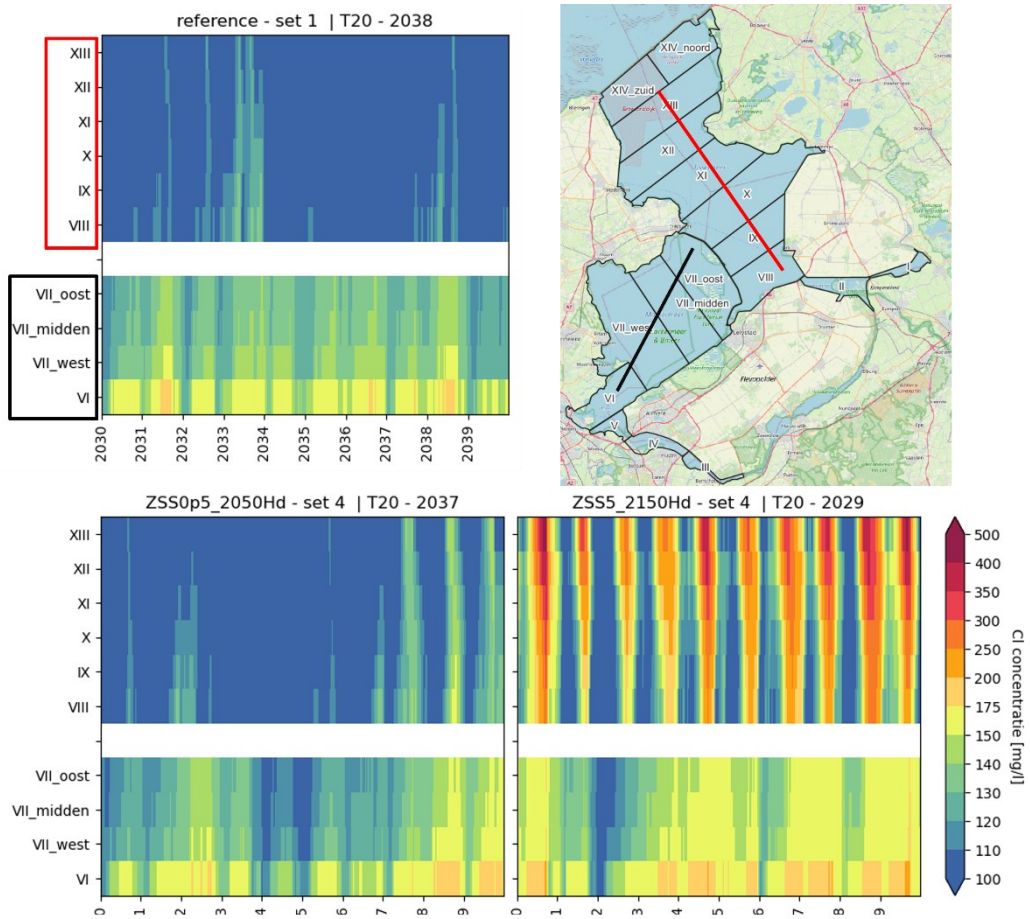
In de ISWP studie (Rijkswaterstaat 2019) zijn verschillende combinaties onderzocht van spui- en maalcapaciteiten omwille van meerpeilbeheersing onder combinaties van rivierafvoer, regionaal waterbezwaar, meerpeil-varianten, wind en zeespiegel (tot 2,8m). De kern van de adviezen uit ISWP is dat, om het waterveiligheidsniveau te handhaven, in welke variant dan ook, de totale afvoercapaciteit van gemalen en spuien nog steeds minimaal van de orde 1400 m³/s daggemiddeld moet zijn bij 2,8m zeespiegelstijging. Wat dit advies voor zoutbeheersing betekent is echter onzeker. Het hangt er namelijk vanaf hoe dit debiet wordt gerealiseerd (verhouding inzet gemalen, spuiokers) omdat dat bepaalt of de spuien nog krachtig genoeg zullen zijn om de erosiekuilen te legen. De afname in spuicapaciteit betekent echter dat sowieso moet worden overgestapt op gedeeltelijk en later volledige afvoer via pompen. Tijdige doelgerichte inzet van de pompen omwille van de zoutbeheersing in plaats van spuien lost de bovengeschetste onzekerheid op. Het voordeel van pompen ten opzichte van spuien is namelijk dat zij een relatief beperktere zoutlast en (mits goed gedimensioneerd) een efficiëntere afvoer van zout met zich meebrengen. Bij spuien moet het zout uit de erosiekuilen worden weggemengd, wat relatief hoge stroomsnelheden vergt en meer risico oplevert op ongecontroleerd opmengen van zout. Pompen kunnen met diepere onttrekking en kleiner debiet het zout veiliger afvoeren. In de modelstudie van Arcadis-HydroLogic (2025) is aangenomen dat bij 0m zeespiegelstijging het peil en zout geheel via spuien wordt beheerst, bij 0,5m 50% via spuien, 50% via gemalen, en bij 1m en hoger alles middels gemalen. In het IJsselmeermodel is de toegepaste relatie tussen de afgevoerde debieten en zout uit de erosiekuilen in overeenstemming gebracht met deze overgang van spuien naar malen.

7.2.3. *Doorwerking zeespiegelstijging op zoutvrachten*

Door zeespiegelstijging nemen de zoutlekken door de schut- en spuisluisen toe. De gevoeligheidsanalyse uit fase 1 (Arcadis/HydroLogic 2023d) laat ook zien dat mogelijke toekomstige veranderingen in de sluisen of het schutbedrijf, bijvoorbeeld toenemend aantal schuttingen of de aanleg van een diepere of bredere sluiscolk, zonder mitigerende maatregelen al snel een vergelijkbare toename in zoutlast als zeespiegelstijging van één of enkele meters.

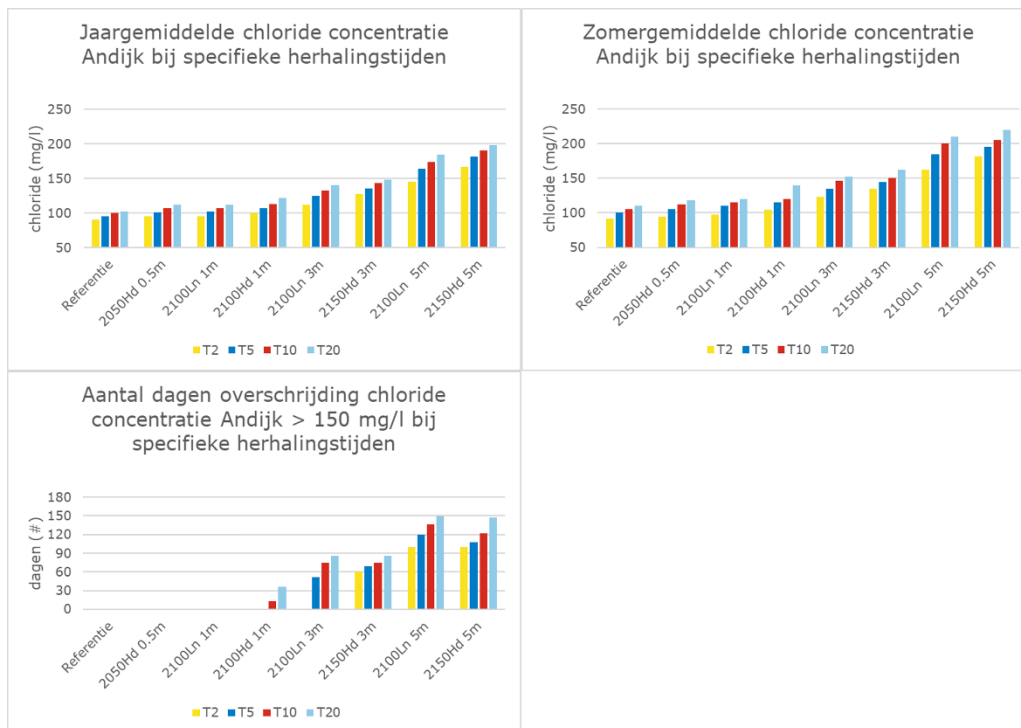
Het compenseren van de toenemende zoutvracht via de sluisen vraagt een hoeveelheid zoetwater die drukt op de volumebalans van het IJsselmeergebied en concurreert met de inzet van het rivierwater en de waterbufferschijf voor andere doelen.

Uit de verdiepende studie uit fase 2 (Arcadis/HydroLogic 2025) blijkt dat bij voortzetten van het huidige beheer de chlorideconcentraties door zeespiegelstijging op het IJsselmeer en Markermeer toenemen. Uit Figuur 7-1 blijkt dat in alle doorgerekende scenario's de chlorideconcentratie in de winter wel altijd weer onder de 150 mg/L zakt. De interjaarlijkse variatie in de winterwaarden neemt wel toe en de mate en duur van de concentratiedaling (winterse 'ontlading' van het systeem) nemen af met toenemende zeespiegelstijging.



Figuur 7-1 Hovmöller diagrammen van de ruimtelijke en temporele dynamiek van zoutconcentraties in het IJsselmeer en Markermeer. Langs de verticale assen staan de bakjes van het bakjes model, welke in het figuur rechtsboven staan weergegeven, inclusief de raai waarlangs de verticale as is getrokken. Op de horizontale as staan 10 (fictieve) jaren. In het veld zijn met kleuren de chlorideconcentraties weergegeven. Linksboven is het figuur weergegeven van de referentie situatie, huidig klimaat en 0 m zeespiegelstijging. Linksonder het figuur voor het klimaatscenario 2050Hd en een zeespiegelstijging van 0,5 m. Rechtsonder het figuur voor hetzelfde klimaatscenario maar bij een zeespiegelstijging van 5m.

De samenvattende Figuur 7-2 laat zien dat overschrijdingen van 150 mg/L in zomer- en jaargemiddelden bij stijgende zeespiegel en extremere klimaatcondities vaker en langduriger voorkomen.



Figuur 7-2 Samenvatting van de herhalingstijdenstatistiek afgeleid uit Arcadis/HydroLogic (2025), voor de verschillende klimaatscenario's (doorgevoerd voor de variabelen rivierafvoer, verdamping en watervraag regio) in combinatie met zeespiegelstijging, met betrekking tot gemiddelde chloride concentraties bij Andijk. Rechtsboven: zomergemiddelde (15 april t/m 30 september); linksboven: jaargemiddelde; onder: aantal dagen overschrijding > 150 mg/L.

Figuur 7-2 laat ook zien dat vanaf 3m zeespiegelstijging de statistisch eens in de 20 jaar (T20) optredende zomergemiddelde chlorideconcentratie bij Andijk altijd boven de 150 mg/L uitkomt, maar onder de 250 mg/L blijft. Dit geldt ongeacht het bij die zeespiegel toegepaste Ln of Hd klimaatscenario. Zeespiegelstijging heeft dus meer invloed op laagfrequente chloride-statistiek dan de bandbreedte in meteorologie en hydrologie tussen de scenario's: de variaties in verdamping en chloridegehalten van de IJssel spelen een ondergeschikte rol ten opzichte van de toenemende zoutlast uit zee. Vanaf 3m zeespiegelstijging blijkt een nat versus droog klimaatscenario ook weinig invloed meer te hebben op de duur van de laagfrequente (T10, T20) overschrijdingen. Bij 5m zeespiegelstijging geldt dit ook voor de hoogfrequente gebeurtenissen en overschrijdt de chlorideconcentratie bij Andijk de 150 mg/L elke twee jaar gedurende 3 maanden.

Het Markermeer is in veel mindere mate gevoelig voor verzilting door zoutinrusie bij de Afsluitdijk en dus minder gevoelig voor zeespiegelstijging. Het Markermeer is wel gevoelig voor zoutinrusie via het sluiscomplex bij Schellingwoude indien het NZK door zeespiegelstijging zouter wordt. Voor detailresultaten van het Markermeer wordt verwezen naar het deelrapport Arcadis/HydroLogic (2025).

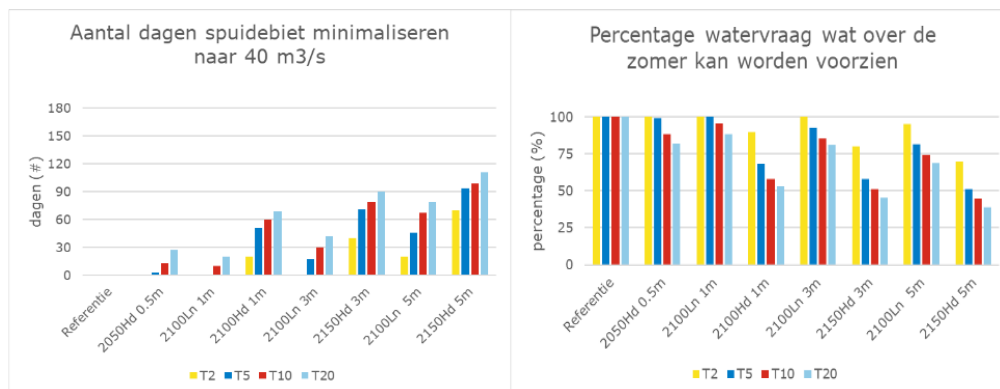
7.2.4. *Doorwerking zeespiegelstijging op peiluitzakking en watertekort*
Aangezien de berekeningen in de systeemanalyse uitgaan van de huidige beheerstrategie (waarbij peilbehoud over zoutbestrijding prevaleert), werkt de toenemende zoutlast op het meer niet door op statistiek van watertekort en peiluitzakking. Zeespiegelstijging zorgt via interne verzilting echter ook voor toename van de regionale watervraag, indien ervoor gekozen wordt om de toename

van interne verzilting middels doorspoeling te mitigeren. Via deze route heeft zeespiegelstijging dus alsnog effect op de peilstatistiek.

De zoetwatervraag ter bestrijding van zoute grondwaterkwel in de omliggende landbouwgebieden neemt door zeespiegelstijging sneller toe dan recht-evenredig, zoals is samengevat in Hoofdstuk 3 (op basis van de grondwaterstudie Deltares 2022). In de huidige situatie is er in de grondwaterstudie (samengevat in Hoofdstuk 3 en Tabel 3-1) een doorspoelbehoefte uit het IJsselmeergebied ter bestrijding van verzilting in de regionale watergangen van ca. 12 m³/s berekend. Dit debiet neemt bij 0,5 m zeespiegelstijging toe tot ca. 38 m³/s, bij 1 m zeespiegelstijging tot ca. 66 m³/s, bij 3m zeespiegelstijging tot ca. 134 m³/s en bij extrapolatie naar 5 m zeespiegelstijging tot ca. 200 m³/s. Deze toename correspondeert met de situatie waarbij wordt vastgehouden aan huidige chloride-streefwaarden in polders en regionale boezems en doorgespoeld areaal en er geen dubbel gebruik van dit extra spoelwater voor peilbeheer wordt aangenomen. Mogelijk is in het regionaal systeem in werkelijkheid nog wel enig hergebruik van water mogelijk, maar zelfs bij hergebruik van orde 50% neemt deze watervraag met tientallen m³/s per m zeespiegelstijging toe. Deze zeespiegelstijging-gedreven toename in watervraag is (voor het zomerhalfjaar) opgeteld bij de uit de klimaat-scenario's afgeleide watervraag van de regio. Beide trendmatige veranderingen samen leiden tot verandering in watertekorten zoals berekend in het model. De indicatoren die hiervoor gehanteerd zijn, zijn het aantal dagen dat het doorspoeldebiet bij de Afsluitdijk wordt beperkt tot 40 m³/s vanwege peiluitzakking onder NAP -0,3 m en het percentage regionale watervraag dat over de gehele zomer kan worden voorzien.

Voor peiluitzakking (Figuur 7-3) blijkt de trend in statistiek anders te zijn dan voor chloride. Peil en watertekort worden sterker dan chloride beïnvloed door de meteorologische en hydrologische klimaattrends. De verandering wordt al merkbaar vanaf 0,5 m zeespiegelstijging. Bij die zichtwaarde worden er bij het droge klimaatscenario (2050Hd) eens in de 5 jaar al kortstondige peiluitzakkingen onder NAP -0,3 m berekend. Bij een herhalingstijd van 20 jaar (T20) telt de duur van peiluitzakkingen bij dat scenario op tot nagenoeg 30 dagen per zomerperiode. Bij 1m zeespiegelstijging wordt er bij het nattere klimaatscenario (2100Ln) een min of meer vergelijkbare peiluitzakking berekend, terwijl het drogere klimaatscenario (2100Hd) een verveelvoudiging in aantal dagen laat zien gegeven een bepaalde herhalingstijd.

De trends in percentage watertekort voor de regio tonen in Figuur 7-3 in wezen het complement van de peiluitzakking: tussen de droge en natte klimaatscenario's is een groot verschil in het aantal dagen dat er een tekort is. Zeespiegelstijging versterkt vervolgens het effect vanwege de toename van de watervraag. Bij 3m zeespiegelstijging en verder nemen ook de percentages voorziene watervraag voor de natte scenario's significant af, c.q. de herhalingstijden van watertekort toe.



Figuur 7-3 Samenvatting van de herhalingstijdenstatistiek afgeleid uit Arcadis/HydroLogic (2025) voor de verschillende klimaatscenario's (geprojecteerd voor rivierafvoer, verdamping, watervraag regio) in combinatie met zeespiegelstijging. Boven: het aantal dagen dat het spuidebiet bij de Afsluitdijk wordt bijgesteld van 70 naar 40 m³/s, als indicator voor uitzakking van het meerpeil tot NAP -0,3m of lager. Onder: Percentage van de watervraag dat in de zomerperiode kan worden voorzien.

Nogmaals wordt benadrukt dat er een terugkoppeling is tussen peiluitzakking en verzilting: bij frequentere peiluitzakking moet het doorspoeldebiet vaker beperkt worden tot het minimum, wat resulteert in een toename in verzilting. Dit effect wordt in de analyse echter deels tenietgedaan doordat bij 0,5 m zeespiegelstijging en hoger, pompen worden ingezet die bij verzilting efficiënter (met minder water meer zout uitpompen) bestrijden. Deze overstap heeft dus een dempend effect op de zeespiegelgevoeligheid van de chloride-resultaten.

7.2.5.

Onzekerheden

Opvallend in de resultaten van Arcadis/HydroLogic 2025 is dat de referentierun geen chloride concentratie overschrijdingen >150 mg/L bij (bakje) Andijk, geen peiluitzakking onder NAP -0,3 m en geen watertekort laat zien, zoals ook te zien is in bovenstaande figuren. De kalibratiesom met het model voor de historische periode 2020-2022 laat wel overschrijdingen zien (niet opgenomen in deze rapportage, zie Arcadis/Hydrologic 2025). De verklaring voor dit verschil ligt enerzijds in het feit dat de kalibratieperiode het jaar 2022 omvat, een jaar waarvan de herhalingstijd volgens de statistiek van het huidige klimaat buiten de bandbreedte van T1 tot T20 ligt. Anderzijds valt niet uit te sluiten dat de analyse op basis van de momenteel best beschikbare input een bias richting 'relatief zoete' resultaten vertoont, ook voor T20 en frequentere events. De koppeling tussen peiluitzakking en verminderen van zoetspoeling zorgt voor een scherpe overgang in de zoutbelasting van het systeem (wel of niet lekkage van zout uit de erosiekuilen naar de rest van het IJsselmeer) waardoor de chloride-respons van het bakjesmodel sterker dan lineair gevoelig is voor onzekerheid in de forceringen. Ook gestapelde onzekerheid in de berekende chlorideconcentraties van het IJsselwater draagt bij aan onzekerheid in de uitvoerstatistieken: een eventuele overschatting in Lobith-afvoer combineert met een onderschatting in de empirische (huidig klimaat) regressierelatie tussen rivierafvoer en chloride (KWR 2021). Deze twee afwijkingen verlagen beide de concentraties in het bakjesmodel. Een eventuele systematische fout in chloride werkt sterker door in statistiek van overschrijding van drempelwaarden naarmate de geschatte concentraties dichter in de buurt van de drempelwaarde liggen. De gemodelleerde relatieve trends en relatieve gevoeligheden zijn desalniettemin voldoende betrouwbaar voor het doel waartoe ze hier gebruikt worden: inschatting van de systeemgevoeligheid op een tijdhorizon

vanaf 2050 en verder. Voor eventuele toepassing van het in KP ZSS ontwikkelde bakjesmodel van het IJsselmeer voor kortere-termijn vraagstukken (trends in de komende decennia) wordt aanbevolen om de gevoeligheid voor bovengenoemde onzekerheden nader te kwantificeren.

Tot slot wordt opgemerkt dat bij alle hier getoonde berekeningen is uitgegaan van de bodemligging in het rivierengebied en de daarbij behorende afvoerverdeling over de splitsingspunten Pannerdense Kop en IJsselkop volgens de situatie van 2018. Dit betekent dat er een inspanning in het behouden van deze afvoerverdeling richting de verdere toekomst is verondersteld. Bij voortschrijdende erosie en daarmee gepaard gaande voortschrijdende verschuiving van de rivierdebieten ten gunste van de Waal en ten koste van de IJssel, zal het IJsselmeer gevoeliger reageren op klimaatverandering en zeespiegelstijging dan hier gepresenteerd.

7.3. Maatregelen om gevolgen zeespiegelstijging tegen te gaan en houdbaarheid op te rekken.

In fase 2 is het effect van 4 typen maatregelen gekwantificeerd, te weten:

1. Bronmaatregelen op schut- en spuisluizen om de zoutlast te beperken
2. Extra aanvoer en/of waterschijf creëren om langer te kunnen doorspoelen en in regionale watervraag te blijven voorzien
3. Omgaan met hogere chloridewaardes
4. Internationale afspraken om chlorideconcentratie Rijn verder te verlagen

7.3.1. Bronmaatregelen op schut- en spuisluizen

Schutsluizen

Voor de schutsluizen zijn twee maatregelen beschouwd, zowel afzonderlijk als in combinatie met elkaar (Deltares 2025b). Het betreft: 1) een bellenscherm op beide hoofden van de schutkolk en 2) een klein spoeldebiet (2 tot 4 m³/s) met een pomp langs en/of door de schutkolk. Beide in combinatie met een drempel op het buitenhoofd van de schutsluis, die meegroeit met zeespiegelstijging. Een bellenscherm op beide sluishoofden zorgt ervoor dat er een vertraagde wateruitwisseling van de schutkolk met het zoute zeewater of het zoete water in het meer optreedt. Een (gepompt) spoeldebiet afkomstig uit het IJsselmeer zorgt voor het tegengaan van een groot deel van de resterende zoutlek uit de voorhaven aan zeezijde. Tevens zorgt continu spoelen voor het verzoeten van de voorhaven aan de zeezijde, wat de uitwisseling van zout tussen kolk en zeezijde vertraagt wanneer de sluisdeuren open staan. Beide maatregelen (zowel een spoeldebiet als een bellenscherm) verminderen de zoutlast vanuit schutsluizen door kolkuitwisseling.

Uit het werk van Deltares (2025b) blijkt dat een maximaal effectief bellenscherm bij de huidige zeespiegel ongeveer de helft van de binnenkomende zoutlast bij beide schutsluizen in de Afsluitdijk kan reduceren. Bij inzet van een bellenscherm is aanvankelijk geen toename in doorspoeldebiet bij de spuisluizen nodig om zeespiegelstijging te compenseren, maar vanaf 1m zeespiegelstijging kan een bellenscherm alleen de toename in zoutlast niet meer compenseren. In combinatie met een spoeldebiet van 2m³/s per sluis afwisselend door en langs de schutkolk kan het effect van zeespiegelstijging tot 3m worden gecompenseerd. Met een spoeldebiet van 4m³/s kan een zeespiegelstijging van 5m worden gecompenseerd, de binnenkomende zoutvracht is dan zelfs nog minder dan in de huidige situatie. Een spoeldebiet van 4m³/s afwisselend door en/of langs de schutkolk zonder inzet

van een bellenscherm lijkt effectief te zijn tot 3m zeespiegelstijging. Merk daarbij op dat de genoemde debieten door en/of langs de kolk deels een compensatie zijn van een inkomend schutdebiet dat groter wordt met de zeespiegelstijging. De netto onttrekkingen uit het IJsselmeer zullen kleiner zijn.

Spuisluizen

Voor de spuisluizen is door Deltares (2025b) onderzocht wat het effect is van 1) het halveren van de zoutlek via de spuideuren en 2) het inzetten van pompen naast de aanwezigheid van lekkende spuisluizen.

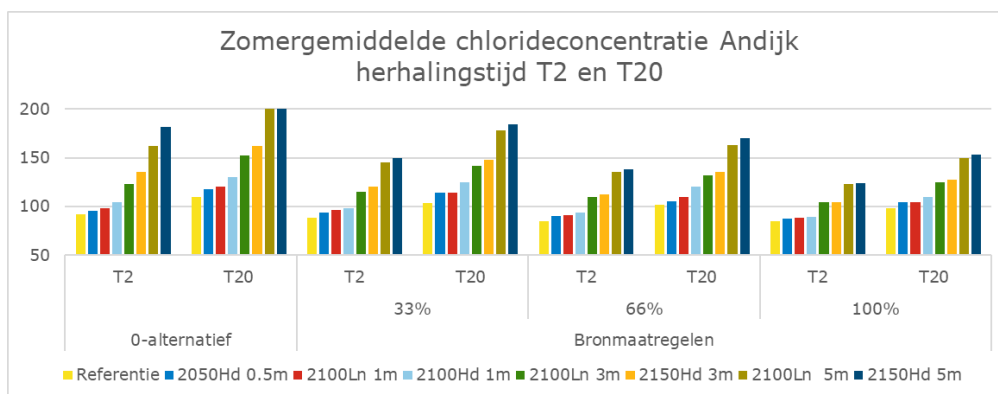
Het halveren van het lekoppervlak van de spuideuren bij 0,5m zeespiegelstijging en het behouden van de vastgestelde minimale meerdaags gemiddelde afvoer van 30 m³/s bij Kornwerderzand en 40 m³/s bij Den Oever (tezamen 70 m³/s), zorgt voor een reductie van de binnenkomende zoutlast van ca. 50% t.o.v. het nul-alternatief bij 0,5 m zeespiegelstijging (situatie zonder maatregel). Halveren van de zoutlast bij 0,5 m zeespiegelstijging biedt nog geen garantie op het in stand kunnen houden van de zoutbeheersing. Door de afname van de spuivensters is het bij zeespiegelstijging op een gegeven moment niet meer mogelijk om de benodigde piekafvoer te realiseren bij Kornwerderzand en Den Over. Bij Den Oever is de situatie bovendien gevoeliger voor dit effect dan bij Kornwerderzand aangezien de getijamplitude bij Den Oever kleiner is. Het halveren van het lekoppervlak van de spuideuren is bij Den Oever dan ook veel minder effectief dan bij Kornwerderzand. Bij 0,5 m zeespiegelstijging is de netto binnenkomende zoutvracht in die situatie daardoor nog steeds vele malen groter dan in de huidige situatie bij behoud van de gemiddelde netto dagafvoer van 40m³/s. Bij Den Oever is een grotere reductie van het lekoppervlak noodzakelijk, tot mogelijk het helemaal afsluiten (en buiten gebruik stellen) van de spuisluizen, of een eerdere combinatie met de inzet van pompen om het effect van zeespiegelstijging op de binnenkomende zoutlast te reduceren.

In Deltares (2025b) is aangenomen dat op beide complexen bij een zeespiegelstijging vanaf 2 m volledig is overgegaan op pompen. Hierbij is ervanuit gegaan dat de spuisluizen volledig buiten gebruik worden genomen en er dus geen zoutlek meer via spuideuren is. Wel vindt er nog lekkage via de pompen plaats. Dit laatste is klein t.o.v. de zoutlek via de spuisluizen. Er kan tot een zeespiegelstijging van 5 m volstaan worden met een klein debiet van ≤ 10 m³/s per spuicomplex om deze zoutlast af te voeren naar zee. In het ontwerp van de pompen dient rekening gehouden te worden met dit relatief lage debiet en een onttrekkingsdiepte zo laag mogelijk in de erosiekuil.

Effect op het systeem

Door Arcadis/Hydrologic (2025) is in fase 2 doorgerekend welk effect bronmaatregelen hebben op de herhalingstijden van chlorideoverschrijding bij Andijk. De maatregelen zijn geïmplementeerd door een reductie (33, 66 of 100 %) op de binnenkomende bruto zoutvracht op te leggen bij de schut- en spuisluizen. In het model zorgen maatregelen op de schutsluizen er direct voor dat er minder zout het IJsselmeer op gaat. Maatregelen genomen op de spuisluizen zorgen ervoor dat er minder zout richting de erosiekuilen gaat. Hoe minder zout er richting de erosiekuilen gaat, hoe minder zout er richting het IJsselmeer gaat.

De bronmaatregelen hebben in de berekeningen vrijwel geen effect op de peiluitzakkingen en watertekorten voor de regio, omdat er voor het peilbeheer in de modellering (in het nul-alternatief) niet werd gestuurd op de chlorideconcentratie en bij de berekeningen met maatregelen hetzelfde peilbeheer is gesimuleerd. Hierdoor is de mogelijke besparing in afgevoerd volume niet volledig benut ten gunste van de waterbeschikbaarheid. Derhalve zijn deze figuren ook niet opgenomen in de rapportage. De watertekorten veranderen door deze maatregel dus niet noemenswaardig, de zoutgehaltes wel. In Figuur 7-4 zijn de herhalingstijden van de zomergemiddelde chlorideconcentratie opgenomen voor de 3 maten van bronreductie. Zelfs bij een bronreductie van 100% is er nog steeds een toename van de zomergemiddelde chlorideconcentratie berekend door zeespiegelstijging. Er komt in dat scenario dan wel geen zout via de spui- en schutsluizen op de Afsluitdijk binnen, er komt nog wel steeds meer zout via kwel via de bodem van het IJsselmeer binnen en via afvoer van de regio.



Figuur 7-4 Zomergemiddelde chlorideconcentratie Andijk voor herhalingstijden T2 en T20 voor alle klimaatscenario's in combinatie met zeespiegelstijging. Voor het 0-alternatief en de bronmaatregel reductie van 33, 66 en 100 %.

7.3.2. Extra aanvoer en/of waterschijf creëren

Om langer te kunnen blijven doorspoelen bij de Afsluitdijk en/of langer te blijven voorzien in de watervraag zijn in fase 2 ook drie mogelijke oprekmaatregelen voor wat betreft extra aanvoer en/of extra waterschijf beschouwd (Arcadis/HydroLogic 2025):

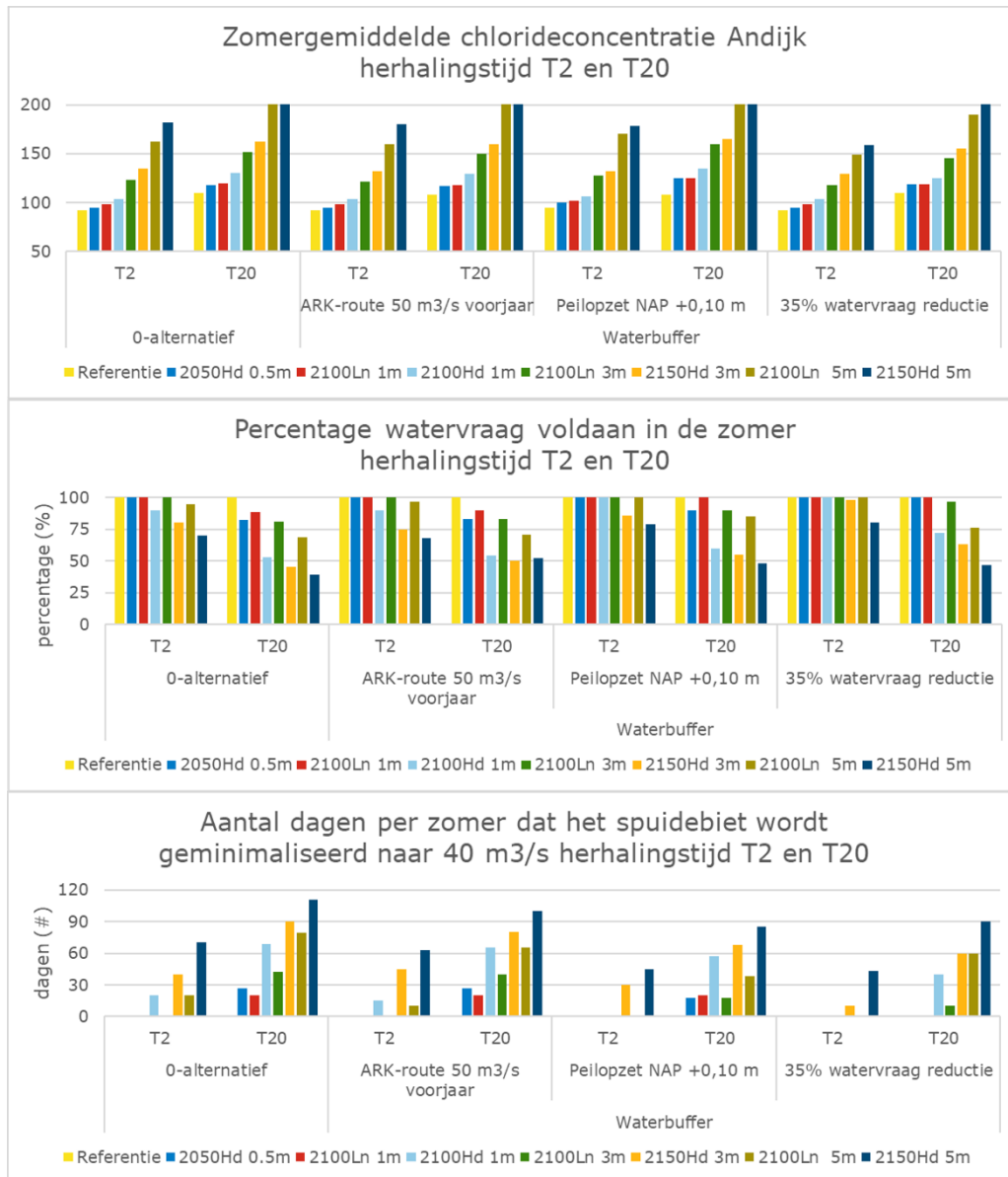
- ARK-route: extra aanvoer vanuit Waal via ARK naar Markermeer en IJsselmeer van 50 m³/s in het voorjaar
- Extra peilmarge van 30 cm in de zomer door een zomers bovenpeil van NAP +0,10 m i.p.v. NAP -0,2m aan te houden
- 35% permanente reductie van de watervraag van de zoetwaterregio

De **ARK-route** heeft in de berekeningen een beperkt positief effect op het aantal dagen overschrijding van de 150 mg/L grenswaarde bij Andijk (zie Figuur 7-5). Het effect is groter bij de scenario's met hogere zeespiegelstijging. Dit geldt ook voor de herhalingstijden van de jaar- en zomergemiddelde chloride bij Andijk en voor de mate van peiluitzakking. De maatregel is slechts beperkt effectief omdat hij alleen in het voorjaar is geïmplementeerd terwijl in de gematigde scenario's de watertekorten vooral in de zomer voorkomen. In de extreme zeespiegelstijging-scenario's voegt deze maatregel relatief meer toe aan de robuustheid omdat daar in het voorjaar wel al watertekorten optreden. De maatregel is in de analyse alleen in het voorjaar geïmplementeerd omdat aangenomen is dat in de zomer een zodanig grote druk op

de landelijk watervraag zal ontstaan dat inzet van de ARK-route niet mogelijk zou zijn.

Extra peilopzet heeft tegen de *a-priori* verwachting in een licht ongunstig effect op het aantal dagen overschrijding van de 150 mg/L grenswaarde en het jaar- en zomergemiddelde chloridegehalte bij Andijk (zie Figuur 7-5). Ook hier speelt de technische implementatie in het model een rol. In de modellering is aangenomen dat er tijdens de periode van opbouw van winterpeil naar zomerpeil in het voorjaar maximaal 70 m³/s gespuid wordt richting Waddenzee, wat minder is dan normaal in die periode van het jaar, omdat het peil minder ver hoeft te stijgen. Het gevolg van deze werkwijze is dat bij dit spuidebiet de chlorideconcentraties in het voorjaar enigszins oplopen. Ondanks dit nadeel in het voorjaar heeft deze maatregel een groot gunstig effect op het aantal dagen dat er peiluitzakking optreedt in het gehele zomerhalfjaar. Er kan immers langer in de watervraag blijven voorzien. Doordat peiluitzakking en bijbehorende debietbeperking in de zomer afnemen, heeft de maatregel per saldo netto wel een gunstig effect op de maximale chloridewaarden tijdens de zomerperiode.

Permanent korten op de watervraag van de regio's heeft uiteraard een gunstig effect op de mate van peiluitzakking. Er wordt immers direct minder water gevraagd. Voornamelijk op de nattere klimaatscenario's (Ln) heeft deze maatregel een merkbaar effect op het aantal dagen overschrijding van de 150 mg/L grenswaarde en het jaar- en zomergemiddelde chloridegehalte bij Andijk (zie Figuur 7-5). De verklaring is dat deze vraagreductie een direct effect heeft op de mate waarin vanwege peiluitzakking het spoeldebiet over de Afsluitdijk wordt beperkt tot 40 m³/s. Onder het 0-alternatief gebeurt dit in de natte scenario's relatief minder vaak dan in de droge. Dit beperktere aantal events is met de watervraagreductie vervolgens relatief sterk te beïnvloeden. In de droge scenario's is de absolute reductie in aantal dagen van minimaal spuidebiet vergelijkbaar als in de natte maar resteert nog een aanzienlijk aantal events waarbij zout uit de erosiekuilen op het systeem geaccepteerd wordt. Voor deze maatregel zullen de regio's aanzienlijke adaptatie-inspanningen moeten verrichten omdat er permanent minder zoetwater geleverd wordt.



Figuur 7-5 T20 en T2 herhalingstijden voor de zomergemiddelde chlorideconcentratie (boven), het percentage watervraag wat voldaan kan worden (midden) en het aantal dagen dat het spuidebiet wordt geminimaliseerd naar 40 m3/s herhalingstijd T2 en T20 voor alle doorgerekend klimaatscenario's en maten van zeespiegelstijging. Links het nul-alternatief, daarnaast de 3 maatregeltypen.

7.3.3.

Omgaan met hogere chloridewaardes & verlagen zoutgehalte IJssel

Incidenteel hogere chlorideconcentraties accepteren of een structureel hogere drempelwaarde voor Andijk toepassen lijken zeer effectieve maatregelen. Bij een drempelwaarde van 150 mg/L treden er bij alle scenario's voorbij 0,5 m zeespiegelstijging (uitgezonderd 2100Ln 1m) eens in de 20 jaar meer dan 30 dagen per jaar overschrijdingen bij Andijk op. Bij een drempelwaarde van 175 mg/L treedt dit alleen nog maar op voor de 3 en 5 meter zeespiegelstijging scenario's en bij een drempel van 200 mg/L betreft dit alleen nog maar de scenario's 2150Hd 3 en 5m en 2100Ln 5m. Verhoging van de drempelwaarde met 25 tot 50 mg/L (15-30%) stelt de incidentele (enige maanden durende) overschrijdingen dus met meerdere meters zeespiegelstijging uit. Een dergelijke verhoging betekent wel dat er maatregelen

genomen moeten worden door de drinkwaterwinning, bijvoorbeeld middels de aanleg van een voldoende grote seizoensbuffer of aanpassing als men er zeker van wil zijn dat de huidige jaargemiddelde normen niet overschreden worden. Omdat overschrijdingen van de huidige jaargemiddelde norm van 150 mg/L in het IJsselmeer zich zonder maatregelen pas voorbij 3m zeespiegelstijging met herhalingstijden vaker dan T20 manifesteert en alle scenario's tot en met T20 en 5m zeespiegelstijging onder de WHO norm van 250 mg/L blijven lijkt er ook nog wel ruimte richting de toekomst voor aanpassing aan een verhoogde norm. Voor landbouw en natuur lijkt er sowieso een minder grote opgave te zijn, omdat de overschrijdingen beperkter zijn dan de daar geldende hogere grenswaarden.

De chlorideconcentratie in de IJssel correleert met de Rijnafvoer en dus de IJsselaflow. De laagste T20 zomergemiddelde IJssel-afvoer in de opgelegde randvoorwaarden is te vinden in de 2100Hd en 2150Hd scenario's: ca. 160 m³/s. De bij die afvoer behorende chlorideconcentratie van het rivierwater is ca. 130 mg/L. In de doorgerekende klimaatscenario's wordt de rivier-chlorideconcentratie dus zeer zelden (minder dan 12,5 % van de data) hoger dan 150 mg/L en nooit hoger dan 200 mg/L. De maatregel 'verder verlagen van de rivier-chlorideconcentratie' heeft doordat de chlorideconcentratie zelden hoger is dan 150 mg/L dan ook geen waarneembaar effect op de resultaten. Zoals gesteld in paragraaf 7.2.5 is de achtergrondconcentratie echter wel een onzekere en sterk-bepalende factor voor de overschrijdingsstatistiek indien deze waarde de 150 mg/L nadert. Het is in het kader van het internationale stroomgebiedbeheer van de Rijn dus nog steeds relevant of de huidige relatie tussen Rijnafvoer en chlorideconcentratie in de toekomst behouden blijft of ongunstig verandert door veranderende klimatologische of antropogene factoren.

7.3.4. *Samenstelling oprekpakketten IJsselmeergebied*

De oprekpakketten (zie Hoofdstuk 8) hebben een gradatie in impact op de omgeving. In het eerste oprekpakket is ingezet op bronmaatregelen bij alleen de schutsluizen. De schutsluizen worden voorzien van bellenschermen, doorspoeldebieten en een op de zeespiegel afgestemde drempel aan de zeezijde. Met deze maatregelen wordt het benodigde doorspoeldebiet op de Afsluitdijk ingeschat op de huidige hoeveelheid (70/40 m³/s). De maatregelen zorgen ervoor dat er bij 5 m zeespiegelstijging evenveel zout binnenkomt als bij 0 m zeespiegelstijging.

In het tweede oprekpakket worden naast bronmaatregelen op de schutsluizen ook bronmaatregelen genomen voor de spuisluizen. Aangenomen wordt dat vanaf 0,5 m zeespiegelstijging volledig wordt overgestapt op pompen en worden de spuisluizen volledig lekdicht gemaakt. Op die manier komt er geen zoutlek via de spuisluizen meer binnen. Om van die overstap op pompen te profiteren ten behoeve van de zoutbeheersing zijn installaties nodig die een beperkt debiet kunnen draaien. Op basis van Deltares 2025b wordt voor beide locaties ca. 10 m³/s ingeschat. Tezamen met de maatregelen bij de schutsluizen uit pakket I, waar een doorspoeldebiet van ca. 10 m³/s voor beide locaties gezamenlijk wordt ingezet, wordt het doorspoeldebiet op de Afsluitdijk in dit oprekpakket ca. 30 m³/s. Dit levert een besparing van 40 m³/s/10 m³/s t.o.v. de minimale spuidebieten in het heden op.

In het derde oprekpakket wordt er nog een tandje bij gezet; in de zomerperiode wordt het IJsselmeer peil opgezet tot NAP +0,10 m (een extra bufferschijf van 30

cm). De geselecteerde maatregelen in pakket I en II, hebben een direct effect op de toename van zoutindringing via de sluisen en dus op verzilting. Pakket III heeft een indirect effect op de effecten van zeespiegelstijging. Door te voorkomen/te vertragen dat er een watertekort optreedt, wordt er ook niet/later gekort op het spoeldebiet bij de Afsluitdijk, waardoor de mate van verzilting afneemt. Deze maatregel is gekozen omdat uit de sommen is gebleken dat deze effectief zijn en een kwantificeerbaar effect op de waterbalans hebben. Het spoeldebiet bij de Afsluitdijk blijft in pakket III 30 m³/s zoals in pakket II.

7.4. Conclusies houdbaarheid en oprekbaarheid

Door zeespiegelstijging neemt de spuicapaciteit van de spuisluisen af. Bij Den Oever is spuien niet meer mogelijk bij 0,5 m zeespiegelstijging en bij Kornwerderzand bij 1 m zeespiegelstijging. Ter aanvulling en uiteindelijk vervanging worden hiervoor eerst spui groepen uitgebreid en pompen gebouwd. Dit heeft potentieel gunstige invloed op de afvoer van zoutwater. Pompen kunnen effectiever dan spuien zoutwater afvoeren als er door de pomp op grotere diepte zoutwater wordt aangetrokken en afgevoerd.

Door zeespiegelstijging nemen de zoutlekken door de schut- en spuisluisen fors toe, waardoor de doorspoelbehoefte van het IJsselmeer toeneemt. Als dit water niet beschikbaar is en er wordt vastgehouden aan de huidige spoelstrategie tijdens droogte (70 m³/s spuien en bij watertekort 40 m³/s spuien) dan treedt er bij stijgende zeespiegel en extreme klimaatcondities steeds vaker een overschrijding van de zomer- en jaargemiddelde chloridewaarde van 150 mg/L op. Vanaf 3 meter zeespiegelstijging ligt het zomergemiddelde chloridegehalte bij Andijk boven de 150 mg/L, niet alleen in een extreem scenario, maar ook in een minder extreem scenario. De chlorideconcentratie ligt dan gedurende een periode van gemiddeld ca. 90 dagen tussen de 150 en 200 mg/L. In alle doorgerekende klimaatscenario's en maten van zeespiegelstijging vindt er in de winter weer voldoende verzoeting plaats tot onder 150 mg/L.

Zeespiegelstijging versterkt de zoute kwel in polders nabij de kust in de provincies Noord-Holland, Friesland en Groningen. Dit vergroot de regionale watervraag aan het IJsselmeer voor polderdoorspoeling met enkele tientallen m³/s per meter zeespiegelstijging. Deze toename van watervraag in combinatie met een toename van de watervraag voor peilbeheer en beregening en een afname van de rivierafvoer zorgt voor vaker uitzakken van het IJsselmeerpeil. Uitzakken van het IJsselmeerpeil zorgt voor het korten op het doorspoeldebiet bij de Afsluitdijk, waardoor er sneller verzilting optreedt. Peiluitzakking en watertekort zijn gevoeliger voor meteorologische klimaatverandering dan voor zeespiegelstijging.

Zoute kwel via de bodem van het IJsselmeer is van ondergeschikt belang vergeleken met de zoutvracht die via de sluisen op de Afsluitdijk binnen komt.

Het Markermeer is in veel mindere mate gevoelig voor verzilting door zoutintrusie bij de Afsluitdijk en dus minder gevoelig voor zeespiegelstijging.

Bronmaatregelen lijken de meest effectieve van de doorgerekende maatregelen om een stijging van chloridewaarden als gevolg van zeespiegelstijging en droogte op het IJsselmeer te beperken of tegen te gaan. Echter, zelfs bij 100% reductie van de zoutlast bij de Afsluitdijk wordt er bij 5m zeespiegelstijging in een droge zomer bij

herhalingstijd T20 nog steeds een overschrijding ($150 \text{ mg/L} < C < 175 \text{ mg/L}$) in zomergemiddelde chloride concentratie bij Andijk berekend. Deze overschrijding komt voornamelijk door te toename van zoute kwel die via de regio afspoelt op het IJsselmeergebied. Reductie van de zoutlast bij de schutsluizen lijkt met bellenschermen, spoeldebieten door en/of langs de kolk en een drempel aan de zeezijde goed mogelijk te zijn.

Reductie van de zoutlast bij de spuisluizen is lastiger, tenzij op pompen wordt overgestapt en de spuisluizen volledig worden gesloten. Pompen kunnen gerichter zoutwater uit de kuilen afvoeren, mits zij aanzuigen vanuit de zoute onderlaag. Bij Den Oever zijn bij 0,5 m sowieso al volledig pompen nodig ten behoeve van peilbeheer als de meerpeilen niet meestijgen. Bij Kornwerderzand is omwille van peilbeheer volledige overstap op pompen rond 1m zeespiegelstijging aan de orde als de meerpeilen niet meestijgen.

Maatregelen om de waterbuffer te vergroten hebben voornamelijk een positief effect op het beperken van regionale watertekorten, waarbij het permanent reduceren van de regionale watervraag met 35% het meest effectief blijkt te zijn.

Bovenstaande maatregelen gaan alle uit van de wens om de bestaande ambities zo lang mogelijk te handhaven en zelfs zomerse chlorideoverschrijdingen boven 150 mg/L tot een minimum te beperken. De analyses laten echter ook zien dat de overschrijdingen en uiteindelijke jaargemiddelden zelfs bij 5m zeespiegelstijging lager liggen dan de WHO norm voor drinkwater van 250 mg/L. Een hogere zomerse of jaargemiddelde chloridewaarde accepteren die nog steeds voldoet aan de WHO norm kan dus ook een zeer effectieve maatregel zijn. Deze maatregel is niet vertaald in termen van de waterbalans (c.q. hoeveel er bezuinigd zou kunnen worden op de spoeldebieten.) Het verdient aanbeveling om de variatie van zoutgehaltes en peilen bij instelling van een lager minimaal debiet en hogere normen nader te bepalen met het bakjesmodel en daarbij ook de kosten en schades in ogenschouw te nemen.

8 Maatregelen Oprekpakketten

Aan het einde van fase 2 zijn de oprekkpakketten samengesteld. Zoals in paragraaf 2.6.2 beschreven is het voor de landsbrede waterbalans en de impactanalyse onwerkbaar om alle geïnventariseerde oprekmaatregelen afzonderlijk en in alle combinaties te beschouwen. Omwille van het overzicht is dan ook besloten te werken met maximaal 3 pakketten aan oprekmaatregelen. In Tabel 8-1 is een beknopt overzicht van de oprekkpakketten weergegeven, in paragraaf 2.6.2 is de verdere totstandkoming van de oprekkpakketten beschreven. Een gedetailleerder overzicht van de oprekkpakketten is opgenomen in bijlage B. De effectiviteit van de afzonderlijke maatregelen is opgenomen in de hoofdstukken 3 t/m 7. Tevens is in die hoofdstukken beschreven hoe de doorspoelvragen voor de oprekkpakketten voor de landsbrede waterbalans in Hoofdstuk 9 tot stand zijn gekomen. De effectiviteit van de oprekkpakketten op de landsbrede waterbalans is weergegeven in hoofdstuk 9. De impact van de oprekkpakketten op de omgeving worden binnen een afzonderlijk traject (RHDHV 2025a, b) geduid.

Tabel 8-1 Beknopt overzicht indeling oprekkpakketten. In Bijlage A is een gedetailleerder overzicht weergegeven.

	Pakket I	Pakket II	Pakket III
Doorspoeling Zoetwaterregio's	Verhogen chloride-streefwaarde polders en boezems met 50mg/L	I + Chloride-streefwaarde regio aanpassen aan meest voorkomende type landbouw in polder	I+II+ Polders met relatief grootste doorspoelvraag niet meer doorspoelen
IJsselmeer	Schutsluizen voorzien van bellen-schermen, doorspoeldebiet en meegroeiende drempel zeezijde	I + Spuisluizen volledig afsluiten en gemalen inzetten voor zout- en peilbeheer	I+II+ Peilopzet naar NAP +0,10m in zomerperiode (extra waterbuffer creëren)
ARK-NZK (IJmuiden)	Selectieve onttrekking verder optimaliseren	I	I
RMM (Holl. IJssel en Lek beneden Hagestein)	Verhoogde chloride in benedenstroomse delen accepteren om surplusdebiet te besparen.	I	Incidenteel afsluiten d.m.v. keringen zonder schutsluizen
RMM (Nieuwe Maas - Hollands Diep)		Meegroeien bodem Nieuwe Waterweg met ZSS	II
RMM (Oude Maas, Spui, Haringvliet)		Meegroeien bodem Nieuwe Waterweg met ZSS	II + Incidenteel afsluiten d.m.v. keringen met binnenvaartsluizen

9 Landsbrede waterbalans HWS en hydraulische knelpunten

Als afsluiting van deze synthese wordt de doorwerking van de regionale bevindingen op de KZH-strategie van het Nederlandse hoofdwatersysteem (HWS) beschouwd. De KZH-strategie beoogt een klimaatrobuuste (situationele) sturing van het beschikbare rivierwater over de deelgebieden om de zoetwaterbuffers optimaal in stand te houden en verzilting tegen te gaan. De waterverdeling laat zich deels beschrijven door een waterbalans in de vorm van Sankey-diagrammen zoals ook gepresenteerd in Deltares (2024a). Deze benaderwijze kent echter beperkingen. Het suggereert dat er voor typerende droge condities met een bepaalde herhalingstijd, gegeven een scenario, instantaan evenwicht mogelijk of noodzakelijk zou zijn tussen wateraanbod en watervraag en dat een grotere vraag dan aanbod zich direct vertaalt in een watertekort. De werkelijkheid met dynamiek van situationele sturing van debieten en de vertraagde reactie van meerpeilen en zoutgehaltes is echter genuanceerder. Ook zullen in werkelijkheid ruimtelijke en temporele patronen van watervraag en aanbod onderling uit de pas lopen, terwijl de statistieken van vraag en aanbod in de waterbalans direct met elkaar worden gecombineerd. De herhalingstijd, duur en omvang van optredende knelpunten is in werkelijkheid een resultante van de opeenvolging en coïncidentie van lage rivierafvoeren, regionale onttrekkingen, effecten van berging en buffering in het hoofd- en regionaal watersysteem, verdamping en neerslag en windeffecten. Tot slot is de huidige watersturing aan grenzen van de infrastructuur gebonden: bepaalde doorvoercapaciteiten zijn fysiek beperkt, bepaalde stuurknoppen verliezen hun effectiviteit onder extreme condities. In de hier gepresenteerde benaderwijze worden dergelijke infrastructurele beperkingen in eerste instantie genegeerd om de confrontatie tussen vraag en aanbod *as is* te kunnen tonen.

De Sankey-diagrammen van de Nederlandse landsbrede waterbalans van het HWS maken desondanks inzichtelijk wat het effect van zeespiegelstijging op het watertekort en de verzilting is gegeven combinaties van bepaalde afvoercondities en watervraag. Ook geven ze weer hoe maatregelen dit effect kunnen verkleinen (paragraaf 9.1.2). Voorafgaand aan deze waterbalans in de vorm van een Sankey-diagram, is in Fase 1 een bovenregionale verdelingstool gemaakt (Arcadis-HydroLogic 2023e). Die tool is minder expliciet over de watervraag, maar maakt juist goed inzichtelijk waar de knelpunten voor de infrastructuur in het HWS zich voordoen. In paragraaf 9.2 volgt een samenvatting waar de bevindingen uit beide tools zijn opgenomen.

9.1. Grootschalige waterbalans van het HWS

9.1.1. *Effect van zeespiegelstijging op het watertekort*

In Figuur 9-1 is de zoetwaterbalans van Nederland met verziltingsindicatoren weergegeven voor de huidige zeespiegel en het huidige klimaat in de vorm van een Sankey-diagram. Deze waterbalans is ook opgesteld voor verschillende maten van zeespiegelstijging en de daarbij verwachte scenario's voor de watervraag uit de zoetwaterregio's en rivierafvoeren. De zoetwaterbalans van Nederland is opgesteld voor een zomermaand met een wateraanbod (Rijnafvoer) dat bij het betreffende scenario statistisch ca. eens in de 20 jaar (T20) te verwachten is (Hd klimaatscenario). In de database met modelresultaten van het Nationaal Water

Model is vervolgens de bij deze maandgemiddelde Lobith-afvoer passende regionale watervraag voor berekening en peilbeheer overgenomen (Deltascenario Stoom).⁹

Wat betreft het HWS (specifiek IJsselmeer en Rijn-Maasmonding) wordt verzilting op twee manieren in de Sankeydiagram getoond: enerzijds door middel van een schatting van het bij het geconstrueerde T20-scenario optredende zoutgehalte, anderzijds als een 'hypothetische' watervraag die drukt op de waterbalans. Voor het regionaal watersysteem wordt het effect van verzilting via zoute kwel alleen als hypothetische watervraag weergegeven, niet met kleurcodes.

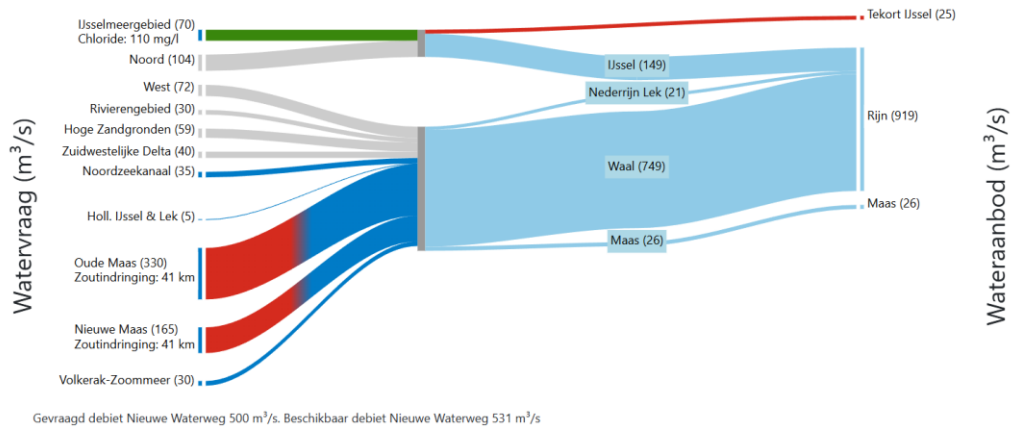
De weergegeven verzilting van IJsselmeer en Rijn-Maasmonding is de in de systeemanalyses berekende verzilting. Voor het IJsselmeer worden de met het bakjesmodel bepaalde T20 zoutgehalten behorende bij het in de diagram toegepaste klimaatscenario weergegeven (zie ook Hoofdstuk 7). Voor de RMM wordt de intrusielengte van de 250 mg/l chloridecontour (L_{250} , zie Hoofdstuk 5) op basis van het volgens de balans resterende debiet door de Nieuwe Waterweg (Q_{NWW} (Oude Maas + Nieuwe Maas)) weergegeven. Hierbij is een maximale intrusie van 100km gehanteerd in geval het resterende Nieuwe-Waterwegdebiet de nul nadert of negatief wordt, omdat de toegepaste relatie op een gegeven moment niet meer geldig is. Merk op dat er voor de bepaling van Q_{NWW} vanuit wordt gegaan dat alle bovenstroomse doorspoelbehoeften worden voorzien. De waarde van Q_{NWW} kan dus negatief worden. Voor VZM en ARK-NZK zijn de zoutgehalten niet weergegeven omdat van deze gebieden de T20 condities niet bepaald zijn.

Om, naast kleurcodes, het effect van verzilting te kunnen vertalen naar de waterbalans is, voor alle balansposten waar verzilting een rol speelt, een vertaling gemaakt van de verziltingsdruk in een 'hypothetisch' doorspoeldebiet. Voor wat betreft de regionale watervraag is dit de berekende doorspoelcomponent ingegeven door wat ter bestrijding van interne verzilting nodig zou zijn om het zoutgehalte niet boven de huidige streefwaarden te laten komen (zie Hoofdstuk 3). Voor het hoofdwatersysteem is het debiet bepaald dat nodig zou zijn voor beheersing van de verzilting conform de strategieën beschreven in de voorgaande hoofdstukken (Hoofdstuk 4 t/m 6). 'Hypothetisch' geeft aan dat er in de balansbeschouwing van wordt uitgegaan dat al deze doorspoeldebieten ook daadwerkelijk zouden worden ingezet als er voldoende rivierwater-aanbod zou zijn geweest. In werkelijkheid zijn de maximaal 'beleidsmatig gewenste' debieten zeer waarschijnlijk eindig. In het regionaal systeem zal die eindigheid vroeg of laat bereikt worden ofwel vanwege hydraulische beperkingen (capaciteiten van boezem en poldersystemen) ofwel omdat de baten (verziltingsbestrijding) niet meer opwegen tegen de lasten (wateroverlast, kosten andere neveneffecten). Voor het HWS is het debiet eveneens hypothetisch omdat ook hier de baten in deze beschouwing niet zijn afgewogen tegen de kosten (directe kosten en opportuniteitskosten) en neveneffecten. Waar in een aantal delen van het HWS nog sprake is van technische mogelijkheid om desgewenst over het hypothetisch debiet te beschikken (aanvoer via kunstwerken)

⁹ Deze veronderstelde coïncidentie van watervraag en wateraanbod is enigszins kunstmatig en zegt niet alles over de herhalingsdij van de resulterende watertekorten en verzilting. De kans op het tegelijkertijd optreden van een T20 wateraanbod en T20 watervraag is kleiner dan eens in de 20 jaar. Anderzijds kunnen minder zeldzame condities van de ene variabele ook samenvallen met extremere condities van de andere variabele met een zelfde netto watertekort als resultaat. Het voert voor deze studie te ver en is ook niet mogelijk om de resultante herhalingsdij van de hier getoonde watertekorten op basis van stochastische variabelen exact te kwantificeren.

is in de RMM bovendien sprake van een aanvullend hypothetische situatie, omdat dit systeem afhankelijk is van het uiteindelijk daadwerkelijke resterende debiet dat de RMM instroomt. Op de Hollandsche IJssel en Lek na zijn er in het HWS van de RMM geen beheerknoppen om verzilting te bestrijden middels doorspoeling. Ook beleidsmatig is er geen 'knop', omdat in de huidige strategie geen afweging wordt gemaakt tussen optimaliseren van het Nieuwe Waterweg-debiet versus het voorzien in watervraag elders. In de praktijk bepaalt het resterende debiet door de Nieuwe Waterweg de mate van zoutindringing door de RMM. Samenvattend: voor de Oude en Nieuwe Maas is het in de Sankeydiagram getoonde debiet dus niet het debiet dat daadwerkelijk beschikbaar is, maar wat nodig zou zijn om de intrusielengte L_{250} op 42 km te houden. Zoals toegelicht in hoofdstuk 5 correspondeert deze intrusielengte met 'code lichtrood'. Voor de andere gebieden (IJsselmeer, ARK-NZK, VZM) zijn de in de voorgaande hoofdstukken gepresenteerde benodigde doorspoeldebieten behorende bij de geselecteerde zeespiegelwaarden toegepast.

In de waterbalans is onderscheid gemaakt in het deel van Nederland dat via de IJssel wordt voorzien en het deel dat via de Waal en Maas (en aftakkingen) wordt voorzien. Daarbij is de relatie gebruikt voor de afvoerverdeling bij laagwater bij de Pannerdense kop en IJsselkop die overeenkomt met de rivierbodempligging van 2018. Tot slot is in de waterbalans open-water-verdamping van het HWS niet expliciet opgenomen. Van alle deelgebieden is de verdampingspost van het IJsselmeer-Markermeer de enige die significant op de waterbalans drukt. Voor IJsselmeergebied wordt open-water-verdamping daarom wel impliciet meegenomen door de aanname dat verdamping in een droge zomer direct ten koste gaat van de huidige beschikbare bufferschijf. Hiermee wordt het binnen het concept van de 'pseudo-instantane' balans van een Sankeydiagram lastig te kwantificeren effect van de peilbuffer dus ook uit de waterbalans weggeschreven (zie Bijlage B voor de volledige onderbouwing van deze vereenvoudiging).

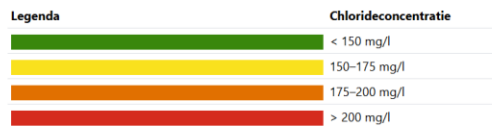


Legenda verziltingsindicatoren

Intrusielengte (km) 250 mg/l chloride Oude Maas en Nieuwe Maas o.b.v. daadwerkelijk restdebiet



Eens in de 20 jaar zomergemiddelde chloridewaarde Andijk (mg/l)



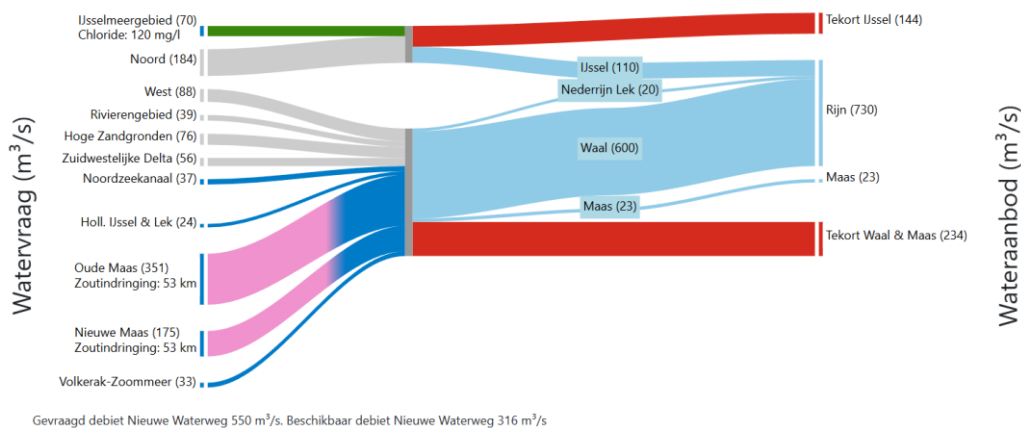
Figuur 9-1 Grootschalige waterbalans van het HWS voor gecombineerd T20 wateraanbod en watervraag in een droge zomermaand (huidige zeespiegel, huidig klimaat). Lichtblauwe balken: wateraanbod Rijn en Maas. Grijs blokjes bij de posten links verwijzen naar de totale watervraag van de zoetwaterregio's. Donkerblauwe blokjes bij posten links verwijzen naar de (hypothetische) doorspoeldebieten voor verziltingsbestrijding van het HWS. Het watertekort (rechts in rood) is apart bepaald voor het gebied dat door de IJssel wordt voorzien en voor de overige gebieden. Het uit de balans resterende beschikbare debiet door de Nieuwe Waterweg is vertaald naar intrusielengte L₂₅₀ (zie hoofdstekst). De post IJsselmeergebied is gekleurd op basis van de berekende T20 zomergemiddelde chloridegehalte bij Andijk. In bijlage C is een link naar de interactieve html-tool van de waterbalans opgenomen.

In de in Figuur 9-1 getoonde situatie (huidige klimaat en huidige zeespiegel) is er een watertekort berekend van 25 m³/s voor de regio die via de IJssel wordt voorzien. Voor de regio die door de Waal, Nederrijn Lek en Maas wordt voorzien is geen tekort berekend. Het zomergemiddelde chloridegehalte bij Andijk is in de weergegeven situatie lager dan 150 mg/L en de intrusielengte L₂₅₀ is ca. 41 km op de Oude en Nieuwe Maas. Op de Hollandsche IJssel en Lek houden de ingestelde surplusdebieten de intrusie beperkt¹⁰. De aldus berekende waterbalans van Nederland is in deze droge zomermaand net niet in evenwicht.

In Figuur 9-2 is de waterbalans weergegeven voor het scenario van 0,5 m zeespiegelstijging en het klimaatscenario 2050Hd. Door zeespiegelstijging nemen de benodigde doorspoeltermen voor het hoofdwatersysteem en de zoetwaterregio's toe. Daarnaast neemt het wateraanbod via de grote rivieren af en neemt de watervraag van de zoetwaterregio's voor peilbeheer en beregening toe. Dit resulteert in een watertekort voor de regio voorzien door de IJssel van 144 m³/s en voor de regio voorzien door de Waal, Nederijn Lek en de Maas van 234 m³/s. Het

¹⁰ Merk op dat op deze twee takken alleen het gezamenlijk surplus is weergegeven en niet de totale afvoer over Gouda en Hagestein bovenstrooms bij deze takken. Het verschil tussen deze twee debieten zijn de regionale onttrekkingen die zijn geaggregeerd in de regionale watervraagposten.

zomergemiddelde chloridegehalte bij Andijk is lager dan 150 mg/L. Het totaal gevraagde debiet voor de Nieuwe Waterweg betreft ca. 550 m³/s, er is 316 m³/s beschikbaar, waardoor de intrusielengte van de 250 mg/L chloride contour toe neemt met ruim 10 km tot ca. 53 km.



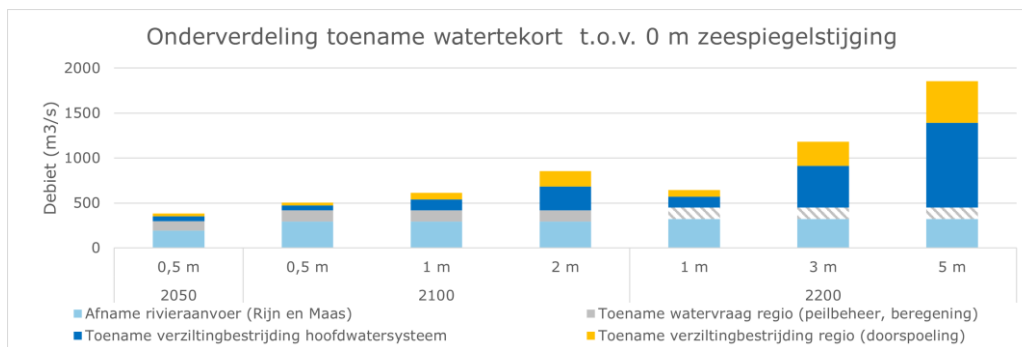
Figuur 9-2 Als Figuur 9-1, maar voor 0,5 m zeespiegelstijging en klimaatscenario 2050Hd. Het hypothetische debiet voor de Nieuwe Waterweg om L_{250} op ~ 42 km te houden is 546 m³/s. Er is 316 m³/s beschikbaar en er is aldus een tekort van 234 m³/s voor het gebied dat door de Waal, Maas en Nederrijn Lek wordt voorzien. Voor het berekenen van de intrusielengte wordt ervanuit gegaan dat het debiet in de Nieuwe Waterweg 316 m³/s is, wat resulteert in $L_{250} = 53$ km en een roze arcering van de balk. In bijlage C is een link naar de interactieve html-tool van de waterbalans opgenomen.

In bijlage C is een link naar de interactieve html-tool van de Sankey-diagrammen voor alle scenario's en maatregelpakketten opgenomen.

In Figuur 9-3 is de opbouw van de toename van het watertekort t.o.v. de huidige situatie voor alle doorgerekende scenario's weergegeven. Daarbij zijn de tekorten voor de regio voorzien door de IJssel en de overige regio's opgeteld. Voor het scenario van 0,5 m zeespiegelstijging, waarvan de waterbalans in Figuur 9-2 is weergegeven, is het totale watertekort ca. 378 m³/s¹¹. Dit tekort ten opzichte van de huidige situatie is ontstaan doordat de wateraanvoer via de Rijn en de Maas met 192 m³/s is afgenomen (lichtblauwe post Figuur 9-3), de watervraag voor peilbeheer en berekening van de waterschappen met 106 m³/s is toegenomen (grijze post Figuur 9-3), de watervraag voor doorspoeling voor het hoofdwatersysteem met 54 m³/s (donkerblauwe post Figuur 9-3) en voor de waterschappen (poldersloten en boezemstelsel) met 31,5 m³/s (gele post Figuur 9-3) is toegenomen. De laatste twee posten zijn het gevolg van zeespiegelstijging, de andere twee posten van met name meteorologische klimaatverandering. Voor de watervraag voor peilbeheer en berekening zijn alleen scenario's beschikbaar voor het zichtjaar 2050 en 2085. De data voor het zichtjaar 2100 en 2200 is voor deze posten dan ook gelijkgesteld aan 2085, waardoor de tekorten voor die zichtjaren onderschat worden. Voor de rivierafvoeren zijn data beschikbaar voor 2050, 2100 en 2150. De data van 2150 zijn voor het zichtjaar 2200 toegepast. Door deze keuzes wordt bijvoorbeeld voor het scenario 1 m zeespiegelstijging in 2100 vrijwel hetzelfde tekort berekend als voor 1 m zeespiegelstijging in 2200, terwijl het niet uitgesloten is dat in een klimaat met extreme zeespiegelstijging droogte richting

¹¹ Om precies te zijn: de in Figuur 9-3 getoonde toename is 384 m³/s aangezien in de referentie (Figuur 9-1) sprake was van een totaal overschot van 6 m³/s

2200 nog verder toeneemt. Vanwege deze tekortkoming is de regionale vraag voor 2200 gearceerd weergegeven in Figuur 9-3.



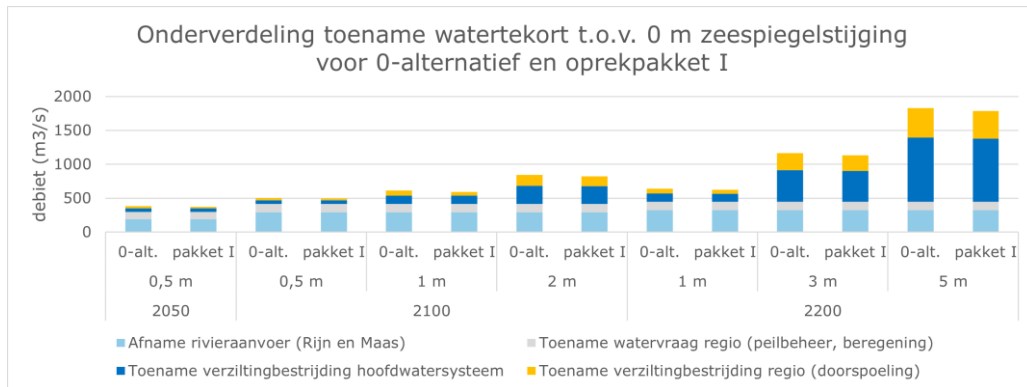
Figuur 9-3 Opbouw watertekortposten uit de grootschalige waterbalans van Nederland voor een droge zomermaand die ca. eens in de 20 jaar te verwachten is. Tekorten uitgedrukt t.o.v. huidige T20-situatie, 0m ZSS. Geel: toename doorspoelvraag van regionale polders en boezems door zeespiegelstijging. Donkerblauw: toename van doorspoelvraag HS door zeespiegelstijging. Grijs (bij 2200 gearceerd): toename watervraag voor peilbeheer en beregening door meteorologische klimaatverandering. Lichtblauw: afname van rivieraanvoer. Voor zichtjaar 2200 is de watervraag van 2085 genomen, gearceerd weergegeven i.v.m. niet beschikbare scenario's voorbij 2085. Voor het zichtjaar 2200 is voor rivieraanvoer de aanvoer van 2150 genomen, i.v.m. niet beschikbare klimaatscenario's voorbij 2150.

Uit Figuur 9-3 volgt duidelijk dat vooral voorbij 1m de zeespiegelstijging significant bijdraagt aan het totale tekort aan zoetwater: rond 2m zeespiegelstijging is de toename in landelijk opgetelde (hypothetische) watervraag voor verziltingsbestrijding van dezelfde grootte als de toename in watertekort door hydrologische en meteorologische droogte. De exacte relatieve bijdrage van zeespiegelstijging aan het tekort op de langere termijn is afhankelijk van hoe de watervraag zich na 2085 verder ontwikkelt. In deze studie is vanaf 2085 de watervraag constant gehouden, terwijl niet uit te sluiten is dat de trends daarin zich ook zullen voortzetten voorbij deze zichthorizon. Niet zichtbaar in Figuur 9-3 is dat de T20 jaargemiddelde chloridegehalten bij Andijk vanaf 3m zeespiegelstijging in 2200 (hoog zeespiegelstijging scenario) boven de 150 mg/L uitkomen. Vanaf dit scenario heeft de berekende intrusielengte L_{250} in de RMM de maximale waarde van 100 km bereikt. Bij 1m zeespiegelstijging in 2100 (hoog zeespiegelstijging scenario) is L_{250} ca. 70 km, voor een zeespiegelstijging van 2m in 2100 (extreem zeespiegelstijging scenario) is L_{250} ca. 85 km. (Zie Bijlage C voor Sankey diagrammen alle scenario's met bijbehorende L_{250} en chloride Andijk).

9.1.2.

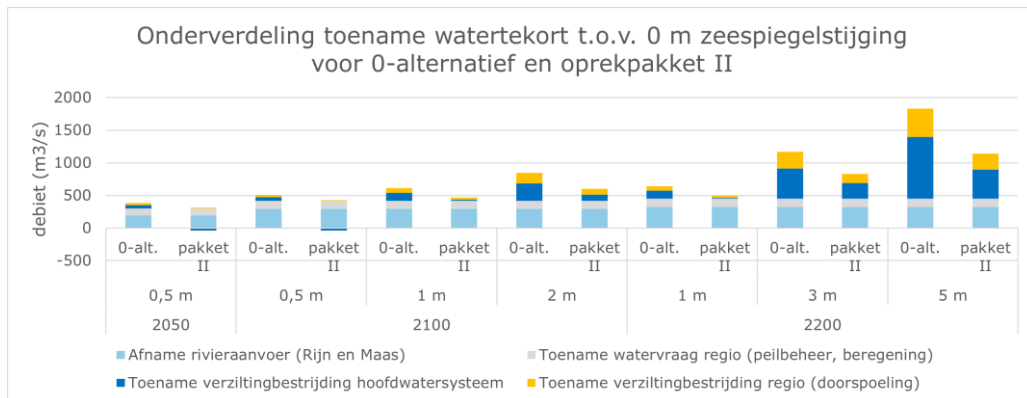
Effect van de oprekpakketten (maatregelen) op het watertekort

De oprekpakketten (maatregelen) geïntroduceerd in Hoofdstuk 8 hebben invloed op de waterbalans. Er zijn in totaal 3 oprekpakketten, die bestaan uit een selectie van verschillende typen maatregelen (zie Tabel 8-1). De maatregelen in alle oprekpakketten hebben alleen betrekking op de posten 'Toename verziltingsbestrijding HWS' (donkerblauw, zie voor uitleg Figuur 9-3) en 'Toename verziltingsbestrijding zoetwaterregio's' (geel, zie voor uitleg Figuur 9-3). Voor oprekpakket I zijn de veranderingen van de hoeveelheid watertekort en de onderverdeling van het watertekort weergegeven in Figuur 9-4. Pakket I geeft landsgemiddeld gesproken een beperkt effect (tot nog geen 10%), waardoor het watertekort fors blijft.



Figuur 9-4 Onderverdeling watertekort posten voor opreekpakket I. Zie Figuur 9-3 en zie voor samenstelling opreekpakket I paragraaf 8.1.

Opreekpakket II zorgt voor een grotere afname van het watertekort als gevolg van zeespiegelstijging, maar het totale watertekort blijft nog steeds aanzienlijk, zoals te zien is in Figuur 9-5. Dit pakket (waar pakket I in wordt meegenomen) heeft tegen zeespiegelstijging een aanmerkelijk effect: de toename in regionale doorspoelbehoefte wordt voor alle zichtwaarden meer dan gehalveerd. In het HWS is het pakket vooral tot ca. 1m zeespiegelstijging relatief zeer effectief. Voor 0,5 m zeespiegelstijging neemt de doorspoelpost van het HWS zelfs af ten opzichte van het huidige klimaat (negatief in Figuur 9-5). Bij hogere zeespiegelstijging (>2m zeespiegelstijging) blijft de doorspoelpost van het HWS echter groot (van dezelfde orde als het tekort door afnemende rivieraanvoer). Voor extreme zeespiegelstijging lijkt het opreekpakket dus beperkt invloed te hebben.

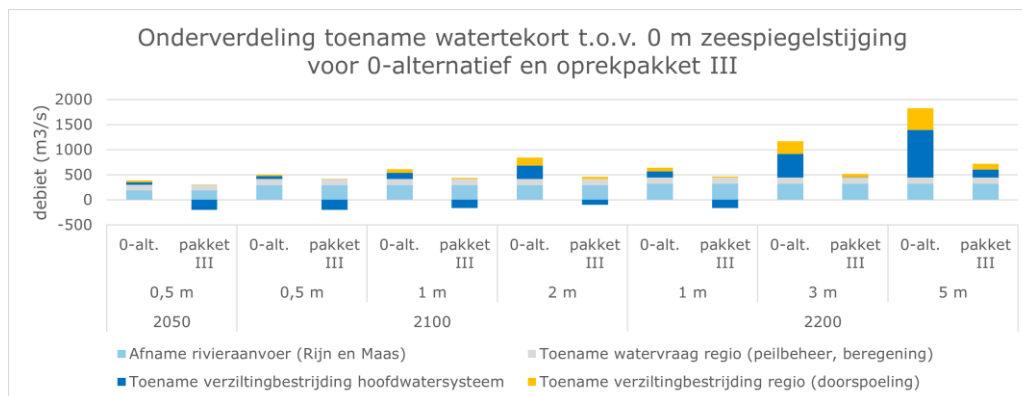


Figuur 9-5 Onderverdeling watertekort bij opreekpakket II. Zie Figuur 2-1 en zie voor samenstelling opreekpakket II paragraaf 9-3.

Het derde opreekpakket werkt zeer effectief in op de hypothetische watervraag van regionale systemen en het HWS. De toename in regionale watervraag wordt nog sterker beperkt. Voor het HWS resulteert pakket III tot en met 2m zeespiegelstijging in negatieve waarden¹² en levert het ook bij hogere zeespiegelstijging relatief het meeste op. In dit pakket worden de Oude Maas en het Hartelkanaal en de Lek en de Hollandsche IJssel situationeel afgesloten. Tijdens een afsluiting is in de RMM ca. 50 m³/s zoetwater nodig om zoutlek via de schutsluizen in de Oude Maas weg te spoelen. De rest van het rivierdebiet kan via de Nieuwe Maas tegendruk geven aan het zoute zeewater. Door deze omleiding wordt

¹² Negatieve toename betekent dat er minder water nodig zou zijn ten opzichte van de huidige situatie.

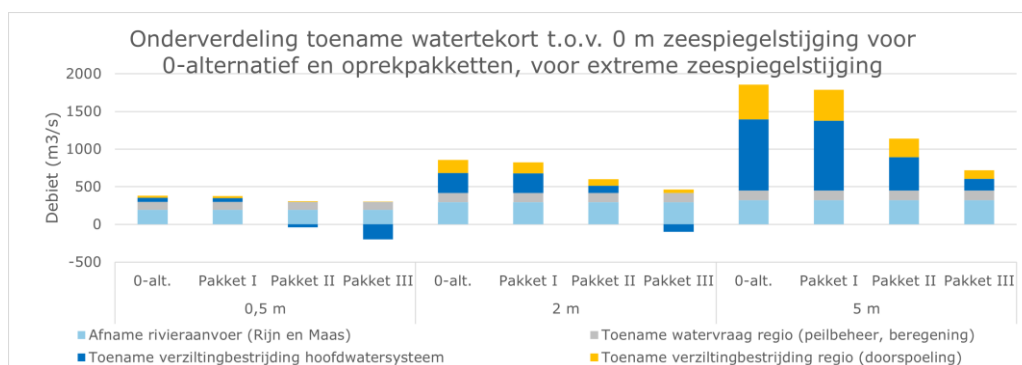
bijvoorbeeld bij 0,5m zeespiegelstijging de intrusielengte L_{250} ca. 25% korter dan in de situatie zonder maatregel. Deze ingrijpende systeem-aanpassing reduceert de hypothetische watervraag van de RMM in de balans. Deze maatregel komt in eerste instantie alleen ten goede aan het watertekort in de regio voorzien door de Waal, Nederrijn-Lek en de Maas. In de hier getoonde waterbalansen wordt dit 'vrijgekomen' debiet niet herverdeeld naar andere regio's, daarom kunnen de getallen in Figuur 9-6 niet zomaar tegen elkaar weggestreept worden. Bij zeespiegelstijging voorbij 3m is er ook bij pakket III geen sprake meer van een positief effect op de watervraag van de Nieuwe Waterweg door dit maatregelpakket, het watertekort blijft groter in vergelijking met de huidige situatie bij 0m zeespiegelstijging (waarde is groter dan 0). In de regio voorzien door de IJssel is als maatregel peilopzet in het IJsselmeergebied opgenomen in pakket III. Dit effect is zichtbaar gemaakt door de afname van de rivierafvoer (lichtblauwe vlak) kleiner te maken met een debiet van 105 m³/s. Dit debiet is ingeschat door uit te gaan van uitzakken van de meerpeilen met 30 cm in een periode van 2 maanden.



Figuur 9-6 Onderverdeling watertekort bij oprekpakket III. Zie Figuur 9-3 en zie voor samenstelling oprekpakket III Hoofdstuk 8.

De getoonde maatregelpakketten verkleinen steeds sterker het watertekort als gevolg van zeespiegelstijging (zie ook Figuur 9-7). Voornamelijk pakket III zorgt voor een grote afname van het watertekort op de posten beïnvloed door zeespiegelstijging. Ten opzichte van de huidige situatie blijft er in de scenario's vanaf 2100 desondanks altijd sprake van een watertekort. De maatregelen in pakket III hebben bovendien verstreckende gevolgen zowel binnen het waterbeheer (wateroverlast, waterveiligheid, investering in en bediening, beheer en onderhoud van civieltechnische kunstwerken en maatregelen) als voor andere functies zoals scheepvaart of natuur. Zoals beschreven zijn de doorspoelbehoeften deels hypothetisch. Het geheel tegengaan van de groei in die doorspoelbehoefte met de hier onderzochte maatregelen is dus ook deels hypothetisch. Immers, accepteren van en omgaan met meer (variatie in) verzilting kan maatschappelijk al op een eerder moment gunstiger uitpakken dan het moment dat de in deze pakketten gepresenteerde maatregelen kosten-baten-technisch of maatschappelijk gunstig uitpakken. Naast de verkende maatregelen in de oprekpakketten zullen er hoe dan ook aanvullende maatregelen nodig zijn om de waterbalans in evenwicht te krijgen en moeten die maatregelen tezamen in onderlinge afhankelijkheid en integraal in een adaptatiepad beschouwd worden. De conclusie van deze effectanalyse is dus louter gericht op het potentiële effect op de waterbalans, en zegt niets over de integrale kosten versus baten, de pad-afhankelijkheid en de maatschappelijke meerwaarde van de pakketten onderling, laat staan de meerwaarde van deze maatregelen ten overstaan van de alternatieven die vooral neerkomen op het

accepteren van en omgaan met een toekomst waarin zoutgehaltes in regionaal watersysteem en delen van het HWS meer dan nu zullen gaan fluctueren tussen natte en droge perioden. Het aspect van fluctuaties moet niet uit het oog verloren worden. De hier gepresenteerde balansen verwijzen namelijk naar een geconstrueerde T20 situatie. De keuze daarvoor is ingegeven door het uitgangspunt (paragraaf 1.3) dat de zoetwaterstrategie een eens in de 20 jaar optredende droogte nog het hoofd zou moeten kunnen bieden. Deze presentatiewijze geeft echter niet het volledige inzicht. Minder extreme, vaker voorkomende condities zijn nu nog niet in beeld en ook de duur en uiteindelijke impacts van zowel de condities in het nul-alternatief als condities en de duur van inzet van de maatregelen bij de pakketten is niet of maar in beperkte mate bepaald.



Figuur 9-7 Onderverdeling watertekort voor het meest extreme scenario van de zeespiegelstijging snelheid, voor de huidige situatie en de 3 oprekpakketten. Zie Figuur 9-3 en zie voor samenstelling oprekpakket III Hoofdstuk 8.

9.2. Hydraulische knelpunten

Volgens het huidige beheer wordt zoutindringing in het hoofdwatersysteem en regionaal systeem voor een groot deel tegengegaan door het doorvoeren van een zoetwater spoeldebiet. Paragraaf 9.1.1 heeft laten zien wat er met de waterbeschikbaarheid gebeurt als we verzilting op dezelfde manier als nu blijven bestrijden. De behoefte zal steeds vaker groter zijn dan de hoeveelheid water die het land binnenstroomt via de grote rivieren, ook indien zeespiegelstijging zich gematigd ontwikkelt, maar droogte wel sterk toeneemt. Zoals in paragraaf 9.1.1 ook toegelicht is een deel van de in de waterbalans gepresenteerde watervraag voor verziltingsbestrijding hypothetisch. Er is hoe dan ook onvoldoende water om deze behoefte tijdens droogte in zijn geheel te voorzien, ook al bij beperkte zeespiegelstijging. Er kan echter voor gekozen worden om een deel van de strategie in bepaalde deelgebieden wel voort te zetten. In dat geval kunnen hydraulische knelpunten optreden in het watersysteem.

In eerder hoofdstukken werd al opgemerkt dat regionale aanvoer- en doorvoercapaciteiten beperkend kunnen zijn om de benodigde hoeveelheid water naar de beoogde gebieden te voeren. KP ZSS heeft geen nadere analyse gemaakt van de knelpunten in de regionale systemen, maar algemeen kan gezegd worden dat inlaten en aflaten onder vrij verval (ook naar zee en naar rivieren die meestijgen met de zeespiegel), gemaalcapaciteiten en de stroomsnelheden en verhanglijnen in regionale systemen niet eindeloos zijn te vergroten. De kosten, neveneffecten, en technische risico's (faalkansen, beheersbaarheid) zullen toenemen en vanaf een bepaald punt niet meer opwegen tegen de baten.

Voor het HWS heeft KP ZSS wel een eerste beeld van hydraulische knelpunten gemaakt:

- Zeespiegelstijging zorgt voor het afnemen van de spuicapaciteit onder vrij verval naar zee en naar meestijgende binnenwateren. Uit de systeemanalyses kan geconcludeerd worden dat de meeste spuivoorzieningen in het HWS die voor afvoer van zout gebruikt worden ook voor peilbeheer ingezet worden en dat de daartoe benodigde capaciteiten maatgevend zijn en blijven. Ervan uitgaand dat peilbeheer zal worden voortgezet volgens de huidige strategie, lift zoutbestrijding dus op de aanpassing van spuien en gemalen mee.
- Een andersoortig hydraulisch knelpunt gaat zich afspelen aan de bovenstroomse zijde van de RMM. De waterstanden van Hollandsche IJssel en Lek zullen meestijgen met de zeespiegel en tegelijk zullen de benodigde regionale en HWS-doorspoelbehoeften toenemen. Bij voortzetten van de strategie treedt stapeling van watervraag aan het stuwpand Hagestein - Amerongen op: dit stuwpand van de Lek bedient de doorspoeling en regionale watervraag van het ARK-NZK en het gebied rond Hollandsche IJssel en Lek. Deze stapeling van debieten komt terecht bij de Bernhardsluizen, Irenesluizen, stuw Hagestein, Waaiersluis Gouda en de doorvoerroutes van de KWA en DKW.

Deze punten worden op een bepaald moment beperkend in hun capaciteit, waarbij de afweging te maken is of de capaciteit uit te breiden is of dat dit niet meer als houdbaar beoordeeld wordt gelet op neveneffecten. Bijvoorbeeld inzet van de Nederrijn via stuw Driel kan het ARK-Betuwepand (Bernhardsluizen) ontlasten.

De volgorde van de hydraulische knelpunten in het HWS als gevolg van zeespiegelstijging is samenvattend als volgt:

1. Richting 0,5 m zeespiegelstijging gaat de afname van de spuicapaciteit bij IJmuiden en Den Oever opspelen in het peilbeheer, er kan hier dan niet meer voldoende gespuid worden en er is eerder al meer gemaalcapaciteit nodig. Bij 1m zeespiegelstijging is er vrijwel geen spuicapaciteit meer beschikbaar op de Afsluitdijk omdat ook Kornwerderzand dan wegvalt, ook hier is dan eerder al meer gemaalcapaciteit nodig.
2. Rond 0,5 m zeespiegelstijging zullen er bij het VZM pompen nodig zijn om de IZZS bij de Krammersluizen operationeel te houden. Dit betreft pompen op het laagbekken (reeds voorzien) en pompen bij het spuimiddel (SPVM). Vanaf 1m zeespiegelstijging kan er niet meer gespuid worden.
3. Rond 2 m zeespiegelstijging kan stuw Hagestein in zijn huidige vorm niet meer worden ingezet om de benodigde afvoer onder vrij verval richting de Lek te realiseren. Eerder zal de stuw al te maken gaan krijgen met kortstondig negatief verval (eerst tijdens windopzet en springtij en bij voortschrijdende zeespiegelstijging geleidelijk aan tijdens elk hoogwater): aangezien de stuw hier niet op ontworpen is, zal hij dus al eerder zeespiegelbestendig moeten worden gemaakt dan bij 2m zeespiegelstijging. Van de andere bovengenoemde knelpunten rondom stuwpand Hagestein is niet in detail bepaald bij welke zeespiegelstijging ze beperkend worden, mede omdat dit sterk afhangt van de beleidsmatige keuzes ten aanzien van doorspoelen en stapelen van behoeften.
4. Rond 2 m zeespiegelstijging zorgt de hoeveelheid extra door te voeren spoeldebiet door zeespiegelstijging voor de Irenesluizen, Bernhardsluizen en de lokale doorvoerroute KWA ook voor een hydraulisch knelpunt.
5. Vanaf 2,5 m zeespiegelstijging is het niet meer mogelijk om te spuien bij Bath op de Westerschelde. Eerder, bij 1 m zeespiegelstijging zijn er pompen nodig

om voldoende afvoercapaciteit voor peilbeheer te behouden, er is niet onderzocht wanneer precies.

De beschouwde oprekmaatregelen in paragraaf 9.1.2 om de effecten van zeespiegelstijging op de doorspoelvraag voor het hoofdwatersysteem en de waterschappen te mitigeren resulteren voor alle pakketten in een afname van het watertekort. De in deze studie verkende maatregelen verlichten dus enigszins de druk op de hier genoemde hydraulische knelpunten, maar nemen die niet allemaal weg. Verdergaande maatregelen in de RMM (bijvoorbeeld verder verondiepen van de RMM, zie Hoofdstuk 5) kunnen bijvoorbeeld wel de toename in benodigde surplussen op HIJ en Lek remmen, maar niet een negatief verval over stuw Hagestein voorkomen.

10 Conclusies en discussie

10.1. Conclusies hoofdvragen

Deze synthese brengt de kernpunten van de regionale systeemanalyses Zoetwater (KP ZSS) samen en plaatst deze in het perspectief van de landsbrede waterbalans van het HWS. Het rapport beantwoordt daarmee de hoofdvragen van de Systeemanalyses KP ZSS vanuit een overwegend technisch (waterstaatkundig) perspectief:

1. Wat zijn de gevolgen van (extreme) zeespiegelstijging voor de waterbeschikbaarheid in Nederland?
2. Wat betekent (extreme) zeespiegelstijging voor de houdbaarheid van de voorkeursstrategie Zoetwater?
3. Hoe en tot wanneer/welke meters zeespiegelstijging is de voorkeursstrategie Zoetwater houdbaar te houden? ('oprekbaar')?

Hieronder worden deze vragen beantwoord, waarbij vragen 1 en 2 tezamen beantwoord worden. Daarna volgt een chronologie van gevolgen en mogelijke maatregelen bij toenemende zeespiegelstijging en droogte.

Gevolgen van (extreme) zeespiegelstijging voor de zoetwaterbeschikbaarheid en houdbaarheid van de zoetwaterstrategie

De belangrijkste bedreiging van zeespiegelstijging is verzilting. Verzilting zet ook zonder zeespiegelstijging al druk op de zoetwaterbeschikbaarheid, maar neemt door zeespiegelstijging verder toe. Daarnaast beperken afvoer- en doorvoermogelijkheden van zoetwater steeds meer de zoetwaterbeschikbaarheid. De effecten van verzilting door zeespiegelstijging zijn dus alleen goed te duiden in combinatie met droogte (lagere rivierafvoeren en hogere watervraag). Verzilting wordt in de huidige strategie bestreden met doorspoeling. Het op dezelfde voet tegengaan van toenemende verzilting zou extra zoetwater vereisen waardoor de spanning tussen waterkwaliteit (zoutbestrijding) en waterkwantiteit verder toeneemt.

Bij circa 0,5 m zeespiegelstijging (tweede helft van deze eeuw) ontstaan aanzienlijke tekorten. In een zeer droge zomer (T20-vraag en -aanbod) bedraagt het zoetwatertekort 50–80% van de totale rivieraanvoer. Landsbreed nemen de tekorten in de komende eeuw steeds meer toe, maar technisch is de strategie tot in de tweede helft van deze eeuw nog uitvoerbaar. Hydraulische knelpunten (peil- en zoutbeheer) treden al onder 0,5 m zeespiegelstijging op maar die zijn technisch oplosbaar.

Rond 1 m zeespiegelstijging wordt de strategie landsbreed onhoudbaar. In de gevolgde *worst-case* benadering worden totale tekorten dan vergelijkbaar met of groter dan de rivieraanvoer: in gestapelde T20-condities stroomt nauwelijks nog water via de Nieuwe Waterweg naar zee. Daardoor lopen zoutgehalten in de RMM sterk op. De grootste bijdrage aan de onbalans is de 'hypothetische zoetwatervraag' van de RMM: de hoeveelheid debiet door de Nieuwe Waterweg die bij een bepaalde zeespiegel nodig zou zijn om de intrusielengte van de zouttong te houden zoals die in het huidige klimaat is. In de praktijk wordt dit water niet met dat doel naar de RMM gestuurd (als het al beschikbaar zou zijn) maar gaat dit hypothetische tekort zich als toenemende verzilting in de RMM manifesteren.

Ondanks sterke landsbrede toename van tekorten zijn, buiten de RMM, de strategieën van de deelgebieden van het hoofdwatersysteem bij 1m zeespiegelstijging nog wel houdbaar. Het IJsselmeer, ARK-NZK en VZM krijgen bij voortzetting van de strategie tot 1 m te kampen met slechts beperkt meer verzilting. In die deelgebieden is vooral de toenemende droogte in combinatie met afnemend wateraanbod debiet aan de groeiende tekorten. Jaargemiddeld zijn deze delen nog zoet genoeg te houden voor alle functies. Om de deelgebied-strategieën houdbaar te houden, is het wel nodig om maatregelen te treffen bij gemalen, sluizen en andere kunstwerken die door zeespiegelstijging hun werking verliezen. Dit betreft de hydraulische werking (water afvoeren, stuwen), maar ook de zoutscheidende werking, zoals bellen-schermen bij sluizen en de inzet van gemalen gericht op afvoer van zout water.

Bij meerdere meters zeespiegelstijging worden de deelgebied-strategieën steeds meer beïnvloed door interne verzilting. Het wegspoelen van zoute kwel als gevolg zeespiegelstijging legt een steeds grotere claim op de waterbalans. Voortzetten van de huidige zoetspoelstrategie van polders en boezems is dan niet meer houdbaar.

Tot welke condities is de voorkeursstrategie Zoetwater houdbaar te houden?

Oprekken betekent optimalisatie van beheer en inrichting binnen de filosofie van de voorkeursstrategie van een open-gesloten systeem, slimme verdeling en beperking van de vraag. Zolang grote lock-ins worden vermeden, blijft overstap naar een robuustere of rendabelere strategie mogelijk. Maatregelen zoals gemalen en extra bronmaatregelen verlengen de levensduur van de strategie, maar kunnen ook de afhankelijkheid van water uit het HWS vergroten en leiden niet vanzelf tot vraagbeperking. Het rendement van deze maatregelen hangt af van zowel de beschikbaarheid van HWS-water als de mate waarin verzilting wordt geaccepteerd.

In de open-gesloten RMM betekent oprekken tot 0,5 m (mogelijk tot 1 m) vooral optimalisatie van het beheer van Lek en Hollandsche IJssel door middel van surplussturing, eventueel met meer acceptatie van verzilting in de benedenlopen. Ook vanaf 1 m kunnen Hollandsche IJssel en Lek technisch gesproken nog steeds zoet gespoeld worden, maar het is een open vraag hoe maatschappelijk rendabel dit in de praktijk dan nog is, gelet op neveneffecten in de aanvoerregio's en baten van de inzet van debiet voor verziltingbestrijding afgezet tegen baten van dezelfde debieten voor andere doelen binnen de strategie.

Gevoeligheid van de RMM voor zeespiegelstijging en lage rivierafvoer kan deels (maar niet geheel) worden verminderd. Daarmee neemt de 'hypothetische water-vraag' af. Dit kan bijvoorbeeld via bodem- of geometrische aanpassingen of gedeeltelijke, situationele afsluitingen die het resterende rivierdebiet effectiever tegen de zouttong in laten stromen.

Tijdens droge perioden accepteren van tijdelijk hogere chloridewaarden is een andere oprekmaatregel. De verziltende delen van de noordrand van het RMM en het ARK en ook het VZM herstellen zich immers weer als de afvoeren stijgen en doorspoeling weer mogelijk is. Ook het IJsselmeer blijkt zich over de seizoenen heen nog te kunnen herstellen. Bij 3m zeespiegelstijging komt het zomergemiddelde weliswaar eens in de 10 jaar boven de huidige richtwaarde voor drinkwaterwinning (150 mg/L) uit, maar in het merendeel van de jaren blijft de concentratie bij Andijk nog steeds onder de 200 mg/L. De seizoensdynamiek van zoutgehalte deels omarmen betekent besluiten om niet maximaal in te zetten op zoetspoelen in perioden dat dit water schaars is en wellicht voor andere doeleinden grotere meerwaarde heeft. Dit kan de spoelstrategie effectief oprekken.

Twee deelgebieden nemen een bijzondere positie in: de zuidrand van de RMM en het gekoppelde VZM. Hier kunnen zich een lastiger om te keren kantelpunt en cascade-effect voordoen. Bij zeer lage restdebieten via de Nieuwe Waterweg en extreme zeespiegelstijging kunnen Hollands Diep en Haringvliet langdurig verzilten en daarna moeilijk te verzoeten zijn, terwijl deze gebieden wel zout 'naleveren'. Wanneer de verzilting van Hollands Diep de doelconcentraties van het VZM benaardt, is de huidige strategie ook daar zonder doelwijziging niet langer houdbaar. De exacte ligging van dit kantelpunt, de bovenregionale doorwerking van het cascade-effect en de mate van nalevering en verzoeting bij herstel van de afvoeren moet nog nader onderzocht worden.

In de overige deelgebieden is geen absoluut eindpunt voor de strategie vast te stellen. Wel heeft elk gebied een minimale zoetwaterbehoefte; als die niet zonder grote maatschappelijke nadelen kan worden geleverd, wordt de strategie onhoudbaar. Deze 'einde houdbaarheid' treedt op wanneer regionale of korte-termijn voor- delen niet meer opwegen tegen nadelen elders, of wanneer betere alternatieven beschikbaar zijn. Voor het HWS geldt dat sommige deelgebieden langer houdbaar zijn dan het systeem als geheel. Strategische keuzes zijn mogelijk: bepaalde gebieden zo zoet mogelijk houden en elders meer verzilting accepteren. Accepteren van verzilting kan de strategie ook daar deels nog laten functioneren, maar met grotere variatie in zoutgehaltes. Ook bij regionale maatregelen zijn bovenregionale afwe- gingen nodig, omdat baten en kosten deels elders neerslaan. Daarom moeten houdbaarheid en oprekbaarheid zowel regionaal als bovenregionaal op doel- matigheid en rendement worden beoordeeld.

Nog vóór tekorten ontstaan, moeten per deelgebied worden afgewogen tussen hogere zoutgehalten accepteren of technische oprekmaatregelen nemen, ook bovenregionaal vanwege de onderlinge wisselwerking. Acceptatie kan restopgaven, kosten en inzet van maatregelen beperken. Dit vraagt verfijndere analyses dan de in dit kennisprogramma gehanteerde worst cases en relatief eenvoudige optelsom van regionale balansen (met en zonder maatregelen) tot één landsbrede balans.

10.2. Chronologie

In Tabel 10-1 zijn de resultaten van de systeemanalyses zoetwater in de tijd en naast elkaar geplaatst. Dit is gedaan voor het extreme zeespiegel-scenario gecombineerd met het extreme droogte-scenario. Voor watervraag en afvoeren is de relatief droge variant van het extreme emissie-scenario (KNMI scenario Hd) gecombineerd met het scenario van relatief sterke groei in watervraag (Deltascenario Stoom). Zie voor de resulterende combinatie van zeespiegelstijging, T20 rivierafvoer (wateraanbod) en T20 watervraag Figuur 2-1.

Let wel dat dit overzicht geen volledig adaptatie-pad is. De complexiteit van het adaptatie-vraagstuk vertaalt zich in ruimtelijke afhankelijkheid (van deelgebied naar deelgebied), in pad-afhankelijkheid in de tijd (effect van eerdere beslissingen op latere beslissingen) en in thematische afhankelijkheid (beslissingen bijvoorbeeld omwille van waterveiligheid, natuur of scheepvaart beïnvloeden de beslisruimte voor zoetwater en vice versa). Tot slot is informatie over herhalingstijden en condities die minder extreem zijn dan de gehanteerde T20 events niet beschouwd. De chronologie beperkt zich dus tot *worst-case* stapeling van de opgaven en maatregelen en beschouwt niet de integrale opgave en afwegingen in het watersysteem.

Tabel 10-1 Per deelgebied twee kolommen "wat gebeurt er als" o.b.v. combinatie van zeespiegelstijging (ZSS) en droogte (rivierafvoer en watervraag), en mogelijk handelingsperspectief ontleend uit de maatregelpakketten. In de laatste kolom staat landsbreed de optelsom van de knelpunten en wisselwerking van maatregelen.

ZSS (m)	Tijd	Grondwater		RMM		IJM		ARK-NZK		VZM		Landsbreed
0-0,2	2050	Doorspoelvraag neemt toe bij voortzetten strategie bestrijding zoute kwel.		Rivierafvoer-daling domineert verzilting	Surplus HIJ en Lek vaker toepassen of vaker verzilting accepteren	Wat betreft zout is IJM redelijk robuust jaarrond; systeem herstelt in winters, maar zomerse piekwaarden lopen steeds meer op en houden langer aan. Vanwege toenemende droogte wel scherper dilemma zoetspoelen versus voorzien watervraag. Aanpassen bufferschijf (bijv. van 30cm) rond zomerpeil verzacht dilemma enigszins.	Zoutlek-maatregelen spuilsuizen en optimaal sluisbeheer.	Systeem op zichzelf relatief robuust tegen verzilting		Vanaf 0,2 m ZSS neemt capaciteit van SPVM af onder de beoogde winterwaarde		Q_{www} sterk bepalend voor dilemma's waterbalans en verzilting
0,5	2050-2100	Deze post gaat steeds meer drukken op de zout- en waterbalansen van de deelsystemen en op de landsbrede balans.	Meer directe afvoer spoelwater op zee kan regionale zoutbalans ontlasten, maar druk dan wel weer op peilbeheer HWS. Kunstwerken en inrichting regionaal aanpassen op ZSS: meer gemalen, andere routes.	Surplusstrategie HIJ en Lek relatief robuust. Kan tot 0,5m zeker nog volgehouden worden. Bij sterke daling Q_{www} meer surplus nodig dan alleen voor ZSS.	Surplus HIJ en Lek vergroten; 100 m ³ /s / Q_{www} daling kan gecompenseerd worden met ca. 10 m ³ /s extra surplus (beide takken samen).	Afname spuitcapaciteit bedreigt peilbeheer en werkt verzilting in hand. Toename jaargemiddelde chlorides marginaal. Toename zomerse piekwaarden beperkt. Toename zoutvracht via sluisen versterkt de speelbehoefte. Toenemende droogte gaat ten koste van verziltingsbestrijding (peil gaat voor zout)	Overstap op gemalen nodig voor peil in gecombineerde spui-maal-strategie. Overstap voor optimaal zoutbeheer eerder effectief dan voor peilbeheer: gemalen inzetten om erosiekuiten te ontzilten.	Peilbeheer dicteert, zoutbeheer lift mee. Vanaf 0,4m, 100% malen voor peilbeheer nodig	Optimalisatie Selectieve Onttrekking in combinatie met aanpassing spui-maal strategie. Dynamisch beheer ARK (pulsen) en bellesscherm bieden daarnaast kansen om situationeel op ARK debiet te besparen	Vanaf ca. 0,5 m capaciteit SPVM in de zomer ontoereikend	Pompvoorzieningen bij IZSS nodig.	Q_{www} nog steeds sterk bepalend, ZSS komt erbij Rond 0,5 meter zeespiegelstijging kunnen de watertekorten zo gaan knellen dat het noodzakelijk is op landelijk niveau beleidsmatig te kiezen hoe we het schaarse zoetwater verdelen.
1	2100-2150	Bij 1 meter zeespiegelstijging is landsbreed 3-4 keer zoveel spoelwater nodig, terwijl minder zoetwater beschikbaar is. Watergebruikers moeten in de betreffende polders zich aanpassen aan hogere zoutgehalten. Droge zomerperioden gaan afgewisseld blijven met nattere perioden en met nattere winters. Zout en peil en grondwaterstanden gaan dus veel meer variëren dan nu.	Aanpassingen op land (omgaan met grotere zoutvariabilites) kunnen watervraag tientallen procenten beperken. De keuze ligt voor om er expliciet voor te kiezen minder zoetwater beschikbaar te stellen voor het doorspoelen van deze polders, zodat andere delen en functies langer voorzien kunnen worden. Dat kan bijvoorbeeld door op een hoger zoutgehalte te sturen of delen met de grootste doorspoelvraag niet meer van zoetwater te voorzien.	Capaciteiten aanvoerroutes HIJ en Lek worden beperkend (omvang, frequentie KWA). Rendement v.d. surplusstrategie neemt af: verhouding voorziene onttrekkingen vs. surplus worden steeds ongunstiger.	Verzilting accepteren in benedenlopen van beide takken kan 30-50% surplusdebieten besparen. Impact op inlaat DKW in Lek, en benedenstrooms Snelle Sluis in HIJ.	Zoutlast schutsluizen neemt overhand over zoutlast gemalen/spuilen. Desondanks jaarrond geen normoverschrijdingen, wel verder toenemende piekwaarden in zomers.	Aanvullende maatregelen op schutsluizen: drempels, bellesschermen, kolk- en voorhavenspoeling.	Zonder aanvullende maatregelen ca 3m ³ /s per meter ZSS extra debiet ARK zoet te houden.	Indien verdere reductie WIS debiet gewenst (dan huidig debiet): aanvullende civieltechnische maatregelen monding ARK; aanbeveling om e.e.a. nader uit te werken t.a.v. kosten en baten en leveringszekerheid.	Vanaf ca. 1 m ZSS kan het laagbekken van de IZSS onder vrij verval niet meer voldoende functioneren. Vanaf ca. 1 m ZSS daalt de maximale afvoercapaciteit bij Bath onder de 60 m ³ /s.	Oprekken kan door overstap gemalen i.p.v. spuien en door grotere zoutmarges te hanteren: meer winterspoeling, zomerse hogere grenswaarde in HWS.	Regionale kwelbestrijding sterk bepalend Het lukt steeds vaker niet om en de grote zoete watersystemen zoet te houden in droge zomers en de kwantitatieve watervraag te voorzien. De herhalingstijd waarmee dit dilemma terugkeert is niet exact bepaald, maar dit knelpunt wordt hoe dan ook geleidelijk groter. Wanneer precies keuzes wenselijk of nodig zijn, hangt ervan af hoe we het kwantitatieve tekort aan zoetwater beoordelen tegenover het kwalitatieve tekort (verzilting) en in welke mate verschillende watergebruikers kunnen meebewegen, bijvoorbeeld door hun bedrijfsvoering aan te passen.
2	2200-2300	Gevraagde capaciteiten overschrijden regionale doorvoermogelijkheden.	Afwegingen tussen faciliteren en accepteren, tussen kwantiteit en kwaliteit binnen regio's.	Voorbij 1-2m wordt beheersing RMM lastiger, zeker als Q_{www} verder blijft dalen. Spui-BBM en zuidrand steeds gevoeliger ook voor wind-events.	Ingrijpen in RMM benedendeel is te overwegen. Meegroei bodem (of meer) mitigeert ZSS al deels zonder scheepvaart te hinderen. Kosten en baten moeten wel afgewogen, want	Zoutlast schutsluizen neemt verder toe. Sluismaatregelen gaan steeds meer spoelwater vragen.	Verdere optimalisatie sluisen kan, maar netto debietbesparing ten einde. Minimum spoeldebiet over Afsluitdijk van 30 m ³ /s tijdens droogte nodig voor handhaven huidige	Knelpunten door stapeling debieten (KWA, Diemen, lateralen). Eerst bij Irenesuizen, daarna ook op Stuwen NRL, Bernhardsluizen.		Vanaf 2m overstijgt de totale watervraag voor HWS en regio via de Volkeraksluizen de reguliere capaciteit. Vanaf ca. 2,5 m kan er via Bath in het geheel niet meer onder vrij verval worden gespuid op de Westerschelde.	Meer zout accepteren in de doorspoelgebieden op land; beide nodig om de toename in speelbehoefte te beperken.	Stuw Hagestein in Lek benedenstroomse waterstand gelijk aan bovenstroomse waterstand, hydraulisch knelpunt en effect op functie waterverdeling onbekend.

ZSS (m)	Tijd	Grondwater		RMM		IJM		ARK-NZK		VZM		Landsbreed
					accepteren is ook nog steeds optie.		doelen. Lager lijkt niet haalbaar.					
3		Gevraagde debieten belasten HWS (zowel in waterbalans als in gevraagde capaciteiten kunstwerken)	Afwegingen tussen faciliteren en accepteren, tussen kwantiteit en kwaliteit tussen regio's	Lange-termijn houdbaarheid wordt beperkt door houdbaarheid Holl. Diep. Toenemende doorspoelbehoefte (vooral van regio ZWD) ondermijnt de RMM.	Grootschaliger ingegrepen kunnen overwogen worden middels keringen/stuwen in OM en HK. Dit (situationeel) afsluiten van de RMM-zuidrand vergroot wel de windgevoeligheid van de RMM-noordrand	Overschrijdingen jaargemiddelden	Oprekken kan zeer goed door hogere zomerwaarden te accepteren: zomer maxima blijven tot 3 m ZSS nl meest beperkt tot onder de 200 mg/L.			VZM van zichzelf goed te beschermen en op te rekken tot 3m, maar uiteindelijk niet houdbaar i.c.m. open RMM. Lange-termijn houdbaarheid wordt beperkt door houdbaarheid Holl. Diep. Toenemende doorspoelbehoefte (vooral van regio ZWD) ondermijnt Holl. Diep en RMM noordrand.	Om levensduur maximaal te houden: moet HD zoet genoeg blijven, bij gematigde rivierdaling lukt dit tot ca 3m, bij extreme daling wellicht al in buurt van 1m toenemende verzilting HD.	Bovenregionale afwegingen nodig.
>3				Mogelijk tipping point: permanente achterwaartse verzilting met nalevering Holl. Diep en Haringvliet vanaf $L_{250} \sim 70\text{km}$. Dit treedt op bij $3\text{m ZSS} \& Q_{\text{NWW}} \leq \sim 300 \text{ m}^3/\text{s}$; $2\text{m ZSS} \& Q_{\text{NWW}} \leq \sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$; $1\text{m ZSS} \& Q_{\text{NWW}} \ll 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Kennisleemte wat betreft exacte ligging en aard tipping point i.c.m. wind-effecten.		Zoutvrachten omliggende gebieden gaan steeds grotere rol spelen	Bronmaatregelen alleen houden systeem niet zoet. Met alle maatregelen bij 5m is het zomer maximum <250 mg/L.			Mogelijk tipping point: permanente achterwaartse verzilting met nalevering Holl. Diep en Haringvliet vanaf $L_{250} \sim 70\text{km}$. Dit treedt op bij $3\text{m ZSS} \& Q_{\text{NWW}} \leq \sim 300 \text{ m}^3/\text{s}$; $2\text{m ZSS} \& Q_{\text{NWW}} \leq \sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$; $1\text{m ZSS} \& Q_{\text{NWW}} \ll 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Kennisleemte wat betreft exacte ligging en aard tipping point i.c.m. wind-effecten.		

10.3. Discussie: dilemma's binnen en buiten de zoetwatervoorziening

Voorgaande hoofdstukken maken duidelijk dat alle verziltingsgevoelige delen van het hoofdwatersysteem en grote delen van het regionaal systeem onderling communicerende vaten zijn. En dat er voortdurend wisselwerking is tussen zoetwaterdoelen in termen van kwantiteit ('kuubs') en kwaliteit ('chloride'). De gevoeligheidsanalyses van KP ZSS laten zien wat de druk van zeespiegelstijging op die communicerende vaten en doelen is en wat enkele opties zijn om ze robuuster te maken. De afweging tussen de deelgebieden en doelen is binnen deze studie echter maar deels beschouwd. Het toegepaste concept van een instantane waterbalans, stapeling van dreigingen en een beperkte selectie van maatregelen geven de werkelijkheid sterk vereenvoudigd weer.

Uit de systeemanalyses komen de volgende dilemma's naar voren.

Zoetwater kwantiteit versus zoetwater kwaliteit

Zeespiegelstijging en droogte vergroten de verzilting, die wordt bestreden door doorspoelen van het HWS en regionale systemen. Tegelijk neemt door klimaatverandering de onbalans tussen vraag en aanbod toe. De analyses tonen dat deze onbalans niet volledig binnen het waterbeheer is op te lossen: verziltingsbestrijding vergt altijd spelwater, terwijl acceptatie van hogere zoutgehalten juist water bespaart. Daarmee wordt omgaan met hogere chlorides op termijn onvermijdelijk. De optimale afweging tussen doorspoeldebieten en zoutgehalten, zowel technisch als maatschappelijk, kan met deze systeemanalyses niet volledig worden bepaald. Wel blijkt dat een strategie die primair inzet op dreigings-beperking en acceptatie van restrisico (KZH) niet onbeperkt houdbaar is. Vermindering van afhankelijkheid door buffering en ontkoppeling en bevordering van schadebeperking en herstelvermogen worden noodzakelijk. Hoe sterker de strategie inzet op vraagbeperking, hoe kleiner de gevoeligheid en hoe beter toekomstige lock-ins bij verdere zeespiegelstijging worden voorkomen.

Bij minder doorspoelen moet wel worden meegenomen dat doorspoeling ook de chemische en ecologische waterkwaliteit ondersteunt en deels samenvalt met wateraanvoer voor peilbeheer en beregening.

Andere functies versus zoetwaterfuncties

Scheepvaart, met name schutten, is een belangrijke bron van verzilting in gesloten zoetwatersystemen. Zeespiegelstijging en ontwikkelingen in de scheepvaart (grotere sluizen, meer schuttingen) vergroten deze zoutlast, vooral bij diepe zeesluizen zoals IJmuiden. Hierdoor nemen spanningen toe tussen de transportfunctie en de zoetwaterfunctie van het watersysteem. Technische maatregelen zoals drempels, bellenschermen en zoetspoelen kunnen verzilting beperken, maar vereisen complexere bediening en structureel zoetspoelwater (enkele tot tientallen m³/s per kolk). Daarmee rijst de vraag of zoetwater- en scheepvaartfuncties overal en altijd verenigbaar blijven, of dat functiescheiding¹³ soms maatschappelijk rendabeler is. Vergelijkbare dilemma's spelen ook voor waterveiligheid, drinkwater en natuur.

Meestijden versus pompen

Bij gelijkblijvende peilen vervalt in gesloten systemen geleidelijk de mogelijkheid tot spuien onder vrij verval. Oplossingen zijn pompen (zoals in deze studie

¹³ Bijvoorbeeld in de RMM de inrichting van een diepe, zoute half afgesloten vaarweg met havens, gescheiden van een ondiepere, relatief zoete rivier parallel daaraan.

aangenomen) en/of het (deels) meestijgen van peilen, met gevolgen voor waterveiligheid en wateroverlast. Meestijgen kan de benutbare zoetwaterbuffer vergroten, maar afvoer van zout lekwater via gemalen of hevels is efficiënter dan via spuien. Ook bij meestijgende peilen blijft actief zoutbeheer met gemalen daarom wenselijk als de doorspoelbehoefte moet worden beperkt.

10.4. Aanbevelingen voor vervolg

De hier gepresenteerde systeemanalyses zijn uitgegaan van een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid. Voor een gevoeligheidsanalyse bieden ze voldoende inzichten. Voor het onderbouwen van besluiten 'wat te laten' wellicht ook nog wel: de levensduur van de strategie bij *worst case* stapeling laat zien dat er nog ruimte en rek in de strategie zit. Voor besluiten 'wat wel te doen en wanneer' geven de analyses hooguit een eerste richting.

Aanbevolen wordt om het concept van *worst case* stapeling en een stationaire water- en zoutbalans los te laten en het spectrum aan klimaat- en sociaaleconomische drukfactoren te verbreden. Besluitvorming wat wel te doen en waar vraagt om betere inzichten in herhalingstijden, coïncidenties en dynamische effecten.

Specifiek is voor de RMM een gedetailleerdere analyse nodig met windeffecten, dynamische lozingen en onttrekkingen en tijdsvariabele afvoeren. Voor het IJsselmeer verdient de werking van gemalen (ecologisch, energetisch en qua faalkansen voor waterveiligheid) in combinatie met peilbesluiten en andere ecologische functies (vismigratie en brakke zones) een nadere beschouwing.

De regionale systemen zijn nu slechts globaal beschouwd. Vervolgstudies moeten regionale details, aanpassingsopties en samenhang met andere opgaven (wateroverlast, bodemdaling, ruimtelijke druk) meenemen voordat keuzes over beheer en functies kunnen worden gemaakt.

Voor alle deelgebieden geldt dat hoe om te gaan met de toekomstige dynamiek in de jaargemiddelde en zomerse chloridewaarden, integraal moeten worden beantwoord.

11 Referenties

- Arcadis 2019 (Tuijnder A) *Inzetbaarheid Stuw Hagestein ter bestrijding van verzilting op de Lek*, Arcadis rapport 083808337, 4 februari 2019
- Arcadis / HydroLogic 2023a (Van der Heijden et al.) *Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II: Systeemanalyses zoetwater regio Volkerak-Zoommeer* Rapportnummer: 30101791.1.ANL Arcadis, Januari, 2023
- Arcadis / HydroLogic 2023b (Coonen et al.) *Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II: Systeemanalyses zoetwater regio Rijn-Maasmonding*. Rapportnummer: 30101791.2.P1319, Arcadis, Maart, 2023
- Arcadis / HydroLogic 2023c (Van der Baan et al.) *Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II: Systeemanalyses zoetwater regio Amsterdam-Rijnkanaal-Noordzeekanaal*. Rapportnummer: 30101791.3.ANL. Arcadis, Januari, 2023
- Arcadis / HydroLogic 2023d (Boelens et al.) *Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II Systeemanalyses zoetwater regio IJsselmeer – Markermeer* Rapportnummer: 30101791.4.P1319, Arcadis, januari 2023
- Arcadis / HydroLogic 2023e (Spijker et al.) *Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II: Systeemanalyses zoetwater Bovenregionale waterverdeling* Rapportnummer: 30101791.5.P1319 Arcadis, Januari 2023
- Arcadis / HydroLogic 2025 (Boelens et al.) *Nadere analyse effecten zeespiegelstijging Regio IJsselmeer & Markermeer*, Arcadis/Hydrologic Rapportnummer: , Mei 2025 IJsselmeergebied
- Biemond, B., Kranenburg, W. M., Huismans, Y., de Swart, H. E., & Dijkstra, H. A., 2025. Dynamics of salt intrusion in complex estuarine networks: an idealised model applied to the Rhine–Meuse Delta. *Ocean Science*, 21(1), 261-281.
- Boonekamp, T., Boleij, J., Huizer, S., Zuurbier, K.G., Oude Essink, G.H.P., Janssen, G.M.C.M., 2019. *Vergroten overbruggingsvermogen naar een robuuste strategische zoetwatervoorraad*. Arcadis Rapp. 083775184 A.
- Deltares 2018 (Wolters, H. A., Born, G. J. v. d., Dammers, E., & Reinhard, S.) *Actualisering 2017: Deltascenario's voor de 21e eeuw, Hoofdrapport*, Deltares (NUMMER) mei 2018
- Deltares 2020a (Nolte et al.) *Klimaatrobustheid van het waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer* Rapport 11203741-001-ZKS-0005, Deltares 8 juli 2020
- Deltares 2020b (Delsman et al.) *Actualisatie zout in het NHI - Toolbox NHI zoet-zout modellering en landelijk model*. Rapport 11205261-003-BGS-0001, Deltares
- Deltares 2021 (Nolte et al.) *Vraagarticulatie en aanzet modelinstrumentarium voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging Spoor 2 Systeemanalyse Zoetwater*. Rapport 11205272-018-ZWS-0014, Deltares, Maart 2021
- Deltares 2022 (Delsman et al.) *Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II: Grondwaterverzilting en watervraag bij een stijgende zeespiegel*; Rapport 11208039-009-BGS-0001, Deltares, Mei 2022.
- Deltares 2023a (Laan et al.) *Effect bodemligging op verzilting Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Lek ten behoeve van de Basisrivierbodemligging (BRL)*, Deltares Rapport 11208075-010-ZWS-0001, Februari 2023

Deltares 2023b (Buitink et al.) *Implications of the KNMI'23 climate scenario's for the discharge of the Rhine and Meuse*, Deltares Rapport 11209265-002-ZWS-0003, December 2023

Deltares 2023c (Weiler et al.), *Functionele prestatie Stuw Hagestein: Zeespiegelstijging & Verandering rivierafvoer*, Deltares-notitie, 14 december 2023

Deltares 2024a (Mens et al.) *De zoetwaterbalans van laag Nederland in een warmer klimaat*, Deltares Rapport 11210362-000-ZWS-0001, Februari 2024

Deltares 2024b (Delsman) *Verkenning handelingsruimte in doorspoelen polders bij zeespiegelstijging*, Deltares Rapport 11211024-002-BGS-0002, November 2024

Deltares 2024c (Oude Essink & Horta Nogueira) *Effecten zeespiegelstijging op zoetwater in de Nederlandse duinen*, Deltares Rapport 11210315-005-BGS-0001, December 2024

Deltares 2024d (Tiessen) *Actualisatie klimaatrobustheidsstudie Waterbeheer Volkerak-Zoommeer*, Deltares Rapport 11210350-001-ZKS-0006, December 2024

Deltares 2024f (Van der Brugge & De Winter), 2024. *Deltascenario's 2024 - Zicht op Water in Nederland*. Deltares rapport 11209219-000-ZKS-0004

Deltares 2024g (Harmsen van der Beek et al.) *Functionele prestatie (algemeen, zout en biodiversiteit), Iteratieve werkwijze Stap 4 - Bepalen van functionele prestatie*", Kennisprogramma Natte Kunstwerken, Deltares 11207401-009-HYE-0005

Deltares 2025a (Vuik et al.) *Zoetwaterbeschikbaarheid in de Rijn-Maasmonding in een warmer klimaat: Integrale verkenning van bouwstenen om zoutindringing te beperken*, Deltares Rapport 11210362-013-ZWS-0003, Januari 2025

Deltares 2025b (Weiler et al.) *Oprekmogelijkheden door maatregelen op spui- en schutsluizen*, Deltares 11210315-004-BGS-0001, April 2025

Deltares 2025c (Huismans et al.) *KZH: Validatie van afvoer-chloride relaties voor toepassing in het waterverdeelmodel QWAST ten behoeve van berekeningen voor KZH*, Deltares 11211995-002-ZWS-0001, Juli 2025.

Deltares 2025d (Van de Wijk & Weiler) *Verkenning naar de effecten van het afsluiten van de Oude Maas en het Hartelkanaal, bepaling van de effecten op het watersysteem*, Deltares Rapport 11209221-006-BGS-0002, Juli 2025

Diender, L., 2022 *Assessing uncertainties and assumptions in a simplified 1D model for the IJsselmeer/Markermeer region* Internship report Wageningen University and Research (WUR) & HydroLogic 2022 – Rapport 1042078

Friocourt, Y.; Blaas, M.; Bonte, M.; Vos, R.; Slomp, R.; Wilmink, R.; Lodder, Q.; Brakenhoff, L.; van Gool, S., 2025. The Impact of Extreme Sea Level Rise on the National Strategies for Flood Protection and Freshwater in the Netherlands. *Water* 2025, 17, 919. <https://doi.org/10.3390/w17070919>

HKV / HydroLogic 2019 (Vermeulen, Van den Brink) *Slim Watermanagement: Nadere uitwerkingen faalkansanalyse Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal bij wateroverlast*; HKV lijn in Water, PR3393.20, januari 2019

HKV 2023 (Vuik V, J.-W. van Lente (2023)). *Verzilting monding Amsterdam-Rijnkanaal, Fase 2: onderzoek naar maatregelen*; PR4773.10, juli 2023

HKV 2024 (Van Denderen, P., J.-W. van Lente, A. Paarlberg (2024)). *Nadere analyse zoetwater Rijn-Maasmonding onder extreme zeespiegelstijging; Deelrapport Kennisprogramma Zeespiegelstijging Systeemanalyse*, HKV Lijn in water, PR5113.10, december 2024.

- HKV 2025a (Daggenvoorde et al.) *Verziltingsbeperkende maatregelen Rijn-Maas-monding*, Rapport HKV Lijn in water, PR5313.10, juli 2025
- HKV 2025b (Rudolph et al.) *Verziltingsbeperkende maatregelen Rijn-Maas-monding*, Factsheets HKV Lijn in water, PR5313.10, juli 2025
- IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.,
- KNMI, 2023: *KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland*, KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 23-03.
- Monismith, S.G., Kimmerer, W., Burau, J.R., Stacey, M.T., (2002). Structure and flow-induced variability of the subtidal salinity field in northern San Francisco Bay. *J. Phys. Oceanogr.* 32 (11), 3003–3019.
- Ralston, D.K., Geyer, W.R., (2019). Response to channel deepening of the salinity intrusion, estuarine circulation, and stratification in an urbanized estuary. *J. Geophys. Res.: Oceans* 124 (7), 4784–4802.
- Rijkswaterstaat 2019 (Van Remmelzwaal et al.). *Beleidsaanbevelingen voor het langetermijn peilbeheer in het IJsselmeergebied*. Eindrapport Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied (ISWP). Rijkswaterstaat, juni 2019
- Rijkswaterstaat 2021 (Vos) Memo, Tijdlijnen voor Spoor 2 Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 24 maart 2021
- RHDHV 2025a. Impactanalyse Kennisprogramma Zeespiegelstijging: Deelrapport Huidige Strategie; Royal Haskoning DHV BJ5279, juni 2025
- RHDHV 2025b. Impactanalyse Kennisprogramma Zeespiegelstijging: Deelrapport Oprekmogelijkheden Zoetwaterbeschikbaarheid, Waterveiligheid, Zandige Kust Royal Haskoning DHV BJ5279, juni 2025
- Van den Hurk, B., et al., 2014. *KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective* KNMI report: WR-2014-01,2014
- Van Dorland et al. *KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands*, Scientific report; WR-23-02, KNMI 2023
- Van Westen, R. M., Kliphuis, M., & Dijkstra, H. A., 2024. Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course. *Science advances*, 10(6), eadk1189.
- VEWIN 2023 (Geudens en Kramer), *Drinkwaterstatistieken 2022, van bron tot kraan*, VEWIN rapport 2023
- Wegman, T.M., Pietrzak, J.D., Horner-Devine, A.R., Dijkstra, H.A., Ralston, D.K. 2024. Observations of estuarine salt intrusion dynamics during a prolonged drought event in the Rhine-Meuse Delta. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 129, e2024JC021655. <https://doi.org/10.1029/2024JC021655>
- Witteveen & Bos 2016 (Van Tuinen, Phernambucq) *Informatie- en systeemanalyse Volkerak-Zoommeer: bouwstenen voor Slim Watermanagement*. Rijkswaterstaat, Waterschap Brabantse Delta, Waterschap Scheldestromen, Waterschap Hollandse Delta; RW1929-255/16-018.805, 9 november 2016

Bijlage A Oprekpakketten

In bijlage A zijn de oprekkpakketten weergegeven. Eén tabel per oprekkpakket. Per tabel volgt allereerst een omschrijving van elke oprekmaatregel per regio en daarna het effect van de oprekmaatregel op de zoetwaterbalans. Dat effect is uitgedrukt in benodigde m³'s zoetwater per meter zeespiegelstijging. Daarachter is een kolom toegevoegd waar de informatie vandaan komt. De informatie van de VKS komt uit de verschillende deelstudies per regio uit Fase 1 voor zoetwater.

Pakket I

Regio	Beschrijving	Watervraag HWS per m ZSS (m3)	Bron
Regionale polders	Minder doorspoelen polders door in de polders te sturen op een chloride streefwaarde van 50 mg/L meer dan de huidige chloride streefwaarde.	0m 15 m ³ /s (-5 m ³ /s), 0.5m 40 m ³ /s (-10 m ³ /s), 1m 75 m ³ /s (-15 m ³ /s), 2m 160 m ³ /s (-20 m ³ /s), 3m 250 m ³ /s (-20 m ³ /s) (De negatieve waarde geeft de afname t.o.v. 0-alternatief weer).	- Verkenning handelingsruimte in doorspoelen polders bij zeespiegelstijging (Deltares 2024a)
ARK/NZK	Verdiepen van de zoutvang in de Velserkom t.p.v. de SO.	0 m3/s per m ZSS extra (25 m3/s Weesp blijft benodigd en 35 m ³ /s bij IJmuiden).	- Oprekmogelijkheden door maatregelen op spui- en schutsluizen (Deltares 2025b)
IJsselmeergebied	In de schutsluizen een bellenscherm aan beide zijden gecombineerd met een spoeldebiet door/langs de kolk (4 m3/s) en een drempel aan zeezijde welke meegroeit met de zeespiegelstijging.	0m t/m 5m = 70 m ³ /s en bij een dreigend watertekort 40 m3/s. Geen extra doorpoelvraag per m ZSS. O.b.v. Deltares (2025b) ingeschat wat het percentage reductie binnenkomende zoutvracht is. Vervolgens op basis van dat percentage een koppeling gelegd met de maatregelen in Arcadis/HydroLogic (2025). Volgende combinaties gemaakt voor keuze zomergemiddelde T20 chloride waarde: Scenario waterbalans en scenario A/H (2025) 2020_0m en Ref66% 2050_0.5m 2050Hd0,5m33%reductie, 2100_0.5m 2050Hd0,5m33%reductie, 2100_1m 2100Hd1m33%, 2100_2m interpolatie33%, 2200_1m 2100Hd1m33%, 2200_3m 2150Hd3m33%, 2200_5m 2150Hd5m33%	- Oprekmogelijkheden door maatregelen op spui- en schutsluizen (Deltares 2025b) - Nadere analyse effecten zeespiegelstijging Regio IJsselmeer & Markermeer (Arcadis/Hydrologic 2025)
VZM	Pompen Krammersluizen (capaciteit ~50 m ³ /s voor Laag Bekken, jachtensluis, Spui- en Vismigratiemiddel), Pompen Bathse Spuisluis (~170 m ³ /s) en Kreekraksluizen (~5m ³ /s voor Antwerps kanaalpand).	0m 30 m3/s, 0.5m 32.5 m3/s, 1m 35 m3/s, 2m 50 m3/s, 3m 70 m3/s, 5m 100 m3/s	- Systeemanalyses zoetwater regio Volkerak - Zoommeer (Arcadis/Hydrologic 2023a) - Actualisatie klimaatrobustheidsstudie Waterbeheer Volkerak Zoommeer (Deltares 2024d) - Oprekmogelijkheden door maatregelen op spui- en schutsluizen (Deltares 2025)

Regio	Beschrijving	Watervraag HWS per m ZSS (m3)	Bron
RMM	<p>Hollandsche IJssel/Lek meer zout accepteren. Meest benedenstroomse innamelocaties vaker/meer zout accepteren dan bovenstrooms gelegen locaties. Bij accepteren van meer verzilting neemt de hoeveelheid surplus af:</p> <ul style="list-style-type: none"> - HIJ: bij keuze voor zoethouden tot halverwege Gouda en Snelle Sluis ipv t/m Snelle Sluis halveert de surplusbehoefte - Lek: bij keuze voor zoet houden tot Bergambacht ipv tot Krimpenerwaard resulteert in ongeveer $\frac{3}{4}$ vd surpluswaarden. 	<p>Surplusbehoefte bij HIJ bij maatregel: 0m 0 m³/s, 0.5m 1 m³/s, 1m 3 m³/s, 2m 7 m³/s, 3m 19 m³/s.</p> <p>Surplusbehoefte bij Lek bij maatregel: 0m 3 m³/s, 0.5m 19 m³/s, 1m 24 m³/s, 2m 30 m³/s, 3m 37 m³/s.</p>	- Nadere analyse zoetwater Rijn-Maasmonding onder extreme zeespiegelstijging (HKV 2024)

Pakket II

Regio	Beschrijving	Watervraag HWS per m ZSS (m3)	
Regionale polders	Pakket I + Nog minder doorspoelen in polders door te sturen op een chloride streefwaarde in de polders voor het meest voorkomende type landbouwgewas in een polder	Doorspoeldebieten (komt bovenop de vraag voor peilbeheer en beregening): 0m 3 m ³ /s (-17 m ³ /s), 0.5m 30 m ³ /s (-20 m ³ /s), 1m 50 m ³ /s (-40 m ³ /s), 2m 105 m ³ /s (-75 m ³ /s), 3m 160 m ³ /s (-110 m ³ /s). (De negatieve waarde geeft de afname t.o.v. 0-alternatief weer).	- Verkenning handelingsruimte in doorspoelen polders bij zeespiegelstijging (Deltares 2024a)
ARK/NZK	Pakket I	Pakket I	Pakket I
IJsselmeergebied	Pakket I + Afsluiten spuisluizen, alle afvoer zal worden verpompt, er vind geen lekkage meer via de spuisluizen plaats.	0m t/m 5m ZSS 30 m ³ /s (10 m ³ /s voor de schutsluizen gezamenlijk aan spoeldebiet, en 2 x 10 m ³ /s voor de pompen op beide locaties). O.b.v. Deltares (2025b) ingeschat wat het percentage reductie binnenkomende zoutvracht is. Vervolgens op basis van dat percentage een koppeling gelegd met de maatregelen in Arcadis/Hydrologic (2025). Volgende combinaties gemaakt voor keuze zomergemiddelde T20 chloride waarde:	- Oprekmogelijkheden door maatregelen op spui- en schutsluizen (Deltares 2025b) - Nadere analyse effecten zeespiegelstijging Regio IJsselmeer & Markermeer (Arcadis/Hydrologic 2025)

Regio	Beschrijving	Watervraag HWS per m ZSS (m3)	
		Scenario waterbalans en scenario A/H (2025) 2020_0m Ref100% 20250_0.5m 2050Hd0,5m100% 2100_0.5m 2050Hd0,5m100% 2100_1m 2100Hd1m100% 2100_2m interpolatie100% 2200_1m 2100Hd1m100% 2200_3m 2150Hd3m66% 2200_5m 2150Hd5m66%.	
VZM	Pakket I	Pakket I	Pakket I
RMM	Pakket I + Meegroeien bodem Nieuwe Waterweg & Nieuwe Maas.	Meegroeien diepte van NWW en NM met ZSS compenseert het effect van ZSS voor ongeveer de helft (bij matige ZSS) tot ongeveer een-derde (bij extreme ZSS).	- Zoetwaterbeschikbaarheid in de RMM in een warmer klimaat (Deltares 2025a)

Pakket III

Regio	Beschrijving	Watervraag HWS per m ZSS (m3)	Bron
Regionale polders	Pakket II + 10 polders (LSW eenheden) welke de grootste doorspoel watervraag per m2 hebben bij een ZSS van 3 m. Deze gebieden liggen geclusterd op drie locaties, Tholen, Noordwijk, Noord-Groningen	Doorspoeldebieten: 0m 3 m3/s (-17 m3/s), 0.5m 25 m3/s (-25 m3/s), 1m 40 m3/s (-50 m3/s), 2m 60 m3/s (-120 m3/s), 3m 100 m3/s (-170 m3/s) (De negatieve waarde geeft de afname t.o.v. 0-alternatief weer).	- Verkenning handelingsruimte in doorspoelen polders bij zeespiegelstijging (Deltares 2024) - GIS analyse RWS voor selectie 10 LSW's o.b.v. data Deltares 2022
ARK/NZK	Pakket I	Pakket I	Pakket I
IJsselmeergebied	Pakket II + Peilopzet IJsselmeer in de periode dat zomerpeil wordt gehanteerd. Er wordt een extra buffer gerealiseerd van 30 cm (van NAP -0,2 m naar NAP +0,1 m).	Er is door de opzet van de buffer een extra wateraanvoer van ca. 105 m3/s in alles scenario's. (Peilopzet tot NAP +0,10 m (30 cm bufferschijf), uitzakken in 2 maanden tijd. Oppervlakte IJsselmeer 184 km2 * 0,3 m / 2 maanden = ca. 105 m3/s).	- Nadere analyse effecten zeespiegelstijging Regio IJsselmeer & Markermeer (Arcadis/Hydrologic 2025)

Regio	Beschrijving	Watervraag HWS per m ZSS (m3)	Bron
		Aangenomen is dat dit geen andere effecten op de chloridegehalten heeft.	
VZM	Pakket I	Pakket I	Pakket I
RMM	<p>Meegroeien bodem Nieuwe Waterweg & Nieuwe Maas + Incidenteel afsluiten Oude Maas en Beerkanaal, HIJ en Lek.</p> <p>OM & Beerkanaal: nieuwe afsluitconstructies/zoutkering i.c.m. binnenvaartsluis en spuimiddel/gemaal; de sluisen moeten worden voorzien van een drempel met zoutvang, bellenschermen, een kolkspoelsysteem, en een netto spoeldebiet van 50 m3/s bij 1m ZSS. (De variant met zeesluisen zou netto geen debiet besparen. De variant met binnenvaartsluisen is daarom de voorkeursvariant.)</p> <p>Hollandse IJssel: Algerakering zonder binnenvaartsluis, met spuimiddel. Lek: nieuwe afsluitconstructie zonder binnenvaartsluis, met spuimiddel.</p>	<p>Deze configuratie beschermt Spui/Bernisse-Brielse-Meer ongeacht de ZSS, want wordt gecombineerd met meegroeien bodem. Doorspoelen sluisen OM-BK vraagt 50 m3/s. Dit geeft netto circa 100-150 m3/s debiet meer ruimte (nl het uit resterende via NM omgeleide debiet dat anders via OM en HK zou gaan) op de NWW t.a.v. de verzilting op Nieuwe Maas.</p> <p>Voor Lek en HIJ wordt uitgegaan van kering zonder sluisen: dus daar geen spoeldebiet meer.</p> <p>De combinatie met extremere ZSS is niet doorgerekend in Deltares 2025a, maar als uitgegaan wordt van combinatie met pakket II, dan neemt de diepte niet netto toe met ZSS en is deze maatregel qua spoelbehoefte en zoutlast etc zo goed als ZSS-onafhankelijk.</p>	<p>- Zoetwaterbeschikbaarheid in de RMM in een warmer Klimaat (Deltares 2025a)</p> <p>- Verkenning naar de effecten van het afsluiten van de Oude Maas en het Hartelkanaal (Deltares 2025d)</p>

Bijlage B Beschrijving data en uitgangspunten waterbalans KP ZSS

Memo Deltares

Titel: Beschrijving data en uitgangspunten waterbalans KP ZSS

Datum: 12 mei 2025

Auteurs: Janneke Pouwels, Geert Prinsen, Marjolein Mens

Memo

Aan

Jantine Hoekstra / Meinte Blaas

Datum

12 mei 2025

Contactpersoon

Janneke Pouwels

Doorkiesnummer

+31(0)6 5367 9518

E-mail

janneke.pouwels@deltares.nl

Aantal pagina's

1 van 37

Onderwerp

Beschrijving data en uitgangspunten waterbalans KPZSS

Auteurs:

Janneke Pouwels

Geert Prinsen

Marjolein Mens

1 Introductie

In een eerdere globale studie (Mens et al., 2024) is op basis van de KNMI'14 scenario's, basisprognoses 2018, recente afvoergegevens (Rijn en Maas) en de inzichten van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP-ZSS) een waterbalans opgesteld voor NL in de vorm van Sankey-diagrammen voor een droge zomermaand. Dit is gedaan voor drie situaties: de huidige situatie, een situatie met 2 graden opwarming en 0,4m zeespiegelstijging, en 2 graden opwarming en 1 m zeespiegelstijging. Belangrijke aanbevelingen uit die studie waren:

- de diagrammen te actualiseren met data op basis van de KNMI'23 scenario's,
- de 'droge zomermaand' beter statistisch te onderbouwen en een herhalingstijd aan te geven
- de scenario's ook in de tijd te plaatsen,
- verkenning van effecten van oplossingsrichtingen in de waterbalansfiguren
- de effecten van het toelaten van hogere chloridehaltes zichtbaar te maken

Verder heeft Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KPZSS) de wens om ook het effect van een grotere zeespiegelstijging te laten zien, het zichtbaar maken van verzilting in de visualisatie en het zichtbaar maken van het effect van maatregelen (bronmaatregelen). Deze aanbevelingen en wensen worden door KPZSS (fase 2) opgepakt ten behoeve van het synthesedocument dat in 2025 gepubliceerd zal worden.

Dit memo bevat een technische toelichting bij de door Deltares aangeleverde informatie en (resultaten van) analyses ten behoeve van de waterbalansen voor KPZSS. Hierbij wordt voor de huidige situatie (REFERentie) en situatie onder toekomstig klimaat (KNMI'23 Hd scenario) en verschillende scenario's voor zeespiegelstijging inzichtelijk gemaakt hoe de zoetwaterbalans er voor die verschillende situaties en bij een aantal 'oprekmaatregelen' voor laag-Nederland er uit kan zien, en waarbij het effect op zoutindringing inzichtelijk gemaakt wordt.

De volgende zichtjaren en scenario's zijn uitgewerkt (tussen haakjes staat de naam van het scenario zoals dat binnen het KP-ZSS voor de systeemverkenningen wordt gebruikt):

- 2020 bij 0 m zeespiegelstijging;
- 2050 bij 0,5 m zeespiegelstijging (laag);
- 2100 bij 0,5 m zeespiegelstijging (zeer laag);

- 2100 bij 1 m zeespiegelstijging (midden);
- 2100 bij 2 m zeespiegelstijging (extreem);
- 2200 bij 1 m zeespiegelstijging (laag);
- 2200 bij 3 m zeespiegelstijging (midden);
- 2200 bij 5 m zeespiegelstijging (extreem).

De balansen worden gemaakt voor het 'nulalternatief' (zonder oprekmaatregelen) en voor drie pakketten aan oprekmaatregelen.

Deltares heeft meegedacht met het opstellen van de waterbalans en heeft getallen aangeleverd voor de posten: 'verdamping IJsselmeergebied', 'regionale watervraag' (met uitzondering van de post polderdoorspoeling) en 'aanvoer vanuit grote rivieren'. Rijkswaterstaat was binnen KP ZSS zelf verantwoordelijk voor het verzamelen van de uitgaande posten richting zee ('watervraag doorspoelen HWS'), de post polderdoorspoeling en voor de verandering van de balansposten bij de maatregelpakketten. Deze laatste twee onderdelen worden zodoende niet beschreven in dit memo.

Er is deels gebruik gemaakt van de nieuwe scenario invoergegevens (conform KNMI'23) zoals die gebruikt zijn in de Basisprognoses 2024. Dit betreft de rivierafvoeren en de doorspoelvraag van polders en boezems. Voor overige regionale watervragen is gebruik gemaakt van de Basisprognoses 2018 resultaten met enkele aanpassingen. De focus ligt hierbij op een droge maand corresponderend met een herhalingstijd van eens in de twintig jaar (vanaf nu aangeduid met T20).

2 Rivierafvoeren bij landsgrens

2.1 Statistiek Rijnafvoer Lobith

In het rapport van Mens et al. (2024), is uitgegaan van een droge zomermaand met een Rijnafvoer in huidig klimaat van 900 m³/s, en een Maasafvoer van 30 m³/s ('Sint Pieter'). Voor juli 1976 was de maandgemiddelde afvoer bij Lobith 953 m³/s, maar voor de afvoer is op basis van recente jaren 2018 en 2022 gekozen voor een lagere afvoer, namelijk 900 m³/s. In de laatste 30 jaar waren er drie jaren met een maandgemiddelde afvoer lager dan 900 m³/s. Over de langere meetreeks 1910-2022 is de frequentie van maandafvoeren < 900 m³/s ongeveer eens in de 10 jaar. Daarbij zijn echter ook oktober en november meegenomen die buiten het groeiseizoen van 1 april tot 1 oktober vallen. In 2018 waren de lage afvoeren (< 900 m³/s) juist in die najaarsmaanden. Dan is echter het effect voor de zoetwatervoorziening beperkt, want er is nauwelijks watervraag uit de regio meer (geen berekening, alle peilen zijn al naar winterpeil verlaagd, en er is meer lokale neerslag). Uiteraard is er buiten het groeiseizoen nog wel een effect van lage afvoeren op drinkwatervoorziening (door verzilting) en een effect op de scheepvaart doorvaardiepte-beperkingen.

Op basis van de dagcijfers QLobith van de KNMI'23 scenario's (Buitink et al., 2023) zijn de maandgemiddelde afvoeren voor de zomermaanden bepaald voor de referentiesituatie, en de scenario's 2050Hd en 2100Hd, waarbij ook nog onderscheid is gemaakt naar de 3 ensembles van 30 jaar per scenario (zoals geselecteerd voor de BP2024 berekeningen) en de in totaal 8 beschikbare ensembles van 30 jaar (d.w.z. tijdreeksen van 90 of 240 jaar).

Op basis van de afgeleide maandgemiddelden voor de maanden april tot en met september is vervolgens met een empirische fit een schatting gemaakt van de herhalingstijd, dus op basis van 6*30*3 maandwaarden (6 maanden x 90 jaar) of 6*30*8 maandwaarden (6 maanden x 240 jaar). De grafiek van de herhalingstijden is opgenomen in respectievelijk Figuur 2.1 en Figuur 2.2.

Ook de historische reeks (1911-2019) is ter vergelijking gehanteerd (met 6 maanden*109jaar). Hierop is een empirische verdeling (overschrijdingskans = $n/(N+1)$) gefit , waarbij n het rankingnummer is en N het totaal aantal waarden. De grafiek is opgenomen in Bijlage 1.

De resultaten met geschatte afvoeren voor herhalingstijd T=20 jaar worden samengevat in Tabel 1. Hieruit blijkt dat de resultaten voor beide methoden dicht bij elkaar liggen. De eerder in Mens et al. (2024) gehanteerde 900 m³/s voor een lage maandgemiddelde Lobith afvoer blijkt voor de historische data in het zomerhalfjaar goed overeen te komen met een T20 zomermaandafvoer voor de huidige situatie.

In een later stadium kwam nog een script beschikbaar waarbij met 30-daagse lopende gemiddelden voor elk jaar voor de zomerperiode een serie van orde 150 gemiddelden is bepaald, en dan met een statistische fit op de jaarminima een herhalingstijd is geschat. Ter vergelijking is deze methode ook toegepast. De verschillen bleken klein te zijn, zie ook Figuur 2.3 en Figuur 2.4.

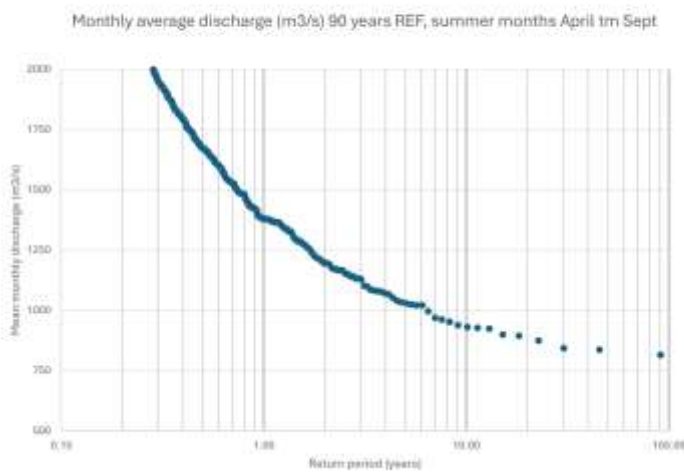
Tabel 1 Statistiek maandgemiddelde Rijnafvoer Lobith volgens 2 verschillende methoden

Scenario	T20 afvoer Lobith op basis van maandafvoeren zomerhalfjaar	T20 afvoer Lobith volgens script op basis 30-daags lopend gemiddelde en fit op basis van jaarminima (ter vergelijking)
Historische data 1911-2019	900	niet bepaald
REF KNMI'23 90 jaar	885	874
REF KNMI'23 240 jaar	919	884
KNMI'23 2050 Hd scenario, 90 jaar	800	784
KNMI'23 2050 Hd scenario, 240 jaar	730	735
KNMI'23 2100 Hd scenario, 90 jaar	665	644
KNMI'23 2100 Hd scenario, 240 jaar	630	646
KNMI'23 2150 Hd scenario, 90 jaar	niet bepaald	617
KNMI'23 2150 Hd scenario, 240 jaar	niet bepaald	571

Voor de in de waterbalans gehanteerde methode met maandafvoeren laten Figuur 2.1 en Figuur 2.2 de herhalingstijden zien van de zomermaandafvoer, met in de korte tabel ernaast de laagste zomermaandgemiddelde afvoeren en bijbehorende herhalingstijd. Uit de figuren

blijkt ook de bandbreedte als gevolg van de keuze voor 90 of 240 jaar.

BP2024 Lobith afvoeren 90 jaar REF (s1,s2,s7)



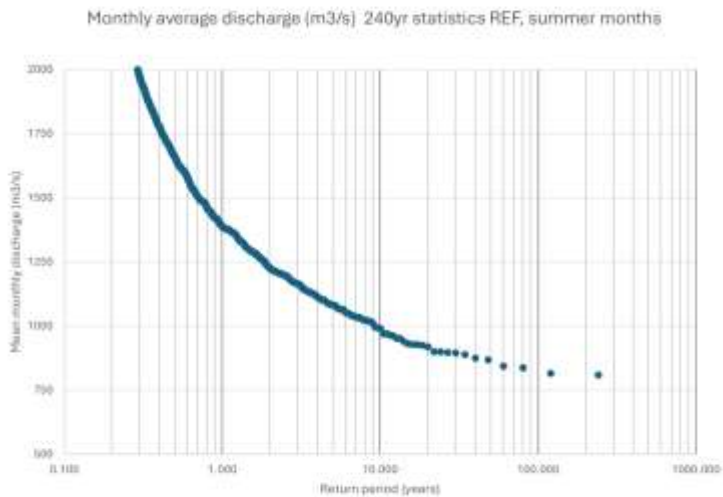
Maandafvoer (m³/s)	Herhalingstijd (jaar)
815	91.0
837	45.5
844	30.3
875	22.8
895	18.2
899	18.2
905	13.0
908	11.4
931	10.1
939	9.1

Op basis van de 90 jaar BP2024 REF heeft een maandafvoer van 900 m³/s een herhalingstijd van orde 15 jaar. Dus frequenter (lagere herhalingstijd) dan volgens de historische data 1911-2019

Bij T=20 zou een maandafvoer van orde 885 m³/s horen.

Figuur 2.1 Referentie scenario KNMI'23, 90 jaar zomermaandafvoeren Lobith (ensembles s1, s2 en s7), T20 maandafvoer bedraagt 885 m³/s

BP2024 Lobith afvoeren 240 jaar REF (s1 tm s8)

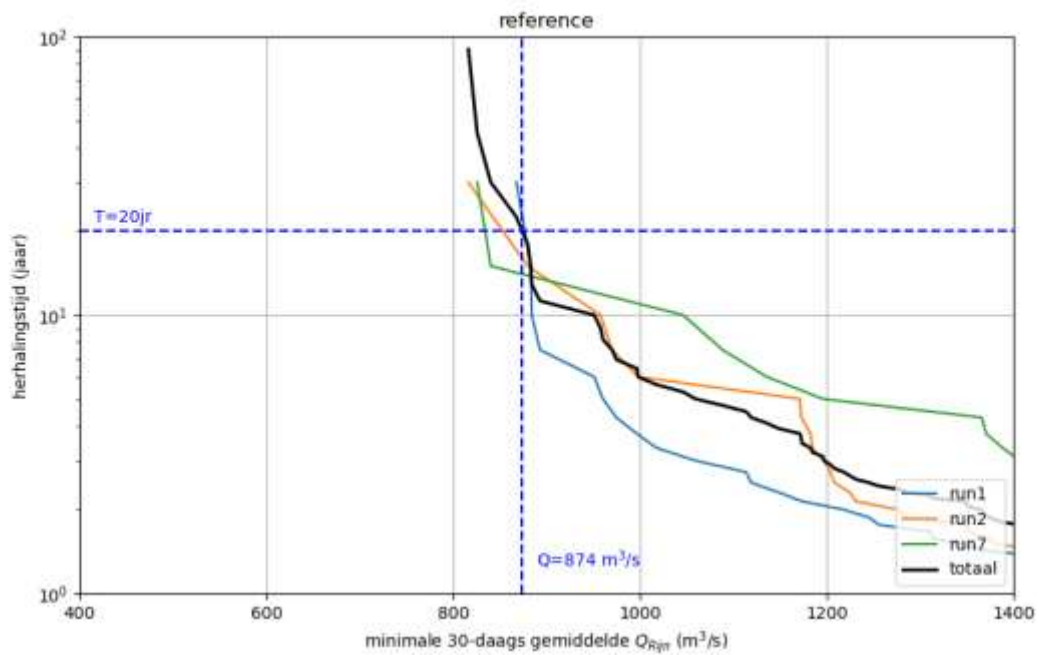


Maandafvoer (m³/s)	Herhalingstijd (jaar)
810	241
815	120.5
837	60.3
844	30.3
868	18.2
875	12.1
889	8.1
895	6.1
897	4.1
899	3.1
900	2.1
919	1.1
925	0.8
928	0.7
931	0.6
939	0.5

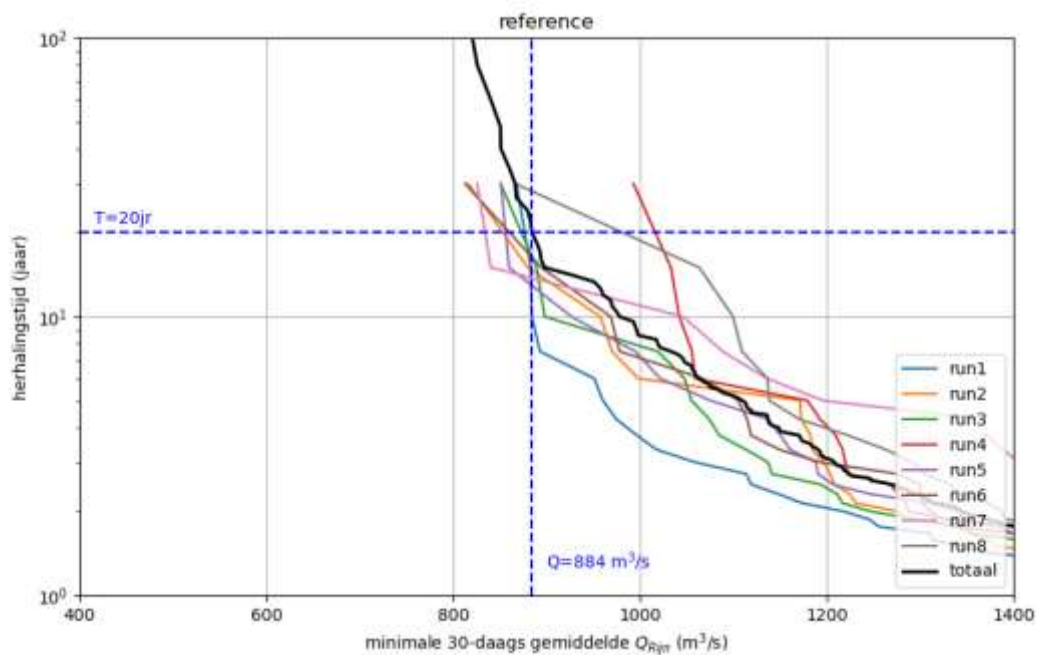
Op basis van de 240 jaar BP2024 REF heeft een maandafvoer van 900 m³/s een herhalingstijd van 22 jaar, dat is redelijk vergelijkbaar met de historische data 1911-2019 (T=20 jaar) en iets minder frequent dan in de selectie van 90 jaar (dan Q=900 is T=15 jaar)

De 240 jaar data geven voor T=20 jaar een maandafvoer van 919 m³/s.

Figuur 2.2 Referentie scenario KNMI'23, 240 jaar zomermaandafvoeren Lobith (ensembles s1 t/m s8), T20 maandafvoer bedraagt 919 m³/s



Figuur 2.3 Referentie KNMI'23, 3x30=90 jaar zomerafvoeren Lobith, methode met lopend 30-daags gemiddelde, T20 afvoer beraagt $874 m^3/s$



Figuur 2.4 Referentie KNMI'23, 8x30=240 jaar zomerafvoeren Lobith, methode met lopend 30-daags gemiddelde, T20 afvoer bedraagt $884 m^3/s$

2.2 Statistiek Maasafvoer (Monsin / Sint Pieter)

2.2.1 Afvoeren bij een herhalingstijd van 20 jaar

Voor de Maas is door Mens et al., (2024) uitgegaan van een lage afvoer van 30 m³/s bij Sint Pieter op basis van meetgegevens van de laatste 30 jaar. In 1991 en 2022 waren er 2 maanden met gemiddelde afvoeren minder dan 30 m³/s. In 2018 was de laagste gemiddelde maandafvoer bij Sint Pieter 32 m³/s.

Recent zijn door Buitink et al. (2023) voor de Referentie en voor de KNMI'23-scenario's de afvoerreksen bij Monsin gegenereerd (met het neerslag-afvoer model Wflow). Dit is de zogenaamde ongedeelde Maasafvoer, nog voor de onttrekking richting het Albertkanaal. Deze afvoer wordt verdeeld tussen Nederland, België en een gezamenlijk deel (Grensmaas) volgens het Maasafvoercontract.

We hebben de statistiek op de Monsin-reeks op dezelfde manier afgeleid als voor de Rijn. Vervolgens is volgens het Maasafvoercontract – of beter geformuleerd, de vigerende praktische invulling daarvan (Jaskula, 2011) – de bijbehorende afvoer bij Sint Pieter bepaald (zie uitleg in de volgende paragraaf). Het resultaat staat in Tabel 2.

Tabel 2 Statistiek ongedeelde Maasafvoer bij Monsin en Sint Pieter volgens 2 verschillende methoden.
Grafieken van de herhalingstijden zijn opgenomen in Bijlage 2.

Afvoerreeks	Ter vergelijking: T20 afvoer Monsin volgens 30-daags lopend gemiddelde	T20 afvoer op basis van maandafvoeren zomerhalfjaar	
		Monsin	Sint Pieter
Historische data 1911-2019	niet bepaald	35	24
REF KNMI'23, 90 jaar	39	38	25
REF KNMI'23, 240 jaar	39	40	26
KNMI'23 2050 Hd scenario, 90 jaar	35	35	24
KNMI'23 2050 Hd scenario, 240 jaar	32	34	23
KNMI'23 2100 Hd scenario, 90 jaar	30	32	22
KNMI'23 2100 Hd scenario, 240 jaar	30	32	22
KNMI'23 2150 Hd scenario, 90 jaar	29	niet bepaald	
KNMI'23 2150 Hd scenario, 240 jaar	30	niet bepaald	

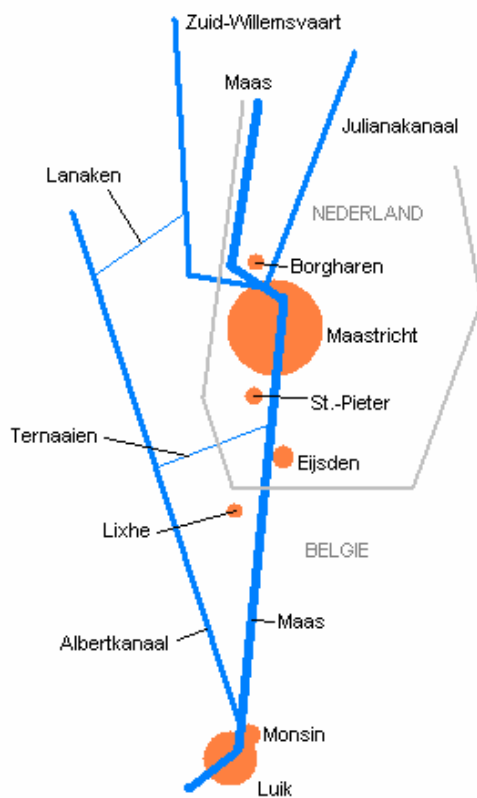
Opvallend is dat de historische data 1911-2019 bij Monsin een T20 zomermaandafvoer van 35 m³/s geven, een paar kuub lager dan de referentie van de nieuwe KNMI'23 afvoerreksen voor de referentie.

2.2.2 Maasafvoercontract

Het Maasafvoercontract, getekend in 1995 en geldig vanaf 1 juli 1996 (Maasafvoercontract, 1996), is gebaseerd op een deel gezamenlijk verbruik (minimum afvoer Grensmaas zo lang mogelijk 10 m³/s) en een 50-50 gebruik van het overige water door België en Nederland. Bij een Monsin-afvoer van 30 m³/s wordt 10 m³/s over de Grensmaas gestuurd, en kan België 10

m^3/s gebruiken en Nederland ook $10 m^3/s$. Bij lagere afvoeren worden alle gebruikers (Grensmaas, België, Nederland) evenredig verdeeld, dus bij een Monsin afvoer van $25 m^3/s$ ieder $8.3 m^3/s$). Bij hogere rivierafvoeren bij Monsin neemt in eerste instantie de mogelijkheid voor eigen gebruik toe, bij afvoeren tussen 30 en $60 m^3/s$ wordt de Grensmaas op $10 m^3/s$ gehouden en loopt het Vlaams verbruik en Nederlands verbruik elk op van 10 naar $25 m^3/s$. Bij afvoeren van meer dan $60 m^3/s$ bij Monsin zal ook de afvoer over de Grensmaas toenemen. Bij afvoeren tussen de 100 en $130 m^3/s$ loopt het Nederlands en Vlaams gebruik op tot $35 m^3/s$. Bij een Monsin-afvoer van meer dan $130 m^3/s$ zal al het extra water via de Grensmaas afstromen.

In de tekst van het Maasafvoeroverdrag wordt gesproken over een afvoer van minimaal $8 m^3/s$ via de ZuidWillemsvaart dat naar de Kempische kanalen gaat, en maximaal $10 m^3/s$ dat via de ZuidWillemsvaart bij Lozen weer terugkeert naar Nederland. In de praktijk neemt België vooral via het Albertkanaal in, en blijft een restant van de afvoer via de ZuidWillemsvaart bij de splitsing bij Lozen in België achter voor de Kempische kanalen. Verder kan in overleg van de verdeling worden afgeweken en neemt België vaak meer water in, maar compenseert dat door meebetalen aan pompkosten in Nederland (pers. comm. Marcel de Wit, maart 2008). In Kallen et. Al., (2008) wordt een nadere toelichting en waterverdeling gegeven, die hier kort wordt samengevat.



Figuur 2.5 Situatieschets Maas bij Maastricht

Figuur 2.5 laat een situatieschets zien van de Maas en zijn aftakkingen. Niet alle waterwegen zijn hierop aangegeven (bijv. de Jeker en de Geul ontbreken op deze schets). Vlak na Luik, bij Monsin, begint het Albertkanaal. Dit kanaal onttrekt water van de Maas. Via de sluisen bij Ternaaien komt een deel van deze onttrekking weer bovenstrooms van St.-Pieter terug in de Maas. Benedenstrooms van Sint Pieter onttrekken de Zuid-Willemsvaart en het Julianakanaal water van de Maas. Ook komt er in Maastricht een klein beetje water terug in de Maas via de Jeker (niet weergegeven). Bij Borgharen bevindt zich een (automatische) stuw. Benedenstrooms van Borgharen komt een klein beetje water vanuit de Geul in de Maas (niet

weergegeven). Vlak voor de grens met Nederland, bevindt zich in het Belgische Lixhe een stuw met hydraulische centrale voor de opwekking van electriciteit aan de hand van het verval.

Tabel 3 Invulling Maasafvoeroverdrag (volgens Kallen et. al, 2008) aangevuld met Julianakanaal en uitsplitsing ZuidWillemsvaart (ZWLM) Belgisch en Nederlands verbruik

Monsin	Vlaams gebruik	NL gebruik	Grensmaas	Maas Sint Pieter	Albertkanaal België	Juliana kanaal	ZWLM totaal	ZWLM België	ZWLM NL
130	35	35	60	104	26	15	19	9	10
115	30	30	55	94	21	15	19	9	10
100	25	25	50	84	16	15	19	9	10
90	25	25	40	74	16	15	19	9	10
80	25	25	30	64	16	15	19	9	10
70	25	25	20	54	16	15	19	9	10
60	25	25	10	44	16	15	19	9	10
55	22.5	22.5	10	41.5	13.5	15	16.5	9	7.5
50	20	20	10	38	12	14.5	13.5	8	5.5
45	17.5	17.5	10	33.6	11.4	12	11.5	6.1	5.4
40	15	15	10	30.1	9.9	9.5	10.5	5.1	5.4
35	12.5	12.5	10	27.6	7.4	7.5	10	5.1	4.9
30	10	10	10	25.1	4.9	5	10	5.1	4.9
25	8.3	8.4	8.3	20.7	4.3	4	8.3	4	4.3
20	6.7	6.6	6.7	16.3	3.7	4	5.7	3	2.7

Vlaams verbruik is de som van de kolommen Albertkanaal België en ZWLM België; hierbij is het Albertkanaal het netto verbruik, dus eventuele terugstroming bij Ternaaien en Lanaken is hierin verdisconteerd. Nederlands verbruik is de som van Julianakanaal en ZWLM NL. Bij Monsin-afvoeren boven de 100 m³/s heeft Nederland dan in principe nog ruimte voor een grotere afvoer via het Julianakanaal (of andere onttrekkingen).

In 2011 heeft RWS directie Limburg (Jaskula, 2011) aangegeven dat in de praktijk België 4 m³/s meer inlaat via het Albertkanaal en 4 m³/s minder via de ZuidWillemsvaart. Dat leidt tot de volgende aangepaste tabel 4 die in het LHM (DM) is geïmplementeerd. Voor Monsin-afvoeren boven de 100 m³/s is aangenomen dat het extra water over de Grensmaas gaat.

Tabel 4 Praktijk invulling Maasafvoeroverdrag, waarbij conform mededeling A. Jaskula van RWS-Limburg (2011) België meer inlaat via het Albertkanaal. De afvoeren Monsin en Sint Pieter zijn geel gemarkeerd.

Monsin	Albert Kanaal België	Sint Pieter	Grensmaas Borgharen	Juliana-kanaal NL	Zuid-Willemsvaart totaal	ZWLM België	ZWLM NL (Lozen)
130	30	100	70	15	15	5	10
115	25	90	60	15	15	5	10
100	20	80	50	15	15	5	10
90	20	70	40	15	15	5	10
80	20	60	30	15	15	5	10
70	20	50	20	15	15	5	10
60	20	40	10	15	15	5	10
55	17.5	37.5	10	15	12.5	5	7.5
50	16	34	10	14.5	9.5	4	5.5
45	15.4	29.6	10	12	7.5	2.1	5.4
40	13.9	26.1	10	9.5	6.5	1.1	5.4
35	11.4	23.6	10	7.5	6	1.1	4.9

30	8.9	21.1	10	5	6	1.1	4.9
25	8.3	16.7	8.4	4	4.3	0*	4.3
20	6.7	13.3	6.7	4	2.7	0*	2.7

NB: Bij een lage afvoer van <25 m³/s bij Monsin zal België waarschijnlijk iets minder water innemen via het Albertkanaal en iets meer via de ZuidWillemsvaart, zolang het totaal maar klopt met de afgesproken hoeveelheid Vlaams gebruik in het Maasafvoeroverdrag. Ook de verdeling voor Nederlands gebruik (Julianakanaal vs. ZuidWillemsvaart bij Lozen) zou anders kunnen zijn. Een dergelijke lage decade- of maandgemiddelde Monsin-afvoer is sinds het Maasafvoeroverdrag echter nog niet voorgekomen (alleen in 1976 was de historische Monsin afvoer zo laag, maar toen waren de watervragen ook nog lager). Verder zijn inmiddels diverse sluizen op het Albertkanaal en het Julianakanaal ook voorzien van pompen zodat schutverliezen door terugpompen kunnen worden beperkt in perioden van lage Maasafvoeren.

2.2.3 Coïncidentie Maasafvoeren met lage afvoeren Lobith

Tenslotte is er nog gekeken naar de coïncidentie van de lage afvoeren van Maas en Rijn. Omdat de Maasafvoer een orde kleiner is dan de Rijnaafvoer, is voor zoutindringing bij een T20 situatie vooral de Rijnaafvoer bepalend. Maar de vraag is of de lage afvoeren bij Maas en Rijn tegelijk optreden, wat bij het onafhankelijk van elkaar bepalen van de T20 afvoer bij Lobith en bij Monsin impliciet wordt verondersteld. Daarom is onderzocht, bij de laagste afvoeren van de Rijn bij Lobith (met afvoeren kleiner of gelijk aan de T20 maandafvoer bij Lobith), wat dan de afvoer van de Maas bij Monsin en Sint Pieter is.

In de KNMI'23 klimaatscenario's is de coïncidentie van lage afvoeren van Maas en Rijn geregeld via het klimaatmodel. Met het klimaatmodel is voor de bovenstroomse catchments van Maas en Rijn tegelijkertijd gerekend, en gekalibreerd/geverifieerd dat de neerslag voor de referentiesituatie overeenkomt met huidige patronen. Voor toekomstig klimaat (2050Hd en 2100Hd) kunnen die patronen veranderen, en dat zal de met Wflow berekende afvoeren, op basis van de neerslag, verdamping en temperatuurinformatie, beïnvloeden. De berekende afvoeren van de Rijn zijn nog bias-corrected, omdat door onderschatting van neerslag in de Alpen en de verdamping de winterafvoeren te hoog en zomerafvoeren te laag waren in vergelijking met de metingen. Een dergelijke correctie was niet nodig voor de Maas. Er is echter niet apart getoetst op de coïncidentie van lage afvoeren van Maas en Rijn.

Voor de historische situatie levert een snelle analyse van de afvoeren bij Monsin, kijkend naar de maanden met lage Rijnaafvoeren bij Lobith, het volgende op (Tabel 5).

Tabel 5 Lage maandgemiddelde zomerafvoeren bij Lobith (met herhalingsstijd 10 jaar en groter) en bijbehorende Monsin afvoer uit de historische reeks 1911-2019.

maand	Lobith Rijnaafvoer	Herhalingsstijd Lobith zomermaandafvoer (jaren)	Monsin afvoer in dezelfde maand
sep-1949	782	110	53
sep-1947	796	55	42
aug-1949	815	37	52
apr-1921	832	28	100
sep-1991	874	22	42
aug-2018	915	18	50
aug-1964	919	16	41
sep-1959	920	14	45

sep-2003	936	12	55
sep-1943	945	11	55
sep-1964	952.5	10.0	40
jul-1976	953	9.17	29

Voor de historische reeks is de T20 Lobith zomermaandafvoer 900 m³/s. Als we voor de bijbehorende Monsin afvoer het minimum of de een na-laagste waarde nemen van de geselecteerde 5 maanden waarvoor de Lobith-afvoer minder is dan 900 m³/s, komen we op 42 m³/s. De gemiddelde maandafvoer Monsin voor de in geel aangegeven maanden met Lobith afvoer <=900 m³/s is 58 m³/s, dat is wel fors hoger door de uitschieter van 100 m³/s bij Monsin voor april 1921.

De T20 maandafvoer van Monsin, waarbij geen rekening is gehouden met correlatie met de Rijnaafvoer, is 35 m³/s. De 42 m³/s bij Monsin als minimum voor de geselecteerde maanden met lage Rijnaafvoer is dus maar beperkt hoger dan de T20 waarde van Monsin, maar kijkend naar het gemiddelde over die geselecteerde maanden is de te verwachte Monsin afvoer wel 10 – 20 m³/s hoger.

Op dezelfde manier zijn de afvoeren bij Monsin voor maandafvoeren bij Lobith voor de 240-jaar series voor het Referentie scenario, 2050Hd en 2100 Hd bepaald (Tabel 6).

Tabel 6 T20 afvoer Rijn en Maas, en Monsin afvoer op basis van geselecteerde maanden met lage Rijnaafvoer bij Lobith (minimum waarde Monsin en gemiddelde waarde Monsin voor de selectie)

Scenario	T20 afvoer Lobith	T20 afvoer Monsin	
		onafhankelijk	Op basis van de maanden met Rijnaafvoer < de T20 Rijnaafvoer, dus met coincidentie Lobith minimum, (gemiddelde)
Historische data 1911-2019	900	35	42 (58)
KNMI'23 REF scenario, 240 jaar	919	40	52 (129)
KNMI'23 2050 Hd scenario, 240 jaar	730	34	34 (68)
KNMI'23 2100 Hd scenario, 240 jaar	630	32	36 (50)

Met name voor het referentiescenario is de gemiddelde Monsin afvoer in de maanden met lage Rijnafvoeren duidelijk hoger dan de T20 waarde uit de reeks 1911-2019. Dat zal verklaard worden doordat het berekende referentiescenario is gematcht op de waarnemingsreeks van de jaren 1991-2020, waarin minder extreem lage afvoeren bij Monsin optraden dan in de lange historische reeks.

Voor de 2050Hd en 2100 Hd scenario's is de berekende afvoer bij Monsin – uitgaande van het minimum over de geselecteerde Lobith maanden – vergelijkbaar met de eerder afgeleide T20 schattingen. Wel is het opvallend dat de minimum Monsin afvoer bij scenario 2100Hd hoger is dan bij scenario 2050Hd. Voor de gemiddelden geldt dit niet, die laten wel een dalende trend zien als we van Referentie naar 2050Hd en 2100Hd gaan.

3 Afvoerverdeling bovenrivierengebied

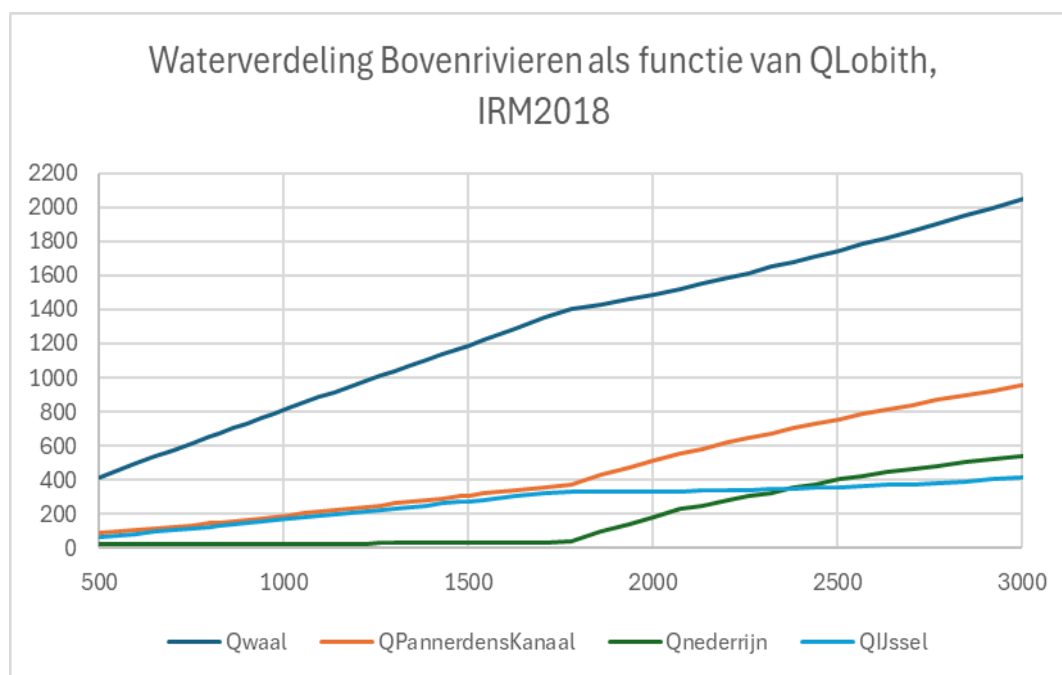
3.1 Varianten afvoerdeling

In het LHM4.3 model in NWM (Basisprognoses 2024) is een interpolatietabel op basis van de IRM2018 bodemligging en SOBEK3 berekeningen gebruikt (De Jong, 2022). Er is echter ook een interpolatietabel op basis van IRM bodemligging 2050 beschikbaar. Typisch is voor 2050 en later de bodem van de Waal dieper uitgesleten dan de bodem van Neder-Rijn en IJssel, dus met deze interpolatietabel wordt iets meer afgevoerd via de Waal en iets minder via Neder-Rijn en IJssel. Dat betekent dat er minder water naar het IJsselmeer gestuurd kan worden en meer naar het westen (Rijn-Maasmond). Door het uitslijten van de rivierbodem is er in principe een ongunstig effect op de watertekorten in regio IJsselmeer (grotere tekorten bij gelijke Lobith-afvoer), en een gunstig effect op zoutindringing in RMM (minder zoutindringing bij gelijke Lobith-afvoer), al wordt dat effect op zoutindringing in RMM door de lagere rivierafvoeren in de 2050Hd en 2100Hd scenario's meer dan teniet gedaan.

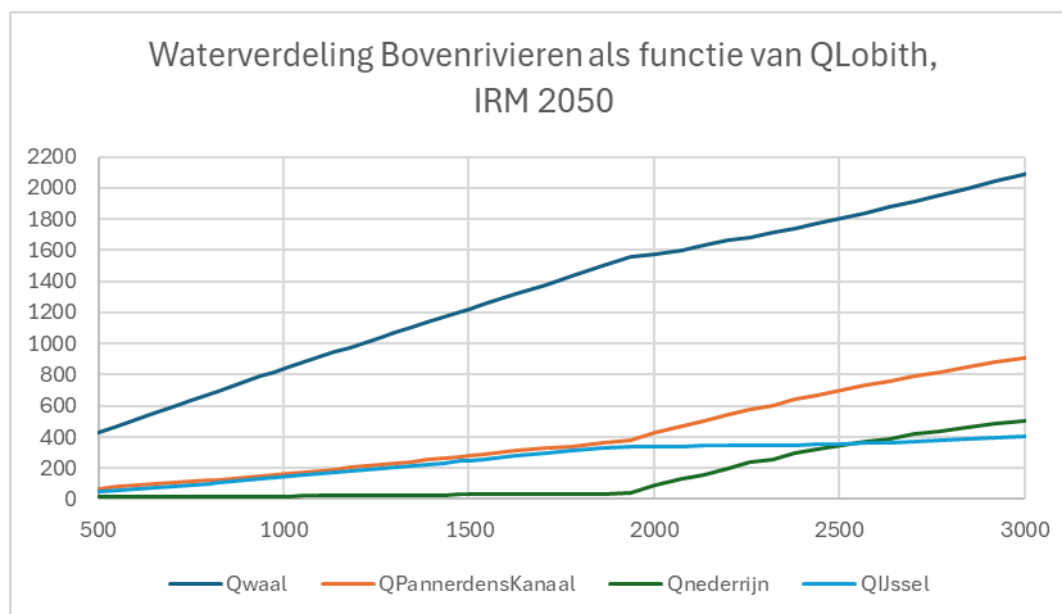
Tabel 8 toont de afvoerverdelingen bij de (huidige) IRM2018 bodem en de IRM2050 bodemligging. Hierbij is aangenomen dat op de Neder-Rijn een minimale afvoer van 20 m³/s gehandhaafd kan worden.

Tabel 8 Afvoerverdeling IRM 2018 bodem (huidige situatie) en IRM2050, in m³/s

Afvoer Lobith	Afvoer Waal IRM2018	Afvoer Nederrijn IRM2018	Afvoer IJssel IRM2018	Afvoer Waal IRM2050	Afvoer Nederrijn IRM2050	Afvoer IJssel IRM2050
600	494	20	85	512	20	67
650	535	20	95	554	20	76
699	575	20	104	595	20	84
750	615	20	114	637	20	93
800	655	20	124	678	20	102
823	674	20	129	696	20	107
861	704	20	137	727	20	114
899	734	20	145	758	20	121
937	762	21	153	788	20	129
975	791	22	161	818	20	137
1013	820	23	169	848	20	144
1054	852	24	178	880	21	153
1096	884	24	188	912	22	162
1137	915	25	197	944	23	170
1179	947	26	206	976	23	179
1220	978	27	215	1008	24	188
1260	1008	28	224	1038	25	197
1301	1039	29	233	1069	26	206
1343	1071	29	242	1101	27	215
1386	1104	30	252	1134	27	224
1430	1137	31	261	1167	28	234
1476	1172	32	271	1202	29	244
1500	1191	32	277	1220	30	249



Figuur 3.1 Afvoer per riviertak (m^3/s) volgens bodemligging IRM 2018 (huidige situatie) als functie van de afvoer bij Lobith (m^3/s)



Figuur 3.2 Afvoer per riviertak (m^3/s) volgens bodemligging IRM 2050 als functie van de afvoer bij Lobith (m^3/s)

3.2 Samenvatting afvoerdeling Rijntakken

De volgende afvoerverdeling is aangeleverd voor de waterbalans:

Zichtjaar	2020	2050	2100	2100	2100	2200	2200	2200
Zeespiegelstijging (m)	0	0.5	0.5	1	2	1	3	5
Rijnafvoer (m^3/s)	919	730	630	630	630	630	630	630
	Verdeling							
IJssel	149	110	90	90	90	90	90	90

Nederrijn/Lek	21	20	20	20	20	20	20	20
Waal	749	600	519	519	519	519	519	519

4 Verdamping IJsselmeergebied

4.1 Varianten verdamping

In de door Mens et al. (2024) beschreven balans is aangenomen dat verdamping van de grote meren (IJsselmeer, Markermeer en Veluwe-randmeren) in een droge zomer direct ten koste gaat van de beschikbare bufferschijf van de meren, en daarom in de balans tegen elkaar kunnen worden weggestreept. In die balans werd aangenomen dat er gemiddeld in een droge zomer 3 mm/dag open-watervedamping optreedt. De direct beschikbare bufferschijf van de IJsselmeer/Markermeer/Randmeren bedraagt 20 cm (zomerpeil -0,10 m NAP uitzakkend naar -0,30 m NAP). De direct beschikbare bufferschijf van 20 cm is voldoende om te voorzien in de open-watervedamping van de grote meren van 3 mm/dag gedurende ruim twee maanden ($200/3 = 70$ dagen). De waterbalans gaat echter over één droge maand ipv twee. Door de open-watervedamping en de beschikbare bufferschijf niet mee te nemen in de balans werd een deel van het beschikbare water dus niet meegeteld. Deze aanname was verantwoord omdat een droge maand niet op zichzelf staat, en voor een maand met gemiddeld 900 m³/s afvoer bij Lobith (T20 afvoer historische data 1911-2019) zal ook de voorafgaande maand al droog zijn geweest. Dus is de kans groot dat er reeds een deel van de buffer is verdampt.

Ter vergelijking voor de waterbalans kan dit omgerekend worden naar m³/s. Met een oppervlakte van 1864 km² (IJsselmeer, Markermeer en Veluwe-Randmeren), komt 20 cm bufferschijf overeen met een volume van (afgerond) 380 Mm³. Als dit volume in één maand wordt gebruikt komt het volume overeen met 146 m³/s.

De aanname van 3 mm/dag netto verdamping is opnieuw tegen het licht gehouden. Ook is ingeschat hoeveel de open-watervedamping in de Hd-scenario's zou kunnen toenemen en of de bufferschijf dan nog steeds toereikend is. Hiervoor is gekeken naar de modeldata van de LHM invoergegevens van BP24 voor het IJsselmeer (een van de 3 modelknopen en daarom overeenkomend met 998 km² ipv 1200 km²). Die modeldata was beschikbaar in m³/s, maar is omgerekend naar mm/dag, zie Tabel 9. In de nieuwe (90-jarige) reeks voor de referentie volgens KNMI'23 bedraagt de netto zomerverdamping gemiddeld 1,6 mm/dag en in het droogste jaar uit de reeks kan dit oplopen tot 3,9 mm/dag. De grootste verdamping in deze reeks komt in juli voor met 5,4 mm/dag. Dit is echter extreem. Rekenend met 3,9 mm/dag zal de bufferschijf in anderhalve maand opgebruikt zijn om te voorzien in de verdamping ($200/3,9 = 51$ dagen).

In de Hd-scenario's is de verwachting dat de bufferschijf nog sneller leeg zal raken door verdamping van de meren. Gemiddeld neemt de potentiële zomerverdamping met maximaal 22% toe in 2100 volgens de kentallen van KNMI'23 (Tabel 10). Tegelijkertijd neemt de zomerneerslag af. Het effect op de netto verdamping van de grote meren is afhankelijk van de maand en de ernst van de droogte. De modeldata laat zien dat de gemiddelde (netto) zomerverdamping met 40 – 78% toeneemt in het Hd2050/Hd2100 scenario. De netto verdamping van de droogste zomer uit de reeks neemt toe met 24-40% naar 4,8 mm/dag in Hd2050 en 5,4 mm/dag in Hd2100. Met een netto verdamping van 4,8 mm/dag is de bufferschijf in 41 dagen op; met 5,4 mm/dag nog iets sneller, namelijk in 37 dagen. Dat is nog steeds meer dan een maand. We kunnen dus nog steeds stellen dat de beschikbare bufferschijf toereikend is om de meerverdamping in een droge zomermaand te compenseren.

Tabel 9 Netto verdamping IJsselmeer(een van de 3 DM knopen) voor KNMI'23 referentie en KNMI'23 scenario's 2050Hd, 2100Hd. Data is overgenomen van LHM-modelinvoer van de BP24 berekeningen, en vervolgens omgerekend naar mm/dag.

netto verdamping (mm/dag)	Ref	Hd2050	%toename Hd2050 tov Ref	Hd2100	%toename Hd2100 tov Ref
zomergemiddeld (juni-juli-aug)	1,6	2,3	40%	2,9	78%
droogste zomer	3,9	4,8	24%	5,4	40%
droogste juni	5,2	6,2	19%	5,6	7%
droogste juli	5,4	6,1	12%	6,2	15%
droogste augustus	3,7	5,2	38%	5,6	51%

Tabel 10 KNMI'23 kerncijfers klimaatverandering: huidig klimaat en scenario's 2050Hd en 2100Hd (KNMI, 2023)

seizoen	Variabele (gemiddelde)	REF (1991-2020)	2050Hd (verandering in °C of %)	2100Hd verandering in °C of %)
	Temperatuurstijging wereldwijd		+1.5 °C	+4.0 °C
Jaar	Temperatuur NL	10.5 °C	+1.6 °C	+4.4 °C
	Neerslag	851 mm	-2%	-3%
Winter	Gemiddelde neerslag	218 mm	+4%	+14%
Lente	Gemiddelde Neerslag	153 mm	+0%	+4%
	Potentiële verdamping	190 mm	+6%	+10%
Zomer	Gemiddelde Neerslag	235 mm	-13%	-29%
	Potentiële verdamping	286 mm	+11%	+22%
	Neerslagtekort april t/m september	160 mm	+35%	+79%
Herfst	Neerslag	245 mm	+1%	+1%

4.2 Samenvatting verdamping grote meren

We adviseren om, in lijn met Mens et al. (2024), geen rekening te houden met waterbeschikbaarheid vanuit de buffer van de grote meren, omdat dit volume grotendeels nodig is voor de openwater-verdamping.

5 Regionale watervragen

5.1 Watervragen berekening en peilbeheer uit het Nationaal Water Model (Basisprognoses 2018)

De watervragen voor berekening en peilbeheer komen uit het Nationaal Watermodel (NWM). Vanwege de onbruikbaarheid van de Basisprognoses 2024 zijn hiervoor de Basisprognoses 2018 gebruikt (<https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/watermanagementmodellen/nationaal-water-model/basisprognoses/basisprognoses-2018/>). Deze maken gebruik van de KNMI'14 scenario's.

Deze basisprognoses bestaan uit een 101-jarige reeks (jaren 1911-2011) voor de referentie en zichtjaar 2050. Berekeningen voor het zichtjaar 2100 (Stoom2085) zijn destijds later toegevoegd en hebben een kortere tijdreeks: 32 jaar (jaren 1972 – 2004).

Vanwege de aansluiting bij de T20-situatie van Lobith is gekozen om de watervragen en tekorten bij een T20 situatie van Lobith-afvoeren te gebruiken. Daarvoor zijn de volgende stappen uitgevoerd:

- De databases uit het DPZW project Pragmatische Aanpak zijn gebruikt. Het project Pragmatische Aanpak heeft twee typen databases ontwikkeld: één die de bruto watervraag van de regio weergeeft, en één die de netto watervraag van de regio aan het hoofdwatersysteem weergeeft, dus de watervraag die gecorrigeerd is voor het deel dat binnen de regio kan worden geleverd. Vanwege de andere focus van dit project en het Pragmatische Aanpak project, gebruiken beide projecten uiteindelijk verschillende databases. Voor dit project (de waterbalans) is de netto watervraag aan het hoofdwatersysteem namelijk het meest interessant.
- De 101-jarige tijdreeksen van Lobith-afvoeren, landelijke watervragen (totaal van peilbeheer, berekening en doorspoeling) en landelijke watertekorten (totaal van peilbeheer, berekening en doorspoeling) zijn gebruikt. Deze tijdreeksen hebben een tijdstapgrootte van 1 decade, en zijn verzameld voor het Referentie2017-scenario.
- Vanuit deze reeksen is een lopend gemiddelde van 3 decaden genomen, dat kan worden gezien als lopend maandgemiddelde.
- De watervragen in de periode die passen bij de eerder bepaalde T20 Lobith afvoer in het zomerhalfjaar ($900 \text{ m}^3/\text{s} \pm 50 \text{ m}^3/\text{s}$) zijn geselecteerd.

In een eerdere analyse binnen deze opdracht was het criterium voor de Lobith afvoer van $900 \text{ m}^3/\text{s} \pm 20 \text{ m}^3/\text{s}$ gebruikt. Dat gaf echter enkel bruikbare perioden buiten de 32-jarige reeks van Stoom2085. Om consistente waterbalansen te leveren die voor de verschillende zichtjaren met elkaar vergeleken kunnen worden is het belangrijk om voor alle scenario's dezelfde periode te kiezen. Vandaar dat de range is uitgebreid naar $900 \text{ m}^3/\text{s} \pm 50 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabel 11 geeft de gemiddelde watervraag en -tekort voor de perioden (op basis van lopende maandgemiddelde) waarin de Rijnafvoer bij Lobith (in de referentie conform KNMI'14) binnen de range $900 \text{ m}^3/\text{s} \pm 50 \text{ m}^3/\text{s}$ ligt, wat ongeveer overeenkomt met een T20 afvoersituatie in de historische reeks. De geel gearceerde perioden liggen binnen de periode 1972-2004, welke is gebruikt voor Stoom2085. We zijn daarnaast met name geïnteresseerd in de zomer (juli), omdat het groeiseizoen dan nog volop aan de gang is. De watervragen en -tekorten van de periode 1-7-1976 t/m 31-7-1976 (middelste decade 11-7-1976 in de tabel) van zowel referentie als Stoom2050 en Stoom2100 zijn overgenomen in de waterbalans. Verschillen met de getallen van Mens et al. (2024) hebben te maken met een andere regio-indeling en een net andere periode. Opgemerkt moet worden dat er geen informatie beschikbaar is over de watervragen na 2100. Daarom worden de 2100-getallen ook gebruikt voor zichtjaar 2200.

Tabel 11 De 3-decades gemiddelde totale landelijke watervraag en watertekort (totaal van peilbeheer, beregening en doorspoeling) in het zomerhalfjaar in de referentie, horende bij een Qlobith van ongeveer 900 m³/s, met uitgebreidere zoekcriteria. In geel de perioden die vallen binnen reeks 1972-2004.

Middelste decade	Watervraag (m ³ /s)	Watertekort (m ³ /s)	Afvoer Lobith (m ³ /s)
1-9-1947	258.8	27.6	865.6
11-9-1991	142.6	11.1	874.1
1-8-1949	255.2	30.8	875.1
1-5-1921	209.5	7.0	886.0
1-8-1964	167.0	14.5	905.4
11-8-1964	167.4	14.0	917.8
21-7-1949	248.5	27.6	918.8
11-9-1959	239.8	20.6	920.2
1-9-1991	211.9	15.9	926.9
1-7-1976	371.9	48.4	928.0
1-9-1976	188.2	21.9	934.7
11-9-2003	147.6	9.0	935.9
1-8-1921	302.9	40.9	936.7
21-7-1964	193.4	14.5	942.8
21-8-1964	137.4	10.7	943.9
11-9-1943	141.3	8.6	945.0
11-7-1976	334.1	46.8	946.9
21-8-1947	294.4	32.5	947.7

5.2 Watervragen boezemdoorspoeling

De watervraag voor polderdoorspoeling is geleverd door RWS uit Delsman et al. (2022) en wordt hier verder niet beschreven.

De watervraag voor boezemdoorspoeling komt uit twee bronnen: Delsman et al. (2022) en de Deltascenario's 2018 (corresponderend met BP18). De getallen uit Delsman et al. (2022) zijn actueler en bevatten nieuwe inzichten. Echter zijn deze niet direct bruikbaar.

Binnen Delsman et al., 2022 is enkel gekeken naar de doorspoeling vanuit verziltingsoogpunt, terwijl in NWM ook doorspoeling vanwege waterkwaliteitsoogpunt is meegenomen. Vandaar dat de doorspoelvraag voor het Referentieklimaat in Delsman et al. (2022) lager uitpakt (40 m³/s versus 47 m³/s). Daarnaast is Delsman et al. (2022) niet direct bruikbaar omdat deze enkel landelijke getallen levert en geen onderverdeling maakt naar de regio's.

De volgende stappen zijn doorlopen voor het afleiden van de watervraag voor boezemdoorspoeling:

- Voor Referentie zijn de NWM-getallen gebruikt (omdat daar ook doorspoeling vanwege waterkwaliteit bij zit).
- De toename in doorspoeling door ZSS uit Delsman et al. (2022) is naar verhouding verdeeld over de regio's Noord, West en ZWD om de doorspoeling in de scenario's te krijgen. Hier is voor alle scenario dezelfde verhouding van de referentiesituatie gehanteerd.

Voor een zeespiegelstijging van 5 meter zijn geen getallen beschikbaar. Voor dat scenario adviseren we de beschikbare gegevens te extrapoleren.

De totale watervraag voor doorspoeling is niet noodzakelijkerwijs een optelsom van polderdoorspoeling en boezemdoorspoeling. Soms kan water hergebruikt worden. Het is niet bekend in hoeverre dit op nationale schaal gebeurt. De onzekerheid hierover kan worden vertaald in een onzekerheidsband, als volgt. Als bovenkant van de bandbreedte wordt aangenomen dat geen water wordt hergebruikt, oftewel het totaal is de optelsom van de watervraag voor polder- en boezemdoorspoeling. Als onderkant van de bandbreedte wordt aangenomen dat al het water wordt hergebruikt. Het totaal is dan gelijk aan het maximum van de twee termen).

5.3 Samenvatting regionale watervragen

Tabel 12 Overzicht van de aangeleverde totale watervragen per scenario (m³/s) voor de periode 1-7-1976 t/m 31-7-1976. Bestaande uit de posten peilbeheer en berekening uit het NWM BP18, de polderdoorspoeling uit Delsman et al. (2022) en de gecorrigeerde boezemdoorspoeldebieten zoals beschreven in bovenstaande paragraaf. Voor de data van 2 m ZSS heeft lineaire interpolatie plaatsgevonden, voor de data van 5 m heeft lineaire extrapolatie plaatsgevonden.

Zichtjaar	2020	2050	2100	2100	2100	2200	2200	2200
Zeespiegelstijging (m)	0	0.5	0.5	1	2	1	3	5
Hoge Zandgronden	64	81	84	84	84	84	84	84
Rivierengebied	30	39	42	42	42	42	42	42
Noord	112	192	198	228	266	228	305	382
West	85	102	107	113	153	113	193	272
Zuidwestelijke delta	41	57	59	66	92	66	119	171
totaal	332	471	490	533	637	533	742	951

6 Literatuur

Buitink, J., Tsiokanos, A., Geertsema, T., ten Velden, C., Bouaziz, L., & Weiland, F. S., 2023: Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse. Deltares report 11209265-002-ZWS-0003, December 2023.

Delsman, J., America, I., & Mulder, T. (2022): Grondwaterverziltiging en watervraag bij een stijgende zeespiegel. *Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II*.

Mens, M., Pouwels, J., Weiler, O., Delsman, J., Huismans, Y. 2024: De zoetwaterbalans van laag Nederland in een warmer klimaat. Deltares rapport 11210362-000-ZWS-0001

S. Bastings, A. Jaskula, K. Maeghe, 2011: Maasafvoeroverdrag Vlaanderen-Nederland : 15 jaar ervaring. H2O nr. 02, 2011.

DPZW, 2025, Pragmatische aanpak (in prep.)

De Jong, J., 2020: Effect van een nieuwe bodemhoogte 2050 op de waterstanden en afvoeren op de Rijntakken, memo 11203738-005-BGS-0011, Deltares, januari 2020

KNMI, 2023: KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland, KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 23-03.

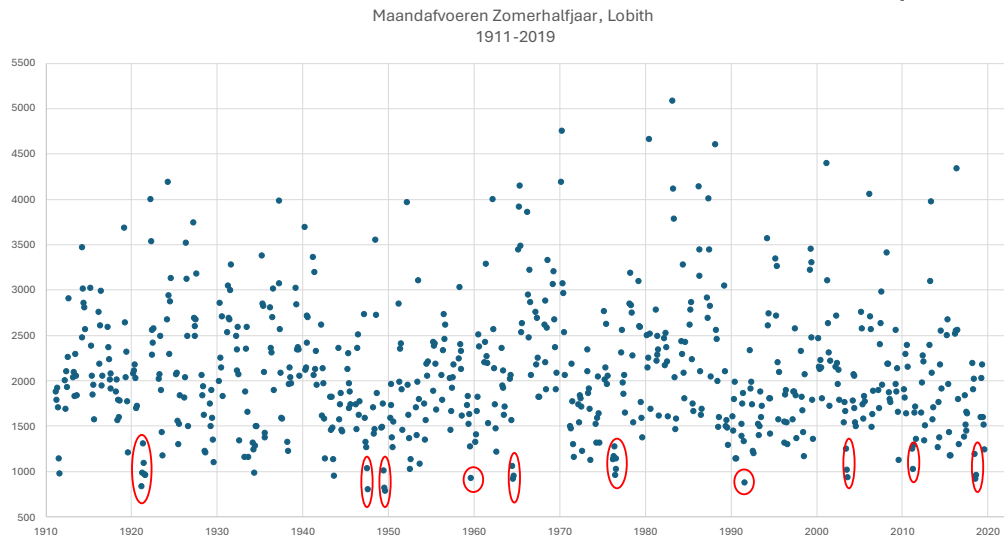
M.J. Kallen, E.D. de Goede, P.M.A. Boderie, Bepaling koelcapaciteit van Rijkswateren onder maatgevende en extreme omstandigheden", WL-rapport Q4498, Deltares, 2008. Maasafvoeroverdrag, <https://wetten.overheid.nl/BWBV0001232/1996-07-01>

Sloff, K. 2019: Prognose bodemligging Rijntakken 2020-2050, 11203738-005-BGS-0008, Deltares, December 2019.

Van Walsem, T. 2020 Gevoeligheidsanalyse: Impact van Bodemverandering Rijntakken op Zoetwatervoorziening 2050, Memo RWS-WVL, oktober 2020.

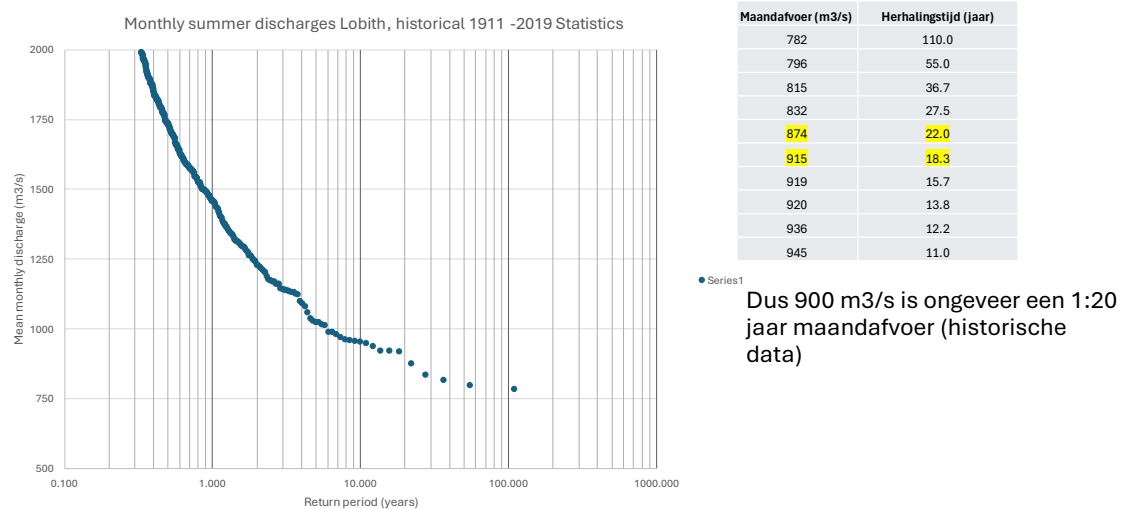
Bijlage A: Lobith figuren

Historische Lobith afvoeren zomermaanden 1911-2019 (NB BP2018=historische afvoeren 1911-2011)



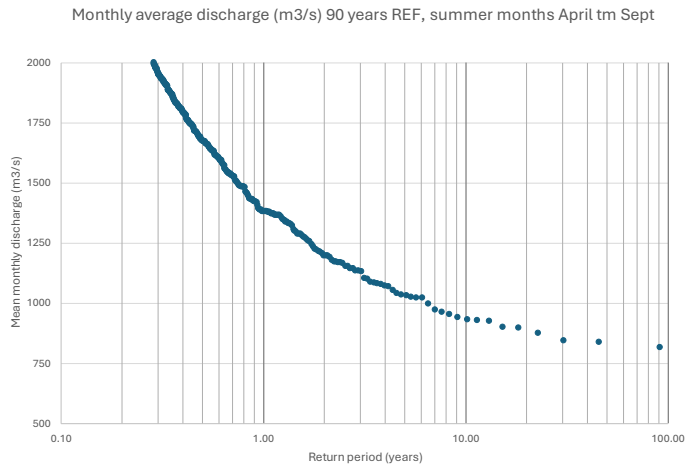
Figuur 6.1 Historische Lobith maandafvoeren zomermaanden 1911-2019. De laagste maandafvoeren zijn met rode ellipsen om de datapunten aangegeven. De jaren met bekende droge zomermaanden 1921, 1947, 1949, 1959, 1964, 1976, 1991, 2003, 2011 en 2018 komen hier naar voren.

Historische Lobith afvoeren



Figuur 6.2 Zomermaandafvoer Lobith versus herhalingsjijd voor de historische Lobith maandafvoeren zomermaanden 1911-2019

BP2024 Lobith afvoeren 90 jaar REF (s1,s2,s7)



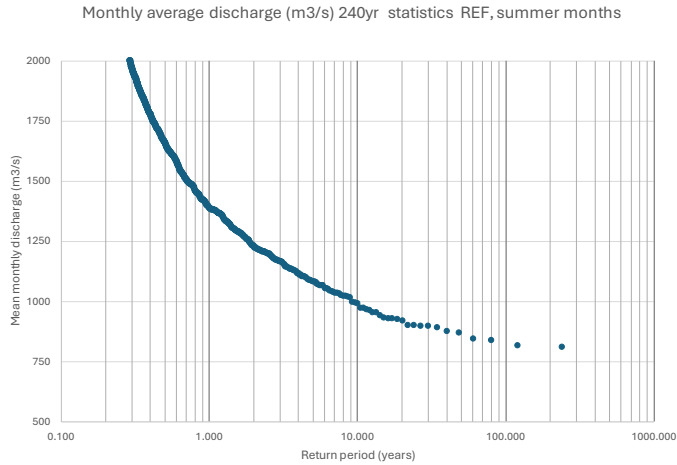
Maandafvoer (m3/s)	Herhalingstijd (jaar)
815	91.0
837	45.5
844	30.3
875	22.8
895	18.2
899	15.2
925	13.0
928	11.4
931	10.1
939	9.1

Op basis van de 90 jaar BP2024 REF heeft een maandafvoer van 900 m3/s een herhalingstijd van orde 15 jaar. Dus frequenter (lagere herhalingstijd) dan volgens de historische data 1911-2019

Bij T=20 zou een maandafvoer van orde 885 m3/s horen.

Figuur 6.3 Zomermaandafvoer Lobith versus herhalingstijd voor de KNMI'23 Referentie scenario, 90 jaar

BP2024 Lobith afvoeren 240 jaar REF (s1 tm s8)



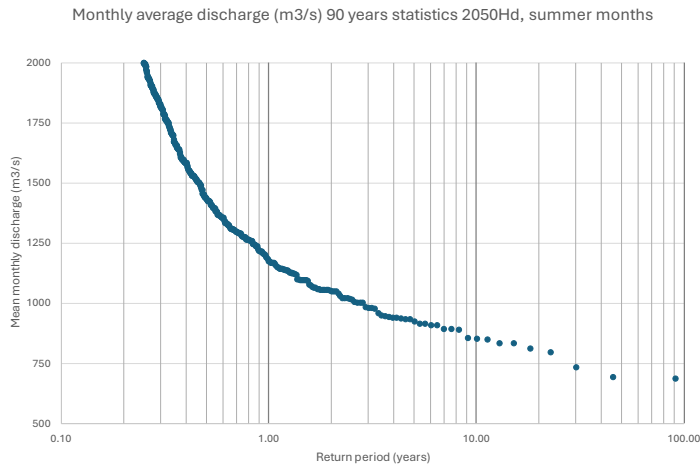
Maandafvoer (m3/s)	Herhalingstijd (jaar)
810	241
815	120.5
837	80.3
844	60.3
868	48.2
875	40.2
889	34.4
895	30.1
897	26.8
899	24.1
900	21.9
919	20.1
925	18.5
928	17.2
931	16.1
939	15.0

Op basis van de 240 jaar BP2024 REF heeft een maandafvoer van 900 m3/s een herhalingstijd van 22 jaar, dat is redelijk vergelijkbaar met de historische data 1911-2019 (T=20 jaar) en iets minder frequent dan in de selectie van 90 jaar (dan Q=900 is T=15 jaar)

De 240 jaar data geven voor T=20 jaar een maandafvoer van 919 m3/s.

Figuur 6.4 Zomermaandafvoer Lobith versus herhalingstijd voor de KNMI'23 Referentie scenario, 240 jaar

BP2024 Lobith afvoeren 90 jaar 2050Hd (s3, s4,s8)



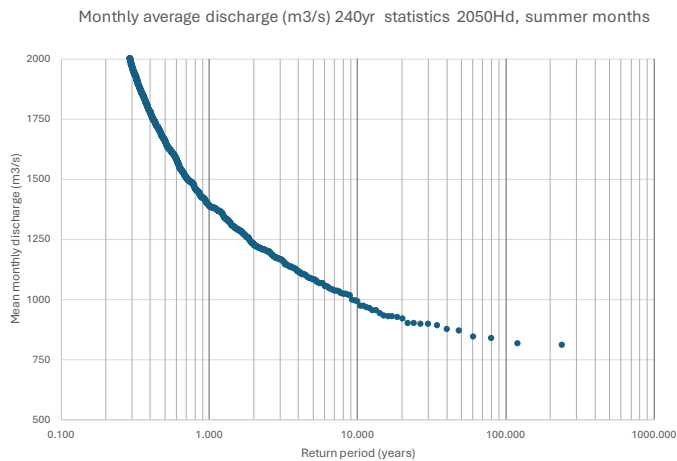
Maandafvoer (m3/s)	Herhalingstijd (jaar)
685	91.0
690	45.5
731	30.3
793	22.8
808	18.2
830	15.2
831	13.0
847	11.4
849	10.1
853	9.1

Op basis van de 90 jaar BP2024 2050Hd heeft een maandafvoer van 700 m3/s een herhalingstijd van orde 40 jaar.

Bij T=20 hoort een maandafvoer (90 jaar 2050Hd statistiek) van orde 800 m3/s.

Figuur 6.5 Zomermaandafvoer Lobith versus herhalingstijd voor de KNMI'23 2050Hd scenario, 90 jaar

BP2024 Lobith afvoeren 240 jaar 2050Hd (s1 tm s8)



Maandafvoer (m3/s)	Herhalingstijd (jaar)
644	241
685	120.5
687	80.3
690	60.3
690	48.2
691	40.2
693	34.4
696	30.1
697	26.8
698	24.1
710	21.9
730	20.1
731	18.5
733	17.2
740	16.1
749	15.0

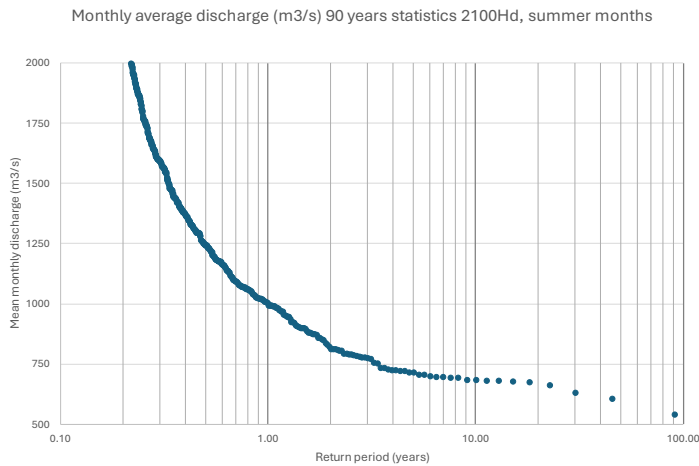
Op basis van de 240 jaar BP2024 2050Hd heeft een maandafvoer van 700 m3/s een herhalingstijd van 24 jaar.

De 240 jaar data geven voor T=20 jaar een maandafvoer van 730 m3/s, een stuk lager dan de 800 m3/s in de 90 jaar reeks.

In de analyse van vorig jaar van Mens c.s. was voor een T=20 maandafvoer 2050Hd Q=700

Figuur 6.6 Zomermaandafvoer Lobith versus herhalingstijd voor de KNMI'23 2050Hd scenario, 240 jaar

BP2024 Lobith afvoeren 90 jaar 2100Hd (s1, s7,s8)



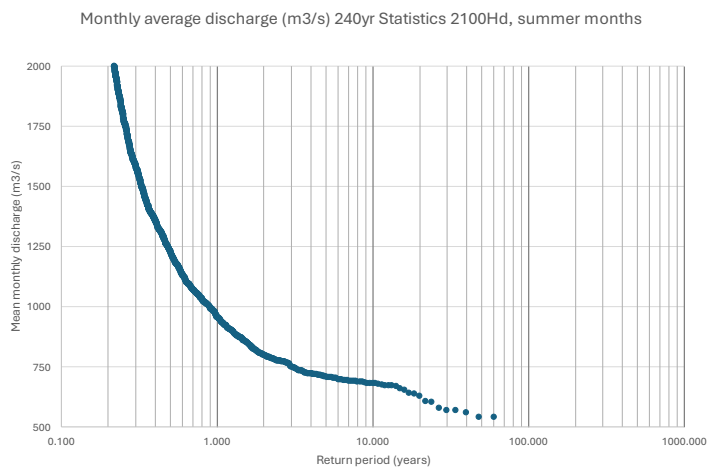
Maandafvoer (m3/s)	Herhalingstijd (jaar)
540	91.0
605	45.5
629	30.3
661	22.8
673	18.2
676	15.2
681	13.0
681	11.4
682	10.1
684	9.1

Op basis van de 90 jaar BP2024 21000Hd heeft een maandafvoer van 665 m3/s een herhalingstijd van orde 20 jaar.

Bij een maandafvoer van 700 m3/s hoort een herhalingstijd van ongeveer 6 jaar

Figuur 6.7 Zomermaandafvoer Lobith versus herhalingstijd voor de KNMI'23 2100Hd scenario, 90 jaar

BP2024 Lobith afvoeren 240 jaar 2100Hd (s1 tm s8)

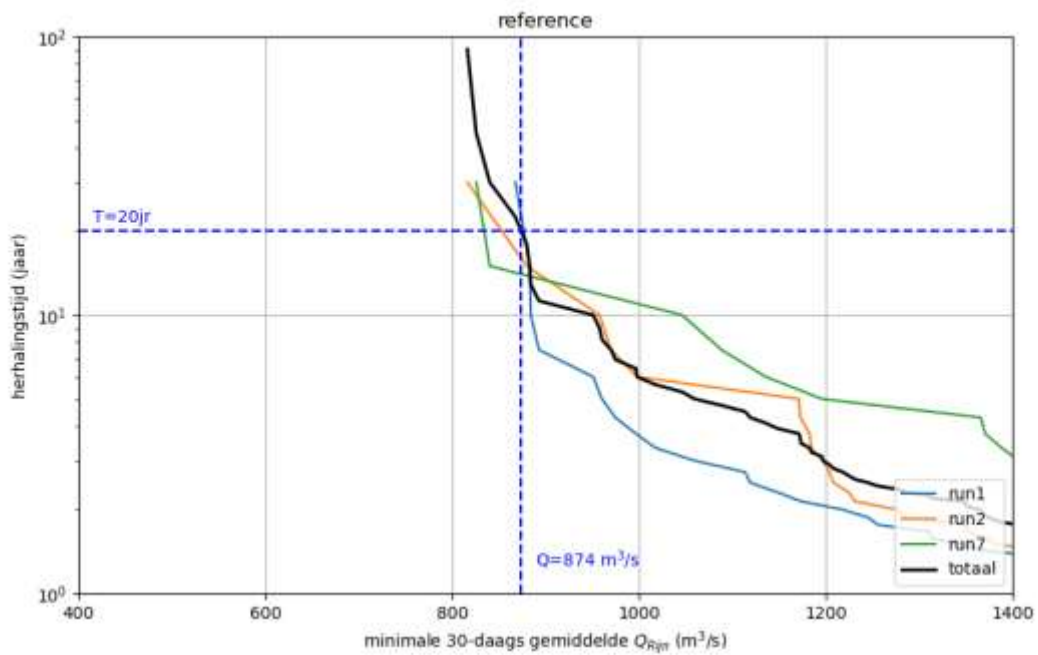


Maandafvoer (m3/s)	Herhalingstijd (jaar)
438	241
442	120.5
442	80.3
540	60.3
540	48.2
560	40.2
569	34.4
570	30.1
577	26.8
605	24.1
607	21.9
629	20.1
639	18.5
642	17.2
654	16.1
661	15.0

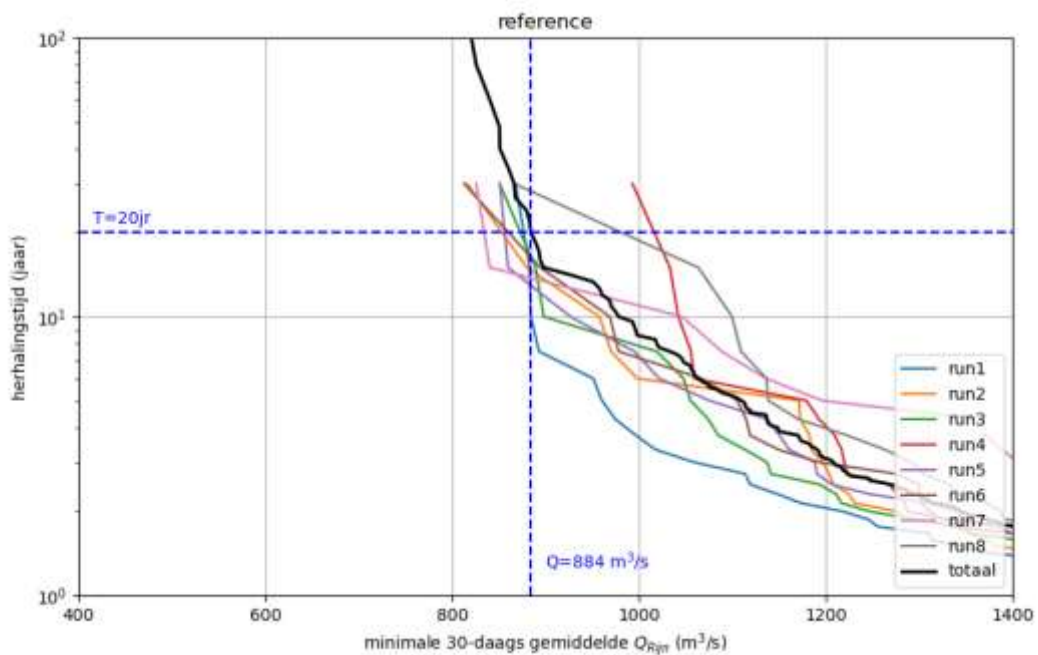
Op basis van de 240 jaar BP2024 2100Hd heeft een maandafvoer van 630 m3/s een herhalingstijd van 20 jaar. Bij dezelfde herhalingstijd T=20 jaar geeft de 90 jaar reeks een afvoer van 665 m3/s. De langere reeks bevat dus relatief meer lage maandafvoeren.

Bij een maandafvoer van 700 m3/s hoort een herhalingstijd van ongeveer 6 jaar, dat geldt zowel voor de 90 als 240 jaar reeks.

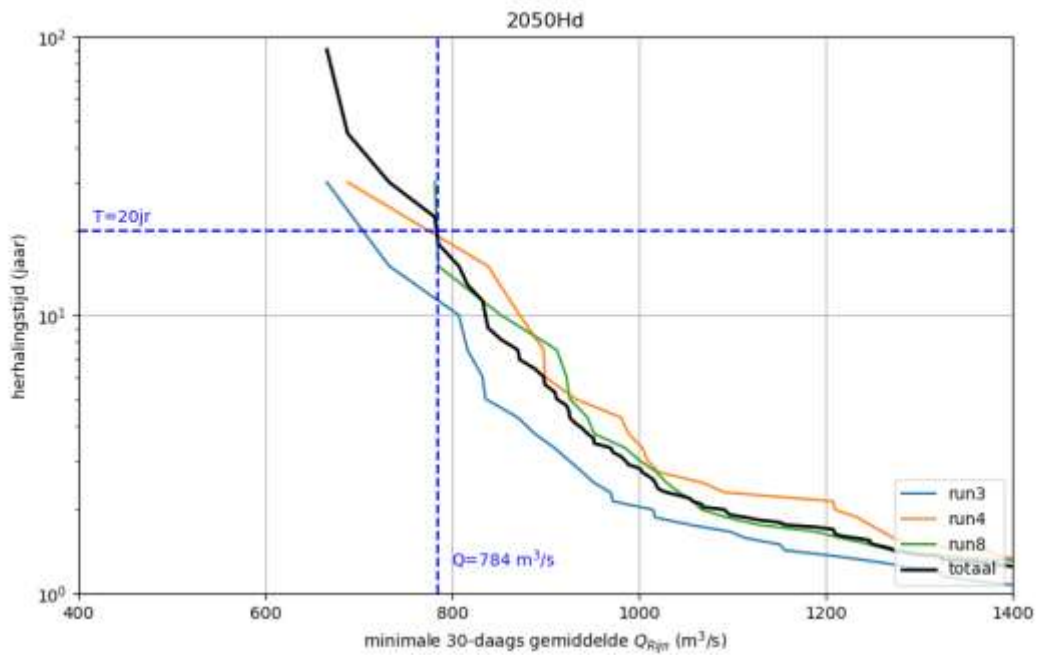
Figuur 6.8 Zomermaandafvoer Lobith versus herhalingstijd voor de KNMI'23 2100Hd scenario, 240 jaar



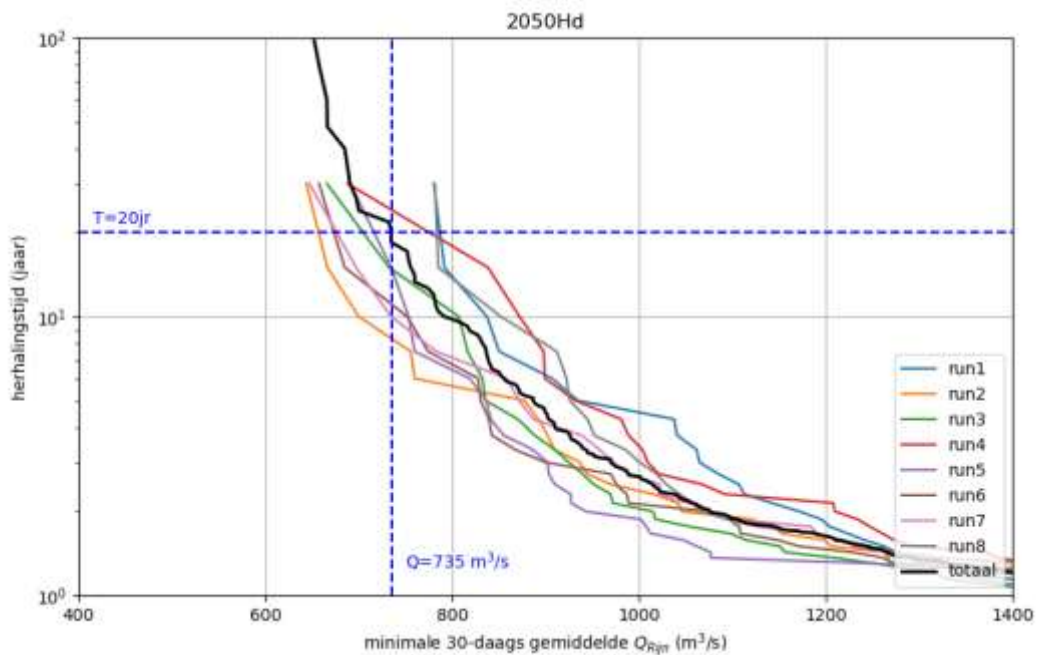
Figuur 6.9 30-daagse zomerafvoer Lobith vs. herhalingsstijd voor KNMI'23, Referentie, 90 jaar, methode script



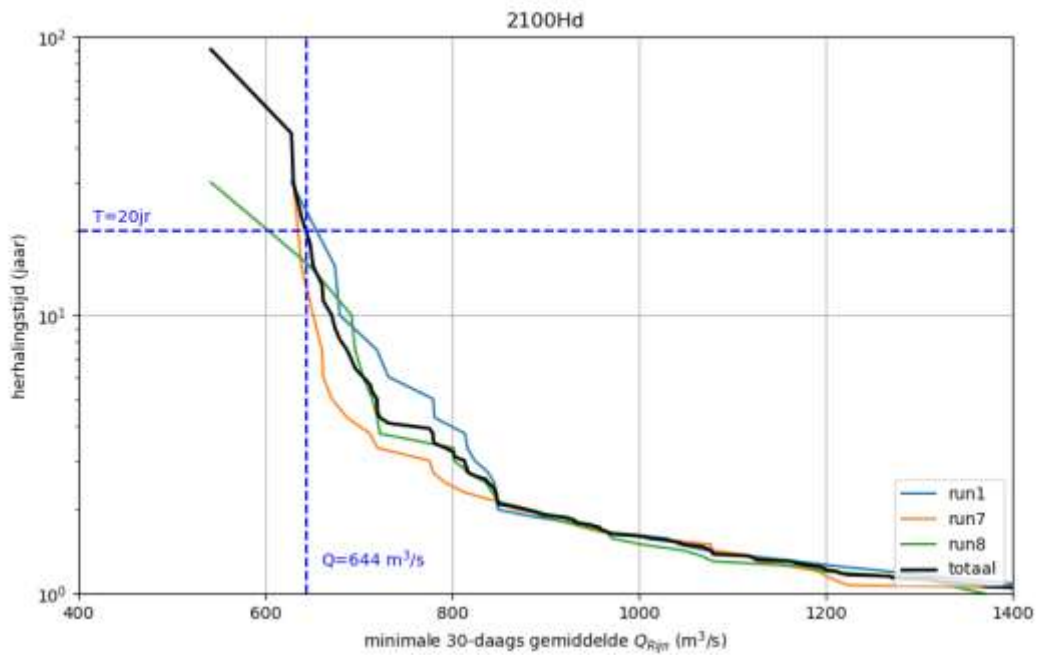
Figuur 6.10 30-daagse zomerafvoer Lobith vs. herhalingsstijd voor KNMI'23, Referentie, 240 jaar, methode script



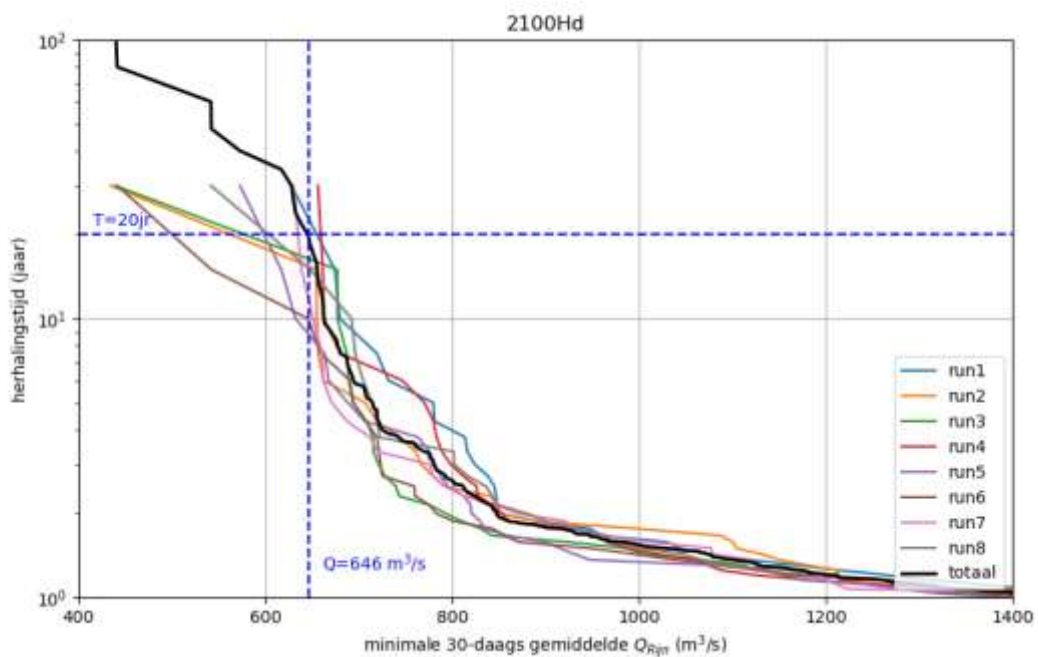
Figuur 6.11 30-daagse zomerafvoer Lobith vs. herhalingsstijd voor KNMI'23, 2050Hd, 90 jaar, methode script



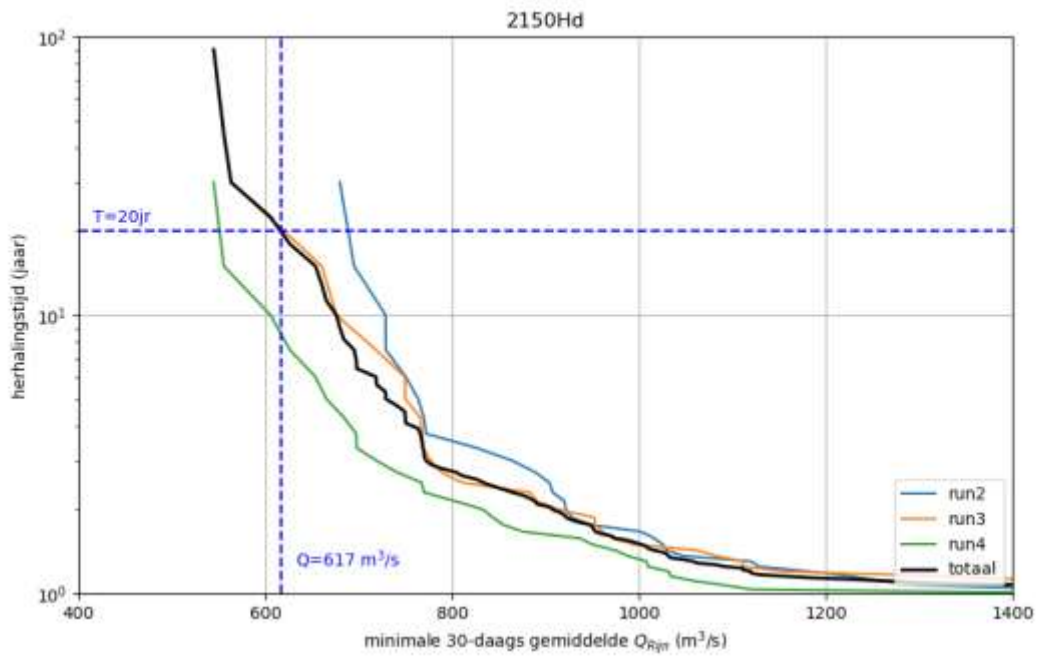
Figuur 6.12 30-daagse zomerafvoer Lobith vs. herhalingsstijd voor KNMI'23, 2050Hd, 240 jaar, methode script



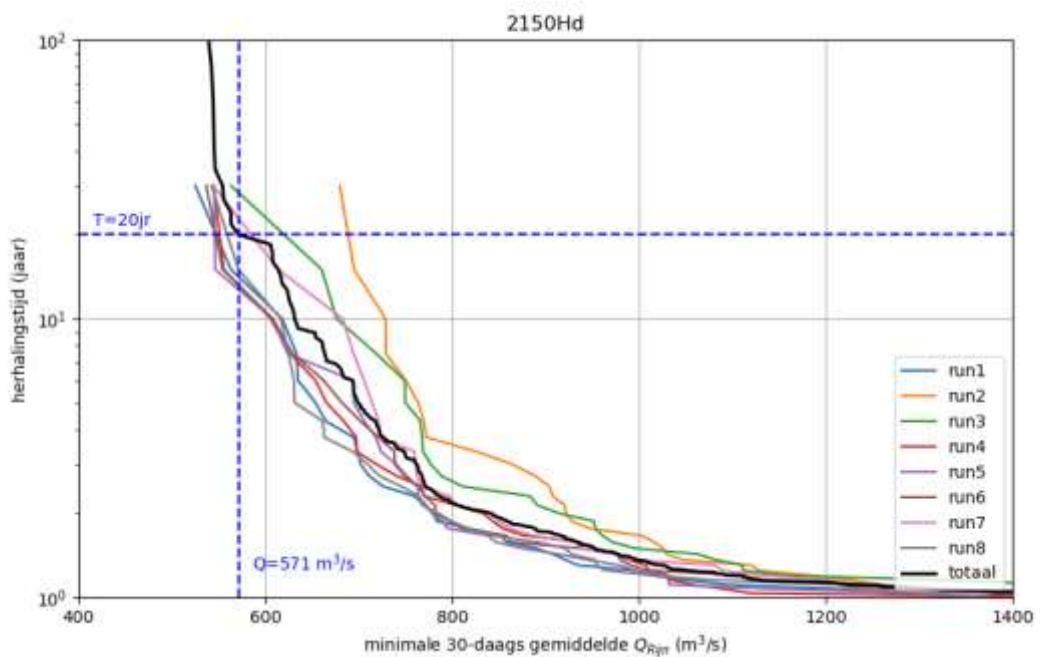
Figuur 6.13 30-daagse zomerafvoer Lobith vs. herhalingstijd voor KNMI'23, 2100Hd, 90 jaar, methode script



Figuur 6.14 30-daagse zomerafvoer Lobith vs. herhalingstijd voor KNMI'23, 2100Hd, 240 jaar, methode script



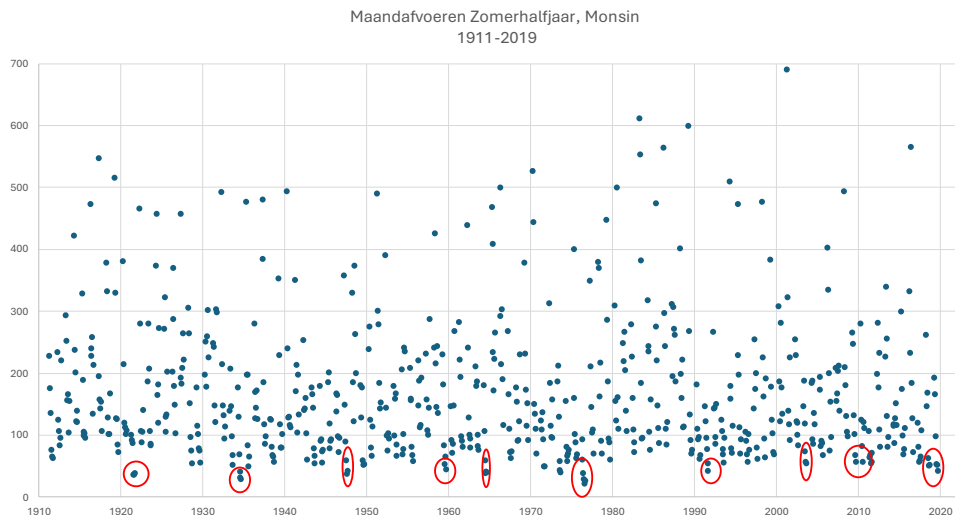
Figuur 6.15 30-daagse zomerafvoer Lobith vs. herhalingstijd voor KNMI'23, 2150Hd, 90 jaar, methode script



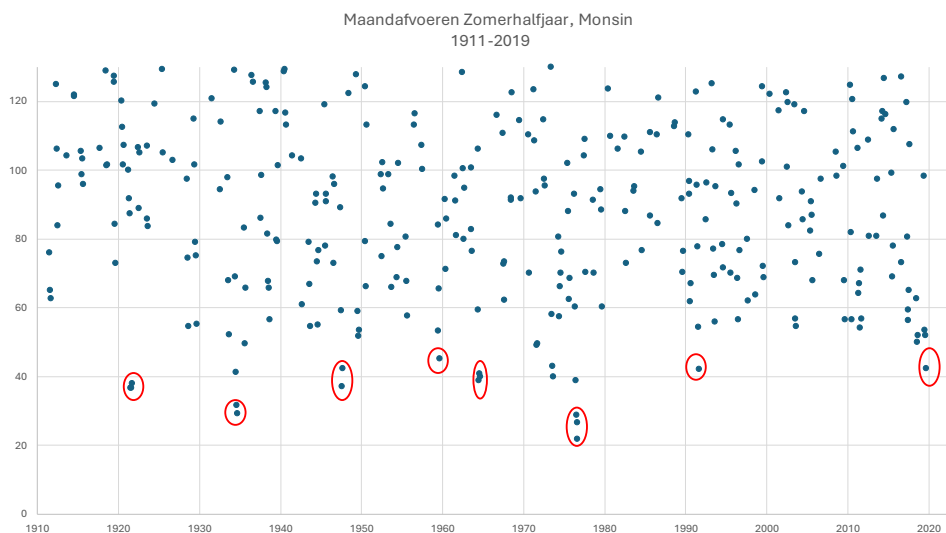
Figuur 6.16 30-daagse zomerafvoer Lobith vs. herhalingstijd voor KNMI'23, 2150Hd, 240 jaar, methode script

Bijlage B: Monsin figuren

Historische Monsin afvoeren zomermaanden 1911-2019 (NB BP2018=historische afvoeren 1911-2011)

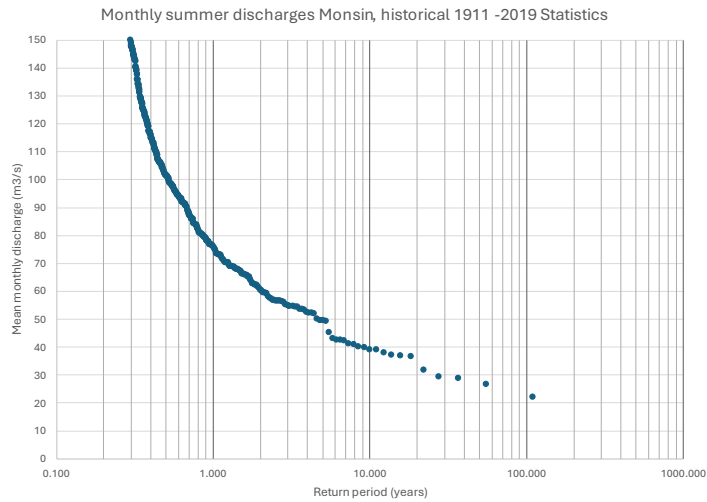


Historische Monsin afvoeren zomermaanden 1911-2019 (NB BP2018=historische afvoeren 1911-2011)



Figuur 6.17 *Historische Monsin maandafvoeren zomermaanden 1911-2019. De laagste maandafvoeren zijn met rode ellipsen om de datapunten aangegeven. Behalve de jaren genoemd bij figuur A1 voor Lobith, springen ook 1934 en 2019 er uit. Merk op dat in de eerste jaren van de reeks diverse stuwen op de Maas, als ook het Julianakanaal en Albertkanaal nog niet operationeel waren.*

Historische Monsin afvoeren



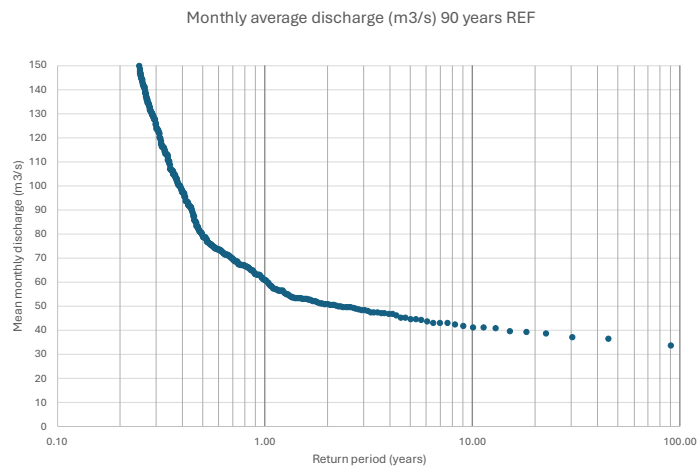
Maandafvoer (m3/s)	Herhalingstijd (jaar)
22	110.0
27	55.0
29	36.7
29	27.5
32	22.0
37	18.3
37	15.7
37	13.8
38	12.2
39	11.0

Dus 35 m3/s bij Monsin is ongeveer een 1:20 jaar maandafvoer op basis van de historische data.

Dat komt overeen met een (praktijk) afvoer van 24 m3/s bij St Pieter.

Figuur 6.18 Zomermaandafvoer Monsin versus herhalingstijd voor de historische Monsin maandafvoeren zomermaanden 1911-2019

BP2024 Monsin afvoeren 90 jaar REF (s1,s2,s7)



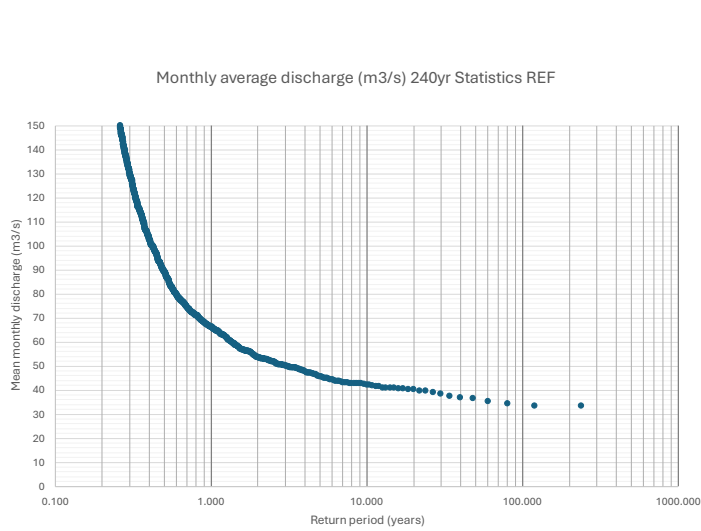
Maandafvoer (m3/s)	Herhalingstijd (jaar)
33	91.0
36	45.5
37	30.3
38	22.8
39	18.2
39.4	15.2
40.5	13.0
40.7	11.4
41.0	10.1
41.6	9.1

Op basis van de 90 jaar BP2024 REF heeft een maandafvoer van 35 m3/s een herhalingstijd van orde 50 jaar. Dus minder frequent (hogere herhalingstijd) dan volgens de historische data 1911-2019

Bij T=20 hoort een Monsin afvoer van 38 m3/s (25 m3/s bij St Pieter)

Figuur 6.19 Zomermaandafvoer Monsin versus herhalingstijd voor de KNMI'23 Referentie scenario, 90 jaar

BP2024 Monsin afvoeren 240 jaar REF (s1 tm s8)



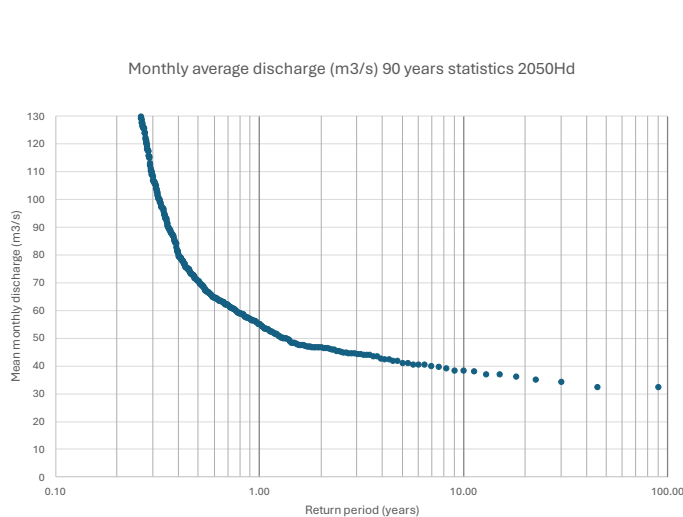
Maandafvoer (m3/s)	Herhalingstijd (jaar)
33	241
33	120.5
34	80.3
35	60.3
36	48.2
37	40.2
38	34.4
38	30.1
39	26.8
39	24.1
40	21.9
40	20.1
40	18.5
40	17.2
41	16.1
41	15.0

Op basis van de 240 jaar BP2024 REF heeft een maandafvoer van 35 m3/s een herhalingstijd van 60 jaar, dat is minder frequent dan in de historische data 1911-2019 (T=20 jaar) en minder frequent dan in de selectie van 90 jaar (dan Q=38 is de herhalingstijd T=50 jaar)

De 240 jaar data geven voor T=20 jaar een maandafvoer van 40 m3/s bij Monsin (26 m3/s bij St Pieter).

Figuur 6.20 Zomermaandafvoer Monsin versus herhalingstijd voor de KNMI'23 Referentie scenario, 240 jaar

BP2024 Monsin afvoeren 90 jaar 2050Hd (s3, s4,s8)



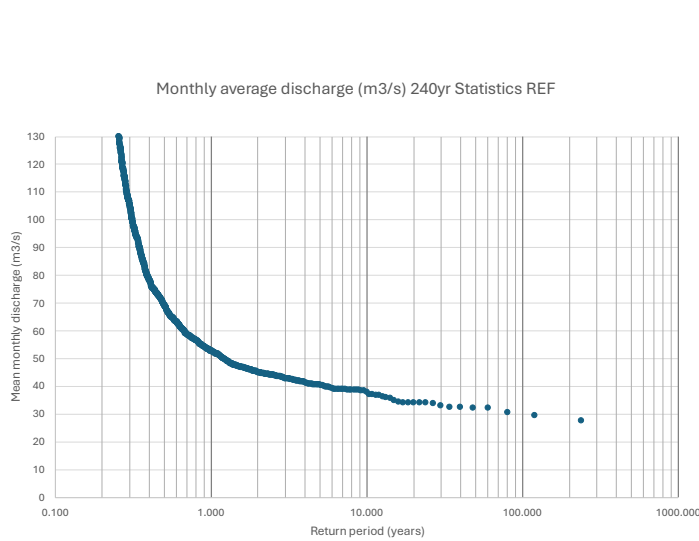
Maandafvoer (m3/s)	Herhalingstijd (jaar)
32.2	91.0
32.3	45.5
34.2	30.3
35.0	22.8
36.2	18.2
36.8	15.2
37.0	13.0
37.9	11.4
38.2	10.1
38.3	9.1

Op basis van de 90 jaar BP2024 2050Hd heeft een maandafvoer bij Monsin van 32 m3/s (St Pieter: 22 m3/s) een herhalingstijd van orde 90 jaar.

Bij T=20 hoort een maandafvoer Monsin (90 jaar 2050Hd statistiek) van orde 35 m3/s (St Pieter: 23.6 m3/s)

Figuur 6.21 Zomermaandafvoer Monsin versus herhalingstijd voor de KNMI'23 2050Hd scenario, 90 jaar

BP2024 Monsin afvoeren 240 jaar 2050Hd (s1 tm s8)



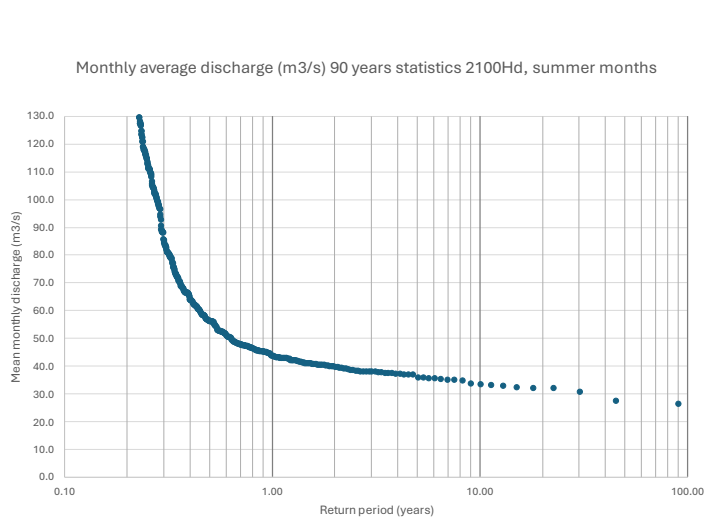
Maandafvoer (m3/s)	Herhalingstijd (jaar)
27.5	241
29.5	120.5
30.5	80.3
32.1	60.3
32.2	48.2
32.3	40.2
32.4	34.4
32.9	30.1
33.7	26.8
33.9	24.1
34.0	21.9
34.0	20.1
34.0	18.5
34.1	17.2
34.2	16.1
35/0	15.0

Op basis van de 240 jaar BP2024 2050Hd heeft een Monsin maandafvoer van 34 m3/s een herhalingstijd van 20 jaar (St. Pieter: 23 m3/s)

In de analyse van vorig jaar van Mens c.s. was voor een T=20 maandafvoer 2050Hd een afvoer Q=10 m3/s bij St Pieter geschat.

Figuur 6.22 Zomermaandafvoer Monsin versus herhalingstijd voor de KNMI'23 2050Hd scenario, 240 jaar

BP2024 Monsin afvoeren 90 jaar 2100Hd (s1, s7,s8)



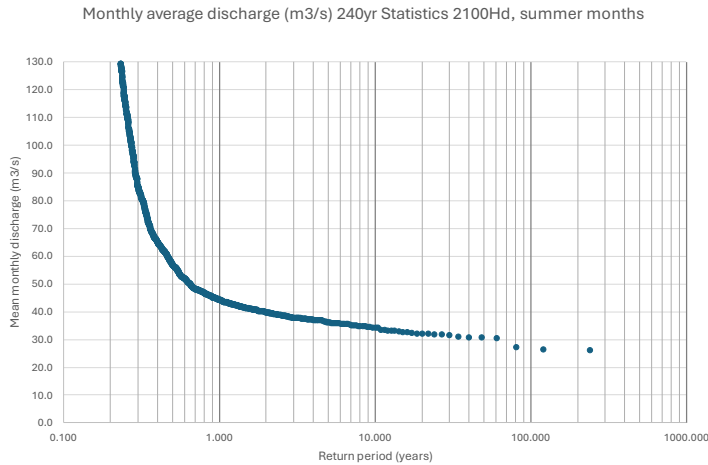
Maandafvoer (m3/s)	Herhalingstijd (jaar)
26.3	91.0
27.3	45.5
30.7	30.3
32.0	22.8
32.0	18.2
32.1	15.2
32.6	13.0
33.1	11.4
33.3	10.1
33.5	9.1

Op basis van de 90 jaar BP2024 2100Hd heeft een maandafvoer van 32 m3/s bij Monsin een herhalingstijd van orde 20 jaar. Bij St Pieter komt dat overeen met 22 m3/s.

Figuur 6.23 Zomermaandafvoer Monsin versus herhalingstijd voor de KNMI'23 2100Hd scenario, 90 jaar

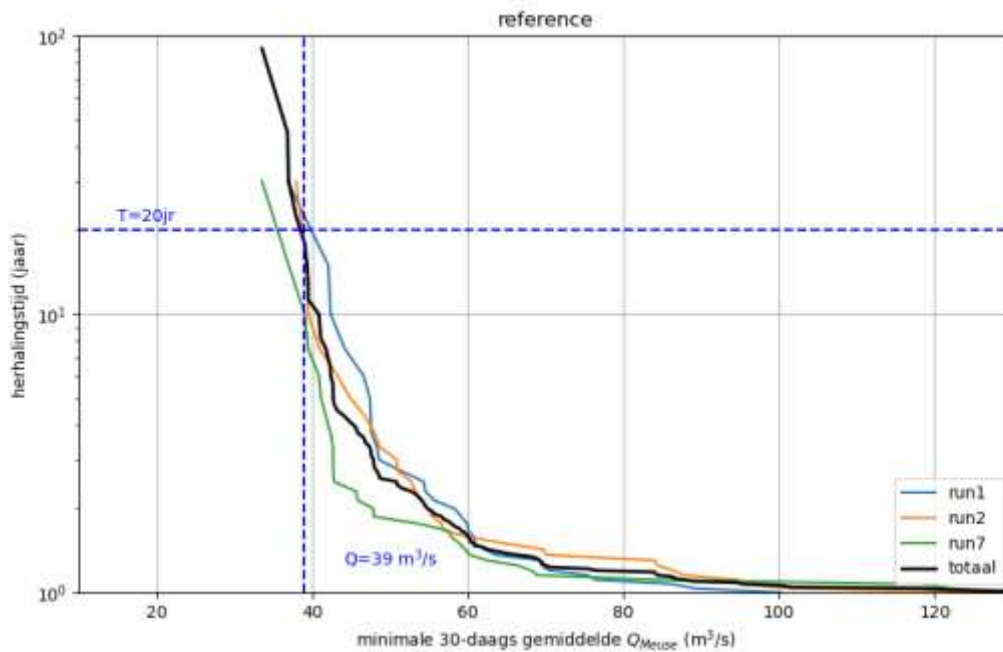
BP2024 Monsin afvoeren 240 jaar 2100Hd (s1 tm s8)

Maandafvoer (m ³ /s)	Herhalingstijd (jaar)
26.0	241
26.3	120.5
27.3	80.3
30.5	60.3
30.7	48.2
30.8	40.2
31.1	34.4
31.6	30.1
31.7	26.8
31.7	24.1
32.0	21.9
32.0	20.1
32.1	18.5
32.3	17.2
32.5	16.1
32.6	15.0

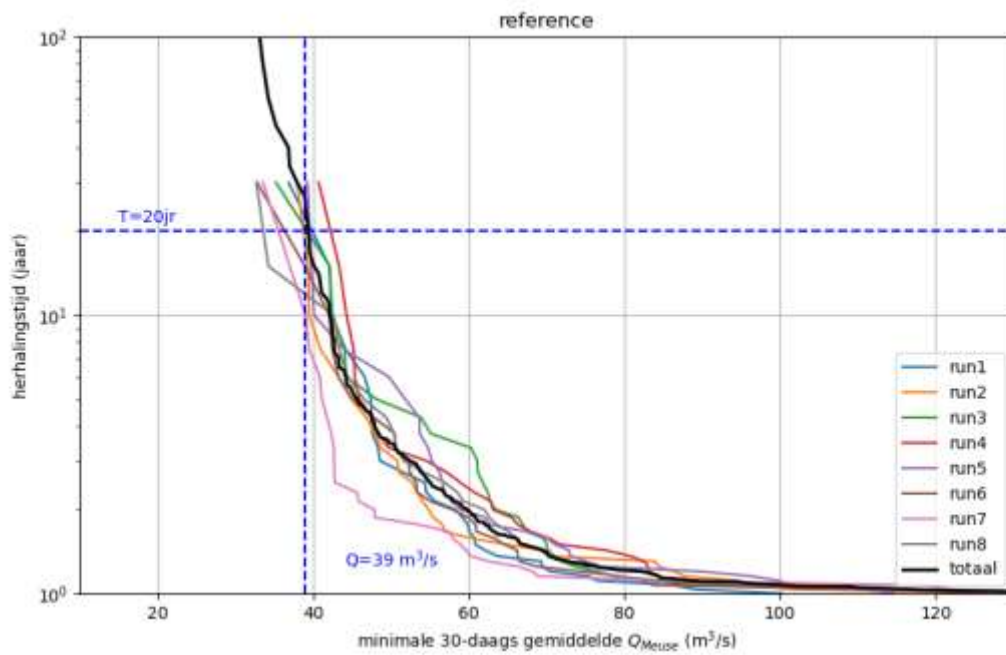


Op basis van de 240 jaar BP2024 2100Hd heeft een maandafvoer van 32 m³/s bij Monsin een herhalingstijd van 20 jaar. (St. Pieter: 22 m³/s)

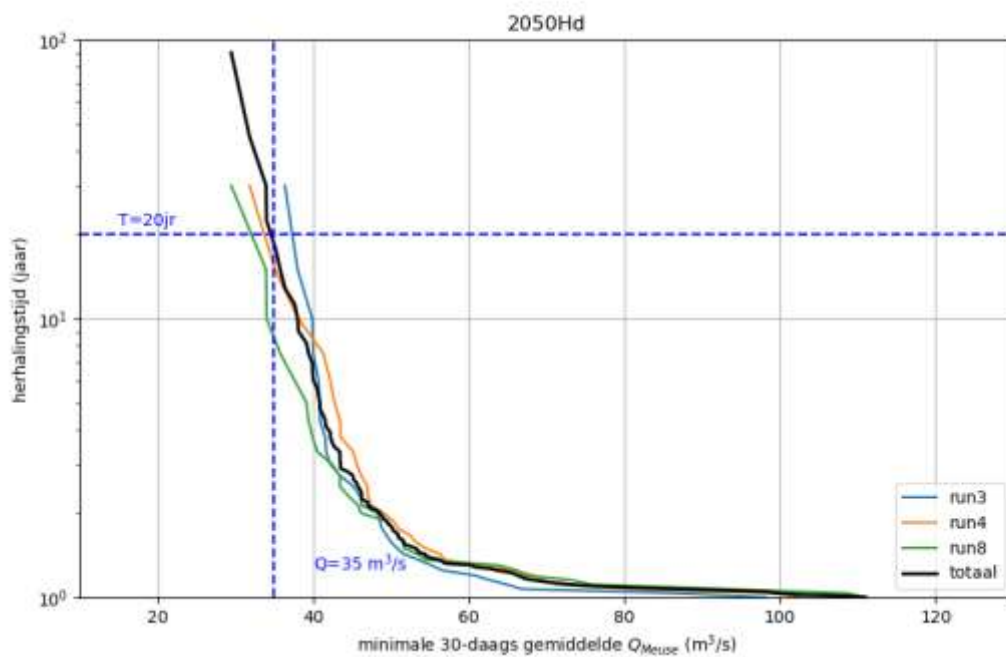
Figuur 6.24 Zomermaandafvoer Monsin versus herhalingstijd voor de KNMI'23 2100Hd scenario, 240 jaar



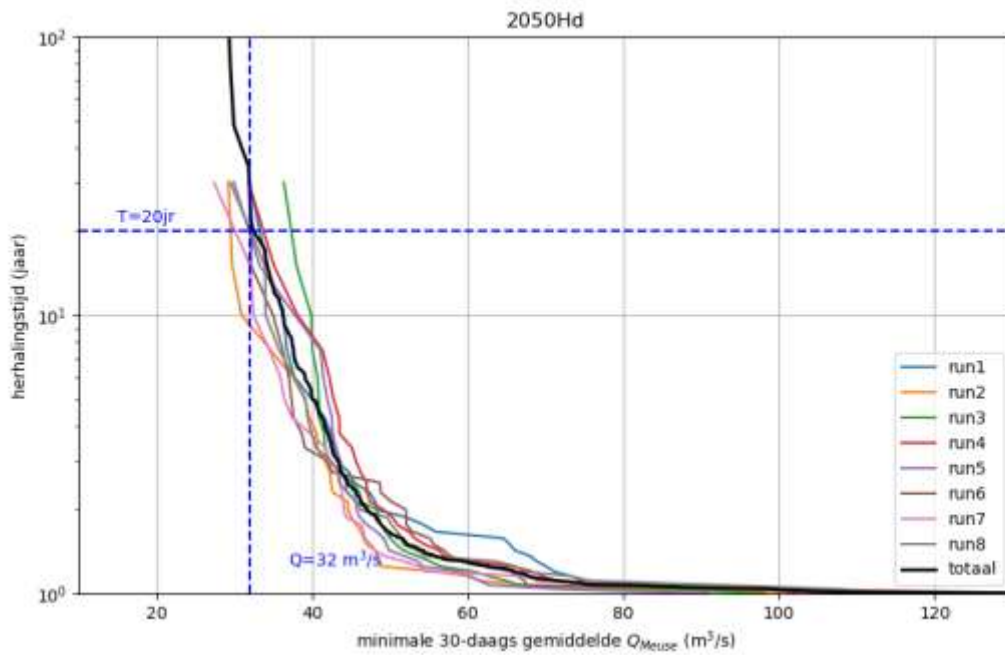
Figuur 6.25 30-daagse zomerafvoer Monsin vs. herhalingstijd voor KNMI'23, Referentie, 90 jaar, methode script



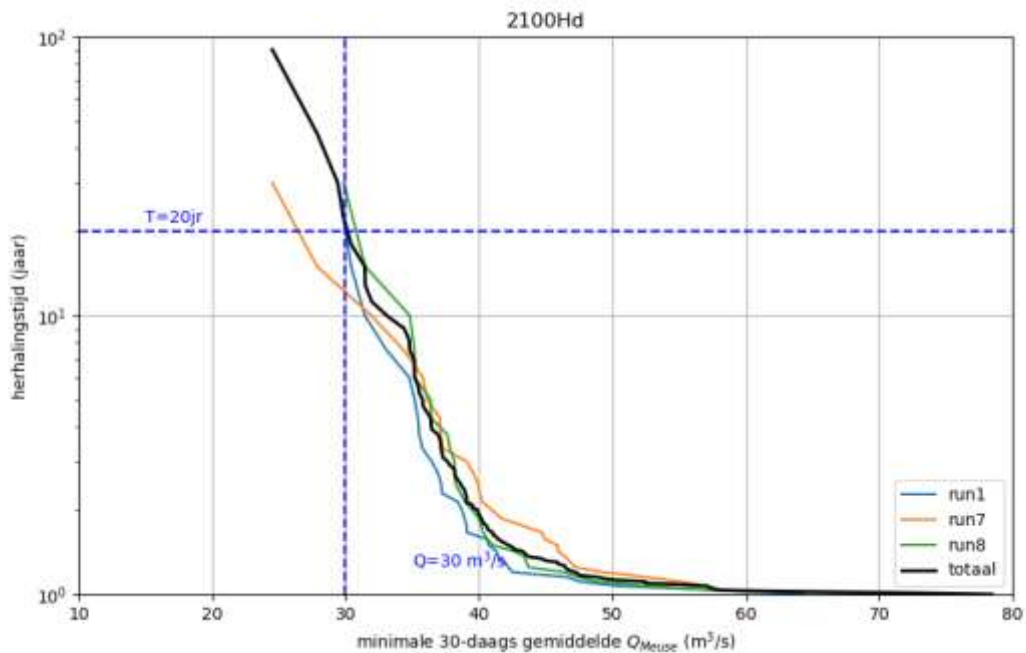
Figuur 6.26 30-daagse zomerafvoer Monsin vs. herhalingstijd voor KNMI'23, Referentie, 240 jaar, methode script



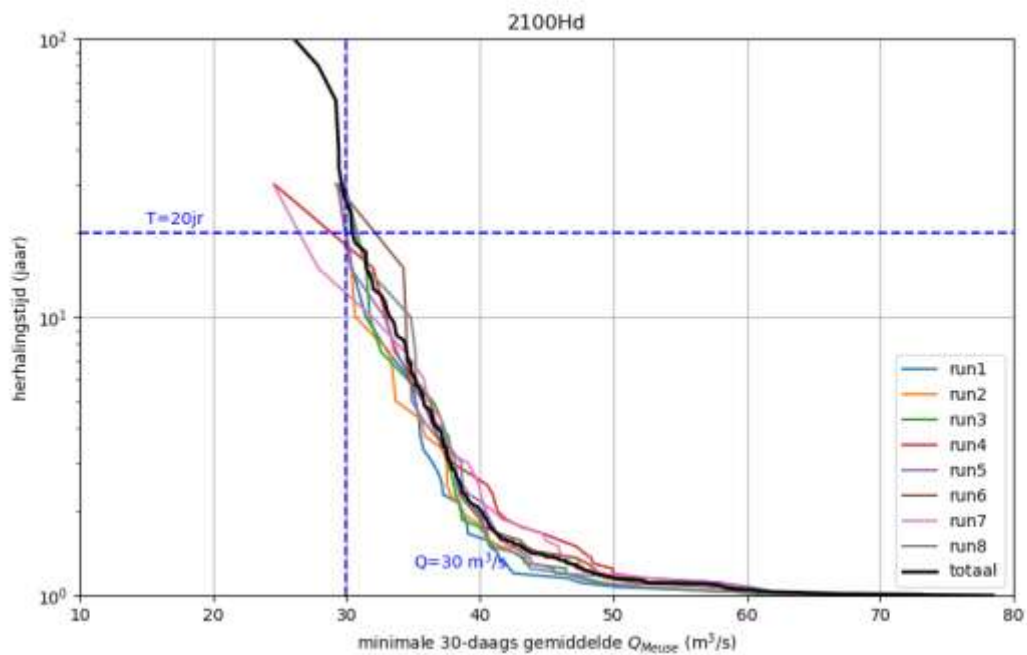
Figuur 6.27 30-daagse zomerafvoer Monsin vs. herhalingstijd voor KNMI'23, 2050Hd, 90 jaar, methode script



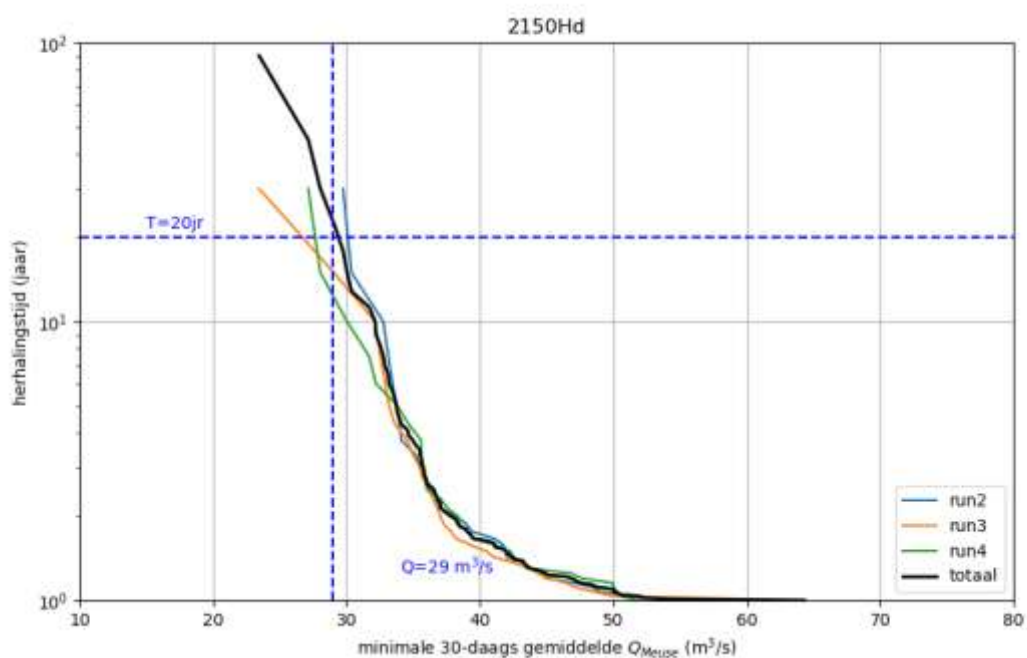
Figuur 6.28 30-daagse zomerafvoer Monsin vs. herhalingstijd voor KNMI'23, 2050Hd, 240 jaar, methode script



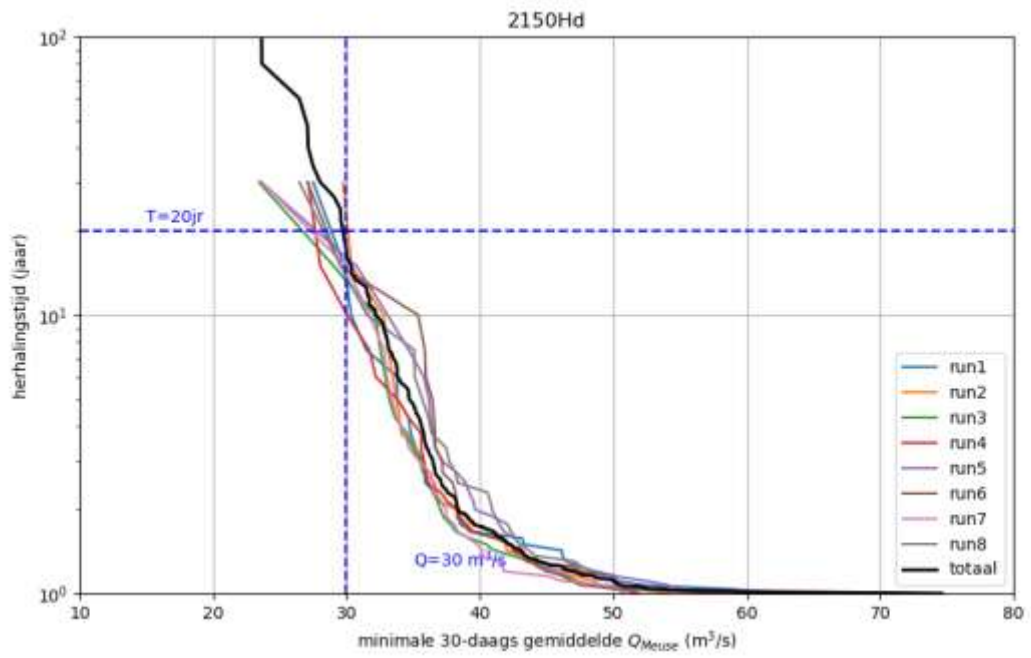
Figuur 6.29 30-daagse zomerafvoer Monsin vs. herhalingstijd voor KNMI'23, 2100Hd, 90 jaar, methode script



Figuur 6.30 30-daagse zomerafvoer Monsin vs. herhalingsstijd voor KNMI'23, 2100Hd, 240 jaar, methode script



Figuur 6.31 30-daagse zomerafvoer Monsin vs. herhalingsstijd voor KNMI'23, 2150Hd, 90 jaar, methode script



Figuur 6.32 30-daagse zomerafvoer Monsin vs. herhalingsstijd voor KNMI'23, 2150Hd, 240 jaar, methode script

Bijlage C Sankey diagrammen

De sankey diagrammen van alle scenario's van de waterbalans van het HWS zijn opgenomen in een interactief html-bestand, welke als aparte bijlage in het zip-bestand is bijgeleverd aan dit document. Als het html-bestand in dezelfde map is geplaatst/uitgepakt als het pdf-document, kan deze met onderstaande link geopend worden.

[Synthese bevindingen KP ZSS Zoetwater BijlageC Sankey diagrammen.html](#)

