

Zoetwaterbeschikbaarheid in de Rijn-Maasmonding in een warmer klimaat

Integrale verkenning van bouwstenen om zoutindringing te beperken



Zoetwaterbeschikbaarheid in de Rijn-Maasmonding in een warmer klimaat

Integrale verkenning van bouwstenen om zoutindringing te beperken

Auteur(s)

Vincent Vuik
Ymkje Huisman
Marjolein Mens
Anna van den Hoek
Ruurd Noordhuis
Otto Weiler
Remi van der Wijk
Ferdinand Diermanse

Zoetwaterbeschikbaarheid in de Rijn-Maasmonding in een warmer klimaat

Integrale verkenning van bouwstenen om zoutindringing te beperken

Opdrachtgever	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Contactpersoon	Marcela Laguzzi
Referenties	-
Trefwoorden	Zoetwaterbeschikbaarheid, Rijn-Maasmonding, Zeespiegelstijging, Deltaprogramma Zoetwater

Documentgegevens

Versie	1.1
Datum	17-01-2025
Projectnummer	11210362-013
Document ID	11210362-013-ZWS-0003
Pagina's	91
Classificatie	
Status	definitief

Auteurs

Vincent Vuik Ymkje Huismans Marjolein Mens Anna van den Hoek Ruurd Noordhuis Otto Weiler Remi van der Wijk Ferdinand Diermanse	
---	--

Gebruik van deze tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
0.1	Vincent Vuik	Meinard Tiessen	Judith Blaauw
1.0	Vincent Vuik	Meinard Tiessen	Judith Blaauw

Samenvatting

Aanleiding en doel

Om de Rijn-Maasmonding (RMM) voor te bereiden op zeespiegelstijging en andere gevolgen van klimaatverandering zal op termijn een strategie moeten worden gekozen: blijft de Rijn-Maasmonding afsluitbaar-open, wordt toegewerkt naar een gesloten zeefront, of wordt de oplossing zeewaarts gezocht? In het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) zijn in de afgelopen jaren verschillende oplossingsrichtingen verkend en uitgewerkt op het gebied van waterveiligheid, ruimtebeslag en kosten, maar in beperkte mate voor zoetwaterbeschikbaarheid.

Voor zoetwaterbeschikbaarheid treden al op kortere termijn knelpunten op, waardoor mogelijk eerder maatregelen genomen moeten worden. Recente droge zomers, zoals 2018 en 2022, lieten zien dat het nu al moeilijk is om het zout in de Rijn-Maasmonding voldoende buiten de deur te houden. Recente studies geven aan dat de zoetwatervoorziening ook in dit deel van het land steeds meer onder druk komt te staan, wanneer klimaatverandering leidt tot lagere lage afvoeren, grotere watervraag en een stijgende zeespiegel.

Het hoofddoel van deze studie is het uitwerken en semi-kwantitatief beoordelen van diverse bouwstenen voor het beperken van zoutindringing in de Rijn-Maasmonding binnen de huidige systeemconfiguratie (afsluitbaar-open) en voor alternatieve lange-termijn strategieën zoals uitgewerkt binnen de oplossingsrichting *Beschermen* van het KP ZSS.

Aanpak

Per bouwsteen is op basis van bestaande kennis het effect op de zoetwatervoorziening zoveel mogelijk gekwantificeerd middels het opstellen van een zoetwaterbalans. Voor het opstellen van de waterbalans is specifiek gekeken naar een situatie van lage rivier-afvoer: **een 14-daags gemiddelde waarde binnen het groeiseizoen (1 april tot 1 oktober) met een herhalingstijd van 20 jaar.**

Daarnaast zijn op kwalitatieve wijze de effecten voor scheepvaart en waterkwaliteit en ecologie in beeld gebracht. Bij scheepvaart is onderscheid gemaakt tussen gevolgen voor binnenvaart en zeevaart. Bij ecologie is gekeken naar sleutelfactoren connectiviteit en diversiteit/dynamiek. De effecten van de bouwstenen zijn ingeschat ten opzichte van het nulalternatief, zijnde een T=20 afvoersituatie volgens het KNMI'23 scenario Hd in zichtjaar 2100 bij voortzetting van huidig beleid (dus geen aanvullende maatregelen). Daarnaast is een eerste grove inschatting gedaan van de investeringskosten, en is een kwalitatieve score gegeven op waterveiligheid en ruimtebeslag.

Conclusies

- Binnen de huidige strategie en in een warmer klimaat volgens KNMI'23 scenario Hd2100, zijn er nog diverse bouwstenen mogelijk om zoutindringing te beperken met beperkte negatieve effecten op scheepvaart en ecologie/waterkwaliteit. Het vergroten van het surplusdebiet lijkt het meest effectief voor Hollandsche IJssel en Lek, maar dit is geen oplossing voor Spui/Bernisse. Andersom is het incidenteel afsluiten van de Oude Maas een effectieve oplossing om het Spui zoet te houden. Dit heeft ook een verzoetend effect voor de Nieuwe Maas, maar het is naar verwachting niet voldoende voor het zoethouden van HIJ/Lek bij scenario Hd2100. Een combinatie van deze twee bouwstenen lijkt daarom kansrijk, maar is nog niet onderzocht.
- Binnen de huidige strategie is het grootschalig verondiepen van de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas of de hele Rijn-Maasmonding effectief voor beperking van zoutindringing

en heeft dit geen grote negatieve effecten voor de ecologie. Echter, het effect op zeevaart is significant. Deze maatregel is effectief om de invloed van zeespiegelstijging op zoutindringing tegen te gaan, maar niet onbeperkt houdbaar bij verder afnemende rivierafvoeren. Bovendien is de beheerinspanning vermoedelijk groot, omdat het ondiepere systeem morfologisch niet in evenwicht is.

- Indien gekozen wordt voor het volledig afsluiten van de Rijn-Maasmonding met sluizen en dammen, kan de zoetwatervoorziening alleen gegarandeerd worden bij volledige afsluiting met alleen dammen. Als gekozen wordt voor schutsluizen in de dammen, blijft het beperken van zoutindringing een groot aandachtspunt. Bij het blijven faciliteren van zeevaart is het door de grote zoutlast via de zeesluizen niet mogelijk om de Hollandsche IJssel, Lek en Spui zoet te houden. Door het wegvallen van de getijdynamiek dreigt sterke zoutindringing in een gelaagd systeem. Er is dan te veel doorspoeling van de Rijn-Maasmonding nodig om te compenseren voor de grote zoutindringing via de zeesluizen. Als gekozen wordt voor binnenvaartsluizen is het afhankelijk van het aantal schuttingen en de effectiviteit van gekozen zoutindringing-beperkende maatregelen bij de sluizen of er voldoende water is om zoutindringing voldoende tegen te gaan. Ook zal de overslag van zeevaart naar binnenvaart anders georganiseerd moeten worden. Hoe dan ook vraagt deze strategie een strategische keuze over de inrichting van de hele transportsector in dit deel van het land.
- Klimaatverandering heeft gevolgen voor waterkwaliteit en ecologie in de Rijn-Maasmonding. In de huidige studie zijn de aanvullende effecten van verschillende bouwstenen in beeld gebracht. Belangrijke aandachtspunten hierbij zijn het ontstaan van fysieke barrières bij dammen en sluizen in het geval van een gesloten zeefront of deltapolder. Ook kan het wegvallen van getijdestroming in een afgesloten Rijn-Maasmonding leiden tot minder dynamiek, hogere watertemperaturen, hogere nutriëntconcentraties, algenbloei en het verdwijnen van zoetwatergetijdennatuur. Daar tegenover staat in de strategie met een afsluitbaar open Zuidrand de ontwikkeling van een meer natuurlijk estuarium in het Haringvliet of de Grevelingen, wat kansen oplevert voor vismigratie, een natuurlijke zoet/zout-gradiënt en grotere arealen intergetijdengebied.

Strategie	Bouwsteen	Investeringkosten (miljard euro)	Effect in scenario Hd2100 ten opzichte van het nulalternatief										Waterveiligheid**
			zoetwater	waterveiligheid	zoetwater					scheepvaart			ecologie & waterkwaliteit
					Hollandsche IJssel / Lek	Spui	Volkerak-Zoommeer	binnenvaart	zeevaart				
					sterke verbetering tov nulalternatief	lichte verbetering tov nulalternatief	geen significant effect	lichte verslechtering tov nulalternatief	sterke verslechtering tov nulalternatief				
B1	Vergroten surplusdebieten Hollandsche IJssel (~5m³/s) en Lek (~40 m³/s)	<1			●	●	●	●	●				
B1	Verondiepen Nieuwe Waterweg/Nieuwe Maas (4-7 m)	1 - 2,5			●	●	●	●	●				
B1	Verondiepen Rijn-Maasmonding (2-3 m)	2,5 - 5			●	●	●	●	●				
B1	Incidenteel afsluiten Hollandsche IJssel en Lek	<1			●	●	●	●	●				
B1	Incidenteel afsluiten Oude Maas	1 - 2,5			●	●	●	●	●				
A1/A2	Afsluiten Nieuwe en Oude Maas met zeesluizen	2,5 - 5*			●	●	●	●	●				
A1/A2	Afsluiten Nieuwe en Oude Maas met binnenvaartsluizen	1 - 2,5*			●	●	●	●	●				
A1/A2	Afsluiten Nieuwe en Oude Maas met overslagdammen	<1*			●	●	●	●	●				
B2	Afsluitbaar open Haringvliet, in combinatie met diverse sluizen of dammen	5 - 10*			●	●	●	●	●				
B2	Afsluitbaar open Grevelingen, in combinatie met diverse sluizen of dammen	5 - 10*			●	●	●	●	●				

*betreft alleen de aanlegkosten van dammen, sluizen en keringen; exclusief kosten voor pompen en spuismiddelen; exclusief vermeden kosten voor dijkversterking

** In alle varianten zullen aanvullende maatregelen uitgevoerd worden om aan de waterveiligheidsnorm te blijven voldoen. Het netto effect op waterveiligheid is dan 0. De huidige score betreft de extra opgave die de bouwsteen tot gevolg heeft om voor waterveiligheid aan de norm te voldoen. Het nulalternatief gaat uit van dijkversterkingen; bij overstap naar B2 of A1 zijn er veel minder dijkversterkingen nodig.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Aanleiding	9
1.2	Doelstelling	10
1.3	Uitgangspunten	10
1.4	Leeswijzer	11
2	Werkwijze	12
2.1	Bouwstenen en inrichtingsvarianten	12
2.2	Statistiek van lage afvoeren	14
2.3	Waterbalans in huidig klimaat en in een warmer klimaat	14
3	Huidige inrichting van de Rijn-Maasmonding	19
3.1	Vergroten surplusdebieten	19
3.1.1	Zoetwaterbalans	20
3.1.2	Scheepvaart	21
3.1.3	Waterkwaliteit en ecologie	21
3.1.4	Waterveiligheid	22
3.1.5	Ruimtebeslag	22
3.1.6	Kosten	22
3.2	Verondiepen van riviertakken	22
3.2.1	Zoetwaterbalans	23
3.2.2	Scheepvaart	24
3.2.3	Waterkwaliteit en ecologie	25
3.2.4	Waterveiligheid	25
3.2.5	Ruimtebeslag	25
3.2.6	Kosten	25
3.3	Incidenteel afsluiten Hollandsche IJssel en Lek	26
3.3.1	Zoetwaterbalans	27
3.3.2	Scheepvaart	28
3.3.3	Waterkwaliteit en ecologie	28
3.3.4	Waterveiligheid	28
3.3.5	Ruimtebeslag	28
3.3.6	Kosten	28
3.4	Incidenteel afsluiten Oude Maas	29
3.4.1	Zoetwaterbalans	30
3.4.2	Scheepvaart	31
3.4.3	Waterkwaliteit en ecologie	31
3.4.4	Waterveiligheid	32
3.4.5	Ruimtebeslag	32
3.4.6	Kosten	32
3.5	Aanvullende (kleine) bouwstenen	32

3.5.1	Incidenteel afsluiten Spui	33
3.5.2	Onderwaterdrempel	33
3.5.3	Aanpassingen aan de Lek	33
3.5.4	Verdiepen van de Noord	34
4	Alternatieve strategieën Rijn-Maasmonding	35
4.1	Alternatieve strategieën	35
4.2	Strategie A1 en A2: Gesloten zeefront met of zonder schutsluizen	35
4.2.1	Beschrijving inrichtingsvariant	35
4.2.2	Zoetwaterbalans	39
4.2.3	Scheepvaart	43
4.2.4	Waterkwaliteit en ecologie	44
4.2.5	Waterveiligheid	47
4.2.6	Ruimtebeslag	48
4.2.7	Kosten	48
4.3	Strategie B2: Binnenpolder i.c.m. open Haringvliet	49
4.3.1	Beschrijving inrichtingsvariant	49
4.3.2	Zoetwaterbalans	50
4.3.3	Scheepvaart	52
4.3.4	Waterkwaliteit en ecologie	52
4.3.5	Waterveiligheid	53
4.3.6	Ruimtebeslag	54
4.3.7	Kosten	54
4.4	Strategie B2: Binnenpolder i.c.m. open Grevelingen	55
4.4.1	Beschrijving inrichtingsvariant	55
4.4.2	Zoetwaterbalans	56
4.4.3	Scheepvaart	57
4.4.4	Waterkwaliteit en ecologie	57
4.4.5	Waterveiligheid	58
4.4.6	Ruimtebeslag	58
4.4.7	Kosten	58
5	Onderlinge vergelijking van bouwstenen	60
5.1	Vergelijking bouwstenen	60
5.2	Onzekerheden	62
6	Conclusies en aanbevelingen	64
6.1	Conclusies	64
6.2	Aanbevelingen	65
	Referenties	66
A	Statistiek van lage afvoeren	69
B	Extra toelichting op de waterbalansen	71
B.1	Benodigde afvoer Nieuwe Waterweg	71
B.2	Afvoer van Lobith richting de Rijn-Maasmonding	71
B.3	Surplusdebieten Hollandsche IJssel en Lek	72

C	Extra toelichting op ingeschatte zoutindringing	74
C.1	Zoutindringing bij verondieping	74
C.2	Zoutindringing bij wijziging van de afvoerverdeling	75
C.3	Zoutindringing in afgesloten systemen: voorbeelden KGT en NZK	77
C.4	Zoutindringing via schutsluizen	79
C.5	Zoutindringing in open estuaria	84

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In de Rijn-Maasmonding wordt op diverse locaties zoetwater ingenomen voor drinkwater, industrie en landbouw, natuur, peilbeheer en doorspoeling. Daarnaast heeft de ruimtelijke en temporele dynamiek van zoet en zout water geleid tot een gevarieerd palet aan zoet- en zoutwatergetijdenatuur. Figuur 1-1 geeft een overzicht van het beschouwde systeem: de waterlopen, belangrijkste kunstwerken, indicatie van innamepunten voor zoetwatervoorziening, scheepvaartverbindingen, havens en Natura2000-gebieden in de Rijn-Maasmonding.



Figuur 1-1 Overzichtskaart met waterlopen, belangrijkste kunstwerken, indicatie van innamepunten voor zoetwatervoorziening, scheepvaartverbindingen, havens en Natura2000-gebieden in de Rijn-Maasmonding.

Om de Rijn-Maasmonding (RMM) voor te bereiden op zeespiegelstijging en andere gevolgen van klimaatverandering zal op termijn een strategie moeten worden gekozen: blijft de Rijn-Maasmonding afsluitbaar-open, wordt toegewerkt naar een gesloten zeefront, of wordt de oplossing zeewaarts gezocht? In het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) zijn verschillende oplossingsrichtingen verkend en (in variërende mate van detail) uitgewerkt op het gebied van waterveiligheid, ruimtebeslag en kosten en in beperkte mate voor zoetwaterbeschikbaarheid. Ook het afsluiten van de Nieuwe Waterweg wordt in deze context regelmatig benoemd. Uit het onderzoek in het KP ZSS is gebleken dat er vanuit waterveiligheid geen noodzaak is om deze keuze al op korte termijn te maken; de waterveiligheid is binnen de huidige voorkeursstrategie nog lange tijd houdbaar en oprekbaar (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2023). Voor zoetwaterbeschikbaarheid treden al op kortere termijn knelpunten op, waardoor mogelijk eerder maatregelen genomen moeten worden. De praktijk heeft laten zien dat het in recente droge zomers zoals 2018 en 2022 moeilijk is om het zout voldoende buiten de deur te houden. Met huidige beheermaatregelen en goede voorspel- en monitoringssystemen was het net te doen. Maar wanneer klimaatverandering leidt tot lagere lage afvoeren, grotere watervraag en een stijgende zeespiegel, komt de zoetwatervoorziening ook in dit deel van het land steeds meer onder druk te staan (Deltares, 2024e; Van der Brugge & De Winter, 2024).

In Spoor IV van het KP ZSS zijn de verschillende beschouwde lange-termijn oplossingsrichtingen (beschermen, meebewegen, zeewaarts) en strategieën (strategische keuzes binnen een oplossingsrichting) slechts beperkt onderzocht op het gebied van zoetwaterbeschikbaarheid. Ook geeft DGWB aan dat er onder bestuurders in beperkte mate een gedeeld beeld bestaat van de effectiviteit van individuele maatregelen zoals verondiepen van de Nieuwe Waterweg, afsluiten van de Nieuwe Waterweg met behulp van dammen en schutsluizen, verhogen van surplusdebieten op de Hollandsche IJssel, enzovoorts. Deels komt dit doordat zoutindringing een complex driedimensionaal proces is, deels doordat mogelijke maatregelen nog maar beperkt zijn doordacht en onderzocht. Bovendien staan recente inzichten nog niet overzichtelijk bij elkaar.

1.2 Doelstelling

Het hoofddoel van deze studie is het uitwerken en semi-kwantitatief beoordelen van diverse bouwstenen voor het beperken van zoutindringing in de Rijn-Maasmonding binnen de huidige systeemconfiguratie (afsluitbaar-open). Het neven doel is het koppelen van deze bouwstenen voor de Rijn-Maasmonding aan de lange-termijn strategieën zoals uitgewerkt binnen de oplossingsrichting Beschermen van het KP ZSS (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2024a).

1.3 Uitgangspunten

Voor deze studie gelden de volgende uitgangspunten:

- 1 Het gaat om een semi-kwantitatieve studie op basis van reeds beschikbare informatie. Er zijn dus geen nieuwe berekeningen met numerieke modellen uitgevoerd. Wel is een grove waterbalans gemaakt, met beschikbare gegevens uit bestaande studies, waar nodig aangevuld met expertschattingen.
- 2 Voor de aansluiting met het KP ZSS zijn (combinaties van) bouwstenen gekoppeld aan de strategieën zoals ontwikkeld binnen de oplossingsrichting Beschermen, namelijk afsluitbaar-open via een open Nieuwe Waterweg (B1, conform de huidige inrichting), afsluitbaar-open via een open Zuidrand (B2, open Haringvliet of Grevelingen) of een gesloten zeefront (A1 en A2), waarbij alle zeemondingen permanent gesloten zijn, al dan niet voorzien van schutsluizen).
- 3 Naast het effect op zoutindringing en zoetwaterbeschikbaarheid is ook een kwalitatieve of semi-kwantitatieve inschatting gemaakt van de kosten, het ruimtebeslag en de effecten op waterveiligheid, scheepvaart, waterkwaliteit en ecologie.
- 4 Voor een goede integrale besluitvorming moeten de hier verkende bouwstenen en regionale inrichtingsvarianten gecombineerd worden met varianten uit andere regio's en andere systeemkeuzes zoals de bovenregionale waterverdeling. Deze combinaties vallen buiten de scope van de huidige studie.
- 5 Binnen deze studie gaan we uit van het KNMI'23 scenario Hd in het zichtjaar 2100. Dit is het klimaatscenario waarbij sprake is van een hoog uitstootscenario (H) in combinatie met een droog scenario ("d"). Dit is het scenario met de grootste opgave voor zoetwaterbeschikbaarheid. Het is belangrijk om op te merken dat de bouwstenen alleen verkend zijn voor dit hoge scenario, dus (nog) geen volledige scenario-analyse. Meer details zijn te vinden in Bijlage A.
- 6 Het KP ZSS ging uit van 2 m (versnelde) zeespiegelstijging in 2100 en 5,4 m ZSS in 2200, terwijl Hd2100 uitgaat van 59–124 cm zeespiegelstijging in 2100.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van beschouwde bouwstenen en hoe deze gecombineerd zijn met strategieën uit KP ZSS. Ook beschrijft dit hoofdstuk de statistische analyse van rivierafvoeren en de waterbalansberekening voor het huidige klimaat en het nulalternatief. In Hoofdstuk 3 komen bouwstenen aan de orde die technisch inpasbaar zijn binnen de huidige strategie (inrichting) van de Rijn-Maasmonding. Hoofdstuk 4 heeft een vergelijkbare inhoud, maar dan voor strategieën zoals ontwikkeld binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (Spoor IV). In Hoofdstuk 5 volgt een overkoepelende vergelijking van de verschillende bouwstenen. Het rapport besluit met conclusies en aanbevelingen in Hoofdstuk 6. Voor de leesbaarheid is de onderbouwing van met name de waterbalansen opgenomen in een aantal bijlagen.

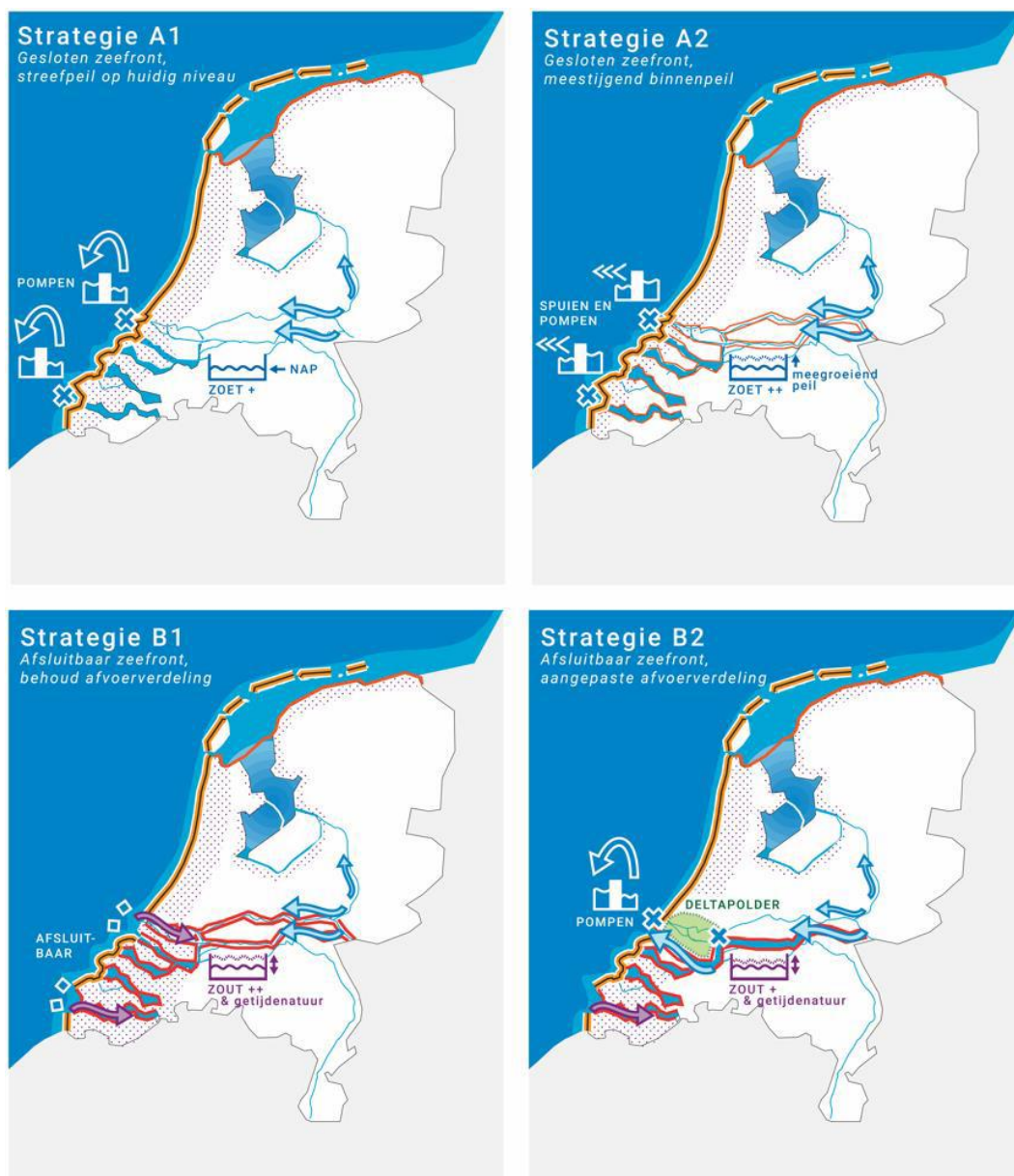
Tabel 1-1 Lijst met gebruikte afkortingen.

Afkorting	Betekenis
ARK	Amsterdam-Rijnkanaal
BRL	Basis Rivier Bodemligging
HIJ	Hollandsche IJssel
IRM	Integraal Riviermanagement
KGT	Kanaal Gent-Terneuzen
KP ZSS	Kennisprogramma Zeespiegelstijging
NWW	Nieuwe Waterweg
NZK	Noordzeekanaal
RMM	Rijn-Maasmonding
RWS	Rijkswaterstaat
SO	Selectieve onttrekking
VZM	Volkerak-Zoommeer
ZD	Zeeuwse Delta
ZSF	Zeesluisformulering
ZSS	Zeespiegelstijging

2 Werkwijze

2.1 Bouwstenen en inrichtingsvarianten

De huidige verkenning bevat bouwstenen voor het vergroten van de zoetwaterbeschikbaarheid. De bouwstenen kunnen worden gecombineerd met de huidige systeeminrichting (een afsluitbaar open Rijn-Maasmonding; B1). Deze combinaties worden besproken in Hoofdstuk 3. Bouwstenen kunnen ook worden gecombineerd met alternatieve strategieën zoals ontwikkeld binnen de oplossingsrichting Beschermen van het KP ZSS (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2024a), zie Figuur 2-1. Deze strategieën (A1, A2 en B2) komen aan de orde in Hoofdstuk 4.



Figuur 2-1 Strategieën uit de Oplossingsrichting Beschermen van het KP ZSS (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2024a).

Wanneer een of meerdere bouwstenen worden gecombineerd met een strategie, spreken we over een inrichtingsvariant. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de beschouwde (combinaties van) bouwstenen bij de vier strategieën. Voor een aantal bouwstenen geldt dat deze alleen logisch zijn in combinatie met andere bouwstenen. In dat geval zijn ze in combinatie geanalyseerd. Zie het kader voor de gehanteerde definities.

Tabel 2-1 Overzicht beschouwde bouwstenen en strategieën.

Strategie	Systeemkeuze	Bouwsteen/bouwstenen
Afsluitbaar open (B1)	Huidige situatie met afsluitbaar open Noordrand (Nieuwe Waterweg)	Vergroten surplusdebieten Hollandsche IJssel en Lek (rivierafvoer bovenstrooms minus onttrekkingen)
		Verondiepen Nieuwe Waterweg/ Nieuwe Maas
		Verondiepen Rijn-Maasmonding
		Incidenteel afsluiten Hollandsche IJssel en Lek
		Incidenteel afsluiten Oude Maas
Deltapolder met afsluitbaar open Zuidrand (B2)	Open Haringvliet	Afsluitbaar open Haringvliet, in combinatie met diverse sluizen of dammen
	Open Grevelingen	Afsluitbaar open Grevelingen, in combinatie met diverse sluizen of dammen
Gesloten zeefront (A1/A2)	Zeesluizen	Afsluiten Nieuwe en Oude Maas met zeesluizen
	Binnenvaartsluizen	Afsluiten Nieuwe en Oude Maas met binnenvaartsluizen
	Volledig gesloten dammen	Afsluiten Nieuwe en Oude Maas zonder schutsluizen

Gehanteerde definities

Systeemkeuze: keuzes die een grote (landelijke) systeemverandering veroorzaken, zoals het wel/niet afsluiten van de zeearmen, het zeewaarts uitbreiden, een aanpassing in de afvoerverdeling bij hoog- en laagwater en een aanpassing van het streefpeil van het IJsselmeer.

Bouwsteen: een mogelijk te overwegen type maatregel, zoals het verondiepen van vaarwegen, implementeren of versterken van waterkeringen, bellenschermen, pompen, sluizen, diverse nature-based solutions, etc.

Strategie: een combinatie van systeemkeuzes, aangevuld met bouwstenen. Binnen de oplossingsrichting ‘beschermen’ van het KP ZSS zijn vier strategieën voorgesteld: A1, A2, B1 en B2 (Figuur 2-1).

Inrichtingsvariant: binnen een strategie kunnen verschillende combinaties van bouwstenen toegepast worden. Specifieke combinaties noemen we een inrichtingsvariant. Voor elk van de vier strategieën van Figuur 2-1 beschrijven en analyseren we meerdere inrichtingsvarianten.

2.2 Statistiek van lage afvoeren

Kentallen voor het KNMI-scenario Hd zijn voor de zichtjaren 2050 en 2100 als volgt, hierin wordt de verandering ten opzichte van de referentieperiode 1991-2020 gegeven (KNMI, 2023):

Hd2050:

- Wereldwijde temperatuurstijging: 1,5°C
- Zeespiegelstijging Nederlandse kust: 19 – 38 cm
- Maximaal neerslagtekort zomerhalfjaar: +35%

Hd2100:

- Wereldwijde temperatuurstijging: 4°C
- Zeespiegelstijging Nederlandse kust: 59-124 cm
- Maximaal neerslagtekort zomerhalfjaar: +79%

Voor het opstellen van de waterbalans is specifiek gekeken naar een situatie van lage rivierafvoer: een 14-daags gemiddelde waarde binnen het groeiseizoen (1 april tot 1 oktober) met een herhalingstijd van 20 jaar. De resulterende getallen zoals gehanteerd in deze studie zijn te vinden in Tabel 2-2. De onderbouwing achter deze getallen is te vinden in Bijlage A.

Tabel 2-2 Overzicht van kentallen voor het opstellen van de waterbalans (14-daagse gemiddelde rivierafvoeren) zoals gehanteerd in deze verkenning.

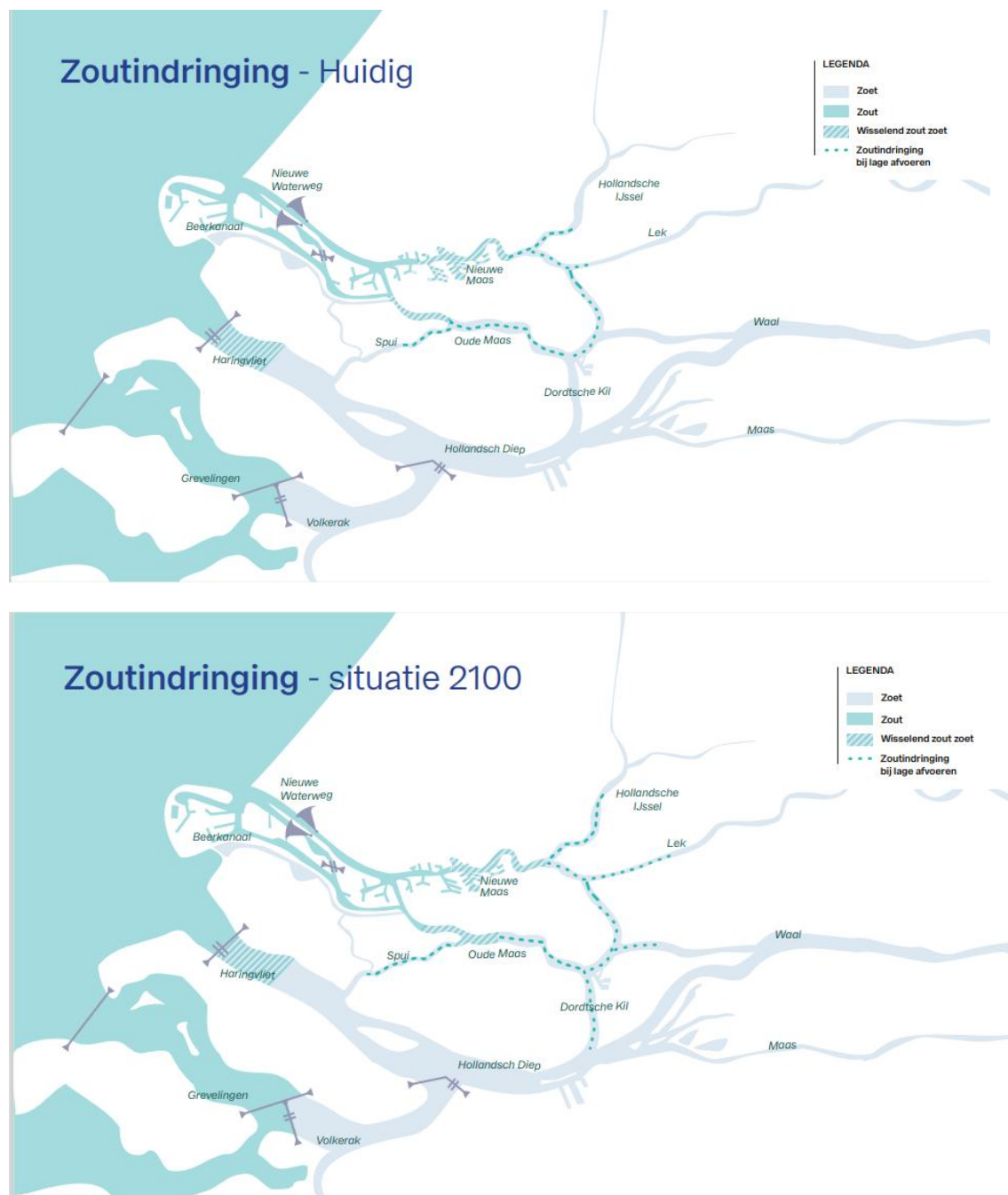
	Huidig	Hd 2050	Hd 2100	Toelichting
14d-gem. lage Rijnafvoer bij Lobith (T=20jr)	834 m³/s	675 m³/s	610 m³/s	Zie Bijlage A
Bijbehorende lage Maasafvoer bij Lith	25 m³/s	25 m³/s	15 m³/s	Zie Bijlage A
Onttrekkingen Rijn-Maasmonding	100 m³/s	155 m³/s	200 m³/s	Toename percentages in lijn met Deltares (2024e), referentiewaarde conform gerapporteerde waarden in 2018 (Deltares, 2024d).
Zeespiegelstijging	0 m	0,3 m	0,8 m	Meest waarschijnlijke waarde binnen bandbreedte (KNMI, 2023), afgerond naar decimeters.

2.3 Waterbalans in huidig klimaat en in een warmer klimaat

Per inrichtingsvariant is op basis van bestaande kennis het effect op de zoetwatervoorziening zoveel mogelijk gekwantificeerd middels het opstellen van een zoetwaterbalans. In Figuur 2-3 en Figuur 2-4 zijn de zoetwaterbalansen bij de huidige inrichting van het gebied getoond voor twee klimaatscenario's: het huidige klimaat en voor klimaatscenario Hd2100, beide voor een herhalingstijd van 20 jaar (zie Paragraaf 2.2). Op basis van het water dat binnenkomt (via de Waal, Lek, Hollandsche IJssel en Maas) en de onttrekkingen, wordt bepaald hoeveel water er nog overblijft voor uitstroom naar zee. Dit 'beschikbare debiet' wordt vervolgens vergeleken met het 'benodigde debiet' om het water voldoende zoet¹ te houden bij de voornaamste zoetwaterbuffers in het gebied: de Hollandsche IJssel, de

¹ Voldoende zoet betekent voor de Hollandsche IJssel een getijgemiddelde concentratie bij Snelle Sluis (en alle punten bovenstrooms) van <400 mg Cl/l en < 200 mg Cl/l bij Gouda en voor de Lek een getijgemiddelde concentratie bij de Krimpenerwaardinlaat (en alle punten bovenstrooms) van <200 mg Cl/l.

monding van de Lek en het Spui (zie Figuur 2-2). Indien het resulterende getal negatief is, is er sprake van een tekort.



Figuur 2-2 Indicatie van de mate van zoutindringing in de huidige situatie (boven) en in het scenario Hd2100 (onder).

Bij de huidige inrichting betreft de vergelijking tussen beschikbaar en benodigd uitstroomdebiet enkel de Nieuwe Waterweg (NWW), omdat dit de enige open verbinding met zee is. De overige mondingen zijn gesloten en hebben maar een beperkt uitstroomdebiet nodig (zoutriolen Haringvliet 2 m³/s en debiet bij Volkeraksluizen 35-43 m³/s). In de huidige inrichting en zonder aanvullende maatregelen zijn schattingen voor het benodigde NWW-debiet afgeleid uit de BRL-studie (Deltares, 2023a), zie Bijlage B.1. In Tabel 2-3 en Tabel 2-4 worden alle in- en uitgaande posten toegelicht.

Alle getallen in de waterbalansen in dit rapport zijn het rechtstreekse resultaat van een berekening. De nauwkeurigheid van de getallen oogt daardoor hoog (op m³/s nauwkeurig), maar kent een grote onzekerheid vanwege de gedane aannames, eenvoudige berekeningen en/of het toegepaste expertoordeel. De waterbalansen zijn slechts bedoeld om een globaal beeld te geven van de mogelijkheden om zoetwater beschikbaar te houden in een warmer klimaat bij verschillende bouwstenen.

Tabel 2-3 Overzicht van alle inkomende debieten (m³/s) bij het voortzetten van de huidige strategie.

Inkomende debieten	Huidig	Hd2050	Hd2100	Toelichting
Waal	618	482	415	Gemiddelde bij lage Lobithafvoeren (Bijlage A): 78% van de Lobith-afvoer minus Lek en HIJ minus extra onttrekkingen naar ARK om toename zoutindringing t.g.v. ZSS te beperken (5 m ³ /s per meter ZSS) (Deltares, 2024e).
Lek	25	32	42	Conform huidig beleid wordt er een surplusdebiet ingesteld van rond de 10 m ³ /s om verzilting tegen te gaan, zie Bijlage B.3. Met 17 m ³ /s onttrekkingen levert dit een afvoer van 27 m ³ /s op. Omdat de watervraag met klimaatverandering toeneemt, neemt de benodigde afvoer over de tak met klimaatverandering toe, om 10 m ³ /s surplus te behouden.
Hollandsche IJssel (HIJ)	8	11	15	Conform huidig beleid, wordt er een surplusdebiet ingesteld om verzilting tegen te gaan, indien dat nodig is. In huidig klimaat is dit rond de 1 m ³ /s, zie Bijlage B.3. Omdat de watervraag met klimaatverandering toeneemt, neemt de benodigde afvoer over de tak met klimaatverandering toe, om het surplus van 1 m ³ /s te behouden.
Maas (Lith)	25	25	15	De verwachtingswaarde van de afvoer van de Maas bij Monsin bij een T=20 jaar lage afvoer (14 dagen) van de Rijn, minus 15 m ³ /s onttrekkingen voor o.a. Albertkanaal (zie Bijlage A).

Tabel 2-4 Overzicht van alle uitgaande debieten bij het voortzetten van de huidige strategie.

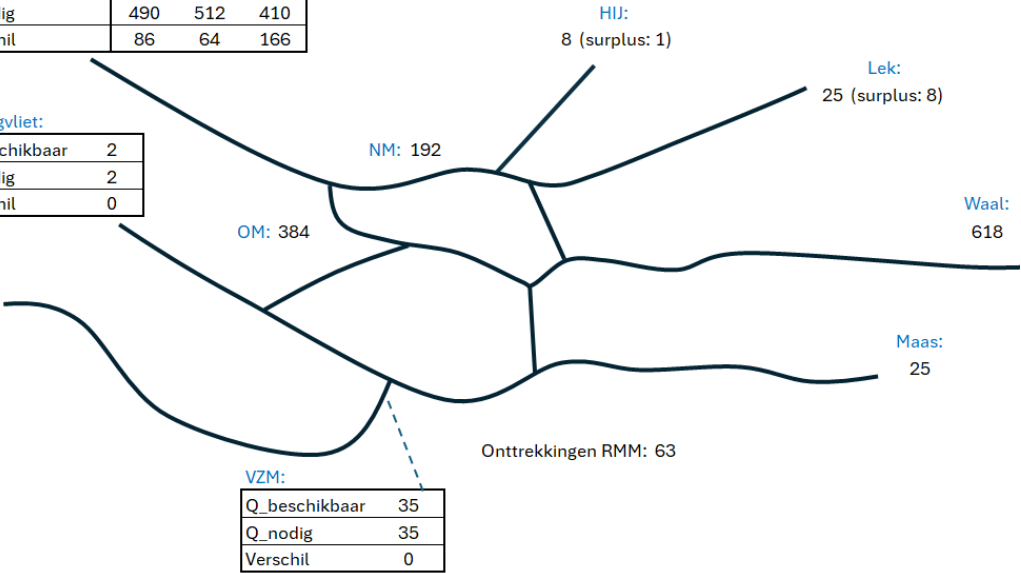
Uitgaande debieten	Huidig	Hd2050	Hd2100	Toelichting
Toename t.o.v. huidig		+40%	+100%	Schatting toename interne onttrekkingen (=regionale onttrekkingen) op basis van (Deltares, 2024e).
Onttrekkingen Lek	17	24	34	In huidige droge jaren rond de 17 m³/s o.b.v. Deltares (2023a) en Deltares (2024d). Toename watervraag conform percentages.
Onttrekkingen Holl. IJssel	7	10	14	In droge jaren rond de 10 m³/s indien beschikbaar (Deltares, 2021), maar bij beperkte waterbeschikbaarheid eerder rond de 5 à 7 m³/s (persoonlijke comm. RWS). Toename watervraag conform percentages.
Volkerak Zoommeer (incl. Krammersluizen)	35	37	43	In het huidige klimaat is rond de 35 m³/s nodig (IPLO, 2024). Hiervan is 9 m³/s nodig voor de Krammersluizen. Met zeespiegelstijging neemt de doorspoelvraag voor VZM toe. Toename bepaald op basis van KP-ZSS (Arcadis & Hydrologic, 2023a).
Haringvlietsluizen	2	2	2	Doorspoeling zoutriolen (IPLO, 2024).
Overige onttrekkingen	39	67	107	Resterende onttrekkingen, zo gekozen dat het totaal klopt, zie volgende regel in deze tabel.
Totaal	100	140	200	Totale onttrekkingen aan de RMM zijn in huidig klimaat rond de 100 m³/s (Deltares, 2024d), dit is inclusief de hierboven genoemde posten. Toename totaal conform percentages voor Hd2050 en Hd2100.

Nieuwe Waterweg:

Zoet houden van:	NM	HIJ/Lek	Spui
Q beschikbaar			576
Q nodig	490	512	410
Verschil	86	64	166

Haringvliet:

Q beschikbaar	2
Q nodig	2
Verschil	0



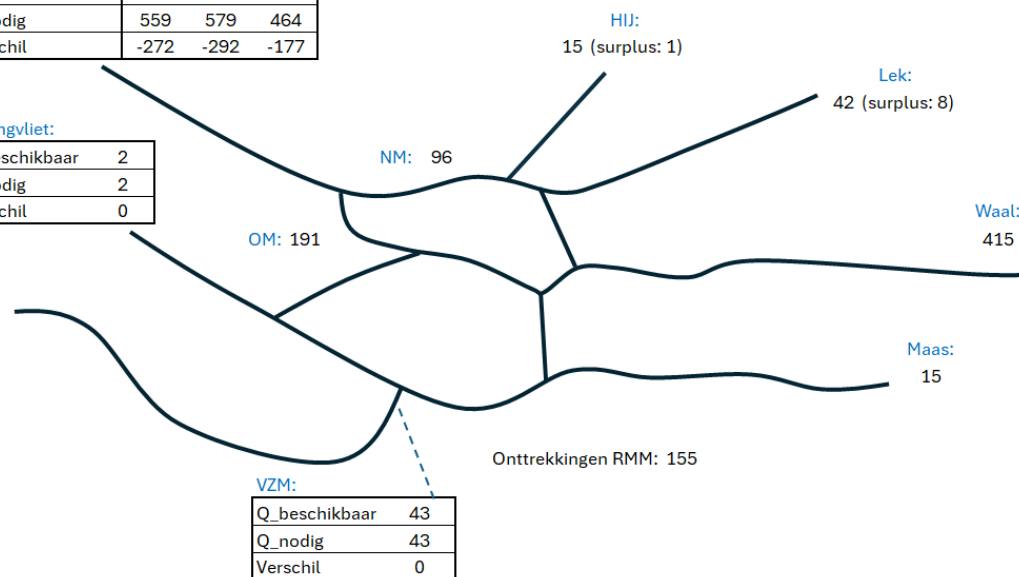
Figuur 2-3 Waterbalans in een T=20 droog jaar bij de huidige inrichting van de Rijn-Maasmond voor de referentiesituatie (2024) In de boxen bij elke monding (van noord naar zuid: Nieuwe Waterweg, Haringvliet en Grevelingen) staan getallen van hoeveel er beschikbaar is aan uitstroomdebiet en hoeveel er nodig is. Indien het verschil debiet negatief is, is er een tekort aan zoetwater.

Nieuwe Waterweg:

Zoet houden van:	NM	HII/Lek Spui
Q beschikbaar		287
Q nodig	559	579 464
Verschil	-272	-292 -177

Haringvliet:

Q beschikbaar	2
Q nodig	2
Verschil	0



Figuur 2-4 Waterbalans in een T=20 droog jaar bij de huidige inrichting van de Rijn-Maasmond voor scenario Hd in het zichtjaar 2100. In de boxen bij elke monding (van noord naar zuid: Nieuwe Waterweg, Haringvliet en Grevelingen) staan getallen van hoeveel er beschikbaar is aan uitstroomdebiet en hoeveel er nodig is. Indien het verschil debiet negatief is, is er een tekort aan zoetwater.

3 Huidige inrichting van de Rijn-Maasmonding

Dit hoofdstuk beschrijft het functioneren van bouwstenen binnen de huidige inrichting van de Rijn-Maasmonding. In de terminologie van het KP ZSS spreken we dan over de houdbaarheid en oprekbaarheid van de voorkeursstrategie (Spoor II van het KP ZSS). Op hoofdlijnen komt Strategie B1 van de oplossingsrichting Beschermen uit Spoor IV van het KP ZSS overeen met de huidige (voorkeurs)strategie.

In de huidige situatie is de noordrand van de Rijn-Maasmonding (de Nieuwe Waterweg) afsluitbaar open via de Maeslantkering of een opvolger daarvan. De Nieuwe Maas en Oude Maas blijven in Strategie B1 ook bij sterke zeespiegelstijging onder dagelijkse omstandigheden in open verbinding staan met de Nieuwe Waterweg.

Binnen deze strategie passen (combinaties van) de volgende bouwstenen: verhogen surplusdebieten, verondiepen riviertakken en incidenteel afsluiten van de Hollandsche IJssel, Lek, Oude Maas en/of het Spui, zie Figuur 3-1.



Figuur 3-1 Bouwstenen in de huidige inrichting van de Rijn-Maasmonding, waarbij een afsluitbaar open zeefront is gerealiseerd via een open Noordrand (Nieuwe Waterweg) (Strategie B1 uit het KP ZSS).

3.1 Vergroten surplusdebieten

Conform huidige strategie wordt, indien nodig, extra water via de Hollandsche IJssel en Lek geleid om de verzilting in deze takken tegen te gaan. Voorlopige resultaten uit KP-ZSS Spoor II, fase 2 (HKV, 2024) duiden erop dat het verder vergroten van deze afvoeren een effectieve strategie is om verzilting in deze riviertakken tegen te gaan en de innamepunten langs de Lek (Krimpenerwaard en verder bovenstrooms) en Hollandsche IJssel (Snelle Sluis en verder bovenstrooms) voldoende zoet² te houden. Voordeel van deze maatregelen is dat er geen aanpassingen nodig zijn in het hoofdwatersysteem. Nadeel is dat dit alleen helpt

² Voldoende zoet betekent een getijgemiddelde concentratie van <200 mg Cl/l voor Krimpenerwaard en innamepunten bovenstrooms <400 mg Cl/l voor Snelle Sluis en verder bovenstrooms, en <200 mg Cl/l voor Gouda.

voor de zoetwaterzones van de Lek en de Hollandsche IJssel, maar geen mitigerend effect heeft op de andere innamepunten, waaronder Bernisse (Figuur 3-2). Daarnaast gaat het om substantiële surplusdebieten die moeten worden doorgevoerd om ze bij de Hollandsche IJssel en Lek te krijgen. Dit vereist aanpassingen aan de infrastructuur in het regionale systeem voor doorvoer naar de Hollandsche IJssel en mogelijk aan de Prins Bernhardsluizen voor de Lek.



Figuur 3-2 Indicatie van de zoutindringing in het scenario Hd2100 met verhogen surplusdebieten

3.1.1 Zoetwaterbalans

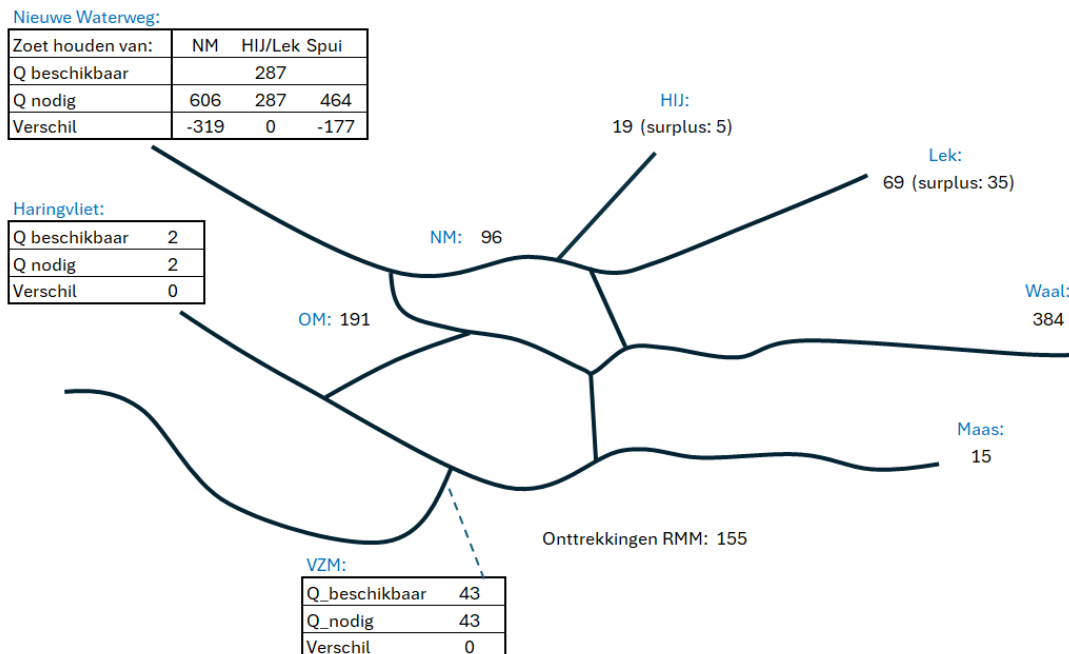
De zoetwaterbalans is getoond in Figuur 3-3. Voor de T=20 lage afvoersituatie in Hd2100 is er naar schatting $\sim 290 \text{ m}^3/\text{s}$ beschikbaar voor de Nieuwe Waterweg. Om voor deze afvoer en 80 cm zeespiegelstijging de Hollandsche IJssel voldoende zoet³ te houden, is het naar schatting voldoende om het surplusdebiet te vergroten van $\sim 1 \text{ m}^3/\text{s}$ naar $\sim 5 \text{ m}^3/\text{s}$ (schatting op basis van HKV, 2024). Het huidige surplusdebiet tijdens droogte is 0 – 2 m^3/s (mondelinge communicatie RWS-WNZ) Uitgaande van een toekomstige watervraag van $\sim 15 \text{ m}^3/\text{s}$, is het nodig om een debiet van rond de 20 m^3/s naar de Hollandsche IJssel te laten gaan.

Om voor dezelfde situatie de Lek voldoende zoet⁴ te houden, moet het surplusdebiet verhoogd worden van $\sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$ naar $\sim 40 \text{ m}^3/\text{s}$ (schatting op basis van HKV, 2024). Uitgaande van een toekomstige watervraag van $\sim 35 \text{ m}^3/\text{s}$, is het nodig om een debiet van $\sim 75 \text{ m}^3/\text{s}$ naar de Lek te laten gaan. Let wel, dit zijn voorlopige resultaten en voor situaties zonder windopzet. Met windopzet kan er tijdelijk een groter surplus nodig zijn.

Deze maatregel heeft een verwaarloosbaar klein effect op de verzilting van de overige gebieden in de Rijn-Maasmonding. Zonder aanvullende maatregelen zullen innamepunten langs de Nieuwe Maas en Spui verziltten bij een T=20 lage afvoersituatie (Hd2100).

³ Getijgemiddelde chlorideconcentraties bij de innamepunten Snelle Sluis en Gouda onder de 250 mg Cl/l.

⁴ Getijgemiddelde chlorideconcentraties bij de Krimpenerwaardinlaat en Bergambacht onder de 200 mg Cl/l



Figuur 3-3 Zoetwaterbalans voor de bouwsteen vergroten surplusdebieten Hollandsche IJssel en Lek in een T=20 droog jaar voor scenario Hd in het zichtjaar 2100.

3.1.2

Scheepvaart

Om extra afvoer richting de Lek te realiseren, wordt de stuw bij Hagestein verder opengezet. Normaal gesproken gaat daar ongeveer 8 m³/s doorheen. Als de opening met 20 cm vergroot wordt kan er 30 m³/s doorheen (zoals in 2018 is toegepast⁵). Voor 70 m³/s is een nog grotere doorstroomopening nodig. Dit water komt via het Amsterdam-Rijnkanaal Betuwepand uit de Waal ter hoogte van Tiel.

Door extra water aan te voeren richting de Lek en Hollandsche IJssel neemt de afvoer op de Waal af met ongeveer 30 m³/s. Tijdens droogte wordt nu ook al water vanuit de Waal via het Amsterdam-Rijnkanaal Betuwepand naar de Nederrijn/Lek geleid en via de Pr. Irenesluizen naar het Amsterdam-Rijnkanaal Noordpand. De vaardiepte neemt op de Waal dan verder af, wat gevolgen heeft voor de binnenvaart. Volgens Deltares (2024c) levert dit tijdens de inzet een kostenpost van ongeveer 2 tot 5 miljoen euro op. Als het Betuwepand (deels) gestremd moeten worden voor het aanvoeren van hoge surplusdebieten, moet de scheepvaart tussen Duitsland en Amsterdam omvaren via de Nederrijn. Grotere schepen moeten omvaren via Rotterdam. Dit leidt tot een verhoging van de potentiële kostenpost voor de scheepvaart naar orde 5 tot 10 miljoen euro per keer.

3.1.3

Waterkwaliteit en ecologie

De Rijn-Maasmonding blijft een open systeem waarbij de verzilting op de Hollandsche IJssel en Lek beperkt blijft. Met zeespiegelstijging en afnemende rivierafvoeren verschuift de zoet-zoutgradiënt landinwaarts. Dat betekent dat de specifieke brakke habitats de ruimte moeten hebben om landinwaarts te verplaatsen. Bestaande functies, waterkeringen en infrastructuur kunnen deze ruimte beperken. Met het instellen van een surplusdebiet schuift de gradiënt weer gedeeltelijk terug. Wel is de verschuiving met zeespiegelstijging (enkele kilometers bij 1 m zeespiegelstijging (HKV, 2024)) klein ten opzichte van de al bestaande variatie ten gevolge van seizoenale fluctuaties in rivierafvoer (tien kilometer of meer (Deltares, 2023a)). In

⁵ <https://detielenaar.nl/nieuws/2018/08/prins-bernhardsluizen-gestremd-om-verzilting-westen-tegen-te-gaan/>

vergelijking met de andere bouwstenen is het effect op ecologie en waterkwaliteit in dit deel van het systeem verwaarloosbaar.

3.1.4 Waterveiligheid

Het vergroten van de surplusdebieten heeft geen effect op de waterveiligheid. Hooguit is er lokaal sprake van extra wateroverlast in verband met het bewerkstelligen van een groter surplusdebiet in de Hollandsche IJssel.

3.1.5 Ruimtebeslag

De genoemde maatregelen vragen niet of nauwelijks om extra ruimte. Alleen voor het doorvoeren van extra water naar de Hollandsche IJssel zijn mogelijk aanpassingen nodig in het regionale watersysteem. Naast het rechtstreekse ruimtebeslag door de maatregelen tegen zout, is er nog wel het algemene ruimtebeslag voor het versterken van waterkeringen bij Strategie B1.

3.1.6 Kosten

Voor deze bouwsteen zijn investeringen nodig voor aanpassingen in het regionale watersysteem om de extra doorvoer naar de Hollandsche IJssel te kunnen bewerkstelligen, onder andere mogelijk een aanpassing van de Prins Bernhardsluizen (in het Betuwepand) en de Pr. Irenesluizen. Om een eerste inschatting te maken van de kosten wordt gekeken naar twee vergelijkbare maatregelen uit het Deltaprogramma Zoetwater. In fase 1 werd de Klimaatbestendige Wateraanvoervoorziening (KWA) voor West-Nederland uitgebreid met ongeveer 7 m³/s. Dit kostte circa 35 miljoen euro. In fase 2 wordt de doorvoer Krimpenerwaard (DKW) uitgebreid met ongeveer 5 m³/s. Dit kost circa 20 miljoen euro. Om de benodigde extra aanvoercapaciteit om de surplusdebieten te realiseren is een extra doorvoercapaciteit van 30 m³/s voor de Lek en 20 m³/s voor de Hollandsche IJssel nodig. Dit is ongeveer 5 keer zoveel als de uitbreiding van de KWA en de DKW bij elkaar. Als eerste kostenindicatie voor deze bouwsteen houden we daarom 250 miljoen euro aan. Dit is nog zonder eventuele aanpassingen aan sluizen.

3.2 Verondiepen van riviertakken

Bij toekomstscenario's voor de Rijn-Maasmonding wordt aangenomen dat de rivierbodem gehandhaafd wordt op huidig niveau t.o.v. NAP. Hierdoor neemt met zeespiegelstijging de waterdiepte en daarmee de zoutindringing toe. Door de geulen te verondiepen kan verzilting worden beperkt. Hierbinnen zijn twee mogelijke bouwstenen uitgewerkt: het lokaal verondiepen van de Nieuwe Waterweg / Nieuwe Maas en het verondiepen van de gehele Rijn-Maasmonding. Voordeel van beide bouwstenen is dat de verzilting overal in het gebied beperkt kan worden, er geen grote infrastructurele aanpassingen nodig zijn en de connectiviteit voor de ecologie behouden wordt. Daarnaast is er mogelijk een gunstig effect op de baggerbezwaren. Nadeel is dat de vaardieptes voor de scheepvaart afnemen.

Figuur 3-4 toont de zoutindringing voor een T=20 lage afvoersituatie in Hd2100 voor de bouwsteen verondiepen gehele Rijn-Maasmonding en Figuur 3-5 voor het lokaal verondiepen van de Nieuwe Waterweg / Nieuwe Maas.



Figuur 3-4 Indicatie van de zoutindringing in het scenario Hd2100 met verondiepen gehele Rijn-Maasmonding



Figuur 3-5 Indicatie van de zoutindringing in het scenario Hd2100 met lokaal verondiepen (Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas)

3.2.1

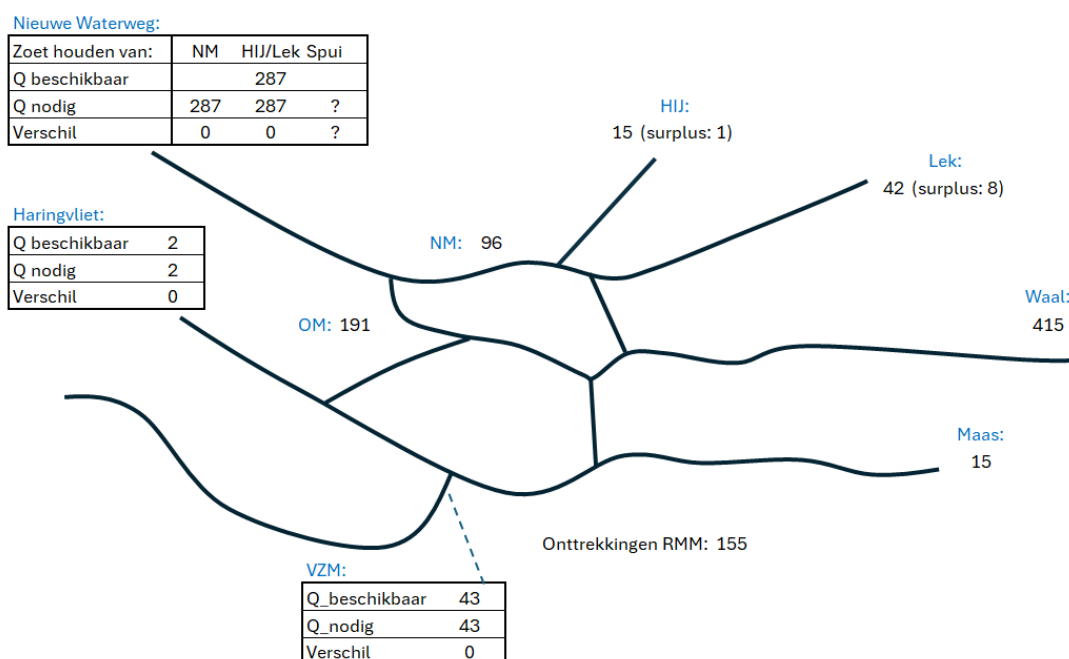
Zoetwaterbalans

De zoetwaterbalansen voor het lokaal en volledig verondiepen van de Rijn-Maasmonding zijn getoond in Figuur 3-6. Bij het lokaal verondiepen heeft het verondiepen van de toegangseu (Nieuwe Waterweg) veruit het sterkste effect (Biemond et al., 2024). Echter, het effect van zeespiegelstijging op verzilting is groter dan het lokaal aanpassen van de rivierbodem in de Rijn-Maasmonding met dezelfde grootte. Bij 1 m bodemverandering van de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas (tot de Erasmusbrug) neemt de afvoer waarbij verzilting optreedt af met gemiddeld 50 m³/s (zie Bijlage C.1, Deltares, 2023a). 80 cm zeespiegelstijging zorgt voor een toename van gemiddeld 110 m³/s, wat neerkomt op circa 140 m³/s per meter ZSS. Er is dus bijna een factor 3 verschil tussen het effect van 1 m ZSS versus 1 m verondieping.

Daarnaast moet niet alleen het effect van zeespiegelstijging op verzilting worden gemitigeerd maar is er in de toekomst ook sprake van een afname in de bovenstroomse rivieraanvoer en een grotere lokale watervraag.

Uitgaande van lineaire schaling is er 4 à 7 m verondieping van de toegangsgeul (NWW) nodig, om de cruciale innamepunten langs de Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel en Lek voldoende zoet te houden bij een T=20 lage afvoer van 14 dagen met een geschat beschikbaar NWW-debiet van ~290 m³/s (Hd2100), zie Bijlage C.1. Naar verwachting heeft deze bouwsteen ook een gunstig effect op de inlaat Bernisse, omdat een ondieper NWW ook invloed heeft op zoutindringing via de Oude Maas en het Spui.

Als de volledige Rijn-Maasmonding wordt verondiept, is voor dezelfde situatie de geschatte benodigde verondieping rond de 2 à 3 meter. Let wel, het gaat bij beide bouwstenen om een grove schatting op basis van lineaire schaling, terwijl de relatie tussen waterdiepte en zoutintrusielengte in werkelijkheid niet-lineair is.



Figuur 3-6 Zoetwaterbalans voor de bouwsteen verondiepen van de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas met 4 à 7 meter of van de gehele Rijn-Maasmonding met 2 à 3 meter (zelfde waterbalans) in een T=20 droog jaar voor scenario Hd in het zichtjaar 2100.

3.2.2 Scheepvaart

Met een grotere lokale verondieping op de Nieuwe Waterweg / Nieuwe Maas worden de havens langs deze riviertakken veel minder goed bereikbaar voor zeevaart. Dit omvat ook de cruiseterminal in de binnenstad van Rotterdam. Met een verondieping in de gehele Rijn-Maasmonding worden alle havens, inclusief die van Dordrecht en Moerdijk, minder bereikbaar.

Een ander aandachtspunt is de maritieme industrie in de regio Rijnmond – Drechtsteden, die baat heeft bij genoeg diepgang in de Rijn-Maasmonding. Een groot deel van de industrie bevindt zich verder landinwaarts, daardoor wordt de maatgevende diepgang met de verondieping in de gehele Rijn-Maasmonding wel beïnvloed en niet met de lokale aanpassing. De binnenvaart ondervindt geen hinder bij beide opties voor verondieping.

3.2.3 Waterkwaliteit en ecologie

In een gelaagd zoet-zout watersysteem kunnen zoet- en zoutwaterminnende aquatische organismen boven elkaar leven. Omdat de bovenlaag zoet is, zijn de gemeenschappen van intergetijdenzones en overstromingsgebieden voornamelijk zoet. Als het systeem minder gelaagd wordt, heeft dit gevolgen voor het ecosysteem. In de Rijn-Maasmonding zijn er momenteel grote variaties in de mate van gelaagdheid door seizoensvariaties in de rivierafvoer. Met de stijging van de zeespiegel zal de gelaagdheid toenemen, terwijl deze met lagere rivierafvoeren zal afnemen. Als het systeem vervolgens wordt verondiept, zal de gelaagdheid verder afnemen. Zowel de verandering in gelaagdheid door klimaatverandering als door verondieping zijn naar verwachting kleiner dan de natuurlijke variatie. De verwachting is daarom dat het effect van verondieping op de ecologie verwaarloosbaar is. De waterkwaliteit verandert ook niet significant.

3.2.4 Waterveiligheid

Het sterk verondiepen van de Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Oude Maas leidt tot een verandering in de doordringing van het getij en stormvloeden in de Rijn-Maasmonding. Dit heeft gevolgen voor hoogwaterstanden in het geval van een niet-sluitende Maeslantkering en/of Hartelkering. Uit een modelstudie (Leuven et al., 2023) volgt dat lokale verondieping in de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas leidt tot een lichte afname van de getijslag. Hetzelfde is te verwachten voor de indringing van stormvloeden. Het verondiepen van de monding heeft daarmee een (beperkt) gunstig effect op waterveiligheid.

Het verondiepen van de gehele Rijn-Maasmonding met ongeveer 2 meter kan leiden tot een verlaging van de afvoercapaciteit, en daarmee zorgen voor opstuwung in het bovenstroomse deel van het gebied tijdens hoge rivierafvoeren. Voor verondieping van de gehele Rijn-Maasmonding wordt daarom een licht negatief effect voorzien, wat gecompenseerd moet worden met extra dijkversterkingen om aan de norm te blijven voldoen. Modelstudies zijn nodig om beide effecten nader te kwantificeren.

3.2.5 Ruimtebeslag

Geen extra ruimtebeslag.

3.2.6 Kosten

De Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas zijn momenteel dieper dan het morfologisch evenwicht, wat betekent dat er van nature sedimentatie optreedt en dat er baggeronderhoud nodig is om deze geulen op diepte te houden (Huisman et al., 2021). Bij verondieping van de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas zal naar verwachting een deel van de sedimentatie op natuurlijke wijze plaatsvinden. Momenteel wordt ongeveer 15 Mm³ per jaar gebaggerd in de Nieuwe Waterweg en omliggende havenbekkens. Het verondiepen kan deels worden bereikt door niet meer te baggeren. Omdat het onbekend is hoeveel sedimentatie dit jaarlijks kan opleveren en of dit sediment voldoende geleidelijk verspreid wordt, is voor de kostenraming een conservatieve schatting gemaakt waarbij alle verondieping door middel van suppleties plaatsvindt.

Het verondiepen van 16 kilometer Nieuwe Waterweg en Scheur van circa 500 m breed en 12 kilometer Nieuwe Maas (tot aan de Erasmusbrug) van 350 m breed met 4 à 7 m resulteert in een volume te suppleren sediment van 50 à 85 Mm³. In het IRM onderzoek is uitgegaan van een eenheidsprijs van 47 euro per m³ voor suppleties (Ecorys, 2023). Dit resulteert in een kostenschatting van 2 à 4 miljard euro. Vanwege de grote volumes en korte vaarafstanden van de Noordzee naar de Rijn-Maasmonding is waarschijnlijk een lagere schatting te rechtvaardigen. Daarnaast kan een deel van de ophoging worden bewerkstelligd door gedurende lange tijd geen onderhoudsbaggerwerk meer uit te voeren. Als inschatting houden we daarom 1 tot 2 miljard euro aan.

Bij het verondiepen van de gehele RMM met orde 2 m is niet exact gespecificeerd binnen welk gebied dit gaat plaatsvinden. Bij verondieping van de noordrand en het middengebied⁶, gaat het om een volume van 95 Mm³, bij verondieping van de hele Rijn-Maasmonding (dus inclusief de Beneden en Nieuwe Merwede en Haringvliet en Hollands Diep), gaat het om bijna ~470 Mm³. Uitgaande van dezelfde eenheidsprijs resulteert dit in ruim 4 tot ruim 20 miljard aan kosten. Omdat het verondiepen van riviertakken nabij de monding meer effect heeft dan verondieping verder in het systeem, is het waarschijnlijk niet nodig om Hollands Diep en Haringvliet zoveel te verondiepen, bovendien vindt in deze riviertakken nog sedimentatieplaats en zal een deel van de sedimentatie natuurlijk kunnen verlopen. Dit geldt naar verwachting ook voor de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas. De schatting van 20 miljard lijkt daarom te hoog. Tegelijkertijd zal het een uitdaging zijn om het sediment op de juiste plek te houden, omdat het systeem morfologisch niet in evenwicht is en er erosie optreedt in het middengebied (Huismans e.a., 2021). Dit zal de beheerinspanning vergroten en mogelijk moeten er harde lagen worden aangelegd.

Naast de kostenraming op basis van de eenheidsprijs van 47 euro per m³ (Ecorys, 2023), geeft ook de aanleg van de zandmotor een beeld van de mogelijke kosten. Het volume van de zandmotor (aangelegd in 2011) was ongeveer 21 Mm³, wat is aangelegd tegen een kostprijs van ongeveer €70 miljoen. Nu, 12 jaar later, zou dat ongeveer €100 miljoen zijn (40% inflatie over die periode). Opschaling van 21 naar 90-470 Mm³ resulteert in een bedrag van €0,4-2 miljard. Een zandmotor is veel goedkoper aan te leggen dan suppleties in het rivierengebied vanwege toepasbare technieken en vaarafstanden. Dus dat de schatting op basis van Ecorys (2023) hoger uitvalt is in de lijn met de verwachting. Met alle onzekerheden lijkt de lage raming binnen de bandbreedte van 4-20 miljoen plausibeler dan de hoge raming.

Naast directe kosten in verband met het realiseren van een verondieping heeft deze maatregel economische impact gerelateerd aan de effecten op scheepvaart. Deze kosten zijn hier niet gekwantificeerd.

3.3 Incidenteel afsluiten Hollandsche IJssel en Lek

Door de Hollandsche IJssel en Lek in zeer droge zomers tijdelijk af te sluiten met een (zout)kering, kunnen deze takken zoet gehouden worden, mits de keringen voor de gehele verziltingsperiode gesloten blijven en er voldoende water van bovenstrooms wordt aangevoerd om voor de onttrekkingen te compenseren. Bij de Lek zal een nieuwe kering aangelegd moeten worden, bij de Hollandsche IJssel kan gebruik gemaakt worden van de bestaande stormvloedkering. Aanname is dat er geen schutsluizen aangelegd worden bij de zoutkering (Lek) of dat de bestaande schutsluizen in tijden van dreigende verzilting niet gebruikt worden (Hollandsche IJssel), omdat anders de afscherpende werking sterk afneemt. Voordeel is dat er minder grote surplusdebieten nodig zijn, nadeel is dat er gedurende de periode dat de kering gesloten is, geen scheepvaart of vismigratie mogelijk is. Ook heeft deze maatregel alleen effect op de Hollandsche IJssel en Lek, en wordt de verzilting in de andere riviertakken niet beperkt (Figuur 3-7).

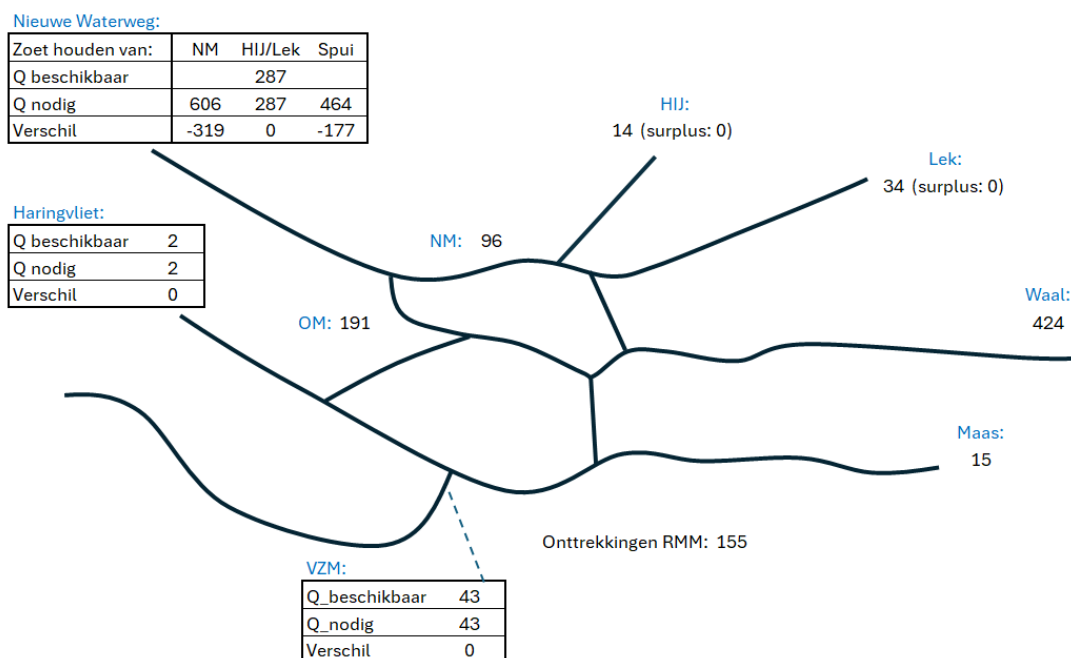
⁶ Noordrand (Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Lek), middengebied (Oude Maas, Noord, Spui, Dordtsche Kil)



Figuur 3-7 Zoutindringing voor een $T=20$ lage afvoersituatie in Hd2100 met het incidenteel afsluiten van de Hollandsche IJssel en Lek.

3.3.1 Zoetwaterbalans

De zoetwaterbalans voor het tijdelijk afsluiten van de Hollandsche IJssel en Lek is getoond in Figuur 3-8. De Hollandsche IJssel en Lek kunnen met deze maatregel zoet worden gehouden, ook voor lagere Nieuwe Waterweg debieten of meer zeespiegelstijging. Bovenstrooms dient er voldoende water te worden aangevoerd om de onttrekkingen te compenseren en te voorkomen dat het waterpeil uitzaakt. Op de Hollandsche IJssel levert dit een beperkt voordeel op ten opzichte van het instellen van een surplusdebiet (zie bouwsteen “vergroten surplusdebieten”), er hoeft namelijk orde $5 \text{ m}^3/\text{s}$ minder te worden aangevoerd. Op de Lek is dit voordeel groter, namelijk rond de $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Voor de andere takken heeft deze maatregel geen effect.



Figuur 3-8 Zoetwaterbalans voor de bouwsteen incidenteel afsluiten van de Hollandsche IJssel en Lek in een $T=20$ droog jaar voor scenario Hd in het zichtjaar 2100.

3.3.2 Scheepvaart

Hoe vaak en hoelang deze maatregel moet worden ingezet is nog niet uitgezocht, waardoor de impact alleen grofstoffelijk is in te schatten. Gedurende de inzet van de maatregel is er geen scheepvaart mogelijk over de Hollandsche IJssel en Lek (ervan uitgaande dat er geen schutsluizen in operatie zijn). Voor scheepvaart op de Hollandsche IJssel zijn er geen alternatieve routes te bedenken, wat beperkend werkt voor de bereikbaarheid van industrie in het Groene Hart (bijvoorbeeld in Alphen a/d Rijn). Scheepvaart over de Lek zou mogelijk via de Waal en het Betuwepand om kunnen varen, al zullen als gevolg hiervan de wachttijden bij de Irenesluizen vermoedelijk sterk toenemen. Voor scheepvaart over de Waal heeft deze maatregel een voordeel omdat er meer water beschikbaar is op de Waal.

3.3.3 Waterkwaliteit en ecologie

Gedurende de inzet van de maatregel is geen vismigratie mogelijk. Hoe vaak en hoe lang deze maatregel moet worden ingezet is nog niet uitgezocht. De frequentie van de inzet is bepalend voor de impact op trekvissoorten op de langere termijn. Om welke trekvissoorten het gaat hangt af van de timing van de afsluiting (Van Leeuwen et al. 2004).

In het voorjaar gaat het bijvoorbeeld om spiering en driedoornige stekelbaars (maart), zeeprik, fint, elft, steur en bot (april/mei), in de zomer om zalm en zeeforel (juni-aug), in het najaar om houting en rivierprik (okt-dec). De hoofdroutes voor vismigratie blijven echter beschikbaar. Conclusie: een lichte verslechtering op de ecologische sleutelfactor connectiviteit. Op de andere sleutelfactoren - dynamiek, diversiteit en waterkwaliteit – wordt geen effect verwacht.

3.3.4 Waterveiligheid

Het incidenteel afsluiten van de Hollandsche IJssel en Lek tijdens lage rivierafvoer heeft geen effect op de waterveiligheid, aangezien dit niet in het stormseizoen maar in droge zomers gebeurt, wat niet relevant is voor waterveiligheid.

De Hollandsche IJsselkering krijgt in deze bouwsteen een hybride functie als stormvloedkering (huidige functie) en zoutkering (toegevoegde functie). De extra zoutkering in de Lek kan eventueel op dezelfde manier een hybride functie vervullen. Dit verhoogt de redundantie binnen het watersysteem: behalve de Maeslantkering is er nog een extra mogelijkheid om de Lek af te sluiten. Een eventuele hybride functie heeft consequenties voor de vereiste constructieve sterkte en betrouwbaarheid sluiten van de kering. Ook kan onderhoud dan niet altijd meer in de zomer plaatsvinden.

3.3.5 Ruimtebeslag

Een nieuw afsluitmiddel in de Lek vraagt om ruimtebeslag. De Hollandsche IJsselkering (of opvolger daarvan) is reeds aanwezig.

3.3.6 Kosten

Voor deze bouwsteen is het uitgangspunt dat de bestaande Hollandsche IJsselkering (of opvolger daarvan) gebruikt kan worden om incidenteel te worden ingezet als zoutkering. Uitgangspunt is dat investeringskosten voor de Hollandsche IJsselkering worden gedekt vanuit waterveiligheid. Voor de Lek is wel een kering nodig die enkel ingezet wordt om zoutindringing te beperken. Een dergelijke zoutkering hoeft minder robuust en betrouwbaar te worden uitgevoerd dan een stormvloedkering.

Een globale kostenschatting baseren we op de geschatte nominale kosten uit Spoor II van het KP ZSS, systeemanalyse waterveiligheid voor de Rijn-Maasmonding (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2023). Daarin staan de volgende getallen voor vervanging van stormvloedkeringen:

- Maeslantkering: ca. 1700 miljoen;
- Hollandsche IJsselkering: ca. € 300 miljoen;
- Hartelkering: ca. € 200 miljoen.

Voor het aanleggen van een nieuwe zoutkering in de Lek zijn de globaal geschatte kosten op basis van deze referentie € 300 miljoen. We merken hierbij op dat enige verhoging van het surplusdebiet nog steeds nodig is om in toenemende regionale watervraag te kunnen voorzien. Er komen dus ook kosten bij voor het verhogen van de aanvoercapaciteit zoals beschreven in Paragraaf 3.1.6.

3.4 Incidenteel afsluiten Oude Maas

In deze bouwsteen worden de Oude Maas en het Beerkanaal afsluitbaar gemaakt door middel van een beweegbare zoutkering in combinatie met een schutsluis en spuimiddel/gemaal. De zoutkeringen en schutsluizen hoeven alleen te worden gebruikt in tijden van dreigende verzilting. Deze inrichtingsvariant stond centraal in de verkenning binnen het Corporate Innovatie Programma (CIP), vastgelegd in Deltares (2024a). De gedachte achter deze bouwsteen is dat hiermee het Spui met de Bernisse-inlaat beschermd kan worden (Figuur 3-9). Dit is een essentieel innamepunt voor de zoetwatervoorziening in de regio via het Brielse Meer. Tegelijkertijd kan de afvoer van de Oude Maas grotendeels via de Nieuwe Maas stromen en daar meer tegendruk geven tegen zoutindringing.

Voor de beoordeling van deze bouwsteen is de frequentie en tijdsduur van inzet van groot belang. Tot dusver is verzilting van de Bernisse-inlaat door alleen een zeer lage rivierafvoer nog niet aan de orde geweest. Tijdens droge zomers van 2018 en 2022 zijn wel zoutpieken gemeten bij Bernisse, maar slechts enkele dagen en met voldoende mogelijkheden om tussen de zoutpieken door nog water in te blijven nemen (zogenaamde inlaatvensters). De voornaamste bedreiging in de huidige situatie is verzilting van het Haringvliet als gevolg van stormopzet, waarna op het Spui langdurige nalevering van zout kan optreden. Incidentele inzet van de afsluiting van de Oude Maas kan dan beperkt blijven tot stormgebeurtenissen in combinatie met lage rivierafvoer, wat in de praktijk hooguit neerkomt op sluiting gedurende enkele dagen per jaar. De vraag is hoe deze situatie gaat veranderen bij zeespiegelstijging en verder afnemende rivierafvoeren. Om daar meer grip op te krijgen, is gekeken naar de statistiek van de 14-daags, 30-daags en 90-daags gemiddelde rivierafvoeren, als uitbreiding op de statistiek in Paragraaf 2.2. Daaruit blijkt dat bij Hd2100 in ongeveer de helft van de zomers een afsluiting van de Oude Maas nodig is vanwege te lage rivierafvoeren, en dan in veel gevallen ook meteen de hele zomer (90 dagen). Het karakter van deze bouwsteen verschuift dan geleidelijk van incidentele afsluiting naar zomerafsluiting.

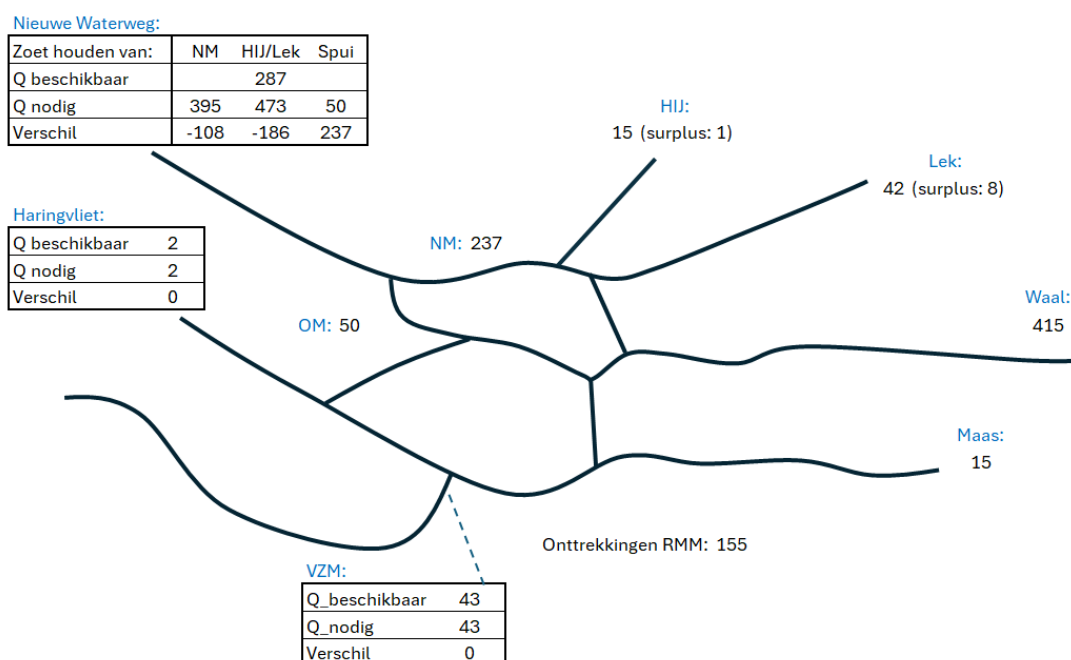


Figuur 3-9 Indicatie van de zoutindringing in het scenario Hd2100 met het incidenteel afsluiten van de Oude Maas en het Beerkanaal.

3.4.1

Zoetwaterbalans

De zoetwaterbalans voor het incidenteel afsluiten van de Oude Maas is getoond in Figuur 3-10.



Figuur 3-10: Zoetwaterbalans voor de bouwsteen incidenteel afsluiten van de Oude Maas in een T=20 droog jaar voor scenario Hd in het zichtjaar 2100.

Wanneer de zoutkeringen in werking zijn, wordt zoutindringing via de schutsluizen conform Deltares (2024a) beperkt door (1) de dimensies van de schutsluizen gelijk te stellen aan die van de Rozenburgsesluis (geschikt voor CEMT-klasse VIc: 6 baks duwstel), (2) een drempel aan te brengen aan de rivierzijde, (3) goed functionerende bellenschermen aan te brengen,

(4) een spoeldebiet toe te passen en eventueel (5) een zoutvang met selectieve onttrekking aan te brengen. Met deze maatregelen kan de benodigde rivierafvoer over de Oude Maas worden beperkt tot 50 m³/s. De andere rivierafvoer vanaf de Rijntakken kan via de Nieuwe Maas worden gestuurd, waardoor de zoutindringing daar sterker wordt tegengegaan dan in de huidige situatie.

Met deze maatregel blijft de Bernisse-inlaat langs het Spui beschikbaar, waardoor voldaan kan blijven worden aan de watervraag van de gebruikers van het Brielse Meer (waterschappen Hollandse Delta en Delfland, havenbedrijf van Rotterdam, industrie, etc.). Bij de Bernisse-inlaat kan alleen worden ingenomen als de waterstand hoog genoeg is. Bijkomend voordeel van deze bouwsteen is dat bij een gesloten zoutkering op de Oude Maas de getijslag op het Spui nagenoeg wegvalt, wat het mogelijk maakt om de hele dag door water in te nemen bij Bernisse. Opmerking daarbij is dat zeespiegelstijging op zichzelf ook zal leiden tot hogere waterstanden bij de Bernisse-inlaat en daardoor minder beperkingen van de inlaatvensters door lage waterstanden. Zelfs het meer benedenstrooms gelegen inlaatpunt bij Spijkenisse blijft volledig zoet. Deze maatregel is ook gunstig voor de inlaatvensters bij de verschillende innamepunten langs de Nieuwe Maas, door de verhoogde rivierafvoer in de Nieuwe Maas. Bij doorgaande zeespiegelstijging en lager wordende rivierafvoeren zal het zout hier wel steeds verder binnendringen. Voor de 1/20 lage afvoer situatie in Hd2100, zal de extra afvoer over de Nieuwe Maas naar verwachting niet voldoende zijn om de innamepunten langs de Noordrand voldoende zoet te houden. Het gaat hierbij om een zeer ruwe schatting, zie de uitwerking in Bijlage C.4. Voor de innamepunten langs de Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel en Lek zijn aanvullende maatregelen nodig, bijvoorbeeld het verhogen van de surplusdebieten of het verondiepen van de Nieuwe Waterweg/Nieuwe Maas.

3.4.2 Scheepvaart

Het grootste deel van de tijd is er geen hinder voor scheepvaart. Alleen tijdens droge zomers (bijvoorbeeld eens per 20 jaar) is gedurende een relatief korte periode van droogte (bijvoorbeeld 1 tot 3 maanden) de Oude Maas alleen passeerbaar via een sluisencomplex. De Oude Maas is de belangrijkste transportader richting Dordrecht, Moerdijk en Antwerpen. Als de schutsluis wordt ingericht voor maximaal CEMT-klasse VIc: 6 baks duwstel, betekent dit dat alle schepen met een diepgang groter dan 4,5 m om moeten varen. Dit gaat in de Oude Maas om 15% van het aantal schepen (Deltares, 2024c). Omvaren via de Nieuwe Maas en Noord is mogelijk, maar hier zijn meer bruggen die open moeten gaan om hoge schepen te laten passeren. Een ander alternatief is om meer in te zetten op overslag over land van zeeschepen naar binnenvaartschepen. De vraag is echter of de haveninfrastructuur daarop aangepast kan worden voor relatief kortdurende en onregelmatig plaatsvindende perioden. Wanneer de afsluiting van de Oude Maas in Hd2100 meer permanent wordt ingezet in de zomerperiode, wordt een aanpassing van overslagstrategie meer voor de hand liggend, al zal dat gevolgen hebben voor het ruimtegebruik op het land.

3.4.3 Waterkwaliteit en ecologie

Een afsluiting van de Oude Maas heeft effect op connectiviteit (o.a. vismigratie). Als de frequentie van inzet beperkt is tot bijvoorbeeld eens per 10 of 20 jaar, kunnen leefgemeenschappen zich overwegend goed herstellen. De frequentie van inzet bij Hd2100 lijkt echter hoger te liggen: gemiddeld om het jaar een hele zomer (90 dagen). Eventueel kunnen vistrappen worden toegevoegd aan de zoutkeringen. Het is wel de vraag of grote droogte (vaak eind van de zomer) samenvalt met vismigratie van relevante soorten. Voor soorten als zalm, zeeforel (juni-aug), spruit en houting (okt-nov) is het mogelijk een probleem (vismigratiekalender; zie Van Leeuwen et al. 2004). Als de route voor vismigratie via de Oude Maas tijdelijk gesloten is, blijft de route via de Nieuwe Maas nog wel beschikbaar. Daarom wordt slechts een licht negatief effect verwacht van zomerafsluitingen van de Oude Maas.

Ook de diversiteit en dynamiek worden mogelijk beïnvloed. Het wegvallen van de getijwerking op de Oude Maas in droge zomers heeft gevolgen voor zoetwatergetijdengebieden zoals de Rhoonse en Carnisse Grienden, maar mogelijk ook verder stroomopwaarts. Daarom wordt een lichte verslechtering verwacht op de sleutelfactoren diversiteit en dynamiek.

3.4.4 Waterveiligheid

Extra zoutkeringen in de Oude Maas en het Beerkanaal kunnen eventueel een hybride functie vervullen als zout- en stormvloedkering. Dit verhoogt de redundantie binnen het watersysteem: behalve de Maeslantkering en Hartelkering zijn er nog extra mogelijkheden om riviertakken af te sluiten. Een eventuele hybride functie heeft consequenties voor de vereiste constructieve sterkte en betrouwbaarheid sluiten van de keringen.

3.4.5 Ruimtebeslag

Een nieuw afsluitmiddel in de Oude Maas vraagt om ruimtebeslag, evenals het aan te leggen sluisencomplex.

3.4.6 Kosten

De kosten voor deze maatregel bestaan uit de aanleg van een beweegbare zoutkering en twee binnenvaartsluizen. Voor een beweegbare zoutkering zijn de geschatte kosten ongeveer € 300 miljoen, zie Paragraaf 3.3.6.

Een globale kostenschatting baseren we op de geschatte nominale kosten uit Spoor II van het KP ZSS, systeemanalyse waterveiligheid voor de Rijn-Maasmonding (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2023). Daarin staan onder andere de volgende getallen voor vervanging van binnenvaartsluizen:

- Beatrixsluizen, per schutsluis: € 144 miljoen
- Marijkesluizen, per schutsluis: € 195 miljoen
- Irenesluizen, per schutsluis: € 227-235 miljoen
- Prins Bernhardsluizen, per schutsluis: € 253-257 miljoen
- Schutsluis Driel: € 172 miljoen
- Volkeraksluizen, per grote sluiskolk: € 357-376 miljoen

De sluizen in de Oude Maas en het Beerkanaal moeten grote binnenvaartschepen kunnen bedienen. Uitgangspunt in Deltares (2024a) is een sluiskolk die geschikt is voor CEMT-klasse VIc: 6-baks duwstel, wat nog groter is dan de Volkeraksluizen (klasse VIb, 4-baks duwstellen). Inschatting is daarom een investeringsprijs van € 400 miljoen per sluis, onder de aanname dat nieuwe aanleg even duur is als vervanging (sloop plus nieuwe aanleg).

De totale investeringskosten voor een zoutkering en twee schutsluizen komen daarmee op € 1,1 miljard. Deze investeringskosten zijn exclusief eventuele financiële implicaties van incidentele afsluitingen van de Oude Maas voor de scheepvaartsector en aanverwante economische activiteiten.

3.5 Aanvullende (kleine) bouwstenen

Tot slot zijn er kleinere bouwstenen mogelijk die kunnen helpen bij het (lokaal) beperken van de verzilting, namelijk een (tijdelijke) onderwaterdrempel in de Nieuwe Waterweg of Nieuwe Maas, het verplaatsen van stuw Hagestein en het verdiepen van de Noord. Hieronder worden nog vier bouwstenen en hun effect op de verzilting beknopt toegelicht:

3.5.1 Incidenteel afsluiten Spui

Halverwege het Spui bevindt zich de Bernisse-inlaat, waar water wordt ingenomen voor de zoetwaterbuffer in het Brielse Meer. Verzilting kan op deze plaats optreden bij zeer lage rivierafvoeren (afvoergedreven verzilting) of bij een combinatie van een vrij lage rivierafvoer met stormopzet vanaf zee (opzetgedreven verzilting). Bij dreigende verzilting van de Bernisse-inlaat kan een tijdelijke afsluiting aan het noordelijke uiteinde van het Spui een effectieve maatregel zijn, waarmee wordt verhinderd dat zout water vanaf de Oude Maas het Spui in stroomt. De impact van deze maatregel op scheepvaart is veel kleiner dan van een tijdelijke afsluiting van de druk bevaren Oude Maas. Deze bouwsteen is niet verder uitgewerkt binnen het voorliggende rapport, omdat deze binnen de scope valt van een gelijktijdig lopende studie van HKV in opdracht van Rijkswaterstaat WNZ.

3.5.2 Onderwaterdrempel

Een onderwaterdrempel is een lokale verhoging van de bodemhoogte in de rivier met een lengte van orde een kilometer. Omdat het zoute zeewater zich voornamelijk nabij de bodem bevindt, kan zo'n onderwaterdrempel een deel van het zoute water tegenhouden. In de Mississippi wordt succesvol gebruik gemaakt van een tijdelijke onderwaterdrempel van lokaal sediment, om tijdens lage afvoer periodes de zoutindringing te beperken. Naar verwachting verdwijnt (een deel van) de drempel op natuurlijke wijze bij hoge rivierafvoeren. Op basis van resultaten uit Hendrickx e.a. (2024) voor geïdealiseerde estuaria, is binnen Deltares (2024f) de potentiële effectiviteit van de maatregel verkend. Hieruit blijkt dat een onderwaterdrempel in de Nieuwe Maas/Nieuwe Waterweg een potentieel effectieve maatregel kan zijn. De locatie van de drempel zal naar eerste schatting ergens zeewaarts van de Erasmusbrug moeten liggen, bijvoorbeeld rond de Waalhaven of verder zeewaarts, in de monding van de Nieuwe Maas (waar de Nieuwe Maas en Oude Maas samen komen). De hoogte zal naar schatting minimaal 30% van de waterdiepte moeten bedragen om voldoende effectief te zijn. Hiermee kan in potentie de indringingslengte met 5 à 20% beperkt worden. Dit betekent dat dat verzilting van de Noordrand pas bij veel lagere Lobith afvoeren optreedt. Door ook een drempel in de Oude Maas te plaatsen (of één gezamenlijke drempel in de Nieuwe Waterweg), kan mogelijk ook de verzilting richting het Spui significant beperkt worden.

Dit lijkt daarmee een kansrijke maatregel om verder te verkennen. Voornaamste aandachtspunt bij een eventuele vervolgvormgeving is het effect van de maatregel tijdens windopzet. De waterkolom raakt dan grotendeels of volledig gemengd en er stroomt door de verhoogde waterstand een grote hoeveelheid zeewater het systeem in. Hierdoor kan het zoute zeewater over de drempel stromen en daar mogelijk achter blijven hangen.

3.5.3 Aanpassingen aan de Lek

Het verschil in fase tussen in en uitstroom van de Hollandsche IJssel met de Nieuwe Maas is erg belangrijk voor het beperken van de verzilting van de Hollandsche IJssel (Deltares, 2015 en De Wilde, 2024). De Lek heeft een veel kleiner faseverschil met de Nieuwe Maas. Door de Lek te verondiepen of te verkorten, zou dit faseverschil verschoven kunnen worden naar een (vanuit zoutindringing) gunstiger verschil. Door de Lek met 8 km in te korten, komt er naar schatting 20% minder zout binnen (De Wilde, 2024). Als stuw Hagestein technisch of functioneel einde levensduur is, zou overwogen kunnen worden om de stuw en het schutsluizencomplex zeewaarts te verplaatsen of een extra kunstwerk benedenstrooms van stuw Hagestein te plaatsen. Als de verplaatste stuw Hagestein stroomafwaarts van de Beatrixsluizen wordt gepositioneerd, betekent dit dat veel scheepvaart tussen Rotterdam en het Amsterdam-Rijnkanaal stuw Hagestein moet passeren, waar dit nu niet het geval is. Het aantal passages van stuw Hagestein gaat dan van 10-40 per dag naar 50-200 per dag.

3.5.4 Verdiepen van de Noord

Een tweede mogelijke optimalisatie is het verdiepen van de Noord. Hiermee wordt de afvoerverdeling tussen de Noord- en de Zuidrand beïnvloed. Door de Noord dieper te maken, stroomt er meer water via de Nieuwe Maas en neemt daar de verzilting af. Het verondiepen van de Nieuwe Waterweg met 1 m, heeft een even sterk effect op de verzilting langs de noordrand als het verdiepen van de Noord met 2,5 m (Biemond et al., 2024), uitgaande van lineaire schaling. Belangrijk nadeel van deze maatregel is dat de verzilting richting de Oude Maas toeneemt. Deze toename is echter veel kleiner dan de afname aan de Noordrand. Of verdieping van de Noord realistisch is, vraagt om nader onderzoek. Aandachtspunten zijn de stabiliteit van keringen en de aanwezigheid van tunnels onder de rivier.

4 Alternatieve strategieën Rijn-Maasmonding

Dit hoofdstuk beschrijft het functioneren van bouwstenen binnen alternatieve strategieën voor de inrichting van de Rijn-Maasmonding. Deze alternatieve strategieën zijn ontwikkeld binnen de Oplossingsrichting Beschermen uit het KP ZSS Spoor IV (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2024a). De systeemkeuzes binnen deze strategieën zijn voornamelijk gemaakt om de waterveiligheid te behouden bij sterke zeespiegelstijging (met 2 m ZSS in 2100 tot 5,4 m ZSS in 2200). In dit hoofdstuk wordt een verdiepingsslag aangebracht voor het aspect zoetwaterbeschikbaarheid (bij Hd2100 met 0,8 m ZSS).

4.1 Alternatieve strategieën

We beschouwen twee alternatieve strategieën uit het KP ZSS: het gesloten zeefront (de Strategieën A1 en A2 uit Figuur 2-1) en de afgesloten deltapolder met open zuidrand (Strategie B2 uit Figuur 2-1).

In de strategieën met een “gesloten zeefront” uit het KP ZSS is het principe dat de gehele Rijn-Maasmonding (RMM) en Zeeuwse Delta (ZD) een afgesloten zoetwaterbuffer vormen met een totaal oppervlak van 1000 km². Het verschil tussen Strategie A1 en A2 is dat in A1 het streefpeil in het gehele afgesloten binnenwater gelijk blijft aan het huidige gemiddelde peil van NAP+0 m en in A2 meegroeit met de ZSS. Bij een gesloten zeefront vormt het afvoeren van hoge rivierafvoeren de voornaamste uitdaging. In Strategie A2 kan meer gespuid worden richting zee onder vrij verval, waar in Strategie A1 steeds meer gepompt moet worden naarmate de zeespiegel stijgt. In Strategie A1 is volgens Kennisprogramma Zeespiegelstijging (2024a) een gemaaicapaciteit van 5.000 m³/s nodig in de Rijn-Maasmonding bij een ZSS van 2 m en 15.500 m³/s bij een ZSS van 5,4 m. In Strategie A2 blijft dit ‘beperkt’ tot 3.000 m³/s. Bij een gesloten zeefront zal de overslag van zee- naar binnenvaart grotendeels via land plaatsvinden (minder schutten) of “gebruik maken van slimme sluisontwerpen waardoor de zoutindringing door het schutten marginaal is” (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2024a). De zoutindringing en te overwegen maatregelen worden in dit memo verder verkend. We hebben daarbij onderscheid gemaakt tussen drie inrichtingsvarianten: dammen met zeesluizen, dammen met binnenvaartsluizen of geheel gesloten dammen zonder schutsluizen.

Als tweede beschouwen we de Strategie “afsluitbaar open” met een open zuidrand in plaats van een open noordrand (Strategie B2, zie Figuur 2-1). Er wordt een afvoercorridor aangelegd vanaf de Waal, via de Boven-Merwede, Nieuwe Merwede naar het Hollands Diep en het Haringvliet. De Rijn-Maasmonding verandert in een afgesloten “deltapolder” met een beheerst waterpeil, slechts toegankelijk voor scheepvaart via schutsluizen. Bij de sluizen en dammen komen voorzieningen voor spuien en/of malen. Binnen deze Strategie zijn combinaties van bouwstenen uitgewerkt, namelijk (1) de afgesloten binnenpolder in combinatie met een open Haringvliet (Paragraaf 4.3) en (2) met een open Grevelingen (Paragraaf 4.4).

4.2 Strategie A1 en A2: Gesloten zeefront met of zonder schutsluizen

4.2.1 Beschrijving inrichtingsvariant

Bij de Strategieën A1 en A2 van het KP ZSS wordt gekozen voor een afgesloten zeefront met aan te leggen dammen in de Oude Maas, Nieuwe Maas en het Beerkanaal die passeerbaar zijn voor schepen via zeesluizen (vergelijkbaar met IJmuiden, Terneuzen of Antwerpen). In deze studie beschouwen we die Strategie als inrichtingsvariant, maar voegen we hier twee

extra bouwstenen aan toe: dammen met binnenvaartsluizen en dammen zonder schutsluizen. Vanwege de sterke overeenkomsten tussen de teksten voor deze drie inrichtingsvarianten behandelen we ze gezamenlijk in deze paragraaf.

Door de dammen en schutsluizen in de Oude en Nieuwe Maas te leggen, en niet in de Nieuwe Waterweg, kunnen zeeschepen nog een groot deel van de Rotterdamse haven bereiken zonder schutsluizen te moeten passeren. Het deel van de Rijn-Maasmonding buiten de dammen mag zout worden omdat zich hier weinig inlaatpunten bevinden. De huidige inlaatlocaties Schiegemaaal (Delfland) en Pernis (Hollandse Delta) komen te vervallen, omdat deze zich buiten de gekozen locaties voor de sluizencomplexen bevinden. Ook in de huidige situatie zijn dit echter al locaties die tijdens lage afvoeren beperkt inzetbaar zijn als zoetwaterinnamepunten.

Scheepvaart die verder de Rijn-Maasmonding in wil varen, krijgt te maken met dammen, al dan niet voorzien van een sluizencomplex. Hiervoor zijn drie inrichtingsvarianten uitgewerkt:

1. **Inrichtingsvariant met zeesluizen.** De zeesluis in de Nieuwe Maas is geplaatst op de locatie zoals voorgesteld in de motie Geurts (Plan Sluizen/Spaargaren) (Rijkswaterstaat, 2015), net ten westen van de Beneluxtunnel. Via deze zeesluis blijven de Eemhaven en Waalhaven bereikbaar, ook voor zeeschepen. Via de zeesluis in de Oude Maas kan zeevaart nog de havens van Dordrecht en Moerdijk bereiken. Daarnaast wordt een dam aangelegd om het Beerkanaal te scheiden van het Hartelkanaal. Deze wordt voorzien van een binnenvaartsluis. De huidige Rozenburgsesluis blijft bestaan, dit is eveneens een binnenvaartsluis.
2. **Inrichtingsvariant met binnenvaartsluizen.** Bij deze inrichtingsvariant wordt niet gekozen voor zeesluizen, maar voor binnenvaartsluizen. Zeeschepen kunnen deze niet meer passeren, maar binnenvaartschepen nog wel, zodat er nog mogelijkheden zijn voor binnenvaart om de Nieuwe Waterweg te bereiken. Toch zal in deze variant in sterkere mate overslag via land gaan plaatsvinden. Daarom is de binnenvaartsluis op de Nieuwe Maas geplaatst tussen de Eemhaven (zodat ook dit havenbekken geschikt kan worden gemaakt voor zeevaart) en de Waalhaven (dit havenbekken wordt dan bestemd voor binnenvaart). Overslag tussen zeevaart en binnenvaart kan plaatsvinden over de Heijplaat. Daarnaast is overslag mogelijk in het Europoortgebied, met de zeeschepen aan de zeezijde (het Botlekgebied, de havens aan het Calandkanaal en de Amazonehaven) en de binnenvaartschepen aan de rivierzijde (Hartelkanaal, Dintelhaven, Mississippihaven en Hartelhaven). Ook in de Oude Maas en het Beerkanaal komt een binnenvaartsluis. Hierdoor wordt Moerdijk onbereikbaar voor zeeschepen. De huidige Rozenburgsesluis (binnenvaartsluis) blijft bestaan.
3. **Inrichtingsvariant zonder schutsluizen.** Bij keuze voor deze bouwsteen worden de sluizen vervangen door volledig gesloten dammen. Hierdoor zijn ze niet meer passeerbaar voor schepen en wordt een nog grotere blokkade opgeworpen voor ecologie. Het aanbrengen van een gesloten dam in de Nieuwe Maas, Oude Maas en Beerkanaal maakt een nagenoeg volledige zoet/zout-scheiding mogelijk, alhoewel zoute kwel dan nog wel weggespoeld dient te worden. Dat kan gerealiseerd worden met een beperkt doorspoeldebiet. Voor de overslag over land gelden dezelfde mogelijkheden als beschreven bij de binnenvaartsluizen. De huidige Rozenburgsesluis blijft bestaan om voor bijzondere situaties nog enkele scheepsbewegingen mogelijk te maken, maar zonder significante zoutflux.

Voor het Haringvliet blijft het Kier-regime in stand, waarbij het zout niet voorbij de lijn Spui-Middelharnis komt. Figuur 4-1 geeft een overzicht van de bouwstenen in deze inrichtingsvariant.



Figuur 4-1 Bouwstenen bij een gesloten zeefront met zeesluizen, binnenvaartsluizen of geheel gesloten dammen.

In tegenstelling tot de KP ZSS Strategieën (A1 en A2) worden de deltawateren ten zuiden van de Volkerakdam (Volkerak-Zoommeer, Grevelingen, Oosterschelde, Veerse Meer, Westerschelde) niet beschouwd in de inrichtingsvarianten voor de Rijn-Maasmonding. In de KP ZSS Strategieën A1 en A2 worden deze wateren ook afgesloten en is hiervoor aanvoer van rivierwater nodig. Verwacht mag worden dat hierdoor minder zoetwater in/voor de Rijn-Maasmonding beschikbaar zal zijn dan in de hier uitgewerkte varianten. Aangenomen wordt dat de huidige maximale aanvoer naar het Volkerak-Zoommeer ($50 \text{ m}^3/\text{s}$ conform vigerende Waterakkoord) gehandhaafd blijft. Ook de mogelijkheid van waterberging op deze deltawateren ten behoeve van waterveiligheid is in de hier uitgewerkte inrichtingsvarianten A1 en A2 niet beschouwd.

Figuur 4-2, Figuur 4-3 en Figuur 4-4 tonen de zoutindringing voor een T=20 lage afvoersituatie in Hd2100 voor de inrichtingsvarianten zeesluizen, binnenvaartsluizen en overslagdammen.



Figuur 4-2 Indicatie van de zoutindringing in het scenario Hd2100 met zeesluizen.



Figuur 4-3 Indicatie van de zoutindringing in het scenario Hd2100 met binnenvaartsluizen.



Figuur 4-4 Indicatie van de zoutindringing in het scenario Hd2100 met overslagdammen.

4.2.2

Zoetwaterbalans

Het toekomstbeeld in Strategie A1 is een zoet binnenwater met een streefpeil van NAP+0 m. Via zeesluizen, en in mindere mate via binnenvaartsluizen, zal echter veel zout binnendringen. Het zout aan de binnenzijde van het sluizencomplex verspreidt zich in bovenstroomse richting. Zonder getijwerking en met beperkte doorspoeling neemt de menging in het systeem af, en ontstaat er een sterk gelaagde situatie met een zouttong bij de bodem die relatief makkelijk stroomopwaarts kan bewegen. De situatie wordt dan vergelijkbaar met de huidige situatie in het Kanaal Gent-Terneuzen of het Noordzeekanaal. Zie Bijlage C.3 voor een beschrijving van de zoutdynamiek in deze kanalen.

De benodigde rivierafvoer (doorspoeldebieten) voor de inrichtingsvarianten met schutsluizen is ingeschat op basis van berekeningen met een dispersieformule en de Zeesluisformulering. De inkomende zoutvracht is voornamelijk afhankelijk van de sluisdimensies, schutfrequentie, deuropentijden en de waterstanden en het zoutgehalte aan weerszijden van de sluizen in de Nieuwe Maas en Oude Maas. De uitgaande zoutvracht volgt uit de vermenigvuldiging van de rivierafvoer en het zoutgehalte aan de binnenzijde van de sluizen. In de berekeningen is het uitgangspunt gehanteerd dat een selectieve onttrekking wordt toegepast op beide locaties. Daarbij wordt relatief zout water bij de bodem onttrokken, waardoor de efficiëntie van de zoutafvoer kan worden verhoogd. In de berekeningen is hiervoor een factor 2 aangehouden ten opzichte van het dieptegemiddelde zoutgehalte.

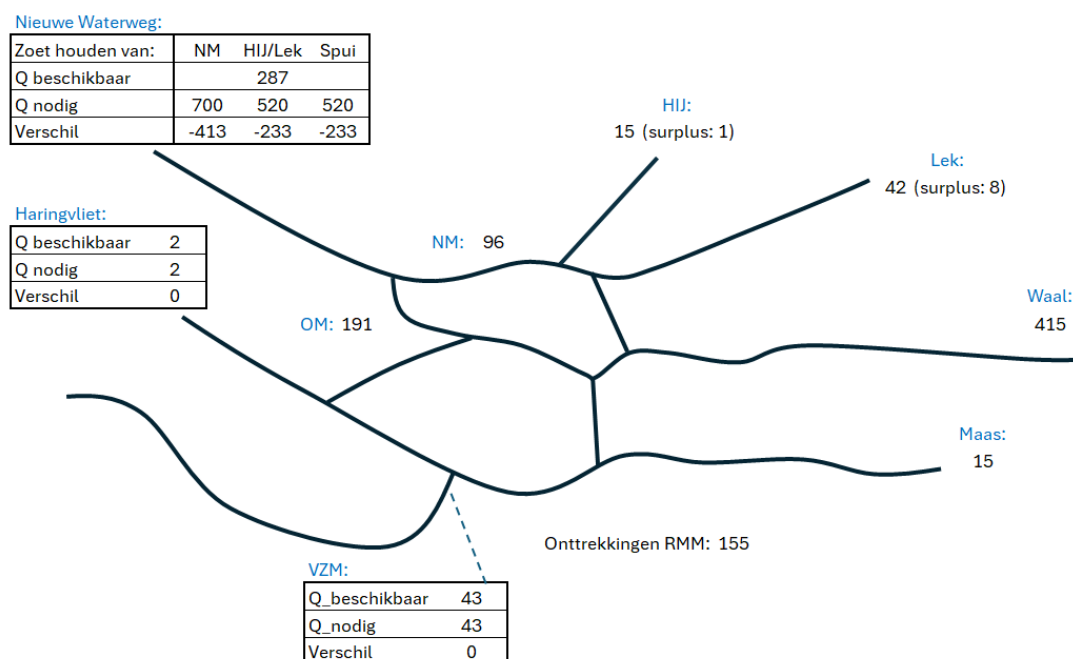
Vanaf de binnenzijde van de sluizen neemt het zoutgehalte langzaam af in stroomopwaartse richting. De zoutgradiënt is afhankelijk van de rivierafvoer en de dichtheidsgradiënt die een stroomopwaarts optrekkende zouttong veroorzaakt. In de berekeningen is dit proces vereenvoudigd door gerekend met een dispersieformule. Uitgangspunt is dat de mondingen van de Lek en het Spui zoet moeten blijven (200 mg Cl l^{-1}). Hoe dichterbij het sluizencomplex ligt, hoe minder ruimte er is voor een relatief hoge concentratie aan de binnenzijde en daarmee hoe hoger het benodigde doorspoeldebiet. De afstand tussen de monding van de Lek en de beoogde locatie van de sluizen in de Nieuwe Maas is 20 km (zeesluis bij Beneluxtunnel) of 17 km (binnenvaartsluizen bij de Heijplaat). Dat geeft meer ruimte dan de afstand van slechts 8 km tussen de sluizen in de Oude Maas en de monding van het Spui. Vooral een zeesluis in de Oude Maas vraagt om een hoge rivierafvoer. Details over de rekenmethode, de aannamen en resultaten zijn te vinden in bijlage C.4.

De getallen zijn bepaald op basis van bestaande berekeningen zonder het effect van zeespiegelstijging. Bij optreden van zeespiegelstijging zal steeds meer (zout) schutdebiet naar binnen komen. In het ontwerp van de sluizen en de selectieve onttrekking (met een zoutvang) kan ervoor gezorgd worden dat dit zoute schutwater wordt opgevangen in de zoutvang en niet verder stroomopwaarts gaat. Als dit onvoldoende goed lukt, is bij zeespiegelstijging een groter deel van de rivierafvoer nodig voor doorspoeling dan in het vervolg van deze paragraaf gepresenteerd.

Als eerste beschouwen we de bouwsteen met **zeesluizen**. De benodigde doorspoeldebieten (rivierafvoeren) om bij aanleg van zeesluizen de locaties monding Lek en monding Spui zoet te houden zijn als volgt:

- Panamax+ zeesluis & 6-baks duwvaart binnenvaartsluis met selectieve onttrekking in de Nieuwe Maas t.p.v. de Beneluxtunnel: 190 m³/s;
- Panamax zeesluis met selectieve onttrekking in de Oude Maas: 310 m³/s;
- 6-baks duwvaart binnenvaartsluizen Rozenburg & Beerkanaal: 20 m³/s;
- Zoute kwel: geen aanvullende doorspoeling nodig;
- Totaal: 520 m³/s.

Andere inlaatpunten rond de Nieuwe Maas (Brielselaan, Leuvehaven, Schilthuis en verder landinwaarts) en Oude Maas (Spijkenisse) zijn bij keuze voor zeesluizen niet meer beschikbaar, tenzij een hoger chloridegehalte dan 200 mg/l wordt geaccepteerd of nog meer rivierafvoer kan worden gerealiseerd. Inlaatpunten langs de Hollandse IJssel zijn op basis van deze verkenning nog wel bruikbaar als 520 m³/s rivierafvoer beschikbaar is.



Figuur 4-5 Zoetwaterbalans voor de inrichtingsvariant met gesloten zeefront met zeesluizen in een T=20 droog jaar voor scenario Hd in het zichtjaar 2100.

De waterbalans in Figuur 4-5 laat zien dat in Hd2100 slechts 287 m³/s beschikbaar is om via de Nieuwe Waterweg af te voeren. Dit is 248 m³/s minder dan het benodigde doorspoeldebiet van 520 m³/s. Voor de inlaatpunten langs de Nieuwe Maas is nog meer afvoer nodig. Hier staat daarom een getal van 700 m³/s in de waterbalans, wat enkel bedoeld is als hoger getal dan 520 m³/s zonder verdere onderbouwing. Uit deze waterbalans volgt de verwachting dat een zoete Rijn-Maasmonding niet te combineren is met intensief gebruikte zeesluizen

(voorzien van een selectieve onttrekking) bij een hoog en droog scenario Hd in het zichtjaar 2100. N.B. Bellenschermen kunnen de zoutindringing reduceren, maar deze zijn in diepe zeesluizen erg kostbaar en vragen zeer veel energie. Daarom zijn deze vooralsnog buiten beschouwing gelaten.

Als tweede beschouwen we de bouwsteen met **binnenvaartsluizen**. Deze bouwsteen is niet fundamenteel anders dan met zeesluizen, maar er zijn twee verschillen. Ten eerste is de bron van zout veel kleiner bij relatief ondiepe binnenvaartsluizen in vergelijking met diepe, brede zeesluizen. Ten tweede kunnen de vaarwegen ten oosten van de sluizen (Nieuwe Maas, Oude Maas, Dordtse Kil) verondiept worden. Ook een versmalling van deze vaarwegen is te overwegen. In ondieper water is zoutindringing via dichtheidsstroming veel makkelijker tegen te gaan dan in dieper water. Vergelijk de efficiëntie van doorspoelen in het diepe en dus brakke Noordzeekanaal met het veel ondiepere en mede daarom zoetere Amsterdam-Rijnkanaal, waar zout niet vaak voorbij Diemen komt ondanks een relatief beperkt doorspoeldebiet van orde 25 m³/s.

Ook in het ongeveer 6 m diepe Antwerps Kanaalpand tussen de Kreekraksluizen en de diepere zoute havendokken bij Antwerpen is een sterke zoutgradiënt mogelijk van ongeveer 3500 mg/l naar 350 mg/l chloride over een afstand van 7 km. Jaargemiddeld wordt bij de Kreekraksluizen slechts ongeveer 2 tot 8 m³/s afgevoerd (o.b.v. data tussen 1988 en 2009) (Deltares, 2013).

Via een pakket van bronmaatregelen bij de sluizen kan gestreefd worden naar een (zoveel mogelijk) gesloten zoutbalans, waarbij de export van zout door doorspoeling gelijk is aan de import van zout via kolkuitwisseling en het schutdebiet. De export van zout kan worden verhoogd door een hoger doorspoeldebiet en/of door selectieve onttrekking van zout water bij de bodem. De import van zout kan worden verlaagd door maatregelen als een drempel (al dan niet beweegbaar), bellenschermen aan beide sluishoofden, korte deuropentijden, werken met bekkens en het zoveel mogelijk beperken van de schutfrequentie. Dergelijke bronmaatregelen zijn veelal effectiever bij binnenvaartsluizen dan bij zeesluizen, en daarnaast veel minder kostbaar.

Hoewel de uitdagingen bij binnenvaartsluizen kleiner zijn dan bij zeesluizen, is het zoet houden van het binnenwater ook bij keuze voor binnenvaartsluizen uitdagend. Aandachtspunten zijn spaarzaam gebruik van de binnenvaartsluizen, verondiepen en eventueel versmallen van de vaarwegen en toepassen van voldoende doorspoeling. De benodigde doorspoeling (rivierafvoeren) via Oude Maas en Nieuwe Maas is ingeschat in Bijlage C.4.

De benodigde doorspoeldebieten (rivierafvoeren) om bij een gesloten zeefront met binnenvaartsluizen de locaties monding Lek en monding Spui zoet te houden zijn als volgt:

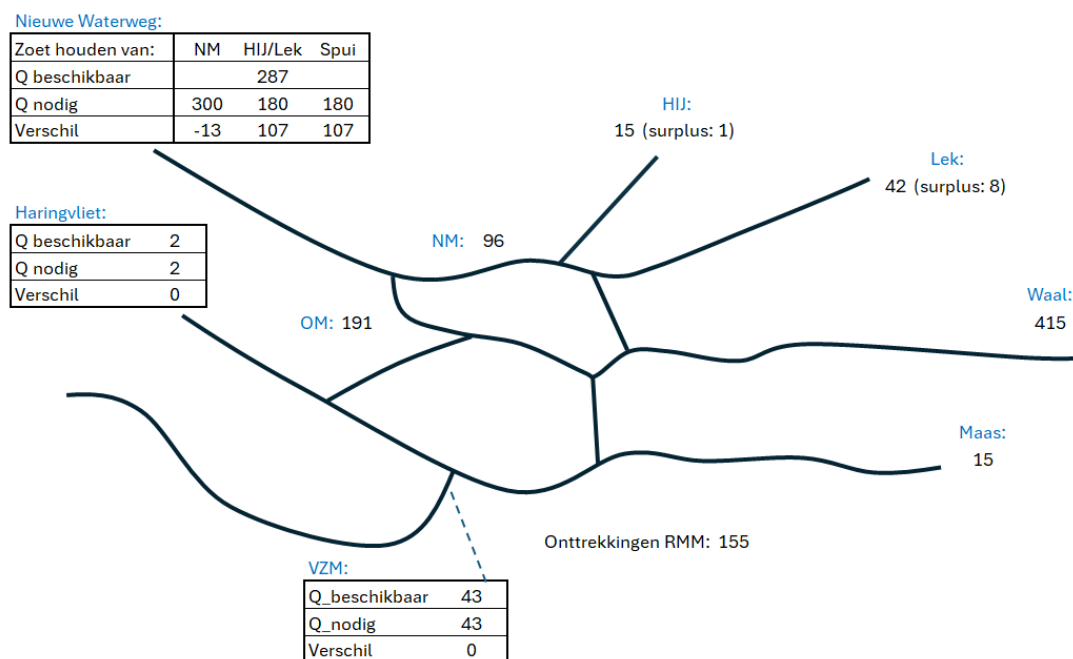
- Twee keer 6-baks duwvaart binnenvaartsluizen in de Nieuwe Maas: 130 m³/s
- Drie 6-baks duwvaart binnenvaartsluizen Oude Maas, Rozenburg & Beerkanaal: 50 m³/s
- Zoute kwel: geen aanvullende doorspoeling nodig
- Totaal: 180 m³/s

Bijlage C.4 is gebaseerd op eerdere berekeningen waarin het uitgangspunt is gehanteerd dat alle sluizen 12 keer per dag gebruikt worden (12 cycli, dus 12 keer in beide richtingen). Voor zeesluizen is dit een realistisch uitgangspunt. Ook voor binnenvaartsluizen in de Oude Maas is dit een juiste orde van grootte. Alleen voor binnenvaartsluizen in de Nieuwe Maas is 2 schutsluizen maal 12 schuttingen aan de lage kant, gelet op het huidige aantal passages. Op basis van scheepvaartregistraties bij de Beneluxtunnel zou de gemiddelde sluisbezetting neerkomen op 1,4 schepen per schutting, op basis van registraties bij de Maastunnel loopt dit op naar 2,2. Bij de Beneluxtunnel bestaat een aanzienlijk deel van de schepen nog uit

zeevaart, bij de Maastunnel vormt binnenvaart de hoofdmoot. De in de huidige studie aangehouden locatie van de binnenvaartsluizen (tussen de Eemhaven en de Waalhaven) ligt daar tussenin. Gemiddeld ongeveer 2 schepen per schutting is meer dan gebruikelijk bij schutsluizen. De verwachting is daarom dat er meer schuttingen nodig zijn dan in de berekeningen waarop Bijlage C.4 is gebaseerd. De benodigde rivierafvoer in de Nieuwe Maas van 130 m³/s is daarom wellicht aan de lage kant, en zou ook richting 200 m³/s kunnen gaan, waardoor de totale benodigde NWW-afvoer op 250 m³/s uitkomt. Dit zou nog steeds duidelijk minder zijn dan de orde 500-600 m³/s voor de huidige inrichting met Hd2100 (Figuur 2-4).

Een variant met alleen binnenvaartsluizen lijkt te leiden tot een doorspoelbehoefte die kleiner is dan de beschikbare rivierafvoer in het scenario Hd2100 bij een herhalingstijd van 20 jaar, gegeven de uitgangspunten van effectieve bronmaatregelen bij de Oude Maas, een goed functionerende selectieve onttrekking in beide riviertakken en circa 12 schuttingen per dag per sluis. Er blijft dan nog ruim 100 m³/s over voor aanvullende doorspoeling van Nieuwe Waterweg, Haringvliet of Grevelingen, of voor ander nuttig gebruik om aan de watervraag te voldoen. Een verdere reductie van de schutfrequentie, optimalisatie van bronmaatregelen of verondieping van de huidige diepe vaarwegen naar binnenvaartwegen kunnen leiden tot een verdere verbetering van de zoetwaterbalans.

Voor het zoet houden van de inlaatpunten langs de Nieuwe Maas is geen berekening uitgevoerd. Vanwege de korte afstand tot het sluizencomplex is de verwachting dat dit aanzienlijk meer zal zijn dan 130 m³/s die berekend is om de monding van de Lek zoet te houden. Grofweg is hier voor de Nieuwe Maas een benodigd debiet van 300 m³/s ingeschat. Dit is slechts een eerste indicatie zonder verdere onderbouwing. Mogelijk worden voornamelijk de inlaatpunten dicht op de schutsluizen (Parksluizen, Brielselaan) onbruikbaar in deze inrichtingsvariant.

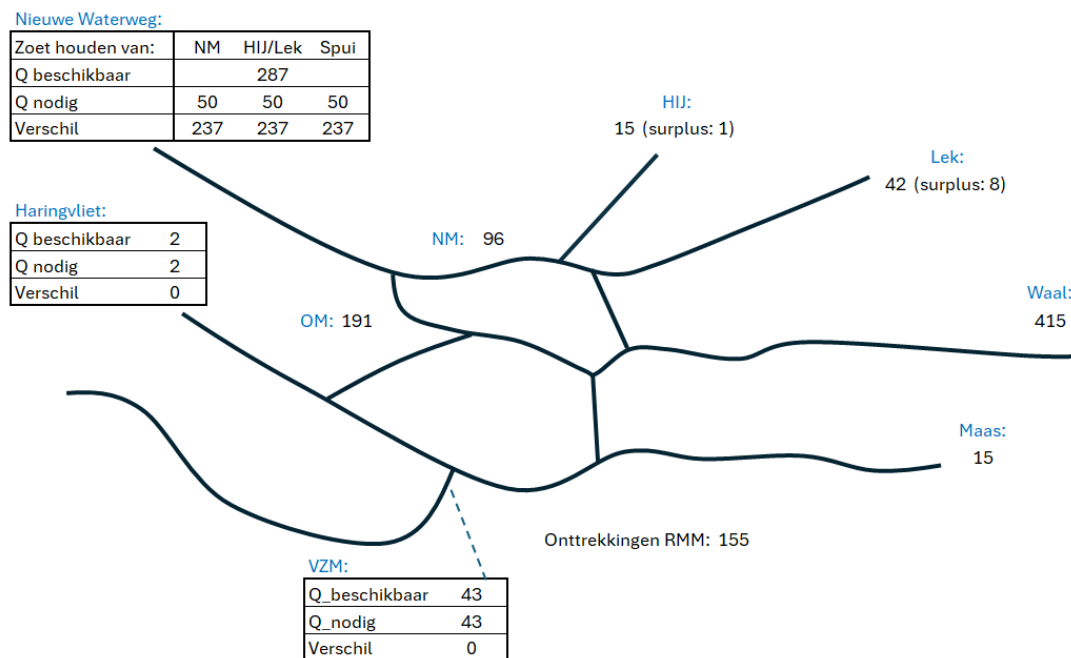


Figuur 4-6 Zoetwaterbalans voor de inrichtingsvariant met gesloten zeefront met binnenvaartsluizen in een T=20 droog jaar voor scenario Hd in het zichtjaar 2100.

Tot slot beschouwen we de inrichtingsvariant met **dammen zonder schutsluizen**. Vergelijkbaar met de variant met binnenvaartsluizen blijft innemen van zoetwater mogelijk bij

innamelocaties als Spijkenisse, Bernisse, Brielselaan, Leuvehaven, Schilthuis en verder landinwaarts. Alleen de huidige inlaatlocaties buiten de dammen, Schiegemaal (Delfland) en Pernis (Hollandse Delta), komen te vervallen.

Om doorspoeling te beperken kunnen vaarwegen (net als bij de inrichtingsvariant met binnenvaartsluizen) worden verondiept tot op de vereiste diepte voor binnenvaart. Alleen schuttingen via de Rozenburgsesluis vragen om enige rivierafvoer door de Oude Maas en Hartelkanaal, maar de gedachte achter deze inrichtingsvariant is dat de Rozenburgsesluis slechts incidenteel gebruikt wordt. Wel blijft enige aanvullende doorspoeling nodig voor het tegengaan van het effect van zoute kwel. Ook kan waterkwaliteit een bepaalde doorspoeling vragen die mogelijk groter is dan de beperkte benodigde rivierafvoeren zoals getoond in de waterbalans in Figuur 4-7, hoewel ook de onttrekkingen van 198 m³/s binnen de Rijn-Maasmonding (het getal voor Hd2100) voor de nodige doorspoeling zorgen.



Figuur 4-7 Zoetwaterbalans voor de inrichtingsvariant met gesloten zeefront zonder schutsluizen in een T=20 droog jaar voor scenario Hd in het zichtjaar 2100.

4.2.3 Scheepvaart

Zeevaart kan het gebied buiten de sluizen nog zonder hinder bereiken. Bij de inrichtingsvariant met zeesluizen gaat dit om de Maasvlakte en Botlek. Zeeschepen die de Eemhaven en Waalhaven willen bereiken, moeten de zeesluis in de Nieuwe Maas passeren, schepen naar Dordrecht en Moerdijk de zeesluis in de Oude Maas. Voor zowel zeevaart als binnenvaart zal er sprake zijn van langere wachttijden.

Bij de keuze voor binnenvaartsluizen kan zeevaart de Waalhaven en de havens van Dordrecht en Moerdijk niet meer bereiken. Verder is de cruiseterminal in het centrum niet meer bereikbaar. Daarnaast kan de bereikbaarheid van de maritieme sector van Rijnmond-Drechtsteden beperkt worden, zoals toegelicht bij de bouwsteen “verondiepen” (Paragraaf 3.2.2). De impact van de aanleg van dammen met binnenvaartsluizen zal naar verwachting groter zijn dan het verondiepen van de vaarwegen. Binnenvaart zal te maken krijgen met extra wachttijd.

Er is overslag nodig naar binnenvaartschepen over land, of binnenvaartschepen moeten naar de buitenhaven varen en daarbij de binnenvaartsluizen passeren (Nieuwe Waterweg en daaraan aangesloten kanalen en dokken). Het voordeel van binnenvaartsluizen is dat de schutcycli overwegend korter duren dan bij zeesluizen. Ook bij zeesluizen krijgt overslag over land steeds meer de voorkeur vanwege het effect van schutbewegingen op de zoetwaterbeschikbaarheid. Bij dammen zonder schutsluizen wordt overslag over land de enige mogelijkheid.

Het verschil tussen de Strategieën A1 en A2 is een groter gemiddeld peilverschil tussen Nieuwe Waterweg en binnenwater bij Strategie A1. Dit houdt in dat nivelleertijden wat langer worden. Ook bepaalde bronmaatregelen tegen zoutindringing bij sluizen kunnen de afwikkeling bij scheepvaart bij sluizen vertragen.

4.2.4 Waterkwaliteit en ecologie

De volgende veranderingen hebben impact op waterkwaliteit en ecologie:

- Omslag van een geleidelijke zout/zoet-gradiënt naar een overwegend zoet systeem;
- Het nagenoeg wegvallen van de verticale getijbeweging (waterstanden);
- Het nagenoeg wegvallen van de horizontale getijbeweging (stroming);
- Seizoensvariaties in het peil in de afgesloten Rijn-Maasmonding (peilregime);
- Verandering van rivierafvoer door de Rijn-Maasmonding;
- Aanwezigheid van fysieke barrières.

Deze veranderingen hebben invloed op:

- Debieten en verblijftijd;
- Waterkwaliteitsparameters: watertemperatuur, stratificatie en nutriëntgehalten;
- De connectiviteit binnen het systeem (o.a. vismigratie);
- Het karakter van (zoetwater)getijdenatuurgebieden.

Debieten en verblijftijd

De gemiddelde verblijftijd van water in de Rijn-Maasmonding is afhankelijk van de benodigde doorspoeling en de getijdynamiek. Zeker in het westelijke deel van de Rijn-Maasmonding zijn de bruto debieten door het getij overwegend groter dan de rivierafvoer. Bijvoorbeeld in de Nieuwe Maas variëren de debieten met een amplitude van orde 3000 m³/s rondom de gemiddelde rivierafvoer, in de Nieuwe Waterweg is dit zelfs orde 6000 m³/s. Dit is duidelijk groter dan de gemiddelde rivierafvoer door deze riviertakken in tijden van droogte.

Aanleg van dammen met schutsluizen neemt deze sterke getijdynamiek weg. De enige resterende dynamiek is het gevolg van doorspoeldebieten (groot bij zeesluizen, klein bij gesloten dammen) en van translatiegolven die een relatie hebben met starten en stoppen van spuien en malen bij de dammen. Deze translatiegolven zijn ook aanwezig in het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal. Tijdens laagwater op zee wordt gespuid onder vrij verval. Het water in het Noordzeekanaal stroomt dan richting IJmuiden. Als de zeewaterstand te hoog wordt om te spuien, worden de spuikokers gesloten. Het stromende water op het Noordzeekanaal hoopt zich dan op bij IJmuiden, wat leidt tot een waterstandsverhoging. Na enige tijd keert de stroomrichting om, en beweegt het opgehoopte water in stroomopwaartse richting het Noordzeekanaal op. De resulterende translatiegolf is tot ver op het Amsterdam-Rijnkanaal meetbaar. Omdat de periode van deze translatiegolf gelijk is aan de periode van het getij, wordt deze golfbeweging ook wel aangeduid als 'pseudo-getij'. Ook in de Rijn-Maasmonding is bij aanleg van schutsluizen, spuisluizen en gemalen te verwachten dat de huidige sterke getijbeweging verdwijnt, en reduceert tot een zwak pseudo-getij.

Het nagenoeg wegvallen van de getijdynamiek zorgt voor de grootste toename van verblijftijden in de Rijn-Maasmonding. Als secundair effect komt daarbovenop een verandering van de rivierafvoeren (doorspoeldebieten). De rivierafvoeren uit Paragraaf 4.2.2 kunnen worden vergeleken met de doorspoeldebieten voor de huidige inrichting in Paragraaf 2.3. Daaruit volgt dat in tijden van droogte de doorspoeldebieten toenemen in de inrichtingsvariant met zeesluizen, licht afnemen in de inrichtingsvariant met binnenvaartsluizen en sterk afnemen bij dammen zonder schutsluizen.

Waterkwaliteit

Een toename van verblijftijden leidt in principe tot hogere watertemperaturen, hogere nutriëntenconcentraties en (nabij de sluizen) enige dichtheidsgedreven stratificatie. Inrichtingsvarianten hebben op de schaal van de gehele RMM geen invloed op de aanvoer van nutriënten en (afval)stoffen in het rivierwater, hoewel het aannemelijk is dat autonome ontwikkelingen rondom emissies zullen zorgen voor verlaging, met name bij fosfaat (NB: toekomstscenario's voor nutriënten en (afval)stoffen zijn niet beschikbaar). Door een andere verdeling van de afvoer over de riviertakken en de genoemde toegenomen verblijftijd zal de concentratie van nutriënten en (afval)stoffen iets kunnen veranderen, bijvoorbeeld doordat lokaal de retentie (opslag in het systeem) toeneemt. Echter, aangezien deze grotendeels stroomopwaartse bronnen hebben, is de verwachting dat concentraties als gevolg van de waterstaatkundige inrichting niet veel zullen verschillen. Nogmaals, de ontwikkeling van emissies is relevanter.

Bij ongeveer gelijkblijvende nutriëntenconcentraties zullen algenconcentraties ook vergelijkbaar zijn met nu. In principe kunnen algenconcentraties toenemen door hogere watertemperaturen en sterkere uitputting van beschikbaar fosfaat bij een langere verblijftijd. Op deze manier kan blauwalgenbloei ontstaan, die nu niet voorkomt in Oude Maas en Nieuwe Maas door dynamiek/stroming en korte verblijftijd. Blauwalgen kunnen zich vooral snel vermeerderen als er veel fosfaat aanwezig is, zoals in het Volkerak-Zoommeer (VZM) in droge zomers. Toch is het niet de verwachting dat in een afgesloten RMM dergelijke problemen met blauwalgen ontstaan, omdat fosfaatgehalten in het water van de Rijn veel lager zijn dan in het water dat via de Dintel en Mark naar het VZM wordt aangevoerd. Het Haringvliet is wel een aandachtspunt. Sinds de droogte van 2018 wordt ook op het Haringvliet blauwalg gevonden in droge zomers. Als verblijftijden en watertemperaturen op het Haringvliet toenemen, is het mogelijk dat blauwalg zich verder gaat ontwikkelen op het Haringvliet.

Door afnemende afvoer en stroomsnelheden in Oude Maas en Nieuwe Maas zal aan de landwaartse zijde van de sluizen sedimentatie van slib en organisch materiaal en daaraan gebonden stoffen plaatsvinden, vergelijkbaar met de sedimentatie in Haringvliet en Hollands Diep als gevolg van de Haringvlietssluizen. Door mineralisatie van dit materiaal neemt het zuurstofverbruik toe en kunnen onder bepaalde omstandigheden (in combinatie met hogere temperaturen) zuurstoftekorten ontstaan.

Veranderingen in sedimentatiepatronen kunnen de sedimentsamenstelling van met name de diepe delen en op termijn wellicht ook de ondiepe delen en overstromingsdelen veranderen. Sedimentatie is vooral te verwachten in het noordelijke deel van de RMM, waar de getijdynamiek wegvalt. Als de aanleg van dammen en sluizen bij de Noordrand leidt tot verhoogde debieten en stroomsnelheden door het Hollands Diep en Haringvliet, kan dit leiden tot erosie van het daar aanwezige sediment. De bodem van deze wateren is in de jaren 1970 tot 1975 sterk verontreinigd met zware metalen, PAK's, PCB's en bestrijdingsmiddelen. Later is daar door verbeterde waterkwaliteit weer schoner materiaal op afgezet, hoewel er nog steeds bedreigingen zijn door relatief nieuwe stoffen als GenX (Arcadis, Royal HaskoningDHV en Sweco, 2023). Erosie van voornamelijk de diepere lagen vormt al met al een aanzienlijk toxisch risico voor het ecosysteem.

De verblijftijd in Haringvliet-Hollands Diep wordt waarschijnlijk korter, omdat er bij lage rivierafvoer nog steeds gespuid of gepompt zal worden, terwijl de Haringvlietssluis momenteel bij lage rivierafvoer dicht staan. Dit effect is vooral merkbaar bij een inrichtingsvariant met binnenvaartsluizen of zonder schutsluizen in het gesloten zeefront. Bij zeesluizen is de verwachting dat nog steeds al het beschikbare rivierwater nodig is voor doorspoeling van de Oude Maas en Nieuwe Maas.

Connectiviteit

Dammen zonder schutsluizen maken vispasseerbaarheid onmogelijk. Mogelijk kunnen vistrappen gerealiseerd worden om dit effect enigszins te mitigeren. Het ecosysteem zal veranderen naar een stagnant en overwegend zoet binnenwater zonder getijdewerking en zonder duidelijke connectie met de zee. Bij de dammen is een vrij sterke (bij zeesluizen) tot zeer abrupte (zonder schutsluizen) zoutgradiënt aanwezig tussen het zoete binnenwater en het zoute zeewater.

Migratie van vissen wordt bij alle drie de inrichtingsvarianten substantieel lager dan in de huidige (voorkeurs)strategie. Met de afsluiting verdwijnt de enige overgebleven open verbinding van Rijn en Maas met de Noordzee, waarvan nu nog veel trekvis en estuariene fauna in bredere zin gebruik maakt. De huidige ecologische waarde gaat dus grotendeels verloren. De unieke combinatie van zoet- en zoutwatervis (respectievelijk bovenin en onderin de waterkolom) met uitwisselingsmogelijkheden verdwijnt.

Getijdenatuur en seizoensgebonden peil

Het aanleggen van een gesloten zeefront heeft twee gevolgen: de verticale getijslag verdwijnt grotendeels en er ontstaat een beheerst peil. De Strategieën A1 en A2 kennen een verschil in peilbeheer in de afgesloten Rijn-Maasmonding:

- Bij Strategie A1 wordt in het winterhalfjaar gestreefd naar een peil rond NAP+0 m. Alleen in de zomerperiode wordt het peil opgezet voor zoetwaterbeschikbaarheid, tot het niveau van de zeespiegelstijging.
- Bij Strategie A2 stijgt het winterpeil mee met de zeespiegelstijging. In de zomer kan dit peil uitzakken als waterbuffer.

Dagelijks getij zoals nu in bijvoorbeeld in het zoetwatergetijdengebied de Biesbosch met bijbehorende karakteristieke flora en fauna is wellicht ten dele nog te handhaven door sturing met de spuisluizen en/of de pompen. De getijslag en bijbehorende natuur, die al is afgenomen na de uitvoering van de Deltawerken, zal echter hoe dan ook verder teruglopen. Dit geldt ook voor de oeverzones van de Oude Maas (eveneens Natura 2000-gebied). Juist aan de noordkant van de RMM liggen gebieden waar nog de grootst overgebleven getijslag is, zoals de Sophiapolder in de Noord met circa 80 cm getij. Hier wordt door de beheerder al een aantal jaar geïnvesteerd in herstel van de karakteristieke waarden (biezenvelden).

Al dan niet in combinatie met (kunstmatige) getijdewerking is de ontwikkeling en handhaving van duurzame en veerkrachtige ecosystemen in afgesloten, zoete zeearmen (zoals IJsselmeer, Volkerak) gebaat bij een zo natuurlijk mogelijk peilbeheer, waarbij de waterstanden in het vroege voorjaar hoog zijn, waarna deze tot in de nazomer uitzakken. In het IJsselmeergebied biedt het geldende peilbesluit hiervoor enige ruimte (in de praktijk echter niet genoeg). Ook verschillen tussen jaren zijn hierbij van belang. Het peilbeheer in Strategie A1 lijkt op het huidige peilbeheer in het IJsselmeergebied, maar dan in versterkte vorm. Dit tegennatuurlijke peilregime heeft negatieve gevolgen voor vestigingskansen voor vegetatie (o.a. riet) en vogels die op of nabij de grond broeden.

Het peilregime in Strategie A2 is in principe gunstiger voor ecologie dan bij Strategie A1. Bij sterke zeespiegelstijging neemt het peil in Strategie A2 eveneens toe, waardoor buitendijkse natuur kan verdrinken. Afhankelijk van de snelheid van meestijgen van het peil kan een

groter of kleiner deel van de ondiepe en overstromende gebieden meegroeien door sedimentaanvoer. Afhankelijk van de omvang van deze processen zal het voor handhaving en ontwikkeling van een robuust en veerkrachtig ecosysteem nodig zijn om aanpassingen te doen voor behoud van ruimtelijke gradiënten (met name land-water-overgangen), in combinatie met maatregelen rond peilbeheer, gebruik makend van kunstmatige getijwerking en variaties in rivierafvoer.

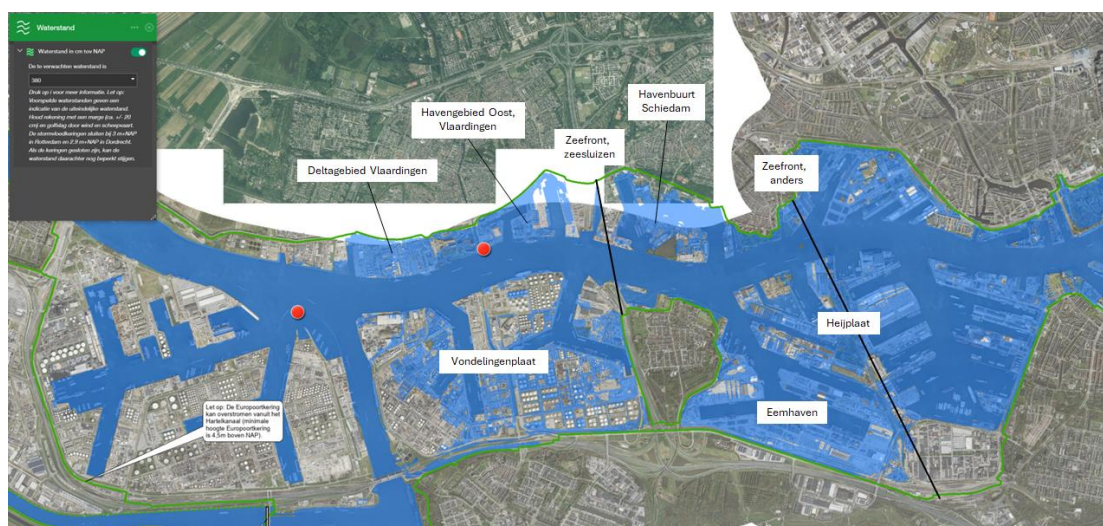
Concluderend: de verwachting is dat de ecologie en waterkwaliteit negatief zullen worden beïnvloed door uitvoering van Strategie A1 en A2. De mate waarin nog sprake is van connectiviteit (door schutsluizen of andere passages), de hoeveelheid doorspoeling en seizoensale en getijde-peilvariatie zijn cruciaal voor het ten dele kunnen mitigeren van de negatieve effecten.

4.2.5 Waterveiligheid

Voor waterveiligheid in de Strategieën A1 en A2 verwijzen we naar het KP ZSS (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2024a). De Strategieën zijn zo ingericht dat voldaan wordt aan de normen. We kunnen derhalve kort zijn over waterveiligheid, tenzij inrichtingsvarianten fundamentele verschillen veroorzaken ten opzichte van de Strategieën uit het KP ZSS.

Enkele opmerkingen:

- De Maeslantkering komt te vervallen en wordt qua waterkerende functie vervangen door meer landinwaarts gelegen dammen en schutsluizen. In het tussenliggende gebied zijn extra dijkversterkingen nodig.
- In het gebied tussen de Maeslantkering en het nieuwe zeefront ontstaat een opgave voor het buitendijks gebied. In het scenario Hd2100 is de gemiddelde waarde van de zeespiegelstijging 80 cm. Als het huidige sluitpeil van de Maeslantkering (NAP+3 m) verhoogd wordt met deze 80 cm treedt inundatie op in het blauw gekleurde gebied op de kaart in Figuur 4-8 met een frequentie gelijk aan de huidige sluitfrequentie van de Maeslantkering. Het gaat dan om industrie- en havengebieden zoals de Vondelingenplaat, Eemhaven, Deltagebied Vlaardingen en Havenbuurt Schiedam. Ook enkele woonkernen vallen binnen het gebied dat in deze Strategie vaker wordt blootgesteld aan hoge waterstanden, zoals Heijplaat en een buitendijkse woonwijk van Vlaardingen. In deze gebieden zijn aanpassingen nodig: verhogen, omdijken of verplaatsen van activiteiten.



Figuur 4-8 Overzicht van overstroomd gebied bij een waterstand van NAP+3,8 m. De primaire waterkeringen zijn aangegeven met groene lijnen, de aangehouden locatie van het zeefront met zeesluizen of met binnenvaartsluizen / dammen met zwarte lijnen. Bron: Hoogwaterkaart Rotterdam.

- Bij dammen is betrouwbaarheid van sluiten niet aan de orde, in tegenstelling tot stormvloedkeringen.
- Ook bij schutsluizen is betrouwbaarheid sluiten niet belangrijk, omdat er altijd minimaal één deur dicht staat. De kans op constructief bezwijken van sluisdeuren is over het algemeen zeer klein, zolang de deuren en het sluisplateau maar voldoende hoog worden aangelegd.
- Dammen zonder schutsluizen zijn in principe makkelijker aanpasbaar (op te hogen) bij zeespiegelstijging dan dammen met schutsluizen, mits hier bij het ontwerp en de ruimtelijke inrichting van de nieuwe dammen reeds rekening mee wordt gehouden.
- Tot slot nog de opmerking dat de gesuggereerde optie om vaarwegen te verondiepen en/of versmallen enig negatief effect kan hebben op waterveiligheid bovenstrooms van de vernauwde watergangen, hoewel zeer hoge rivierafvoeren in de Strategieën A1 en A2 in principe via het Haringvliet moeten worden afgevoerd.

4.2.6 Ruimtebeslag

Deze inrichtingsvariant omvat diverse maatregelen die ruimte nodig hebben. Aandachtspunten zijn de benodigde ruimte voor de sluiscomplexen (zeesluizen vragen de meeste ruimte), selectieve onttrekking en zoutvang, eventuele voorziening voor zoet/zout-scheiding van het schutdebiet en ruimtebeslag voor havengebied dat is ingericht voor de overslag van goederen tussen zeevaart en binnenvaart (in toenemende mate van een inrichtingsvariant met zeesluizen naar een inrichtingsvariant met volledig gesloten dammen).

4.2.7 Kosten

Voor zeesluizen is een ingeschatte eenheidsprijs € 1 miljard op basis van de recente aanleg van grote zeesluizen bij IJmuiden en Terneuzen. Voor grote binnenvaartsluizen is in Paragraaf 3.4.6 beargumenteerd dat een prijs van € 400 miljoen per schutsluis een reële orde van grootte is. Daarbovenop komen nog kosten voor de aanleg van dammen, orde € 100 miljoen per dam.

Tabel 4-1 Globale investeringskosten voor de aanleg van het gesloten zeefront per inrichtingsvariant.

Gesloten zeefront met:	Zeesluizen	Binnenvaartsluizen	Gesloten dammen
Aantal dammen	3	3	3
Aantal zeesluizen	2	0	0
Aantal binnenvaartsluizen	2	5	0
Kosten dammen (M€)	300	300	300
Kosten zeesluizen (M€)	2000	0	0
Kosten binnenvaartsluizen (M€)	800	2000	0
Totale kosten (M€)	3100	2300	300

De kosten variëren van 300 miljoen euro voor een gesloten zeefront met dammen tot 3,1 miljard euro voor een gesloten zeefront met (onder andere) zeesluizen. Dit betreft alleen de kosten voor de dammen, al dan niet voorzien van schutsluizen. Zoetwaterbeschikbaarheid is niet het enige criterium om al dan niet te kiezen voor deze Strategie. Met het gesloten zeefront wordt ook een fundamentele keuze gemaakt voor waterveiligheid in de Rijn-Maasmonding. Voor deze keuze is een veel breder palet aan kosten bepalend, inclusief (vermeden) dijkversterkingen, investeringen in pompen, spuisluizen en buitendijks gebied, zie Kennisprogramma Zeespiegelstijging (2024b). Daarbij komen nog kosten voor aanpassing van haveninfrastructuur, vestigingsklimaat en scheepvaart.

4.3 Strategie B2: Binnenpolder i.c.m. open Haringvliet

4.3.1 Beschrijving inrichtingsvariant

Deze inrichtingsvariant is een verdere uitwerking van Strategie B2 uit het KP ZSS (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2024a), waarin (zoals vermeld in Paragraaf 4.1) een afvoercorridor ontstaat vanaf de Waal tot aan het Haringvliet, en de Rijn-Maasmonding verandert in een afgesloten 'deltapolder' met een beheerst waterpeil, slechts toegankelijk voor scheepvaart via schutsluizen. Aan de noordrand gaat het om een sluis in het Beerkanaal, de bestaande Rozenburgsesluis, een sluis (of sluizen) in de monding van de Oude Maas en een sluis (of sluizen) in de Nieuwe Maas, voor deze studie gepositioneerd tussen de Eemhaven en de Waalhaven (zoals bij de Strategie A1 en A2 met binnenvaartsluizen). Aan de zuidrand wordt de deltapolder afgesloten door sluizen in de Beneden-Merwede, Dordtse Kil en het Spui. Het Haringvliet wordt een open estuarium, tijdens stormen afsluitbaar met een stormvloedkering. Figuur 4-9 geeft een overzicht van de bouwstenen in deze inrichtingsvariant en Figuur 4-10 toont de zoutindringing voor een T=20 lage afvoersituatie in Hd2100 voor deze variant.



Figuur 4-9 Bouwstenen bij een binnenpolder in combinatie met een open Haringvliet (rood).



Figuur 4-10 Indicatie van de zoutindringing in het scenario Hd2100 met afgesloten binnenpolder i.c.m. open Haringvliet.

4.3.2 Zoetwaterbalans

In het rapport voor de oplossingsrichting 'Beschermen' van het KP ZSS (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2024a) wordt gesteld dat de watervraag voor doorspoeling van de Rijn-Maasmonding (veranderd in een 'deltapolder') grotendeels vervalt in Strategie B2. Bij beperkte doorspoeling en het ontbreken van getij ontstaat echter (net als bij een gesloten zeefront) een situatie die vergelijkbaar is met het Noordzeekanaal of Kanaal Gent-Terneuzen en scenario's A1 en A2 (paragraaf 4.2), waarbij zout ver het systeem kan indringen zonder sterke doorspoeling, zie Bijlage C.3. Het ligt daarom voor de hand om te kiezen voor binnenvaartsluizen in combinatie met verondieping van de vaarwegen, en het aantal schuttingen via de binnenvaartsluizen in tijden van droogte waar mogelijk te beperken. Via een pakket van bronmaatregelen bij de sluizen (vergelijkbaar met de maatregelen genoemd in Paragraaf 3.4) kan gestreefd worden naar een gesloten zoutbalans, waarbij de export van zout door doorspoeling gelijk is aan de import van zout via kolkuitwisseling. De situatie in de deltapolder lijkt sterk op het gesloten zeefront met binnenvaartsluizen (zie Paragraaf 4.2). Bijlage C.4 geeft de achtergrond achter de benodigde NWW-afvoer van 180 m³/s om Hollandsche IJssel, Lek en Spui zoet te kunnen houden.

Het Haringvliet verandert in een open estuarium. Dit houdt in dat het water bij de zuidrand van het Spui brak of zout wordt. Dat zorgt voor bedreiging van de Bernisse-inlaat. Mogelijkheden om dit tegen te gaan zijn: geheel afdammen van het Spui aan de zuidzijde (geen intensief bevaren waterloop), aanleg van een schutsluis met een effectieve zoet/zout-scheiding en/of het genereren van een doorspoeldebiet in zuidwaartse richting. Een andere mogelijkheid is het verplaatsen van de inname van zoetwater van Bernisse naar Spijkenisse, waar naar verwachting geen sprake meer is van verzilting.

Bijlage C.5 geeft een overzicht van diverse bronnen om de zoutindringingslengte in te schatten bij openen van het Haringvliet. Het gaat dan om historische gegevens van vóór de aanleg van de Haringvlietssluis, modelberekeningen uit het onderzoeksproject 'SALTI Solutions' en een analytisch model van Savenije (2005). Uit al deze berekeningen volgt het volgende beeld:

- De inloop van het Spui en de inlaat naar het Volkerak zijn bij een open Haringvliet niet zoet te houden, niet bij een lage Rijnafvoer, maar ook niet bij meer gemiddelde condities.

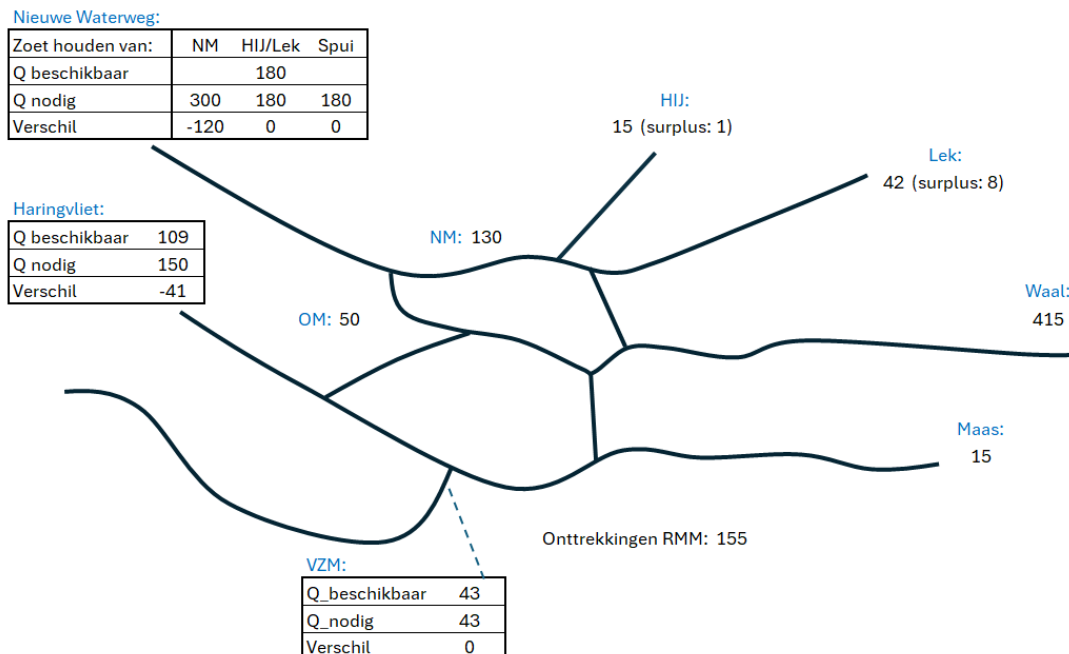
Bij het Spui ligt het vanwege de zeer lage scheepvaartintensiteit voor de hand een afsluiting met enkel een spuumiddel te overwegen.

- Als het criterium wordt dat de Dordtse Kil zoet moet blijven, is een afvoer door het Haringvliet nodig van ongeveer 600 m³/s. Bij 1 meter zeespiegelstijging wordt het moeilijker om een zoete monding van de Dordtse Kil te behouden, tenzij de bodem van het gehele Haringvliet meegroeit met de zeespiegelstijging.
- Als het criterium wordt om de Biesbosch zoet te houden, is naar verwachting een afvoer door het Haringvliet van ongeveer 150 m³/s nodig (grobe inschatting). Alleen bij sterke stormopzet op de Noordzee is grootschalige zoutindringing in de Biesbosch te verwachten, maar dan treedt de stormvloedkering in werking.

Aangezien in deze inrichtingsvariant schutsluizen worden aangelegd in de Dordtse Kil, is een enigszins verhoogde zoutconcentratie hier niet direct een probleem. Een afvoer van 150 m³/s wordt daarom aangehouden als benodigde doorspoeling om de Biesbosch zoet te houden.

Figuur 4-11 toont de waterbalans voor deze inrichtingsvariant voor de 14 droogste dagen binnen een T=20 jaar droge zomer bij het scenario Hd in zichtjaar 2100. Binnen de afgesloten Deltapolder is een balans gemaakt: 180 m³/s beschikbaar en nodig. In het Haringvliet is na aftrek van nog eens 198 m³/s onttrekkingen nog 109 m³/s over. Of dit voldoende is om de Biesbosch ten allen tijde zoet te houden, is twijfelachtig, maar incidentele, beperkte verzilting is vanuit ecologisch perspectief niet direct problematisch. Al met al lijkt het met een deltapolder in combinatie met een open Haringvliet op hoofdlijnen mogelijk om de watervraag, doorspoelbehoefte en het wateraanbod met elkaar in balans te brengen. Opmerking: in Strategie B2 verschuift de afvoerverdeling richting de afvoercorridor vanaf de Waal, maar dit geldt alleen voor hoge rivierafvoeren. In dit project ligt de focus op lage afvoeren, waarvoor in Strategie B2 geen verschuiving in afvoerverdeling is voorzien.

Belangrijk aandachtspunt is de zoetwatervoorziening van de Zuidwestelijke Delta in deze inrichtingsvariant. Bij het Volkerak-Zoommeer staat nog een post van 43 m³/s in de waterbalans in Figuur 4-11. Deze onttrekking uit het Hollands Diep kan echter niet meer plaatsvinden op de huidige locatie, omdat de zoutindringingslengte zelfs bij gemiddelde rivierafvoeren naar verwachting verder komt dan de Volkeraksluizen. Het innamepunt voor het Volkerak-Zoommeer zal moeten worden verlegd, of de Zuidwestelijke Delta moet op een andere manier van zoetwater worden voorzien.



Figuur 4-11 Zoetwaterbalans in de inrichtingsvariant met binnenpolder i.c.m. open Haringvliet in een T=20 droog jaar voor scenario Hd in het zichtjaar 2100.

4.3.3

Scheepvaart

Zeeschepen kunnen de afgesloten deltapolder niet bevaren. Er is overslag nodig tussen zeeschepen en binnenvaartschepen, ofwel in het 'buitengebied' rond de Nieuwe Waterweg, ofwel over land tussen de zeehavens en binnenvaarthavens. Overslag van zeevaart naar binnenvaart gebeurt nu in de regel direct vanuit het zeeschip naar het binnenvaartschip. Overslag over land zal veel ruimte in beslag nemen voor zowel de opslag van goederen als het transport van het "buitengebied" naar het "binnengebied". Daarnaast levert het transport over land emissies op en kan de druk op de wegen vergroten.

Scheepvaart (binnenvaart) van de Nieuwe Waterweg richting Moerdijk en Antwerpen moet zowel via de Oude Maas als de Nieuwe Maas tweemaal een sluis passeren (bij overslag over land: eenmaal). Een beperkt voordeel is dat er minder onderhoudsbaggerwerk nodig is om de waterwegen binnen de deltapolder op diepte te houden.

4.3.4

Waterkwaliteit en ecologie

Voor de afgesloten deltapolder gelden op hoofdlijnen dezelfde overwegingen voor waterkwaliteit en ecologie als voor het gesloten zeefront met binnenvaartsluizen. Verblijftijden nemen toe met bijbehorende gevolgen voor waterkwaliteit. Vispasseerbaarheid wordt problematisch bij de dammen met schutsluizen. De huidige waardevolle zoetwatergetijdengebieden langs bijvoorbeeld de Nieuwe Maas, Noord en Oude Maas zullen een ander karakter krijgen bij een afgesloten deltapolder. Voor meer toelichting verwijzen we naar Paragraaf 4.2.4.

Tegenover deze negatieve veranderingen staat in Strategie B2 het voordeel dat een relatief open estuarium ontstaat in het Haringvliet, met bijbehorend waardevol areaal aan intergetijdengebied en zoet/zout-gradiënten. Langs de zuidrand van de Rijn-Maasmonding is duidelijk meer areaal aan potentiële getijdenatuur aanwezig dan de huidige getijdenatuur langs de noordrand. De buitendijkse delen van de Biesbosch veranderen bij extreem lage afvoeren mogelijk van een zoetwatergetijdengebied in een brak getijdennatuurgebied. De verwachting is echter dat dit incidenteel zal zijn, waardoor het karakter van de Biesbosch niet fundamenteel verandert.

Het huidige zoete ecosysteem van het Volkerak-Zoommeer is niet houdbaar, omdat de zoet-zoutgradiënt bij de inlaat van de Volkeraksluizen zal komen te liggen. Met alleen afvoer van de Brabantse rivieren is het Volkerak-Zoommeer niet zoet te houden. Een verlegde, bovenstroomse inlaat is onwaarschijnlijk. Ter vergelijking: De aangelegde Roode Vaart heeft een voorziene maximale capaciteit van 10 m³/s, terwijl voor het zoet houden aanvullend circa 30 m³/s nodig is. Het Volkerak-Zoommeer verandert dan in een brak of zout ecosysteem. Daarvoor zijn meerdere opties denkbaar. Zonder infrastructurele aanpassingen aan de verbindingen met de zoute wateren, ontstaat waarschijnlijk een zwak-dynamisch meer met een grote seizoensvariatie in zoutgehalte dat meebeweegt met de zoetwateraanvoer. Zo'n ecosysteem is onnatuurlijk en zal waarschijnlijk ecologisch niet robuust zijn. Als de zoetwateraanvoer naar het Volkerak-Zoommeer beperkt wordt, kan een zout systeem vergelijkbaar het huidige Grevelingenmeer ontstaan. De zoet-zoutscheiding bij de Krammersluizen verdwijnt en de sluizen kunnen ingezet worden als doorlaatmiddel vergelijkbaar met de Brouwerssluis. Een derde optie is een groter doorlaatmiddel zoals in eerdere studies naar verzilting van het Volkerak-Zoommeer is onderzocht of vergelijkbaar met de onderzoeken naar Getij Grevelingen. Op het Volkerak-Zoommeer kan dan een beperkt getij en/of een beperkte zoet-zoutgradiënt ontstaan. In al deze opties betreft het een fundamentele wijziging van het ecosysteem (net als voor de scheepvaart en de zoetwatervoorziening van het Volkerak-Zoommeer naar de omliggende gebieden).

In de Voordelta zullen morfologie en ecologie zich enigszins wijzigen. Op de overgang met het Haringvliet ontstaan meer natuurlijke zoet-zout gradiënten met een minder grillige seizoensdynamiek, waardoor zich een estuariene bodemfauna kan ontwikkelen. De grootte van de openingen in de nieuwe stormvloedkering is van aanzienlijk belang voor de te verwachten getijedynamiek in het Haringvliet. De huidige sluizen zouden vermoedelijk een langdurig gestratificeerd systeem opleveren, ook als ze permanent open zouden zijn.

Vismigratie naar de rivieren kan hoofdzakelijk plaatsvinden via het Haringvliet. Voorwaarde (voordeel) voor goed functionerende gradiënten is dat de noodzaak van "zoetspoelen" van het Haringvliet bij lage Rijnafvoer flink wordt teruggebracht, zodat de levensgemeenschappen die zich langs deze gradiënten ontwikkelen niet frequent worden aangetast. Het gebied wordt dan niet alleen meer geschikt voor vissoorten als zalm, die passeren naar verder bovenstrooms gelegen paaigronden, maar ook voor estuariene gemeenschappen met een ruimtelijke zonering van zout naar zoet.

4.3.5 Waterveiligheid

Langs de afvoercorridor Waal, Hollands Diep en Haringvliet zijn dijkversterkingen nodig vanwege de verschuiving in afvoerverdeling bij hoge rivierafvoeren ten opzichte van de huidige strategie. Binnen de deltapolder is de opgave voor dijkversterkingen beperkt. Er zijn op hoofdlijnen twee soorten bedreigingen te onderscheiden.

De eerste bedreiging is een hoge afvoer vanaf de Lek. Vanwege de beperkte bergingscapaciteit van het watersysteem (inclusief Haringvliet en Hollands Diep) moet de afvoer vanaf de Lek vrijwel volledig worden gespuid of gemalen naar zee. De kans op hoge

waterstanden bij de keringen is dan afhankelijk van de kans op overschrijding van de spui/pompcapaciteit en de kans op (gedeeltelijk) uitval van spuumiddelen of pompen.

De tweede bedreiging is het niet-sluiten of constructief bezwijken van een van de schutsluizen of van de stormvloedkering in de Haringvlietdam. Als deze bezwijken of niet sluiten, kunnen hoge waterstanden optreden in de afgesloten deltapolder door de combinatie van zeespiegelstijging en stormvloed. Voor schutsluizen en stormvloedkeringen met een groot aantal sluitmiddelen (zoals de huidige Haringvlietssluiten en Oosterscheldekering) hebben de kansen op niet-sluiten en constructief bezwijken van een of enkele van de sluitmiddelen echter een geringe invloed op de hydraulische belastingen in het achterliggende gebied. Dit aandachtspunt speelt vooral bij stormvloedkeringen met één groot sluitgat, zoals de Maeslantkering, Hartelkering en Hollandsche IJsselkering.

Evenals in de Strategie met gesloten zeefront komt de Maeslantkering te vervallen. Dit vereist dijkversterkingen en aanpassingen in het buitendijks gebied tussen de huidige Maeslantkering en het nieuwe zeefront met dammen en sluizen, zie de uitleg in Paragraaf 4.2.4.

4.3.6 Ruimtebeslag

Aanleg van schutsluizen vraagt ruimte. Anderzijds wordt ruimtebeslag door verhogen en verbreden van waterkeringen rond de afgesloten deltapolder vermeden.

4.3.7 Kosten

Voor zeesluizen is een ingeschatte eenheidsprijs € 1 miljard op basis van de recente aanleg van grote zeesluizen bij IJmuiden en Terneuzen. Voor grote binnenvaartsluizen is in Paragraaf 3.4.6 beargumenteerd dat een prijs van € 400 miljoen per schutsluis een reële orde van grootte is. Daarbovenop komen nog kosten voor de aanleg van dammen, orde € 100 miljoen per dam. Tot slot worden de huidige Haringvlietssluiten vervangen door een stormvloedkering met een meer open karakter, waarvoor de kosten in Kennisprogramma Zeespiegelstijging (2024b) zijn geraamd op € 2,5 miljard.

Tabel 4-2 Globale investeringskosten voor de aanleg van dammen, sluizen en stormvloedkeringen bij een Deltapolder met open Haringvliet.

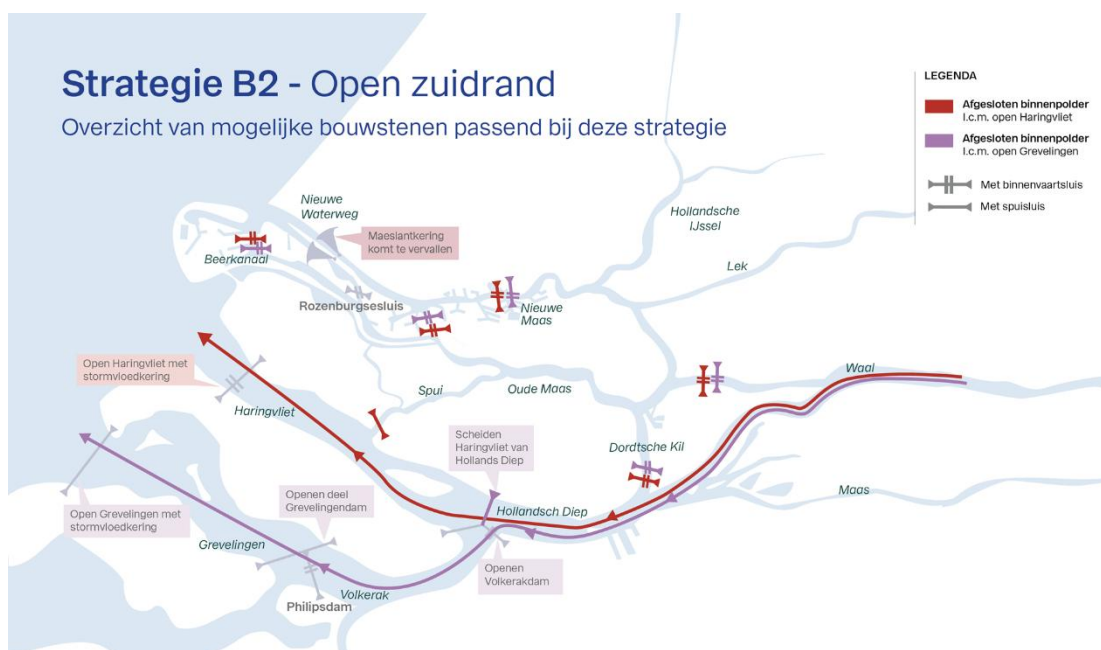
Deltapolder met:	Open Haringvliet
Aantal dammen	6
Aantal binnenvaartsluizen	9
Aantal stormvloedkeringen	1
Kosten dammen (M€)	600
Kosten binnenvaartsluizen (M€)	3600
Kosten kering Haringvliet (M€)	2500
Totale kosten (M€)	6900

De totale kosten van circa € 7 miljard betreffen alleen de kosten voor de vervangende stormvloedkering in het Haringvliet en de dammen rond de deltapolder, voorzien van één of twee binnenvaartsluizen. Zoetwaterbeschikbaarheid is niet het enige criterium om al dan niet te kiezen voor deze Strategie. Met de deltapolder wordt ook een fundamentele keuze gemaakt voor waterveiligheid in de Rijn-Maasmonding. Voor deze keuze is een veel breder palet aan kosten bepalend, inclusief (vermeden) dijkversterkingen, investeringen in pompen, spuisluizen en buitendijks gebied, zie Kennisprogramma Zeespiegelstijging (2024b). Daarbij komen nog kosten voor aanpassing van haveninfrastructuur, vestigingsklimaat en scheepvaart.

4.4 Strategie B2: Binnenpolder i.c.m. open Grevelingen

4.4.1 Beschrijving inrichtingsvariant

Deze inrichtingsvariant is een alternatieve invulling van Strategie B2 uit het KP ZSS, waarbij het rivierwater vanaf de Waal en Maas niet via Haringvliet wordt afgevoerd, maar via de corridor Waal, Hollands Diep, Volkerak en Grevelingen. Bij hoge rivierafvoeren verschuift de afvoerdeling bij de Pannerdensch Kop, waarbij meer water via de Waal wordt geleid. Bij lage rivierafvoeren blijft de afvoerdeling in principe ongewijzigd. Het Haringvliet verandert in een afgesloten zoet meer. De bouwsteen met een open Grevelingen is onder andere voorgesteld in Weiler (2023) en is genoemd als variant van B2 in het rapport van de oplossingsrichting Beschermen uit het KP ZSS (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2024a). Figuur 4-12 geeft een overzicht van de bouwstenen in deze inrichtingsvariant (figuur is gelijk aan Figuur 4-9). Figuur 4-13 toont de zoutindringing voor een T=20 lage afvoersituatie in Hd2100 voor deze variant.



Figuur 4-12 Bouwstenen bij een binnenpolder in combinatie met een open Grevelingen (in paars).



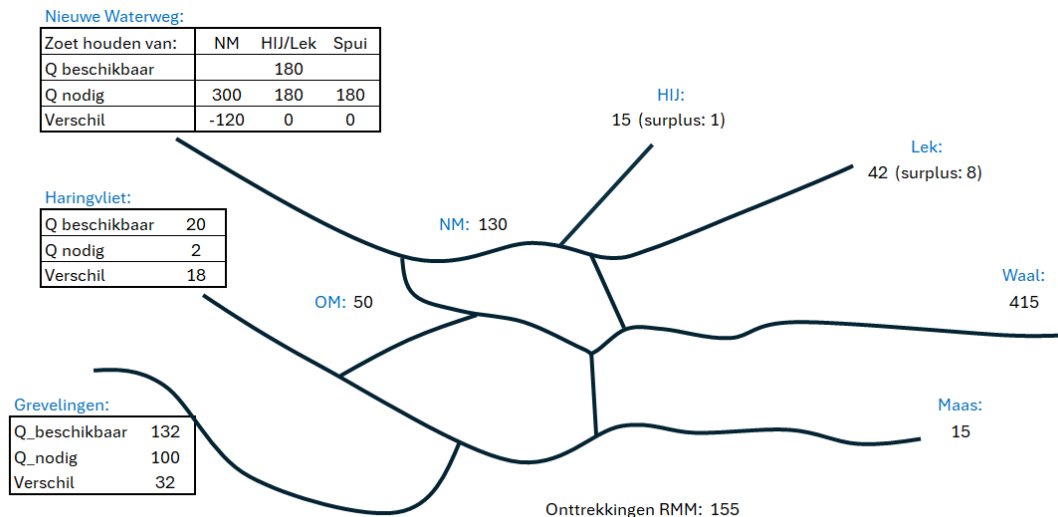
Figuur 4-13 Zoutindringing voor een T=20 lage afvoersituatie in Hd2100 met afgesloten binnenpolder i.c.m. open Grevelingen.

4.4.2 Zoetwaterbalans

Voor zoetwater gelden op hoofdlijnen dezelfde overwegingen als bij een deltapolder met open Haringvliet. Specifiek met een open Grevelingen zijn er minder uitdagingen om het innamepunt langs het Spui zoet te houden. Daarnaast ontstaat een zoetwaterbuffergebied in het Haringvliet. Voor het tegengaan van het effect van onder andere zoute kwel is wel enige doorspoeling van dit afgesloten Haringvliet nodig. Daarvoor kan bijvoorbeeld water vanaf de Lek via het Spui worden aangevoerd, en afgevoerd bij de Haringvlietdam en de nieuw aan te leggen scheiding tussen het Haringvliet en het Hollands Diep. In Kennisprogramma Zeespiegelstijging (2024a) is ingeschat dat in Strategie B2 ongeveer 40 m³/s benodigd is voor het tegengaan van zoute kwel in 2100 en 75 m³/s in 2200.

Vanwege de langere afstand tussen monding Grevelingen en de Biesbosch ten opzichte van monding Haringvliet en de Biesbosch is aangenomen dat 100 in plaats van 150 m³/s nodig is om de Biesbosch zoet te houden. Deze getallen zijn echter slechts een grove indicatie.

Belangrijk aandachtspunt is de zoetwatervoorziening van de Zuidwestelijke Delta in deze inrichtingsvariant. Het Volkerak wordt in deze inrichtingsvariant onderdeel van het open estuarium, waardoor het Volkerak-Zoommeer niet meer als zoetwaterbuffer kan blijven fungeren. De Zuidwestelijke Delta zal bij deze inrichtingsvariant op een andere manier van zoetwater moeten worden voorzien, bijvoorbeeld vanuit de nieuwe zoetwaterbuffer in het Haringvliet. Hier zijn beleidsvarianten voor ontwikkeld binnen de context van verkenningen naar een zout Volkerak-Zoommeer.



Figuur 4-14 Zoetwaterbalans in de inrichtingsvariant met binnenpolder i.c.m. open Haringvliet in een T=20 droog jaar voor scenario Hd in het zichtjaar 2100.

4.4.3 Scheepvaart

Ook voor scheepvaart gelden nagenoeg dezelfde overwegingen als bij de inrichtingsvariant met open Haringvliet, met één verschil: de Volkeraksluizen komen te vervallen, en daarmee is een sluis minder te passeren op de route naar Antwerpen. Mogelijk moet een sluis aangelegd worden in de Eendracht, de waterloop tussen Tholen en Noord-Brabant. De Eendracht fluctueert met het getij, het is te bezien of dat acceptabel is voor scheepvaart. Alternatief (en op de langere duur logischer) is het verplaatsen van de Kreekraksluizen naar de aantakking van de Eendracht op het Volkerak, waarbij het peil op de Eendracht gelijk wordt aan peil in het Antwerps Kanaalpand, ofwel het peil in de Antwerpse havendokken (ca. NAP+2 m).

4.4.4 Waterkwaliteit en ecologie

Deze inrichtingsvariant betekent een fundamentele aanpassing van de huidige ecosystemen in de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer. De zoute, peilbeheerde Grevelingen en het zoete, peilbeheerde Volkerak-Zoommeer verdwijnen en worden samen een estuarien systeem met natuurlijke dynamiek en een natuurlijke zoet-zoutgradiënt. Het deel Eendracht-Zoommeer wordt een doodlopende arm, tenzij de infrastructuur aan de zuidzijde (Westerschelde, Oosterschelde) ook wordt aangepast. Eventueel wordt bij de noordelijke ingang van de Eendracht een scheepvaartsluis gebouwd, waarna een zout binnenmeer zal ontstaan. Het estuariene systeem Grevelingen-Krammer-Volkerak biedt kansen voor systeemherstel, maar bij snelle zeespiegelstijging is het verdrinken van intergetijdengebieden waarschijnlijk, omdat er onvoldoende sedimentaanvoer nodig is om mee te kunnen groeien. Mogelijk is extra ruimte door dijkverlegging nodig om intergetijdengebieden te behouden. Gezien de grote impact zullen bij deze inrichtingsvariant alle deltawateren of in ieder geval ook de Oosterschelde betrokken moeten worden, onder andere omdat keuzes voor de Oosterscheldekering in het Hd scenario waarschijnlijk relatief gelijktijdig gemaakt moeten worden met keuzes in de Rijn-Maasmonding.

Specifiek aandachtspunt bij deze inrichtingsvariant is de waterkwaliteit in het Haringvliet(meer). Voorkomen moet worden dat hier een situatie ontstaat zoals in de (huidige) Grevelingen met slechte waterkwaliteit in met name de diepe delen, het Volkerak (stagnant water, blauwalg) of het Markermeer (hoge slibgehalten).

4.4.5 Waterveiligheid

Voor waterveiligheid gelden dezelfde overwegingen als bij de inrichtingsvariant met open Haringvliet (Paragraaf 4.3.4), met een aantal verschillen:

- Dijkversterkingen rond het Haringvliet zijn in mindere mate nodig. Daarvoor in de plaats komen dijkversterkingen rond het Volkerak-Zoommeer en de Grevelingen.
- De Brouwersdam wordt vervangen door een stormvloedkering. Een stormvloedkering heeft een grotere faalkans dan een dam of schutsluis vanwege de kans op niet-sluiten. De hydraulische belastingen op de waterkeringen rond de Grevelingen worden beïnvloed door deze kans op niet-sluiten. Dijken rond de Grevelingen zijn wel voormalige zeedijken, wat inhoudt dat ze relatief robuust zijn.
- Bij een open Grevelingen en Volkerak is aandacht nodig voor het beheersen van waterstanden in de Dintel, de verbinding met onder andere Breda en Roosendaal.

4.4.6 Ruimtebeslag

Aanleg van schutsluizen vraagt ruimte. Anderzijds wordt ruimtebeslag door verhogen en verbreden van waterkeringen rond de afgesloten deltapolder (inclusief Haringvliet) vermeden. Daarvoor in de plaats komen wel dijkversterkingen rondom de Grevelingen. Deze vinden veelal plaats buiten de bebouwde omgeving, waardoor ruimtelijke inpassing eenvoudiger is dan in bijvoorbeeld Rotterdam of Dordrecht.

4.4.7 Kosten

Voor de deltapolder met open Grevelingen gelden op hoofdlijnen dezelfde kosten als voor deze Strategie met een open Haringvliet. Zie Paragraaf 4.3.7 voor een toelichting. Voor grote binnenvaartsluizen is in Paragraaf 3.4.6 beargumenteerd dat een prijs van € 400 miljoen per schutsluis een reële orde van grootte is. Daarbovenop komen nog kosten voor de aanleg van dammen, orde € 100 miljoen per dam. Tot slot worden de huidige Haringvlietssluisen in de periode tot 2100 vervangen door een dam (schatting: orde € 1,5 miljard voor sloop en aanleg) en wordt de Brouwersdam voorzien van een stormvloedkering met een relatief open karakter, waarvoor de kosten in Kennisprogramma Zeespiegelstijging (2024b) zijn geraamd op € 2,5 miljard.

Tabel 4-3 Globale investeringskosten voor de aanleg van dammen, sluizen en stormvloedkeringen bij een Deltapolder met open Grevelingen.

Deltapolder met:	Open Grevelingen
Aantal dammen	6
Verwijderen dammen	3
Aantal binnenvaartsluizen	8
Aantal stormvloedkeringen	1
Kosten dammen (M€)	600
Kosten verwijderen dammen (M€)	300
Kosten binnenvaartsluizen (M€)	3200
Kosten SVK Grevelingen (M€)	2500
Kosten dam i.p.v. SVK Haringvliet (M€)	1500
Totale kosten (M€)	8100

De totale kosten van circa € 8 miljard betreffen alleen de kosten voor het vervangen van de Haringvlietkering door een dam, van de Brouwersdam door een stormvloedkering en de dammen rond de deltapolder, voorzien van één of twee binnenvaartsluizen. Zoetwaterbeschikbaarheid is niet het enige criterium om al dan niet te kiezen voor deze Strategie. Met de deltapolder wordt ook een fundamentele keuze gemaakt voor

waterveiligheid in de Rijn-Maasmonding. Voor deze keuze is een veel breder palet aan kosten bepalend, inclusief (vermeden) dijkversterkingen, investeringen in pompen, spuisluizen en buitendijks gebied, zie Kennisprogramma Zeespiegelstijging (2024b). Daarbij komen nog kosten voor aanpassing van haveninfrastructuur, vestigingsklimaat en scheepvaart.

5 Onderlinge vergelijking van bouwstenen

In dit hoofdstuk geven we een onderlinge vergelijking van de hiervoor besproken bouwstenen en gaan we verder in op onzekerheden in de gepresenteerde effectbeoordeling. Het onderling (relatief) vergelijken van de bouwstenen geeft inzicht in de potentiële effectiviteit van de bouwstenen op het tegengaan van verzilting en vergroten van zoetwaterbeschikbaarheid, en in hoeverre er rekening moet worden gehouden met (negatieve) effecten op scheepvaart en ecologie of (positieve of negatieve) effecten op waterveiligheid. Ook geeft het richting aan kansrijke combinaties die in een vervolgstudie in meer detail kunnen worden onderzocht. Het is nadrukkelijk geen multi-criteria-analyse ten behoeve van een afweging, want daarvoor is de analyse niet gedetailleerd genoeg. De beoordeling is bovendien kwalitatief binnen het type effect. Dat wil zeggen dat 'groot effect' voor scheepvaart economisch gezien iets anders betekent dan 'groot effect' voor zoetwater. Tot slot is het beeld dat hier wordt geschetst niet compleet, omdat andersoortige maatregelen (zoals het reduceren van de watervraag of verplaatsen van innamepunten) en kansrijke combinaties van bouwstenen niet zijn beschouwd.

5.1 Vergelijking bouwstenen

De bouwstenen zijn onderling vergeleken op 1) de mate van beperken van zoutindringing, 2) effect op scheepvaart en 3) effect op waterkwaliteit en ecologie en 4) indien van toepassing, effecten op waterveiligheid (Figuur 5-1). De getallen uit de waterbalans zijn hiervoor vergeleken met het nul-alternatief (wel klimaatverandering, geen maatregelen) en omgezet in een waarde tussen -2 en +2, waarbij -2 een sterke verslechtering en +2 een sterke verbetering betekent ten opzichte van het nul-alternatief. De beoordeling geldt voor een T=20 lage-afvoersituatie in het scenario Hd2100. De effectiviteit voor gebeurtenissen met een andere herhalingsperiode en andere KNMI-scenario's viel buiten de scope, maar moet voor een compleet beeld wel onderzocht worden in vervolgstudies.

Uit de waterbalans bleek dat in het nul-alternatief de zoutindringing in een T=20 lage-afvoersituatie toeneemt als geen aanvullende maatregelen worden genomen in het Hd2100-scenario. Dit is het gevolg van lagere rivierafvoeren in droge zomers in combinatie met zeespiegelstijging. De effecttabel laat zien in hoeverre het lukt om de betreffende takken zoet te houden. We maken hierbij onderscheid tussen Lek/Hollandsche IJssel (HIJ) en Spui, waar de belangrijkste innamepunten voor zoetwater zich bevinden. Het effect van de onderzochte bouwstenen is voor HIJ en Lek vergelijkbaar en daarom in dit geval samengenomen.

Zoetwater

Uit de effecttabel blijkt dat de meeste bouwstenen een positief effect hebben op het beperken van zoutindringing voor de **Lek/HIJ**. Het vergroten van de surplusdebieten vergt daarnaast ook relatief beperkte investeringskosten. Het afsluiten van de RMM met zeesluizen is geen oplossing; de zoutindringing is namelijk vergelijkbaar met het nul-alternatief. Er zijn twee bouwstenen onderzocht die de zoutindringing wel enigszins beperken ten opzichte van het nul-alternatief: het incidenteel afsluiten van de Oude Maas en het afsluiten van de RMM met dammen, al dan niet voorzien van binnenvaartsluizen. Daarbij is afsluiting van alleen de Oude Maas weliswaar effectief voor Oude Maas en Spui, maar waarschijnlijk niet voldoende om de zoetwaterbeschikbaarheid langs de HIJ en Lek in een T=20 lage-afvoersituatie te garanderen.

Voor het beperken van zoutindringing op **het Spui** (zowel afvoer- als opzetgedreven verzilting) is het incidenteel afsluiten van de Oude Maas het effectiefst binnen de onderzochte bouwstenen voor de huidige strategie (B1). Ook verondiepen is gunstig voor het beperken van de zoutindringing richting het Spui, al is het mogelijk niet genoeg om het Spui voor een 1/20 situatie zoet te houden. Met de Strategie afsluitbaar/open (B2; open Haringvliet of open Grevelingen) wijzigt de RMM in een afgesloten deltapolder, waarbinnen het Spui ook zoet gehouden kan worden. In de variant met open Haringvliet is hiervoor wel een extra afsluitmiddel of schutsluis nodig in de inloop van het Spui bij het Haringvliet, of het inlaatpunt Bernisse moet verplaatst worden.

Scheepvaart

In de huidige Strategie (B1) zijn de negatieve effecten voor zeevaart het grootst als gekozen wordt voor de bouwsteen verondiepen. Dit raakt dan niet alleen de zeevaart, maar ook de hele maritieme sector die hiervan afhankelijk is. Voor de zee- en binnenvaart zijn er beperktere negatieve effecten door de bouwsteen 'tijdelijk afsluiten van de Oude Maas'. Hier vindt enkel oponthoud plaats, wanneer bij sluiting wachttijden optreden bij de sluizen in de Oude Maas voor de binnenvaart en zeevaart deze route niet kan nemen. Dit zal bij het Hd-scenario in 2100 naar verwachting elke paar jaar gedurende de gehele zomer (orde 90 dagen) het geval zijn. Het vergroten van de surplusdebieten op de Lek en/of Hollandsche IJssel heeft ook een effect op de binnenvaart door extra verlaagde waterstanden in de Waal en mogelijke stremming van de Bernhardsluizen.

Strategieën met een gesloten zeefront (A1/A2) of afgesloten deltapolder (B2) hebben grote gevolgen voor de hele scheepvaartsector en maritieme sector die hiervan afhankelijk is, omdat zeeschepen de afgesloten binnenpolder niet kunnen bevaren. Er is overslag nodig tussen zeeschepen en binnenvaartschepen, ofwel in het 'buitengebied' rond de Nieuwe Waterweg, ofwel over land tussen de zeehavens en binnenvaarthavens. Door het grote aantal sluizen die gepasseerd moeten worden zal de reistijd van goederen toenemen. Voor zeeschepen en de toegankelijkheid van de zeehavens is Strategie A1/A2 met ze sluizen het minst negatief, maar de reistijden nemen wel flink toe ten opzichte van het nul-alternatief.

Ecologie en waterkwaliteit

Binnen Strategie B1 hebben de bouwstenen relatief weinig effect op ecologie en waterkwaliteit. Bouwstenen waarbij takken incidenteel worden afgesloten hebben tijdelijk een negatief effect op vismigratie.

Een verandering naar Strategie A1/A2 of B2 heeft veruit het grootste effect op ecologie. Het afsluiten van het noordelijke deel heeft een negatieve invloed op:

- Doorstroming, menging en verblijftijden;
- Watertemperatuur, stratificatie en nutriëntgehalten;
- De connectiviteit binnen het systeem (o.a. vismigratie);
- Het karakter van (zoetwater)getijdennatuurgebieden.

Een open Haringvliet of Grevelingen (B2) is minder negatief beoordeeld dan een gesloten zeefront (A1/A2), omdat de connectiviteit via een andere route behouden blijft. Ook blijven er zoet/zout-overgangen bestaan in de Rijn-Maasmonding. Het is dus ruimtelijk een verschuiving van ecologische waarden. Deze verschuiving vindt wel plaats naar de zuidrand, waar een groter areaal aan ecologisch waardevolle gebieden aanwezig is dan in het meer noordelijke deel van de RMM. In het geval van een open Grevelingen gaat de waterkwaliteit erop vooruit in de Grevelingen en het Volkerak, maar daar staat tegenover dat de waterkwaliteit in de deltapolder inclusief Haringvliet naar verwachting afneemt.

Strategie	Bouwsteen	sterke verbetering tov nulalternatief lichte verbetering tov nulalternatief geen significant effect lichte verslechtering tov nulalternatief sterke verslechtering tov nulalternatief	Investeringskosten (miljard euro)		Effect in scenario Hd2100 ten opzichte van het nulalternatief										Waterveiligheid
			zoetwater	waterveiligheid	zoetwater					scheepvaart		ecologie & waterkwaliteit			
					Hollandse IJssel / Lek	Spui	Volkerak-Zoommeer	binnenvaart	zeevert			connectiviteit	dynamiek & diversiteit	waterkwaliteit	
B1	Vergroten surplusdebieten Hollandse IJssel (~5m³/s) en Lek (~40 m³/s)	<1													
B1	Verondiepen Nieuwe Waterweg/Nieuwe Maas (4-7 m)	1 - 2,5													
B1	Verondiepen Rijn-Maasmonding (2-3 m)	2,5 - 5													
B1	Incidenteel afsluiten Hollandse IJssel en Lek	<1													
B1	Incidenteel afsluiten Oude Maas	1 - 2,5													
A1/A2	Afsluiten Nieuwe en Oude Maas met zeesluizen	2,5 - 5*													
A1/A2	Afsluiten Nieuwe en Oude Maas met binnenvaartsluizen	1 - 2,5*													
A1/A2	Afsluiten Nieuwe en Oude Maas met overslagdammen	<1*													
B2	Afsluitbaar open Haringvliet, in combinatie met diverse sluisen of dammen	5 - 10*													
B2	Afsluitbaar open Grevelingen, in combinatie met diverse sluisen of dammen	5 - 10*													

*betreft alleen de aanlegkosten van dammen, sluisen en keringen; exclusief kosten voor pompen en spulmiddelen; exclusief vermeden kosten voor dijkversterking

** In alle varianten zullen aanvullende maatregelen uitgevoerd worden om aan de waterveiligheidsnorm te blijven voldoen. Het netto effect op waterveiligheid is dan 0. De huidige score betreft de die de bouwstenen tot gevolg heeft om voor waterveiligheid aan de norm te voldoen. Het nulalternatief gaat uit van dijkversterkingen; bij overstap naar B2 of A1 zijn er veel minder dijkversterkingen

* betreft alleen de aanlegkosten van dammen, sluisen en keringen; exclusief kosten voor pompen en spuimiddelen; exclusief vermeden kosten voor dijkversterking

** In alle varianten zullen aanvullende maatregelen uitgevoerd worden om aan de waterveiligheidsnorm te blijven voldoen. Het netto effect op waterveiligheid is dan 0. De huidige score betreft de extra opgave die de bouwsteen tot gevolg heeft om voor waterveiligheid aan de norm te voldoen. Het nulalternatief gaat uit van dijkversterkingen; bij overstap naar B2 of A1 zijn er veel minder dijkversterkingen nodig.

Figuur 5-1 Onderlinge vergelijking van de bouwstenen voor zoetwater op basis van het effect in scenario Hd2100 ten opzichte van het nulalternatief (d.w.z. geen aanvullende maatregelen).

5.2 Onzekerheden

De effecten van de maatregelen op waterbeschikbaarheid, scheepvaart, ecologie, waterkwaliteit en waterveiligheid zijn geschat op basis van een combinatie van beschikbare kennis en deskundigenoordeel. Deze schattingen moeten worden gezien als een eerste ruwe inschatting om verschillende bouwstenen onderling met elkaar te kunnen vergelijken. Investeringskosten zijn grofstoffelijk ingeschat op basis van vergelijkbare projecten en eenheidsprijzen. Daarbij geldt dat alleen directe investeringen (aanlegkosten) zijn becijferd van de hier voorgestelde ingrepen. Indirecte economische impact op de scheepvaart- en transportsector of kosten gerelateerd aan (extra of juist vermeden) dijkversterkingen zijn alleen kwalitatief beschouwd. Een kostenraming met meer diepgang en breedte kan leiden tot een ander beeld over de kansrijkheid van maatregelen.

De focus van deze studie heeft gelegen op het kwantificeren van het effect op de zoetwaterbeschikbaarheid via een waterbalans. Deze weliswaar kwantitatieve inschatting kent nog steeds een grote onzekerheid omdat de inschatting is gedaan op basis van beschikbare kennis van vergelijkbare maatregelen, maar er geen hydrodynamische berekeningen aan ten grondslag liggen. Waar geen kennis beschikbaar was zijn grove schattingen gedaan.

Hieronder volgen op hoofdlijnen de belangrijkste onzekerheden ten aanzien van de opgestelde waterbalansen:

- De grootste onzekerheden in de huidige en toekomstige waterbalans (zonder maatregelen) liggen in de onzekerheden in de klimaatprojecties en de watervraag. Daarnaast is voor 1 m ZSS voor Bernisse momenteel nog geen exact getal bekend voor de afvoer waarbij afvoergedreven verzilting (voorwaartse verzilting) optreedt.
- Het effect van de verondieping is nu geschat op basis van een extrapolatie van beschikbare informatie over het effect van 1 m bodemverandering. Echter, hoe groter de verondieping hoe minder lineair het effect. Om nauwkeuriger de effectiviteit te bepalen zijn aanvullende berekeningen nodig.
- Het effect van het verhogen van het surplus is bepaald binnen KP-ZSS (HKV, 2024). Deze studie heeft als doel om grofstoffelijk te verkennen wat de orde groottes benodigd debiet zijn bij een groot bereik aan afvoer- en zeespiegelstijgingscondities. Vanwege diverse aannames die gedaan zijn in HKV (2024) zijn aanvullende berekeningen nodig voor verdere kwantificatie.

- Zoutindringing door schutsluizen is ingeschat op basis van een groot aantal aannames. Voorbeelden zijn de sluisdimensies, aantallen sluiskolken, aantal schuttingen per sluiskolk en de gekozen zoutbeperkende bronmaatregelen (bellenschermen, selectieve onttrekking, drempels) en hun effectiviteit. Daarnaast is op een eenvoudige manier gerekend aan de verspreiding van zout binnen het afgesloten laag-dynamische systeem zonder getijdewerking. De getallen zijn daarom een zeer globale indicatie van de te verwachten zoutindringing bij overstap naar een Strategie met zeesluizen of binnenvaartsluizen in A1/A2 of B2.
- Zoutindringing via een open estuarium (Haringvliet of Grevelingen) is ingeschat op basis van de historische situatie (voor aanleg van de Deltawerken) en berekeningen met empirische formules. De historische situatie kende meerdere open zeearmen, waarmee deze niet geheel representatief is voor een inrichtingsvariant met afgesloten Nieuwe Waterweg en slechts één open zeearm. De inschatting van de zoutindringingslengte bij zeespiegelstijging in combinatie met zeer lage rivierafvoeren is gebaseerd op theoretische formules en extrapolatie. Nader onderzoek met gedetailleerde numerieke modellen is nodig om een beter beeld te krijgen van de zoutindringing in een afsluitbaar open Haringvliet of Grevelingen.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In dit rapport is een eerste verkenning uitgevoerd naar bouwstenen om zoutindringing in de Rijn-Maasmonding te beperken. Daarbij is het KNMI-scenario Hd beschouwd in het zichtjaar 2100, wat neerkomt op sterk verdrogende zomers en ongeveer 80 cm zeespiegelstijging. Binnen dit klimaatscenario is een droge zomer beschouwd die gemiddeld eens per 20 jaar optreedt. Er is niet alleen onderzoek gedaan naar zoetwaterbeschikbaarheid, maar ook de effecten van bouwstenen op scheepvaart, waterkwaliteit en ecologie zijn in beeld gebracht. Naast de inzet van bouwstenen om waterbeschikbaarheid te bevorderen binnen de huidige voorkeursstrategie is ook gekeken naar bouwstenen in alternatieve strategieën, zoals ontwikkeld in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging vanuit voornamelijk het perspectief van waterveiligheid bij sterke zeespiegelstijging (2 tot 5 m): (A) een afgesloten zeefront met dammen en eventueel schutsluizen en (B) de Rijn-Maasmonding als afgesloten deltapolder in combinatie met het Haringvliet of de Grevelingen als afsluitbaar open estuarium.

We concluderen het volgende:

- Binnen de huidige strategie en in een warmer klimaat volgens KNMI'23 scenario Hd2100, zijn er nog diverse bouwstenen mogelijk om zoutindringing te beperken met beperkte negatieve effecten op scheepvaart en ecologie/waterkwaliteit. Het vergroten van het surplusdebiet lijkt het meest effectief voor Hollandsche IJssel en Lek, maar dit is geen oplossing voor Spui/Bernisse. Andersom is het incidenteel afsluiten van de Oude Maas een effectieve oplossing om het Spui zoet te houden. Dit heeft ook een verzoetend effect voor de Nieuwe Maas, maar het is naar verwachting niet voldoende voor het zoethouden van HIJ/Lek bij Hd in 2100. Een combinatie van deze twee bouwstenen lijkt daarom kansrijk. De combinatie is echter nog niet onderzocht.
- Binnen de huidige strategie is het grootschalig verondiepen van de Nieuwe Waterweg/Nieuwe Maas of de hele Rijn-Maasmonding effectief voor beperking van zoutindringing en heeft dit geen grote negatieve effecten voor de ecologie. Echter, het effect op zeevaart is significant. Deze maatregel is effectief om de invloed van zeespiegelstijging op zoutindringing tegen te gaan, maar niet onbeperkt houdbaar bij verder afnemende rivieraafvoeren.
- Indien gekozen wordt voor het volledig afsluiten van de Rijn-Maasmonding met sluizen en dammen, kan de zoetwatervoorziening alleen gegarandeerd worden bij volledige afsluiting met alleen dammen. Als gekozen wordt voor schutsluizen in de dammen, blijft het beperken van zoutindringing een groot aandachtspunt. Bij het blijven faciliteren van zeevaart is het door de grote zoutlast via de zeesluizen niet mogelijk om de Hollandsche IJssel, Lek en Spui zoet te houden. Door het wegvallen van de getijdynamiek dreigt sterke zoutindringing in een gelaagd systeem. Er is dan te veel doorspoeling van de Rijn-Maasmonding nodig om te compenseren voor de grote zoutindringing via de zeesluizen. Als gekozen wordt voor binnenvaartsluizen is het afhankelijk van het aantal schuttingen en de effectiviteit van gekozen zoutindringing-beperkende maatregelen bij de sluizen of er voldoende water is om zoutindringing voldoende tegen te gaan. Ook zal de overslag van zeevaart naar binnenvaart anders georganiseerd moeten worden. Hoe dan ook vraagt deze strategie een strategische keuze over de inrichting van de hele transportsector in dit deel van het land.
- Klimaatverandering heeft gevolgen voor waterkwaliteit en ecologie in de Rijn-Maasmonding. In de huidige studie zijn de aanvullende effecten van verschillende bouwstenen in beeld gebracht. Belangrijke aandachtspunten hierbij zijn het ontstaan van fysieke barrières bij dammen en sluizen in het geval van een gesloten zeefront of

deltapolder. Ook kan het wegvallen van getijdestroming in een afgesloten Rijn-Maasmonding leiden tot minder dynamiek, hogere watertemperaturen, hogere nutriëntconcentraties, algenbloei en het verdwijnen van zoetwatergetijdennatuur. Daar tegenover staat in de strategie met een afsluitbaar open Zuidrand de ontwikkeling van een meer natuurlijk estuarium in het Haringvliet of de Grevelingen, wat kansen oplevert voor vismigratie, een natuurlijke zoet/zout-gradiënt en grotere arealen intergetijdengebied.

6.2 Aanbevelingen

We bevelen aan om het volgende verdiepende en verbredende vervolgonderzoek te doen:

- In de voorliggende studie is alleen het klimaatscenario Hd2100 beschouwd. We bevelen aan om ook andere scenario's (laag, midden) en zichtjaren door te rekenen voor een completer en genuanceerder beeld van nut en noodzaak voor de verschillende bouwstenen.
- De effectiviteit van bouwstenen is op een zeer globale manier onderzocht. We bevelen aan om inschattingen voor mogelijk kansrijke (combinaties van) bouwstenen te verbeteren via simulaties met numerieke modellen.
- Er is in deze studie niet expliciet gekeken naar het effect van klimaatverandering op de zoutindringing van het Haringvliet in combinatie met het kierbesluit en lerend implementeren. We bevelen aan om hier in vervolgstudie meer aandacht aan te besteden.
- De huidige studie had de focus op infrastructurele en geometrische aanpassingen. Er bestaan ook alternatieve strategieën, zoals het reduceren van de watervraag of het verplaatsen van innamepunten. We bevelen aan om dergelijke bouwstenen toe te voegen en te vergelijken met de bouwstenen uit het voorliggende rapport.
- De verschillende bouwstenen zijn soms goed te combineren in een adaptatiepad. Een voorbeeld is het starten met verhoogde surplusdebieten, vervolgens het verondiepen van vaarwegen, daarna incidenteel afsluiten van de Oude Maas, daarna een gesloten zeefront met binnenvaartsluizen. We bevelen aan om de mogelijkheden voor het combineren van bouwstenen in ruimte en tijd verder te onderzoeken in een vervolgstudie.
- Impact op scheepvaart, de haven en de transportsector zijn slechts indicatief in beeld gebracht. We bevelen aan om voor kansrijke bouwstenen en adaptatiepaden meer onderzoek te doen naar de impact op de scheepvaart- en transportsector.
- Een deel van de beschouwde bouwstenen heeft ook implicaties buiten de Rijn-Maasmonding, bijvoorbeeld in het Volkerak-Zoommeer. We bevelen aan om de interactie tussen de regio's scherper in beeld te brengen voor de (mogelijk) kansrijke bouwstenen.

Referenties

- Abraham, G., P. van der Burgh, P. De Vos (1973). Pneumatic barriers to reduce salt intrusion through locks, Rijkswaterstaat Communications No. 17.
- Arcadis & Hydrologic (2023a). Kennisprogramma Zeespiegelstijging, Spoor II: Systeemanalyses zoetwaterregio Volkerak-Zoommeer. In opdracht van Rijkswaterstaat. Rapportnummer: 30101791.1.ANL
- Arcadis & Hydrologic (2023b). Kennisprogramma Zeespiegelstijging, Spoor II: Systeemanalyses zoetwater regio Rijn-Maasmonding. In opdracht van Rijkswaterstaat. Rapportnummer: 30101791.1.ANL
- Arcadis, Royal HaskoningDHV en Sweco (2023). Doelenanalyse Natura 2000. 111 - Hollands Diep; Provincie Zuid-Holland; 7 september 2023.
- Biemond, B., Kranenburg W.K., Huismans, Y., de Swart, H.E., Dijkstra, H.A. (2024). Dynamics of salt intrusion in complex estuarine networks; an idealised model applied to the Rhine-Meuse Delta (submitted).
- Bijlsma, L. & J.W.M. Kuipers (1989). River water and the quality of the Delta waters. Hydro-ecological relations in the Delta Waters of the South-West Netherlands. J.C. Hooghart and C.W.S. Posthumus. The Hague, TNO Committee on Hydrological Research, Proceedings and information No. 41: 3326.
- Huismans, Y., Koopmans, H., Wiersma, A., de Haas, T., Berends, K., Sloff, K., & Stouthamer, E. (2021). Lithological control on scour hole formation in the Rhine-Meuse Estuary. *Geomorphology*, **385**, 107720.
- De Wilde (2024). Tidal phase differences in multi-branch systems and their effect on salt intrusion. MSc thesis TU Delft.
- Deltares (2013). Effectiviteit en effect van winterdoorspoeling van het Volkerak-Zoommeer; Modelstudie en beknopte data-analyse. Deltares rapport 1208550-000.
- Deltares (2016). Analyse van de zoutmetingen in november 2015 langs de Hollandsche IJssel – afleiding dispersiecoëfficiënt. Deltares rapport: 1230077-001 Kees Kuijper.
- Deltares (2016). Systeemanalyse Rijn-Maasmonding: analyse relaties noord- en zuidrand en gevoeligheid stuurknoppen. Deltares Rapport: 1230077-001.
- Deltares (2021). Verzilting Hollandsche IJssel en Lek - Evaluatie en systeemanalyse op basis van metingen. Deltares rapport 11206830-017-ZWS-0001.
- Deltares (2023a). Effect bodemligging op verzilting Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Lek. Deltares rapport 11208075-010-ZWS-0001. Stendert Laan, Ymkje Huismans, Socorro Rodrigo, Leo Leummens, Wouter Kranenburg.
- Deltares (2023b). Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse. Deltares rapport 11209265-002-ZWS-0003, Joost Buitink, Athanasios Tsiokanos, Tjitske Geertsema, Corine ten Velden, Laurene Bouaziz, Frederiek Sperna Weiland, 07-12-2023.

- Deltares (2024a). 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, Remi van der Wijk en Otto Weiler, 10 juli 2024, voorlopig.
- Deltares (2024b). Nogmaals sluizen in Rotterdam: hoe kunnen die ons helpen in een droge zomer? Otto Weiler, Rolien van der Mark en Marjolein Mens, 14 maart 2024.
<https://www.deltares.nl/verhalen/sluizen-in-rotterdam>
- Deltares (2024c). Vervolg Stresstest Indirecte Bedreigingen; Systeembeschrijving Hoofdwatersysteem. Deltares rapport 11209214-003-ZWS-0001. Remi van der Wijk, Anna van den Hoek, Rolien van der Mark. 24-01-2024.
- Deltares (2024d). Extra debiet over stuw Hagestein voor het tegengaan van verzilting van de Lek. Deltares rapport 11210363-001-ZKS-0001.
- Deltares (2024e). De zoetwaterbalans van laag Nederland in een warmer klimaat. Deltares rapport 11210362-000-ZWS-0001, M. Mens, J. Pouwels, O. Weiler, J. Delsman en Y. Huismans, 15 februari 2024.
- Deltares (2024f). Resultaten SALT Solutions: toepassingsperspectief voor Rijkswaterstaat – groeidocument. Deltares rapport 1210363-007 (in voorbereiding).
- Ecorys (2023). Integraal Riviermanagement; Kengetallen kosten-batenanalyse. 22 juni 2023.
- HKV (2023). Verzilting Kanaal Gent-Terneuzen; rapportage oppervlaktewatermodellering. HKV-rapport pr4728.10 vanuit Schelde in Beeld voor de VNSC, 13 februari 2023.
- HKV (2024). Nadere analyse zoetwater Rijn-Maasmonding onder extreme zeespiegelstijging. HKV Rapport.
- Imares (2007). Herstel van estuariene dynamiek in de zuidwestelijke Delta. Imares Rapport C119/07, M.J. Baptist, I. de Mesel, L.C.P.M. Stuyt, R. Henkes, H. de Molenaar, J. Wijsman, N. Dankers, V. Kimme, december 2007.
- IPLO (2024). Kaarten waterverdeling bij lage afvoeren | Informatiepunt Leefomgeving (iplo.nl)
<https://iplo.nl/@291053/kaarten-waterverdeling-lage-afvoeren/>
- Kennisprogramma Zeespiegelstijging (2023). Kennisprogramma Zeespiegelstijging, Spoor II, Systeemanalyse waterveiligheid; Deelrapport Rijn-Maasmonding en Rivierengebied; Hoofdrapport. Rapportnummer: PR4682.10, 30 mei 2023.
- Kennisprogramma Zeespiegelstijging (2024a). Kennisprogramma Zeespiegelstijging Spoor IV; Technisch-fysische uitwerking Oplossingsrichting Beschermen. Hoofdrapport - referentie 135942/23-017.432 - definitief d.d. 15 februari 2024.
- Kennisprogramma Zeespiegelstijging (2024b). Kennisprogramma Zeespiegelstijging Spoor IV; Oplossingsrichting Beschermen. Bijlagenrapport - referentie 135942/23-017.522 - definitief d.d. 15 februari 2024.
- KNMI (2023). KNMI'23-klimaatsscenario's voor Nederland, KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 23-03.
- Leuven, J.R.F.W., Niesten, I., Huismans, Y., Cox, J.R., Hulsen, L., van der Kaaij, T., & Hoitink, A.J.F. (2023). Peak water levels rise less than mean sea level in tidal channels subject to depth convergence by deepening. Journal of Geophysical Research: Oceans, 128, e2022JC019578.

- Rijkswaterstaat (1998). MER beheer Haringvlietsluizen. Over de grens van zout en zoet. Deelrapport 1 Water en zoutbeweging, Report, 211 pages.
- Rijkswaterstaat (2015). Motie Geurts, Deltaprogramma: onderzoek naar de effecten van sluizen in de Nieuwe Maas en Oude Maas op de waterveiligheid en zoetwatervoorziening. 'Nader onderzoek variant afsluiting Nieuwe Waterweg'. 19 november 2015, Definitief concept
- Savenije, H.H.G. (2005). Salinity and Tides in Alluvial Estuaries. Amsterdam, Elsevier BV.
- Van der Brugge, R., R.C. de Winter (2024). Deltascenario's 2024 - Zicht op Water in Nederland. Deltares 11209219-000-ZKS-0004
- Van Leeuwen F., P. Jacobs & K. Storm (red.) (2004). Haringvlietsluizen op een Kier. Effecten op de gebruiksfuncties. Stuurgroep Realisatie de Kier. Projectorganisatie Realisatie de Kier. In opdracht van Ministerie van Verkeer en Waterstaat en Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.
- Wageningen Marine Research & Deltares (2018). Potenties voor herstel getijdenatuur in het Haringvliet, Hollands Diep en de Biesbosch. Wageningen Marine Research rapport C008/18. Jeroen Wijsman, Vincent Escaravage, Ymkje Huismans, Arno Nolte, Remi van der Wijk, Zheng Bing Wang en Tom Ysebaert, 31 januari 2018.
- Weiler, O. (2023). Een toekomst voor de monding van Rijn en Maas vanuit bestuurlijke principes, een essay. Februari 2023, Deltares projectnummer 11209189-003 (tekstuele aanpassingen oktober 2023).

A Statistiek van lage afvoeren

Het KNMI heeft in 2023 vier scenario's gepresenteerd voor klimaatverandering in Nederland rond 2050 en 2100, aansluitend op de wereldwijde klimaatscenario's zoals afgegeven door het IPCC. De vier scenario's bestaan uit de combinatie van een hoog ('H') of laag ('L') uitstootscenario in combinatie met een nat ('n') of droog ('d') scenario. In het natte scenario gaan de winters sterk vernatten en de zomers licht verdrogen, terwijl in het droge scenario de winters licht vernatten en de zomers sterk verdrogen. De combinatie van beide leidt tot de vier klimaatscenario's: Ld, Ln, Hd en Hn. De Deltascenario's van het Deltaprogramma zijn gebaseerd op een combinatie van de KNMI'23-klimaatscenario's en de sociaaleconomische scenario's voor Nederland zoals opgesteld door het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). In het Deltaprogramma Zoetwater worden alleen de 'droog'-scenario's (Ld en Hd) gebruikt, omdat de focus op waterbeschikbaarheid ligt en deze in de droge varianten het meest onder druk komt te staan.

Op dit moment zijn de lange-termijn inrichtingsvarianten alleen beoordeeld voor het scenario Hd voor zichtjaar 2100. Het is belangrijk om op te merken dat de studie daarmee een "wat-als" karakter heeft en niet pretendeert een te verwachten toekomstbeeld te presenteren.

Kentallen voor scenario Hd zijn voor de zichtjaren 2050 en 2100 als volgt:

Hd2050:

- Wereldwijde temperatuurstijging (t.o.v. 1991-2020): 1,5°C
- Zeespiegelstijging Nederlandse kust: 19 – 38 cm
- Neerslagtekort zomerhalfjaar: +35%
- Zomerafvoer Rijn: -18%
- 7-daagse minimumafvoer Rijn: -20% (grofweg van 1100 m³/s naar 900 m³/s)

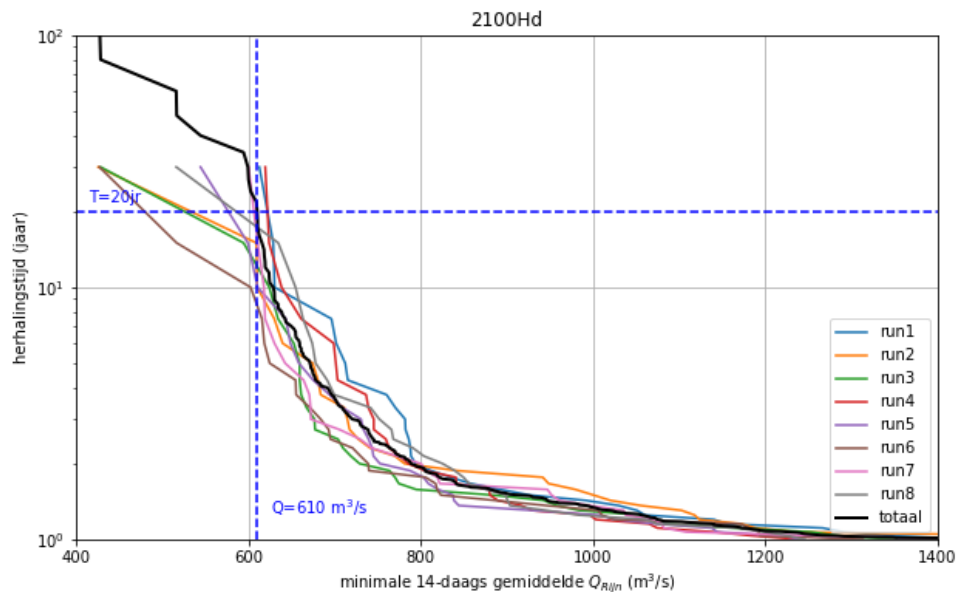
Hd2100:

- Wereldwijde temperatuurstijging (t.o.v. 1991-2020): 4°C
- Zeespiegelstijging Nederlandse kust: 59-124 cm
- Neerslagtekort zomerhalfjaar: +79%
- Zomerafvoer Rijn: -31%
- 7-daagse minimumafvoer Rijn: -27% (grofweg van 1100 m³/s naar 750 m³/s)

Naast deze kentallen was het nodig om te komen tot een 'maatgevende' droge zomer binnen een bepaald scenario. Daarvoor is een statistische analyse uitgevoerd op de afvoerscenario's voor Rijn en Maas (Deltares, 2023b), gebaseerd op de KNMI'23-klimaatscenario's. De afvoerscenario's bevatten per zichtjaar (referentie, 2050, 2100, 2150) en scenario (Hd, Ld, etc.) telkens 8 synthetische reeksen van 30 jaar, die elk representatief zijn voor dit scenario en zichtjaar. Bij elkaar levert dit dus 240 jaar met rivierafvoeren op per zichtjaar en KNMI-scenario. Vervolgens is per jaar de minimale 14-daags gemiddelde rivierafvoer berekend binnen het groeiseizoen (1 april tot 1 oktober). Op deze minima is statistiek bedreven. Vaak wordt de eens per 20 jaar droogte als maatgevend beschouwd voor beleid. Bij een herhalingsjijd van 20 jaar is de minimale 14-daags gemiddelde Rijnaflow bij Lobith 834 m³/s in de referentiesituatie, 675 m³/s bij Hd2050, 610 m³/s bij Hd2100 (zie Figuur A-1) en 544 m³/s bij Hd2150.

Gevoeligheidsanalyse:

- 7-daags gemiddeld in plaats van 14-daags gemiddeld: ca. 15 m³/s lagere afvoer;
- 30-daags gemiddeld in plaats van 14-daags gemiddeld: ca. 30 m³/s hogere afvoer;
- Herhalingstijd 30 jaar in plaats van 20 jaar: ca. 15 m³/s lagere afvoer.



Figuur A-1 Statistiek van minimale 14-daags gemiddelde Rijnafoeren in de 8 synthetische reeksen behorend bij scenario Hd voor zichtjaar 2100. In de dikke zwarte lijn zijn de 8 reeksen samengevoegd.

Bovenstaande had alleen betrekking op de Rijnafoer bij Lobith. Ook de bijdrage van de Maas aan de statistiek is onderzocht. De bijdrage van de Maas aan de T=20 jaar rivierafvoer naar de Rijn-Maasmonding is ongeveer 40 m³/s in de referentiesituatie en bij Hd2050, en 30 m³/s bij Hd2100 en Hd2150⁷. Dit is de afvoer bij Eijsden, “maar zonder de afsplitsing tussen de Maas (rivier) en Prins Albertkanaal (dus de waarde is de som van de afvoer op beide locaties)”. Na aftrek van een debiet naar het Albertkanaal resteert een afvoer van ongeveer 25 m³/s bij Lith in de referentiesituatie en bij Hd2050, en 15 m³/s bij Hd2100 en Hd2150. Deze getallen zijn aangehouden als bijdrage van de Maas aan de afvoer richting de Rijn-Maasmonding.

Bij een open systeem zal de verzilting zowel door zeespiegelstijging als door lagere rivierafvoeren toenemen. Ten gevolge van 80 cm zeespiegelstijging (gemiddelde waarde voor Hd2100) is de verwachting dat verzilting langs de Noordrand bij een 75-190 m³/s hogere Lobith-afvoer op zal treden, zie Tabel 4-1 uit Deltares (2023a). De genoemde afname van de 7-daagse minimumafvoer van de Rijn met 31% in Hd2100 (dat is ruim 350 m³/s) heeft daarmee duidelijk meer effect op de verzilting van de Noordrand van de Rijn-Maasmonding dan een zeespiegelstijging van 80 cm.

⁷ Dit is niet de T=20 jaar lage afvoer van de Maas, meer de verwachtingswaarde van de afvoer van de Maas bij een T=20 jaar lage afvoer van de Rijn.

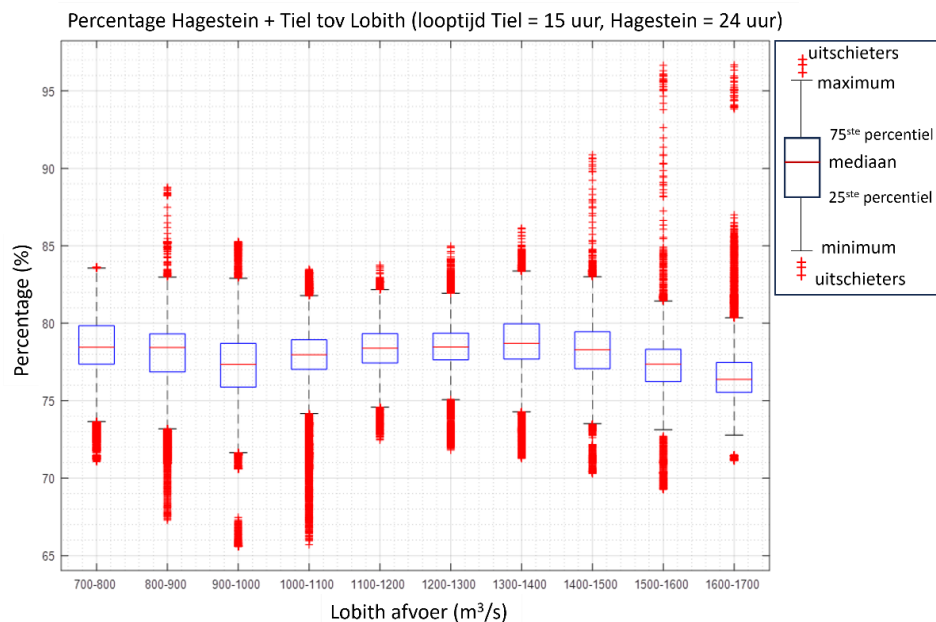
B Extra toelichting op de waterbalansen

B.1 Benodigde afvoer Nieuwe Waterweg

In de studie voor de Basis Rivier Bodemligging (BRL) is bepaald bij welke Lobith afvoeren de verzilting in de Rijn-Maasmonding zoveel toeneemt dat het met huidige maatregelen niet langer voldoende zoet te houden is. Dit voor situaties binnen huidig en toekomstig klimaat en voor huidige en aangepaste rivierbodempligging in de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas (Deltares, 2023a). Deze kritische Lobith-afvoeren (Tabel 3-1 en 4-1 in het rapport) zijn voor deze studie gecorrigeerd met +100 m³/s vanwege de ontbrekende onttrekkingen in de berekeningen en met -50 m³/s voor de te hoge inschatting van de chloridewaarde door het meenemen van windopzet in de relatie tussen afvoer en chloride (QS-relatie), zie ook Bijlage C.1. De kritische Lobith-afvoeren zijn vervolgens vertaald naar NWW-afvoeren conform methodiek van de waterbalans, namelijk 78% van het Lobith-water bereikt de Rijn-Maasmonding, vanuit de Maas komt hier nog 25 m³/s bij en er wordt 100 m³/s onttrokken in de Rijn-Maasmonding, voordat het overige water de Rijn-Maasmonding via de Nieuwe Waterweg verlaat. Omdat in de modelberekeningen voor de BRL-studie geen rekening is gehouden met een toename aan onttrekkingen of een afname in Maas-afvoer met klimaatverandering, zijn deze toenames bij de bepaling van de benodigde NWW-afvoeren in 2050 en 2100 niet meegenomen in de conversie van de afvoer bij Lobith naar de afvoer door de Nieuwe Waterweg.

B.2 Afvoer van Lobith richting de Rijn-Maasmonding

Bij lage rivierafvoeren gaat gemiddeld 78% procent van de Lobith afvoer naar de Rijn-Maasmonding, zie Figuur B-1. Omdat niet bekend is welke mate diverse effecten (seizoenseffecten, verandering van de afvoerverdeling bij Pannerden en trendmatige ontwikkelingen in onttrekkingen) de variatie hebben beïnvloed, is de gemiddelde waarde gekozen. Voor toekomstige projecties is ook 78% gehanteerd, omdat niet eenvoudig is vast te stellen welke toekomstige IRM-keuzes er gemaakt gaan worden met betrekking tot afvoerverdeling bij Pannerden of wat de trend wordt m.b.t. de kleine onttrekkingen.



Figuur B-1 Percentage van de Rijn-afvoer die naar de Waal en Nederrijn/Lek stroomt, op basis van meetdata van de periode 01-01-2010 tot 01-01-2023 (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2024a). Minimum en maximum zitten op anderhalf kwartielafstand van respectievelijk het 25^{ste} en 75^{ste} percentiel. De overige datapunten worden als uitschieters beschouwd (rode kruisjes).

B.3 Surplusdebieten Hollandsche IJssel en Lek

Tabel B-1 Benodigd surplusdebiet op de Hollandsche IJssel (HIJ) in het huidige klimaat volgens diverse studies. Blauw gearceerde cellen geven de waarden aan die horen bij het benodigde NWW-debiet afgeleid voor deze studie. De andere waarden zijn toegevoegd als extra referentie.

Afvoer NWW (m ³ /s)	Benodigd surplusdebiet HIJ (m ³ /s)	Bron
514	1	BRL studie (Deltares, 2023a), met vertaling afvoer Lobith naar NWW conform beschreven in Bijlage B.2.
514	geen	KP-ZSS fase 2 (HKV, 2024), op basis van grafieken voor de indringingslengte van 250 mg C/I.
710	0	Op basis van meetdata, zie Fig 3.14 en 3.15 in Deltares (2021), hieruit blijkt dat met negatief debiet de HIJ al rond Q_{lobith} van 1000 m ³ /s verzilt
554	Enig surplus nodig	Op basis van meetdata, zie Fig 3.15 in Deltares (2021), zonder windopzet en Q_{lobith} ~800 m ³ /s wel enig surplus nodig.

Tabel B-2 Benodigd surplusdebiet op de Lek in huidig klimaat volgens diverse studies. Blauw gearceerde cellen geven de waarden aan die horen bij het benodigde NWW-debiet afgeleid voor deze studie. De andere waarden zijn toegevoegd als extra referentie.

Afvoer NWW (m³/s)	Benodigd surplusdebiet Lek (m³/s)	Bron
471	3	BRL studie (Deltares, 2023a), met vertaling afvoer Lobith naar NWW conform beschreven in Bijlage B.2.
510	3	Lek studie (Deltares, 2024d), op basis van grafieken voor de indringingslengte van 200 mg Cl/l.
460	17	
471	12	KP-ZSS fase 2 (HKV, 2024), op basis van grafieken voor de indringingslengte van 200 mg Cl/l.

C Extra toelichting op ingeschatte zoutindringing

C.1 Zoutindringing bij verondieping

In het kader van de Basis Rivierbodempligging (BRL) is recent zowel het effect van een 1 m diepere Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas (tot de Erasmusbrug) als 0,8 m zeespiegelstijging op verzilting bepaald (Deltares, 2023a). Uit deze studie zijn op basis van relaties tussen afvoer en verzilting de afvoeren bepaald, waaronder de chlorideconcentraties gemiddeld genomen boven de drempelwaarde uitkomen voor verschillende locaties, en voor situaties met en zonder bodemaanpassing en met en zonder zeespiegelstijging. Voor deze studie zijn deze kritische waarden voor de rivierafvoer gebruikt om een indicatie te krijgen van de benodigde afvoer met en zonder zeespiegelstijging en in de effectiviteit van de het verondiepen van (delen van) de Rijn-Maasmonding. Hieronder wordt de gevolgde methodiek op hoofdlijnen toegelicht.

Eerst is op basis van interpolatie tussen de kritische waarden voor de Lobithafvoer bij 0 en 0,8 m zeespiegelstijging een waarde afgeleid voor de benodigde Lobith afvoer voor Hd2050 (0,3 m zss) en Hd2100 (0,8 m zss), zie Tabel C-1. Omdat de mate van zeespiegelstijging uit de studie van Deltares (2023a) overeenkomt met Hd2100 is voor dit laatste getal geen interpolatie nodig geweest.

Vervolgens is de bepaald met hoeveel de benodigde afvoer verschuift ten gevolge van 1 m zeespiegelstijging of 0,8 m bodemverandering in de Nieuwe Waterweg/Nieuwe Maas, zie Tabel C-2. Tot slot is bepaald op basis van afvoertekort in de Nieuwe Waterweg voor Hd2050 en Hd2100, hoeveel bodemaanpassing er nodig is om dit tekort op te vangen, zie Tabel C-3.

Tabel C-1 Benodigde Lobithafvoeren om de genoemde locaties voldoende zoet te houden. De toegepaste correctie is toegelicht in B.1 en betreft een correctie van - 100 m³/s voor ontbrekende onttrekkingen in de RMM en -50 m³/s voor overschatting van de kritische waarde ten gevolge van het volledig meenemen van het effect van windopzet.

Scenario	Zss (m)	bodempligging	Benodigde Lobith-afvoeren (m ³ /s)			Toelichting
			Parksluizen	Krimpen	Krimpenerwaard	
Huidig	0	normaal	724	753	697	Gecorrigeerde* getallen uit Tabel 3-1 en 4-1 van Deltares (2023a)
Huidig	0	1 m verdieping	766	822	734	
80 cm zss	0,8	normaal	825	851	814	
80 cm zss	0,8	1 m verdieping	873	944	862	
Hd2050	0,3	normaal	762	790	741	Geïnterpoleerde getallen
Hd2100	0,8	normaal	825	851	814	

Tabel C-2 Verschuiving in benodigde afvoer ten gevolge van zeespiegelstijging of een bodemaanpassing in de Nieuwe Waterweg/Nieuwe Maas.

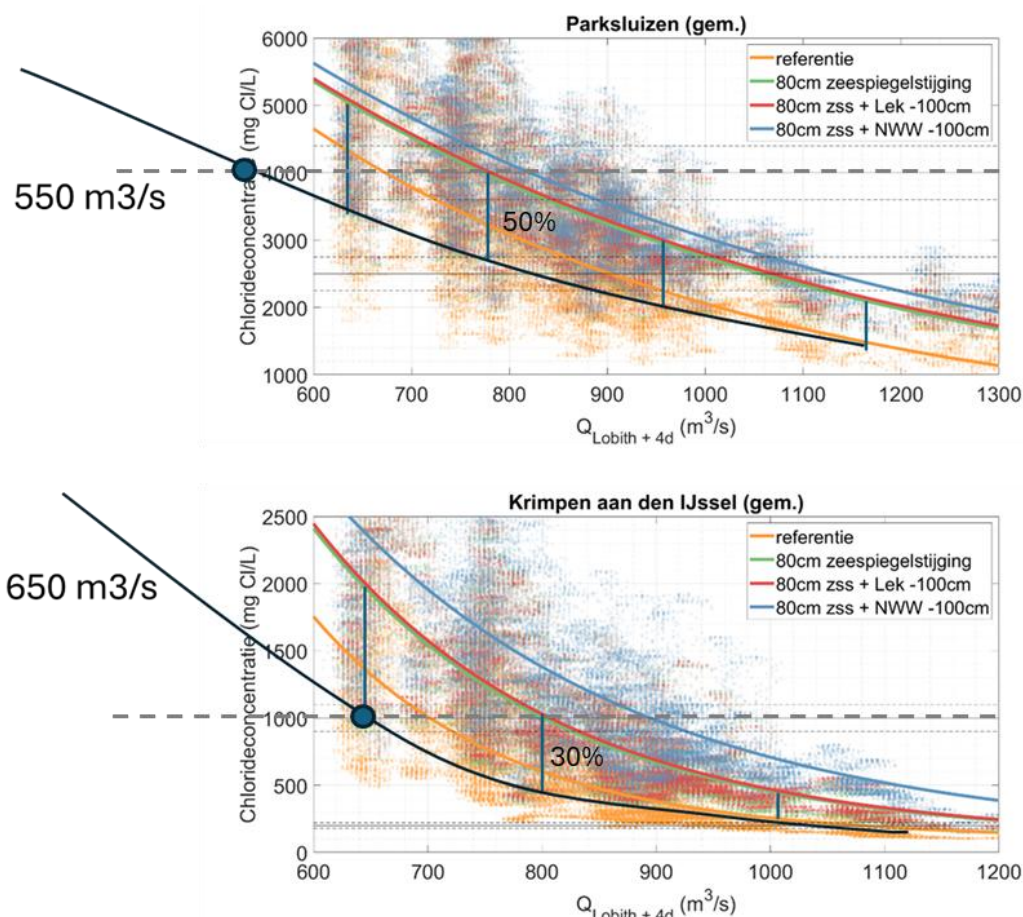
Aanpassing	Verschuiving in benodigde afvoer (m³/s)		
	Parksluizen	Krimpen	Krimpenerwaard
Effect 1 m verdieping NWW/NM bij huidige zeespiegel	42	69	37
Effect 0,8 m zeespiegelstijging	101	98	117
1 m verdieping NWW/NM bij 0,8 m zeespiegelstijging	48	93	48

Tabel C-3 Vertaling afvoertekort naar bodemaanpassing.

Scenario	Omschrijving	Parksluizen	Krimpen	Krimpenerwaard
2050	Afvoertekort bij Hd2050, 1/20 jaar 14 dagen	-109 m³/s	-131 m³/s	-93 m³/s
	benodigde verondieping NWW/NM ter compensatie van afvoertekort	-2,4 m	-1,6	-2,2
	benodigde verondieping hele RMM ter compensatie van afvoertekort	-0,9	-1,1	-0,6
2100	Afvoertekort bij Hd2100, 1/20 jaar 14 dagen	-272 m³/s	-292 m³/s	-263 (m³/s)
	benodigde verondieping NWW/NM ter compensatie van afvoertekort	-6,0	-3,6	-6,2
	benodigde verondieping hele RMM ter compensatie van afvoertekort	-2,2	-2,4	-1,8

C.2 Zoutindringing bij wijziging van de afvoerverdeling

Wanneer de afvoerverdeling binnen de Rijn-Maasmonding verandert, heeft dit effect op de zoutindringing. Bij het incidenteel afsluiten van de Oude Maas stroomt er namelijk aanzienlijk meer water over de Nieuwe Maas en neemt de verzilting af. Hierdoor neemt het benodigde debiet door de Nieuwe Waterweg (NWW) voor het tegengaan van verzilting af. Een ruwe schatting hiervoor is gemaakt op basis van kentallen uit Deltares (2023a) en Deltares (2016). Volgens de systeemanalyse nemen de chlorideconcentraties nabij Brienenoord en Krimpen aan de IJssel met ~10% af als 20 m³/s extra water over de Nieuwe Maas stroomt, bij gelijkblijvend NWW-debiet. Bij de tijdelijke afsluiting van de Oude Maas neemt volgens de waterbalans het debiet op de Nieuwe Maas met 140 m³/s, zie Figuur 3-10. De afname van de verzilting zal dus substantieel meer zijn dan 10%. Indien we aannemen dat de afname 50% is bij Krimpen a/d IJssel en Krimpen aan de Lek en 30% bij Parksluizen (ligt dichterbij de Nieuwe Waterweg), dan kan op basis van de debiet-zoutrelaties uit Deltares (2023a) geschat worden met hoeveel de benodigde afvoer bij Lobith afneemt, zie Figuur C-1. De resulterende benodigde NWW-debieten zijn getoond in Tabel C-4. NB. Het gaat hierbij om zeer grove schatting.



Figuur C-1 Afvoer-chloriderelaties uit Deltares (2023a). Nieuwe fit getekend op basis van zeer ruwe schatting van de afname van chlorideconcentraties ten gevolge van een hoger debiet door de Nieuwe Maas. Conform de BRL-studie (Deltares, 2023a) zijn aanvullende maatregelen nodig als bij Parksluizen of Krimpen aan de IJssel de getijgemiddelde chlorideconcentraties boven respectievelijk 4000 mg Cl/l en 1000 mg Cl/l komen. Voor Parksluizen gaat het bijv. om het stremmen van het scheepsverkeer, om te voorkomen dat nog meer zout het systeem inkomt. Bij Krimpen aan de IJssel gaat het om het verhogen van het ingestelde surplus (1 m³/s) op de Hollandse IJssel om te voorkomen dat innamepunten bovenstrooms verzilt.

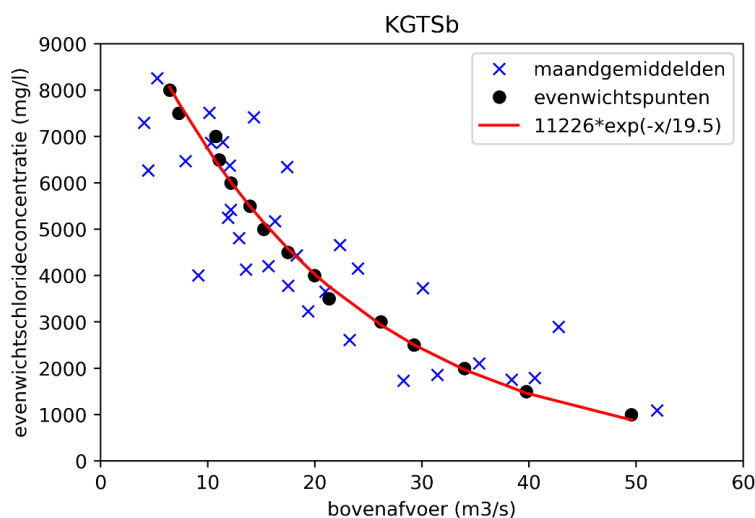
Tabel C-4 Benodigd debiet om de Nieuwe Waterweg (indicatiepunt Parksluizen) en Hollandse IJssel (indicatiepunt Krimpen aan de IJssel) voldoende zoet te houden, indien het debiet over de Nieuwe Maas met 140 m³/s toeneemt, maar het debiet door de Nieuwe Waterweg gelijk blijft.

Locatie	Benodigd debiet (m³/s), om te voorkomen dat verzilting te hoog wordt		
	Lobith	Lobith, gecorrigeerd voor onttrekkingen en windopzet (zie toelichting in Bijlage B.1)	Nieuwe Waterweg
Parksluizen	550	600	395
Krimpen a/d IJssel	650	700	473

C.3 Zoutindringing in afgesloten systemen: voorbeelden KGT en NZK

Deze bijlage geeft informatie over de zoutindringing in het Kanaal Gent-Terneuzen (KGT) en het Noordzeekanaal (NZK), als voorbeelden van zoutindringing in gesloten watersystemen.

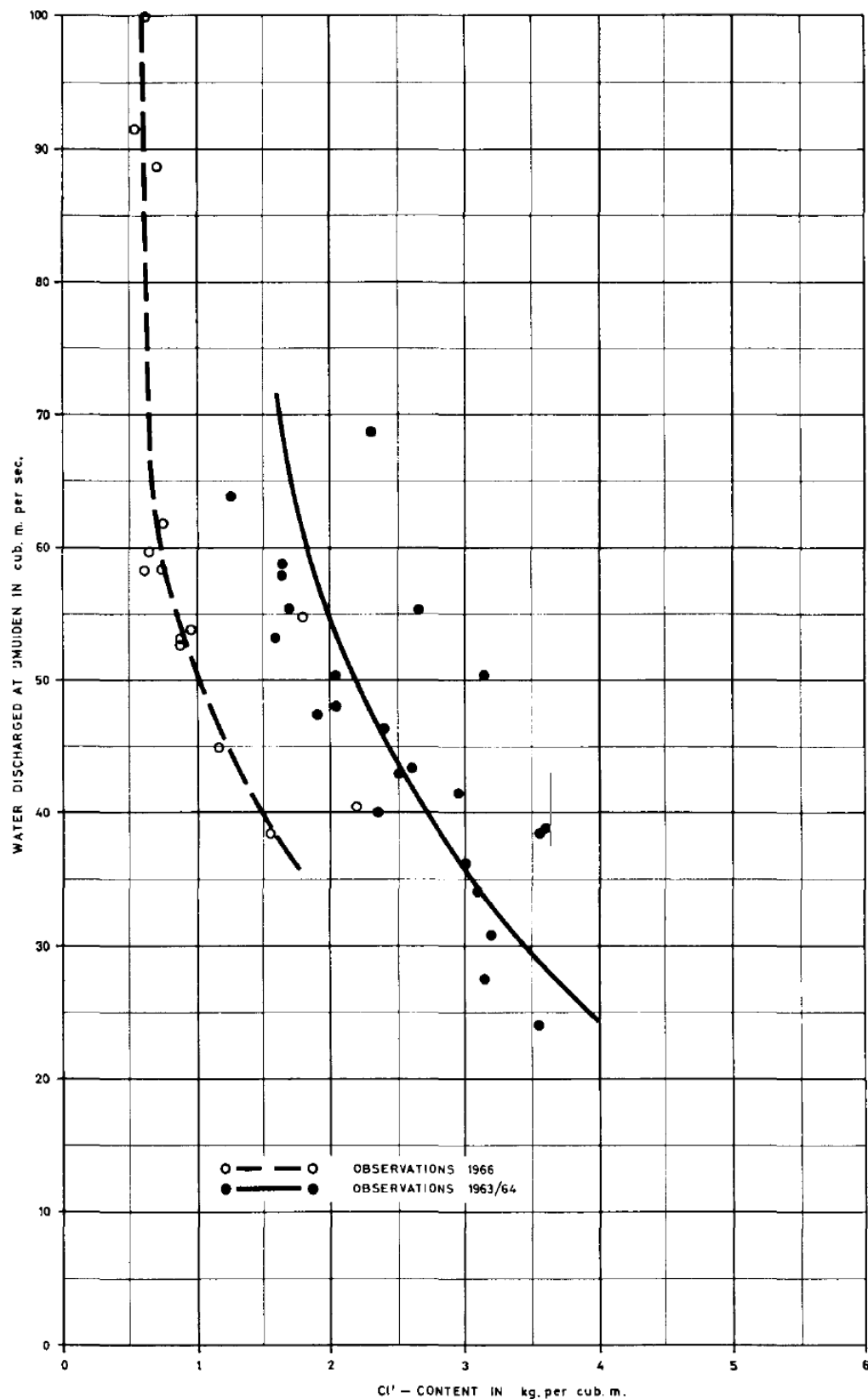
Onderstaande figuur toont de zoutindringing in het Kanaal Gent-Terneuzen (KGT) bij meetlocatie Sas van Gent. Ondanks een afstand van meer dan 10 km tot de sluizen bij Terneuzen worden hier hoge chlorideconcentraties gemeten (>5000 mg/l bij een gebruikelijke zomerafvoer van ongeveer 15 m³/s, zie Figuur C-2). Om het water hier volledig zoet te krijgen (<150 mg/l), is exponentieel meer doorspoeling nodig, meer dan het bereik wat zichtbaar is in deze grafiek). In de praktijk is het KGT daarom ook een brak kanaal (KRW-klasse 300-3000 mg/l).



Figuur C-2 Evenwichtsconcentratie (mg/l chloride) bij locatie Sas van Gent als functie van de totale bovenafvoer. Overgenomen uit HKV (2023).

Het KGT is 140 m breed, en daarmee minder breed dan de Oude Maas (ca. 250 m) en Nieuwe Maas (ca. 400 m). Het benodigde doorspoeldebiet neemt evenredig toe met de breedte. De verwachting is dat een zeer groot doorspoeldebiet (in totaal orde 1000 m³/s) nodig is om de Oude en Nieuwe Maas (bij handhaven van de huidige breedte) zoet te houden (<150 mg/l) op relatief korte afstand vanaf de zeesluizen (Deltares, 2024b).

Ook voor het Noordzeekanaal (NZK) zijn dergelijke exponentiële verbanden gevonden in onder andere Abraham et al. (1973). Bij een afvoer van 100 m³/s was het chloridegehalte helemaal achterin het NZK (op 24 km afstand vanaf de sluizen bij IJmuiden) nog steeds 600 mg/l bij toepassing van bellenschermen (Figuur C-3). Zonder deze bellenschermen lagen de chlorideconcentraties nog ongeveer 1000 mg/l hoger. De curves dalen zeer langzaam bij een verdere verhoging van het debiet. Op 3 km afstand vanaf IJmuiden gaat het om orde 3000 mg/l chloride bij 100 m³/s doorspoeldebiet, zonder bellenschermen (figuur uit Abraham et al. 1973, niet overgenomen).



Figuur C-3 Chlorideconcentratie (horizontale as, in kg/m^3) uitgezet tegen de afvoer bij IJmuiden (m^3/s) in de situatie zonder bellenschermen (1963-1964) en met bellenschermen (1966). Bron: Abraham et al. (1973).

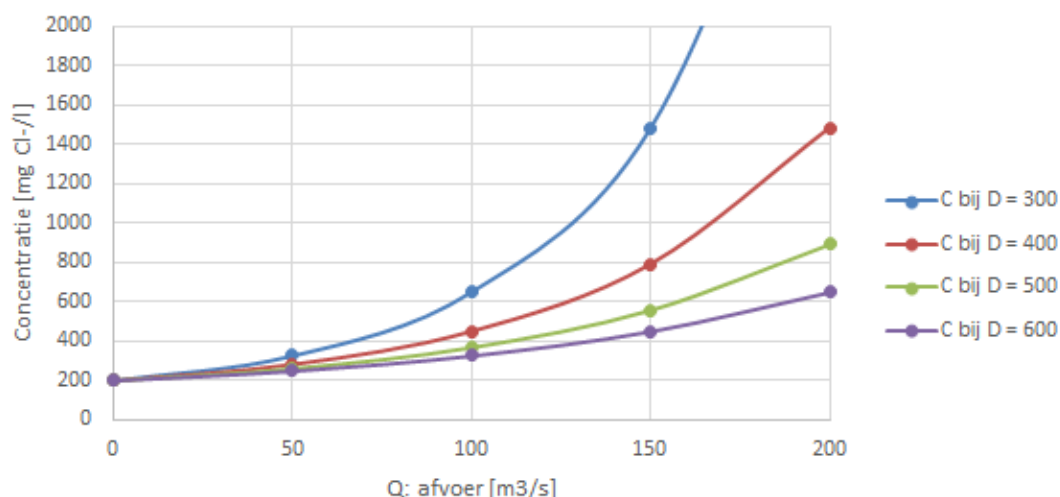
C.4 Zoutindringing via schutsluizen

Bij het afsluiten van de Rijn-Maasmonding via schutsluizen komt zout water het afgesloten systeem binnen bij elke schutting. Er is doorspoeling nodig om dit zoute water weer terug af te voeren richting de Nieuwe Waterweg. In deze Bijlage wordt ingeschat hoe groot deze doorspoeling (rivierafvoer) moet zijn voor inrichtingsvarianten met zeesluizen en binnenvaartsluizen. Daarbij wordt voortgebouwd op eerder onderzoek voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS), Spoor IV, oplossingsrichting Beschermen. Binnen dat project zijn verkennende berekeningen uitgevoerd met een analytische dispersierelatie in combinatie met de Zeesluisformulering (ZSF). Deze zijn gepresenteerd op een hackathon van 29 september 2023. Voor de huidige studie was geen tijd beschikbaar om aanvullende berekeningen te doen. Daarom is geïnterpoleerd en geëxtrapoleerd op basis van de berekeningen uit het KP ZSS.

De redeneerlijn is als volgt:

1. Kies een locatie waar zoetwater vereist is. Uitgangspunt zijn de monding van de Lek voor de Nieuwe Maas en de monding van het Spui voor de Oude Maas, waar een chlorideconcentratie van maximaal 200 mg/l gewenst is.
2. Tussen deze zoete locaties en de binnenzijde van de sluizencomplexen mag de zoutconcentratie geleidelijk oplopen. Voor die berekening wordt gebruik gemaakt van een analytische dispersierelatie met een dispersiecoëfficiënt van $500 \text{ m}^2/\text{s}$. Dit is een representatieve waarde voor gesloten systemen, zo blijkt uit een kalibratiestudie van HKV waarin SOBEK is toegepast voor het Kanaal Gent-Terneuzen (HKV, 2023). Voor verschillende rivierafvoeren kan worden berekend hoe hoog het zoutgehalte aan de binnenzijde van de sluizencomplexen in de Oude Maas en/of Nieuwe Maas mag zijn om ter plaatse van het zoete punt het niveau van 200 mg/l niet te overschrijden. Het resultaat voor locatie Heijplaat, op 17 km vanaf de monding van de Lek, is weergegeven in Figuur C-4.
3. Bij een combinatie van rivierafvoer en het maximale zoutgehalte aan de binnenzijde van het sluizencomplex hoort een (maximale) uitgaande zoutflux bij het sluizencomplex. Deze volgt eenvoudig uit vermenigvuldiging van rivierafvoer en zoutgehalte.
4. Met het zoutgehalte aan de binnenzijde en buitenzijde, in combinatie met de afmetingen en schutfrequentie van de sluizen, kan ook een inkomende zoutflux worden berekend.
5. De rivierafvoer is hoog genoeg als er een evenwicht kan worden gevonden tussen de inkomende en uitgaande zoutflux.

Concentratie chloride bij Heijplaat afh. van D en Q



Figuur C-4 Maximale toelaatbare chlorideconcentratie aan de binnenzijde van het sluizencomplex bij locatie Heijplaat op 17 km vanaf monding Lek als functie van de rivierafvoer, om bij monding Lek een chloridegehalte van 200 mg/l te verkrijgen. Verschillende lijnen horen bij verschillende aangenomen dispersiecoëfficiënten voor zoutverspreiding in de afgesloten Rijn-Maasmonding.

Binnen het KP ZSS is gerekend aan de locaties Beneluxtunnel en Maastunnel. De gekozen locatie in de inrichtingsvarianten in dit memo bevinden zich hier tussenin, bij de Heijplaat tussen de Eemhaven en Waalhaven. De afstand tussen deze locatie en de monding van de Lek is ongeveer 17 km. Over die afstand is ruimte voor een zoutgradiënt.

In het KP ZSS is gerekend aan de volgende sluisconfiguraties in de Nieuwe Maas:

- Een Panamax+ zeesluis
- Twee binnenvaartsluizen voor 6-baks duwvaart
- Idem, maar dan i.c.m. een bellenscherm
- Idem, maar dan i.c.m. een bellenscherm en een spoeldebiet door de kolk

Sluis voor zeevaart (Panamax+):

- lengte x breedte x bodemniveau t.o.v. waterstand: 300m x 36m x peil -12 m;
- geschikt voor schepen van (oude) Panamax-maat, maar met extra breedte en lengte voor benutting door binnenvaart (6-baks breed en -lang);
- 16 schutcycli per etmaal, 5 min voor deuren openen/sluiten, 10 minuten voor nivelleren, factor op deuropentijden CDOT = 0,6 (conform Noordersluis IJmuiden); representatieve deuropentijd = 18 minuten;
- scheepsvolume in de kolk: 10% van kolkvolume.

Sluis voor binnenvaart (6-baks duwvaart):

- lengte x breedte x bodemniveau t.o.v. waterstand: 300m x 24m x peil -6 m;
- drempel op binnenhoofd: 1 m boven de bodem;
- 24 schutcycli per etmaal, 2,5 min voor deuren openen/sluiten, 5 minuten voor nivelleren, factor op deuropentijden CDOT = 0,5; representatieve deuropentijd = 11 minuten
- scheepsvolume in de kolk: 10% van kolkvolume
- bellenschermen: $\eta = 0,25$, 10 m buiten de deuren
- momentaan spoeldebiet door de kolk (as deuren open staan): 10 m3/s

Enkele andere details over de berekeningen met de ZSF:

- Aangenomen waterstand aan weerszijden: NAP+0 m. Deze aanname betekent dat zeespiegelstijging niet in de berekeningen is meegenomen. De waterstand is echter een relatief onbelangrijke factor bij zoutuitwisseling via sluizen. Als de zeespiegel stijgt, kunnen daarnaast ook nog de drempels in de sluiskolken worden verhoogd, zonder de maximale diepgang van de schepen te verkleinen.
- In Strategie A1 stijgt het binnenpeil niet mee met de zeespiegel. Er moet dan over een toenemend peilverschil genivelleerd worden. Om zoutindringing dan niet te laten toenemen is het een optie om het schutdebiet op te vangen in een apart bekken (conform Krammersluizen na ombouw) en terug te voeren naar de Nieuwe Waterweg.

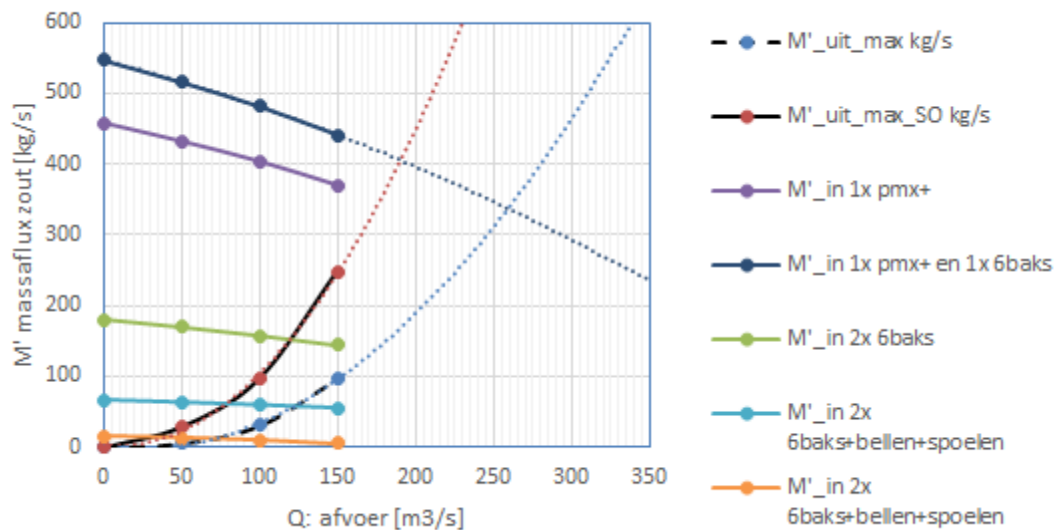
Onderstaande Figuur C-5 toont dalende en stijgende lijnen. De stijgende lijnen tonen de maximale uitgaande zoutflux als functie van de rivierafvoer. Bij een hogere rivierafvoer spelen twee processen. Hoe hoger de rivierafvoer, hoe hoger het volume afgevoerd zout water, maar ook hoe hoger het zoutgehalte aan de binnenzijde van het sluizencomplex mag zijn. Bij een hoge rivierafvoer is namelijk de gradiënt in chloridegehalte tussen monding Lek en het sluizencomplex groter. De combinatie van die twee factoren zorgt voor een min of meer kwadratische relatie tussen debiet door de Nieuwe Maas en maximale uitgaande zoutflux. Er zijn twee stijgende lijnen: de standaard lijn met zoutgehalte x rivierafvoer, en een lijn met een selectieve onttrekking, waarbij aangenomen is dat twee keer zo zout water wordt afgevoerd dan dieptegemiddeld.

De dalende lijnen tonen de inkomende zoutflux. Deze is berekend met de ZSF op basis van sluisdimensies, een schutpatroon en het zoutgehalte aan de binnen- en buitenzijde. Voor de buitenzijde (Nieuwe Waterweg) is aangenomen dat het zoutgehalte enigszins daalt naarmate er meer water uit de Oude en Nieuwe Maas komt: aangenomen waarden van 28, 27, 26, 25 kg/m³ bij afvoeren van resp. 0, 50, 100, 150 m³/s. Zoals beschreven bij het vorige punt: het (maximale toelaatbare) zoutgehalte aan de binnenzijde stijgt met de rivierafvoer. Er is dus een afnemend dichtheidsverschil over de sluiskolk bij een toenemende rivierafvoer. Hierdoor wordt de dichtheidsgedreven kolkuitwisseling aan beide zijden van de sluis minder sterk, en daalt de inkomende zoutflux bij een toenemende rivierafvoer.

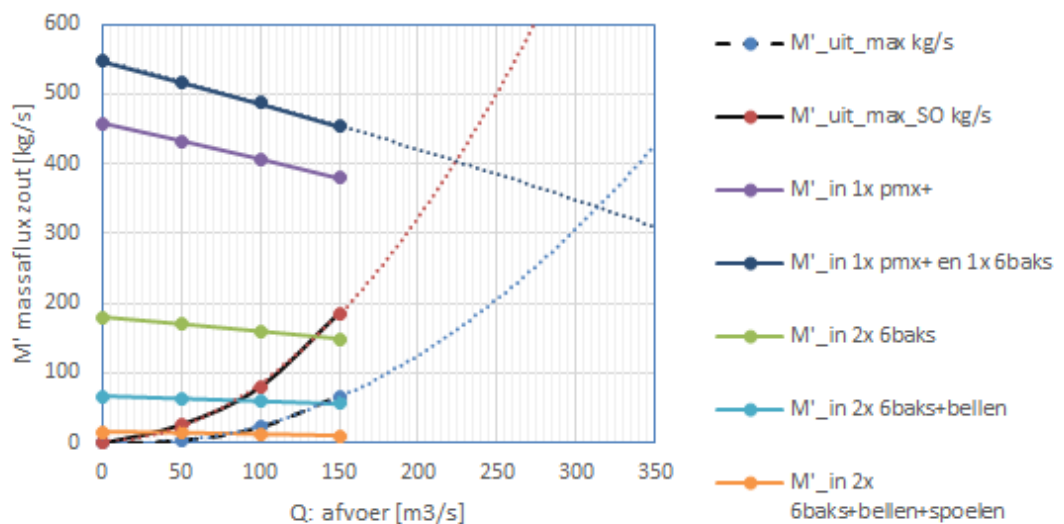
Voor de inrichtingsvarianten met zeesluizen als bouwsteen is in de Nieuwe Maas uitgegaan van een Panamax+ zeesluis en een 6-baks duwvaart binnenvaartsluis naast elkaar. Als inkomende zoutflux is de helft van de zoutflux voor 2 binnenvaartsluizen voor 6-baks duwvaart opgeteld bij de zoutflux voor de Panamax+ zeesluis. Dit resulteert in de bovenste dalende lijn in de figuren. Om snijpunten te verkrijgen is extrapolatie uitgevoerd naar hogere doorspoeldebieten met kwadratische trendlijnen. Aanbevolen wordt om deze extrapolatie in een later stadium te vervangen door berekeningen met de dispersierelatie plus ZSF.

De kruispunten van de lijnen resulteren in de getallen in Tabel C-5. Als we ervan uitgaan dat een selectieve onttrekking wordt gerealiseerd (vergelijkbaar met de zoutdam bij IJmuiden of riolen onder de sluiskolk zoals bij de Westsluis van Terneuzen) en dat deze de afvoer van zout verdubbelt, is de benodigde rivierafvoer door de Nieuwe Maas 205 m³/s in het geval van een Panamax+ zeesluis met daarnaast een 6-baks binnenvaartsluis (bouwsteen zeesluizen), en 130 m³/s bij twee 6-baks binnenvaartsluizen (bouwsteen binnenvaartsluizen).

(Max.) massaflux zout bij sluizen nabij Beneluxtunnel



(Max.) massaflux zout bij sluizen nabij Maastunnel



Figuur C-5 Figuren uit een presentatie voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging met de inkomende en uitgaande zoutflux bij de sluizen in de Nieuwe Maas als functie van het doorspoeldebiet. Extrapolatie naar hogere doorspoeldebieten is toegevoegd om snijpunten in te schatten.

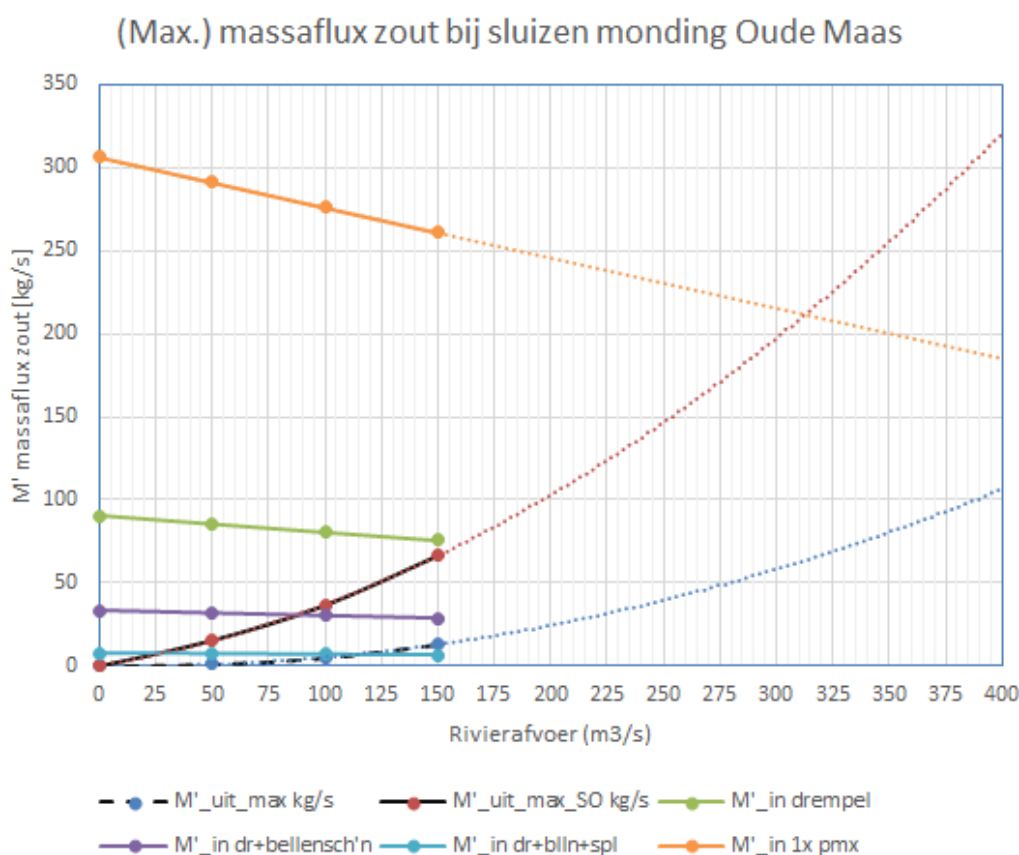
Tabel C-5 Benodigde rivierafvoeren om de Nieuwe Maas zoet te houden bij een sluizencomplex bij de Beneluxtunnel, Maastunnel of bij Heijplaat, in het geval van een Panamax+ zeesluis in combinatie met een 6-baks binnenvaartsluis (links) of bij 2 6-baks binnenvaartsluizen (rechts). SO = selectieve onttrekking.

Locatie	1x Panamax+, 1x 6baks		2x 6baks	
	met SO	zonder SO	met SO	zonder SO
Beneluxtunnel	190	270	120	170
Maastunnel	220	320	140	200
Heijplaat	205	295	130	185

Voor de Oude Maas kan hetzelfde worden gedaan. Het verschil is alleen dat de afstand tussen de monding van de Oude Maas (in de Nieuwe Waterweg) en de monding van het Spui (in de Oude Maas) veel kleiner is: slechts 8 km. Er is dus minder afstand beschikbaar voor een stijging van de chlorideconcentratie van 200 mg/l naar een toelaatbare waarde aan de binnenzijde van het sluizencomplex. Dit zorgt ervoor dat er relatief hoge rivierafvoeren nodig zijn om het zoutgehalte aan de binnenzijde van het sluizencomplex laag te houden. Zeker bij een zeesluis leidt dit tot een hoge vereiste rivierafvoer.

Figuur C-6 toont het resultaat. De lijn voor de zeesluis (een smallere Panamax, geen Panamax+) is toegevoegd t.o.v. het KP ZSS op basis van de verhoudingen tussen inkomende zoutfluxen in de Nieuwe Maas. Hier ligt dus voor de Oude Maas geen berekening met de ZSF aan ten grondslag. Daarnaast was sterke extrapolatie met kwadratische trendlijnen nodig om te komen tot een snijpunt voor de zeesluis. Alleen met selectieve onttrekking is een snijpunt haalbaar binnen een realistisch bereik aan rivierafvoeren tijdens een droge zomer. Het snijpunt met de Panamax zeesluis ligt bij 310 m³/s. Er is niet gekozen voor een binnenvaartsluis direct naast de zeesluis, vanwege de aanwezigheid van binnenvaartsluizen bij de Rozenburgsesluis en het Beerkanaal, en vanwege de mogelijkheid om om te varen via de Nieuwe Maas.

Voor de bouwsteen met binnenvaartsluizen is gebruik gemaakt van de rivierafvoer van 50 m³/s door de Oude Maas. In het CIP-project (Deltares, 2024a) is hieraan gerekend met SOBEK3 en ZSF, en deze berekeningen zijn betrouwbaarder dan de kruisende lijnen uit Figuur C-6.



Figuur C-6 Figuur uit een presentatie voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging met de inkomende en uitgaande zoutflux bij de sluizen in de Oude Maas als functie van het doorspoeldebiet. Extrapolatie naar hogere doorspoeldebieten is toegevoegd om snijpunten in te schatten.

Er is ook nog afvoer nodig voor terugvoeren van zout van de Rozenburgsesluis en de sluis in het Beerkanaal. Door dispersie over grotere afstand zijn daarvoor minder maatregelen nodig. Voor de varianten met zeesluizen is een extra debiet van 20 m³/s aangenomen. Voor de varianten met binnenvaartsluizen betrof het debiet van 50 m³/s uit Deltares (2024a) al de benodigde rivierafvoer om de zoutvracht vanuit de drie sluisencomplexen bij elkaar terug te spoelen.

Bij een inrichtingsvariant met dammen is er alleen doorspoeling nodig voor de bestaande Rozenburgsesluis (25 m³/s, schatting van 50% van het getal voor Oude Maas uit Deltares (2024a)) en voor het wegspoelen van zoute kwel. Deze is in Kennisprogramma Zeespiegelstijging (2024a) geschat op 100 m³/s in 2100 en 150 m³/s in 2200. Deze getallen hebben betrekking op de gehele afgesloten Zuidwestelijke Delta, dus met een afgesloten zoetwatermeer van de Westerschelde tot aan de Nieuwe Maas. Als ruwe schatting houden we aan dat bij een afgedamde Rijn-Maasmonding de helft van dit debiet nodig is: 50 m³/s. Hiervan wordt 25 m³/s al afgevoerd via de Rozenburgsesluis. Daarnaast is dan nog 25 m³/s extra nodig voor het afvoeren van zoute kwel uit de Rijn-Maasmonding.

De totale doorspoelbehoefte van de afgesloten Rijn-Maasmonding is in de verschillende inrichtingsvarianten als volgt ingeschat.

Gesloten zeefront (Strategie A1/A2) met zeesluizen:

- Panamax+ zeesluis & 6-baks duwvaart binnenvaartsluis in de Nieuwe Maas: 205 m³/s
- Panamax zeesluis in de Oude Maas: 310 m³/s
- 6-baks duwvaart binnenvaartsluizen Rozenburg & Beerkanaal: 20 m³/s
- Zoute kwel: geen extra doorspoeling nodig
- Totaal: 535 m³/s

Gesloten zeefront (Strategie A1/A2) of deltapolder (Strategie B2) met binnenvaartsluizen:

- Twee keer 6-baks duwvaart binnenvaartsluizen in de Nieuwe Maas: 130 m³/s
- Drie 6-baks duwvaart binnenvaartsluizen Oude Maas, Rozenburg & Beerkanaal: 50 m³/s
- Zoute kwel: geen extra doorspoeling nodig
- Totaal: 180 m³/s

Gesloten zeefront (Strategie A1/A2) met dammen:

- 6-baks duwvaart binnenvaartsluis Rozenburgsesluis: 25 m³/s
- Zoute kwel: 25 m³/s
- Totaal: 50 m³/s

Afsluitbaar open zeefront (Strategie B1) met binnenvaartsluizen Oude Maas:

- Drie 6-baks duwvaart binnenvaartsluizen Oude Maas, Rozenburg & Beerkanaal: 50 m³/s
- Benodigde rivierafvoer Nieuwe Maas: 350 à 420 m³/s (grobe schatting)
- Totaal: 400 à 470 m³/s

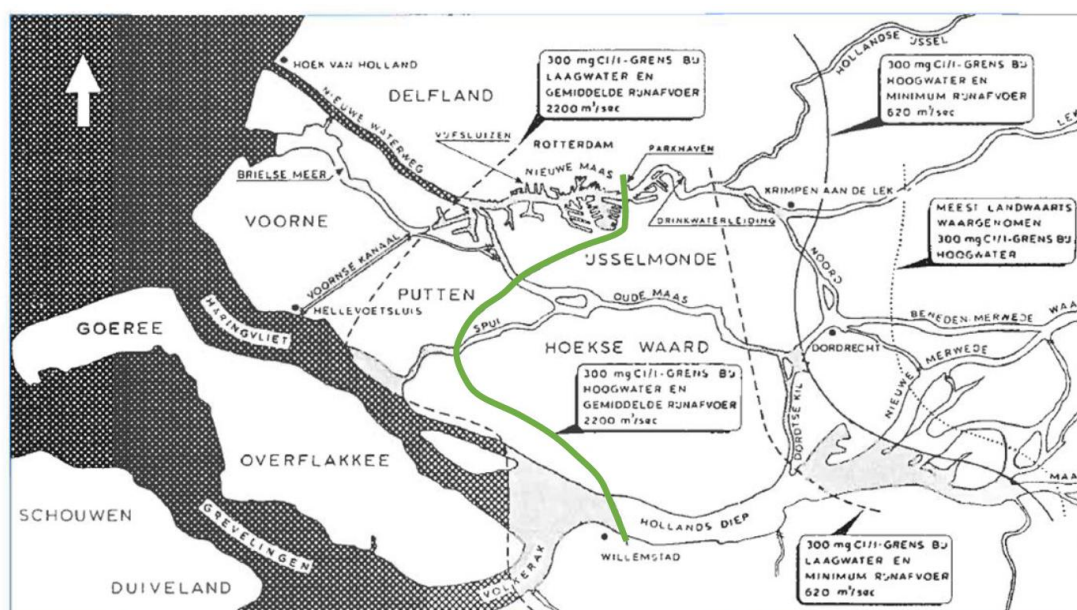
C.5 Zoutindringing in open estuaria

In Wageningen Marine Research & Deltares (2018) is op basis van historische gegevens, analytische berekeningen en expertoordeel ingeschat waar het zoutfront (ongeveer 300 mg/l chloride) zou komen te liggen als de Haringvlietsluizen geheel worden geopend. Dit is dus nog geen volledig open estuarium zonder enige obstructie in de monding, maar een estuarium met een getijslag van ongeveer 140 cm.

In de huidige situatie met de Haringvlietsluizen op een 'kier' is er nauwelijks sprake van getijwerking. Het zoutfront bevindt zich afhankelijk van de rivierafvoer tussen de Haringvlietsluizen en de lijn Spui-Middelharnis. Via 'lerend implementeren' wordt de kier

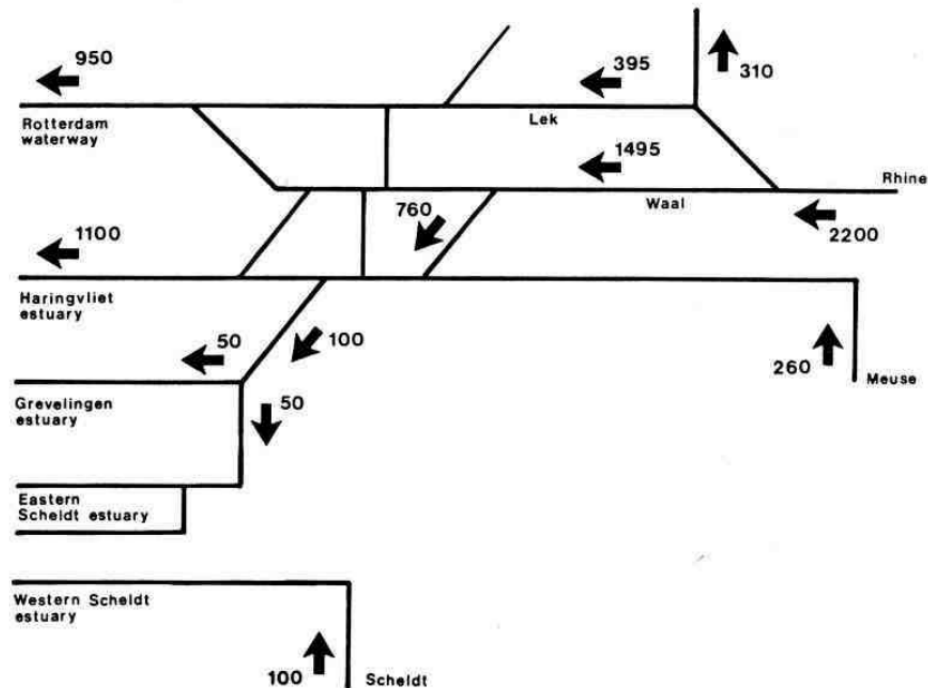
zodanig afgeregeld, dat de zoetwatervoorziening in het Spui (bij de Bernisse-inlaat) niet in gevaar komt.

Figuur C-7 geeft een indicatie van de positie van het 300 mg Cl l⁻¹ zoutfront eind jaren '60, voor de aanleg van de Haringvlietsluizen. Dit zoutfront lag toen bij hoogwater en een gemiddelde Rijnaflow (2200 m³/s via de Rijn, ca. 1100 m³/s via het open Haringvliet, zie Figuur C-8) net ten oosten van Willemstad. Bij een zeer lage Rijnaflow (620 m³/s) bewoog het zoutfront gedurende een getijcyclus heen en weer tussen de Dordtse Kil en de monding van de Nieuwe Merwede. In de Amer is de tegendruk tegen zout lager door de lagere afvoer vanuit de Maas. Hier kon het zoutfront bij een zeer lage Rijnaflow (620 m³/s) het Wilhelminakanaal bereiken. De meest landwaarts waargenomen positie van het 300 mg Cl l⁻¹ zoutfront was iets benedenstrooms van Wantij in de Nieuwe Merwede en het Oude Maasje langs de Amer (net ten oosten van Raamsdonkveer). Vermoedelijk heeft hierbij stormopzet een rol gespeeld. Zo is in 1953 de Biesbosch voor het eerst grootschalig verzilt geraakt⁸.



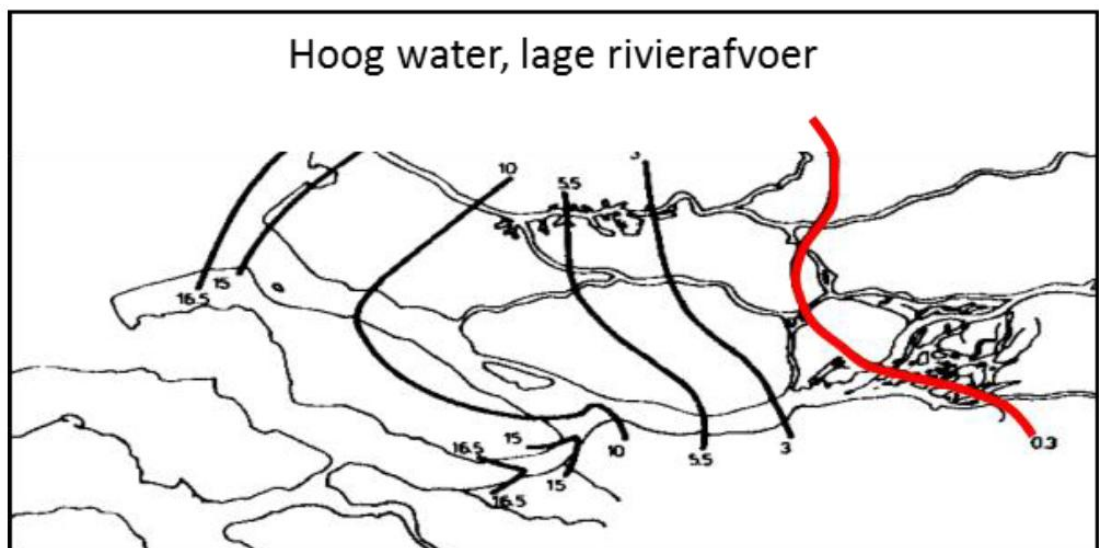
Figuur C-7 Globaal overzicht van de 300 mg Cl l⁻¹ grenzen, gebaseerd op metingen aan het wateroppervlakte uit eind jaren 60. De 300 mg Cl l⁻¹ isocline bij hoogwater en gemiddelde Rijnaflow is in het groen aangegeven. Bron: Rijkswaterstaat (1998).

⁸ <https://www.staatsbosbeheer.nl/wat-we-doen/nieuws/2021/11/biesbosch-600-jaar>



Figuur C-8 Gemiddelde afvoerverdeling (in m³/s) van de grote rivieren in 1965. Uit: Bijlsma & Kuipers (1989), overgenomen uit Imares (2007).

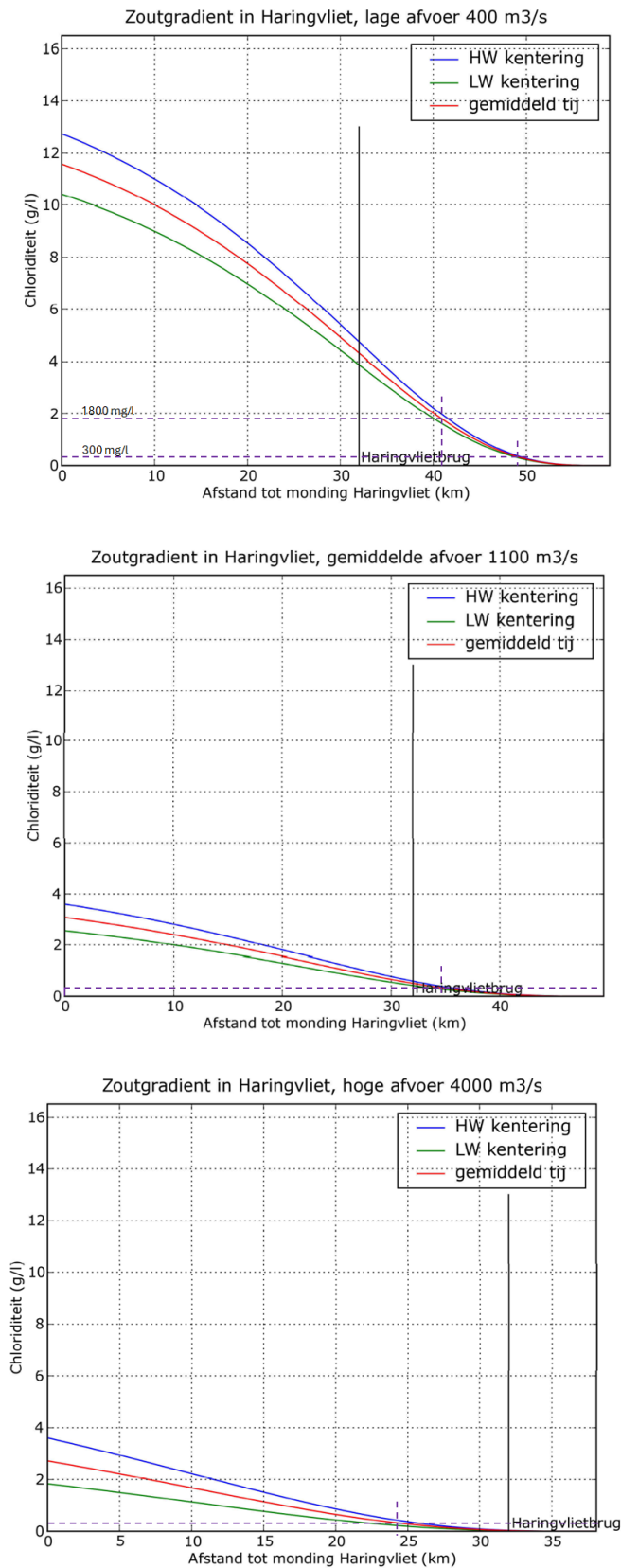
In Wageningen Marine Research & Deltares (2018) is betoogd dat de situatie voor 1960 naar verwachting leidde tot meer zoutindringing dan in de huidige situatie bij openen van de Haringvlietssluisen. Ten opzichte van de situatie voor 1960 is het doorstroomoppervlak kleiner geworden door de aanwezigheid van de (open) Haringvlietssluisen, en is zoutindringing via Oosterschelde en Volkerak weggevalen. Uit Figuur C-9 blijkt dat zoutindringing via de open verbinding met Oosterschelde en Grevelingen aanzienlijke invloed had op de zoutindringing, en waarschijnlijk zelfs dominant was.



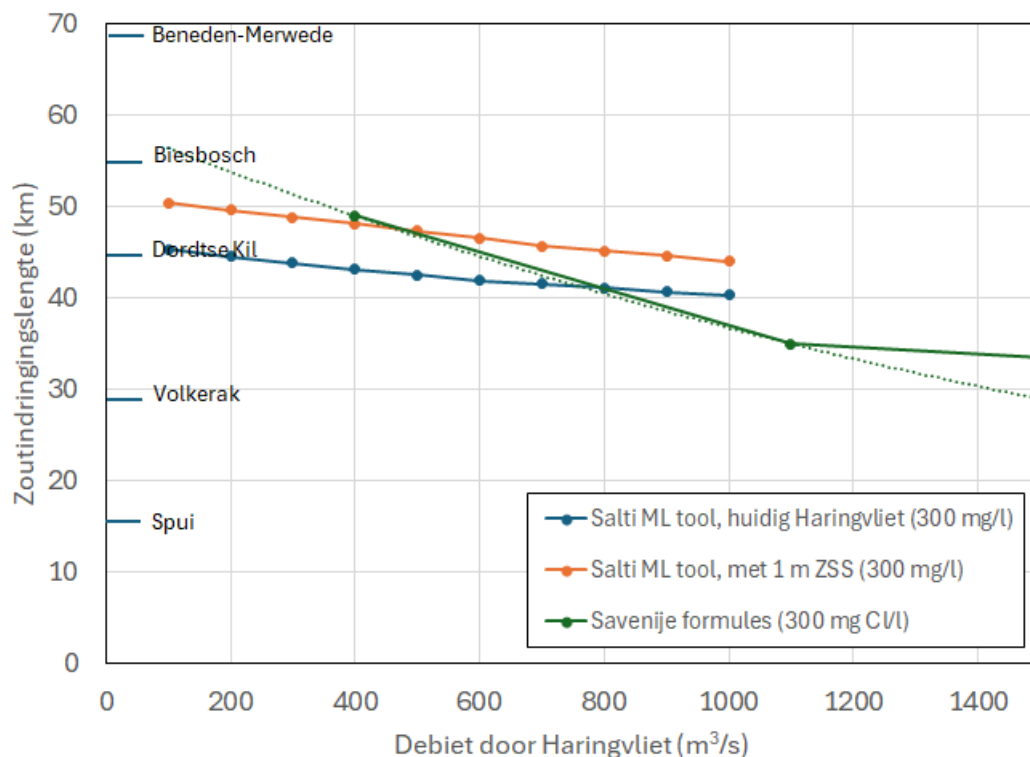
Figuur C-9 Zoutgehalte bij de bodem in het onderzoeksgebied voor de sluiting van de Haringvlietdam bij lage rivierafvoer en astronomisch hoogwater. De rode lijn geeft de 300 mg Cl l⁻¹ isocline. De figuur komt uit Wolff (1973) en is gebaseerd op data uit 1963 tot 1970. Bron: Wageningen Marine Research & Deltares (2018).

Binnen het onderzoeksprogramma Salti Solutions is door Gijs Hendrickx op basis van 3D-modellering van uiteenlopende geïdealiseerde estuaria ingeschat hoe groot de zoutindringingslengte is bij diverse combinaties van getijslag en rivierafvoer. Met behulp van machine learning zijn patronen in de modeldata ontrafeld en ontsloten in een webtool (<https://annesi-web.netlify.app/>). In deze webtool zijn globaal genomen de karakteristieken van het Haringvliet en de getijslag in de monding ingevoerd. De tool levert een zoutindringingslengte op basis van de 1 PSU saliniteitscontour gaat, wat overeenkomt met ongeveer 1800 mg Cl l⁻¹. Uit het analytische model van Savenije (2005) blijkt dat de 1800 mg/l contour ongeveer 8 km minder ver landinwaarts ligt dan de 300 mg/l contour. Daarom is 8 km opgeteld bij het resultaat van de webtool van Hendrickx voor een inschatting van de 300 mg Cl l⁻¹ zoutindringingslengte. Het resultaat is weergegeven in Figuur C-11.

Uit Figuur C-11 volgt een vrij beperkte invloed van de rivierafvoer. De vraag is of dit het gevolg is van bijvoorbeeld de schematisatie van het Haringvliet, de 3D-modelberekeningen of het Machine Learning model, of dat dit ook werkelijk te verwachten is. Om die reden is ook gekeken naar figuren uit Imares (2007) met een berekende zoutindringingslengte met de analytische formules van Savenije (2005), zie Figuur C-10. Daaruit volgt een getijgemiddelde positie van de 300 mg Cl l⁻¹ contour van 24 km bij 4000 m³/s, 35 km bij 1100 m³/s en 49 km bij 400 m³/s. Deze lijn is ook toegevoegd aan Figuur C-11, met een grove extrapolatie naar het lagere bereik voor een indicatie van de indringingslengte bij nog lagere afvoeren dan 400 m³/s. De gevoeligheid voor het debiet in de formules van Savenije is groter dan in de webtool van Hendrickx.



Figuur C-10 Inschatting van de zoutindringingslengtes (300 en 1800 mg Cl l-1) bij verschillende afvoeren door het Haringvliet (400 m³/s boven, 1100 m³/s midden, 4000 m³/s onder) op basis van figuur uit Imares (2007).



Figuur C-11 Zoutindringingslengte in het Haringvliet zoals berekend met de webtool uit Salti Solutions. Hierbij is de originele 1 PSU ($1800 \text{ mg Cl l}^{-1}$) zoutindringingslengte uit de webtool omgezet in een 300 mg Cl l^{-1} zoutindringingslengte door er 8 km bij op te tellen. Deze inschatting is gemaakt o.b.v. de formules van Savenije bij lage afvoer ($400 \text{ m}^3/\text{s}$). De zoutindringingslengte volgens de formules van Savenije, uitgerekend in Imares (2007) is ook toegevoegd, inclusief extrapolatie naar $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Op basis van de diverse bronnen volgt het volgende beeld:

- Het Spui en het Volkerak zijn bij een open Haringvliet niet zoet te houden, niet bij een lage Rijnafvoer, maar ook niet bij meer gemiddelde condities.
- Als het criterium wordt dat de Dordtse Kil zoet moet blijven, is een afvoer door het Haringvliet nodig van ongeveer $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij 1 meter ZSS wordt het duidelijk moeilijker om een zoete monding van de Dordtse Kil te behouden, tenzij de bodem van het gehele Haringvliet meegroeit met de zeespiegelstijging.
- Als het criterium wordt om de Biesbosch zoet te houden, is naar verwachting een afvoer door het Haringvliet van ongeveer $150 \text{ m}^3/\text{s}$ nodig. Alleen bij sterke stormopzet op de Noordzee is grootschalige zoutindringing tot aan de Biesbosch te verwachten, maar dan treedt de stormvloedkering in werking.

Al deze getallen zijn indicatief van aard. Nader onderzoek met bijvoorbeeld het 3D-model voor het Haringvliet is aan te bevelen om met meer zekerheid te kunnen zeggen hoe ver het zout komt bij zeer lage rivierafvoeren.

Voor Strategie B2 met open Grevelingen geldt een vergelijkbare beschouwing als voor deze Strategie met open Haringvliet, met enkele verschillen:

- Het Volkerak is in deze inrichtingsvariant onderdeel van het open estuarium. Voor deze inrichtingsvariant moet hoe dan ook een alternatief gevonden worden voor het Volkerak-Zoommeer als zoetwaterreservoir.
- De monding van de Grevelingen is breder dan het Haringvliet, 5 km in de monding bij de Brouwersdam, maar versmalt wel naar 1,6 km bij Ooltgensplaat op 40 km afstand.

- De afstand vanaf de monding tot aan de Biesbosch via de Grevelingen is groter dan via het Haringvliet: 69 km in plaats van 55 km. Dit verkleint de kans op verzilting van bijvoorbeeld de Dordtse Kil en de Grevelingen.

Kwantitatieve informatie over deze inrichtingsvariant is niet beschikbaar, omdat de Grevelingen nooit een estuarium met significante rivierafvoer is geweest.

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

Deltares

www.deltares.nl