

Vervolg Stresstest Indirecte Bedreigingen

Systeembeschrijving Hoofdwatersysteem



Vervolg Stresstest Indirecte Bedreigingen

Systeembeschrijving Hoofdwatersysteem

Auteur(s)

Remi van der Wijk
Anna van den Hoek
Rolien van der Mark

Vervolg Stresstest Indirecte Bedreigingen

Systeembeschrijving Hoofdwatersysteem

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	mevrouw N. Dasburg-Tromp
Referenties	
Trefwoorden	Binnenvaart, zoetwatervoorziening, waterverdeling, klimaatbestendige netwerken

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	24-01-2024
Projectnummer	11209214-003
Document ID	11209214-003-ZWS-0001
Pagina's	94
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Remi van der Wijk	
	Anna van den Hoek	
	Rolien van der Mark	

Samenvatting

Ten tijde van droogte dienen waterbeheerders in Nederland keuzes te maken voor de zoetwaterbeschikbaarheid. De keuzes kunnen leiden tot een andere verdeling van het water, een verandering in operatie van objecten of andere type maatregelen. Een verandering in *modus operandi* leidt meestal tot beperkingen of overlast voor de scheepvaart. Een aanpassing in waterverdeling gaat meestal ten koste van de vrij afstromende rivieren waardoor de waterdiepte afneemt en er minder vracht kan worden meegenomen. Een aanpassing in de operatie van de objecten ten behoeve van de zoetwatervoorziening verkleint vaak de beschikbare capaciteit van de objecten voor de scheepvaart indien dit object niet primair bedoeld is voor het doorlaten van water.

Voor het functioneren van het vaarwegensysteem is het noodzakelijk om mogelijke bedreigingen (bijvoorbeeld klimaatverandering en rivierbodemerrosie) te beoordelen en te kijken waar de mogelijke knelpunten zich in het systeem bevinden. In de afgelopen jaren heeft Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat meerdere stresstesten uitgevoerd voor het hoofdvaarwegennetwerk binnen het project Klimaatbestendige Netwerken. Het nemen van maatregelen ten behoeve van andere rivierfuncties wordt omschreven als een *indirecte bedreiging* voor de scheepvaart. In 2021 zijn deze bedreigingen op een rij gezet voor het hoofdvaarwegennetwerk.

In 2022 zijn gedurende de droogte meerdere maatregelen genomen die veel impact hadden op de scheepvaart (§2.2). Vanuit de scheepvaartafdeling van Rijkswaterstaat was daarna behoefte aan een systeembeschrijving van het hoofdwatersysteem waarin de samenhang tussen de functies zoetwatervoorziening en scheepvaart in beeld wordt gebracht ten tijde van droogte, inclusief hoe mogelijke maatregelen / afwegingen / keuzes doorwerken op de scheepvaart. In dit project is het doel gesteld om *te bepalen wat het effect is van de maatregelen voor de zoetwatervoorziening op de scheepvaart vanuit een systeembeschrijving waarin de samenhang van de verschillende functies duidelijk is.*

Binnen dit project is er gekeken naar het Midden-Rivierengebied (Waal, Nederrijn/Lek, Betuwepand), het Amsterdam-Rijnkanaal – Noordzeekanaal (§3.3) en het IJsselmeer (§3.4). Om het doel van het project te bereiken is gekeken naar de functies en regio's waarop wordt gestuurd ten tijde van droogte. Vervolgens zijn de criteria die worden gehanteerd voor het nemen van de maatregelen bepaald. Deze systeembeschrijving is ook naast de huidige ontwikkelingen voor de toekomst gelegd om veranderingen in het beslisproces duidelijk te maken. Uiteindelijk is het gevolg van de maatregelen voor de scheepvaart bepaald, waar mogelijk kwantitatief. De resultaten uit dit project geven de *belangrijkste afwegingen tussen de functies weer, maar vormen geenszins een compleet afwegingskader*. De resultaten vormen een overzicht van de *belangrijkste knelpunten in het hoofdvaarwegennet als gevolg van een externe bedreiging*.

Het waterbeheer ten tijde van droogte richt zich op het zoet houden van enkele cruciale locaties (§2.1). Deze locaties bevinden zich vaak op de rand van de zoet/zout scheiding ten tijde van droogte en zijn de belangrijkste of zelfs enige bron van zoet water. Voor het zoet houden van de Lek wordt gericht water aangevoerd via Hagestein (ten koste van de Waal) om genoeg tegendruk te bieden tegen het binnendringende zout. Het Amsterdam-Rijnkanaal (§3.3) is voor de regionale watervoorziening van West-Nederland cruciaal (Klimaatbestendige WaterAanvoer, KWA). Verder is het noodzakelijk om water aan te voeren om te voorkomen dat zout vanuit het IJ / Noordzeekanaal binnendringt en daarmee de kwetsbare natuur en het drinkwaterinnamepunt bij Nieuwersluis bedreigt.

Het IJsselmeer (§3.4) is de belangrijkste bron van zoetwater voor Noordelijk Nederland en het drinkwaterinnamepunt bij Andijk. Het beheer van het IJsselmeer is een balanceer-act tussen het inzetten van het beschikbare water voor het afvoeren van zout en de watervraag rondom het IJsselmeer.

Voor alle locaties geldt dat er op basis van metingen wordt bepaald of er maatregelen moeten worden genomen. Bij het Amsterdam-Rijnkanaal is dat de z5-waarde (een voortschrijdend gemiddelde van meerdere locaties). Het IJsselmeer maakt gebruik van metingen in en nabij de putten achter de sluizen. Op de Lek wordt gebruik gemaakt van divermetingen die tijdens droge zomers worden geïnstalleerd. De benodigde informatie en drempelwaarden waarop wordt gestuurd is de afgelopen jaren waar mogelijk aangescherpt, en zal in de toekomst ongetwijfeld verder worden aangescherpt met nieuwe inzichten.

Het aanvoeren van water voor de zoetwaterbuffers gaat vrijwel altijd ten koste van de vrij afstromende rivieren en dan in het bijzonder van de Waal. Het resultaat hiervan is een daling van de waterstand en daarmee een afname in vaardiepte. Of dit een probleem is hangt af of de vaardiepte afneemt bij de *maatgevende knelpunten*. De resultaten worden in dit onderzoek gepresenteerd als een afname in vervoerde vracht ten opzichte van de referentie situatie. De tussenstap van de berekening om de afname in waterdiepte te bepalen als gevolg van de verlaagde afvoer is opgenomen in de bijlage.

Verder kunnen bij objecten beperkingen ontstaan door te hoge stroomsnelheden, dit heeft dan invloed op de nautische veiligheid (Bernhardsluizen) of doordat scheepvaartsluizen nodig zijn om het water door te voeren (Irenesluizen). De hoofdtransportaders Rotterdam – Antwerpen – Amsterdam – Duitsland kennen de grootste blootstelling aan externe bedreigingen (§3.1). Dat betekent niet dat het belang van scheepvaart op de andere transportaders kan worden genegeerd.

De keuzes in waterverdeling voor het zichtjaar 2050 (§3.2.2) zijn vertaald naar een potentiële impact voor de scheepvaart (§4.1) met behulp van het Quick Inland Navigation Cost Model (QINCoM), een tool ontwikkeld binnen het project Klimaatbestendige Netwerken. De potentiële impact is louter het effect van de maatregelen onafhankelijk van de impact van klimaatverandering uitgedrukt in afname van vervoerde vracht. In werkelijkheid zal de combinatie van klimaatverandering **en** maatregelen resulteren in een hogere impact voor de scheepvaart. De maatregelen zijn het verhogen van de afvoer richting het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK-Route) al dan niet ten behoeve van het Markermeer. De tweede maatregel is het verhogen van de afvoer richting Hagestein om de Lek zoet te houden. Het verhogen van de afvoer over Driel is de laatste maatregel waarbij in theorie de afvoer uit de Waal, IJssel of een combinatie van beide kan komen. De gevolgen voor de scheepvaart zijn te zien in Tabel 1-1 **en** Tabel 1-3.

De afname in vervoerde vracht als gevolg van een andere waterverdeling neemt toe met lagere afvoeren doordat een groter deel van de vloot wordt beïnvloed door de afname in vaardiepte. Daarnaast neemt de totaal vervoerde vracht af bij lagere afvoeren bij Lobith. Het percentage afname in vervoerde vracht neemt dus sterk toe bij lagere rivierafvoeren. Ter illustratie is de afname in vervoerde vracht als gevolg van de toegenomen watervraag in 2050 (zonder aanvullende maatregelen) bij 1020 m³/s 1.124 ton / dag (0,1% van de totale vracht). Met 700 m³/s is dit 1.730 ton / dag (0,3% van de totale vracht).

Het verhogen van de afvoer richting het Amsterdam-Rijnkanaal heeft een grotere invloed op afname in vervoerde vracht dan het verhogen van de afvoer richting de Lek. Dit is simpelweg het gevolg van dat er meer water wordt onttrokken vanuit de Waal voor het Amsterdam-Rijnkanaal ten opzichte van de Lek. Het verschil in afname in vervoerde vracht is ruwweg een factor 2.

Het gecombineerde effect van de maatregelen is meer dan de som van de individuele maatregelen doordat bij afnemende vaardiepte meer schepen beïnvloed worden door een verdere afname in vaardiepte. Het effect van de inzet van beide maatregelen is *1.802 ton / dag (0,3% van de totale vracht)* bij 1020 m³/s en *3.143 ton / dag (0,6% van de totale vracht)* bij 700 m³/s.

Het verhogen van de afvoer richting de Nederrijn / Lek via Driel ten koste van de Waal heeft een grotere invloed op de vervoerde vracht dan de maatregelen Hagestein en Amsterdam-Rijnkanaal bij de laagste afvoeren. Dit komt doordat het maatgevende knelpunt op de Waal-route (Nijmegen) wordt beïnvloed door deze maatregel waar de maatregelen Hagestein en Amsterdam-Rijnkanaal een deel van de Waal-route beïnvloeden. De afname in vervoerde vracht is kleiner als het water uit de IJssel wordt gehaald omdat op deze transportader minder vracht wordt vervoerd. Daarentegen neemt procentueel een groot deel van de vervoerde vracht over de IJssel af omdat bij lage afvoeren de vaardiepte al klein is op de IJssel. Het effect van de maatregel Driel als het water deels uit de Waal en IJssel komt (50% uit elke tak) is *504 ton / dag (< 0,1% van de totale vracht)* bij 1020 m³/s en *3.799 ton / dag (0,8% van de totale vracht)* bij 700 m³/s.

Zowel de inzet van de ARK-route als de inzet van Hagestein is waarschijnlijk in de nabije toekomst (2050). Feitelijk is de inzet van Hagestein, al dan niet met een ander debiet dan hier aangenomen, al een operationele maatregel. De inzet van Driel is minder waarschijnlijk, dat komt doordat er aanpassingen in het systeem noodzakelijk zijn en dat de maatregel ten koste gaat van de scheepvaart en de zoetwatervoorziening van het IJsselmeer. Als er water uit de IJssel wordt gehaald gaat dit ten koste van de buffercapaciteit van het IJsselmeer. De gevolgen van onvoldoende buffer op het IJsselmeer zijn potentieel groot en er lopen meerdere beleidsvragen met betrekking tot het vergroten van de buffercapaciteit.

De impact van beperkingen bij objecten kan heel groot zijn, maar zijn niet altijd kwantitatief te maken. Het inzetten van de ARK-route of Hagestein resulteert vanaf 1020 m³/s bij Lobith in hogere stroomsnelheden door het Betuwepand wat leidt tot problemen met de nautische veiligheid en daarmee een waarschijnlijke stremming voor de scheepvaart van de Bernhardsluizen (voor de grootste scheepsklassen, Tabel 1-2). Bij de impact van een andere waterverdeling op de scheepvaart als gevolg van afnemende waterdiepte werd het effect groter bij lagere afvoeren omdat meer schepen beïnvloed worden door de beperking in vaardiepte. Voor de impact op de scheepvaart bij de stremming van de Bernhardsluizen wordt het effect kleiner bij afnemende afvoeren omdat de grootste scheepsklassen dan al minder vracht minder vervoeren. Bij een afvoer van 1020 m³/s bij Lobith is de potentiële impact van een stremming bij de Bernhardsluizen *7162 ton / dag (6,7% van de totaal vervoerde vracht)*. Met een afvoer van 700 m³/s bij Lobith neemt dit af naar *4957 ton / dag (7% van de totaal vervoerde vracht)*. Dit is wel een maximaal effect op de scheepvaart en gaat er van uit dat de vracht niet vervoerd wordt door kleinere schepen die nog wel de Bernhardsluizen kunnen passeren.

Voor het inzetten van de ARK-route moet de oude scheepvaartkolk worden gebruikt bij de Irenesluizen. Met het inzetten van de ARK-route gaat de wachttijd bij de Irenesluizen toenemen (§4.2.3). Wat hiervan het precieze effect is, is nog niet bekend. Er zijn schattingen te maken van de gevolgen van de wachttijd voor de scheepvaart, maar de toename in wachttijd is nog niet bepaald. Daarnaast kan de impact op de scheepvaart bij de Irenesluizen niet los worden gezien van de beperkingen die dan waarschijnlijk worden ingesteld bij de Bernhardsluizen. De extra wachttijd bij de Irenesluizen beïnvloedt weliswaar meer schepen, maar een stremming van grotere schepen bij de Bernhardsluizen beperkt een deel van de scheepvaart volledig. Dit zou in een vervolgonderzoek nader bekeken kunnen worden om een totaal beeld te krijgen van het effect op de scheepvaart.

Om de zoutlast te beperken wordt de sluisoperatie van zeesluizen aangepast. Vrijwel alle zeesluizen in Nederland kennen beperkingen ten tijde van droogte, in deze studie is specifiek gekeken naar de sluisen in de Afsluitdijk (§4.2.1, Stevin- en Lorentzsluisen) en het sluiscomplex bij IJmuiden (§4.2.4).

Met de huidige maatregelen is kwalitatief te constateren dat de beroepsvaart weinig hinder ondervindt bij het IJsselmeer (§4.2.1). Het grootste deel van de schuttingen bij de sluisen in de Afsluitdijk zijn voor recreatievaart in het zomerhalfjaar, dat neemt niet weg dat er nog een behoorlijk aandeel is van beroepsvaart in de zomer.

Daarnaast hebben de maatregelen minder invloed op de beroepsvaart omdat de deuropentijden niet wezenlijk veranderen en dat de beroepsvaart beter om kan gaan met de andere stromingspatronen als gevolg van de bellenschermen.

De schutbeperkingen bij IJmuiden (§4.2.4) hebben grote invloed op de zeevaart die afhankelijk is van exacte aankomsttijden (cruisevaart, lijndiensten en scheepvaart voor goederen die sterk variëren in de tijd). Verder zal het vestigingsklimaat van de haven van Amsterdam minder aantrekkelijk worden als er vaker schutbeperkingen zijn. Het is aan te bevelen om het effect van de schutbeperkingen waar mogelijk te kwantificeren om de daadwerkelijke impact te kunnen vergelijken met andere functies of afwegingen voor de scheepvaart.

Voor de scheepvaart is een afweging op het Amsterdam-Rijnkanaal te maken tussen hinder als gevolg van een toename in wateraanvoer (en afname vaardiepte Waal) en hinder als gevolg van schutbeperkingen bij IJmuiden. Vervolgonderzoek in 2024 gaat zich richten op het kwantitatief maken van de gevolgen van schutbeperkingen op de scheepvaart. Dan kan een balans worden opgemaakt van de impact van de verschillende maatregelen op de scheepvaart. Hierbij dient opgemerkt te worden dat het aanvoeren van water gericht is op het zoet houden van het Amsterdam-Rijnkanaal, de schutbeperkingen richten zich ook op het beperken van de zoutlast op het Noordzeekanaal – IJ.

In hoeverre de impact op de scheepvaart in verhouding staat tot de baten voor de andere functies is niet op basis van dit onderzoek te zeggen. Voor een volledige afweging tussen de functies is het noodzakelijk om ook de reactie van de verschillende functies op een veranderend klimaat mee te nemen. In het Deltaprogramma Zoetwater zal de afweging tussen de maatregelen verder worden uitgewerkt, onder andere voor de scheepvaart.

Tabel 1-1 Overzicht van de totaal vervoerde vracht in ton per dag per scenario in het gehele rivierensysteem van Nederland voor vijf verschillende afvoeren bij Lobith.

Scenario	Totaal vervoerde vracht in het hele rivierensysteem (ton/dag)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
2030 (ref.)	499.939	592.371	694.890	840.124	886.183
2050	498.209	590.859	693.765	840.030	886.178
2050 ARK	496.485	589.214	692.662	839.829	886.170
2050 Hagestein	497.336	589.930	693.105	839.924	886.178
2050 ARK + Hagestein	495.065	588.139	691.964	839.674	886.154
2050 Driel, IJ	496.211	589.408	693.532	840.030	886.178
2050 Driel, WA	492.894	587.855	692.979	840.030	886.178
2050 Driel, IJ + WA	494.410	588.663	693.262	840.030	886.178

Tabel 1-2 Overzicht van de totaal vervoerde vracht in ton per dag door de Bernhardsluizen voor vijf verschillende afvoeren bij Lobith.

Scheepsklasse	Totaal vervoerde vracht door de Bernhardsluizen (ton/dag)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
Alle	70.113	84.149	106.573	96.057	95.320
> Vb	7.735	9.060	10.966	13.255	14.422
> Vla	4.957	5.802	7.162	6.427	6.458

Tabel 1-3 Overzicht van de afname in totaal vervoerde vracht in ton per dag tussen scenario's in het gehele rivierensysteem van Nederland voor vijf verschillende afvoeren bij Lobith.

Scenario	Afname in totaal vervoerde vracht in het hele rivierensysteem (ton/dag)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
Verschil 2030 – 2050	1.730	1.512	1.124	94	5
Verschil 2050 – 2050 ARK	1.724	1.645	1.103	201	8
Verschil 2050 - 2050 Hagestein	873	929	660	106	0
Verschil 2050 – 2050 ARK & Hagestein	3.143	2.720	1.802	356	24
Verschil 2050 – 2050 Driel, IJ	1.999	1.451	233	0	0
Verschil 2050 – 2050 Driel, WA	5.316	3.004	786	0	0
Verschil 2050 – 2050 Driel, IJ & WA	3.799	2.196	504	0	0

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	11
1.1	Achtergrond en aanleiding	11
1.2	Doel en onderzoeksvragen	11
1.3	Aanpak en leeswijzer	12
2	Situatieschets	13
2.1	Watersysteembeschrijving	13
2.2	Ervaringen uit 2018 en 2022	14
2.2.1	Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal	15
2.2.2	Lek en Hollandsche IJssel	17
2.2.3	Scheepvaart	17
2.3	Overige indirecte bedreigingen	18
2.3.1	Seizoensvariatie	18
2.3.2	Beheer en onderhoud	18
2.3.3	Rivierbodemerrosie	18
2.3.4	Stuwen Nederrijn/Lek	19
2.4	Relevante onderzoeksprogramma's	19
3	Systeembeschrijving	21
3.1	Transportstromen	21
3.1.1	Landelijk	21
3.1.2	Regionale scheepvaart	24
3.1.2.1	IJsselmeer	24
3.1.2.2	Midden-Rivierengebied	27
3.2	Waterverdeling Hoofdwatersysteem	28
3.2.1	Huidige situatie	28
3.2.2	Toekomstsituatie	31
3.2.3	Toekomstscenario's	32
3.2.3.1	ARK-route	33
3.2.3.2	Hagestein	34
3.2.3.3	Combinatie ARK-route & Hagestein	34
3.2.3.4	Driel (3 varianten)	35
3.2.4	Klimaatscenario's	37
3.3	Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal	38
3.3.1	Zout en watersysteem	38
3.3.2	Functies en maatregelen	41
3.3.3	Toekomst	43
3.4	IJsselmeer	44
3.4.1	Zout en watersysteem	44
3.4.2	Functies en maatregelen	47
3.4.3	Toekomstsituatie	49

4	Effect op scheepvaart	50
4.1	Landelijke samenhang	50
4.1.1	Huidig versus toekomstig	50
4.1.2	Toekomstscenario's ARK – Hagestein	52
4.1.3	Toekomstscenario's Driel	54
4.1.4	Conclusies	56
4.2	Schutbeperkingen en regionale stremmingen	56
4.2.1	Schutbeperkingen IJsselmeer	56
4.2.2	Nautische veiligheid bij Bernhardsluizen	57
4.2.3	Schutbeperkingen Irenesluizen	58
4.2.4	Schutbeperkingen IJmuiden	58
4.3	Oplossingsrichting binnen de scheepvaartsector	59
5	Conclusies, discussie en aanbevelingen	61
5.1	Discussie	63
5.2	Aanbevelingen	63
6	Referenties	65
A	Tabellen waterverdeling	68
A.1	2030 – referentie	68
A.2	2050 – invloed klimaatverandering	69
A.3	2050 – ARK-route	71
A.4	2050 – Hagestein	72
A.5	2050 – ARK & Hagestein	73
A.6	2050 – Driel (IJssel)	75
A.7	2050 – Driel (Waal)	76
A.8	2050 – Driel (IJssel & Waal)	77
B	Waterdiepte scenario's	79
B.1	2030 – referentie	79
B.2	2050 – invloed klimaatverandering	80
B.3	2050 – ARK route	81
B.4	2050 – Hagestein	82
B.5	2050 – ARK & Hagestein	83
B.6	2050 – Driel (IJssel)	84
B.7	2050 – Driel (Waal)	85
B.8	2050 – Driel (IJssel en Waal)	86
C	Figuren QINCoM	87
D	Tabel scheepvaart Bernhardsluizen	93

1 Introductie

1.1 Achtergrond en aanleiding

In de eerder uitgevoerde Quicksan Indirecte Bedreigingen voor scheepvaart (van der Mark et al., 2021) werden zogenaamde indirecte bedreigingen¹ afzonderlijk beschouwd via zogenaamde bowties. Uit die Quicksan is duidelijk geworden dat de verschillende 'indirecte bedreigingen' sterk met elkaar samenhangen (watertekort, waterverdeling, zoutindringing). Ook tijdens de droogteperiode van 2022 is dit gebleken en moesten beslissingen genomen worden met betrekking tot het tegengaan van zoutindringing, waarbij de mogelijke maatregelen (zoals aanpassing schutregime, water sturen door ARK) nadelig konden uitwerken voor de scheepvaart.

1.2 Doel en onderzoeksvragen

Er is vanuit Rijkswaterstaat behoefte aan een systeembeschrijving waarin de samenhang tussen de verschillende rivierfuncties (zoetwatervoorziening en scheepvaart) in beeld wordt gebracht ten tijde van droogte, inclusief hoe mogelijke maatregelen / afwegingen / keuzes doorwerken op de scheepvaart. Het doel van dit project is *het bepalen van het effect van maatregelen voor zoetwatervoorziening op scheepvaart vanuit een systeembeschrijving waarin de samenhang van de verschillende functies wordt gegeven*. Voor dit project worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Het doel is om zoveel mogelijk kwantitatief te beschrijven, maar in enkele gevallen is alleen een kwalitatieve beschrijving mogelijk.
- Er wordt specifiek gekeken naar de maatregelen voor zoetwatervoorziening ten tijde van droogte. Indirecte bedreigingen voor de scheepvaart onder hoogwater omstandigheden worden niet behandeld.
- De positie van scheepvaart in de verdringingsreeks wordt hier niet ter discussie gesteld.
- De invloed van de bestuurlijke inrichting voor het watermanagement wordt niet behandeld.
- De impact op recreatievaart wordt niet nader uitgewerkt, maar waar relevant, benoemd.
- De referentie is de huidige situatie met enkele maatregelen die al worden uitgevoerd (of zeer waarschijnlijk zijn). Voor de referentiesituatie wordt gebruik gemaakt van verschillende bronnen waarbij het referentiejaar niet per definitie overeen komt. Overeenkomende zichtjaren zijn 2030 (referentie) en 2050 (invloed klimaatverandering).
- Er wordt gebruik gemaakt van de afvoerniveaus uit Klimaatbestendige Netwerken (KBN) voor het bereik aan mogelijke condities.
- In deze studie wordt gekeken naar het Midden-Rivierengebied (Waal, Nederrijn/Lek en Betuwepand), Amsterdam-Rijnkanaal Noordzeekanaal en IJsselmeer.

Voor het bereiken van het doel zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

- 1 Op welke functies en regio's wordt gestuurd ten tijde van droogte?
- 2 Wat zijn de criteria voor deze functies en regio's voor het nemen van maatregelen?
- 3 Welke veranderingen in de (nabije) toekomst kunnen de aansturing ten tijde van droogte aanpassen?
- 4 Wat is het gevolg van deze maatregelen en ontwikkelingen voor de scheepvaart?

¹ gedefinieerd als externe ontwikkelingen, keuzes of gebeurtenissen, die nodig zijn omwille van andere doelen / ambities / rivierfuncties, maar die een negatief effect kunnen hebben op de scheepvaartfunctie

1.3 Aanpak en leeswijzer

Dit project is een vervolg op de eerder uitgevoerde Quicksan Indirecte Bedreigingen (van der Mark et al., 2021), de verbanden en inzichten uit dat project vormen het startpunt voor de analyse.

Dit rapport start met een situatieschets (hoofdstuk 2). Daarin worden het watersysteem (§2.1) en de ervaringen uit de droge jaren 2018 en 2022 (§2.2) beschreven. Dit project richt zich op de samenhang tussen de rivierfuncties zoetwatervoorziening en scheepvaart. Voor de volledigheid presenteert §2.3 een beschrijving van de overige bedreigingen voor de scheepvaart. Een overzicht van de verschillende onderzoeksprogramma's en inzichten van Rijkswaterstaat waaruit voor dit project is geput is te vinden in §2.4.

De vervolgstap is het nader uitwerken van de systeemwerking met aandacht voor de functies en potentiële maatregelen die worden genomen om de functies in stand te houden (§3), om onderzoeksvragen 1 en 2 te beantwoorden. Om de blootstelling van de scheepvaart in kaart te brengen worden de transportstromen op basis van resultaten uit eerdere stresstesten beschreven (§3.1). Daarna wordt de waterverdeling van het hoofdwatersysteem (Midden-Rivierengebied) in kaart gebracht. De beschrijving van de waterverdeling geeft inzicht in de keuzes die gemaakt kunnen worden en waar mogelijk knelpunten ontstaan voor de scheepvaart. Vervolgens wordt voor het Amsterdam-Rijnkanaal, Noordzeekanaal (§3.3) en IJsselmeer (§3.4) de werking van het systeem beschreven en de maatregelen die genomen kunnen worden. Tevens is er aandacht voor de ontwikkelingen die plaatsvinden in de (nabije) toekomst (onderzoeksvraag 3) en de invloed hiervan op de scheepvaart. Welke maatregelen zijn doorgerekend en beschouwd is in samenspraak met Rijkswaterstaat gedurende het project bepaald. Dit zijn de maatregelen die naar verwachting de grootste invloed hebben op de scheepvaart en die meegenomen worden in de maatregelenpakketten in lopende programma's.

De impact van de verschillende landelijke waterverdelingen op de scheepvaart (onderzoeksvraag 4) in het Midden-Rivierengebied wordt in het daaropvolgende hoofdstuk gegeven (§4.1). Hiervoor is gebruik gemaakt van QINCoM, conform de eerdere KBN studies. Het effect van maatregelen op een regionaal niveau wordt daarna beschreven (§4.2) waar mogelijk kwantitatief. In dit project is er gekeken naar de sluizen van het IJsselmeer (§4.2.1), Bernhardsluizen (§4.2.2), Irenesluizen (§4.2.3) en de sluizen van IJmuiden (§4.2.4).

Het rapport eindigt met de discussie en aanbevelingen (§5).

2 Situatieschets

2.1 Watersysteembeschrijving

In deze paragraaf wordt een globale beschrijving gegeven van de werking van het hoofdwatersysteem (zonder de Maas, Brabantse Kanalen, Friese Kanalen en Zeeuwse wateren). Het gaat er om op hoofdlijnen de waterverdeling en gebieden voor zoetwatervoorziening te beschrijven zodat deze vervolgens in §3 gekoppeld kunnen worden met de hoofdtransportaders.

De Rijn (Figuur 2-1) splitst zich vrij snel in Nederland in twee takken, de Waal en het Pannerdensch Kanaal. Met lage afvoeren gaat ongeveer 80% van het water richting de Waal. Het Pannerdensch kanaal splitst zich in de Nederrijn en de IJssel waarbij met behulp van stuw Driel bij lage afvoeren een gewenst debiet van ongeveer 25 m³/s richting de Nederrijn wordt gestuurd². Vanuit de IJssel wordt water onttrokken onder andere richting de Twentekanalen en vult het restant van de afvoer de waterschijf van het IJsselmeer aan. Overtollig water van het IJsselmeer wordt gespuid op de Waddenzee (onder vrij verval) bij Kornwerderzand en Den Oever. Door de schut- en spuisluizen komt ook zout binnen op het IJsselmeer wat met spuien weer kan worden afgevoerd.

De Waal heeft twee verbindingen met de Maas via het Maas-Waalkanaal (sluis Weurt, nabij Nijmegen) en via het kanaal van Sint-Andries. Verder staat de Waal bij lage afvoeren in open verbinding met de Lek doordat de sluisen in het Betuwepand (Bernhardsluizen en Marijkesluizen) worden geopend. Bij lage afvoeren wordt er vanuit de Waal gericht water gestuurd naar de Lek en het Amsterdam-Rijnkanaal via het Betuwepand (plus het resterende water van de Nederrijn) met behulp van de Irenesluizen (Amsterdam-Rijnkanaal) en stuw Hagestein (Lek).

Het resterende water op de Waal (na het Betuwepand) komt uiteindelijk samen met de afvoer van de Maas en Lek in de Rijn-Maasmonding waar een deel van het water via het Haringvliet en Volkerak-Zoommeer richting zee gaat. Het overgrote deel van de afvoer gaat bij lage afvoeren richting de Maasmond via de Oude Maas en Nieuwe Maas. Het getij speelt in dit gebied een belangrijke rol in de waterbeweging en de zoutindringing. In dit gebied is er altijd sprake van een balans tussen de afvoer (tegendruk) en het binnendringend getij voor de zoutverspreiding.

Vanuit het Amsterdam-Rijnkanaal kan water worden ingenomen door verschillende waterschappen. Verder is er water nodig uit het Amsterdam-Rijnkanaal voor de kwetsbare natuurgebieden tussen Amsterdam en Utrecht en voor de drinkwatervoorziening. Een belangrijke route voor het zoete water is de Klimaatbestendige WaterAanvoer (KWA) die via de Oude Rijn en andere regionale wateren water stuurt richting het westen van het land. Het Amsterdam-Rijnkanaal mondt uit in het IJ dat via de Oranjesluizen is verbonden met het Markermeer en via het Noordzeekanaal en de sluisen bij IJmuiden met de Noordzee. Via de sluisen bij IJmuiden komt er zout binnen dat met spuien geloosd kan worden op de Noordzee. Het Amsterdam-Rijnkanaal vormt de verbinding tussen de Rijn en de haven van Amsterdam en IJmuiden. De haven van Amsterdam is één van de grotere zeehavens van Europa.

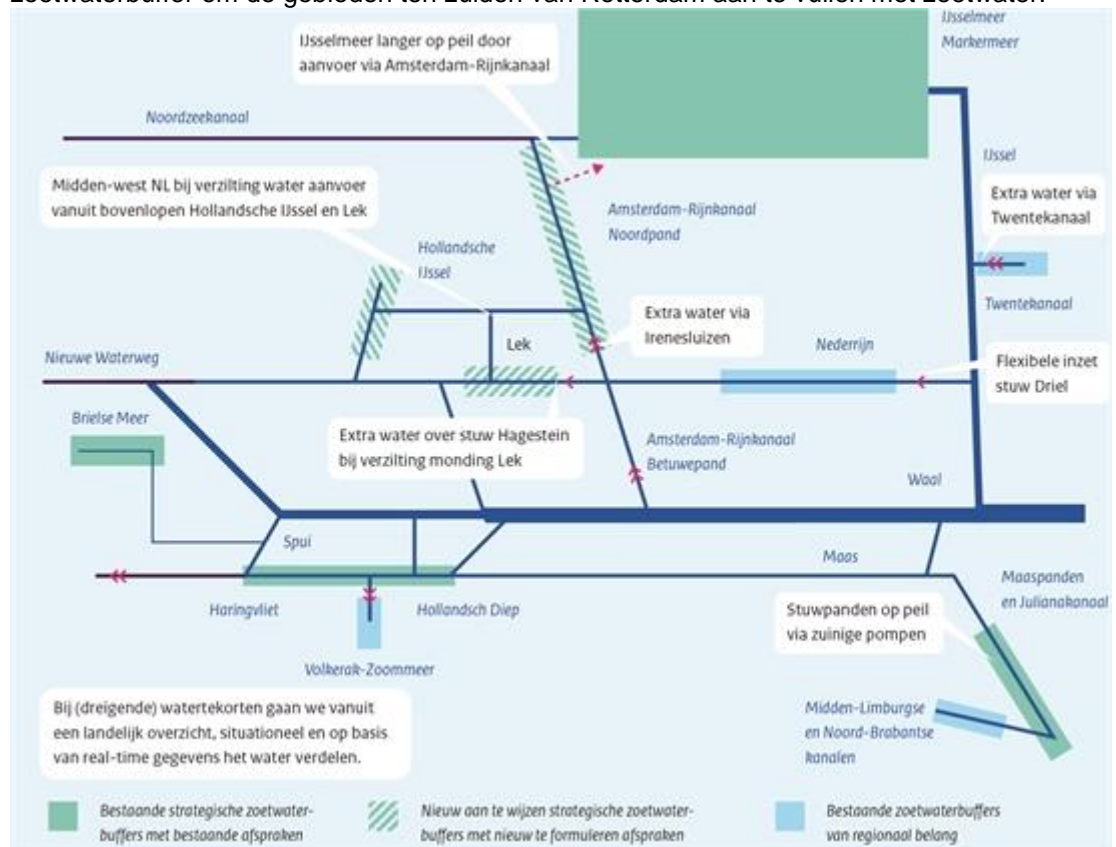
² Met dalende waterstanden neemt het regelbereik van de stuw af en kunnen er situaties ontstaan dat stuw Driel gestreken moet worden om negatief verval te voorkomen, dat is zowel in 2018 en 2022 voorgekomen.

Met name droge bulk (steenkool en ijzererts) en petrochemische producten vormen een belangrijk onderdeel van de zeehaven. Daarnaast vormt de cruisevaart een belangrijk onderdeel van de scheepsbewegingen op het Noordzeekanaal.

Langs de rivieren wordt op meerdere locaties water ingenomen voor het regionale watersysteem. Dichter richting de zee zijn er meerdere plekken waar gestuurd wordt op zoetwaterbeschikbaarheid voor innamepunten van waterschappen of drinkwaterbedrijven (Figuur 2-1).

Het IJsselmeer is het grootste zoetwaterreservoir van Nederland en wordt door de Afsluitdijk afgesloten van de Waddenzee. Het IJsselmeer speelt een cruciale rol in de zoetwatervoorziening van het noorden van Nederland. Van oudsher is er veel visserij op en rondom het IJsselmeer en bevinden zich meerdere thuishavens van vissers rondom het IJssel-, Marker- en Veluwerandmeer. Tegenwoordig zijn er echter maar weinig bedrijven die volledig afhankelijk zijn van de visserij rondom het IJsselmeer (van Ginkel et al., 2022). Het IJsselmeer vormt verder de verbinding tussen de Friese Kanalen, de IJssel en het Markermeer (en daarmee uiteindelijk Amsterdam).

De Hollandsche IJssel en Lek vormen een cruciale zoetwaterbuffer voor de regionale watervoorziening van west-Nederland, de Lek heeft tevens een innamepunt voor drinkwater. Verder zeewaarts in de Rijn-Maasmonding vormen het Haringvliet en het Spui een zoetwaterbuffer om de gebieden ten zuiden van Rotterdam aan te vullen met zoetwater.

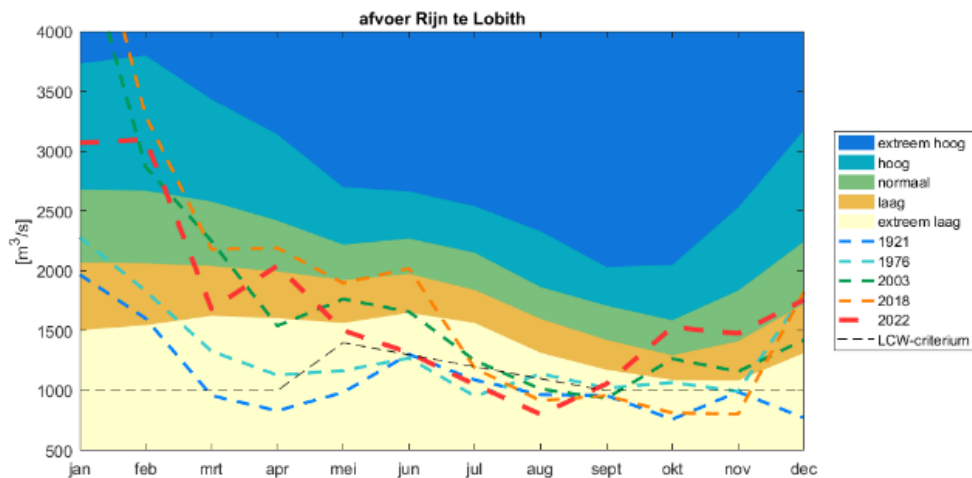


Figuur 2-1 Schematische weergave van het hoofdwatersysteem voor zoetwaterbeschikbaarheid (bron: Deltaprogramma 2021)

2.2 Ervaringen uit 2018 en 2022

In zowel 2018 als 2022 was de afvoer op de Rijn laag en zijn er geruime tijd beperkingen geweest voor de scheepvaart.

Er is wel een verschil tussen 2018 en 2022 qua afvoerverloop (Figuur 2-2). In 2022 daalde de afvoer al vrij vroeg naar extreme lage waarden (vanaf mei) om vanaf augustus weer te stijgen naar lage / gemiddelde afvoerwaarden. In 2018 bleef de afvoer tot november / december laag en werden de minimale afvoeren in oktober en november bereikt. Een gevolg van dit verschil is dat in 2022 tijdens het groeiseizoen, wanneer de watervraag het grootst is, de afvoer lager was en dat er al eerder maatregelen genomen moesten worden zoals het aanvoeren van water richting het Amsterdam-Rijnkanaal.



Figuur 2-2 Afvoerverloop van de Rijn bij Lobith op maandbasis voor enkele droge jaren inclusief classificatie ten opzichte van een langjarig gemiddelde³

Na 2018 zijn er verschillende afspraken gemaakt omtrent het waterbeheer tegen zoutindringing:

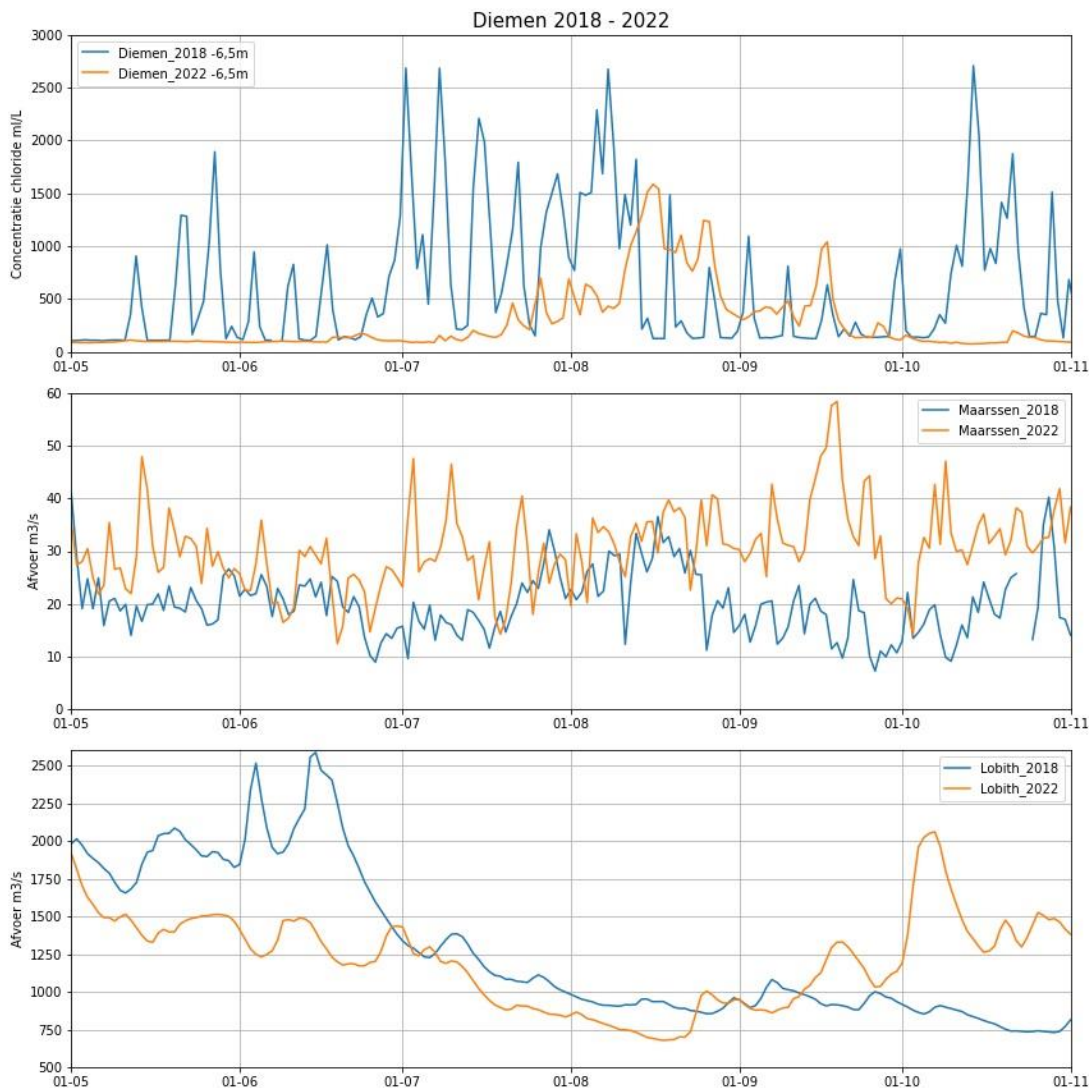
- Het peilbesluit rondom het IJsselmeer is aangescherpt om meer water in de zomer beschikbaar te hebben.
- Er is een droogteprotocol gemaakt voor het beheer van sluis IJmuiden op basis van het zoutgehalte in het Noordzeekanaal (en Amsterdam-Rijnkanaal), deze is begin 2023 nog verder aangepast.
- Het informatieaanbod is uitgebreid om pro- of reactiever te kunnen sturen naar gelang de condities er om vragen, ook de afvoervoorstellingen worden verder vooruit gegeven.

2.2.1 Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal

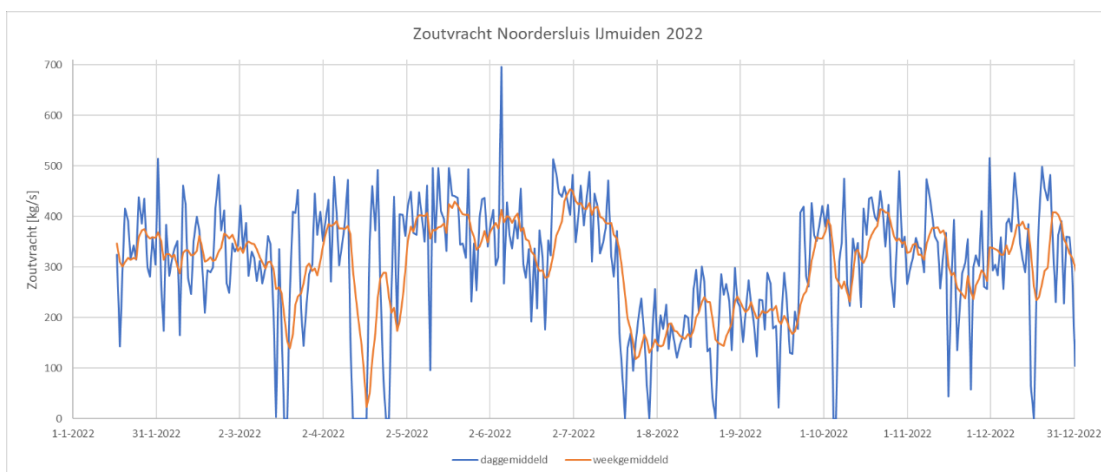
Ten opzichte van 2018 was in 2022 de nieuwe zeesluis al opgeleverd. Dit resulteert in een grotere zoutlast op het Noordzeekanaal welke zonder de selectieve onttrekking⁴ hoe dan ook vraagt om een groter doorspoeldebiet. Als gevolg hiervan is de nieuwe zeesluis slechts beperkt (of niet) inzetbaar ten tijde van droogte. Ten opzichte van 2018 werd er al eerder meer afvoer richting het Amsterdam-Rijnkanaal gestuurd (Figuur 2-3). Het bellenscherm op het Amsterdam-Rijnkanaal is in tegenstelling tot 2018 niet in gebruik geweest omdat de zoutconcentratie bij Diemen lager was door het hogere doorspoeldebiet. Er is wel een geruime tijd sprake geweest van schutbeperkingen bij IJmuiden om de zoutlast te beperken op het Noordzeekanaal (Figuur 2-4). Samenvattend, in 2022 is al eerder meer afvoer richting het Amsterdam-Rijnkanaal gestuurd om te voorkomen dat er zoutpieken bij Diemen zijn op basis van de ervaring uit 2018. In combinatie met de schutbeperkingen bij IJmuiden was er geen noodzaak om het bellenscherm aan te zetten in 2022.

³ Bron uit een nog te publiceren Deltares rapport "De Droogte van 2022 in Nederland"

⁴ Of met de selectieve onttrekking de zoutlast geheel wordt gemitigeerd is niet helemaal zeker.



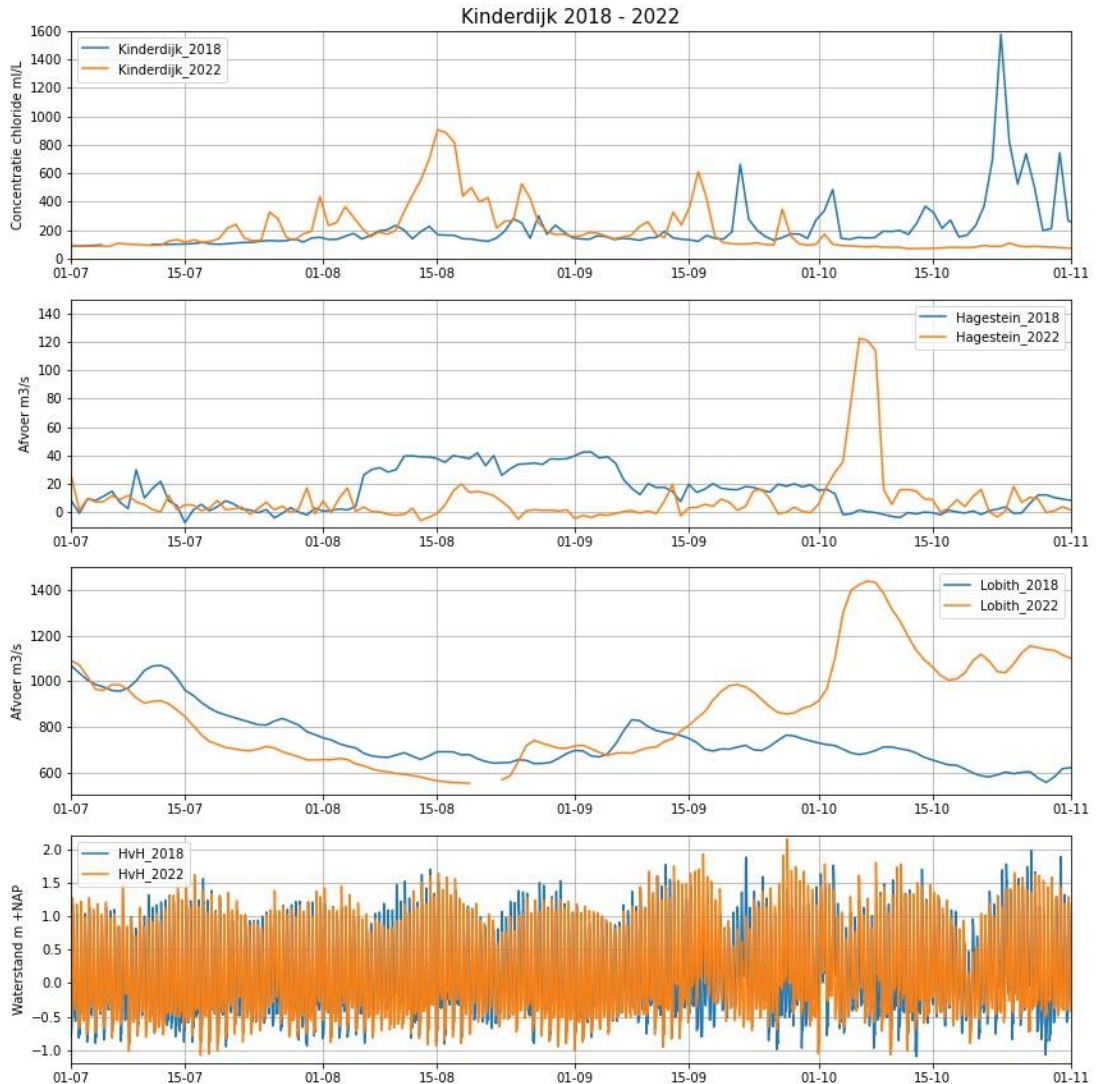
Figuur 2-3 Van onder naar boven: getijgemiddelde zoutconcentraties (Diemen, -6.50 m NAP), daggemiddelde afvoeren op het Amsterdam-Rijnkanaal t.h.v. Maarsse, en Rijnafvoer bij Lobith, in 2018 (blauw) en 2022 (oranje)



Figuur 2-4 Zoutvracht dat via de Noordersluis bij IJmuiden binnenkomt, onderdeel van verhaal van de droogte van 2022. Bron: IWP-systeem -

2.2.2 Lek en Hollandsche IJssel

In 2022 is er, ondanks dat er al eerder verzilting was op de Lek, minder en pas later water richting de Lek gestuurd (Figuur 2-5). Dit is een direct gevolg van de evaluatie van de maatregelen van 2018 en het opzetten van een uitgebreid meetnetwerk waardoor reactief sturen op de chlorideconcentraties mogelijk was in 2022 in combinatie met aanvullende berekeningen (Huisman et al., 2022). De KWA is in 2018 en 2022 voor een vergelijkbare periode ingezet ook al was het afvoerverloop net anders.



Figuur 2-5 Van boven naar onder: afvoer Lobith, afvoer Lek, waterstanden Hoek van Holland en getijgemiddelde zoutconcentraties monding Lek (Kinderdijk) voor 2018 (blauw) en 2022 (oranje)

2.2.3 Scheepvaart

Ten opzichte van 2018 was er in 2022 sprake van een ander economisch klimaat waarin er een grotere vraag was naar kolen in 2022. Als gevolg hiervan waren de vrachtprijzen enorm hoog. Uit een rondgang na de droogte van 2022 lijkt het er op dat meerdere bedrijven al maatregelen hadden genomen om de impact van lage afvoeren te beperken door bijvoorbeeld voorraden aan te leggen. De impact van de droogte in 2018 op de scheepvaart lijkt groter te zijn dan die van 2022. Dit komt waarschijnlijk door de combinatie van langdurig lage afvoer en beperkte ervaring met droogte.

Daarentegen hadden de schutbeperkingen bij IJmuiden in 2022 veel invloed op de scheepvaart op het Noordzeekanaal en de bereikbaarheid van de haven Amsterdam.

In een vervolgonderzoek in samenwerking met de Haven van Amsterdam wordt de invloed van de schutbeperkingen verder gekwantificeerd.

Daarnaast was het in 2022 niet mogelijk om eenrichtingsverkeer op de IJssel te realiseren doordat de betonning niet kon worden verplaatst omdat de juiste schepen niet beschikbaar waren. Met afnemende rivierafvoeren neemt de beschikbare vaarwegbreedte op de IJssel af en is het voor de nautische veiligheid noodzakelijk om eenrichtingsverkeer in te stellen. Uiteindelijk stegen de afvoeren vlak nadat het wenselijk was om eenrichtingsverkeer in te stellen en nam de beschikbare vaarwegbreedte toe. Bij Eefde stonden de pompen droog en moest water via de kolk worden aangevoerd richting het Twentekanaal. Hierdoor waren er schutbeperkingen bij Eefde.

2.3 Overige indirecte bedreigingen

In deze paragraaf wordt kwalitatief gekeken naar overige indirecte bedreigingen voor de scheepvaart. Veel van de uitdagingen die hier worden beschreven worden in andere programma's al nader uitgezocht.

2.3.1 Seizoensvariatie

De watervraag is niet constant over het jaar, gedurende het groeiseizoen is de watervraag veel groter wat de noodzaak voor maatregelen groter maakt. Hierbij dient wel gezegd te worden dat kritische functies (drinkwater en kwetsbare natuur) voor de zoetwatervoorziening een constante eis hebben aan de chlorideconcentratie. Dat betekent dat buiten het groeiseizoen nog steeds maatregelen nodig kunnen zijn voor het zoet houden van de bepalende locaties. De ervaring uit 2018 en 2022 laat zien dat het samenvallen van een lage afvoer met het groeiseizoen de afweging tussen de functies nog scherper maakt. Aanpassingen in afvoerregime door klimaatverandering versterken deze bedreiging.

2.3.2 Beheer en onderhoud

Beheer en onderhoud van kunstwerken wordt veelal in de zomer uitgevoerd. Objecten die ook een rol spelen in de waterveiligheid kunnen niet in het winterhalfjaar worden onderhouden. Voorbeelden van objecten met een functie voor de waterveiligheid zijn de stuwcomplexen op de Nederrijn / Lek en de keersluizen van het Betuwepand. Het zorgt ervoor dat beperkingen door onderhoud bij, in sommige gevallen, cruciale objecten altijd in de zomer zullen zijn. Gedurende de zomer (en begin van het najaar) is de hinder als gevolg van lagere afvoeren voor de scheepvaart het hoogst. De hinder als gevolg van het onderhoud en lagere afvoeren vallen hiermee waarschijnlijk samen .

Er zijn ook gevallen bekend dat uitgesteld onderhoud kan resulteren in storingen, ook ten tijde van lage afvoeren. Op dit moment lopen er meerdere grootschalige renovatie- en onderhoudsprogramma's voor natte kunstwerken. Het is waarschijnlijk dat in de nabije toekomst een verhoogd risico is op beperkingen bij objecten. Hoe groot het effect hiervan is valt niet van tevoren te zeggen en er zal altijd worden getracht om de impact op de functies te beperken.

Om de bevaarbaarheid te garanderen op de IJssel en de Waal is het noodzakelijk om de betonning te kunnen verplaatsen. Er waren in 2022 geen vaartuigen beschikbaar voor het verplaatsen van de tonnen op de IJssel doordat er niet voldoende diepgang voor de beschikbare vaartuigen was.

2.3.3 Rivierbodemerrosie

Door het eroderen van de rivierbodem ontstaan er meerdere knelpunten in de rivier voor de scheepvaart. Het duurzaam beheren van de rivierbodem wordt onderzocht in het programma Integraal Riviermanagement.

De ligging en hoogte van de rivierbodem heeft invloed op de afvoerverdeling wat kan resulteren in een verhoging of vermindering van de beschikbare vaardiepte. Naast het effect op de afvoerverdeling heeft erosie ook een direct effect op de aantakkingen van kanalen op de rivieren. De drempels van sluizen eroderen niet mee en komen zo hoger te liggen ten opzichte van de rivier (en daarmee waterstand). Het effect van de eroderende bodem op de aantakkingen is te vinden in de rapportage van IRM (Asselman et al., 2022). Wat niet is meegenomen in dit onderzoek is de bereikbaarheid van de havens die zich bevinden aan de Rijntakken. Een bekend probleem is de haven van Deventer waar bij uitzakkende waterstanden op de IJssel de sluis die toegang geeft tot de haven gestremd kan worden..

2.3.4 **Stuwen Nederrijn/Lek**

Het uitzakken van de waterstanden op het pand Hagestein – Amerongen door de open verbinding met de Waal via het Betuwepand en stroomopwaarts van Driel zorgt ervoor (al dan niet in combinatie met opzet op zee) dat in de afgelopen jaren meermaals sprake is geweest van negatief verval. Onder deze condities worden de vizerbogen automatisch geheven omdat de objecten niet om kunnen gaan met negatief verval.

Het openen van Driel kan resulteren in stremmingen bij de schutsluizen van Driel of Amerongen om het beschikbare water vast te houden (in 2022 is Amerongen daadwerkelijk ook gestremd). Ook bij Hagestein zijn er in 2022 negatieve vervallen waargenomen, hierbij zijn de schutsluizen niet gestremd omdat het negatieve verval nog onder de drempelwaarde van 20 centimeter was.

De combinatie van uitzakkende waterstanden als gevolg van de rivierbodemerrosie en het vaker voorkomen van lagere afvoeren kan ervoor zorgen dat hier vaker stremmingen optreden in de toekomst. Zowel het verder eroderen van de rivierbodem als het niet functioneren van de stuwen ten tijde van lage afvoeren is onderdeel van lopende onderzoeksprogramma's (IRM en Kennisprogramma Natte Kunstwerken).

2.4 **Relevante onderzoeksprogramma's**

In dit project is veel geput uit andere onderzoeksprogramma's om een zo compleet mogelijk beeld te krijgen van de systeemwerking op landelijk en regionaal niveau. In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de bronnen waaruit is geput. De exacte rapporten worden genoemd in de desbetreffende paragraaf.

Dit project is een vervolg op een eerder uitgevoerde studie binnen Klimaatbestendige Netwerken Hoofdvaarwegennetwerk (KBN-HVWN), ook genaamd Indirecte Bedreigingen (van der Mark et al., 2021). In die studie is kwalitatief gekeken naar alle mogelijke bedreigingen voor de scheepvaart. Verder zijn binnen KBN meerdere studies uitgevoerd naar de robuustheid van het vaarwegennetwerk binnen een veranderend klimaat. De methodiek en resultaten van de verscheidene studies zullen hier ook gebruikt worden (de Jong, 2019; de Jong et al., 2020; de Jong, 2020; de Jong, 2021; de Jong, 2022).

Integraal Riviermanagement (IRM) is een uitgebreid programma waar wordt gekeken naar de samenhang tussen verschillende functies op de rivieren (met een nadruk op de Rijntakken) en de maatregelen die genomen kunnen worden (Asselman et al., 2022). Dit programma is bij het uitvoeren van deze studie nog gaande en richt zich op meer dan alleen de scheepvaart.

Het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) richt zich op de effecten van klimaatverandering op de zoetwaterbeschikbaarheid van Nederland (Mens et al., 2020a; Mens et al., 2020b). De (toekomstige) maatregelen en inrichting van het hoofdwatersysteem worden in dit programma onderzocht (Delsman et al., 2020).

Verder worden ook de klimaatscenario's doorgerekend en vertaald naar een verandering in watervraag. De strategie voor de waterverdeling (Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem – KZH) komt ook voort uit dit programma (beslissing gepland voor 2027).

De regionale systeemwerking en maatregelen worden uitgewerkt in het programma Waterverdeling en Verzilting. De systeemwerking van het Amsterdam-Rijnkanaal Noordzeekanaal (o.a. Hydrologic, 2021a; HKV, 2023) en IJsselmeer (o.a. Hydrologic, 2021b; Bijlsma et al., 2023) en de rol van sluizen in deze systemen worden in dit programma onderzocht.

Voor een langere termijn inrichting van Nederland en de regionale systemen is voornamelijk gekeken naar de uitkomsten van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP-ZSS). Dit zijn meer kwalitatieve inzichten die worden verwerkt om een blik te werpen op de verre toekomst (2100 en later).

Als laatste heeft Rijkswaterstaat meerdere rapporten aangeleverd. De lessen die zijn getrokken uit de droogte van 2022 vormen input voor de probleemstelling vanuit Rijkswaterstaat (Rijkswaterstaat, 2023). De metingen bij de Bernhardsluizen geven een betere indicatie van de drempelwaarden qua debiet voor de nautische veiligheid. Binnen het project is meerdere malen gesproken met verscheidene onderdelen van Rijkswaterstaat, waar deze inzichten gebruikt zijn als bron is dit apart aangemerkt.

3 Systeembeschrijving

Dit hoofdstuk presenteert allereerst de transportstromen op basis van resultaten uit eerdere stresstesten (§3.1), om de blootstelling van de scheepvaart in kaart te brengen. Daarna wordt de waterverdeling beschreven voor het hoofdwatersysteem, het systeem Amsterdam-Rijnkanaal-Nordzeekanaal en het IJsselmeer. Daarbij wordt ingegaan op mogelijke maatregelen voor de zoetwatervoorziening en verwachte veranderingen in de toekomst (veranderingen in watervraag en in het watersysteem).

3.1 Transportstromen

3.1.1 Landelijk

Voor eerdere studies is een analyse van de scheepvaart gemaakt om de potentiële blootstelling te bepalen voor de stresstesten (de Jong, 2020). De resultaten uit deze analyse worden hier kort samengevat om een indicatie te geven van de vrachtvolumes en ruimtelijke patronen van de scheepvaart. Deze analyse is op basis van het referentiejaar 2014 omdat dit jaar als representatief wordt gezien door de afwezigheid van significante hoog- en laagwaterperioden. Er is sindsdien geen nieuw referentiejaar voor de scheepvaart gedefinieerd. Aan te nemen is dat de huidige volumes groter zullen zijn dan in 2014 en dat de potentiële impact daarmee toeneemt.

In Figuur 3-1 is het voor Binnenvaart Analyse Systeem (een netwerkmodel genaamd BIVAS) geschematiseerde vaarwegennetwerk zichtbaar. De belangrijkste transportaders verbinden de zeehavens met de andere zeehavens en het achterland, met name het Ruhrgebied en de Oberrhein. Rotterdam, Antwerpen en Amsterdam vormen de belangrijkste zeehavens voor de herkomst van goederen. Dezelfde zeehavens zijn ook de belangrijkste bestemmingen in combinatie met de havens van Duisburg en Düsseldorf (Ruhrgebied).

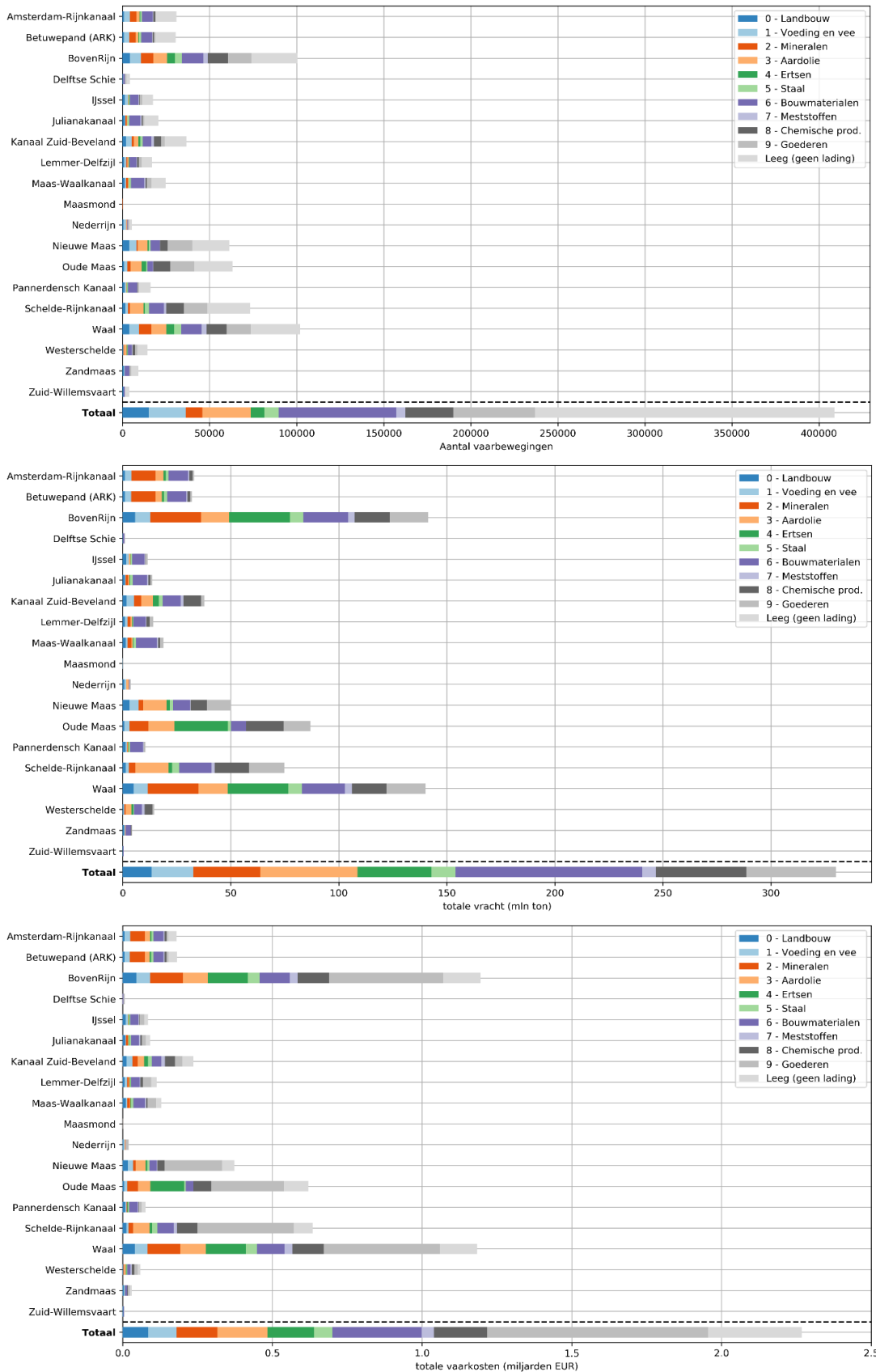
Het verschil tussen de corridors is goed zichtbaar in Figuur 3-2. Op de hoofdtransportaders zijn meer vaarbewegingen, maar omdat er vooral grotere schepen varen zijn de vaarkosten⁵ vele malen hoger op de hoofdtransportaders ten opzichte van de andere transportaders. Pakweg de helft van de totale vaarkosten en vervoerde vracht in Nederland bevindt zich op de corridor Antwerpen – Rotterdam – Duitsland (via de Waal en Boven-Rijn). Ondanks dat de andere transportaders (Maas en IJssel) significant kleiner zijn spelen deze wateren een cruciale rol in de regionale economie.

De meeste scenario's binnen het Deltaprogramma Zoetwater gaan uit van een economische groei en daarbij horende groei van ladingvolumes. Bij het uitvoeren van dit project kwamen de nieuwe klimaatscenario's beschikbaar. Het lijkt aannemelijk dat het referentiejaar voor de scheepvaart en de economische groei opnieuw worden gedefinieerd en dat de hier gerepresenteerde resultaten zullen veranderen.

⁵ Binnen BIVAS zijn vaarkosten de transportkosten om de goederen van herkomst naar bestemming te vervoeren. Hierin worden de kosten voor personeel, materieel en brandstof meegenomen. De vaarkosten zijn dus de kosten voor een reder om de goederen van A naar B te vervoeren per schip.



Figuur 3-1 Vaarwegen met CEMT-klasse van het netwerk MIRT 2030 in BIVAS (De Jong, 2020)



Figuur 3-2 Voor enkele karakteristieke vaarwegen is uitgedrukt hoeveel vaarbewegingen hier zijn (boven), hoeveel vracht vervoerd wordt (midden) en hoe groot de totale vaarkosten zijn (onder) die door deze vaarbewegingen gemaakt worden. (De Jong, 2020)

3.1.2 Regionale scheepvaart

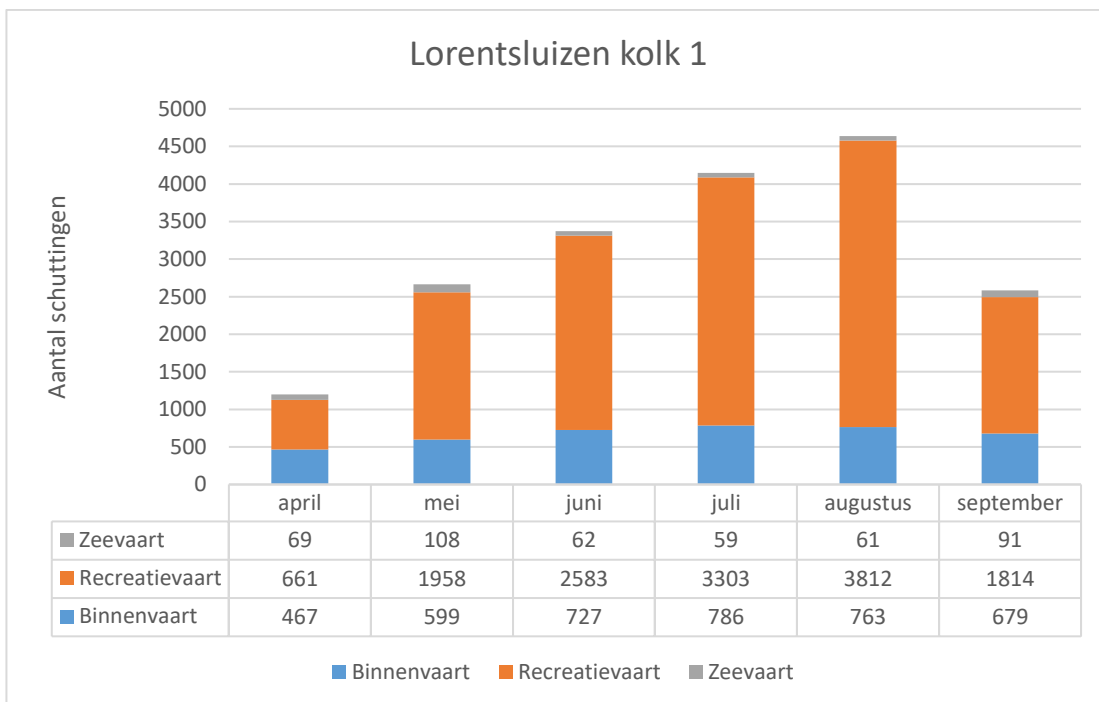
3.1.2.1 IJsselmeer

Het grootste deel van de beroepsvaart (zowel visserij als vrachtaart) op het IJsselmeer blijft binnengaats. Op basis van de schutregistraties van de Lorentz- en Stevinsluizen is te zien dat het overgrote deel van de scheepvaart bestaat uit recreatievaart⁶ (de Jong, 2022, en Tabel 3-1 en Figuur 3-3, Figuur 3-4 en Figuur 3-5). Deze scheepvaart is sterk seizoensgebonden met het overgrote deel van de schuttingen in de maanden mei tot en met augustus. De beroepsvaart maakt het meeste gebruik van de grote kolk bij Kornwerderzand (Lorentzsluizen kolk 1) en in mindere mate van de Stevinsluizen. Ook bij de beroepsvaart is er een seizoensvariatie zichtbaar met 1/3 van de schuttingen in het winterhalfjaar en 2/3 van de schuttingen in het zomerhalfjaar. Het is niet bekend wat de exacte oorzaak is van deze seizoensvariatie in de beroepsvaart. Het meest waarschijnlijk is dat dit het gevolg is van de voorkeur van schippers om tijdens het stormseizoen niet op het IJsselmeer en de Waddenzee te varen vanwege de hogere risico's. Er is in dit onderzoek niet nader gekeken naar de variatie in beroepsvaart tussen droge en minder droge jaren omdat het aandeel van de beroepsvaart door de sluisen beperkt is.

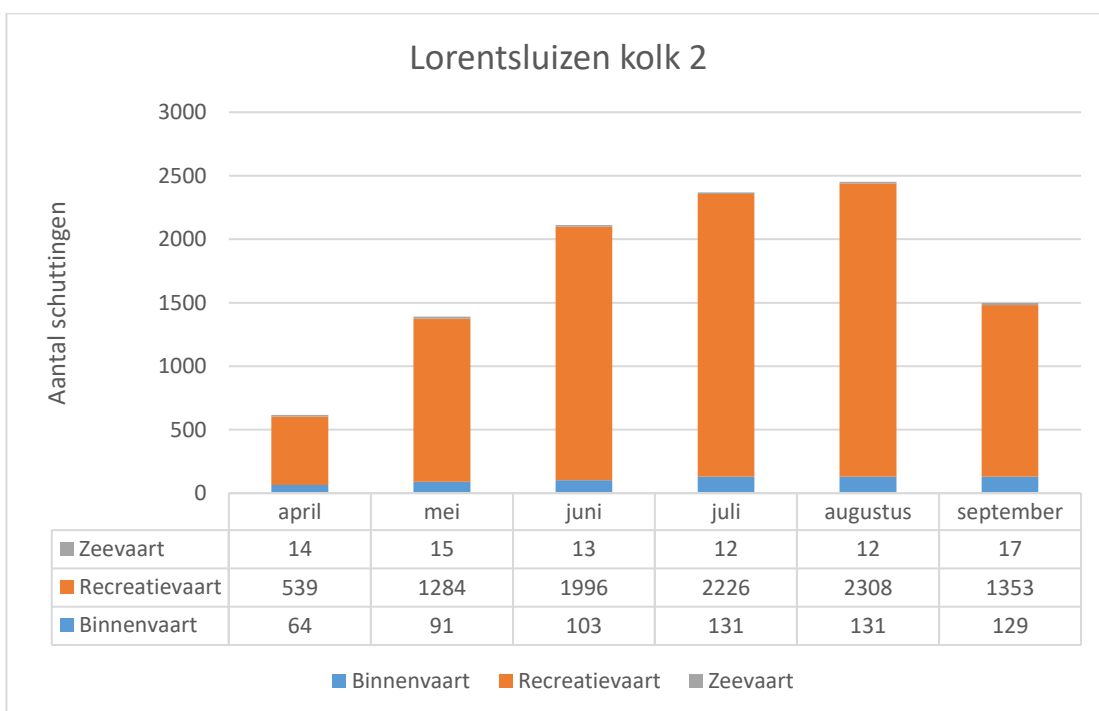
⁶ Het is niet zeker of de schuttingen na constructie van nieuwe jachten op gespecialiseerde werven rondom het IJsselmeer vallen onder beroeps- of recreatievaart. De verbreding van de Lorentzsluizen is er mede op gericht om grotere jachten te kunnen schutten.

Tabel 3-1 Gemiddeld aantal schutregistraties per jaar van de Lorentz en Stevinsluizen tussen 2017 en 2022

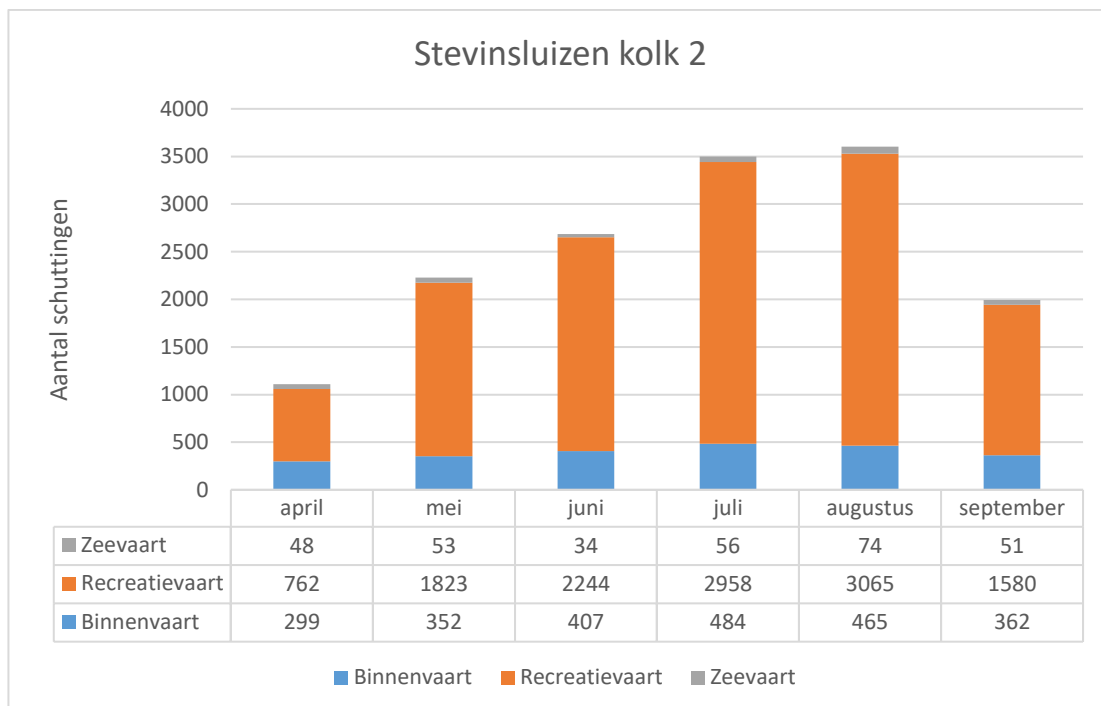
Lorentzsluizen kolk 1 2017 - 2022					Lorentzsluizen kolk 2 2017 - 2022					Stevinsluis 2017 - 2022				
Maand	Binnen-vaart	Recreatie-vaart	Zee-vaart	Onbekend	Maand	Binnen-vaart	Recreatie-vaart	Zee-vaart	Onbekend	Maand	Binnen-vaart	Recreatie-vaart	Zee-vaart	Onbekend
Jan	305	93	67	2	Jan	26	38	7	0	Jan	161	16	23	0
Feb	262	21	41	0	Feb	31	29	8	0	Feb	187	16	28	0
Maa	357	97	51	0	Maa	46	93	10	0	Maa	219	82	44	0
Apr	467	661	69	1	Apr	64	539	14	0	Apr	299	762	48	1
Mei	599	1958	108	1	Mei	91	1284	15	0	Mei	352	1823	53	0
Juni	727	2583	62	2	Juni	103	1996	13	0	Juni	407	2244	34	0
Juli	786	3303	59	1	Juli	131	2226	12	0	Juli	484	2958	56	2
Aug	763	3812	61	0	Aug	131	2308	12	0	Aug	465	3065	74	0
Sep	679	1814	91	0	Sep	129	1353	17	0	Sep	362	1580	51	4
Okt	539	895	155	0	Okt	90	632	13	0	Okt	282	643	92	1
Nov	346	95	131	0	Nov	58	68	18	0	Nov	280	96	82	2
Dec	264	81	86	3	Dec	29	97	14	0	Dec	206	22	46	4
Totaal	6095	15414	979	10	Totaal	929	10662	152	0	Totaal	3704	13305	631	14
Zomerha lfjaar	4022	14131	449	5	Zomerha lfjaar	649	9706	82	0	Zomerha lfjaar	2369	12431	317	7



Figuur 3-3 Gemiddeld aantal schutregistraties per jaar bij de Lorentsluizen (grote kolk) tussen 2017 en 2022



Figuur 3-4 Gemiddeld aantal schutregistraties per jaar bij de Lorentsluizen (kleine kolk) tussen 2017 en 2022



Figuur 3-5 Gemiddeld aantal schutregistraties per jaar bij de Stevinsluizen tussen 2017 en 2022

3.1.2.2 Midden-Rivierengebied

In eerdere paragrafen is gekeken naar de scheepsbewegingen in Nederland. Het kwantificeren van de scheepsbeweging voor de stresstest geeft de potentiële blootstelling van het systeem aan externe forceringen. In deze paragraaf wordt specifiek gekeken naar de scheepsbewegingen door de relevante objecten. Het doel van deze exercitie is het herkennen van relevante patronen voor de stresstest (in andere woorden, veranderen de scheepsbewegingen met lagere afvoeren) en het bepalen van de potentiële blootstelling.

Om de potentiële blootstelling van de scheepvaart bij de Irene- en Bernhardsluizen te analyseren is gekeken naar de IVS registraties uit 2014 (het referentiejaar) en 2018 (een droog jaar), zie Tabel 3-2. Daarnaast is gebruik gemaakt van de sommen uit KBN waarin de reactie van de scheepvaart op een afnemende afvoer te zien is (Tabel 3-3).

In Tabel 3-2 is te zien dat het aantal scheepsbewegingen voor de grotere schepen zo goed als gelijk is tussen de Irene- en Bernhardsluizen. Dat is conform de verwachting omdat de grotere schepen normaliter niet de Lek of Nederrijn opvaren.

Er is wel een subtiel verschil in het aandeel van de grotere schepen (>Vb) als de afvoer afneemt, wat ook conform de verwachting is. Belangrijk is hierbij te melden dat in 2018, op een korte periode na, in principe alle schepen de Irene- en Bernhardsluizen konden passeren. Al konden er wel periodes zijn waarbij de wachttijd is toegenomen. In die zin is de reactie van het afnemen van het aandeel grotere schepen waarschijnlijk een gevolg van de beperkingen in vaardiepte op de andere vaarwegen. De aannemelijke knelpunten zijn dan Nijmegen en Kaub.

Tabel 3-2 Aantal vaarbewegingen op basis van IVS gegevens door de Irene- en Bernhardsluizen in 2014 en 2018 voor verschillende CEMT-klassen

Vaarbewegingen				
	Irenesluizen 2014	Irenesluizen 2018	Bernhardsluizen 2014	Bernhardsluizen 2018
0	155	153	131	148
I	137	139	139	137
II	3551	3439	3045	3039
III	9025	8625	9042	8455
IV	7281	6547	7251	6418
Va	9277	9481	9435	9753
Vb	1802	2050	1821	2108
VIa	1180	998	1211	1085
VIb	556	388	556	416
VIc	1		3	1
Totaal	32965	31820	32634	31560

Tabel 3-3 Vervoerde tonnage en vaarkosten voor verschillende afvoeren bij Lobith (volledige tabel opgenomen in Appendix D) door het Betuwepand (Bernhardsluizen) op basis van KBN QINCoM sommen

Row Labels	Qlobith 700		Qlobith 850		Qlobith 1020	
	Tonnage	Vaarkosten [kEur]	Tonnage	Vaarkosten [kEur]	Tonnage	Vaarkosten [kEur]
0	16.223	240	23.114	370	23.695	353
I	14.461	364	14.860	355	12.696	311
II	858.451	6.990	1.051.950	7.639	1.199.084	8.060
III	3.316.376	22.940	4.510.036	29.520	5.455.046	33.612
IV	3.832.058	30.778	5.216.761	39.154	6.695.625	45.313
V	14.745.981	172.968	16.609.462	148.890	21.534.474	155.215
VI	2.825.224	42.045	3.309.261	32.204	4.005.187	25.274
Total / dag	70.113	757	84.149	707	106.573	734

3.2 Waterverdeling Hoofdwatersysteem

Deze paragraaf beschrijft de waterverdeling in het hoofdwatersysteem, dat zoals in paragraaf 2.1 is beschreven, bestaat uit onder andere de verschillende Rijntakken (Waal, Nederrijn, Lek en IJssel) en het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK), inclusief het Betuwepand (BP). Daarbij wordt allereerst de huidige situatie beschreven voor verschillende afvoerniveaus (§3.2.1). Daarna wordt ingegaan op de invloed van een toename in de watervraag (§3.2.2) en mogelijke maatregelen ten behoeve van de zoetwatervoorziening (toekomstscenario's, §3.2.3). §3.2.4 geeft een doorkijk naar de invloed van een veranderend klimaat.

3.2.1 Huidige situatie

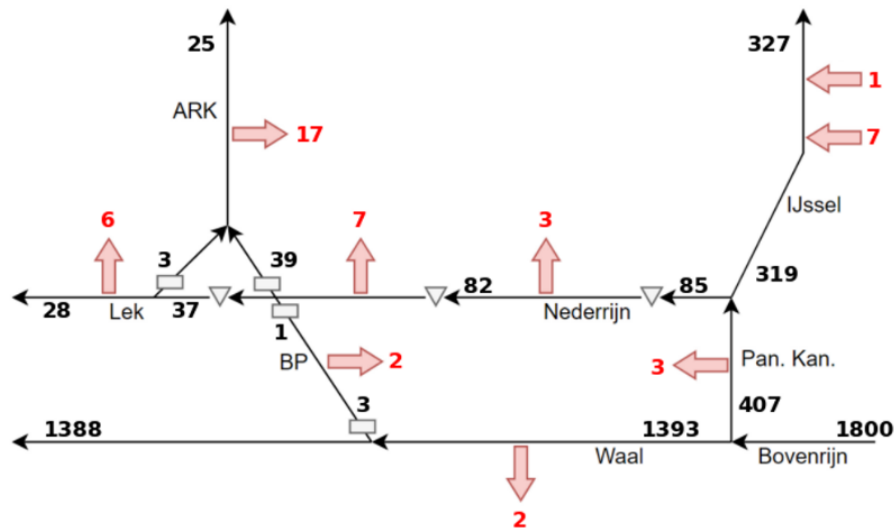
De waterverdeling tussen de Rijntakken wordt in de huidige situatie gereguleerd door het stuwcomplex Driel. De Waal en de IJssel stromen vrij af. Bij afvoeren tot ongeveer 2600 m³/s bij Lobith wordt de waterstand gestuurd door stuwen op de Nederrijn en Lek. Bij hogere afvoeren stromen de Nederrijn en de Lek vrij af.

Bij een afvoer van 1250 m³/s of lager bij Lobith worden de Prins Bernhardsluizen op het Betuwepand geopend (Lieveense Milieu B.V.,2019), omdat de afvoer via Driel dan niet meer volstaat om aan de watervraag van Midden-West Nederland te voldoen. Hierdoor komt het pand Amerongen-Hagestein in open verbinding te staan met de Waal.

Voor vijf verschillende (lage) afvoeren bij Lobith – 1800, 1400, 1020, 800 en 750 m³/s – is een waterbalans voor het referentie zichtjaar 2030 opgesteld voor het hoofdwatersysteem. De referentie is de huidige situatie met enkele maatregelen die al worden uitgevoerd of zeer waarschijnlijk zijn. Voor het bepalen van de referentiesituatie is gebruik gemaakt van verschillende bronnen, waarbij het referentiejaar niet per definitie overeenkomt. Deze balansen per afvoer bij Lobith zijn in Figuur 3-6 tot en met Figuur 3-10 schematisch weergegeven. In appendix A.1 zijn de complete tabellen van de balansen van 2030 gevoegd.

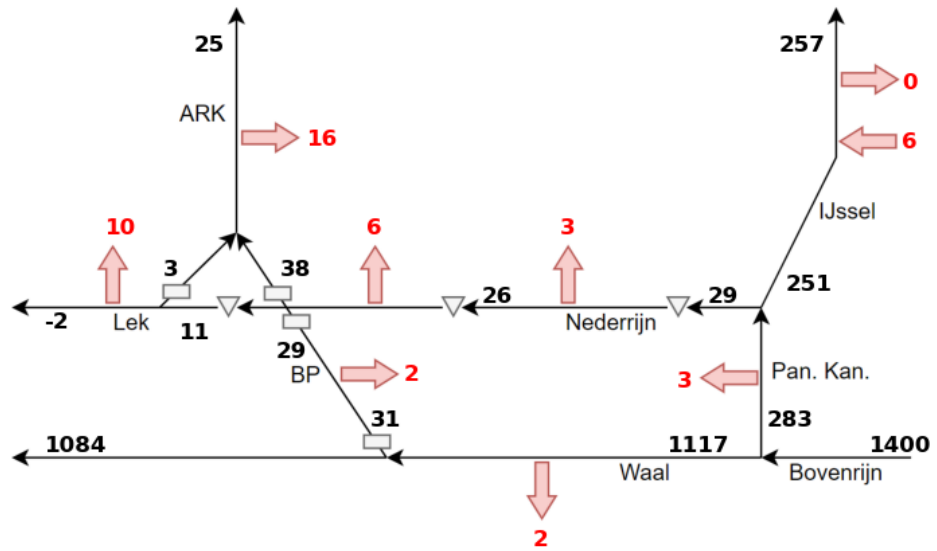
De waterbalansen zijn gebaseerd op verschillende bronnen. Voor het bepalen van de waterverdeling bij de Pannerdensche Kop en de IJsselkop is gebruik gemaakt van gegevens uit het Landelijke Sobek Model (Prinsen, 2021). De watervraag in m³/s voor elk van de vijf afvoeren bij Lobith is in de figuren aangegeven met rode pijlen en is bepaald aan de hand van verschillende bronnen (Prinsen, 2021; Rijkswaterstaat, 2021; Hydrologic, 2013; Hydrologic, 2019a; informatie van RWS ON⁷). Als laatste is aangenomen dat er bij de monding van het ARK altijd een minimum afvoer is van 25 m³/s, omdat dit voldoende is om zoutindringing te voorkomen (HKV, 2015; Arcadis, 2016) en dat over stuw Hagestein een minimaal debiet van 10 m³/s gaat, tevens om te voorkomen dat de zoutconcentratie te hoog wordt (Delsman et al., 2020). De sluitpost van de balans is dan dus de afvoer over het Betuwepand en het ARK.

Uit Figuur 3-6 tot en met Figuur 3-10 blijkt dat wanneer de afvoer bij Lobith afneemt, de watervraag in het algemeen toeneemt. Dit komt omdat laagwater in het hoofdwatersysteem vaak samenvalt met (zeer) droge omstandigheden in de regionale stroomgebieden en watervraag aan het hoofdwatersysteem dus toeneemt (Hydrologic, 2013). Als gevolg moet er een groter debiet door de Prins Bernhardsluizen en Prinses Irenesluizen om aan de aangenomen debieten bij monding ARK en stuw Hagestein te kunnen voldoen.

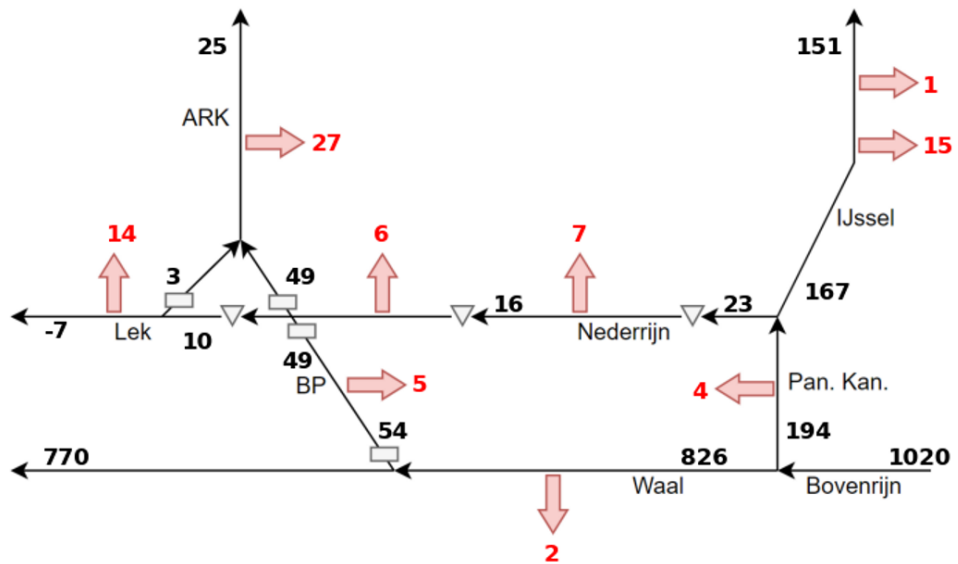


Figuur 3-6 Waterbalans voor een afvoer van 1800 m³/s bij Lobith. Met in zwart de afvoer in m³/s per tak van het hoofdwatersysteem en in rood de belangrijkste onttrekkingen (rode pijl wijst van zwarte pijl af) of aanvullingen (rode pijl wijst naar zwarte pijl toe) aan het hoofdwatersysteem in m³/s. De stuwen op de Nederrijn-Lek zijn weergegeven met driehoekjes en de sluizen op het ARK-Betuwepand en het Lekkanaal met rechthoekjes.

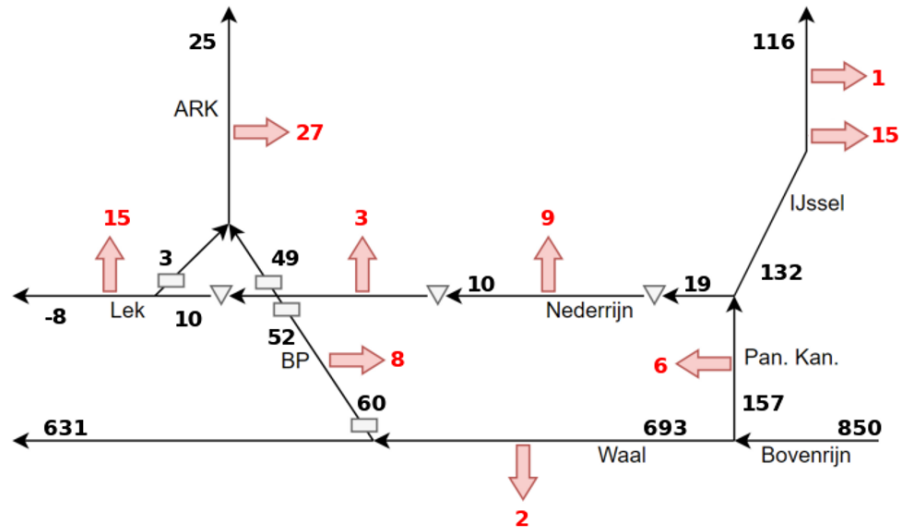
⁷ Persoonlijke communicatie Rijkswaterstaat Oost-Nederland, d.d. 29-08-2023



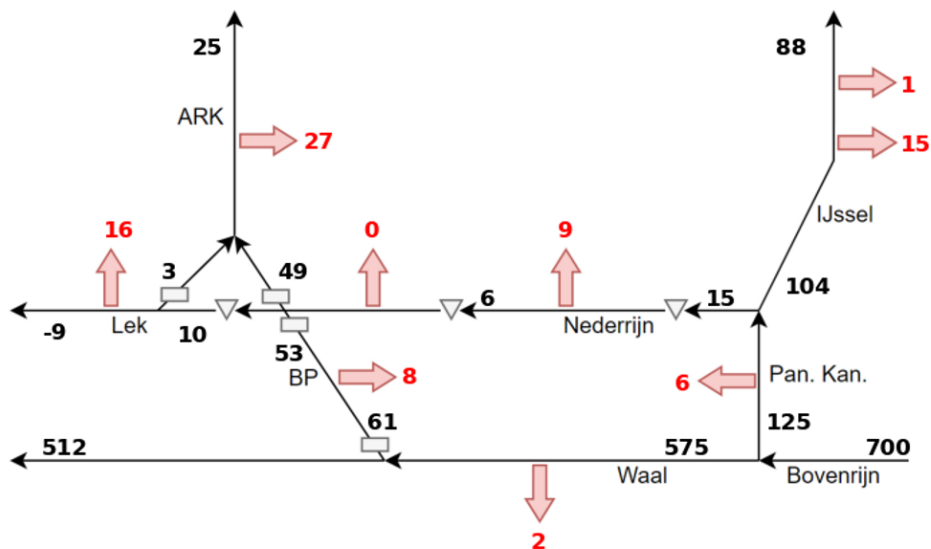
Figuur 3-7 Waterbalans voor een afvoer van 1400 m³/s bij Lobith. Met in zwart de afvoer in m³/s per tak van het hoofwatersysteem en in rood de belangrijkste onttrekkingen (rode pijl wijst van zwarte pijl af) of aanvullingen (rode pijl wijst naar zwarte pijl toe) aan het hoofwatersysteem in m³/s. De stuwen op de Nederrijn-Lek zijn weergegeven met driehoekjes en de sluisen op het ARK-Betuwegeland en het Lekkanaal met rechthoekjes.



Figuur 3-8 Waterbalans voor een afvoer van 1020 m³/s bij Lobith. Met in zwart de afvoer in m³/s per tak van het hoofwatersysteem en in rood de belangrijkste onttrekkingen (rode pijl wijst van zwarte pijl af) of aanvullingen (rode pijl wijst naar zwarte pijl toe) aan het hoofwatersysteem in m³/s. De stuwen op de Nederrijn-Lek zijn weergegeven met driehoekjes en de sluisen op het ARK-Betuwegeland en het Lekkanaal met rechthoekjes.



Figuur 3-9 Waterbalans voor een afvoer van 850 m³/s bij Lobith. Met in zwart de afvoer in m³/s per tak van het hoofwatersysteem en in rood de belangrijkste onttrekkingen (rode pijl wijst van zwarte pijl af) of aanvullingen (rode pijl wijst naar zwarte pijl toe) aan het hoofwatersysteem in m³/s. De stuwen op de Nederrijn-Lek zijn weergegeven met driehoekjes en de sluizen op het ARK-Betuweband en het Lekkanaal met rechthoekjes.



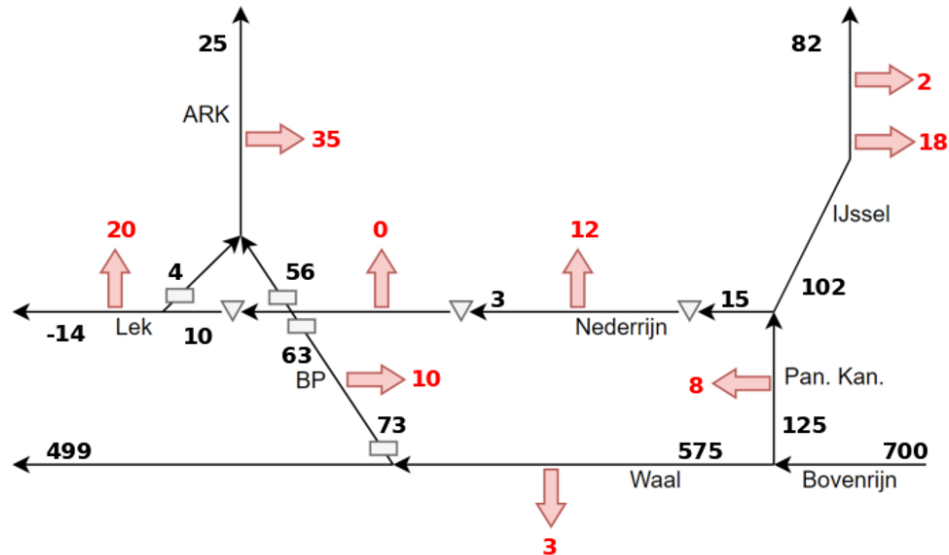
Figuur 3-10 Waterbalans voor een afvoer van 700 m³/s bij Lobith. Met in zwart de afvoer in m³/s per tak van het hoofwatersysteem en in rood de belangrijkste onttrekkingen (rode pijl wijst van zwarte pijl af) of aanvullingen (rode pijl wijst naar zwarte pijl toe) aan het hoofwatersysteem in m³/s. De stuwen op de Nederrijn-Lek zijn weergegeven met driehoekjes en de sluizen op het ARK-Betuweband en het Lekkanaal met rechthoekjes.

3.2.2 Toekomstsituatie

Voor het zichtjaar 2050 zijn vijf balansen opgesteld voor dezelfde (lage) afvoeren bij Lobith als voor het zichtjaar 2030 (referentie). Ten opzichte van 2030 zal in 2050 de watervraag als gevolg van klimaatverandering alleen maar toenemen. Voor het bepalen van de watervraag van 2050 is aangenomen dat de watervraag van 2030 met 20% is toegenomen (informatie van RWS ON⁸; Klijn et al., 2012). Om aan deze vergrootte watervraag te kunnen voldoen moet het debiet door de Bernhard- en Irenesluizen zodanig verhoogd worden om benedenstrooms van het ARK nog een afvoer van 25 m³/s en over stuw Hagestein een debiet van minimaal 10 m³/s te kunnen garanderen.

⁸ Persoonlijke communicatie met Rijkswaterstaat Oost-Nederland, d.d. 29-08-2023

Uit een onderzoek van Arcadis (2017) is gebleken dat wanneer er extra water wordt onttrokken aan de Waal via het Betuwepand dit geen effect heeft op de afvoerverdeling bij de Pannerdensch Kop. Daarom is voor de balansen van 2050 de waterverdeling bij de Pannerdensch Kop ook niet aangepast ten opzichte van de referentiesituatie 2030. In Figuur 3-11 is de waterbalans voor 2050 te zien met een afvoer van 700 m³/s bij Lobith. In het vervolg van deze paragraaf zal naar deze waterbalans verwezen worden als 2050 Ref700. In appendix A.2 is de tabel van deze waterbalans en van de waterbalansen voor de vier andere afvoeren bij Lobith te vinden.



Figuur 3-11 Waterbalans voor 2050 voor een afvoer van 700 m³/s bij Lobith waarbij alleen de watervraag ten opzichte van 2030 is vergroot en het debiet door het Betuwepand en ARK hierop is aangepast. Met in zwart de afvoer in m³/s per tak van het hoofwatersysteem en in rood de belangrijkste onttrekkingen (rode pijl wijst van zwarte pijl af) of aanvullingen (rode pijl wijst naar zwarte pijl toe) aan het hoofwatersysteem in m³/s. De stuwen op de Nederrijn-Lek zijn weergegeven met driehoekjes en de sluizen op het ARK-Betuwepand en het Lekkanaal met rechthoekjes.

Omdat in de toekomst de watervraag alleen maar toe zal nemen en de kans op lage afvoeren groter wordt, is het van belang dat Nederland een lange termijnstrategie heeft op het gebied van zoetwatervoorziening. De waterverdeling kan op verschillende manieren aangepast worden om de zoetwatervoorziening op niveau te houden. In de volgende paragraaf wordt dieper ingegaan op verschillende scenario's.

3.2.3 Toekomstscenario's

Hier zal verder ingegaan worden op verschillende scenario's die invloed hebben op de waterverdeling, namelijk:

- *ARK-route*: inzetten van ARK om IJsselmeerbuffer aan te vullen.
- *Hagestein*: een minimaal debiet van 25 m³/s over stuw Hagestein garanderen.
- *ARK & Hagestein*: een combinatie van de bovenstaande twee scenario's.
- *Driel*: een minimaal debiet van 25 m³/s over stuw Driel garanderen.

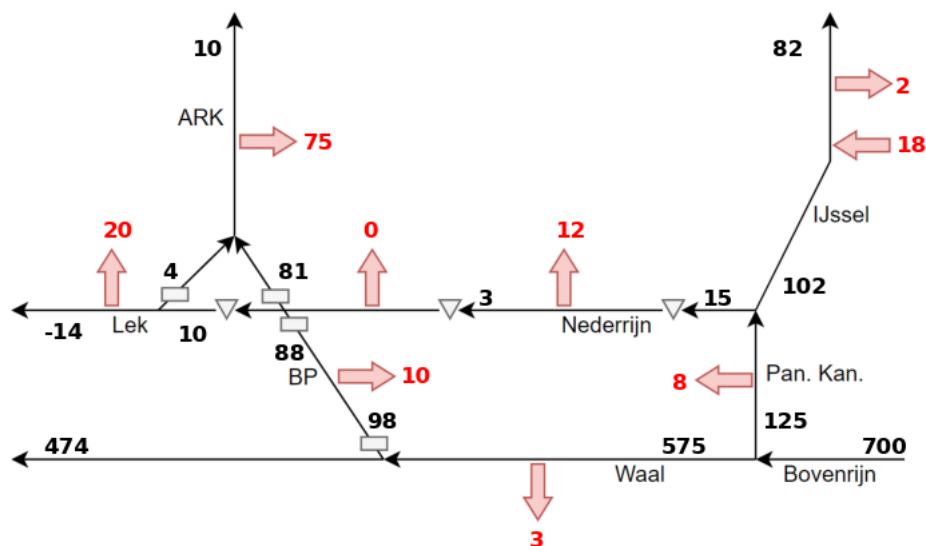
Deze scenario's komen uit een nadere verkenning van een Stuurbaar Buffernetwerk in het kader van het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW). In de volgende paragrafen worden deze scenario's verder toegelicht. Hierbij is op te merken dat het verhogen van de afvoer richting het Amsterdam-Rijnkanaal en Hagestein in de nabije toekomst vaker zal gebeuren.

Het verhogen van het debiet over Hagestein is feitelijk al een operationele maatregel en de ARK-route wordt aangemerkt als een voorkeursstrategie. Het aanpassen van het debiet over Driel is minder waarschijnlijk.

3.2.3.1 ARK-route

Het concept van een Stuurbaar Buffernetwerk (SBN) is in het kader van het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) uitgewerkt als een strategie voor een klimaatbestendige zoetwatervoorziening vanuit het hoofwatersysteem (Hydrologic, 2019b). Een maatregel binnen SBN is het vergroten van de zoetwateraanvoer naar het IJsselmeer/Markermeer via het ARK om zo de buffer te vergroten. Bij middel-lage tot lage afvoeren is de mogelijkheid om meer water naar het IJsselmeer te sturen over de IJssel beperkt of niet aanwezig, omdat de afvoer bij Driel dan al minimaal is (25 m³/s, maar in de praktijk ongeveer 15-20 m³/s) en niet verder geknepen kan worden. Door van het ARK ook een aanvoerroute naar het IJsselmeer – via het Markermeer – te maken, wordt de aanvoer van de IJsselmeervoorraad stuurbaar.

Wanneer de ARK-route niet ingezet wordt stroomt al het water van het ARK naar het NZK. In de 2050 Ref700 situatie gaat dit om 25 m³/s. Bij een mogelijke situatie van de ARK-route waarbij circa 40 m³/s naar het Markermeer gevoerd wordt kan de toevoer naar het NZK verkleind worden tot 10 m³/s, omdat er benedenstrooms van het ARK met 50 m³/s nog genoeg tegendruk geleverd wordt (Hydrologic, 2019c). Om benedenstrooms van het ARK van een afvoer van 25 m³/s naar 50 m³/s te gaan, neemt de watervraag met 25 m³/s toe. In Figuur 3-12 is te zien dat aan deze toename in watervraag voldaan kan worden door het debiet door het Betuwepand te verhogen en dus 25 m³/s extra uit de Waal te onttrekken. Door deze onttrekking daalt de waterstand bij Ophemert (iets benedenstrooms van Tiel, zie Figuur 4-1) met zo'n 7 cm ten opzichte van de 2050 Ref700 situatie. In bijlage B6B zijn de waterdieptes per knelpunt voor elke afvoer bij Lobith voor elk scenario weergegeven. Een grotere onttrekking door de Bernhardsluizen zal tevens zorgen voor een hogere afvoer door deze sluisen. Zowel de waterstandsverlaging benedenstrooms op de Waal als de hogere afvoer door de Bernhardsluizen zullen negatieve gevolgen hebben voor de scheepvaart. Op deze gevolgen voor de beladingsgraad van schepen zal in Hoofdstuk 4 dieper ingegaan worden.

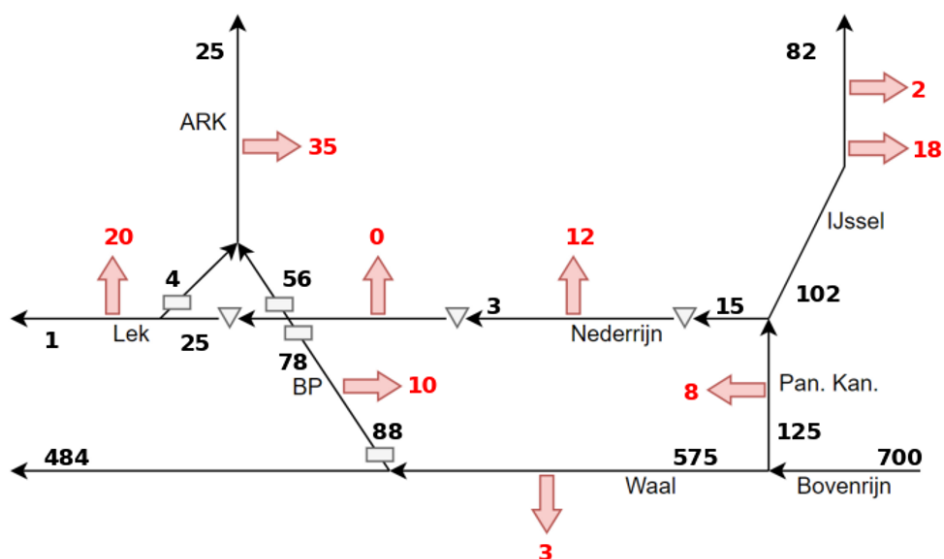


Figuur 3-12 Waterbalans voor 2050 met inzet ARK-route voor een afvoer van 700 m³/s bij Lobith. Met in zwart de afvoer in m³/s per tak van het hoofwatersysteem en in rood de belangrijkste onttrekkingen (rode pijl wijst van zwarte pijl af) of aanvullingen (rode pijl wijst naar zwarte pijl toe) aan het hoofwatersysteem in m³/s. De stuwen op de Nederrijn-Lek zijn weergegeven met driehoekjes en de sluisen op het ARK-Betuwepand en het Lekkanaal met rechthoekjes.

3.2.3.2 Hagestein

Op de Lek bevinden zich bij Bergambacht, Streefkerk en Krimpen aan de Lek innamepunten voor waterschappen en drinkwater. Bij lage afvoeren kunnen deze innamepunten evenals de Hollandse IJssel in de toekomst mogelijk verzilten. Door het debiet over stuw Hagestein te vergroten kan deze verzilting voorkomen worden. Volgens Hydrologic (2019c) is 10 tot 40 m³/s over Hagestein voldoende om de benedenstroomse inlaten en innamepunten zoet te houden in perioden van laagwater. Met de bestaande stuw is het technisch mogelijk om deze hoeveelheden door te kunnen laten (Hydrologic, 2019c). In de balans van dit onderzoek is gekozen voor een minimum debiet van 25 m³/s, omdat met dit debiet de afvoer bij de monding van de Lek nog positief is. De huidige aanname is dat bij een constante negatieve afvoer bij de monding van de Lek het zout kan oprukken (zodra de zouttong de monding van de Lek heeft bereikt) ten tijde van droogte. Er loopt in het kader van de KZH een onderzoek naar het benodigde debiet over Hagestein om deze aanname te toetsen.

Het verhogen van het debiet over Hagestein gaat echter wel ten kosten van de Waal afvoer en concurreert met het debiet voor het ARK-NZK (zie Figuur 3-13), omdat het extra water door het Betuwepand aangevoerd wordt. Het effect van dit scenario op de afvoerverdeling is dus vooral voelbaar benedenstrooms op de Waal, omdat daar de afvoer verlaagd is ten opzichte van 2050 Ref700. Dit heeft een waterstandsverlaging bij Ophemert van ongeveer 4 cm ten opzichte van 2050 Ref700 als gevolg. Echter heeft het inzetten van de ARK-route een grotere impact op de afvoer en waterstand benedenstrooms van de Waal. Nadelige gevolgen van het scenario Hagestein voor de scheepvaart zijn dus net als voor de ARK-route een waterstandsverlaging op de Waal benedenstrooms van Tiel en een hogere afvoer door de Bernhardsluizen. Op deze gevolgen voor de beladingsgraad van schepen zal in Hoofdstuk 4 dieper ingegaan worden.

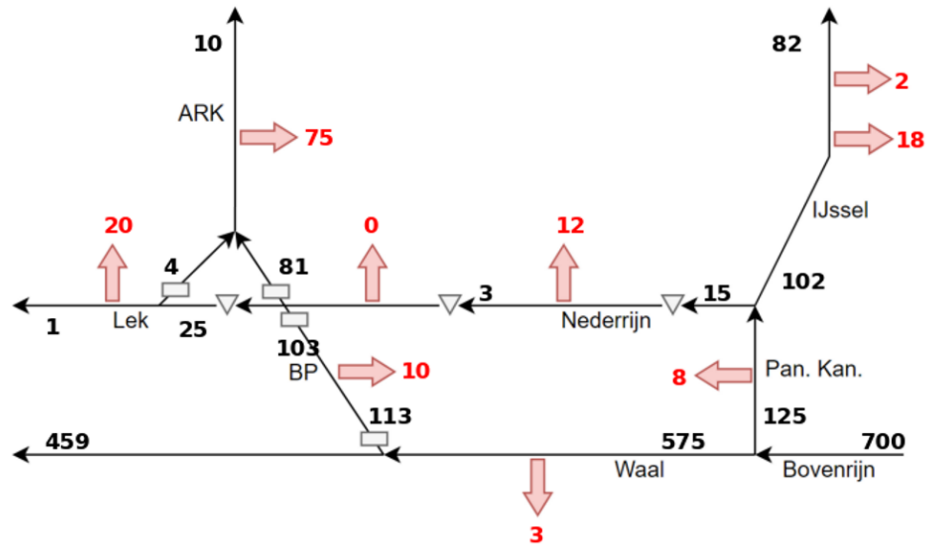


Figuur 3-13 Waterbalans voor 2050 met minimaal 25 m³/s over Hagestein voor een afvoer van 700 m³/s bij Lobith. Met in zwart de afvoer in m³/s per tak van het hoofwatersysteem en in rood de belangrijkste onttrekkingen (rode pijl wijst van zwarte pijl af) of aanvullingen (rode pijl wijst naar zwarte pijl toe) aan het hoofwatersysteem in m³/s. De stuwen op de Nederrijn-Lek zijn weergegeven met driehoekjes en de sluizen op het ARK-Betuwepand en het Lekkanaal met rechthoekjes.

3.2.3.3 Combinatie ARK-route & Hagestein

Om zowel een grotere zoetwaterbuffer in de IJsselmeerregio te hebben als benedenstrooms van de Lek verzilting te voorkomen kunnen de inzet van de ARK-route en scenario Hagestein gecombineerd worden.

Dit heeft als gevolg dat er nog meer water onttrokken moet worden uit de Waal en het debiet in de Prins Bernhardsluizen stijgt tot 113 m³/s bij een afvoer van 700 m³/s bij Lobith. Het gevolg van de combinatie van deze twee maatregelen is vooral voelbaar benedenstrooms op de Waal, waar de afvoer ten opzichte van 2050 Ref700 met bijna 10% afneemt. Het combineren van de ARK-route en scenario Hagestein zorgt voor een afname van bijna 12 cm in de waterstand bij Ophemert ten opzichte van 2050 Ref700. Op de gevolgen voor de beladingsgraad van schepen zal in Hoofdstuk 4 dieper ingegaan worden.



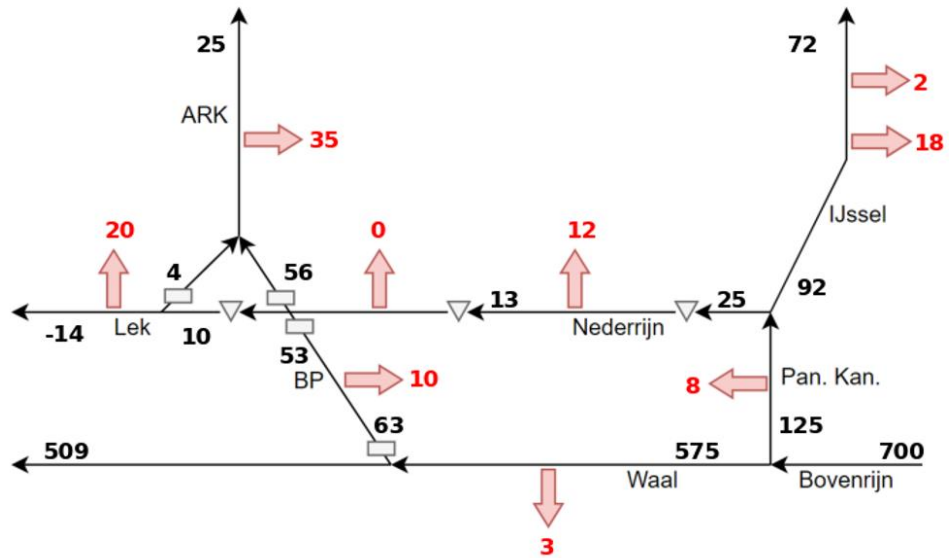
Figuur 3-14 Waterbalans voor 2050 met ARK-route en minimaal 25 m³/s over Hagestein gecombineerd voor een afvoer van 700 m³/s bij Lobith. Met in zwart de afvoer in m³/s per tak van het hoofwatersysteem en in rood de belangrijkste onttrekkingen (rode pijl wijst van zwarte pijl af) of aanvullingen (rode pijl wijst naar zwarte pijl toe) aan het hoofwatersysteem in m³/s. De stuwen op de Nederrijn-Lek zijn weergegeven met driehoekjes en de sluizen op het ARK-Betuwepand en het Lekkanaal met rechthoekjes.

3.2.3.4 Driel (3 varianten)

In deze paragraaf wordt onderzocht wat het gevolg is voor de waterbalans als het debiet over stuw Driel verhoogd wordt tot minimaal 25 m³/s. Dit kan theoretisch gezien volledig ten kosten van de IJssel, volledig ten kosten van de Waal of deels ten kosten van beide aangevuld worden. In praktijk is er geen directe keuze te maken tussen de Waal of IJssel, de beschouwde scenario's dienen daarom als hoekpunten te worden beschouwd om de potentiële impact van de maatregel te bepalen.

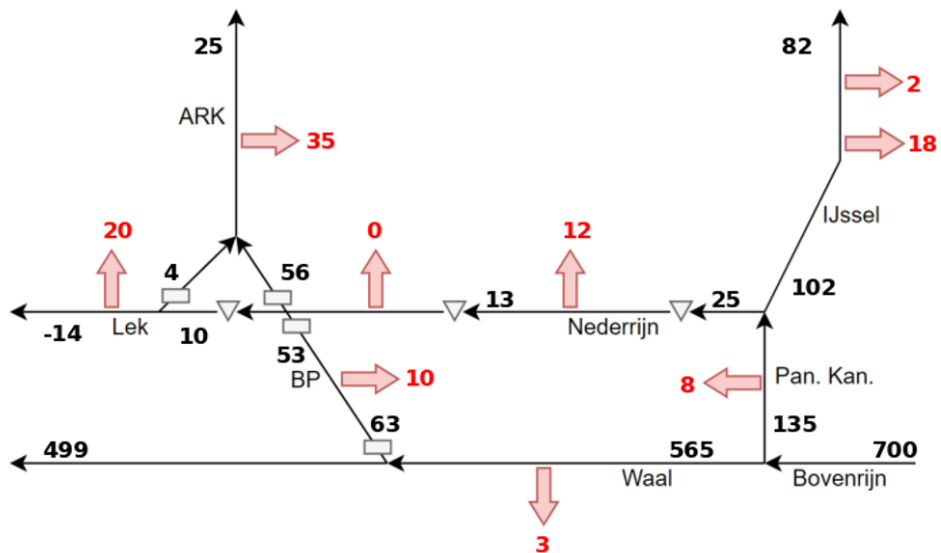
De opties die hier beschreven zijn geven dus de maximale effecten weer en een benadering van de praktijk. Door het verhogen van het debiet over stuw Driel, is er aangenomen dat er minder water door het Betuwepand hoeft te gaan.

Wanneer het debiet bij Driel volledig uit de IJssel wordt aangevuld, neemt de afvoer van de IJssel uiteraard af. De afvoer benedenstrooms van de Waal ligt in dit geval echter hoger dan bij 2050 Ref700, omdat er minder water door het Betuwepand aan de Waal onttrokken wordt. Dit is te zien in Figuur 3-15. Het verschil met de 2050 Ref is dus een lagere afvoer op de IJssel en een hogere afvoer benedenstrooms op de Waal. Dit heeft de volgende effecten op de waterstand. Bovenstrooms op de IJssel bij Velp zal de waterstand met bijna 10 cm afnemen ten opzichte van 2050 Ref700, Benedenstrooms op de Waal zal de waterstand echter enkele centimeters toenemen.



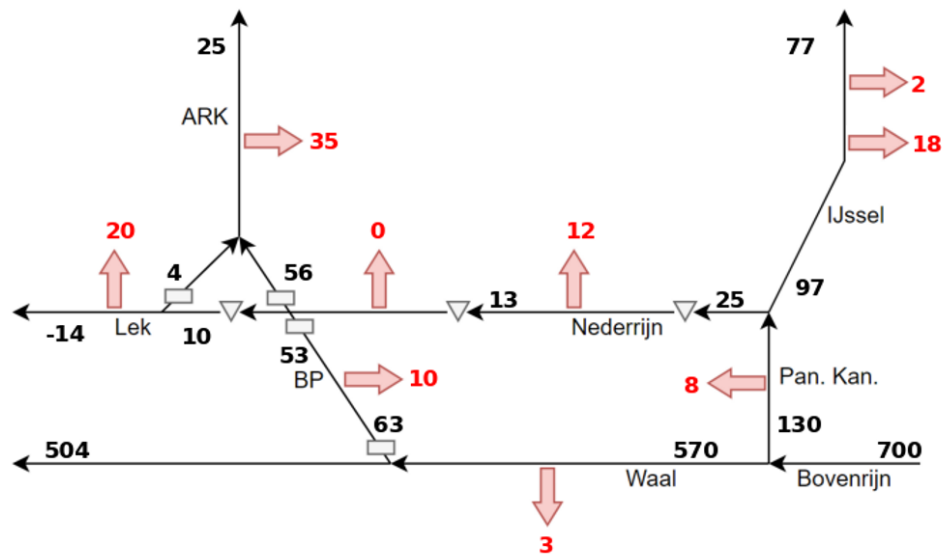
Figuur 3-15 Waterbalans voor 2050 met minimaal 25 m³/s over Driel (uit de IJssel) voor een afvoer van 700 m³/s bij Lobith. Met in zwart de afvoer in m³/s per tak van het hoofwatersysteem en in rood de belangrijkste onttrekkingen (rode pijl wijst van zwarte pijl af) of aanvullingen (rode pijl wijst naar zwarte pijl toe) aan het hoofwatersysteem in m³/s. De stuwen op de Nederrijn-Lek zijn weergegeven met driehoekjes en de sluizen op het ARK-Betuwapand en het Lekkanaal met rechthoekjes.

Wanneer het verhogen van het debiet bij Driel ten kosten zou gaan van de Waal, zal de afvoer in de IJssel gelijk blijven (zie Figuur 3-16). De afvoer benedenstrooms op de Waal zal ook gelijk blijven ten opzichte van 2050 Ref, omdat de hoeveelheid water die bovenstrooms van de Waal extra naar Driel gaat nu niet onttrokken hoeft te worden bij het Betuwepand. Het grootste verschil is dus een lagere afvoer op de Waal tussen Pannerdensche Kop en Betuwepand. Dit heeft een waterstandsverlaging bovenstrooms op de Waal van zo'n 3 cm ten opzichte van 2050 Ref700 als gevolg.



Figuur 3-16 Waterbalans voor 2050 met minimaal 25 m³/s over Driel (uit de Waal) voor een afvoer van 700 m³/s bij Lobith. Met in zwart de afvoer in m³/s per tak van het hoofwatersysteem en in rood de belangrijkste onttrekkingen (rode pijl wijst van zwarte pijl af) of aanvullingen (rode pijl wijst naar zwarte pijl toe) aan het hoofwatersysteem in m³/s. De stuwen op de Nederrijn-Lek zijn weergegeven met driehoekjes en de sluizen op het ARK-Betuwapand en het Lekkanaal met rechthoekjes.

Bij het laatste scenario wordt het extra water zowel uit de IJssel als uit de Waal gehaald (Figuur 3-17). Hierdoor neemt de afvoer op de IJssel af, maar minder dan in Figuur 3-15. Ook de afvoer bovenstrooms van de Waal neemt af, maar ook minder dan in Figuur 3-16. Benedenstrooms op de Waal ligt de afvoer echter hoger dan in 2050 Ref, omdat er minder water wordt onttrokken door het Betuwepand. Bij Velp zal de waterstand nu dalen met ongeveer 5 cm en bij Nijmegen dalen met ongeveer 1 cm ten opzichte van 2050 Ref700.



Figuur 3-17 Waterbalans voor 2050 met minimaal 25 m³/s over Driel (uit de IJssel en Waal) voor een afvoer van 700 m³/s bij Lobith. Met in zwart de afvoer in m³/s per tak van het hoofwatersysteem en in rood de belangrijkste onttrekkingen (rode pijl wijst van zwarte pijl af) of aanvullingen (rode pijl wijst naar zwarte pijl toe) aan het hoofwatersysteem in m³/s. De stuwen op de Nederrijn-Lek zijn weergegeven met driehoekjes en de sluizen op het ARK-Betuwepand en het Lekkanaal met rechthoekjes.

3.2.4 Klimaatscenario's

Eerder is het gevolg van klimaatverandering op de herhalingstijd en onderschrijdingsduur van de afvoer (bij Lobith) bepaald (Jong, 2019). Als gevolg van klimaatverandering kunnen, afhankelijk van het klimaatscenario, lage afvoeren vaker (lagere terugkeertijd) of langer (meer dagen onderschrijding in één jaar) voorkomen (Tabel 3-4). De gevolgen van klimaatverandering zijn eerder beschreven in de stresstest droogte (de Jong & van der Mark, 2020). In dit onderzoek wordt hier niet nader naar gekeken, maar het effect van klimaatverandering kan bovenop het effect van de maatregelen komen. In een vervolgonderzoek kunnen deze twee bedreigingen worden samengenomen.

Opzet op zee zorgt ervoor dat het zout verder kan binnendringen. Gedurende deze momenten neemt de watervraag toe waardoor er maatregelen genomen kunnen worden die negatieve gevolgen hebben voor de scheepvaart. Over het algemeen is gedurende het groeiseizoen de opzet op zee relatief beperkt. Echter, bij lagere afvoeren kunnen geringe verhogingen in waterstanden resulteren in verregaande zoutindringing. Dit is met name relevant voor de Rijn-Maasmonding en daarmee vooral voor de Lek en Hollandsche IJssel. In de watervraag zit impliciet al aangenomen dat er een natuurlijke variatie is in waterstanden op zee en dat er een aanvoer aan water nodig is om de noodzakelijke tegendruk te generen. Hierbij dient ook opgemerkt te worden dat maatregelen tegen zoutindringing in de Rijn-Maasmonding gericht zijn op het getijgemiddelde zoutfront en niet op het tegengaan van de zoutpieken.

Bij zeespiegelstijging zal het zoutfront van nature verder landwaarts liggen. Voor het zichtjaar 2050 is, zolang de zeespiegelstijging niet sterk toeneemt, een stijging van 40 centimeter aan te nemen (Mens et al., 2018). Dit resulteert niet direct in drastische veranderingen in aansturing van het watersysteem. Wel dient opgemerkt te worden dat een combinatie van zeespiegelstijging en zakkende waterstanden op de rivieren kan resulteren in negatief verval bij stuw Hagestein en in mindere mate bij Lith (Maas). Wat hiervan de gevolgen zijn is nog niet bekend en zou later uitgezocht moeten worden.

Tabel 3-4 Aantal dagen onderschrijding van afvoeren bij Lobith voor verschillende terugkeertijden voor de referentiesituatie en twee klimaatscenario's van 2050 [Uit tabel 9.1 van (Jong, 2019)]

Aantal dagen onderschrijding		Afvoerniveau (m ³ /s)				
Klimaatscenario	Terugkeertijden	700	850	1020	1400	1800
Ref	1	0	0	0	0	12
	2	0	0	0	62	141
	10	0	15	69	179	281
	100	32	112	208	319	341
	<i>Gemiddeld</i>	<i>1</i>	<i>6</i>	<i>20</i>	<i>78</i>	<i>151</i>
GL_2050	1	0	0	0	0	7
	2	0	0	0	37	117
	10	0	5	51	142	244
	100	27	100	176	294	332
	<i>Gemiddeld</i>	<i>0</i>	<i>3</i>	<i>12</i>	<i>56</i>	<i>123</i>
WHdry_2050	1	0	0	0	2	60
	2	0	3	34	114	183
	10	30	70	120	212	285
	100	117	195	259	316	337
	<i>Gemiddeld</i>	<i>7</i>	<i>22</i>	<i>47</i>	<i>117</i>	<i>185</i>

3.3 Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal

3.3.1 Zout en watersysteem

Het Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal zijn zonder objecten met elkaar verbonden en worden gemeenschappelijk gereguleerd met spui- en schutsluizen (Hydrologic, 2021a, Figuur 3-18). Het Amsterdam-Rijnkanaal is geometrisch vrijwel constant, zowel in de breedte als in de diepte. Het Noordzeekanaal (en IJ) kennen een sterke variatie in de breedte en diepte. Het kanaal is het diepste bij IJmuiden en neemt stapsgewijs af in diepte richting Amsterdam.

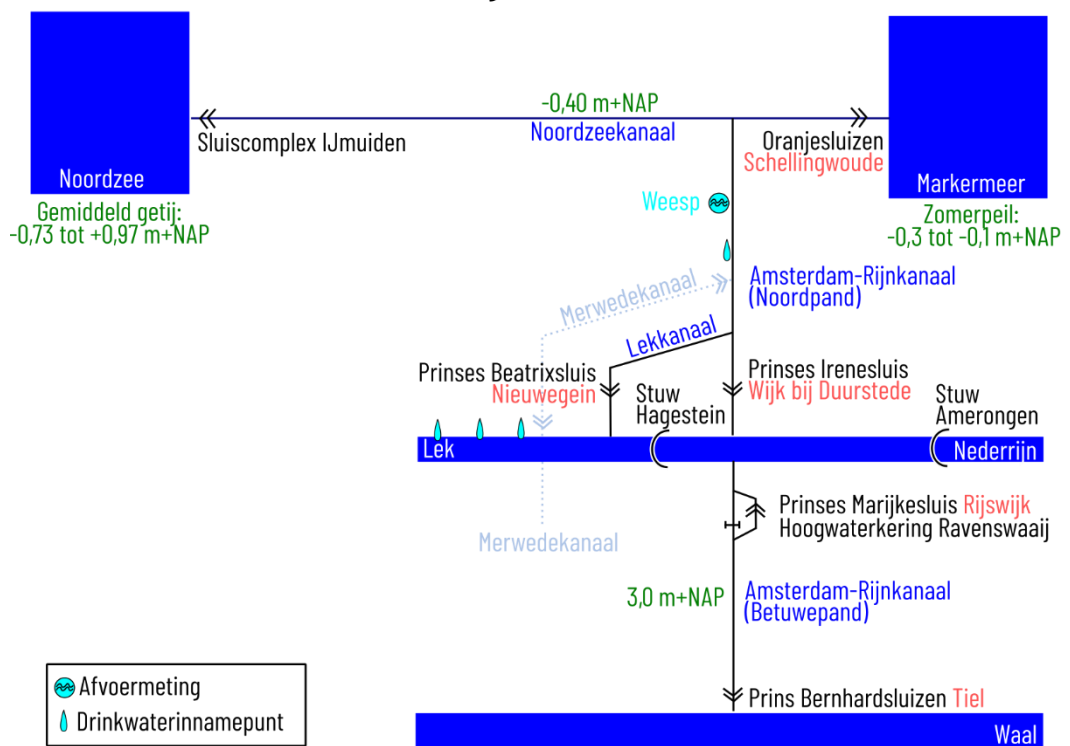
In droge situaties wordt er water aangevoerd vanuit de Lek bij de Irenesluizen. Tot 30 m³/s wordt het water aangevoerd via het Waterinlaatsysteem (WIS), daarboven wordt er ('s nachts) gebruik gemaakt van de oude scheepvaartkolk waardoor deze kolk is gestremd, maar er is dan nog 1 kolk beschikbaar voor de scheepvaart. Op het Amsterdam-Rijnkanaal zijn er meerdere uitwisselpunten met de waterschappen en drinkwaterbedrijven en wordt in droge situaties meer water ingenomen dan via de Irenesluizen wordt aangevoerd. Onder andere de Klimaatbestendige Wateraanvoervoorziening (KWA) neemt water in vanuit het Amsterdam-Rijnkanaal via gemaal de Aanvoerder (Figuur 3-19). Tussen Amsterdam en Utrecht zijn er meerdere (open) verbindingen tussen het hoofdwatersysteem en regionale systeem. Via het regionale systeem bij Weesp is er een uitwisseling van water mogelijk met het Markermeer op het Amsterdam-Rijnkanaal.

Het Amsterdam-Rijnkanaal mondt uit in het IJ, welke via de Oranjesluizen (en indirect met gemaal Zeeburg) in verbinding staat met het Markermeer. De Amsterdamse grachten staan in open verbinding met het IJ en daarmee het hoofdwatersysteem. Het Noordzeekanaal kent meerdere uitwisselpunten met het regionale systeem, in droge situaties wordt hier normaliter geen of amper water ingenomen. Overtollig water wordt bij IJmuiden door middel van spuisluizen onder vrij verval afgevoerd naar de Noordzee.

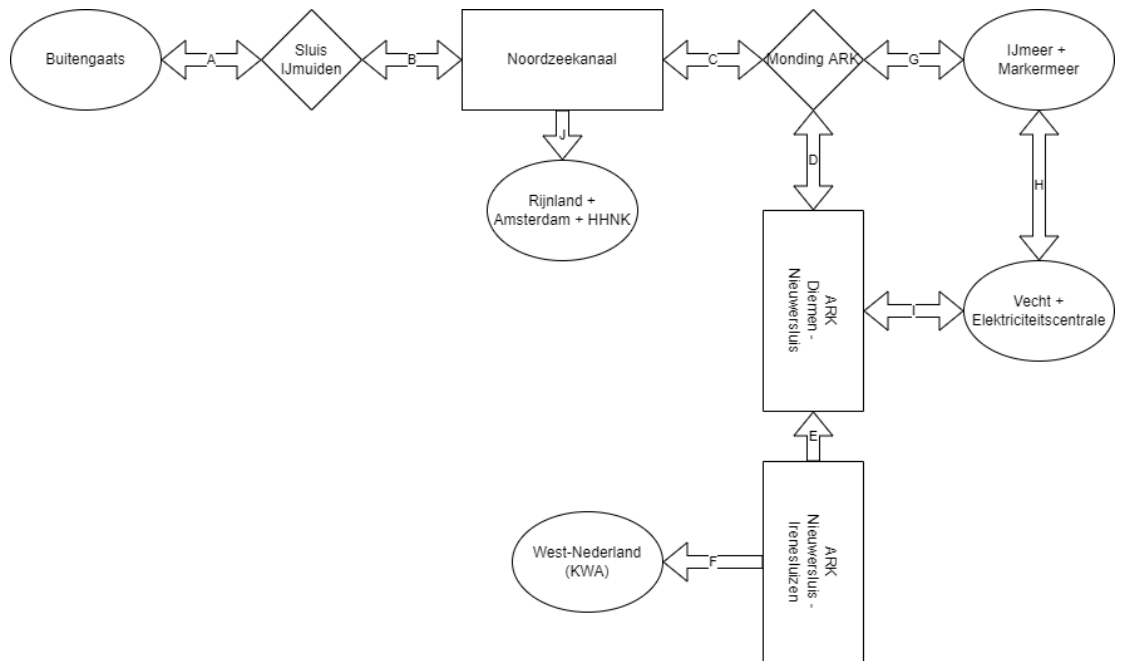
Zout komt het kanaal binnen via de schut- (en spui)sluizen bij IJmuiden (Figuur 3-20). Deze bron van zout vormt de grootste uitdaging in het kanaal. Daarnaast zijn de diepe polders tussen Amsterdam en Utrecht een relevante bron van zout voor het Amsterdam-Rijnkanaal door zoute kwel vanuit de ondergrond. Als laatste vormt het rivierwater een bron van zout ook al is het rivierwater zoet. Dit komt doordat het rivierwater een achtergrondconcentratie heeft aan zout, maar deze achtergrondconcentratie is in principe onder de drempelwaarden van 150 mg Cl/l voor drinkwater. Alleen bij extreem lage afvoeren zal de zoutconcentratie van het rivierwater boven de drempelwaarden komen.

Over een langere tijdschaal (meerjaarlijks) is er sprake van een balans tussen het binnendringende en afgevoerde zout. Als de spuidebieten afnemen wanneer er sprake is van een watertekort zal er netto meer zout binnenkomen. Als gevolg hiervan zal de zouttong hoger in de waterkolom terecht komen, maar de zouttong bevindt zich door de hogere dichtheid nog steeds onder de zoetwaterlaag. Het zout mengt zich met de rest van de waterkolom door wind, scheepvaart en sluisoperaties en daardoor dringt het zout verder landinwaarts. De exacte bijdrage van elk van de componenten is nog niet bekend. De geometrie van de bodem zorgt ervoor dat er drempels zijn waar de zouttong overheen moet. Zodra de zouttong over een drempel is gekomen kan deze zich in eerste instantie snel horizontaal verspreiden.

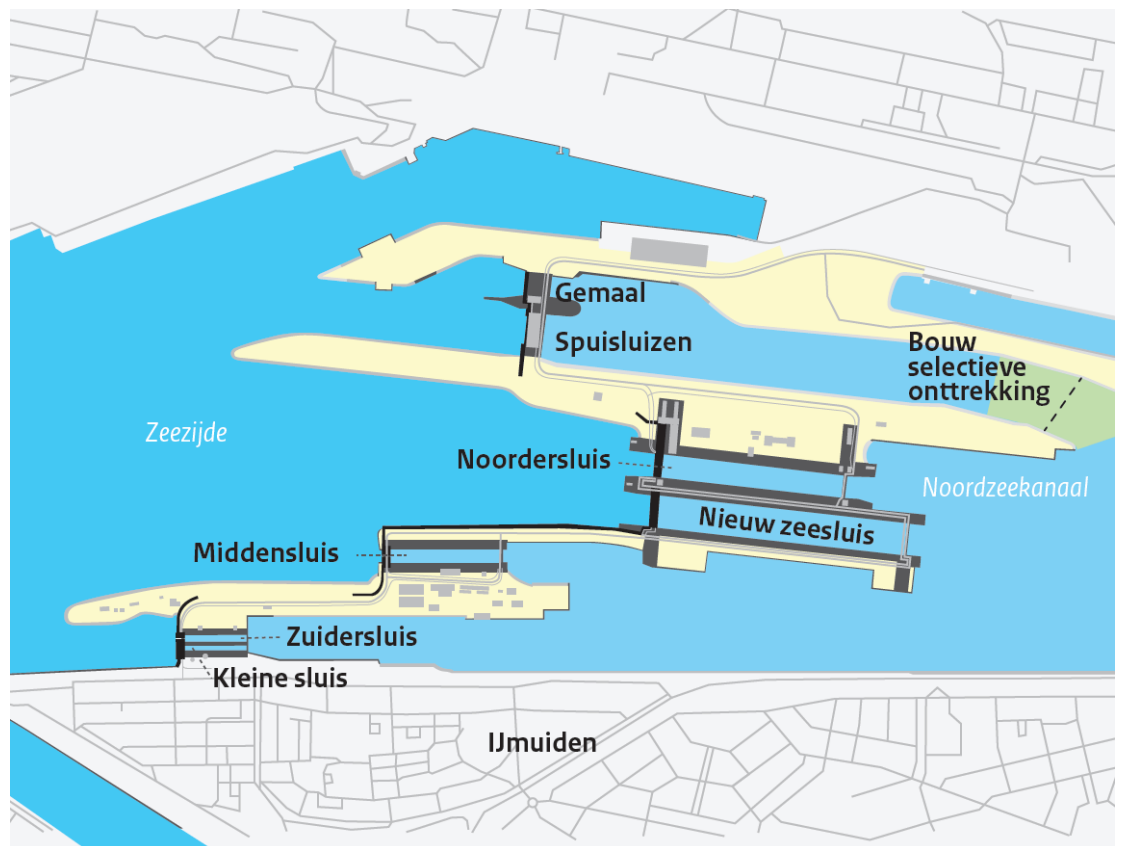
Amsterdam-Rijnkanaal-Noordzeekanaal



Figuur 3-18 Schematische weergave van het Amsterdam-Rijnkanaal-Noordzeekanaal. Het peil op het Betwepand volgt bij afvoeren bij Lobith van lager dan 1200 m³/s de waterstand op de Waal doordat de Prins Bernhardsluizen geopend staan. De Prinses Marijkesluis is alleen in gebruik bij hoge afvoeren als keersluis Ravenswaaij wordt gesloten. Voor meer informatie wordt verwezen naar (Rijkswaterstaat, 2020)



Figuur 3-19 Schematische weergave Amsterdam-Rijnkanaal-Noordzeekanaal met de uitwisselpunten tussen het regionale systeem en hoofdwatersysteem



Figuur 3-20 Spui- en schutsluiscomplex IJmuiden (Hydrologic, 2021a)

3.3.2 Functies en maatregelen

Net als bij de andere wateren in Nederland zijn er meerdere functies te onderscheiden.

- Het Amsterdam-Rijnkanaal - Noordzeekanaal is een belangrijke bron van zoetwater voor drinkwater, landbouw en kwetsbare natuur.
- De wateren zijn onderdeel van het aquatisch ecosysteem.
- Als laatste is het Amsterdam-Rijnkanaal – Noordzeekanaal inclusief schutsluizen onderdeel van de hoofdtransportas.

De maatregelen in dit systeem richten zich ten tijde van droogte op het zoet houden van het Amsterdam-Rijnkanaal (en in mindere mate ook het Noordzeekanaal – IJ). Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de metingen bij Diemen en in het Noordzeekanaal (z5-waarde, een 5-daags voortschrijdend gemiddelde van 5 locaties). De maatregelen zijn in te delen in 5 hoofdcategorieën die per categorie later worden besproken.

- I. (Gericht) Afvoeren van zout;
- II. Vergroten aanvoer van water;
- III. Beperken zoutlast bij schutsluizen;
- IV. Beperken zoutlast, watervraag of uitwisseling met aantakende systemen.
- V. Overige maatregelen die niet onder één van de voorgaande categorieën vallen

I. Afvoeren van zout

- Het afvoeren van zout (met zo min mogelijk water) is te realiseren door gericht water uit de zoute laag te spuien. Deze maatregel wordt geïmplementeerd en staat bekend als de Selectieve Onttrekking en vormt in 2024 onderdeel van het operationele systeem.

II. Vergroten aanvoer van water

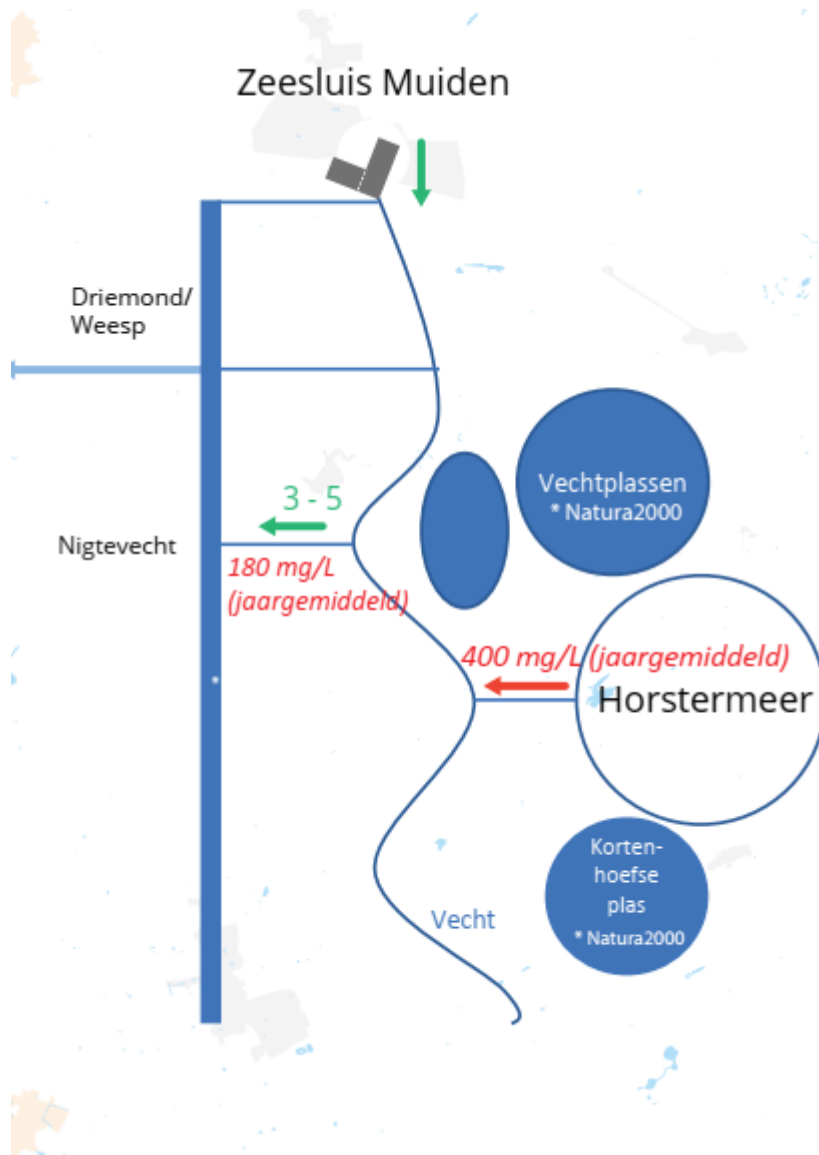
- Een bestaande maatregel is het vergroten van de wateraanvoer via de Irenesluizen door ('s nachts) gebruik te maken van de oude kolk. Dit water wordt via het Betuwepand uiteindelijk onttrokken uit de Waal en resulteert daar in een waterstandsdeling.
- Via de Beatrixsluizen is er water aan te voeren uit de Lek, dit is nu geen onderdeel van de operationele maatregelen en kan resulteren in beperkingen voor de scheepvaart. Als het water wordt aangevoerd via Hagestein komt het uiteindelijk uit de Waal en zal de waterstand daar dalen. Wordt het water onttrokken uit de Lek zonder extra water aan te voeren zou het negatieve gevolgen kunnen hebben op de zoutindringing daar, al is dit nog niet onderzocht.
- Vanuit het Markermeer kan er direct water worden aangevoerd op het IJ via de Oranjesluizen. De tegendruk van de afvoer vanuit het Markermeer wordt over een groter oppervlak verspreid op het IJ ten opzichte van het aanvoeren van water via de Irenesluizen. Het gevolg is dat het aanvoeren van dezelfde hoeveelheid water vanuit het Markermeer minder effectief is dan het aanvoeren via de Irenesluizen.
- Vanuit het Markermeer kan ook via het regionale systeem (Zeesluis Muiden → Nigtevecht) water worden geloosd op het Amsterdam-Rijnkanaal (Figuur 3-21). Over het algemeen is het water van het Markermeer iets minder zoet, maar is het een aanvullende optie in situaties van droogte.
- De Elektriciteitscentrale bij Diemen kan ook water lozen op het Amsterdam-Rijnkanaal om het debiet te verhogen en daarmee meer tegendruk te generen tegen de zoutindringing.

III. Beperken zoutlast bij schutsluizen

- Een beperking van de zoutlast is op meerdere manieren te realiseren bij IJmuiden:
 - De eerste stap is het optimaliseren van de schuttingen. Hiermee worden de deuropentijden zoveel mogelijk beperkt. Het gevolg hiervan is een langere wachttijd voor de scheepvaart.
 - De stap daarna is het beperken van het aantal schuttingen op een dag. Hiervoor wordt met name gekeken naar de grote kolken (Zeesluis en Noordersluis). Het gevolg hiervan is minimaal een nog langere wachttijd en kan de bereikbaarheid van de haven sterk beperken (afhankelijk van het aantal nog mogelijke schuttingen).
 - De schutbeperkingen hebben pas na een geruime tijd (>30 dagen) effect op de zoutconcentratie bij het Amsterdam-Rijnkanaal, maar hebben al eerder invloed op de zoutconcentratie in het Noordzeekanaal.
- Bellenschermen zijn geen reële optie voor de grote schutsluizen van IJmuiden (Weiler en Bijlsma, 2019).
- De kleinere schutsluizen ondervinden geen beperkingen in tijden van droogte. De zoutlast van de grote kolken is zoveel groter dat het amper zin heeft om beperkingen in te stellen voor de kleinere kolken.

IV. Beperken zoutlast, watervraag of uitwisseling met aantakende systemen

- De polders tussen Amsterdam en Utrecht hebben te maken met zoute kwel (Horstermeer uit Figuur 3-21). Deze zoutvracht kan terecht komen op het Amsterdam-Rijnkanaal (Nigtevecht uit Figuur 3-21). De uitwisseling tussen deze polders en het hoofdwatersysteem kan tijdelijk worden afgesloten.
- Sommige watersystemen (Amsterdamse grachten, plassen tussen Amsterdam en Utrecht) zijn af te sluiten van het hoofdwatersysteem. Het gevolg hiervan is dat de drempelwaarde van de zoutconcentratie zich verplaatst richting het innamepunt van het drinkwater en dat de eerste maatgevende innamepunten verder bovenstrooms zijn.
- Door de inname van water te beperken op het Amsterdam-Rijnkanaal (en Noordzeekanaal) blijft er meer water over om zout af te voeren of tegendruk te bieden. Programma's als Slim Watermanagement richten zich op het regionaal verdelen van het beschikbare water waar dit soort maatregelen uitgewerkt kunnen worden.



Figuur 3-21 Het regionale systeem tussen Amsterdam en Utrecht (uit Hydrologic, 2021a)

V. Overig

Als laatste is het bellenscherm bij de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal te noemen als een maatregel. Deze is niet in één van de categorieën in te delen want het richt zich op twee componenten. Als eerste zorgt een bellenscherm ervoor dat het zout minder makkelijk kan indringen via de bodem van het Amsterdam-Rijnkanaal. Daarnaast bevordert het de menging van het zout met de toplaag waar het afgevoerd kan worden richting zee. Bellenschermen kosten veel energie en hebben negatieve gevolgen voor de vismigratie. Bellenschermen kunnen de manoeuvreerbaarheid van schepen negatief beïnvloeden, maar dit effect is voor de beroepsvaart beperkt.

3.3.3

Toekomst

Op 26 januari 2022 is de nieuwe zeesluis IJmuiden geopend, toen was de maatregel "Selectieve Onttrekking" nog niet gereed. Dit zorgt ervoor dat de inzet van de zeesluis nog wordt beperkt om de zoutlast binnen de normen te houden. Naar verwachting is de selectieve onttrekking in 2024 / 2025 gereed en kan er volledig gebruik gemaakt worden van de zeesluis. In theorie zal de toename in zoutlast van de nieuwe zeesluis worden gecompenseerd door de maatregel.

Verder wordt er gekeken naar het mogelijk aanpassen van de geometrie van de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal. Dit zal invloed hebben op de manoeuvreerbaarheid van schepen op het Amsterdam-Rijnkanaal, maar heeft een positieve invloed op de zoutindringing. In hoeverre het negatieve effect op de scheepvaart opweegt tegen de positieve invloed op de zoutindringing wordt momenteel onderzocht (HKV en RoyalHaskoningDHV, 2023).

Het vergroten van de afvoer richting het Amsterdam-Rijnkanaal om meer water richting West-Nederland en het Markermeer te sturen (onderdeel van de KZH) heeft een negatief effect op de scheepvaart in het midden-rivierengebied. De maatregel heeft verder weinig negatieve gevolgen voor de scheepvaart in het Amsterdam-Rijnkanaal – Noordzeekanaal, er van uitgaande dat hetzelfde peil wordt gehandhaafd op het kanaal. Het aanvoeren van extra water zou, mits het resulteert in extra afvoer bij de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal, in theorie kunnen leiden tot een vermindering van mogelijke schutbeperkingen van IJmuiden. Of dit daadwerkelijk het geval is hangt af van de daadwerkelijke toename in tegendruk op het Amsterdam-Rijnkanaal. Daarnaast zouden er nog steeds maatregelen nodig kunnen zijn bij IJmuiden om de zoutindringing op het Noordzeekanaal te beperken (er van uitgaande dat het aanvullende water op het Amsterdam-Rijnkanaal richting de waterschappen en Markermeer wordt gestuurd). Om de balans tussen het mogelijke positieve effect van minder schutbeperkingen en het negatieve effect op de scheepvaart in het midden-rivierengebied te kunnen beoordelen is een objectieve kwantificatie van de schutbeperkingen op de scheepvaart benodigd. Het is op dit moment niet mogelijk om het effect van de schutbeperkingen bij IJmuiden te kwantificeren waardoor het opstellen van deze balans niet is gedaan. Dit zal in 2024 in een vervolgonderzoek worden opgepakt in samenwerking met Havenbedrijf Amsterdam.

3.4 IJsselmeer

3.4.1 Zout en watersysteem

De Afsluitdijk vormt de barrière tussen de zoute Waddenzee en het zoete IJsselmeer (Figuur 3-22). Zoet water wordt aangevoerd vanuit de IJssel en door spuisluizen bij Den Oever en Kornwerderzand afgevoerd. Er zijn verschillende uitwisselpunten tussen de waterschappen met het IJsselmeer. Bij Andijk neemt PWN water in voor de drinkwatervoorziening. Daarnaast is het IJsselmeer via de Krabbersgatsluis en Houtribsluizen verbonden met het Markermeer. Door het grote oppervlak van het IJsselmeer vormen neerslag en verdamping een significante post voor het opstellen van de waterbalans.

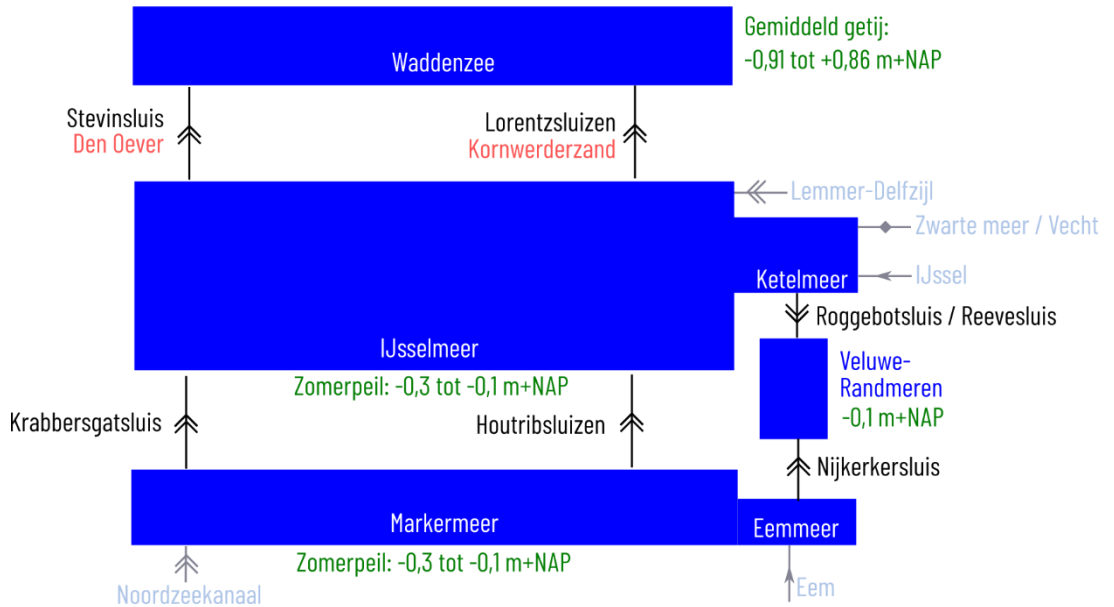
Zout komt het systeem binnen via de schut- en spuisluizen in de Afsluitdijk (Hydrologic, 2021b). Dit zijn de Stevinsluizen bij Den Oever en de Lorentzsluizen bij Kornwerderzand. Er is verder sprake van zoute kwel direct in het IJsselmeer vanuit de Waddenzee. Vanuit de regio's wordt zout geloosd op het systeem dat afkomstig is van kwel. Met name de diepe Wieringermeerpolder is een bron van zout voor het IJsselmeer. De grootste zoutvracht is afkomstig van de IJssel zelf (Figuur 3-24), maar de chlorideconcentratie blijft vrijwel altijd onder de gestelde normen. Bovendien zijn er geen maatregelen mogelijk zodra het rivierwater te zout is.

Zout blijft in eerste instantie hangen in de diepe kuilen achter de sluizen (Figuur 3-23). Deze kuilen zijn het resultaat van de bodemerrosie en vangen het zout op door de hogere dichtheid van zout water. Dit zout is af te voeren door te spuien met genoeg stroomsnelheid (ofwel debiet). Spuien gebeurt onder vrij verval met hevels.

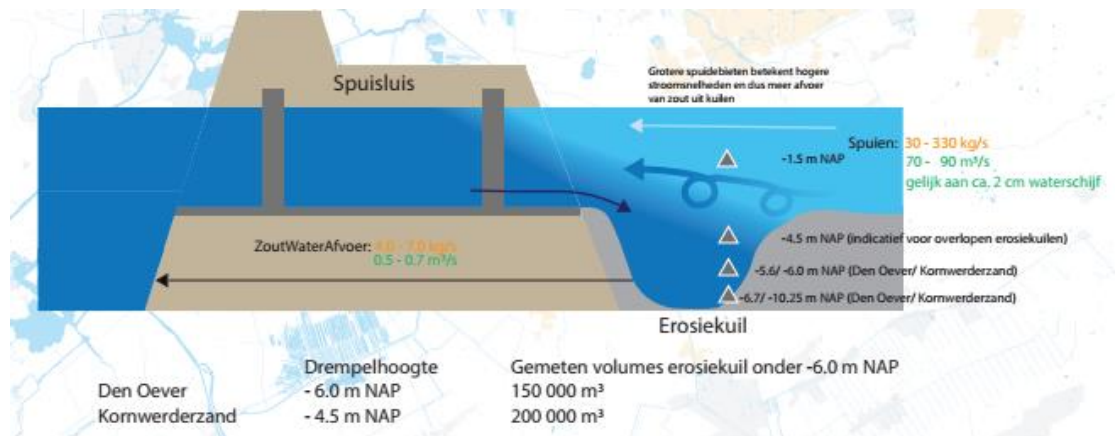
Het beheersen van de zoutindringing is een balans tussen genoeg spuien met het beschikbare water en het in stand houden van het gewenste peil in het IJsselmeergebied (Friocourt, 2020). In droge situaties wordt de buffer gebruikt om de watervraag en zoutbeheersing mogelijk te maken.

Zodra het zout over de randen van de kuilen stroomt kan het zich snel verspreiden door het gebied (far-field) door de wind gedreven stromingen (Figuur 3-25). Een beperkte toename in chlorideconcentratie kan al genoeg zijn om de drempelwaarden te overschrijden.

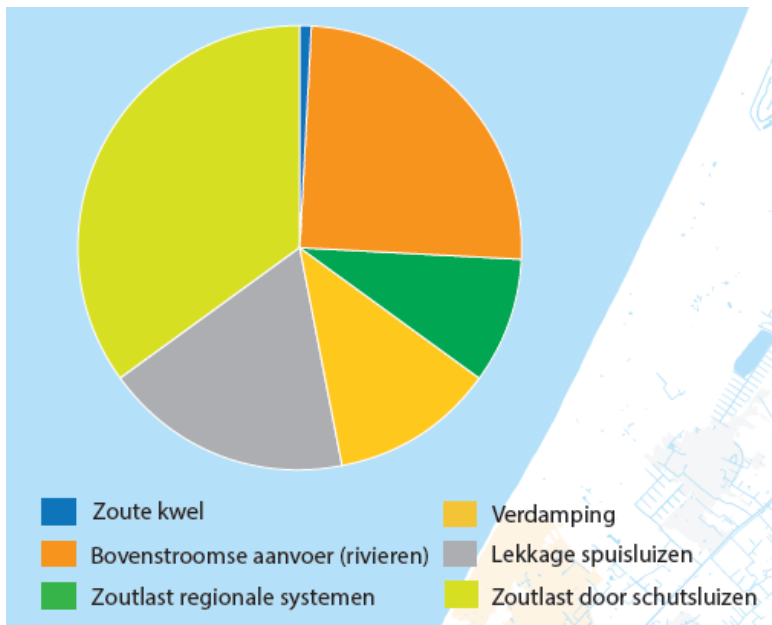
IJsselmeergebied



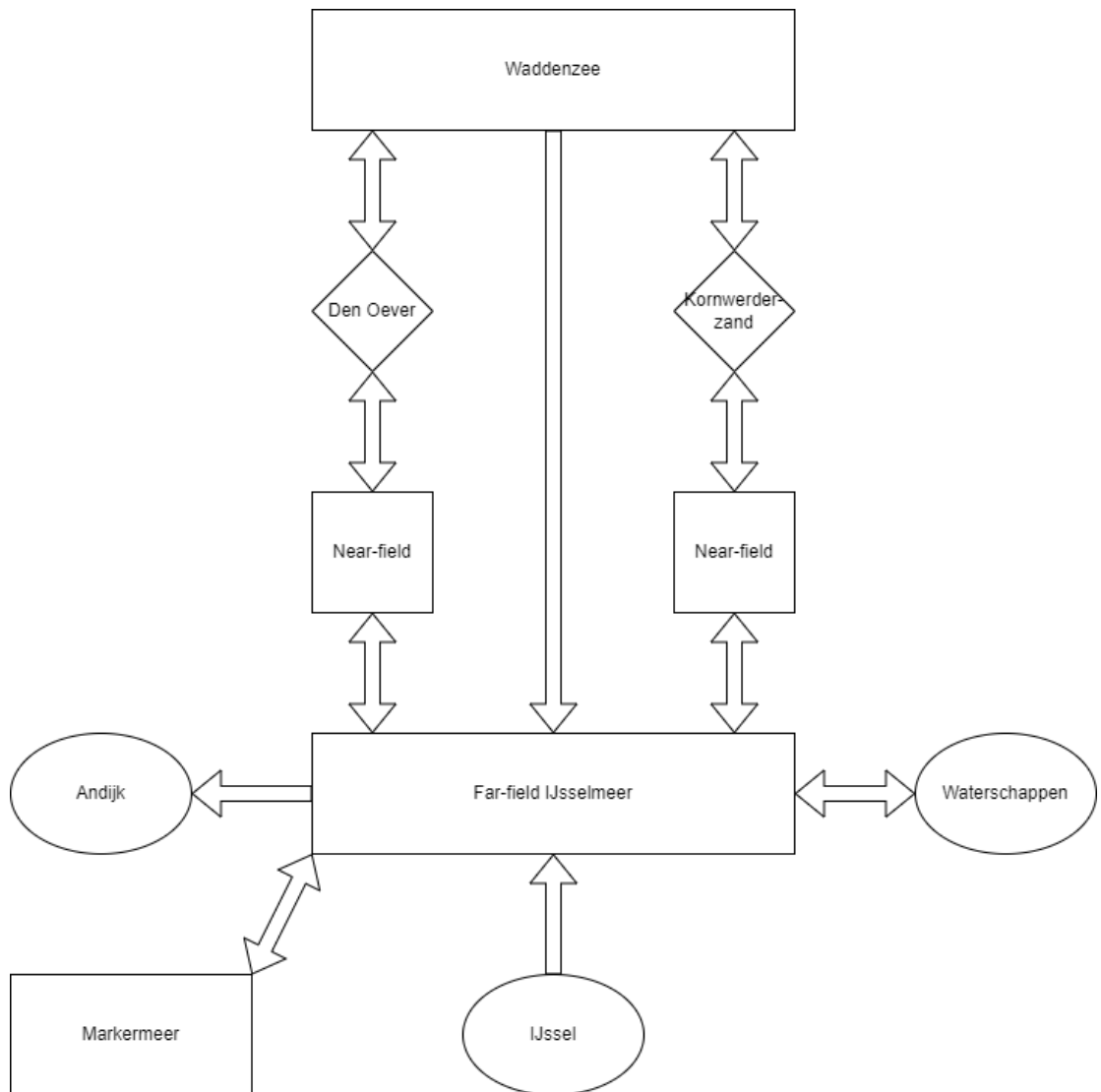
Figuur 3-22 Schematische weergave van het Merengebied. Voor meer informatie wordt verwezen naar Rijkswaterstaat (2020).



Figuur 3-23 Schematische weergave van zoutindringing bij schut- en spuisluizen bij de Afsluitdijk (Hydrologic, 2021b)



Figuur 3-24 Aandeel van de verschillende zoutbronnen voor een droge zomer (Hydrologic, 2021b)



Figuur 3-25 Schematische weergave IJsselmeer voor de verspreiding van zout en waterbalans

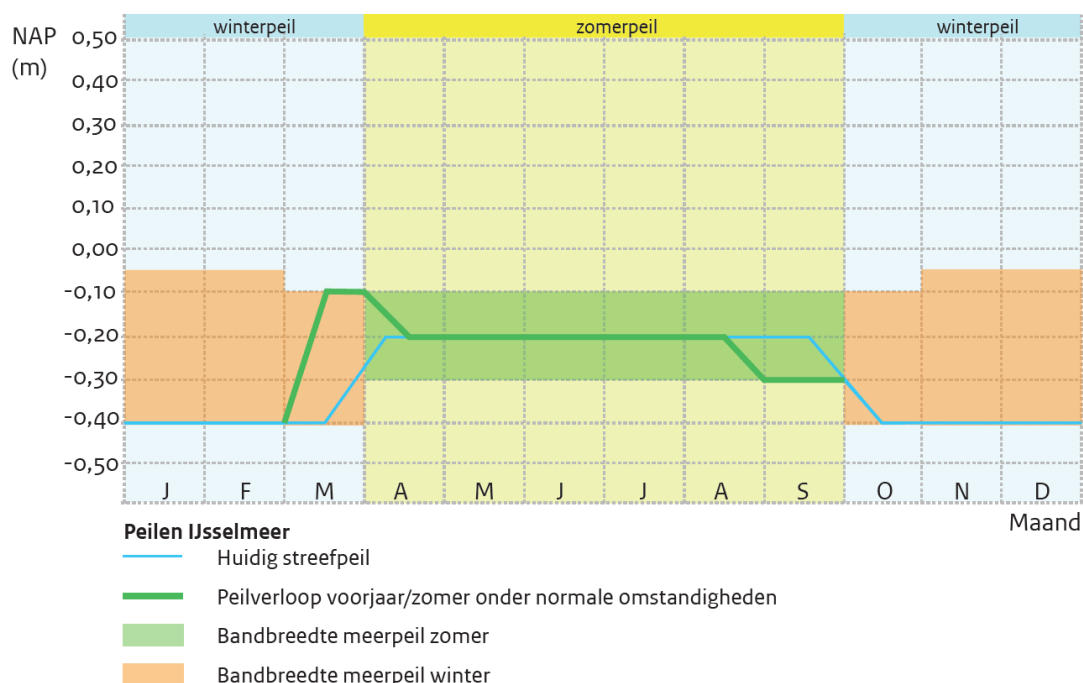
3.4.2 Functies en maatregelen

Het IJsselmeer vervult meerdere functies:

- 1 Komberging van water als onderdeel van hoogwaterbescherming;
- 2 Voorraadberging ten behoeve van de zoetwatervoorziening;
- 3 Robuust aquatisch ecosysteem;
- 4 Delen en objecten van het IJsselmeer worden gebruikt voor de scheepvaartfunctie.

Daarnaast wordt op en rondom het IJsselmeer ruimte gebruikt voor windparken en recreatie. Het gaat hier om zowel aquatische recreatie op het IJsselmeer als vakantieparken die zich op de randen van het IJsselmeer bevinden.

De combinatie van functie 1 en 2 resulteert in omgekeerd natuurlijk peilbeheer waar de waterstand in beginsel hoog is in de zomer en laag in de winter (Figuur 3-26). Deze bestuurlijke maatregel zorgt ervoor dat er een buffer is in de winter om water op te slaan ten tijde van hoogwater (zowel neerslag, hoge afvoeren als opzet op zee). De waterschijf die ontstaat als gevolg van het peil opzetten in de lente wordt gebruikt als strategische zoetwaterbuffer. Het onnatuurlijke peilbeheer werkt negatief door in de ecologische waarde in en rondom het IJsselmeer.



Figuur 3-26 Nagestreefd zomer- en winterpeil IJsselmeer, volgens vigerend peilbesluit (van Ginkel et al., 2022)

Ten behoeve van de zoetwatervoorziening zijn er vijf types maatregelen te onderscheiden:

- I. Afvoeren van zout met zo min mogelijk water;
- II. Vergroten van de aanvoer van water;
- III. Beperken zoutlast van de schuttingen;
- IV. Beperken zoutlekkage;
- V. Beperken zoutlast vanuit de regio.

I. Afvoeren van zout

Net als bij sluis IJmuiden richten de eerste maatregelen zich op het zo efficiënt mogelijk afvoeren van zout. Dit kan door de zoutvracht van het gespuide water te maximaliseren.

Bij de spuilsuizen wordt al zo veel mogelijk uit de diepere laag van het water gespuid om de zoutvrucht te vergroten. Hoe het spuiregime verder geoptimaliseerd kan worden wordt nog onderzocht.

Indien er sprake is van een watertekort wordt er gebruikt gemaakt van de buffer om nog voldoende te kunnen spuien. De buffer is een waterschijf die wordt gecreëerd door het peil van het IJsselmeer aan het einde van het stormseizoen (maart – april) gecontroleerd op te laten lopen. De buffer wordt aangevuld met de afvoer vanuit de IJssel. De houdbaarheid van de buffer is een kwestie van de balans tussen de aanvoer, watervraag en volume van de buffer (Tabel 3-5). De houdbaarheid van de buffer is uit te drukken in dagen, uitgaande van een stationaire aanvoer en watervraag. Bij droge of zeer droge zomers is de huidige buffer (20 centimeter) bij lage afvoeren slechts voor 1 of enkele maanden houdbaar (Tabel 3-5).

Normaliter wordt bij het spuien rekening gehouden met de vismigratie. Aangezien dit resulteert in extra zoutlast wordt dit in situaties van watertekort verminderd ingezet.

Tabel 3-5 Houdbaarheid van de buffer (20 centimeter [buffer 1] of 40 centimeter [buffer 2]) op basis van de waterbalans IJsselmeer (van Ginkel et al., 2022) en gegeven de aanvoer via het IJsselmeer

Lobith [m ³ /s]	IJsselmeer [m ³ /s]	Buffer nodig	Droge Zomer		Zeer droge zomer	
			Buffer [dagen]	1 Buffer [dagen]	2 Buffer [dagen]	1 Buffer [dagen]
1800	327	Nee	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
1400	257	Nee	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
1020	151	Ja	347.4	694.8	55.2	110.4
850	116	Ja	61.6	123.3	31.8	63.6
700	88	Ja	37.2	74.4	23.7	47.5

II. Vergroten aanvoer van water

Er zijn twee manieren om de aanvoer van water te vergroten. Als eerste kan er meer water gestuurd worden richting de IJssel, al is dat met de bestaande stuurknoppen lastig te realiseren. Wat de ideale afvoerdeling tussen de riviertakken voor de toekomst is en welke maatregelen er noodzakelijk zijn om dit te realiseren wordt in andere programma's zoals IRM en DPZW nader bekeken.

Via het Amsterdam-Rijnkanaal en het Markermeer is er meer water aan te voeren richting het IJsselmeer. De waterkwaliteit van het Markermeer is meestal lager ten opzichte van het IJsselmeer waardoor het doorvoeren van water niet altijd de voorkeur heeft. Tegelijkertijd wordt voor de watervraag op en rond het Markermeer water vanuit het IJsselmeer onttrokken. Dat zorgt ervoor dat het beperken van de watervraag vanuit het IJsselmeer richting het Markermeer kan resulteren in een surplus op het IJsselmeer.

III. Beperken zoutlast schuttingen

Net als bij het spuien wordt normaliter zo visvriendelijk mogelijk geschut. In tijden van watertekort wordt dit verminderd om de toegenomen zoutlast te beperken. Schutbeperkingen op het IJsselmeer richten zich op het beperken van de openingstijden van de deuren en daarna het beperken van het aantal schuttingen al dan niet in combinatie met een bellenscherm. Daarnaast wordt de beroeps- en recreatievaart gesplitst over de verschillende kolken. Tevens wordt gekeken of er beter geschut kan worden met de Stevinsluizen ten opzichte van de Lorentssluisen. Dit heeft te maken met de verschillen in bathymetrie (bodempligging) achter de sluisen.

Het beperken van de openingstijden van de deuren heeft beperkt invloed op de beroepsvaart. De beroepsvaart neemt meestal een gehele kolk in beslag waardoor de openingstijden van de deuren niet veranderen met het optimaliseren van de deur-opentijden. Voor het beperken van het aantal schuttingen wordt met name gekeken naar de recreatievaart en ondervinden deze de langere wachttijden. Ook in dit geval is het effect voor de beroepsvaart beperkt, al zijn er geen harde cijfers om deze ervaring uit de praktijk te ondersteunen.

Als laatste worden er bij de kolken bellenschermen ingezet om de zoutlast op het IJsselmeer te beperken. Dit resulteert in andere stromingen in de kolken wat voor kleinere schepen moeilijkheden kan opleveren. De beroepsvaart vaart meestal met grotere schepen en ondervindt minder hinder van de veranderende stromingspatronen.

IV. Beperken zoutlekkage

Zout lekt op meerdere plekken vanuit de Waddenzee richting het IJsselmeer. Het beperken van de lekkage is mogelijk door slabben aan te brengen bij de spuisluizen. Voor het beperken van de zoutlekkage is na 2018 gebleken dat de staat van het onderhoud cruciaal is.

V. Beperken zoutlast uit de regio

Zodra waterschappen minder zout lozen op het systeem is er minder water nodig om de zoutvracht te spuien. Er zijn afspraken gemaakt door Rijkswaterstaat en de regio om de zoutlast op het IJsselmeer te reguleren. Deze worden na afloop gecontroleerd door een water- en stoffenbalans op te stellen van het systeem.

3.4.3

Toekomstsituatie

Met de renovatie van de Afsluitdijk worden ook de sluizen onder handen genomen om toekomstbestendig te zijn. Dit omvat onder andere het vergroten van de capaciteit van de hevels en kan ook resulteren in een lagere zoutlast als gevolg van lekkage. Daarnaast zijn er plannen om de scheepvaartsluis en vaargeul van Kornwerderzand te vergroten (Bijlsma et al., 2023). Het blijkt dat de zoutlast onacceptabel hoog wordt als gevolg van deze ingreep waardoor het niet zeker is dat deze plannen doorgaan.

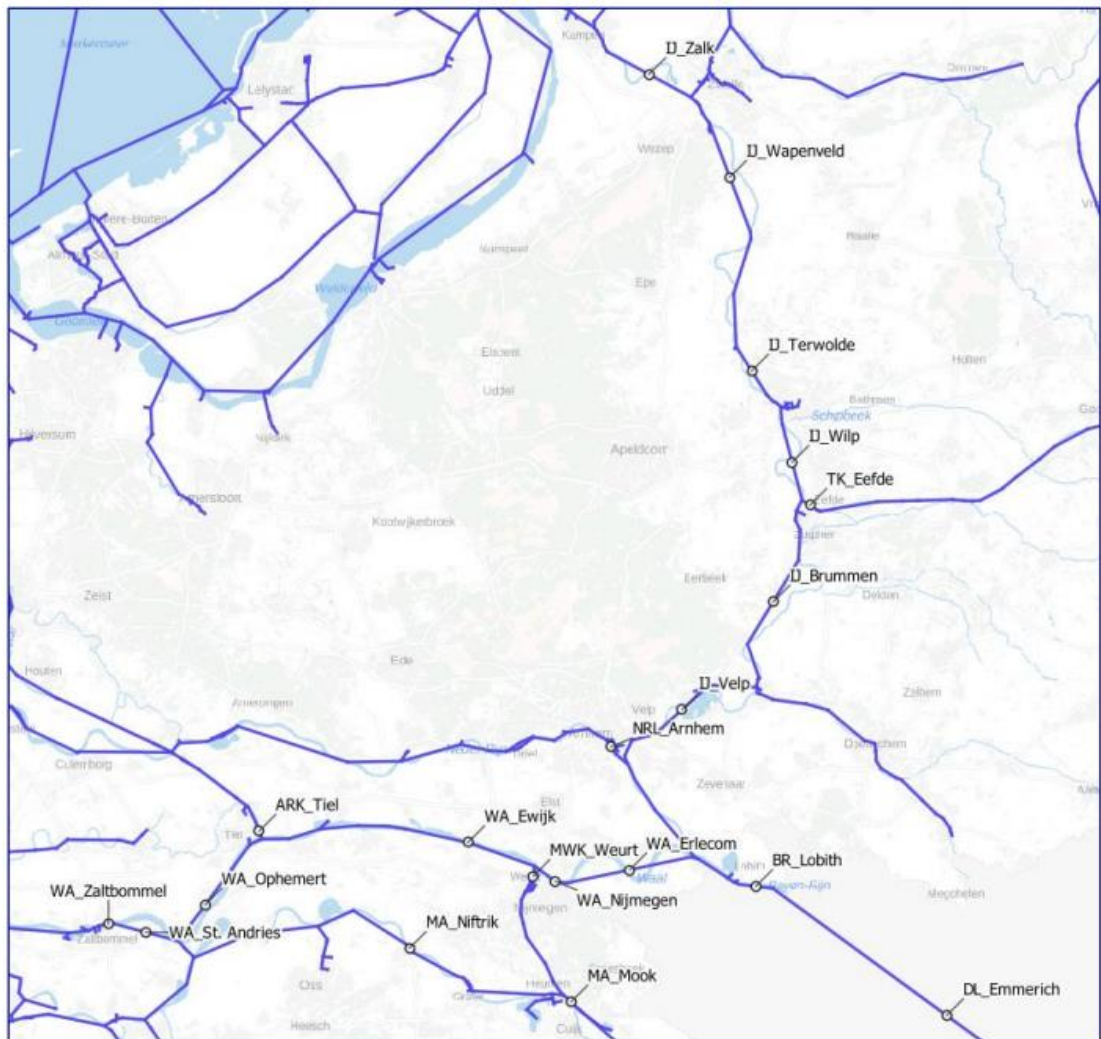
Tevens wordt er een vismigratierivier aangelegd om de ecologische doelen van de Rijksoverheid te halen. In principe neemt de zoutlast niet toe door de aanleg van de vismigratierivier.

Voor het toekomstbestendig maken van het IJsselmeer wordt gekeken welke verdere aanpassingen benodigd zijn. Welke set aan maatregelen genomen gaat worden is niet bekend en het is niet uit te sluiten dat deze maatregelen invloed hebben op de scheepvaart.

4 Effect op scheepvaart

4.1 Landelijke samenhang

Voor het bepalen van het effect van de waterverdeling op de scheepvaart is gebruikt gemaakt van het model QINCoM v0.6.0 (de Jong, 2021). Dit is een Quick Inland Navigation Cost Model bedoeld om verschillende hydrologische scenario's door te rekenen. Deze tool is ontwikkeld binnen KBN. QINCoM maakt gebruik van knelpunten zoals te zien in Figuur 4-1. Elke mogelijke route bestaat uit een set van knelpunten. In dit onderzoek ligt vooral de focus op de knelpunten op de Waal: WA_Erlecom, WA_Nijmegen, WA_Ewijk, WA_Ophemert, WA_St. Andries en WA_Zaltbommel. Bij het onderzoeken van het effect van het verhogen van het debiet over stuw Driel wordt ook gekeken naar drie knelpunten op de IJssel, namelijk IJ_Velp, IJ_Wilp en IJ_Zalk.



Figuur 4-1 Kaart van alle beschouwde knelpunten. De punten DL_Ruhrort en DL_Kaub liggen verder bovenstrooms op de Rijn en vallen buiten de kaart. (de Jong, 2021)

4.1.1 Huidig versus toekomstig

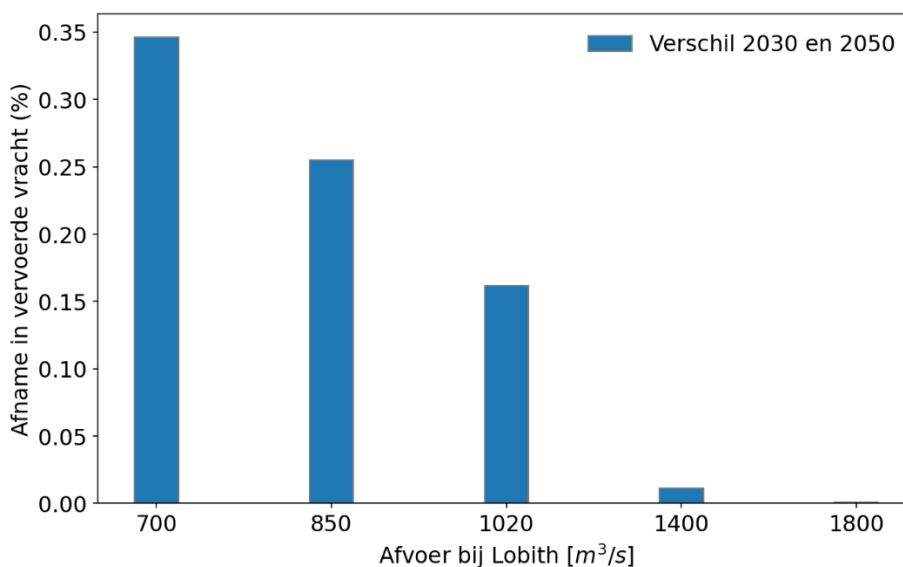
Een toename van de watervraag in de toekomst heeft een lagere afvoer op de Waal, IJssel en Lek als gevolg (Figuur 3-10 en Figuur 3-11).

In Tabel 4-1 is de met QINCoM berekende totaal vervoerde vracht in Nederland (ton/dag) voor 2030 en 2050 Ref te zien en het verschil in totaal vervoerde vracht (ton/dag) tussen beide. Bij een afvoer van 700 m³/s bij Lobith zou in 2050 1730 ton per dag minder vervoerd kunnen worden dan in 2030. Dit komt overeen met een afname van 0,35% (Figuur 4-2). Dit is slechts de afname in vervoerde vracht door een toename in de watervraag van 20% zoals beschreven in paragraaf 3.2.2. Hierbij is de impact van de additionele maatregelen zoals beschreven in paragraaf 3.2.3 dus niet meegenomen.

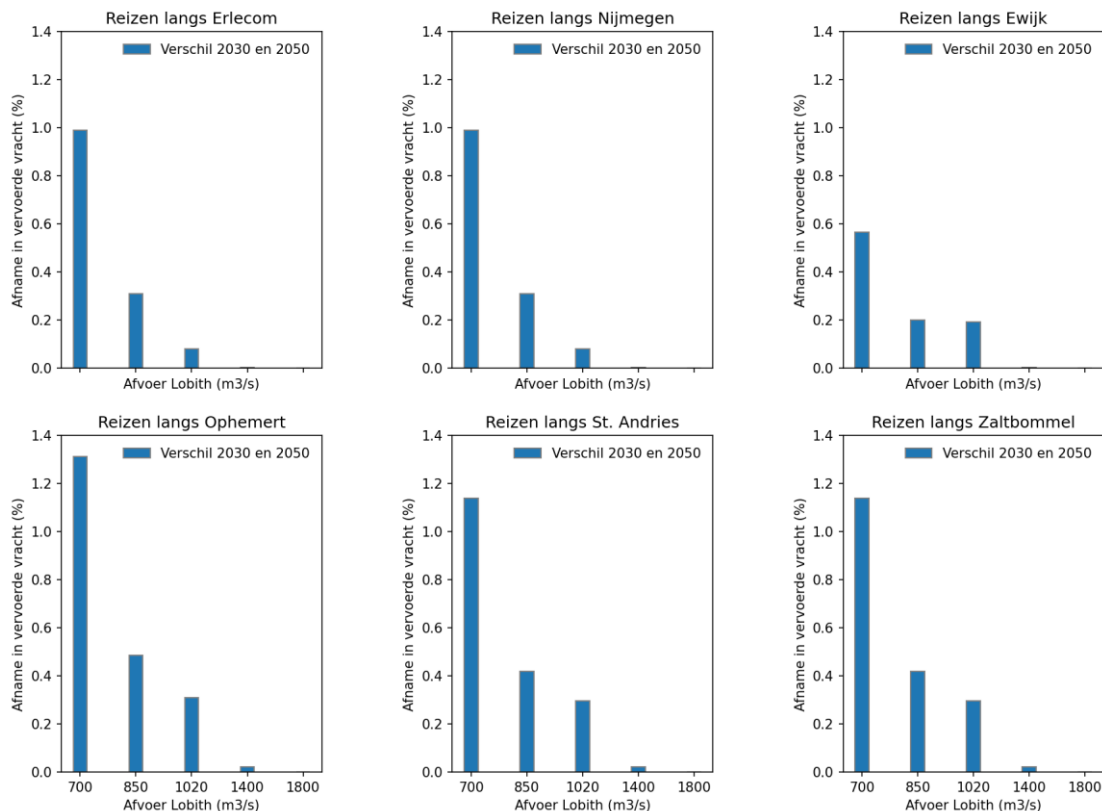
Als wordt ingezoomd op de knelpunten op de Waal, wordt duidelijk dat deze toename in watervraag op lokaal niveau grotere gevolgen kan hebben voor de scheepvaart dan op landelijk niveau (In Figuur 4-3 is de percentuele afname in vervoerde vracht weergegeven voor de verschillende knelpunten op de Waal. Erlecom, Nijmegen en Ewijk liggen meer bovenstrooms en Ophemert, St. Andries en Zaltbommel benedenstrooms. Voor elk knelpunt is bepaald hoeveel vracht er percentueel minder vervoerd kan worden in zichtjaar 2050 ten opzichte van zichtjaar 2030. Zoals te zien in Figuur 4-3 ligt dit percentage voor alle knelpunten bij een afvoer van 700 m³/s hoger dan het landelijk percentage (Figuur 4-2). De impact op scheepvaart op de Waal is dus groter dan de landelijke impact. Op de Waal zelf is de grootste impact benedenstrooms te merken, waarschijnlijk omdat hier de toename in watervraag sterker te voelen is dan bovenstrooms. In appendix B zijn meerdere figuren uit QINCoM gevoegd.

Tabel 4-1 Totaal vervoerde vracht en verschil in totaal vervoerde vracht voor 2030 en 2050 Ref.

Scenario	Totaal vervoerde vracht in het hele rivierensysteem (ton/dag)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
2030	499939	592371	694890	840124	886183
2050 Ref	498209	590859	693765	840030	886178
Vershil 2030 – 2050 Ref	1730	1512	1124	94	5



Figuur 4-2 Percentueel afname in totaal vervoerde vracht tussen 2030 en 2050 Ref.



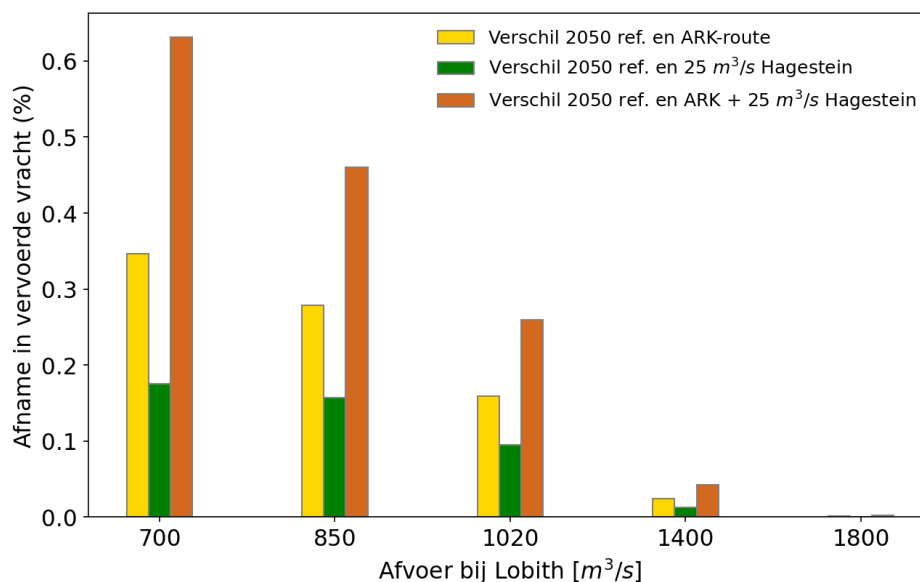
Figuur 4-3 Percentuele afname in vervoerde vracht van 2050 Ref ten opzichte van 2030 per knelpunt op de Waal.

4.1.2 Toekomstscenario's ARK – Hagestein

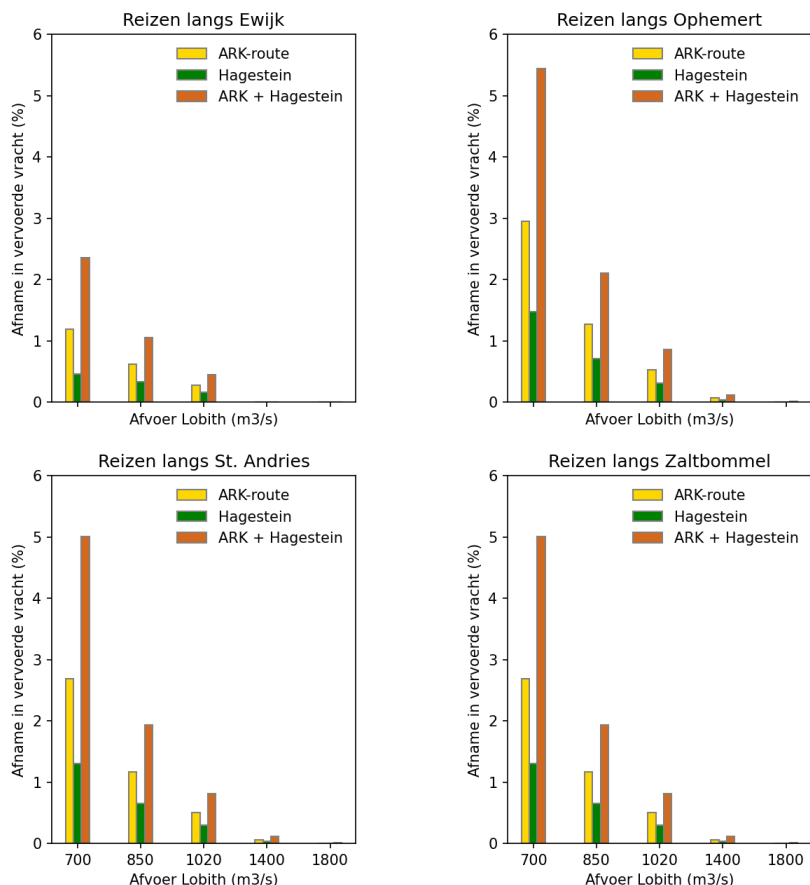
In Tabel 4-2 is de totaal vervoerde vracht en het verschil tussen 2050 Ref en de 2050 scenario's ARK, Hagestein en een combinatie van beide (zoals beschreven in Toekomstscenario's 3.2.3) te zien. In al deze scenario's is de afvoer benedenstrooms op de Waal verlaagd ten opzichte van 2050 Ref. Het meest negatief voor de scheepvaart is uiteraard het scenario waarbij de ARK-route en verhogten debiet stuw Hagestein worden gecombineerd, omdat hierbij het meeste water uit de Waal wordt onttrokken. Dit geeft bij een afvoer van 700 m³/s bij Lobith een afname van 0,63% in vervoerde vracht (Figuur 4-4). Op de Waal is dit effect nog groter en is er bij bijvoorbeeld Ophemert een afname van 5,5% (Figuur 4-5). In appendix B zijn meerdere figuren uit QINCoM gevoegd, zoals bijvoorbeeld de afname in ton/dag voor de knelpunten.

Tabel 4-2 Totaal vervoerde vracht en verschil in totaal vervoerde vracht voor 2050 Ref en scenario's ARK en Hagestein.

Scenario	Totaal vervoerde vracht in het hele rivierensysteem (ton/dag)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
2050 Ref	498209	590859	693765	840030	886178
2050 ARK	496485	589214	692662	839829	886170
2050 Hagestein	497336	589930	693105	839924	886178
2050 ARK + Hagestein	495065	588139	691964	839674	886154
Vershil 2050 Ref - ARK	1724	1645	1103	201	8
Vershil 2050 Ref- Hagestein	873	929	660	106	0
Vershil 2050 Ref - ARK + Hagestein	3143	2720	1802	356	24



Figuur 4-4 Percentuele afname in totaal vervoerde vracht tussen 2050 Ref en scenario's ARK en Hagestein.



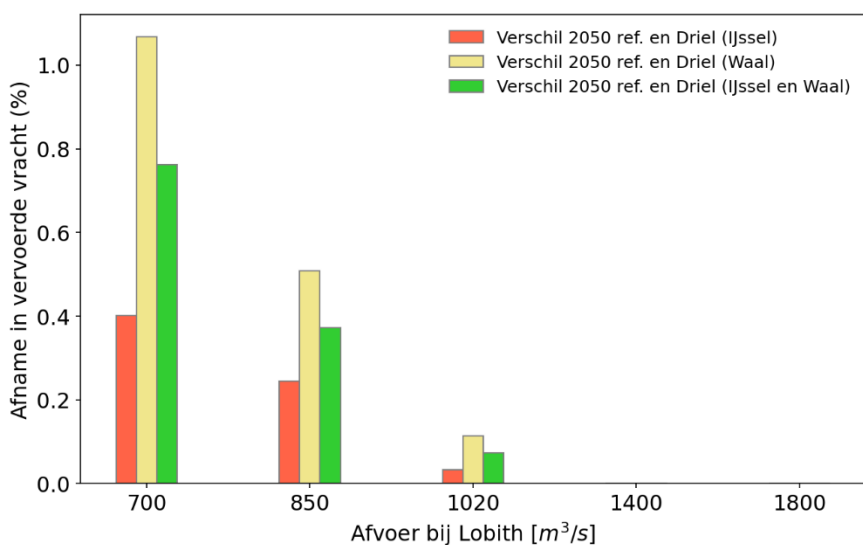
Figuur 4-5 Percentuele afname in vervoerde vracht van scenario's ARK en Hagestein ten opzichte van 2050 Ref per knelpunt op de Waal. Knelpunt WA_Nijmegen en WA_Erlecom zijn niet aan deze figuur toegevoegd omdat daar geen verandering zichtbaar was.

4.1.3 Toekomstscenario's Driel

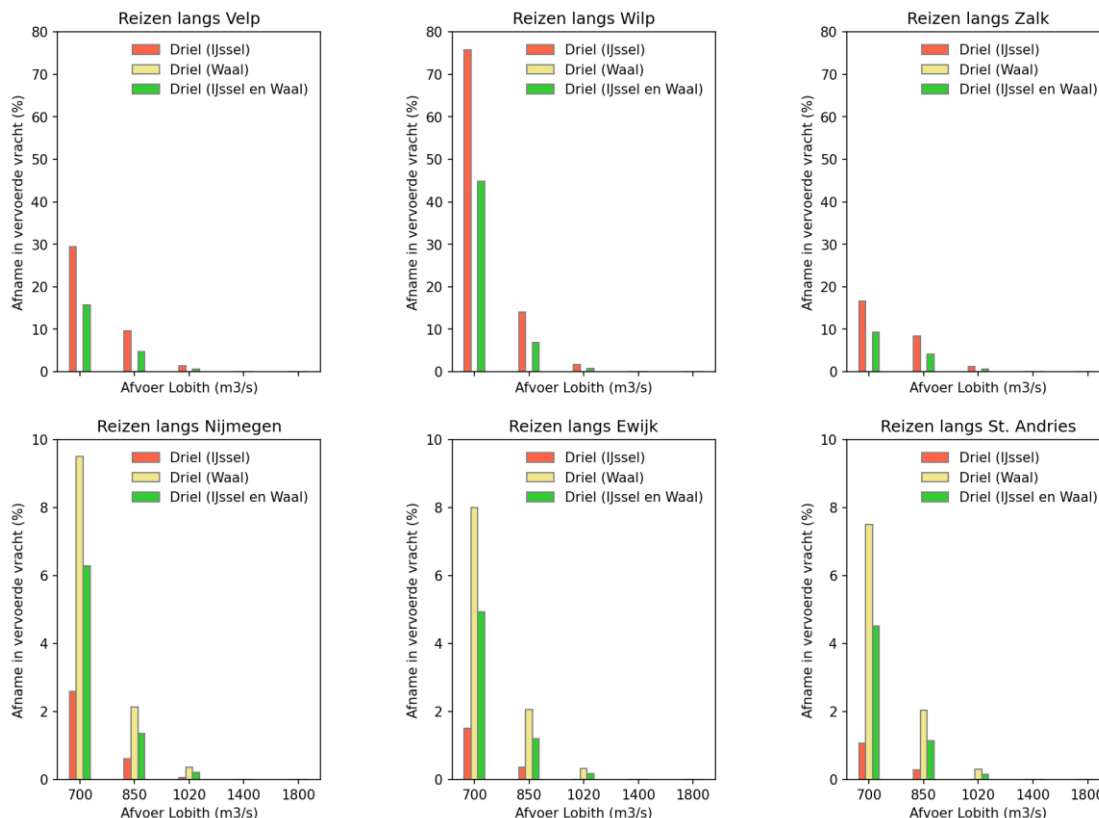
Wanneer naar de drie verschillende scenario's bij Driel wordt gekeken, wordt duidelijk dat voor de totale scheepvaart het scenario waarbij al het water uit de Waal wordt onttrokken het meest nadelig is (Tabel 4-3 en Figuur 4-6). Dit komt omdat de intensiteit van scheepvaart op de Waal hoger ligt dan op de IJssel. Echter zijn lokaal op de transportader IJssel de gevolgen procentueel het grootst wanneer er minder water naar de IJssel gaat (Figuur 4-7). Bij Wilp zou dit een afname in vervoerde vracht van ongeveer 75% betekenen. Dit heeft grote gevolgen voor de havens langs de Twentekanalen. Maar ook voor knelpunten op de Waal vindt er een afname in vracht plaats wanneer de extra aanvoer naar de Nederrijn volledig uit de IJssel afkomstig is, omdat er routes langs zowel de knelpunten op de Waal als op de IJssel lopen. Andersom heeft het onttrekken van extra water uit de Waal geen invloed op de vervoerde vracht over de IJssel, omdat de vaardiepte op de IJssel altijd kleiner is dan op de Waal en dit dus de beperkende factor is.

Tabel 4-3 Totaal vervoerde vracht en verschil in totaal vervoerde vracht voor 2050 Ref en scenario's Driel.

Scenario	Totaal vervoerde vracht in het hele rivierensysteem (ton/dag)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
2050 Ref	498209	590859	693765	840030	886178
2050 Driel, IJ	496211	589408	693532	840030	886178
2050 Driel, WA	492894	587855	692979	840030	886178
2050 Driel, IJ + WA	494410	588663	693262	840030	886178
Vershil 2050 Ref - Driel, IJ	1999	1451	233	0	0
Vershil 2050 Ref-Driel, WA	5316	3004	786	0	0
Vershil 2050 Ref - Driel, IJ + WA	3799	2196	504	0	0



Figuur 4-6 Percentuele afname in totaal vervoerde vracht tussen 2050 Ref en scenario's Driel.



Figuur 4-7 Percentuele afname in vervoerde vracht van scenario's Driel ten opzichte van 2050 Ref voor drie knelpunten op de IJssel (boven) en drie op de Waal (onder).

4.1.4 Conclusies

In de voorgaande paragraaf zijn de gevolgen voor de scheepvaart als gevolg van een afgenomen vaardiepte van een andere waterverdeling en watervraag in het Midden-Rivierengebied geschetst. Hierbij zijn de volgende conclusies te trekken:

- Het effect van de toegenomen regionale watervraag zonder aanvullende maatregelen is relatief beperkt. Door het vergroten van de aanvoer van water richting de Lek en Amsterdam-Rijnkanaal als gevolg van de hogere watervraag is de impact vooral benedenstrooms van Tiel zichtbaar;
- Inzet ARK-route en Hagestein hebben meer impact op de scheepvaart, waarbij de ARK-route resulteert in een hogere onttrekking vanuit de Waal richting het Amsterdam-Rijnkanaal dan scenario Hagestein;
- Het combineren van beide maatregelen leidt tot meer afname in vervoerde vracht. De impact is meer dan alleen de sommatie van beide maatregelen apart.
- Door het debiet over Driel te verhogen gaat er minder afvoer over de Waal en/of IJssel, ook bij de maatgevende knelpunten op deze riviertakken. Hierdoor heeft deze maatregel een grote impact op de vervoerde vracht.

4.2 Schutbeperingen en regionale stremmingen

4.2.1 Schutbeperingen IJsselmeer

In 2018 waren er geen problemen bij de sluisen tussen het Markermeer en IJsselmeer (TwinstraGudde, Hydrologic & Infram, 2020). Met schutbeperingen IJsselmeer wordt dus alleen gekeken naar de beperkingen bij de sluisen tussen het IJsselmeer en de Waddenzee. Deze zijn kwalitatief al behandeld in paragraaf 3.4.

4.2.2 Nautische veiligheid bij Bernhardsluizen

Met het verhogen van de afvoer door het Betuwepand (om water richting de Lek en het Amsterdam-Rijnkanaal te sturen) neemt de stroomsnelheid bij de Bernhardsluizen toe. Bij hogere stroomsnelheden is het op een gegeven moment niet meer mogelijk om veilig één of beide kolken te passeren. De grootste scheepsklassen ondervinden als eerste hinder.

In 2019 en 2022 is er nader gekeken naar de stroomsnelheden door de Bernhardsluizen bij hogere afvoeren door het Betuwepand. Op basis van metingen in 2022 zijn de volgende drempelwaarden bepaald voor de scheepvaart:

- A. Als de afvoer door het Betuwepand (gemiddeld) hoger is dan 85 m³/s is er een stremming voor schepen groter dan CEMT-klasse VIa.
- B. Bij een afvoer groter dan 115 m³/s gemiddeld door het Betuwepand is er een stremming voor schepen groter dan CEMT-klasse Vb.

Bij deze drempelwaarden zijn beide kolken niet bruikbaar voor de respectievelijke scheepsklasse. Bij een lagere afvoer is voor die scheepvaartklasse de westelijke kolk gestremd. Omdat er dan feitelijk nog een alternatief is wordt dit gezien als hinder, en kan de wachttijd toenemen. Het is niet zeker met hoeveel de wachttijd toeneemt bij een gedeeltelijke stremming voor een bepaalde scheepsklasse. Hierdoor is in dit onderzoek hier niet verder naar gekeken. Zodra beide kolken niet beschikbaar zijn is het effect wel gekwantificeerd.

Het verschil tussen het gemeten daggemiddelde debiet en het tijdelijke maximale debiet kan 10 – 50% en in uitzonderlijke gevallen 80% zijn. De hogere maximale debieten kunnen het gevolg zijn van passerende schepen.

Indien er een veiligheidsmarge wordt gehanteerd voor de nautische veiligheid zou de drempelwaarde voor het daggemiddelde debiet een stuk lager kunnen zijn. Dit resulteert in een drempelwaarde van 55 (A) en 75 (B) m³/s als daggemiddeld debiet (Veldman, 2023). Er wordt voor nu van uitgegaan dat er wordt gestuurd op drempelwaarde A en B⁹.

In 2030 worden de drempelwaarden daggemiddeld niet overschreden (§3.1.2.2 en §3.2.1). Bij de afvoeren 850 en 700 m³/s kan kortstondig de drempelwaarde worden overschreden. In de referentiesituatie van 2050 gebeurt dat kortstondig al bij een afvoer van 1020 m³/s (§3.2.2).

Tabel 4-4 Vervoerde tonnage en vaarkosten voor verschillende afvoeren bij Lobith (volledige tabel opgenomen in Appendix D) door het Betuwepand (Bernhardsluizen) op basis van KBN QINCoM sommen voor de twee drempelwaarden

	Qlobith 700		Qlobith 850		Qlobith 1020	
	Tonnage	Vaarkosten [kEur]	Tonnage	Vaarkosten [kEur]	Tonnage	Vaarkosten [kEur]
> Vb / dag	7,735	115	9,060	88	10,966	69
> VIa / dag	4,957	95	5,802	66	7,162	44

In Tabel 3-3 is de vervoerde vracht voor verschillende CEMT-klassen bij de Bernhardsluizen te zien. De onderste twee regels zijn een uitsnede van de potentieel beïnvloede scheepvaart bij hogere debieten door de Bernhardsluizen tijdens droogte (>VIa - 85 m³/s voor de onderste regel, >Vb - 110 m³/s voor de regel daarboven, op basis van Veldman, 2023). Ook al neemt het aandeel grotere schepen af bij lagere afvoeren vervoeren deze schepen nog steeds 5 – 10% van de gehele tonnage bij een afvoer van 1020 m³/s bij Lobith.

⁹ Naar verwachting wordt begin 2024 een operationele debietmeting in het Betuwepand gerealiseerd. Als gevolg hiervan kunnen de hier genoemde drempelwaarden nog aangepast worden aan de praktijkervaring.

Dit aandeel neemt toe naar 12 – 15% als de afvoer zakt naar 700 m³/s bij Lobith. Met andere woorden, ook al neemt het percentage vaarbewegingen van grotere schepen af bij lagere afvoeren, neemt dit deel van de vloot minstens een procentueel even groot deel mee van de totale vracht. Daarnaast maken de vaarkosten van de grootste scheepvaartklassen ongeveer 50 – 65% uit van het totaal.

Bij zowel de maatregel ARK-Route en Hagestein zullen bij een afvoer lager dan 1020 m³/s bij Lobith beperkingen ontstaan in 2050 voor schepen groter dan CEMT-klasse VIa. De impact hiervan is 7.162 – 4.957 ton per dag minder vracht wat overeenkomt met 43,5 – 94,5 kEur per dag afhankelijk van de afvoer bij Lobith (1020 – 700 m³/s, §3.3).

Bij het combineren van de maatregel meer afvoer naar het Amsterdam-Rijnkanaal en meer water naar de Lek ontstaan er nog net (2 m³/s verschil) geen beperkingen voor schepen groter dan CEMT-klasse Vb. Indien er iets meer water richting de Lek of Amsterdam-Rijnkanaal wordt gestuurd en daarmee wel beperkingen zouden ontstaan is de impact (op basis van de blootstelling) 10.966 – 7.735 ton per dag wat overeenkomt met 69,1 – 115,1 kEur per dag.

In theorie zouden kleinere schepen (een deel van) de vracht kunnen vervoeren. In situaties van droogte is er echter over het algemeen een tekort aan dergelijke kleinere schepen waardoor het onzeker is of de vracht overgeheveld kan worden naar andere schepen. De hierboven genoemde getallen zijn daardoor een maximaal mogelijk effect voor de scheepvaart.

4.2.3 Schutbeperkingen Irenesluizen

Voor de Irenesluizen zijn de volgende drempelwaarden te definiëren door het gebruik van de scheepvaartkolken om water aan te voeren:

- < 30 m³/s | geen beperkingen;
- 30 – 60 m³/s | 's nachts stremming oude kolk;
- >60 m³/s | stremming oude kolk 24 uur.

De maatgevende kolk is altijd beschikbaar, maar de wachttijden kunnen toenemen met het stremmen van de oude kolk omdat hiermee water wordt gespuid. Vanuit de ervaring van afgelopen jaren is te stellen dat het stremmen van de oude kolk 's nachts niet resulteert in grote problemen voor de scheepvaart. Ondanks dat er sprake is van een 24 uurseconomie neemt het aantal vaarbewegingen sterk af 's nachts. Er is geen informatie beschikbaar of een stremming van de oude kolk overdag resulteert in problematische wachttijden.

Met de vastgestelde waterbalans voor het hoofdwatersysteem is te concluderen dat in 2030 sprake is van een stremming 's nachts bij alle afvoerniveaus bij Lobith. Ook met het toenemen van de watervraag in 2050 wordt de laatste drempelwaarde nog niet overschreden.

Als er meer water richting het Amsterdam-Rijnkanaal wordt gestuurd (voor het Markermeer / IJsselmeer) moet de oude kolk ook overdag worden gestremd. Los ervan dat het niet bekend is wat het effect is van de schutbeperkingen overdag zullen er twee beperkingen tegelijk samenkomen in dit gebied. Naar alle waarschijnlijkheid valt het overdag stremmen van de oude kolk bij de Irenesluizen namelijk samen met een gedeeltelijke stremming van de Bernhardsluizen. Mogelijk resulteert dit in een toename in scheepvaartbewegingen (meer kleinere schepen en dan hogere wachttijden) of afname in scheepsbewegingen (goederen worden niet vervoerd over het water).

4.2.4 Schutbeperkingen IJmuiden

Het is niet mogelijk gebleken om het effect van de schutbeperkingen bij zeesluis IJmuiden te kwantificeren binnen deze studie, dit gaat veranderen in de toekomst als studies naar de schutbeperkingen van 2022 zijn afgerond.

Dat neemt niet weg dat er op basis van de gegevens van het Havenbedrijf Amsterdam een kwalitatieve impact is te geven van de schutbeperkingen van 2022.

Belangrijk om te melden is dat voor de schutbeperkingen alleen voor de grootste kolken beperkingen worden opgelegd omdat deze verreweg het meeste bijdragen aan de zoutlast. In een normale situatie kunnen door meteorologische omstandigheden vertragingen optreden en wordt uitgegaan van ongeveer 10 schuttingen per dag. De eerste stap in schutbeperkingen is het geclusterd schutten waarbij het aantal schuttingen per dag naar 7 gaat en de deur-opentijden worden beperkt. De volgende stap is ernstige schutbeperkingen met rond de 4 schuttingen per dag en nog kortere deur-opentijden.

Daarnaast is het mogelijk om de beperkingen in scheepslengte die normaal gelden voor de kleinere kolken op te rekken. Hierdoor wordt de zoutlast nog steeds verminderd (kleinere uitwisseling), maar is scheepvaart nog steeds mogelijk.

Omdat alleen de grootste kolken worden beperkt in het aantal schuttingen is het de zeevaart die de hinder ondervindt. De cruisevaart, lijndiensten en het transport van marktvolatiele producten (fossiele brandstoffencluster) ondervindt het meeste last van de schutbeperkingen. Dit is het gevolg van de strakke tijdschema's die samenhangen met deze specifieke scheepvaart. Op lange termijn leiden schutbeperkingen tot een verminderd vestigingsklimaat voor bedrijven rondom de Amsterdamse haven.

Een deel van de scheepvaart die normaal Amsterdam zou aandoen ten tijde van schutbeperkingen wijkt uit naar andere Nederlandse havens. In 2022 verplaatste een deel van de cruisevaart zich naar Rotterdam in plaats van Amsterdam. Dit maakt een kwantificering van het economische effect op nationaal niveau nog wat lastiger.

4.3 Oplossingsrichting binnen de scheepvaartsector

In dit project is eerst gekeken naar de mogelijke bedreigingen vanuit het watersysteem op de scheepvaart zonder dat er mitigerende maatregelen worden getroffen binnen de sector. Deze paragraaf zal niet een volledige analyse omvatten van wat er mogelijk is binnen de scheepvaart- en logistieke sector, maar stipt enkele aandachtspunten aan die de potentiële impact drastisch kunnen verminderen.

In reactie op de verminderde waterdiepte op de Rijn kan worden overwogen om zogenaamde "laagwater schepen" te bouwen. Dit zijn schepen die minder diep steken en dus bij lagere afvoeren relatief meer vracht mee kunnen nemen. Het ontwerpen en bouwen van schepen die minder diep steken gaat vaak ten koste van de efficiëntie van de schepen bij normalere condities. In hoeverre de kosten-baten analyse voor "laagwater schepen" positief uitkomt wordt in verscheidene onderzoeksprogramma's bekeken. Indien de vlootsamenstelling meer gericht is op laagwater kan het effect van verminderde vaardiepte als gevolg van een andere afvoerverdeling kleiner worden.

De stremmingen bij de Bernhardsluizen richten zich op de grootste scheepsklassen, welke ook het meeste hinder ondervinden van de verminderde vaardiepte. Als gevolg van het vaker voorkomen van lage afvoeren neemt de inzetbaarheid van deze scheepsklassen af waardoor het aandeel van de door de stremming potentieel beïnvloedde schepen af kan nemen. Tevens zou het gevolg van het voorkomen van een stremming bij de Bernhardsluizen kunnen zijn dat andere scheepsklassen de vracht overnemen.

QINCoM gaat uit van behoud van dezelfde routes en neemt omvaren niet mee als mogelijke reactie. Over het algemeen is dit een veilige aanname, er is echter één mogelijke omvaarroute die in de praktijk ook wordt toegepast en die het berekende effect kan verminderen. Het gaat hier om de bereikbaarheid van de Beneden-IJssel.

Bij lage afvoeren kiezen schepen ervoor om via het Amsterdam-Rijnkanaal, Markermeer en IJsselmeer de IJssel op te varen in plaats van de IJssel af te varen. Met name het knelpunt Wilp is dan minder relevant, al zijn er nog steeds extra kosten verbonden aan het omvaren.

5 Conclusies, discussie en aanbevelingen

In dit project zijn de indirecte bedreigingen voor de scheepvaart als gevolg van maatregelen voor de zoetwatervoorziening voor het Midden-Rivierengebied, Amsterdam-Rijnkanaal Noordzeekanaal en IJsselmeer uitgewerkt. De keuzes die te maken zijn in het hoofdwatersysteem zijn vertaald naar een impact voor de scheepvaart, gegeven een set aan uitgangspunten. De resultaten uit dit project geven de belangrijkste afwegingen tussen de functies weer, maar vormen geenszins een compleet afwegingskader. De resultaten vormen een overzicht van de belangrijkste knelpunten in het hoofdvaarwegennet als gevolg van een externe bedreiging.

Het gevolg van de gemaakte keuzes voor de scheepvaart is vertaald naar een verlies in vervoerde vracht voor de situatie in 2050. De eerste vergelijking is het gevolg van de toegenomen watervraag in 2050 ten opzichte van 2030 *zonder* aanvullende maatregelen. Vervolgens wordt gekeken naar de individuele maatregelen die genomen kunnen worden. De gevolgen voor scheepvaart zijn te zien in Tabel 5-1, Tabel 5-2 en Tabel 5-3.

Tabel 5-1 Overzicht van de totaal vervoerde vracht in ton per dag per scenario in het gehele rivierensysteem van Nederland voor vijf verschillende afvoeren bij Lobith.

Scenario	Totaal vervoerde vracht in het hele rivierensysteem (ton/dag)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
2030 (ref.)	499.939	592.371	694.890	840.124	886.183
2050	498.209	590.859	693.765	840.030	886.178
2050 ARK	496.485	589.214	692.662	839.829	886.170
2050 Hagestein	497.336	589.930	693.105	839.924	886.178
2050 ARK + Hagestein	495.065	588.139	691.964	839.674	886.154
2050 Driel, IJ	496.211	589.408	693.532	840.030	886.178
2050 Driel, WA	492.894	587.855	692.979	840.030	886.178
2050 Driel, IJ + WA	494.410	588.663	693.262	840.030	886.178

Tabel 5-2 Overzicht van de totaal vervoerde vracht in ton per dag door de Bernhardsluizen voor vijf verschillende afvoeren bij Lobith.

Scheepsklasse	Totaal vervoerde vracht door de Bernhardsluizen (ton/dag)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
Alle	70.113	84.149	106.573	96.057	95.320
> Vb	7.735	9.060	10.966	13.255	14.422
> VIa	4.957 ¹⁰	5.802	7.162	6.427	6.458

¹⁰ Vanaf een afvoer van 1020 m³/s bij Lobith zijn er beperkingen, dan gaat het om een verlies van 7162 ton / dag

Tabel 5-3 Overzicht van de afname in totaal vervoerde vracht in ton per dag tussen scenario's in het gehele rivierensysteem van Nederland voor vijf verschillende afvoeren bij Lobith.

Scenario	Afname in totaal vervoerde vracht in het hele rivierensysteem (ton/dag)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
Vershil 2030 – 2050	1.730	1.512	1.124	94	5
Vershil 2050 –2050 ARK	1.724	1.645	1.103	201	8
Vershil 2050 - 2050 Hagestein	873	929	660	106	0
Vershil 2050 – 2050 ARK & Hagestein	3.143	2.720	1.802	356	24
Vershil 2050 – 2050 Driel, IJ	1.999 ¹¹	1.451	233	0	0
Vershil 2050 – 2050 Driel, WA	5.316	3.004	786	0	0
Vershil 2050 – 2050 Driel, IJ & WA	3.799	2.196	504	0	0

Bij hogere afvoeren bij Lobith neemt de impact van een stremming van de Bernhardsluizen toe. Dit is andersom bij de andere maatregelen die invloed hebben op de vaardiepte. Bij hogere afvoeren wordt er nog meer door het Betuwepand vervoerd waardoor het verlies in vervoerde vracht relatief hoger is. Bij lagere afvoeren is een afname in vaardiepte als gevolg van een andere afvoerverdeling meer impactvol doordat de vervoerde vracht exponentieel afneemt bij lagere afvoeren.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat een combinatie van deze maatregelen niet zonder meer gesommeerd kan worden. Een stremming van het Betuwepand voor schepen in combinatie met het effect op de aflaaddiepte is niet een sommatie van deze getallen omdat het waarschijnlijk is dat de vloot zich zal aanpassen aan de stremming. Dit heeft weer invloed op de reactie op de verminderde vaardiepte. De getallen uit deze opsomming geven wel weer wat de verhouding is tussen de impact op de scheepvaart tussen de scenario's.

Het effect van de mogelijke maatregelen vanuit andere rivierfuncties op scheepvaart bij het IJsselmeer, Irenesluizen en IJmuiden is nog niet te kwantificeren.

- Op basis van de ervaring tot op heden is te concluderen dat de impact van de schutbeperkingen bij de Lorentz- en Stevinsluizen voor de beroepsvaart beperkt is.
- De inzet van de ARK-route kan zorgen voor een toename in wachttijd bij de Irenesluizen in 2050, wat het exacte gevolg is voor de scheepvaart in combinatie met een waarschijnlijke stremming bij de Bernhardsluizen is moeilijk te bepalen.
- De schutbeperkingen bij IJmuiden hebben zonder twijfel een negatief effect op de scheepvaart, met name zeevaart, en de haven van Amsterdam.

Het kwantificeren van het effect van de mogelijke maatregelen op het Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal op de scheepvaart is het grootste vraagteken en kent enkele afwegingen voor de scheepvaart, onafhankelijk van de andere functies.

¹¹ Het resulteert in een reductie van 75% van de vervoerde vracht langs Wilp

Zo is nu niet met zekerheid te zeggen of het aanvoeren van extra water, wat resulteert in beperkingen op de Waal, Betuwepand en Irenesluizen, opweegt tegen het mogelijk niet nemen van maatregelen bij IJmuiden.

In dat kader zou het aanvoeren van extra water voor het IJsselmeer via het Amsterdam-Rijnkanaal mogelijk positief uit kunnen pakken voor de scheepvaartsector als er dan geen maatregelen genomen hoeven te worden bij IJmuiden. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de schutbeperkingen niet alleen worden ingezet voor de zoetwatervoorziening van het Amsterdam-Rijnkanaal, maar ook voor het Noordzeekanaal. Hoeveel water er nodig is om ook het Noordzeekanaal zoet genoeg te houden is niet exact bekend en wordt in lopende onderzoeksprogramma's bekeken.

Het verhogen van het debiet over Driel ten koste van de Waal of IJssel heeft grote impact op de scheepvaart. In praktijk is er geen directe keuze te maken tussen het verhogen van het debiet ten koste van de Waal of IJssel, de beschouwde scenario's dienen daarom als hoekpunten te worden beschouwd om de potentiële impact van de maatregel te bepalen. Het verhogen van het debiet ten koste van de IJssel is procentueel een groot deel van de afvoer en heeft daarmee veel invloed op de beschikbare waterdiepte (en vaarwegbreedte). Verder wordt hiermee de aanvoer naar het IJsselmeer beperkt wat de bufferwerking in dat gebied niet ten goede komt. Met het verhogen van het debiet ten koste van de Waal wordt het maatgevende knelpunt bij Nijmegen direct beïnvloed wat de grootste impact heeft op de vervoerde vracht.

5.1 Discussie

De gepresenteerde resultaten laten het maximale effect zien van de maatregelen alsof er geen andere veranderingen zijn in het systeem. Vooral voor de IJssel en de Bernhardsluizen is een reactie mogelijk vanuit de scheepvaartsector die niet resulteert in een (zo'n groot) verlies in getransporteerde vracht. Voor de IJssel is het mogelijk om via het Amsterdam-Rijnkanaal, Markermeer en IJsselmeer om te varen richting de Beneden-IJssel. Deze omvaarroute wordt in praktijk ook gebruikt om de nauwe en ondiepe stukken van de IJssel te vermijden. Omdat de Bernhardsluizen alleen voor de grootste scheepklassen wordt gestremd hoeft niet alle vracht achter te blijven. Wat de reactie is vanuit de scheepvaartsector is niet met zekerheid te zeggen.

Voor het zichtjaar 2050 is de waterbalans aangepast, maar de blootstelling van de scheepvaartsector gelijk gehouden. Naar alle waarschijnlijkheid is er in 2050 sprake van een andere potentiële impact, al dan niet door veranderende transportstromen. Uitgaande van gelijkmatige economische groei met een vergelijkbare transportbehoefte zullen de gepresenteerde getallen lager zijn dan in praktijk.

Voor de scheepvaartsector is het effect van de maatregelen zoveel mogelijk kwantitatief gemaakt. Dat is te vertalen naar een afweging tussen functies door te kijken naar de kosten en baten. Om dit goed uit te voeren is een effectbepaling voor de andere functies noodzakelijk, waar mogelijk kwantitatief. In het Deltaprogramma Zoetwater worden dit soort afwegingen uitgewerkt waardoor er in dit project hier niet nader op in wordt gegaan.

5.2 Aanbevelingen

Het is niet mogelijk om de invloed van alle mogelijke maatregelen te kwantificeren voor de scheepvaart. Dat maakt een complete afweging tussen de impact van de maatregelen niet mogelijk. Met name de keuzes op het Amsterdam-Rijnkanaal – Noordzeekanaal vragen om een kwantificatie van de schutbeperkingen bij IJmuiden en in mindere mate bij de Irenesluizen op de scheepvaart.

Onafhankelijk van de andere functies is er te balanceren tussen hinder voor de scheepvaart als gevolg van een andere afvoerverdeling en het **niet** hoeven te beperken van de schuttingen bij IJmuiden. Het is raadzaam om, nadat de selectieve onttrekking in gebruik is genomen, nader te kijken naar de kwantitatieve effecten van schutbeperkingen op de scheepvaart **en** zoutindringing. In 2024 is een vervolgonderzoek voor het kwantificeren van de schutbeperkingen van IJmuiden op de scheepvaart gepland.

In dit project is alleen gekeken naar het effect van de maatregelen op de scheepvaart zonder de invloed van klimaatverandering mee te nemen.

Met het vaker voorkomen van lage afvoeren is er sprake van afname in vervoerde vracht. Het effect van de maatregelen hier bovenop kan ervoor zorgen dat de afname in vervoerde vracht anders uitpakt. Het is aan te raden om de combinatie van stress door een veranderend klimaat en maatregelen door te rekenen.

Het afvoerniveau van 700 m³/s bij Lobith is erg laag, maar kan in de toekomst vaak voorkomen en zelfs nog lager worden. Het is aan te bevelen om nog een lager afvoerniveau toe te voegen aan de KBN sommen om het bereik aan condities uit te breiden.

Eerder is al genoemd dat er reacties vanuit de scheepvaart mogelijk zijn op beperkingen in het systeem. Het is aan te raden om de potentiële scenario's in vlootsamenstelling en reactie op beperkingen vanuit de scheepvaart- en logistieke sector op te stellen om de impact van de maatregelen nog verder aan te scherpen. Naar dit onderwerp is al onderzoek uitgevoerd wat gecombineerd kan worden met de resultaten uit dit onderzoek.

In dit project is gekeken naar mogelijke ontwikkelingen en maatregelen in de toekomst. Er lopen op dit moment meerdere programma's en onderzoeken die veel invloed kunnen hebben op het watersysteem en daarmee de resultaten van dit onderzoek kunnen veranderen. Met name de ligging van de rivierbodembodem is sterk bepalend in de locatie van maatgevende knelpunten (en daarmee potentieel effect van maatregelen) en de afvoerverdeling. Zodra er een voorkeursstrategie bekend is is het aan te raden om deze studie te actualiseren.

6 Referenties

- Arcadis (2016). Debiet verzilting ARK. Benodigd debiet om verzilting vanuit het NZK tegen te gaan, een 3D modelstudie. Arcadis rapport 0790806120.2, Gijs van Banning, Jos van der Baan en Nathanaël Geleynse, 6 september 2016
- Arcadis (2017). Verkenning vergrote aanvoer water via Betuwepand onder droge omstandigheden.
- Asselman, N. J. de Jong, M. Mens, M. Maarse, B. Maas, P. de Grave en E. van der Deijl (2022) Effectbepaling Nulalternatief IRM. Deltares rapport 11208036-004-ZWS-0002.
- Bijlsma, A., Chavarrias, V., Genseberger, M. (2023) 3D modelonderzoek verdieping vaargeul naar Kornwerderzand, Deltares rapport 11208075-002-ZWS-0001
- Delsman, J.R., K. Horváth, K., Op den Kelder, T., Van der Deijl, E., De Jong, J., Visser, M., 2020. Een verkenning van de effecten van kansrijke maatregelen op waterverdeling, scheepvaart en landbouw: Deelrapport Deltaprogramma Zoetwater 2019, Deltares rapport 11203734-005, Delft.
- Friocourt, Y. (2021). Nieuwe inzichten naar aanleiding van de verzilting van het IJsselmeer in 2018 en actualisatie van de posten van de water- en zoutbalans van het meer. RWS rapport.
- Van Ginkel, K., Klijn, F., Mens, M., ter Maat, J. (2022) Verkennende systeemanalyse IJsselmeergebied, Deltares rapport 11208074-010-ZWS-0002
- HKV (2015). Benodigde doorvoercapaciteit van de Irenesluizen. Inventarisatie van de kennisleemtes. HKV rapport PR3104.10, augustus 2015.
- HKV, RoyalHaskoningDHV (2023) Verzilting monding Amsterdam-Rijnkanaal fase 2: onderzoek naar maatregelen. HKV rapport: PR4773.10
- Huisman, Y., van der Wijk, R., Chavarrias, V., Wang, Z. (2022) Urgent advies ten aanzien van inzet Hagestein bij extreem lage afvoeren Deltares memo d.d. 31 augustus 2022 - 11208075-000-ZWS-0001
- Hydrologic (2013). Waterverdelings- en verziltingsvraagstukken in het hoofdwatersysteem in West- en Midden-Nederland. Eindrapport Regionale Deelprogramma Zoetwater Midden-West-Nederland van het Deltaprogramma. P475, d.d. maart 2013.
- Hydrologic (2013). Waterverdelings- en verziltingsvraagstukken in het hoofdwatersysteem in West- en Midden-Nederland. Eindrapport. P475, d.d. maart 2013.
- Hydrologic (2019a). Factsheet Beleidstafel Droogte VW02 – versie 4. P1049, d.d. 27 februari 2019.
- Hydrologic (2019b). Verdelingsvarianten Hoofdwatersysteem: Verkennende studie naar een stuurbaar buffernetwerk. P1048, d.d. april 2019.
- Hydrologic (2019c). Nadere verkenning Stuurbaar Buffernetwerk. P1100, d.d. 30 september 2019.
- Hydrologic (2021a). Factsheet verzilting ARK-NZK P1231, d.d. 31 mei 2021.
- Hydrologic (2021b). Factsheet verzilting IJsselmeer P1231, d.d. 31 mei 2021.
- Jong, J.S. de (2019). KBN: Bedreiging klimaatverandering - Beschrijving karakteristieke droge jaren met stationaire afvoerniveaus. Deltares memo 11203738-005-BGS-0002 versie 1.1, d.d. 14 december 2019

- Jong, J.S. de. & R. van der Mark (2020). KBN-HVWN Stresstest droogte Rijntakken: Toestand van het Systeem en Kwetsbaarheid gebruiksfunctie. Deltares rapport 11205274-004-BGS-0022 v1.1, d.d. 7 mei 2021
- Jong, J.S. de (2020). Stresstest Droogte Rijntakken – Impact op de scheepvaart. Deltares rapport v1.1, kenmerk 11205274-004-BGS-0009
- Jong, J.S. de (2021) Quick Inland Navigation Cost Model (QINCoM) voor een snelle berekening van het effect van laagwater en maatregelen op kosten van de binnenvaartsector. Deltares memo 11205272-005-ZWS-0003, d.d. december 2021 v1.0
- Jong, J.S. de (2022). KBN-HVWN: Scheepvaartbeperkingen door watertekorten Deltares rapport 11206832-020-GEO-0002 d.d. 23-03-2022
- Klijn, F., Velzen, E. van, Maat, J. ter, Hunink, J. (2012). Zoetwatervoorziening in Nederland; aangescherpte landelijke knelpuntenanalyse 21^e eeuw. Deltares rapport 11205970-000, d.d. 22 mei 2012.
- Lievens Milieu B.V. (2019). Stuwbeheer Nederrijn – Lek: Optimalisatie vanuit de KRW-functie. WAB005880-R001, d.d. 28 juni 2019
- Mark, R. van der, J. de Jong, O. Weiler, E. Ruijgh (2021). Stresstest “indirecte bedreigingen”. Verkenning externe invloeden op het hoofdvaarwegennet. Deltares rapport 11206832-004-GEO-003, v0.9, d.d. 16 augustus 2021
- Mens, M., R. van der Wijk, N. Kramer, J. Hunink, B., J. de Jong, Becker, P. Gijsbers, C. ten Velden (2018) Hotspotanalyses voor het Deltaprogramma Zoetwater: Inhoudelijke rapportage. Deltares rapport 11202240-004-ZWS. Delft, mei 2018.
- Mens, M., Schasfoort, F., Hunink, J., Pouwels, J., Delsman, J., De Jong, J. (2020a) Hydrologische en economische effecten van twee maatregelpakketten voor Deltaprogramma Zoetwater fase II. Deltares rapport 1205271-005, Deltares, Delft
- Mens, M., Hunink, J.C., Delsman, J.R., Pouwels, J., Schasfoort, F. (2020b). Geactualiseerde knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II, Deltares rapport 112003734-003, Delft.
- Prinsen, G.F. (2021), KPP 2022 – Landelijk SOBEK model LSM3 – update en verificatiesom 2018, Deltares rapport 11206813-016--ZWS-0009_v1.1-def, Delft
- Rijkswaterstaat (2020). Infographics operationeel water management van: ark-nzk, gestuwde Maas en Maas-Waalkanaal, Grevelingenmeer, Haringvliet, Hoofdvaarweg Lemmer-Delfzijl, hoofdwatersysteem, IJsselmeergebied, kanaal Gent-Terneuzen, ml-nbk, Nederrijn Lek, Twentekanal, Veerse meer, Volkerak-zoommeer, zuidelijk deel Maas en Julianakanaal. Te downloaden vanaf <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/water-ruimte/waterkwantiteit/infographics-operationeel-watermanagement-0/>
- Rijkswaterstaat (2021). Infographic Verzilting: Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal. Te downloaden vanaf <https://www.helpdeskwater.nl/@250488/infographics-verzilting-amsterdam-rijnkanaal/>
- Rijkswaterstaat (2023). Lessons learned – Hoogwater 2021, Droogte 2022 – d.d. 6 juni 2023
- TwynstraGudde, Hydrologic & Infram (2020). Joint Fact-finding Studie Robuustheid IJsselmeergebied bij droogte. In opdracht van Bestuurlijk Platform IJsselmeergebied. D.d. 5 maart 2020
- Veldman, J.J. (2023). Memo Metingen PBS-20230127-HV. Rijkswaterstaat-ON memo d.d. 27 januari 2023

A Tabellen waterverdeling

A.1 2030 – referentie

Tabel A-1 Waterverdeling hoofdwatersysteem voor 2030 - referentie.

Bovenrijn (m ³ /s)	Waal (m ³ /s)	Pannerdensch Kanaal (m ³ /s)	Watervraag Pan. Kan. (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
1800	1393	407	-3	85	319
1400	1117	283	-3	29	251
1020	826	194	-4	23	167
850	693	157	-6	19	132
700	575	125	-6	15	104

IJssel (m ³ /s)	Watervraag IJssel (m ³ /s)	Twentekanal (m ³ /s)	IJsselmeer (m ³ /s)
319	1	7	327
251	0	6	257
167	-1	-15	151
132	-1	-15	116
104	-1	-15	88

Waal (m ³ /s)	Watervraag Waal (m ³ /s)	Prins Bernhardsluizen (m ³ /s)	Restant Waal (m ³ /s)
1393	-2	-3	1388
1117	-2	-31	1084
826	-2	-54	770
693	-2	-60	631
575	-2	-61	512

Betuwepand Tiel (m ³ /s)	Watervraag Betuwepand (m ³ /s)	Betuwepand Rijswijk (m ³ /s)
3	-2	1
31	-2	29
54	-5	49
60	-8	52
61	-8	53

Driel (m ³ /s)	Watervraag Driel-Amerongen (m ³ /s)	Amerongen (m ³ /s)	Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Watervraag Amerongen-Hagestein (m ³ /s)	Pr. Bernhardsluizen (m ³ /s)	Hagestein (m ³ /s)
85	-3	82	-39	-7	1	37
29	-3	26	-38	-6	29	11
23	-7	16	-49	-6	49	10
19	-9	10	-49	-3	52	10
15	-9	6	-49	0	53	10

Hagestein (m ³ /s)	Watervraag Lek (m ³ /s)	Pr. Beatrixsluizen (m ³ /s)	Restant Lek (m ³ /s)
37	-6	-3	28
11	-10	-3	-2
10	-14	-3	-7
10	-15	-3	-8
10	-16	-3	-9

Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Pr. Beatrixsluizen (m ³ /s)	Watervraag ARK (m ³ /s)	Restant ARK (m ³ /s)
39	3	-17	25
38	3	-16	25
49	3	-27	25
49	3	-27	25
49	3	-27	25

A.2 2050 – invloed klimaatverandering

Tabel A-2 Waterverdeling hoofdwatersysteem voor 2050 – invloed klimaatverandering.

Bovenrijn (m ³ /s)	Waal (m ³ /s)	Pannerdensch Kanaal (m ³ /s)	Watervraag Pan. Kan. (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
1800	1393	407	-4	85	318
1400	1117	283	-4	29	250
1020	826	194	-5	23	166
850	693	157	-8	19	130
700	575	125	-8	15	102

IJssel (m ³ /s)	Watervraag IJssel (m ³ /s)	Twentekanal (m ³ /s)	IJsselmeer (m ³ /s)
318	0	7	325
250	-1	6	255
166	-2	-18	146
130	-2	-18	110
102	-2	-18	82

Waal (m ³ /s)	Watervraag Waal (m ³ /s)	Prins Bernhardsluizen (m ³ /s)	Restant Waal (m ³ /s)
1393	-3	-4	1386
1117	-3	-40	1074
826	-3	-66	757
693	-3	-73	617
575	-3	-73	499

Betuwepand Tiel (m ³ /s)	Watervraag Betuwepand (m ³ /s)	Betuwepand Rijswijk (m ³ /s)
4	-4	0
40	-4	36
66	-6	60
73	-10	63
73	-10	63

Driel (m ³ /s)	Watervraag Driel-Amerongen (m ³ /s)	Amerongen (m ³ /s)	Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Watervraag Amerongen-Hagestein (m ³ /s)	Pr. Bernhardsluizen (m ³ /s)	Hagestein (m ³ /s)
85	-5	80	-43	-9	0	28
29	-5	24	-42	-8	36	10
23	-9	14	-56	-8	60	10
19	-12	7	-56	-4	63	10
15	-12	3	-56	0	63	10

Hagestein (m ³ /s)	Watervraag Lek (m ³ /s)	Pr. Beatrixluizen (m ³ /s)	Restant Lek (m ³ /s)
28	-9	-4	15
10	-13	-4	-7
10	-17	-4	-11
10	-19	-4	-13
10	-20	-4	-14

Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Pr. Beatrixluizen (m ³ /s)	Watervraag ARK (m ³ /s)	Restant ARK (m ³ /s)
43	4	-22	25
42	4	-21	25
56	4	-35	25
56	4	-35	25
56	4	-35	25

A.3 2050 – ARK-route

Tabel A-3 Waterverdeling hoofdwatersysteem voor 2050 inzet ARK-route.

Bovenrijn (m ³ /s)	Waal (m ³ /s)	Pannerdensch Kanaal (m ³ /s)	Watervraag Pan. Kan. (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
1800	1393	407	-4	85	318
1400	1117	283	-4	29	250
1020	826	194	-5	23	166
850	693	157	-8	19	130
700	575	125	-8	15	102

IJssel (m ³ /s)	Watervraag IJssel (m ³ /s)	Twentekanal (m ³ /s)	IJsselmeer (m ³ /s)
318	0	7	325
250	-1	6	255
166	-2	-18	146
130	-2	-18	110
102	-2	-18	82

Waal (m ³ /s)	Watervraag Waal (m ³ /s)	Prins Bernhardsluizen (m ³ /s)	Restant Waal (m ³ /s)
1393	-3	-11	1379
1117	-3	-65	1049
826	-3	-91	732
693	-3	-98	592
575	-3	-98	474

Betuwepand Tiel (m ³ /s)	Watervraag Betuwepand (m ³ /s)	Betuwepand Rijswijk (m ³ /s)
11	-4	7
65	-4	61
91	-6	85
98	-10	88
98	-10	88

Driel (m ³ /s)	Watervraag Driel-Amerongen (m ³ /s)	Amerongen (m ³ /s)	Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Watervraag Amerongen-Hagestein (m ³ /s)	Pr. Bernhardsluizen (m ³ /s)	Hagestein (m ³ /s)
85	-5	80	-68	-9	7	10
29	-5	24	-67	-8	61	10
23	-9	14	-81	-8	85	10
19	-12	7	-81	-4	88	10
15	-12	3	-81	0	88	10

Hagestein (m ³ /s)	Watervraag Lek (m ³ /s)	Pr. Beatrixsluizen (m ³ /s)	Restant Lek (m ³ /s)
10	-9	-4	-3
10	-13	-4	-7
10	-17	-4	-11
10	-19	-4	-13
10	-20	-4	-14

Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Pr. Beatrixsluizen (m ³ /s)	Watervraag ARK (m ³ /s)	Restant ARK (m ³ /s)
68	4	-62	10
67	4	-61	10
81	4	-75	10
81	4	-75	10
81	4	-75	10

A.4 2050 – Hagestein

Tabel A-4 Waterverdeling hoofdwatersysteem voor 2050 verhogen debiet Hagestein.

Bovenrijn (m ³ /s)	Waal (m ³ /s)	Pannerdensch Kanaal (m ³ /s)	Watervraag Pan. Kan. (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
1800	1393	407	-4	85	318
1400	1117	283	-4	29	250
1020	826	194	-5	23	166
850	693	157	-8	19	130
700	575	125	-8	15	102

IJssel (m ³ /s)	Watervraag IJssel (m ³ /s)	Twentekanal (m ³ /s)	IJsselmeer (m ³ /s)
318	0	7	325
250	-1	6	255
166	-2	-18	146
130	-2	-18	110
102	-2	-18	82

Waal (m ³ /s)	Watervraag Waal (m ³ /s)	Prins Bernhardsluizen (m ³ /s)	Restant Waal (m ³ /s)
1393	-3	-4	1386
1117	-3	-55	1059
826	-3	-81	742
693	-3	-88	602
575	-3	-88	484

Betuwepand Tiel (m ³ /s)	Watervraag Betuwepand (m ³ /s)	Betuwepand Rijswijk (m ³ /s)
4	-4	0
55	-4	51
81	-6	75
88	-10	78
88	-10	78

Driel (m ³ /s)	Watervraag Driel-Amerongen (m ³ /s)	Amerongen (m ³ /s)	Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Watervraag Amerongen-Hagestein (m ³ /s)	Pr. Bernhardsluizen (m ³ /s)	Hagestein (m ³ /s)
85	-5	80	-43	-9	0	28
29	-5	24	-42	-8	51	25
23	-9	14	-56	-8	75	25
19	-12	7	-56	-4	78	25
15	-12	3	-56	0	78	25

Hagestein (m ³ /s)	Watervraag Lek (m ³ /s)	Pr. Beatrixsluizen (m ³ /s)	Restant Lek (m ³ /s)
28	-9	-4	15
25	-13	-4	8
25	-17	-4	4
25	-19	-4	2
25	-20	-4	1

Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Pr. Beatrixsluizen (m ³ /s)	Watervraag ARK (m ³ /s)	Restant ARK (m ³ /s)
43	4	-22	25
42	4	-21	25
56	4	-35	25
56	4	-35	25
56	4	-35	25

A.5 2050 – ARK & Hagestein

Tabel A-5 Waterverdeling hoofdwatersysteem voor 2050 inzet ARK-route en verhogen debiet Hagestein.

Bovenrijn (m ³ /s)	Waal (m ³ /s)	Pannerdensch Kanaal (m ³ /s)	Watervraag Pan. Kan. (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
1800	1393	407	-4	85	318
1400	1117	283	-4	29	250
1020	826	194	-5	23	166
850	693	157	-8	19	130
700	575	125	-8	15	102

IJssel (m ³ /s)	Watervraag IJssel (m ³ /s)	Twentekanalen (m ³ /s)	IJsselmeer (m ³ /s)
318	0	7	325
250	-1	6	255
166	-2	-18	146
130	-2	-18	110
102	-2	-18	82

Waal (m ³ /s)	Watervraag Waal (m ³ /s)	Prins Bernhardsluizen (m ³ /s)	Restant Waal (m ³ /s)
1393	-3	-26	1364
1117	-3	-80	1034
826	-3	-106	717
693	-3	-113	577
575	-3	-113	459

Betuwepand Tiel (m ³ /s)	Watervraag Betuwepand (m ³ /s)	Betuwepand Rijswijk (m ³ /s)
26	-4	22
80	-4	76
106	-6	100
113	-10	103
113	-10	103

Driel (m ³ /s)	Watervraag Driel-Amerongen (m ³ /s)	Amerongen (m ³ /s)	Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Watervraag Amerongen-Hagestein (m ³ /s)	Pr. Bernhardsluizen (m ³ /s)	Hagestein (m ³ /s)
85	-5	80	-68	-9	22	25
29	-5	24	-67	-8	76	25
23	-9	14	-81	-8	100	25
19	-12	7	-81	-4	103	25
15	-12	3	-81	0	103	25

Hagestein (m ³ /s)	Watervraag Lek (m ³ /s)	Pr. Beatrixsluizen (m ³ /s)	Restant Lek (m ³ /s)
25	-9	-4	12
25	-13	-4	8
25	-17	-4	4
25	-19	-4	2
25	-20	-4	1

Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Pr. Beatrixsluizen (m ³ /s)	Watervraag ARK (m ³ /s)	Restant ARK (m ³ /s)
68	4	-62	10
67	4	-61	10
81	4	-75	10
81	4	-75	10
81	4	-75	10

A.6 2050 – Driel (IJssel)

Tabel A-6 Waterverdeling hoofdwatersysteem voor 2050 verhogen debiet Driel uit IJssel.

Bovenrijn (m ³ /s)	Waal (m ³ /s)	Pannerdensch Kanaal (m ³ /s)	Watervraag Pan. Kan. (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
1800	1393	407	-4	85	318
1400	1117	283	-4	29	250
1020	826	194	-5	25	164
850	693	157	-8	25	124
700	575	125	-8	25	92

IJssel (m ³ /s)	Watervraag IJssel (m ³ /s)	Twentekanalen (m ³ /s)	IJsselmeer (m ³ /s)
318	0	7	325
250	-1	6	255
164	-2	-18	144
124	-2	-18	104
92	-2	-18	72

Waal (m ³ /s)	Watervraag Waal (m ³ /s)	Prins Bernhardsluizen (m ³ /s)	Restant Waal (m ³ /s)
1393	-3	-4	1386
1117	-3	-40	1074
826	-3	-64	759
693	-3	-67	623
575	-3	-63	509

Betuwepand Tiel (m ³ /s)	Watervraag Betuwepand (m ³ /s)	Betuwepand Rijswijk (m ³ /s)
4	-4	0
40	-4	36
64	-6	58
67	-10	57
63	-10	53

Driel (m ³ /s)	Watervraag Driel-Amerongen (m ³ /s)	Amerongen (m ³ /s)	Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Watervraag Amerongen-Hagestein (m ³ /s)	Pr. Bernhardsluizen (m ³ /s)	Hagestein (m ³ /s)
85	-5	80	-43	-9	0	28
29	-5	24	-42	-8	36	10
25	-9	16	-56	-8	58	10
25	-12	13	-56	-4	57	10
25	-12	13	-56	0	53	10

Hagestein (m ³ /s)	Watervraag Lek (m ³ /s)	Pr. Beatrixsluizen (m ³ /s)	Restant Lek (m ³ /s)
28	-9	-4	15
10	-13	-4	-7
10	-17	-4	-11
10	-19	-4	-13
10	-20	-4	-14

Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Pr. Beatrixsluizen (m ³ /s)	Watervraag ARK (m ³ /s)	Restant ARK (m ³ /s)
43	4	-22	25
42	4	-21	25
56	4	-35	25
56	4	-35	25
56	4	-35	25

A.7 2050 – Driel (Waal)

Tabel A-7 Waterverdeling hoofdwatersysteem voor 2050 verhogen debiet Driel uit Waal.

Bovenrijn (m ³ /s)	Waal (m ³ /s)	Pannerdensch Kanaal (m ³ /s)	Watervraag Pan. Kan. (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
1800	1393	407	-4	85	318
1400	1117	283	-4	29	250
1020	824	196	-5	25	166
850	687	163	-8	25	130
700	565	135	-8	25	102

IJssel (m ³ /s)	Watervraag IJssel (m ³ /s)	Twentekanal (m ³ /s)	IJsselmeer (m ³ /s)
318	0	7	325
250	-1	6	255
166	-2	-18	146
130	-2	-18	110
102	-2	-18	82

Waal (m ³ /s)	Watervraag Waal (m ³ /s)	Prins Bernhardsluizen (m ³ /s)	Restant Waal (m ³ /s)
1393	-3	-4	1386
1117	-3	-40	1074
824	-3	-64	757
687	-3	-67	617
565	-3	-63	499

Betuwepand Tiel (m ³ /s)	Watervraag Betuwepand (m ³ /s)	Betuwepand Rijswijk (m ³ /s)
4	-4	0
40	-4	36
64	-6	58
67	-10	57
63	-10	53

Driel (m ³ /s)	Watervraag Driel-Amerongen (m ³ /s)	Amerongen (m ³ /s)	Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Watervraag Amerongen-Hagestein (m ³ /s)	Pr. Bernhardsluizen (m ³ /s)	Hagestein (m ³ /s)
85	-5	80	-43	-9	0	28
29	-5	24	-42	-8	36	10
25	-9	16	-56	-8	58	10
25	-12	13	-56	-4	57	10
25	-12	13	-56	0	53	10

Hagestein (m ³ /s)	Watervraag Lek (m ³ /s)	Pr. Beatrixsluizen (m ³ /s)	Restant Lek (m ³ /s)
28	-9	-4	15
10	-13	-4	-7
10	-17	-4	-11
10	-19	-4	-13
10	-20	-4	-14

Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Pr. Beatrixsluizen (m ³ /s)	Watervraag ARK (m ³ /s)	Restant ARK (m ³ /s)
43	4	-22	25
42	4	-21	25
56	4	-35	25
56	4	-35	25
56	4	-35	25

A.8 2050 – Driel (IJssel & Waal)

Tabel A-8 Waterverdeling hoofdwatersysteem voor 2050 verhogen debiet Driel uit IJssel en Waal.

Bovenrijn (m ³ /s)	Waal (m ³ /s)	Pannerdensch Kanaal (m ³ /s)	Watervraag Pan. Kan. (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
1800	1393	407	-4	85	318
1400	1117	283	-4	29	250
1020	825	195	-5	25	165
850	690	160	-8	25	127
700	570	130	-8	25	97

IJssel (m ³ /s)	Watervraag IJssel (m ³ /s)	Twentekanal (m ³ /s)	IJsselmeer (m ³ /s)
318	0	7	325
250	-1	6	255
165	-2	-18	145
127	-2	-18	107
97	-2	-18	77

Waal (m ³ /s)	Watervraag Waal (m ³ /s)	Prins Bernhardsluizen (m ³ /s)	Restant Waal (m ³ /s)
1393	-3	-4	1386
1117	-3	-40	1074
825	-3	-64	758
690	-3	-67	620
570	-3	-63	504

Betuwapand Tiel (m ³ /s)	Watervraag Betuwapand (m ³ /s)	Betuwapand Rijswijk (m ³ /s)
4	-4	0
40	-4	36
64	-6	58
67	-10	57
63	-10	53

Driel (m ³ /s)	Watervraag Driel-Amerongen (m ³ /s)	Amerongen (m ³ /s)	Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Watervraag Amerongen-Hagestein (m ³ /s)	Pr. Bernhardsluizen (m ³ /s)	Hagestein (m ³ /s)
85	-5	80	-43	-9	0	28
29	-5	24	-42	-8	36	10
25	-9	16	-56	-8	58	10
25	-12	13	-56	-4	57	10
25	-12	13	-56	0	53	10

Hagestein (m ³ /s)	Watervraag Lek (m ³ /s)	Pr. Beatrixsluizen (m ³ /s)	Restant Lek (m ³ /s)
28	-9	-4	15
10	-13	-4	-7
10	-17	-4	-11
10	-19	-4	-13
10	-20	-4	-14

Pr. Irenesluizen (m ³ /s)	Pr. Beatrixsluizen (m ³ /s)	Watervraag ARK (m ³ /s)	Restant ARK (m ³ /s)
43	4	-22	25
42	4	-21	25
56	4	-35	25
56	4	-35	25
56	4	-35	25

B Waterdiepte scenario's

B.1 2030 – referentie

Tabel B-1 Waterdieptes per knelpunt voor de situatie van 2030 – referentie.

Knelpunt	Waterdiepte per knelpunt (m)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
BR_Lobith	2,26	2,62	3,02	3,85	4,58
WA_Erlecom	1,88	2,20	2,59	3,40	4,12
WA_Nijmegen	1,51	1,80	2,18	3,01	3,75
WA_Ewijk	1,85	2,21	2,59	3,43	4,18
WA_Ophemert	1,91	2,26	2,58	3,43	4,21
WA_St. Andries	2,32	2,56	2,83	3,51	4,18
WA_Zaltbommel	2,45	2,62	2,84	3,40	3,98
NRL_Arnhem	1,71	1,91	2,15	2,36	2,86
MWK_Weurt	2,21	2,56	2,94	3,76	4,48
ARK_Tiel	3,14	3,48	3,85	4,77	5,55
TK_Eefde	3,23	3,59	4,00	5,04	5,68
MA_Niftrik	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
MA_Mook	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
IJ_Velp	1,45	1,73	2,06	2,90	3,54
IJ_Brummen	1,56	1,80	2,06	2,90	3,57
IJ_Wilp	1,29	1,64	2,01	2,92	3,50
IJ_Terwolde	1,58	1,89	2,25	3,15	3,70
IJ_Wapenveld	2,07	2,22	2,42	3,01	3,41
IJ_Zalk	2,69	2,73	2,80	2,99	3,15
DL_Emmerich	1,75	2,10	2,47	3,20	3,87
DL_Ruhrort	1,76	2,12	2,49	3,24	3,93
DL_Kaub	1,09	1,44	1,77	2,37	2,85

B.2 2050 – invloed klimaatverandering

Tabel B-2 Waterdieptes per knelpunt voor de situatie van 2050 – invloed klimaatverandering.

Knelpunt	Waterdiepte per knelpunt (m)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
BR_Lobith	2,26	2,62	3,02	3,85	4,58
WA_Erlecom	1,88	2,20	2,59	3,40	4,12
WA_Nijmegen	1,51	1,80	2,18	3,01	3,75
WA_Ewijk	1,85	2,21	2,59	3,43	4,18
WA_Ophemert	1,88	2,22	2,55	3,40	4,20
WA_St. Andries	2,30	2,53	2,81	3,49	4,17
WA_Zaltbommel	2,43	2,60	2,82	3,38	3,97
NRL_Arnhem	1,71	1,91	2,15	2,36	2,86
MWK_Weurt	2,21	2,56	2,94	3,76	4,48
ARK_Tiel	3,14	3,48	3,85	4,77	5,55
TK_Eefde	3,23	3,59	4,00	5,04	5,68
MA_Niftrik	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
MA_Mook	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
IJ_Velp	1,43	1,71	2,05	2,89	3,53
IJ_Brummen	1,54	1,78	2,05	2,89	3,56
IJ_Wilp	1,22	1,57	1,97	2,91	3,48
IJ_Terwolde	1,52	1,82	2,20	3,13	3,68
IJ_Wapenveld	2,04	2,19	2,39	3,00	3,40
IJ_Zalk	2,68	2,73	2,79	2,99	3,14
DL_Emmerich	1,75	2,10	2,47	3,20	3,87
DL_Ruhrort	1,76	2,12	2,49	3,24	3,93
DL_Kaub	1,09	1,44	1,77	2,37	2,85

B.3 2050 – ARK route

Tabel B-3 Waterdieptes per knelpunt voor de situatie van 2050 – ARK-route.

Knelpunt	Waterdiepte per knelpunt (m)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
BR_Lobith	2,26	2,62	3,02	3,85	4,58
WA_Erlecom	1,88	2,20	2,59	3,40	4,12
WA_Nijmegen	1,51	1,80	2,18	3,01	3,75
WA_Ewijk	1,85	2,21	2,59	3,43	4,18
WA_Ophemert	1,80	2,15	2,50	3,33	4,18
WA_St. Andries	2,25	2,48	2,76	3,44	4,16
WA_Zaltbommel	2,39	2,56	2,78	3,34	3,96
NRL_Arnhem	1,71	1,91	2,15	2,36	2,86
MWK_Weurt	2,21	2,56	2,94	3,76	4,48
ARK_Tiel	3,14	3,48	3,85	4,77	5,55
TK_Eefde	3,23	3,59	4,00	5,04	5,68
MA_Niftrik	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
MA_Mook	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
IJ_Velp	1,43	1,71	2,05	2,89	3,53
IJ_Brummen	1,54	1,78	2,05	2,89	3,56
IJ_Wilp	1,22	1,57	1,97	2,91	3,48
IJ_Terwolde	1,52	1,82	2,20	3,13	3,68
IJ_Wapenveld	2,04	2,19	2,39	3,00	3,40
IJ_Zalk	2,68	2,73	2,79	2,99	3,14
DL_Emmerich	1,75	2,10	2,47	3,20	3,87
DL_Ruhrort	1,76	2,12	2,49	3,24	3,93
DL_Kaub	1,09	1,44	1,77	2,37	2,85

B.4 2050 – Hagestein

Tabel B-4 Waterdieptes per knelpunt voor de situatie van 2050 – Hagestein.

Knelpunt	Waterdiepte per knelpunt (m)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
BR_Lobith	2,26	2,62	3,02	3,85	4,58
WA_Erlecom	1,88	2,20	2,59	3,40	4,12
WA_Nijmegen	1,51	1,80	2,18	3,01	3,75
WA_Ewijk	1,85	2,21	2,59	3,43	4,18
WA_Ophemert	1,83	2,18	2,52	3,36	4,20
WA_St. Andries	2,27	2,50	2,78	3,46	4,17
WA_Zaltbommel	2,41	2,58	2,79	3,36	3,97
NRL_Arnhem	1,71	1,91	2,15	2,36	2,86
MWK_Weurt	2,21	2,56	2,94	3,76	4,48
ARK_Tiel	3,14	3,48	3,85	4,77	5,55
TK_Eefde	3,23	3,59	4,00	5,04	5,68
MA_Niftrik	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
MA_Mook	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
IJ_Velp	1,43	1,71	2,05	2,89	3,53
IJ_Brummen	1,54	1,78	2,05	2,89	3,56
IJ_Wilp	1,22	1,57	1,97	2,91	3,48
IJ_Terwolde	1,52	1,82	2,20	3,13	3,68
IJ_Wapenveld	2,04	2,19	2,39	3,00	3,40
IJ_Zalk	2,68	2,73	2,79	2,99	3,14
DL_Emmerich	1,75	2,10	2,47	3,20	3,87
DL_Ruhrort	1,76	2,12	2,49	3,24	3,93
DL_Kaub	1,09	1,44	1,77	2,37	2,85

B.5 2050 – ARK & Hagestein

Tabel B-5 Waterdieptes per knelpunt voor de situatie van 2050 – ARK & Hagestein.

Knelpunt	Waterdiepte per knelpunt (m)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
BR_Lobith	2,26	2,62	3,02	3,85	4,58
WA_Erlecom	1,88	2,20	2,59	3,40	4,12
WA_Nijmegen	1,51	1,80	2,18	3,01	3,75
WA_Ewijk	1,85	2,21	2,59	3,43	4,18
WA_Ophemert	1,76	2,10	2,47	3,29	4,15
WA_St. Andries	2,22	2,45	2,73	3,40	4,12
WA_Zaltbommel	2,37	2,54	2,75	3,31	3,93
NRL_Arnhem	1,71	1,91	2,15	2,36	2,86
MWK_Weurt	2,21	2,56	2,94	3,76	4,48
ARK_Tiel	3,14	3,48	3,85	4,77	5,55
TK_Eefde	3,23	3,59	4,00	5,04	5,68
MA_Niftrik	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
MA_Mook	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
IJ_Velp	1,43	1,71	2,05	2,89	3,53
IJ_Brummen	1,54	1,78	2,05	2,89	3,56
IJ_Wilp	1,22	1,57	1,97	2,91	3,48
IJ_Terwolde	1,52	1,82	2,20	3,13	3,68
IJ_Wapenveld	2,04	2,19	2,39	3,00	3,40
IJ_Zalk	2,68	2,73	2,79	2,99	3,14
DL_Emmerich	1,75	2,10	2,47	3,20	3,87
DL_Ruhrort	1,76	2,12	2,49	3,24	3,93
DL_Kaub	1,09	1,44	1,77	2,37	2,85

B.6 2050 – Driel (IJssel)

Tabel B-6 Waterdieptes per knelpunt voor de situatie van 2050 – Driel (IJssel)

Knelpunt	Waterdiepte per knelpunt (m)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
BR_Lobith	2,26	2,62	3,02	3,85	4,58
WA_Erlecom	1,88	2,20	2,59	3,40	4,12
WA_Nijmegen	1,51	1,80	2,18	3,01	3,75
WA_Ewijk	1,85	2,21	2,59	3,43	4,18
WA_Ophemert	1,91	2,24	2,56	3,40	4,20
WA_St. Andries	2,32	2,54	2,81	3,49	4,17
WA_Zaltbommel	2,44	2,61	2,82	3,38	3,97
NRL_Arnhem	2,27	2,27	2,27	2,36	2,86
MWK_Weurt	2,21	2,56	2,94	3,76	4,48
ARK_Tiel	3,14	3,48	3,85	4,77	5,55
TK_Eefde	3,23	3,59	4,00	5,04	5,68
MA_Niftrik	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
MA_Mook	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
IJ_Velp	1,34	1,65	2,03	2,89	3,53
IJ_Brummen	1,46	1,73	2,04	2,89	3,56
IJ_Wilp	1,09	1,49	1,95	2,91	3,48
IJ_Terwolde	1,41	1,76	2,18	3,13	3,68
IJ_Wapenveld	1,99	2,16	2,38	3,00	3,40
IJ_Zalk	2,66	2,72	2,78	2,99	3,14
DL_Emmerich	1,75	2,10	2,47	3,20	3,87
DL_Ruhrort	1,76	2,12	2,49	3,24	3,93
DL_Kaub	1,09	1,44	1,77	2,37	2,85

B.7 2050 – Driel (Waal)

Tabel B-7 Waterdieptes per knelpunt voor de situatie van 2050 – Driel (Waal).

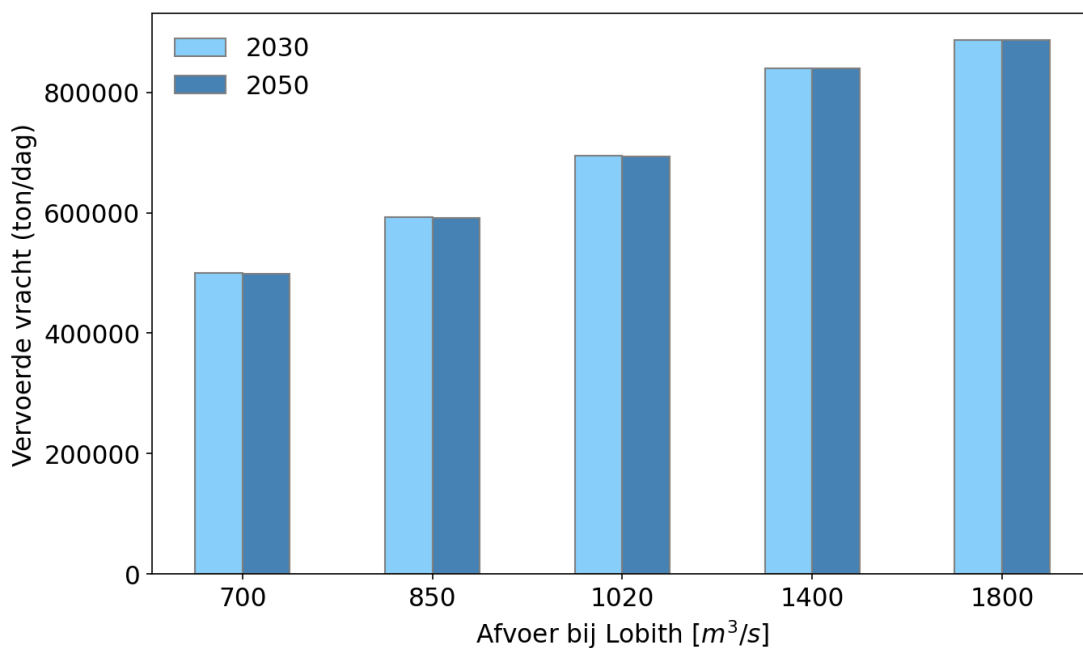
Knelpunt	Waterdiepte per knelpunt (m)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
BR_Lobith	2,26	2,62	3,02	3,85	4,58
WA_Erlecom	1,85	2,19	2,58	3,40	4,12
WA_Nijmegen	1,49	1,79	2,18	3,01	3,75
WA_Ewijk	1,82	2,19	2,58	3,43	4,18
WA_Ophemert	1,88	2,22	2,55	3,40	4,20
WA_St. Andries	2,30	2,53	2,81	3,49	4,17
WA_Zaltbommel	2,43	2,60	2,82	3,38	3,97
NRL_Arnhem	2,27	2,27	2,27	2,36	2,86
MWK_Weurt	2,21	2,56	2,94	3,76	4,48
ARK_Tiel	3,14	3,48	3,85	4,77	5,55
TK_Eefde	3,23	3,59	4,00	5,04	5,68
MA_Niftrik	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
MA_Mook	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
IJ_Velp	1,43	1,71	2,05	2,89	3,53
IJ_Brummen	1,54	1,78	2,05	2,89	3,56
IJ_Wilp	1,22	1,57	1,97	2,91	3,48
IJ_Terwolde	1,52	1,82	2,20	3,13	3,68
IJ_Wapenveld	2,04	2,19	2,39	3,00	3,40
IJ_Zalk	2,68	2,73	2,79	2,99	3,14
DL_Emmerich	1,75	2,10	2,47	3,20	3,87
DL_Ruhrort	1,76	2,12	2,49	3,24	3,93
DL_Kaub	1,09	1,44	1,77	2,37	2,85

B.8 2050 – Driel (IJssel en Waal)

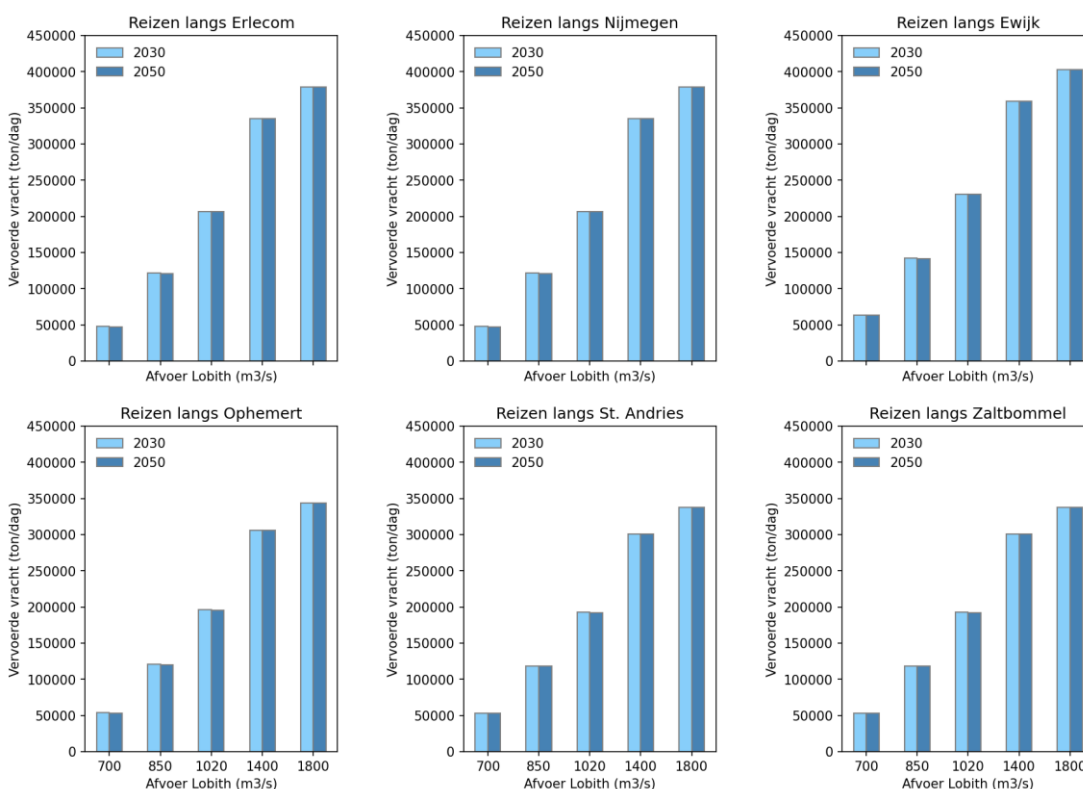
Tabel B-8 Waterdieptes per knelpunt voor de situatie van 2050 – Driel (IJssel en Waal).

Knelpunt	Waterdiepte per knelpunt (m)				
	Afvoer bij Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
BR_Lobith	2,26	2,62	3,02	3,85	4,58
WA_Erlecom	1,86	2,19	2,59	3,40	4,12
WA_Nijmegen	1,50	1,79	2,18	3,01	3,75
WA_Ewijk	1,84	2,20	2,59	3,43	4,18
WA_Ophemert	1,89	2,23	2,56	3,40	4,20
WA_St. Andries	2,31	2,54	2,81	3,49	4,17
WA_Zaltbommel	2,43	2,61	2,82	3,38	3,97
NRL_Arnhem	2,27	2,27	2,27	2,36	2,86
MWK_Weurt	2,21	2,56	2,94	3,76	4,48
ARK_Tiel	3,14	3,48	3,85	4,77	5,55
TK_Eefde	3,23	3,59	4,00	5,04	5,68
MA_Niftrik	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
MA_Mook	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
IJ_Velp	1,39	1,68	2,04	2,89	3,53
IJ_Brummen	1,50	1,75	2,04	2,89	3,56
IJ_Wilp	1,15	1,53	1,96	2,91	3,48
IJ_Terwolde	1,46	1,79	2,19	3,13	3,68
IJ_Wapenveld	2,02	2,17	2,39	3,00	3,40
IJ_Zalk	2,67	2,72	2,79	2,99	3,14
DL_Emmerich	1,75	2,10	2,47	3,20	3,87
DL_Ruhrort	1,76	2,12	2,49	3,24	3,93
DL_Kaub	1,09	1,44	1,77	2,37	2,85

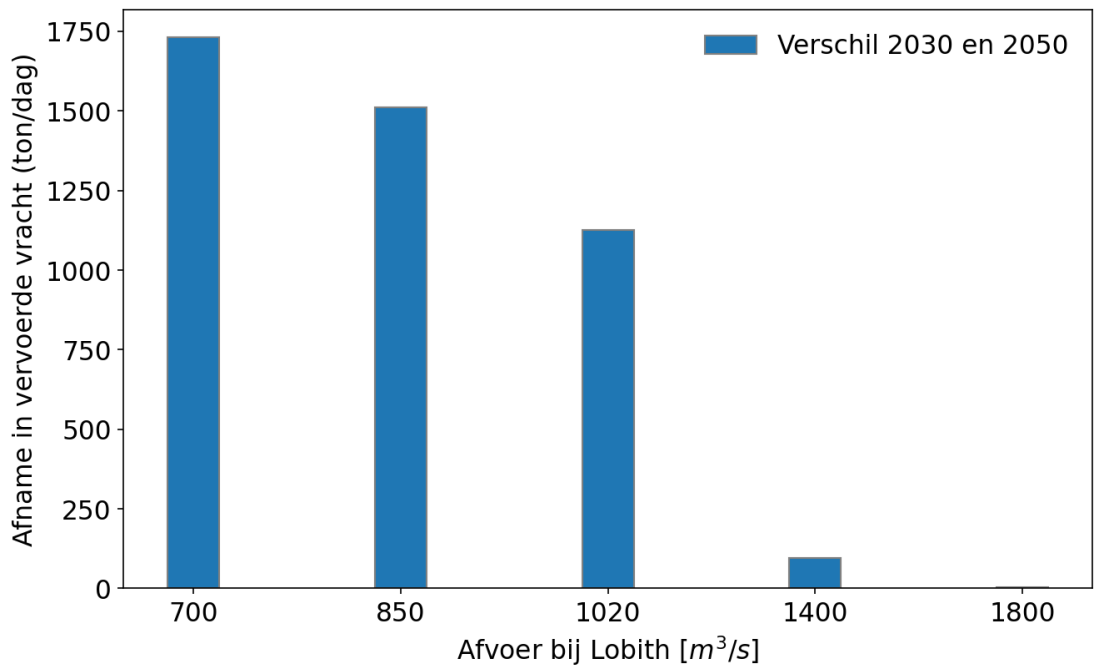
C Figuren QINCoM



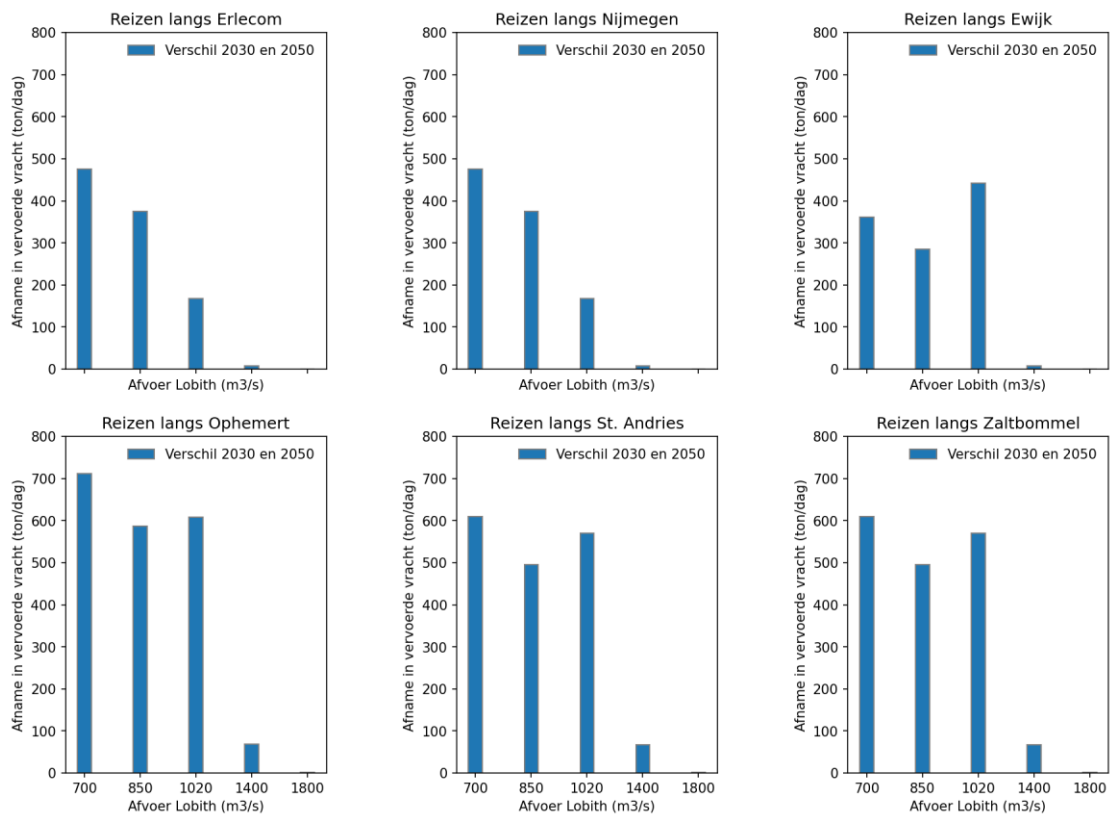
Figuur C-1 Totaal vervoerde vracht voor 2030 en 2050 Ref.



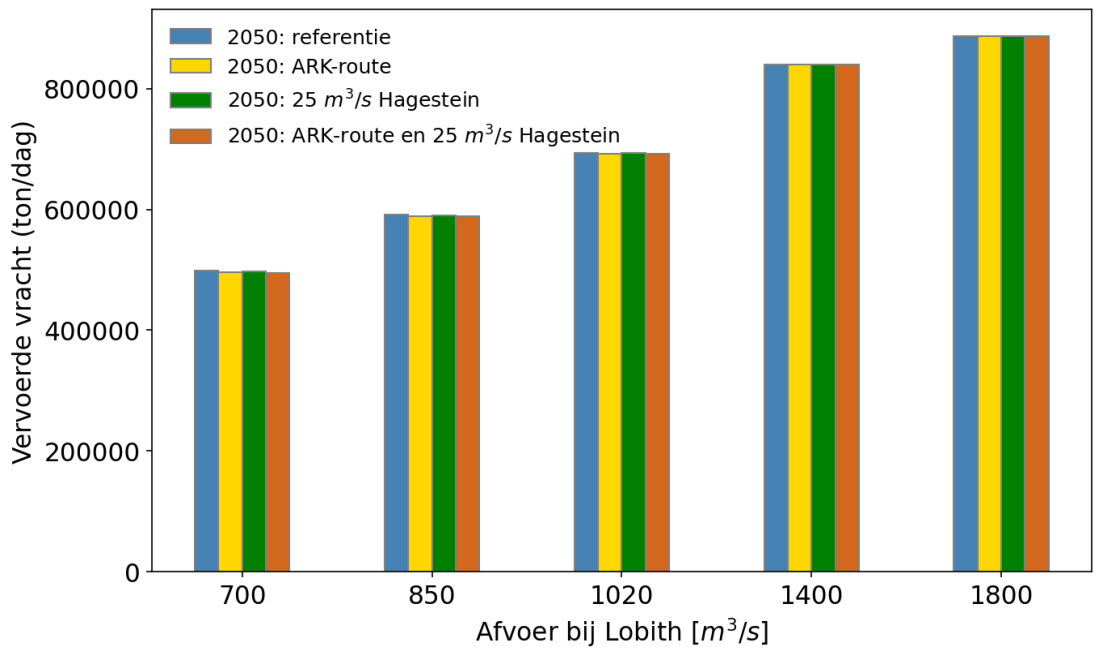
Figuur C-2 Totaal vervoerde vracht per knelpunt op de Waal voor 2030 en 2050 Ref.



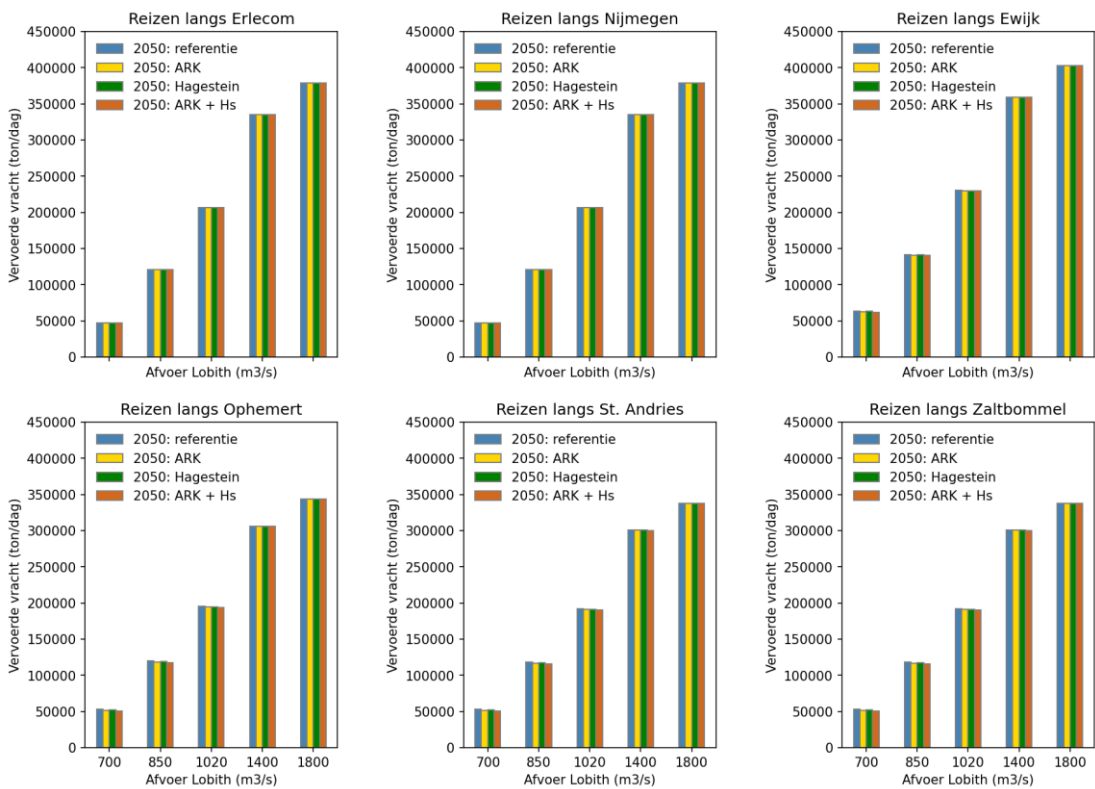
Figuur C-3 Verschil in totaal vervoerde vracht tussen 2030 en 2050 Ref.



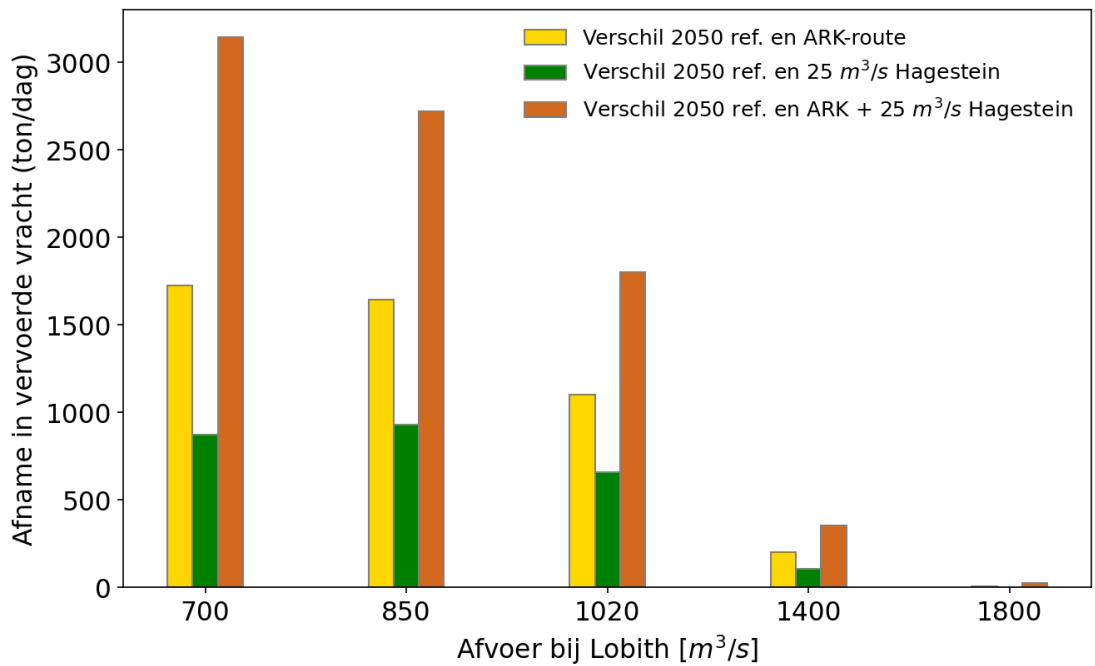
Figuur C-4 Verschil in totaal vervoerde vracht per knelpunt op de Waal tussen 2030 en 2050 Ref.



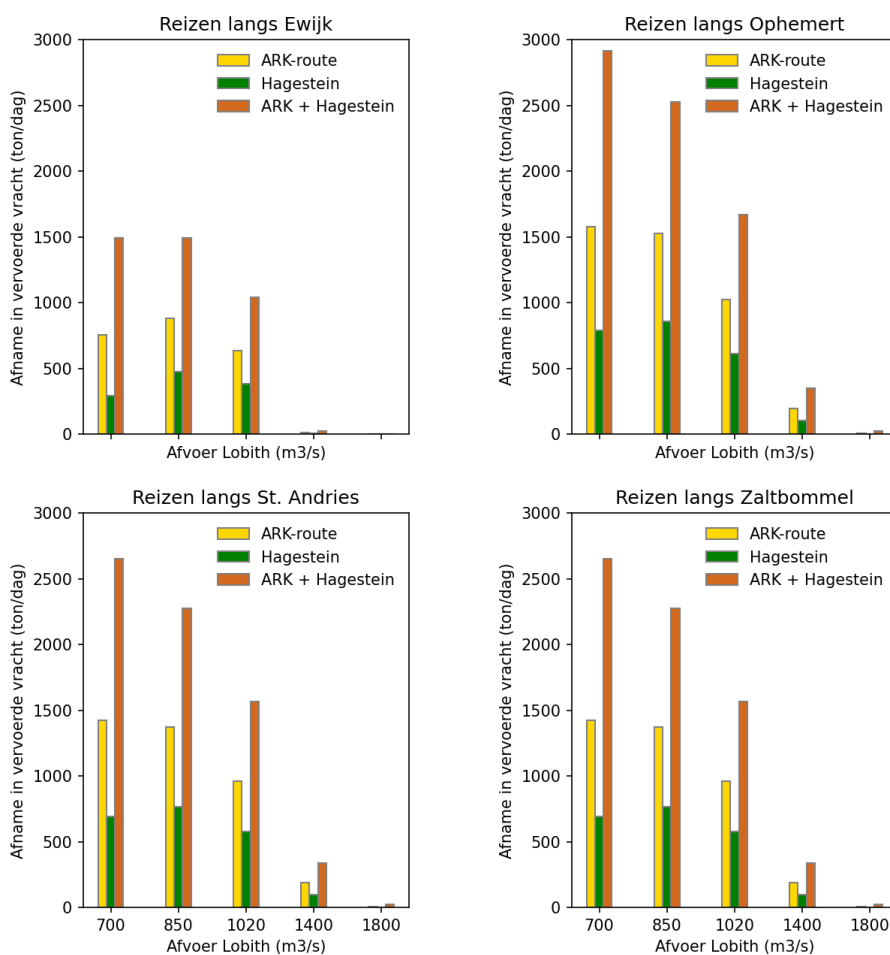
Figuur C-5 Totaal vervoerde vracht voor 2050 Ref en scenario's ARK, Hagestein en beide gecombineerd.



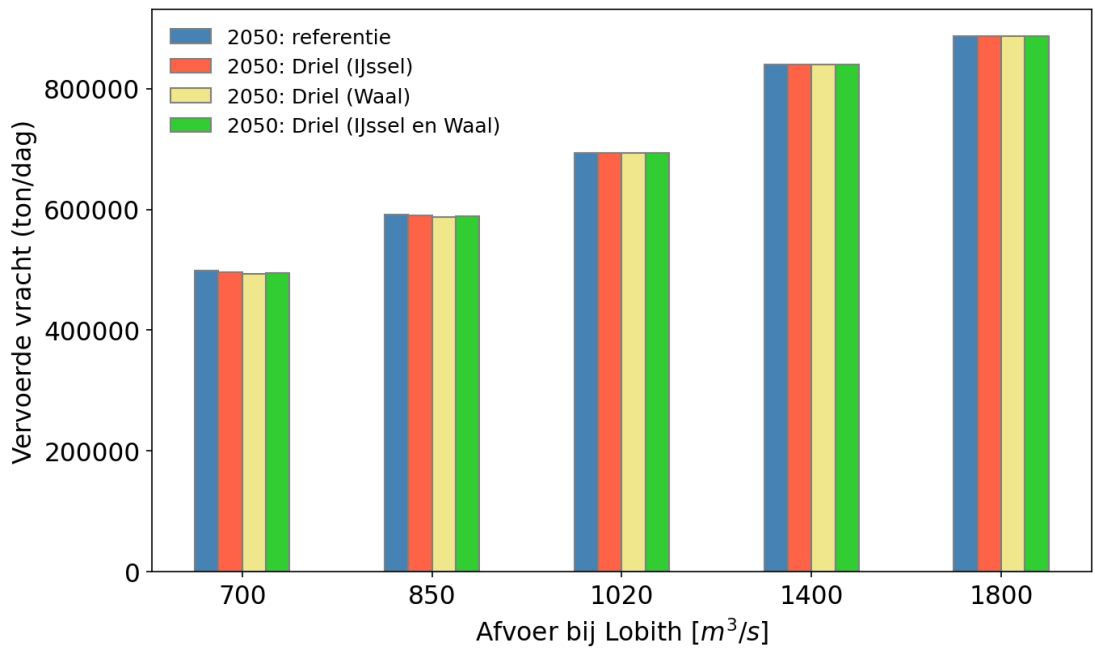
Figuur C-6 Totaal vervoerde vracht per knelpunt op de Waal voor 2050 Ref en scenario's ARK, Hagestein en beide gecombineerd.



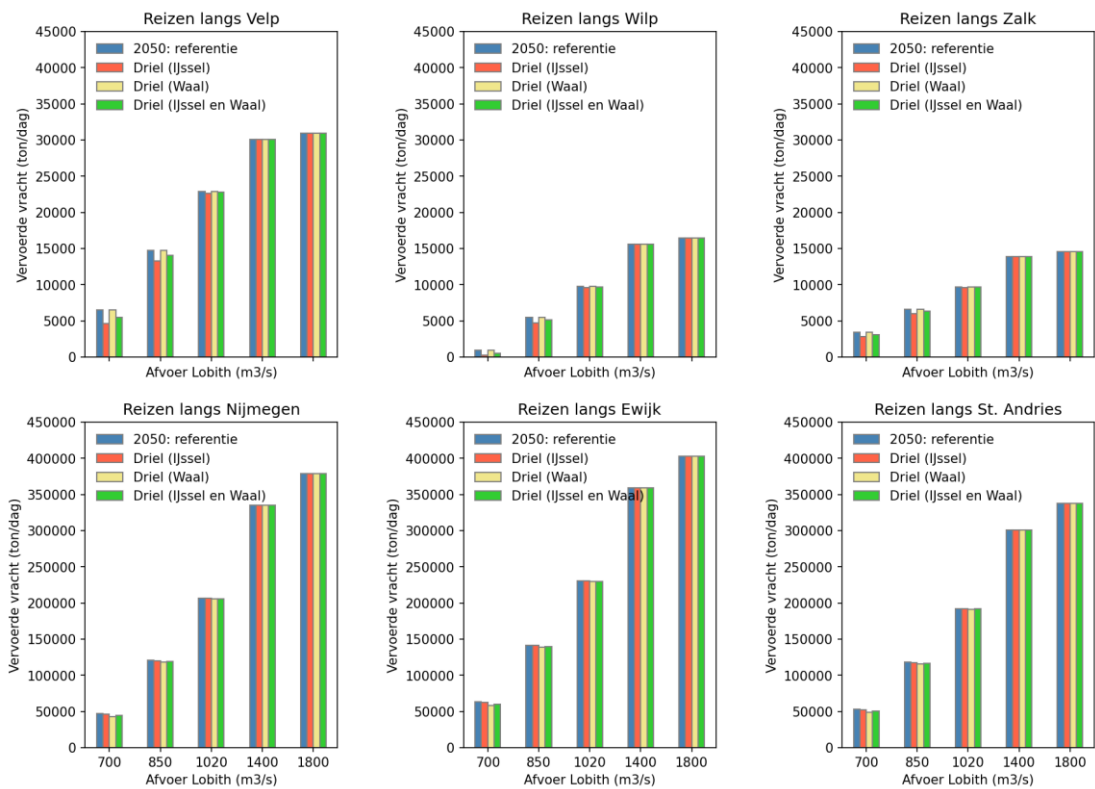
Figuur C-7 Verschil in totaal vervoerde vracht tussen 2050 Ref en scenario's ARK, Hagestein en beide gecombineerd.



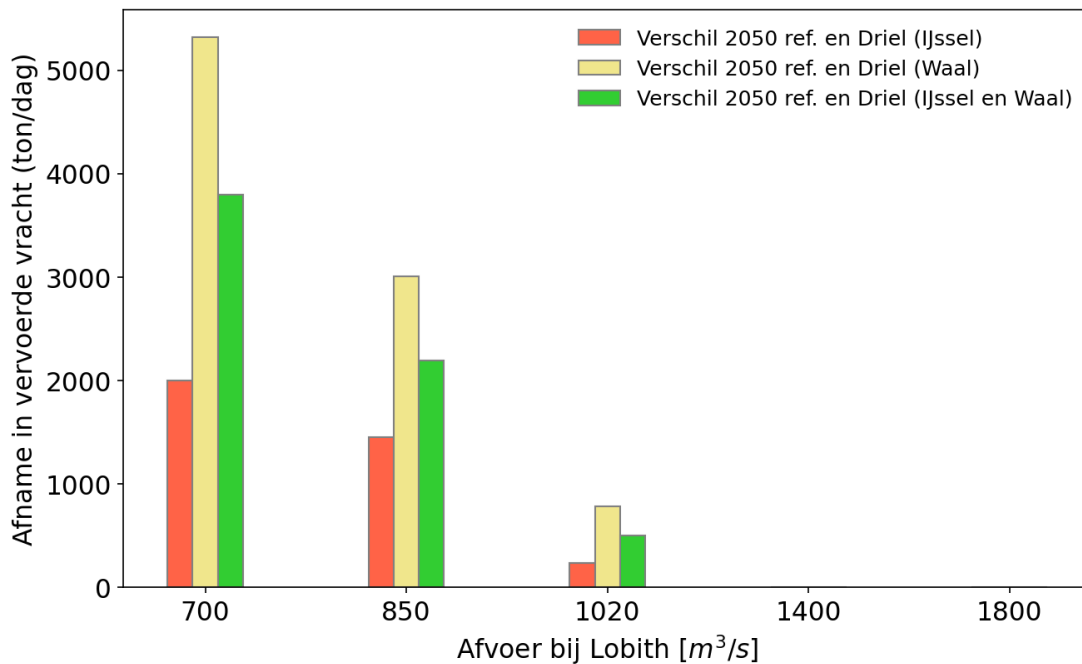
Figuur C-8 Verschil in totaal vervoerde vracht per knelpunt op de Waal voor 2050 Ref en scenario's ARK, Hagestein en beide gecombineerd.



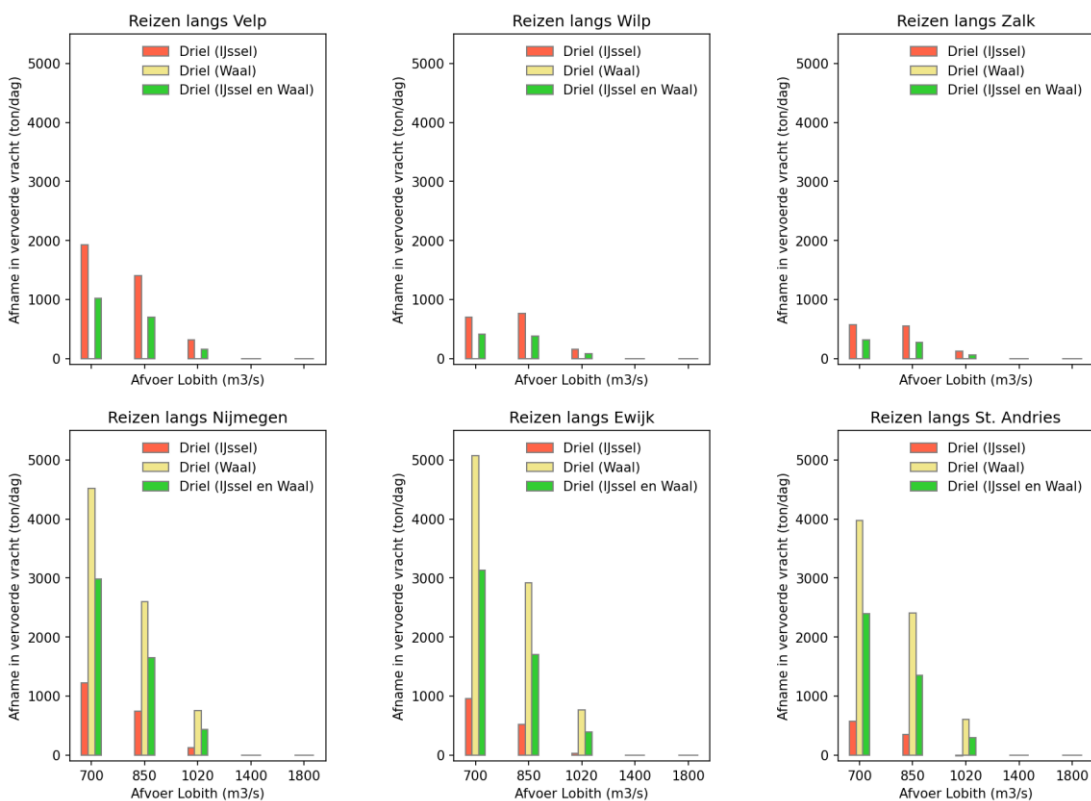
Figuur C-9 Totaal vervoerde vracht voor 2050 Ref en scenario's Driel.



Figuur C-10 Totaal vervoerde vracht per knelpunt op de Waal voor 2050 Ref en scenario's Driel.



Figuur C-11 Verschil in totaal vervoerde vracht tussen 2050 Ref en scenario's Driel.



Figuur C-12 Verschil in totaal vervoerde vracht per knelpunt op de Waal voor 2050 Ref en scenario's Driel.

D Tabel scheepvaart Bernhardtsluizen

Row Labels	Q700		Q850		Q1020		Q1400		Q1800	
	Tonna ge	Vaarkosten [kEur]	Tonna ge	Vaarkosten [kEur]	Tonna ge	Vaarkosten [kEur]	Tonna ge	Vaarkosten [kEur]	Tonna ge	Vaarkosten [kEur]
0	16,223	240	23,114	370	23,695	353	23,415	273	22,565	270
I	14,461	364	14,860	355	12,696	311	11,795	298	11,345	295
II	858,45		1,051,		1,199,		1,171,		1,106,	
III	1	6,990	950	7,639	084	8,060	689	7,600	844	7,175
IV	3,316,		4,510,		5,455,		4,565,		4,355,	
V	376	22,940	036	29,520	046	33,612	048	25,052	953	23,829
VI	3,832,		5,216,		6,695,		6,158,		6,007,	
Total / dag	058	30,778	761	39,154	625	45,313	762	37,939	402	36,700
> Vb / dag	14,745		16,609		21,534		18,312		18,043	
> Vla / dag	,981	172,968	,462	148,890	,474	155,215	,884	113,593	,785	108,575
	2,825,		3,309,		4,005,		4,841,		5,267,	
	224	42,045	261	32,204	187	25,274	285	23,014	717	23,143
Total / dag	70,113	757	84,149	707	106,573	734	96,057	569	95,320	548
> Vb / dag	7,735	115	9,060	88	10,966	69	13,255	63	14,422	63
> Vla / dag	4,957	95	5,802	66	7,162	44	6,427	34	6,458	32

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