



Kennisprogramma Natte Kunstwerken
Kennisplan 2024

*Vervangings- en renovatieopgave
natte kunstwerken in Nederland*

Kennisbijdrage:

Ontwikkelen systematiek voor uitwerken opties

Iteratieve werkwijze Stap 4 –
Bepalen van functionele prestaties

Auteurs

Noor ten Harmsen van der Beek	(Deltares)
Sam Maijvis	(Deltares)
Esther van Baaren	(Deltares)
Otto Weiler	(Deltares)
Ileen de Kat	(Rijkswaterstaat)
Herbert Berger	(Rijkswaterstaat)
Albert Barneveld	(Rijkswaterstaat)

kenmerk	: KpNK-2024-KV2-opties-a011
versie	: 1.0
datum publicatie	: 31 december 2024



Voorwoord

Kennisprogramma Natte Kunstwerken

Sluizen, stuwen, gemalen en stormvloedkeringen zijn belangrijke assets waarvoor beheerders zoals Rijkswaterstaat en de waterschappen verantwoordelijk zijn. Veel van deze natte kunstwerken in de waterinfrastructuur bereiken de komende decennia het einde van hun (technische en/of functionele) levensduur. Zij kunnen daardoor hun functies naar verwachting niet meer adequaat blijven uitoefenen. Dit zal ten koste gaan van de mate waarin de waterinfrastructuur voldoet aan betrouwbaarheidseisen. In het kader van goed assetmanagement staan we dan ook voor de enorme opgave om deze kunstwerken te vervangen of te renoveren. Welke kennis hebben we nodig om dat efficiënt, kostenbesparend en toekomst-bestendig aan te pakken?

Deltares

MARIN

Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

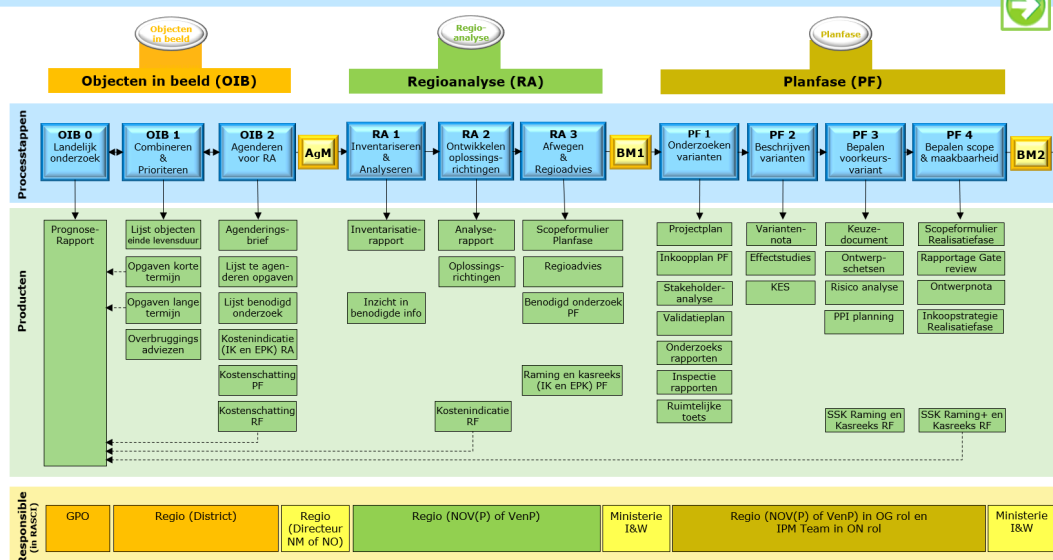
TNO

In het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK) ontwikkelen en bundelen Deltares, MARIN, TNO en Rijkswaterstaat deze kennis op basis van de Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken.

Werkwijze vervangings- en renovatieproces

De laatste jaren richten we ons niet meer uitsluitend op een-op-een vervanging van kunstwerken. We zoeken steeds meer naar mogelijkheden om hun levensduur te verlengen en (noodzakelijke) ingrepen te koppelen aan gebieds- en netwerkontwikkelingen en aan functionele ontwikkelingen. Rijkswaterstaat heeft als assetmanager een vernieuwde werkwijze voor dit vervangings- en renovatieproces (VenR) opgesteld om een uniform en systematisch proces te hebben waarmee een VenR-maatregel transparant onderbouwd kan worden (zie Figuur 1).

Procesketen VenR (tot aan Realisatie)



Figuur 1: Procesketen VenR binnen Rijkswaterstaat

Deze procesketen vormt de basis waar de kennisontwikkeling van het kennisprogramma aan bijdraagt.



Twee-stappen-benadering en drie kernvragen

De kennis die we ontwikkelen binnen het Kennisprogramma Natte Kunstwerken draagt bij aan de stapsgewijze-benadering binnen deze Procesketen VenR:

- stap 1 (*Objecten in Beeld*): richt zicht op (het einde van) de technische levensduur van een kunstwerk en het agenderen van de VenR-opgave in het *Prognose rapport*;
- stap 2 (*Regioanalyse*): brengt vooral de relatie in kaart tussen het kunstwerk en de netwerken waar het (samen met andere kunstwerken) deel van uitmaakt. In het resulterende *Regioadvies* gaat het ook over (het einde van) de functionele levensduur.

Inhoudelijk vindt het onderzoek plaats aan de hand drie *kernvragen*:

1. Hoe lang gaat mijn kunstwerk nog mee, zowel technisch als functioneel?
2. Welke alternatieven heb ik, behalve een-op-een vervanging?
3. Hoe weeg ik de alternatieven tegen elkaar af?

Programmaplan, jaarlijkse kennisplannen en samenwerking

Het programmaplan omvat de achtergronden en ambities voor de gehele looptijd van het Kennisprogramma Natte Kunstwerken. Jaarlijks worden deze ambities uitgewerkt in een kennisplan en een bijbehorend financieringsplan. Andere partijen zoals waterschappen, adviesbureaus en andere (commerciële) organisaties, nodigen we uitdrukkelijk uit om deel te nemen aan het gezamenlijk uitvoeren van een kennisplan, bijvoorbeeld met kennisbijdragen in voor hen relevante onderzoeksprojecten, met praktijkervaringen of financiële bijdragen.

Resultaten delen

Bijdragen en onderzoeksresultaten uit ons Kennisprogramma Natte Kunstwerken delen we met de hele sector via onze website (www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl) en op andere manieren.

Hieronder vindt u een kennisbijdrage binnen werkpakket 2 'Ontwikkelen systematiek voor uitwerken opties' uit het kennisplan 2024. Het omvat eerst de samenvatting van het onderzoek 'Iteratieve werkwijze Stap 4 – Bepalen van functionele prestaties'. Deze activiteit is namens het Kennisprogramma Natte Kunstwerken geleid door Deltares en Rijkswaterstaat. Na de samenvatting vindt u het volledige onderzoeksverslag in de vorm van een rapport.

N.B. Het volledige rapport is gelijk aan het originele document van Deltares, met uitzondering van het titelblad. Bij publicatie van dit onderzoeksverslag op de KpNK-website, is deze om privacyredenen verwijderd.



Kennisprogramma Natte Kunstwerken *Kennisplan 2024*

Meer informatie

- Het Kennisprogramma Natte Kunstwerken is de uitwerking van de onderzoeklijn 'Toekomstbestendige Natte Kunstwerken' binnen het Nationaal Kennisplatform voor Water en Klimaat (NKWK). Zie www.waterenklimaat.nl

NKWK

- Voor meer informatie over het programma Kennisprogramma Natte Kunstwerken, zie www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl.



- Voor vragen over het Kennisprogramma Natte Kunstwerken en het kennisplan 2024 kunt u terecht bij Martine Brinkhuis, email martine.brinkhuis@rws.nl
- Voor vragen over de voorliggende kennisbijdrage kunt u terecht bij de auteurs:

Noor ten Harmsen van der Beek

noor.tenharmsevanderbeek@deltares.nl

Ileen de Kat

ileen.de.kat@rws.nl



Kennisprogramma Natte Kunstwerken
Kennisplan 2024



Samenvatting

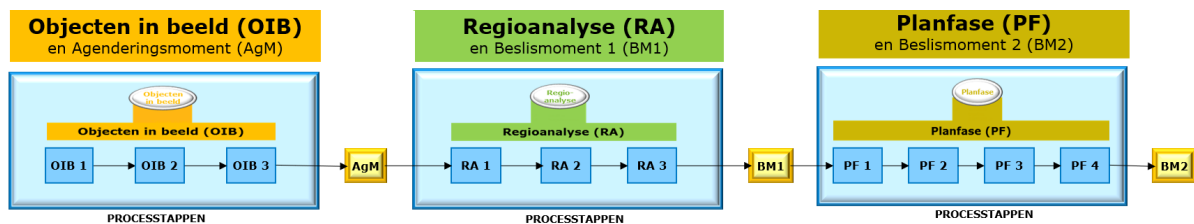
Ontwikkelen systematiek voor uitwerken opties

Iteratieve werkwijze Stap 4 – Bepalen van functionele prestaties

Hieronder vindt u een kennisbijdrage van het werkpakket ‘Ontwikkelen systematiek voor uitwerken opties’ uit het kennisplan van Kernvraag 2 en 3. De bijdrage – geleid door Deltares en RWS – omvat de samenvatting van het onderzoek ‘Iteratieve werkwijze Stap 4 – Bepalen van functionele prestaties’. Na de samenvatting vindt u het volledige onderzoeksverslag in de vorm van een rapport.

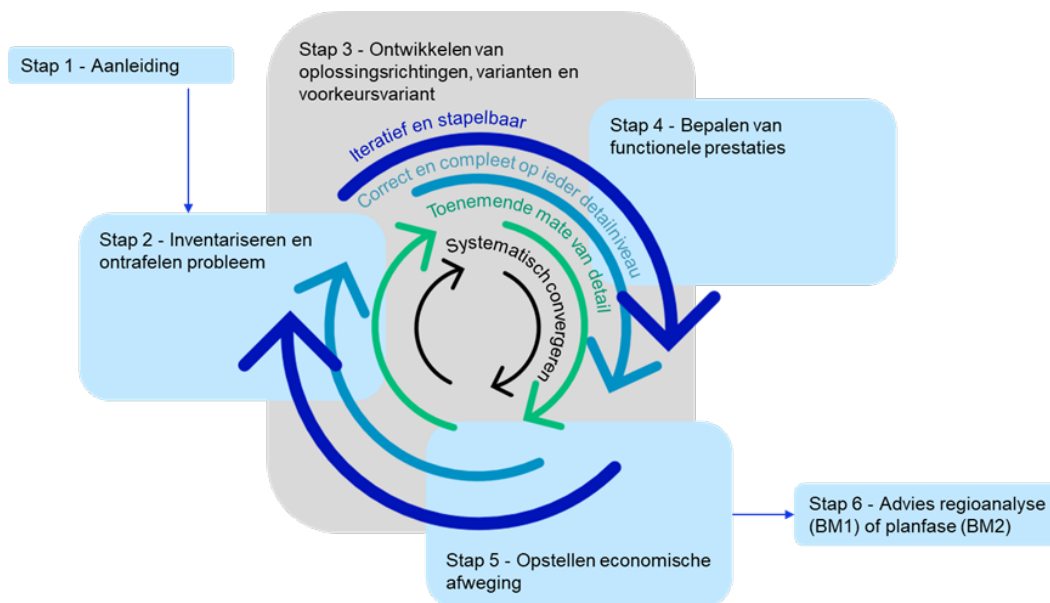
Aanleiding en probleemstelling

Om het besluitvormingsproces rondom de Vervanging en Renovatie (VenR) van kunstwerken te ondersteunen heeft Rijkswaterstaat een werkproces (zie Figuur 1) opgezet, bestaande uit onder meer Objecten in beeld, Regioanalyse en Planfase. Tussendoor zijn er verschillende beslismomenten. De Doorklikplaat VenR beschrijft dit werkproces en biedt hulpmiddelen voor de uitvoering.



Figuur 1: Versimpelde weergave van deel werkproces volgens Doorklikplaat VenR

Om de Regioanalyse en Planfase uit dit werkproces goed te doorlopen, is in het KpNK de iteratieve werkwijze ontwikkeld. Hiermee kunnen beslismomenten 1 en 2 (BM1 – voorbereid in de Regioanalyse en BM2 – voorbereid in de Planfase) goed, transparant, en navolgbaar voorbereid en onderbouwd worden (Figuur 2). De iteratieve werkwijze wordt op hoofdlijnen toegelicht in het [hoofdrapport](#).



Figuur 2: Iteratieve werkwijze om onderbouwd te komen tot oplossingsrichting, varianten en voorkeursvariant voor objecten met einde levensduur.

Een belangrijk onderdeel in de onderbouwing van een VenR-beslissing is het scherp in kaart brengen van het effect van de maatregelen waartoe wordt besloten. Dus in welke mate blijven het netwerk en de natte kunstwerken aan de (in stap 2 geïnventariseerde) functie-eisen en wensen voldoen. Deze 'functionele prestaties' moeten zowel op dit moment als in de toekomst (ook inclusief het effect van eventuele VenR-ingrepen en/of van drivers) eenduidig worden gekwantificeerd.

Onderzoeksvraag (WAT)

Het doel van de iteratieve werkwijze is om de VenR-coördinatoren van Rijkswaterstaat te ondersteunen bij het doorlopen van het VenR-werkproces (Figuur 1). De onderzoeksvraag specifiek voor deze stap in de iteratieve werkwijze is: Op welke wijze kan het (huidige en toekomstige) functioneren van een netwerk en de kunstwerken daarbinnen worden uitgedrukt, zodanig dat deze informatie kan worden gebruikt bij het ontwikkelen van oplossingsrichtingen en varianten?

Onderzoeksaanpak en -methode (HOE)

De ontwikkelde iteratieve werkwijze en de bijbehorende onderdelen zijn tot stand gekomen in co-creatie tussen Rijkswaterstaat en Deltares. Hiervoor is gebruikgemaakt van verschillende werk- en onderzoeksmethoden: literatuurstudies, werksessies met het projectteam, werksessies ter ondersteuning van daadwerkelijke VenR-besluitvorming (praktijkcases), interviews en data-analyses.

Drie praktijkcases hebben er nadrukkelijk aan bijgedragen om een antwoord te vinden op bovenstaande onderzoeksvraag: de Regioanalyses voor de Maasstuwen en het Julianakanaal, en een fictieve damwanden-case.

Onderzoeksresultaten en synthese

Hoe functionele prestaties van een netwerk of kunstwerk op een bepaald tijdstip, kan worden uitgedrukt, vraagt om een (reken)model waarmee een relatie kan worden gelegd tussen de verandering van de relevante condities en het effect daarvan op deze prestaties; wetende dat de eisen en wensen vaak voor het netwerk en dus niet voor de afzonderlijke kunstwerken gelden. Als deze prestaties op een gegeven moment onder een bepaalde drempelwaarde komen en er geen



maatregelen worden genomen, dan eindigt de functionele levensduur. Naast rekenmodellen kan hier overigens ook aan expert judgement worden gedacht om prestaties kwalitatief uit te drukken.

Het rapport biedt een stappenplan voor het bepalen van functionele prestaties, waarbij informatie uit stap 2 (over het kunstwerk, functies, eisen en wensen, drivers) en (indien relevant) maatregelen nodig is. De focus ligt op het kwantificeren van functionele prestaties op een laagdrempelige manier, met voorbeelden van casussen binnen en buiten het KpNK. Het beschrijft ook een methode om functionele prestaties op een kwalitatieve manier systematisch mee te nemen en geeft voorbeelden van visualisaties van functionele prestaties, zoals landelijke kaarten.

Evaluatie en vooruitblik

De iteratieve werkwijze (inclusief deze vierde stap) is klaar om te gebruiken voor VenR-teams. Aan de hand van toepassing in de praktijk zal moeten blijken of de deze werkwijze daadwerkelijk leidt tot goed onderbouwde VenR-beslissingen, en waar eventuele verbeterpunten nodig zijn. Zie voor verdere uitleg over de (totstandkoming) van de iteratieve werkwijze ook de kennisbijdrage '[Hoofdrapportage](#)'.

Specifiek voor het kwantificeren van de functionele prestaties wordt er de komende jaren ook gewerkt aan verdere uitwerking voor specifieke functies en het kwantificeren voor een combinatie van functies. Er is bijvoorbeeld in het KpNK al gewerkt aan tools en handleidingen voor het omgaan met zoutbeheer en biodiversiteit bij natte kunstwerken.

Tot slot. Hoewel het rapport zich richt op de iteratieve werkwijze en de VenR-opgave, is het onderbouwen van (de noodzaak van) maatregelen door het uitdrukken in functionele prestaties breder toepasbaar, bijvoorbeeld in prognoserapporten en netwerkschakelplannen.



Kennisprogramma Natte Kunstwerken
Kennisplan 2024

Functionele prestatie (algemeen, zout en biodiversiteit)

Iteratieve werkwijze Stap 4 - Bepalen van functionele prestatie



 enabling delta life

Foto: © Rijkswaterstaat



KENNISPROGRAMMA
NATTE KUNSTWERKEN



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Functionele prestatie (algemeen, zout en biodiversiteit)
Iteratieve werkwijze Stap 4 - Bepalen van functionele prestatie

Auteur(s)

Noor ten Harmsen van der Beek

Sam Majvis

Otto Weiler

Nino Zuiderwijk

Esther van Baaren

Ileen de Kat

Herbert Berger

Albert Barneveld

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Context Kennisprogramma Natte Kunstwerken	9
1.2	Doel en doelgroep	10
1.3	Iteratieve werkwijze	10
1.4	Stap 4 – Bepalen van functionele prestaties	11
2	Wat is functionele prestatie en waar is het voor te gebruiken?	13
2.1	Wat is functionele prestatie?	13
2.2	Toepassing functionele prestatie	14
2.2.1	Identificeren van functioneren objecten in de huidige situatie	15
2.2.2	Vaststellen van (toekomstige) knelpunten	15
2.2.3	Uitwerken, onderbouwen en afwegen van oplossingsrichtingen en VenR-varianten	17
2.3	Detailniveaus	18
2.3.1	Light	19
2.3.2	Medium	19
2.3.3	Heavy	19
3	Stappenplan functionele prestatie	20
3.1	Bepalen functionele prestatie	20
4	Kwalitatief beoordelen functionele prestatie	23
4.1	Aanpak	23
4.2	Voorbeeldtoepassingen	24
4.2.1	Maasstuwen	24
4.2.2	Julianakanaal	24
4.2.3	Stresstest objecten in Hoofdwatersysteem	24
5	Kwantificeren functionele prestatie	25
5.1	Overzicht casussen	25
5.2	Voorbeeldcasussen buiten het KpNK	27
5.2.1	Dagelijkse en Extreme waarden Volkerak-Zoommeer (DEVO) en Zuyderzee (DEZY)	27
5.2.2	Functionele Levensduur Scenario Analyse (FLSA)	27
5.2.3	Integrale Mobiliteitsanalyse (IMA)	27
5.2.4	Klimaatbestendige Netwerken (KBN)	27
5.2.5	Risk and Opportunity Based Asset Management for Critical Infrastructure (ROBAMCI)	27
5.3	KpNK (of daaraan gerelateerde) voorbeeldcasussen	28
5.3.1	Maasstuwen	28
5.3.2	Spuisluizen en spuicapaciteit	29
5.3.3	Zoutbeheer bij Noordersluis IJmuiden	30
5.3.4	Kunstwerken rond het Haringvliet	30

5.3.5	Hollandsche IJsselkering	31
5.3.6	Bergingscapaciteit	31
5.3.7	Stuw Hagestein	32
5.3.8	Overstortend debiet	32
5.3.9	Biodiversiteit	32
6	Visualiseren functionele prestatie	33
6.1	Interactieve visualisaties (dashboard)	33
6.2	Landelijke kaarten	33
6.2.1	Doel landelijke kaarten	34
6.2.2	Toelichting opzet landelijke kaarten	34
6.2.3	Peilbeheer	36
6.2.4	Zoutbeheer	38
6.2.5	Biodiversiteit	40
7	Vervolgstappen en aanbevelingen	42
7.1	Vervolgstappen in de iteratieve werkwijze	42
7.2	Aanbevelingen	42
	Referenties	44
A	Ontwikkeling naar functionele prestatie	47
A.1	Functionele levensduur	47
A.2	Kennisprogramma Natte Kunstwerken	47
B	Functionele prestatie per kerntaak	49
B.1	Kerntaak: Vlot en veilig vaarwegverkeer	49
B.2	Kerntaak: Waterveiligheid	52
B.3	Kerntaak: Voldoende water	54
B.4	Kerntaak: Schoon en gezond water	58
C	Spuisluizen en spuicapaciteit	60
C.1	Introductie	60
C.2	Methodeontwikkeling afvoercapaciteit: Casus Bathse spuisluis voor de functie waterbeheer	60
C.2.1	Introductie	60
C.2.2	Afvoercapaciteit	61
C.2.3	Casus-uitwerking	61
C.2.3.1.	Gegevens	62
C.2.3.2.	Huidige capaciteit en capaciteit bij zeespiegelstijging	63
C.2.3.3.	Vergelijking met geregistreerde afvoeren	65
C.2.3.4.	Maatregelen	67
C.3	Toepassing op andere spuisluizen	67
C.3.1	Spui- en vismigratiemiddel Krammersluizen	68
C.3.2	Spuisluizen Afsluitdijk: Kornwerderzand en Den Oever	68
C.3.3	Spuisluis in het sluisencomplex IJmuiden	70
C.3.4	Haringvlietsluizen	72

C.4	Discussie	74
C.4.1	Methode	74
C.4.2	Toepasbaarheid methode	75
D	Functie zoutbeheer	76
E	Bergingscapaciteit achterland stormvloedkeringen	79
F	Functionele prestatie stuw Hagestein – Negatief verval	82
F.1	Systeembeschrijving	82
F.2	Aanpak	84
F.2.1	Methode voor huidige situatie	84
F.2.2	Methode voor invloed zeespiegelstijging	84
F.2.3	Methode voor gecombineerd invloed zeespiegelstijging met afname van rivierafvoer	85
F.3	Resultaten	86
F.3.1	Huidige situatie	86
F.3.2	Invloed zeespiegelstijging	87
F.3.3	Invloed zeespiegelstijging in combinatie met een afname van de rivierafvoer	88
F.3.4	Intermezzo: Beoordeling gebruik betrekkinglijn	89
F.3.5	Discussie van de resultaten	91
F.4	Impact op stuwcomplex en watersysteem	91
F.4.1	Impact op stuwcomplex Hagestein	91
F.4.2	Impact watersysteem	92
F.5	Discussie casus	93
F.5.1	Huidige situatie	93
F.5.2	Drivers	93
F.5.3	Aanpak	93
F.5.4	Methodiekontwikkeling functionele prestatie	94
F.5.5	Afsluitend	94
G	Kunstwerken rondom het Haringvliet	95
H	Kwantificeren technische prestatie – Overstortend debiet – belasting op bodembescherming	97

1 Inleiding

1.1 Context Kennisprogramma Natte Kunstwerken

Sluizen, stuwen, gemalen, stormvloedkeringen en damwandconstructies zijn belangrijke assets (ook wel natte kunstwerken genoemd) voor het waterbeheer waar beheerders zoals Rijkswaterstaat en de waterschappen voor verantwoordelijk zijn. Gezien de ontwerphorizon, conditie en prestatie van deze natte kunstwerken in de waterinfrastructuur bereiken veel (onderdelen) van deze objecten de komende decennia het einde van hun levensduur (Rijkswaterstaat, 2022). Zij kunnen daardoor hun functies niet meer adequaat blijven uitvoeren. Zonder aanpassingen zal dit dan ten koste gaan van de betrouwbaarheid, beschikbaarheid, onderhoudbaarheid en/of veiligheid van de waterinfrastructuur. In sommige gevallen raakt het ook de veiligheid van de burger (bijv. het niet-sluiten van een spuisluis of uitval van een gemaal). In het kader van goed assetmanagement staan beheerders als Rijkswaterstaat dan ook voor een grote opgave om tot toekomstbestendige (investerings-)beslissingen te komen bij het vervangen of renoveren (VenR) van deze kunstwerken. Sinds 2024 heet VenR Vernieuwing binnen Rijkswaterstaat. In dit rapport wordt nog de term VenR aangehouden aangezien de implementatie van deze verandering (en bijbehorende terminologie) nog bezig is.

Wanneer een nat kunstwerk bijna einde levensduur bereikt, dient onderbouwd afgewogen te worden welke oplossingsrichting voor dit kunstwerk wordt gekozen: niets doen, levensduurverlengend onderhoud, VenR of nieuwe aanleg. Bij de onderbouwing dient goed in beeld te worden gebracht wat de functie van het natte kunstwerk in het bijbehorende netwerk en gebied is, naast effecten van socio-economische, klimatologische en beleidsmatige ontwikkelingen. Indien voor het verouderde kunstwerk wordt gekozen voor de oplossingsrichting VenR, dan heeft Rijkswaterstaat een uniform en systematisch werkproces opgesteld waarmee - vanaf de verkennende fase - een VenR-maatregel transparant en herleidbaar onderbouwd kan worden. De zogenoemde Doorklikplaat VenR visualiseert dit proces van de te doorlopen deelstappen en de op te leveren resultaten in dit werkproces.

In het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK) ontwikkelen en bundelen Deltares, MARIN, TNO en Rijkswaterstaat de technische, functionele en economische kennis die nodig is om de besluitvorming omtrent de VenR-opgave bij de civiele en bewegende delen van natte kunstwerken effectief, efficiënt, transparant en toekomstbestendig te onderbouwen. De kennisontwikkeling in het KpNK draagt bij aan twee fasen van het VenR-proces, namelijk de Regioanalyse en Planfase, en vindt inhoudelijk plaats langs de volgende drie kernvragen:

1. Kernvraag 1: Hoe lang gaat mijn kunstwerk nog mee, zowel technisch als functioneel?
2. Kernvraag 2: Hoe kunnen oplossingsrichtingen¹ en VenR-varianten² systematisch uitgewerkt en onderbouwd worden?
3. Kernvraag 3: Hoe weeg ik oplossingsrichtingen en VenR-varianten in termen van kosten en baten tegen elkaar af?

¹ Oplossingsrichtingen: niets doen, levensduurverlengend onderhoud, vervangen en renoveren, en aanleg

² Een variant is hier een verdere uitwerking van een oplossingsrichting. Binnen het VenR-proces wordt toegewerkt naar een voorkeursvariant.

1.2 Doel en doelgroep

In het KpNK is door Rijkswaterstaat en Deltares ten behoeve van het doorlopen van de Regioanalyse en Planfase volgens de VenR-doorklikplaat een iteratieve werkwijze ontwikkeld (zie het hoofdrapport over de iteratieve werkwijze (KpNK, 2024a)). Deze iteratieve werkwijze heeft als doel te komen tot een goede onderbouwing van de te nemen beslissing. De aanpak kenmerkt zich door een stapelbare en stapsgewijze aanpak waarbij steeds meer in detail kan worden gegaan (zie ook Figuur 1.1).

Aan de hand van deze iteratieve werkwijze kunnen de adviezen met betrekking tot de oplossingsrichting(en) in de Regioanalyse en het daarbij behorende beslismoment 1 (BM1³) én de adviezen met betrekking tot de varianten in de Planfase en het daarbij behorende beslismoment 2 (BM2⁴) goed onderbouwd worden. Centraal in de iteratieve werkwijze staat de prestatie van een netwerk of kunstwerk - i.e. de mate waarin het voldoet aan de gestelde eisen en/of wensen. Op die manier wordt de functionele prestatie (KpNK, 2024d) gebruikt om het huidige en toekomstige functioneren van een nat kunstwerk of bijbehorend netwerk(deel) te bepalen, knelpunten op beide niveaus vast te stellen en (daarmee) systematisch oplossingsrichtingen en varianten uit te werken. Het concept van functionele prestatie is uiteraard breder toepasbaar; bevindingen van het KpNK zijn daarom ook los van de iteratieve werkwijze te gebruiken.

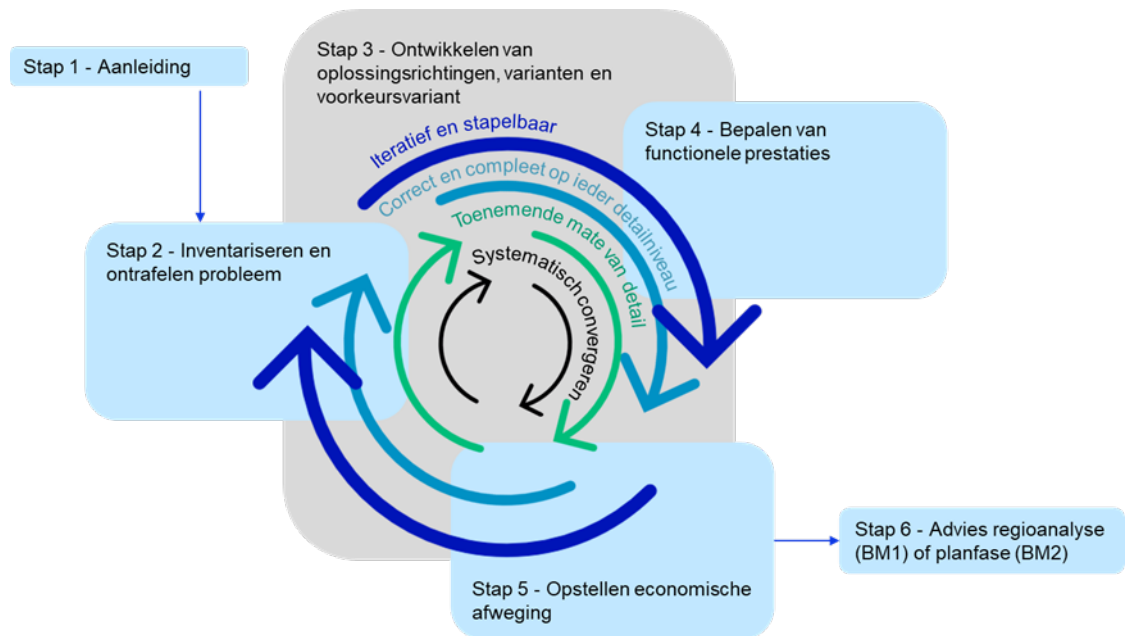
De genoemde iteratieve werkwijze is bedoeld als hulpmiddel voor de teams die – onder leiding van de betreffende regionale directies van Rijkswaterstaat - gezamenlijk het werkproces volgens de VenR-Doorklikplaat gaan doorlopen bij het in zicht komen van einde levensduur van een nat kunstwerk. Het biedt de VenR-coördinator van de regio een handvat voor een werkwijze die hij/zij kan volgen om systematisch te komen tot een goede onderbouwing van de oplossingsrichting(en) voor BM1 (voorbereid in de Regioanalyse) en varianten en voorkeursvariant voor BM2 (voorbereid in de Planfase) in het VenR-werkproces.

1.3 Iteratieve werkwijze

De iteratieve werkwijze is schematisch weergegeven in de navolgende figuur.

³ hierin gaat het om de vraag welke van de volgende oplossingsrichtingen op welk moment het meest passend is: niets doen, levensduurverlengend onderhoud, VenR of aanleg

⁴ hierin gaat het om de vraag welke van de verschillende realistische varianten de voorkeursvariant is



Figuur 1.1 Iteratieve werkwijze om onderbouwd te komen tot oplossingsrichting, varianten en voorkeursvariant voor objecten met einde levensduur.

Doel van de iteratieve werkwijze is om voor een object onderbouwd te komen tot een oplossingsrichting in de Regioanalyse (BM1) of tot varianten inclusief voorkeursvariant in de Planfase (BM2). Een belangrijke eigenschap van de iteratieve werkwijze is 'stapelbaarheid'. Hiermee wordt een herhaling van processtappen bedoeld waarbij in iedere herhaling (iteratie) er meer en/of betere informatie wordt verkregen voor onderbouwing van keuzes en waarbij nieuwe informatie aansluit bij eerdere, en mogelijk grovere, informatie. Er wordt stapsgewijs gewerkt, van grof naar fijn en met voortschrijdend inzicht, om onderbouwd te komen tot in steeds meer detail onderbouwde VenR-beslissingen (hier de oplossingsrichting, varianten en voorkeursvariant). Verkregen informatie, uitgangspunten, berekeningen en beargumenteerde keuzes worden als onderdeel van de ontwikkelde werkwijze transparant en eenduidig opgeschreven zodat bij vervolgvragen in het VenR-proces hier op kan worden voortgebouwd en de onderbouwing van keuzes tot een juist detailniveau kan worden gebracht. In de werkwijze wordt rekening gehouden met de verschillende functies van natte kunstwerken en (onzekere) toekomstige ontwikkelingen (drivers). Er is bij de opzet van de werkwijze zoveel mogelijk aangesloten bij de gangbare werkwijzen van Rijkswaterstaat (VenR-proces en -Doorklikplaat).

Een uitgebreide beschrijving van de volledige iteratieve werkwijze is beschikbaar in het hoofdrapport over de iteratieve werkwijze (KpNK, 2024a). Voor de afzonderlijke Stappen 2, 3, 4 en 5 zijn separate rapporten beschikbaar. In deze rapportage wordt Stap 4 toegelicht.

1.4 Stap 4 – Bepalen van functionele prestaties

De prestatie van een netwerk of kunstwerk, oftewel de mate waarin deze aan de gestelde eis(en) of wens(en) voldoet, kan op drie verschillende aspecten beoordeeld worden:

- Technische prestatie: in hoeverre voldoet de constructieve staat aan de (wettelijk vastgestelde) eisen voor bestaande kunstwerken?
- Functionele prestatie: in hoeverre is het kunstwerk in staat om de gevraagde functies naar behoren uit te voeren?
- Economische prestatie: in hoeverre is er sprake van een positieve verhouding tussen de baten en de kosten?

Het onderscheid tussen deze begrippen wordt grafisch weergegeven in Figuur 1.2. In dit rapport ligt de focus op functionele prestatie, maar deze aspecten kunnen niet volledig afzonderlijk van elkaar beschouwd worden: het bereiken van einde technische levensduur (zoals een bezwijken grondkerende wand) betekent bijvoorbeeld vaak ook einde functionele levensduur (geen water kunnen keren).



Figuur 1.2: Onderscheid tussen technische, functionele en economische prestatie aan de hand van een voorbeeldbrug; een tekort aan constructieve integriteit, het niet kunnen voldoen aan eisen van de scheepvaart en/of hoge onderhoudskosten kunnen ervoor zorgen dat deze voorbeeldbrug ondermaats presteert.

Binnen de iteratieve werkwijze wordt functionele prestatie in plaats van functionele levensduur gebruikt. De belangrijkste reden hiervoor is om het veranderen van de prestatie in de tijd of de prestatie op een specifiek moment eenduidiger te kunnen kwantificeren. Op het moment dat voor een functie de werkelijke (netwerk)prestaties structureel onder de gestelde eis liggen, dan is er sprake van einde functionele levensduur. Het concept functionele prestatie in de tijd geeft meer detail over het functioneren van het kunstwerk dan functionele levensduur, waar een absoluut oordeel 'voldoet wel' of 'voldoet niet' uit volgt. Daarnaast kan dit concept ook in afwezigheid van concrete eisen toegepast worden. Hoofdstuk 2 gaat verder in op functionele prestatie en de toepassingen ervan. In Hoofdstuk 3 wordt een algemeen stappenplan om functionele prestatie te bepalen gegeven.

Door een gestructureerd overzicht te maken van alle functies van het netwerk en de beschouwde kunstwerken, en alle drivers die daar mogelijk invloed op hebben, kan vervolgens op basis van de Methode Functionele Prestatie (MFP) bepaald worden welke driver-functie combinaties naar verloop van tijd mogelijk levensduurbepalend gaan worden. Hoofdstuk 4 gaat hier verder op in. Waar relevant kan de functionele prestatie ook in meer detail worden uitgewerkt. Dit rapport geeft hier enkele voorbeelden van in Hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 geeft enkele voorbeelden van visualisatievormen. In Hoofdstuk 7 worden de vervolgstappen in de iteratieve werkwijze gegeven en daarnaast enkele algemene aanbevelingen.

2 Wat is functionele prestatie en waar is het voor te gebruiken?

Functionele prestatie is de mate waarin een object presteert ten opzichte van de gestelde eisen of wensen voor een bepaalde functie. Als bij een functie de functionele prestatie structureel onder de eisen of wensen liggen, dan treedt in principe einde functionele levensduur op. Het bepalen van functionele prestatie kan in het VenR-proces zorgen voor inzicht in de invloed van drivers of maatregelen. Het is daarmee ondersteunend voor beslissingen of het wegschrijven of juist meenemen van varianten. In dit hoofdstuk wordt functionele prestatie in het algemeen, de toepassing van functionele prestatie en het gebruik van verschillende detailniveaus beschreven.

2.1 Wat is functionele prestatie?

Conform KpNK (2024b), de rapportage over Stap 2 van de iteratieve werkwijze, beschrijft een functie alles wat een object (qua kerntaken) moet kunnen of welk gebruik het mogelijk moet maken. Functionele levensduur is daarbij een veel gebruikte term. In het Life Cycle Cost (LCC) kader van Rijkswaterstaat (Rijkswaterstaat, 2014) wordt dit gedefinieerd als de periode waarover (een onderdeel van) een object van voldoende waarde is voor het doel waarvoor het ontworpen is, daarbij ook rekening houdend met een veranderende vraag en eisen. Dergelijke eisen zijn bijvoorbeeld gerelateerd aan de RAMS aspecten: betrouwbaarheid (Reliability), beschikbaarheid (Availability), onderhoud (Maintainability) en veiligheid (Safety). In het verlengde hiervan is in Deltares (2022c) aangehouden dat het einde van de functionele levensduur wordt bereikt als een object door veranderde randvoorwaarden een of meerdere functies niet meer conform de op dat moment geldende functionele eisen op objectniveau kan uitvoeren als gevolg van klimaatverandering of bodemdaling, socio-economische en/of beleidsmatige ontwikkelingen. Bijlage A geeft een overzicht van verschillende eerdere studies naar (einde) functionele levensduur.

Functionele prestatie is de mate waarin een kunstwerk presteert ten opzichte van de gestelde eisen en wensen voor een bepaalde functie

Binnen de iteratieve werkwijze wordt functionele prestatie in plaats van functionele levensduur gebruikt. De belangrijkste reden hiervoor is om de ontwikkeling van de relatieve prestatie in de tijd van een object beter te kunnen uitdrukken. Zo kan de prestatie ten opzichte van een eis worden beschouwd, bijvoorbeeld: Zit de prestatie ver onder de norm of is deze maar net ondermaats? Daarbij komt dat er voor elke functie *minimaal* één eis of wens geldt, in de vorm van een drempelwaarde voor de te leveren prestatie. Veelal is er per functie zelfs sprake van meerdere eisen of wensen, waardoor het al dan niet naar behoren vervullen van een functie afhankelijk is van meerdere aspecten. Een voorbeeld hiervan is het mogelijk maken van vlot en veilig vaarwegverkeer, waar onder andere eisen gelden voor zowel breedte, diepte als doorvaarthoogte. Het concept functionele prestatie maakt het ook eenvoudiger om de functionele samenhang (zie Hoofdstuk 3) inzichtelijk te maken.

Functionele levensduur of functionele prestatie wordt zowel vanuit één type kunstwerk (bijvoorbeeld in VONK (Vervangingsopgave Natte Kunstwerken)) of één specifiek kunstwerk op één locatie (bijvoorbeeld in een regioanalyse) als vanuit één functie van (een deel van) het

netwerk (bijvoorbeeld vanuit klimaatbestendige netwerken of Deltaprogramma zoetwater) of vanuit één regio (bijvoorbeeld klimaatstudies) bekeken.

Functionele prestatie kan worden gebruikt om het verloop van deze prestaties onder verschillende scenario's of op een specifiek moment weer te geven. Verandering van eisen aan de functies, maatregelen in Beheer en Onderhoud (BenO) of VenR kunnen zo leiden tot andere knelpunten in de tijd voor de infrastructuur en VenR-varianten kunnen naast elkaar uitgewerkt worden. Ook voor het meenemen van functionele prestatie in een economische afweging is het nuttig om de prestatie in de tijd uit te drukken. Vaak wordt de functionele prestatie uitgedrukt per mate van verandering van een driver (bijv. per meter zeespiegelstijging). Voor de vertaling naar tijd kan een scenario worden gebruikt.

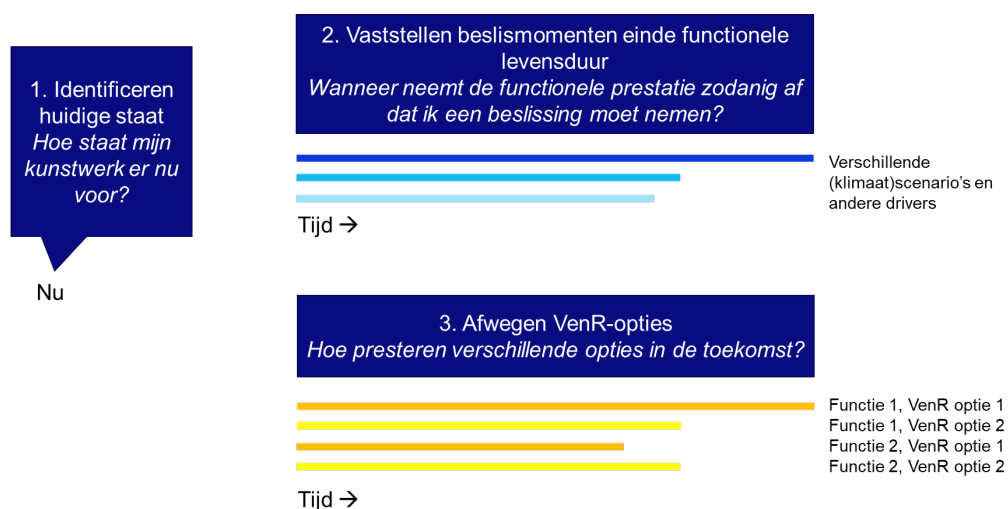
Gebleken is dat er niet één eenheid voor functionele prestatie is. Functies verschillen teveel van elkaar om daar één eenheid voor functionele prestatie van af te leiden (zie verdere uitwerkingen verderop in dit rapport). In de landelijke kaarten van Hoofdstuk 6.2 is er wel voor gekozen om de prestatie bij een functie uit te drukken in een percentage ten opzichte van een eis of de huidige prestatie. Dit is al één stap in de richting van een gezamenlijke eenheid. Het verschil in eenheden van functionele prestatie betekent wel dat er in de afweging (Stap 5) een keuze moet worden gemaakt in hoe deze verschillende functies met elkaar vergeleken worden. Het is daarbij ook goed om op te merken dat er een ongelijksoortigheid is tussen de verschillende typen eisen en wensen, waarbij normen wellicht zwaarder meewegen dan richtlijnen, en richtlijnen zwaarder dan wensen.

2.2 Toepassing functionele prestatie

Het concept functionele prestatie op netwerk- en objectniveau kan op drie verschillende manieren worden toegepast (zie ook Figuur 2.1):

1. Identificeren van functioneren objecten in de huidige situatie;
2. Vaststellen van (toekomstige) knelpunten;
3. Uitwerken, onderbouwen en afwegen van oplossingsrichtingen en VenR-varianten.

De iteratieve werkwijze is van toepassing op alle drie de doelstellingen. Voor functionele prestatie (Stap 4 van de iteratieve werkwijze) geldt dat het in drie verschillende trajecten van RWS toegepast kan worden: BenO, VenR (Objecten in beeld, Regioanalyse en Planfase) en Aanleg. Hieronder worden drie mogelijke toepassingen verder toegelicht met een voorbeeld. De economische afweging (onderdeel van de derde toepassing en Stap 5 in de iteratieve werkwijze) wordt beschreven in een afzonderlijke rapportage (KpNK, 2024d).



Figuur 2.1: Schematische weergave van de drie doelstellingen van de methode functionele prestatie.

2.2.1 Identificeren van functioneren objecten in de huidige situatie

Voor elke functie zou de huidige status van de functionele prestatie beschreven moeten worden, mits er eisen of wensen zijn beschreven voor het kunstwerk of het systeem voor die functie. Deze inzet van functionele prestatie is onderdeel van Stap 2 van de iteratieve werkwijze als manier om de huidige situatie en mogelijke locaties voor huidige problemen in kaart te brengen. Ook bij het prognoserapport VenR (Rijkswaterstaat, 2022) is er de ambitie om (elementen van) de functionele levensduur van kunstwerken toe te voegen aan de analyse van de (rest)levensduur. Het identificeren van de huidige situatie aan de hand van functionele prestatie wordt ook 'functionele inspectie' genoemd. Specifiek wordt hier bedoeld: het op basis van (bij voorkeur kwantitatieve) waarnemingen en informatie in beeld brengen van de mate waarin een object in het netwerk ten opzichte van de gestelde eis(en) of wens(en) daadwerkelijk functioneert.

Voorbeeld: Identificeren huidige situatie sluis bij Grave

In KpNK (2022b) is een aantal stappen uit de werkwijze uitgewerkt voor het bepalen van de functionele prestatie van de sluis bij Grave, met focus op de bijdrage van de sluis aan de bevaarbaarheid van het hoofdvaarwegennet rondom Grave. Hiervoor is op basis van beschikbare data gekeken naar het effect van de functionele prestatie van de sluis op het netwerk. Ook is gekeken naar alternatieve routes binnen het netwerk op het moment dat sluisolk Grave niet beschikbaar zou zijn. Een specifieke focus ligt hiermee in dit onderzoek op de functionele samenhang tussen objecten in het systeem. In KpNK (2022b) worden methoden om de functionele samenhang binnen het netwerk te kwantificeren onderzocht, en wordt aangegeven of de benodigde waarnemingen en tools beschikbaar én inzetbaar zijn.

Deze inzet van functionele prestatie is onderdeel van Stap 2 van de iteratieve werkwijze. In de inventarisatie en de probleemstelling is onder andere gekeken naar de functionele afbakening van het netwerkdeel rondom Grave en de functionele samenhang. Vervolgens is de huidige functionele prestatie bekeken aan de hand van metingen en registraties. Indien de huidige functionele prestatie al voor knelpunten zou zorgen, dan kunnen maatregelen als alternatieve routes worden verkend om de functionele prestatie op netwerkniveau voldoende te houden.

Vanuit de beschrijving van het netwerkdeel wordt in KpNK (2022b) gekeken hoe de functionele prestatie aan de hand van beschikbare data kwantitatief kan worden bepaald. Waarbij het van belang is om te realiseren dat in de selectie van de geregistreerde data nauwkeurig rekening moet worden gehouden met welke invloeden er mogelijk in de datasets zitten (zoals bijvoorbeeld welke dag van de week of periode van het jaar het is voor de referentie van de scheepvaartintensiteit) en waarvoor deze inzetbaar zijn. Tegelijkertijd is de data ook niet altijd beschikbaar op het moment dat het nodig is voor de analyse.

2.2.2 Vaststellen van (toekomstige) knelpunten

Naast het in kaart brengen van de huidige situatie via functionele inspectie is het vaststellen van knelpunten voor VenR (in de toekomst) een tweede toepassing van functionele prestatie. Een knelpunt ontstaat in de tijd als, op één of meer locaties in het systeem, de functionele prestatie van een netwerk of kunstwerk dusdanig afneemt dat:

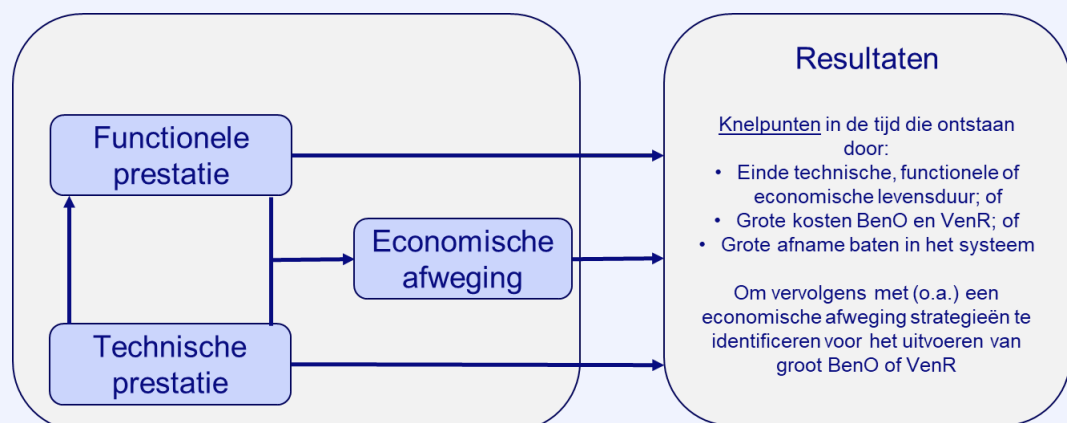
- Einde functionele levensduur wordt bereikt;
- Grote investeringen (via BenO of VenR) in het netwerk moeten worden gepleegd om de functionele prestatie voldoende op peil te houden;
- Grote afname van baten in (een deel van) het systeem optreden door afname van de functionele prestatie van één of meer kunstwerken.

Externe ontwikkelingen (bijvoorbeeld van klimatologische, socio-economische of beleidsmatige aard) kunnen invloed hebben op de functionele prestatie, waardoor deze prestatie dus niet (altijd) constant is in de tijd. Voor elke functie zou met behulp van dergelijke 'drivers' de vereiste toekomstige functionele prestatie beschreven kunnen worden, mits er eisen of doelen zijn beschreven voor het kunstwerk voor die functie. Ook het prognoserapport VenR (Rijkswaterstaat, 2022) noemt het belang van het beschouwen van einde functionele levensduur.

Deze inzet van functionele prestatie wordt in de iteratieve werkwijze toegepast om aan te tonen waar mogelijke toekomstige knelpunten voor het huidige object zitten in Stap 2 en daarmee ook als onderbouwing voor het meenemen dan wel afschrijven van oplossingsrichtingen en varianten die uitgaan van het huidige object.

Voorbeeld: Vaststellen knelpunten Hollandse IJsselkering

In Deltares (2022c) zijn knelpunten vastgesteld voor de casus Hollandse IJsselkering. Het vaststellen van de VenR-knelpunten in een (deel van het) netwerk vereist een integrale aanpak, waarin naast de functionele ook de technische prestatie en een vertaling naar economische aspecten wordt meegenomen om zo tot het identificeren van knelpunten in de tijd te komen (zie Figuur 2.2). Door met behulp van de iteratieve werkwijze op een systematische manier naar de invloed van (onzekere) drivers op het functioneren van een kunstwerk en diens rol in het netwerk te kijken, kunnen knelpunten in de tijd geïdentificeerd worden. In Deltares (2022c) is deze beschouwing uitgevoerd door middel van interviews en expertsessies. De technische prestatie is in die eerdere studie op een vergelijkbare manier uitgewerkt, door naar de mogelijke invloed van drivers op componenten te kijken. Bij het zoeken naar knelpunten van bestaande infrastructuur is het aanvullend van belang ook de technische prestatie in de tijd goed uit te werken.

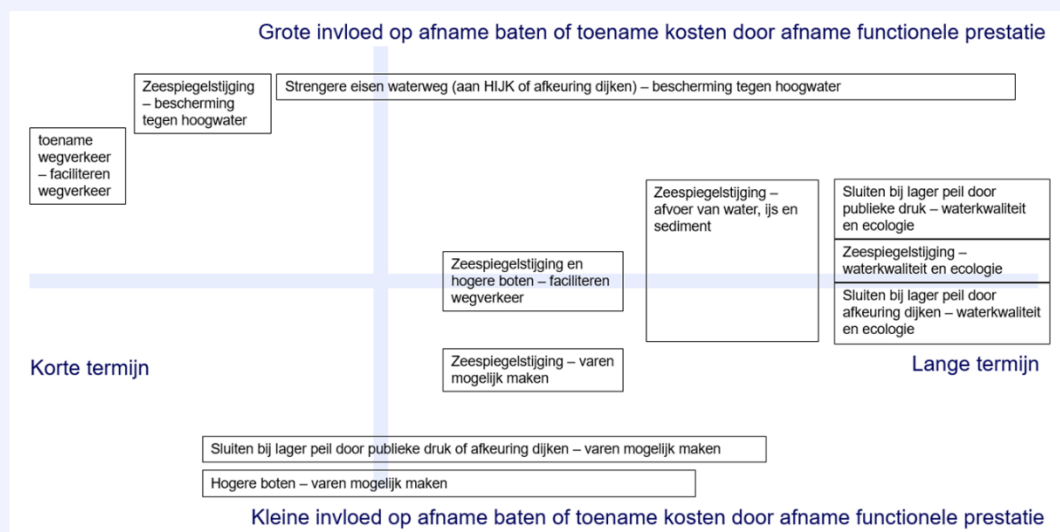


Figuur 2.2: De samenhang tussen functionele en technische prestatie in combinatie met een economische afweging leidt tot knelpunten in de tijd (Deltares, 2022c).

Er is in Deltares (2022c) een systeem- en objectanalyse gemaakt en een overzicht gecreëerd van functies, eisen en de functionele samenhang. De functionele prestatie van de huidige situatie is in die studie op basis van expert judgement door medewerkers van Rijkswaterstaat en Deltares bepaald. Hiermee is een eerste beeld gecreëerd om te bepalen hoe de huidige situatie wordt ervaren, als aanvulling op de gevonden functie-eisen en ter referentie voor toekomstige veranderingen.

Vervolgens is in de studie uit 2022 een database van drivers opgesteld om daarna op basis van expert judgement en bestaande informatie beargumenteerd weg te strepen welke drivers niet, beperkt of pas op de lange termijn van invloed zijn op de functionele prestatie van de Hollandse IJsselkering voor de verschillende functies. De combinatie van een driver en een functie die mogelijk zorgt voor knelpunten door afname van functionele prestatie zijn op een assenstelsel gezet (zie Figuur 2.3). Dit geeft inzicht in op

welke termijn grote en kleine knelpunten optreden. Bovendien creëert dit gedrag voor het uitwerken van die onderdelen die belangrijk zijn voor – in dit geval – de Hollandsche IJsselkering. Onderdelen zijn daarbij zoveel mogelijk gekwantificeerd, zie hiervoor Paragraaf 5.3 in onderliggend rapport en Vader et al. (2023).



Figuur 2.3: Knelpunten o.b.v. functionele prestatie voor de HJK voor de belangrijkste driver-functie combinaties, welke op basis van expert judgement op de assen zijn geplaatst (Deltares, 2022c).

2.2.3

Uitwerken, onderbouwen en afwegen van oplossingsrichtingen en VenR-varianten

Door de functionele prestatie van het netwerk of een kunstwerk voor verschillende oplossingsrichtingen (in de Regioanalyse) en VenR-varianten (in de Planfase) te kwantificeren kunnen deze vergeleken worden. Verschillen in functionele prestatie tussen oplossingsrichtingen dan wel varianten, zowel per locatie als in de tijd, kunnen ook leiden tot verschillen in functionele levensduur. Die verschillen kunnen vervolgens vertaald worden naar (gederfde) baten in een economische analyse. Eisen aan de functionele prestatie zijn wenselijk, maar ook in afwezigheid van eisen (of wensen) kunnen verschillende oplossingsrichtingen en varianten nog steeds naast elkaar gezet worden door de verschillen in functionele prestatie te vertalen naar baten.

Stap 4 van de iteratieve werkwijze richt zich op deze toepassing van functionele prestatie. Varianten en oplossingsrichtingen uit Stap 3 worden in deze stap uitgewerkt naar een verwacht beeld van de functionele prestatie op relevante plekken in het netwerk (zoals bij kunstwerken) op een bepaald tijdstip. Deze informatie vormt invoer voor Stap 5 van de iteratieve werkwijze.

Voorbeeld: Uitwerken, onderbouwen en afwegen varianten doorvaarbare Maasstuwen

In de studie naar de doorvaarbbaarheid van de toekomstige Maasstuwen (KpNK, 2022a) is de werkwijze (KpNK, 2024a) toegepast voor variantafweging. In die studie zijn vier varianten beschouwd voor vervanging van de huidige stuwen van de stuwcomplexen Linne, Roermond, Belfeld, Sambeek en Grave: wel of niet doorvaarbare stuwen in combinatie met het wel of niet verhogen van de kerende hoogte van de schutsluis.

Stap 2 tot en met 4 uit de iteratieve werkwijze zijn in die studie doorlopen in samenwerking met de Regionale Dienst. Gelijk aan de hierboven beschreven studie voor de Hollandse IJsselkering is de werkwijze ook voor de Maasstuwen gebruikt om op een beargumenteerde

en herleidbare manier te komen tot onderdelen die zouden kunnen leiden tot een verschil in baten of kosten tussen de varianten, of waar op dit moment niet voldoende kennis over is om dit te beoordelen. Op basis van verschillende bronnen is gekomen tot een set van functies voor de nieuwe stuwcomplexen met bijbehorende eisen, ambities of wensen (Stap 2). Vanuit klimaatverandering, socio-economische ontwikkelingen en beleidsbeslissingen zijn de drivers geïdentificeerd die naar verwachting invloed zullen hebben op de functionele prestatie van de nieuwe stuwen (Stap 2). Ook zijn de varianten beschreven (Stap 3). Een systematische uitwerking heeft geleid tot een selectie van functie-eisen, ambities of wensen voor de stuwen, waar de varianten mogelijk niet alle in gelijke mate aan kunnen voldoen (een 'Light' uitwerking (zie Paragraaf 2.3.1) van Stap 4). De uitkomst maakt het mogelijk een eerste vergelijking tussen de varianten te maken.

Vervolgens is voor enkele (kritieke) driver-functie combinaties die overbleven de toekomstige functionele prestatie gekwantificeerd voor de verschillende varianten (Stap 4). In Paragraaf 5.3.1 wordt op de verdere vertaling naar potentiële knelpunten ingegaan.

Tijdens deze eerdere studie zijn twee werksessies georganiseerd met verschillende experts. In de eerste sessie is daarbij aandacht besteed aan de functies van de stuwen en de drivers die invloed hebben op deze functies. Er is toen gezamenlijk verkend wat dit betekent voor de verschillen tussen de VenR-varianten. De tweede sessie was gericht op de eisen, ambities en wensen die bij de functies horen, en over de gedragenheid en prioritering van deze aspecten. Enkele inzichten die zijn ontstaan uit deze werksessies zijn:

- het werken met drivers en ook de combinaties tussen drivers, functies en varianten werkt verhelderend;
- voor een goede analyse van de objecten is ook kennis van het systeem heel belangrijk;
- het is belangrijk om een goed en breed overzicht te hebben van alle functies en de daarbij horende eisen voordat prioriteiten gesteld worden;
- input van zowel de beleidsmakers, beheerders als de gebruikers is nodig om tot een gedragen lijst van eisen, wensen en ambities te komen.

Tijdens de werksessies is gebleken dat de iteratieve werkwijze wordt gezien als een goede manier om tot uitwerking te komen om aan beleid voor te leggen ten behoeve van beleidskeuzes. De werksessies hebben geholpen met het verbeteren van deze methodiek en met het uitwerken van de concrete casus. Het is ook belangrijk gebleken om de methodiek vooral niet te ingewikkeld te maken.

2.3 Detailniveaus

De uitwerking van de stappen binnen de iteratieve werkwijze kan, afhankelijk van de vraag en de fase in het VenR-proces, op verschillende detailniveaus worden gedaan. Binnen het KpNK wordt daarom onderscheid gemaakt tussen de niveaus 'Light', 'Medium' en 'Heavy', zoals geïntroduceerd in KpNK (2020). In deze rapportage wordt een aanscherping op de eerdere definiëring van wat bij welk detailniveau hoort gedaan.

Een eerste verkenning kan gedaan worden met de 'Light'-variant. De 'Light' versie is een kwalitatieve en eenvoudige beoordeling op basis van expert judgement en snel vindbare kennis en informatie. In de beginfase van het besluitproces rondom VenR kunnen tools of werkvormen van het niveau 'Light' van grote waarde zijn. Hiermee kan worden verkend welke aspecten het meest bepalend zullen zijn bij het maken van een keuze voor een oplossingsrichting. Daarmee wordt dan meteen een gedragen en onderbouwde inschatting gemaakt van welke aspecten (tijdelijk) kunnen worden geparkeerd, en welke aspecten in een later stadium in meer detail onderzocht dienen te worden op de niveaus 'Medium' of 'Heavy', die meer kwantitatieve resultaten opleveren.

2.3.1 Light

Met 'Light' wordt het laagste detailniveau aangeduid. Het gaat hierbij om snelle analyses op basis van expert judgement en makkelijk beschikbare informatie. Hieronder worden bijvoorbeeld werk- en brainstormsessies verstaan. Het gaat hier vaak, maar niet uitsluitend, om kwalitatieve informatie. Hoofdstuk 4 focust zich op dit niveau.

2.3.2 Medium

Onder 'Medium' wordt een stap gezet richting kwantificeren. Hoofdstuk 5 van deze rapportage focust zich op dit niveau. Dit kan bijvoorbeeld gaan om het draaien van snelle numerieke modellen die een eerste inzicht geven in de functionele prestatie. Hieronder vallen bijvoorbeeld de Zeesluisformulering, Spuisluisformulering en het Zouttransportmodel (Deltares, 2022d). Niveau 'Medium' omvat in potentie een bereik aan detailniveaus, van bakjesmodellen tot het toepassen van eenvoudige formules op een datareeks.

2.3.3 Heavy

Met 'Heavy' wordt verwezen naar de inzet van gedetailleerde (numerieke) modellen (fijn rooster, kleine tijdstap en langere rekentijd, hogere nauwkeurigheid). Om bijvoorbeeld de stroming rondom een kunstwerk te bepalen, hier kan gedacht worden aan CFD⁵, D-HYDRO⁶ of iMOD⁷. Met name in een later stadium van het VenR-proces of bij ontwerp- en aanlegvraagstukken zullen dit type modellen gebruikt worden.

⁵ Bijvoorbeeld CFD software [Simcenter STAR-CCM+](#) of [OpenFOAM](#).

⁶ [D-HYDRO Suite 2D3D - Integrale aanpak van kustgebieden, estuaria, rivieren en meren | Deltares](#)

⁷ [iMOD - Flexibele en consistente sub-domein grondwater modelleringstechnieken | Deltares](#)

3 Stappenplan functionele prestatie

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van het stappenplan voor het bepalen van de functionele prestatie van een netwerk of kunstwerk. Dit stappenplan bestaat uit vragen die richting geven aan welke informatie nodig is om functionele prestatie in kaart te krijgen. Hiervoor is informatie uit verschillende Stappen van de iteratieve werkwijze nodig (zie KpNK (2024a)). De termen hieruit komen dan ook terug in onderstaand stappenplan. Onderstaande stappen 1 tot en met 6 met betrekking tot bepalen van de functionele prestatie (zie Paragraaf 3.1) zijn zelfs volledig onderdeel van Stap 2 van de iteratieve werkwijze (zie KpNK (2024b)).

Echter zoals genoemd in Paragraaf 2.2 kan functionele prestatie voor verschillende toepassingen en doelstellingen worden toegepast. Afhankelijk van de doelstelling is mogelijk niet elke stap van het stappenplan nodig. Bij enkele stappen wordt verwezen naar een verdiepende rapportage waarin meer (achtergrond)informatie beschikbaar is.

Om de functionele prestatie te bepalen wordt eerst een beeld gevormd van het kunstwerk, het omliggende watersysteem met andere kunstwerken en de drivers (stap 1 tot en met 5). Deze worden hieronder op kunstwerk-niveau toegelicht. Vervolgens wordt via de Light-methode gekeken naar de functionele prestatie. Indien nodig kan deze vervolgens gekwantificeerd worden via de Medium- (of zelfs de Heavy)-aanpak. Hoofdstuk 4 en 5 gaan uitgebreider in op de Light- en Medium-aanpak.

3.1 Bepalen functionele prestatie

1 Waar in het netwerk ligt het kunstwerk?

- Wat zijn de omliggende kunstwerken?
- Hoe gestuurd of gecontroleerd is de omgeving?
- Hoe groot is het gebied dat moet worden meegenomen?

Een goed begrip van het functioneren van het kunstwerk in het netwerk draagt bij aan het selecteren wat meegenomen moet worden bij het bepalen van functionele prestatie. Een eerste stap daarin is het maken van een overzicht van de fysieke omgeving. Voor het creëren van een overzicht kan het zinvol zijn om gebruik te maken van een geschematiseerde kaarten van het gebied (zie bijvoorbeeld Figuur F.1). In de rapportage over Stap 2 (KpNK, 2024b) wordt uitgebreider ingegaan op gebiedsomschrijving.

2 Welke functies voert het kunstwerk uit?

- Is er sprake van samenhang in het netwerk?
- Welke grenzen stelt deze samenhang aan de functie?

Een kunstwerk kan binnen het (deels overlappende) Hoofdwatersysteem en Hoofdvaarwegennet meerdere functies uitvoeren binnen de vier kerntaken van Rijkswaterstaat: waterveiligheid, voldoende water, schoon en gezond water, en vlot en veilig scheepvaartverkeer. De verschillende functies van één kunstwerk of kunstwerkcomplex kunnen daarbij ook samenhang hebben. Er kan sprake zijn van samenhang: tussen functies binnen één complex, tussen kunstwerken in één netwerk, en tussen kunstwerken voor verschillende functies van het watersysteem. In de rapportage over Stap 2 (KpNK, 2024b) wordt uitgebreider ingegaan op functies en de samenhang daartussen.

3 Welke eisen en wensen gelden er voor deze functies?

- Zijn per functie de eisen en wensen bekend?
- Zijn per functie de eisen/wensen gedefinieerd voor het netwerk of het object?
- Indien de eisen en wensen voor een functie ontbreken, kan er gebruik gemaakt worden van scenario's van eisen of een economische afweging?

Om de functionele prestatie te toetsen is een set eisen nodig waaraan de functies van het kunstwerk moeten voldoen. Deze eisen zijn vaak gedefinieerd voor het netwerk en niet voor het object zelf. Een voorbeeld hiervan is de eis aan zoutgehalte op een specifieke plek in een kanaal (KpNK, 2024l). Bij gebrek aan eisen kunnen er ook wensen gebruikt worden, of kan vanuit kosten en baten gedacht worden. In KpNK (2024c) wordt dit uitgebreider toegelicht.

4 Wat is de huidige functionele prestatie?

- In hoeverre is de prestatie voor de geïdentificeerde functies van het kunstwerk op dit moment voldoende?
- In hoeverre is de technische prestatie van het kunstwerk begrenzend voor de functionele prestatie van het kunstwerk?
- In hoeverre zijn omliggende kunstwerken in staat om een afname van de functionele prestatie bij het kunstwerk (tijdelijk) te compenseren?

Het kan zo zijn dat het kunstwerk in de huidige situatie aan al zijn functionele eisen voldoet, maar het is ook mogelijk dat er in de huidige situatie al sprake is van verminderde functionele prestatie. Een Light-beoordeling van functionele prestatie door middel van expertkennis of inspectierapporten kan hierbij helpen. Een verminderde technische prestatie (bijvoorbeeld als gevolg van slijtage) kan ook voor een beperking in de functionele prestatie zorgen. Een voorbeeld hiervan is een calamiteit waardoor de schuiven van een stuw tijdelijk niet bruikbaar zijn, waardoor bijvoorbeeld de functies peilbeheer en waterveiligheid niet uitgevoerd kunnen worden.

5 Welke drivers hebben invloed op het object?

- Welke drivers hebben invloed op het object en de samenhang rondom het object?
- Is het van belang om een combinatie van drivers mee te nemen?
- Welke data is er nodig om de invloed hiervan te kwantificeren?

Afhankelijk van de locatie van het kunstwerk (stap 1 van het stappenplan) en de verschillende functies die het kunstwerk binnen het netwerk uit moet voeren (stap 2 van het stappenplan) kunnen verschillende drivers invloed hebben op het functioneren van het kunstwerk. Een voorbeeld hiervan is de stijgende zeespiegel, die er voor kan zorgen dat er minder vaak kan worden gespuid onder vrij verval. Ook hier is het van belang om samenhang te beschouwen, zowel tussen drivers als functies, zowel binnen het kunstwerkcomplex als bij omliggende kunstwerken (KpNK, 2024b). KpNK (2024c) geeft voorbeelden van drivers en beschikbare databronnen. Het is in deze stap nuttig om een volledige lijst van mogelijke drivers te maken. In de vervolgstappen wordt gekeken welke (kritieke) driver-functie-combinaties verdere uitwerking nodig hebben.

6 Wat is de verandering van de functionele prestatie in de toekomstige situatie? (Light)

- Hoe verandert de toekomstige functionele prestatie onder invloed van de drivers?
- Gaat het om een toe- of afname van de functionele prestatie en hoe groot is deze verandering?
- Voor welke functie-driver-combinaties is de invloed van de driver op de toekomstige situatie nog onvoldoende bekend?

In deze stap wordt op een kwalitatieve manier geïnterviewd wat de invloed van drivers op de prestatie voor de verschillende functies is. Hiervoor kan expertkennis en beschikbare rapportages gebruikt worden. In Hoofdstuk 4 wordt een mogelijke, systematische aanpak hiervoor toegelicht.

Indien de functionele prestatie wordt bepaald voor het ontwikkelen van oplossingsrichtingen in een Regio-analyse, dan kan deze stap mogelijk gebruikt worden om te kijken of het voldoende is om alleen grootschalig (levensduurverlengend) onderhoud uit te voeren, of zelfs niets te doen. Als blijkt dat VenR noodzakelijk is, dan volgt stap 7 van dit stappenplan.

7 Indien wordt gekozen voor de oplossingsrichting VenR⁸: Welke varianten moeten dan worden overwogen?

- Wat zijn de varianten die worden overwogen?
- Zijn dit fundamenteel andere oplossingen voor een functie of gaat het om een aanpassing van een huidig object?
- In het geval van aanpassingen op meerdere locaties, is er samenhang hierin die moet worden meegenomen of kan worden benut?

KpNK (2024c) gaat in op het ontwikkelen van oplossingsrichtingen, varianten en de voorkeursvariant voor een kunstwerk (als onderdeel van het netwerk). Voor functionele prestatie is het vooral van belang om te identificeren of er sprake is van samenhang tussen aanpassingen en of het gaat om fundamenteel andere oplossingen voor een functie.

8 Wat is de verandering van de functionele prestatie van de varianten in de toekomstige situatie? (Light)

- Hoe verandert, onder invloed van drivers, de toekomstige functionele prestatie na implementatie van de varianten?
- Welke functie-driver combinaties zijn kritiek/belangrijk/onderscheidend voor de verschillende varianten om verder te kwantificeren?
- Over welke functie-driver combinaties is nog onvoldoende bekend?

Op basis van expertkennis kan een eerste inschatting worden gemaakt van hoe de verschillende varianten in de toekomst zullen presteren (zie ook stap 6, detailniveau 'Light'). Waar nog onvoldoende bekend is en de verandering tussen de varianten sterk onderscheidend is, kan gebruik gemaakt worden van een kwantificering (zie stap 9).

9 Wat is de verandering van de functionele prestatie van de varianten in de toekomstige situatie? (Medium)

- Welke rekenregels kunnen gebruikt worden?
- Is een deterministische aanpak hier voldoende?
- Wat zijn de fysieke dimensies van het object en hoe wordt het object ingezet?
- Welke invloed heeft een verandering in technische prestatie?

De laatste stap is het kwantificeren van de functionele prestatie van de verschillende varianten onder veranderende omstandigheden. Vaak kunnen basale fysische rekenregels al een goed beeld geven van de veranderingen in functionele prestatie (detailniveau 'Medium').

Hoofdstuk 5 geeft een verdere toelichting op het kwantificeren van functionele prestatie op een Medium-detailniveau. Voor het bepalen van de functionele prestatie van kunstwerken met de functies zoutbeheer of het bieden van leefgebied en migratieroutes voor vis zijn verdiepende rapportages opgesteld (KpNK, 2024l; KpNK, 2024k).

⁸ Stap 7 tot en met 9 van dit stappenplan voor het bepalen van functionele prestatie zijn ook toepasbaar bij keuze voor oplossingsrichting Aanleg. Dit wordt echter niet verder uitgewerkt in dit rapport.

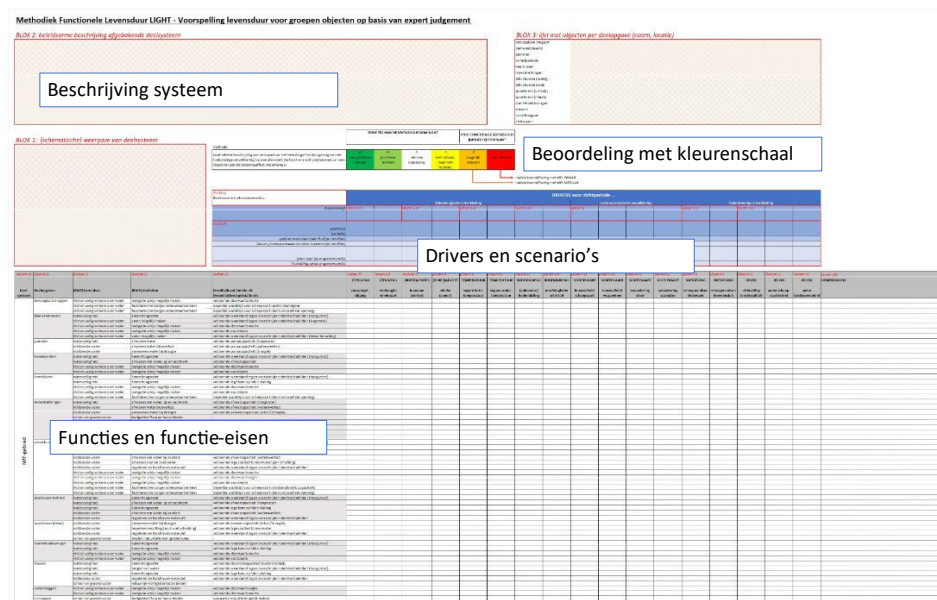
4 Kwalitatief beoordelen functionele prestatie

Functionele prestatie 'Light' gaat om snelle analyses op basis van expertkennis en makkelijk beschikbare informatie. Het gaat hier vaak, maar niet uitsluitend, om kwalitatieve informatie. Dit wordt onder andere toegepast in Stap 2 van de iteratieve werkwijze en in de eerste iteratie van de werkwijze. In sommige gevallen is uit deze 'Light'-verkenning al voldoende informatie beschikbaar om een specifieke functie (op dat moment) niet verder uit te hoeven werken. In andere gevallen onderbouwt een 'Light'-verkenning juist dat er verdere uitwerking nodig is.

4.1 Aanpak

In het voorgaande KpNK is een systematische manier ontwikkeld om op een 'Light'-niveau naar de huidige en toekomstige functionele prestatie van kunstwerken in een netwerk te kijken, en daarmee de meest kritieke of onderscheidende aspecten te identificeren. Deze methode is ontwikkeld in de casus Julianakanaal-Grensmaas (KpNK, 2019a), en verder doorgepakt in een stresstest objecten in het Hoofdwatersysteem (Rijkswaterstaat, 2020a) en een proof of concept (KpNK, 2020), die ook in een artikel in Water Matters is gepubliceerd (Kramer et al., 2021). Dit werd toen 'Methode Functionele Levensduur Light' genoemd. In dit rapport wordt dit echter ook 'functionele prestatie' genoemd.

Het gaat om een kwalitatieve methode om op basis van expertkennis en vereenvoudiging van de werkelijkheid tot een kwalitatieve inschatting van de verwachte restlevensduur van een kunstwerk te komen. De methode bestaat uit een overzicht van alle driver-functie combinaties van het desbetreffende object, waarin op basis van expertkennis aan elke combinatie een kleur wordt toegekend die de relevantie van die combinatie weergeeft. Het toepassen van deze methode vereist relatief weinig inspanning. Aandachtspunten voor de functionele prestatie komen vrij snel boven water en de inschattingen van de functionele levensduur kunnen met de verwachte technische prestatie worden vergeleken.



Figuur 4.1: Screenshot van een lege tabel voor bepaling van de huidige en toekomstige functionele prestatie onder invloed van drivers (aangepast uit KpNK (2020))

4.2 Voorbeeldtoepassingen

Deze aanpak is in verschillende casussen toegepast. Figuur 4.1 laat een voorbeeld zien om samen met experts de huidige en toekomstige functionele prestatie onder invloed van drivers te bepalen. In KpNK (2020) wordt ook een voorbeeld gegeven van toepassing voor het bepalen van de toekomstbestendigheid van verschillende varianten.

4.2.1 Maasstuwen

In het project rondom de Maasstuwen (KpNK, 2022a) is de methode gebruikt voor het opstellen van driver-functiecombinaties voor de afweging van alternatieven. Hierbij is gekeken naar het effect van drivers op de stuw en mogelijke effecten op de functie en ontwerpisen voor een nieuwe stuw. Vervolgens is gekeken naar verschillende varianten en is bepaald welke van deze aspecten onderscheidend zijn tussen de varianten en een kennisleemte bevatten. Op basis hiervan zijn keuzes gemaakt voor verdere kwantificering ('Medium') van de functionele prestatie van de varianten.

4.2.2 Julianakanaal

In het project rondom het Julianakanaal (KpNK, 2024f) is de methode met behulp van Excelsheets gebruikt in werksessies om de invloed van objecten op functies en de invloed van drivers op functionele prestatie te identificeren. De eerder ingezette aanpak van Excelsheets is in deze sessies aangevuld met een Python-script om de input van verschillende experts te combineren en makkelijker te kunnen filteren. Een dergelijke tool kan helpen in het beperken van en selecteren in de veelheid aan informatie die uit de methode kan volgen, maar heeft verdere uitwerking nodig om algemeen toepasbaar te zijn.

In aanvulling zijn de geïdentificeerde drivers gekoppeld met daaruit volgende wensen of noodzaken (identificatie van het tekort aan prestatie) en vervolgens gekoppeld aan verschillende maatregelen bij objecten. Per maatregel is vervolgens de resulterende prestatie gegeven. Deze driver-wens-maatregel-tabel is gebruikt om het brede scala aan maatregelen te ordenen voorafgaand aan de werksessie.

4.2.3 Stresstest objecten in Hoofdwatersysteem

Het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie (DPRA) heeft de ambitie om voor 2050 tot een water-robuuste en klimaatbestendige inrichting van Nederland te komen. Onderdeel daarvan is het programma Klimaatbestendige Netwerken (KBN), dat zich richt op het in beeld brengen van kwetsbaarheden en het voeren van risicodialogen. In 2019 is binnen Klimaatbestendige Netwerken een stresstest op de natte kunstwerken in het Hoofdwatersysteem uitgevoerd (Rijkswaterstaat, 2020a). Bij het identificeren van faalmechanismen van objecten en het ophalen van expertkennis bij de regio's is gebruik gemaakt van de Methode Functionele Levensduur.

5 Kwantificeren functionele prestatie

Er bestaan verschillende methoden om kwantitatieve en/of kwalitatieve inschattingen te maken van de functionele prestatie van kunstwerken. Verschillende casussen vanuit het KpNK hebben al opvolging gekregen in andere projecten. Dit laat duidelijk zien dat het kwantificeren van functionele prestatie breder toepasbaar en gewenst is in verschillende projecten. Zo zijn de ontwikkelingen rondom het kwantificeren van zoutindringing bij schutsluizen breder geland in bijvoorbeeld het Kennisprogramma Zeespiegelstijging en bij het bepalen van randvoorwaarden voor hydrodynamische modellen. De kwantificering voor afvoercapaciteit bij spuisluizen heeft parallel gelopen met sommen voor de Deltascenario's (Deltares, 2024c) en de ontwikkeling van een methode om de belasting op de bodembescherming te bepalen liep al toen er een spoedadvies werd gestart rondom de calamiteiten bij stuw Borgharen en stuw Lith in november 2023 (Deltares, 2023b).

In Paragraaf 5.1 wordt een overzicht gegeven van de in verschillende projecten ontwikkelde methoden voor het kwantificeren van de functionele prestatie. Vervolgens wordt in Paragrafen 5.2 en 5.3 respectievelijk voor projecten of casussen buiten en binnen het KpNK meer detail gegeven.

5.1 Overzicht casussen





In verschillende eerdere studies (zie ook Paragraaf 2.1) is functionele prestatie in verschillende mate van detail uitgewerkt, al werd in veel eerdere studies vaak alleen gesproken over functionele levensduur. Een overzicht van eerdere en binnen het KpNK uitgewerkte studies en casussen naar functionele prestatie voor verschillende type kunstwerken en functies wordt weergegeven in Tabel 5.1. In Bijlage A wordt per functie een gedetailleerder overzicht gegeven van eerdere studies, zowel als onderdeel van het KpNK als daarbuiten.

In deze voorgaande studies werd de functionele prestatie bekeken onder invloed van drivers (zeespiegelstijging, veranderende afvoer (lager en hoger), socio-economische ontwikkelingen en beleidsveranderingen). De focus tussen prestatie op object- of netwerkniveau verschilt per studie. Studies naar huidige functionele prestatie worden hier buiten beschouwing gelaten. Sommige studies maken gebruik van een probabilistische aanpak, terwijl andere een deterministische aanpak kiezen.

De functies die beschouwd zijn, dat wil zeggen scheepvaart, hoogwaterveiligheid, waterbeheer, zoutbeheer en het bieden van habitat en migratieroutes voor vis, zijn onderdeel van de vier kerntaken van Rijkswaterstaat voor het watersysteem (Hoofdwatersysteem en Hoofdvaarwegennetwerk). Een overzicht van de verschillende functies die tot deze kerntaken behoren is beschikbaar in de rapportage over Stap 2 van de iteratieve werkwijze (KpNK, 2024b). In het overzicht in Tabel 5.1 worden per kerntaak verschillende aspecten bekeken, zoals bijvoorbeeld:

- Vlot en veilig vaarwegverkeer: dimensies, wacht- en passagetijden
- Waterveiligheid: overschrijding waterstanden, golfoverslag, kerende hoogte
- Voldoende water: afvoercapaciteit, waterberging, waterstanden, zoutgehalten
- Schoon en gezond water: succesvolle vispassages, habitatgeschiktheid

Tabel 5.1: Overzicht van studies naar functionele prestatie per type kunstwerk en functies. In Bijlage A is per studie meer informatie te vinden.

		Kerntaken			
		 Vlot en veilig vaarwegverkeer	 Waterveiligheid	 Voldoende water	 Schoon en gezond water
Kunstwerken	Schutsluizen	<p>Dimensies, wacht- en passagetijden (HKV & Iv-Infra, 2014; HKV, 2015a)</p> <p>Wachttijden (ROBAMCI, 2017)</p> <p>I/C en wachttijd (Rijkswaterstaat, 2021c)</p> <p>Doorbaarheid, passagetijd en watergebruik (Deltares, 2021e; Deltares, 2021d)</p> <p>Beschikbaarheid voor scheepvaart (KpNK, 2022a); (Deltares, 2021b)</p>	<p>Kerende hoogte object (Deltares, 2021b)</p> <p>Faalkans (ROBAMCI, 2017)</p>	<p>Kerende hoogte object (Deltares, 2020a)</p> <p>Zoutlast (ROBAMCI, 2017)</p> <p>Zoutgehalten (KpNK, 2024l)</p>	
	Spuisluizen		<p>Overschrijding waterstand of golfoverslag (HKV & Iv-Infra, 2014; HKV, 2015a)</p> <p>Overschrijding waterstand (HKV, 2016; 2017a)</p> <p>Kerende hoogte object (Deltares, 2021b)</p>	<p>Overschrijding waterstand, afvoercapaciteit (HKV & Iv-Infra, 2014; HKV, 2015a)</p> <p>Overschrijding waterstand (HKV, 2016; 2017a)</p> <p>Afvoercapaciteit (Deltares, Bijlage C)</p>	
	Stuwen	<p>Doorbaarheid en watergebruik (Deltares, 2021e; Deltares, 2021d)</p> <p>Beschikbaarheid voor scheepvaart (KpNK, 2022a)</p>	<p>Overschrijding waterstand of golfoverslag (HKV & Iv-Infra, 2014; HKV, 2015a)</p>	<p>Overschrijding waterstand (peilbeheer) (HKV & Iv-Infra, 2014; HKV, 2015a)</p> <p>Overschrijding waterstand (inzet kering) (Deltares, Bijlage F)</p>	<p>Vispasseerbaarheid en habitatgeschiktheid (KpNK, 2024k)</p>
	Gemalen		<p>Overschrijding waterstand of golfoverslag (HKV & Iv-Infra, 2014; HKV, 2015a)</p>	<p>Overschrijding waterstand (HKV & Iv-Infra, 2014; HKV, 2015a)</p> <p>Afvoercapaciteit (ROBAMCI, 2016)</p>	<p>Optimalisatie pompsturing t.b.v. o.a. palingmigratie (Deltares, 2024d)</p>
	Stormvloedkeringen	<p>Stremming scheepvaart (Deltares, 2022c)</p> <p>Sluitfrequentie (Deltares, 2024b)</p>	<p>Overschrijding waterstand (Deltares, 2022c)</p> <p>Cumulatieve sluitingen (Deltares, 2024b)</p> <p>Bergingscapaciteit (Deltares, Bijlage C)</p>		

Aanvullend op de kunstwerken in Tabel 5.1 (schut- en spuisluizen, stuwen, gemalen en stormvloedkeringen) is in verschillende studies (HKV & Iv-Infra, 2014; HKV, 2015a; Rijkswaterstaat, 2021c; Deltares, 2021e) ook voor de vaste en de beweegbare bruggen naar de functionele prestatie voor de functie scheepvaart gekeken. In HKV & Iv-Infra (2014) is de functie scheepvaart ook beschouwd voor de onderdoorgangen en afmeervoorzieningen, de functie waterbeheer voor de sifons, duikers en hevels en waterreguleringswerken en de functie hoogwaterveiligheid voor de waterreguleringswerken. Een aantal van de studies die zijn weergegeven in Tabel 5.1 worden hieronder beknopt toegelicht: in Paragraaf 5.2 zijn enkele voorbeeldcasussen van buiten het KpNK kort samengevat. In Paragraaf 5.3 en de daaropvolgende subparagrafen worden enkele KpNK en aan KpNK gerelateerde studies toegelicht.

5.2 Voorbeeldcasussen buiten het KpNK

Buiten het KpNK zijn in verschillende projecten methodes ontwikkeld die aansluiten bij of verwant zijn aan het begrip functionele prestatie. In de volgende subparagrafen worden enkele voorbeelden hiervan kort samengevat.

5.2.1 **Dagelijkse en Extreme waarden Volkerak-Zoommeer (DEVO) en Zuyderzee (DEZY)**

HKV heeft de modellen DEVO (HKV, 2017a) en DEZY (HKV, 2016) ontwikkeld. DEVO en DEZY zijn probabilistische bakjesmodellen die waterstandsoverschrijdingslijnen kunnen berekenen in peilgestuurde systemen zoals het Volkerak-Zoommeer en het IJsselmeer. Er wordt hier rekening gehouden met de faalkans van de kunstwerken en stochasten van rivierafvoer, neerslag, waterstanden, windsnelheden en -richtingen en toe- en afvoer. Deze methodiek kan worden toegepast op de functies peilhandhaving en afvoer.

5.2.2 **Functionele Levensduur Scenario Analyse (FLSA)**

In het project Gevoeligheidstest Vervangingsopgave Natte Kunstwerken (GT-VONK) is de Functionele Levensduur Scenario Analyse (FLSA) ontwikkeld om het einde van de functionele levensduur van kunstwerken te bepalen voor de functies hoogwaterveiligheid (HKV & Iv-Infra, 2014) scheepvaart en zoetwaterbeheer (HKV, 2015a). Deze methodiek maakt gebruik van de Deltascenario's om op basis van de functie-eisen per kunstwerk een tijdsvenster te definiëren waarin einde functionele levensduur bereikt wordt. De invloed van socio-economische ontwikkelingen zijn in deze studies buiten beschouwing gelaten.

5.2.3 **Integrale Mobiliteitsanalyse (IMA)**

In de Integrale Mobiliteitsanalyse (IMA) zijn de knelpunten van het vaarwegensysteem in kaart gebracht. De beschouwde knelpunten bij sluisen, bruggen en stuwen zijn wachttijden, doorvaarthoogte en -breedte, waterbeschikbaarheid (i.r.t. schutdebiet), de verhouding tussen scheepvaartintensiteit en -capaciteit en aanzanding (specifiek voor stuwen).

5.2.4 **Klimaatbestendige Netwerken (KBN)**

In het project Klimaatbestendige Netwerken (KBN) zijn stresstests uitgevoerd om de effecten van mogelijke toekomstige klimaatomstandigheden op het hoofdvaarwegennetwerk (HVWN) te bepalen. In de stresstests zijn bedreigingen door droogte, zeespiegelstijging, hoge rivierafvoer en hitte op de functie scheepvaart beschouwd, zowel op kwalitatieve (zie Paragraaf 4.2.3) als kwantitatieve wijze.

5.2.5 **Risk and Opportunity Based Asset Management for Critical Infrastructure (ROBAMCI)**

In ROBAMCI is een systeembenadering toegepast met het doel om een programma met systeemmaatregelen op te stellen waarmee efficiencywinst kan worden bereikt over de levensduur van kunstwerken door (integraal) assetmanagement (ROBAMCI, 2016). In ROBAMCI wordt de nadruk gelegd op transparantie van het beslisproces over aanleg, beheer

en onderhoud en verbetering of vervanging. Het resultaat van deze aanpak bestaat uit drie elementen voor assetmanagement: risico (op schade), kosten (uitgaven) en de prestatie van het kunstwerk. In ROBAMCI zijn onder andere gemaal IJmuiden en zeesluis Farmsum behandeld als casus.

5.3 KpNK (of daaraan gerelateerde) voorbeeldcasussen

Binnen het KpNK en KpNK-gerelateerde projecten is aan verschillende voorbeeldcasussen gewerkt om een methodiek te ontwikkelen om functionele prestatie in de tijd te kwantificeren. Sommige casussen zijn als onderdeel van het KpNK uitgewerkt, en sommige casussen in samenwerking met het KpNK. Deze casussen zijn:

1. VenR-variantuitwerking voor de Maasstuwen (KpNK, 2022a), zie Paragraaf 5.3.1
2. Bathse spuisluis voor de functie waterbeheer, zie Paragraaf 5.3.2 en Bijlage C.
3. Noordersluis IJmuiden voor de functie zoutbeheer (KpNK, 2024l), zie Paragraaf 5.3.3
4. Kunstwerken rond het Haringvliet (Deltares, 2021b), zie Paragraaf 5.3.4.
5. Levensduur Hollandsche IJsselkering (Deltares, 2022c; Vader, et al., 2023), zie Paragraaf 5.3.5.
6. Achterland Europoortkering voor de functie waterberging, zie Bijlage E.
7. Optreden van negatief verval bij Stuw Hagestein, zie Paragraaf 5.3.7 en Bijlage F.
8. Bodembescherming bij stuwen, zie Paragraaf 5.3.8 en Bijlage H.
9. Stuwen voor de functie 'bieden migratieroutes en leefgebied vis', zie Paragraaf 5.3.9 en KpNK (2024k).
10. Functionele, technische en economische levensduur Maeslantkering, zie Deltares (2024b).

De verschillende casussen belichten verschillende aspecten van het kwantificeren van de functionele prestatie, namelijk:

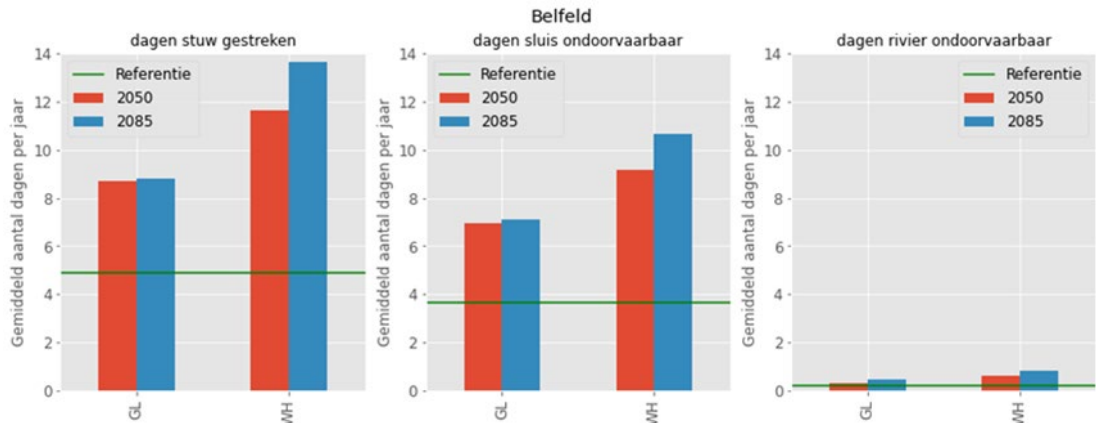
- Een aantal van deze casussen is een goed voorbeeld van functionele samenhang, zoals bijvoorbeeld casus 1 en 7. Bij de Maasstuwen bepaalt een serie stuwen en sluisen de doorvaarbaarheid van het traject en bij stuw Hagestein hebben verschillende kunstwerken invloed op de optredende waterstanden rondom de stuw.
- Casus 7 laat ook de invloed van een combinatie van drivers zien, zowel zeespiegelstijging als een afname van rivierafvoeren spelen een belangrijke rol.
- Andere casussen maken de link met het uitwerken van varianten (casus 1) en de economische afweging (casus 2).
- Casus 2, 3 en 9 zijn gebruikt om te toetsen hoe generiek toepasbaar de methoden zijn. In Paragraaf 6.2 worden de daaruit volgende landelijke kaarten besproken. Hoewel methoden relatief generiek zijn, vraagt de lokale context om aandacht bij het toepassen van een methode.
- Casus 7 en 8 verkennen de link tussen technische en functionele prestatie.

In de bijlagen van dit rapport worden de casussen die in het KpNK zijn uitgewerkt voor waterbeheer in detail behandeld. Voor zoutbeheer (KpNK, 2024l) en het bieden van leefgebied en migratieroutes voor vissen (KpNK, 2024k) zijn aparte verdiepende rapportages beschikbaar.

5.3.1 Maasstuwen

In KpNK (2022a) is een analyse gedaan naar de doorvaarbaarheid van de toekomstige Maasstuwen. Er is een systematische aanpak toegepast voor het uitwerken van vier VenR-varianten op basis van functie-driver combinaties. De functionele prestatie van de stuwen en schutsluisen is gekwantificeerd voor de functie scheepvaart (zie Paragraaf B.1 voor verdere toelichting). Door middel van een data-analyse is gekeken naar het aantal dagen dat een

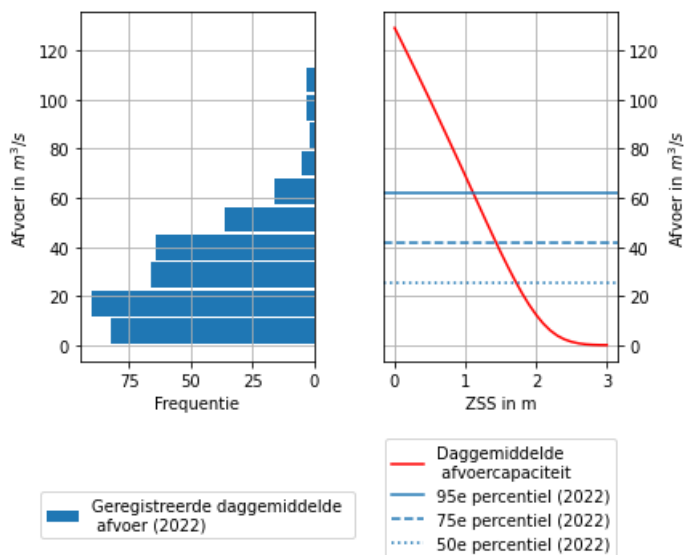
bepaalde afvoer voorkomt in een data-reeks van een bepaald klimaatscenario. Hiervoor zijn verschillende grenswaarden gekozen die inzicht gaven in de beschikbaarheid van het kunstwerk of een serie kunstwerken voor de scheepvaart. Een voorbeeld van de resultaten is gegeven in Figuur 5.1. De methodiekontwikkeling voor die studie viel onder het KpNK.



Figuur 5.1: Doorvaartmogelijkheden stuwcomplex Belfeld in verschillende scenario's in gemiddeld aantal dagen per jaar (KpNK, 2022a).

5.3.2 Spuisluizen en spuicapaciteit

Zeespiegelstijging zorgt voor een afname van de functionele prestatie van spuisluizen door een afname van de beschikbare spuicapaciteit (onder vrij verval). Dit is een gevolg van de afname van zowel de gemiddelde duur van een spuienster (de periode waarin gespuid kan worden) als het gemiddeld beschikbaar verval in een spuienster. In de ontwikkelde methode wordt de spuicapaciteit berekend op basis van eenvoudige afvoerformules en de gemeten waterstanden aan beide zijden van de spuisluis. De waterstanden aan de zeezijde worden vervolgens verhoogd met een toeslag voor zeespiegelstijging. Zo kan per zeespiegelstijgingsscenario bekeken worden hoe de functionele prestatie van een spuisluis verandert. De gevonden spuicapaciteit wordt hierbij gerelateerd aan de geregistreerde afvoer bij de spuisluis (zie Figuur 5.2). Een uitgebreidere beschrijving van de ontwikkelde methode is beschikbaar in Bijlage C. In KpNK (2024d) wordt de economische prestatie van de Bathse Spuisluis verkend voor de functie peilbeheer.



Figuur 5.2: De verandering in afvoercapaciteit bij zeespiegelstijging gerelateerd aan de daadwerkelijke afvoer (hier vergeleken met het jaar 2022). De berekening is gemaakt in het kader van methodiekontwikkeling en resultaten kunnen dus ook nader worden aangescherpt voor de Bathse Spuisluis.

5.3.3 Zoutbeheer bij Noordersluis IJmuiden

Voor de functie zoutbeheer zijn in het KpNK twee methodes uitgewerkt:

1. Het toepassen van een bakjesmodel dat de veranderingen in het zoutgehalte in voorhavens en kanalen kan kwantificeren. Deze aanpak maakt, naast de bakjes, gebruik van de zeeluisformulering⁹ (ZSF, ontwikkeld in KpNK 2017-2020) en de spuisluisformulering (SSF, ontwikkeld in KpNK 2021-2024). Het geheel van bakjes, ZSF en SSF wordt het ZoutTransportModel (ZTM) genoemd. Aan de hand van de verandering van de zoutgehaltenes van de bakjes kan een inschatting gemaakt worden van de hoeveelheid zoet water die nodig is om het bakje voldoende zoet te houden.
2. Het berekenen van de verandering in de watervraag om het watersysteem voldoende zoet te houden, onder de aanname dat het zoet-zout evenwicht in de huidige situatie acceptabel is en daardoor als referentiesituatie kan dienen. Deze aanpak maakt geen onderscheid tussen bakjes en beschouwd in plaats daarvan het systeem als geheel, en maakt daarom gebruik van de ZSF als standalone module. Deze aanpak is alleen geschikt voor schutsluizen die grenzen aan een kanaal.

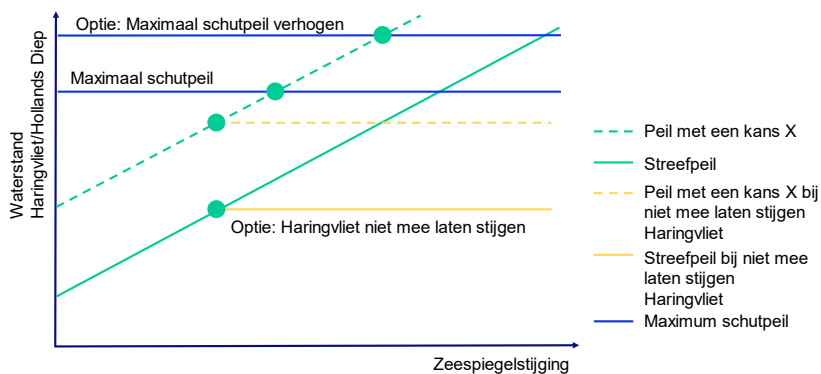
Beide methodes en de ontwikkeling daarvan (aan de hand van de casus Noordersluis IJmuiden) worden in Bijlage D toegelicht. In KpNK (2024I) is extra achtergrond informatie beschikbaar over deze casussen en de methodeontwikkeling. Ook worden daar de fysische principes, mogelijke maatregelen en varianten die te maken hebben met de functie zoutbeheer toegelicht. Omdat voor zoutbeheer geen eisen worden gesteld aan het object maar aan het systeem, is bij de ontwikkeling van deze methodes rekening gehouden met een vertaling tussen systeem- en objecteis.

5.3.4 Kunstwerken rond het Haringvliet

In Deltares (2021b) is gekeken naar het effect van zeespiegelstijging op de waterstanden op het Haringvliet en het Hollands Diep, waar veranderingen door zullen werken in het hele systeem van zuidwest-Nederland. De belangrijkste aanname hierin is dat het Haringvliet en Hollands Diep zullen meestijgen met zeespiegelstijging; dit omdat de rivier naar zee moet kunnen stromen en om, net als nu, zoutindringing via de Nieuwe Waterweg zoveel mogelijk te

⁹ [ZSF documentation — libzsf documentation](#)

voorkomen. Dit betekent dat hogere waterstanden op Haringvliet en Hollands Diep in de toekomst dus een grotere kans van voorkomen zullen krijgen. In Deltares (2021b) is voor de driver zeespiegelstijging, en daaraan gekoppeld de stijging van het peil van het Haringvliet, gekeken naar de terugkeertijd van het maximum verval bij de schutsluizen, de kerende hoogte van de deuren van de schutsluizen en de kerende hoogte van de inlaatsluizen bij de Volkeraksluizen. Hiervoor is onder bepaalde aannames data vanuit Hydra-NL (HKV, 2017b) gebruikt en aangepast. In Bijlage G is een uitgebreidere toelichting te vinden.



Figuur 5.3: Schematische weergave van de aanpak in Deltares (2021b). De figuur geeft inzicht in de gevolgen van zeespiegelstijging voor het Haringvliet bij twee verschillende maatregelen: het verhogen van het maximaal schutpeil en het niet mee laten stijgen van het Haringvliet (Deltares, 2021b).

5.3.5 Hollandsche IJsselkering

In Deltares (2022c) is een raamwerk ‘beslismomenten¹⁰ VenR’ opgesteld en doorlopen aan de hand van de casus Hollandsche IJsselkering (HIJK). Dit raamwerk heeft een sterke link met de KpNK-werkwijze. In deze studie is zowel de technische als functionele prestatie en de economische afweging meegenomen. Door dit raamwerk op basis van expertkennis te doorlopen met de doelstelling ‘identificeren knelpunten’, is op een systematische manier een selectie gemaakt van de driver-functie combinaties die naar verwachting invloed zullen hebben op de technische en functionele prestatie van de HIJK. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen kleine/grote invloed en korte/lange termijn. Na het identificeren van de belangrijke functie-driver combinaties is de functionele prestatie gekwantificeerd in Vader et al. (2023). De driver zeespiegelstijging is geïdentificeerd als de dominante driver voor het bereiken van einde (functionele) levensduur voor de functies hoogwaterveiligheid en scheepvaart. Hydra-NL is in die studie gebruikt voor de kwantificering van de functionele prestatie.

5.3.6 Bergingscapaciteit

Wanneer stormvloedkeringen sluiten moet het achterland voldoende bergingscapaciteit hebben om rivierwater en eventueel lokale neerslag tijdelijk te bergen. Ook overstortend debiet zorgt er voor dat de waterstand in het achterland toeneemt tijdens een sluiting. Afhankelijk van de bergingscapaciteit van het achterland en het mogelijk samenvallen van een stormvloed met verhoogde rivierafvoer, zullen maatregelen moeten worden getroffen om te voldoen aan de waterveiligheidsnormen. De kans op het overlappen van een storm en een extreem neerslag-evenement is daarentegen klein, omdat voor een dergelijk neerslagevenement een stagnerend weersysteem nodig is (Deltares, 2022b). De kans dat na afloop van een extreem neerslagevenement een storm optreedt is wel aanwezig. Een van de maatregelen die in dat geval getroffen kan worden is een maalstop, echter zorgt dat mogelijk voor wateroverlast.

Met behulp van waterstandsreeksen kan gekwantificeerd worden hoe lang de bestaande bergingscapaciteit voldoet (op basis van het oppervlak van de beschikbare bergingsgebieden

¹⁰ In deze rapportage wordt dit verder aangeduid als ‘knelpunten’ in plaats van ‘beslismomenten’.

en de daar maximaal toegestane waterstand) om een bepaalde combinatie van rivierafvoer, neerslag en overstort te bergen. Dit concept is uitgewerkt in Bijlage C voor de interactie tussen berging in het Rijn-Maasmondingsgebied en de Maeslant- en Hartelkering.

5.3.7 **Stuw Hagestein**

Door de driver zeespiegelstijging neemt de waterstand benedenstrooms van kunstwerken met een open verbinding naar zee toe. Daarnaast zorgt verdere afname van lage rivierafvoeren voor lagere waterstanden bovenstrooms van deze stuwen. Dit kan leiden tot negatief verval (een hogere waterstand benedenstrooms dan bovenstrooms). Aangezien de vizierstuwen niet ontworpen zijn voor negatief verval, zullen deze mogelijk verschillende functies verminderd kunnen uitvoeren. Met behulp van de ontwikkelde methode is gekeken naar het minimum verval (negatief wanneer kleiner dan 0 cm) en, als negatief verval optreedt, wat de gemiddelde en maximale duur zijn van het optreden hiervan voor stuw Hagestein. Hiertoe is meetdata van de waterstanden gebruikt om inzicht te krijgen in de huidige situatie. Vervolgens is met beschikbare data over de boven- en benedenstroomse waterstand bij klimaatverandering inzicht verkregen in welke mate negatief verval bij stuw Hagestein met klimaatverandering voorkomt. In Bijlage F wordt de methode in meer detail uitgewerkt.

5.3.8 **Overstortend debiet**

Door zeespiegelstijging en piekafvoeren zal de hoeveelheid overstortend debiet in de toekomst toenemen en daarmee mogelijk een overbelasting op de bodemverdediging achter (overstortende) kunstwerken (in kustwateren) kunnen veroorzaken. Overstortend debiet heeft een aantal concrete gevolgen, waaronder een aanval op de bodemverdediging achter het kunstwerk en een toename van de waterstand, welke kunnen leiden tot (technisch) falen van het kunstwerk. Met behulp van watersprongrelaties en waterstandsreeksen kan worden gekeken of er direct achter een overstortend kunstwerk een watersprong ontstaat en welke bodemsnelheden er ontstaan. Deltares heeft hiervoor eerder een 'rapid assessment tool' ontwikkeld (Weiler, Verhaart, Nogueira, & O'Mahoney, 2019) die nu is toegepast om de functionele prestatie te kwantificeren. Deze methode is in detail uitgewerkt in Bijlage H.

5.3.9 **Biodiversiteit**

Biodiversiteit is een breed begrip; in het KpNK is qua kwantificering nu gefocust op de vispasseerbaarheid van stuwen en de habitatgeschiktheid in waterlichamen die worden afgebakend door stuwen. De aanwezigheid van kunstwerken heeft namelijk een negatieve invloed op de vismigratie door het verbreken van de verbinding tussen waterlichamen, en de habitatgeschiktheid van de tussenliggende waterlichamen, bijvoorbeeld door het gebrek aan stromend water. Om een beter inzicht te krijgen in de passeerbaarheid van stuwcomplexen heeft Deltares in 2021 een analysetool ontwikkeld waarmee het passagesucces van verschillende vissoorten gekwantificeerd kan worden voor de stuwcomplexen in de Maas en de Nederrijn-Lek. Deze kwantificering is gebaseerd op expertkennis, observaties en literatuur en is afhankelijk van de aanwezige natte kunstwerken, de rivierafvoer, de vissoort en de richting van de migratiebeweging (stroomop- of afwaarts). In KpNK (2024k) is met behulp van deze analysetool en de KRW-Verkenner Rijkswateren (Deltares, 2013) onderzocht hoe de functionele prestatie voor deze functie gekwantificeerd kan worden. Met behulp van deze tool kan de invloed van de driver veranderende rivierafvoer beschouwd worden en kan ook het gevolg van verschillende kunstwerksamenstellingen doorgerekend worden.

6 Visualiseren functionele prestatie

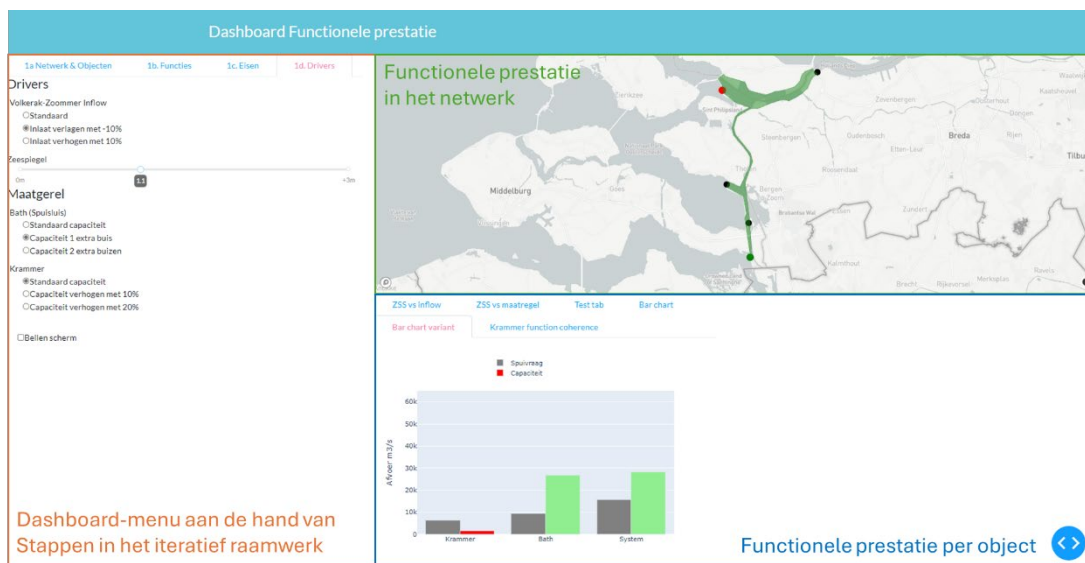
Er zijn verschillende manieren om functionele prestatie weer te geven. Het doel van deze statische en interactieve visualisaties is om de interpretatie van (complexe) beslisinformatie die afkomstig is uit de verschillende methodieken inzichtelijk te maken. Daarmee ondersteunen zij de werkvormen die nodig zijn in een gestroomlijnd en transparant proces van besluitvorming, en dragen ze nadrukkelijk bij aan een gedragen besluit.

In het KpNK is gewerkt aan verschillende vormen van statische visualisaties (zoals beschreven in KpNK (2024g)), een interactief beslisinformatiedashboard (zie Paragraaf 6.1) en een set van landelijke kaarten (zie Paragraaf 6.2).

6.1 Interactieve visualisaties (dashboard)

Binnen het KpNK is ook gewerkt aan een prototype van een interactief visualisatie-dashboard waar de stappen van de werkwijze doorlopen kunnen worden (KpNK, 2024f). In het prototype kan er bijvoorbeeld voor specifieke casussen de verandering in functionele prestatie bekeken worden.

Het doel van dit dashboard is het beschikbaar maken van een generiek toepasbaar, digitaal platform dat visueel inzicht geeft in de beschikbare en soms complexe informatie over netwerkprestaties in de huidige situatie maar ook bij kansrijke VenR-oplossingsrichtingen. Het dashboard kan vanaf het beginstadium van het besluitvormingsproces faciliteren dat de besluitnemers op transparante en gedragen wijze tot een onderbouwde VenR-investeringsbeslissing kunnen komen.



Figuur 6.1: Screenshot van het prototype van het visualisatie-dashboard.

6.2 Landelijke kaarten

Binnen het KpNK is gewerkt aan drie landelijke kaarten van de functionele prestatie voor peilbeheer, zoutbeheer en biodiversiteit op basis van de casussen uit Hoofdstuk 5. Deze kaarten laten voor verschillende complexen de functionele prestatie zien. De kaarten zouden bijvoorbeeld ook opgenomen kunnen worden in het visualisatie-dashboard en zo interactief bekeken kunnen worden. Op die manier zou er bijvoorbeeld naar het effect van aanpassingen

aan het complex of een andere eis gekeken kunnen worden. Het opnemen van de kaarten in het prototype van het Visualisatie-dashboard is echter niet voorzien in het KpNK. De kaarten die in deze rapportage zijn gegeven zijn bedoeld ter inspiratie.

6.2.1 Doel landelijke kaarten

Het doel van de landelijke kaarten is om een eerste inzicht (basisinformatie) te verschaffen in de verandering van functionele prestatie van een bepaald type object onder bepaalde drivers. De kaarten bevatten een kwantificering van de verandering in functionele prestatie die wordt gevisualiseerd in brede bandbreedtes.

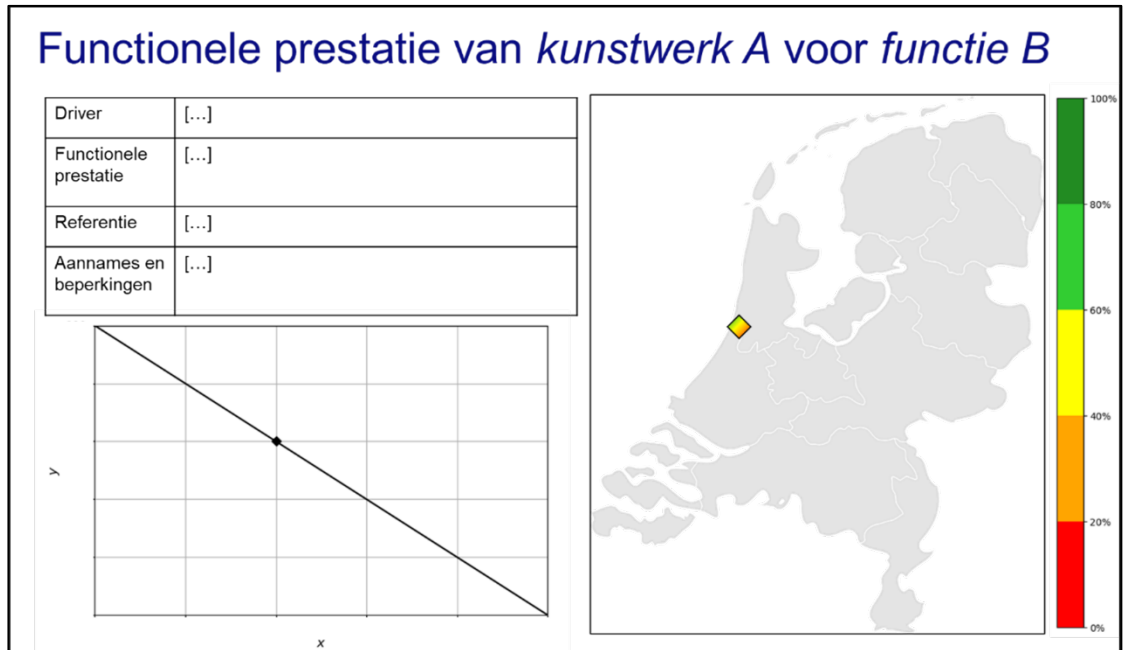
De kaarten kunnen ingezet worden als een Light-toepassing van functionele prestatie, waar het toepassen van de rekentools achter de kaarten voor verdere kwantificering als 'Medium' worden gezien. Binnen een Vernieuwingsproces worden verschillende landingsplekken gezien.

- In de Prognosefase:
 - Om aan te geven wanneer investeringen in de kunstwerken mogelijk nodig zijn.
- In de Regio-analyse (en deels ook in de Planfase):
 - Om een eerste inzicht te geven welk proces (BenO, VenR of Aanleg) nodig is om te voldoen aan de eisen.
 - Om inzicht te geven in de omgevingscontext rond specifieke kunstwerken
 - Om belangrijke functie-drivercombinaties te inventariseren.

6.2.2 Toelichting opzet landelijke kaarten

In Figuur 6.2 wordt de opzet van de landelijke kaarten voor functionele prestatie weergegeven. De weergave op de landelijke kaart geeft over het algemeen één situatie in de tijd weer, gecombineerd met een grafiek die de functionele prestatie over de tijd laat zien. Het specifieke moment dat op de kaart is weergegeven wordt in deze grafiek ook gemarkeerd. Omdat de functionele prestatie van verschillende kunstwerken en verschillende functies allemaal op een andere manier berekend of getoetst worden, wordt in de weergave in Figuur 6.2 ook een kader met extra informatie weergegeven over de volgende aspecten:

- Driver: welke driverinvloed is gekwantificeerd;
- Functionele prestatie: op welke manier wordt de functionele prestatie uitgedrukt;
- Referentie: ten opzichte van welke situatie of uitgangspunt wordt de prestatieafname gekwantificeerd;
- Aannames en beperkingen: de aannames waaronder de functionele prestatie gekwantificeerd is en de beperkingen van de toegepaste rekenmethode. Uitgebreide toelichting is te vinden in deze rapportage.



Figuur 6.2: Basisopzet van de visualisatie van functionele prestatie op een landelijke kaart.

De informatie die weergegeven wordt in de kaarten is bedoeld voor een Light-toepassing, daarom wordt er in de figuren gebruik gemaakt van brede bandbreedtes met een vaste kleurenschaal van groen naar rood. Door een bandbreedte te geven, in plaats van een specifieke waarde, wordt het voor de gebruiker duidelijk dat de toepassing als 'Light' bedoeld is en dat de weergegeven prestatie niet meer dan een indicatie geeft.

Daarmee is de keuze gemaakt om de functionele prestatie voor verschillende functies op een zelfde manier weer te geven. De gebruikte eenheid van functionele prestatie verschilt wel per functie. Hier is voor gekozen omdat de verschillende functies te zeer van elkaar verschillen en het gelijk trekken van de eenheid onduidelijk maakt wat wordt weergegeven.

Er is wel voor elke kaart gekozen om de prestatie uit te drukken in een percentage ten opzichte van een eis of de huidige prestatie. Zo kan de eenheid teruggebracht worden tot de verandering van functionele prestatie bij een bepaalde invloed van een driver (bijv. 1 m zeespiegelstijging) ten opzichte van de huidige functionele prestatie of een eis. Deze verandering wordt weergegeven op een schaal van 100% (volledige prestatie t.o.v. huidige vraag/eis) tot 0% (geen prestatie t.o.v. huidige vraag/eis).

De kaarten laten de functionele prestatie onder een bepaalde mate van invloed van een driver zien (bijv. bij een bepaalde mate van zeespiegelstijging). Om aanvullende informatie te geven bij de kaarten kan de verandering van functionele prestatie over tijd (onder invloed een driver) weergegeven worden in een grafiek (zoals linksonder in Figuur 6.2).

De kaarten zijn gemaakt op basis van de methodes zoals beschreven in Hoofdstuk 5. Het gaat hierbij dus om eerste-orde-berekeningen op basis van eenvoudig beschikbare meetgegevens, gegevens van de complexen en simpele aannames rondom de drivers.

6.2.3 Peilbeheer

Figuur 6.3 laat de landelijke kaart voor spuisluizen voor de functie peilbeheer onder de driver zeespiegelstijging zien. Dit is gebaseerd op de methodeontwikkeling en berekeningen in Paragraaf 5.3.2 en Bijlage C. Op deze resultaten is een bewerking gedaan om van de grafieken naar een prestatie per mate van zeespiegelstijging te gaan. Hiervoor is gemeten afvoer over één jaar (spuivraag) met de berekende spuicapaciteit gecombineerd.

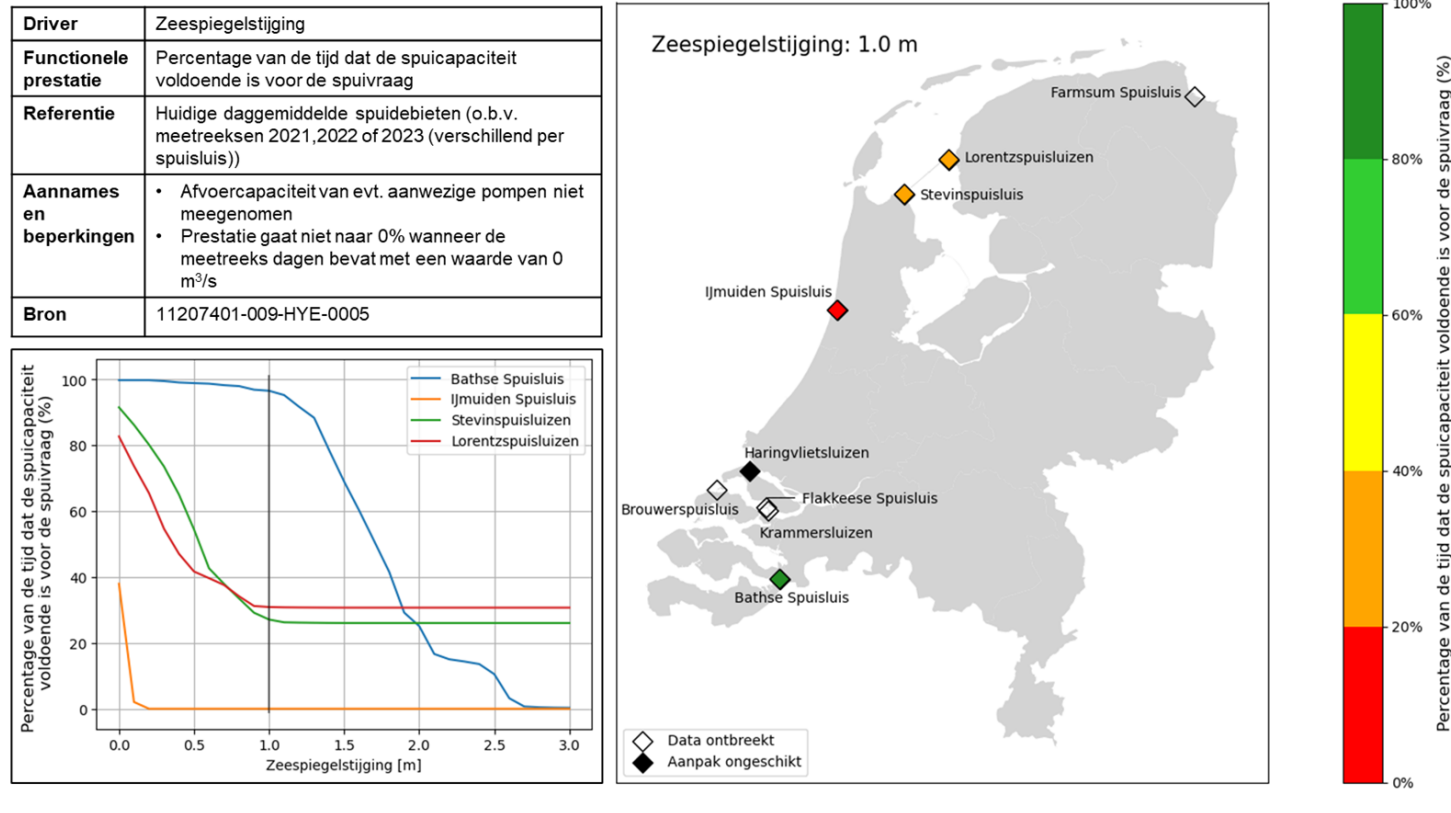
Deze spuicapaciteit wordt berekend op basis van eenvoudige afvoerformules en de gemeten waterstanden aan beide zijden van de spuisluis. De waterstanden aan de zeezijde worden vervolgens verhoogd met een toeslag voor zeespiegelstijging. De gemeten afvoerreeks wordt omgezet tot één gemiddelde waarde per dag. De spuicapaciteit wordt omgezet tot één gemiddelde waarde over het jaar in de berekende potentiële spuicapaciteitsreeks. Vervolgens kan worden berekend hoeveel dagen de daggemiddelde spuiafvoer kleiner was dan de gemiddelde spuicapaciteit per zeespiegelstijgingsscenario. Dit wordt vervolgens omgezet tot een percentage van de tijd waarin de gemiddelde spuicapaciteit voldoende was: 100% (alle dagen) tot 0% (geen enkele dag). Zo kan per zeespiegelstijgingsscenario bekeken worden hoe de prestatie per spuisluis veranderd.

Deze aanpak heeft enkele aandachtspunten bij de interpretatie van de figuren:

- De gemiddelde spuicapaciteit per dag wordt vergeleken met één daggemiddelde afvoervraag over één jaar aan data. Zoals in het geval van de spuisluizen in de Afsluitdijk (Bijlage C.3.2) lijkt het resultaat te suggereren dat de spuicapaciteit op dit moment al niet elke dag voldoende is. Dit neemt echter variaties over het jaar of toegestane peilvariaties niet mee. Daarnaast is het resultaat sterk afhankelijk van de gekozen jaarreeks aan data.
- De afvoermeeptreksen kunnen dagen bevatten waarin er niet gespuid wordt. Op deze dagen zal altijd voldaan worden aan de spuicapaciteit, ook als deze tot 0 zakt. In de grafiek linksonder in Figuur 6.3 zorgt dit dat de enkele lijnen niet verder zakken bij een verdere toename in zeespiegelstijging.
- De methode geeft geen inzicht in het tekort aan spuicapaciteit op de dagen dat de spuisluis niet voldeed.
- De kaart geeft geen inzicht in de aanwezigheid van andere afvoermiddelen naast de spuisluis. In het geval van IJmuiden zijn pompen aanwezig naast de spuisluis die het tekort aan spuicapaciteit kunnen opvangen en bij andere complexen zijn ook pompen aanwezig of gepland.
- Veranderingen in de afvoervraag zijn niet meegenomen.

Tot slot, in deze casus is alleen gekeken naar spuisluizen die verbonden zijn met de zee waar zeespiegelstijging een belangrijke driver is. De spuisluis in Farmsum is vanwege te beperkte beschikbare gegevens niet meegenomen, net als de spuisluis in de Brouwersdam. De nieuwe geplande spuiokers bij Den Oever en het nieuwe spuumiddel bij de Krammersluizen zijn niet meegenomen in dit figuur. De Haringvlietsluizen zijn vanwege de huidige open verbinding met de zee en de hoogwaterveiligheidsfunctie weggelaten uit de figuur.

Functionele prestatie van spuisluizen voor peilbeheer



Figuur 6.3 Voorbeeld van een landelijke kaart van de functionele prestatie van spuisluizen voor peilbeheer bij 1 m zeespiegelstijging. Deze kaart kan voor verschillende maten van zeespiegelstijging gegenereerd worden.

6.2.4 Zoutbeheer

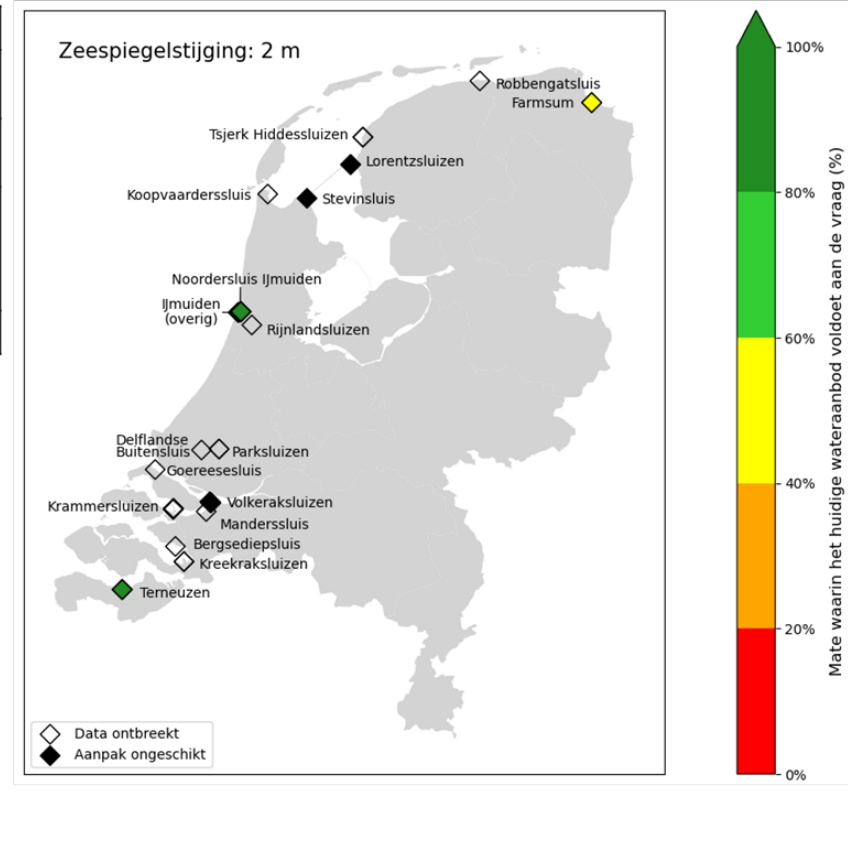
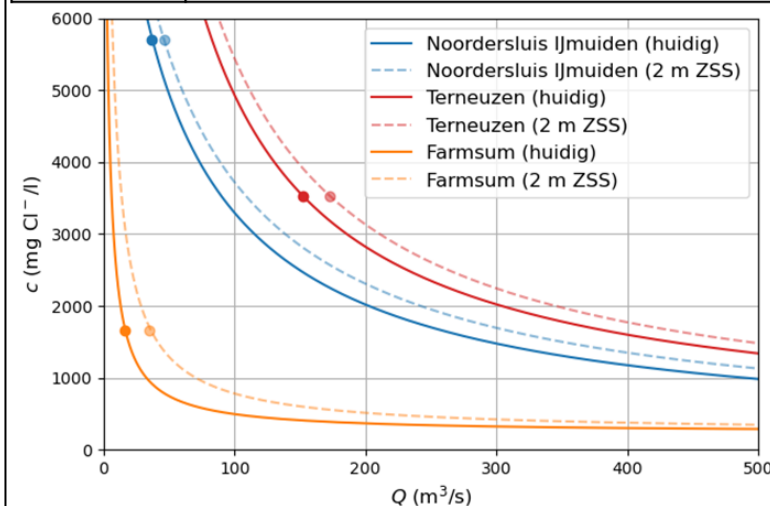
Figuur 6.4 geeft de functionele prestatie van de Noordersluis (IJmuiden) en de sluisen in Terneuzen en Farmsum zien voor de functie zoutbeheer onder invloed van de driver zeespiegelstijging. De Zeesluisformulering-(ZSF)-berekeningen waarop de weergegeven kwantificering gebaseerd zijn worden uitgebreid toegelicht in een verdiepende rapportage (KpNK, 2024). De toegepaste berekeningen zijn alleen geschikt voor sluisen die grenzen aan een kanaal. De sluisen waarvoor deze aanpak niet geschikt is, zoals de sluisen in de Afsluitdijk, zijn in Figuur 6.4 gemarkeerd met een zwarte ruit. De berekeningen maken gebruik van historische reeksen (2018-2023) van waterstanden, zoutgehaltes en scheepvaartdata. De sluiscomplexen (zowel in beheer van Rijkswaterstaat als waterschappen) waarvan (nog) niet alle data beschikbaar was zijn gemarkeerd met een open ruit in Figuur 6.4.

De functionele prestatie wordt op de landelijke kaart in Figuur 6.4 uitgedrukt als de mate waarin aan de zoetwatervraag voldaan wordt. In deze weergave wordt ervan uit gegaan dat het evenwicht of gemiddelde dat volgde uit de historische reeksen een acceptabel zoet-zoutevenwicht is. Deze keuze is gemaakt omdat de eisen aan zoutindringing altijd in het watersysteem liggen en niet direct bij de sluis, en juist dat laatste is wat met de ZSF berekend kan worden. Dit evenwicht is een bepaald zoutgehalte direct aan de binnenzijde van de sluis dat ontstaat door een combinatie van zoutindringing en afvoer. Door de driver zeespiegelstijging neemt de zoutindringing toe, waardoor er meer afvoer nodig is om de huidige balans in stand te houden. Deze toename in zoutindringing en daardoor toenemende vraag naar zoet water resulteert in de afname van de functionele prestatie van de sluisen voor de functie zoutbeheer. De functionele prestatie wordt nu uitgedrukt als de mate waarin de hoeveelheid rivierafvoer die in de huidige situatie voor het gewenste zoet-zoutevenwicht zorgt, onder toekomstige veranderingen nog aan de veranderende watervraag kan voldoen die dit evenwicht in stand kan houden.

De functionele prestatie in de grafiek in Figuur 6.4 laat de verschuiving van het evenwicht tussen verschillende chloridegehaltes en de daarvoor benodigde rivierafvoer zien in de huidige situatie (doorgetrokken lijn) en bij 2 m zeespiegelstijging (stippellijn). Het huidige evenwicht tussen zoutgehalte en rivierafvoer bij de complexen, wat als referentie geldt op de landelijke kaart, wordt in deze grafiek gemarkeerd met een ronde marker.

Functionele prestatie van zeesluizen voor zoutbeheer

Driver	Zeespiegelstijging
Functionele prestatie	Mate waarin het huidige wateraanbod voldoet aan de (toekomstige) vraag
Referentie	De huidige balans tussen zoet- en zout water (o.b.v. meetreeksen 2018-2023) vlakbij de sluis
Aannames en beperkingen	<ul style="list-style-type: none"> Aanpak niet geschikt voor zeesluizen die aan meren grenzen Eisen liggen in het watersysteem, niet vlakbij de sluis
Bron	11207401-021-HYE-0012



Figuur 6.4: Voorbeeld van een landelijke kaart van de functionele prestatie van schutsluizen voor zoutbeheer bij 2 m zeespiegelstijging. Deze kaart kan voor verschillende maten van zeespiegelstijging gegenereerd worden.

6.2.5 Biodiversiteit

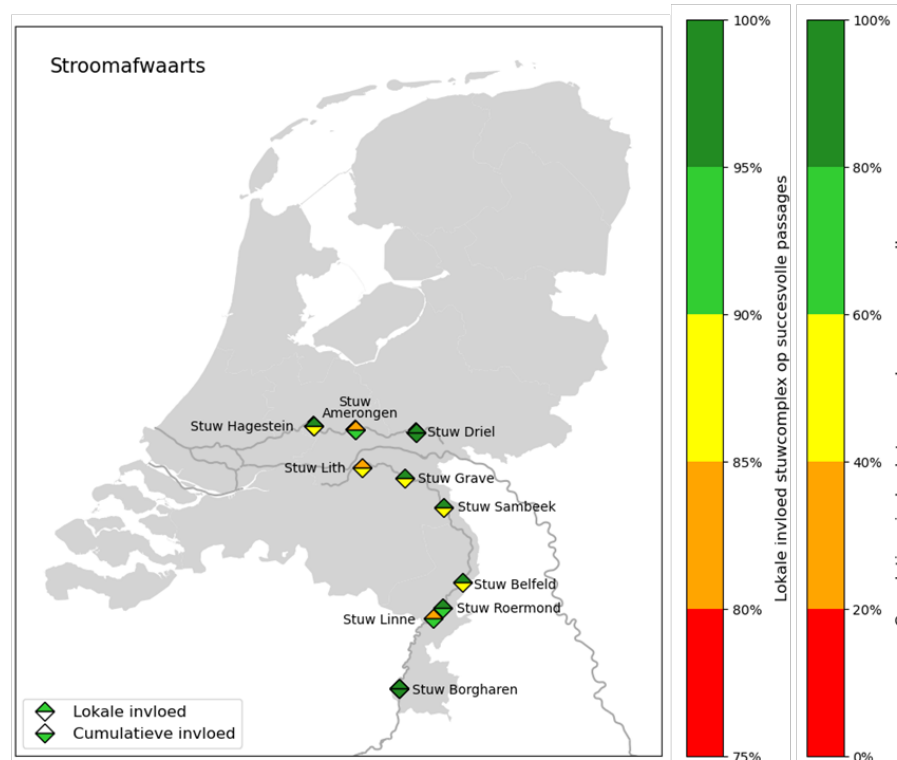
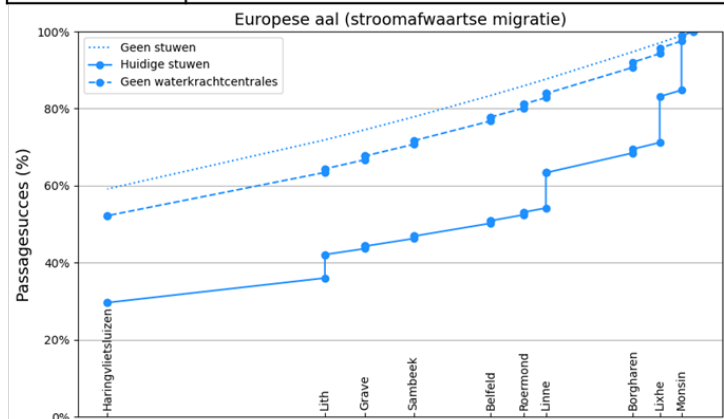
Figuur 6.5 geeft de functionele prestatie van alle stuwcomplexen in de Rijkswateren weer voor de functie vismigratie. De berekeningen waarop de weergegeven kwantificering gebaseerd is worden uitgebreid toegelicht in een verdiepende rapportage (KpNK, 2024k). In deze figuur wordt de functionele prestatie als functie van de tijd weergegeven vanuit het perspectief van het afleggen van de migratieroute – niet als functie van een driver. De ingezette rekentool (Analysetool Vispasseerbaarheid) heeft de mogelijkheid om enkele afvoerscenario's door te rekenen, echter is de invloed van deze driver beperkt.

De verschillen in lokale invloed tussen de stuwcomplexen is klein – het cumulatieve effect van een serie stuwcomplexen is wat leidend is voor de functionele prestatie van stuwcomplexen voor vismigratie. Om die reden zijn op de landelijke kaart in Figuur 6.5 beide aspecten weergegeven: lokaal (bovenste ruit, ▲) en cumulatief (onderste ruit, ▼). Voor het lokale effect is vanwege de kleine verschillen ook de schaal aangepast naar 100%-75% omdat de gekozen bandbreedtes de verschillen niet goed weer kunnen geven.

Het cumulatieve effect voor de Maas is ook weergegeven in grafiek in Figuur 6.5. Het gekwantificeerde passagesucces gebruikt de landsgrenzen als startpunt. Dit betekent dat op de landsgrenzen sprake is van een vispopulatie van 100%. Een belangrijk uitgangspunt in de berekeningen is dat ook door natuurlijk factoren of externe factoren die niet met de stuwen te maken hebben sprake is van verlies van vis langs hun migratieroute. Hierdoor is ook sprake van sterfte tussen de stuwcomplexen in de grafiek. De bijdrage van de stuwcomplexen (doorgetrokken lijn) kan uit deze figuur afgelezen worden door het totale cumulatieve verlies te vergelijken met het verlies in een rivierstrekking waarin vissen geen stuwen hoeven te passeren (stippellijn). Zoals ook op de kaart te zien is, is het lokale effect op stroomafwaartse migratie het grootst bij stuwen met een waterkrachtcentrale (WKC). Bij de overige stuwen verloopt de stroomafwaartse migratie relatief probleemloos. Aan de gestreepte lijn in de grafiek is te zien dat de Maas met stuwen maar zonder waterkrachtcentrales, heel dicht in de buurt komt bij een rivierstrekking zonder stuwen (gestippeld).

Functionele prestatie van stuwen voor vismigratie

Driver	-
Functionele prestatie	Succesvolle stroomafwaartse passages (lokaal en cumulatief)
Referentie	<ul style="list-style-type: none"> Huidig stuwbeheer, gemiddelde afvoeren (o.b.v. 1911-2011)
Aannames en beperkingen	<ul style="list-style-type: none"> Onderling kleine verschillen tussen stuwcomplexen m.u.v. waterkrachtcentrales (cumulatief effect leidend) Invloed stuwcomplexen in het buitenland niet weergegeven
Bron	11207401-028-HYE-0001



Figuur 6.5: Voorbeeld van een landelijke kaart van de functionele prestatie van stuwen voor stroomafwaartse vismigratie van de Europese aal. Deze kaart kan voor verschillende vissoorten en beide migratierichtingen gegenereerd worden.

7 Vervolgstappen en aanbevelingen

7.1 Vervolgstappen in de iteratieve werkwijze

Functionele prestatie komt op meerdere plekken terug in de iteratieve werkwijze. Dit is een belangrijke manier om de probleemstelling in kaart te brengen (Stap 2) en de varianten goed onderbouwd te kunnen afwegen (Stap 5). Hoe functionele prestatie in Stap 2 wordt toepast wordt beschreven in KpNK (2024b).

Vanaf Stap 4 kan er in de iteratieve werkwijze verder worden gegaan naar verschillende stappen in de werkwijze, bijvoorbeeld naar Stap 2 om eisen en wensen aan te passen of om de inventarisatie aan te vullen, naar Stap 3 om de varianten en oplossingsrichtingen aan te passen of naar Stap 5 om de functionele prestatie te gebruiken in de economische afweging.

In dit rapport ligt de focus op de aansluiting op de iteratieve werkwijze en de VenR-opgave, functionele prestatie is echter breed toepasbaar, zoals beschreven in Paragraaf 2.2. Functionele prestatie zou bijvoorbeeld ook goed inzetbaar zijn in het Prognoserapport en in de netwerkschakelplannen.

7.2 Aanbevelingen

Functionele prestatie is op verschillende detailniveaus mee te nemen. Dit rapport geeft een uitwerking van methodes om op een 'Light'-manier kwalitatief naar functionele prestatie te kijken en van verschillende manieren om op een 'Medium'-manier kwantitatief naar functionele prestatie te kijken. Ook worden verschillende voorbeelden gegeven. Voor de 'Heavy'-variant is geen methodiek ontwikkeld, omdat wat beschikbaar of nodig is sterk afhankelijk van de vraag en locatie is. Vaak kan hier gebruik gemaakt worden van bestaande uitgebreide modellen, waar wellicht wel aanpassingen voor de hier beschouwde toepassing voor benodigd zijn.

De methodiek voor 'Light' en 'Medium' is klaar om toegepast te worden voor de uitgewerkte aspecten. Voor de 'Medium'-aanpak is voor andere kunstwerken (bijv. gemalen), functies (bijv. hoogwaterveiligheid en biodiversiteit) en drivers (bijv. combinaties van drivers) een verdere uitwerking nodig.

Daarnaast is voor sommige aspecten en locaties een op maat gemaakte aanpak nodig. Denk hierbij bijvoorbeeld aan specifieke aspecten van een kunstwerk, zoals de doorvaarbaarheid van de Maasstuwen of het negatief verval bij stuw Hagestein. Daarnaast kan ook de functionele samenhang vragen om een specifieke aanpak.

Tegelijkertijd kan een gedragen aanpak, met onzekerheden en bandbreedtes, adaptief voor veranderende opstandigheden en inzichten, de drempel om functionele prestatie mee te nemen sterk verlagen en discussie over resultaten te verkleinen. Duidelijkheid over aannames en bijbehorende kans op onder- of overschatting is daarbij belangrijk.

Voor het uitwerken van 'Medium' of 'Heavy' zijn modelinstrumentaria nodig om de effecten van drivers door te rekenen op de locaties van de natte kunstwerken. De bestaande instrumentaria zijn vaak niet ontworpen om met zeespiegelstijging, veranderende afvoeren en veranderende randvoorwaarden of inzet van kunstwerken om te gaan. Aanpassingen zijn nodig voor de VenR-opgave.

In Stap 2 (KpNK, 2024b) zijn knelpunten in de beschikbaarheid van data en informatie over drivers, objecten en eisen geïdentificeerd. Het beter beschikbaar maken van deze informatie

draagt bij aan het makkelijker meenemen van functionele prestatie op een laagdrempelige manier.

Tot slot, functionele prestatie heeft niet één eenheid. Dit bemoeilijkt het vergelijken en afwegen van verschillende functies. Dit vraagt om keuzes in Stap 5 hoe de verschillende functies met elkaar worden vergeleken. In sommige gevallen zal dit gaan via een economische balans, terwijl in andere gevallen een harde ondergrens voor een prestatie wordt gehanteerd.

Referenties

- Deltares. (2013). *Toepassing van de KRW-Verkenner in de Rijkswateren*. 1208271-000-ZWS-0011.
- Deltares. (2017). *Het Haringvliet na de Kier*. 11200854-010.
- Deltares. (2019). *Omgevingscondities A-omgeving BESW2017 ('Menukaart') - Voorbeelden van hydrodynamische scenario's*. 1230119-000-HYE-0040.
- Deltares. (2020a). *Klimaatrobustheid van het waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer*. 11203741-001-ZKS-0005.
- Deltares. (2020b). *Memo 'Zeespiegelstijging, 'Plan Sluizen' en zoutindringing in de benedenrivieren'*. 11203871-004.
- Deltares. (2020c). *Renovatie en ombouw Krammersluizen: de invloed van zeespiegelstijging op de zoutindringing en de operatie*. 11204995-006-HYE-0001.
- Deltares. (2021a). *Memo 'Onderdeel Vis van de KRW-Verkenner module Ecologie Rijkswateren'*. 21-11-0016.
- Deltares. (2021b). *Urgentie en Realisatie van Redesign the Delta vanuit VenR perspectief. Case zuidwest-Nederland*. 11206882.
- Deltares. (2021c). *Vispasseerbaarheid stuwcomplexen: Kennisvragen beantwoorden en Analysetool ontwikkelen*. 11201844-003-HYE-0002.
- Deltares. (2021d). *Kwetsbaarheid sluizen Maas voor klimaatverandering: Onderzoek naar de sluizen Born, Maasbracht en Heel in klimaatbestendige netwerken*. 11205274-004-BGS-0017.
- Deltares. (2021e). *Stresstest Doorvaarthoogte Hoofdvaarwegennet: Zeespiegelstijging en rivierafvoeren*. 11205274-004-BGS-0021.
- Deltares. (2022a). *Specificaties zesde-generatie modellen met D-HYDRO. Generieke technische en functionele specificaties (v1-2022)*. 11208053-012.
- Deltares. (2022b). *Case studie Zuid-Holland: 'Analyse grootschalige wateroverlast'*. 11208520-000-ZWS-0008.
- Deltares. (2022c). *Raamwerk beslismomenten VenR Stormvloedkeringen - Gecombineerde functionele en technische prestatie en economische afweging met case Hollandsche IJsselkering*. 11206063-000-HYE-0002.
- Deltares. (2022d). *Rapport Zoutlast IJmuiden bij testen en ingebruikstelling nieuwe zeesluis*. 11206063-000-HYE-0002.
- Deltares. (2022e). *Grondwaterverziltting en watervraag bij een stijgende zeespiegel (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II)*. 11208039-009-BGS-0001.
- Deltares. (2023a). *Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse*. 11209265-002-ZWS-0003.
- Deltares. (2023b). *Spoedadvies hoogwaterscenario's bij haperen stuwen Borgharen en Lith in de Maas*.
- Deltares. (2024a). *Extra debiet over stuw Hagestein voor het tegengaan van verziltting van de Lek*. 11210363-001-ZKS-0001.
- Deltares. (2024b). *Levensduur Maeslantkering - Identificeren knelpunten en potentiële levensduur-verlengende maatregelen*. 11209283-000-HYE-0001 v1.0.
- Deltares. (2024c). *Vertaling van de Deltascenario's 2024 naar invoer voor het Nationaal Water Model*. 11209219-018-ZKS-0001.
- Deltares. (2024d). *Optimizing the pump order for safer passage of eels at IJmuiden*. Delft-FEWS lunch lecture.
- Hall, J., Harvey, H., & Manning, L. (2019). Adaptation threshold and pathways for tidal flood risk management in London. *Climate Risk Management*, 24, 42-58.
- HKV & Iv-Infra. (2014). *Methodiek gevoeligheidstest natte kunstwerken*.

- HKV. (2015a). *Gevoeligheidstest Natte Kunstwerken: Methode Functionele Eindelevensduur. Kwaliteit en toepasbaarheid FLSA-methode.*
- HKV. (2015b). *Vervangingsopgave Natte Kunstwerken: Meerwaarde van de Gevoeligheidstest Natte Kunstwerken voor Adaptief Deltamanagement - Case Gemaal- en Spuicomplex IJmuiden.*
- HKV. (2016). *Doorontwikkeling DEZY 2.0 - Modelling faalkansen kunstwerken.* Versie 2.1 PR3232.10.
- HKV. (2017a). *Probabilistisch model meerpeil-statistiek Volkerak-Zoommeer (DEVO).* Versie 2.1 PR3689.10.
- HKV. (2017b). *Hydra-NL Systeemdocumentatie. Versie 2.3.* PR3506.
- IPLO. (z.d.). *Infographics Operationeel Watermanagement - Volkerak-Zoommeer.* Geraadpleegd op 14/03/2023.
- KNMI. (2023a). *KNMI'23 Klimaatscenario's voor Nederland (gebruikersrapport).*
- KNMI. (2023b). *Zware stormen in Nederland sinds 1910.* KNMI.
- KP ZSS. (2023). *Systeemanalyse waterveiligheid - Deelrapport Rijn-Maasmonding en Riviereengebied.* Kennisprogramma Zeespiegelstijging Spoor II, Auteurs: HKV, Witteveen+Bos & IV-Infra.
- KpNK. (2019a). *Functionele Levensduur - Case Julianakanaal-Grensmaas.* KpNK-2018-SKW-02a002.
- KpNK. (2020). *Functionele Levensduur - Indicatie einde functionele levensduur van areaal Rijkswaterstaat.* KpNK-2020-SKW-02a004.
- KpNK. (2022a). *Analyse naar de doorvaarbaarheid van de toekomstige Maasstuwen.* 11208384-002-HYE-0001.
- KpNK. (2022b). *Einde levensduur overige HWS-objecten: Kernvraag-overstijgend onderzoek naar functionele inspectie.* 11207401-005-HYE-0001.
- KpNK. (2024a). *Iteratieve werkwijze om te komen tot een advies in Regio-analyse en Planfase.* 11207401-007-HYE-0005.
- KpNK. (2024b). *Inventariseren en Probleem Ontrafelen - Stap 2 in de Iteratieve Werkwijze.* 11207401-009-HYE-0004.
- KpNK. (2024c). *Ontwikkelen van oplossingsrichtingen, varianten en voorkeursvariant - Stap 3 in de iteratieve werkwijze.* 11207401-007-HYE-0006.
- KpNK. (2024d). *Opstellen economische afweging - Stap 5 in de iteratieve werkwijze.* 11207401-007-HYE-0004.
- KpNK. (2024f). *Aanvulling op best practice Regio-analyse Weurt-Heumen vanuit ervaring Julianakanaal.* 11207401-007-HYE-0008.
- KpNK. (2024g). *Achtergrondrapportage bij werkvormen en visualisaties.* 11207401-030-HYE-0002.
- KpNK. (2024k). *Functionele prestatie van stuwcomplexen voor migrerende vis - Kwantificeren en visualiseren van vispasseerbaarheid en habitatgeschiktheid.* 11207401-028-HYE-0001.
- KpNK. (2024l). *Functionele prestatie van sluizen met een zoutbeheerfunctie - Kwantificering, overwegingen en maatregelen.* 11207401-021-HYE-0012.
- Kwadijk, J., Haasnoot, M., Mulder, J., Hoogvliet, M., Jeuken, A., van der Krogt, R., . . . de Wit, M. (2010). Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise: A case study in the Netherlands. *Wiley interdisciplinary reviews: Climate Change.* doi:10.1002/wcc.64
- Rajaratnam, N., & Chamani, M. (1995). Energy loss at drops. *Journal of Hydraulic Research,* 33(3), 373-384.
- Rijkswaterstaat. (1975). *Lock capacity and traffic resistance of locks.* The Hague: Government Publishing Office.
- Rijkswaterstaat. (2004). *Het Noordzeekanaal in cijfers anno 2004: : ANW-04.04.* Directie Noord-Holland.
- Rijkswaterstaat. (2013). *Handboek Neder-Rijn en Lek: Bediening stuw-/sluiscomplexen.* Rijkswaterstaat Oost-Nederland District Zuid.

- Rijkswaterstaat. (2014). Kader LCC.
- Rijkswaterstaat. (2018). *Betrekkinglijnen 2018 h Lobith 650 - 1780 rkm*.
- Rijkswaterstaat. (2020a). *Klimaat stresstest objecten Hoofdwatersysteem - Bezien vanuit het perspectief van Ruimtelijke Adaptatie*.
- Rijkswaterstaat. (2020b). *Regioanalyse Vervanging en Renovatie (VenR) Weurt-Heumen*.
- Rijkswaterstaat. (2021a). *Het verhaal van het sediment*. Platform Rivierkennis.
- Rijkswaterstaat. (2021c). *Achtergrondrapportage Vaarwegen Integrale Mobiliteitsanalyse*.
- Rijkswaterstaat. (2022). *Vervanging en Renovatie. Prognoserapport 2022. Prognose voor de periode 2023 tot en met 2050*.
- Rijkswaterstaat Bouwdienst. (2000). *Ontwerp van Schutsluizen I*.
- Rijkswaterstaat. (z.d.). *Sluizencomplex en Kunstwerken in de Haringvlietdam*. Waterdistrict Haringvliet.
- ROBAMCI. (2016). *ROBAMCI Case Kunstwerken - Gemaal IJmuiden*.
- ROBAMCI. (2017). *Waardensysteem Zeesluis Delfzijl - Een zoektocht naar mogelijkheden rondom de zeesluis*. 1230174-003-ZWS-0006.
- Vader, H., Bakker, A. M., Jonkman, S., Van den Boomen, M., Van Baaren, E., & Diermanse, F. (2023). A framework for assessing the remaining life of storm surge barriers. *Structure and Infrastructure Engineering*.
- Weiler, O., Verhaart, F., Nogueira, H., & O'Mahoney, T. (2019). Hydraulic loads on bottom constructions behind a storm surge barrier or weir: development of a rapid assessment method. *Conference paper Smart Rivers 2019 in Lyon, France*.
- WL | Delft Hydraulics. (1970). *Afvoerbepaling Haringvlietsluizen: Rapport modelonderzoek (M1081)*.
- WL | Delft Hydraulics. (1997). *Renovatie spuisluis IJmuiden: Q2172*. Jongeling, T. H.G.
- WL | Delft Hydraulics. (2003a). *IJkmetingen Spuisluizen Afsluitdijk, Afvoer Lorentzsluizen*. H3849.22.
- WL | Delft Hydraulics. (2003b). *IJkmetingen Spuisluizen Afsluitdijk, Afvoer Stevinsluizen*. H3849.21.

A Ontwikkeling naar functionele prestatie

In deze bijlage wordt een overzicht gegeven van verschillende studies naar functionele levensduur van natte kunstwerken en de ontwikkeling van functionele levensduur naar functionele prestatie binnen het KpNK.

A.1 Functionele levensduur

In Nederland zijn diverse studies gedaan naar knikpunten in het watersysteem en de infrastructuur, bijvoorbeeld (Kwadijk, et al., 2010). De Thames Barrier is hiervan een internationaal case-voorbeeld (Hall, Harvey, & Manning, 2019). De methodiek van het gebruiken van beslis- of knikpunten is de laatste jaren verder uitgewerkt voor natte kunstwerken, vaak binnen grote, meerjarige programma's, zoals VONK, ROBAMCI en het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK, 2020). Ook wordt het denken in functionele levensduur meegenomen in beleidsdocumenten, zoals de IMA (o.a. knelpunt sluiscapaciteit in verschillende scenario's) (Rijkswaterstaat, 2021c).

Binnen VONK (Vervangingsopgave Natte Kunstwerken) is de 'Gevoeligheidstest Natte Kunstwerken' ontwikkeld (GT-VONK). Deze gevoeligheidstest kan worden gebruikt om voor diverse typen kunstwerken en functies het moment van einde levensduur te bepalen. Dit is toegepast op kunstwerken voor de functies keren van hoogwater (HKV & Iv-Infra, 2014), waterbeheer en scheepvaart (HKV, 2015a).

De Functionele Levensduur Scenario Analyse (FLSA) (HKV & Iv-Infra, 2014) beschouwt per kunstwerk één hoofdfunctie en, indien van toepassing, de hoogwaterkerende functie. Er is hierbij gekeken naar klimaatverandering en socio-economische ontwikkelingen. De methode is zoveel mogelijk geautomatiseerd door middel van MATLAB-scripts. Een aandachtspunt is de beschikbaarheid van informatie over de kunstwerken en modeluitvoer. Waar onvoldoende data beschikbaar was, zijn binnen de VONK-studies de activiteiten beperkt gebleven tot methodiekontwikkeling. Als andere aandachtspunten zijn vanuit de huidige studie het destijds niet (kunnen) meenemen van samenhang tussen kunstwerken en het functioneren van kunstwerken in droge periodes geïdentificeerd.

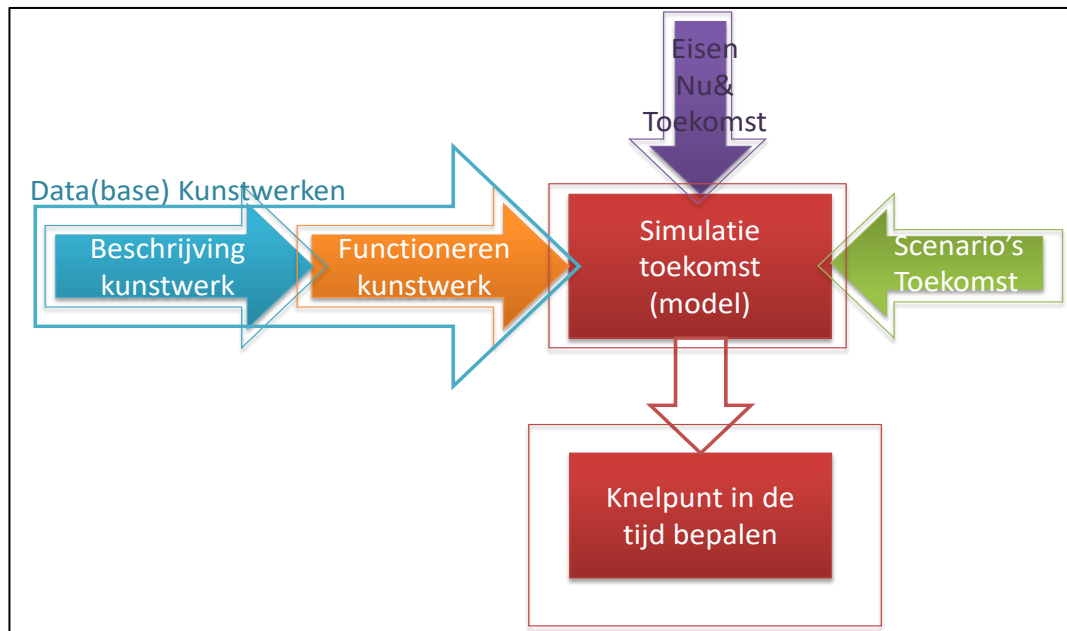
Samenhang tussen kunstwerken is wel meegenomen in de case IJmuiden binnen het ROBAMCI-project (ROBAMCI, 2016). Deze case bouwt voort op een VONK-studie naar adaptatiepaden voor de spuisluizen en het gemaal van IJmuiden (HKV, 2015b). ROBAMCI (Risk and Opportunity Based Asset Management for Critical Infrastructures) was een onderzoeksprogramma waarin de toepassing van assetmanagement met een systeembenadering in de watersector werd verkend (Deltares, 2022a). Hierbinnen zijn verschillende casussen voor kunstwerken en andere objecten uitgewerkt.

A.2 Kennisprogramma Natte Kunstwerken

In het vorige Kennisprogramma Natte Kunstwerken is een verkennend onderzoek naar de functionele levensduur van kunstwerken uitgevoerd (KpNK, 2020). Discussies in dat kader over een (praktische) werkwijze om einde functionele levensduur te bepalen hebben geleid tot de inventarisatie van beschikbare kennis, modellen en informatie.

Op basis hiervan stelt KpNK (2020) dat het verstandig lijkt een generieke *transparante Methode Functionele Levensduur* te definiëren om einde functionele levensduur te bepalen, die voortbouwt op de Gevoeligheidstest Natte Kunstwerken uit VONK (HKV & Iv-Infra, 2014;

HKV, 2015a) en voor alle watersystemen en alle functies kan worden gebruikt. Daartoe is in (KpNK, 2020)) tot de samenhangende bouwstenen in Figuur A.1 gekomen.



Figuur A.1: Bouwstenen voor Methode Functionele Levensduur- Medium en Heavy (KpNK, 2020).

Vervolgens was er behoefte aan een praktische, bij voorkeur generieke, werkwijze waarin de relatie tussen de (toekomstige) functionele prestatie(s) van een object en het deelsysteem waarvan het onderdeel is wordt meegenomen. Daartoe is binnen het Kennisprogramma Natte Kunstwerken de *Toolbox Functionele Levensduur* opgesteld (KpNK, 2020). Deze toolbox is bedoeld om de inschatting van einde functionele levensduur voor afzonderlijke kunstwerken en groepen van kunstwerken op verschillende detailniveaus te faciliteren. In de toolbox is er keuze uit verschillende detailniveaus voor de te maken analyse (Light, Medium of Heavy, verder toegelicht in Paragraaf 2.3). De Methode Functionele Levensduur is onder andere toegepast als onderdeel van de regioanalyse van Weurt-Heumen (Rijkswaterstaat, 2020b).

In het KpNK 2021-2024 (voorliggende studie) is de stap gezet van functionele levensduur naar functionele prestatie. Functionele prestatie kan worden gebruikt om het verloop in de tijd of op een specifiek moment weer te geven. Verandering van eisen aan de functies, maatregelen in BenO of VenR kunnen zo leiden tot andere knelpunten in de tijd voor de infrastructuur en VenR-alternatieven kunnen naast elkaar uitgewerkt. Ook voor het meenemen van functionele prestatie in een economische afweging is het nuttig om de prestatie in de tijd (door middel van scenario's) uit te drukken.

B Functionele prestatie per kerntaak

B.1 Kerntaak: Vlot en veilig vaarwegverkeer

Voor de kerntaak 'vlot en veilig vaarwegverkeer' wordt in onderstaande tabellen een overzicht gegeven van de voor de werkwijze relevante informatie uit de studies en casussen besproken in Hoofdstuk 5.

Studie: VenR-variantuitwerking doorvaarbaarheid Maasstuwen	Kunstwerken: Maasstuwen	Meer informatie: Paragraaf 5.3.1 en KpNK (2022a)
Korte beschrijving: Uitwerking van VenR-varianten voor de stuwcomplexen op de Maas voor wel of niet doorvaarbare stuwen bij hoge afvoeren		
Relevante parameters voor eisen/wensen: <ul style="list-style-type: none">• Strijkdebiet• Maximum schutpeil• Doorvaarbaarheid rivieren• Aantallen schepen als functie van afvoer		
Beschouwde drivers: Na inventarisatie van de mogelijke effecten van alle drivers op de verschillende tussen de VenR-varianten is verder uitgewerkt de impact van : <ul style="list-style-type: none">• Veranderende hoge rivierafvoeren• Veranderingen in scheepvaart		
Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie: <ul style="list-style-type: none">• Toepassing werkwijze uitwerken VenR-varianten• Kwantificering functionele prestatie sluisstuwcomplexen onder klimaatverandering en verandering scheepvaart voor hogere afvoeren.		
Gevonden knelpunten: Passeerbaarheid complex (ontwikkeling in de tijd weergegeven, geen vast knelpunt gedefinieerd)		
Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten: <ul style="list-style-type: none">• Doorvaarbare stuw• Niet-doorvaarbare stuw• Niet-doorvaarbare stuw met verhoogde sluis		
Studie: Stresstest HVWN	Kunstwerken: Sluizen en bruggen HVWN	Meer informatie: Deltares (2021e)
Korte beschrijving: In de stresstest Doorvaarthoogte Hoofdvaarwegennet is gekeken naar de doorvaarthoogte voor de containervaart in het HVWN bij hoge rivierafvoer en zeespiegelstijging in de grote rivieren in Nederland		
Relevante parameters voor eisen/wensen: <ul style="list-style-type: none">• Doorvaarthoogte voor de containervaart in het HVWN<ul style="list-style-type: none">○ Onderscheid tussen formele eisen en wensen vanuit scheepvaartsector		
Beschouwde drivers: <ul style="list-style-type: none">• Hogere rivierafvoer• Zeespiegelstijging		
Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie: Op basis informatie over de afvoeren in de Rijn en de Maas en de waterstanden in de Rijn-Maasmonding zijn in deze stresstest de knelpunten geïdentificeerd en is gekeken hoe groot de impact van veranderingen in doorvaarthoogte is. Ook is er een kwalitatief overzicht gegeven van de gevolgen voor de transportsector.		
Gevonden knelpunten: <ul style="list-style-type: none">• Stremmingen scheepvaart vanwege afname van de doorvaarthoogte		
Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten: Een afname in doorvaarthoogte door klimaatverandering kan resulteren in verschillende maatregelen/te accepteren gevolgen:		

- Vracht wordt niet of later vervoerd;
- Er moeten alternatieve routes worden gezocht;
- Bruggen moeten vaker open;
- De lading wordt over meer schepen verdeeld;
- Er vindt een verschuiving plaats naar andere vervoersmiddelen (modaliteiten);
- De infrastructuur moet worden aangepast;
- Er wordt meer ballast ingenomen;
- Betere informatievoorziening zorgt voor optimaal gebruik van de beschikbare doorvaarthoogte.

Studie: Stresstest droogte KBN	Kunstwerken: Sluizen Born, Maasbracht en Heel	Meer informatie: Deltares (2021d)
--	---	---

Korte beschrijving:

De stresstest 'droogte' van het project Klimaatbestendige Netwerken heeft gekeken naar de kwetsbaarheid van de sluizen bij Born, Maasbracht en Heel voor klimaatverandering

Relevante parameters voor eisen/wensen:

- Schutdebiet
- Passeertijd
- Afvoer
- Pompcapaciteit

Beschouwde drivers:

Lagere rivierafvoer

De kwetsbaarheden worden veroorzaakt door periodes van lage afvoer in de Maas, waarbij de beschikbare afvoer lager is dan de benodigde afvoer voor het schutbedrijf. Door klimaatverandering zal de afvoer op de Maas vaker en langer laag zijn.

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Data analyse, verkeersafwikkelingsmodel SIVAK en analytische modellen om de knelpunten en de kosten als gevolg van langere wachttijden en hoger energieverbruik in kaart te brengen, zowel voor het huidige klimaat als voor toekomstscenario's met verschillende toegepaste maatregelen. Voor de geïdentificeerde maatregelen zijn de haalbaarheid en de gevolgen voor de kwetsbaarheid van de sluizen geanalyseerd.

Gevonden knelpunten:

Door klimaatverandering zal de afvoer op de Maas vaker en langer laag zijn, dit zorgt voor een toename in de wachttijd voor de scheepvaart en in een toename in energiekosten door het in moeten zetten van pompen om het schutdebiet te compenseren.

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

Waterbesparende strategieën die worden ingezet tijdens laagwater: meer schepen per schutting, hevelend schutten (bij meerdere sluiskolken het schutwater van de ene kolk in de andere lozen wanneer gelijktijdig maar in tegengestelde richting wordt geschut) of pompen. De aanpassingen hebben echter gevolgen voor de wachttijden en kosten. Meer mogelijke maatregelen zijn uitwisselingsriolen, spaarbekkens of pompen met turbines (die in tijden van hoogwater juist energie kunnen opwekken) aanleggen.

Studie: Verkenning levensduur kunstwerken rond Haringvliet	Kunstwerken: Volkeraksluizen en omliggende kunstwerken	Meer informatie: Paragraaf 5.3.4 en Deltares (2021b)
--	--	--

Korte beschrijving:

Voor het uitwerken van de methodiekontwikkeling functionele prestatie in relatie tot langetermijnontwikkelingen van de Zuidwestelijke Delta is gekeken naar het effect van zeespiegelstijging op de natte kunstwerken rond het Haringvliet. De functionele prestatie van de Volkeraksluizen, is kwantitatief uitgewerkt voor de functies hoogwaterveiligheid, scheepvaart en waterberging op het Volkerak Zoommeer. Functionele samenhang tussen functies en tussen kunstwerken is een belangrijk uitgangspunt in deze studie.

Relevante parameters voor eisen/wensen:

- Maximum schutpeil
- Kerende hoogte Volkerak inlaat- en schutsluizen → hogere waterstand VZM → doorvaarthoogte omliggende kunstwerken

Beschouwde drivers:

Zeespiegelstijging en (aangenomen) gekoppelde peilstijging Haringvliet

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Hydra-NL, informatie over de sluizen en het systeem gecombineerd tot een kwantitatieve inschatting

Gevonden knelpunten:

- Vaker stremming Volkeraksluizen door bereiken maximum schutpeil

- Mogelijke stremmingen scheepvaart door hogere waterstand VZM

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

- Peil Haringvliet niet laten meegroeien (met gevolgen voor rivierafvoer en functie zoutmanagement (zoutindringing) op de Nieuwe Maas)
- Maximum schutpeil verhogen

Deze maatregelen zijn niet verder uitgewerkt

Studie: Integrale Mobiliteitsanalyse	Kunstwerken: Sluizen, stuwen en bruggen	Meer informatie: Rijkswaterstaat (2021c)
--	---	--

Korte beschrijving:

In de Integrale Mobiliteitsanalyse (IMA) is in kaart gebracht welke capaciteitsknelpunten in de vaarweginfrastructuur aanwezig zijn. De knelpunten sluizen en bruggen bij hoogwater voor de functie scheepvaart zijn voor de driver klimaatverandering verder uitgewerkt.

Relevante (parameters voor) eisen/wensen:

Gehanteerde criteria voor sluizen om de functionele prestatie als 'voldoende' te zien:

- intensiteit/capaciteit ≥ 0.5
 - gemiddelde wachttijd maatgevende periode < 30 minuten
- effect van stremmingen is niet meegenomen

Beschouwde drivers:

- Hogere waterstanden door klimaatverandering
- Schaalvergroting van de scheepvaart

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Vanuit functionele samenhang voor de functie scheepvaart sluizen en bruggen als knelpunt geïdentificeerd. SIVAK (Prosim, 2000) is gekalibreerd met IVS registraties uit 2019, vervolgens zijn met behulp van SIVAK scheepvaartverkeerssimulaties uitgevoerd voor verschillende zichtjaren (2030, 2040, 2050) in toekomstscenario's Hoog en Laag.

Gevonden knelpunten:

- Overschrijding wachttijden en bijbehorende vaartuigverliesuren
- Robuustheid netwerk, (on)geplande stremmingen bij kunstwerken en het aantal beschikbare kolken voor maatgevende schepen
- Onvoldoende water voor normaal schutbedrijf bij sluizen langs de Maas
- Doorvaarthoogte- en breedte bruggen
- Aanzanding bij stuwen door minder vaak heven

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

Wanneer onvoldoende water beschikbaar is voor het schutbedrijf moeten waterbesparende maatregelen toe worden gepast (terugpompen van schutdebiet, hevelend schutten, meer schepen tegelijkertijd schutten). De gevolgen van deze maatregelen moeten binnen een maximale wachttijd blijven. Het knelpunt aanzanding kan worden verholpen met baggeronderhoud

Studie: VONK	Kunstwerken: Sluizen en bruggen in beheer van RWS	Meer informatie: HKV & Iv-Infra (2014), HKV (2015a)
------------------------	---	---

Korte beschrijving:

Methodiekontwikkeling voor het bepalen van een tijdsvenster voor het einde functionele levensduur voor de functie scheepvaart voor schutsluizen, vaste en beweegbare bruggen en afmeervoorzieningen.

Relevante parameters voor eisen/wensen:

- Sluisafmetingen in relatie tot maatgevend schip binnen CEMT-scheepvaartklasse
- Wachttijd scheepvaart in maatgevende maand maximaal 30 minuten
- Uitvaartijd maximaal 5 minuten

Functie-eisen zijn in overleg met Rijkswaterstaat bepaald. In het geval van scheepvaart gebaseerd op richtlijnen (voor ontwerp) en keuzes ten behoeve van het project.

Beschouwde drivers:

- Veranderende rivierafvoer
- Zeespiegelstijging
- Socio-economische ontwikkeling (ontwikkeling verkeersstromen, scheepvaartintensiteit en scheepvaartonwikkelingen)

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

BIVAS en Kooman-spreadsheet (Rijkswaterstaat, 1975)

Gevonden knelpunten:

Aan de hand van de gestelde eisen/wensen, bereiken van einde functionele levensduur van meerdere schutsluizen.

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten: Niet beschouwd.

Studie: ROBAMCI	Kunstwerken: Zeesluis Farmsum	Meer informatie: ROBAMCI (2017)
---------------------------	---	---

Korte beschrijving:

In Risk and Opportunity Based Asset Management for Critical Infrastructures (ROBAMCI) zijn kennis, methoden en tools ontwikkeld waarmee 'efficiencywinst' kan worden bereikt over de levensduur van natte kunstwerken, onder andere a.d.h.v. de casus zeesluis Farmsum.

Relevante parameters voor eisen/wensen:

- Waterveiligheidsnormen
- Scheepvaartklasse, wachttijden
- Zoutlast

Beschouwde drivers:

- Zeespiegelstijging
- Bodemdaling

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Kosten-batenanalyse t.o.v. referentiesituatie op basis van onder andere wachttijdanalyse

Gevonden knelpunten:

- Passage van tweebaksduwvaart
- Mogelijk aanpassingen coupures nodig

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

- Alternatief 1: Sluis vergroten op huidige locatie incl. aanvullende maatregelen
- Alternatief 2: Nieuwe zeesluis in Zeehavenkanaal en verleggen primaire waterkering
- Alternatief 3: Sluis vergroten op huidige locatie en verleggen primaire waterkering

B.2 Kerntaak: Waterveiligheid

Voor de kerntaak 'waterveiligheid' wordt in onderstaande tabellen een overzicht gegeven van de voor de werkwijze relevante informatie uit de studies en casussen besproken in Hoofdstuk 5.

Studie: Levensduur Hollandsche IJsselkering	Kunstwerken: Hollandsche IJsselkering	Meer informatie: Paragraaf 5.3.5, Deltares (2022c) en Vader et al. (2023)
---	---	---

Korte beschrijving:

Onderzoek naar de dominante factoren die bijdragen aan het einde levensduur van de Hollandsche IJsselkering (HIJK) en de onzekerheden daarin. Er is een methode opgesteld voor het bepalen van de resterende levensduur van de HIJK op basis van zowel technische als functionele eisen.

Relevante parameters voor eisen/wensen:

- Voorkomen extreem hoog waterniveau achter de kering (minder dan 1/30.000 per jaar)
- Stremming scheepvaart: te vaak (9 stremmingen per jaar, ook met scenario's gewerkt) of te lang (2% van de tijd niet beschikbaar per jaar)

Beschouwde drivers:

Zeespiegelstijging

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Hydra-NL

Gevonden knelpunten:

- Einde functionele levensduur door zeespiegelstijging leidend voor HIJK
- In gematigde zeespiegelscenario's mogelijk binnen 20 jaar einde levensduur door afname functionele prestatie voor hoogwaterveiligheid en scheepvaart.

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

- Verbeteren van betrouwbaarheid van sluiten
- Accepteren hinder aan scheepvaart

Studie: Verkenning levensduur kunstwerken rond Haringvliet	Kunstwerken: Volkeraksluizen en omliggende kunstwerken	Meer informatie: Paragraaf 5.3.4 en Deltares (2021b)
--	--	--

Korte beschrijving:

Voor het uitwerken van de methodiekontwikkeling functionele prestatie in relatie tot langetermijntonwikkelingen van de Zuidwestelijke Delta is gekeken naar het effect van zeespiegelstijging op de natte kunstwerken rond het Haringvliet. De functionele prestatie van de Volkeraksluizen, is kwantitatief uitgewerkt voor de functies hoogwaterveiligheid, scheepvaart en waterberging op het Volkerak Zoommeer. Functionele samenhang tussen functies en tussen kunstwerken is een belangrijk uitgangspunt in deze studie.

Relevante parameters voor eisen/wensen:

Kerende hoogte schutsluizen en inlaatsluizen

Beschouwde drivers:

Zeespiegelstijging en (aangenomen) gekoppelde peilstijging Haringvliet

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Hydra-NL, informatie over de sluizen en het systeem gecombineerd tot een kwantitatieve inschatting

Gevonden knelpunten:

Speelt waarschijnlijk niet op de korte termijn

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

Niet beschouwd.

Studie: GT-VONK	Kunstwerken: stormvloed- en hoogwaterkeringen, stuwen, spui- en uitwateringssluizen, waterreguleringswerken en gemalen	Meer informatie: HKV & Iv-Infra (2014), HKV (2015a)
---------------------------	--	---

Korte beschrijving:

Methodiekontwikkeling voor het bepalen van een tijdsvenster waarin einde functionele levensduur wordt bereikt voor de functie hoogwaterveiligheid bij stormvloed- en hoogwaterkeringen, stuwen, spui- en uitwateringssluizen, waterreguleringswerken en gemalen.

Relevante parameters voor eisen/wensen:

De uitwerking van de methodiek is voor hoogwaterveiligheid beperkt tot faalmechanisme golfoverslag (toelaatbaar overslagdebiet van 1 l/m/s). Het moment van falen is gedefinieerd als het moment waarop de benodigde waterkerende hoogte van het kunstwerk groter is dan de beschikbare kerende hoogte van het kunstwerk in gesloten toestand.

Beschouwde drivers:

- Zeespiegelstijging
- Veranderende rivierafvoer

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Deltamodel met daarin waterstanden en afvoer voor de Deltascenario's

Gevonden knelpunten:

Voor kunstwerken met hoogwaterveiligheid als primaire functie (stormvloed- en hoogwaterkeringen) is golfoverslag bepalend voor einde levensduur. Voor kunstwerken die hoogwaterveiligheid als secundaire functie hebben, kan einde functionele levensduur al eerder optreden door andere functie-eisen.

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

Niet beschouwd.

Studie: Levensduur Maeslantkering	Kunstwerken: Maeslantkering	Meer informatie: Deltares (2024b)
---	---------------------------------------	---

Korte beschrijving:

Methodiekontwikkeling voor het bepalen van een tijdsvenster waarin einde functionele levensduur wordt bereikt voor de functie hoogwaterveiligheid bij stormvloed- en hoogwaterkeringen, stuwen, spui- en uitwateringssluizen, waterreguleringswerken en gemalen.

Relevante parameters voor eisen/wensen:

- Faalkanseis
- Sluitpeil
- Vermoeingsbudget

- Eisen scheepvaart (haven)
- Arbo eisen

Beschouwde drivers:

- Zeespiegelstijging
- Veranderende rivierafvoer
- Degradatie en veroudering

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Gebruik van KNMI'23, KP ZSS scenario's en Hydra-NL om de sluitfrequentie en het cumulatieve aantal sluitingen te berekenen

Gevonden knelpunten:

Als gevolg van een toename van de sluitfrequentie:

- Eerder uitputten eindig budget belastingswisselingen
- Onderhoud lastig uitvoerbaar door alarmpeil droogdokken
- Betrouwbaarheid sluiten niet voldoende
- Te vaak sluiten voor de scheepvaart

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

- Sluitpeilverhoging
- Fysieke aanpassingen aan de kering
- Jaarrond onderhoud
- Vergroten betrouwbaarheid

B.3 Kerntaak: Voldoende water

Voor de kerntaak 'voldoende water' wordt in onderstaande tabellen een overzicht gegeven van de voor de werkwijze relevante informatie uit de studies en casussen besproken in Hoofdstuk 5.

Studie: Methodeontwikkeling optreden negatief verval	Kunstwerken: Stuw Hagestein	Meer informatie: Bijlage F
--	---------------------------------------	--------------------------------------

Korte beschrijving:

Methodiekontwikkeling voor het bepalen van de functionele prestatie van stuwen met betrekking tot negatief verval over de stuw, waarbij de stuw Hagestein als voorbeeld is gebruikt.

Relevante parameters voor eisen/wensen:

Optreden negatief verval (gerelateerd aan geregistreerde waterstanden boven- en benedenstrooms)

Beschouwde drivers:

Zeespiegelstijging en verandering rivierafvoer

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Verskil in geregistreerde waterstanden boven- en benedenstroomse in combinatie met zeespiegelstijging (KNMI'23 scenario's) en 100-jarige afvoerreeksen (KNMI'14 scenario's)

Gevonden knelpunten:

Negatief verval kan mogelijk al optreden bij stuw Hagestein bij lage rivierafvoer gecombineerd met stormopzet benedenstrooms. Gezien de verwachting zeespiegelstijging en rivierafvoer volgens de KNMI'23 scenario's zou negatief verval al kunnen optreden rond 2050 ten tijde van lage rivierafvoer.

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

Niet beschouwd.

Studie: Methodeontwikkeling capaciteit bergingsgebieden	Kunstwerken: Beweegbare keringen (casus Europoortkering)	Meer informatie: Bijlage E
---	--	--------------------------------------

Korte beschrijving:

Methodiekontwikkeling voor het bepalen van knelpunten in de bergingscapaciteit van het achterland bij gesloten beweegbare keringen

Relevante parameters voor eisen/wensen:

Maximaal toegestane waterstand in het achterland

Beschouwde drivers:

Zeespiegelstijging (en overstortend debiet als gevolg), piekafvoeren, extreme neerslag

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Waterbalans op basis van de beschikbare bergingscapaciteit in het achterland, waarbij er geen uitgaand water is vanwege de gesloten keringen en de hoeveelheid binnenkomend water wordt gebaseerd op overstortend water, rivierafvoer en neerslag gedurende de keringsoperatie

Gevonden knelpunten:

Indien na afloop van een extreem neerslagevenement een storm optreedt, wordt de kans op te hoge waterstanden in bergingsgebieden groter.

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

- Het beschikbaar maken van extra bergingsgebieden
- Tussentijds spuien (bijv. bij laagtij)

Studie: Methodiekontwikkeling afvoercapaciteit	Kunstwerken: Bathse Spuisluis	Meer informatie: Bijlage C
--	---	--------------------------------------

Korte beschrijving:

Methodiekontwikkeling voor het bepalen van de functionele prestatie van spuisluizen voor waterbeheer, waarbij de Bathse spuisluis als voorbeeld is gebruikt.

Relevante parameters voor eisen/wensen:

Afvoercapaciteit (gerelateerd aan geregistreerde afvoeren)

Beschouwde drivers:

Zeespiegelstijging

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Standaard overlaatformules

Gevonden knelpunten:

Afname van de spuicapaciteit bij zeespiegelstijging, bij 2.5 m zeespiegelstijging nauwelijks capaciteit over, daarvoor al een grote afname.

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

- Toevoegen extra spuicapaciteit
- Toevoegen pompen
- Water afvoeren via andere kunstwerken of water tijdelijk elders bergen
- Tijdelijk hoger peil toestaan
- Peiltrap verhogen

Studie: Verkenning levensduur kunstwerken rond Haringvliet	Kunstwerken: Volkeraksluizen en omliggende kunstwerken	Meer informatie: Paragraaf 5.3.4 en Deltares (2021b)
--	--	--

Korte beschrijving:

Voor het uitwerken van de methodiekontwikkeling functionele prestatie in relatie tot langetermijnontwikkelingen van de Zuidwestelijke Delta is gekeken naar het effect van zeespiegelstijging op de natte kunstwerken rond het Haringvliet. De functionele prestatie van de Volkeraksluizen, is kwantitatief uitgewerkt voor de functies hoogwaterveiligheid, scheepvaart en waterberging op het Volkerak Zoommeer. Functionele samenhang tussen functies en tussen kunstwerken is een belangrijk uitgangspunt in deze studie.

Relevante parameters voor eisen/wensen:

- Inzet berging Volkerak-Zoommeer
- Kerende hoogte schut- en inlaatsluizen

Beschouwde drivers:

Zeespiegelstijging en (aangenomen) gekoppelde peilstijging Haringvliet

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Hydra-NL, informatie over de sluisen en het systeem gecombineerd tot een kwantitatieve inschatting

Gevonden knelpunten:

- Het bergend vermogen van het Haringvliet wordt door zeespiegelstijging kleiner, waardoor het gezamenlijke bergend vermogen van het Haringvliet en het VZM af neemt.
- Vaker bereiken van de kerende hoogte zorgt ervoor dat er vaker geen sturing vanuit de Volkeraksluizen op het Volkerak-Zoommeer is.

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten: Niet beschouwd.

Studie: DEVO en DEZY	Kunstwerken: Bathse spuisluis, Krammersluizen, Volkeraksluizen (DEVO); Oranjesluis, spuisluizen Afsluitdijk en Houtribdijk, spuisluis en gemaal Afsluitdijk (DEZY)	Meer informatie: HKV (2016; 2017a)
--------------------------------	--	--

Korte beschrijving:

HKV heeft probabilistische bakjesmodellen ontwikkelt die waterstandoverschrijdingslijnen kunnen berekenen in peilgestuurde systemen zoals het Volkerak-Zoommeer en het IJsselmeer. De DEVO/DEZY aanpak is op dit moment alleen geschikt voor de functies peilhandhaving en hoogwaterafvoer.

Relevante parameters voor eisen/wensen:

- Peil Volkerak-Zoommeer (DEVO)
- Peil IJsselmeer (DEZY)

Beschouwde drivers:

- Zeespiegelstijging
- Veranderende rivierafvoer en neerslag

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Probabilistische bakjesmodellen DEZY en DEVO

Gevonden knelpunten:

Niet gespecificeerd voor beschouwde drivers.

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

- Ander streefpeil
- Pompen in plaats van spuisluizen
- Extra spuicapaciteit
- Andere herstelduren en faalkansen bij de Bathse Spuisluis (alleen DEVO)
- Andere inzetfrequentie Volkerak-Zoommeer als berging (alleen DEVO)
- Ander inzetcriterium Krammersluizen (alleen DEVO)

Studie: GT-VONK	Kunstwerken: Gemalen, sifons, duikers en hevels, spui- en uitwateringssluizen, stuwen en waterreguleringswerken	Meer informatie: HKV & Iv-Infra (2014), HKV (2015a)
---------------------------	---	---

Korte beschrijving:

Methodiekontwikkeling voor het bepalen van een tijdsvenster voor het einde functionele levensduur voor de functie waterbeheer voor gemalen, sifons, duikers en hevels, spui- en uitwateringssluizen, stuwen en waterreguleringswerken.

Relevante parameters voor eisen/wensen:

- Doorvoeren maatgevend debiet en voorkomen overschrijden kritiek peil
- Keren maatgevend verval
- Overschrijden alarmpeil gedurende minimaal één dag vaker dan 1 keer per 100 jaar (gemalen, sifons, duikers, hevels, spui- en uitwateringssluizen)
- Dijkhoogte als gevolg van opstuwung door stuw later dan hydraulisch belastingniveau met een overschrijdingsfrequentie van 1/N jaar (stuwen)
- Onvoldoende afvoercapaciteit voor één dag of langer vaker dan 1 keer per 10 jaar (waterreguleringswerken)

Beschouwde drivers:

- Zeespiegelstijging
- Veranderende rivierafvoer

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Resultaten Deltamodel (zichtjaren 2015, 2050, 2100) voor 4 Deltascenario's worden met behulp van de ontwikkelde methode uitgedrukt in tijdsvensters waarbinnen einde levensduur optreedt. Deze tijdsvensters worden afgebakend door het eerste en het laatste faalmoment waarop de Deltascenario's door een grenscriterium voor de desbetreffende functie-eis gaan. Hierbij is gekeken naar één of maximaal twee functies per type kunstwerk.

Gevonden knelpunten:

- Kwaliteit en bruikbaarheid uitkomsten voor gemalen, sifons, duikers, hevels en waterreguleringswerken onvoldoende (te kort aan object- en modelinformatie)
- Einde functionele levensduur beschouwde spui- en uitwateringssluizen in 2015 (waarbij kanttekeningen bij de gestelde eisen worden gesteld)

- Einde functionele levensduur stuwen (in 2015 of na 2100) (waarbij kanttekeningen worden geplaatst en expert judgement van de resultaten nodig is)

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

Niet beschouwd.

Studie: Methodeontwikkeling zoutmanagement	Kunstwerken: Noordersluis IJmuiden	Meer informatie: KpNK (2024)
--	--	--

Korte beschrijving:

Methodiekontwikkeling voor het bepalen van de functionele prestatie van (zee)sluizen met de functie zoutmanagement, waarbij in eerste instantie het systeem Noordzeekanaal – Amsterdam-Rijnkanaal gebruikt is als casus en vervolgens is gekeken naar de mogelijkheid van generieke toepassing op alle Nederlandse zeesluizen. Er is gekeken naar de waterstanden, zoutgehaltes, spuicapaciteit en de vraag naar zoetwater om het systeem voldoende zoet te houden.

Relevante parameters voor eisen/wensen:

(Gewenste) zoutgehaltes, waarbij systeemeisen nog moeten worden vertaald naar eisen aan het object

Beschouwde drivers:

- Zeespiegelstijging
- Veranderende afvoer

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Snelle kwantificering m.b.v. de ZSF als stand-alone model of het ZoutTransportModel.

Gevonden knelpunten:

- Vanaf een bepaalde hoeveelheid zeespiegelstijging is het niet meer mogelijk om te spuien onder vrij verval en moet overtollig water worden weggepompt
- De vraag naar zoet water neemt toe met zeespiegelstijging, maar het aanbod wordt schaarser in tijden van droogte

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

Met de ZSF mogelijk om te kijken naar:

- Effect mitigerende maatregelen (bellenscherm en drempels op beide sluishoofden, spoeldebiet)
- Beperken deur-opentijd

Studie: ROBAMCI	Kunstwerken: Gemaal IJmuiden	Meer informatie: ROBAMCI (2016)
---------------------------	--	---

Korte beschrijving:

In Risk and Opportunity Based Asset Management for Critical Infrastructures (ROBAMCI) zijn kennis, methoden en tools ontwikkeld waarmee 'efficiencywinst' kan worden bereikt over de levensduur van natte kunstwerken, onder andere a.d.h.v. de casus gemaal IJmuiden.

Relevante parameters voor eisen/wensen:

- Maximaal waterpeil
- Afvoercapaciteit

Beschouwde drivers:

- Extremere regenval
- Zeespiegelstijging

Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie:

Kosten-batenanalyse op basis van onder andere de benodigde afvoercapaciteit in verschillende scenario's

Gevonden knelpunten:

- Totale kosten zeer gevoelig voor het gekozen streefpeil

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

- Uitbreiding gemaal IJmuiden
- Uitbreiding gemaal Zeeburg
- Bouw van een gemaal bij de Beatrixsluis
- Uitbreiden van gemaal Gouda

B.4 Kerntaak: Schoon en gezond water

Voor de kerntaak 'schoon en gezond water' wordt in onderstaande tabel een overzicht gegeven van de voor de werkwijze relevante informatie uit de studies en casussen besproken in Hoofdstuk 5.

Studie: Kwantificeren passeerbaarheid en habitatgeschiktheid voor migrerende vis	Kunstwerken: Stuwcomplexen in de Maas en Nederrijn-Lek	Meer informatie: Deltares (2024k)
Korte beschrijving: Methodiekontwikkeling voor het bepalen van de functionele prestatie van stuwcomplexen die invloed hebben op de habitatgeschiktheid van waterlichamen (stuwpannen) voor vissen en het migratiesucces van migrerende vissen.		
Relevante parameters voor eisen/wensen: <ul style="list-style-type: none">• Percentage succesvolle passages;<ul style="list-style-type: none">◦ Voor waterkrachtcentrales is een eis beschikbaar bij vergunningsverlening (maximaal 10% cumulatieve vissterfte in een gestuwd traject voor Europese aal en Atlantische zalm ten gevolge van de waterkrachtcentrale)◦ Voor andere objecten in het stuwcomplex zijn eisen afwezig• Habitatgeschiktheid waterlichaam		
Beschouwde drivers: <ul style="list-style-type: none">• Veranderende afvoer		
Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie: Snelle kwantificering met behulp van de analysetool vispasseerbaarheid (Deltares, 2021c) en de KRW-Verkenner module Ecologie Rijkswateren (Deltares, 2021a).		
Gevonden knelpunten: <ul style="list-style-type: none">• Gebrek aan stromend water door de vistrap bij droogte (via regelwerk)• Potentieel geschikte habitatten zijn slecht bereikbaar door de beperkte passeerbaarheid• Vistrappen zijn over het algemeen niet geschikt voor alle soorten die er gebruik van moeten kunnen maken		
Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten: Met de analysetool vispasseerbaarheid (passeerbaarheid): <ul style="list-style-type: none">• Plaatsen/verwijderen waterkrachtcentrales• Aanleg nevengeul ('Light', alleen gebaseerd op afvoerverdeling over het stuwcomplex)• Vervanging door ander stuwtype ('Light', alleen gebaseerd op afvoerverdeling) Met de KRW-V module Ecologie Rijkswateren (habitatgeschiktheid): <ul style="list-style-type: none">• Aanleg nevengeul ('Heavy' vanwege de noodzaak voor nieuwe WAQUA sommen)• Vervanging door ander stuwtype via de daardoor veroorzaakte verandering in waterdiepte en stroomsnelheid ('Heavy' vanwege de noodzaak voor nieuwe WAQUA sommen)		
Studie: Optimaliseren pompbesturing voor veiligere palingmigratie	Kunstwerken: Gemaal IJmuiden	Meer informatie: Deltares (2024d)
Korte beschrijving: Het Instrument voor het Waterpeilbeheer (IWP) wordt onder andere toegepast om adviezen te genereren voor optimaal waterbeheer. In dit project wordt een adviesmodule ontwikkeld die de volgorde van de inzet en de stand van de pompen van gemaal IJmuiden optimaliseert om aan verschillende randvoorwaarden te kunnen voldoen, waaronder veiligere palingmigratie.		
Relevante parameters voor eisen/wensen: <ul style="list-style-type: none">• Pompcapaciteit• Afvoer NZK-ARK• Aan/uit-tijd pompen (energiezuinigheid)• Vissterfte• Windopzet		
Beschouwde drivers: <ul style="list-style-type: none">• Rivierafvoer• Neerslag		
Gebruikte aanpak en modellen functionele prestatie: Optimalisatie van de controleparameters (multi-objective optimization), met behulp van RTC-tools		

Gevonden knelpunten:

- Door de rangschikking van eisen is de meest optimale configuratie niet altijd de beste configuratie qua visvriendelijkheid

Geïdentificeerde maatregelen of VenR-varianten:

- Het pomptype en de besturing daarvan heeft een grote invloed op de vismortaliteit
 - VenR-variant: visvriendelijkere pompen plaatsen, en de meest visonvriendelijke pompen als eerste vervangen

C Spuisluizen en spuicapaciteit

C.1 Introductie

Zeespiegelstijging zorgt voor een afname van de functionele prestatie van spuisluizen door een afname van de beschikbare spuicapaciteit. De Bathse Spuisluis is binnen het KpNK gebruikt als voorbeeld om een methodiek voor het kwantificeren van de functionele prestatie voor spuicapaciteit onder zeespiegelstijging te ontwikkelen. Deze methode is vervolgens op verschillende spuisluizen in Nederland toegepast om te komen tot een landelijke kaart en te testen hoe generiek toepasbaar de methode is. De resultaten hiervan geven een indicatief en illustratief beeld en zijn niet bedoeld om specifieke conclusies over deze spuisluizen te trekken.

C.2 Methodeontwikkeling afvoercapaciteit: Casus Bathse spuisluis voor de functie waterbeheer

C.2.1 Introductie

De Bathse Spuisluis voert water uit het Volkerak-Zoommeer via het Bathse spuikanaal af naar de Westerschelde (zie Figuur C.1). Dit wordt gedaan voor zowel peilbeheer als doorspoeling. De doorspoeling is van belang ter bestrijding van blauwalgoverlast en het beperken van de chlorideconcentratie op het meer. Het peilbeheer op het Volkerak-Zoommeer volgt een peiltrap die is afgestemd op grenzen in waterpeilen ten gunste van broedvogels. Voor het reguliere peilbeheer en het doorspoelen worden frequent kleine hoeveelheden water afgevoerd. Voor momenten waar veel water afgevoerd moet worden, wordt een groter deel van de capaciteit van de spuisluis ingezet (IPLO, z.d.).

Zeespiegelstijging zorgt voor hogere waterstanden op de Westerschelde. Dit zorgt voor een verlaging van de afvoercapaciteit van de Bathse Spuisluis door een afname van de beschikbare tijd om te spuien en door een afname van het maximum verval in een spui-tijdslot. Het water op het Volkerak-Zoommeer kan met zeespiegelstijging dus minder vaak en minder goed (onder vrij verval) worden afgevoerd via de Bathse Spuisluis. Dit is daarmee een verwachte toekomstige afname van de functionele prestatie.



Figuur C.1 Bathse Spuisluis en het Volkerak-Zoommeer (links: Google Earth, rechts: Rijkswaterstaat)

C.2.2 Afvoercapaciteit

Hoeveel water er afgevoerd kan worden is afhankelijk van de afvoercapaciteit. De afvoercapaciteit is afhankelijk van het verval over de spuisluis en de vormgeving van de spuisluis. Dit kan berekend worden met een afvoerformule uit de literatuur en handboeken/collegedictaten.

Afvoer door een spuisluis, of over een overlaat, kan optreden in twee verschillende toestanden: volkomen of onvolkomen afvoer. Bij stroming volgens een volkomen overlaat is de afvoer alleen afhankelijk van de bovenstroomse waterstand, terwijl voor een onvolkomen overlaat zowel de boven- als de benedenstroomse randvoorwaarde de afvoer bepaalt. Voor veel spuisluisen is het grootste deel van de tijd de afvoer onvolkomen, maar dit geldt niet altijd. De benedenstroomse waterstand remt dan de stroming door de opening. Als de benedenstroomse waterstand lager wordt, neemt deze remmende weerstand af. De afvoer wordt op een gegeven moment volledig gestuurd door de bovenstroomse waterstand, er is dan sprake van een volkomen afvoer.

Er bestaan meerdere afvoerformules voor overlaten. In de basis zijn die niet erg complex, maar het goed bepalen welke formule en welke coëfficiënten het beste waar toegepast kunnen worden vraagt de nodige aandacht. Voor de methodiekontwikkeling wordt gebruik gemaakt van de formules en parameters zoals deze ook zijn opgenomen in het LMW-systeem¹¹. De formules beschrijven de situaties van – en overgangen tussen – volkomen en onvolkomen afvoer, zoals hieronder gegeven.

$$\text{Onvolkomen overlaat: } H_{be} \leq H_{bo} \leq \frac{3}{2} H_{be}$$

$$Q = \mu N B H_{be} \sqrt{2 g (H_{bo} - H_{be})} \quad (\text{C. 1})$$

$$\text{Volkomen overlaat: } H_{bo} > \frac{3}{2} H_{be}$$

$$Q = \mu N B \frac{2}{3} H_{bo} \sqrt{\frac{2}{3} g H_{bo}} \quad (\text{C. 2})$$

Voor een situatie zoals de Bathse Spuisluis geldt hierbij: H_{be} , de benedenstroomse waterstand ten opzichte van de bodem van de koker in meter, H_{bo} , de bovenstroomse waterstand ten opzichte van de bodem van de koker in meter, Q afvoer in m³/s, μ de afvoercoëfficiënt (kunstwerk-specifieke schalingsfactor), N het aantal kokers, B de breedte per spuijoker in m en g de gravitatieconstante in m/s².

C.2.3 Casus-uitwerking

Hieronder wordt de methode voor het bepalen van functionele prestatie voor afvoercapaciteit van een spuisluis uitgewerkt voor de Bathse Spuisluis. Er wordt gebruik gemaakt van bovenstaande formules voor een onvolkomen en volkomen overlaat. Met behulp van reeksen van beneden- en bovenstroomse waterstanden wordt hiermee de maximaal mogelijke afvoer in de huidige situatie en onder zeespiegelstijging uitgerekend. Deze afvoercapaciteit wordt vervolgens gerelateerd aan de benodigde afvoer bij Bath, waarvoor een registratie van de gerealiseerde afvoer bij Bath wordt gebruikt. Tot slot wordt er kort ingegaan op mogelijke maatregelen om de functionele prestatie voor wat betreft deze hoofdfunctie van de spuisluis te verhogen.

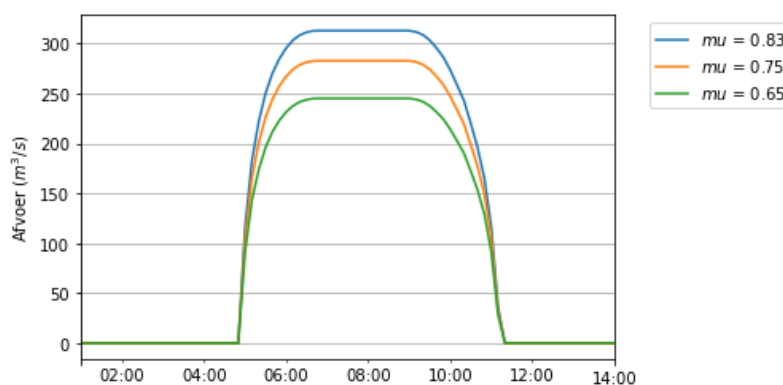
¹¹ Landelijk Meetnet Water, zoals opgevraagd bij Rijkswaterstaat Zee en Delta (1/3/2023).

C.2.3.1. Gegevens

In het kader van methodiekontwikkeling worden de gegevens van de spuisluis zoals ook genomen in het LMW-systeem¹¹ aangehouden.

Parameter	Waarde
Aantal spuiokers (N)	6
Breedte per spuioker (B)	3.2 m
Niveau bodem in spuioker	-5 m NAP
Afvoercoëfficiënt (μ)	0.83

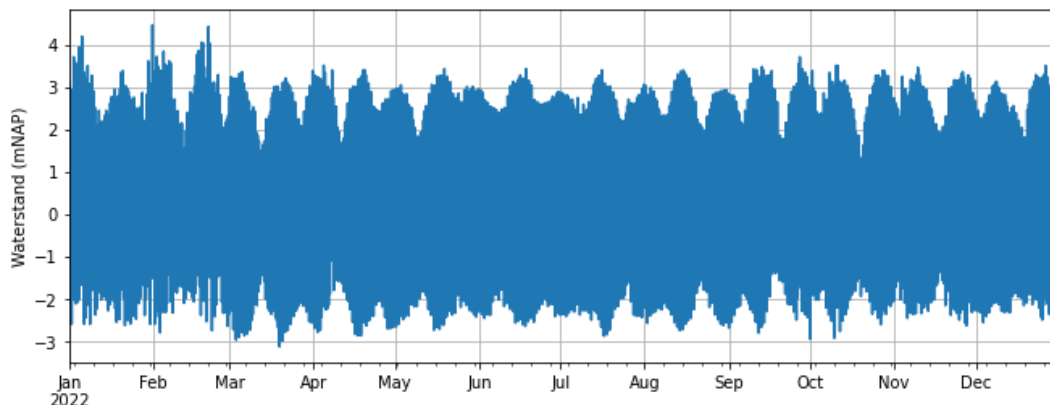
Een belangrijke parameter is de afvoercoëfficiënt, die sterk object-specifiek is. In een vervolg is meer aandacht nodig voor het afleiden van de afvoercoëfficiënt. Deze is onder andere ook afhankelijk van de data op basis waarvan deze bepaald is (de locatie van de waterstandsmetingen en de stand van de schuiven), zie ook Paragraaf C.4.1. Zoals in de formules hierboven te zien is, is de afvoer recht evenredig met de afvoercoëfficiënt. Het goed bepalen van de afvoercoëfficiënt is daarom van belang. In verschillende studies zijn verschillende afvoercoëfficiënten voor de Bathse Spuisluis gebruikt. Tussen 2017 en 2019 zijn drie debietmetingen uitgevoerd bij de Bathse Spuisluis. Op basis daarvan is de afvoercoëfficiënt in de LMW-systemen meest recentelijk vastgesteld op 0.83. In deze studie wordt daarom ook met deze waarde gerekend. Ter vergelijking van het effect van deze parameter is de afvoer gedurende één getijcyclus uitgerekend met verschillende waarden voor de afvoercoëfficiënt (Figuur C.2).



Figuur C.2 Uitkomsten van principe-berekeningen van het debiet door de Bathse Spuisluis voor verschillende mogelijke waarden van de afvoercoëfficiënt van dit kunstwerk.

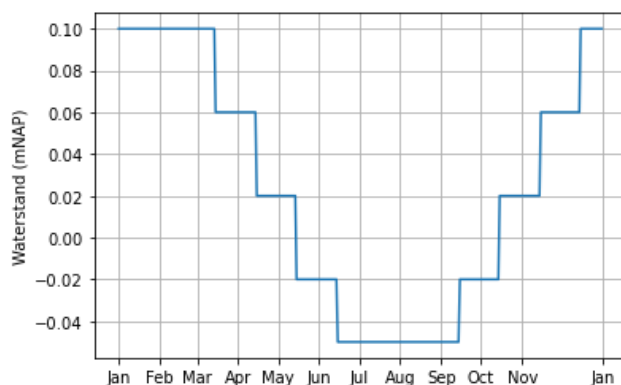
Voor de waterstand op de Westerschelde wordt gebruik gemaakt van een reeks waterstanden bij het meetstation Bath in 2022 uit Waterinfo¹² (zie Figuur C.3). Voor het berekenen van het effect van zeespiegelstijging worden de waterstanden in deze reeks verhoogd met de zeespiegelstijging. Deze reeks van één jaar wordt nu gebruikt voor methodiekontwikkeling. Meerjaarlijkse getijcycli en eventuele veranderingen in het getij door zeespiegelstijging worden hier niet meegenomen.

¹² waterinfo.rws.nl



Figuur C.3 10-minuten waarde van de waterstand bij meetstation Bath.

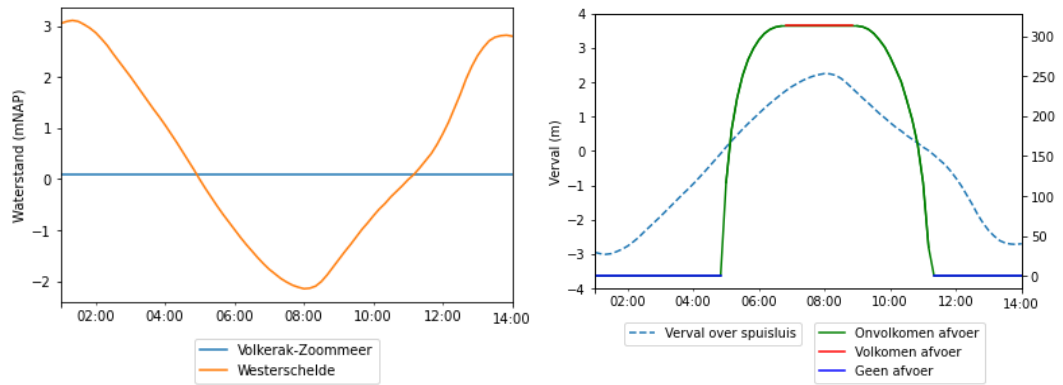
Voor de waterstand bovenstrooms wordt gebruik gemaakt van de peiltrap op het Volkerak-Zoommeer zoals gebruikt in Deltares (2020a). Deze peiltrap beschrijft het streefpeil van het Volkerak-Zoommeer door het jaar heen (zie Figuur C.4). In werkelijkheid zal het waterpeil fluctueren rondom deze waarde met bandbreedte voor een minimum en maximum afwijking ten opzichte van het momentane streefpeil.



Figuur C.4 Peiltrap op het Volkerak-Zoommeer

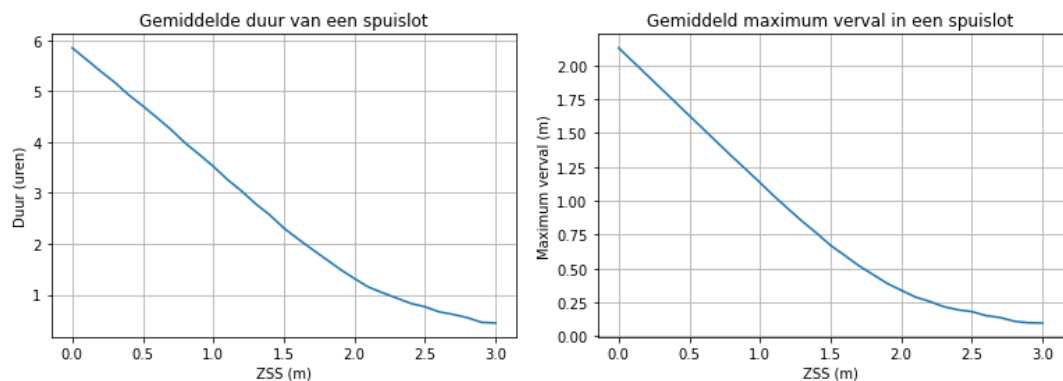
C.2.3.2. Huidige capaciteit en capaciteit bij zeespiegelstijging

Figuur C.5 laat de berekende maximaal beschikbare afvoer zien op basis van de gegeven waterstanden aan beide zijden van de spuisluis. Ter illustratie is hier de uitkomst voor de duur van één gehele getijdencyclus getoond. Te zien is dat – conform verwachting – als het verval toeneemt, de afvoer ook toeneemt. De overgang van onvolkomen naar volkomen afvoer is ook aangegeven. Bij onvolkomen afvoer wordt de afvoer bepaald door het verval en dus mede door de benedenstroomse waterstand. Bij volkomen afvoer doet de benedenstroomse waterstand (Westerschelde) er niet meer toe en varieert de afvoer niet meer in de tijd vanwege de op de hier getoonde tijdschaal betrekkelijk constante bovenstroomse waterstand.



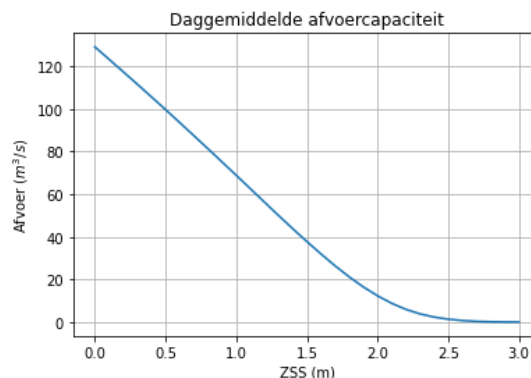
Figuur C.5 Links: Waterstand op het Volkerak-Zoommeer en de Westerschelde voor één getijdencyclus. Rechts: Bijbehorend verval over de Bathse Spuisluis en afvoerregimes.

Zeespiegelstijging betekent dat de beschikbare tijd per dag om water te spuien (onder vrij verval) afneemt, zie Figuur C.6 – links, waarbij 0 m zeespiegelstijging refereert aan de situatie in 2022. Het water op de Westerschelde is daardoor namelijk steeds korter lager dan het water op het Volkerak-Zoommeer. Tegelijkertijd neemt het gemiddelde maximale verval dat optreedt tijdens een beschikbaar spuislot af. Het maximale positieve verval – hogere waterstand op het Volkerak-Zoommeer dan op de Westerschelde – wordt kleiner, zie Figuur C.6 – rechts. Beide effecten – kortere duur en lager verval – betekenen een verlaging van het totale volume dat per getijdencyclus onder vrij verval kan worden geloosd. Beide figuren laten een snelle afname zien, die vanaf ongeveer 2 m zeespiegelstijging minder snel daalt. Dat is het moment dat de waterstand van het meer dicht bij het dal van de sinus van de getijdencyclus zit.



Figuur C.6 Gemiddelde duur van een spuislot (links) en gemiddeld maximum verval in een spuislot (rechts) bij verschillende niveaus van zeespiegelstijging.

Figuur C.7 laat de daggemiddelde afvoercapaciteit over één jaar (gebaseerd op de waterstanden op de Westerschelde in 2022) voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging zien. De huidige gemiddelde capaciteit ligt net boven de 120 m³/s, maar dit neemt met zeespiegelstijging snel af tot er bij ongeveer 2.5 m zeespiegelstijging nauwelijks capaciteit over is om onder vrij verval nog te kunnen spuien.

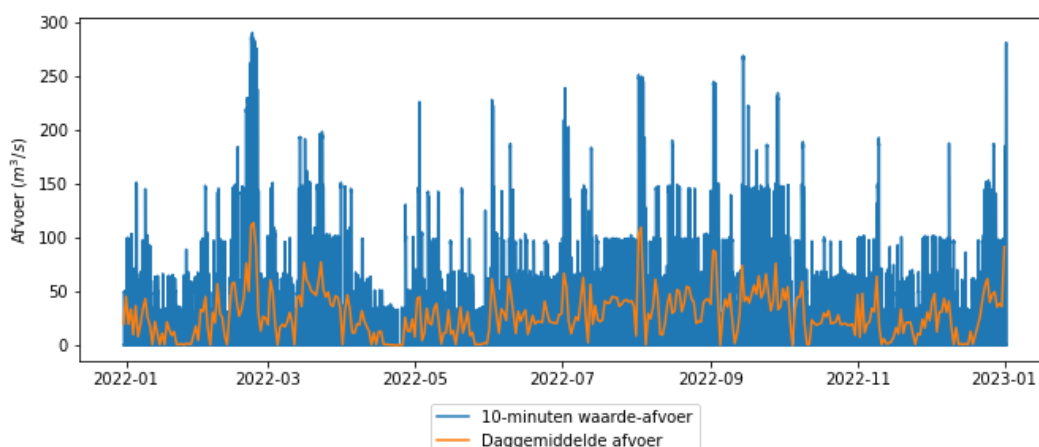


Figuur C.7 De afname van de beschikbare spuiduur en het beschikbare verval bij zeespiegelstijging zorgt voor een afname van de gemiddelde spuicapaciteit.

C.2.3.3.

Vergelijking met geregistreerde afvoeren

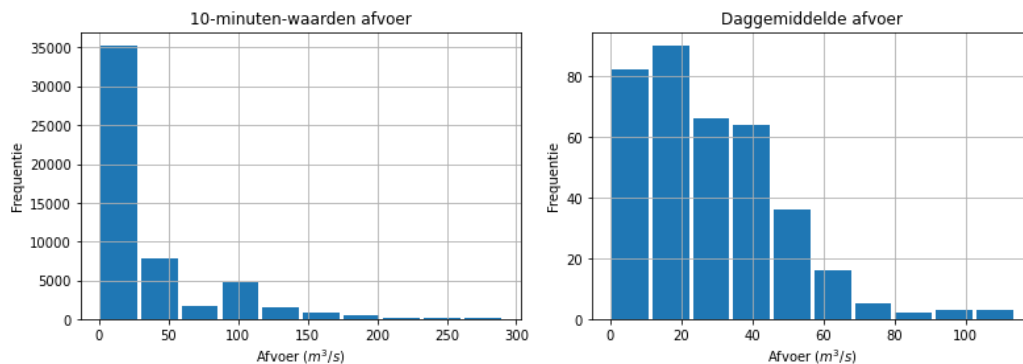
Om de hierboven berekende maximaal beschikbare spuicapaciteit in verhouding te zetten en te zien hoeveel van de capaciteit in de huidige situatie daadwerkelijk wordt gebruikt wordt deze vergeleken met de geregistreerde afvoer bij de Bathse Spuisluis in 2022 van Waterinfo¹³. Hierbij is niet gekeken hoe representatief 2022 voor de afvoer is. Deze afvoer zoals vastgelegd in LMW wordt afgeleid uit metingen van de waterstand boven- en benedenstrooms van de spuisluis en informatie over het gebruik van de spuiokers uit HMC (Hydro Meteo Centrum van Rijkswaterstaat). Deze afleiding wordt gedaan volgens de formules en coëfficiënten zoals hierboven beschreven met als toevoeging de informatie over het aantal ingezette spuiokers. In Figuur C.8 zijn zowel de 10-minutenwaarden als de daggemiddelde waarde weergegeven. De 10-minuten waarden kunnen veel hoger liggen dan de daggemiddelde waarden als gevolg van een groot verval van korte duur (door laag laagwater).



Figuur C.8 Geregistreerde afvoer bij de Bathse Spuisluis

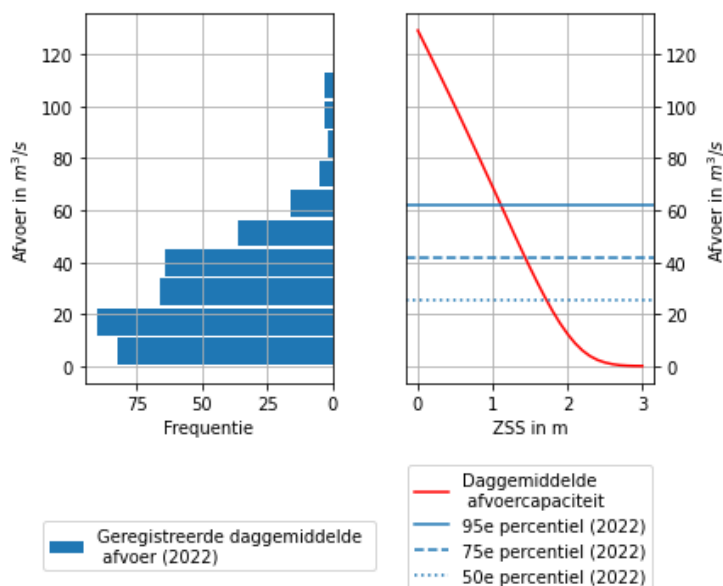
Figuur C.9 laat het de verdeling van het optreden van verschillende klassen van afvoeren per 10-minuten en gemiddeld per dag zien. Te zien is dat af en toe grote debieten worden afgevoerd door veel kokers open te zetten, maar dat het grootste deel van de tijd minder kokers worden ingezet en de afvoer onder de 50 m³/s blijft. Voor het waterbeheer is de daggemiddelde afvoer meer van belang. De hier afgeleide waarden voor de (huidige) praktische inzet hebben een bereik van 0 tot 115 m³/s.

¹³ waterinfo.rws.nl



Figuur C.9 Histogrammen van de afvoer bij Bath per 10 minuten en in daggemiddelde waarden.

Met de aanname dat er in de toekomst een vergelijkbare daggemiddelde afvoer gerealiseerd moet worden als geregistreerd in 2022, kan de afvoer van 2022 vergeleken worden met de daggemiddelde afvoercapaciteit onder zeespiegelstijging (zoals ook weergegeven in Figuur C.7). Figuur C.10 laat de gemiddelde afvoercapaciteit voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging zien gerelateerd aan de geregistreerde daggemiddelde afvoer. Waar beschikbaar zou hier ook vergeleken kunnen worden met een toekomstig nodige daggemiddelde afvoer.



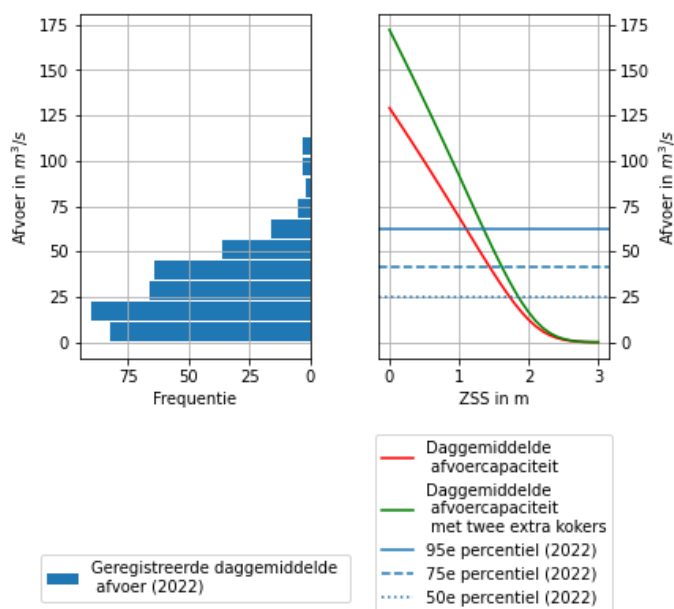
Figuur C.10 De verandering in afvoercapaciteit bij zeespiegelstijging gerelateerd aan de daadwerkelijke afvoer (hier vergeleken met het jaar 2022).

Tot 1 meter zeespiegelstijging is in 95% van dagen de afvoercapaciteit voldoende. Dit betekent dus dat er in 5% van de dagen het streefpeil niet gehandhaafd kan worden. Dit zijn bijvoorbeeld dagen met veel regenval in Noord-Brabant. Bij 1.4 m zeespiegelstijging lukt het handhaven van het streefpeil nog maar op zo'n 75% van de dagen en bij 1.7 m zeespiegelstijging zo'n 50% van de dagen. Er zijn dus steeds meer dagen waarop het peil niet gehandhaafd kan worden, waardoor de beheerder een steeds grote bandbreedte op het gewenste peil zal moeten accepteren. Bij 2.5 m zeespiegelstijging is er nauwelijks capaciteit om te spuien over onder vrij verval en zullen pompen ingezet moeten gaan worden om het overtollige water naar de Westerschelde te pompen.

C.2.3.4. Maatregelen

Als er te weinig capaciteit is, stijgt tijdelijk het peil op het meer. Als continue handhaving van het peil heel belangrijk is, zijn er diverse maatregelen denkbaar om de functionele prestatie te verhogen. Hierbij kan gedacht worden aan maatregelen in het systeem of maatregelen bij/aan het kunstwerk. De op dit moment geïdentificeerde potentiële maatregelen worden hieronder kort toegelicht.

De afvoercapaciteit bij de spuisluis kan bijvoorbeeld worden verhoogd door het toevoegen van extra kokers. Dit geeft extra afvoercapaciteit (zie de factor N in de formules), maar de spuicapaciteit per koker neemt nog steeds af met de zeespiegelstijging. Dit is zichtbaar in Figuur C.11 voor twee extra spuikokers.



Figuur C.11: Het toevoegen van twee extra spuikokers verhoogt de capaciteit, echter neemt de capaciteit alsnog snel af.

Een andere mogelijke aanpassing is het ombouwen van de spuisluis naar een gemaal door het plaatsen van pompen, zodat er onafhankelijk van het verval gespuid kan worden. Dit is echter een kostbare optie zowel qua investeringen als qua energieverbruik.

Er zijn ook maatregelen elders in het systeem denkbaar. Mogelijk kunnen op piekmomenten andere kunstwerken in het betrokken watersysteem meer water afvoeren of kan er minder water naar het meer worden toegevoerd. Bij de Krammersluizen is bijvoorbeeld al een nieuw spuumiddel gepland. Ook kan er mogelijk tijdelijk een hoger peil op het meer worden geaccepteerd. Dit geeft bergingscapaciteit en door de resulterende hogere waterstand kan het water over een langere duur worden afgevoerd en met een groter verval. Tot slot, en in het verlengde van het voorgaande, is het mogelijk ook een optie om de peiltrap in zijn geheel te verhogen.

C.3 Toepassing op andere spuisluizen

Bovenstaande aanpak is ook toegepast op de Haringvlietsluizen, op het geplande nieuwe spuumiddel bij de Krammersluizen, op de spuisluizen in de Afsluitdijk en op de spuisluis in het sluisencomplex IJmuiden. Dit met als doel om te komen tot een landelijke kaart van de spuicapaciteit en te testen hoe generiek toepasbaar de methode is.

Hieronder worden de gebruikte invoer en resultaten besproken.

C.3.1 Spui- en vismigratiemiddel Krammersluizen

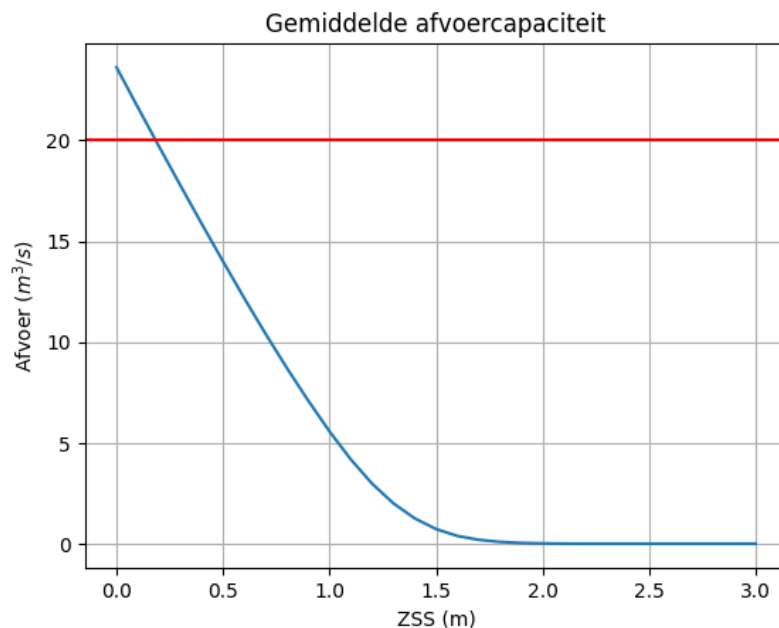
In de sommen wordt gebruikt van de beschikbare gegevens over het nieuwe spuumiddel bij de Krammersluizen, het spui- en vismigratiemiddel (SPVM). Dit spuumiddel is nog niet gerealiseerd, maar de plannen hiervoor zijn al wel concreet.

Aangezien niet alle gegevens van dit nog niet-gebouwde spuumiddel beschikbaar waren, is er in de berekening alleen rekening gehouden met een onvolkomen overlaat. De aanname is hiermee dat de spuiokers altijd geheel onder water zitten. Er wordt hierbij gebruik gemaakt van een 'effectief spuioppervlak', μ_A , van 12 m² op basis van eerdere berekeningen voor de renovatie en ombouw (Deltares, 2020c).

De waterstand in het Volkerak-Zoommeer wordt gegeven door een peiltrap, gelijk aan de sommen voor de Bathse Spuisluis. Voor de waterstand aan de buitenzijde wordt gebruik gemaakt van data van het meetpunt 'Krammersluizen West' op Waterinfo voor 2022.

Bij de andere spuisluizen wordt gebruik gemaakt van de geregistreerde afvoer als referentie voor de beschikbare spuicapaciteit. Aangezien het spuumiddel bij de Krammer nog niet gebouwd is, wordt er hier gebruik gemaakt van een minimum benodigd afvoerdebiet van 20 m³/s. Dit is de gewenste daggemiddelde afvoer buiten het groeiseizoen (Deltares, 2024c).

Figuur C.12 laat zien hoe de gemiddelde afvoercapaciteit bij de Krammersluizen afneemt met zeespiegelstijging. Bij een zeespiegelstijging van ongeveer 0.25 m is de gemiddelde afvoercapaciteit al lager dan de benodigde 20 m³/s. De afname van de afvoercapaciteit bij de Krammersluizen gaat sneller dan die bij de Bathse Spuisluis, vanwege de kleinere getij-amplitude.



Figuur C.12: Afname van de afvoercapaciteit bij de Krammersluizen bij zeespiegelstijging (in blauw) ten opzichte van het benodigd afvoerdebiet van 20 m³/s (in rood).

C.3.2 Spuisluizen Afsluitdijk: Kornwerderzand en Den Oever

Er zijn twee spuisluiscomplexen in de Afsluitdijk: bij Kornwerderzand (Lorentzsluizen) en bij Den Oever (Stevinsluizen). Voor de Stevinsluizen zijn resultaten voor het huidige en het nieuwe spuumiddel gegeven.

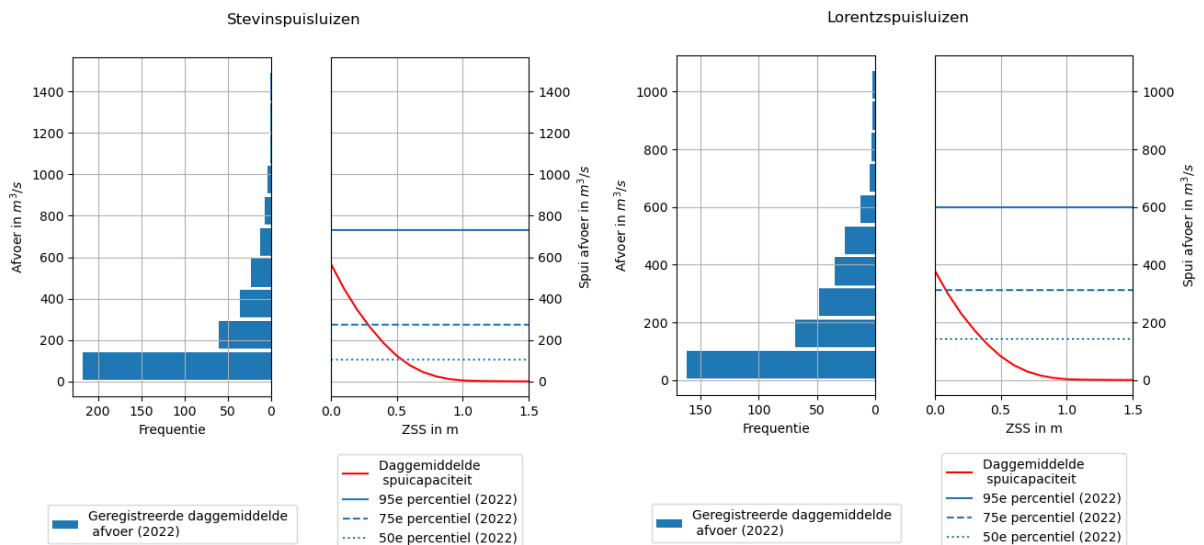
Voor waterstanden aan de Waddenzeekant worden gemeten data uit 2022 gebruikt. Voor Den Oever wordt gebruik gemaakt van meetstation 'Den Oever buiten' en voor Kornwerderzand van 'Kornwerderzand buiten'. Voor de waterstanden op het IJsselmeer worden de metingen aan de IJsselmeerzijde gebruikt ('Den Oever binnen' en 'Kornwerderzand binnen').

De gegevens over de spuicomplexen zelf zijn samengevat in Tabel C.1. De bodemhoogtes zijn bij benadering voor de huidige situatie geschat op -4,7 m NAP. De afvoercoëfficiënt wordt voor de huidige situatie op 1 ingeschat. In werkelijkheid varieert de afvoercoëfficiënt met het waterstandsverschil, zoals Tabel 3.1 in WL | Delft Hydraulics (2003b) voor de Stevinsluizen en Tabel 3.1 in WL | Delft Hydraulics (2003a) laat zien. Voor lage vervallen zal deze waarde lager liggen.

Tabel C.1: Eigenschappen spuisluisen bij Den Oever en Kornwerderzand

Parameter	Den Oever (Stevinsluizen)	Kornwerderzand (Lorentzsluisen)
Aantal spuiokers (N)	15	10
Breedte per spuioker (B)	12 m	12 m
Niveau bodem in spuioker	-4,7 m NAP	-4,7 m NAP
Afvoercoëfficiënt (μ)	1,0	1,0

Een aangevulde debietreeks uit het IWP over het jaar 2022 is beschikbaar voor de spuisluisen bij Den Oever en Kornwerderzand. Deze reeks geeft inzicht in het benodigd afvoerdebiet vanuit het IJsselmeer naar zee. Het resultaat van het vergelijk van de spuvraag met de spuicapaciteit is weergegeven in Figuur C.13 voor beide spuisluisen. In deze figuur is ook aangegeven hoe verschillende percentielen van de gemeten afvoerreeds zich verhouden tot de afvoercapaciteit van de spuisluis.



Figuur C.13: De verandering in afvoercapaciteit bij zeespiegelstijging gerelateerd aan de daadwerkelijke afvoer gemeten bij Stevinspuisluisen (Den Oever) en Lorentzspuisluisen (Kornwerderzand) (hier vergeleken met het jaar 2022).

De spuvraag en spuicapaciteit voor de Lorentzsluisen zijn kleiner dan voor de Stevinsluizen. Dit heeft onder andere te maken met het hogere aantal spuiokers bij de Stevinsluizen. Voor beide sluisen geldt dat rond een zeespiegelstijging van 0,3 m de daggemiddelde spuicapaciteit ongeveer gelijk is aan het 50e-percentiel van de gemeten afvoeren. Vanaf een

zeespiegelstijging van 0,9 m neemt de spuicapaciteit van beide spuisluizen dermate af dat er amper nog water afgevoerd kan worden via de spuisluizen.

Figuur C.13 laat zien dat voor beide locaties de berekende daggemiddelde spuicapaciteit over het jaar 2022 lager geweest is dan het 95-percentiel van de gemeten afvoeren over het jaar 2022. Er zijn dus dagen geweest dat de afvoer hoger was dan de daggemiddelde afvoer over het jaar. Dit kan verklaard worden door variaties over het jaar die zorgen voor een groter waterstandsverschil, bijvoorbeeld door peilopzet bij een piekafvoer of een lagere buitenwaterstand bij springtij of afwaaiing. De spuicomplexen in de Afsluitdijk worden momenteel gerenoveerd, inclusief de realisatie van extra pomp- en spuicapaciteit.

C.3.3 Spuisluis in het sluisencomplex IJmuiden

Om overtollig water uit het Noordzeekanaal te spuien worden spuisluizen en pompen in het sluisencomplex IJmuiden ingezet. Hieronder wordt gekeken naar de afvoercapaciteit van de spuisluis.

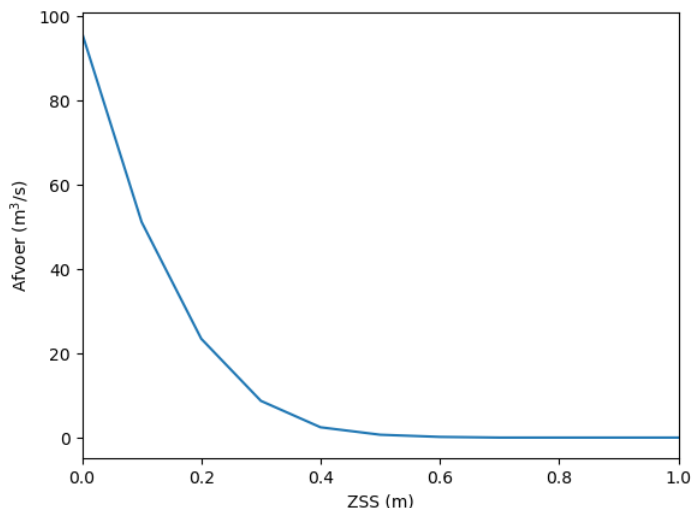
Voor de waterstanden aan de zee- en kanaalzijde wordt gebruik gemaakt van waterhoogte metingen van Waterinfo voor het jaar 2023 op de locaties 'IJmuiden buitenhaven' en 'IJmuiden binnen'. De waterstand op het Noordzeekanaal ligt gemiddeld tussen de -0,4 en -0,5 m NAP.

De spuisluis bij IJmuiden beschikt over 7 spuiokers met elk een breedte van 4,8 m. Het niveau van de drempel van de spuisluizen ligt op -9,25 m NAP (Rijkswaterstaat, 2004). Er zijn meerdere afvoercoëfficiënten opgesteld voor de spuisluis. WL | Delft Hydraulics (1997) heeft eerder een afvoercoëfficiënt van 1,28 afgeleid. Overigens, uit recentere metingen van het besturingssysteem van de spuisluis (Rijkswaterstaat, 2004) bleek dat het debiet pas optrad vanaf een minimum verval van 12 cm vanwege dichtheidsverschillen over de spuisluis. Met dit in acht genomen is een nieuwe afvoercoëfficiënt afgeleid van 1,424, welke nog niet is gevalideerd (Rijkswaterstaat, 2004). De afvoercoëfficiënt zal ook enigszins veranderen als gevolg van de realisatie van het zoutscherm in het binnenspuikanaal. Deze afvoercoëfficiënt van 1,424 bij een minimum verval van 12 cm wordt verder gebruikt voor deze verkenning van de spuisluizen bij IJmuiden. In een verfijning van deze berekening verdient de keuze van de afvoercoëfficiënt verdere aandacht. De karakteristieken van de spuisluis zijn weergegeven in Tabel C.2.

Tabel C.2: Eigenschappen spuisluis IJmuiden.

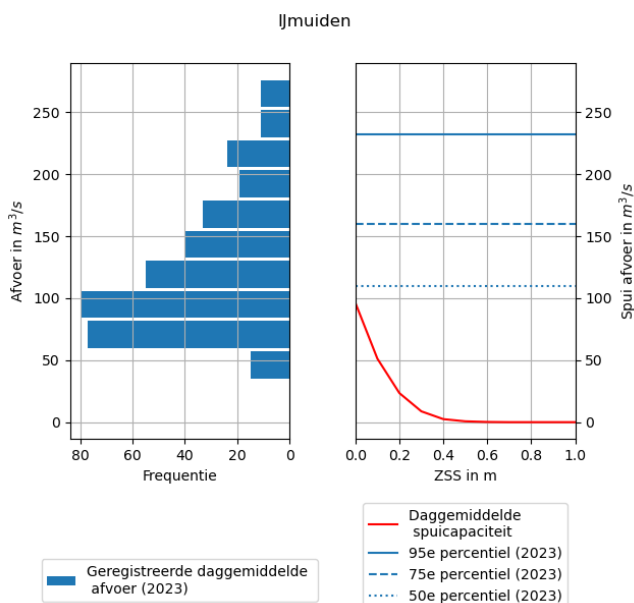
Parameter	IJmuiden
Aantal spuiokers (N)	7
Breedte per spuioker (B)	4,8 m
Niveau bodem in spuioker	- 9,25 m NAP
Afvoercoëfficiënt (μ)	1,424
Minimaal verval (dH)	0.12 m

De spuicapaciteit, op basis van de eigenschappen van de spuisluis en de waterstanden gemeten in 2023, onder invloed van zeespiegelstijging is weergegeven in Figuur C.14. Zoals is te zien neemt de daggemiddelde spuicapaciteit snel af van 95 m³/s tot er niet meer gespuid kan worden vanaf ongeveer 0.5 meter zeespiegelstijging. Dit komt doordat er een relatief laag waterpeil wordt gehandhaafd op het Noordzeekanaal tussen de -0.4 en -0.5 m NAP en daardoor frequent lager ligt dan het waterniveau op zee.



Figuur C.14: Daggemiddelde spuicapaciteit van de spuisluis bij IJmuiden over het jaar 2023 onder invloed van zeespiegelstijging.

Onder de huidige condities is de spuicapaciteit van IJmuiden regelmatig niet voldoende. Om het tekort aan spuicapaciteit op te vangen is er een gemaalcomplex gebouwd met in totaal 6 pompen. Een debietreeks uit het IWP over het jaar 2023 is beschikbaar voor het spui- en gemaalcomplex samen. Deze reeks geeft inzicht in het benodigd afvoerdebiet vanuit het Noordzeekanaal naar zee door dit spui- en gemaalcomplex. In het geval dat de gemeten afvoer hoger ligt dan de spuicapaciteit van de spuisluis, voldoet de spuisluis niet aan de afvoervraag en wordt dit overtollige water afgevoerd door de pompen. De afvoervraag in verhouding tot de spuicapaciteit is zichtbaar in Figuur C.15. Hierin is duidelijk te zien dat het spuicomplex alleen niet voldoende is om te voldoen aan de afvoervraag en moeten regelmatig de aanwezige pompen hiervoor worden ingezet. Onder de huidige condities kon op ongeveer 50% van de dagen in het jaar 2023 voldoende water van het Noordzeekanaal afgevoerd worden via de spuisluis om aan de vraag te voldoen.



Figuur C.15: De verandering in spuicapaciteit van het spuimiddel bij zeespiegelstijging gerelateerd aan de daadwerkelijke totale afvoer bij het spui- en gemaalcomplex IJmuiden (hier vergeleken met het jaar 2023).

C.3.4 Haringvlietsluizen

De Haringvlietsluizen spelen een belangrijke rol in de zoetwaterbeschikbaarheid in de Rijn-Maasmonding en overtollig water kan via deze sluisen gespuid worden vanaf de Haringvliet in zee. De Haringvlietsluizen zijn ontworpen om piekafvoeren vanuit de rivieren af te voeren. Om die reden is de spuicapaciteit van de Haringvlietsluizen erg groot ten opzichte van de hoeveelheid water die dagelijks wordt gespuid. De functie van de Haringvlietsluizen is daarmee ook anders dan die van de eerder beschouwde spuisluisen.

Daarnaast staat het Haringvliet in open verbinding met zee via het Spui. Om die reden zal het Haringvliet meestijgen met de zeespiegel en zal de spuicapaciteit dan ook niet (of beperkt) afnemen. Ten behoeve van deze methodologische uitwerking wordt er vanuit gegaan dat het waterpeil op het Haringvliet wel gelijk blijft. In het geval van een afsluiting van Rotterdam van zee (bijvoorbeeld door sluisen in de Nieuwe Waterweg) zou dit kunnen optreden.

De spuicapaciteit wordt berekend op basis van gemeten waterstanden aan de zeezijde en Haringvliet-zijde van de Haringvlietsluizen in het jaar 2021 op de locaties 'Stellendam buiten' en 'Hellevoetsluis'.

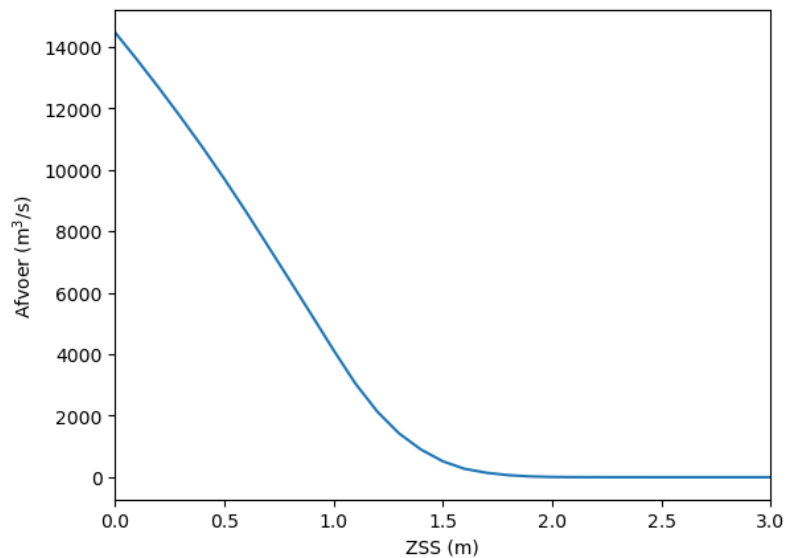
De Haringvlietsluizen bestaan uit 17 openingen welke individueel geopend en gesloten kunnen worden. Deze openingen hebben een doorstroombreedte van 56.5 m (Deltares, 2017) met elk een bodem op een niveau van -5.5 m NAP (Rijkswaterstaat, z.d.). De afvoercoëfficiënt is gebruikt zoals afgeleid uit eerder modelonderzoek van WL Delft (1970) 1.1 aangenomen. Dit is de bekende waarde voor de Haringvlietsluizen en daarom wordt deze ook toegepast in het vervolg van deze verkenning. In een verfijndere verkenning benodigd deze coëfficiënt verdere aandacht, zie paragraaf C.4.1.

Tabel C.3: Eigenschappen Haringvlietsluizen.

Parameter	Waarde
Aantal spuiokers (N)	17
Breedte per spuioker (B)	56.5 m
Niveau bodem in spuioker	- 5.5m NAP
Afvoercoëfficiënt (μ)	1.1

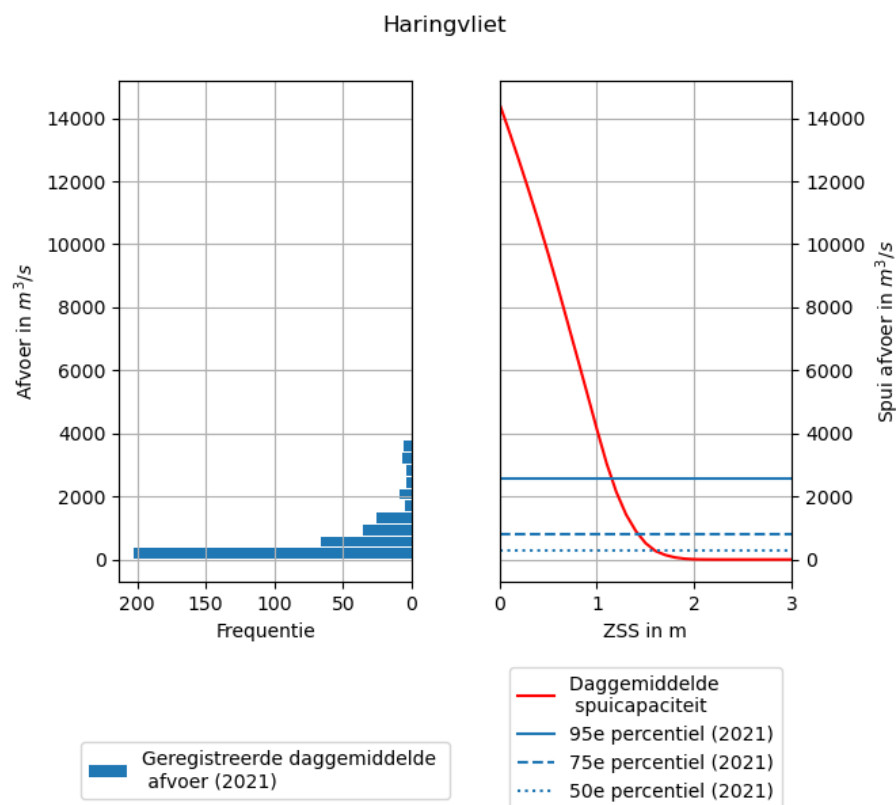
De spuicapaciteit, op basis van de eigenschappen van de spuisluis en de waterstanden gemeten in 2021, onder invloed van zeespiegelstijging is weergegeven in Figuur C.16. Deze resultaten zijn niet toepasbaar op het huidige watersysteem. De sommen geven namelijk inzicht in de invloed van zeespiegelstijging op daggemiddelde spuicapaciteit wanneer het Haringvliet geen open verbinding zou hebben met zee en het huidige waterpeil op de Haringvliet gehandhaafd wordt.

Zoals duidelijk te zien is in Figuur C.16, is de daggemiddelde spuicapaciteit op dit moment (zonder zeespiegelstijging) meer dan 14.000 m³/s. Deze hoge afvoercapaciteit komt doordat de Haringvlietsluizen zijn ontworpen om hoge piekafvoeren te kunnen doorlaten. Overigens is de piekafvoercapaciteit van de Haringvliet nog hoger. De waarde die hier gegeven is, is het gemiddelde over een heel jaar. Deze spuicapaciteit neemt af onder invloed van zeespiegelstijging tot er niet meer gespuid kan worden vanaf een zeespiegelstijging van ongeveer 1.7 m.



Figuur C.16: Daggemiddelde afvoercapaciteit van de Haringvlietsluizen over het jaar 2021 onder invloed van zeespiegelstijging. Dit figuur is gemaakt onder aanname van een gelijkblijvend peil op het Haringvliet en zijn daarom niet toepasbaar op de huidige situatie.

Op basis van waterstanden en hefhoogtes is een afvoerreeks voor het jaar 2021 opgesteld door Rijkswaterstaat. Op basis van deze afvoerreeks kan worden berekend hoe de Haringvlietsluizen presteren met betrekking tot peilbeheer (zie Figuur C.17).



Figuur C.17: De verandering in afvoercapaciteit bij zeespiegelstijging gerelateerd aan de daadwerkelijke afvoer gemeten bij de Haringvlietsluizen (hier vergeleken met het jaar 2021).

Zoals is te zien in Figuur C.17 is de huidige spuicapaciteit ruim voldoende voor het 95^e-percentiel van de daggemiddelde afvoer. De spuisluizen zijn dan ook ontworpen om piekafvoeren met een lage kans van voorkomen af te voeren. Dit illustreert ook duidelijk dat de methode niet geschikt is om te kijken naar hoogwaterveiligheid. Hiervoor gelden andere normen en zal een probabilistische aanpak gevolgd moeten worden

Deze resultaten zijn daarnaast alleen toepasbaar bij het handhaven van het huidige waterpeil op de Haringvliet. In het huidige open watersysteem zal het waterpeil op de Haringvliet mee stijgen met zeespiegelstijging vanwege de open verbinding met zee.

C.4 Discussie

C.4.1 Methode

Hierboven is een methode beschreven om snel inzicht te krijgen in de functionele prestatie voor wat betreft de hoofdfunctie van een spuisluis op basis van eenvoudige relaties en een beperkte set gegevens. Het gaat hier om een eenvoudige methode om inzicht te krijgen in de trend en orde van grootte van de afname van de functionele prestatie. Het kiezen van de juiste parameters om de capaciteit te bepalen en te vergelijken met het huidige gebruik vraagt aandacht. De resultaten zoals hierboven besproken dienen dan ook nog nader te worden aangescherpt voor deze daadwerkelijk worden ingezet.

In deze analyse is de beschikbare afvoercoëfficiënt voor elke spuisluis gebruikt zonder aandacht te besteden aan verdere details over hoe deze is afgeleid. Zo is de afvoercoëfficiënt sterk afhankelijk van de formule evenals de data die gebruikt is voor het afleiden. De formule gebruikt in deze generieke methode maakt gebruik van de potentiële energie (verval over de spuisluis) om het debiet door de spuisluis te berekenen. De coëfficiënt bevat een benadering van de eventuele aanwezigheid van kinetische energie wanneer metingen gebruikt worden vlakbij de spuisluis. Is de coëfficiënt afgeleid voor waterstanden ver weg van de sluis, dan is er grofweg sprake van stilstaand water en weinig kinetische energie. Wordt deze gebruikt in combinatie met waterstanden dichtbij, wordt de hoeveelheid aanwezige energie onderschat en daarmee ook het berekent maximum debiet. Aanvullend is de weerstand in de stroming afhankelijk van de hoeveelheid open kokers evenals welke kokers dan geopend zijn. Met name bij Den Oever zou de aanleg van de nieuwe spuikokers ook de afvoercoëfficiënt van de al beschikbare kokers kunnen beïnvloeden.

De resultaten geven inzicht in de daggemiddelde afvoercapaciteit. Dit betekent dat door het jaar heen de momentane capaciteit ook groter of kleiner kan zijn.

In deze sommen is alleen zeespiegelstijging meegenomen en zijn veranderingen in het meerpeil of de benodigde afvoer niet meegenomen. In werkelijkheid speelt er meer en varieert het peil en de afvoer meer, en met andere oorzaken en redenen, dan in deze sommen is aangenomen. Ook spelen er vaak andere processen zoals neerslag, verdamping, aanvoer van water door andere kunstwerken en zoutbeheer.

Er is gerekend met een vaste afvoercoëfficiënt of vast effectief spuioppervlak. In werkelijkheid kan deze waarde veranderen met het waterstandsverschil. Dit kan voor een verschil wat betreft de berekende spuicapaciteit zorgen. Daarnaast is deze ook afhankelijk van de data op basis waarvan deze bepaald is (de locatie van de waterstandsmetingen en de stand van de schuiven).

De gebruikte gegevens per kunstwerkcomplex verschillen iets. Bij het ene complex wordt bijvoorbeeld gebruik gemaakt van gegevens van de spuikokers en de afvoercoëfficiënt, waar bij het andere complex gebruik wordt gemaakt van een effectief spuioppervlak. De keuzes

hierin zijn gemaakt op basis van de beschikbaarheid van gegevens. Het breder inzetten van functionele prestatie zal baat hebben bij het uniformer beschikbaar maken van dergelijke basisgegevens.

De eis voor peilbeheer ligt vaak op systeemniveau (een bepaalde toegestane peilvariatie). Voor inzicht in de prestatie van het kunstwerk is het nuttig om ook grenswaarden bij het kunstwerk te hebben. Deze moeten gedefinieerd worden in nauw overleg met de probleemeigenaar. In deze uitwerking is gekozen voor een vergelijking met het 50-, 75- en 95-percentiel van de huidige afvoer. Welke prestatie nog acceptabel is, is afhankelijk van de grootte van het achterliggende gebied en de toegestane peilvariatie. De capaciteit bij de Afsluitdijk zit bijvoorbeeld onder het 95-percentiel van de huidige afvoer, maar de huidige prestatie is voldoende. Het vergelijken met daggemiddelde afvoeren werkt voor peilbeheer en reguliere condities. Voor hoogwaterveiligheid is er echter een andere aanpak nodig.

C.4.2 Toepasbaarheid methode

De verschillende uitwerkingen laten zien dat ondanks dat de methode generiek toepasbaar is, de verschillende situaties een andere interpretatie van de situatie geven door bijvoorbeeld functionele samenhang of door een andere inzet van het complex.

Op het Volkerak-Zoommeer en het IJsselmeer zijn meerdere spuicomplexen verantwoordelijk voor het peilbeheer. In het geval van het Volkerak-Zoommeer is de aanvoer daarnaast voor een groot deel gestuurd door de Volkeraksluizen. Deze functionele samenhang is niet meegenomen in deze methode.

Dit kan worden meegenomen door van deze beschrijving van alleen het kunstwerk naar een bakjesmodel te gaan dat het hele systeem beschrijft. In dit soort bakjesmodellen zijn er veel meer parameters om te variëren en te analyseren, en ligt daardoor de focus minder op de functionele prestatie van het kunstwerk alleen en meer op het functioneren van het systeem. Een dergelijk bakjesmodel is eerder opgezet voor het Volkerak-Zoommeer in een studie om de grens van het huidige beheer te zoeken (Deltares, 2020a). Hetzelfde model is recentelijk ook gebruikt in Kennisprogramma Zeespiegelstijging-onderzoek (Kennisprogramma Zeespiegelstijging, 2023). Een ander voorbeeld van een bakjesmodel van het Volkerak-Zoommeer is het DEVO-model (HKV, 2017b), waar onder andere het falen van de spuisluis ook is meegenomen.

Bij het complex in IJmuiden is de spuisluis samen met verschillende pompen verantwoordelijk voor het peilbeheer. Naar verwachting zullen ook bij de andere spuicomplexen met zeespiegelstijging pompen geplaatst worden. De huidige methode geeft alleen inzicht in de spuicapaciteit en geeft geen volledig inzicht in het presteren van het volledige complex. Het toevoegen van de beschikbare pompcapaciteit zou daarom een nuttige uitbreiding zijn.

De uitwerking voor de Haringvlietssluis (hier meegenomen met een vast peil voor het Haringvliet) laat zien dat de methode van het vergelijken met de daggemiddelde afvoer niet zinnig is voor een complex dat gericht is op afvoeren van piekafvoer en hoogwaterveiligheid. Hiervoor is een probabilistische aanpak nodig.

In deze casus is alleen gekeken naar spuisluis die verbonden zijn met de zee waar zeespiegelstijging een belangrijke driver is. De spuisluis in Farmsum is vanwege te beperkte beschikbare gegevens niet meegenomen, net als de spuisluis in de Brouwersdam.

D Functie zoutbeheer

De uitdaging bij het bepalen van de functionele prestatie van zeesluizen voor de functie zoutbeheer is dat de eisen worden gesteld aan het achterliggende watersysteem en niet aan het kunstwerk zelf (bijvoorbeeld in de vorm van een zoutflux door de schutsluis). Er zijn in het KpNK twee methodes ontwikkeld om hier mee om te gaan:

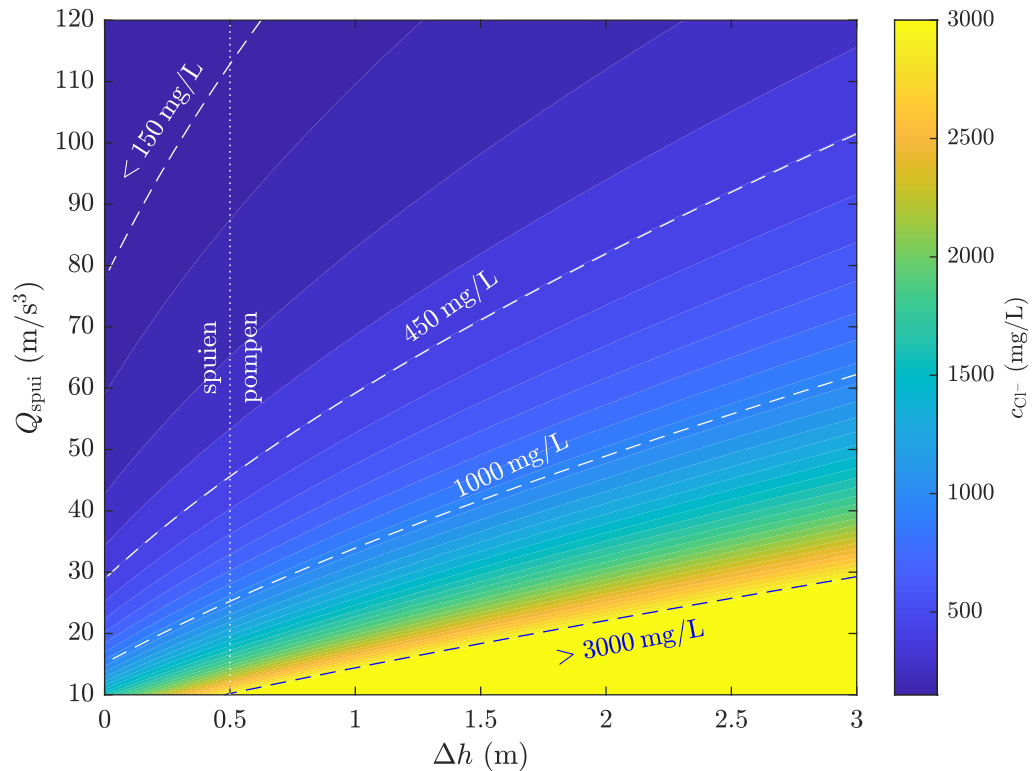
1. Het toepassen van een bakjesmodel dat de veranderingen in het zoutgehalte in voorhavens en kanalen kan kwantificeren. Deze aanpak maakt naast de bakjes gebruik van de zeesluisformulering¹⁴ (ZSF) en spuisluisformulering (SSF). Het geheel van bakjes, ZSF en SSF wordt het ZoutTransportModel (ZTM) genoemd). Aan de hand van de verandering van de zoutgehaltes van de bakjes kan een inschatting gemaakt worden van de hoeveelheid zoet water die nodig is om het bakje voldoende zoet te houden.
2. Het berekenen van de verandering in de watervraag om het watersysteem voldoende zoet te houden, onder de aanname dat het zoet-zout evenwicht in de huidige situatie acceptabel is en daardoor als referentiesituatie kan dienen. Deze aanpak maakt geen onderscheid tussen bakjes en beschouwd in plaats daarvan het systeem als geheel, en maakt daarom gebruik van de ZSF als standalone module. Deze aanpak is alleen geschikt voor schutsluizen die grenzen aan een kanaal.

Bij het ontwikkelen van deze methodieken voor de functie zoutmanagement is gebruik gemaakt van het systeem Noordzeekanaal – Amsterdam-Rijnkanaal als casus. Bij het sluisencomplex in IJmuiden wordt zoutindringing veroorzaakt tijdens het schutten van schepen door de zeesluizen. De functionele prestatie van de zeesluizen wordt beïnvloed door de drivers zeespiegelstijging en een afname in de rivierafvoer omdat de functionele prestatie van de sluis door deze drivers verandert: er mag minder zout worden doorgelaten, maar de hoeveelheid zout dat binnenkomt neemt toe. Beide methodieken worden hier kort toegelicht. Een uitgebreidere toelichting is beschikbaar in een verdiepende rapportage (KpNK, 2024).

Kwantificeren verandering zoutgehaltes achterland met het ZTM

Figuur D.1 laat een voorbeeld van een resultaat zien voor de Noordersluis, waarin af te lezen is hoeveel extra afvoer er nodig is om het chloridegehalte in een bakje afgebakend rond Diemen en Weesp op dezelfde chlorideconcentratie te houden bij een stijgende zeespiegel. De verdere uitwerking en onderbouwing van deze casus is beschreven in een aparte rapportage (KpNK, 2024). Deze methodiek is ook geschikt om voor andere zeesluizen inzicht te geven in de verschuivingen in de evenwichtssituatie in het watersysteem onder invloed van de drivers.

¹⁴ [ZSF documentation — libzsf documentation](#)



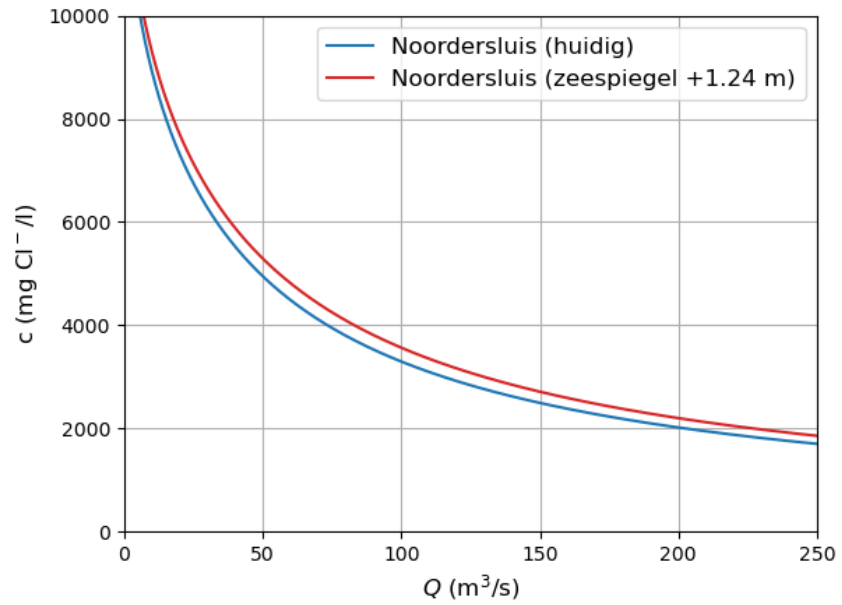
Figuur D.1: Ontwikkeling van de chlorideconcentratie c_{Cl^-} in het bakje Diemen/Weesp als functie van de drivers (lokale) zeespiegelstijging Δh en veranderende afvoer.

Kwantificeren watervraag met de ZSF

De benodigde afvoer Q_{rivier} om een evenwichtssituatie met zoutgehalte S_{meer} aan de zoete zijde ('meerzijde') van de zeesluis te behouden kan worden beschreven als (Deltares, 2020b):

$$Q_{rivier} = Q_{naar\ meer} \frac{S_{naar\ meer} - S_{meer}}{S_{meer} - S_{rivier}} \quad (D.1)$$

In deze berekening moet een aanname worden gedaan van het zoutgehalte van het rivierwater S_{rivier} . De zoutflux en het debiet van de zoute naar de zoete zijde ($Q_{naar\ meer}$, $S_{naar\ meer}$) door de zeesluis zijn uitvoerparameters van de ZSF. Met behulp van vergelijking E.1 kan de toenemende vraag naar water gekwantificeerd worden. Met behulp van de ZSF kan ook de invloed van mitigerende maatregelen, zoals de inzet van bellenschermen, hogere drempels en kortere deur-opentijden worden gekwantificeerd. Ook overwegingen qua sluiskolk lengte, -breedte en -diepte bij het ontwerpen van een sluiskolk kunnen snel worden doorgerekend met deze methodiek. In Figuur D.2 wordt de beschreven methodiek toegepast op de Noordersluis in IJmuiden. Een gedetailleerdere uitwerking van deze methodiek en de toepassing ervan op enkele andere zeesluizen wordt beschreven in een aparte rapportage (KpNK, 2024l).



Figuur D.2: Verband tussen het chloridegehalte aan de binnenkant van en de afvoer van rivierwater langs de Noordersluis (blauw), en hoe dit evenwicht verschuift bij zeespiegelstijging (rood) op basis van KNMI'23 scenario Hoog in 2100 (KNMI, 2023a).

E Bergingscapaciteit achterland stormvloedkeringen

Wanneer een stormvloedkering sluit moet het achterland voldoende bergingscapaciteit hebben om rivierwater en eventueel lokale neerslag te bergen. Ook overstortend debiet zorgt er voor dat de waterstand in het achterland toeneemt. Er kan gekwantificeerd worden hoe lang de bestaande bergingscapaciteit voldoet om een bepaalde combinatie van rivierafvoer, neerslag en overstort te bergen. De volgende parameters moeten minimaal bekend zijn om deze methodiek toe te passen:

- Geometrie: hoogte, lengte en breedte van de overstort, afvoercoëfficiënt, capaciteit bergingsgebied
- Randvoorwaarden: waterstand boven- en benedenstrooms van het kunstwerk, rivierafvoer, neerslag

Figuur E.1 geeft schematisch weer welke parameters bijdragen aan (het uitputten van) de bergingscapaciteit van het achterland. Het volume water dat geborgen kan worden $V_{\text{bergingsgebied}}$ is gelijk aan

$$V_{\text{bergingsgebied}} = (h_{\text{bergings,max}} - h_{\text{berging}})A_{\text{bergingsgebied}} \quad (\text{E. 1})$$

Met $h_{\text{bergingsgebied,max}}$ de maximale waterstand die toegestaan kan worden in het bergingsgebied, h_{berging} de waterstand in het bergingsgebied vóór de sluiting van de kering, en $A_{\text{bergingsgebied}}$ de oppervlakte van het bergingsgebied. Het totale instromende debiet Q_{in} is gelijk aan de som van het overstortende debiet, de neerslag Q_{neerslag} en het rivierdebiet Q_{rivier} :

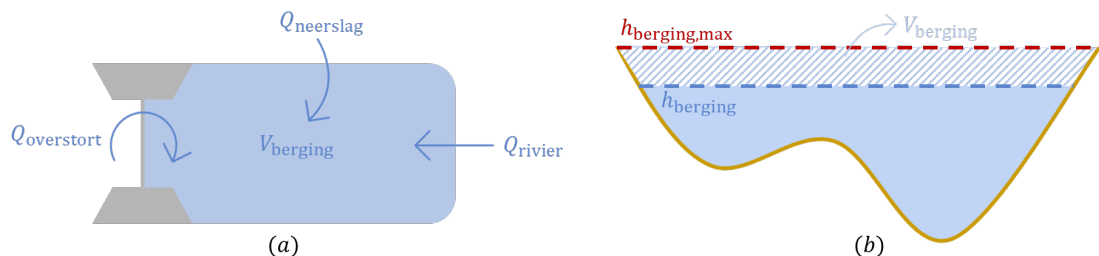
$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{overstort}} + Q_{\text{neerslag}} + Q_{\text{rivier}} \quad (\text{E. 2})$$

Het netto debiet is het verschil tussen het totale instromende debiet en het debiet dat afgevoerd wordt Q_{uit} :

$$Q_{\text{netto}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{uit}} \quad (\text{E. 3})$$

In het geval van een volledig gesloten kering is $Q_{\text{uit}} = 0$. Uitzonderingen hierop kunnen voorkomen bij keringen met een spui functie of bijvoorbeeld bij de Maeslantkering, die tussentijds op kan drijven en daarmee ook water afvoert. De maximale tijdsduur $t_{\text{sluiting,max}}$ van een sluiting is gelijk aan:

$$t_{\text{sluiting,max}} = \frac{V_{\text{berging}}}{Q_{\text{netto}}} \quad (\text{E. 4})$$

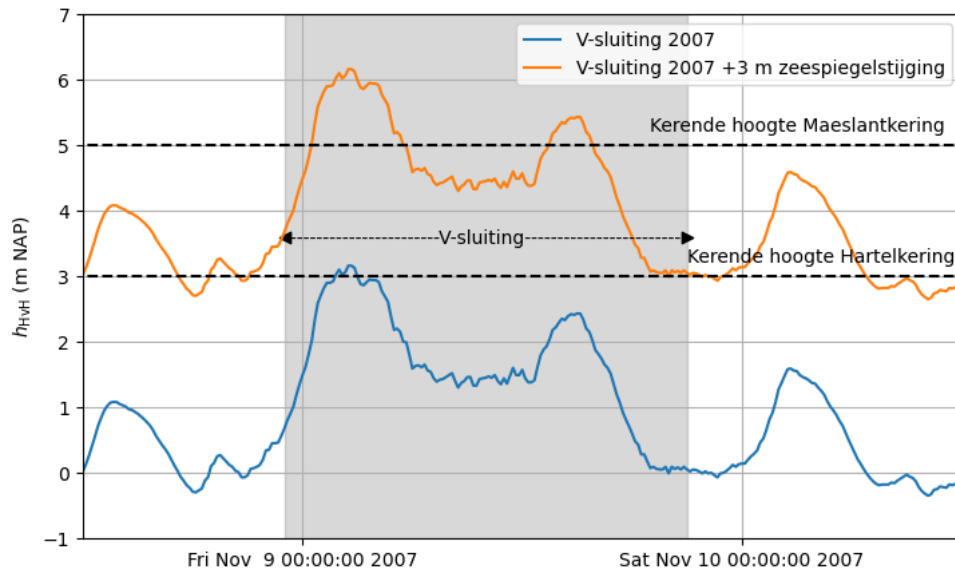


Figuur E.1: Schematische weergave van het totale debiet dat bij een gesloten stormvloedkering het achterland in stroomt (a) en het volume dat geborgen kan worden in het achterland (b).

Wanneer een sluiting langer duurt zou als maatregel een extra bergingsgebied elders in het systeem ingezet kunnen worden. Deze rekenregels kunnen worden gebruikt om in te schatten bij welke mate van zeespiegelstijging een extra bergingsgebied moet worden ingezet en over hoeveel bergingscapaciteit dit gebied moet beschikken om de waterstand voldoende te kunnen beperken.

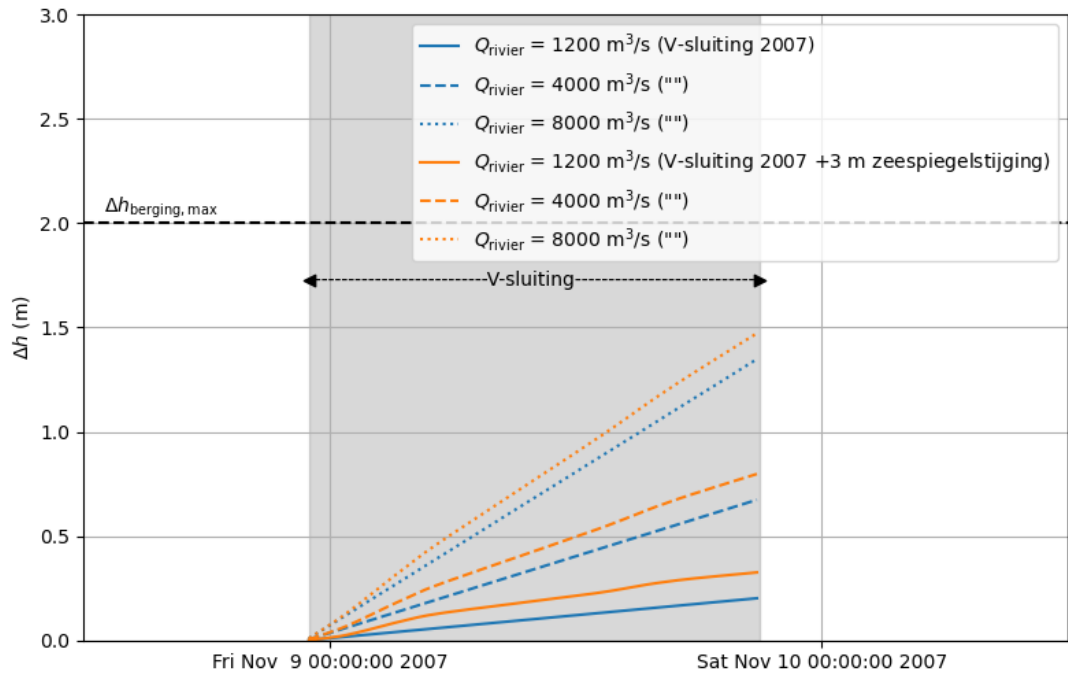
Rekenvoorbeeld Rijn-Maasmonding storm 8 en 9 november 2007

Indien de Europoortkering (bestaande uit de Maeslantkering en Hartelkering) gesloten is, leidt de combinatie van rivierafvoer, neerslag en overstortend debiet tot hogere waterstanden in het achterland. De Europoortkering sluit bij een waterstand van +3.0 m NAP in Rotterdam en/of +2.9 m NAP in Dordrecht en heeft een kerende hoogte van +5.0 m NAP. Het bergingsoppervlak van de Rijn-Maasmonding bedraagt, afhankelijk van de rivierafvoer, ongeveer 470-600 km² (KP ZSS, 2023). Om een voorbeeld te geven van een berekening met de beschreven methodiek wordt hier gebruik gemaakt van de waterstanden te Hoek van Holland tijdens de verificatiesluiting (V-sluiting) uit 2007. Tijdens deze V-sluiting werd een aangepast sluitpeil gehanteerd van +2.6 m NAP in Rotterdam en/of +2.3 m NAP in Dordrecht. Figuur E.2 geeft de waterstanden gedurende de V-sluiting weer. Er was ongeveer 1200 m³/s rivierafvoer tijdens de V-sluiting van 2007 (Deltares, 2019). Uit Figuur E.2 is af te lezen dat de waterstand de kerende hoogte niet overschreden heeft en daarmee was er geen sprake van overstortend debiet. Figuur E.2 geeft ook weer hoe een vergelijkbare storm er qua waterstanden uit had gezien als er sprake was geweest van 3 m zeespiegelstijging – in dat geval is er wel sprake van overstort. Het overstortende debiet is berekend op basis van vergelijking E.1 onder de aanname dat de afvoercoëfficiënt $\mu = 1$. De referentiewaterstand aan de binnenzijde van de keringen is +1 m NAP.



Figuur E.2: Waterstand (m NAP) te Hoek van Holland tijdens de V-sluiting van 8-9 november 2007 (blauw) en de waterstand in het geval dat er sprake zou zijn geweest van 3 meter zeespiegelstijging bij het plaatsvinden van een vergelijkbare storm (oranje).

Uitgaande van een bergingsoppervlak van 470 km² en geen neerslag, kan voor dit scenario berekend worden hoe ver de waterstand in het bergingsgebied toeneemt tijdens de V-sluiting met $t_{\text{sluitduur}} = 22$ h (grijs gearceerd), zie Figuur E.2). Het tussentijds opdrijven (en ‘spuien’) van de Maeslantkering is in deze analyse buiten beschouwing gelaten.



Figuur E.3: De waterstandstoename Δh in het bergingsgebied gedurende de V-sluiting van de MLK in 2007 (blauw) en indien er sprake zou zijn geweest van 3 m zeespiegelstijging en overstort (oranje) bij verschillende rivierafvoeren.

Het verschil in waterstandstoename tussen de V-sluiting uit 2007 ($Q_{\text{rivier}} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$) en het scenario van een vergelijkbare storm inclusief 3 m zeespiegelstijging bedraagt 12.4 cm. Dit verschil wordt in dit geval volledig bepaald door de hoeveelheid overstort, waarbij de Hartelkering het grootste aandeel heeft (zie Figuur E.2). Stel dat vanwege de ligging van Noordereiland (+3 m NAP) niet meer dan twee meter waterstandstoename ($\Delta h_{\text{bergings,max}}$, stippellijn in Figuur E.3) toegestaan is in het bergingsgebied, dan laat Figuur E.3 zien dat er bij deze storm geen knelpunt zou zijn ontstaan.

F Functionele prestatie stuw Hagestein – Negatief verval

Dit hoofdstuk is ook als losse memo gedeeld met Rijkswaterstaat Oost-Nederland (memo-kenmerk 11207401-009-HYE-0003).

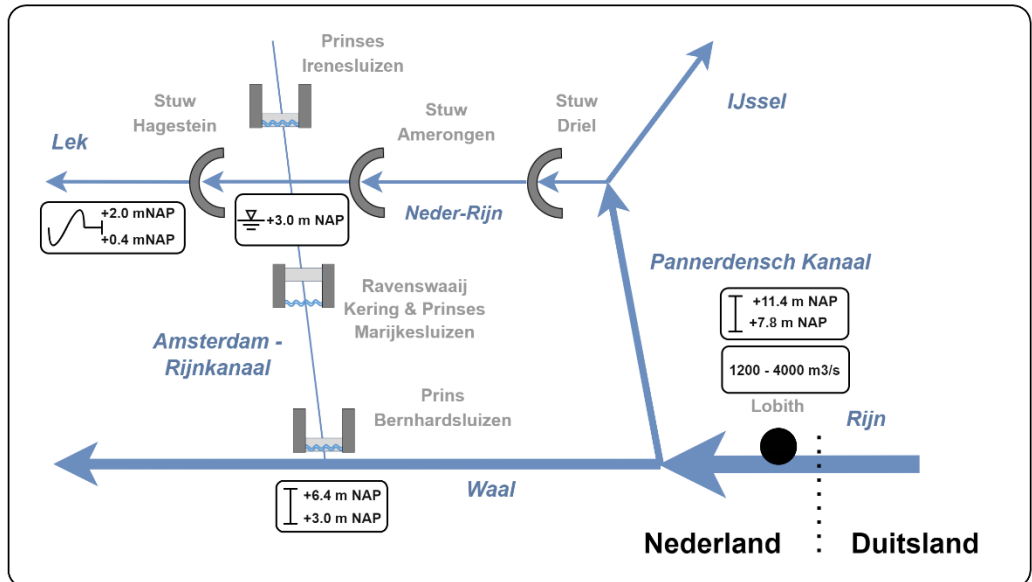
In het kader van methodiekontwikkeling voor het kwantificeren van functionele prestatie van natte kunstwerken wordt er binnen het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK) gewerkt aan casussen. In deze casussen worden verschillende functies en drivers van natte kunstwerken beschouwd, om de methode-ontwikkeling te sturen, de methodes te toetsen aan de praktijk en identificatie van voor de praktijk belangrijke kennis- of dataleemten. De invloed van zeespiegelstijging en verandering van rivierafvoer op de functionele prestatie op stuw Hagestein is één van deze casussen binnen het KpNK. Deze stuw vormt het scheidsvlak op de rivier tussen een gestuwd peil bovenstrooms en getij-invloed benedenstrooms. Een verandering in de lage rivierafvoeren en de invloed van zeespiegelstijging komen bij de stuw samen.

Voor sommige functies kan een combinatie van drivers relevant zijn. Dit is bijvoorbeeld het geval voor het peilbeheer en de debietregeling bij stuw Hagestein. Zeespiegelstijging en het vaker voorkomen van lage rivierafvoeren kunnen de constructie en operatie van deze stuw onder druk zetten doordat er een negatief verval kan ontstaan waar de constructie niet op is berekend. In deze analyse ligt de focus op het kwantificeren van het optreden van een negatief verval en de invloed hiervan op de constructie en het systeem.

De resultaten van deze casus zijn besproken en aangevuld in overleg met Rijkswaterstaat Oost-Nederland (ON).

F.1 Systeembeschrijving

Van de afvoer die Nederland bij Lobith binnenstroomt over de Rijn wordt ongeveer 70% afgevoerd over de Waal en de overige 30% over het Pannerdensch Kanaal. Het Pannerdensch Kanaal splitst zich op de IJsselkop in de IJssel, welke richting het IJsselmeer stroomt, en de Nederrijn, welke benedenstrooms van naam veranderd naar de Lek en bij Rotterdam uitmondt in de Noordzee. De verbinding tussen de Lek en het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK) ten noorden is afgesloten met de Prinses Irenesluizen. Het Amsterdam-Rijkkanaal tussen de Lek en de Waal (ook wel het Betuwepand genoemd) is afgesloten bij normale afvoer met de Prinses Marijkesluizen in het noorden (bij de Lek) en met de Prins Bernhardsluizen in het zuiden (bij de Waal). Een schematisch overzicht van het Rijntakken-systeem kan gevonden worden in Figuur F.1.



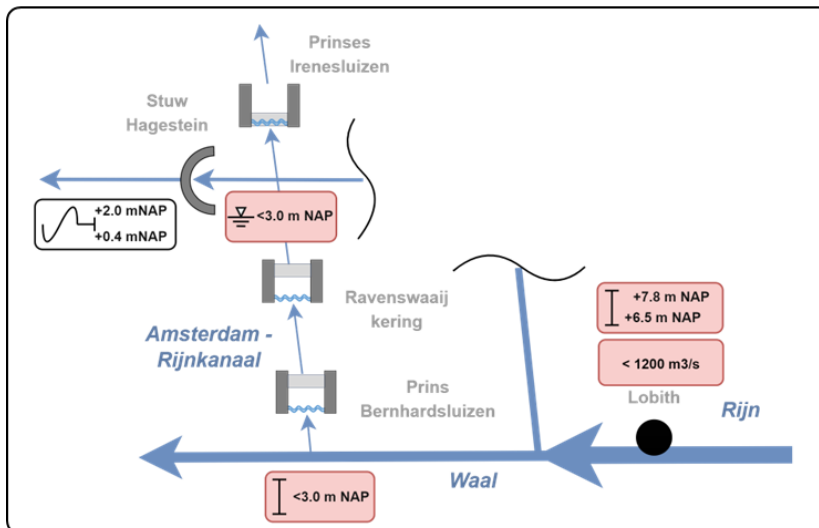
Figuur F.1: Abstracte weergave van het Rijn-systeem onder gemiddelde condities (1200 – 4000 m³/s bij Lobith)

Het waterpeil op het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en een gedeelte van de Lek wordt gestuurd door drie stuwcomplexen (bij Driel, Amerongen en Hagestein). Stuw Amerongen en stuw Hagestein beheren de Nederrijn-Lek op een waterpeil van respectievelijk +6 m NAP en +3 m NAP. Stuw Hagestein vormt daarmee de afscheiding tussen een constant stuwpeil bovenstrooms van +3 m NAP en een variërend peil benedenstrooms bepaald door de afvoer en het getij.

Naast peilbeheer, voor onder andere de scheepvaart, reguleren de stuwen ook de afvoerverdeling. Stuw Driel wordt gebruikt om de afvoerverdeling tussen de IJssel en Nederrijn te reguleren, mede om genoeg aanvoer van water via de IJssel richting het IJsselmeer te sturen. Bij lage afvoer en dreigende verzilting wordt stuw Hagestein gebruikt om een netto debiet van minimaal 18 m³/s over de Lek te sturen om verzilting in de monding van de Lek tegen te gaan (Deltares, 2024a).

In het geval dat de waterstand bij Lobith boven de +11.40 m NAP komt, wordt de stuw Hagestein, net als de overige twee stuwen, volledig geopend (Rijkswaterstaat, 2013). Hierdoor wordt de waterstand in het stuwband variabel met de afvoer. Ook wordt de hoogwaterkering Ravenswaaij naast de Prinses Marijkesluis gesloten bij hoogwater (plaatselijk +5.5 m NAP) om het Betuwepand af te sluiten van de Lek.

Bij lage afvoeren zullen de waterstanden zakken. Als de waterstand van de Waal (bij Tiel) zakt tot onder de waterstand in het stuwband (overwegend +3.0 m NAP), worden de Prins Bernhardsluizen geopend en neemt het stuwband de waterstand van de Waal aan (Figuur F.2).



Figuur F.2: Abstracte weergave van het Rijn-systeem bij lage afvoer Rijn (onder de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith)

F.2 Aanpak

Het verval over stuw Hagestein is het verschil tussen de waterstand bovenstrooms en benedenstrooms van de stuw. Zeespiegelstijging leidt tot hogere waterstanden benedenstrooms van de stuw. Afname van rivierafvoer kan leiden tot significant lagere waterstanden bovenstrooms van stuw Hagestein. De waterstand benedenstrooms van de stuw is ook deels afhankelijk van de afvoer door het stuwcomplex.

Meetdata van de waterstanden is gebruikt om inzicht te krijgen in de huidige situatie. Beschikbare data over de boven- en benedenstroomse waterstand bij klimaatverandering is gebruikt om inzicht te krijgen in welke mate negatief verval bij stuw Hagestein met klimaatverandering voorkomt. Er is geen datareeks beschikbaar voor de combinatie van de twee drivers (zeespiegelstijging en verandering in rivierafvoer). De gebruikte aanpak om toch naar beide drivers tegelijkertijd te kijken wordt hieronder beschreven.

F.2.1 Methode voor huidige situatie

Om een eerste inzicht te krijgen in het minimum verval in de huidige situatie is meetdata geanalyseerd over een recente periode. Waterpeil-metingen over de periode 01-01-2015 tot 30-06-2023 zijn gebruikt om een beeld te krijgen van het verval over de stuw in de huidige condities. Deze metingen bevatten het waterpeil t.o.v. NAP per 10 minuten waardoor de getijcyclus onderscheiden kan worden. Zo kan worden berekend wat het minimum verval is geweest in deze periode en onder welke boven- en benedenstroomse condities dit optrad. Aan de hand van een dataset met alle historische stormen (vanaf windkracht 9) van het KNMI kan worden nagegaan of er ten tijde van minimum verval sprake was van stormcondities die leiden tot een verhoogde benedenstroomse waterstand (KNMI, 2023b). Andere definities van storm of opzet sluiten echter meer aan bij hoe dit in het algemeen wordt meegenomen in waterstandsstudies. In de discussie rondom de aanpak in Paragraaf F.5.3 wordt verder ingegaan op de verschillende oorzaken van een verhoogde waterstand benedenstrooms bij de stuw.

F.2.2 Methode voor invloed zeespiegelstijging

Door het effect van zeespiegelstijging zou de kans op optreden van negatief verval in de toekomst kunnen toenemen. Met behulp van een toeslag op de gemeten waterstanden kan worden berekend wanneer negatief verval kan gaan voorkomen en hoe dit zich verder ontwikkelt onder zeespiegelstijging op basis van de meetreeks en de bijbehorende condities. Aangezien de metingen per 10 minuten zijn bevat de data de variatie van waterpeil over een

getijcyclus. Berekeningen hebben laten zien dat zeespiegelstijging met een factor van ongeveer 0.9 doorwerkt op de benedenstroomse waterstand bij stuw Hagestein bij +1 m zeespiegelstijging en mediane rivierafvoer (1961 m³/s) (Deltares, 2022). Deze factor is hoger voor lagere rivierafvoeren en lager voor hogere rivierafvoeren (Deltares, 2022e).

Voor de huidige verkenning wordt aangenomen dat deze factor van 0.9 doorwerkt op elk zeespiegelstijgingsscenario, waarbij zeespiegelstijging tot 2 m is meegenomen. De KNMI'23-projecties voor zeespiegelstijging (zie Tabel F.1) worden gebruikt om een beeld te geven van de verschillende scenario's. Naast zeespiegelstijging zijn er andere oorzaken (springtij en stormopzet) welke tijdelijk tot een verhoogde benedenstroomse waterstand kunnen leiden. Vanwege de relatief korte periode van de tijdreeksen is het aannemelijk dat deze factoren niet representatief meegenomen worden in deze verkenning.

Tabel F.1 Zeespiegelstijging KNMI'23 klimaatscenario's (KNMI, 2023a).

KNMI'23 scenario	2050		2100	
	L	H	L	H
Zeespiegelstijging	+24 (16 tot 34) cm	+27 (19 tot 38) cm	+44 (26 tot 73) cm	+82 (59 tot 124) cm

F.2.3 Methode voor gecombineerd invloed zeespiegelstijging met afname van rivierafvoer

In het Deltaprogramma Zoet Water (DPZW) zijn 100-jarige afvoerreeksen gecreëerd met dagelijkse afvoer voor de verschillende KNMI'14 klimaatscenario's voor 2050 en 2085. Hiervoor is gekozen aangezien dit de meest recente beschikbare afvoerreeksen zijn tijde van deze verkenning. Deze reeksen beschrijven de volgende scenario's: Ref2015, GL2050, 2050Whdry, 2085GL, 2085Whdry. Het scenario Ref2015 bevat afvoeren over de periode 1901 – 2015.

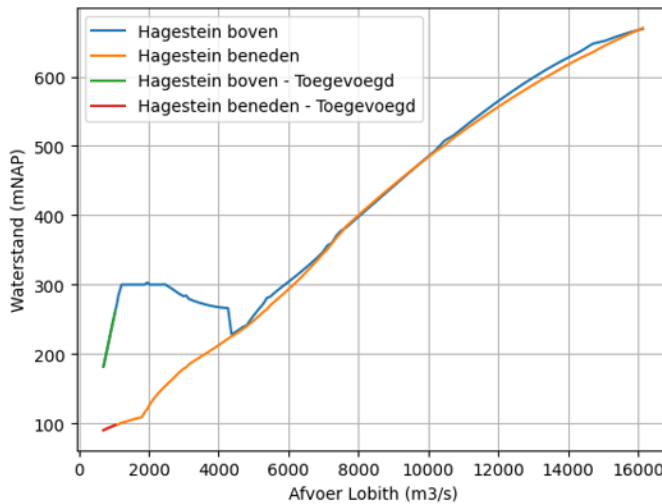
De afvoer bij Lobith uit de 100-jarige reeksen wordt door middel van een betrekkinglijn (versie 2018 (Rijkswaterstaat, 2018)) omgezet tot waterstanden benedenstrooms en bovenstrooms van stuwcomplex Hagestein. Aan de benedenstroomse waterstand op basis van de betrekkinglijn en het klimaatscenario wordt vervolgens een toeslag voor zeespiegelstijging toegevoegd.

De betrekkinglijnen geven gemiddelde waterstanden als functie van de afvoer bij Lobith en zijn gebaseerd op metingen over een periode van twee jaar. Deze betrekkinglijnen worden iedere twee jaar opgesteld vanwege veranderingen in de riviermorfologie. De betrekkinglijn van 2018 wordt toegepast op de gehele lengte van de 100-jarige afvoerreeksen.

Voor de benedenstroomse waterstand bevatten de betrekkinglijnen de gemiddelde vloedwaardes. In een uitgebreidere analyse zouden ook andere oorzaken van een verhoogde waterstand benedenstrooms van de stuw (zoals windopzet, opwaaiing en opslinging) meegenomen kunnen worden. Deze verschillende oorzaken zullen ook tot verschillende duren van een eventueel negatief verval leiden. Dit ligt buiten de scope van deze verkenning..

De betrekkinglijn is gegeven in Figuur F.3. Het openen van de stuw bij hoge afvoer ($H_{Lobith} > +11.40$ m NAP) is te herkennen aan de sterke afname in waterstand net voorbij een afvoer van 4000 m³/s. Daarnaast bevat de betrekkinglijn het openen van de Prins Bernhardsluizen bij lage waterstand op de Waal bij Tiel ($H_{Tiel} < +3.0$ m NAP) wat leidt tot een steile afname in waterstand voor afvoeren onder de 1200 m³/s. Voor afvoeren onder de 703 m³/s is de steile afname geëxtrapoleerd vanwege het beperkte bereik van de betrekkinglijnen.

Ook kan worden gezien dat de betrekkinglijn voor de bovenstroomse waterstand een verlaging laat zien boven een afvoer van 2500 m³/s. Bij deze afvoer wordt een wat lager peil direct bovenstrooms van de stuw gevraagd om het gewenste peil te handhaven bij de kruising met het Amsterdam-Rijnkanaal. Aangezien deze verkenning gaat over de momenten van droogte is gekozen om alle momenten met een afvoer van meer dan 2500 m³/s niet mee te nemen in de berekeningen.

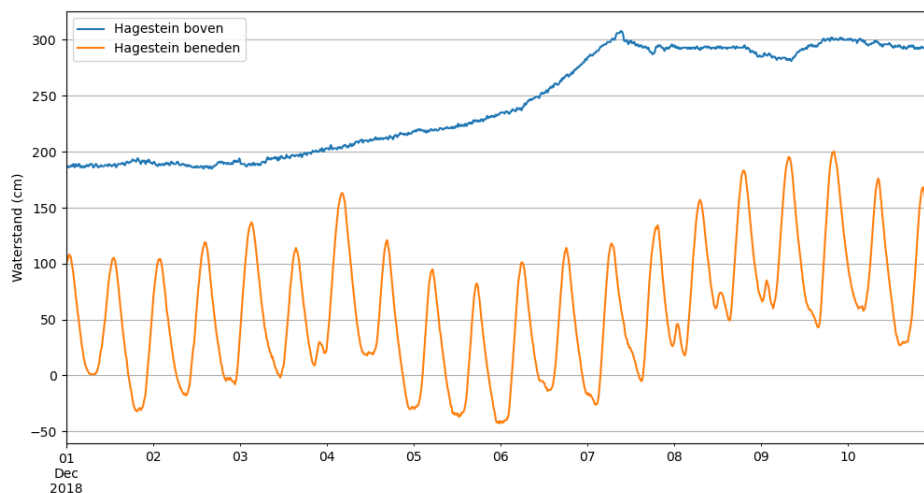


Figuur F.3: Betrekkinglijnen Hagestein boven en beneden tegen waterstand Lobith

F.3 Resultaten

F.3.1 Huidige situatie

De waterstandsmetingen zijn gebruikt om een beeld te krijgen van het minimum verval in de huidige situatie. Deze metingen laten zien dat het minimum verval over de beschouwde periode 0.40 m is en optrad op 4 december 2018 04:10:00 (zie Figuur F.4). Op dat moment was er sprake van een verlaagde afvoer in de Rijn van 871 m³/s. Op het moment van gemeten minimum verval was er geen sprake van stormcondities (KNMI, 2023b). Waterstandsmetingen bij Hoek van Holland laten in dezelfde periode een opzet van enkele decimeters zien. Ook in Figuur F.4 is zichtbaar dat er sprake was van een licht verhoogde waterstand benedenstrooms.



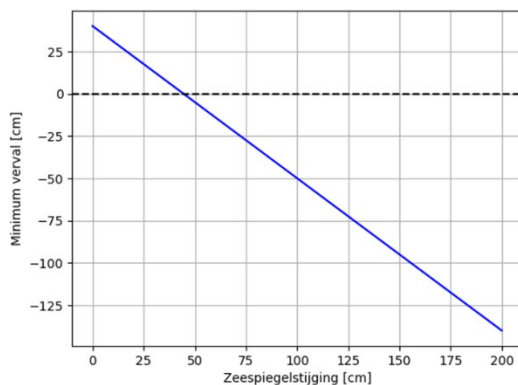
Figuur F.4: Metingen ten tijde van optreden minimum verval (0.40 m) over periode van 2015-2023

Mogelijk zou de aanwezigheid van stormopzet in combinatie met deze lage afvoer al tot een negatief verval kunnen leiden. Het effect van stormopzet op het waterpeil benedenstrooms van stuw zal beperkt blijven bij sluiten van de Maeslantkering, welke sluit bij een verwachte waterstand van ten minste +3.0 m NAP in Rotterdam. In het scenario waarbij een storm leidt tot opzet net onder het sluitpeil en de afvoer door stuw Hagestein laag is, wordt verwacht dat de waterstand benedenstrooms van de stuw ongeveer gelijk zal zijn aan de waterstand in Rotterdam, ongeveer +3.0 m NAP. Deze verhoogde waterstand benedenstrooms in combinatie met een verlaagd bovenstroomse waterstand van + 2.0 m NAP, zoals uit 2018, kunnen leiden tot een negatief verval van 1 meter. Overigens zijn er vele onzekerheden in deze berekening en zijn er verschillende factoren met mogelijk een significant effect hierop welke niet verder onderzocht worden in deze verkenning.

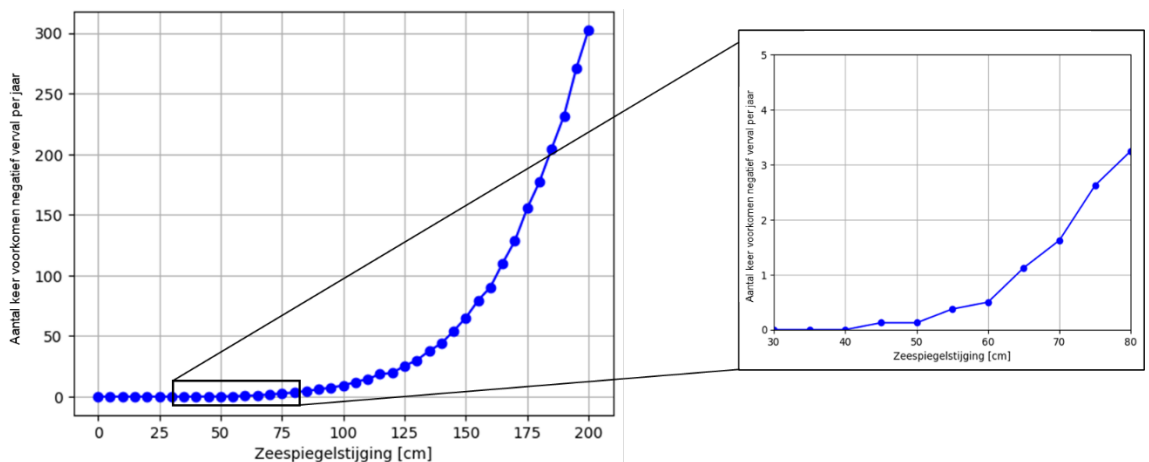
F.3.2 Invloed zeespiegelstijging

Wanneer de invloed van zeespiegelstijging met een factor van 0.9 wordt toegevoegd op de meetreeks kan worden berekend bij welke waarde van zeespiegelstijging negatief verval zou zijn opgetreden in de meetreeks, zie Figuur F.5. Zoals te zien is in de figuur zou negatief verval in dit geval voor het eerst optreden bij ongeveer 45 cm zeespiegelstijging. Dit getal komt voort uit het minimaal gemeten verval over de meetreeks en door de benedenstroomse waterstand te verhogen met zeespiegelstijging vermenigvuldigd met een factor van 0.9. Het minimum verval neemt lineair af met de zeespiegelstijging.

In Figuur F.6 kan worden gezien hoe het aantal keren dat negatief verval optreedt toeneemt door zeespiegelstijging. Negatief verval zou gemiddeld een keer per jaar voorkomen vanaf een zeespiegelstijging van 65 cm (zie Figuur F.6) onder de condities van de meetreeks.



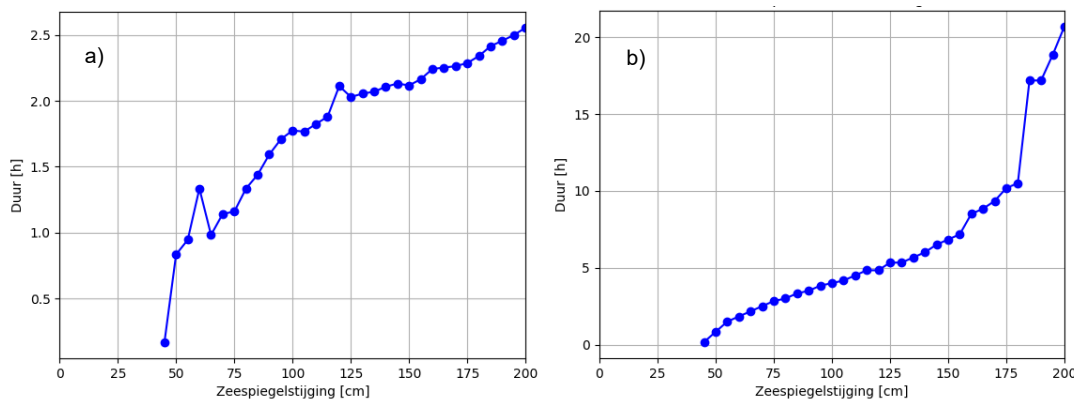
Figuur F.5: Minimum negatief verval op basis van metingen over 2015-2023 en effect zeespiegelstijging



Naast het aantal keer per jaar dat negatief verval optreedt is de duur van deze momenten ook relevant voor de impact op het functioneren van de stuw. De gemiddelde duur van momenten waarin negatief verval optreedt evenals de maximale duur over de lengte van de meetreeks is weergegeven in Figuur F.7.

De gemiddelde duur van een negatief verval event neemt toe met een stijgende zeespiegel. De duur hiervan stijgt relatief snel tot 1.75 uur bij 1 m zeespiegelstijging. Bij verdere zeespiegelstijging neemt de gemiddelde duur van een negatief verval event in mindere mate toe tot 2.5 uur bij een zeespiegelstijging van 2 m (zie Figuur F.7).

De maximale duur van het optreden van negatief verval ligt een stuk hoger dan de gemiddelde duur. Te zien is dat vanaf een zeespiegelstijging van 180 cm de maximale duur van het optreden van negatief verval een sprong maakt van 10 uur naar ongeveer 17.5 uur. Dit heeft ermee te maken dat de stuw te maken heeft met negatief verval over de gehele duur van een getijcyclus en komt de waterstand benedenstrooms dus niet onder de waterstand bovenstrooms ten tijde van laagtij (zie Figuur F.7).



Figuur F.7: Gemiddelde duur (a) en maximale duur (b) optreden negatief verval

F.3.3

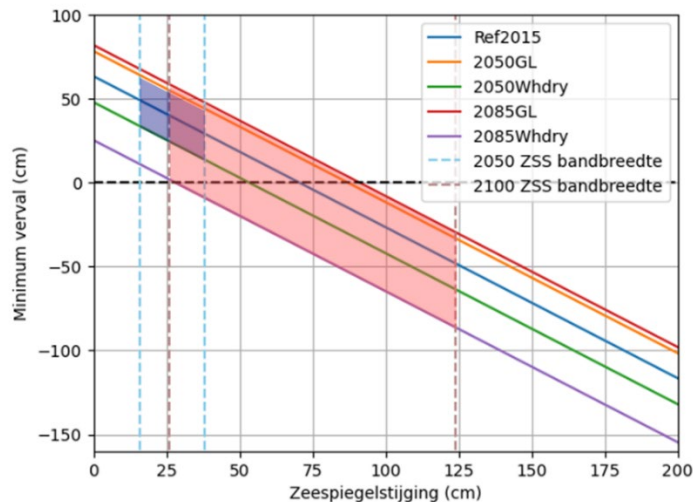
Invloed zeespiegelstijging in combinatie met een afname van de rivierafvoer

De 100-jarige reeksen voor afvoer bij Lobith geven inzicht hoe de rivierafvoer mogelijk gaat veranderen afhankelijk van verschillende KNMI'14 klimaatscenario's. Een combinatie van de betrekkinglijnen en de afvoerreeks geven op die manier een reeks met gemiddelde waarde voor de bovenstroomse waterstanden voor verschillende klimaatscenario's. Een combinatie van de betrekkinglijnen met de afvoerreeks per klimaatscenario geeft de gemiddelde vloedwaterstand benedenstrooms van de stuw. Deze benedenstroomse waterstand wordt verhoogd met een toeslag voor zeespiegelstijging vermenigvuldigt met een factor van 0.9.

N.B.: De ref2015 reeks bevat afvoerstatistiek over een langere en andere periode (1901-2015) dan de eerder beschreven meetreeks over de periode 2015 – 2023. Hierdoor kan de uitkomst van sommen met het ref2015-scenario's verschillen van de eerder beschreven meetreeks.

De resultaten voor de verschillende scenario's zijn gegeven in Figuur F.8. Door gebruik te maken van de 100-jarige afvoerreeksen voor de verschillende KNMI'14 klimaatscenario's en de waarden in de KNMI'23-zeespiegelstijgingsscenario's (zie Tabel F.1) kunnen bandbreedtes voor het minimum verval bij stuw Hagestein worden gegeven.

In Figuur F.8 kan worden gezien dat 63 cm het minimum verval is op basis van het Ref2015-scenario bij 0 m zeespiegelstijging (het startpunt van de blauwe lijn).



Figuur F.8: Minimum verval voor de KNMI'23 afvoerscenario's en scenario's voor zeespiegelstijging. In blauw gearceerd het vlak tussen het lage en het hoge zeespiegelstijgingsscenario en het lage en hoge afvoerscenario voor 2050. In rood gearceerd het vlak tussen het lage en het hoge zeespiegelstijgingsscenario voor 2100 en het lage en hoge afvoerscenario voor 2085.

Voor het jaar 2050 kijken we naar het blauwe vlak (Figuur F.8) en is het hoekpunt linksboven het meest gunstig en rechtsonder het minst gunstig met betrekking tot negatief verval. In het gunstigste scenario (linksboven) blijft het berekend minimum verval ongeveer gelijk, terwijl dit kan afnemen tot +15 cm voor het minst gunstige scenario.

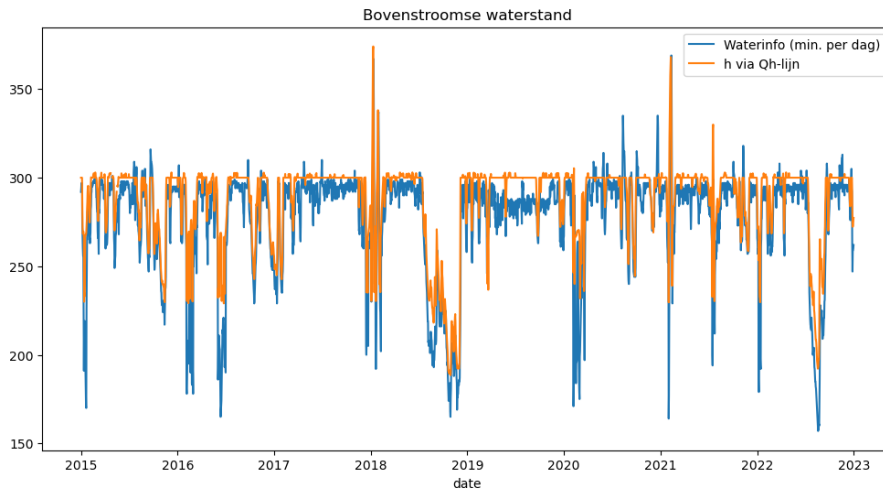
Voor het jaar 2100 is de bandbreedte significant groter. Elke combinatie van een zeespiegelstijgingsscenario en een afvoerscenario laat een afname in minimum verval zien, waarbij het merendeel tot negatief verval leidt. Voor het jaar 2100 kijken we naar het rode vlak (Figuur F.8) en is het hoekpunt linksboven het meest gunstige scenario en rechtsonder het minst gunstige scenario. Voor het meest gunstige scenario neemt het minimum nauwelijks af ten opzichte van het meest gunstige scenario voor het jaar 2050 (linksboven van het blauwe vlak). In het minst gunstige scenario neemt dit af tot een minimum negatief verval over stuw Hagestein van ca. 80 cm.

F.3.4 Intermezzo: Beoordeling gebruik betrekkinglijn

Het minimum verval van 40 cm gemeten over de periode 2015-2023 is in deze verkenning gebruikt als startpunt. Met behulp van de betrekkinglijnen kan de gemeten afvoer bij Lobith omgezet worden tot waterstanden boven- en benedenstrooms van stuw Hagestein. Deze kunnen vervolgens met de gemeten waterstandsreeksen vergeleken worden om de nauwkeurigheid van de betrekkinglijnen te toetsten. De waterstanden worden elke 10 minuten gemeten, terwijl de afvoerreeks, welke in deze vergelijking invoer geeft voor de betrekkinglijn, waardes per dag heeft. Hierdoor is natuurlijke variatie over de duur van een dag niet meegenomen, evenals de getijcyclus voor de benedenstroomse waterstand.

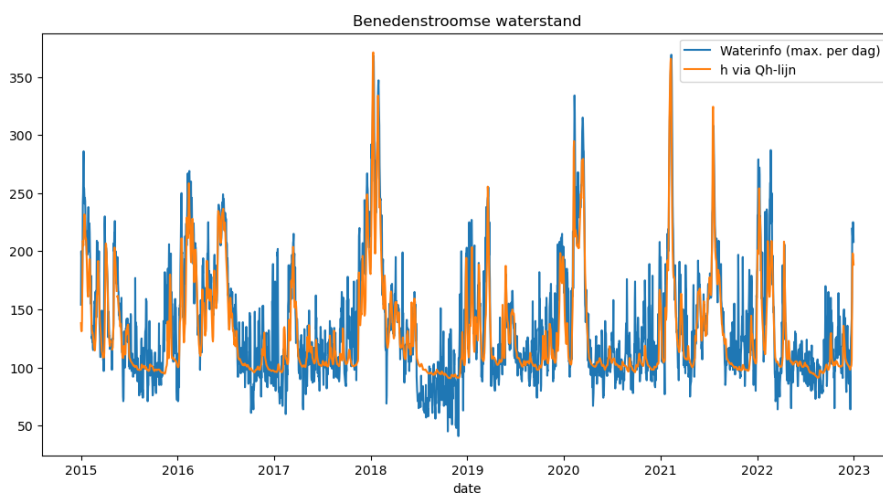
De gemeten en berekende (op basis van de betrekkinglijnen, aangegeven als Qh-lijn) waterstanden bovenstrooms van de stuw zijn weergegeven in Figuur F.9. Aangezien de betrekkinglijn is opgesteld voor gemiddelde waterstanden kan de daadwerkelijke waterstand bovenstrooms van stuw Hagestein afwijken, afhankelijk van het peilbeheer in het stuwpand evenals het optreden van translatiegolven ter plaatse van het meetpunt. In deze verkenning ligt de focus vooral op momenten met een verlaagde waterstand door lage rivierafvoer. Zoals

te zien is in Figuur F.9, lijkt juist een verlaagd gemeten peil significant te worden onderschat en geeft de betrekkinglijn een te hoge waterstand. Dit heeft er onder andere mee te maken dat de betrekkinglijn gebaseerd is op gemiddelde waterstanden. Daarnaast bevat de afvoerreeks daggemiddelden waardoor variatie over de dag niet aanwezig is.



Figuur F.9: Peil Hagestein boven gemeten reeks en een reeks berekend met betrekkinglijn

Figuur F.10 laat de gemeten en berekende (op basis van de betrekkinglijn, aangegeven als Qh-lijn) waterstanden benedenstrooms van stuw Hagestein zien. Voor de berekening van negatief verval zijn vooral de momenten met een verhoogd benedenstrooms peil belangrijk. In de figuur is te zien dat de momenten met een verhoogde peil benedenstrooms worden onderschat door de betrekkinglijn en dat deze een lager peil geeft. Duidelijk is te zien dat de betrekkinglijn gemiddelde vloedwaardes bevat, waardoor extremere verhoging (bijv. bij springtij/opzet) niet goed wordt berekend via de betrekkinglijn. Ten tijde van verlaagd benedenstrooms peil wordt de waterstand overschat door de betrekkinglijn, mede doordat deze is opgesteld voor gemiddelde vloedwaardes. Daarnaast bevat de afvoerreeks daggemiddelde waardoor variatie over de dag niet aanwezig is.



Figuur F.10: Peil Hagestein beneden gemeten reeks en een reeks berekend met betrekkinglijn

Figuur F.9 en Figuur F.10 laten zien dat de bovenstroomse waterstand gemiddeld te hoog wordt geschat terwijl dit voor de benedenstroomse waterstand juist wordt onderschat ten tijde

van hoogtij. Hierdoor is de berekening van het minimum verval conservatief en komt deze lager uit dan is gevonden in de metingen van 2015-2023. Dit geldt ook voor de kans op het optreden van een negatief verval. Dit wordt bevestigd in een berekening van het minimum verval over de periode 2015-2023 met de betrekkinglijnen. Hieruit volgt een minimum verval van 98 cm. Dit is een significante overschatting van 58 cm is ten opzichte van de waterstandsmetingen.

Deze overschatting lijkt aan te duiden dat de toegepaste methode erg optimistisch is. In een verdere verkenning zou dit verder uitgezocht kunnen worden met een minder grove aanpak en kan gewerkt worden aan een meer accurate schatting.

F.3.5 Discussie van de resultaten

Ten tijde van deze analyse waren nog geen afvoerreeksen beschikbaar op basis van de meest recente KNMI'23-scenario's. Een recente analyse (Deltares, 2023a) laat zien dat het 7-daags minimum voor elk mogelijk scenario afneemt in 2050 en in grotere mate voor 2100. Dit is in tegenstelling tot de oudere KNMI'14 afvoerscenario's waarin enkele scenario's een toename in het 7-daags minimum kon bevatten voor 2050 en 2100. Om die reden kan verwacht worden dat met afvoerscenario's op basis van de KNMI'23-scenario's de rode en oranje lijnen in Figuur F.8 lager uit zullen komen. Als gevolg hiervan zou de bovenrand van de bandbreedtes voor 2050 en 2100 lager komen te liggen.

Daarnaast zijn de KNMI'23 scenario's voor zeespiegelstijging opgesteld voor het jaar 2100 en niet voor 2085 zoals dit wel het geval is voor de 100-jarige afvoerreeksen op basis van de KNMI'14 scenario's. De rode arcering in Figuur F.8 combineert de afvoerscenario's voor 2085 met zeespiegelstijgingsscenario's voor 2100. Een scenario voor zeespiegelstijging in 2085 zal lager zijn.

De combinatie van het gebruik van de betrekkinglijn en de nieuwe klimaatscenario's kan ertoe leiden dat deze verkenning het minimum verval te optimistisch inschat. Op basis hiervan is het realistisch dat negatief verval al richting 2050, onder de geanalyseerde klimaat- en zeespiegelstijgingsscenario's, zou kunnen optreden bij gemiddelde vloedstanden benedenstrooms van stuw Hagestein. Extreme condities (zoals stormopzet en springtij) in acht genomen zou dit mogelijk al eerder of zelfs al in de huidige situatie kunnen voorkomen. Om dit goed in kaart te brengen is een verdere verkenning nodig.

F.4 Impact op stuwcomplex en watersysteem

Het (vaker) voorkomen van een negatief verval en het daarvoor moeten openen van de stuw heeft invloed op de technische en functionele prestatie van het complex. Veel is nog onbekend en behoeft verdere studie. Onderstaande discussie komt voort uit interne gesprekken binnen Deltares en het gesprek met Rijkswaterstaat ON.

F.4.1 Impact op stuwcomplex Hagestein

Negatief verval geeft een andere belasting op de constructie dan hoe deze nu in de praktijk wordt ingezet en waarvoor de stuw is ontworpen. Het is onbekend in hoeverre de vizierbogen en cilinderschuif hiermee om zouden kunnen gaan en wat de maximaal toegestane waarde van een negatieve verval zou zijn. De schutsluis kan tegen een negatief verval van -0.20 m (afkomstig uit het overleg met Rijkswaterstaat ON). Bij een groter negatief verval zal de sluis geopend moeten worden. Er kan ook gekozen worden om het negatief verval te verminderen door de bovenstroomse waterstand te verhogen. Het is onbekend wat hiervan de invloed zou zijn op het functioneren van de stuw en of dit op technisch vlak mogelijk is voor de stuw.

Volledig openen van de stuw in het geval van een negatief verval is waarschijnlijk onwenselijk gezien de lange duur van het volledige open- en sluitproces van de vizierbogen (~ vijf uur) en

de relatief korte duur van het optreden van het negatief verval. Daarnaast heeft een open stuw invloed op het functioneren van het watersysteem zoals beschreven in paragraaf F.4.2.

Mogelijk dat door gedeeltelijk openen van de vizierbogen of het openen van de cilinderschuiven het negatief verval beperkt kan blijven. Er zijn hier wel een aantal openstaande vragen. De bodembescherming bij de stuw is bijvoorbeeld ontworpen voor stroming in benedenstroomse richting. Onbekend is in hoeverre deze bestand is tegen een stroming de andere kant op.

Het bewegen van de cilinderschuiven kan relatief snel, maar het is de vraag in hoeverre dat mogelijk is wanneer de schuif in de andere richting belast wordt. Daarnaast is de vuilvang bijvoorbeeld alleen bovenstrooms gemonteerd en geeft stroming in bovenstroomse richting risico op een blokkade.

Daarnaast zal dit op termijn vaker openen en sluiten betekenen. Dit geeft mogelijk extra druk op het onderhoud en de levensduur van de stuw.

F.4.2 Impact watersysteem

Zoals hierboven genoemd, is het onbekend hoeveel negatief verval de stuw aan kan. Aangenomen kan worden dat de stuw (een bepaald) negatief verval constructief niet aan kan en daarom geopend zou moeten worden. Dit heeft een aantal consequenties, waarvan het sturen van het debiet over de Lek de meest complexe is.

Bij een open stuw komt het getij verder het stuwpannd in. Dit is vergelijkbaar met de situatie wanneer de stuw geopend wordt vanwege hoge afvoer, alleen nu bij een lagere gemiddelde waterstand en met een omgekeerde stroomrichting. Dit zal waarschijnlijk geen problemen bovenstrooms opleveren.

Een negatief verval treedt in eerste instantie vooral op gedurende lage rivierafvoeren, wanneer de Bernhardsluizen geopend zijn. De getijbeweging bij de geopende stuw Hagestein zal ook tot een debiet door het Betuwepand leiden, wat mogelijk hinder kan geven aan de schepen die door de geopende Bernardsluizen varen. De Bernhardsluizen sluiten is geen mogelijkheid, omdat ook deze geen negatief verval kunnen keren.

Ook heeft een negatief verval mogelijk invloed op de scheepvaart bij stuw Hagestein. De schutsluis zal openen en het is nog de vraag of de scheepvaart dan met stroming door deze open kolk zal varen. Om de scheepvaart doorgang te laten vinden, zou de stuw daarom misschien toch volledig geopend moeten worden. Als dit ongewenst is, dan moet de scheepvaart misschien gestremd worden.

Voor de situatie op de Lek benedenstrooms van Hagestein geldt dat zodra stuw Hagestein geopend wordt het debiet over de Lek niet langer geregeld kan worden door deze stuw. Het debiet bovenstrooms van de kruising met het ARK wordt vanaf dat moment gestuurd door stuw Amerongen. Via de Irenesluizen kan er nog steeds water worden doorgevoerd naar het ARK en NZK. Maar hoeveel water er naar de Lek gaat is dan ook afhankelijk van hoeveel water er via de Bernardsluizen komt; die staan dan open naar de Waal, maar door de getijvoortplanting is het debiet daar niet meer constant. Al met al is het dus de vraag hoeveel debiet er getij-gemiddeld naar de Lek zal gaan om de zoutindringing bij de monding van de Lek te beperken en in welke mate dit nog is te sturen. Dit zal nader onderzoek vragen.

F.5 Discussie casus

Deze casus is een eerste verkenning in het kader van methodiekontwikkeling. De resultaten laten een grotere urgentie zien dan vooraf werd gedacht: gezien het huidige minimum verval in de metingen is het aannemelijk dat onder extreme condities al in de huidige situatie een negatief verval zou kunnen optreden. Bepaalde aspecten behoeven verder onderzoek om een beter beeld te krijgen van zowel de urgentie als de impact van een negatief verval bij de stuw. Er zijn een groot aantal openstaande vragen die in een eventueel vervolgonderzoek een plaats zouden moeten vinden. Deze vragen hebben betrekking op de huidige situatie, drivers die de situatie beïnvloeden, de gebruikte aanpak, en de relevantie van deze casus voor de methodiekontwikkeling voor functionele prestatie.

F.5.1 Huidige situatie

Negatief verval kan in twee situaties optreden. Bij een sterk verlaagde rivierafvoer in combinatie met benedenstroomse opzet (rond +2 m NAP) en bij normale rivierafvoer in combinatie met grotere stormopzet (boven de +3 m NAP).

De gebruikte waterstanden komen uit de periode 2015-2023. In deze periode is er geen negatief verval opgetreden. In 2018 heeft de Rijn wel te maken gehad met lage afvoeren. Daarbij zijn er in de afgelopen jaren meerdere stormen over Nederland getrokken welke tot hoge waterstanden hebben geleid in de Lek-monding door stormopzet (KNMI, 2023b). De huidige datareeks is echter onvoldoende om de kans op optreden van een negatief verval te kwantificeren. Ook sluiten andere definities van storm of opzet sluiten meer aan bij hoe dit in het algemeen wordt meegenomen in waterstandsstudies.

De bevinding dat negatief verval mogelijk al in de huidige situatie kan voorkomen behoeft daarom extra onderzoek. Het is aannemelijk gemaakt dat het zou kunnen gebeuren, maar de kans op een negatief verval en de grootte daarvan moeten nog worden bepaald. Daarnaast is het niet bekend hoe daar dan operationeel mee omgegaan zou moeten worden en wat dit kan betekenen voor de scheepvaart. Dit vraagt verder onderzoek met een gedetailleerde opzet (o.a. meenemen windopzet) en uitwerking van het handelingsperspectief.

F.5.2 Drivers

Qua drivers is er in deze verkenning gekeken een verandering in rivierafvoer en zeespiegelstijging. Een driver die niet is meegenomen is de bodemverandering bovenstrooms en de invloed daarvan op de afvoerverdeling. Door ongelijke bodemerosie over de riviertakken stroomt er steeds meer water naar de Waal en minder naar de Nederrijn (Rijkswaterstaat, 2021a). Keuzes rondom de rivierbodem zullen daarom een effect hebben op het voorkomen van het negatief verval.

Daarnaast is er in de studie niet gebruikt gemaakt van de meest recente KNMI'23-scenario's. Zoals genoemd in Paragraaf F.3.5 zal het gebruiken van deze scenario's waarschijnlijk tot het eerder en vaker voorkomen van een negatief verval leiden.

F.5.3 Aanpak

Qua aanpak zijn er een aantal aspecten die weggelaten zijn in deze studie of verbeterd zouden kunnen worden.

Er is in deze studie gebruik gemaakt van een simpele aanpak om de keuzes herleidbaar en inzichtelijk te houden. Om meer inzicht te krijgen is een gedetailleerde modelstudie een optie. Van belang is hierbij hoe het hele netwerk hierin is meegenomen (zoals bijvoorbeeld het sluiten van de Maeslantkering, het openen van de Bernhardsluizen).

Wat betreft de betrekkinglijn, de belangrijkste aanmerking is dat de betrekkinglijn voor de benedenstroomse waterstand de gemiddelde vloedwaardes bevat, terwijl voor deze studie juist de extreme waardes relevanter zijn. De aanpak voor het verkrijgen van benedenstroomse waterstanden kan uitgebreid worden door breder te kijken naar oorzaken die voor een verhoogde waterstand kunnen leiden, zoals opwaaiing, opzet en opslinging. Dit zijn relevante aspecten in het bepalen van het optreden van negatief verval en de duur hiervan, maar zijn in deze verkenning buiten beschouwing gelaten.

Daarnaast is de gebruikte betrekkinglijn van 2018, terwijl de gebruikte metingen uit de periode 2015 tot 2023 komen. Eigenlijk zou de versie van de betrekkinglijn passend bij de metingen gebruikt moeten worden vanwege de veranderingen in afvoerverdeling.

Ook is de invloed van de afvoer op de doorwerking van zeespiegelstijging niet meegenomen. Bij hogere afvoeren zal de invloed van zeespiegelstijging kleiner zijn ten opzichte van lagere afvoeren. Ook niet beschouwd is een eventuele sluiting van de Maeslantkering welke de benedenstroomse waterstand zal beperken.

F.5.4 Methodiekontwikkeling functionele prestatie

Deze casus combineert technische (hoeveel negatief verval kan de stuw aan) en functionele prestatie (wat betekent dit voor de functies die de stuw vervult). Ook is deze casus een goed voorbeeld van hoe groot het invloedgebied van een kunstwerk kan zijn, in dit geval zelfs boven- en benedenstrooms van stuw Amerongen tot de Maeslantkering.

De specifieke eigenschappen van de stuw en de specifieke inrichting van het watersysteem maken deze casus relatief uniek. Toch kan deze aanpak ook breder worden ingezet. Het is vaak lastig om de juiste data over drivers bij kunstwerken te vinden (zie KpNK (2024b)). In dit geval, waar zowel zeespiegelstijging als rivierafvoer een rol spelen, is dit nog lastiger. De hier gebruikte aanpak kan mogelijk helpen in een eerste inschatting bij andere kunstwerken waar dit een rol speelt. Ook kan de aanpak mogelijk helpen om inzicht te krijgen bij andere kunstwerken waar een negatief verval kan voorkomen, zoals bijvoorbeeld bij stormvloedkeringen of andere stuwen.

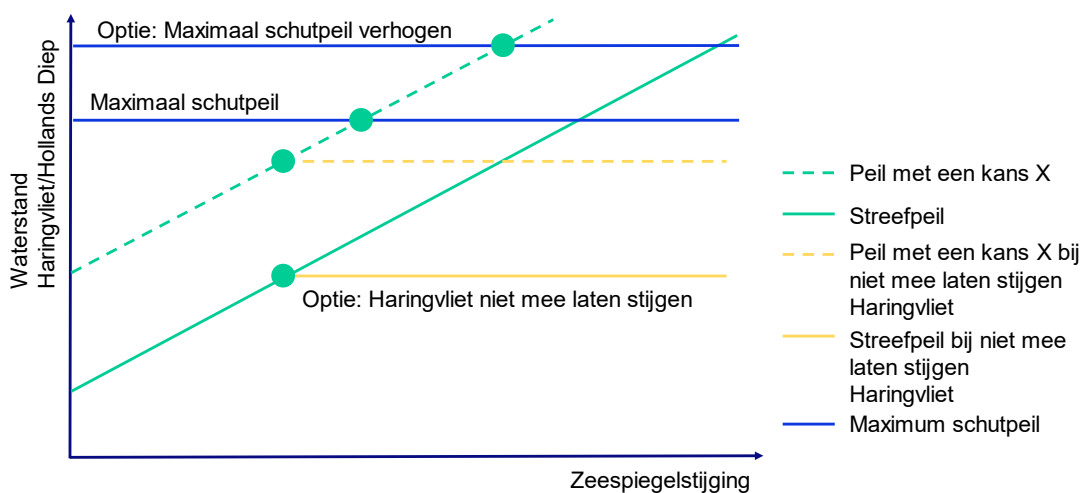
F.5.5 Afsluitend

Negatief verval bij stuw Hagestein kan mogelijk al in de huidige situatie optreden. Daarnaast laten de resultaten zien dat veranderingen in lage afvoercondities en zeespiegelstijging de kans op het optreden van een negatief verval doen toenemen. Wanneer en in welke mate negatief verval voor het eerst kan gaan optreden vraagt om verder onderzoek. De aanbeveling is om met een gedetailleerdere opzet het optreden in het huidige klimaat en het optreden onder de nieuwe klimaatscenario's te onderzoeken. Daarnaast wordt aanbevolen om op korte termijn een start te maken met het uitwerken van een handelingsperspectief voor als een negatief verval zou optreden. Dit betreft een tijdige signalering, de te nemen maatregelen om schade aan de stuw te voorkomen en de implicaties daarvan voor scheepvaart en de waterverdeling.

G Kunstwerken rondom het Haringvliet

In Deltares (2021b) is gekeken naar het effect van zeespiegelstijging op de waterstanden op het Haringvliet en het Hollands Diep, waar veranderingen door zullen werken in het hele systeem van zuidwest-Nederland. De belangrijkste aanname hierin is dat het Haringvliet en Hollands Diep zullen meestijgen met zeespiegelstijging; dit omdat de rivier naar zee moet kunnen stromen en om, net als nu, zoutindringing via de Nieuwe Waterweg zoveel mogelijk te voorkomen. Dit betekent dat hogere waterstanden op Haringvliet en Hollands Diep in de toekomst dus een grotere kans van voorkomen zullen krijgen. In Deltares (2021b) is voor de driver zeespiegelstijging, en daaraan gekoppeld de stijging van het peil van het Haringvliet, gekeken naar de terugkeertijd van het maximum verval bij de schutsluizen, de kerende hoogte van de deuren van de schutsluizen en de kerende hoogte van de inlaatsluizen bij de Volkeraksluizen. Zoals beschreven in Paragraaf 5.3.4 is hiervoor onder bepaalde aannames data vanuit Hydra-NL gebruikt en aangepast.

Door zeespiegelstijging zal de functionele prestatie van de kunstwerken rond het Haringvliet voor de scheepvaartfunctie afnemen. Het *maximum schutpeil* zal vaker bereikt worden, dit is een waterstand waarboven het schutten niet meer wordt toegestaan of (technisch) niet meer kan plaatsvinden. Dit is schematisch weergegeven in Figuur G.1. Het maximum schutpeil kan een waterstand zijn waarbij het verval maximaal is voor het nivelleerproces of waarbij de kerende hoogte van de sluis wordt bereikt (hoewel normaal gesproken het maximum schutpeil onder de kerende hoogte ligt). Het bereiken van het maximum schutpeil betekent dat de sluis gestremd moet worden. Voor ontwerp geldt een overschrijdingspercentage van maximum schutpeil van kleiner dan 1% (Rijkswaterstaat Bouwdienst, 2000). De verwachting is – op basis van zeer grove aannames – dat bereiken van het maximaal schutpeil bij 0.5 m zeespiegelstijging al fors vaker zal voorkomen.



Figuur G.1: Schematische weergave van de aanpak in Deltares. De figuur geeft inzicht in de gevolgen van zeespiegelstijging voor het Haringvliet bij twee verschillende maatregelen: het verhogen van het maximaal schutpeil en het niet mee laten stijgen van het Haringvliet (Deltares, 2021b).

Zeespiegelstijging kan ook voor een afname van de functionele prestatie voor de functies waterbeheer (peil scheiden en waterdoorlaten) en waterveiligheid (waterberging) zorgen. Zo kan bijvoorbeeld op dit moment het Volkerak-Zoommeer bij een gesloten Europoortkering ingezet worden om de rivierafvoer te bergen. Ook dit zal met zeespiegelstijging (en

veranderende rivierafvoer) vaker voorkomen, omdat door zeespiegelstijging de Europoortkering al vaker zal sluiten. Daarnaast betekent zeespiegelstijging – onder de aanname dat de binnenwateren beheerd zullen ‘meestijgen’ – dat het gezamenlijk bergend vermogen van het Haringvliet en het Volkerak-Zoommeer afneemt. Het peil op het Haringvliet ligt dan al hoger en dus zal de berging op het Volkerak-Zoommeer al bij een lagere rivierafvoer worden ingezet.

Los van het inzetten van de berging kan door zeespiegelstijging de *kerende hoogte van de inlaatsuizen* ook vaker worden bereikt. Bij het bereiken van de kerende hoogte stroomt er water over de inlaatsuizen heen naar het Volkerak-Zoommeer en kan er dus geen sturing op de wateraanvoer plaatsvinden. Bij een nog hoger peil wordt de *kerende hoogte van de deuren van de schutsluis* bereikt. Dit betekent dat er water over de sluisdeuren (en later ook sluisplateau en omliggende dijkkring) van het Haringvliet naar het Volkerak-Zoommeer gaat stromen. De kans hierop is nu zeer klein en dit zal tot 1 m zeespiegelstijging – onder de gekozen aannames – ook weinig voorkomen.

Het vaker inzetten van de berging of het vaker voorkomen van het bereiken van de kerende hoogte geeft vaker een hogere waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Dit kan vervolgens voor problemen zorgen bij omliggende kunstwerken met een scheepvaartfunctie, zoals bruggen (verminderde doorvaarthoogte) en sluizen (eerder bereiken maximaal schutpeil en kerende hoogte). Dit geeft dan dus meer stremmingen voor de scheepvaart. Maar het vaker voorkomen van een hoger peil kan ook extra eisen stellen aan de Bathse spuisluis. Functionele samenhang is dus belangrijk is dit gebied.

Een stijging van het peil van het Haringvliet en Hollands Diep heeft ook invloed op het functioneren van Sluis I in het Wilhelminakanaal en een aantal kleinere objecten (keersluis van Hellevoetsluis, Schutsluis bij Kanaal door Voorne, Keersluis van Oud-Beijerland, Marksluis in het Markkanaal). Maatregelen voor de ene functie zullen invloed hebben op een andere functie, en voor sommige maatregelen is de inzet van andere kunstwerken benodigd.

Zoals al geconcludeerd in Deltares (2021b) vraagt het correct uitvoeren van deze analyse om aanpassingen van bestaande modelinstrumentaria. Daarnaast zijn ook zijn diverse kennisvragen geïdentificeerd. Deze kennisvragen hebben betrekking op de effecten van het vaker inzetten van het Volkerak-Zoommeer als bergingsgebied en van de spuicapaciteiten. Daarnaast zijn vragen over de duur van de gebeurtenissen en de effecten op berging, scheepvaart en de kunstwerken in de omgeving geïdentificeerd.

H Kwantificeren technische prestatie – Overstortend debiet – belasting op bodembescherming

Door zeespiegelstijging zal de hoeveelheid overstortend debiet in de toekomst toenemen en daarmee mogelijk een overbelasting op de bodemverdediging achter (overstortende) (kust)kunstwerken kunnen veroorzaken. Ook kan het in de toekomst vaker voor gaan komen dat de kerende hoogte van een kunstwerk (dat niet voor overstort ontworpen is) niet langer toereikend is. Bij landinwaartse kunstwerken, zoals de stuwen in de Maas, kan ook als gevolg van piekafvoeren overstort ontstaan. Overstortend debiet heeft een aantal concrete gevolgen, waaronder een aanval op de bodemverdediging achter het kunstwerk en een toename van de waterstand. Aan de hand van rekenregels kan worden gekwantificeerd hoe het overstortende debiet de technische prestatie van een kunstwerk of kunstwerkonderdeel kan beïnvloeden.

Met behulp van watersprongrelaties kan worden bekeken of er direct achter een overstortend kunstwerk voldoende waterdiepte d_a beschikbaar is voor het ontstaan van een watersprong, wat een bepaalde waterdiepte d_r vereist. Deltares heeft een 'Rapid Assessment Tool' (RAT) ontwikkeld op basis van de watersprongrelaties om de stroomsnelheid bij de bodem als gevolg van een overstortend debiet te kwantificeren (Weiler, Verhaart, Nogueira, & O'Mahoney, 2019). Op basis van deze RAT kan geen directe conclusie worden getrokken over het optreden van schade aan de bodemverdediging, maar het optreden van superkritische stroming ('schietsend water') door onvoldoende waterdiepte achter de kering kan wel een waarschuwing afgeven. In de RAT wordt ook het energieverlies dat optreedt door recirculatie onder de straal water die over de kering valt beschouwd (Rajaratnam & Chamani, 1995). De methode en de daarbij horende vergelijkingen worden uitgebreid beschreven in Weiler et al. (2019).

De volgende parameters moeten minimaal bekend zijn om deze methodiek toe te passen:

- Geometrie: drempel- en kruinhoogte, breedte en afvoercoëfficiënt van het overstortende kunstwerk
- Randvoorwaarden: waterstand boven- en benedenstrooms van het kunstwerk

Voor het overstortende debiet $Q_{\text{overstort}}$ over een volkomen overlaat kan worden aangenomen dat:

$$Q_{\text{overstort}} = \frac{2}{3} \mu b_{\text{overstort}} \sqrt{\frac{2}{3} g (h_{\text{boven}} - h_{\text{overstort}})^{3/2}}, \quad (\text{H. 1})$$

met afvoercoëfficiënt μ . Als alternatief op deze beschrijving van het overstortende debiet kan uiteraard ook gebruik gemaakt worden van netwerkmodellen zoals SOBEK om een afvoerreeks te bepalen.¹⁵

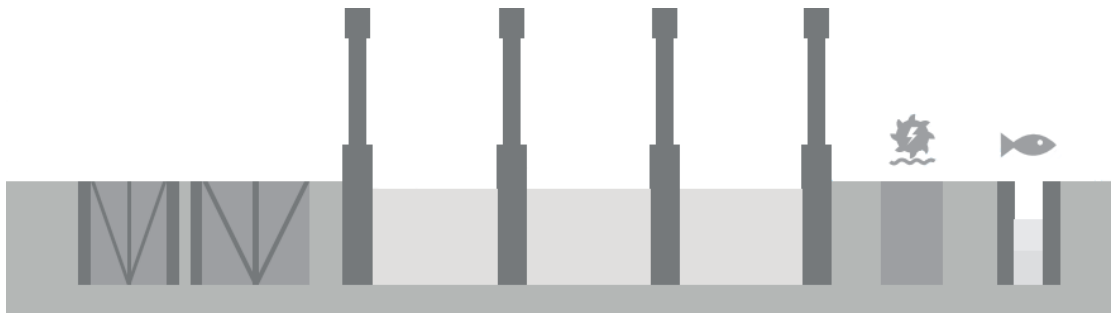
Om de functionele prestatie van overstortende kunstwerken te bepalen kan in geval van superkritische stroming een stroomsnelheid bij de bodem bepaald worden, welke kan worden vergeleken met de ontwerpwaarde van de bodemverdediging. Bij gebrek aan ontwerpwaarden kan ook gebruik worden gemaakt van het moment waarop schade aan de bodembescherming ontstaat, of met andere woorden het moment van in beweging komen van de stenen. Stabiliteitsformules maken echter gebruik van dieptegemiddelde snelheden, terwijl de watersprong die door het overstortende debiet achter het kunstwerk zal ontstaan niet

¹⁵ [SOBEK Suite | Deltares](#)

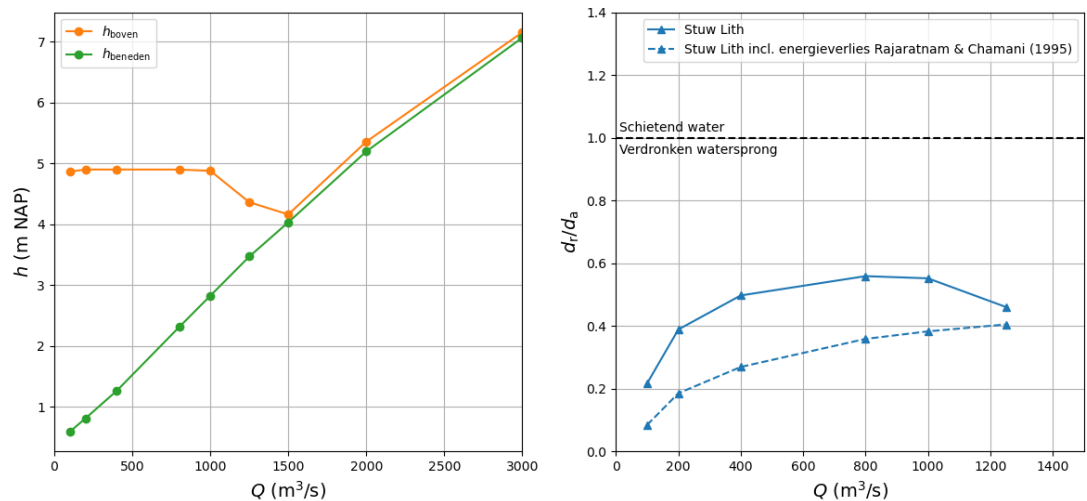
beschreven kan worden op basis van een dieptegemiddelde snelheid. Hierdoor is een 1-op-1 vergelijking niet direct mogelijk.

Rekenvoorbeeld stuw Lith

Stuw Lith is een overstortend stuwcomplex met drie stuwoeningen (zie Figuur H.1). Iedere opening bestaat uit een wielschuiw met daarop scharnierende regelkleppen. Vanaf 1000 m³/s gaat het bedrijf van de kleppen over op de schuiven, en vanaf 1200 m³/s is de stuw volledig getrokken.¹⁶ Figuur H.2 geeft de verhouding tussen de benodigde en beschikbare diepte weer voor stuw Lith bij een bereik aan afvoeren op basis van de methodiek beschreven in Weiler et al. (2019). Uit deze figuur kan worden afgeleid dat er – zoals verwacht voor een kunstwerk dat is ontworpen om te overstorten – geen sprake is van schietend water. Hierbij dient opgemerkt te worden dat ondanks dat er geen schietend water optreedt, de snelheden bij de bodem alsnog erg hoog kunnen zijn. In de berekeningen is aangenomen dat de afvoercoëfficiënt $\mu = 1$.



Figuur H.1: Schematische weergave van stuw Lith (bron: Infographic Operationeel Watermanagement Gestuwde Maas en Maas-Waalkanaal).



Figuur H.2: Waterstanden boven- en benedenstrooms van stuw Lith in de SOBEK berekeningen (links) en de verhouding tussen de benodigde (d_r) en de beschikbare diepte (d_a) als functie van debiet bij overstort over stuw Lith exclusief (doorgetrokken lijn) en inclusief (stippellijn) energieverlies volgens de theorie van Rajaratnam & Chamani (1995) (rechts).

¹⁶ In het SOBEK model is stuw Lith pas vanaf 1400 m³/s volledig getrokken, zie Figuur H.2a.

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