



Kennisprogramma Natte Kunstwerken
Kennisplan 2021

*Vervangings- en renovatieopgave
natte kunstwerken in Nederland*

Kennisbijdrage:

Aanpak VenR-optie uitwerking

Validatie prototype Spuisluisformulering op
basis van de Noordland-
zoutschermexperimenten

Auteurs

Tom O'Mahoney	(Deltares)
Meinhard Tiessen	(Deltares)
Noor ten Harmsen van der Beek	(Deltares)
Arnout Bijlsma	(Deltares)
Gerben Dekker	(Rijkswaterstaat)
Nathalie van Veen	(Rijkswaterstaat)

kenmerk	: KpNK-2021-KV2.1-functie-a002
versie	: 1.0
datum publicatie	: 9 december 2022



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

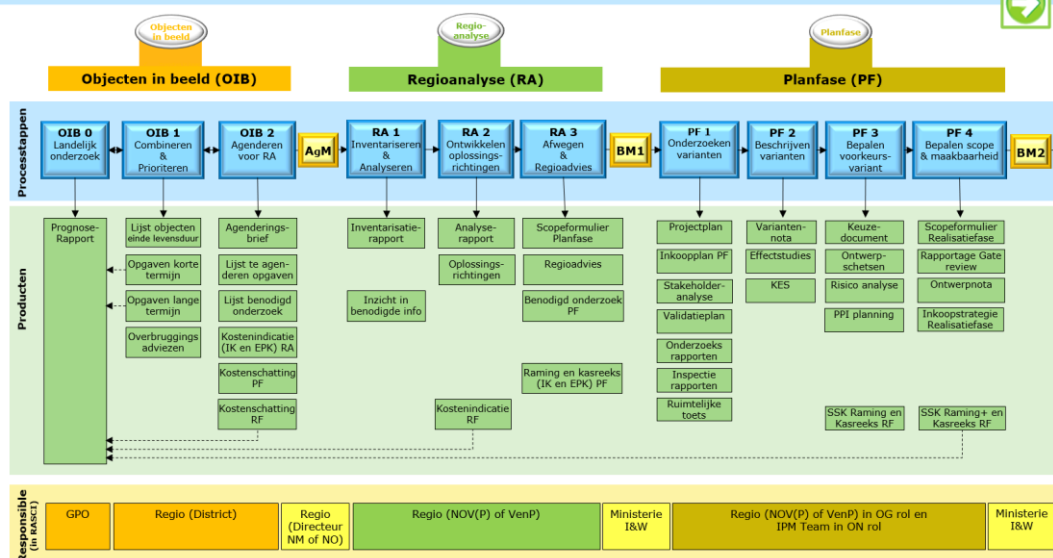
TNO

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



Kennisprogramma Natte Kunstwerken Kennisplan 2021

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 *Prognoserapport*;
- 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 '*Aanpak VenR-optie uitwerking*' uit het kennisplan 2021. Het omvat eerst de samenvatting van het onderzoek '*Validatie prototype Spuisluisformulering op basis van de Noordland-zoutschermexperimenten*'. Dit is een van de in totaal drie bijdragen uit het onderzoek rondom prototype Spuisluisformulering binnen kennisplan 2021, dat namens het Kennisprogramma Natte Kunstwerken is geleid door Deltares. Na de samenvatting vindt u het volledige onderzoeksverslag in de vorm van een onderzoeksrapport.

N.B. Het volledige onderzoeksrapport is gelijk aan het originele onderzoeksrapport 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 2021*

Meer informatie

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

NKWK

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



3. Voor vragen over het Kennisprogramma Natte Kunstwerken en het kennisplan 2021 kunt u terecht bij Daan Dunsbergen, email <daan.dunsbergen@rws.nl>
4. Voor vragen over de voorliggende kennisbijdrage kunt u terecht bij de auteurs:

Tom O'Mahoney - Tom.OMahoney@deltares.nl

Arnout Bijlsma - Arnout.Bijlsma@deltares.nl



Kennisprogramma Natte Kunstwerken
Kennisplan 2021



Samenvatting

Aanpak VenR-optie uitwerking

Validatie prototype Spuisluisformulering op basis van de Noordland-zoutschermmexperimenten

Hieronder vindt u een kennisbijdrage van het werkpakket '*Aanpak VenR-optie uitwerking*' uit het kennisplan 2021. De bijdrage omvat de samenvatting van het bovengenoemde onderzoek 'Validatie prototype spuisluisformulering op basis van de Noordland-zoutschermmexperimenten' evenals het volledige onderzoeksrapport. Het onderzoek is geleid door Deltares en is een van de in totaal drie bijdragen uit het onderzoek rondom de Spuisluisformulering binnen kennisplan 2021.

Aanleiding en probleemstelling

Rijkswaterstaat en de waterschappen zijn als beheerders verantwoordelijk voor de verziltingsbestrijding. In het bijzonder voor het voorkomen van te hoge, dat wil zeggen ongewenste, zoutgehalten stroomopwaarts in het watersysteem. Zoutindringing in het watersysteem komt onder andere voor bij natte kunstwerken die zich bevinden tussen zout en zoet water zoals schut- en spuisluizen. Er kan een situatie ontstaan dat zo'n kunstwerk niet meer in staat is deze zoutindringing voldoende te beperken. Zoutindringing is daarmee een van de factoren die een rol speelt bij het beoordelen van de functionele levensduur van kunstwerken, alsmede bij het beoordelen van varianten voor aanpassing, vervanging of renovatie van kunstwerken.

Net als voor andere functies van kunstwerken geldt voor zoutindringing in het watersysteem, dat het wenselijk is om die in een rekenmodel te beschrijven. Daarmee kan de impact van het gebruik van de kunstwerken en van mitigerende maatregelen op de grootte van de zoutlast worden onderzocht. In het KpNK 2017-2020 is een stelsel van vergelijkingen ontwikkeld die de zoutlast op een watersysteem door zoutindringing via schutsluizen goed berekent. Deze zogenoemde Zeesluisformulering is geschikt om in netwerkmodellen te incorporeren. Beheerders willen graag ook voor spuisluizen een vergelijkbaar instrumentarium hebben om zoutindringing bij spuisluizen te kunnen bepalen. Verkennend werk daarvoor, dat is gedaan in workshops van RWS en Deltares, is vastgelegd in de KpNK-kennisbijdrage KpNK-2020-SKW-01c004 die bij het KpNK-programmateam is op te vragen (zie tabblad 'Contact' op de website www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl).

Onderzoeksvraag (WAT)

In deze kennisbijdrage wordt gewerkt aan een formulering van de zoutindringing bij spuisluizen: een prototype Spuisluisformulering (SSF). Deze moet *stand-alone* gebruikt kunnen worden of in combinatie met een modelmatige beschrijving van het watersysteem. Een doel is ook om een Spuisluisformulering te hebben die in D-HYDRO is geïmplementeerd zodat gebruikers van deze software, ten behoeve van studies naar zoetwaterbeheer, de zoutindringing in het watersysteem voor spuisluizen kunnen vaststellen. En daarmee ook het einde of niet-einde van de functionele levensduur van spuisluizen kunnen vaststellen en de impact van eventuele vervangings- en renovatievarianten op de zoutindringing in het watersysteem.



N.B. Er zijn ook andere toepassingen van een SSF mogelijk. Bijvoorbeeld analyses die het begrip over de samenhang tussen assets binnen het watersysteem vergroten of analyses die de effectiviteit van zoutindringingsbeperkende maatregelen bij het gebruik van spuisluizen kunnen vaststellen.

In het verkennende werk van RWS en Deltares is geconcludeerd dat de ontwikkeling van een SSF zich vooral moet richten op de hoofdvraag:

Hoe zijn drie belangrijke deelprocessen¹ bij het onttrekken van zout water uit zoet water rondom spuisluizen in één wiskundige formulering op te nemen?

Deze hoofdvraag is onderverdeeld in de volgende onderzoeksdeelvragen:

1. Welke kunstwerkformuleringen zijn beschikbaar in de Deltares softwarepakketten (SIMONA, Delft3D, D-HYDRO, etc), in overige softwarepakketten en welke andere formuleringen zijn voor het beschrijven van spuisluizen beschikbaar (bijv. SPUIS)?
2. Wat is de toepasbaarheid/geschiktheid van deze formuleringen en welke hiaten zitten hier nog in?
3. Hoe kan een prototype SSF bijdragen aan het vullen van deze hiaten?
4. Wat is het huidige gebruik van de spuisluisschuiven wat betreft visvriendelijk spuisluisbeheer en hoe zou dit geschematiseerd kunnen worden in een prototype SSF?
5. Welke testcases, velddata, literatuur zijn beschikbaar voor eventuele validatie van een prototype SSF wat visvriendelijk spuien betreft?
6. Zijn er eenvoudige formuleringen in de academische literatuur te vinden die al geschikt zijn om het proces van selectieve onttrekking van zout water uit een gestratificeerd systeem nauwkeurig te reproduceren ?

Onderzoeksaanpak en -methode (HOE)

In dit vervolg op het verkennende onderzoek zijn achtereenvolgens de volgende stappen gezet:

- Er is een kick-off workshop georganiseerd met ontwikkelaars en gebruikers van de huidige Deltares-software voor verziltingsvraagstukken (SIMONA, Delft3D, D-HYDRO). Daarin is de huidige staat van kunstwerkformuleringen met betrekking tot spuisluizen besproken. Het doel van de workshop was om de huidige stand van zaken vast te stellen, alsmede wat er mist ten opzichte van de beoogde toepassing van een prototype SSF.
- Het verkennende werk in 2019 en 2020 heeft geleid tot een voorstel voor een rekenkundig concept (zie kennisbijdrage KpNK-2020-SKW-01c004) om het proces voor het onttrekken van zout water uit zoet water bij spuisluizen te beschrijven. Dit rekenkundig concept is gebaseerd op de methode van Fan. Deze methode uit de academische literatuur is opgesteld om

¹ Dit zijn (1) de lekkage bij de schuiven van een spuisluis, (2) de zoutuitwisseling door visvriendelijk beheer tijdens het spuien en (3) het onttrekken van zout water uit een zoet systeem tijdens het spuien.



sedimentconcentraties bij het spoelen van stuwmeren te kunnen voorspellen, maar kan ook toegepast worden bij het voorspellen van zoutconcentraties bij het spuien. Het rekenkundige concept is vervolgens vastgelegd in een Pythoncode, waarmee tot een prototype van de SSF is gekomen. Dit prototype SSF is vergeleken met de Noordland-zoutexperimenten. Op het werkeiland Noordland bij de Oosterscheldekering was vroeger een spuisluis gepland die was bedoeld om het meer achter een 'Oosterschelddedam' zoet te maken. Met de bouw van een kering is de Oosterschelde echter nooit volledig afgesloten en is dus zout gebleven. Daardoor was de geplande spuisluis met zoutschermdaar niet nodig. Het gaat hier dan ook om lab-experimenten waarbij de geplande spuivoorziening met zoutschermdaar op schaal is nagemaakt. Deze vergelijking, die in deze kennisbijdrage is vastgelegd, dient als validatie van het prototype SSF en geeft daarmee antwoord op onderzoeksdeelvraag 6.

- In een workshop met experts van RWS en Deltares zijn de resultaten van de validatie van het prototype SSF voor alleen het proces van het onttrekken van zout water uit zoet water bij spuisluizen geëvalueerd. Ook hebben we hier feedback gevraagd die ons kan helpen bij de volgende ontwikkelstappen. Daarbij is ook de mogelijkheid verkend om het proces voor het visvriendelijk spuisluisbeheer in het prototype SSF op te nemen. De nadruk in deze verkenning lag op de locaties Afsluitdijk, Haringvliet en Bathse Spuisluis.

Onderzoeksresultaten en synthese

Uit de validatie van deze eerste aanzet van een prototype SSF zijn de volgende conclusies getrokken:

- De methode van Fan is een eenvoudig te implementeren en nauwkeurig model (nauwkeurigheidsmarges meestal binnen de 20%) voor het voorspellen van uitstroomconcentraties uit een gelaagd reservoir. Daarmee is het dus geschikt voor de beoogde toepassingen van de SSF.
- De nauwkeurigheid van de methode van Fan kan misschien vergroot worden (tot maximaal ongeveer 10%) door het kalibreren van de coëfficiënten met behulp van veldmetingen, schaalmodelmetingen of CFD-berekeningen van de specifieke constructie.
- Het is nodig om de modelwaardes in de methode te begrenzen, zodat de SSF géén concentratieratio > 1 als uitkomst kan genereren. Hiervoor dient een (praktische) oplossing te worden gezocht.

Evaluatie en vooruitblik

Naar aanleiding van de validatie van het prototype SSF voor het proces van het onttrekken van zout water uit zoet water bij spuisluizen bevelen we het volgende vervolgonderzoek aan:

- Gebruik de methode van Fan in een SSF waarin het selectief onttrekken van zout water dicht bij de spuisluis niet expliciet opgelost wordt door het gebiedsmodel. Want met de methode van Fan kan het onttrekkingsproces van zout water uit een zoet systeem tijdens het spuien wél worden gemodelleerd.



- De prestatie van de methode in een tijdsafhankelijk scenario, in combinatie met een model voor het verspreiden van zout en zoet water aan weerszijde van de spuisluis, dient nader onderzocht te worden. Hiervoor zal aanvullend validatiematerieel nodig zijn.

De vervolgstappen voor het ontwikkelen van het prototype SSF worden beschreven in het Kennisplan 2022 van het KpNK. Verder informatie kan gevonden worden in de producten uit 2022 en verder.

Memo

Aan

de heer G.J. Dekker

Datum

17 maart 2022

Contactpersoon

Tom O'Mahoney

Ons kenmerk

11207401-021-HYE-0001

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 7206

E-mail

Tom.OMahoney@deltares.nl

Aantal pagina's

1 van 13

Onderwerp

Verificatie Spuisluisformulering (SSF) tegen Noordland experimenten van een zoutscherm

1 Inleiding

Zoutindringing door spui- en schutsluizen is een probleem dat zich afspeelt in interactie tussen het kunstwerk en het watersysteem: de zoutindringing speelt zich af ter plaatse van het kunstwerk, maar het is pas een probleem als het verder bovenstrooms, in het watersysteem, leidt tot ongewenste zoutgehalten (Kerstma et al, 1994).

De zoutindringing speelt een rol bij het beoordelen van de functionele levensduur van kunstwerken tussen zout- en zoetwater en eveneens bij het beoordelen van varianten voor een aanpassing, vervanging of renovatie van dergelijke kunstwerk. En net als voor andere functies van kunstwerken, geldt ook voor de zoutindringing dat, om het functioneren van een kunstwerk in het watersysteem te onderzoeken, het wenselijk is dat het kunstwerk goed beschreven kan worden in een rekenmodel van het watersysteem. In dit project wordt gewerkt aan een formulering van de zoutindringing bij spuisluizen die gebruikt kan worden als stand-alone, of in combinatie met een beschrijving van het watersysteem (zoals rekenmodellen, vuistregels en bakjes-modellen).

2 Achtergrond

In 2017 t/m 2019 (in het Kennis Programma Natte Kunstwerken) is een formulering ontwikkeld (een stelsel van vergelijkingen) die de zoutindringing via schutsluizen goed berekent zodat geometrie, mitigerende maatregelen en operatie meegenomen worden in de bepaling van de zoutlast op een watersysteem. Deze formulering is eveneens geschikt om in netwerkmodellen te incorporeren.

Met betrekking tot spuisluizen wordt er naar gestreefd om een vergelijkbaar instrumentarium beschikbaar te hebben om zoutindringing te bepalen. In het voorbereidend werk van 2019 en 2020 op een spuisluisformulering (Deltares 2020b) werd geconstateerd (d.m.v. workshops met RWS en Deltares) dat een instrumentarium drie belangrijke processen rondom zouttransport bij spuisluizen zou moeten bevatten, namelijk:

- Lekkage bij de schuiven van een spuisluis
- Zoutuitwisseling door visvriendelijke beheer tijdens het spuien en inlaten
- Het onttrekken van zout water uit een zoet systeem tijdens het spuien

Hierbij spelen geometrie en operatie een belangrijke rol. Andere processen zijn ook genoemd (bijv. zouthevens of visdoorgangen) maar werden niet als prioritair aangegeven. De verwachting is dat deze in een latere stadium eenvoudig toe te voegen zullen zijn.

De ontwikkeling van een spuisluisformulering (SSF) zal het (in de toekomst) mogelijk maken om de interactie tussen het watersysteem en de kunstwerken op de grens van zout- en zoetwater te onderzoeken. Deze interactie is complex en voor een groot deel bestaand uit fjnischalige fysische processen die wel invloed hebben uiteindelijk op het achterliggend systeem. Veel overwegingen voor systeemanalyses en vervanging en vernieuwingen van kunstwerken betreffen grootschalige effecten van het kunstwerk op het watersysteem. Deze effecten zullen in kaart gebracht moeten worden bij het beantwoorden van vragen omtrent het einde van de functionele levensduur en het beschouwen van varianten voor vervanging en renovatie van kunstwerken. Er is hierom behoefte aan een benadering van de netto zouttransport over de spuisluis die de essentie van de fysica weer geeft maar die ook de fjnischalige details enigszins schematiseert om de rekentijden te beperken. Daarnaast zijn ook andere toepassingen mogelijk, bijv. t.b.v. systeemanalyses om systeembegrip te vergroten of om maatregelen te kunnen treffen om zoutindringing te beperken.

3 Doelstelling van deze memo

Deze memo richt zich op een van de drie belangrijke processen die SSF moet bevatten, namelijk het onttrekken van zout water uit een zoet systeem tijdens het spuien (het 3^{de} proces uit vorige paragraaf). De formulering van dit proces wordt in dit memo getoetst aan metingen. Uit het werk van KpNK 2019 en 2020 is de methode van Fan (Fan 2008) geïdentificeerd als een geschikte basis voor het onttrekken van zout water uit een zoet systeem. In 2021 wordt deze methode van Fan (zoals beschreven in KpNK product 2020, zie Deltares 2020) op experimenten toegepast (zie Waterloopkundig Laboratorium 1973 en Jirka 1979), de zogenaamde “Noordland proeven”. Deze proeven zijn uitgevoerd door het Waterloopkundig Laboratorium (nu Deltares) en zijn niet gebruikt in het opstellen van de Fan relaties. Ze zijn ook een belangrijke basis geweest voor de initiële vormgeving van de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden.

De stappen die doorlopen zijn voor het verifiëren van de methode van Fan aan de Noordland proeven zijn als volgt:

- Een Python code werd gemaakt om de methode van Fan te doorlopen. Deze code wordt de eerste versie van de SSF.
- Een vergelijking wordt gemaakt tussen de resultaten van deze methode voor de test condities uit de Noordland proeven met de waarnemingen van die proeven. Deze stap dient als verificatie van de code.
- Vervolgens wordt de Fan systematiek doorlopen om de relaties opnieuw af te leiden op basis van de Noordland proeven. Deze stap geeft een alternatieve kalibratie weer van de methode.

De voorliggende memo geeft een samenvatting van de resultaten van deze stappen. Meer informatie is beschikbaar in de rapportage van Gijs Arts, die veel van het werk tijdens zijn afstudeer internship vanuit de TU/e heeft verricht (Arts, 2021).

Op 9 december 2021 werd een evaluatie workshop gehouden om de resultaten van de verificatie van de SSF-code te presenteren aan experts en om feedback te vragen voor de volgende stappen van de ontwikkeling van de SSF-code. De resultaten van deze evaluatie workshop zelf zijn niet opgenomen in deze memo

4 Beschrijving van de verificatie case – de “Noordland proeven”

De experimenten die hier gebruikt worden om de methode van Fan en de eerste SSF-code te verifiëren zijn de “Noordland proeven” (Waterloopkundig Laboratorium, 1973). Deze proeven zijn in de jaren 70 uitgevoerd door het Waterloopkundig Laboratorium (nu Deltares) als fundamentele proeven ter voorbereiding van de bouw van een spuisluis – “de Noordlandsluis” – die bedoeld was om het meer achter de Oosterschelddedam zoet te maken. Echter de Oosterschelde is uiteindelijk nooit volledig afgesloten door de bouw van de Oosterscheldekering, en is dus zout gebleven.

Deze proeven zijn geschikt om een verificatie mogelijk te maken van de eerste versie van de SSF-code op basis van de methode van Fan om twee redenen:

- De proeven zijn dusdanig fundamenteel opgezet dat zij een goed voorbeeld kunnen zijn voor een brede range aan toepassing. Ze zijn ook mede basis geweest van de hydraulische vormgeving van het zoutscherp ter behoeve van selectieve onttrekking bij de Nieuwe Zeesluis IJmuiden; en,
- De proeven zijn niet gebruikt in het ontwikkelen van de methode van Fan. Ze bieden dus een onafhankelijke check van de methode.

De methode van Fan voorspelt, voor een bepaald debiet, een bepaalde plaats van de spuiopening en een bepaald niveau van het grensvlak tussen zout en zoet, de concentratie van het onttrokken water, dus hoeveel zout wordt er meegevoerd met het debiet. In de Noordland proeven zijn deze parameters gemeten voor een zoutscherp met opening onderin het kanaal in een steady-state toestand.

De testopstelling van de Noordland proeven bevat twee reservoirs: een buiten reservoir, 6,00 m x 8,00 m, gevuld met zout water (links in figuur beneden) en 1,46 m diep, en een binnen reservoir, 3,00 m x 3,50 m en 1,04 m diep, waarin zoet water van boven werd toegevoegd. De reservoirs waren verbonden met een opening onder het binnen reservoir waardoor zoutwater langzaam naar het binnen reservoir kon stromen. Zo werd de menging beperkt en een scherp grensvlak gecreëerd om een gestratificeerd systeem na te bootsen.

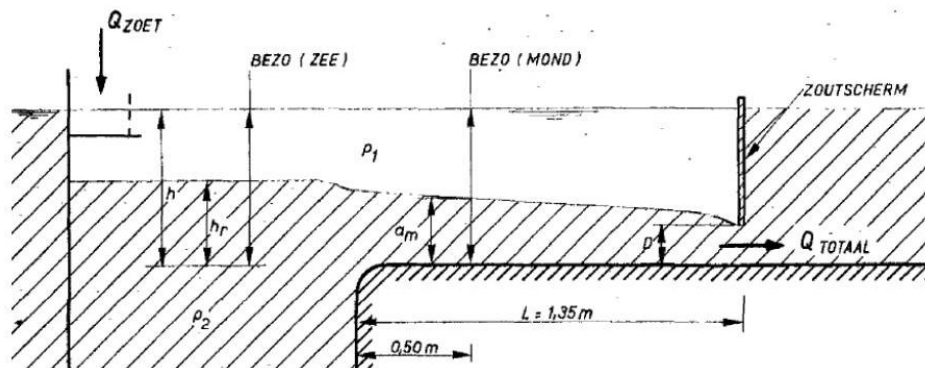
Het binnenreservoir bevat dus een zoete laag bovenop een zoute laag en werd verbonden met een 0,67 m breed kanaal waarin zich een zoutscherp bevond. De hoogte van de opening onder het zoutscherp, (aangegeven met D in Figuur 2), werd op twee verschillende waarden (3,1 cm en 6,1 cm) gezet tijdens de meetserie. Voor het scherm was het kanaal een open bak met vrije waterspiegel. Achter het scherm werd een gesloten buis aan een pomp aangesloten. Het totale debiet werd via een pomp door deze buis afgezogen.

De werkwijze van de testen was als volgt:

- Voor een vooraf gekozen verhouding van zoet en zout (0%, 10%, 20%, 30% en 50% zoet) werd water toegevoegd aan de twee reservoirs;
- Het uitstroom debiet werd gelijk gesteld aan het instromende debiet, waardoor een steady-state toestand zich ontwikkelde;
- Metingen van het niveau van de grensvlak werden gedaan op twee locaties met BEZO meetinstrumenten, BEZO(Zee) en BEZO(Mond).

Deze stappen werden herhaald met verschillende debieten (uitgedrukt als een Froudegetal in de resultaten, zie Figuur 3). Voor de verschillende series van experimenten (zie Tabel 1). Het Froudegetal wordt in dit geval gedefinieerd als:

Figuur 1 Bovenaanzicht en doorsnede van de experimentele setup voor de Noordland proeven.

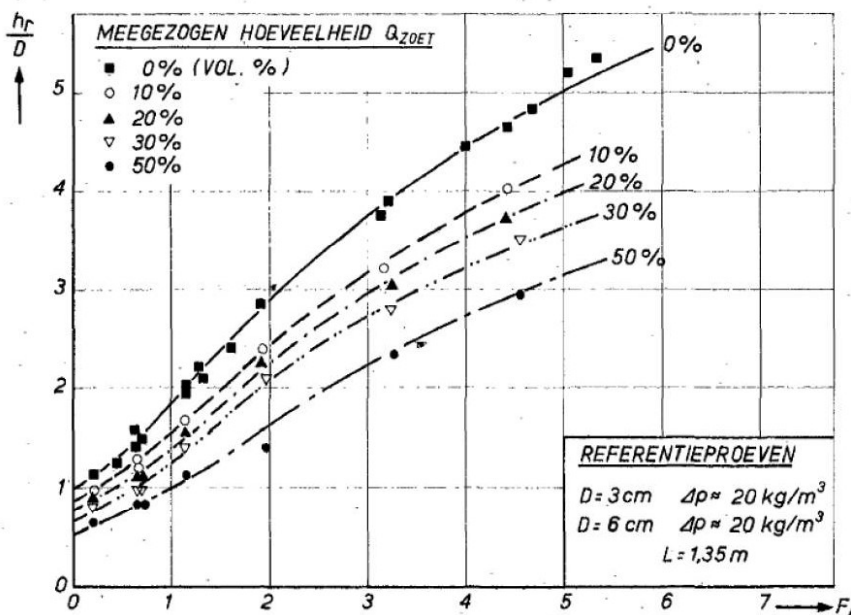


Figuur 2 Detail doorsnede van de locatie van de meting van de grensvlak.

Voor de verificatie in deze memo worden de referentieproeven, voor zowel $D=3,1$ cm en $6,1$ cm, met een dichtheidsverschil van 20 kg/m^3 gebruikt, namelijk metingen 1 t/m 47. In het werk van Arts (2021) wordt ook een bredere range van metingen bekeken. Figuur 3 geeft de gemeten resultaten weer van de proeven 1 t/m 47.

Hier worden deze resultaten kort toegelicht. In Figuur 3 zien wij het niveau van de grensvlak in het reservoir (h_r/D) uitgedrukt tegen het Froudegetal (F_i). Het Froudegetal is evenredig met het debiet. Voor de proeven met volledige selectieve onttrekking ($Q_{zoet} = 0$ of 0%) moet het grensvlak in het reservoir hoger ingesteld worden naarmate het debiet toeneemt (h_r/D is 2 bij F_i gelijk aan 1 maar h_r/D is 5 bij F_i gelijk aan 5). Dit komt omdat bij hogere debieten het water wordt onttrokken uit een steeds grotere (dikkere) laag in het reservoir. Om 0% zoetwater te onttrekken moet het grensvlak boven deze laag blijven en dus hoger komen te liggen als het debiet stijgt.

Anders bekeken, kunnen wij het niveau van de grensvlak gelijk houden (bijvoorbeeld op h_r/D is gelijk aan 3) en kijken wat er gebeurt als het debiet toeneemt. Bij een Froudegetal van F_i gelijk aan 2 (en lager) wordt er volledig selectief onttrokken maar bij een Froudegetal van 3 wordt er al 10% tot 20% zoetwater meegezogen en bij F_i gelijk aan 4.5 is het 50%.



Figuur 3 Voorbeeld resultaten van de eerste twee series van experimenten (1 t/m 47).

L [m]	D [cm]	$\Delta\rho$ (magnitude) [kg/m ³]	Remarks	Experiment no.
1.35	3.1	20	reference data	1-27
1.35	6.1	20	reference data	28-47
1.35	3.1	20	experiments without extraction construction	48-51
1.35	6.1	20	experiments without extraction construction	52-56
11.35	3.1	20	long approach channel	57-77
1.35	3.1	2	reference data	78-83
1.35	6.1	2	reference data	84-99
1.35	6.1	20	experiments with gravel bed	100-111
1.35	6.1	20	experiments with rounded screen	112-125
1.35	6.1	20	experiments with pillars	126-138
1.35	6.1	20	endurance experiments with sharp interface	139-148
1.35	6.1	20	endurance experiments with mixing layer	149-158
11.35	6.1	2	long approach channel	159-171
11.35	6.1	20	long approach channel	172-179

Tabel 1 Samenvatting van de verschillende series van metingen.

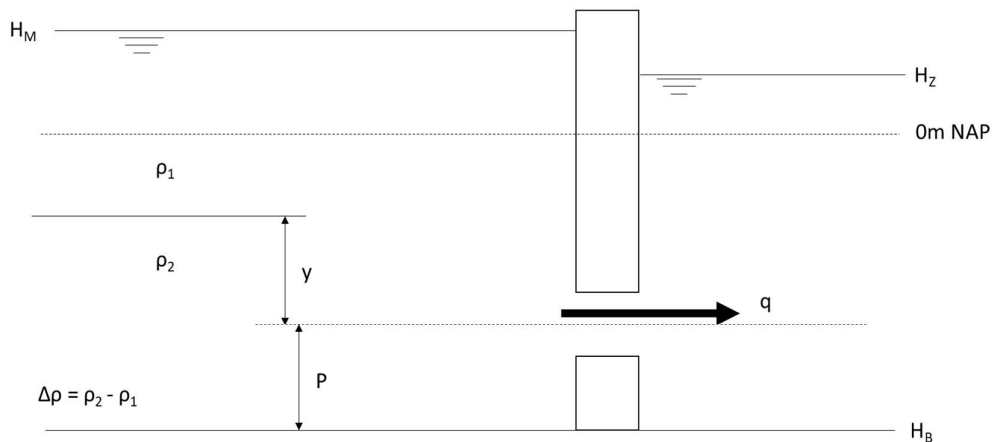
5 Beschrijving van de methode van Fan

De methode van Fan is een stapsgewijze methode om de concentratie van een uitstromend debiet uit een gestratificeerd reservoir te bepalen. Deze stapsgewijze methode is gebaseerd op empirische relaties die van laboratorium experimenten uit de literatuur afgeleid zijn. De Noordland proeven werden niet gebruikt voor het afleiden van deze empirische parameters. Voordeel van de methode is dat deze rekening houdt met een grote range aan mogelijke debieten en niveaus van de grensvlak. Zij is niet gelimiteerd tot openingen die laag in het waterkolom gelegen zijn. De methode is natuurlijk uitgebreid beschreven in de desbetreffende tijdschrift artikel van Fan (2008) maar ook goed samengevat in het rapport van Gijs Arts (2021), die in 2021 bij de TU/e en Deltares is afgestudeerd. Hier zal alleen een korte samenvatting van de belangrijkste punten uit dit rapport gegeven worden.

Het resultaat van de methode is een outflow concentratie ratio, c_o/c_2 , waarin c_o de gemiddelde zoutconcentratie van het uitstromend water is, en c_2 de zoutconcentratie van het zwaardere zoute water. Een hogere waarde betekent dus meer afgevoerd zout, een waarde van 0 geeft volledig onttrekking uit de zoetere laag en een waarde van 1 volledige onttrekking uit de zoutere laag.

De invoer van de methode bestaat uit de volgende parameters (ook in Figuur 4 grafisch weergegeven):

- q , het debiet per strekkende meter (voor een 2D outlet in de verticaal);
- y , de afstand tussen het middenlijn van de opening en de grensvlak tussen zout en zoet in verticale richting;
- $\Delta\rho$, het dichtheidsverschil dat gebruikt wordt om de gereduceerde zwaartekracht $g' = g/\Delta\rho$ te berekenen;
- K , één empirische coëfficiënt. Fan geeft een range van waardes voor K op basis van de geometrie van de uitlaat;
- P , de afstand van de middenlijn van de opening tot de bodem.

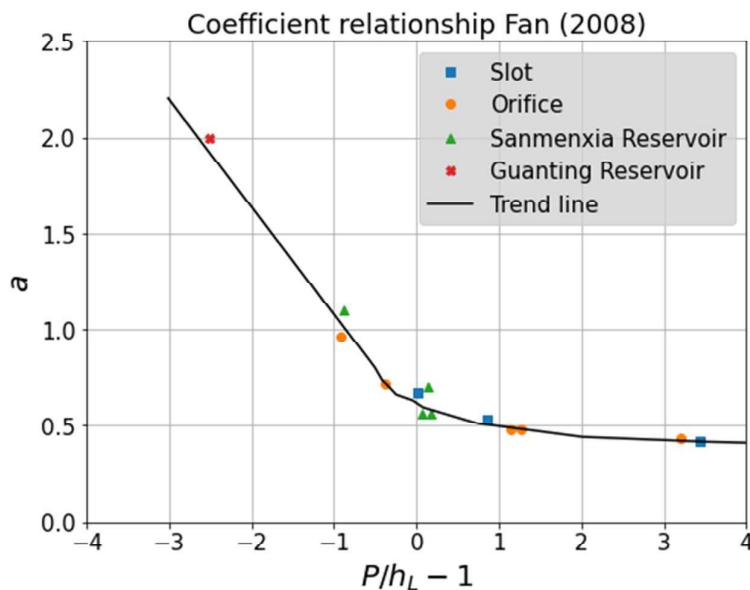


Figuur 4 Definitie schets van de parameters die nodig zijn voor de methode van Fan. Deze is een zijaanzicht van het onttrekken vanuit een meer met diepte H_M met gestratificeerd systeem van twee lagen met dichtheden ρ_1 en ρ_2 . De onttrekking is met een debiet van q per strekkende meter en van links naar rechts.

Deze invoerparameters worden vervolgens gebruikt om enkele andere parameters te berekenen, zoals:

- $G = g^{1/3} / q^{2/3}$
- $h_L = K/G$, de zogenaamd "limiting width of aspiration", de laagdikte waaruit onttrokken wordt
- a , een coëfficiënt voor het eventuele relatie tussen c_o/c_2 en Gy , bepaald via een grafiek
- b , een coëfficiënt voor het eventuele relatie tussen c_o/c_2 en Gy , bepaald als $1/2K$.

De waarde van a wordt afgelezen uit de volgende grafiek (Figuur 5).



Figuur 5 Relatie van coëfficiënt a met $P/h_L - 1$ uit Fan (2008).

De concentratie van het uitstromend debiet wordt vervolgens gegeven als:

$$\frac{c_o}{c_2} = a - bGy$$

Deze concentratie ratio kan vervolgens gebruikt worden om de dichtheid van het onttrokken water te berekenen. In de rapportage van het Kennis Programma van 2020 (Deltares, 2020) werd een voorbeeld hiervan uitgewerkt in de appendix (Appendix A van dat rapport). De link wordt verder toegelicht in de Appendix aan het eind van deze memo.

Opmerkingen

Voor het gebruik van deze methode voor ons doel ten behoeve van de SSF, het voorspellen van de zoutconcentratie van gespuid water bij een spuisluis, is het goed om alvast enige opmerkingen te plaatsen.

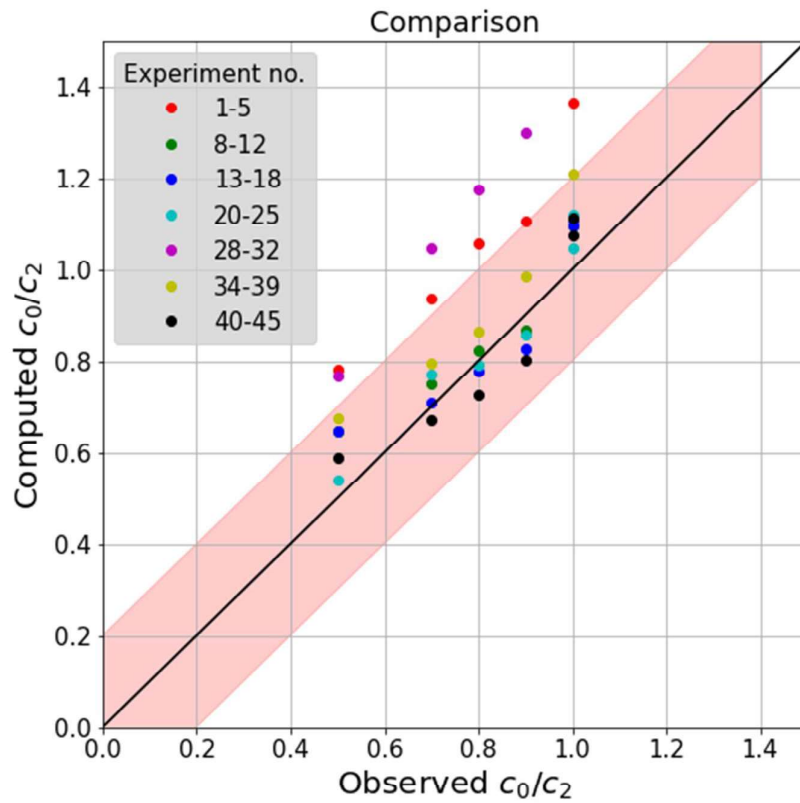
1. De methode is empirisch, d.w.z. er zijn geen fysische grenzen gesteld aan de methode. De best-fit lijn van de methode kan dus geëxtrapoleerd worden naar een niet fysische waarde bij debieten of andere parameters buiten de range die gebruikt is voor het afleiden. Een voorbeeld hiervan is dat er geen check in de methode zit om ervoor te zorgen dat de concentratie ratio niet boven de 1 komt, wat duidelijk niet fysisch is.
2. Voor openingen die dichtbij de bodem liggen, is er een extra behandeling in de methode nodig, om een coördinaattransformatie uit te voeren zodat de methode, die gebaseerd is op oneindig diepe reservoirs, in een consistente manier toegepast kan worden. Het rapport van Gijs Arts (2021) beschrijft deze transformatie en de resultaten hier beneden zijn inclusief die transformatie, waar deze transformatie door Fan wordt voorgeschreven.
3. De methode gaat ervan uit van oneindige diepte. Er is dus geen rekening gehouden met een opening die zich dichtbij het wateroppervlak bevindt. Het is mogelijk om hier mee rekening te houden door een coördinaat transformatie toe te passen zoals gebruikt wordt voor openingen dichtbij de bodem.
4. De resultaten zijn gebaseerd op steady-state experimenten. Tijdsafhankelijk gedrag van het opstarten van een debiet door de uitlaat is niet inbegrepen.

6 Vergelijking en verificatie

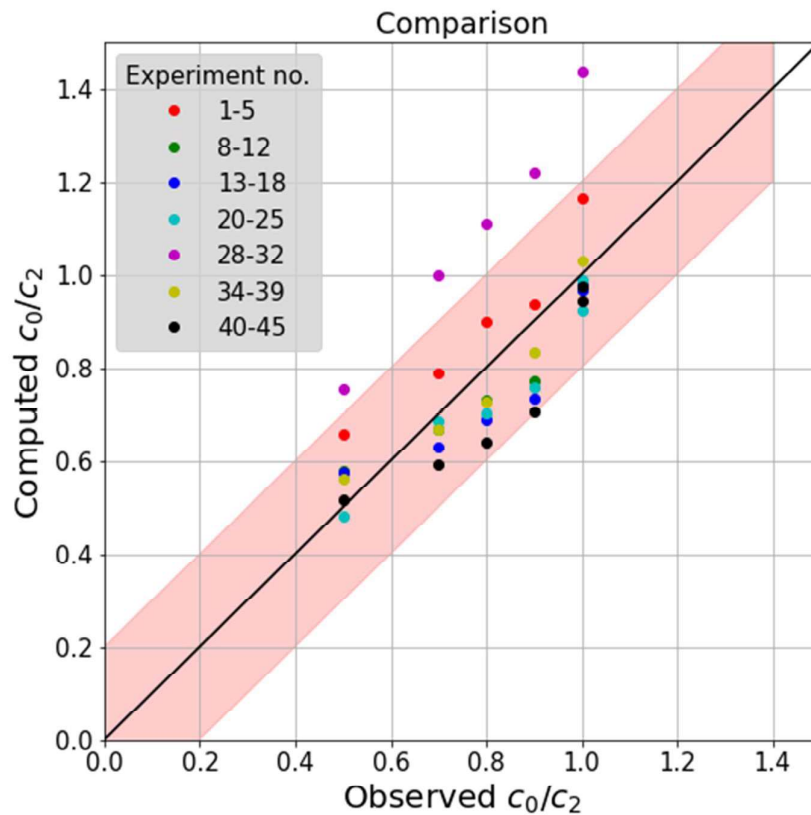
In deze sectie worden de resultaten van het toepassen van de methode van Fan op de Noordland proeven gepresenteerd en kort besproken.

De figuren beneden (Figuur 6 en Figuur 7) geven de resultaten van een vergelijking van de gemeten waardes en de waardes uitgerekend door de methode van Fan voor twee verschillende waardes van de coëfficiënt K (0,7 en 0,8 respectievelijk). Deze twee waardes geven de volledige range aan waardes die in het werk van Fan zijn aangegeven voor dit type opening.

Om Figuur 6 en Figuur 7 goed te lezen en interpreteren is er een diagonale lijn toegevoegd. Punten precies op die lijn geven een perfecte overeenkomst tussen gemeten waarde en model waarde aan. Het roze gebied geeft een 20% nauwkeurigheidsband aan. Bijna alle punten vallen binnen deze band. In deze figuren is ook goed te zien dat de methode soms waardes van de concentratie ratio van boven de 1 voorspeld. Voor een toepassing van deze methode in de praktijk zal het nodig zijn om een begrenzing van de modelwaardes toe te voegen.

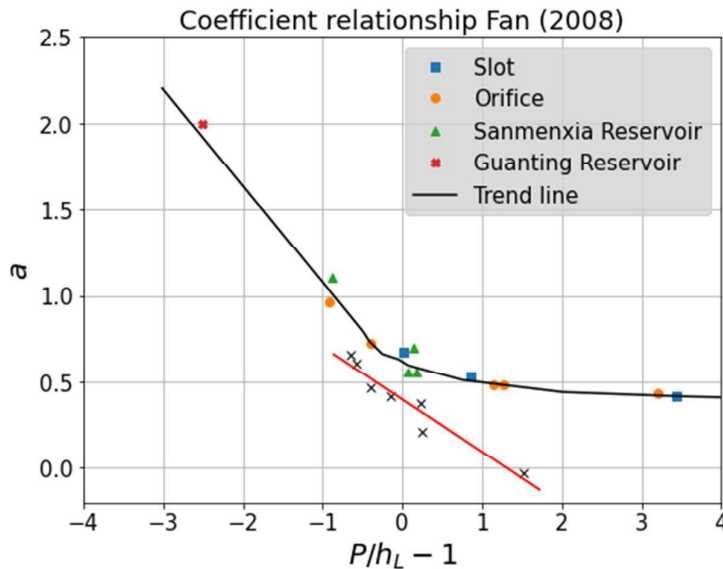


Figuur 6 Vergelijking van de metingen van Noordland met de Fan (2008) methode, $K=0.7$.



Figuur 7 Vergelijking van de metingen van Noordland met de Fan (2008) methode, $K=0.8$.

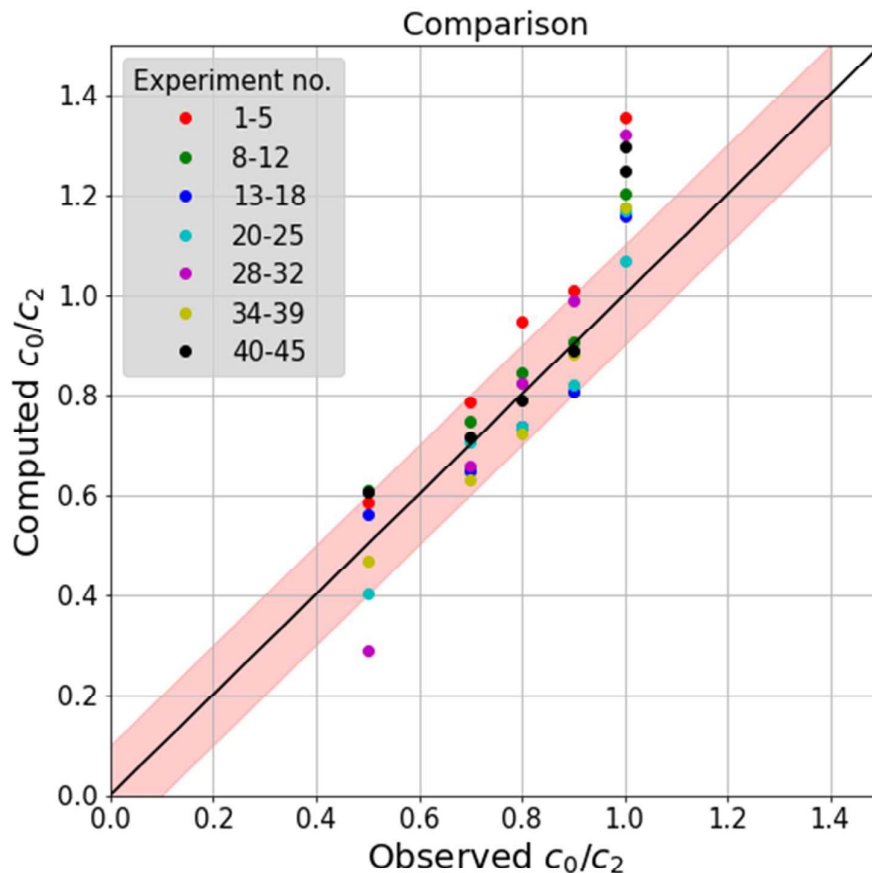
In het rapport van Gijs Arts wordt de volledige werkwijze van Fan uitgevoerd met gebruik van de resultaten van de proeven van Noordland. Dat houdt in dat de volledige afleiding van de empirische relaties opnieuw wordt gedaan met de Noordland meetresultaten als basis en als input. Dat is niet hetzelfde als het toepassen van de empirische relaties van Fan op de Noordland scenario's. Uit deze alternatieve afleiding komt als resultaat een nieuwe grafiek voor het aflezen van de coëfficiënt a (zie Figuur 8). De empirische relatie en methode van Fan wordt hierdoor getuned op de Noordland proeven. Als de methode van Fan vervolgens wordt toegepast in deze aangepaste vorm (met gekalibreerde a coëfficiënten) dan wordt de uitstroomconcentratie met een hogere nauwkeurigheid (altijd binnen 10%) voorspeld (zie Figuur 9).



Figuur 8 Relatie van coëfficiënt a met $P/h_L - 1$ uit Arts(2021) gebaseerd op de Noordland proeven.

Om Figuur 9 goed te lezen en interpreteren is er een diagonale lijn toegevoegd. Punten precies op die lijn geven een perfecte overeenkomst tussen gemeten waarde en model waarde aan. Het roze gebied geeft een 10% nauwkeurigheidsband aan. Bijna alle punten vallen binnen deze band. In deze Figuur is ook goed te zien dat de methode soms waarden van de concentratie ratio van boven de 1 voorspeld. Voor een toepassing van deze methode in de praktijk zal het nodig zijn om alle deze waarden op 1 te zetten.

In de praktijk zijn er niet altijd meetgegevens beschikbaar om de methode te kalibreren. Een eerlijke vergelijking tussen de Noordland proeven en de methode van Fan zal er dan van moeten uitgaan dat er geen extra informatie beschikbaar is en vervolgens de a coëfficiënten van Fan gebruiken uit Figuur 5, zoals hierboven gedaan is voor Figuur 6 en Figuur 7. Tevens is de range van condities ($P/h_L - 1$) en dus de toepasbaarheid veel groter uit de Fan grafiek (P/h_L tussen -3 en 3 i.p.v. tussen -1 en 1.5).



Figuur 9 Vergelijking van de metingen van Noordland met de aangepaste Fan methode van Arts (2021).

7 Conclusies en aanbevelingen

In deze sectie worden er enkele conclusies uit dit werk getrokken die betrekking hebben op het eventuele toepassing van de methode van Fan voor de spuisluisformulering. De conclusies van deze verificatie exercitie kunnen als volgt samengevat worden:

- De methode van Fan is een eenvoudig te implementeren en nauwkeurig (meestal binnen 20%) model voor het voorspellen van uitstroomconcentraties uit een gelaagd reservoir.
- De nauwkeurigheid kan misschien vergroot worden (tot een maximale error van ongeveer 10%) door de coëfficiënten te kalibreren tegen veldmetingen, schaalmodelmetingen of CFD berekeningen van de specifieke constructie.
- Het nodig is om de modelwaardes te begrenzen zodat een concentratieratio > 1 niet als uitkomst gegenereerd kan worden. Hiervoor dient een (praktische) oplossing te worden gezocht.

De volgende aanbevelingen zijn gegeven op dit moment bij het afronden van de verificatie van deze methode met betrekking tot de spuisluisformulering:

- Aanbevolen wordt om de methode van Fan te gebruiken in een spuisluisformulering waarin het selectief onttrekken dichtbij de spuisluis niet expliciet opgelost wordt door het gebiedsmodel. Met de methode van Fan wordt dan het proces "Het onttrekken van zoutwater uit een zoet systeem tijdens het spuien" gemodelleerd.
- De prestatie van de methode in een tijdsafhankelijke scenario, in combinatie met een model voor het verspreiden van het zout en zoet een weerszijde van de spuisluis,

dient nader onderzocht te worden. Hiervoor zal aanvullend validatie materieel nodig zijn.

De vervolgstappen voor het ontwikkelen van de Spuisluisformulering wordt beschreven in de planvorming van het Kennis Programma 2022.

8 Referenties

Kerstma, J., Kolkman, P.A., Regeling, H.J., Venis, W.A., 1994. *Water Quality Control at Ship Locks: Prevention of Salt and Fresh Water Exchange*. Balkema, Rotterdam, 103 pp.

Fan, J., 2008, *Stratified flow through outlets*, Journal of Hydro-environmental Research, 2, 3-18

Arts, G., 2021, *Predicting salt concentration by selective withdrawal of salt water through a salt screen*, Internship report, Masters in Applied Physics, Technical University of Eindhoven.

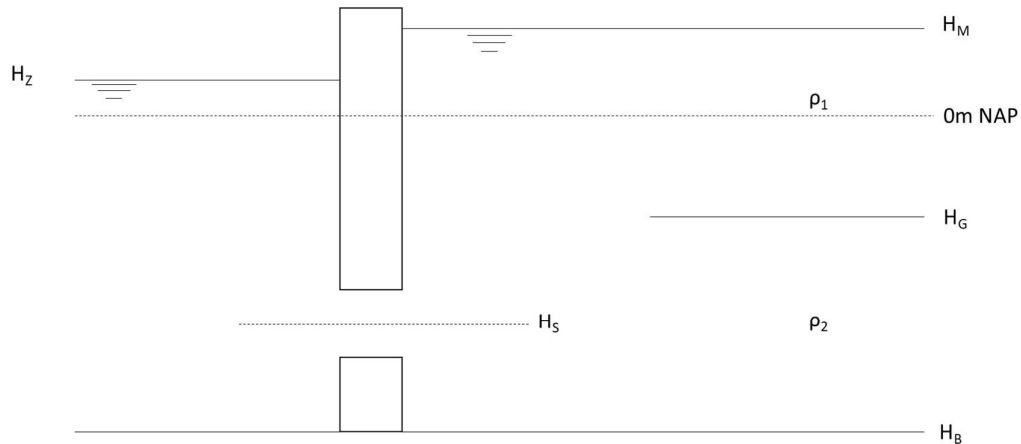
Waterloopkundig Laboratorium, 1973, *Stroomsluis Noordland in de Oosterschelde dam. Selectief afzuigen: twee-dimensionaal onderzoek, verslag modelonderzoek*, Technical Report: M1204

Deltares, 2020, *Rekenkundig concept spuisluisformulering – model voor zouttransport door spuisluizen*, Technical memo 11200741-099-HYE-0002

Jirka, G., 1979, *Supercritical withdrawal from two-layered fluid systems*, Journal of Hydraulic Research, 17:1, 43-51

A Appendix

In de eerdere rapportage van 2020 (Deltares, 2020) werd gebruik gemaakt van de volgende definitie schets om de formules van Fan uit te drukken met parameters die vanuit de praktijk komen (zoals waterstanden uitgedrukt in mNAP).



Figuur 10 Definitie schets voor een twee-laags systeem met waterstanden.

waarbij

H_Z is de waterstand aan de zeezijde [mNAP]

H_M is de waterstand aan de meerzijde [mNAP]

H_S is het niveau van de opening [mNAP]

H_G is het niveau van de grensvlak tussen de lagen van verschillende dichtheid [mNAP],
en ρ_1, ρ_2 zijn de dichtheden van de twee verschillende lagen [kg/m^3].

Met deze parameters en een waarde van coëfficiënt a van 0.5 zou de concentratie ratio uitkomen op.

$$\frac{c_0}{c_2} = \frac{1}{2} - \frac{g^{1/3}(H_S - H_G)}{2Kq^{2/3}} = \frac{1}{2} - bGy$$