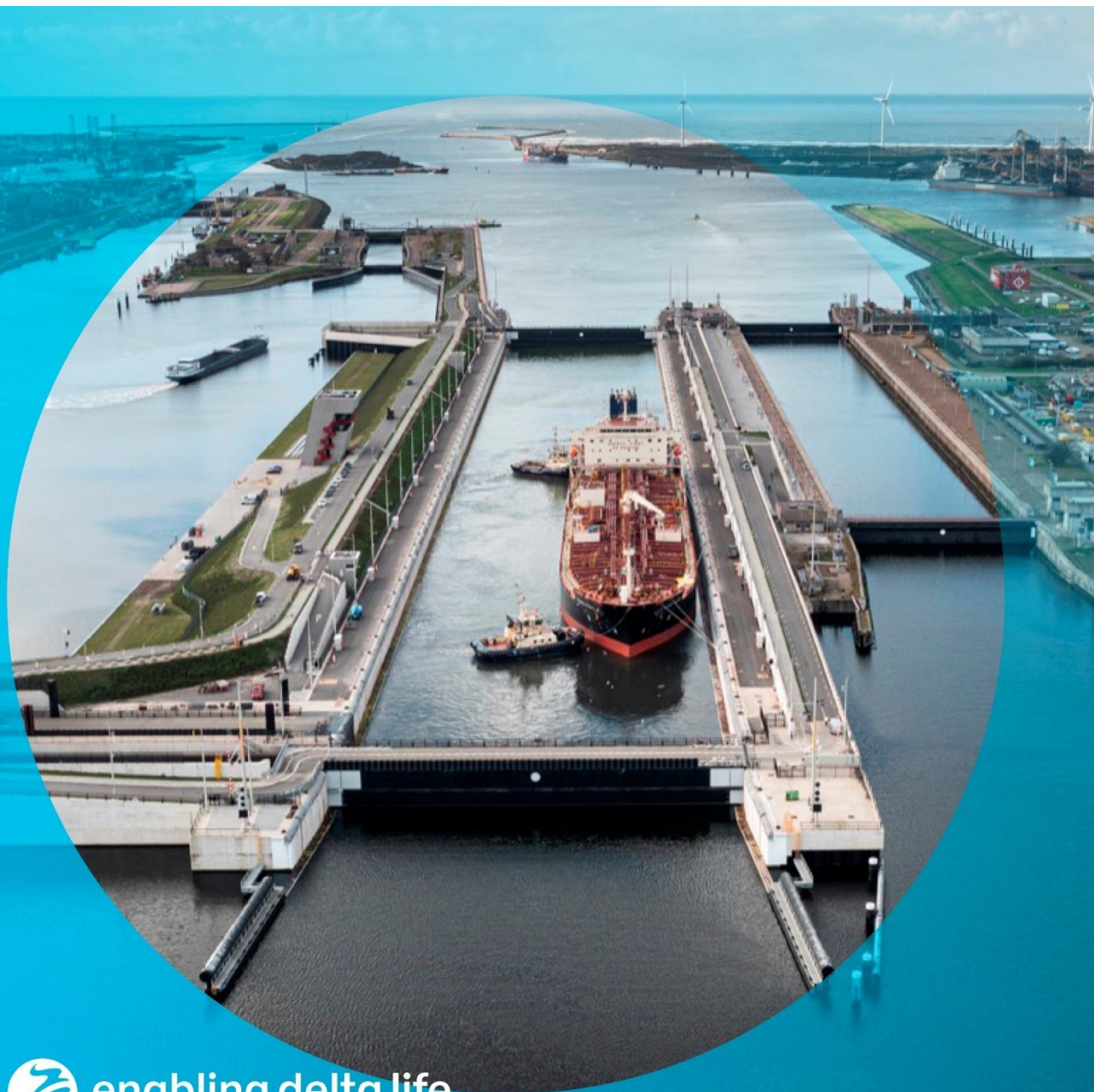


Validatierapport Zeesluisformulering

Validatie op basis van veldmetingen in Zeesluis IJmuiden en de Stevinssluis



Validatierapport Zeesluisformulering

Validatie op basis van veldmetingen in Zeesluis IJmuiden en de Stevinsluis

Auteur(s)

Nino Zuidewijk

Sam Majvis

Tom O'Mahoney

Validatierapport Zeesluisformulering

Validatie op basis van veldmetingen in Zeesluis IJmuiden en de Stevinsluis

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Inge van Tongeren Jan-Willem van Lente
Referenties	SITO-PS WBB02
Trefwoorden	zeesluisformulering, zoutindringing, zout, zeesluis, Zeesluis IJmuiden, Stevinsluis, validatie

Documentgegevens

Versie	1.1
Datum	11-12-2025
Projectnummer	11211542-003, 11211542-004
Document ID	11211542-003-ZKS-0001
Pagina's	50
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Nino Zuiderwijk	Sam Maijvis
	Tom O'Mahoney	

Samenvatting

De Zeesluisformulering (ZSF) is een stelsel van vergelijkingen dat kan worden gebruikt om de hoeveelheid zoutindringing door schutsluizen te berekenen. In het voorliggende rapport wordt de ZSF gevalideerd aan de hand van twee sets metingen: veldmetingen in Zeesluis IJmuiden (Deltares, 2023b) en in de Stevinsluis (Deltares, 2010).

De resultaten van de ZSF voor de meetcampagne in Zeesluis IJmuiden geven een goede schatting van het zouttransport met een afwijking van minder dan 5%. In de resultaten voor de Stevinsluis is sprake van een afwijking van 7 à 10%. Er is in beide gevallen sprake van een systematische onderschatting door de ZSF. Het grootste aandeel van zouttransport door deze zeesluizen is afkomstig van de kolkuitwisseling tijdens de deur-open fase. Tijdens de nivelleer fase is de afwijking tussen de ZSF en de metingen gemiddeld groter, maar heeft een beperkte invloed op de totale zoutindringing omdat het aandeel van het nivelleren in het totale zouttransport kleiner is. In situaties waarin nivelleren wel een groter aandeel verzorgt in de zoutbalans, zou dit kunnen leiden tot een grotere afwijking in de resultaten van de ZSF.

De meetcampagne in Zeesluis IJmuiden is alleen uitgevoerd voor een onbeschermd kolk (geen zoutlekbeperkende maatregelen). In de Stevinsluis is ook gemeten met bellenschermen en met een extra, hogere drempel. Bij het gebruik van bellenschermen is er geen sprake van een onderschatting (zoals bij een onbeschermd kolk), maar juist van een overschatting van het cumulatieve zouttransport. Dit wil zeggen dat de resultaten van berekeningen van situaties met bellenschermen over het algemeen conservatief zullen zijn: in werkelijkheid is de zoutlekreductie groter. Bij de toepassing van de extra drempel onderschat de ZSF het cumulatieve zouttransport ten opzichte van de metingen en deze onderschatting is net als bij de onbeschermd kolk kleiner dan 10%. Overigens, de grootte van de dataset is voor deze maatregel erg beperkt.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Leeswijzer	8
2	Beschikbare data en toepassing in de ZSF	9
2.1	Benodigde data	9
2.2	Zeesluis IJmuiden	10
2.2.1	Verwerking meetdata	10
2.2.2	Verwerking scheepvaartdata uit logboek en sluisdata	12
2.2.3	Ontbrekende data zoutgehaltes	13
2.2.4	Invoer ZSF	13
2.3	Stevinsluis	14
2.3.1	Verwerking meetdata	14
2.3.2	Verwerking scheepvaartdata uit IVS'90	18
2.3.3	Schematisatie Δ -luchtbellenschermen	19
2.3.4	Schematisatie verhoogde drempel	20
3	Resultaat	22
3.1	Definitie van de validatie parameters	22
3.2	Zeesluis IJmuiden	23
3.2.1	Vergelijking cumulatieve zouttransport	23
3.2.2	Vergelijking zouttransport per fase	24
3.3	Stevinsluis	25
3.3.1	Onbeschermde kolk (testnummer 2.1 in Tabel 2.1)	25
3.3.2	Δ -luchtbellenschermen (testnummer 2.2 in Tabel 2.1)	27
3.3.3	Verhoogde drempel (testnummer 2.3 in Tabel 2.1)	30
4	Discussie	32
4.1	Geschiktheid van de validatie data	32
4.1.1	Duur van de metingen	32
4.1.2	Resolutie van de metingen	32
4.1.3	Scheepvaartdata	32
4.1.4	Hoe representatief zijn de validatie sets?	33
4.2	Mogelijke tekortkomingen van de ZSF	35
4.2.1	Waternverplaatsing door scheepvaart	35
4.2.2	Andere tekortkomingen en wensen voor verdere ontwikkeling	35
4.3	Implicaties voor het toepassen van de ZSF	36
4.3.1	Gebruik fasegewijze ZSF zónder metingen	36
4.3.2	Gebruik cyclusgemiddelde ZSF	37
5	Conclusies	38
5.1	Zeesluis IJmuiden	38

5.2	Stevinsluis	38
5.3	Algemene conclusies	39
Referenties		41
A	Meetdata doorgerekende Stevinsluisproeven	42
A.1	Onbeschermdde kolk	42
A.2	Δ -luchtbellenschermen	45
A.3	Verhoogde drempel	48
B	Lange rinketschuif-opentijden Stevinsluis	49

1 Introductie

1.1 Achtergrond

De Zeesluisformulering (ZSF) is een stelsel van vergelijkingen dat kan worden gebruikt om de hoeveelheid zoutindringing door schutsluizen te berekenen (KpNK, 2019a). Dit kan met de ZSF door cyclusgemiddeld te rekenen of fasegewijs. Cyclusgemiddeld rekent over een tijdstap waarin een representatief schutpatroon mag worden aangenomen en kan worden ingezet als er geen informatie beschikbaar is over individuele schuttingen. Daarnaast kan er met de ZSF fasegewijs gerekend worden als er wél registraties beschikbaar zijn over individuele schuttingen. Een fasegewijze ZSF-berekening bevat meer detail dan cyclusgemiddeld en geeft daarmee een nauwkeurigere schatting van het zouttransport dan cyclusgemiddeld. De ZSF kan zowel voor huidige als voor toekomstige situaties worden toegepast, waarin bijvoorbeeld sprake is van zeespiegelstijging, de implementatie van maatregelen (waaronder bellenschermen) of de aanleg van een grotere schutkolk. Door de zeer korte rekentijd van de ZSF kan snel inzicht worden verkregen in de gevolgen van zeespiegelstijging, ontwerpkeuzes en zoutlekbeperkende maatregelen. De ZSF is ontwikkeld in het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (2017–2020) en is inmiddels onder andere toegepast in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (Deltares, 2025) en om randvoorwaarden te genereren voor 3D modellen (Deltares, 2023a). De ZSF is beschikbaar als Python pakket en kan door gebruikers aangeropen worden als [pyzsf](#). De documentatie is online beschikbaar via [ReadtheDocs](#) en de broncode is beschikbaar op [GitHub](#).

Equation Chapter 1 Section 1

De ZSF is bedoeld als een algemeen inzetbare tool en is ontwikkeld in een Open Source omgeving waardoor andere gebruikers transparantie hebben over de gebruikte formules. De voorgangers van de ZSF, het Zoutlekmiddel (Deltares, 2010) en WANDA-Locks (Deltares, 2016a), waren ontwikkeld om vragen uit specifieke projecten te beantwoorden. De ervaringen met deze eerdere tools zijn bij de ontwikkeling van de ZSF gebruikt om enkele vereenvoudigingen te maken in de benodigde invoer en in het stelsel van vergelijkingen om de rekentijd te verkorten en ook de onderhoudbaarheid te vergroten. De veldmetingen in de Stevinsluis (Deltares, 2011) zijn uitgevoerd ter ontwikkeling van het Zoutlekmiddel en zijn gebruikt voor de validatie van WANDA-Locks. De ZSF is in het verleden vergeleken met WANDA-Locks, maar niet direct met de validatiemetingen (Deltares, 2016a; KpNK, 2019c). In het voorliggende rapport wordt de ZSF, en daarmee dus de specifieke aannames in de ZSF, gevalideerd aan de hand van veldmetingen.

De validatiedata voor de ZSF in dit rapport zijn afkomstig van twee sets metingen:

- Veldmetingen in Zeesluis IJmuiden: uitgevoerd in 2023 om de troskrachten die schepen ondervinden tijdens het nivelleren en de kolkuitwisseling te analyseren (Deltares, 2023b).
- Veldmetingen in de Stevinsluis: uitgevoerd in 2010 om de effectiviteit van verschillende zoutlekbeperkende maatregelen in de praktijk te bepalen en ter validatie van het 'Zoutlekmiddel' (Deltares, 2011).

In dit rapport worden de veldmetingen die zijn uitgevoerd zonder zoutlekbeperkende maatregelen, zoals het geval bij de testen in Zeesluis IJmuiden, aangeduid als 'onbeschermd' situatie/kolk. Met de Stevinsluisproeven kan naast de 'onbeschermd' situatie ook de implementatie van zoutlekbeperkende maatregelen gevalideerd worden.

1.2 Leeswijzer

In dit rapport wordt eerst in Hoofdstuk 2 beschreven welke data nodig is om met de ZSF te rekenen, welke data beschikbaar is uit de meetcampagnes en hoe deze vervolgens zijn verwerkt tot invoerparameters. In Hoofdstuk 3 worden de resultaten van de validatie gepresenteerd. De resultaten worden verder besproken en geïnterpreteerd in de discussie in Hoofdstuk 4. Ten slotte worden de conclusies besproken in Hoofdstuk 5.

2 Beschikbare data en toepassing in de ZSF

Vanwege de verschillende doelstellingen van de twee meetcampagnes bestaan de beschikbare datasets niet uit exact hetzelfde type data. In Tabel 2.1 is weergegeven welke momenten zijn doorgerekend met de ZSF en zijn vergeleken met veldmetingen. Per berekening wordt benoemd welke meetdagen (of delen ervan) zijn doorgerekend, welke maatregelen zijn toegepast, en welke randvoorwaarden zijn opgelegd. Alle berekeningen zijn fasegewijs uitgevoerd aangezien data fasegewijs beschikbaar zijn. Om deze berekeningen te kunnen maken is ruwe data verwerkt naar ZSF invoer. De data en de verwerking hiervan is in dit hoofdstuk beschreven. Eerst is beschreven welke data benodigd is om de ZSF toe te passen (Paragraaf 2.1). Vervolgens wordt in Paragrafen 2.2 (Zeesluis IJmuiden) en 2.3 (Stevinsluis) beschreven welke data beschikbaar is uit de meetcampagnes en op welke manier deze data bewerkt is om deze geschikt te maken als invoer voor de ZSF.

Tabel 2.1: Overzicht van alle uitgevoerde berekeningen. Voor de Stevinsluisproeven zijn tijdsperiodes getoond waarin enkel de desbetreffende maatregel actief was.

Sluis	Test-nummer	Maatregel	Datum	Details
Zeesluis IJmuiden	1	Onbeschermd	20 februari – 20 maart 2023	<ul style="list-style-type: none"> Randvoorwaarden (zee/meer) opgelegde meetwaarden voor elke fase Zoutgehalte en waterstand in de kolk geïnitieerd o.b.v. metingen, daarna per fase bepaald door ZSF
			Scheepvaartdata uit logboek	
Stevinsluis	2.1	Onbeschermd	3 april 2010 (08:00 – 16:00)	<ul style="list-style-type: none"> Randvoorwaarden (zee/meer) opgelegd voor elke fase Zoutgehalte en waterstand in de kolk geïnitieerd o.b.v. metingen, daarna per fase bepaald door ZSF Scheepvaartdata uit IVS'90
			9 april 2010 (13:00 – 16:00 & 17:00 – 20:00)	
			15 april 2010 (08:00 – 10:00 & 14:00 – 20:00)	
	2.2	Δ-bellenschermen	7 april 2010 (13:00 – 14:00 & 15:00 – 16:00 & 17:00 – 18:00)	
			21 april 2010 (09:00 – 18:00)	
			5 mei 2010 (08:00 – 12:00)	
2.3	Extra drempel	20 mei 2010 (08:00 – 13:00)	<ul style="list-style-type: none"> Randvoorwaarden (zee/meer) opgelegd voor elke fase Zoutgehalte en waterstand in de kolk geïnitieerd o.b.v. metingen, daarna per fase bepaald door ZSF 	
Scheepvaartdata uit IVS				

2.1 Benodigde data

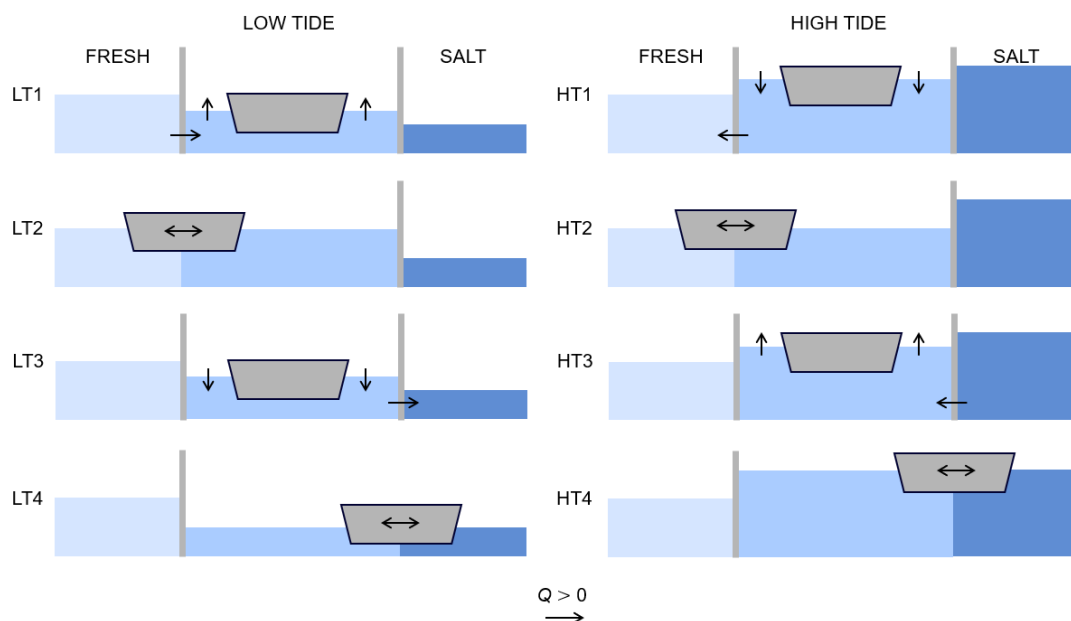
De ZSF heeft twee verschillende modules die het schutproces kunnen beschrijven. De eerste is een zogenaamde fasegewijze aanpak en de tweede is een cyclusgemiddelde aanpak. Dit validatie rapport kijkt in eerste instantie naar de fasegewijze aanpak. In de discussie van dit rapport worden ook de implicaties hiervan voor het toepassen van de cyclusgemiddelde aanpak toegelicht (zie Hoofdstuk 4, paragraaf 4.3.2). Er wordt een vergelijking gemaakt tussen de gemeten en berekende zoutvrachten per fase.

Equation Chapter (Next) Section 1

In de fasegewijze ZSF wordt een schutcyclus opgedeeld in vier fasen (zie Figuur 2.1):

1. Nivelleren naar de meerzijde;
2. Kolkuitwisseling naar de meerzijde en in- en uitvaren van schepen;
3. Nivelleren naar de zeezijde;
4. Kolkuitwisseling naar de zeezijde en in- en uitvaren van schepen.

De benodigde informatie om elk van deze fasen met de ZSF door te rekenen bestaat uit de kolkafmetingen (kolk lengte, -breedte en -diepte en drempelhoogte), randvoorwaarden (zoutgehaltes en waterstanden aan de meer- en zeezijde) en sluisoperatie (deur-opentijden, nivelleertijden, deplacement door scheepvaart). In het geval van zoutlekbepurende maatregelen, zoals bellenschermen, zijn aanvullende invoerparameters nodig, zoals de locatie en doorlaatfractie van het bellenscherm.



Figuur 2.1: Schematische weergave van de vier fasen van een schutcyclus bij laag- (links) en hoogtij (rechts).

2.2 Zeesluis IJmuiden

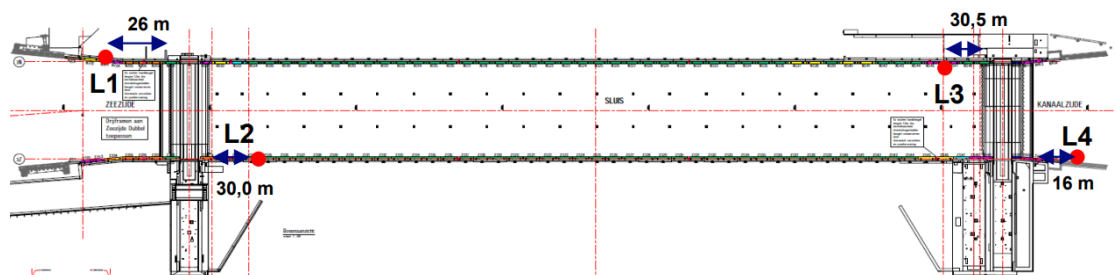
Van 20 februari tot 20 maart 2023 heeft Deltares dichtheidsmetingen uitgevoerd in Zeesluis IJmuiden (Deltares, 2023b). In die periode was de Noordersluis enige tijd gestremd voor onderhoud en is Zeesluis IJmuiden doorlopend ingezet. De doelstelling van deze metingen was het analyseren van de troskrachten die schepen ondervinden tijdens het nivelleren en de kolkuitwisseling. In dit rapport worden de metingen gebruikt om de ZSF te valideren. Hierbij wordt voortgebouwd op een eerdere analyse van de ZSF met metingen bij Zeesluis IJmuiden (De Ruiter, 2025). Tijdens de veldmetingen bij Zeesluis IJmuiden is de kolk onbeschermd geweest en zijn geen zoutlekbepurende maatregelen toegepast. Aanvullend wordt het toepassingsbereik van de ZSF getoetst door de ZSF met constante randvoorwaarde te draaien. In de ZSF berekeningen is een totale kolk lengte aangehouden van 545 m, een breedte van 70 meter en een bodem diepte van -18 m NAP. De sluisdeuren van Zeesluis IJmuiden sluiten tegen een drempel met een hoogte van 0.5 m.

2.2.1 Verwerking meetdata

Tijdens de veldmetingen is continue data gemonitord over geleidbaarheid en temperatuur in de sluis kolk evenals de waterstand per 15 seconden. Deze zijn vertaald naar chloridegehaltes door toepassing van de UNESCO-formulering (1981). Op twee locaties in de kolk zijn elk 5 CTD's (Conductivity Temperature Depth sensoren) geplaatst op verschillende vaste dieptes,

zie locaties L2 en L3 in Figuur 2.2 en Figuur 2.3. Met 2 meetpunten in de kolk is de resolutie beperkt. Lokale variaties in zoutgehalte in de kolk zijn niet nauwkeurig gemeten. Deze beperking in de meetnauwkeurigheid kan van invloed zijn op de vergelijking met de berekeningen met de ZSF. Hier wordt nader op ingegaan in de discussie (Hoofdstuk 4). Door de gemeten chloridegehalten om te zetten naar zoutgehalten (vermenigvuldiging met factor 1.80665) en deze te integreren over de diepte en lengte van de kolk wordt de zoutmassa in de kolk bepaald. Bij het integreren over de diepte wordt rekening gehouden met de onderlinge afstanden tussen de sensoren. Bij het integreren over de lengte is aangenomen dat de 2 verticale meetlijnen in de kolk elk de helft van de kolk representeren. Van de aldus bepaalde zoutmassa in de kolk wordt bijgehouden hoe deze verandert in de tijd. Hieruit volgt het transport van zout naar het Noordzeekanaal, ook wel zoutflux, die kan worden vergeleken met de uitvoer van de ZSF.

In de voorhavens aan de zee- en meerzijde worden dezelfde parameters gemeten: op elk sluishoofd op 1 locatie dicht bij de sluisdeur op dezelfde dieptes als in de kolk, zie locaties L1 en L4 in Figuur 2.2 en Figuur 2.3. Een overzicht van data uit de veldmeting is weergegeven in Tabel 2.2. Let op: de meetdata is hier weergegeven als chloridegehalte [kg/m³]. De ZSF maakt gebruik van het zoutgehalte [kg/m³], niet van chloridegehalten. De meetdata is daarom omgerekend van chloridegehalte [mg/L] naar zoutgehalte [kg/m³] middels de hierboven genoemde omrekenfactor. De waterstanden in de beide voorhavens worden niet overgenomen van de veldmetingen, maar van Waterinfo (Rijkswaterstaat, 2025) bij meetstations IJmuiden West (Zeezijde) en IJmuiden Oost (Kanaalzijde) (met een frequentie van 10 minuten) omdat in de data van de veldproeven enkele waarden ontbreken. De Waterinfo data is continu over de gehele meetperiode. Deze data van Waterinfo wordt lineair geïnterpoleerd naar een gelijke frequentie als die van de veldmetingen: 15 seconden. Aanvullend is er data bijgehouden over de stand van de sluisdeuren die twee standen kent: 0 (dicht) en 2 (open). Informatie over de stand van de nivelleerschuiven is niet beschikbaar. Een voorbeeld van de beschikbare data is voor een korte periode weergegeven in Figuur 2.4.



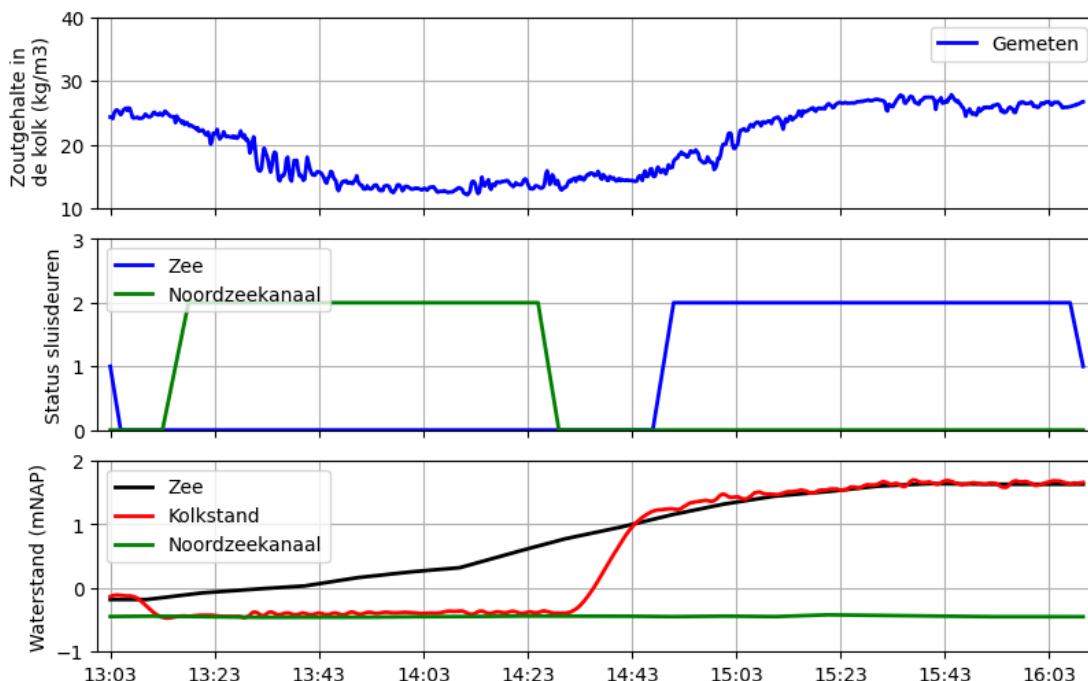
Figuur 2.2: Plaatsing van de vier meetlocaties (L1, L2, L3 en L4) t.o.v. de deurkas/deurnis (Deltares, 2023b).



Figuur 2.3: Sensorposities en naamgeving. In het figuur zijn de hoogtes van de sensoren weergegeven zoals is gehanteerd in de periode 20 februari – 15 maart. In de daarop volgende periode (15 – 20 maart) hingen de sensoren van meetlijn L1 0.32 m hoger dan aangegeven in het figuur (Deltares, 2023b).

Tabel 2.2: Overzicht data veldproefmetingen Zeesluis IJmuiden: Waterstand (WLlock,WLwest en WLeast), dichtheid (rho L1 t/m rho L4 en rho Lock), chloridegehalte (C L1 t/m C L4 en C Lock) en deurstand (Gate West en Gate East).

Time (UTC+1)	WLlock	WLwest	WLeast	rho L1	rho L2	rho L3	rho L4	rho Lock	C L1	C L2	C L3	C L4	C lock	Gate West	Gate East
[dd-mm-yyyy HH:MM:SS]	[mNAP]	[mNAP]	[mNAP]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[0=Closed,1=Open]	[0=Closed,1=Open]
20 February 2023	-0.4	0.1	-0.5	1018.8	1010.5	1012.9	1012.4	1011.7	13.6	7.6	9.3	9.0	8.5	0	2
20 February 2023	-0.4	0.1	-0.5	1018.8	1010.5	1012.9	1012.2	1011.7	13.6	7.6	9.3	8.8	8.4	0	2
20 February 2023	-0.4	0.1	-0.5	1018.8	1010.5	1012.9	1012.2	1011.7	13.6	7.6	9.3	8.8	8.4	0	2
20 February 2023	-0.4	0.1	-0.5	1018.8	1010.5	1013.5	1012.5	1012.0	13.6	7.6	9.7	9.0	8.7	0	2
20 February 2023	-0.4	0.1	-0.5	1018.8	1010.6	1013.6	1013.0	1012.1	13.6	7.6	9.8	9.4	8.7	0	2



Figuur 2.4: Voorbeeld van meetdata van de proeven bij Zeesluis IJmuiden: Het zoutgehalte in de kolk (boven), de status van de sluisdeuren: gesloten (0) of open (2) (midden), en de waterstanden in de kolk en aan de zee- en kanaalzijde van de sluis afkomstig van waterinfo (Rijkswaterstaat, 2025) (onder).

2.2.2 Verwerking scheepvaartdata uit logboek en sluisdata

Tijdens de veldmetingen bij Zeesluis IJmuiden is scheepvaartdata bijgehouden door studenten van de Hogere Zeevaartschool Amsterdam (HZA). Het logboek bevat de vaarrichting van elk schip en de in- en uitvaart tijden. Ook zijn de afmetingen van de meeste schepen genoteerd op aangegeven van de kapiteins. Ontbrekende data zijn aangevuld vanuit Marine Traffic. Tabel 2.3 geeft een overzicht van het scheepvaartlogboek. Deze data zijn verwerkt naar een scheepsvolume dat zich verplaatst in opwaartse (van zee naar kanaal) of neerwaartse (van kanaal naar zee) richting.

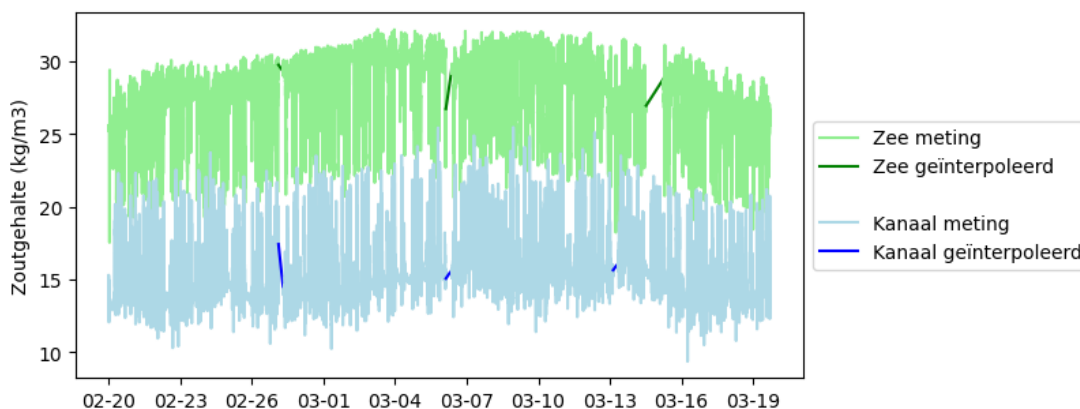
Tabel 2.3: Logboek van de scheepvaartdata door studenten van de Hogere Zeevaartschool Amsterdam (HZA).

Reisdatum	Ingaand / Uitgaand	Schuitnummer	Naast elkaar	Leeg Rond?	Sluis IN	Sluis UIT	dRho binnendeur (L-1)	dRho Buitendeur (L-1)	dRho Totaal (L-1)	Scheepsnaam	LOA	Shp Br	R Dpg	Haven entry	Haven Exit
21-2-2023	9	UIT			19:55	20:28			10,4	DEUN	100	15,6	45	Amsterda	Zee AIJ
21-2-2023	10	IN			21:06	21:38			9,6	BANGLAR AGRAJATRA	185	28,0	108	Zee AIJ	Amsterdam-IJm
21-2-2023	11	UIT		LR					7,1		0	0,0	0	Amsterdam-IJmond	
21-2-2023	12	IN			23:07	23:38			10,3	MIA DESGAGNES	135	23,5	78	Zee AIJ	Amsterdam-IJm
21-2-2023	12	IN			22:51	23:42			10,3	LACANAU	119	20,0	57	Zee AIJ	Amsterdam-IJm
22-2-2023	1	UIT			1:35	2:01			9,9	PINK STARS	249	43,8	132	Amsterda	Zee AIJ
22-2-2023	2	IN			3:16	3:39			10,2	GENUINE ACE	200	32,2	93	Zee AIJ	Amsterdam-IJm
22-2-2023	3	UIT			3:55	4:18			10,0	ASTINA	130	19,0	61	Amsterda	Zee AIJ
22-2-2023	4	IN			6:14	6:53			11,4	CLEAROCEAN MERIBEL	183	32,2	82	Zee AIJ	Amsterdam-IJm

2.2.3 Ontbrekende data zoutgehaltes

De ZSF rekent elke fase door met het zoutgehalte in de kolk aan het einde van de voorgaande fase. Als er geen voorgaande fase is, zoals bij de eerste fase uit de meetperiode, dan wordt de kolk geïnitieerd met een meting. Om de prestatie van de ZSF te valideren wordt een reeks met schuttingen doorgerekend waaruit een cumulatief zouttransport volgt. Hierbij wordt er naar gestreefd om de ZSF continu te kunnen draaien over een meetperiode, zonder onderbreking door missende data. Zo bevat elke fase (met uitzondering van de eerste) een berekend zoutgehalte in de sluis kolk.

De meetreeks bevat periodes waarin de zoutgehaltes aan de zee- en meerzijde niet zijn gemeten. Voor deze periodes wordt de reeks met zoutgehaltes aan de zee- en meerzijde aangevuld met waarden die zijn geïnterpoleerd tussen het laatste en eerstvolgende meetpunt, zie Figuur 2.5. De geïnterpoleerde waarden worden alleen gebruikt om de ZSF continue te kunnen draaien zodat de zoutmassa in de kolk steeds geüpdatet wordt. De periodes waarbij er missende meetdata zijn, worden echter niet gebruikt om een zoutvracht in die fasen te berekenen en worden dus niet meegenomen bij de vergelijkingen tussen meting en ZSF resultaten, zie Paragraaf 3.2.



Figuur 2.5: Weergave van interpolatie zoutgehaltes in periodes zonder metingen

2.2.4 Invoer ZSF

Alle verwerkte data van de meetperiode bij Zeesluis IJmuiden zijn vervolgens omgezet tot een invoerbestand voor de ZSF. De ZSF vraagt onder meer om waterstanden en zoutgehaltes per fase. Deze zijn voor zowel buiten als binnen de kolk gekozen op het laatste moment voordat de deur in beweging komt vóór aanvang van de kolkuitwisseling fase. Deze waarde is bepalend voor de kolkuitwisseling gedurende de hele deur-opentijd. Bij het nivelleren gelden de volgende waterstanden: in de kolk wordt de waterstand aangehouden van de zijde van het invaren op het moment dat de deur volledig gesloten was; buiten de kolk, aan de zijde waar wordt uitgevaren, geldt de waterstand van het moment dat de deur begint met openen. Het zoutgehalte aan beide zijdes is gekozen bij aanvang van de nivelleer fase (het moment dat de sluitende deur in beweging komt). Verstoring in het meetsignaal door menging afkomstig van scheepvaart en/of beweging van de deur wordt hiermee buiten de berekening gehouden. In Figuur 2.4 wordt genivelleerd in de periode $\pm 14:25 - 14:45$, de randvoorwaarde voor deze fase worden vast gesteld op de tijd $\pm 14:23$ (vlak voordat de groene lijn daalt van 2 naar 0).

Tijdens de fases 'Deur-open meer/zee' (routine 2 en 4) wordt ook de waterstand gekozen aan het begin van de fase als invoer voor de ZSF. De ZSF rekent de uitwisseling van zout vervolgens uit met deze waterstand over de hele fase en neemt daardoor eventuele variatie van de waterstand gedurende de fase niet mee. Daarmee blijft een (beperkt) deel van het transport van water en zout door de openstaande sluisdeuren in de ZSF buiten beschouwing.

Een overzicht van het invoer bestand van de ZSF op basis van alle data is weergegeven in Tabel 2.4.

Tabel 2.4: Uitsnede van het invoer bestand voor de ZSF uit de veldmetingen bij Zeesluis IJmuiden.

time	head_sea	head_lake	routine	salinity_lake	salinity_sea	ship_volume_lake_to_sea	ship_volume_sea_to_lake	t_level	t_open_lake	t_open_sea
20/02/2023 07:32	-0.54	-0.42	3	12.77	25.58	39229.76	0	1020	0	0
20/02/2023 07:49	0.1	-0.45	4	13.59	25.4	0	0	0	0	870
20/02/2023 08:04	-0.54	-0.43	3	12.99	28.91	0	0	12000	0	0
20/02/2023 11:24	-0.39	-0.42	4	13.05	25.36	0	0	0	0	5940
20/02/2023 13:03	-0.18	-0.44	1	13.21	25.84	0	31310.02	750	0	0
20/02/2023 13:15	-0.65	-0.41	2	13.5	23.07	35555.6	31310.02	0	4290	0

2.3 Stevinsluis

Van 31 maart tot en met 27 mei 2010 zijn veldmetingen uitgevoerd in de Stevinsluis te Den Oever (Deltares, 2011). Deze metingen zijn uitgevoerd ten behoeve van het ontwikkelen van zoutlekbeperkende maatregelen voor de Volkeraksluizen¹ en voor de ontwikkeling van het 'Zoutlekmiddel' (Deltares, 2011). Naast een 'onbeschermd' kolk zijn daarom ook vier verschillende zoutlekbeperkende maatregelen (en combinaties daarvan) toegepast:

- Twee varianten van (lucht)bellenschermen:
 - S-luchtbellenscherm: traditioneel, standaard aanwezig in beide sluishoofden;
 - Δ-luchtbellenscherm: innovatief, één in de kolk op 10 m van het sluishoofd aan de meerzijde, en één in de buitenvoorhaven op 10 m van het sluishoofd aan de zeezijde.
- Δ-waterscherm (in de buitenvoorhaven op 10 m van het sluishoofd aan de zeezijde);
- Extra drempel (1.18 m hoog, in de kolk op 10 m van het sluishoofd aan de meerzijde);
- Lekkende ebdeuren (spoeledebet door deels geopende rinketschuiven bij laagwater).

De invoer voor de validatieberekeningen is gemaakt op basis van de ruwe data van de Stevinsluisproeven. De vergelijking tussen de uitkomst van de ZSF en de Stevinsluisproeven is gemaakt op basis van de destijds berekende zoutmassa in de kolk (zie ook Paragraaf 2.3.1). Voor de huidige validatieberekeningen van de ZSF ligt de focus op de veldmetingen van een onbeschermd kolk, de Δ-luchtbellenschermen en de extra drempel. Er is gekozen om de maatregelen alleen individueel te valideren omdat bij combinaties moeilijker te achterhalen is welk proces voor eventuele afwijkingen zorgt. De berekeningen zijn uitgevoerd met kolk lengte 148.6 m en kolkbodem -4.7 m NAP. De kolk van de Stevinsluis heeft niet dezelfde breedte over de volledige diepte van de kolk (14.6 m bij de bodem, 14 m aan de waterlijn), en is daarom gemiddeld tot een kolkbreedte van 14.3 m. De sluisdeuren staan tegen drempels van 30 cm.

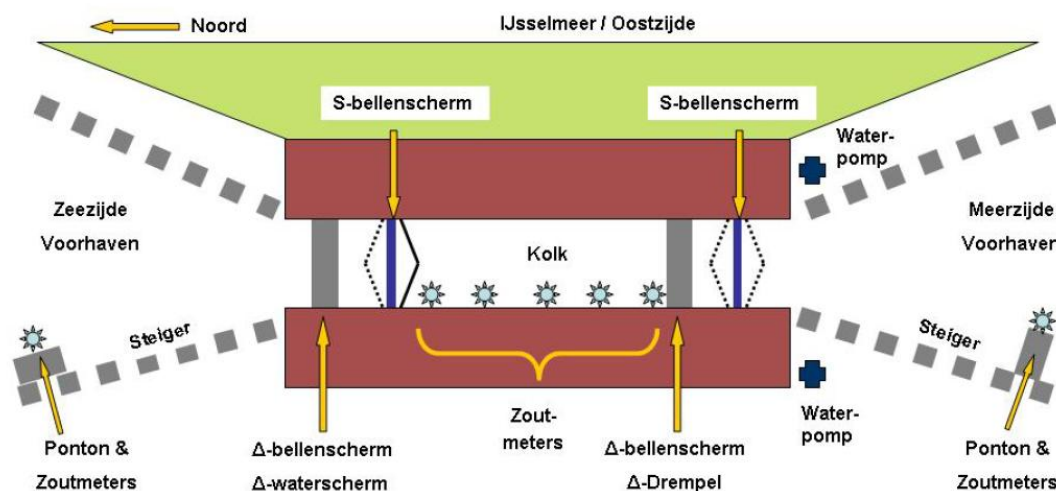
2.3.1 Verwerking meetdata

Tijdens de veldmetingen zijn metingen gedaan met een resolutie van 2 minuten waarin de geleidbaarheid en temperatuur zijn opgenomen in de Stevinsluis, de Binnenhaven en de

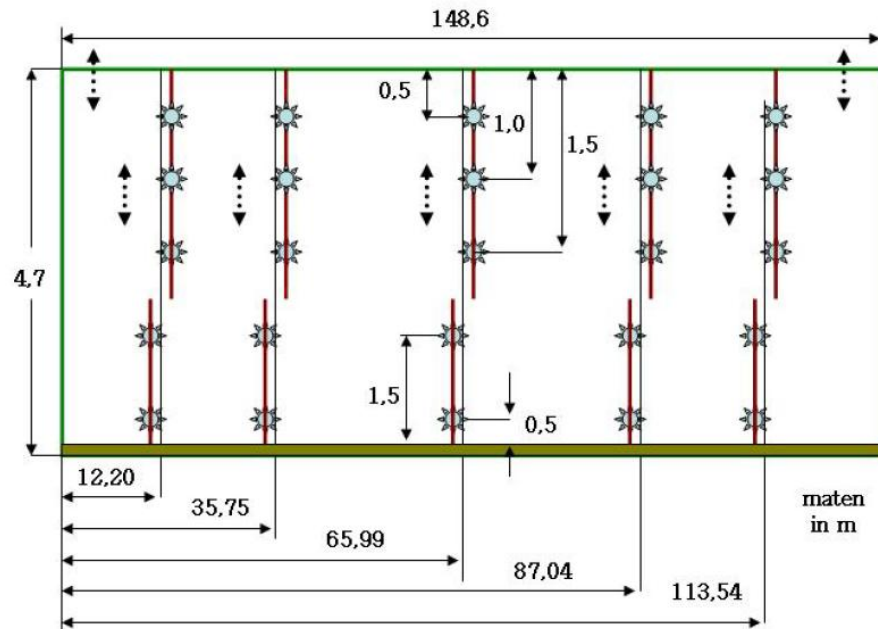
¹ De maatregelen zijn nooit doorgevoerd bij de Volkeraksluizen omdat is besloten om het Volkerak-Zoommeer als zoetwatermeer te behouden. Een vergelijkbaar systeem is onderzocht voor de Krammersluizen (O'Mahoney, De Jonge, Boeters, & Vreeken, 2023).

Voorhaven. Hieruit is vervolgens het zoutgehalte berekend met behulp van de UNESCO zeewaterformulering (UNESCO, 1981). De metingen zijn in de sluis kolk op vijf locaties (zie Figuur 2.6), en elk op vijf verticale posities (zie Figuur 2.7), gemeten. Doordat de bovenste drie rijen met sensoren drijvend zijn uitgevoerd, bewegen deze mee met de waterstand in de kolk. De onderste twee rijen hebben een vaste hoogte. Hierdoor liggen rij 3 en 4 bij laagwater in de kolk soms op dezelfde diepte. De zoutmassa in de kolk is bepaald door integratie over partiele kolkvolumina, waarin de meetwaarden van de CTD sensoren steeds representatief zijn voor het betreffende volume-element. Aan de hand van het verloop in de tijd en de status van de sluisdeuren en rinketschuiven kan vervolgens ook het zouttransport over de sluishoofden bepaald worden.

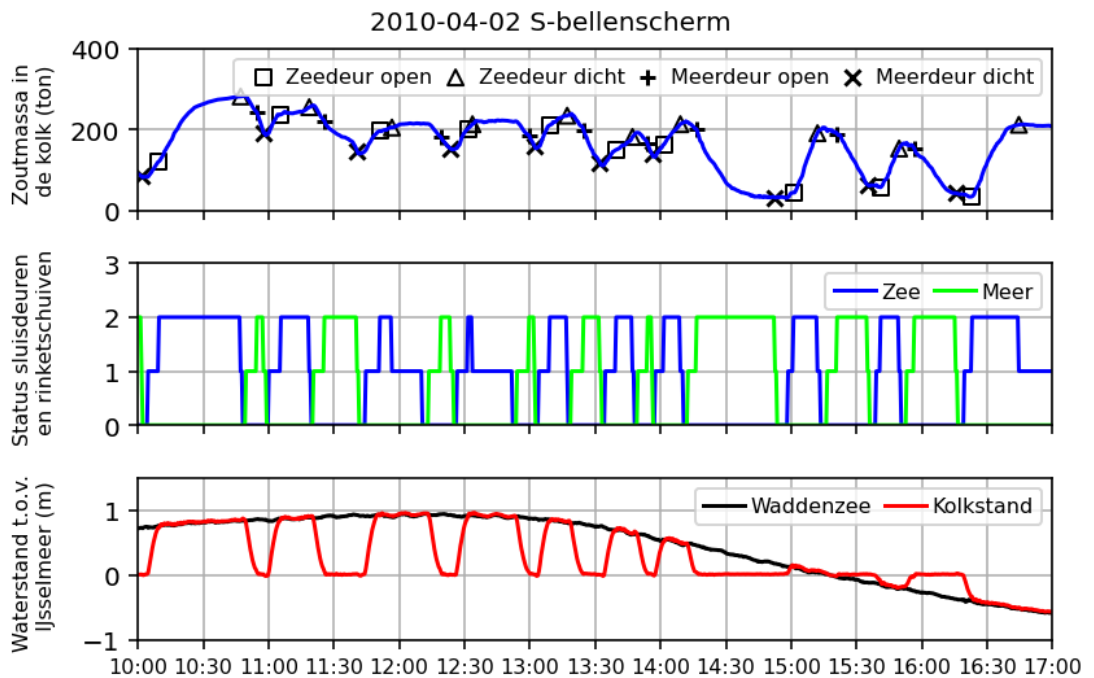
In de Voorhaven (Waddenzeezijde) en de Binnenhaven (IJsselmeerzijde) is op ieder één locatie gemeten, ook op vijf verticale posities. In de sluis kolk is gemeten op 5 posities (met elk 5 sensoren in het verticaal), wat meer resolutie biedt dan bij de veldmetingen in de Zeesluis IJmuiden (gemeten met 2 meetlijnen) en wordt verder toegelicht in Hoofdstuk 4.1.2. Waterstanden zijn gemeten in de sluis kolk en in beide havens. Verder zijn ook de stand van de sluisdeuren en rinketschuiven, de debieten van de water- en luchtbellenschermen, en de stand van de compressoren van het luchtbellenscherm vastgelegd. Een voorbeeld van de beschikbare data wordt weergegeven in Figuur 2.8.



Figuur 2.6: Schematisch overzicht van de locaties van de zoutlekbeperkende middelen en de meetpunten (in het figuur weergegeven met het symbool ✱) (Deltares, 2011).



Figuur 2.7: Zijaanzicht van de posities van de 25 sensoren (symbool ✱) in de kolk. De bovenste drie rijen zijn bevestigd aan drijvende boeien en de onderste twee rijen zijn bevestigd op een vaste hoogte (Deltares, 2011).



Figuur 2.8: Voorbeeld van de meetdata van de Stevinsluisproeven (zie ook Figuur 3.17 in Deltares (2011)): de zoutmassa in de kolk (boven), de status van de sluis: gesloten (0), rinketschuiven open (1) of sluisdeur open (2) (midden), en de waterstand in de Waddenzee en de kolk ten opzichte van het IJsselmeer (onder).

Aan de hand van de status van de sluisdeuren en rinketschuiven (middelste grafiek in Figuur 2.8) is afgeleid welke randvoorwaarden bij welke fase in de schutcyclus horen. Een uitsnede van een daaruit resulterend ZSF invoerbestand is weergegeven in Tabel 2.5. Omdat niet alle sensoren met hetzelfde tijdsinterval en/of op hetzelfde tijdstip hebben gemeten zijn de verschillende datareeksen (waterstanden, zoutgehalten, status van de deuren) aan elkaar gekoppeld via het dichtstbijzijnde tijdstip. De nummering van de routines komt overeen met de

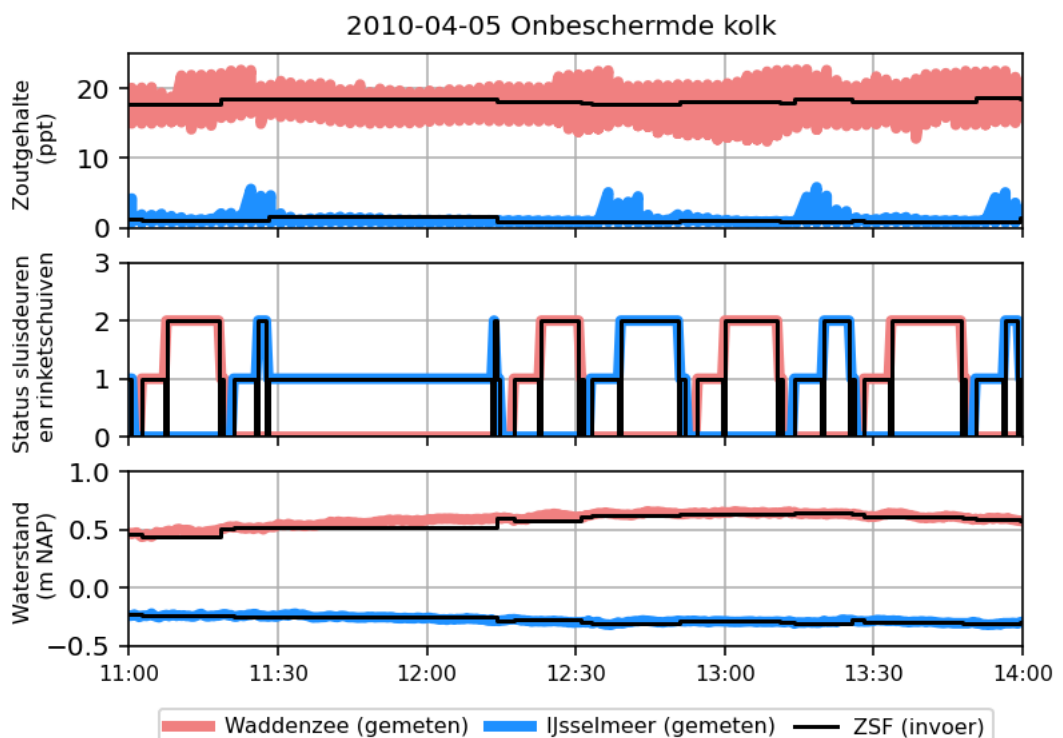
fasen van een schutcyclus zoals eerder weergegeven in Figuur 2.1. Wat opvalt in de data is dat de rinketschuiven (routine 1 of 3) vaak even kort openstaan nadat de sluisdeuren open zijn geweest (routine 2 of 4). De rinketschuiven blijven waarschijnlijk de gehele tijd open staan, vermoedelijk om de krachten op de deuren te verminderen tijdens de deurbeweging. In de data is ook zichtbaar dat op een aantal moment na het sluiten van de deur de rinketschuiven in die deur voor lange tijd open blijven staan. Dit wordt verder beschreven in Appendix B In de ZSF wordt dat opgevat als nivelleren bij een heel klein verval.

Tabel 2.5: Uitsnede van een invoerbestand voor de proeven met een onbeschermd kolk op 5 april 2010.

time	routine	head_sea	head_lake	salinity_sea	salinity_lake	t_open_sea	t_open_lake	t_level
5-4-2010 09:23	3	-0.09	-0.28	19.06	0.82			1260
5-4-2010 09:44	4	-0.09	-0.28	17.81	0.79	300		
5-4-2010 09:54	1	0.21	-0.25	17.93	0.79			209
5-4-2010 09:58	2	0.21	-0.25	18.17	1.38		90	

Figuur 2.9 geeft weer hoe de ZSF randvoorwaarden die zijn afgeleid uit de meetdata (zie Tabel 2.5), zich verhouden tot de originele meetdata. Dit geeft weer hoe de ZSF de ingevoerde randvoorwaarde vasthoudt gedurende de routine, terwijl de meetdata de werkelijke variatie in de tussentijd weergeeft.

Wat ook zichtbaar is in Figuur 2.9 is dat de schommelingen in het gemeten zoutgehalte op sommige momenten erg groot zijn. Voor het IJsselmeer (blauw) vinden er zoals verwacht pieken plaats op de momenten dat de nivelleerschuiwen en de deuren geopend zijn. Aan de Waddenzeezijde (rood) is ook nog sprake van getij, maar zijn de schommelingen een stuk groter en is geen duidelijke relatie met de schutbewegingen zichtbaar. Aan de geselecteerde randvoorwaarden (zwarte lijn) is wel te zien dat deze mooi in het midden van de schommelingen liggen en dat deze dus geen sterk effect hebben gehad op de toegepaste randvoorwaarden.



Figuur 2.9: Vergelijking tussen de meetdata van de Stevensluisproeven en de implementatie daarvan in de ZSF (in zwart): de zoutgehalten (boven), de status van de sluis: gesloten (0), rinketschuiven open (1) of sluisdeur open (2) (midden), en de waterstand in de Waddenzee en de kolk ten opzichte van het IJsselmeer (onder).

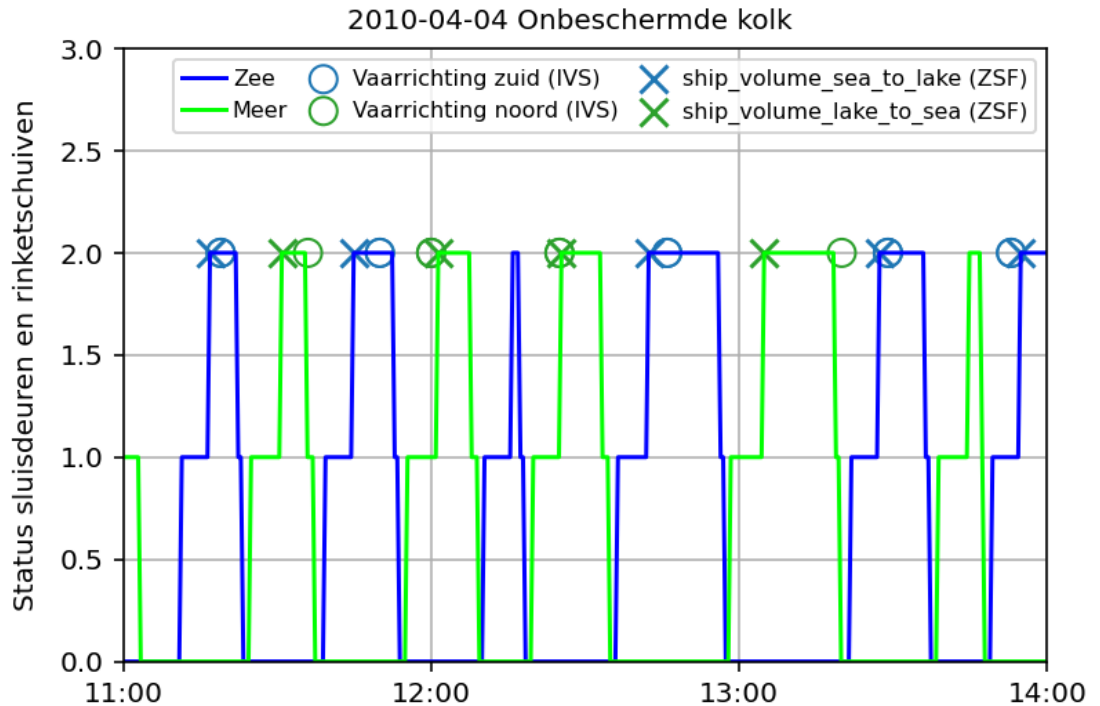
2.3.2 Verwerking scheepvaartdata uit IVS'90

Voor de Stevinsluisproeven is destijds ingeschat dat de scheepsbewegingen van een verwaarloosbaar kleine invloed zijn op het netto zouttransport. Er is toen geobserveerd dat alleen uitvarende schepen een merkbare verstoring van de zoutmassa in de kolk geven, maar deze verstoringen resulteerden niet in een significante verandering van de zoutmassa in de kolk aan het einde van de schutcyclus (Deltares, 2011). Voor de volledigheid van de validatiesommen is de scheepvaartdata wel opgevraagd uit het Informatie- en Volgstelsel voor de Scheepvaart (IVS) en ook toegepast in de berekeningen met de ZSF.

Voor de recreatievaart zijn geen lengtematen geregistreerd in IVS'90, maar die zijn wél nodig om de totale waterverplaatsing te berekenen als invoer voor de ZSF. Om die reden is de waterverplaatsing door recreatievaart bepaald op basis van de maximale afmetingen van een schip van de klasse 'Kleine vaartuigen en recreatievaart'² met lengte 38 m, breedte 5 m, diepgang 1.5 m en $C_B = 0.5$ (RIVM, 2017). Hierdoor zal de hoeveelheid waterverplaatsing door deze klasse soms overschat worden, en in sommige gevallen zal de overschatting groot zijn. Voor de beroepsvaart is gebruik gemaakt van $C_B = 0.8$ (Van Koningsveld, Verheij, Taneja, & de Vriend, 2023).

Een voorbeeld van de vertaling van IVS'90 data naar ZSF invoerparameters is weergegeven in Figuur 2.10. In de ZSF wordt het deplacement van het uitvarende schip altijd toegepast bij aanvang van de deur-openfase, en het deplacement van het invarende schip aan het einde. Daartussenin vindt de kolkuitwisseling plaats, waarbij de hele deur-opentijd wordt meegenomen (uit- en invaren gebeuren in de berekening 'instantaan'). Voor de schematisatie in de ZSF moet het scheepsvolume van het invarende schip bij aanvang van de fase worden opgegeven als invoer. Het deplacement van het uitvarende schip heeft de ZSF onthouden van de voorgaande fase. Daarom moeten de IVS'90 registraties, die op enig moment gedurende de deur-opentijd plaats kunnen vinden (O in Figuur 2.10), worden gekoppeld aan het begin van de fase (X in Figuur 2.10). Wanneer een scheepsbeweging net voor of net na een deur-openfase (zoals geregistreerd tijdens de Stevinsluisproeven) geregistreerd is in IVS'90, is aangenomen dat die registratie bij de dichtstbijzijnde schutcyclus hoorde. Een voorbeeld hiervan is zichtbaar rond 13:20 uur in Figuur 2.10, waar de IVS'90 registratie (O) net buiten de deur-openfase (lijn op status 2) valt, maar in de ZSF is geïmplementeerd bij aanvang van de fase (X). Er zijn in Figuur 2.10 ook schutcycli zichtbaar zonder IVS'90 registratie. Dit kan komen door een leeg-om schutting, of doordat een schutting met een ongeregistreerd schip plaatsvond. Om die laatste reden kan informatie over deplacement, wat in dat geval wel onderdeel is van het gemeten zouttransport, verloren gaan in de ZSF berekening.

² [Kleine vaartuigen en recreatievaart | CBS](#)



Figuur 2.10: Vertaling van IVS'90 data (O) naar ZSF randvoorwaarden (X) in de deur-openfase van de Stevinssluisproeven (lijn op status = 2).

2.3.3 Schematisatie Δ -luchtbellenschermen

Bellenschermen zorgen met behulp van compressoren voor een barrière van stijgende luchtbellen die een verticale waterbeweging teweeg brengen die de kolkuitwisseling en daarmee de uitwisseling van zoet- en zoutwater vertraagt. De Stevinssluis hebben standaard bellenschermen op de drempels ("S-luchtbellenschermen"), maar voor de Stevinssluisproeven heeft Deltares een nieuw, efficiënter bellenscherm ontworpen en getest in de Stevinssluis (" Δ -luchtbellenschermen") (Deltares, 2011). In de validatieberekeningen zijn alleen schuttingen met de Δ -luchtbellenschermen doorgerekend.

De Δ -luchtbellenschermen zijn geplaatst op twee frames, één in de buitenvoorhaven op 10 m van de sluisdeur aan de zeezijde en één in de kolk op 10 m van de sluisdeur aan de meerzijde (zie Figuur 2.11). De frames hebben dezelfde hoogte als de drempels in de sluishoofden (30 cm).



Figuur 2.11: Schematische weergave van de opstelling met Δ -luchtbellenschermen.

De ZSF bevat vier (optionele) invoerparameters om het effect van bellenschermen toe te passen. De afstand tussen het bellenscherm en de deur aan de zee- en meerzijde kan worden opgegeven door middel van `distance_door_bubble_screen_sea` en `distance_door_bubble_screen_lake`. Deze afstand kan zowel positief (buiten de kolk) als negatief (binnen de kolk) zijn. De doorlaatfractie, de factor η waarmee de loopsnelheid van de dichtheidsgolf wordt aangepast, kan worden gedefinieerd in `density_current_factor_sea` en

density_current_factor_lake. Deze doorlaatfractie wordt toegepast als reductiefactor op de kolkuitwisseling. De voorgangers van de ZSF, het Zoutlekmodel (Deltares, 2010) en WANDA-Locks (Deltares, 2016a), maakten gebruik van een stuksgewijs lineaire functie op basis van Shin et al. (2004) om de eerste twee fasen van de kolkuitwisseling te beschrijven (voor- en na de reflectie van de ingaande zoute of zoete tong tegen het gesloten eind van de sluisolk), aangevuld met een formulering voor het restant aan zoet- of zoutwater na deze twee fasen. In de ZSF wordt gebruik gemaakt van de tangens hyperbolicus die alle drie de fasen dekt,

$$V_U = V_L \tanh\left(\frac{\eta T_{\text{open}}}{T_{\text{LE}}}\right), \quad (2.2)$$

met V_U het uitgewisselde volume, V_L het kolkvolume, T_{open} de deur-opentijd en T_{LE} de 'theoretische' duur van de kolkuitwisseling, bepaald op basis van de initiële loopsnelheid van de dichtheidsgolf. De doorlaatfractie is tijdens de Stevinsluisproeven bepaald voor de verschillende (combinaties van) maatregelen. Voor de Δ -luchtbellenschermen is een doorlaatfractie gelijk aan $\eta = 0.25$ afgeleid (Keetels, Uittenboogaard, Cornelisse, Villars, & van Pagee, 2011)³.

2.3.4 Schematisatie verhoogde drempel

Sluisdeuren sluiten vaak tegen drempels aan en de hoogte daarvan kan bijdragen aan het beperken van de zoutindringing. De sluisdeuren van de Stevinsluis staan ieder tegen een 30 cm hoge drempel. De effectieve diepte in het sluishoofd is eigenlijk het deel boven de kruin van deze drempels en de diepte waarover de kolkuitwisseling plaatsvindt wordt daardoor gereduceerd. Bij de Stevinsluisproeven is destijds bepaald dat de effectieve uitwisselingshoogte afneemt met 80% van de hoogte van de drempel (Keetels, Uittenboogaard, Cornelisse, Villars, & van Pagee, 2011). Dit is ook als zodanig geschematiseerd in de ZSF: als plaatselijke verhoging ten opzichte van de kolkbodem, en daardoor afname van de effectieve uitwisselingshoogte, met 80% van de hoogte van de drempel. Dit beperkt de snelheid van de kolkuitwisseling. Het tweede gevolg van het plaatsen van een drempel is dat het totale kolkvolume dat uitgewisseld kan worden afneemt. Dit geldt alleen voor de transporten over het binnenhoofd (naar de meerzijde): het zout dat vast wordt gehouden achter de drempel doet niet mee in de uitwisseling.

Tijdens de Stevinsluisproeven is op ongeveer 10 m afstand van de sluisdeuren, ter hoogte van Δ -luchtbellenschermen, aan de IJsselmeerzijde een extra, hogere drempel (1.18 m) in de kolk geplaatst (zie Figuur 2.12). De metingen met de extra drempel vonden plaats tussen 20 en 26 mei 2010 en zijn met name in combinatie met de luchtbellen- en waterschermen uitgevoerd. Alleen van 20 mei is bekend dat beide luchtbellen- en waterschermen in de ochtend hebben uitgestaan, tussen 09:00 en 13:00.



Figuur 2.12: Schematische weergave van de opstelling met de extra drempel.

³ Voor de S-bellenschermen is een (hogere) doorlaatfractie van $\eta = 0.40$ afgeleid. In Keetels et al. (2011) worden de doorlaatfracties als één constante waarde gepresenteerd, maar hierbij dient opgemerkt te worden dat de reductie sterk afhankelijk is van het luchtdebiet en niet alleen van de toegepaste techniek.

De ZSF heeft twee (optionele) invoerparameters om het effect van drempels mee te nemen: `sill_height_sea`, de drempelhoogte aan de zeezijde, en `sill_height_lake`, de drempelhoogte aan de meerzijde. In tegenstelling tot de schematisatie van de bellenschermen (zie Paragraaf 2.3.3) kan er geen locatie worden gespecificeerd – de ZSF gaat ervan uit dat deze drempels zich ter plaatse van de sluishoofden bevinden. In de ZSF berekeningen bestaat de schematisatie van de verhoogde drempel daardoor alleen uit opgave van de hoogte van 1.18 m en is er geen rekening gehouden met de drempel van 0.30 m in het sluishoofd die daarnaast ook aanwezig was.

3 Resultaat

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van de validatie, waarin condities zijn doorgerekend (zie Tabel 2.1). In eerste instantie wordt beschreven hoe de vergelijking tussen metingen en berekeningen wordt gemaakt (in Paragraaf 3.1). Daarna worden de resultaten van de vergelijking gepresenteerd, voor Zeesluis IJmuiden in Paragraaf 3.2 en voor de Stevinsluis in Paragraaf 3.3.

3.1 Definitie van de validatie parameters

De ZSF geeft het zouttransport in [kg/s] per fase. De uitvoer is opgesplitst in vier debieten [m³/s] (naar en vanaf zee, en naar en vanaf meer) en de vier daarbij horende zoutgehaltes [kg/m³]. Deze gelden als gemiddelde debieten en zoutgehaltes gedurende de fasen. Een debiet vermenigvuldigd met een zoutgehalte geeft een zoutflux in [kg/s]. De som van alle zoutfluxen, rekening houdend met de richting, geeft dan het netto zouttransport in [kg/s], gemiddeld over de fase. Dit is de 'Quantity of Interest' (Oberkampf & Roy, 2013) voor de validatie van de ZSF. Uit de metingen wordt deze waarde bepaald door de zoutmassa in de kolk te berekenen aan het begin en aan het einde van elke fase en dan het verschil te bepalen.

Equation Chapter (Next) Section 1

De berekende zouttransporten worden op twee manieren gepresenteerd: als een zouttransport per fase (zoals hierboven geschreven); en, als een cumulatief zouttransport over een langere periode (één dag tot een paar weken). De nadruk van de validatie wordt gelegd op de zouttransporten over het binnenhoofd naar de meerzijde omdat deze de directe aanleiding zijn voor zoutindringing in het zoetwatersysteem.

De validatie vindt primair plaats op basis van het cumulatieve zouttransport over het binnenhoofd (naar de meerzijde) aan het einde van een reeks schuttingen. De beoordeling van de overeenkomst tussen de ZSF en de metingen wordt voor de cumulatieve transporten gemaakt op basis van de procentuele afwijking. De procentuele afwijking α die door de ZSF gemaakt wordt in de berekening van de cumulatieve getransporteerde zoutmassa M wordt steeds berekend als:

$$\alpha = \frac{M_{\text{ZSF}} - M_{\text{veldmeting}}}{M_{\text{veldmeting}}} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

wat wil zeggen dat $\alpha < 0$ wijst op onderschatting (minder zoutindringing meerzijde dan in meting) en $\alpha > 0$ op overschatting (meer zoutindringing meerzijde dan in meting) door de ZSF. De afwijking in de individuele fasen wordt beoordeeld op basis van de wortel van de kwadratisch gemiddelde afwijking (Root Mean Squared Error, RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_{\text{ZSF},i} - m_{\text{veldmeting},i})^2}, \quad (3.2)$$

met m de getransporteerde zoutmassa per fase, n het aantal datapunten, en de gemiddelde absolute afwijking (Mean Absolute Error, MAE):

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |m_{\text{ZSF},i} - m_{\text{veldmeting},i}|. \quad (3.3)$$

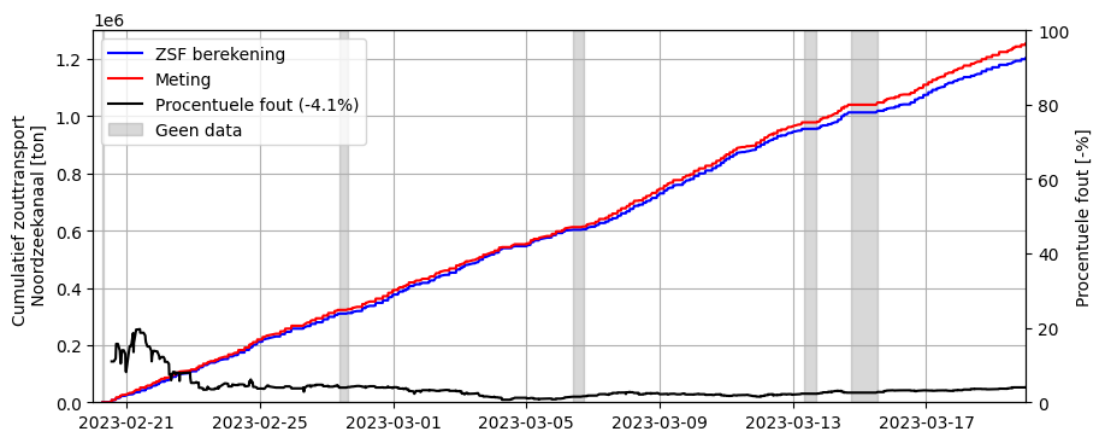
MAE geeft de gemiddelde afwijking, waarbij alle afwijkingen even zwaar meewegen. RMSE geeft, door het kwadrateren, meer gewicht aan uitschieters. Beide weergaven hebben de eenheid van het zouttransport en houden geen rekening met de richting van de afwijking (over- of onderschatting).

3.2 Zeesluis IJmuiden

3.2.1 Vergelijking cumulatieve zouttransport

In deze vergelijking wordt het zouttransport cumulatief uitgerekend over de gehele meetperiode (21 februari 2023 – 20 maart 2023), met uitzondering van de fases waarin het zoutgehalte aan de kanaal- of zeezijde is geïnterpoleerd (zie Paragraaf 2.2.3). Het zoutgehalte, en daarmee de totale zoutmassa in de kolk, wordt doorberekend en bijgehouden in de ZSF. Voor het initiële zoutgehalte in de kolk wordt de gemeten waarde op de eerste tijdstap opgelegd. Voor de periodes waarin geen zoutgehalten in de voorhavens aan de zee- en meerzijde beschikbaar was, is gekozen om de data te interpoleren (zie Paragraaf 2.2.3) zodat de ZSF ook in deze periodes continu kan draaien. Deze periodes zijn niet meegenomen in het cumulatieve zouttransport aangezien de zoutgehalten uit de interpolatie afwijkt van de zoutgehalten in de praktijk en er daarmee niet de benadering van de fysica in de ZSF getoetst kan worden. Het doorrekenen op basis van de geïnterpoleerde zoutgehalten geeft wel een betere schatting van het zoutgehalte in de kolk bij aanvang van de periodes waarin er weer meetdata beschikbaar is.

Het cumulatieve zouttransport en een procentuele afwijking (α) is weergegeven in Figuur 3.1. Ook zijn de periodes grijs gearceerd waarin geen zoutgehalten zijn gemeten, maar zijn geïnterpoleerd. Het berekende en gemeten zouttransport in deze periodes is niet meegenomen in het totaal cumulatief transport (te zien aan de horizontale lijnen in de grijze secties). De procentuele afwijking (zwarte lijn in Figuur 3.1) aan het begin van de simulatie laat een grotere afwijking zien (tot 20%) aangezien het aantal schuttingen waarover de procentuele afwijking wordt berekend nog klein is. Gedurende de meetreeks is er variatie in de procentuele afwijking die wordt gemaakt door de ZSF, maar deze is ten alle tijden negatief (het cumulatieve zouttransport berekend met de ZSF naar het meer is kleiner dan wat volgt uit de metingen). Aan het eind van de hele periode is de cumulatieve procentuele afwijking -4.1%. De ZSF geeft dus een kleine onderschatting van de totale zoutvracht in die periode en is goed in staat om de gemiddelde zoutvracht tijdens die periode te voorspellen.



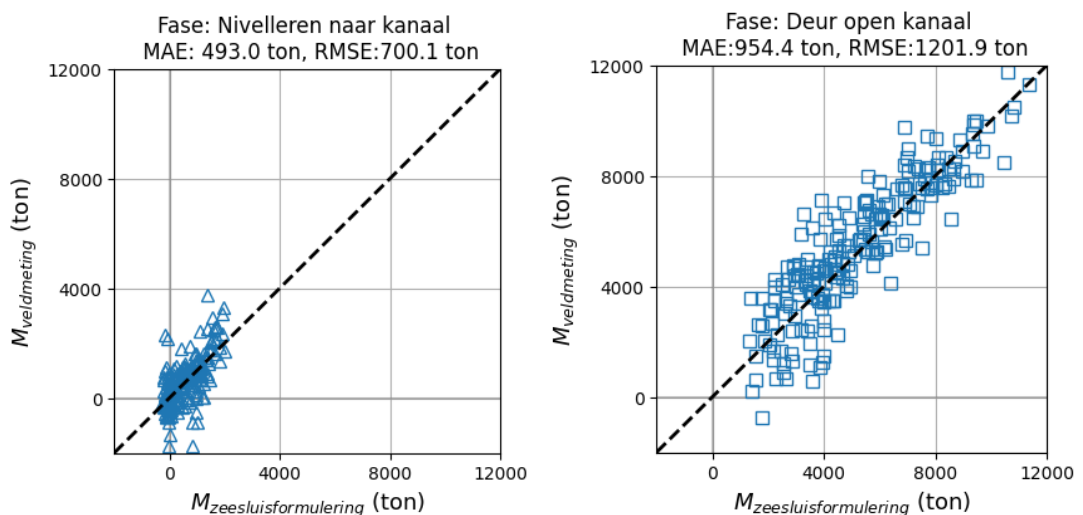
Figuur 3.1: Het totale zouttransport naar het Noordzeekanaal zoals berekend door de ZSF (blauwe lijn) en op basis van de veldmeting bij Zeesluis IJmuiden (rode lijn) over de periode 20 februari 2023 tot 19 maart 2023. Ook is de procentuele afwijking van de ZSF berekening weergegeven tegen de meting (zwarte lijn en rechteras). De periodes waarin geen data zijn gemonitord tijdens de metingen zijn grijs gemaakt.

3.2.2 Vergelijking zouttransport per fase

Het totale zouttransport over het binnenhoofd naar de meerzijde per fase zoals berekend door de ZSF en op basis van de meting is weergegeven in Figuur 3.2. Te zien is dat er relatief meer spreiding aanwezig is bij de nivelleer fase in verhouding tot de deur-open fase. Wanneer wordt ingezoomd op de nivelleer fase in Figuur 3.3, wordt dit verschil duidelijker. Hierin is te zien dat wanneer de ZSF geen zouttransport ($M_{\text{zeesluisformulering}} \approx 0$ ton) berekent, uit de veldmetingen bij enkele schuttingen een groot transport volgde. Een mogelijke reden voor dit verschil kan zijn dat de metingen met 2 verticale meetlijnen in de kolk beperkt is en het zoutgehalte in de kolk niet representatief is. Bij het nivelleren met een klein verval wordt dan namelijk wel een verandering in zoutgehalte gemeten door de meetlijn dicht bij de deur waarover genivelleerd wordt, maar deze waarde is dan niet representatief voor de helft van de kolk (dit wordt wél aangenomen in de verwerking van gemeten zoutgehalte naar zoutmassa in de kolk voor IJmuiden). Dit wordt verder uitgewerkt in Hoofdstuk 4.1.2.

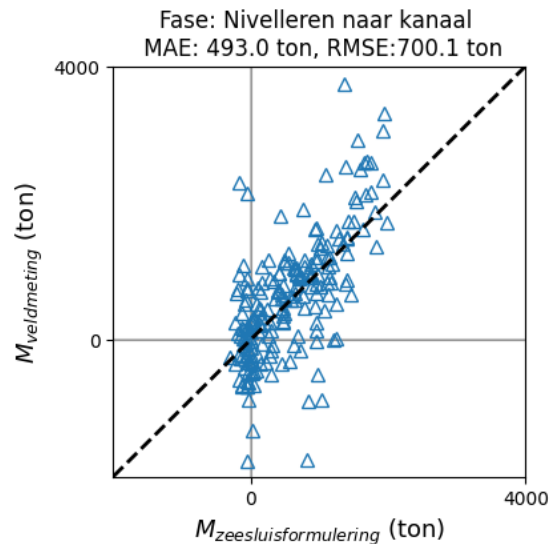
Bij de figuren zijn ook de MAE en RMSE gegeven per fase. De orde grootte van de afwijkingen voor uitwisseling is tussen 900 en 1200 ton, wat ongeveer 6% tot 9% is van een representatieve zoutmassa in de kolk bij het begin van de fase (14.000 ton – het volume van de kolk bij een kanaalpeil -0.4 m NAP vermenigvuldigd met een zoutconcentratie die een gemiddeld is van de concentraties aan weerszijde – namelijk 21.7 kg/m^3)⁴. De onder- en overschattingen vallen enigszins weg tegen elkaar waardoor aan het eind van de hele periode de cumulatieve afwijking kleiner is (-4.1%, zie Figuur 3.1).

Voor nivelleren is de orde grootte van de afwijking tussen 500 en 700 ton, of ongeveer 3.5 - 5% van het representatieve kolkvolume. Een representatieve zoutmassa in een schuttschijf is minder eenduidig te definiëren vanwege het getij. Gebruikmakend van dezelfde gemiddelde zoutconcentratie als hierboven (21.7 kg/m^3) en een representatief waterstandsverschil van 40 cm (verschil tussen gemiddeld zeeniveau (+0.0 m NAP) en het kanaalpeil (-0.4 m NAP)) zal een representatieve zoutmassa in een schuttschijf ongeveer 330 ton zijn. De afwijking van de ZSF is dan tussen 150% en 210%.



Figuur 3.2: Weergave zouttransport naar het Noordzeekanaal voor de fases: 1) Nivelleren naar kanaal (links), en 2) Deur open kanaalzijde (rechts).

⁴ Deze waarde is hoger dan tot nu toe gangbaar geacht. Mogelijk hangt dit samen met een relatief kleine afvoer over het kanaal in de periode tijdens en voorafgaand aan de metingen. Voor de kanaalzijde kan het ook een gevolg zijn van het uitvoeren van metingen op grotere diepten dan daarvoor gebruikelijk was: reguliere metingen gaan veel minder diep, en de dichtheidsprofielmetingen (Deltares, 2016b) gingen minder diep dan vóór de aanleg van Zeesluis IJmuiden omdat daarvoor de bodem ook verdiept is.



Figuur 3.3 Weergave zouttransport naar het Noordzeekanaal tijdens de fase: Nivelleren naar kanaal met aangepaste assen.

Samenvatting Zeesluis IJmuiden

De ZSF geeft voor deze meetperiode een goede schatting met een cumulatieve afwijking van minder dan 5%. Dit heeft er met name mee te maken dat de ZSF goed in staat is om het zouttransport naar de kanaalzijde te berekenen tijdens de deur-openfase. In de nivelleerfase is er een grotere afwijking van het zouttransport naar de kanaalzijde. Het effect hiervan op het cumulatieve zouttransport is echter beperkt doordat er tijdens het nivelleren een ordegruotte minder zout getransporteerd wordt dan tijdens de deur-openfase. Als nivelleren een groter aandeel verzorgt in het zouttransport, kan dit leiden tot een grotere afwijking in het ZSF resultaat. Daarbij dient opgemerkt te worden dat ook de veldmetingen (en de verwerking daarvan) een schematisatie van de werkelijkheid zijn en dus onnauwkeurigheden bevatten.

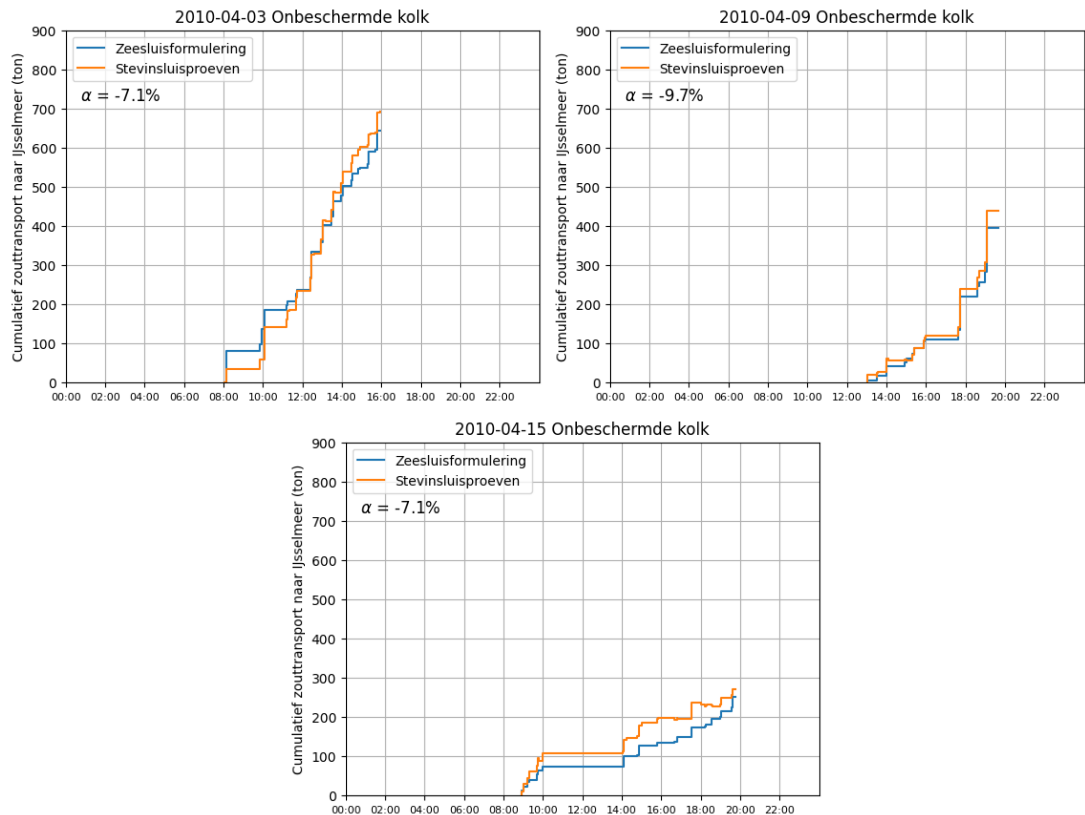
3.3 Stevinsluis

In de metingen op de Stevinsluis zijn verschillende maatregelen beschouwd. Daarom zijn er slechts kortere reeksen van schuttingen beschikbaar met dezelfde configuratie. Voor een onbeschermd kolk zijn er langere reeksen beschikbaar, en kan de ZSF gedraaid worden voor één hele dag. De meetdata van de Stevinsluisproeven bevatten geen meetdagen waarbij een hele dag getest is met één maatregel. Door de dag heen is er veel gevarieerd met verschillende maatregelen (zie Bijlage A) en daarom wordt in die gevallen de ZSF gedraaid voor enkele uren per desbetreffende dag, op momenten waarop zeker is dat er geen variatie was in de inzet van maatregelen. Er is gekozen om de maatregelen alleen individueel te valideren omdat bij combinaties moeilijker te achterhalen is welk proces voor eventuele afwijkingen zorgt.

3.3.1 Onbeschermd kolk (testnummer 2.1 in Tabel 2.1)

Voor de onbeschermd kolk van de Stevinsluis zijn drie meetdagen gedeeltelijk doorgerekend: 3, 9 en 15 april 2010 (voor de specifieke uren per dag, zie Bijlage A.1). Andere dagen in de meetserie hadden altijd een maatregel actief. Het resultaat voor cumulatieve zouttransport naar de meerzijde per dag wordt weergegeven in Figuur 3.4. Aan het einde van de dag bedraagt de afwijking tussen berekend en gemeten voor deze dagen respectievelijk $\alpha = -7.1\%$, -9.7% , en -7.1% . Dit laat zien dat de ZSF het gemeten zouttransport onderschat met een procentuele afwijking die ongeveer twee keer zo groot is als de resultaten van de metingen bij Zeesluis IJmuiden. Echter, bij de berekeningen voor IJmuiden is over een langere periode gedraaid, waardoor dagelijkse fluctuaties worden uitgemiddeld over een langere tijd. Ook bij IJmuiden is te zien dat op dag-niveau (zie begin van Figuur 3.1, daar waar de ZSF nog 'opstart') de procentuele afwijking ook groter is dan 4%. Dat de onderschatting van het totale zouttransport

groter is dan bij Zeesluis IJmuiden is mogelijk niet volledig te wijten aan de ZSF: ook de veldmetingen (en de verwerking daarvan) zijn een schematisatie van de werkelijkheid. Wat opvalt in Figuur 3.4 is dat het gemeten zouttransport van de kolk naar het meer soms negatief is (oranje lijn maakt een stap omlaag, bijvoorbeeld om 13:00 op 3 april 2010). Dit zou betekenen dat er zouter water de kolk instroomt vanaf de meerzijde. De oorzaak hiervan is onduidelijk en is mogelijk ook een onnauwkeurigheid in de metingen.

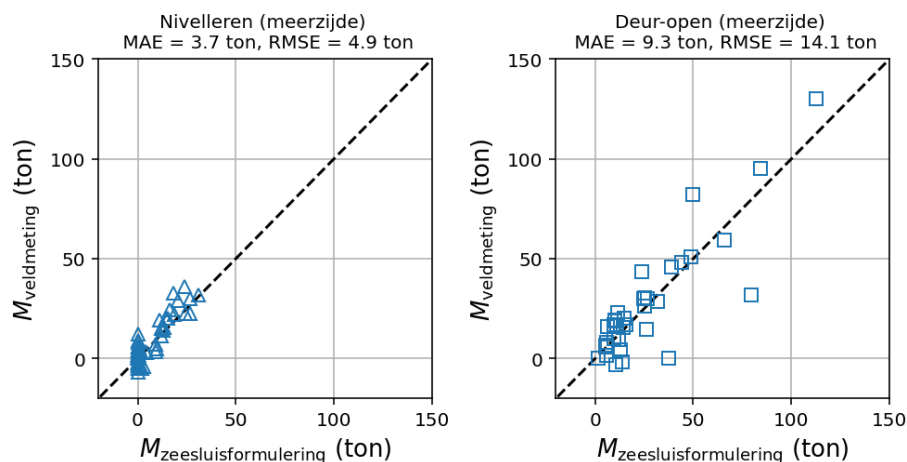


Figuur 3.4: Het gemeten (oranje) ten opzichte van het berekende (blauw) zouttransport voor een onbeschermd kolk op 3, 9 en 15 april 2010.

Voor de afwijkingen per fase (zie Figuur 3.5) lijkt de overeenkomst in de nivelleerfase beter te zijn dan bij Zeesluis IJmuiden. Omdat de resolutie van de metingen bij de Stevinsluizen hoger is (5 profielen in de lengte van de kolk) is het aannemelijk dat de onnauwkeurigheden in de metingen minder groot zullen zijn.

De waarden voor MAE en RMSE zijn weergegeven als absolute waarden. Om een vergelijking te maken met IJmuiden kan er weer gekeken worden naar de proportionele afwijking ten opzichte van een representatieve zoutmassa per fase. Gebruikmakend van dezelfde methode als in de vorige paragraaf zal een representatieve zoutmassa in de kolk bij uitwisselingen ongeveer 220 ton zijn. De afwijking bij de uitwisselingsfase is van ordegrrootte 9 tot 14 ton of 4 - 6% van de representatieve waarde.

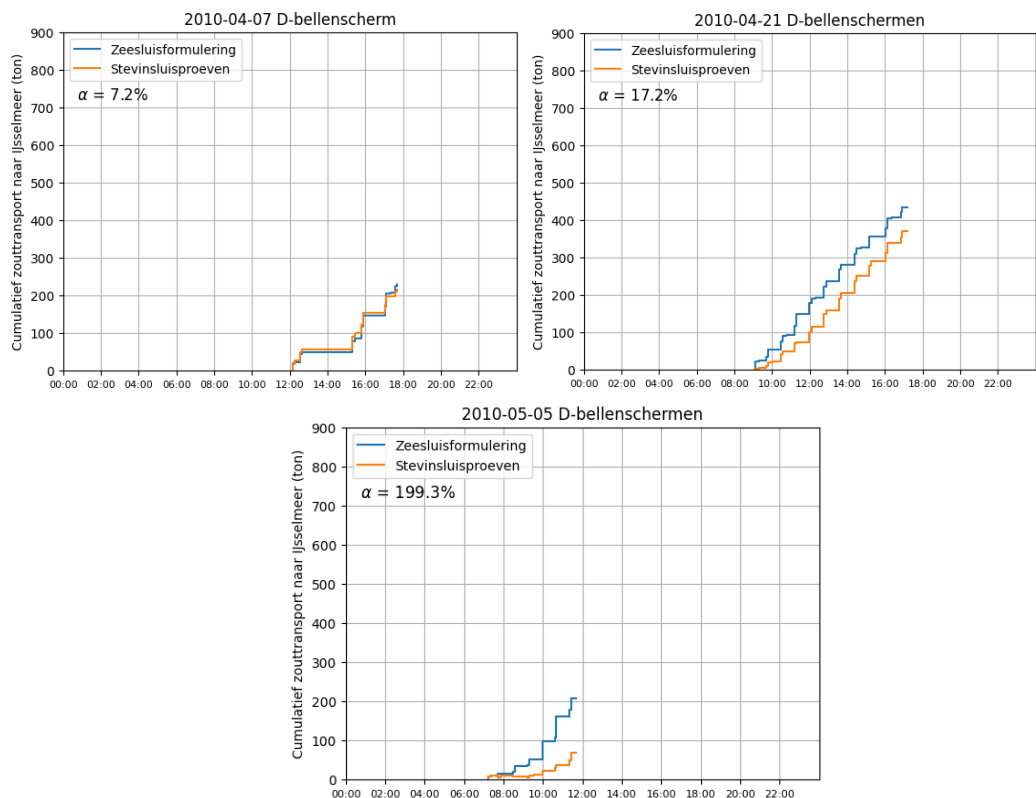
Deze afwijking is kleiner dan bij IJmuiden (6 – 9%). De cumulatieve afwijking is echter groter bij de Stevinsluis. Vermoedelijk zal de resolutie van de metingen bij de Stevinsluis (5 profielen langs de kolk i.p.v. 2) de reden zijn waarom er in dit geval een betere overeenkomst is per fase.



Figuur 3.5: Het gemeten versus berekende zouttransport per fase (zie ook Figuur 2.1), met gemiddelde absolute afwijking, voor een onbeschermd kolk op 3, 9 en 15 april 2010.

3.3.2 Δ -luchtbellenschermen (testnummer 2.2 in Tabel 2.1)

Voor de opstelling met Δ -luchtbellenschermen in de Stevinsluis zijn drie meetdagen gedeeltelijk doorgerekend: 7 en 21 april en 5 mei 2010 (zie Bijlage A.2 voor welke uren per dag). Voor de Δ -luchtbellenschermen is steeds een reductiefactor $\eta = 0.25$ (Keetels, Uittenboogaard, Cornelisse, Villars, & van Pagee, 2011) toegepast, ongeacht de hoeveelheid lucht. Dit wordt in de volgende alinea's besproken. Het resultaat wordt weergegeven in Figuur 3.6. De afwijking tussen berekend en gemeten bedraagt voor deze dagen respectievelijk 7.2%, 17.2% en 199.3%. Hierbij zijn alleen de fasen waarbij het Δ -luchtbellenscherm aanstond (zonder andere maatregelen) meegenomen in de cumulatieve berekeningen. Op die dagen vonden ook schuttingen plaats met andere maatregelen toegepast (of waarbij de Δ -luchtbellenschermen uitstonden).



Figuur 3.6: Het gemeten (oranje) ten opzichte van het berekende (blauw) zouttransport voor de opstelling met Δ -luchtbellenschermen op 7 en 21 april en 5 mei 2010.

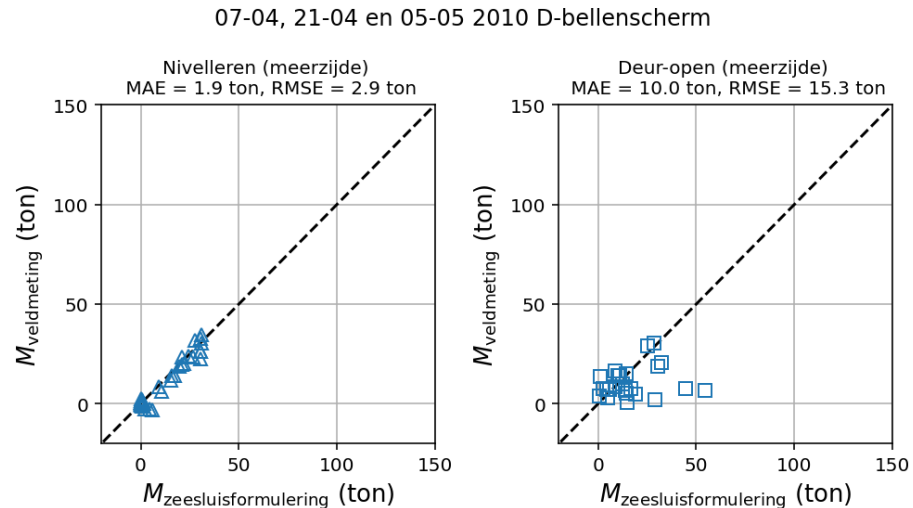
Het resultaat in Figuur 3.6 laat zien dat de ZSF de zoutlekreductie door bellenschermen met $\eta = 0.25$ systematisch onderschat, en daarmee het totale cumulatieve zouttransport overschat. Deze overschatting (in tegenstelling tot de onderschatting bij de onbeschermd kolk, zie Paragraaf 3.3.1) kan erg groot zijn (zie 5 mei 2010).

De aanname van een constante waarde voor de doorlaatfractie η draagt mogelijk bij aan de overschatting omdat $\eta = 0.25$ een gemiddelde en enigszins conservatieve waarde is (Keetels, Uittenboogaard, Cornelisse, Villars, & van Pagee, 2011). In de veldmetingen zijn variërende waarden gevonden tussen de zeezijde en meerzijde (bij de meerzijde was $\eta = 0.20$). De operatie van het bellenscherm tijdens de veldmetingen was ook met een vast luchtdebiet per dag in plaats van een vaste doorlaatfractie: vanwege variaties in waterstand en dichtheden leidt een vast luchtdebiet tot variërende waarden voor de doorlaatfractie. Het is mogelijk om in de ZSF per fase en per sluishoofd een andere reductiefactor te gebruiken, maar die is niet op voorhand bekend. Om die reden is het gewenst om, in de toekomst, de doorlaatfractie tijdens de berekening te kunnen bepalen op basis van een opgelegd luchtdebiet, rekening houdend met de momentane waterstanden en dichtheden in kolk en voorhaven. Dit wordt verder besproken in Hoofdstuk 4.

Er was tijdens de proeven sprake van sterke variatie in de sterkte van het bellenscherm, zie Bijlage A.2. De sterkte is uitgedrukt in het Froude-luchtgetal. Voor een efficiënt bellenscherm moet een waarde rondom 1 gekozen worden. Dat is het geval voor de meerzijde op 7 april en 21 april maar niet voor 5 mei. Voor de zeezijde is het verschil in Froude-luchtgetal nog groter tussen de dagen. Ter illustratie, als een reductiefactor van $\eta = 0.20$ toegepast wordt op 7 april en 21 april dan daalt de afwijking in het cumulatieve zouttransport naar 4.8% en 11.9% (in vergelijking met 7.2% en 17.2% uit Figuur 3.6). Dit kan dus mogelijk een deel van de afwijking verklaren. Bij de metingen van 5 mei is de afwijking zo groot dat vermoed wordt dat er een

andere bron is voor de afwijking, mogelijk de passerende schepen. Dit wordt verderop in deze paragraaf besproken.

Uit de vergelijking tussen de gemeten en berekende waarden per fase (zie Figuur 3.7) blijkt dat de nivelleerfase in de situatie met bellenschermen een sterke correlatie laat zien die vergelijkbaar is met de correlatie voor het nivelleren bij een onbeschermd kolk (zie Figuur 3.5). Dit is in lijn met de verwachtingen omdat de bellenschermen alleen worden toegepast op de deur-openfasen (de kolkuitwisseling).



Figuur 3.7: Het gemeten versus berekende zouttransport per fase (zie ook Figuur 2.1), met gemiddelde absolute afwijking, voor de maatregel Δ -luchtbellenschermen op 7 en 21 april en 5 mei 2010.

De afwijkingen in de berekende uitwisseling gedurende de deur-open fase (zie Figuur 3.7) zijn duidelijk groter. De absolute waarden van het zouttransport zijn minder dan voor de onbeschermd kolk (zie Figuur 3.5). Dit bevestigt dat een bellenscherm een effectieve maatregel is om de zoutlek te verminderen. Er zijn echter schuttingen waarbij de ZSF een hoog zouttransport voorspelt, maar waar dit niet in de metingen terug is te zien. Een voorbeeld hiervan is op 5 mei tussen 10 uur en 11 uur (zie Figuur 3.6). Het grote zouttransport uit de ZSF in deze schutting is niet afkomstig van de uitwisseling maar van een grote waterverplaatsing door schepen (er zijn in deze schutting twee grote binnenvaart schepen die in de kolk varen). Dit duidt op een oorzaak van de afwijking in de manier waarop de waterverplaatsing door scheepvaart behandeld wordt in de ZSF dat verder wordt besproken in Hoofdstuk 4.

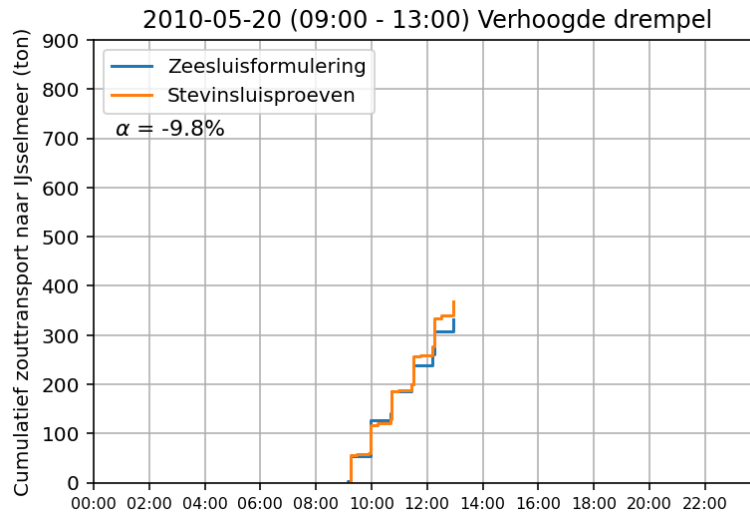
Uit deze vergelijking van schuttingen met bellenscherm kan geconcludeerd worden dat er een grotere onnauwkeurigheid kan worden verwacht als bellenschermen toegepast wordt. Deze is deels toe te wijzen aan de feit dat de zouttransporten in absolute zin kleiner zijn omdat het bellenscherm een effectieve maatregel is in het verminderen van de zoutlek. De absolute afwijking is niet substantieel groter dan voor een onbeschermd kolk. Daarnaast is in deze validatie een constante effectiviteit van het bellenscherm toegepast ($\eta = 0.25$). Een formulering voor een luchtdebietafhankelijke η zou het resultaat kunnen verbeteren.

De afwijkingen zijn het grootst als er een grote waterverplaatsing is door scheepvaart. Wat hierbij mogelijk een rol speelt is de overschatting van de hoeveelheid waterverplaatsing door recreatievaart. Afmetingen van recreatievaart worden niet geregistreerd in IVS'90 en daarom is een aanname gemaakt voor de afmetingen van schepen van die klasse (zie Paragraaf 2.3.2). De afwijkingen die in deze paragraaf te zien zijn zullen daarom niet volledig toe te wijzen zijn

aan de schematisatie van bellenschermen in de ZSF. In Hoofdstuk 4.2.1 wordt dit verder uitgelicht.

3.3.3 Verhoogde drempel (testnummer 2.3 in Tabel 2.1)

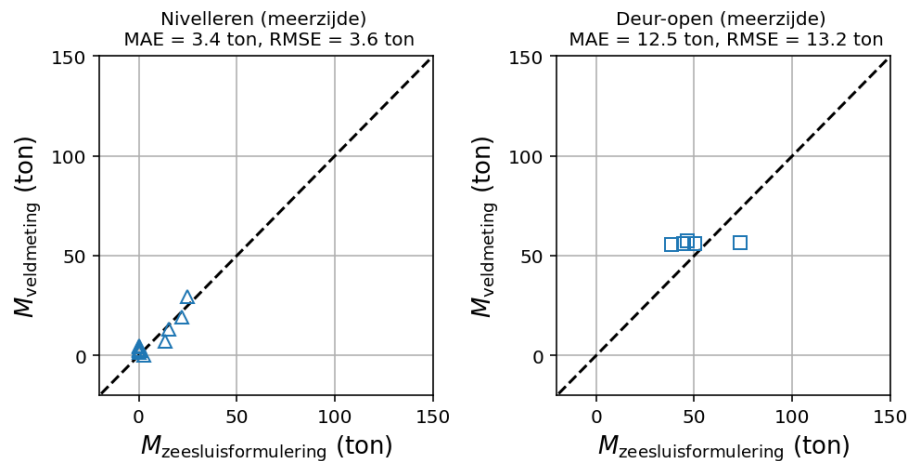
Voor de metingen met een extra, hogere drempel is één meetdag gedeeltelijk doorgerekend: 20 mei 2010. De precieze tijdstippen worden weergegeven in Bijlage A.3. De schematisatie wordt toegelicht in Paragraaf 2.3.4. In de Stevinsluisproeven is een reductie in zouttransport naar de meerzijde gevonden van 30% ten opzichte van de schutting zonder de extra drempel (Keetels, Uittenboogaard, Cornelisse, Villars, & van Pagee, 2011). Het resultaat van de vergelijking voor de schuttingen met de extra, hogere drempel als zoutlekbeperkende maatregel is weergegeven in Figuur 3.8. De afwijking tussen het berekende en gemeten zouttransport is -9.8%. Hierbij zijn alleen de momenten meegenomen waarin geen andere maatregelen actief waren.



Figuur 3.8: Het gemeten (oranje) ten opzichte van het berekende (blauw) zouttransport naar het IJsselmeer voor de opstelling een drempel van 1.18 m op 20 mei 2010.

Figuur 3.8 laat zien dat het berekende cumulatieve zouttransport schommelt rond de gemeten waarde. Gezien het kleine aantal doorgerekende fasen zit er veel onzekerheid in de cumulatieve afwijking. De procentuele afwijking voor de berekening met de extra drempel is iets groter dan voor de onbeschermd kolk. Een mogelijke verklaring hiervoor is de schematisatie van de twee drempelhoogtes en posities als één drempel in het sluishoofd (zie Paragraaf 2.3.4).

Uit de vergelijking tussen gemeten en berekende zouttransporten per fase (zie Figuur 3.9) blijkt dat de uitwisseling bij de nivelleerfase sterk overeenkomt en lijkt op de correlatie voor de onbeschermd kolk of Δ -luchtbellenschermen. Dit is in lijn met de verwachting voor de drempel als maatregel aangezien deze voornamelijk het uitwisselingsproces beïnvloed en dus weinig effect heeft op het zouttransport in de nivelleerfase.



Figuur 3.9: Het gemeten versus berekende zouttransport per fase (zie ook Figuur 2.1), met gemiddelde absolute afwijking, voor de maatregel drempel met hoogte 1.18 m op 20 mei 2010.

Opmerkelijk is dat tijdens de uitwisselingsfase (deur-open fase) de gemeten zouttransporten naar de meerzijde vrijwel allemaal even groot zijn (± 55 ton), terwijl de berekeningen enige spreiding bevatten (40 – 75 ton). De MAE en RMSE (zie Figuur 3.9) zijn van vergelijkbare ordegrootte als bij de onbeschermd kolk en Δ -luchtbellenscherm casussen.

Het effect van de drempel zou tijdens de uitwisselingsfase verstoord kunnen worden door verschillende factoren, bijvoorbeeld door schroefstralen en de retourstroom van de scheepvaart, die zout opwoelen en daarmee het zouttransport over de drempel verhogen. Aangezien het zouttransport in absolute zin kleiner is dan bij een onbeschermd kolk, is het procentuele aandeel waterverplaatsing door scheepvaart ook groter op het totale zouttransport.

Al met al laten de berekeningen met verhoogde drempel en zonder (onbeschermd kolk) een vergelijkbare mate van overeenkomst zien met de metingen, ondanks dat de positionering van de drempel in de ZSF niet op te leggen is. De effectiviteit van de drempel als zoutlekbepurende maatregel in de ZSF is vergelijkbaar met de bevindingen in de metingen. Dit is in lijn met de verwachtingen: de schematisatie van drempels in de ZSF is immers gebaseerd op de resultaten van de Stevinluisproeven (zie Paragraaf 2.3.4). Daarbij dient wel opgemerkt te worden dat het aantal schuttingen waarin alleen de verhoogde drempel als maatregel actief aanwezig was zeer beperkt is.

4 Discussie

In het voorliggende rapport is de validatie gepresenteerd van de toepassing van de fasegewijze ZSF waarbij een vergelijking is gemaakt met veldmetingen in Zeesluis IJmuiden en in de Stevinsluis. De resultaten worden hieronder verder besproken en geïnterpreteerd.

4.1 Geschiktheid van de validatie data

4.1.1 Duur van de metingen

Een mogelijke reden voor de grotere afwijking (7-10%) die is gevonden voor een onbeschermde kolk bij de Stevinsluisproeven dan bij IJmuiden is de kortere dataset die beschikbaar is uit de Stevinsluisproeven. De dataset voor Zeesluis IJmuiden is significant langer en de fasegewijze ZSF kon daarmee continu gedraaid worden, waarbij de procentuele afwijking met metingen stabiel werd na ongeveer één week doorgerekend te hebben. Grotere momentane afwijkingen worden uitgemiddeld over een reeks van schuttingen over meerdere weken. Dit was niet mogelijk voor de validatiesommen van de Stevinsluisproeven. De dataset van de Stevinsluis bevatte namelijk enkel losse dagen met elk een periode van enkele uren waarvan bekend was welke maatregelen actief waren. Uit de berekeningen voor Zeesluis IJmuiden zou geconcludeerd kunnen worden dat dit te kort is voor een nauwkeurige schatting, omdat grote momentane afwijkingen dan nog niet zijn uitgemiddeld.

Anderzijds, in IJmuiden is gewerkt met minder meetlijnen dan in de Stevinsluis, twee meetlijnen in de sluis kolk van Zeesluis IJmuiden tegenover vijf meetlijnen in de Stevinsluis. Voor beide veldmetingen is per meetlijnen het zoutgehalte opgenomen op vijf locaties in de verticaal. Daarmee is de resolutie voor de Stevinsluis groter en is mogelijk minder inspeeltijd nodig om een representatief zoutgehalte in de kolk te krijgen waarmee een nauwkeurige vergelijking gemaakt kan worden tussen de ZSF uitvoer en de metingen per fase.

4.1.2 Resolutie van de metingen

Voor beide locaties zijn gemeten zoutgehalten geïnterpoleerd over lengte en breedte van de kolk om de zoutmassa te bepalen en een vergelijking te maken met de door de ZSF berekende waarde. Voor IJmuiden is de resolutie daarmee relatief kleiner. Mogelijk worden door de twee meetlijnen in de kolk van Zeesluis IJmuiden bepaalde dynamische processen niet voldoende gemeten waardoor het zoutgehalte in de kolk zoals afgeleid uit de metingen niet representatief is. Dit zou met name tijdens de nivelleerfase tot enige verschillen kunnen leiden aangezien de dynamische processen een relatief grotere invloed kunnen hebben op de (kortere) nivelleerfase dan op de (langere) kolkuitwisseling.

Voor de schuttingen met een klein verval (<0.5 meter) zou dit, met name voor IJmuiden, wel tot een grote relatieve afwijking kunnen leiden tussen de metingen en de ZSF. Een verschil in zoutgehalte wordt dan namelijk wel gemeten door de meetlijn dicht bij de deur waarover genivelleerd wordt, maar deze waarde is dan niet representatief voor de helft van de kolk (dit wordt wél aangenomen in de verwerking van gemeten zoutgehalte naar zoutmassa in de kolk voor IJmuiden). Dit verklaart dat de ZSF voor een enkele schutting een klein zouttransport berekent, terwijl uit de metingen afgeleid wordt dat er juist veel zouttransport is geweest, zie bijvoorbeeld Figuur 3.3.

4.1.3 Scheepvaartdata

De ZSF berekent het zouttransport dat wordt veroorzaakt door waterverplaatsing door scheepvaart. Voor de testen van de Stevinsluis is het niet volledig duidelijk wat de waterverplaatsing is van de recreatievaart en dat heeft kunnen leiden tot afwijkingen in de

berekening van het zouttransport door scheepvaart met de ZSF. Afmetingen van recreatievaart worden niet geregistreerd in IVS'90 en daarom is een aanname gemaakt voor de afmetingen van schepen van die klasse (zie Paragraaf 2.3.2).

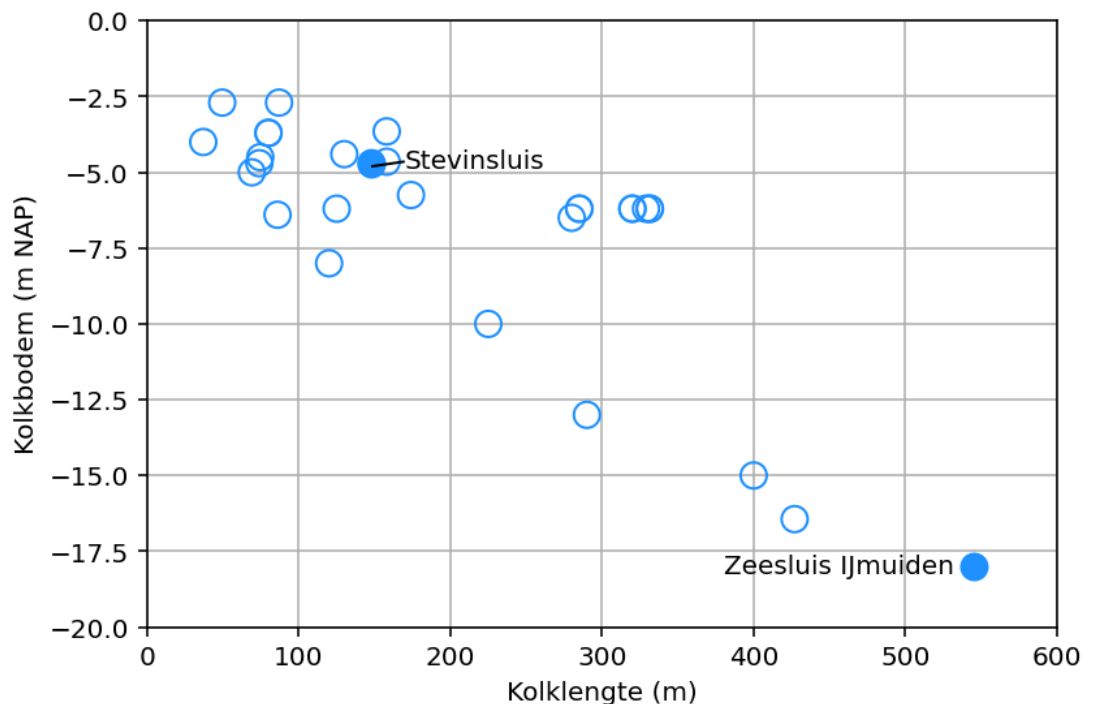
4.1.4 Hoe representatief zijn de validatie sets?

Dit validatierapport laat zien dat de fasegewijze toepassing van de ZSF bruikbaar is om het cumulatieve zouttransport te berekenen zónder en met zoutlekbepurende maatregelen door Zeesluis IJmuiden en de Stevinsluis.

De procentuele afwijking per fase is groter bij de nivelleerfasen dan bij de uitwisselingsfase. Dit is niet terug te zien in het cumulatief zouttransport van beide zeesluizen aangezien voor beide zeesluizen het aandeel van het zouttransport in de nivelleerfase relatief klein is ten opzichte van de kolkuitwisseling. Verder is het zo dat er geen grote systematische afwijking is bij het nivelleren waardoor afwijkingen enigszins wegvallen tegenover elkaar. De onderschatting in het cumulatieve transport is afkomstig uit een lichte systematische afwijking in de uitwisselingsfase.

Dit resultaat kan worden geëxtrapoleerd naar alle zeesluizen in Nederland door te kijken naar de kolkafmetingen (Figuur 4.1) en de verhouding van de schuttschijf (ofwel uitwisseling door nivelleren ($V_{\text{schuttschijf}}$)) en het kolkvolume (V_{kolk}) te beschouwen.

Door het verschil in kolkafmetingen (zie Figuur 4.1) kunnen deze sluisen als representatief worden beschouwd voor de twee uiteindes van het bereik aan kolkafmetingen dat in Nederland voorkomt.



Figuur 4.1: Kolk lengte en bodemniveau van dertig zeesluizen in Nederland. De sluisafmetingen zijn afkomstig uit Data Informatie Systeem Kunstwerken (DISK) (Rijkswaterstaat, 2024),

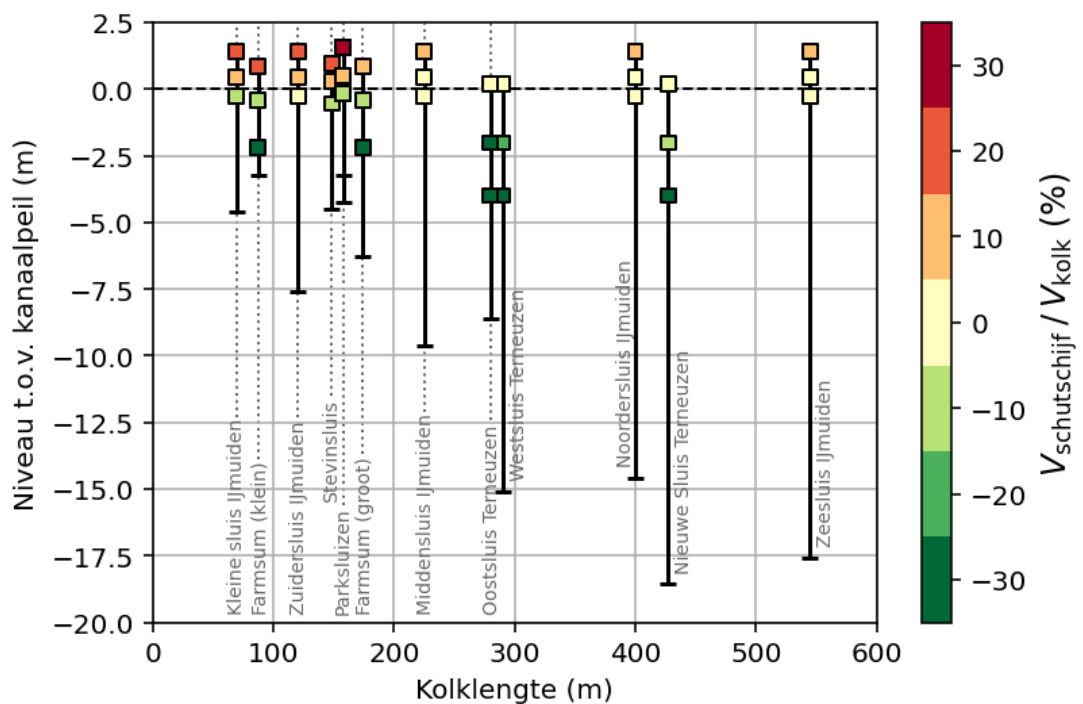
De verhouding tussen de schuttschijf en het kolkvolume (bij uitwisseling aan de binnenkant) komt neer op de verhouding tussen (enerzijds) het verval over de sluis en (anderzijds) de afstand tussen het kanaalpeil en de kolkbodem. Voor een deel van de zeesluizen in Nederland is dit getoond in Figuur 4.2. Voor elke sluis zijn er drie blokjes weergegeven; dit zijn de

waterstanden bij hoogwater, gemiddeld zeeniveau en laagwater, alle drie t.o.v. de waterstand aan de binnenkant, kanaalpeil. De staart eronder geeft de diepte van de sluiscolk aan.

Bij hoogwater aan de zeezijde is het waterpeil in het algemeen hoger dan het kanaalpeil, en bij laagwater is dat andersom. Bij laagwater gaat het schutdebiet naar buiten, en draagt daarmee niet bij aan de kolkuitwisseling; het is eerder andersom, aangezien het water uit het kanaal leidt tot een lager zoutgehalte in de kolk voordat de deur aan de binnenzijde open gaat. Deze situaties zijn afgebeeld met een groene kleur. Alleen een schutting waarbij de zeezijde hoger staat dan kanaalpeil leidt tot een bijdrage aan de zoutindringing. In de figuur zijn deze situaties afgebeeld met een oranje of rode kleur.

De figuur laat duidelijk zien dat de hoogte van het peil van hoogwater ten opzichte van kanaalpeil in het algemeen klein is ten opzichte van de diepte van de kolk ten opzichte van kanaalpeil. De meest ongunstige situatie (diep rode kleur) is bij de Parksluizen, en specifiek de ondiepere Kleine Sluis. De beide Parksluizen hebben dezelfde lengte maar een verschillende diepte, te zien aan de twee streepjes die de ligging van de kolkbodem aangeven onderaan de streep voor deze sluisen.

In Figuur 4.2 is te zien dat bij de Stevinsluis rond hoogwater de schuttschijf circa 20% van het kolkvolume bedraagt; dit ligt aan de bovenkant van de waarden voor het grootste deel van de zeesluizen in Nederland. Het is belangrijk om op te merken dat het kolkvolume niet gelijk is aan het uitwisselvolume omdat deze in de praktijk afhangt van de deur-opentijd. Het gemiddelde uitwisselvolume door de kolkuitwisseling is niet direct af te leiden voor alle zeesluizen aangezien de deur-opentijd variabel is en wordt bepaald door de sluisbediening, maar het geeft wél een beeld van het maximaal uit te wisselen kolkvolume.



Figuur 4.2: De verhouding tussen de schuttschijf en het kolkvolume bij enkele Nederlandse zeesluizen. De sluisafmetingen zijn afkomstig uit Data Informatie Systeem Kunstwerken (DISK) (Rijkswaterstaat, 2024) en de waterstanden (getijkrommes) uit de IPLO Infographics Operationeel Watermanagement (IPLO, z.d.).

4.2 Mogelijke tekortkomingen van de ZSF

4.2.1 Waterverplaatsing door scheepvaart

In de validatiesommen met de drempel en, in grotere mate, met de luchtbellenschermen is het absolute zouttransport kleiner dan voor een onbeschermd kolk. Hierdoor wordt het relatieve aandeel van waterverplaatsing door scheepvaart op de totale uitwisseling groter. Een eventuele onnauwkeurigheid in de manier van berekening van het effect van de waterverplaatsing op de zoutindringing speelt daarmee ook een grotere procentuele rol in de totale afwijking.

De ZSF neemt het effect dat schepen in de kolk hebben op het totale zouttransport als volgt mee:

1. Aan het begin van de deur-opentijd varen schepen de kolk uit. Daarbij wordt eenzelfde volume water terug de kolk in verplaatst vanuit de voorhaven en daarmee ontstaat een nieuw gemiddeld zoutgehalte in de kolk.
2. Met dit nieuwe zoutgehalte wordt de kolk-uitwisseling berekend voor de volledige deur-opentijd, dus zonder aftrek van de tijd voor uitvaren en invaren. Aan het eind van de deur-opentijd wordt weer een nieuw gemiddeld zoutgehalte in de kolk berekend.
3. Wanneer tenslotte een schip de kolk invaart, wordt eenzelfde volume water verplaatst van de kolk (met het zoutgehalte van na de kolkuitwisseling) naar de voorhaven.
4. Bij het omhoog nivelleren (kolk vullen) betekent een volume schip in de kolk dat er minder water in de kolk zit, waardoor het gemiddelde zoutgehalte in de kolk na het omhoog nivelleren anders is. Bij nivelleren naar beneden (kolk ledigen) heeft een schip in de kolk geen invloed: het zoutgehalte in de kolk verandert niet.

Het opdelen van de deur-opentijd in drie sub-fasen zoals hierboven beschreven is een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid: processen die tegelijkertijd plaatsvinden worden apart behandeld. Dit kan leiden tot afwijkingen tussen metingen en berekeningen en dit is dus te zien als een tekortkoming van de ZSF waarop verbetering wenselijk is.

4.2.2 Andere tekortkomingen en wensen voor verdere ontwikkeling

In de bespreking van de proeven met luchtbellenschermen bij de Stevinsluis is al benoemd dat het wenselijk zou om, binnen de ZSF, de doorlaatfractie η te kunnen bepalen op basis van een opgelegd luchtdebiet en de momentane waterstand en dichtheden in de kolk en de voorhaven. De theorie hiervoor is beschikbaar. Omdat een luchtdebiet gemeten kan worden, is daarmee een betere validatie mogelijk. Daarnaast is de ZSF dan beter in staat tot het bepalen van de zoutindringing op basis van registraties (of simulaties) van schuttingen met luchtbellenschermen. Omgekeerd zou ook het benodigd luchtdebiet kunnen worden berekend, gegeven een opgelegde doorlaatfractie. Dit zou behulpzaam zijn bij het verkennen en dimensioneren van maatregelen tegen zoutindringing.

Een tweede punt van een mogelijke verbetering is het kunnen opgeven van een positie van de drempel t.o.v. de deur. Als drempels een belangrijk onderdeel zijn van de beperking van zoutindringing kan het de moeite waard zijn de positie ervan beter in de ZSF mee te nemen om tot meer nauwkeurige resultaten te komen.

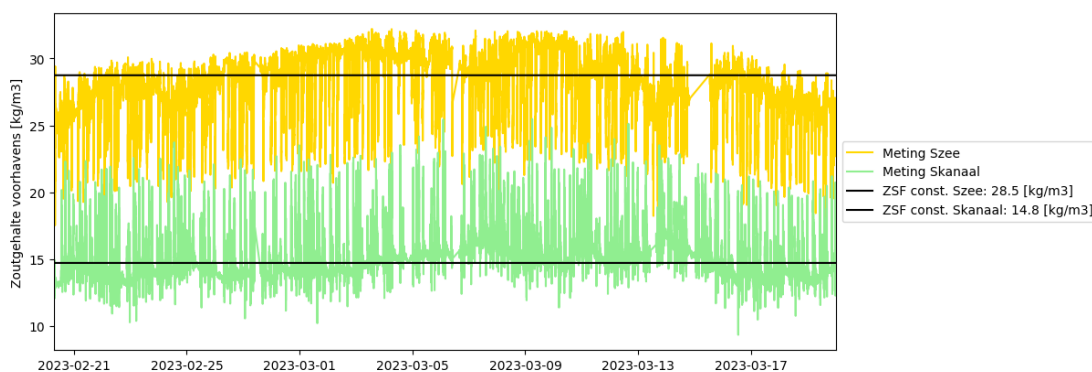
In paragraaf 4.1.4 wordt opgemerkt: "De onderschatting in het cumulatieve transport is afkomstig uit een lichte systematische afwijking in de uitwisselingsfase." Dit kan verband houden met de in de ZSF aangehouden formulering van de kolkuitwisseling op basis van een tangens hyperbolicus.

4.3 Implicaties voor het toepassen van de ZSF

4.3.1 Gebruik fasegewijze ZSF zónder metingen

In het voorliggende validatierapport is gebruik gemaakt van metingen in de voorhavens van de sluis gedurende de gehele meetreeks. In de praktijk zal de ZSF in sommige gevallen ingezet (moeten) worden zonder dat er metingen beschikbaar zijn, bijvoorbeeld voor toekomstige scenario's voor de inrichting/operatie van zeesluizen. In dat geval zal de ZSF gedraaid worden met een aan te nemen constant zoutgehalte aan de kanaal- en zeezijde. Met behulp van de veldmetingen bij Zeesluis IJmuiden kan de keuze om met vaste zoutgehaltenes aan kanaal- en zeezijde te rekenen beoordeeld worden. In deze paragraaf wordt de uitkomst van de ZSF vergeleken met de metingen op dezelfde manier als in Paragrafen 3.2.1 en 3.2.2, zowel cumulatief als per fase.

Om de ZSF te draaien met een constant zoutgehalte aan de kanaal- en zeezijde, dient de vaste waarde weloverwogen te zijn. Om te toetsen hoe de ZSF presteert met vaste randvoorwaarden wordt de ZSF gedraaid met de mediaan van het gemeten zoutgehalte aan de kanaal- en zeezijde van de Zeesluis IJmuiden. De mediaan van de data geeft een redelijke schatting van de zoutgehaltenes over de meetperiode, zie Figuur 4.3. Hierin zijn de gemeten dieptegemiddelde zoutgehaltenes aan weerszijde van de sluis kolk weergegeven over de gehele periode van de metingen. Een gebruiker kan hier uiteraard een andere keuze in maken, zoals het gemiddelde of voortschrijdend gemiddelde. Door de mediaan te gebruiken worden de sterke variaties in zoutgehalte die optreden *tijdens* de verschillende fasen minder zwaar meegewogen dan andere momenten, deze zijn immers niet representatief voor de zoutgehaltenes in het volledige volume van de voorhavens.

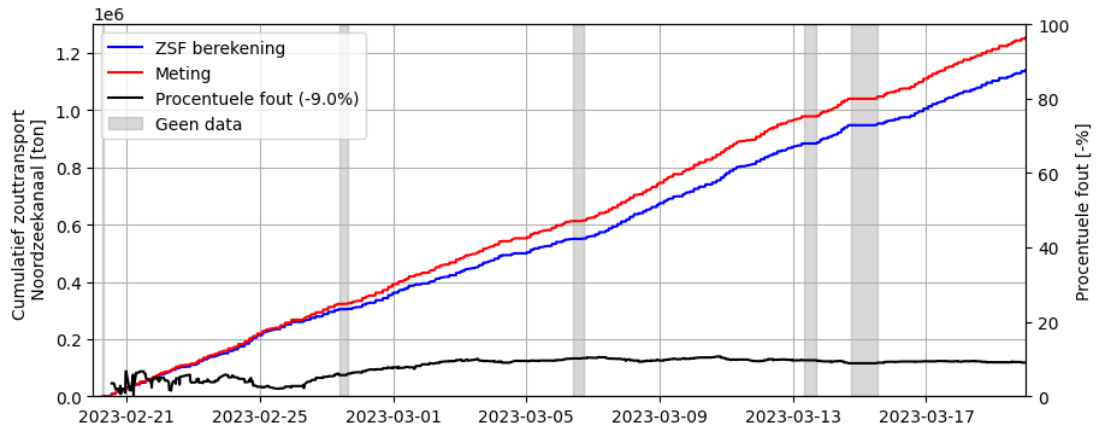


Figuur 4.3: Gemeten dieptegemiddelde zoutgehaltenes aan de kanaal- (groen) en zeezijde (geel). In het figuur is ook weergegeven welke waardes voortkomen uit het mediaan over beide meetreeksen (zwart).

Naast een constant zoutgehalte aan de kanaal- en zeezijde, moet een waterstand aan weerszijde van de kolk worden opgelegd. Een meetreeks over een bepaalde historische periode kan hiervoor gebruikt worden en hierop kan een toeslag opgelegd worden voor een te verwachten mate van zeespiegelstijging. In de vergelijking die hier gemaakt wordt zijn metingen uit het LMW gebruikt om een waterstand aan de kanaal- en zeezijde op te leggen.

Het resultaat van deze ZSF berekeningen is weergegeven in Figuur 4.4. De cumulatieve afwijking is toegenomen van -4.1% met gemeten zoutgehaltenes tot -9.0% voor constante zoutgehaltenes. Dit kan te maken hebben met de keuze voor de constante randvoorwaarde. Met de aanname van een vaste randvoorwaarde is de onderschatting van het cumulatieve zouttransport door de ZSF weliswaar toegenomen, maar nog steeds kleiner dan 10% wanneer een periode van vier weken wordt doorgerekend. Het is dus niet per se nodig om een hoge temporale resolutie van zoutmetingen in de voorhaven te hebben om een betrouwbare schatting van het zouttransport te berekenen met de ZSF.

Wel is het van belang een goede schatting te maken van het gemiddelde zoutgehalte over een periode van ten minste een week om de afwijking in de resultaten te beperken.



Figuur 4.4: Het totale zouttransport naar het Noordzeekanaal voor constante zoutgehaltenes aan de kanaal- en zeezijde. De blauwe lijn is berekend door de ZSF en de rode lijn geeft het zouttransport op basis van de veldmeting bij Zeesluis IJmuiden. Ook is de procentuele afwijking van de ZSF berekening weergegeven tegen de meting (zwarte lijn en rechters). De periodes waarin geen data zijn gemonitord tijdens de metingen zijn grijs gemaakt.

4.3.2 Gebruik cyclusgemiddelde ZSF

De validatiesommen in dit rapport zijn fasegewijs berekend met de ZSF. De ZSF kent ook een cyclusgemiddelde optie waarbij de operatie van de sluis samengevat wordt in gemiddelde invoerparameters: het aantal schuttingen per dag en een representatieve deur-open tijd). Het cyclus-gemiddeld rekenen vraagt dus veel minder invoer en is daarmee goed bruikbaar in allerlei verkennende berekeningen. Validatie van het cyclusgemiddeld rekenen valt buiten de scope van dit validatie rapport, maar wordt hier toch kort besproken.

Het cyclusgemiddeld rekenen is met name bedoeld om zouttransporten te kunnen berekenen bij gebrek aan registraties van (onregelmatige) schuttingen. Bij cyclusgemiddeld rekenen wordt het aantal schutting per etmaal in principe evenredig verdeeld over de tijd. Om rekening te houden met de onregelmatigheid in de operatie, die voor elke zeesluis anders kan zijn, moet een factor (c_{DOT} in de ZSF) worden toegepast. Hiermee wordt de gemiddelde deur-opentijd, die volgt uit het gemiddelde aantal schuttingen per etmaal, gecorrigeerd naar een (kleinere) representatieve deur-opentijd die leidt tot de juiste mate van zoutindringing. Deze factor kan o.a. weergeven dat er in het weekend en in de nacht veel minder geschut wordt dan doordeweeks en overdag.

Deze factor kan het meest nauwkeurig bepaald worden door een vergelijking te maken tussen een fasegewijze en een cyclusgemiddelde berekening van dezelfde zeesluis (KpNK, 2019b). Ook hier geldt dat er sprake kan zijn van seizoenafhankelijkheid waardoor deze factor moet worden bepaald onder de juiste omstandigheden.

5 Conclusies

Uit de validatiesommen blijkt dat de ZSF (met fasegewijs rekenen) een goede benadering maakt van zouttransport door schutsluizen: de afwijking tussen veldmetingen en de berekeningen bedraagt 5% voor Zeesluis IJmuiden en 7 à 10% voor de Stevinsluis. In beide gevallen is er sprake van een onderschatting. Deze zeesluizen en daarmee ook de resultaten van de validatiesommen zijn representatief voor het bereik aan schutkolkafmetingen en verhouding tussen schutschijf en kolkvolume dat in Nederland voorkomt. De ZSF is hierdoor gevalideerd voor gebruik bij Nederlandse sluizen met een verwachte onderschatting in zouttransport van ongeveer 10%. In de volgende paragrafen wordt van beide validatiecasussen een gedetailleerdere beschrijving gegeven en wordt er verwezen naar mogelijke uitzonderingen op de validatieresultaten waarin een lagere nauwkeurigheid verwacht wordt.

5.1 Zeesluis IJmuiden

De ZSF geeft voor deze meetcampagne een goede schatting met een afwijking van minder dan 5%. Er is in dit geval een systematische onderschatting van het zouttransport. Het grootste aandeel van het zout naar de kanaalzijde is afkomstig van de kolkuitwisseling tijdens de deur-open fase. Tijdens de nivelleerfase is de afwijking in de ZSF per fase groter, maar dit heeft beperkte invloed op de totale zoutindringing door Zeesluis IJmuiden naar het Noorzeekanaal omdat er een orde grootte minder zout wordt verplaatst tijdens het nivelleren dan tijdens de deur-open fase en omdat de afwijking geen systematische onder- of overschatting geeft waardoor de afwijkingen enigszins tegen elkaar wegvallen in een cumulatief zouttransport over een lange periode. De afwijking in de fase van nivelleren is ook vermoedelijk afkomstig uit de manier waarop de metingen van dichtheden verwerkt zijn naar zoutfluxen per fase. [Equation Chapter \(Next\) Section 1](#)

De validatie hierboven maakt gebruik van gemeten zoutgehaltes aan weerszijde van de sluis tijdens de meetperiode. Deze zijn de randvoorwaarden van de ZSF. Als deze niet beschikbaar zijn zal een andere randvoorwaarde nodig zijn. Voor het gebruik van constante zoutgehaltes aan weerszijde van de sluis is een goede afweging van de waarde nodig. Afhankelijk van de zoutgehaltes die in het model worden gebruikt zorgt dit voor onder- of overschatting van het zouttransport zoals berekend met de ZSF. Mits de constante waarde een goede representatie zijn van de zoutgehaltes aan de zee- en meerzijde, lijkt de ZSF goed in staat om te gaan met constante zoutgehaltes in de voorhavens. Het is dus niet noodzakelijk om een hoge temporale resolutie van zoutmetingen in de voorhaven te hebben om een betrouwbare schatting van het zouttransport te berekenen met de ZSF. Wel is het van belang een goede schatting te maken van het representatieve zoutgehalte over een periode om de afwijking in de resultaten te beperken.

5.2 Stevinsluis

De validatie van de ZSF met de Stevinsluisproeven is uitgevoerd voor een onbeschermd kolk en voor de Δ -luchtbellenschermen en voor een extra drempel. In de resultaten voor een onbeschermd kolk is net als bij Zeesluis IJmuiden sprake van onderschatting door de ZSF. De afwijking met de metingen is wel iets groter dan bij Zeesluis IJmuiden: 7 à 10%. Dit verschil is verder toegelicht in Hoofdstuk 4.

Bij de toepassing van de Δ -luchtbellenschermen is sprake van overschatting van het cumulatieve zouttransport. Dit wil zeggen dat de resultaten van berekeningen van situaties met bellenschermen over het algemeen tot een groter zouttransport leiden dan gemeten, waarmee

de berekeningen conservatief zijn: in werkelijkheid was het effect van de bellenschermen groter. De afwijking van de resultaten voor de Δ -luchtbellenschermen zijn groter dan bij de onbeschermde kolk (7 tot 17%), met één dag waar de afwijking erg groot is (200%). De reden voor deze grote uitschieter is niet geheel duidelijk, maar kan afkomstig zijn van de korte duur van de dataset, zie Hoofdstuk 4. Er zijn twee vermoedelijke aanleidingen voor de overschatting van het zouttransport in het geval van de Δ -luchtbellenschermen:

- De gebruikte reductiefactor η van 0,25 is afgeleid uit de resultaten van de Stevinsluisproeven. Maar door een groot luchtdebiet was deze η tijdens de metingen lager. Als we zouden kunnen rekenen met een luchtdebietafhankelijke η zou het resultaat kunnen verbeteren.
- IVS'90 registreert geen afmetingen voor recreatievaart. Hiertoe is een aanname gemaakt, maar deze kan in sommige gevallen voor een overschatting van de hoeveelheid waterverplaatsing zorgen.

Bij de toepassing van de verhoogde drempel blijft de afwijking tussen ZSF en metingen kleiner dan 10%, maar de grootte van de dataset is voor deze maatregel erg beperkt. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de schematisatie van drempels in de ZSF gebaseerd is op de Stevinsluisproeven. Dat de resultaten met een verhoogde drempel een vergelijkbare nauwkeurigheid hebben als die van een onbeschermde kolk is daardoor volledig in lijn met de verwachtingen. De trend in de metingen (elke schutting met drempel heeft dezelfde hoeveelheid zouttransport) is anders dan in de ZSF (daarbij er is variatie in het zouttransport per schutting). De reden hiervoor is vermoedelijk de manier waarop het displacement door scheepvaart meegenomen wordt in de berekening. Deze omvat, in aanwezigheid van maatregelen tegen zoutindringing en bij een beperkte zoutvracht, een groter deel van de totale zoutvracht en is daardoor significanter. Het effect van schepen blijft een bron van onzekerheid in de resultaten. Een tekortkoming in de schematisatie van drempels in de ZSF is het niet mee kunnen nemen van drempelposities buiten de sluishoofden.

5.3 Algemene conclusies

De validatie van de fase-gewijs ZSF voor algemene toepassingen is in dit rapport gedaan op basis van de twee datasets hierboven. De conclusies over het algemene gebruik van de ZSF na deze validatie zijn als volgt:

- De ZSF is gevalideerd voor het voorspellen van de cumulatieve zoutflux door zeesluizen in Nederland. Deze validatie set is representatief voor de grote meerderheid van sluisen in Nederland. Een afwijking in zoutflux van tussen de 5 % - 10 % kan verwacht worden. Er is eerder een onderschatting dan een overschatting van de zoutflux te verwachten.
- De zouttransport per schutfase kan een grotere afwijking hebben. Voor toepassingen waarbij deze mate van detail nodig is zal hiermee rekening gehouden moeten worden.
- Het is belangrijk bij het toepassen van de ZSF om een zout concentratie als randvoorwaarden te kiezen (aan de buitenkant en binnenkant van de sluis) die representatief is voor de zoutconcentraties in de beide voorhavens.
- De cyclus-gemiddelde ZSF is niet expliciet gevalideerd. Vooralsnog wordt er aanbevolen om bij het gebruik van deze versie kalibratie te doen op basis van fasegewijs berekeningen voor het bepalen van de factor voor de representatieve deuropentijden.

Mogelijke uitzonderingen voor de algemene validatie van de ZSF komen door mogelijke tekortkomingen in de validatie sets die worden gebruikt in dit rapport. Deze worden toegelicht in paragraaf 4.2. Samenvattend zijn ze als volgt:

- De meetcampagnes bij het toepassen van maatregelen zijn in de validatie set van de Stevinsluis van kort duur (bij IJmuiden waren geen maatregelen toegepast). Voor het toepassen van bellenschermen is er echter voldoende andere data uit het veld om de

gebruikte empirische relaties in de ZSF te vertrouwen. Voor drempels zijn er alleen numerieke berekeningen. Andere maatregelen zijn nog niet gevalideerd.

- Het effect van scheepvaart is afhankelijk van de grootte van de schepen (als fractie van de kolk volume). In de validatie sets zijn de schepen relatief klein geweest. Bij sluisen waarbij relatief grotere schepen geschut worden zal de afwijkingen tussen ZSF en daadwerkelijk zoutflux mogelijk anders worden. Deze dient nader onderzocht te worden.

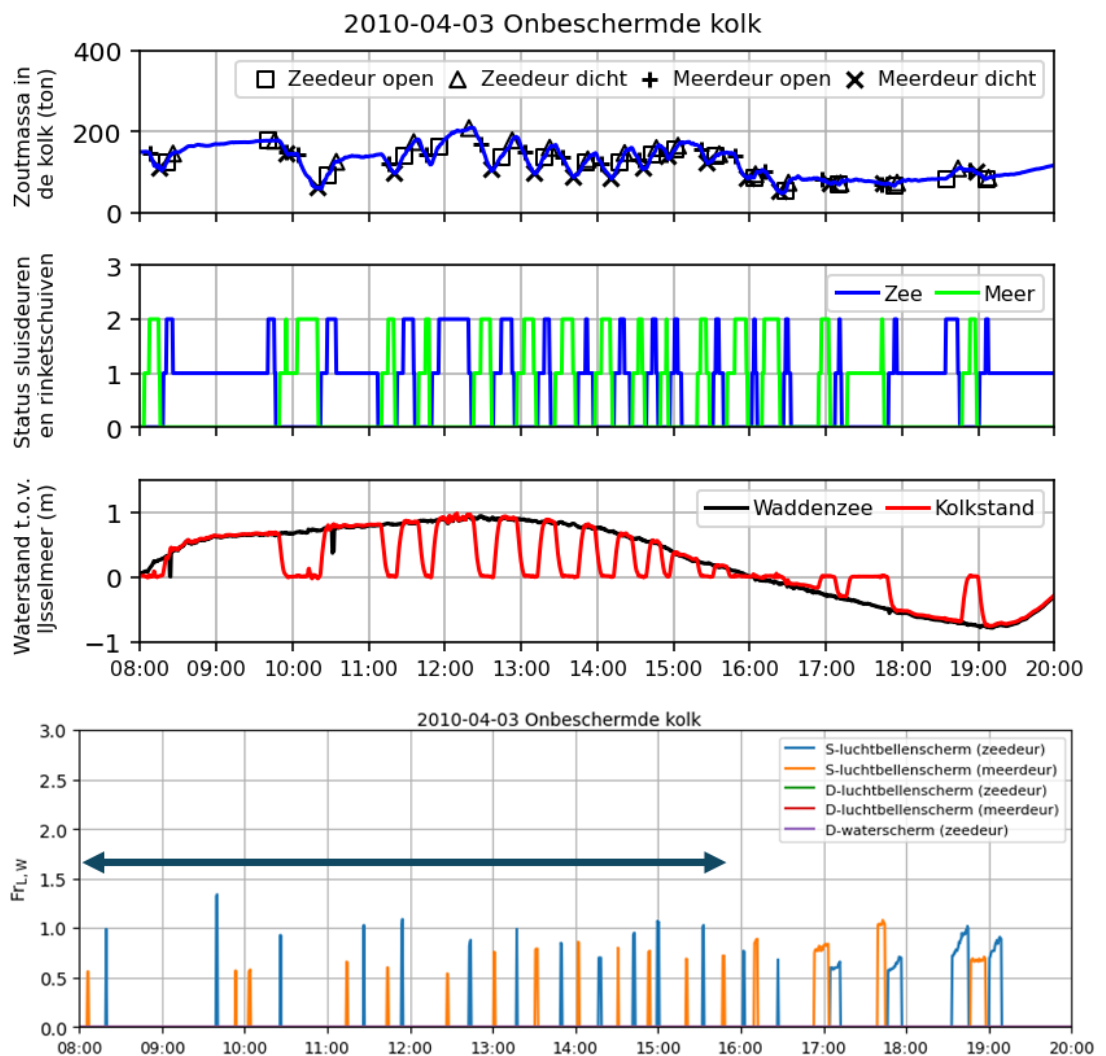
Referenties

- De Ruiter, J. W. (2025). *Locking Strategies IJmuiden*. TU Delft MSc. Thesis.
- Deltares. (2010). *Vorstudie: Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbepierking Volkeraksluizen - Model voor Zoutvrachtberekeningen*. 1201226-011-ZKS-0002.
- Deltares. (2011). *Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbepierking Volkeraksluizen - Beschrijving en resultaten praktijkproef Stevinsluis en evaluatie maatregelen Stevinsluis*. 1201226-005-ZKS-0007.
- Deltares. (2016a). *Validatierapport WANDA-Locks, het nieuwe zoutlekmiddel*. 1209463-000-HYE-0002.
- Deltares. (2016b). *Dichtheidsverschillen IJmuiden - aanvullende beschouwingen*. 1230029-008-GEO-0009.
- Deltares. (2023a). *Ontwikkeling zesde-generatie 3D IJsselmeer model - Modelbouw, validatie*. 11210333-007-ZWS-0002.
- Deltares. (2023b). *Dichtheidsmetingen Zeesluis IJmuiden 2023*. 11209319-000-HYE-0002_v1.0.
- Deltares. (2025). *KP-ZSS Spoor II, Zoetwaterbeheer in de Toekomst: Oprekmogelijkheden door maatregelen op spui- en schutsluizen*. 11210315-004-BGS-0001.
- IPLO. (z.d.). *Infographics Operationeel Watermanagement*. Geraadpleegd op 25/11/2025.
- Keetels, G., Uittenboogaard, R., Cornelisse, J., Villars, N., & van Pagee, H. (2011). Field study and supporting analysis of air curtains and other measures to reduce salinity transport through shipping locks. *Irrigation and Drainage*, 60, 42-50.
- KpNK. (2019a). *Zeesluisformulering, implementatie document*. 11200741-000-HYE-0004-v2.
- KpNK. (2019b). *Zoutindringing schut- en spuisluizen – Verbetering en implementatie Zeesluisformulering KpNK-2019-SKW-01c004*. 11200741-003-HYE-0009.
- KpNK. (2019c). *Zoutindringing schut- en spuisluizen - Opzet en verkenning Zeesluisformulering - KpNK-2018-SKW-01c002*. 11200741-003-HYE-0006.
- Oberkampf, W. L., & Roy, C. J. (2013). *Verification and Validation in Scientific Computing*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
doi:<https://doi.org/10.1017/CBO9780511760396>
- O'Mahoney, T., De Jonge, M., Boeters, R., & Vreeken, T. (2023). Innovative Salt-Freshwater Separation System at the Krammer Locks, The Netherlands. Hydraulic Modelling to Balance Functional Requirements. *Proceedings of PIANC Smart Rivers 2022. PIANC 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*. 264, pp. 479-493. Singapore: Springer.
doi:https://doi.org/10.1007/978-981-19-6138-0_42
- Rijkswaterstaat. (2025). *Waterinfo: Waterhoogte*.
- RIVM. (2017). *Wetted surface area of recreational boats*. RIVM Report 2017-0116.
- Shin, J. O., Dalziel, S. B., & Linden, P. F. (2004). Gravity currents produced by lock exchange. *Journal of Fluid Mechanics*, 521, 1-34.
- UNESCO. (1981). *The practical salinity scale 1978 and the international equation of state of seawater 1980*. Sidney, B.C., Canada: Tenth report of the Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards (JPOTS), UNESCO technical papers in marine science, No. 36.
- Van Koningsveld, M., Verheij, H., Taneja, P., & de Vriend, H. (2023). *Ports and Waterways: Navigating the changing world*. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, Hydraulic engineering, Ports and Waterways.

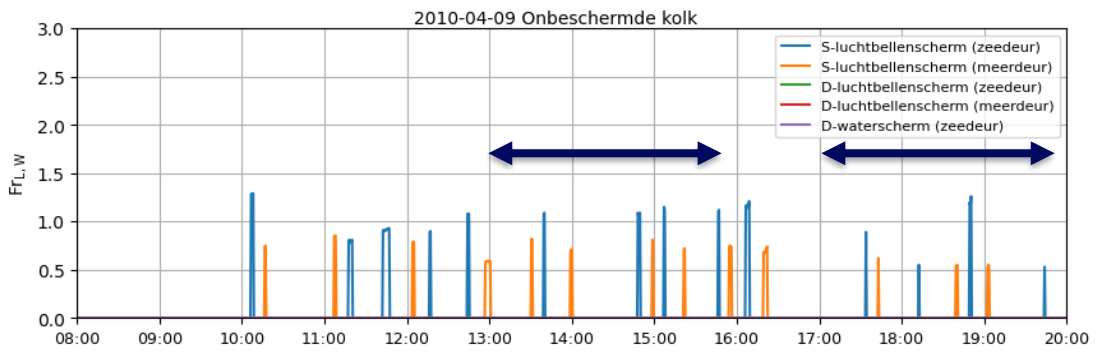
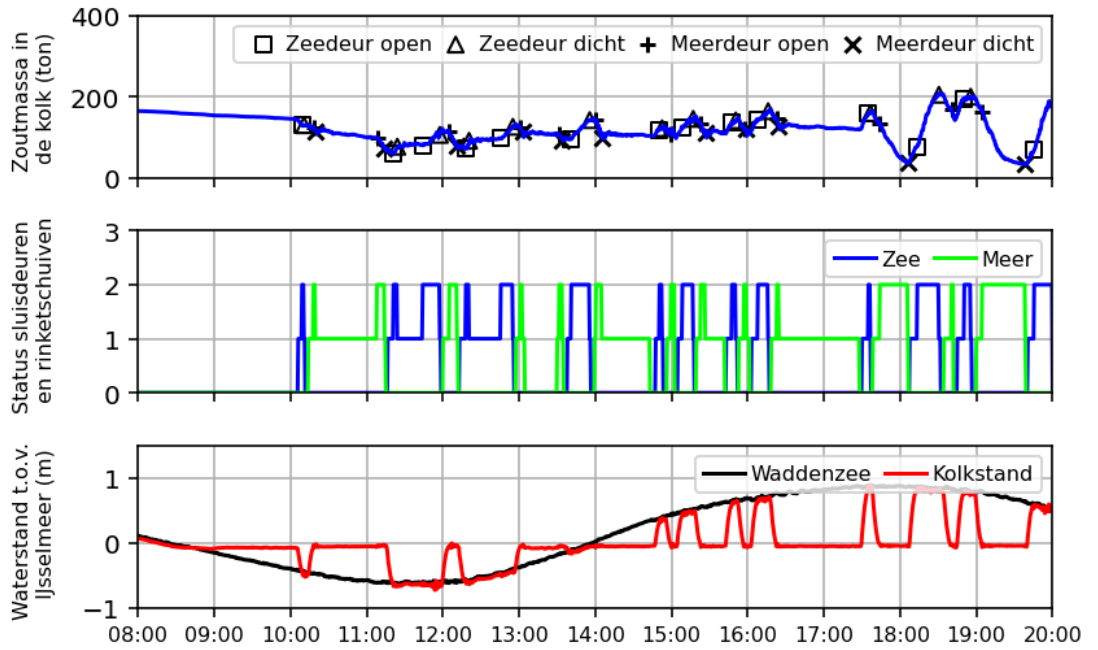
A Meetdata doorgerekende Stevinsluisproeven

In deze bijlage wordt de meetdata van alle doorgerekende Stevinsluisproeven weergegeven. Met de blauwe pijl wordt de doorgerekende periode aangeduid. Deze periodes zijn zo gekozen dat er steeds sprake is van een onbeschermd kolk, of van maar één maatregel (lichtbellenschermen of de verhoogde drempel). Elke doorgerekende periode is aangeduid met een blauwe pijl in de tweede figuur die de sterkte van de bellenschermen en het waterscherm gedurende de periode weergeeft. Wat opvalt is dat voor een onbeschermd kolk (zie Paragraaf A.1) ook pieken in het Froude-luchtgetal zichtbaar zijn, bijvoorbeeld direct onder de blauwe pijl in de figuur van 3 april. Dit is een noodzakelijk onderdeel van het open-deur-protocol van de Stevinsluis: enkele minuten voorafgaand aan het openen van een deur wordt het S-bellenscherm van die deur altijd ingeschakeld (Deltares, 2011). Ten behoeve van de metingen in een onbeschermd kolk werden deze direct weer uitgeschakeld. Hierdoor is steeds een kleine piek zichtbaar in het Froude-luchtgetal van de S-bellenschermen, maar ze stonden in die gevallen niet aan tijdens de kolkuitwisseling.

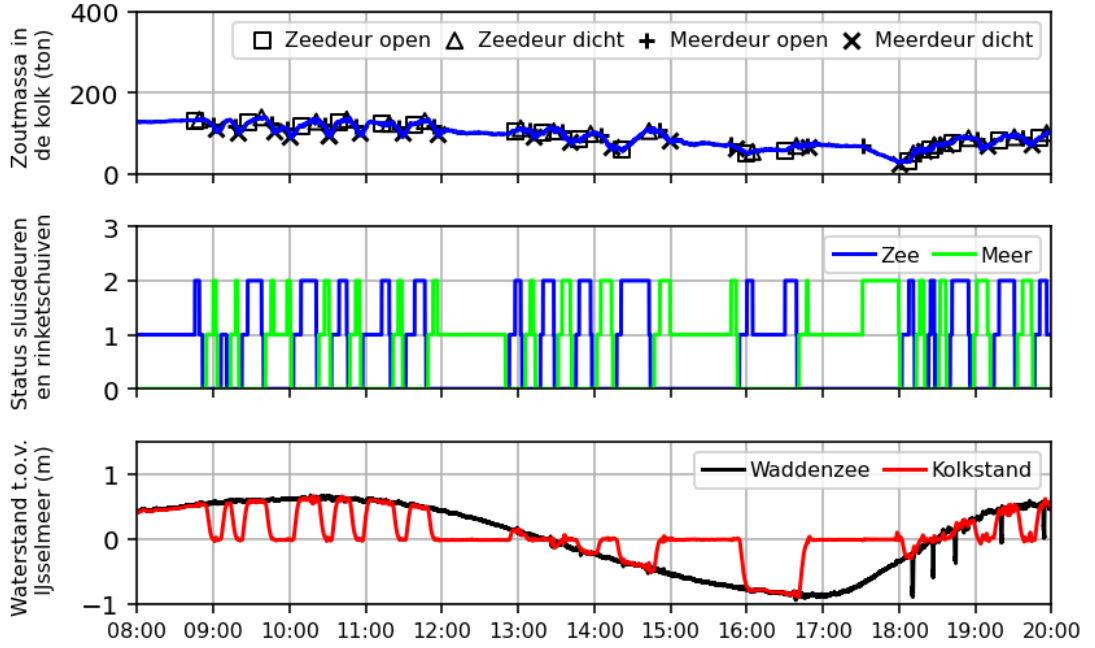
A.1 Onbeschermd kolk



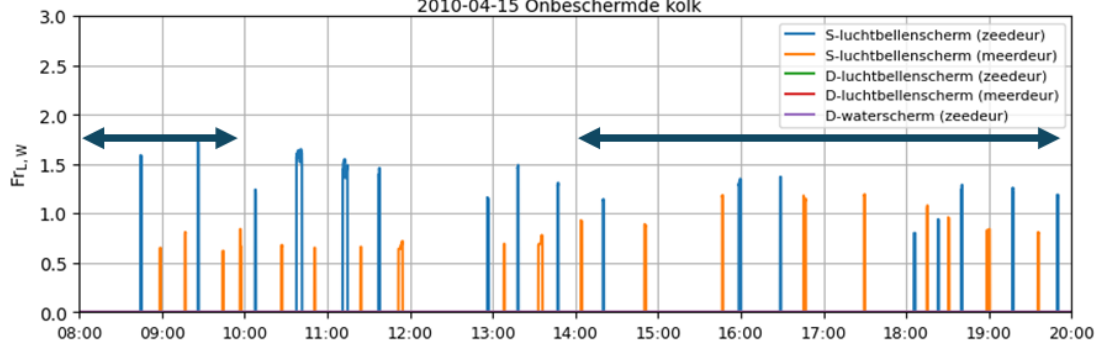
2010-04-09 Onbeschermdde kolk



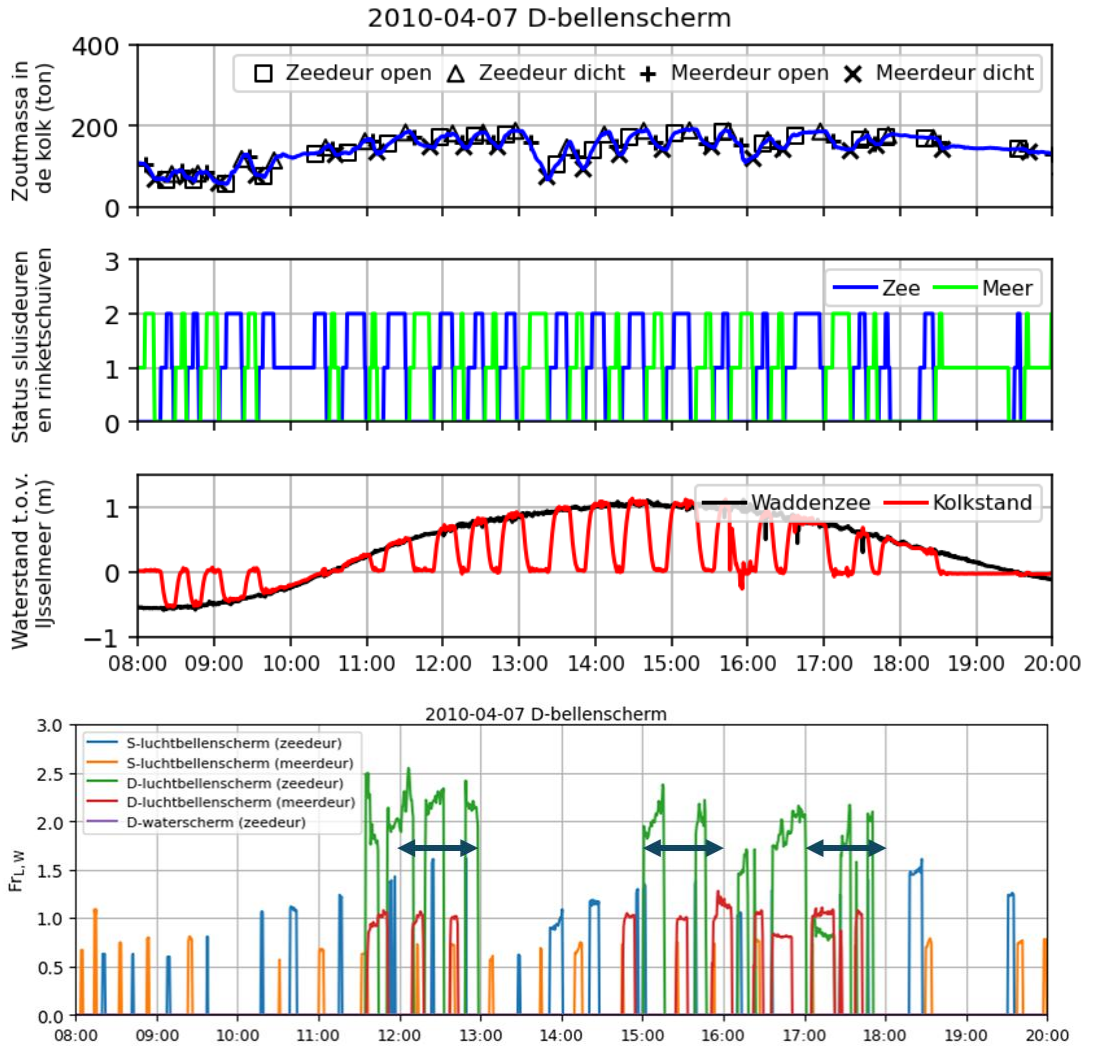
2010-04-15 Onbeschermdde kolk



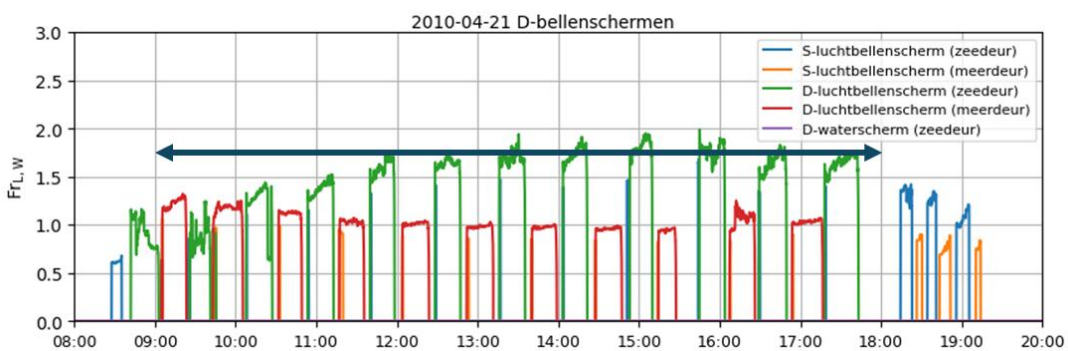
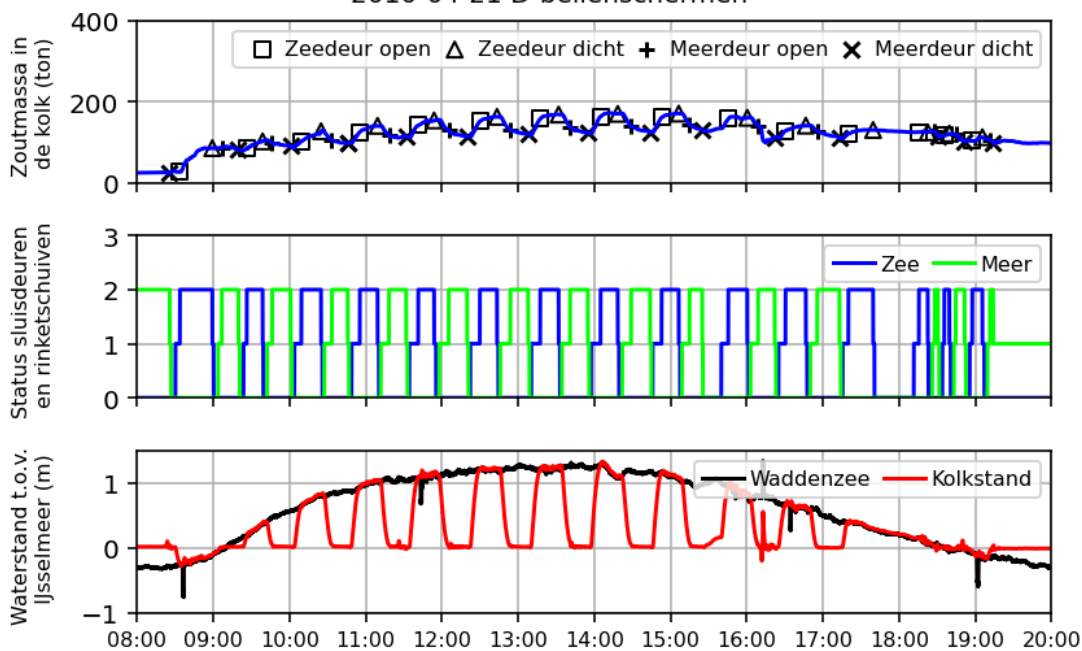
2010-04-15 Onbeschermdde kolk

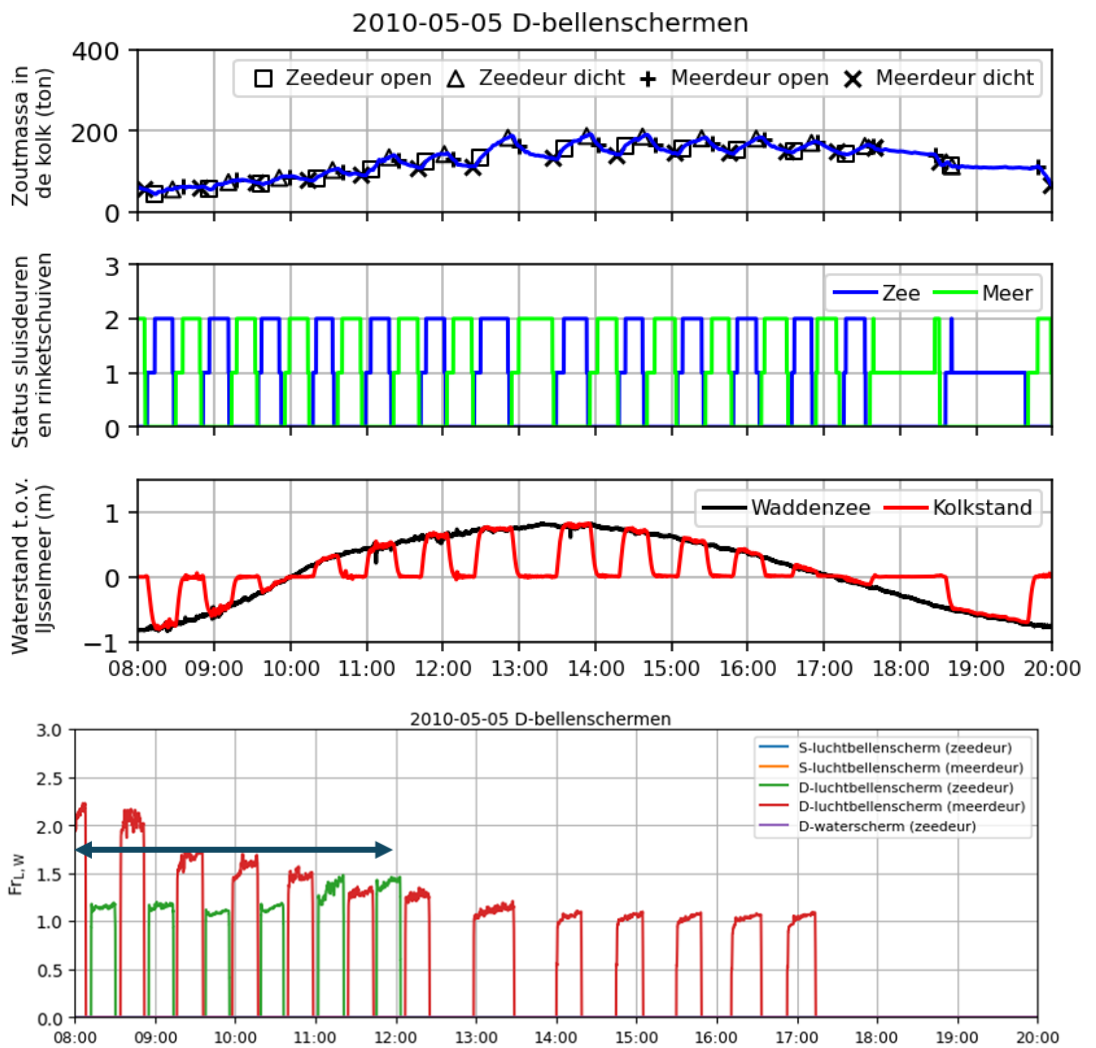


A.2 Δ-luchtbellenschermen

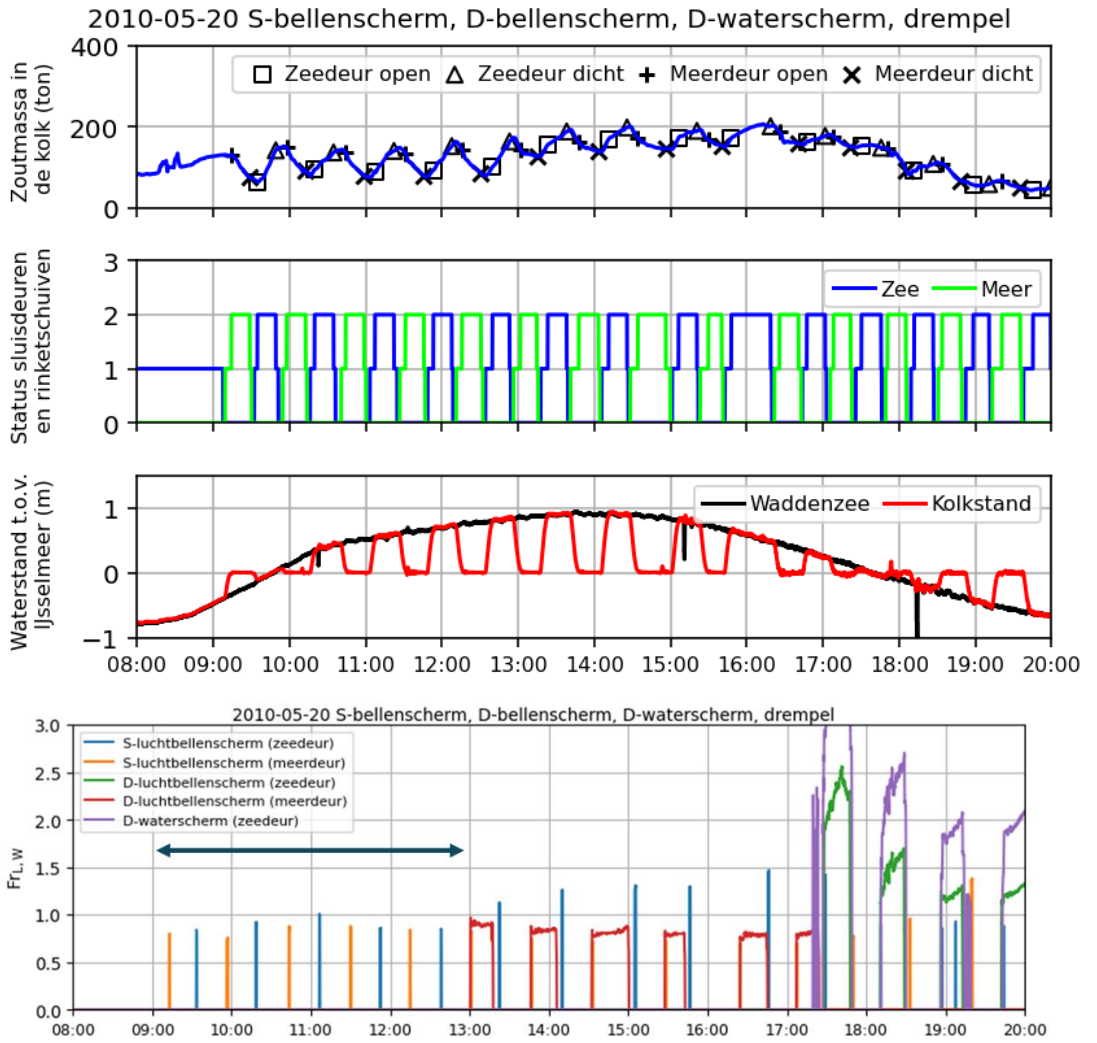


2010-04-21 D-bellenschermen





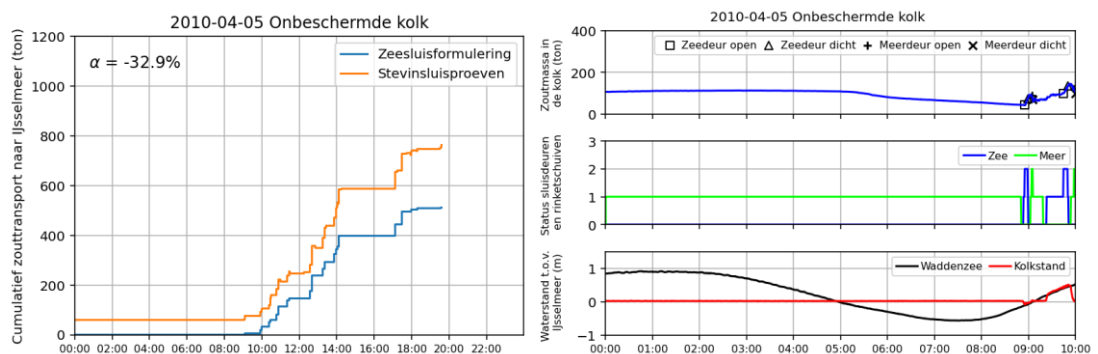
A.3 Verhoogde drempel



B Lange rinketschuif-opentijden Stevinsluis

De rinketschuiven van de Stevinsluis blijven soms erg lang openstaan, ook wanneer niet genivelleerd hoeft te worden. Dit is vermoedelijk onderdeel van de normale sluisoperatie en bedoeld om de krachten op de sluisdeuren te verminderen, maar is niet wenselijk wanneer de zoutindringing beperkt moet worden. De rinketschuiven zitten onderin de deuren, in de zoutste laag. Hierdoor vindt in de werkelijkheid kolkuitwisseling plaats wanneer de rinketschuiven openstaan, maar dit wordt niet door de ZSF berekend in de nivelleerfasen (routine 1 of 3). Ook transport door diffusie wordt niet berekend door de ZSF, maar dit is een veel kleinere bijdrage in vergelijking met het advectieve transport.

Een voorbeeld van een lange rinketschuif-opentijd wordt weergegeven in Figuur B.1: de rinketschuiven aan de meerzijde stonden gedurende negen uren open in de ochtend van 5 april 2010 (groene lijn = 1). De zoutmassa in de kolk daalde in die tijd, wat betekent dat er zout getransporteerd is naar de IJsselmeerszijde (oranje lijn ≈ 60 ton). De kolkstand is de volledige tijd vrijwel gelijk geweest aan de waterstand van het IJsselmeer (rode lijn ≈ 0) waardoor de ZSF, die open rinketschuiven interpreteert als nivelleren zonder verdere kolkuitwisseling, een heel klein zouttransport berekend (≈ 0.43 ton). Hierdoor ontstaat een groot initieel verschil tussen de gemeten en berekende resultaten. Dit werkt sterk door in het eindresultaat voor deze dag, ondanks dat de verticale stappen in het cumulatieve transport (links in Figuur B.1) gedurende de middag een betere onderlinge overeenkomst laten zien. Hierdoor is de gemaakte afwijking gelijk aan -32.9% .



Figuur B.1: De rinketten aan de meerzijde stonden gedurende negen uren open in de ochtend van 5 april 2010 (rechts, groene lijn = 1), waardoor een groot initieel verschil ontstaat in de vergelijking tussen de gemeten en berekende cumulatieve transporten (links).

Wanneer 5 april 2010 doorgerekend wordt vanaf de start van het reguliere schutpatroon (ongeveer 9:00 uur), dat wil zeggen zonder de negen uren lange rinketschuif-opentijd aan het begin van de dag, is de afwijking kleiner: van -32.9% naar -27.0% .

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