



Ontwikkeling 3D-model Kanaal Gent-Terneuzen

Modelopzet, kalibratie en validatie

Opdrachtgever: VNSC



Opdrachtgever: VNSC



Ontwikkeling 3D-model Kanaal Gent-Terneuzen



Modelopzet, kalibratie en validatie

Eindrapport

Auteurs

Pepijn van Denderen
Jan-Willem van Lente
Paula Lambregts
Vincent Vuik

Raamovereenkomst Onderzoek en Monitoring VNSC:
Data-analyse en datamodelleringsdiensten (perceel 2), zaaknr. 31151860

Nadere overeenkomst NOK-KGT06:
Opzet en kalibratie 3D-model Kanaal Gent-Terneuzen, contractnr. 31187756

HKV-projectnummer PR4728.20

juni 2024

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doelstelling	3
1.3	Totstandkoming	3
1.4	Leeswijzer	3
2	Modelopzet	5
2.1	Rekenrooster	5
2.2	Projectie vanuit Baseline	7
2.3	Debietrandvoorwaarden	8
2.4	Randvoorwaarden zout	8
2.5	Overige randvoorwaarden	12
2.6	Instellingen basismodel	12
2.7	Implementatie Nieuwe Sluis Terneuzen	13
3	Kalibratie en validatie	15
3.1	TSO-metingen	15
3.2	Kalibratie	17
3.3	Validatie	24
3.4	Testberekening NST	25
4	Discussie	27
4.1	Zoutlast sluizencomplex	27
4.2	Zoutverspreiding in het kanaal	27
5	Conclusies en aanbevelingen	28
5.1	Conclusies	28
5.2	Aanbevelingen	28
	Referenties	30
	Bijlagen	31
A	Figuren kalibratie	32
B	Figuren validatie	67
C	Baseline	81
D	Modelinstellingen	85
E	Memo: Nader onderzoek zoutlast sluizen Terneuzen	93
F	Vergelijking stroomsnelheden	94

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In het kanaal Gent-Terneuzen (KGT) zijn de afgelopen zomers hoge zoutwaardes boven de norm gemeten. De verwachting is dat de zoutwaardes in de toekomst nog hoger worden. Het hoge zoutgehalte is schadelijk voor damwanden, nadelig voor aanliggende bedrijven en landbouw en maakt het moeilijker de KRW-doelen voor de omliggende natuurgebieden te halen. In droge periodes is de aanvoer van zoet water te klein om de indringing van zout water bij het sluisencomplex bij Terneuzen te voorkomen en het peil te beheersen. Figuur 1-1 toont het kanaal met de daaraan verbonden waterlopen. Met de aanleg van de Nieuwe Sluis Terneuzen (NST), zoals weergegeven in Figuur 1-2, neemt deze problematiek naar verwachting nog verder toe.



Figuur 1-1: Het Kanaal Gent-Terneuzen en de daaraan verbonden zijtakken



Middensluis (1910-2021)

Deze sluis moest plaatsmaken voor de bouw van de Nieuwe Sluis en de dienstenhaven

- 140 meter lang
- 18 meter breed
- 7,58 meter diep

Aantal scheepspassages in 2021: 5.870

Oostsluis (1968)

- 280 meter lang
- 23 meter breed
- 6,5 meter diep

Aantal scheepspassages in 2021: 30.857

Westsluis (1968)

- 290 meter lang
- 40 meter breed
- 13 meter diep

Aantal scheepspassages in 2021: 22.266

Nieuwe Sluis (2023)

- 427 meter lang
- 55 meter breed
- 16,44 meter diep

Figuur 1-2: Bovenaanzicht met kentallen Nieuwe Sluis Terneuzen (Brochure Nieuwe Sluis Terneuzen, 2022)

In 2019 is door het Ambtelijk College van de Vlaams Nederlandse Schelde Commissie (VNSC) besloten een verkennend onderzoek te starten hoe met de droogteproblematiek op het KGT om te gaan. Dit resulteerde in 5 sporen van onderzoek die nodig zijn. In 2021 werd binnen deze sporen een prioritering vastgelegd, waarbij in Fase 1 de focus ligt op effecten van droogte op peilbeheer, scheepvaart en verzilting en in Fase 2 op maatregelen om deze effecten te verzachten of te mitigeren.

Fase 1 heeft geresulteerd in een overzicht van kennisleemtes (VNSC-NOK-KGT1) en een onderzoek naar de effecten van droogte en verzilting in het KGT (VNSC-NOK-KGT2 en VNSC-NOK-KGT3). De belangrijkste resultaten van het onderzoek in Fase 1 staan beschreven in het rapport 'Impact van verzilting en verminderde bovenafvoer in en rond kanaal Gent-Terneuzen' (Schelde in Beeld, 2022). In deze Fase 1 is een 1D SOBEK3-model opgezet. In een 1D-model is het niet mogelijk om dichtheidsstroming te modelleren, waarbij zout water langs de bodem vanaf Terneuzen het kanaal op stroomt onder het zoete water wat van bovenstrooms komt. Alle fysische processen worden diepte- en breedtegemiddeld gemodelleerd, zodat alleen de lengterichting van het kanaal overblijft. Verspreiding van zout wordt vervolgens gemodelleerd met een advectie-diffusie-vergelijking, waarbij de grootte van de dispersiecoëfficiënt bepalend is voor de sterkte van de zouttransporten. De dispersiecoëfficiënten zijn in HKV (2022) per tak van het kanaal bepaald via een kalibratie op gemeten zoutgehaltenes. Hierdoor is het SOBEK3-model goed in staat om de dieptegemiddelde zoutgehaltenes te reproduceren voor de oorspronkelijke toestand van het kanaal (met Westsluis, Middensluis en Oostsluis).

In Fase 2 van het project is behoefte aan inzicht in de effectiviteit van maatregelen tegen verzilting. De aanpak met een 1D-model leunt sterk op de gekalibreerde dispersiecoëfficiënten. Dit resulteert in onzekerheid over de zoutverspreiding in het kanaal na realisatie van de NST. Daarnaast kunnen er met het SOBEK3-model geen maatregelen op het KGT zelf, op een betrouwbare manier, worden doorgerekend. Denk daarbij aan een aanpassing van de zoutvang, een lokale verbreding of versmalling van het kanaal of de aanleg van een bellenscherm in het KGT. Dit was de aanleiding voor de behoefte aan een 3D-model voor het modelleren van zoutindringing en zoutverspreiding in het KGT.

1.2 Doelstelling

Het ontwikkelen een 3D-model voor de modellering van de zoutindringing bij het sluisencomplex van Terneuzen na realisatie van de Nieuwe Sluis Terneuzen (NST) en de verspreiding van zout binnen het Kanaal Gent-Terneuzen (KGT).

Het model moet voldoen aan de eisen die gesteld worden aan zesde generatie modellen van Rijkswaterstaat (Deltares, 2023).

1.3 Totstandkoming

Het 3D-model voor het Kanaal Gent-Terneuzen is opgezet in opdracht van de Werkgroep Droogte van de Vlaams-Nederlandse Scheldecommissie. De werkzaamheden zijn uitgevoerd door HKV vanuit het consortium Schelde in Beeld, bestaand uit HKV, Antea Group, Waardenburg Ecology en Universiteit Gent. Het model is opgezet met ondersteuning van Deltares en het Waterbouwkundig Laboratorium.

Deze rapportage is een update van de versie december 2023. Nieuwe inzichten rondom de zoutlast van de sluisen bij Terneuzen hebben geleid tot aanscherpingen in de randvoorwaarden van de Zeesluisformulering (zie Bijlage E). Vervolgens is het model opnieuw gekalibreerd. Het resultaat van deze aanscherping is dat de zoutlast nabij het sluisencomplex niet meer wordt overschat en dat geen vermenigvuldigingsfactor op de uitwisselingsdebiëten zoals berekend met de Zeesluisformulering meer nodig is.

Een vergelijking tussen gemeten en berekende stroomsnelheden is ook aan het rapport toegevoegd. Hiervoor zijn twee meetmomenten in 2018 van Rijkswaterstaat en het Waterloopkundig Laboratorium gebruikt, zie Bijlage F voor deze vergelijking.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de verschillende elementen van het 3D D-Flow FM-model beschreven. De modelparameters worden in hoofdstuk 3 gekalibreerd en geverifieerd. In dit hoofdstuk wordt er ook een testberekening gedaan met de Nieuwe Sluis Terneuzen (NST). In hoofdstuk 4 worden de beperkingen van het model beschreven. In hoofdstuk 5 worden de conclusies en aanbevelingen samengevat.

2 Modelopzet

In dit hoofdstuk worden de verschillende elementen van het model beschreven: rooster, geometrie, randvoorwaarden, instellingen en implementatie NST.

2.1 Rekenrooster

Het rooster is opgezet voor de nieuwe situatie na aanleg van de Nieuwe Sluis Terneuzen (NST). Daarnaast moet het rooster ook toepasbaar zijn voor de oude situatie vanwege het kalibreren en valideren van het model met meetgegevens. Deltares (2023a) stelt de volgende eisen aan het rooster:

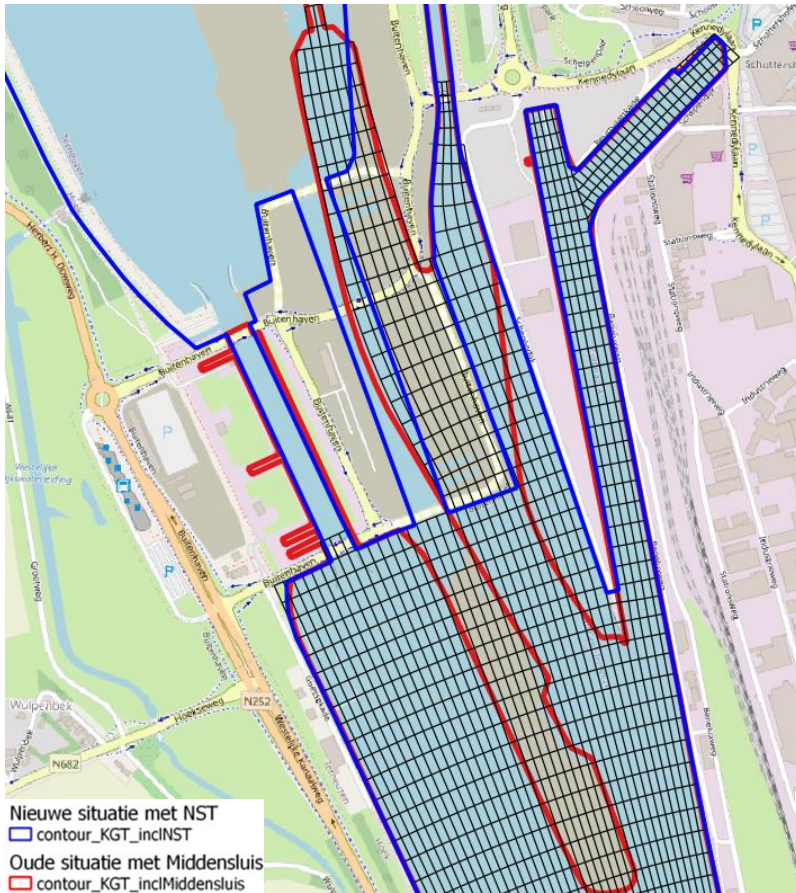
- Minimaal 6 cellen over de breedte in het kanaal
- Orthogonaliteit bij voorkeur $<0,02$ en de eis is $<0,05$
- Aspect ratio van cellen maximaal 5

Over het gehele kanaal zijn minimaal 6 cellen over de breedte gelegd, wat bepalend is voor de breedte van de cellen. De lengte van de cellen is gemaximaliseerd op basis van de aspect ratio van 4. Een roostercel is gemiddeld 22 bij 55 m.

In het havengebied bij Terneuzen is het rooster met een factor 2 verfijnd om de vertakkingen op elkaar aan te laten sluiten en de zoutvang nabij de Westsluis goed weer te geven (Figuur 2-1). Zout water wat via de Westsluis binnenstroomt, accumuleert eerst in deze zoutvang die veel dieper ligt dan de kanaalbodem (Figuur 2-8). Figuur 2-2 laat het rooster zien met daarbij de oude (rood) en nieuwe (blauw) contouren. Het rooster is uitgelijnd met de nieuwe contouren, dus inclusief NST, omdat het model uiteindelijk op deze situatie zal worden toegepast. Hierdoor sluit het rooster niet overal goed aan op de oude situatie en dit is met `dry_polygons` opgelost. Het toepassen van twee verschillende versies van het rooster is ongewenst omdat dit mogelijk tot andere resultaten en kalibratie van het model kan leiden. De zoutindringing via deze sluisen is echter zo klein (HKV, 2023), dat de onnauwkeurigheid die hierdoor in de kalibratie ontstaat, beperkt is. De sluiskolken zelf zijn niet opgenomen in het rooster omdat deze stroming in de sluiskolken als randvoorwaarden aan het model worden opgelegd.

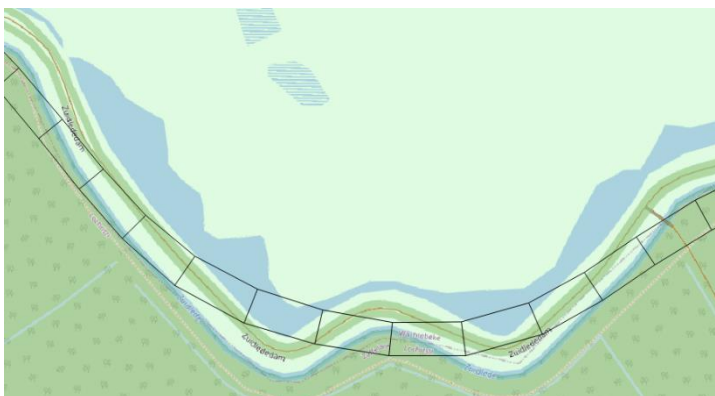


Figuur 2-1: Overgang van het fijne rooster nabij de sluisen naar het grovere rooster in de rest van het KGT.



Figuur 2-2 De contour van de Oude situatie met Middensluis (rood) en de nieuwe situatie met NST (blauw) met het beoogde rekenrooster.

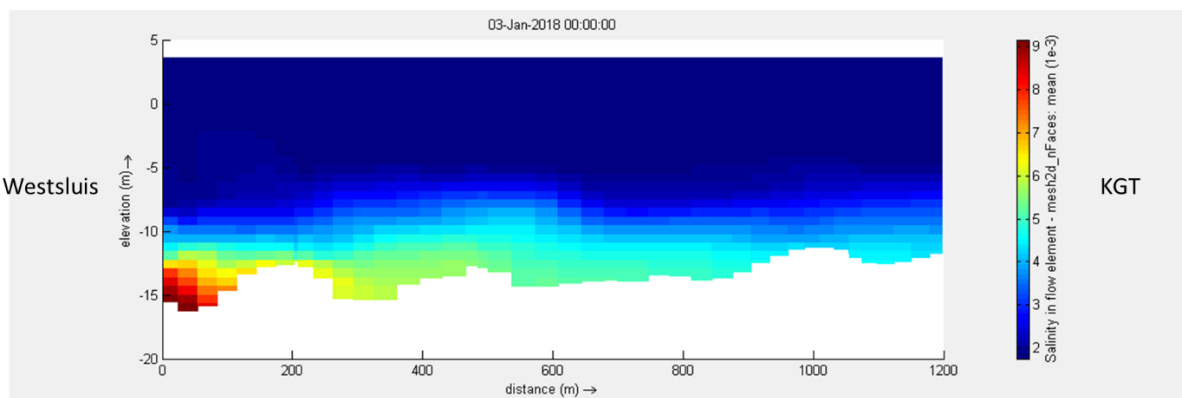
De zijtakken die uitstromen op het KGT, zoals de Moervaart en Zuidlede (Figuur 2-3), zijn met 1 rooster cel over de breedte uitgevoerd. Doordat de Zuidlede sterk meandert, zijn ten behoeve van de orthogonaliteit en smoothness van het rooster bochten afgesneden. De verwachting is dat de fout die hierdoor ontstaat veel kleiner is dan de fout die ontstaat als gevolg van het ontbreken van debietmetingen en nauwkeurige bodemgegevens voor deze waterloop.



Figuur 2-3: Voorbeeld van een bochtafsnijding in het rooster vanwege de opeenvolgende scherpe bochten.

Voor de laagverdeling over de waterdiepte is gebruik gemaakt van Z-lagen, net als in het model voor het Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal (NZK/ARK) (Deltares, 2020). Dit zijn horizontale lagen met een constante dikte (circa 1 m) in het complete modeldomein. Het aantal lagen neemt toe naarmate de waterdiepte toeneemt. Z-lagen zijn meer geschikt voor een vrij zwak-dynamisch en

daardoor sterk gelaagd systeem als het Kanaal Gent Terneuzen. Z-lagen leiden tot een betere modellering van zoutverspreiding dan het alternatief, sigma-lagen. Het aantal Z-lagen hangt af van de laagste bodemhoogte binnen het modeldomein (tot NAP-18 m) en de maximaal te verwachten waterstand (NAP+3 m). De maximale laagdikte is 1 m, net als in het model voor het NZK/ARK (Deltares, 2020). Het model moet ook toegepast kunnen worden om de chlorideconcentratie in de Moervaart te bepalen. Om hier met minimaal twee lagen te kunnen rekenen is de laagdikte in de bovenste vier Z-lagen 0,5 m. Deze neemt daaronder geleidelijk toe naar 1 m. Dit leidt tot in totaal 25 Z-lagen. Bij de start van het project zijn diverse testberekeningen uitgevoerd. Een van deze tests betrof de verticale laagverdeling. Verdubbeling van het aantal lagen leidde niet tot een verbetering van de stabiliteit van het model of tot andere zoutgehalten in het model. Op basis daarvan is geconcludeerd dat het volstaat om met 25 lagen te werken.



Figuur 2-4: Voorbeeld van een langsdoorsnede van de Westsluis door de zoutvang naar het KGT.

2.2 Projectie vanuit Baseline

Om ook in de toekomst andere jaren te kunnen modelleren met het 3D D-Flow FM-model is het wenselijk om zoveel mogelijk aan te sluiten bij de procedures en werkwijze behorend bij de modellen en gebiedsschematisaties van Rijkswaterstaat, waarbij geprojecteerde Baseline bestanden zoveel mogelijk zonder aanpassingen worden gebruikt in een D-Flow-FM schematisatie. Tijdens de ontwikkeling is echter toch gebleken dat een aantal aanpassingen nodig zijn omdat anders essentiële delen van het model niet in voldoende mate gemodelleerd worden of inactief blijven.

Als eerst is daarom de toegeleverde Baseline 6 database (baseline-nl_land-j22_6-v1) geactualiseerd. Hiervoor is een Baseline-maatregel aangemaakt om de aanpassingen in de Baseline-database op te kunnen nemen. Hieronder staan de belangrijkste aanpassingen. Deze zijn in verder detail beschreven in Bijlage C. De belangrijkste aanpassingen zijn:

- Updaten van het sectiebestand. In België is het sectiebestand uitgebreid met de zijtakken: de Ringvaart richting Evergem, de Moervaart en de Zuidlede. Tevens is het ook verlengd in de richting van Gent tot voorbij de Tolhuisstuw. In Nederland zijn de havens rondom Terneuzen aan sectie 1 toegevoegd.
- Update van de bodemhoogtegegevens. In het Belgische deel van het kanaal zijn de recentste gemeten bodemgegevens aan het model toegevoegd. Zo zijn er bodemhoogtes van de Ringvaart richting Evergem, Moervaart, Zuidlede en de oude dokken van Gent toegevoegd. De gegevens in de hoofdgeul zijn geactualiseerd daar waar deze beschikbaar waren.
- Update van de ruwheid. Een ruwheidscode van 3400 is toegekend (gecommuniceerd met Ton Visser (Deltares)) aan het Kanaal van Gent naar Terneuzen in plaats van de niet-gedefinieerde code van 471. Tevens is daarom ook het 'roughcombination.ttd' bestand uitgebreid met deze

ruwheidscode en bijbehorende ruwheid (Nikuradse ruwheidshoogte 0,15 m, zelfde als NZK/ARK). Er is geen gebruik gemaakt van de aparte ruwheidscode voor havens.

- Update van uitvoerlocaties en cross secties. In het Belgische deel zijn kilometerpunten toegevoegd. Kilometerpunten zijn genummerd van zuid (KG_1.00 nabij Gent) naar noord (KG_29.00 bij het sluisencomplex Terneuzen). Tevens is voor elk kilometerpunt een cross-sectie opgenomen. Daarnaast zijn er extra uitvoerlocaties opgenomen bij de TSO-locaties en in de zijtakken (Moervaart, Zuidlede, Gent en de Ringvaart richting Evergem). Extra cross-secties zijn aangebracht bij de sluisen van Terneuzen en in de Moervaart, Zuidlede, Gent en Ringvaart richting Evergem.

Na de actualisatie van de Baseline-database zijn de gegevens uit Baseline geprojecteerd op het rekenrooster. Na deze projectie bleek dat rondom de scheepvaartsluizen bij Terneuzen een handmatige aanpassing nodig was. Tevens zijn er nog een aantal extra uitvoerlocaties gedefinieerd.

- De bodem bij de Westsluis, Middensluis en Oostsluis is aangepast op basis van het diepste punt op deze locaties. Dit is nodig voor de sources/sinks die bij de sluisen worden opgelegd.
- Het bestaande hoogwatervrije vlak (gebieden waar geen water kan stromen) is uitgebreid met een aantal gebieden zodat er geen water over de landhoofden bij de Middensluis, Westsluis en Oostsluis stroomt.

Voor de implementatie van de Nieuwe Sluis Terneuzen (NST) zijn er na de Baseline conversie nog extra aanpassingen gedaan (paragraaf 2.7)

2.3 Debietrandvoorwaarden

De debietrandvoorwaarden zijn uitgebreid beschreven in (HKV, 2023) en hieronder kort samengevat.

- De wateraanvoer verloopt voornamelijk via de stuw bij Evergem. Daarnaast zijn er kleine bijdragen van de Tolhuisstuw in Gent, de Moervaart, Avrijevaart en de schutsluizen van Evergem.
- Op basis van de zeesluisformulering zijn de uitwisselingsdebieten en nivelleerdebeten bij de sluisen bepaald.
- Bij het schutten stroomt kanaalwater van het KGT naar de Westerschelde. Alleen bij zeer hoge hoogwaters op de Westerschelde kan netto water van de Westerschelde naar het KGT stromen, maar daggemiddeld is er altijd netto een waterverplaatsing van het KGT naar de Westerschelde.
- Bij hoge bovenafvoer wordt er gespuid bij Terneuzen via de riolen en deuren van de sluisen.

2.4 Randvoorwaarden zout

Aan de benedenstroomse zijde van het model is de zeesluisformulering (ZSF) toegepast om de schutverliezen en de zoutuitwisseling te bepalen. De methodiek is in meer detail beschreven en ook toegepast voor het KGT in het 1D SOBEK-model (HKV, 2023). Nieuwe inzichten op basis van een nader onderzoek hebben geleid tot aanscherpingen in de randvoorwaarden van de Zeesluisformulering (zie Bijlage E). Deze uitgangspunten zijn met Deltares afgestemd.

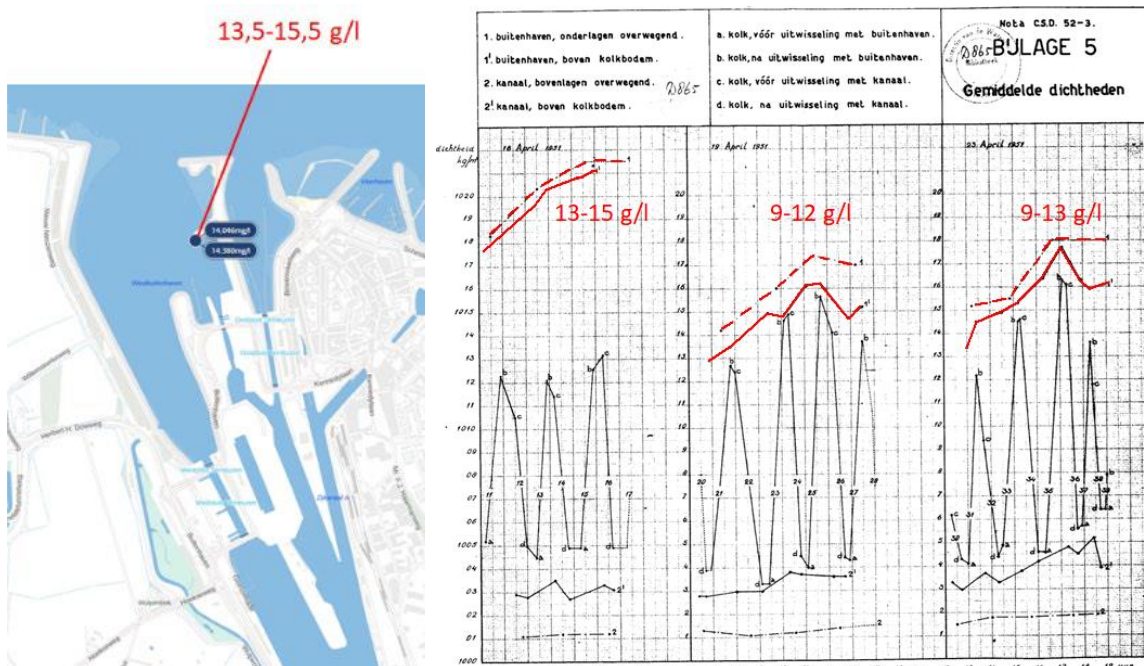
- Scheepsvolumes onder de waterspiegel zijn meegenomen in de ZSF. Om de volumebalans sluitend te houden is besloten om het gemiddeld scheepsvolume aan te houden voor beide vaarrichtingen.
- Watertemperatuur is niet in de ZSF meegenomen omdat dit een secundair effect heeft op de dichtheidsstroming.
- Alle berekeningen met de ZSF zijn fasegewijs uitgevoerd. De schuttijdstippen zijn bekend voor de periode 2016-2021 en gebruikt voor de ZSF. De deuropentijden zijn echter niet

bekend en zijn bepaald op basis van scheepsbewegingen (zie HKV, 2023). Dit zorgt voor een grote onzekerheid in de zoutlast.

- Voor de chlorideconcentratie aan de kanaalzijde is de dieptegemiddelde chlorideconcentratie bij meetlocatie TSO-1 (boven de drempel van de Westsluis) gebruikt. In principe moet de ZSF iteratief worden toegepast waarbij de chlorideconcentratie die aan de ZSF wordt opgelegd, wordt berekend door het model. Deze iteratie stap is niet uitgevoerd omdat:
 - De zoutlast door de ZSF te hoog wordt ingeschat. Dit betekent dat, in principe, voor elke kalibratieberekening de ZSF opnieuw moet worden toegepast.
 - De ZSF een foutmelding geeft wanneer de chlorideconcentratie aan de kanaalzijde hoger is dan de sluiscolk. Dit komt onder andere voor bij de Westsluis waar bij het nivellereen relatief zout water wordt onttrokken uit de zoutvang.

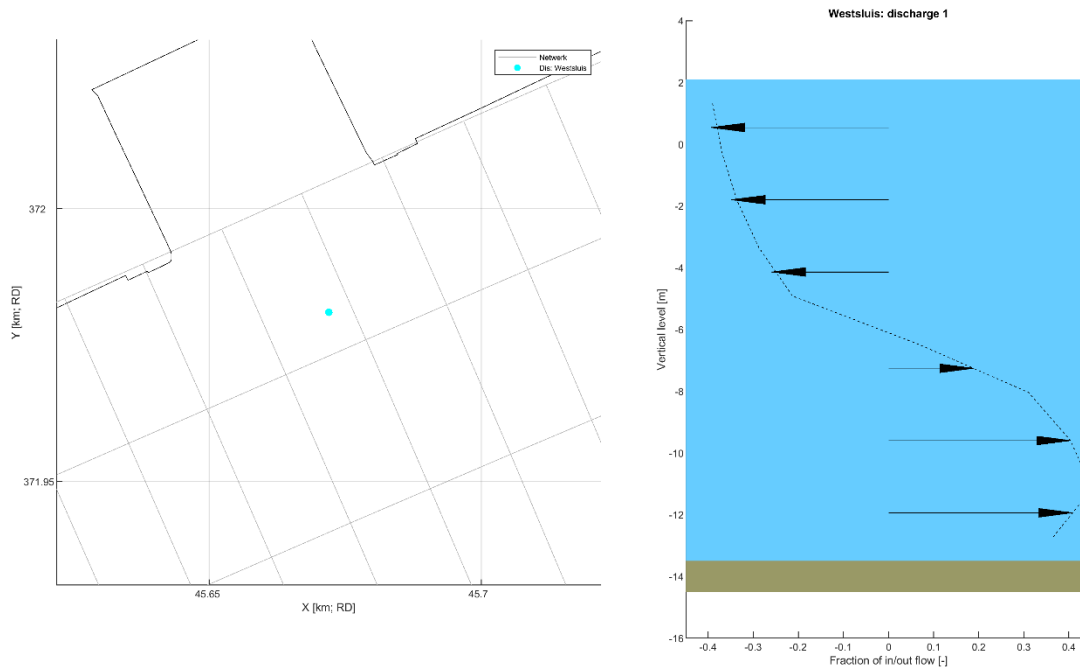
In de ZSF wordt het effect van de zoutvang op de chlorideconcentratie in de colk te zoet ingeschat wat mogelijk leidt tot een te lage zoutlast. Dit effect is secundair. In het D-Flow FM model worden de nivelleerafvoeren wel onttrokken uit de zoutvang.

- Voor het zoutgehalte aan de Westerscheldezijde van de sluisen is de gemeten saliniteit bij het meetpunt in de buitenhaven aangehouden (Figuur 2-5). Dit punt ligt op enige afstand van de Westsluis. Op basis van ervaring met modellen bij de sluisen van IJmuiden en een vergelijking tussen recente en oudere (1951) metingen is bekend dat water dicht bij de sluis zoeter is. Hoeveel zoeter is onbekend, de enige beschikbare metingen uit 1951 zijn niet meer representatief. De Westsluis is nu groter en de buitenhaven is aangepast. Op basis van analyse met het model en expertkennis is een reductie van 4 ppt aangehouden. Metingen voor de nieuwe situatie om de reductie te bepalen zijn sterk aanbevolen.
- De bellenschermen bij de West-, Midden- en Oostsluis zijn niet meegenomen. Deze staan sinds 2012 uit om energie te besparen en hadden weinig effect op de verzilting van het KGT (Rijkswaterstaat, 2015).



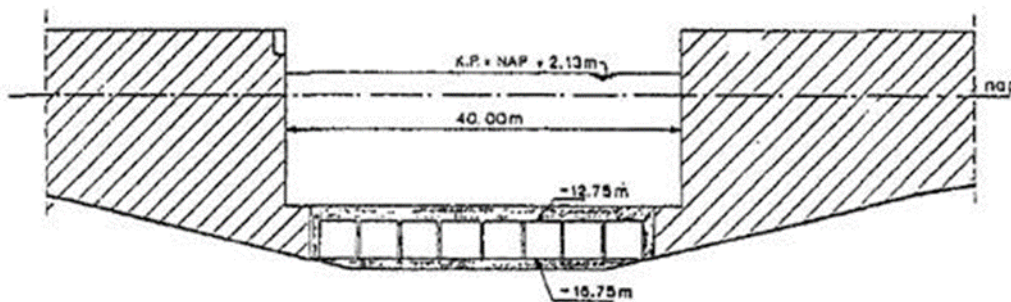
Figuur 2-5: De locatie van het meetpunt in de buitenhaven (links) en oude metingen voor de sluisdeuren van de Westsluis uit 1951 (rechts).

De uitwisselingsafvoeren bij het openen van de sluisdeuren die berekend zijn met de ZSF, zijn als sources/sinks opgelegd en verdeeld over de verticaal en in de tijd om zo het uitwisselingsproces na te bootsen. Dit gebeurt met behulp van scripts van Deltares die ook zijn gebruikt voor het bepalen van 3D-randvoorwaarden bij de Afsluitdijk (Bron: Wilbert Verbruggen, Deltares). Hierbij is op basis van het uitwisselingsvolume en de uitwissingstijd (lock exchange time, TLE) per schutcyclus een realistische afvoer opgelegd, verdeeld over de waterdiepte en over de tijd. Bij zoet-zout-uitwisseling neemt de afvoer namelijk geleidelijk af gedurende het proces van kolkuitwisseling. De uitwisselings-tijd is afgerond op hele minuten in verband met de updatefrequentie van forceringen in D-Flow FM.



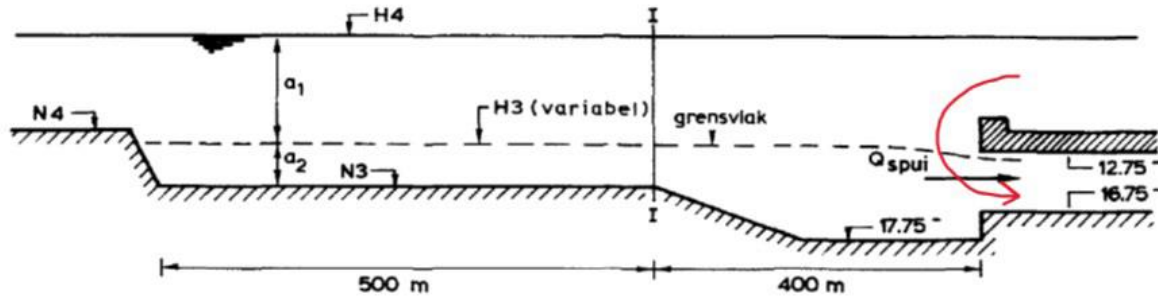
Figuur 2-6: Voorbeeld van een verticaal stromingsprofiel voor uitwisselingsdebiëten bij de Westsluis.

Bij hoge afvoeren vanaf bovenstrooms wordt er via de sluisen gespuid. Daarnaast wordt er bij het nivellere water onttrokken uit het kanaal. Spui- en nivelleerdebiëten worden bij de Westsluis onttrokken uit de zoutvang, tussen NAP-12,75 m en NAP-16,75 m (Figuur 2-7 en Figuur 2-8). Bij het omhoog nivellere wordt het nivelleerdebiet onttrokken uit de zoutvang en bij het omlaag nivellere bij hoogwater op de Westerschelde loopt het water via de riolen naar de zoutvang toe. Het effect van het nivellere uit de zoutvang op de saliniteit in de sluiscolk is niet meegenomen. Spuien via de Middensluis en Oostsluis gaat via de deuren. In het model worden deze spuidebiëten meegenomen als een onttrekking die is verdeeld over de waterdiepte boven de drempel van deze sluisen.



Figuur 2-7 Doorsnede van de Westsluis met de locatie van de riolen.

Met het 'systeem Terneuzen' wordt water gespuid via de riolen onder de Westsluis op het moment dat de deuren aan de kanaalzijde open staan. Dit zorgt ervoor dat de binnentredende zouttong (gedeeltelijk) weer wordt afgezogen (rode pijl in Figuur 2-8). Dit zogenaamde 'uitwisselingsspuien' kan alleen worden toegepast als daarvoor voldoende bovenafvoer beschikbaar is. Om aan te sluiten bij de werking Om het afzuigen van de binnenkomende zouttong bij de Westsluis na te bootsen is een berekening gedaan waarbij uitwisselingsspuidebieten van de binnenkomende kolkuitwisselingsdebieten worden afgetrokken, en niet meer daggemiddeld uit de zoutvang worden onttrokken. Dit sluit beter aan op de werking van het uitwisselingsspuien.



Figuur 2-8: Doorsnede van de zoutvang bij de Westsluis (Waterloopkundig Laboratorium, 1988) met het binnentredende uitwisselingsdebiet dat gelijk weer afgezogen wordt tijdens het uitwisselingsspuien (rode pijl).

Er bestond onduidelijkheid over de precieze geometrie van de sluisen. Verschillende bronnen melden andere dimensies en drempelniveaus. De verschillen in dimensies en uiteenlopende getallen volgden uit verschillende rapporten en websites. Zo was er verwarring door dieptes ten opzichte van NAP en dieptes ten opzichte van kanaalpeil. De getallen in Tabel 2-1 zijn correct en geverifieerd door de sluisbeheerder.

Tabel 2-1: De kolkdimensies van het sluisencomplex. Deze zijn gebruikt bij het opstellen van de zoutrandvoorwaarden in de kalibratie.

	Westsluis	Oostsluis	Middensluis
Breedte kolk (m)	40 ¹	24 ¹	24 ²
Lengte kolk (m)	290	295 ²	235 ²
Bodemhoogte kolk (m+NAP)	-12,82 ¹	-6,5 ²	-7,58 ³
Drempelhoogte buitenzijde (m)	0,0 ⁴	0,0 ⁵	0,0 ³
Drempelhoogte binnenzijde (m)	1,45 ⁴	2,0 ⁵	1,36 ⁶

Aan de bovenstroomse zijde van het model zijn geen gegevens van het chloridegehalte beschikbaar. Hier is aangenomen dat zoetwater het systeem instroomt (150 mg/l chloride, omgezet in een bijpassende saliniteit).

¹ Lievense CSO & Svasek, 2015. MER deelrapport water. Auteurs: Marieke Pfaff-Wagenaar (Lievense CSO) & Lynyrd de Wit (Svasek Hydraulics). In opdracht van de Vlaams Nederlands Scheldecommissie. VNZT-R-127-7.

² Rijkswaterstaat. C6201 onderzoek naar systeem Terneuzen

³ <https://vaarweginformatie.nl/frp/main/#/geo/detail/CHAMBER/5041>

⁴ <https://vaarweginformatie.nl/frp/main/#/geo/detail/CHAMBER/35526>

⁵ <https://vaarweginformatie.nl/frp/main/#/geo/detail/CHAMBER/37304>

⁶ Auteur onbekend. Voorschriften en regelingen bij schutten en spuien 741429

2.5 Overige randvoorwaarden

- Watertemperatuur heeft een secundair effect op de dichtheid en daarmee gelaagdheid. Deze is bij de randen opgelegd:
 - Bovenstroomse afvoeren: watertemperatuur bij Sas van Gent (bij gebrek aan meetgegevens van de watertemperatuur bovenstrooms van het KGT)
 - Benedenstroomse afvoeren: dieptegemiddelde watertemperatuur buitenhaven, Terneuzen Westsluis.
- Het Ocean Heat flux model wordt toegepast in het model, waarin op basis van wind, luchttemperatuur, bewolgingsgraad en luchtvochtigheid de temperatuurverandering van het water wordt bepaald. Als invoer voor de kalibratie zijn KNMI-gegevens gebruikt op basis van KNMI-station Westdorpe. Ontbrekende gegevens zoals de bewolgingsgraad zijn aangevuld op basis van KNMI-station Vlissingen.

2.6 Instellingen basismodel

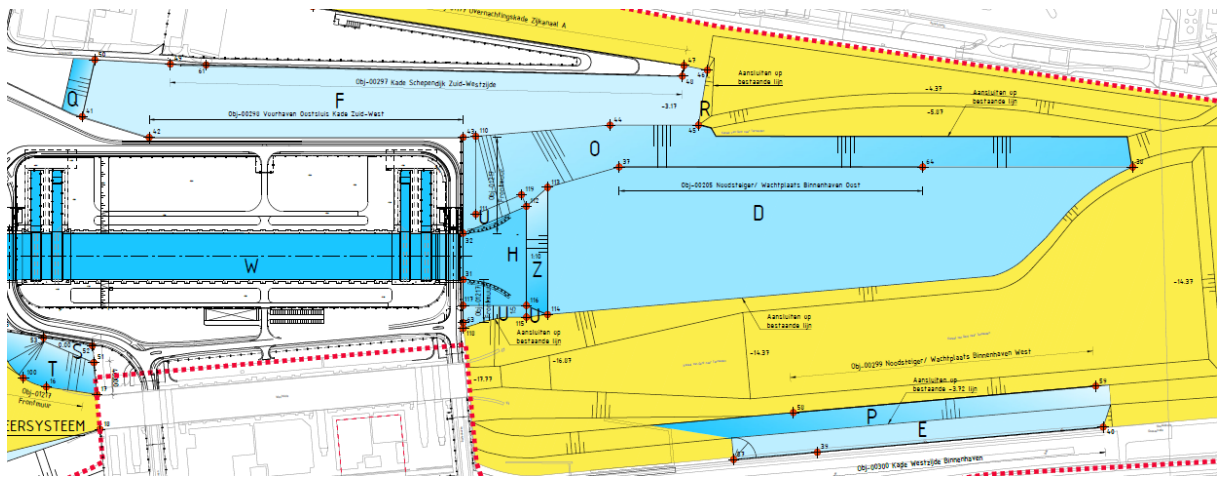
Het model is opgezet voor gebruik van D-Hydro 2023.01 Suite (Linux). De modelinstellingen zijn in de basis uit het 3D D-Flow FM model voor het Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal (NZK/ARK) overgenomen (Deltares, 2020; Deltares 2023). Deze instellingen zorgden echter voor een instabiliteit nabij het sluisencomplex. We hebben meerdere testberekeningen uitgevoerd zoals verticale en horizontale roosterverfijning, variaties in de horizontale en verticale diffusie, variaties in de initiële condities en een vergroting van de verticale viscositeit. De roosterverfijning leidde niet tot een verbetering van de stabiliteit van het model of tot andere zoutgehalten in het model. Uit deze analyse volgen de volgende aanpassingen van de modelinstellingen ten opzichte van NZK/ARK:

- De Latitude en Longitude zijn aangepast, relevant voor zoninstraling (AngLat=51, AngLon=4).
- Initiële condities:
 - Constante gemeten waterstand
 - Constante gemeten temperatuur
 - Diepte-variërende saliniteit. Er is in het gehele modeldomein initieel een constant zoutprofiel opgelegd over de diepte (-18 m+NAP :7 ppt en 0 m+NAP: 2 ppt). Deze is bepaald op basis van TSO-metingen bij het sluisencomplex. Berekeningen laten zien dat het model ongeveer 100 dagen nodig heeft om in te spelen.
- Bodemruwheid:
 - Dezelfde ruwheid is gebruikt als in het NZK-ARK (Nikuradse ruwheidshoogte 0,15 m).
 - Een ruwheidscode 3400 is toegevoegd aan roughcombination.ttd.
- Turbulentie is gemodelleerd met het k-epsilon model. Het effect van scheepvaart is daarin niet expliciet meegenomen.
- Verhoogde horizontale viscositeit in de eerste twee cellen op de rand van het model bij de drie sluiscolken. De grote stroomsnelheid bij de sluisen en variaties daarvan over de diepte kunnen voor numerieke instabiliteit zorgen. Dit is gemitigeerd door de horizontale viscositeit lokaal te verhogen van 0,1 m²/s naar 100 m²/s.
- dTmax=5. De tijdsstap wordt door D-Flow FM automatisch bepaald op basis van de horizontale stroomsnelheden. Om instabiliteit te voorkomen als gevolg van de verticale stroomsnelheden en dichtheidsverschillen is de maximale tijdsstap verlaagd naar 5 seconden.

2.7 Implementatie Nieuwe Sluis Terneuzen

De Nieuwe Sluis Terneuzen (NST) is niet als Baseline maatregel meegenomen maar geïmplementeerd door de invoerbestanden van D-Flow FM direct aan te passen. De sluisgolken zelf zijn niet opgenomen in het model omdat deze stroming in de sluisgolken via de zeesluisformulering als randvoorwaarden aan het model worden opgelegd. Hierbij is:

- de bodemhoogte aangepast zodat deze aansluit op de huidige zoutvang (Figuur 2-9);
- de Middensluis met een hoogwatervrij vlak afgesloten en bestaande hoogwatervrije vlakken zijn verwijderd.



+

Figuur 2-9: Ontwerptekening van de aansluiting de Nieuwe Sluis Terneuzen op het kanaal (Bron: Nieuwe sluis Terneuzen: vakken, coördinaten en maatvoering (NST-T-1_0-0003)).

Het model is getest door het Q3-scenario uit het HKV (2023a) door te rekenen. Dit scenario betreft een droge zomer in het huidige klimaat. De randvoorwaarden zijn hierbij gebaseerd op de winter 2018-2019 (6 november 2018 tot 5 mei 2019) en daarna zomer 2017 (6 mei tot 5 november 2017). De ZSF is toegepast om de benedenstroomse afvoeren en zoutgehalten te bepalen. De schuttijdstippen volgen hierbij uit SIVAK-simulaties (Witteveen & Bos, 2023). Figuur 2-10 geeft de geometrie van de NST weer zoals geïmplementeerd in het model.



Figuur 2-10: Schematische weergave van Nieuwe Sluis en zoutdrempel (bron: nieuwsluisterneuzen.eu)

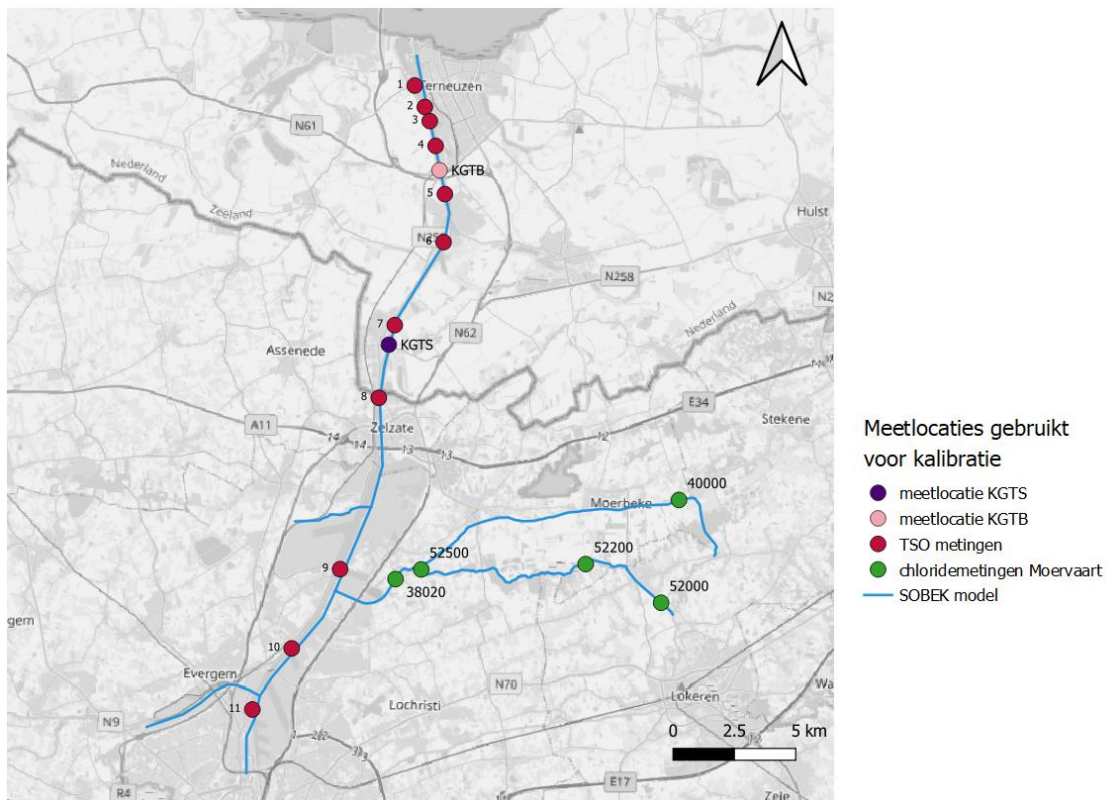
3 Kalibratie en validatie

Dit hoofdstuk beschrijft de kalibratie en validatie van het 3D-model, waarbij in de kalibratie modelparameters zijn gevarieerd en vastgesteld en in de validatie een onafhankelijke beoordeling is uitgevoerd van de kwaliteit van het gekalibreerde model.

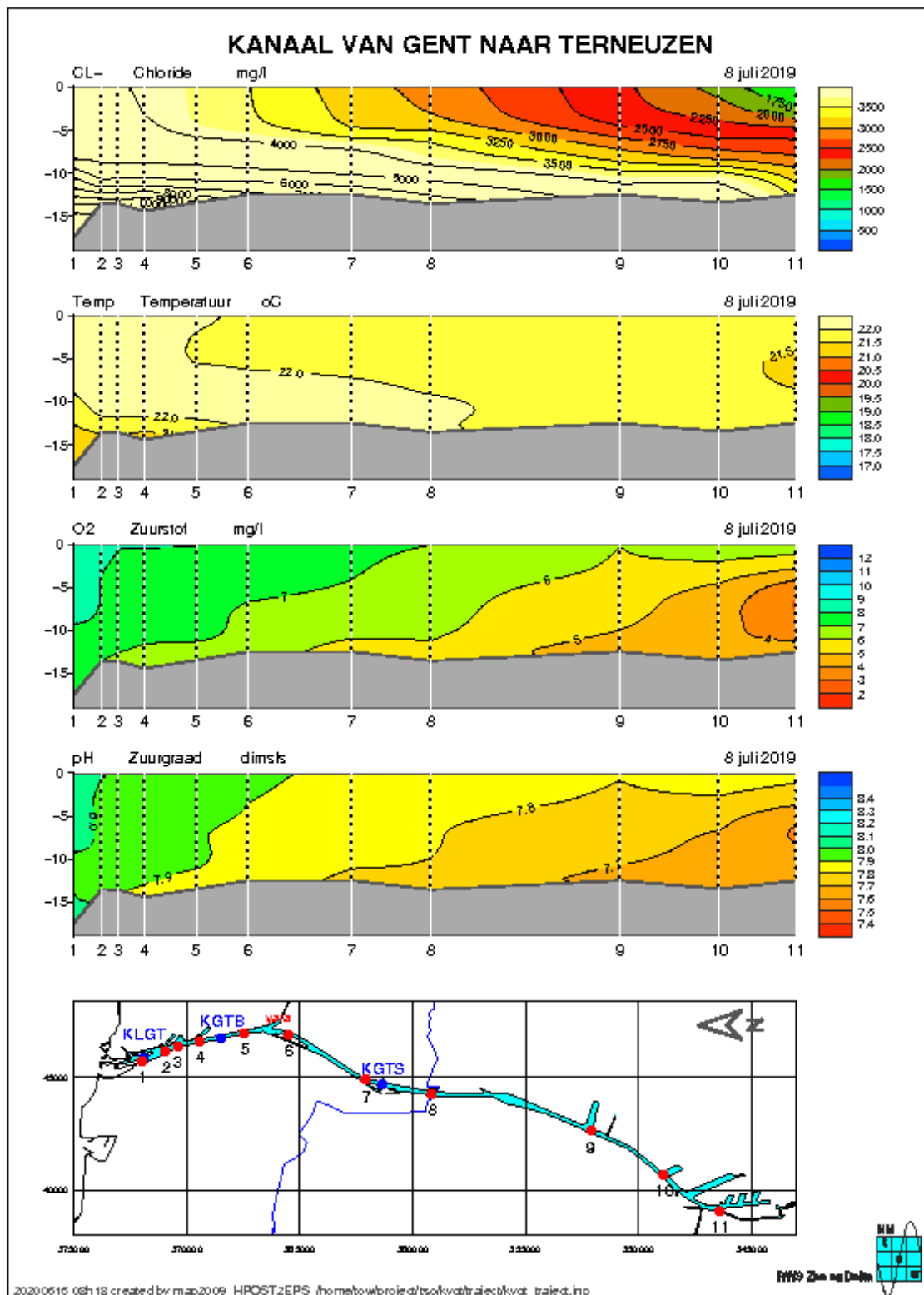
In het 1D SOBEK3-model (HKV, 2023) zijn de zoutlast bij het sluizencomplex en de dispersiecoëfficiënten (één waarde per tak) gekalibreerd op TSO-metingen. Bij TSO-metingen (temperatuur, saliniteit, oxide) worden de watertemperatuur, saliniteit en het zuurstofgehalte een aantal keer per jaar gemeten over de lengte en diepte van het kanaal. Het 3D D-Flow FM-model moet ook worden gekalibreerd, bijvoorbeeld doordat bepaalde processen, zoals scheepvaart, niet worden meegenomen. De kalibratie is uitgevoerd met metingen uit de jaren 2016 en 2017. De modelprestaties zijn daarna onafhankelijk gevalideerd met metingen uit de jaren 2018, 2019 en 2020.

3.1 TSO-metingen

TSO-metingen worden periodiek uitgevoerd op 11 locaties langs het kanaal (Figuur 3-1). Hierbij worden de watertemperatuur, zout- en zuurstofconcentratie gemeten over de diepte met stappen van 1 m. Deze metingen geven een gedetailleerd beeld van de chlorideconcentratie over de diepte en lengte van het kanaal. Andere meetlocaties zijn niet meegenomen omdat deze geen gedetailleerde informatie geven over de zoutconcentratie over de diepte. Figuur 3-2 laat een voorbeeld van een meting zien, inclusief interpolatie naar een langspanprofiel langs de as van het kanaal.



Figuur 3-1: Meetlocaties langs het KGT



Figuur 3-2: Voorbeeld TSO-meting, bron: <https://waterberichtgeving.rws.nl/monitoring/tso-metingen/kanaal-gent-terneuzen>

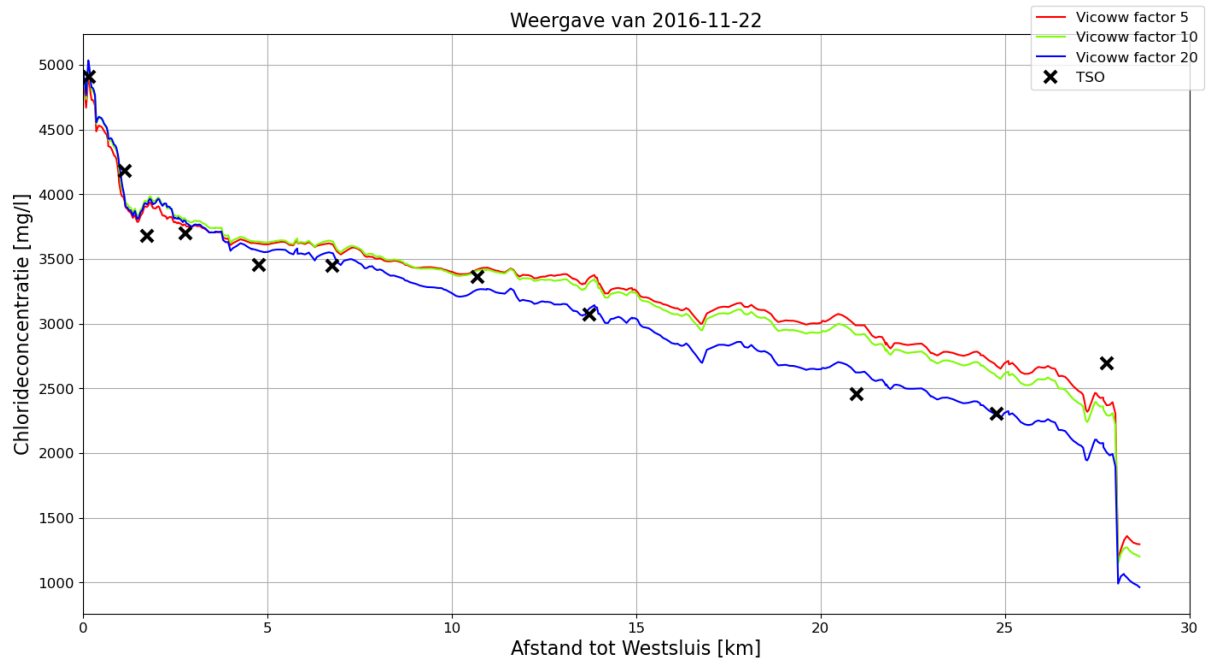
3.2 Kalibratie

In de kalibratie is de chlorideconcentratie in het model vergeleken met de chlorideconcentratie in de TSO-metingen. Voor het omzetten van chlorideconcentraties (g/l) in saliniteit (ppt of psu) is vermenigvuldigd met een standaardfactor van 1,807. Uit de testsimulaties volgt dat het basismodel aan de zoute kant was, vooral verderop in het kanaal. Testberekeningen laten zien dat een verlaging van de horizontale diffusiecoëfficiënt nauwelijks effect heeft op de verspreiding van zout door het kanaal. Een vergroting van de verticale diffusie ten opzichte van de standaardwaarde is ongewenst, omdat hiermee de gelaagdheid niet meer goed zou worden nagebootst.

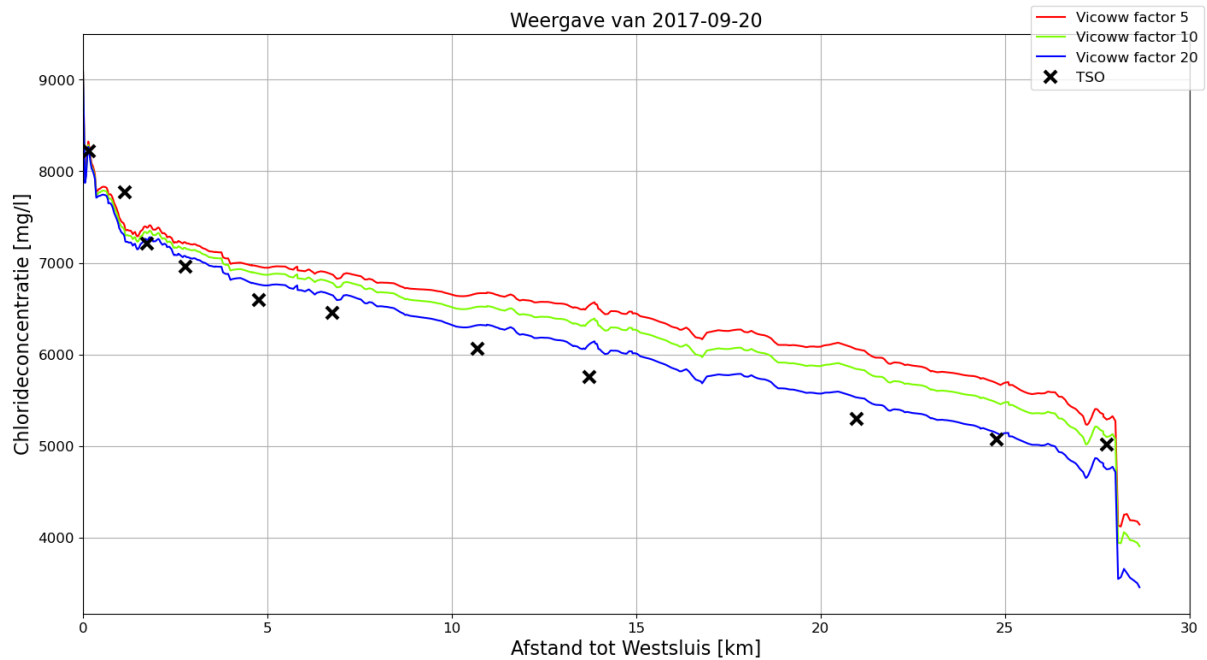
Bij de kalibratie van het model is daarom gekeken naar de viscositeit. Hierbij heeft het wel de voorkeur om qua stroming zo dicht mogelijk bij de turbulentiemodellering met het $k-\epsilon$ model te blijven, en hier dus geen relatief grote achtergrondwaarde voor de viscositeit aan toe te voegen. Omdat uit de testberekeningen bleek dat er behoefte was aan meer gelaagdheid en minder zoutindringing is binnen de kalibratie de verticale viscositeit gevarieerd. Deze coëfficiënt (standaardwaarde $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) beïnvloedt de intensiteit van menging in verticale richting en het proces van momentumtransport.

Dieptegemiddelde chlorideconcentratie

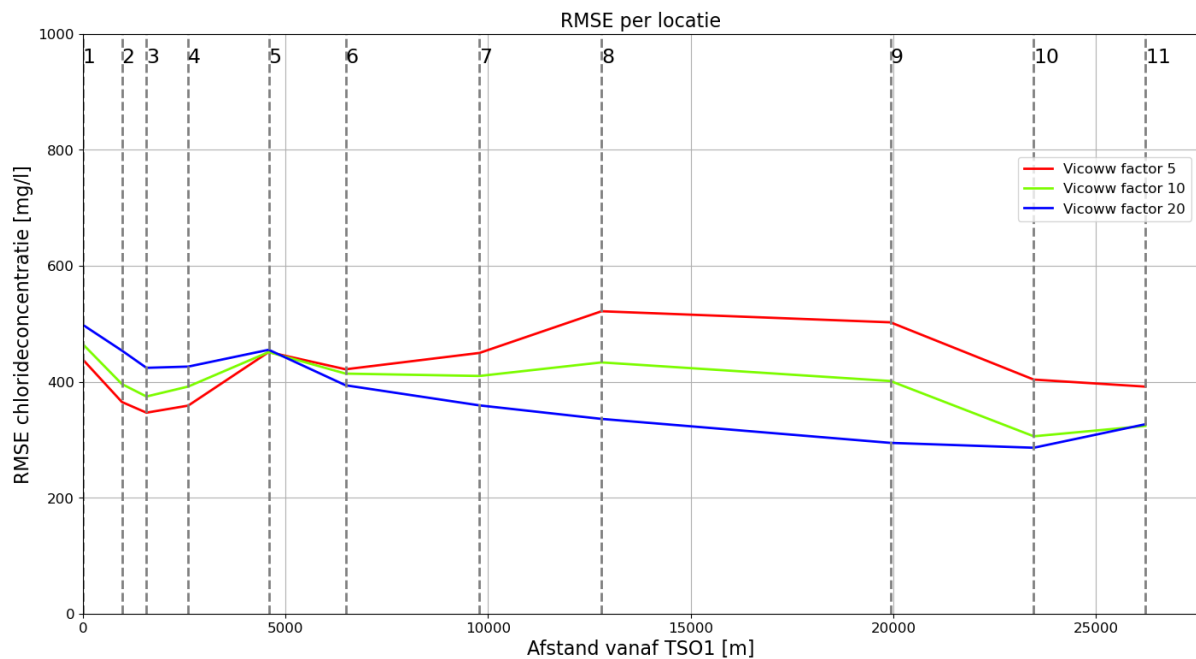
De dieptegemiddelde chlorideconcentratie is op verschillende tijdstippen en voor verschillende modelinstellingen vergeleken met de TSO-metingen. De TSO-metingen zijn hiervoor geïnterpoleerd naar dieptegemiddelde waarden om deze te vergelijken met het modelresultaat. Figuur 3-3 laat de chlorideconcentratie zien in een natte periode (lage chlorideconcentratie) voor verschillende verticale viscositeitscoëfficiënten (Vicoww). De chlorideconcentratie neemt geleidelijk af in de richting van Gent en neemt abrupt af in de voorhaven van Gent. De hoogte van de lijn wordt voornamelijk bepaald door hoeveelheid zout in het systeem. De helling wordt bepaald door de diffusie- en viscositeitscoëfficiënten die de mate van menging in het systeem bepalen. Figuur 3-3 laat het effect van een verhoging van de verticale viscositeit met een factor 10 of 20 in een natte periode zien. De verhoogde viscositeit zorgt voor een minder sterke dichtheidsstroming. Hierdoor is het zouter aan het begin van het kanaal en is er een sterkere afname van de chlorideconcentratie in de langsrichting van het kanaal. Figuur 3-4 laat zien dat bijna alle berekeningen de chlorideconcentratie bovengaan op het kanaal overschatten in droge periodes (met hoge concentraties). De toepassing van het model is voornamelijk gericht op droge zomers met hoge chlorideconcentraties en daarvoor heeft een verhoging met een factor 20 de voorkeur. Figuur 3-5 toont dat de verticale viscositeit verhoogd met een factor 20 de chlorideconcentratie het beste reproduceert op het grootste deel van het kanaal. Dichter bij de sluizen geeft de verhoging met factor 20 een iets grotere fout in de chlorideconcentratie.



Figuur 3-3: Dieptegemiddelde chlorideconcentratie voor verschillende modelinstellingen in vergelijking met de TSO-metingen in een periode met lage chlorideconcentratie.



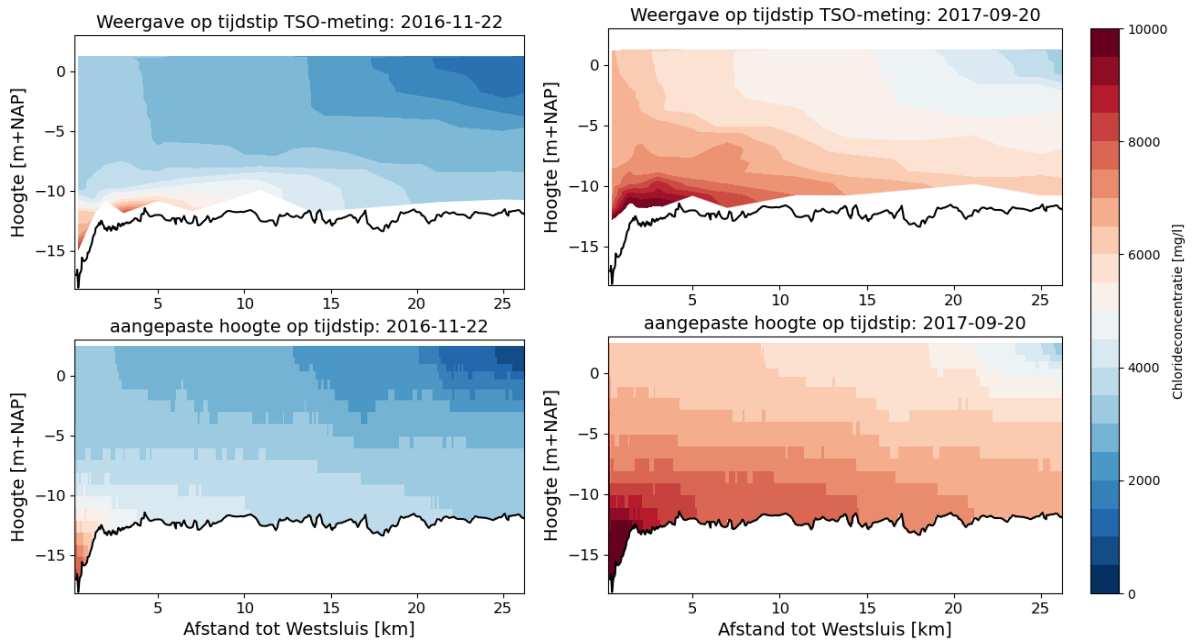
Figuur 3-4: Dieptegemiddelde chlorideconcentratie voor verschillende modelinstellingen in vergelijking met de TSO-metingen in een periode met hoge chlorideconcentratie.



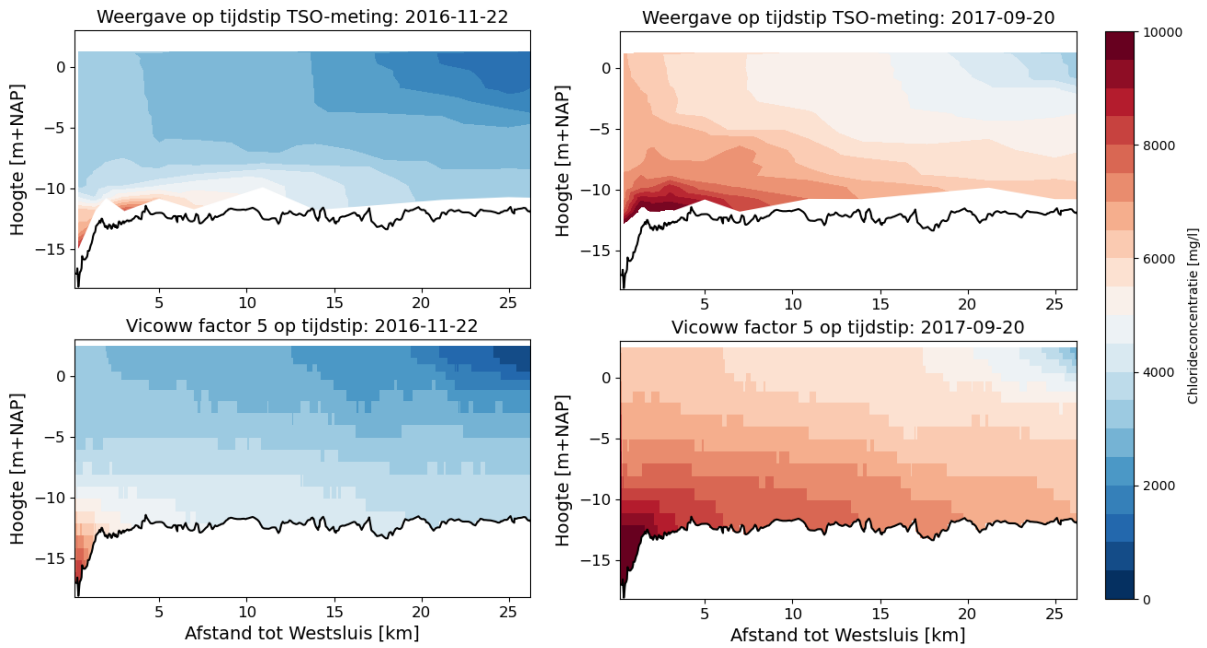
Figuur 3-5: Root Mean Squared Error (RMSE) van de chlorideconcentratie voor verschillende modelberekeningen ten opzichte van de TSO-metingen over de lengte van het kanaal.

Langsdoorsnede

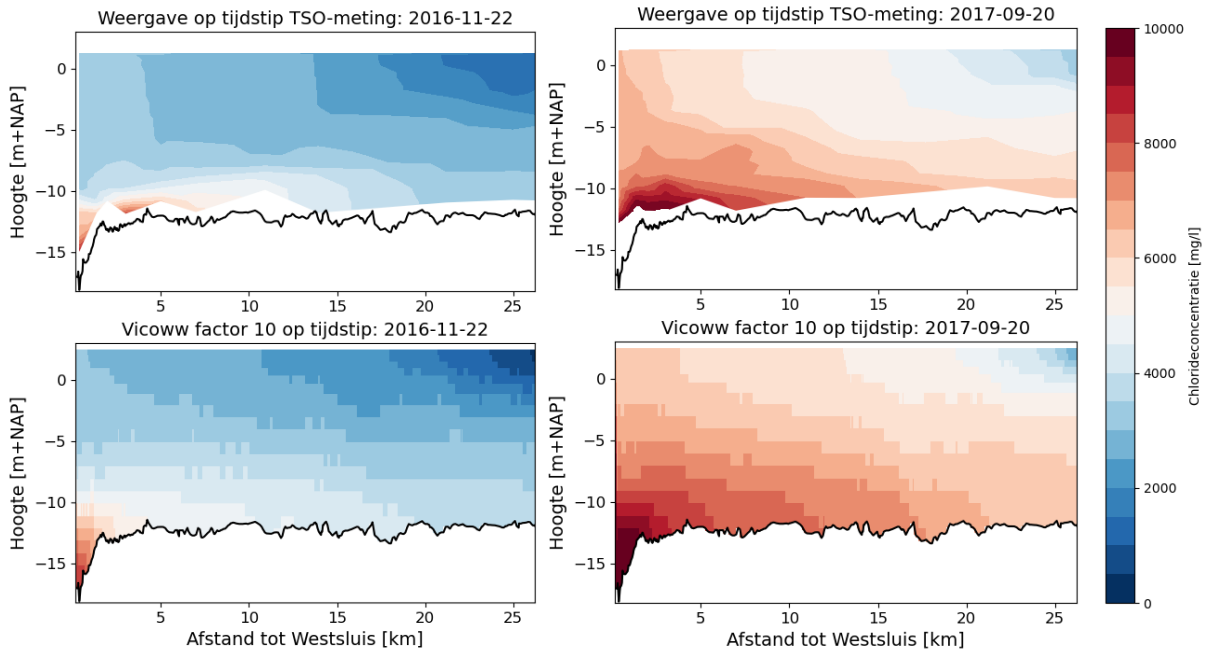
Figuur 3-6 t/m Figuur 3-9 laten de gesimuleerde chlorideconcentraties (onderste figuur) over een langsdoorsnede zien in vergelijking met de TSO-metingen (bovenste figuur). De figuren laten zien dat bij een standaardwaarde voor de verticale viscositeitscoëfficiënt (Figuur 3-6) de zouttong zich onvoldoende door het systeem verspreidt in een droge periode (rechts), maar in een natte periode (links) komt de verspreiding van het zout redelijk overeen met de TSO-meting. Wanneer de verticale viscositeit (met een factor 5) wordt vergroot neemt de menging af (Figuur 3-7). Hierdoor ontstaan er meer contourlijnen en is er meer variatie in chlorideconcentratie over de diepte. De figuren laten zien dat een vergroting van de verticale viscositeit ten opzichte van de standaardwaarde voor een verbetering van de gelaagdheid zorgt. De verhoogde verticale viscositeit met een factor 10 of 20 reproduceren de chlorideconcentratie het best.



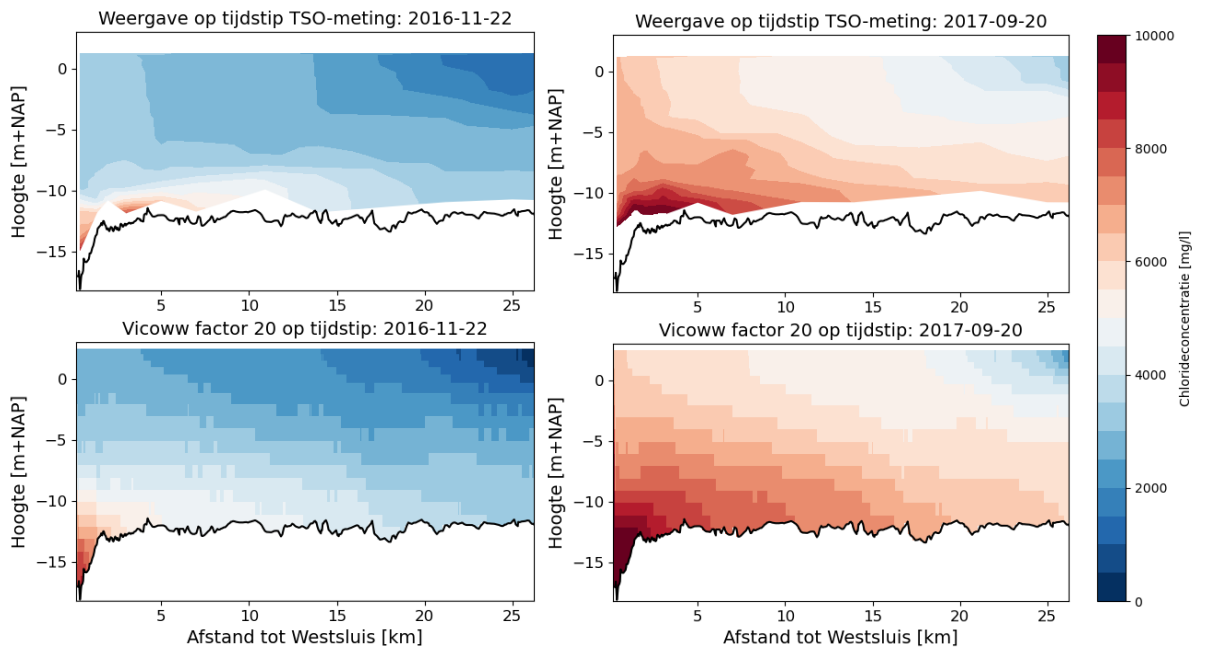
Figuur 3-6: De chlorideconcentratie voor twee langsdoorsnedes op basis van modelberekeningen (viscositeitscoëfficiënt standaardwaarde) in vergelijking met TSO.



Figuur 3-7: De chlorideconcentratie voor twee langsdoorsnedes op basis van modelberekeningen (viscositeitscoëfficiënt factor 5) in vergelijking met TSO.



Figuur 3-8: De chlorideconcentratie voor twee langdoorsneden op basis van modelberekeningen (viscositeitscoëfficiënt factor 10) in vergelijking met TSO.

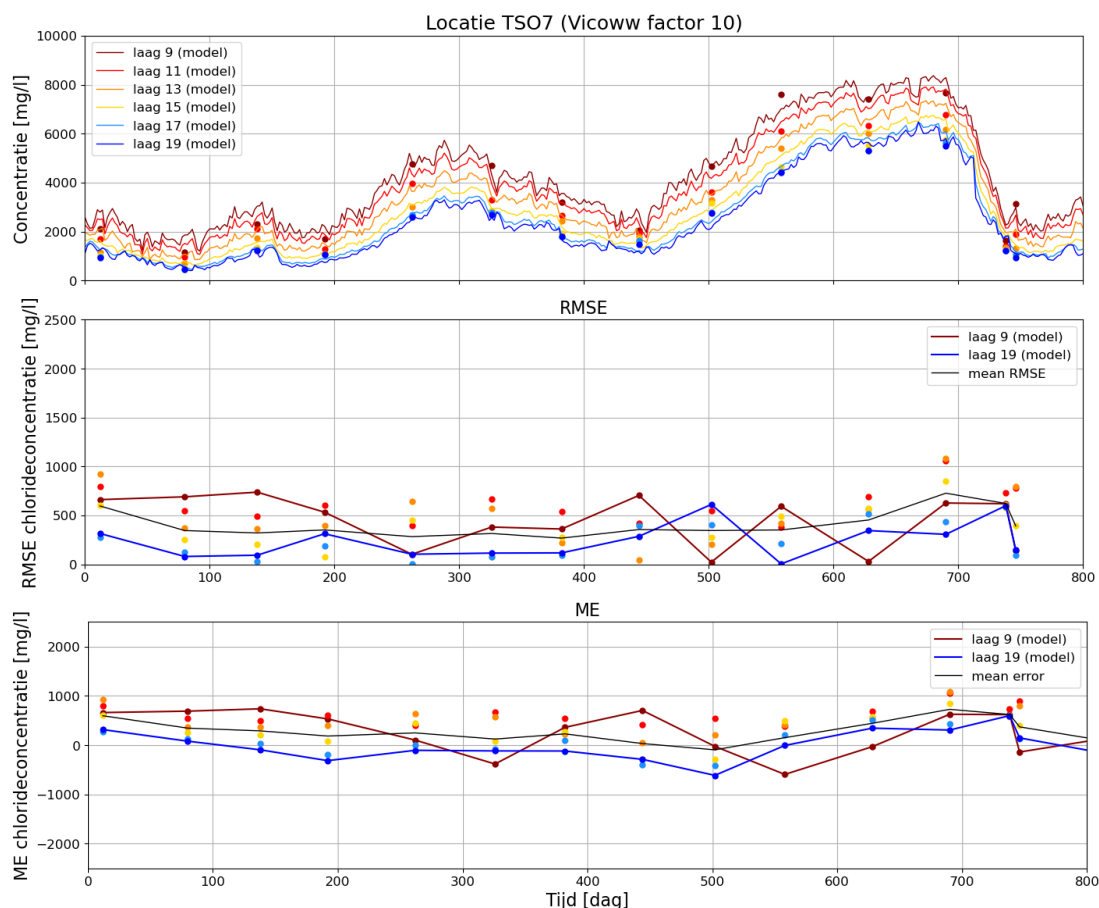


Figuur 3-9: De chlorideconcentratie voor twee langdoorsneden op basis van modelberekeningen (viscositeitscoëfficiënt factor 20) in vergelijking met TSO.

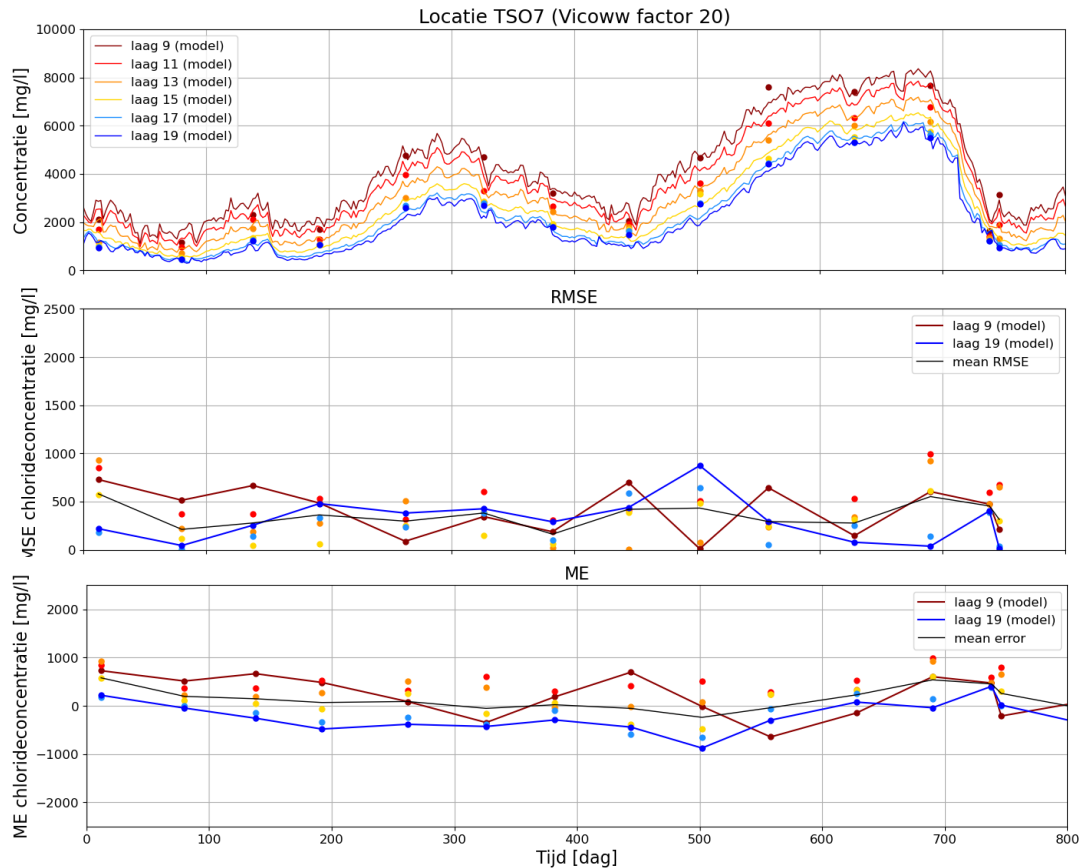
Chlorideconcentratie in de tijd

Figuur 3-10 en Figuur 3-11 laten de chlorideconcentratie zien op TSO-locatie 7 voor verschillende dieptes (bovenste figuur). Het middelste en onderste figuur tonen en RMSE en ME van de chlorideconcentratie voor twee lagen (9 en 19) en de gemiddelde fout. Voor zowel de RMSE als de ME geldt dat waardes dicht bij nul beter zijn.

Figuur 3-10 en Figuur 3-11 laten zien dat bij natte condities (0-400 dagen) de chlorideconcentratie en de gelaagdheid vrij goed worden gereproduceerd door het model. Bij droge condities (550-700 dagen) is de gelaagdheid in werkelijkheid iets groter dan wat in het model wordt gereproduceerd. Daarnaast lijkt het model vertraagd te reageren op grote veranderingen in chlorideconcentratie ten opzichte van de metingen. Zowel een verhoogde verticale viscositeit met een factor 10 als factor 20 presteren beide goed. Hierbij is gemiddeld (mean RMSE: zwarte lijn in middelste figuur) gezien factor 20 iets beter, maar komt een factor 10 bij het wateroppervlakte (blauwe lijnen) beter overeen met de metingen. Bij de gemiddelde fout (ME) is ook zichtbaar dat bij het wateroppervlakte (blauwe lijn in onderste figuur) een factor 10, in met name achterin het model, beter presteert. Op basis van het bovenstaande reproduceert een verhoogde verticale viscositeit met een factor 10 de chlorideconcentratie het best.



Figuur 3-10: De chlorideconcentratie in de tijd (viscositeitscoëfficiënt factor 10) op verschillende dieptes op TSO-locatie 7 met daarbij de RMSE en ME in tijd op deze locatie.



Figuur 3-11: De chlorideconcentratie in de tijd (viscositeitscoëfficiënt factor 20) op verschillende dieptes op TSO-locatie 7 met daarbij de RMSE en ME in tijd op deze locatie.

Gekozen instellingen

Op basis van de resultaten van bovenstaande berekeningen is gekozen voor het verhogen van de verticale viscositeitscoëfficiënt met factor 10 ten opzichte van de standaardwaarde. Deze keuze is gemaakt omdat:

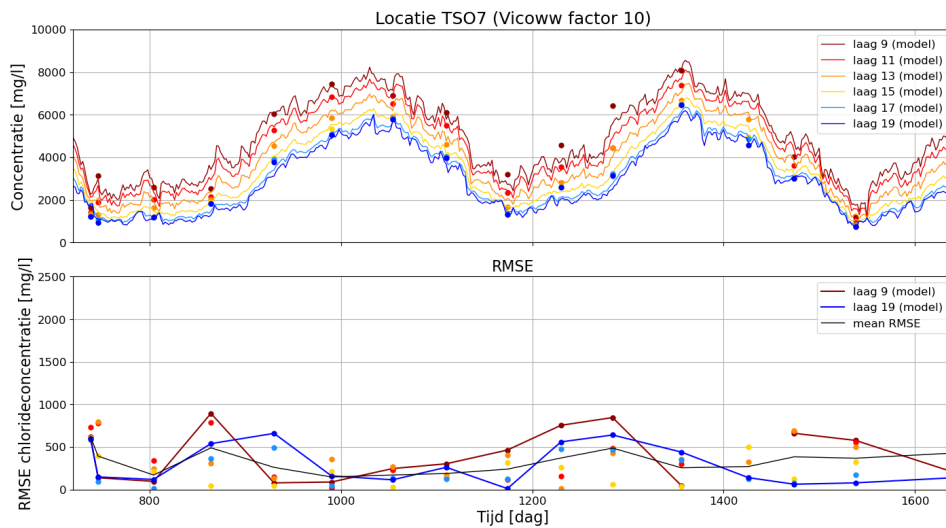
- Factor 10 betere resultaten geeft in de bovenste lagen van het model. Dit is de chlorideconcentratie aan het wateroppervlak. Deze waarde is belangrijker dan de chlorideconcentratie dieper in het water omdat de Moervaart en andere zijtakken voornamelijk beïnvloed worden door concentraties bij het oppervlak en dat onttrekkingen door (landbouw-)bedrijven vaak ook bij het wateroppervlakte plaatsvinden.
- Factor 10 en factor 20 geven de beste resultaten, door te kiezen voor factor 10 blijven we qua stroming dicht bij de turbulentiemodellering met het $k-\epsilon$ model.

Samengevat betekent dit dat we in de komende resultaten uitgaan van:

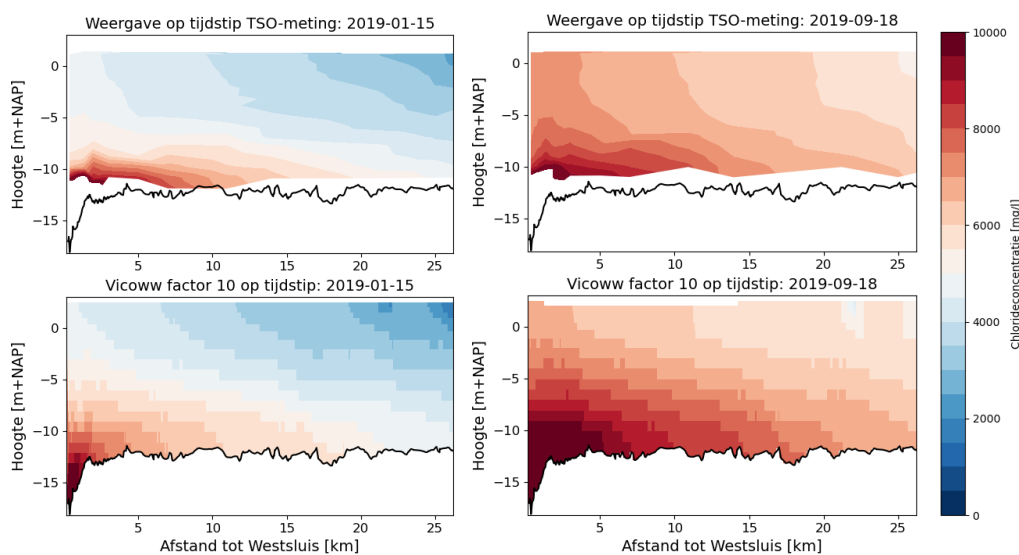
- Een verticale viscositeitscoëfficiënt van $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (een verhoging van de standaardwaarde met factor 10).

3.3 Validatie

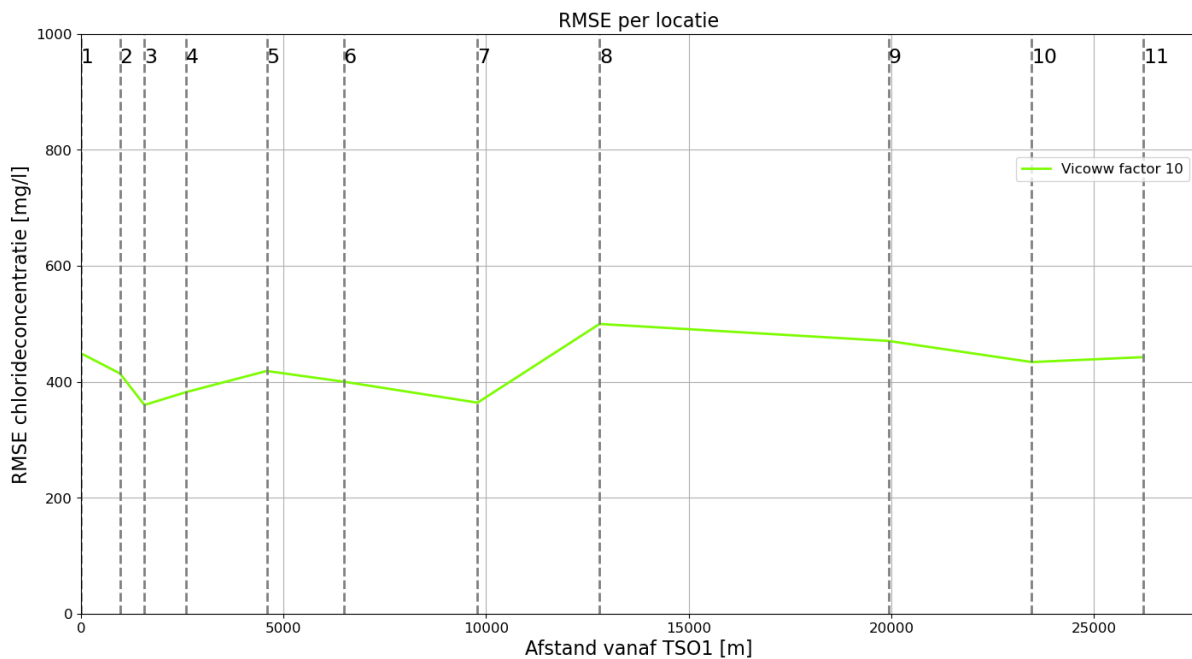
Het model wordt gevalideerd voor de jaren 2018 en 2019 met elk een droge periode (Figuur 3-12). Voor de validatieberekening is het model herstart vanuit de kalibratieberekening. Hierdoor is er geen spin-up periode. Het resultaat volgt de trend van de chlorideconcentratie behoorlijk goed (Figuur 3-12). In droge periodes is het model iets te zoet. Net als in de kalibratieberekening lijkt het model bij een grote toename in chlorideconcentratie trager te reageren dan de metingen. Figuur 3-13 laat zien dat in een natte periode de gemeten zouttong vergelijkbaar is met het model, maar dat het gesimuleerde oppervlaktewater wel wat zoeter is. In een droge periode is de locatie van de zouttong tussen metingen en het model ook vergelijkbaar, het model is wel wat zouter in het midden van de waterkolom. De resultaten laten zien dat het model geschikt is om de trends en gelaagdheid na te bootsen en daarom geschikt is voor effectenstudies. De gemiddelde onnauwkeurigheid van het model is ongeveer 450 mg/l (RMSE, zie Figuur 3-14). Dit is in lijn met de kwaliteit van het NZK/ARK-model (Deltares, 2020). Seizoengemiddeld is deze onnauwkeurigheid waarschijnlijk kleiner doordat de RMSE geen rekening houdt met de vertraging van het model ten opzichte van de metingen.



Figuur 3-12: De chlorideconcentratie in tijd (verticale viscositeitscoëfficiënt = $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) op verschillende dieptes op TSO-locatie 7 met daarbij de RMSE in tijd op deze locatie.



Figuur 3-13: De chlorideconcentratie voor twee langsdoorsneden op basis van modelberekeningen (viscositeitscoëfficiënt = $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) in vergelijking met TSO.



Figuur 3-14: De RMSE in de validatieperiode over de lengte van het kanaal.

Vergelijking met stroomsnelheidsmetingen

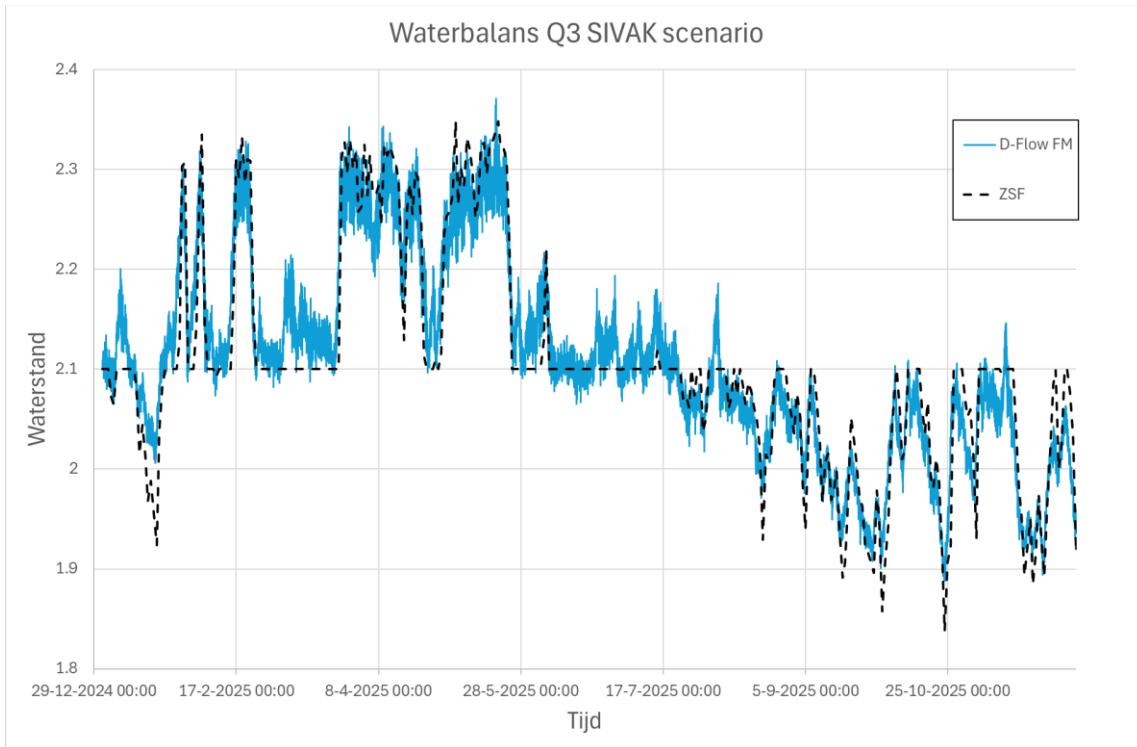
Berekende stroomsnelheden zijn na de kalibratie en validatie vergeleken met gemeten stroomsnelheden die Rijkswaterstaat en Waterloopkundig Laboratorium hebben laten uitvoeren op 17 januari en 15 mei 2018. Op beide momenten is op de elf TSO-locaties in het kanaal een ADCP-meting verricht. De berekende stroomsnelheden en gemeten stroomsnelheden laten nagenoeg voor alle locaties een vergelijkbare trend zien (zie bijlage F). Ondanks enerzijds de onzekerheden in de ADCP-meting (één moment op de dag, effect van scheepvaart en andere factoren) en anderzijds de onzekerheden in het model, geeft deze vergelijking een goed beeld van de prestatie van het model. Het verhogen van de viscositeit in de kalibratie zorgt niet voor ongewenste effecten, het model simuleert stroomsnelheden vergelijkbaar met de metingen.

3.4 Testberekening NST

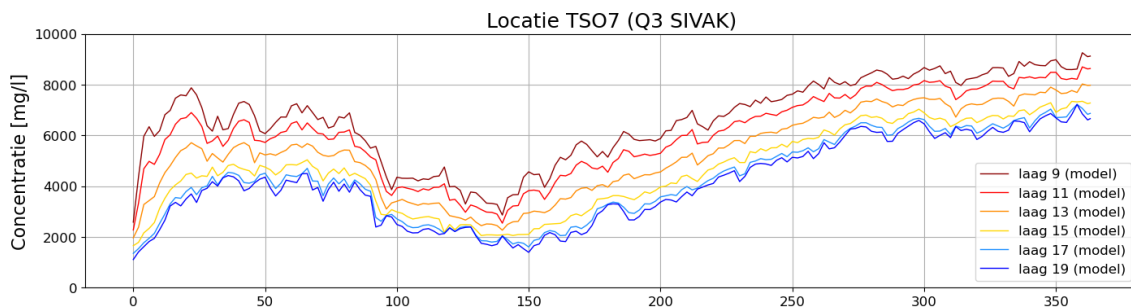
Gedurende het project is de Baseline schematisatie geüpdatet. De testberekening met de NST is uitgevoerd met de definitieve Baseline schematisatie inclusief een aanpassing aan de geometrie zoals beschreven in paragraaf 2.7. De kalibratie en validatieberekening is ook opnieuw uitgevoerd maar liet geen significante verandering zien.

De testberekening met NST is uitgevoerd voor een droge winter en droge zomer. In een droge winter is de afvoer van bovenstrooms relatief groot ten opzichte van de zomercondities. De waterstand in het kanaal neemt daardoor langzaam toe en neemt vervolgens in de droge zomer weer af. De waterstandvariatie volgt vrij goed de variatie in de zeesluisformulering, maar varieert als gevolg van verschillende processen (translatiegolven, etc) in het 3D-model wel meer (Figuur 3-15). Figuur 3-16 laat de chlorideconcentratie zien zoals berekend op basis van de saliniteit in het model. De initiële conditie van het 3D model sluit niet goed aan bij de randvoorwaarden maar na 100 dagen is het model voldoende ingespeeld. De chlorideconcentratie ligt met de NST een stuk hoger dan bij berekeningen zonder NST. Vooral in de droge zomer is de chlorideconcentratie hoog. De trend die het

3D-model laat zien komt redelijk overeen met de resultaten van het 1D SOBEK-model (Figuur 3-17) en laat vergelijkbare chlorideconcentraties zien. Dit geeft voldoende vertrouwen in het 3D-model.



Figuur 3-15: Waterstandsvariatie voor de berekening met NST.



Figuur 3-16: Chlorideconcentratie bij TSO-locatie 7 voor de testberekening met NST.



Figuur 3-17: Dieptegemiddelde chlorideconcentratie volgens het SOBEK-model (HKV,2023).

4 Discussie

4.1 Zoutlast sluizencomplex

De prestatie van het model hangt sterk af van de randvoorwaarde voor zout. In tegenstelling tot het 1D SOBEK3-model (HKV, 2023) is in het 3D D-Flow FM-model geen reductie van de zoutlast die volgt uit de ZSF nodig om aan te sluiten bij de gemeten chlorideconcentraties. Wel is aandacht nodig voor een aantal onderdelen van de ZSF en hoe die doorwerken naar de situatie met de NST:

- Het zoutgehalte aan de buitenzijde (in de buitenhaven) heeft een sterke invloed op de berekende zoutlast. De geometrie van de buitenhaven gaat in de nieuwe situatie veranderen, het toeleidingskanaal tussen Westerschelde en sluizen wordt breder. Hierdoor liggen de concentraties voor de sluisdeuren dichterbij de concentraties op de Westerschelde en zal het hoger uitvallen. Met een model van de buitenhaven en/of metingen is het mogelijk om meer grip te krijgen op de chlorideconcentraties voor de sluisdeuren. Een (eenvoudig) model van de buitenhaven kan meer inzicht geven in de wijziging van de zoutgehalten van de oude geometrie naar de nieuwe geometrie van de buitenhaven bij de verschillende sluiskolken.
- De zoutlast is gevoelig voor de deuropentijden van de sluisdeuren. Hier is weinig tot geen informatie over beschikbaar. Voor de NST is het daarom van belang dat deze goed worden geregistreerd zodat toekomstige modellen gemeten waarden kunnen gebruiken.
- De ZSF moet in principe iteratief worden toegepast omdat de zoutuitwisseling afhankelijk is van de chlorideconcentratie in het kanaal.
- Het continuspuien is in de huidige berekeningen niet los meegenomen maar als deel van het oppervlaktewaterspuien. Omdat het continuspuien vanuit de zoutvang gaat zou dit nog kunnen zorgen voor extra zoutexport. Wat dit betekent voor de zoutlast moet nog nader onderzocht worden. Hiervoor is aanvullend informatie nodig, zoals de beschikbare capaciteit voor continuspuien. Vooralsnog is weinig bekend over het continuspuien.

Voor een accuratere schatting van de verzilting van het KGT dienen de scenarioberekeningen opnieuw uitgevoerd te worden met de aangepaste randvoorwaarden met inachtneming van de bovenstaande punten. Het advies is ook om na aanleg van de NST de zoutlast en de ZSF te kalibreren en valideren. Hiervoor is het van belang om de schutcycli in detail te registreren waarbij ook de deurbewegingen worden geregistreerd.

4.2 Zoutverspreiding in het kanaal

Een ander belangrijk aspect in het model is de verspreiding van het zout in (de bovenstroomse richting) van het kanaal. Dit is afhankelijk van de zoutlast bij het sluizencomplex, de uitwisseling van zout tussen het kanaal en de zoutvang, de menging als gevolg van scheepvaart en stroming, en de bovenstroomse aanvoer van zoetwater. Deze elementen zijn, met uitzondering van scheepvaart, zo goed mogelijk geschematiseerd. Doordat D-Flow FM deze mechanismen niet volledig kan oplossen, ontstaan er afwijkingen met de metingen die door kalibratie kunnen worden verkleind. De kalibratie (Hoofdstuk 3) laat echter zien dat andere coëfficiënten optimaler zijn gedurende droge perioden dan in natte perioden of aan het wateroppervlakte dan dieper in de waterkolom.

De mate waarin de verschillende mechanismen tot een afwijking leiden ten opzichte van de metingen is daarom waarschijnlijk variabel in ruimte en tijd.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Het ontwikkelde 3D D-Flow FM-model is in staat de globale trends, horizontale variaties en verticale variaties in de chlorideconcentratie in het kanaal Gent Terneuzen te reproduceren. Aangezien het model de trends in chlorideconcentratie kan reproduceren is het geschikt om het effect van maatregelen te bepalen ten opzichte van de referentie. De gemiddelde afwijking van het model ten opzichte van metingen (RMSE) is 450 mg/l chloride. Het verhogen van de viscositeit in de kalibratie zorgt niet voor ongewenste effecten, het model simuleert stroomsnelheden vergelijkbaar met stroomsnelheidsmetingen. De verwachting is dat het model seizoengemiddeld en bij de evaluatie van maatregelen ten opzichte van de referentie veel beter presteert.

De berekende watertemperatuur is niet geverifieerd. Industriële lozingen en onttrekkingen ontbreken en de watertemperatuur op de bovenrand bij Evergem is gebaseerd op de temperatuur in het KGT. Het model simuleert de juiste processen en kan in principe worden gebruikt om het effect van thermische lozing te bepalen. Om de nauwkeurigheid van zo'n studie te bepalen zijn aanvullende validatieberekeningen nodig.

5.2 Aanbevelingen

D-Flow FM model

- Modellen van het IJsselmeer en Haringvliet hebben laten zien dat een hele kleine laagdikte (12,5 cm) nodig is om de gelaagdheid goed te beschrijven. In dit project zijn er geen berekeningen gedaan met zulke dunne Z-lagen omdat bij een factor 2 verfijning de berekende zoutconcentratie niet significant verandert. Daarnaast is het model goed in staat de gelaagdheid te reproduceren. Extra berekeningen met dunnere Z-lagen kunnen laten zien hoeverre verticale verfijning tot 12,5 cm de nauwkeurigheid van het model verbetert.
- Het toepassen van een robuuste en automatische kalibratiemethodiek waarin voor verschillende parameters tegelijk kan worden gezocht naar de beste oplossing, eventueel ook met ruimtelijk variërende parameterwaardes.

Zeesluisformulering

- De invoer van de ZSF bevat grote onzekerheden zoals bijvoorbeeld de deur-bewegingen die niet expliciet worden geregistreerd. We bevelen daarom aan om deze wel goed en in detail te registreren na aanleg van de NST.
- De zoutlast reageert sterk op de invoer van de buitenconcentratie aan de Westerscheldezijde. Het lagere zoutgehalte bij de buitendeuren is met name van belang bij de Westsluis waar het zoete water in de voormalige geometrie van het sluzencomplex voor aanleg van de NST makkelijk bleef hangen door het smalle toeleidingskanaal. Metingen voor de nieuwe situatie worden sterk aanbevolen om dit scherper in beeld te krijgen.
- Een verbetering van de ZSF zodat deze geen foutmelding meer geeft als de chlorideconcentratie in de kolk kleiner is dan die aan de kanaalzijde. Dit in combinatie met het iteratief toepassen van de ZSF op basis van modelresultaten kan leiden tot een nauwkeuriger resultaat.

- De spuidebieten zijn nu daggemiddeld afgeleid op basis van de waterbalans en de capaciteiten van de verschillende spuumiddelen. Als er registraties van de spuikleppen beschikbaar zijn, is het mogelijk om de spuidebieten en bijhorende concentratie nauwkeuriger mee te nemen.

Referenties

Deltares (2020)

Ontwikkeling zesde generatie 3D Noordzeekanaal Amsterdam-Rijnkanaal model: Modelbouw, kalibratie en validatie. Deltares rapport 11205258-011-ZWS-0004, Wilbert Verbruggen en Jos van der Baan, 17 december 2020.

Deltares (2023a)

Specificaties zesde-generatie modellen met D-HYDRO: Generieke technische en functionele specificaties (v1-2023). Deltares rapport 11208053-012-ZWS-0024, Tony Minns, Aukje Spruyt en David Kerkhoven, 22 december 2022.

Deltares (2023b)

Memo procedure clipcontour: conceptmemo. Deltares, Ton Visser, 7 juni 2023.

HKV (2023a)

Verzilting Kanaal Gent-Terneuzen: Rapportage oppervlaktewatermodellering. Auteurs: Vincent Vuik en Paula Lambregts. In opdracht van de Vlaams Nederlandse Schelde Commissie. Referentie: PR4728.10.

HKV (2023b)

Metadata document Baseline-maatregel kg_uitb_a1. Auteurs: Jan-Willem van Lente en Joana Vieira da Silva. In opdracht van Deltares. Referentie: PR5018.10

Rijkswaterstaat (2015)

Rapportage proef uitschakelen luchtbellenschermen kanaalzijde West-, Midden- en Oostsluis Terneuzen. Auteurs: L. Dekker. 16 maart 2015

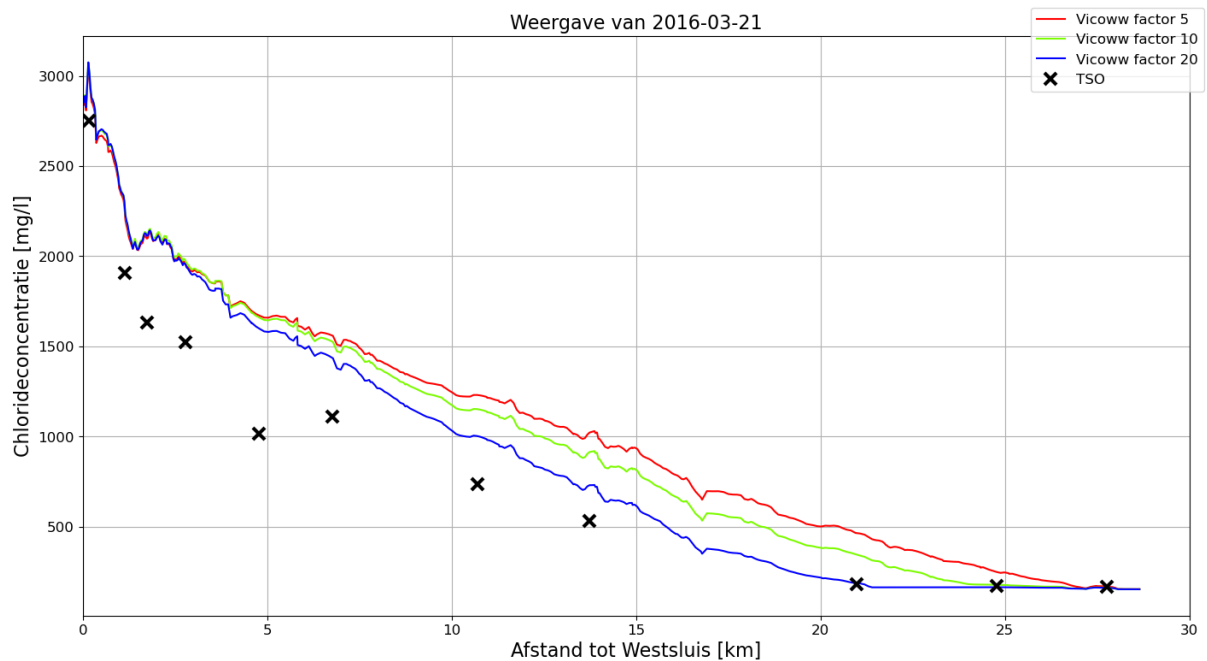
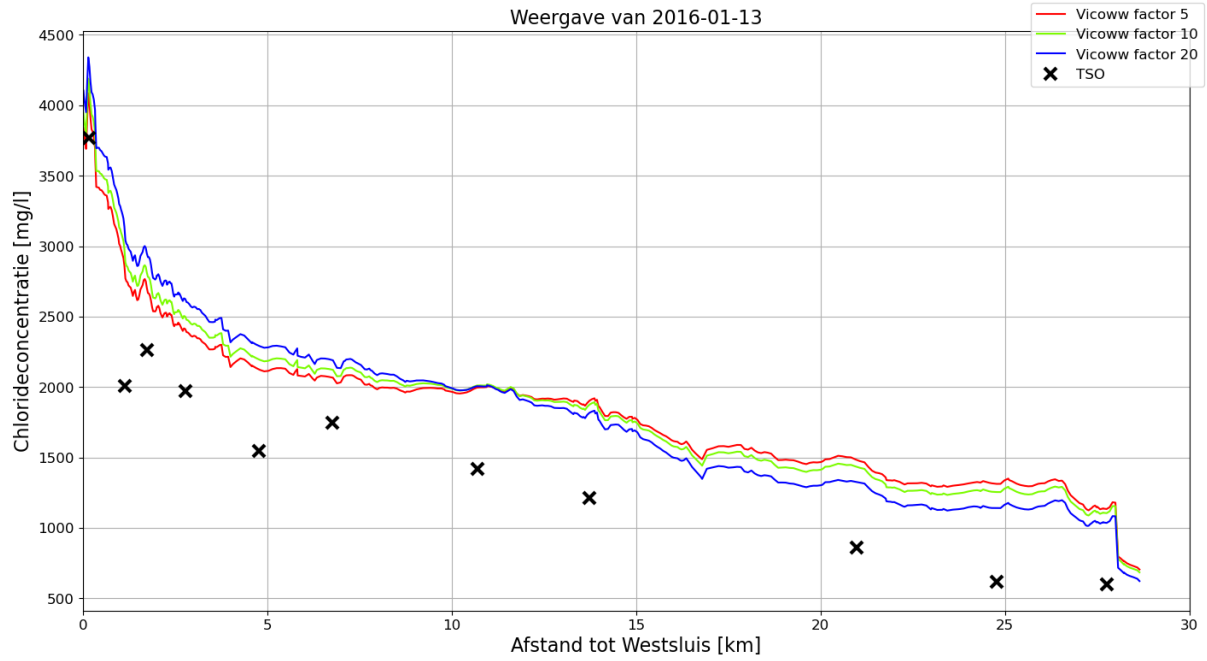
Witteveen & Bos (2023)

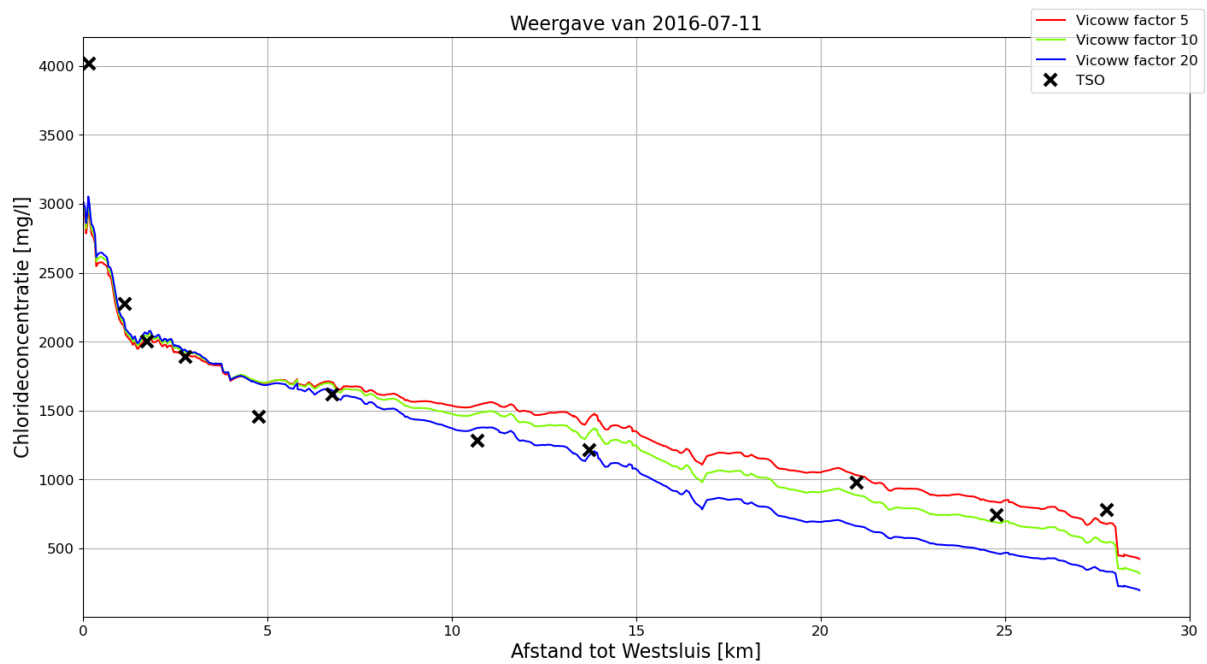
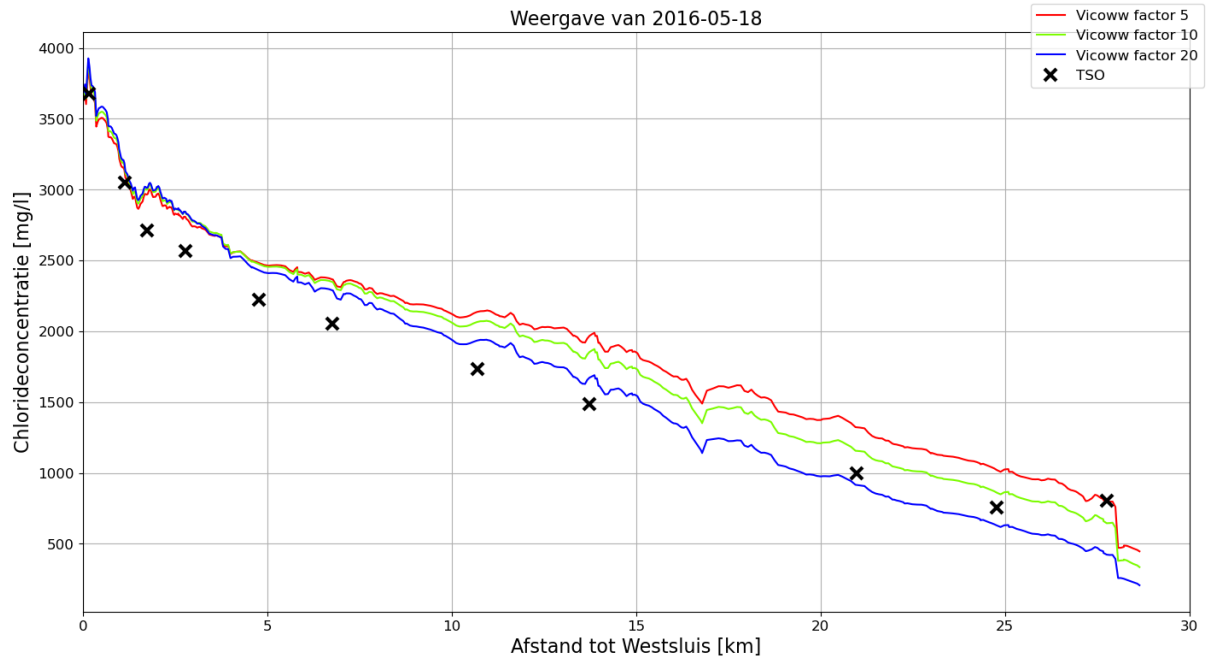
Effect sluisstremmingen sluizencomplex Terneuzen. Auteurs: I. Koevoets. In opdracht van de Vlaams Nederlandse Schelde Commissie. Referentie: 133870/23-003.446.

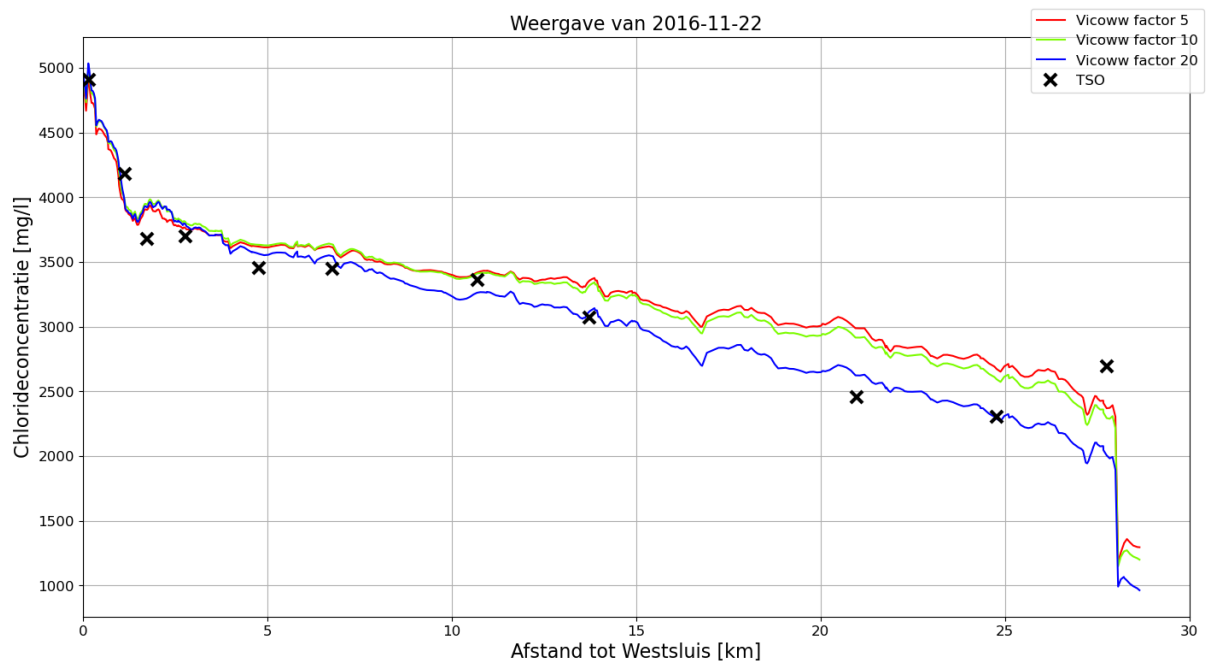
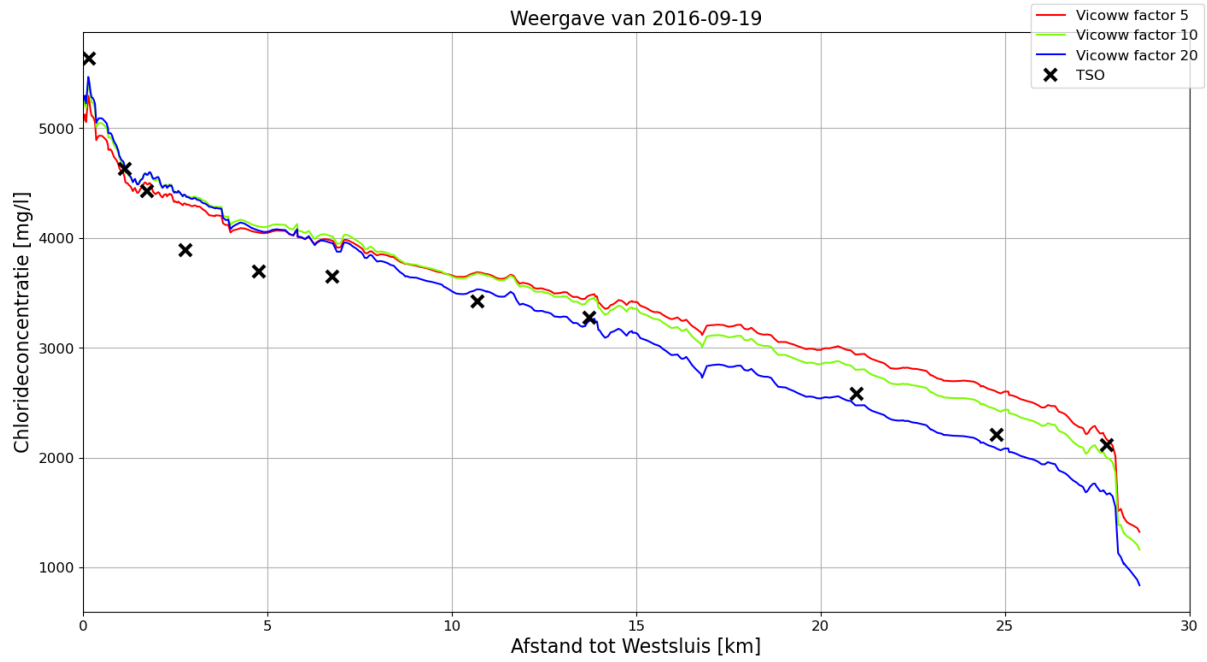
Bijlagen

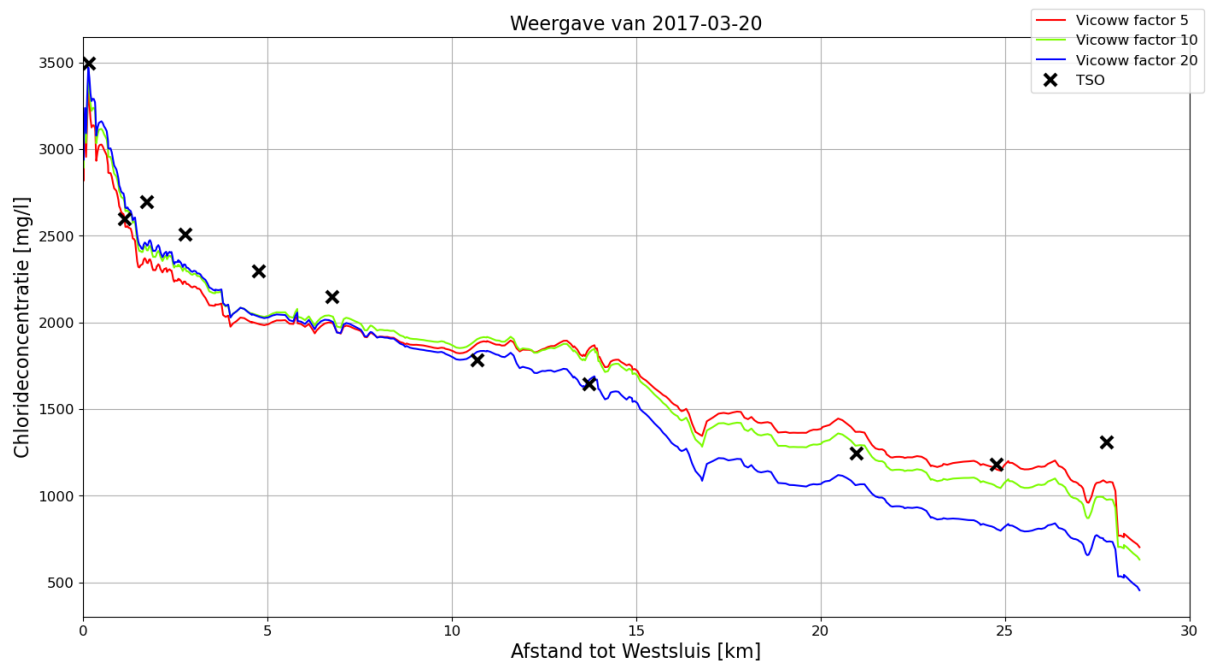
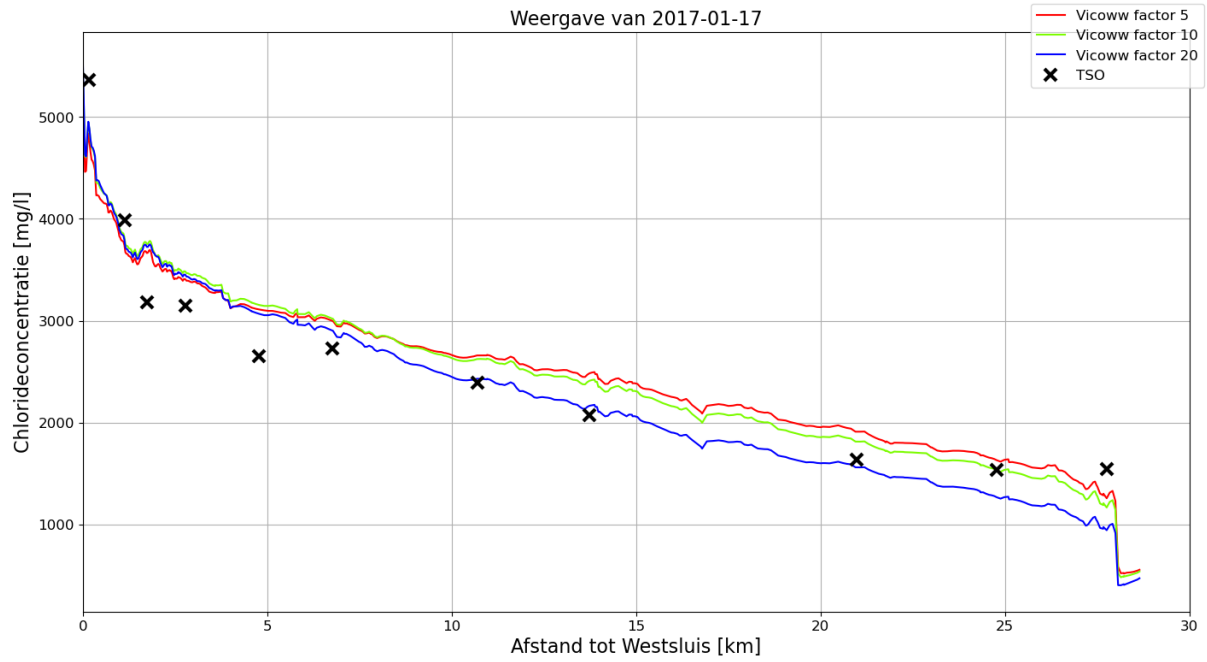
A Figuren kalibratie

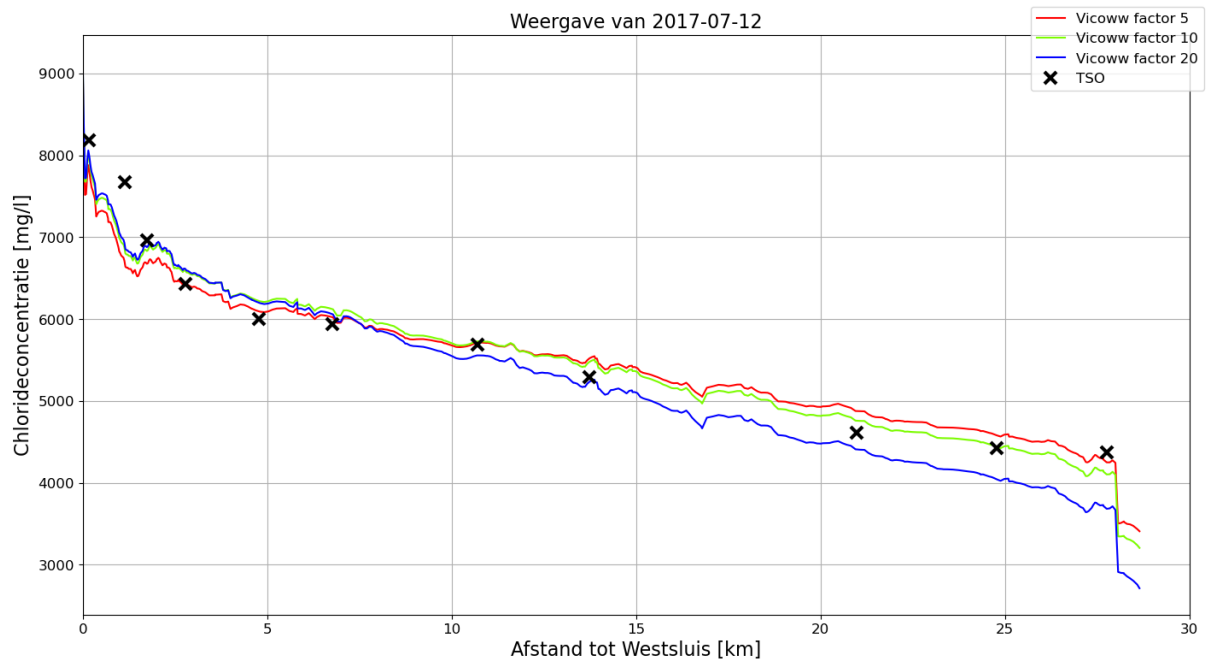
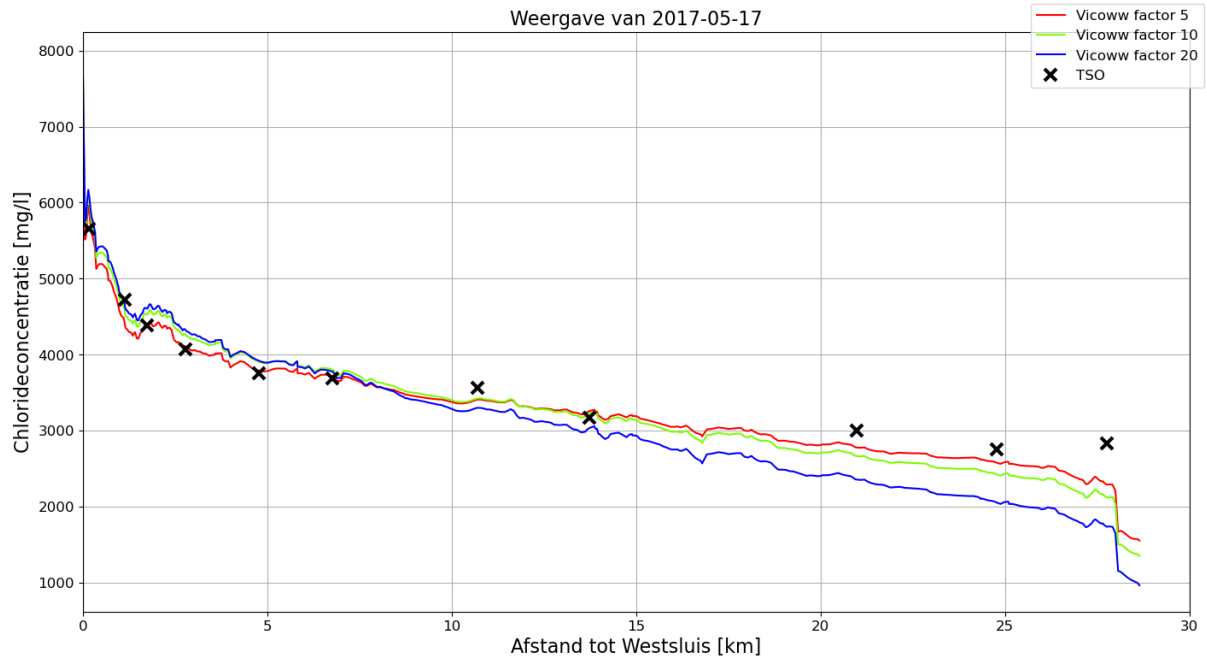
A.1 Dieptegemiddelde chlorideconcentratie

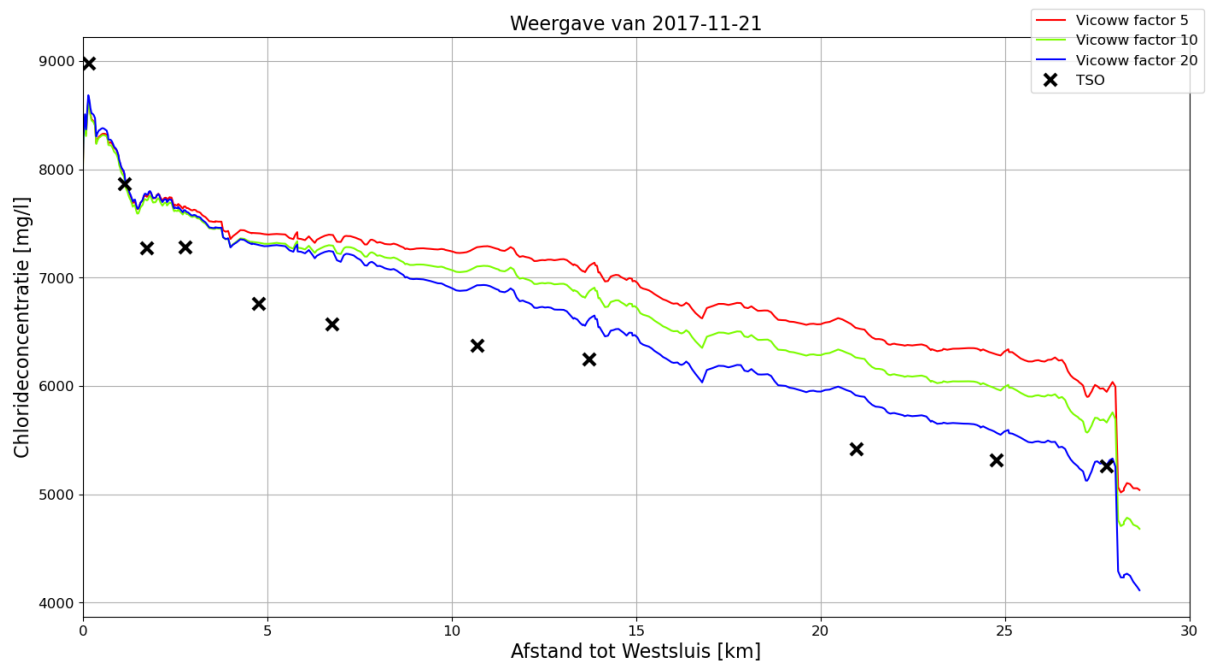
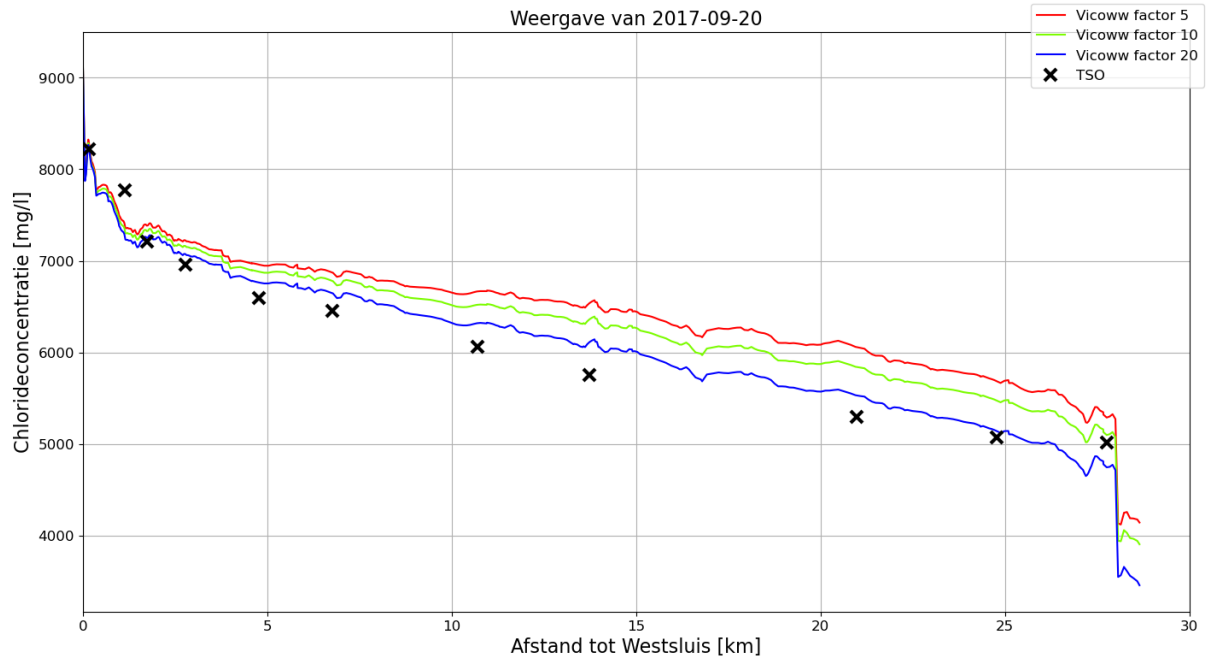


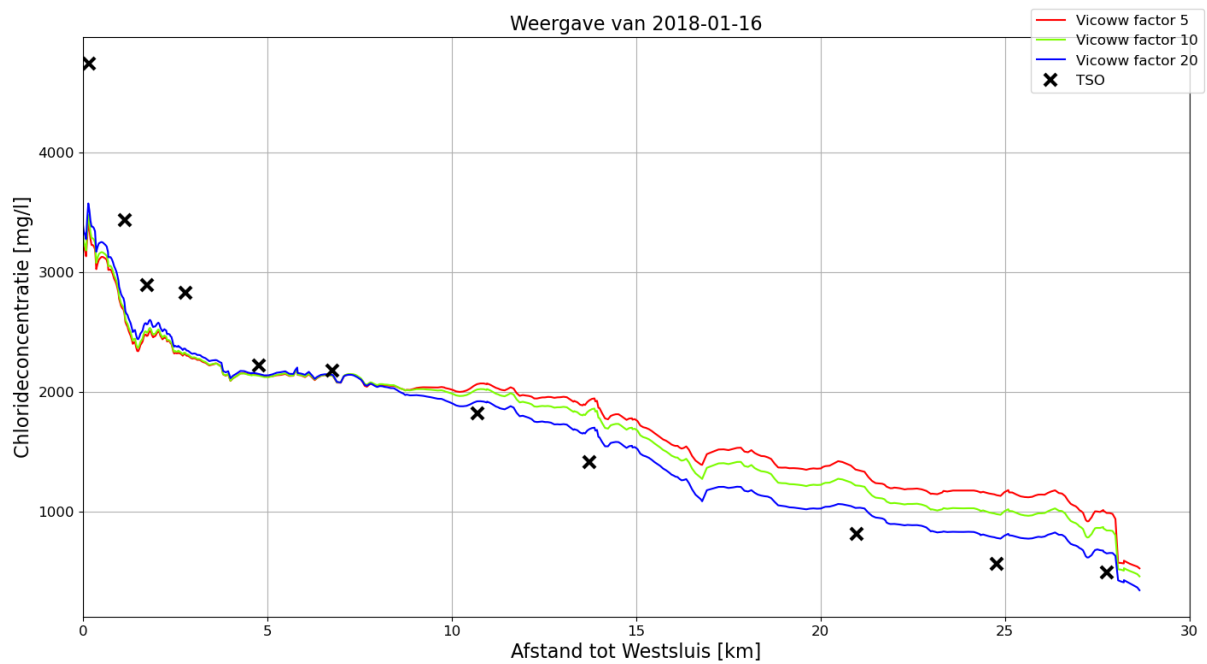
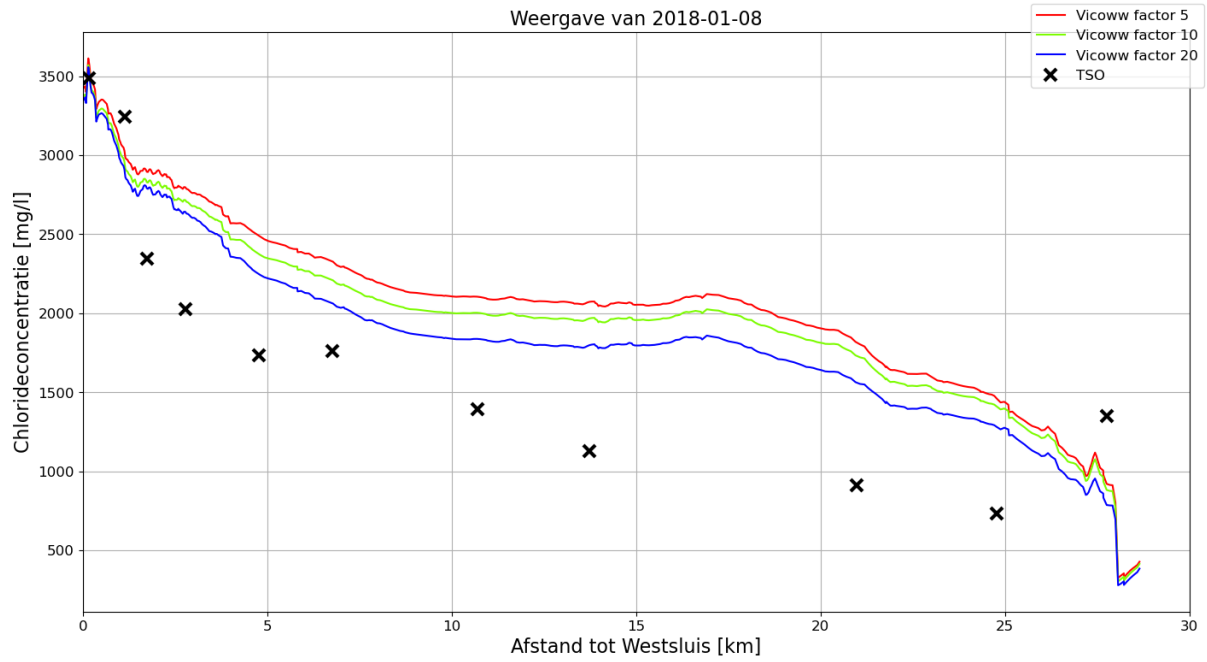






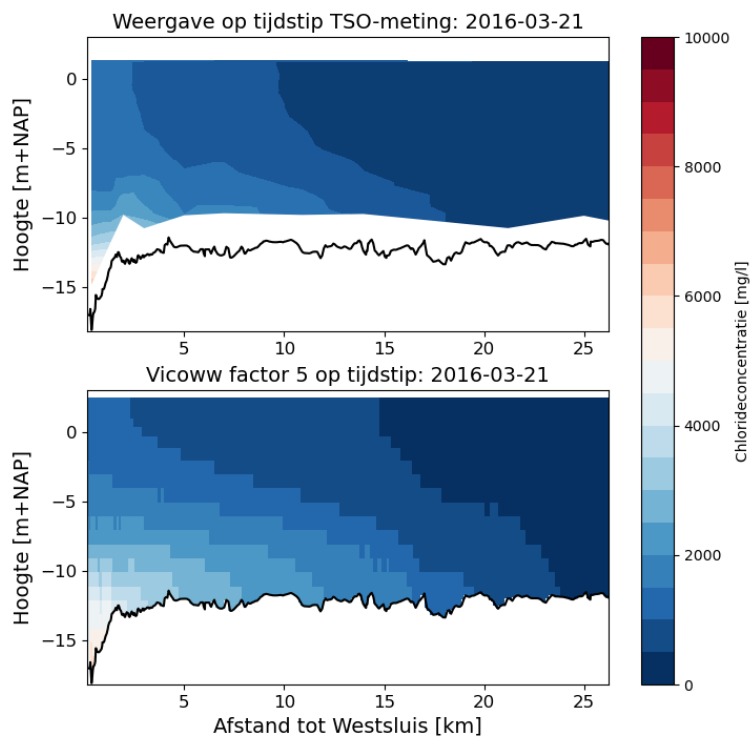
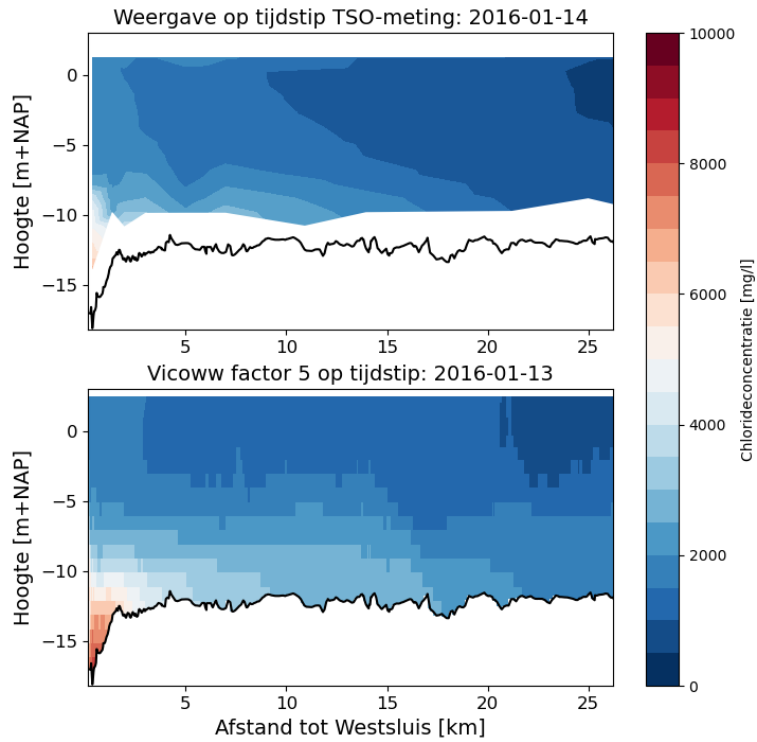


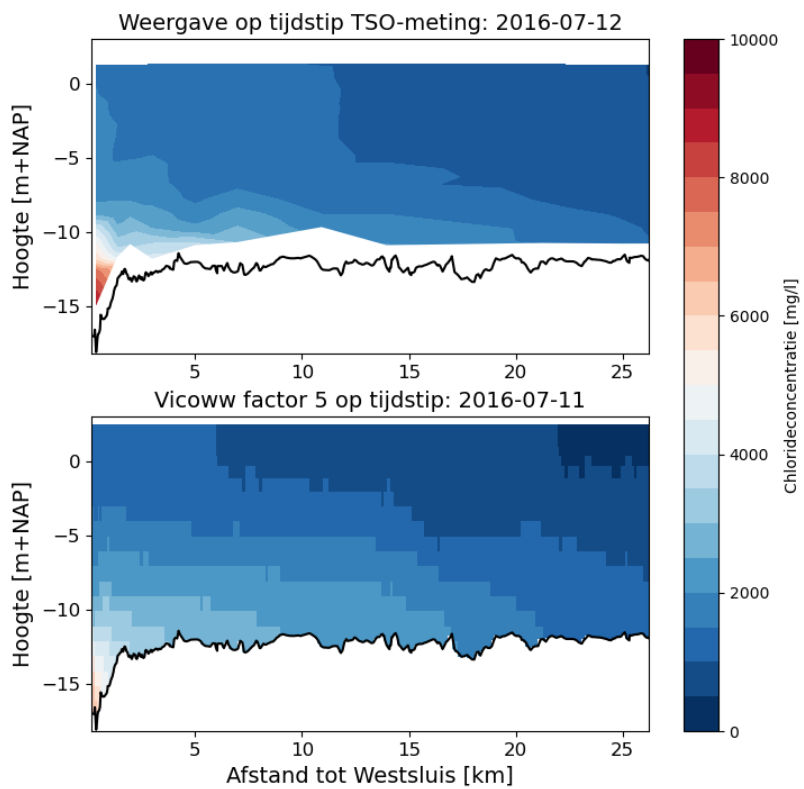
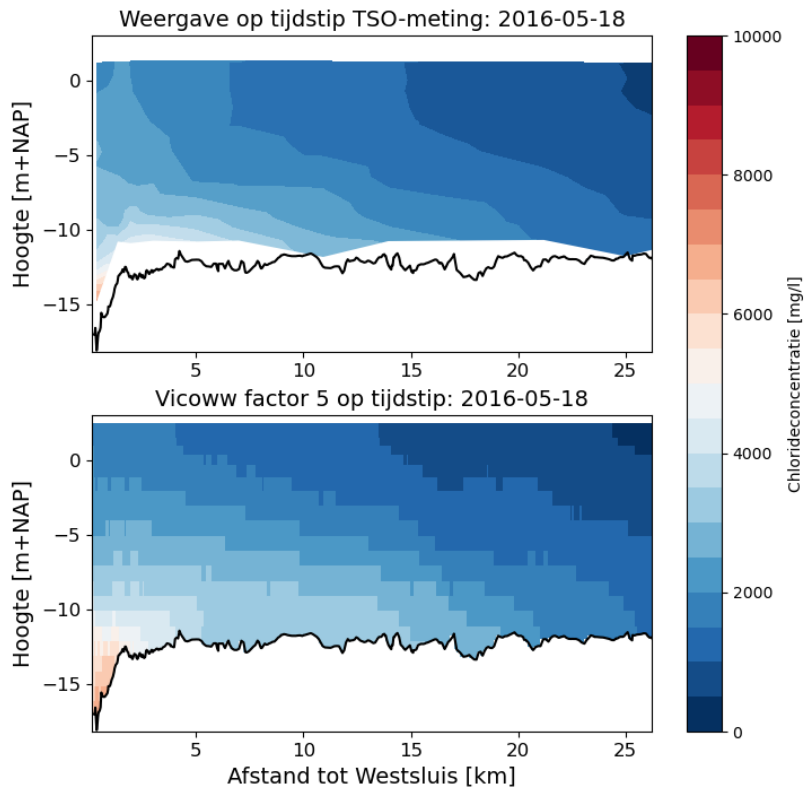


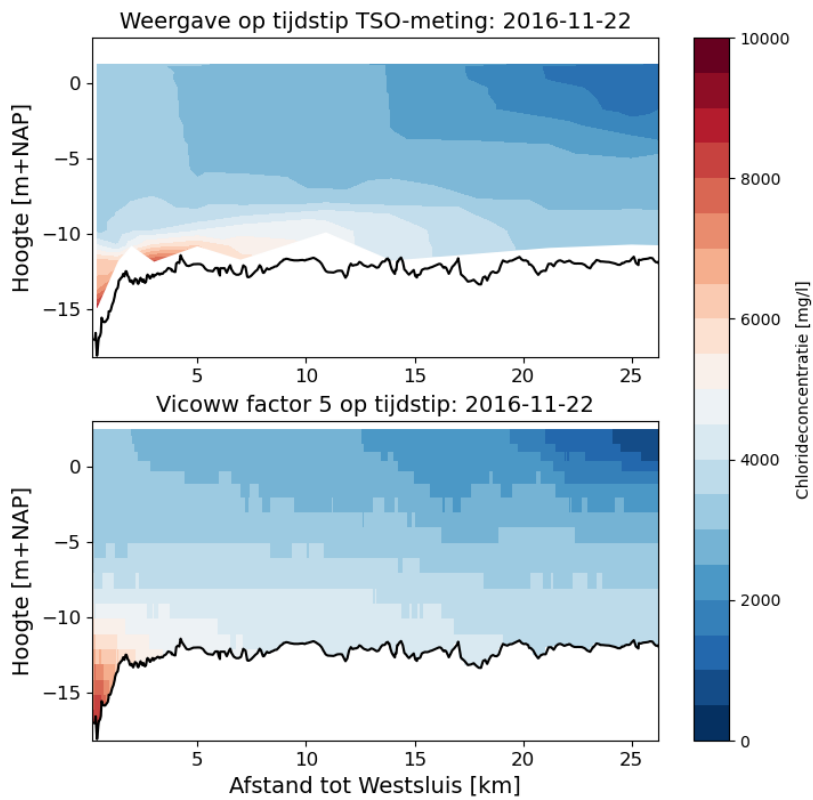
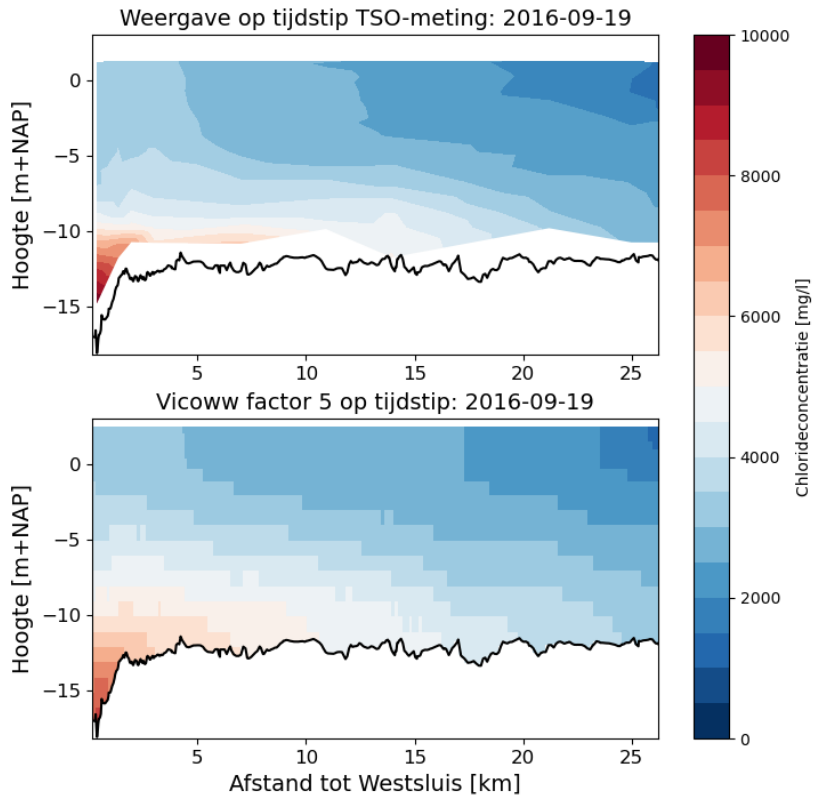


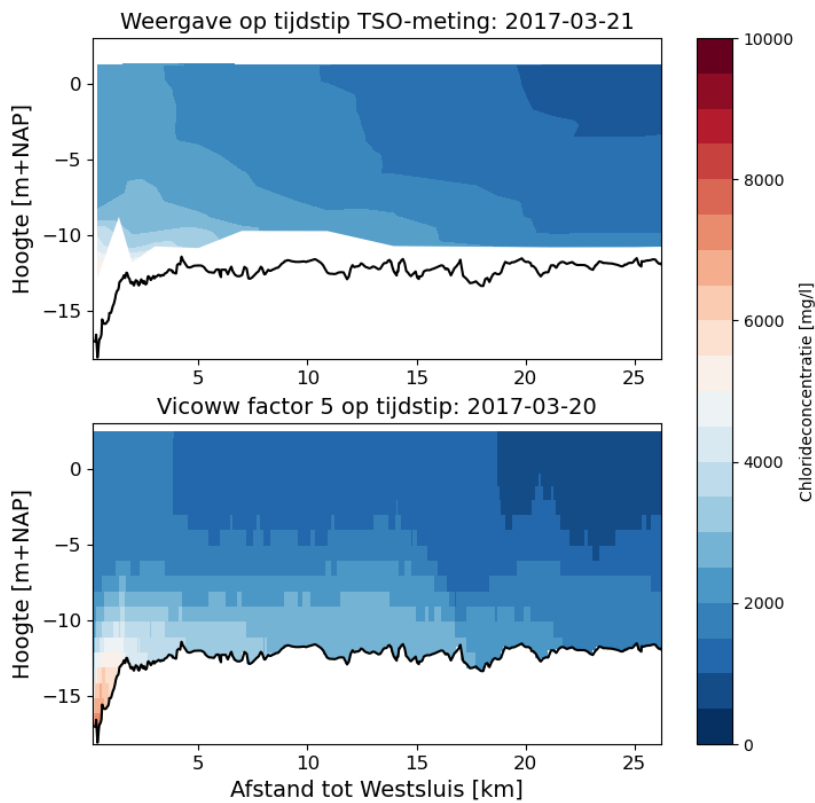
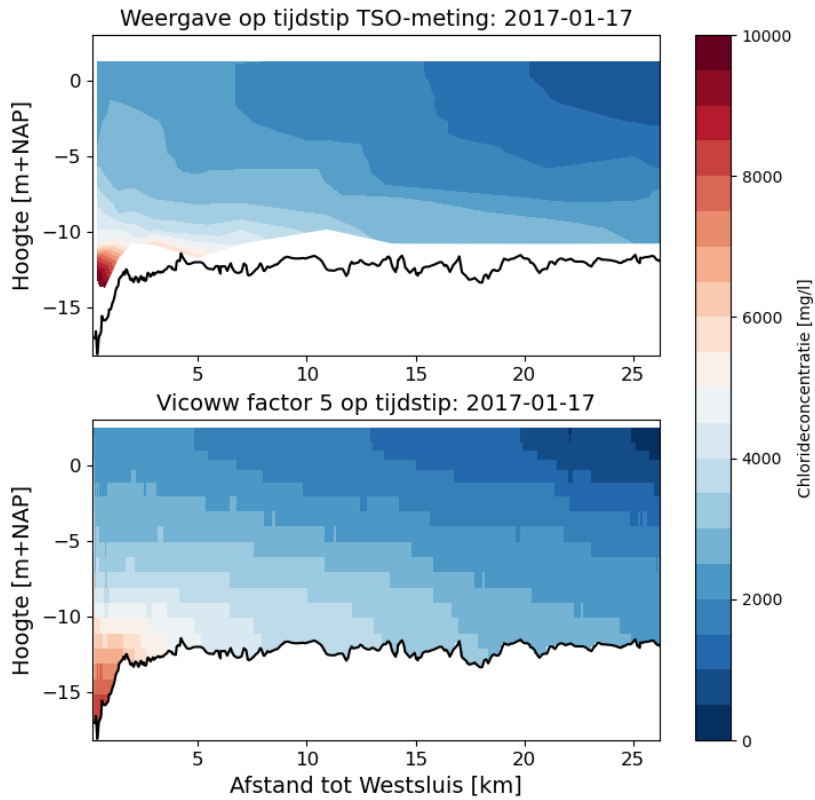
A.2 Langsdoorsnede

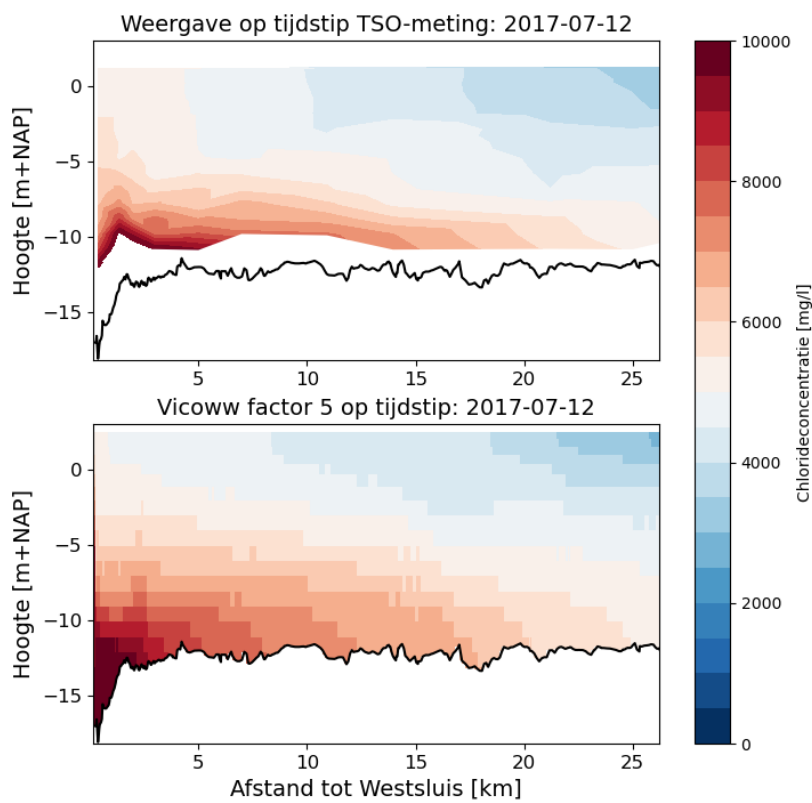
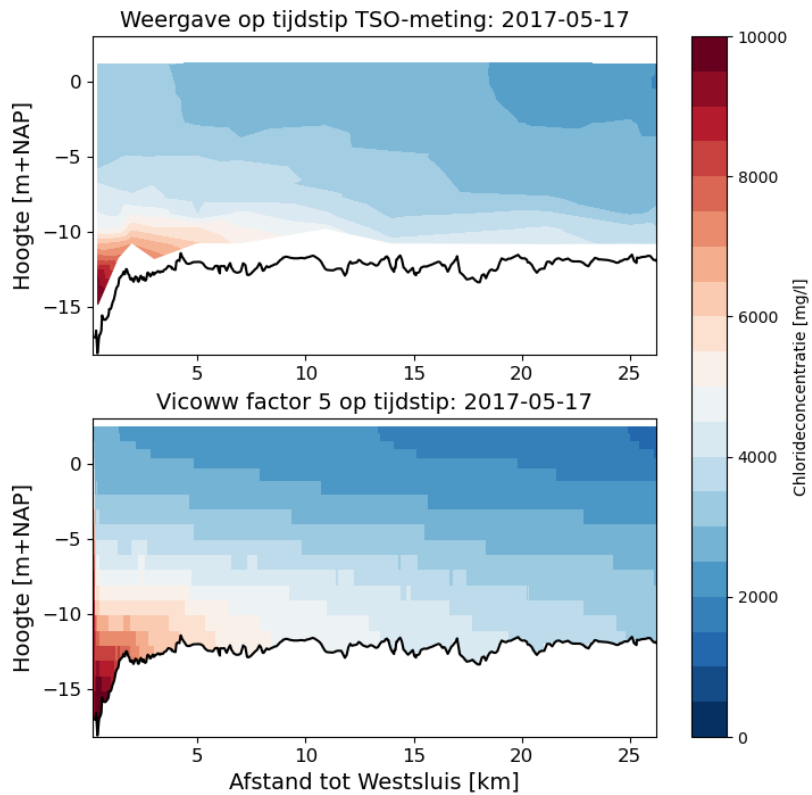
A.2.1 Vicoww factor 5

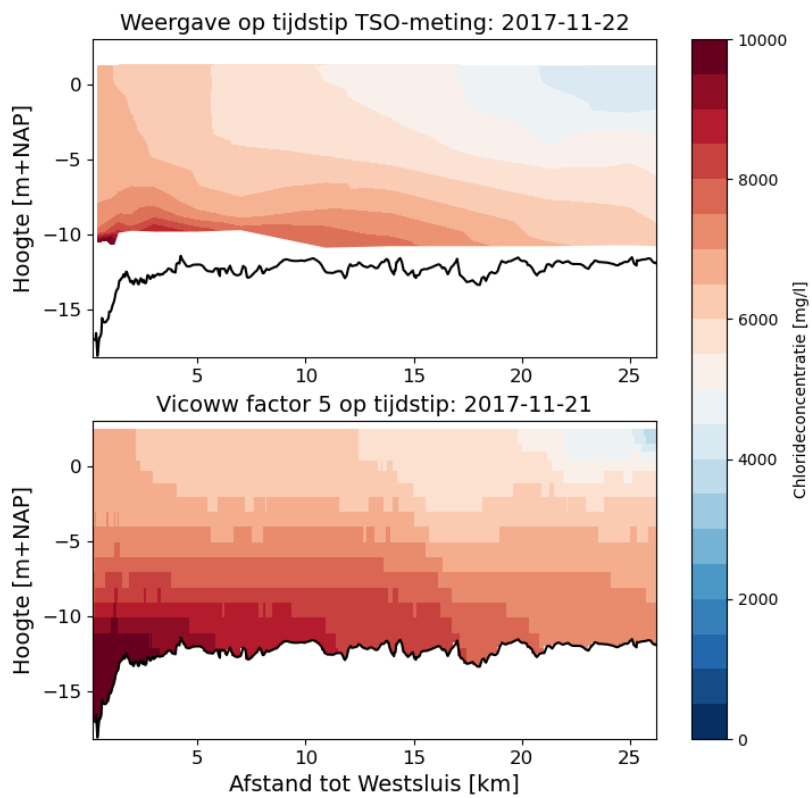
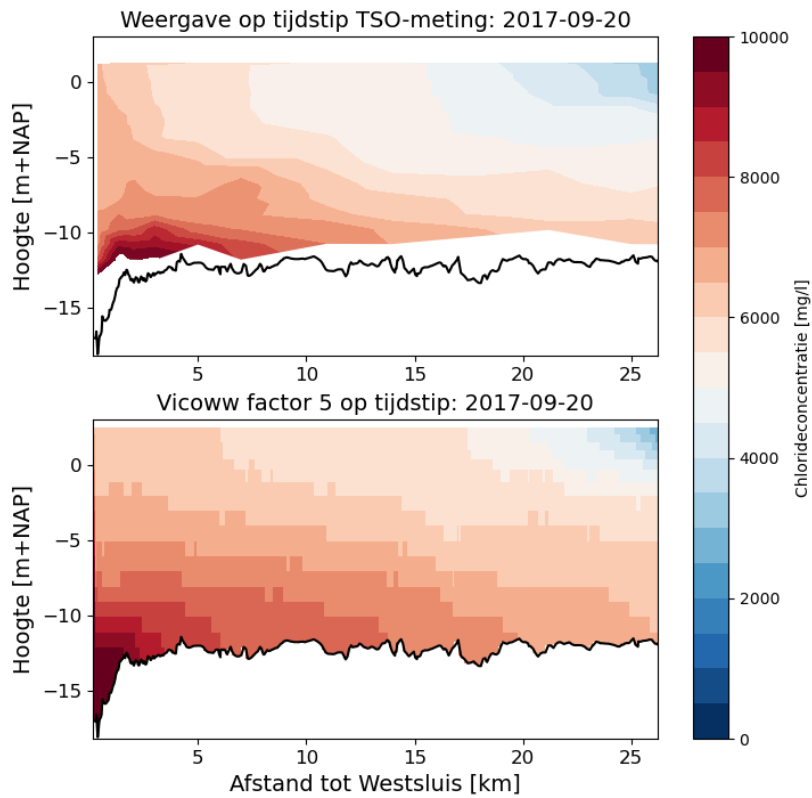


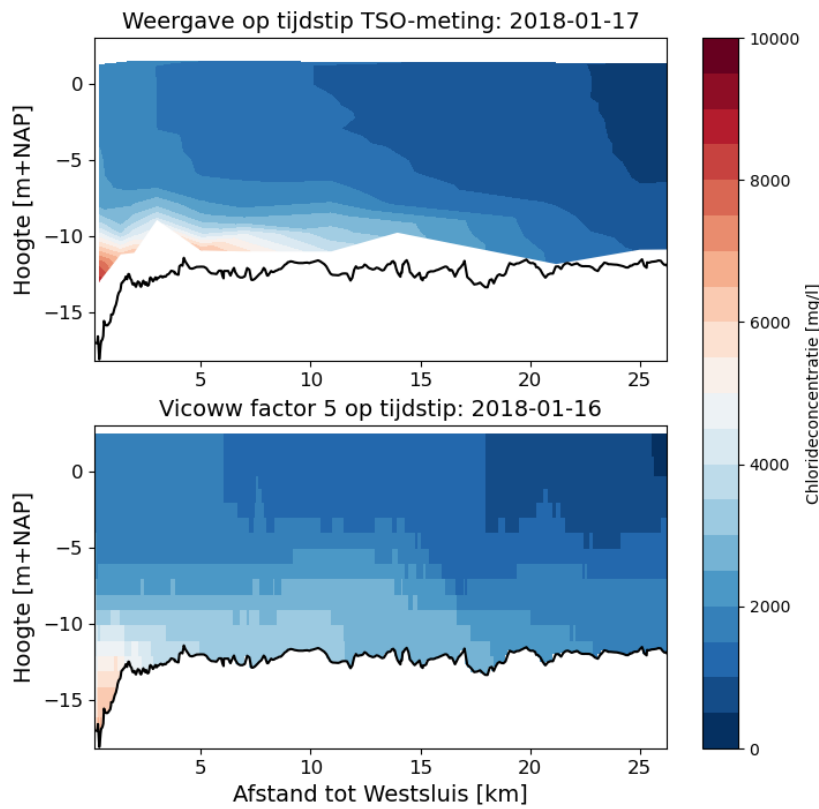
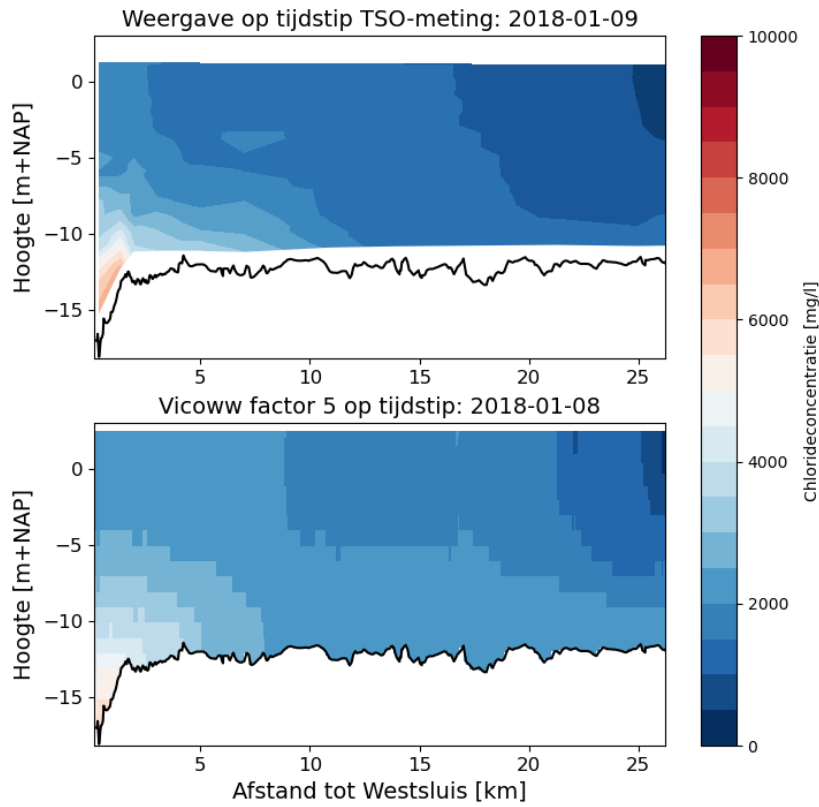




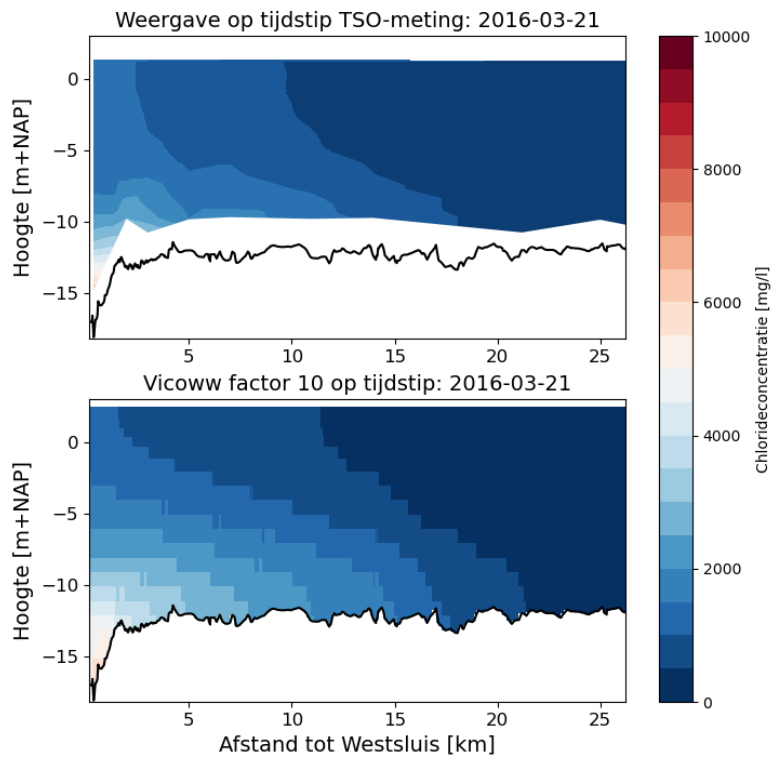
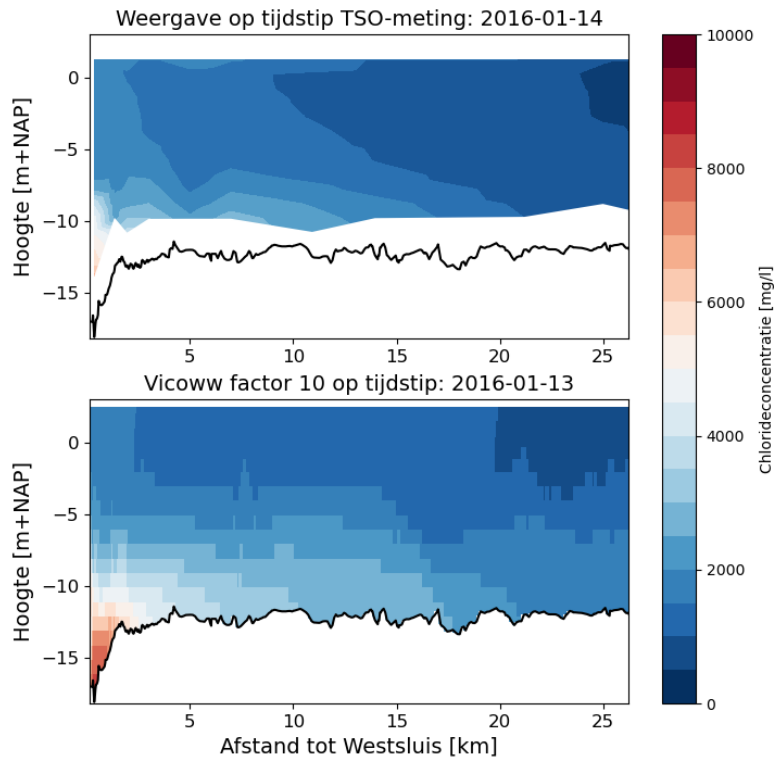


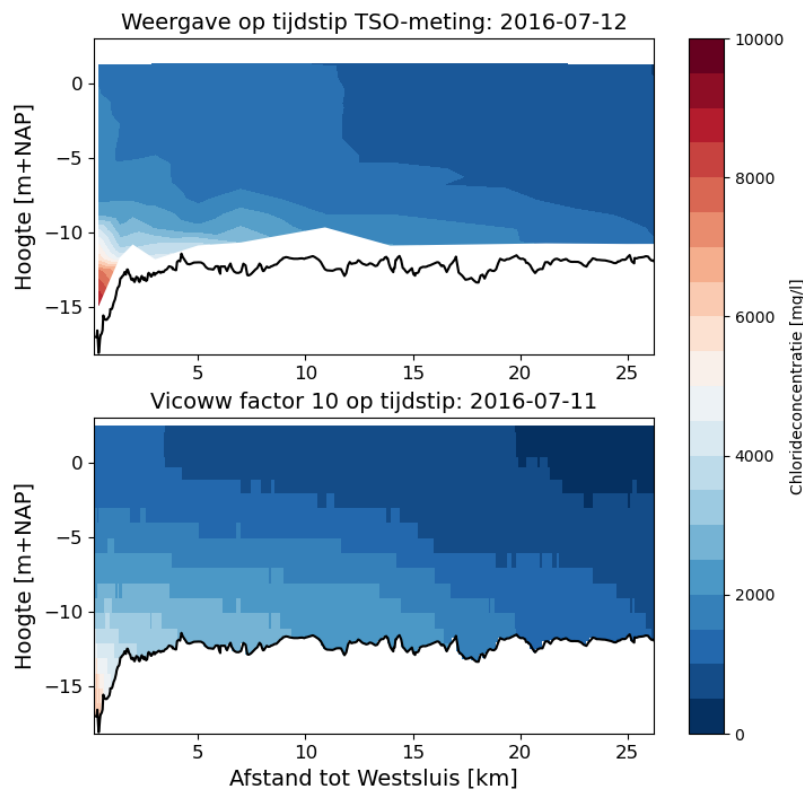
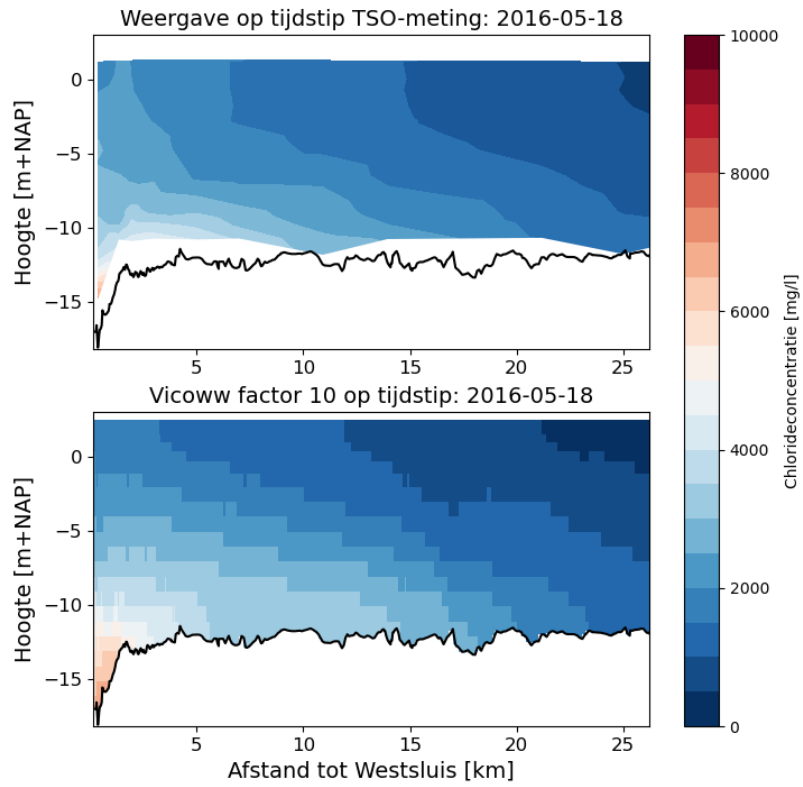


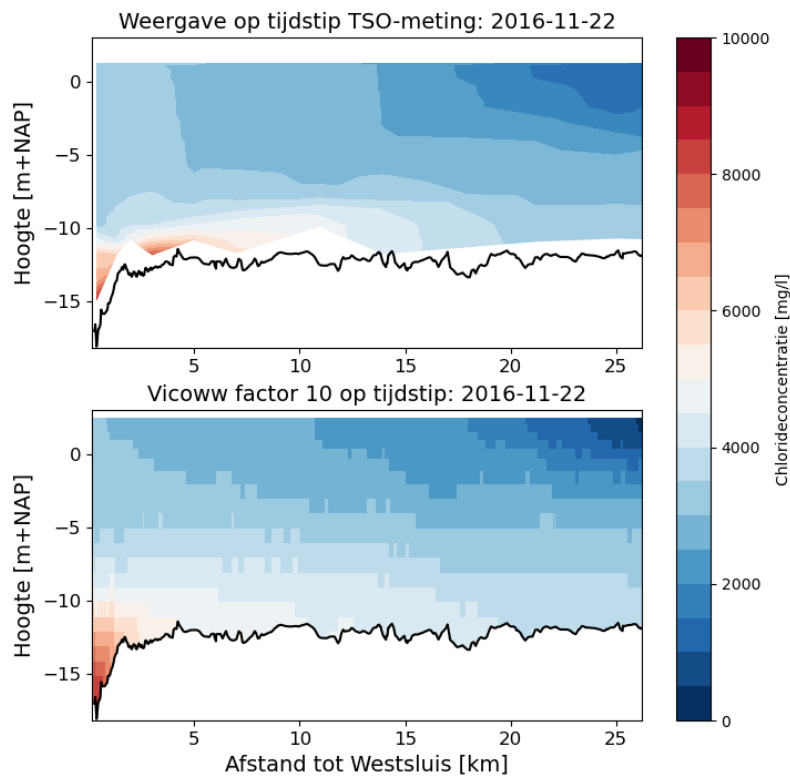
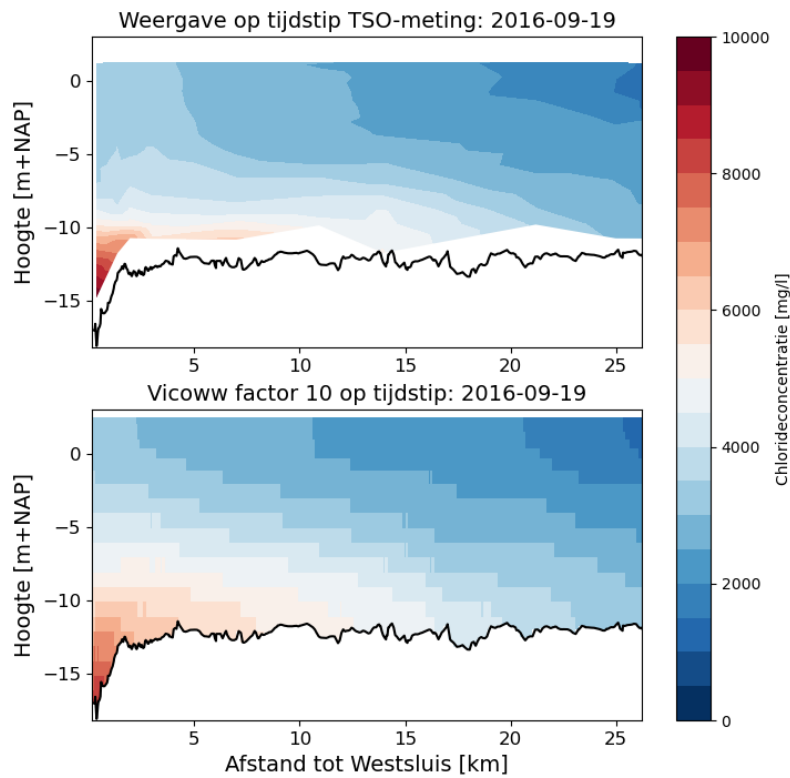


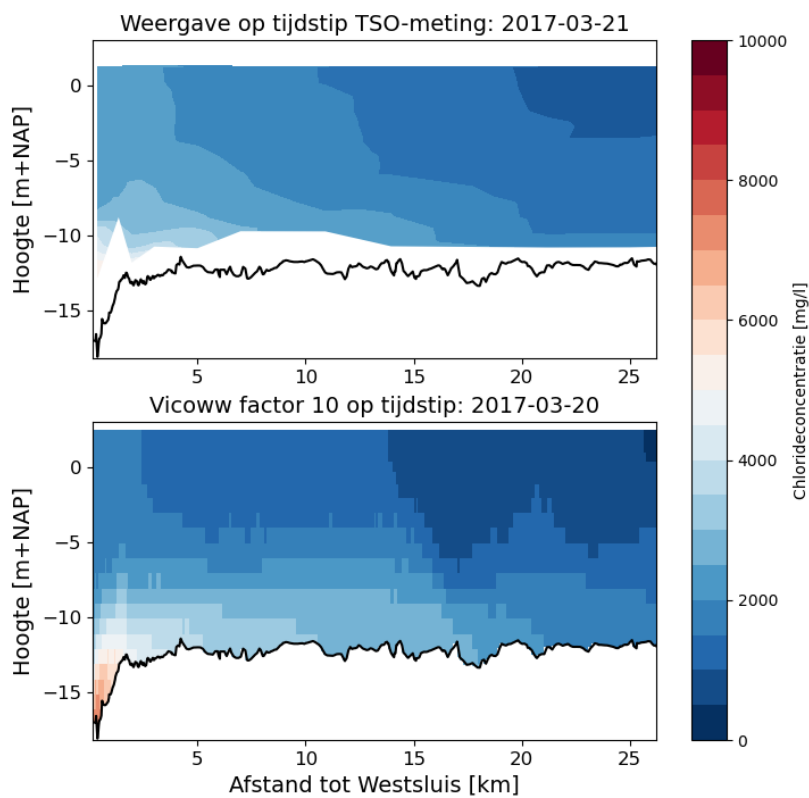
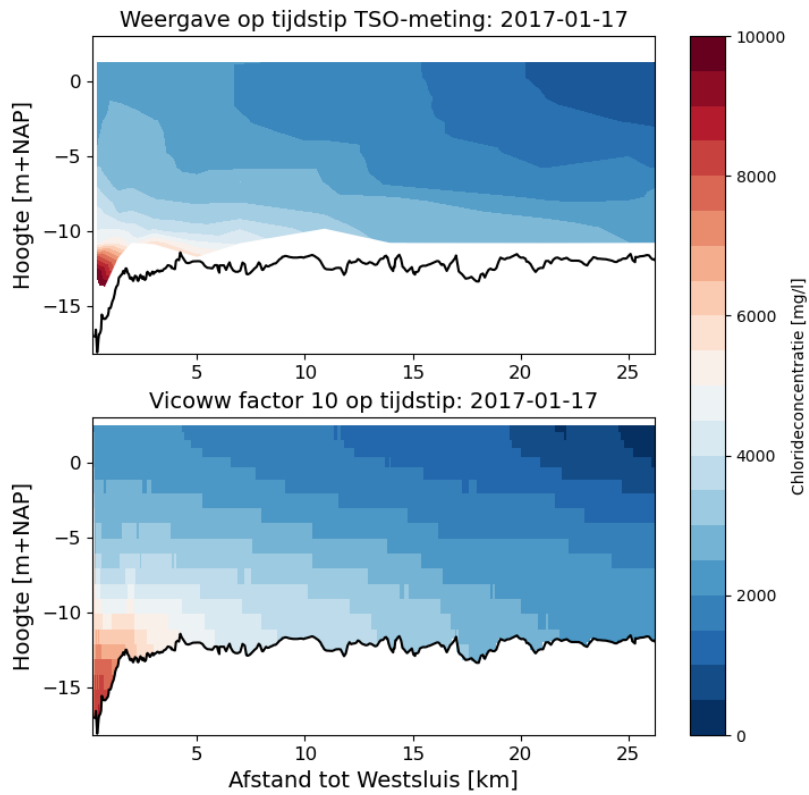


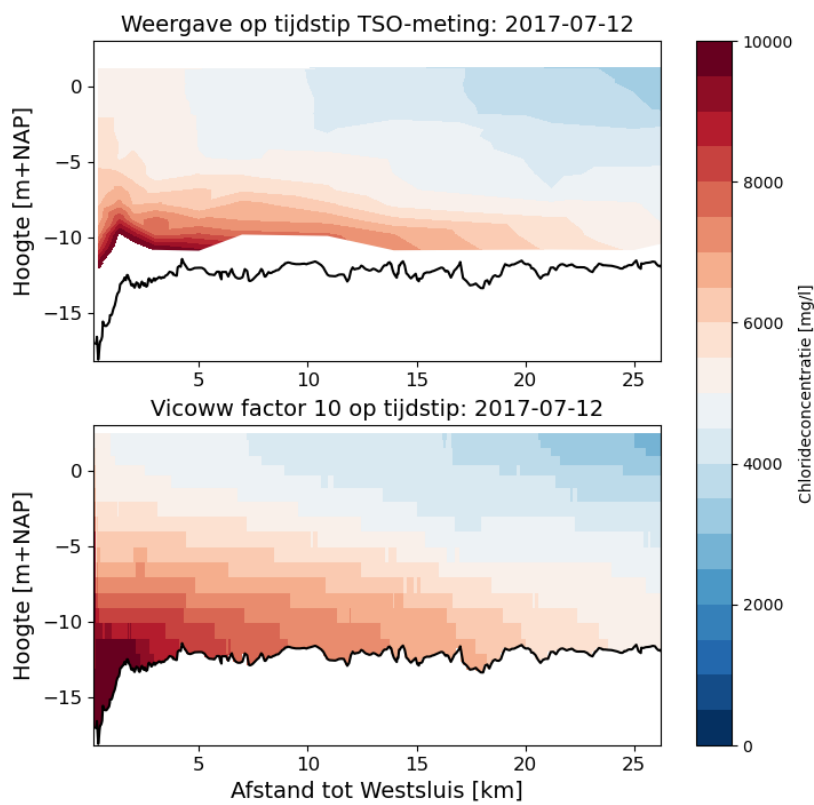
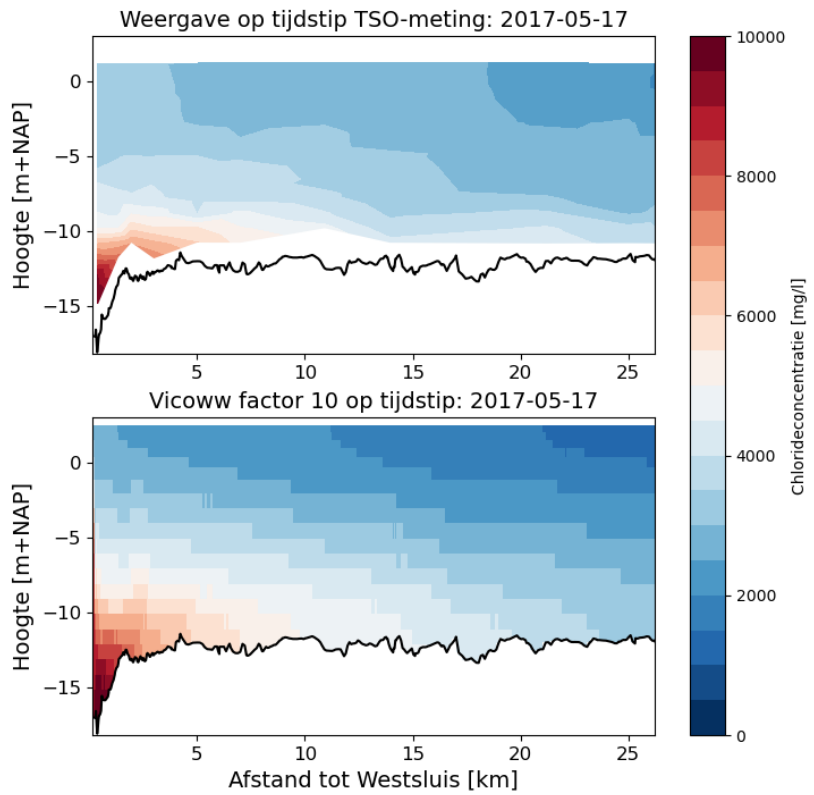
A.2.2 Vicoww factor 10

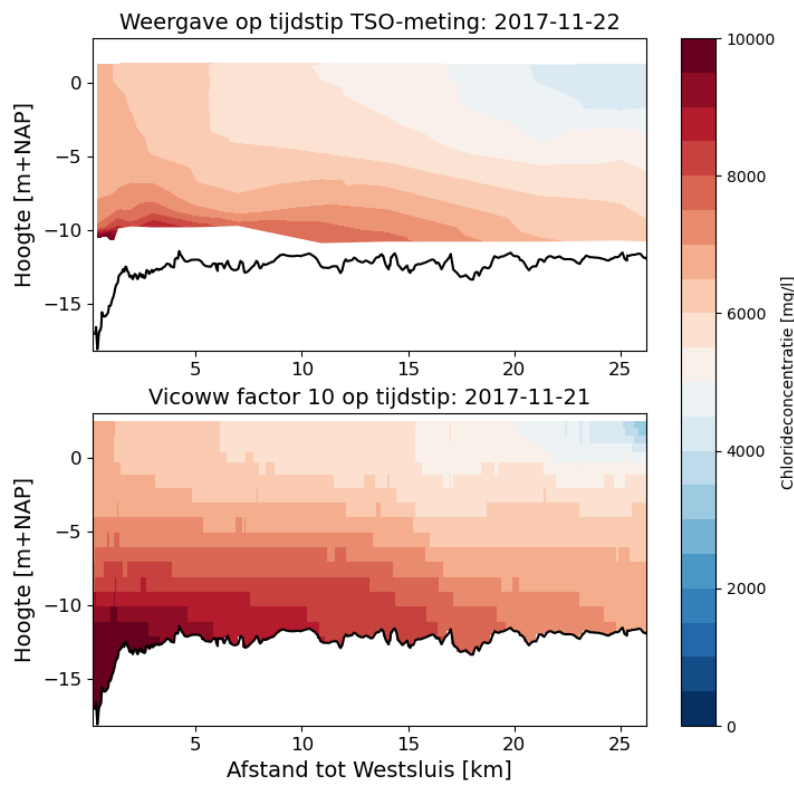
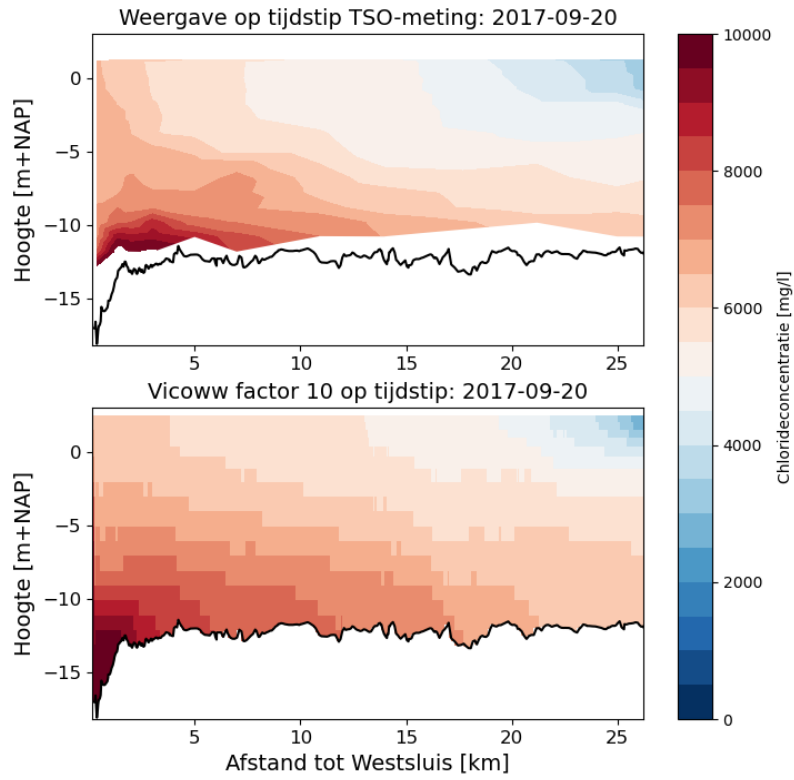


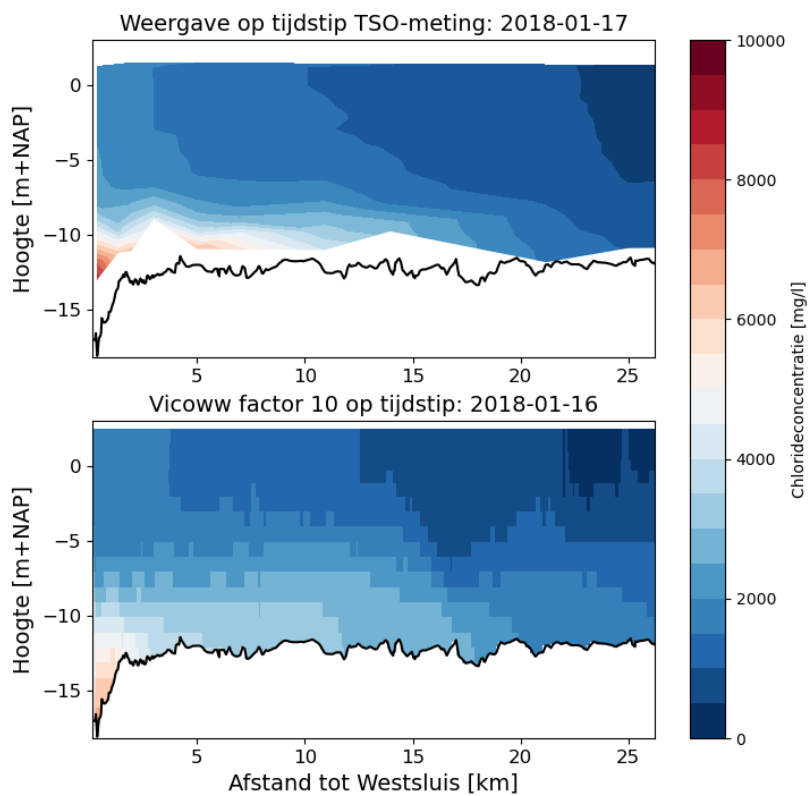
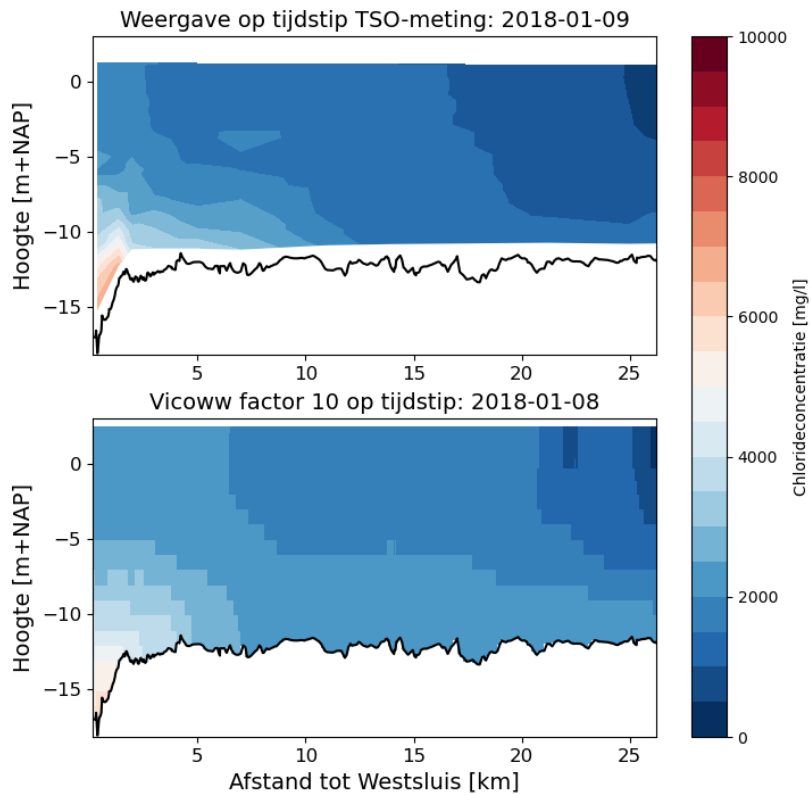




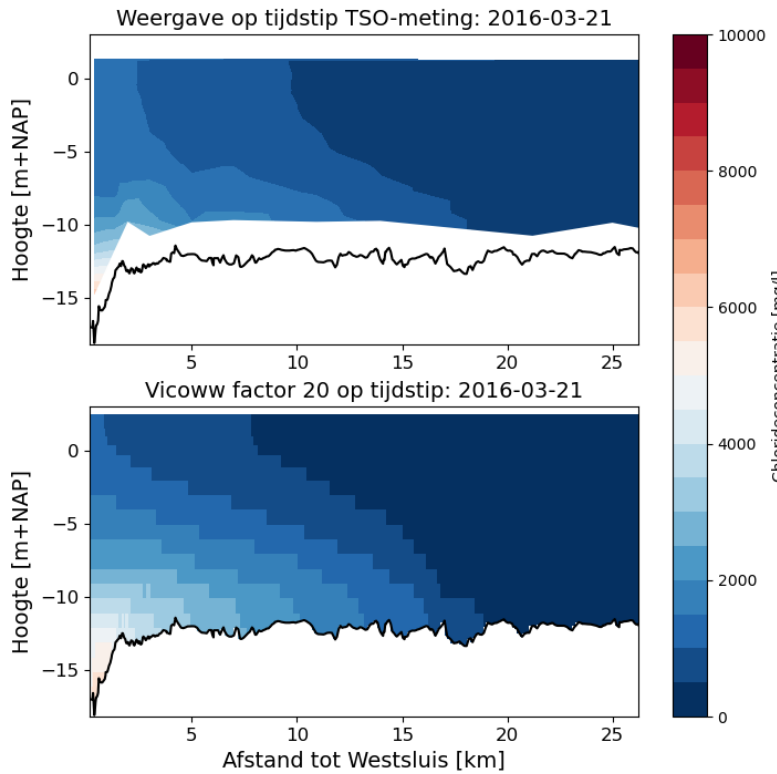
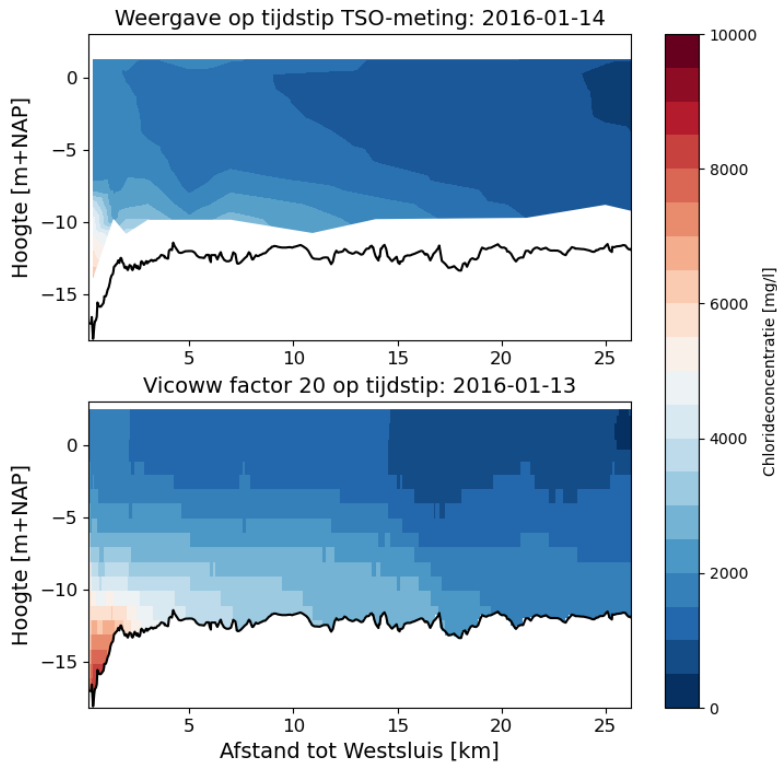


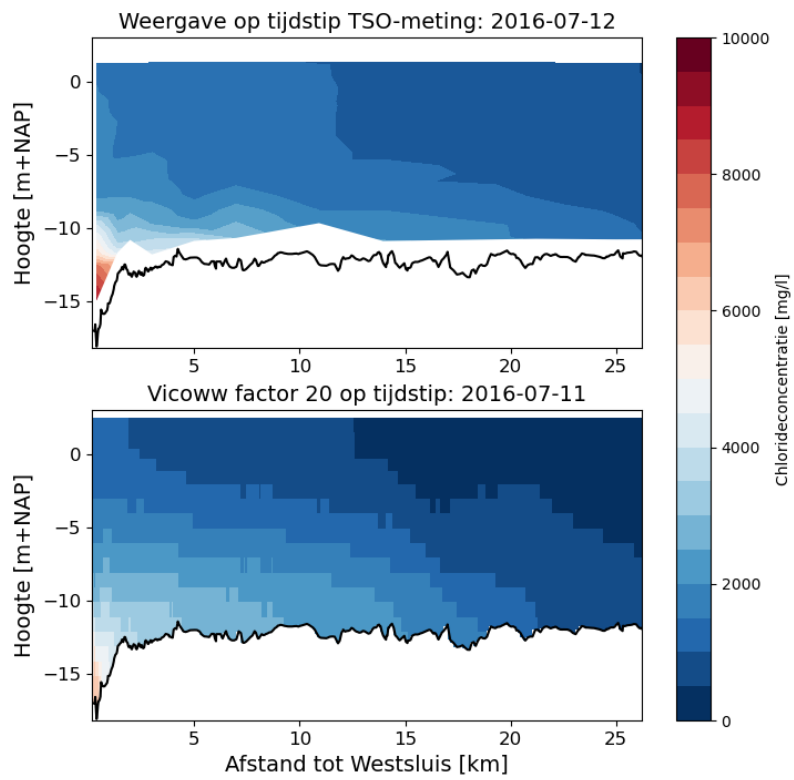
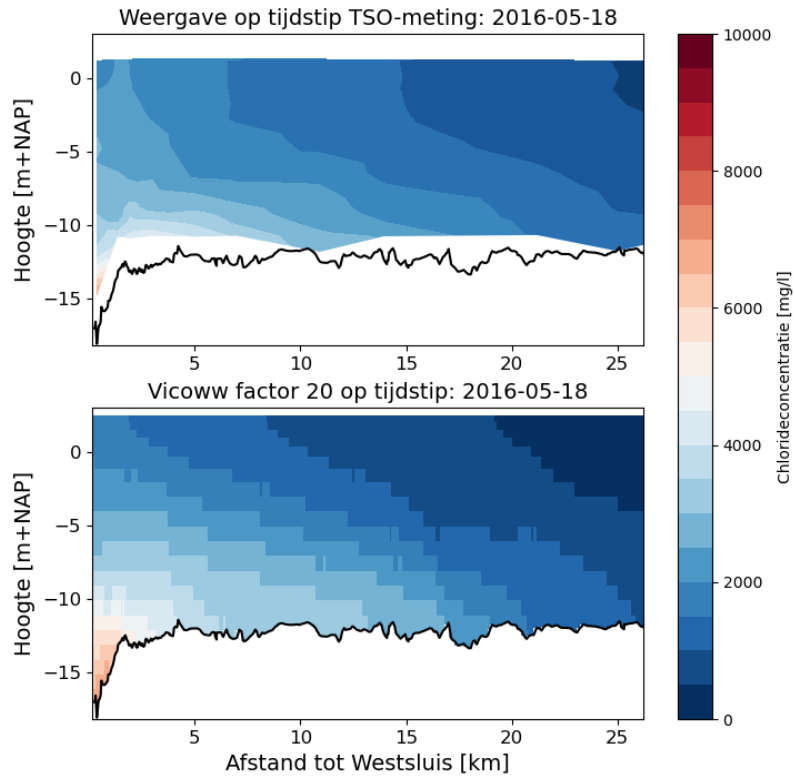


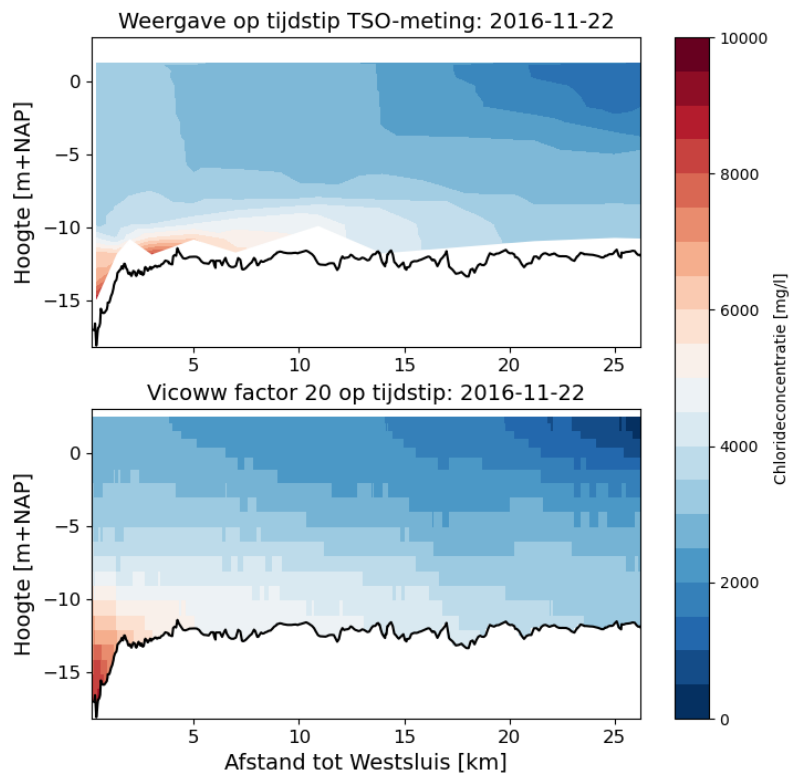
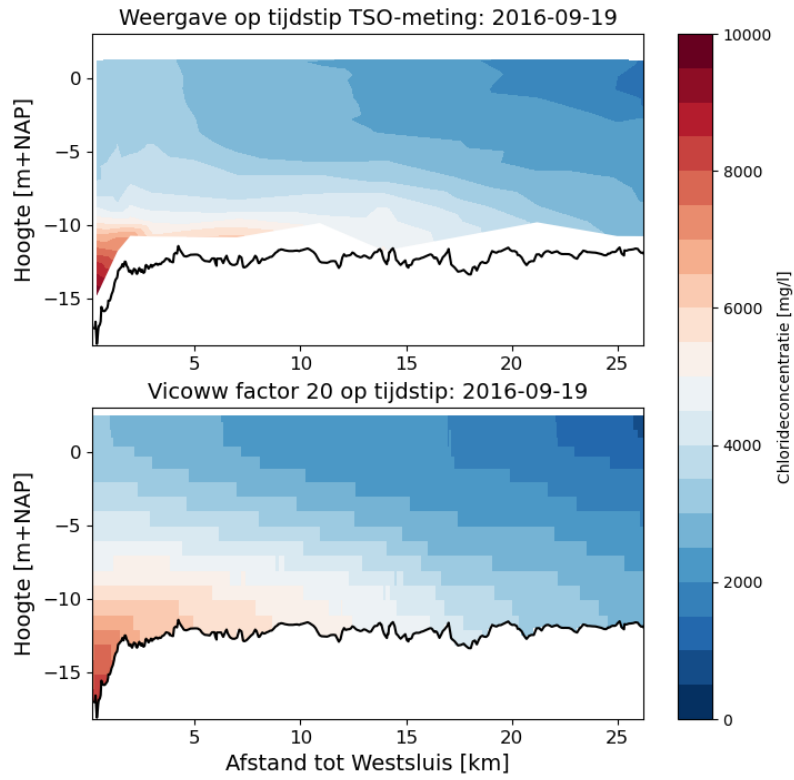


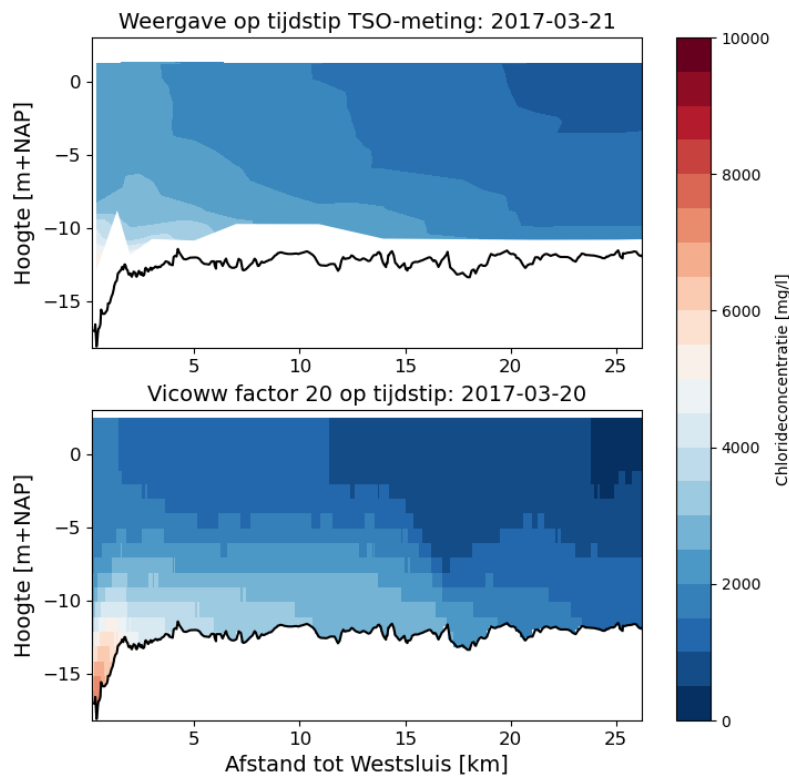
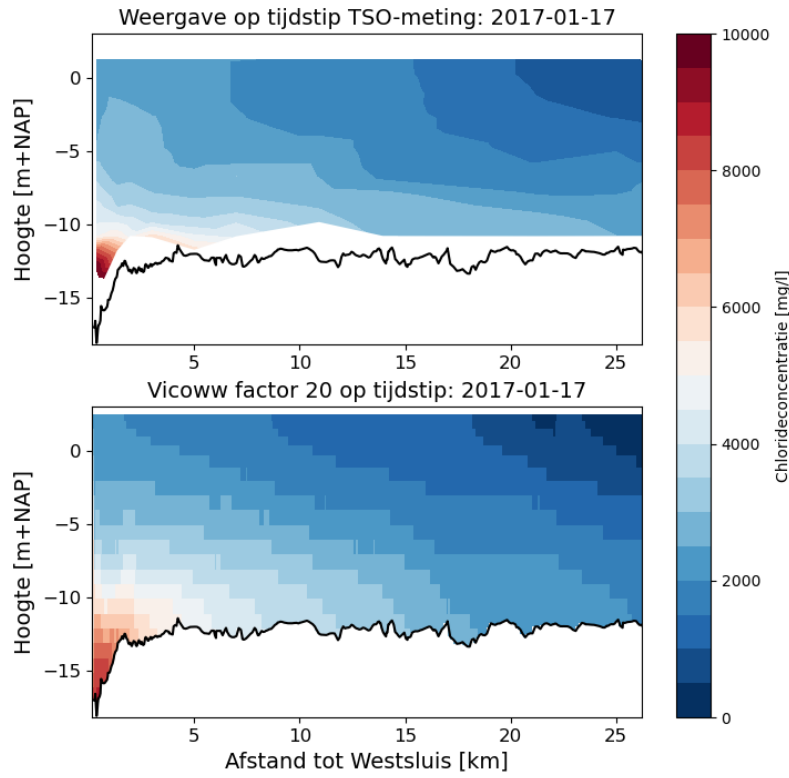


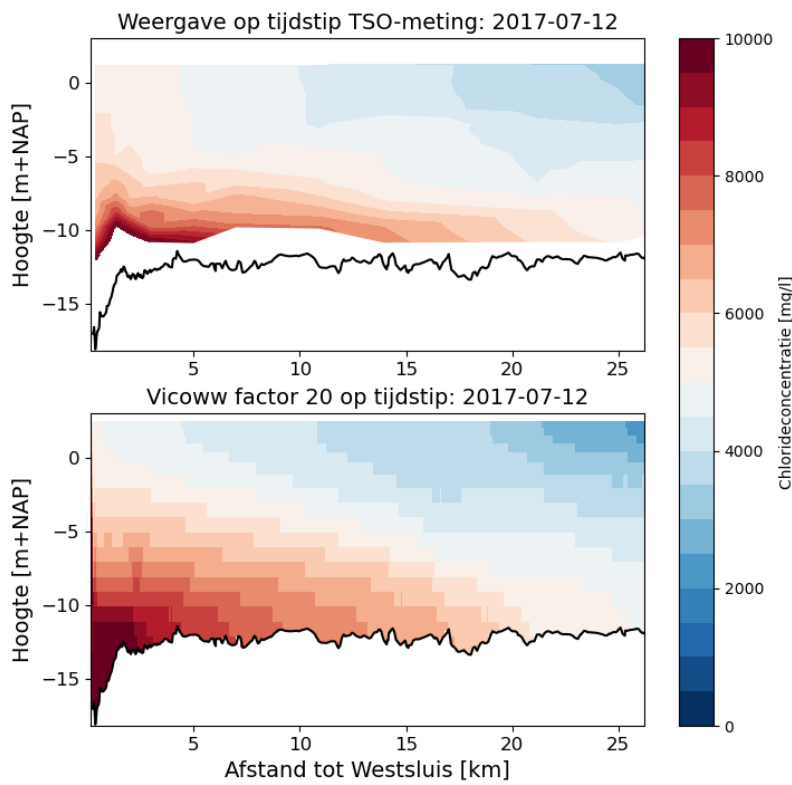
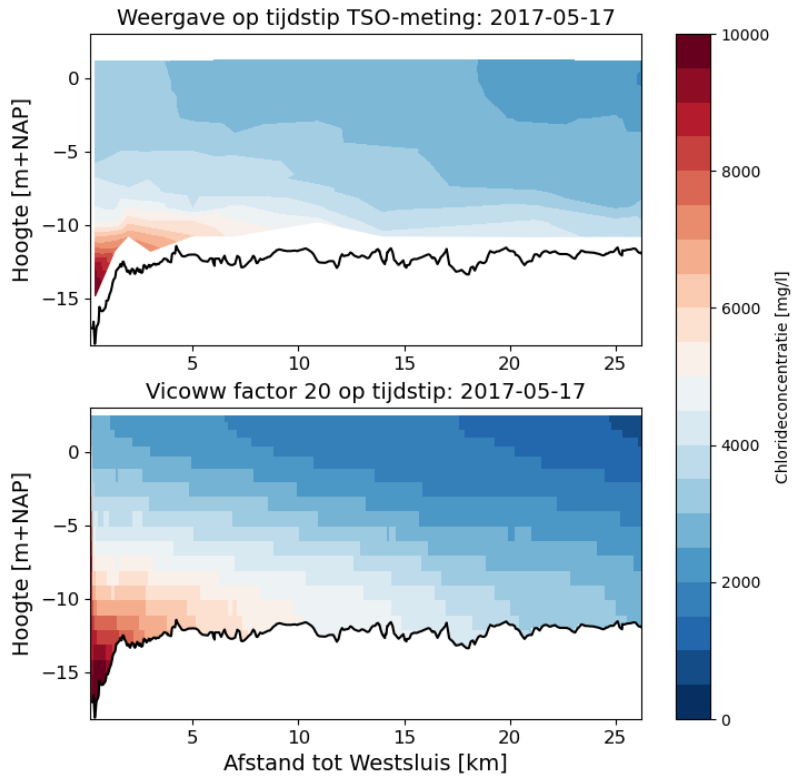
A.2.3 Vicoww factor 20

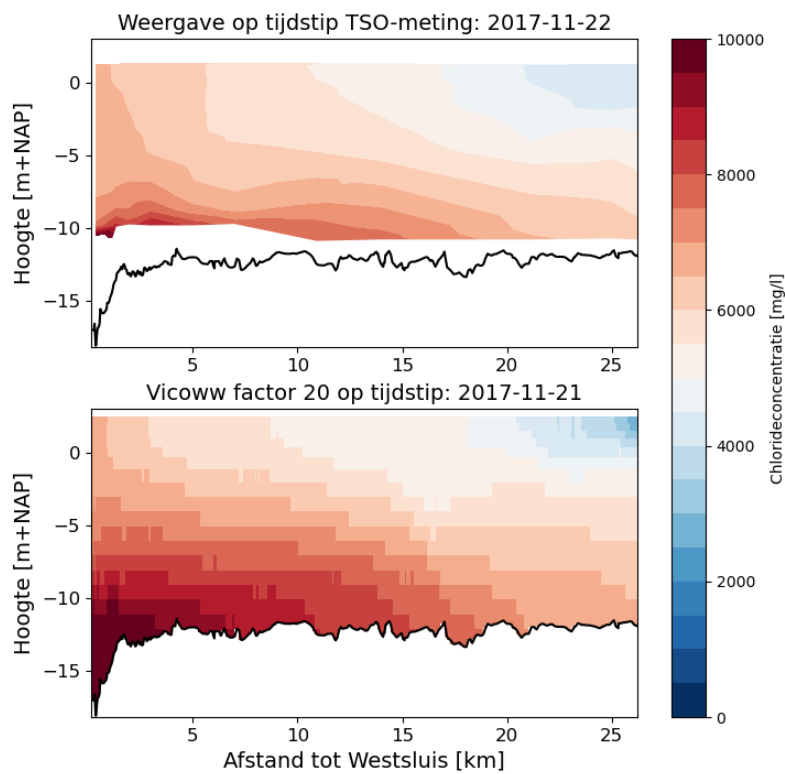
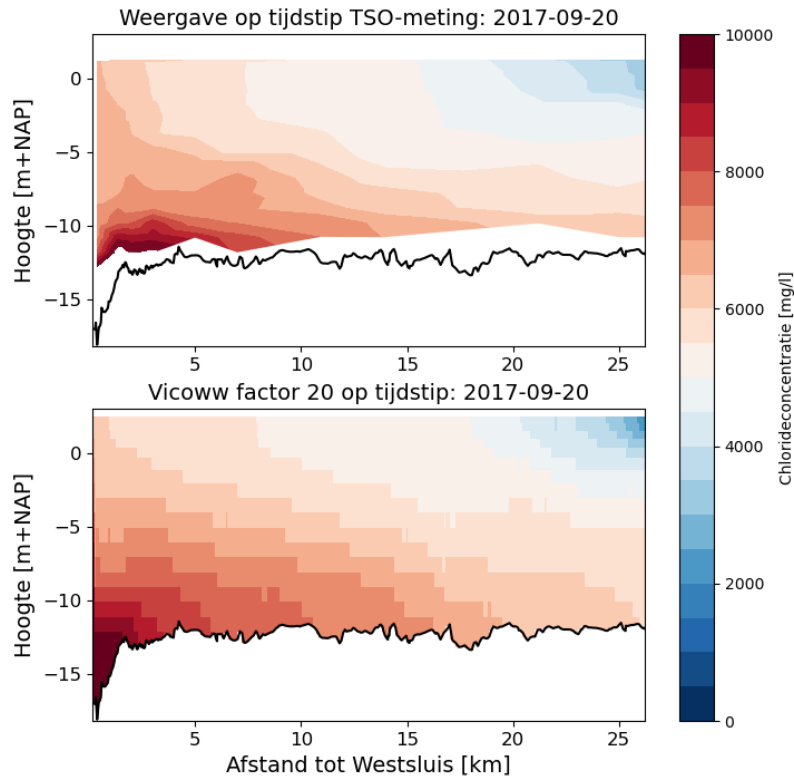


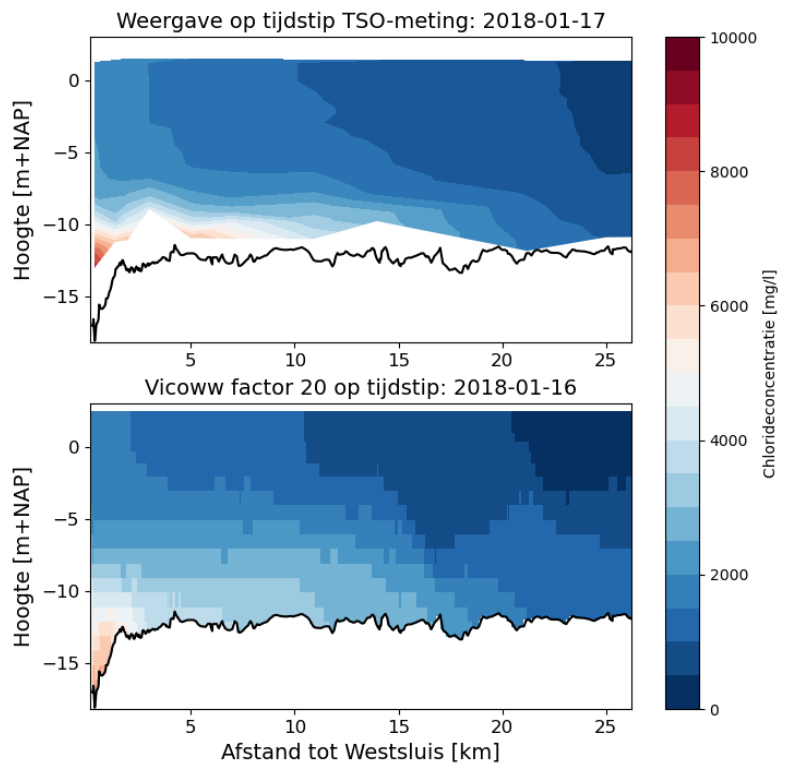
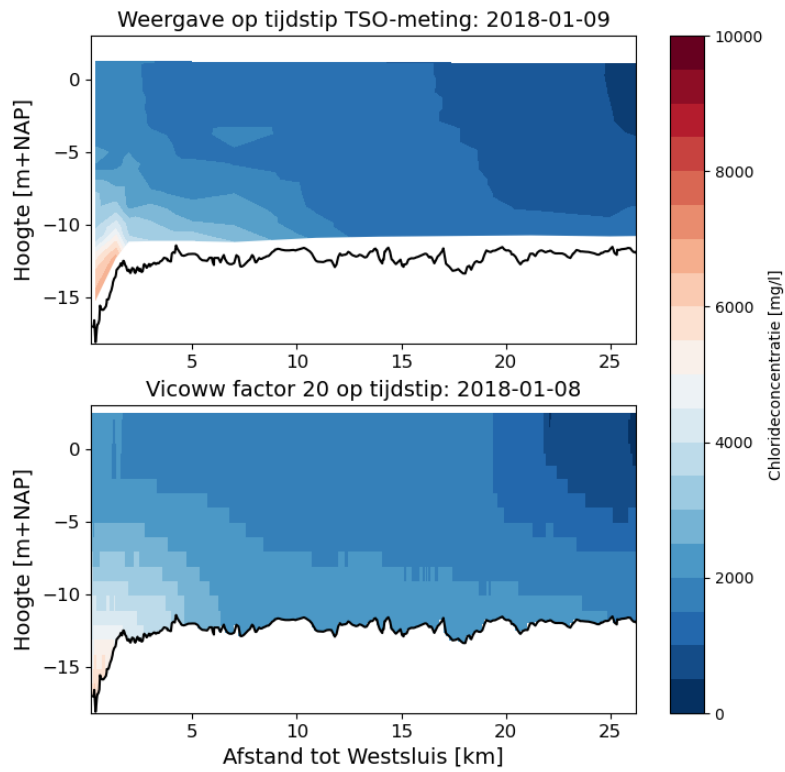




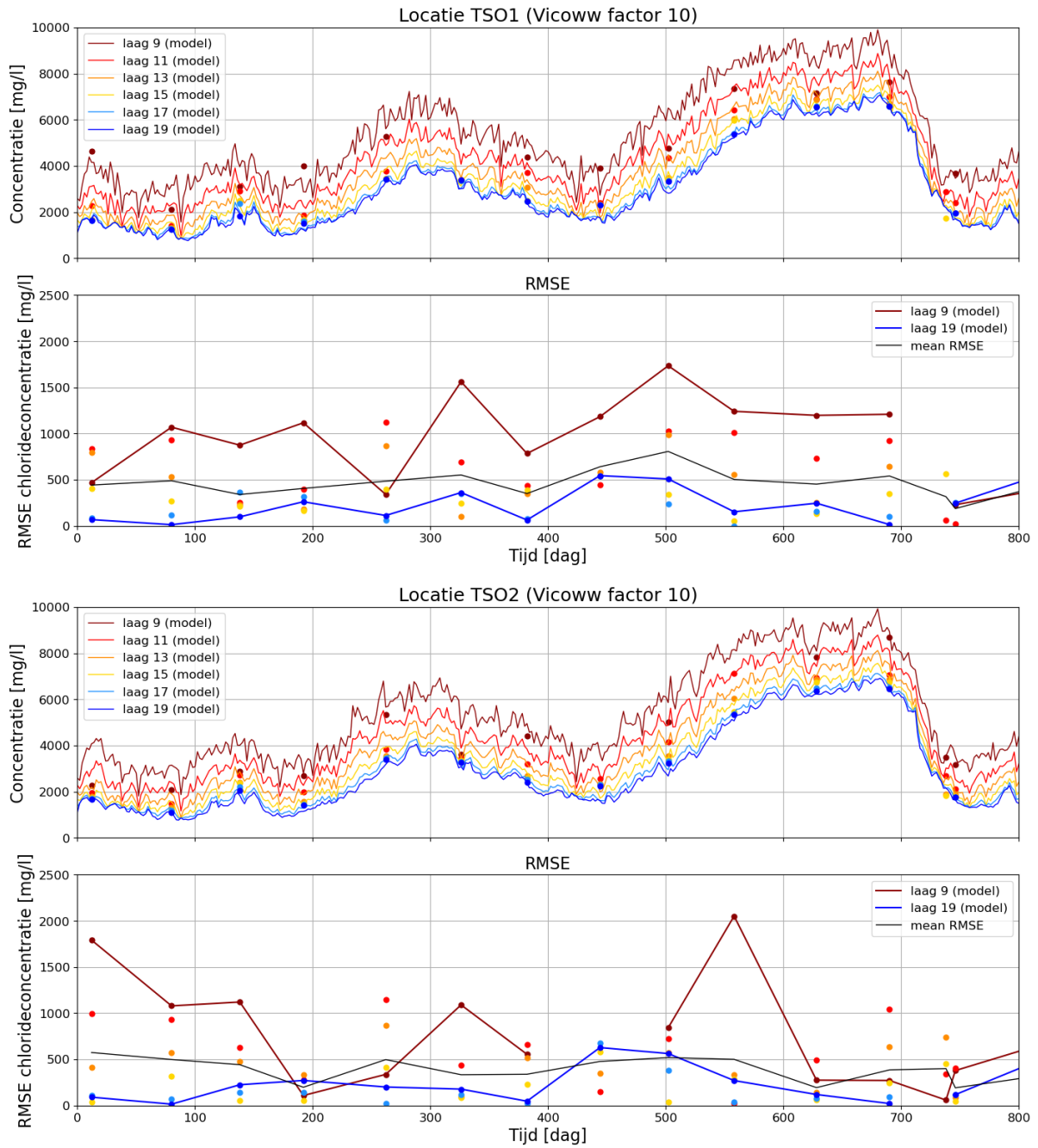


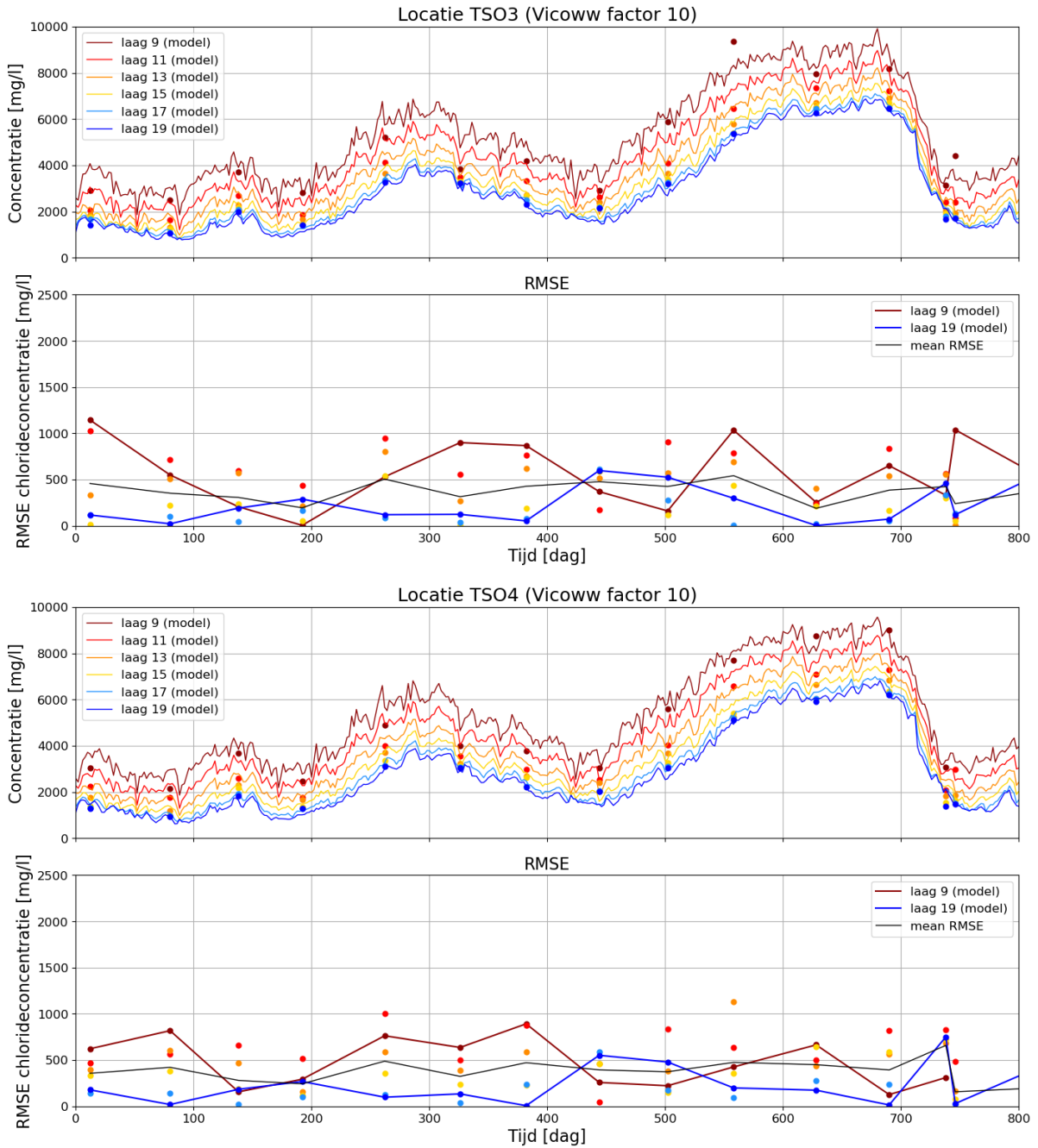


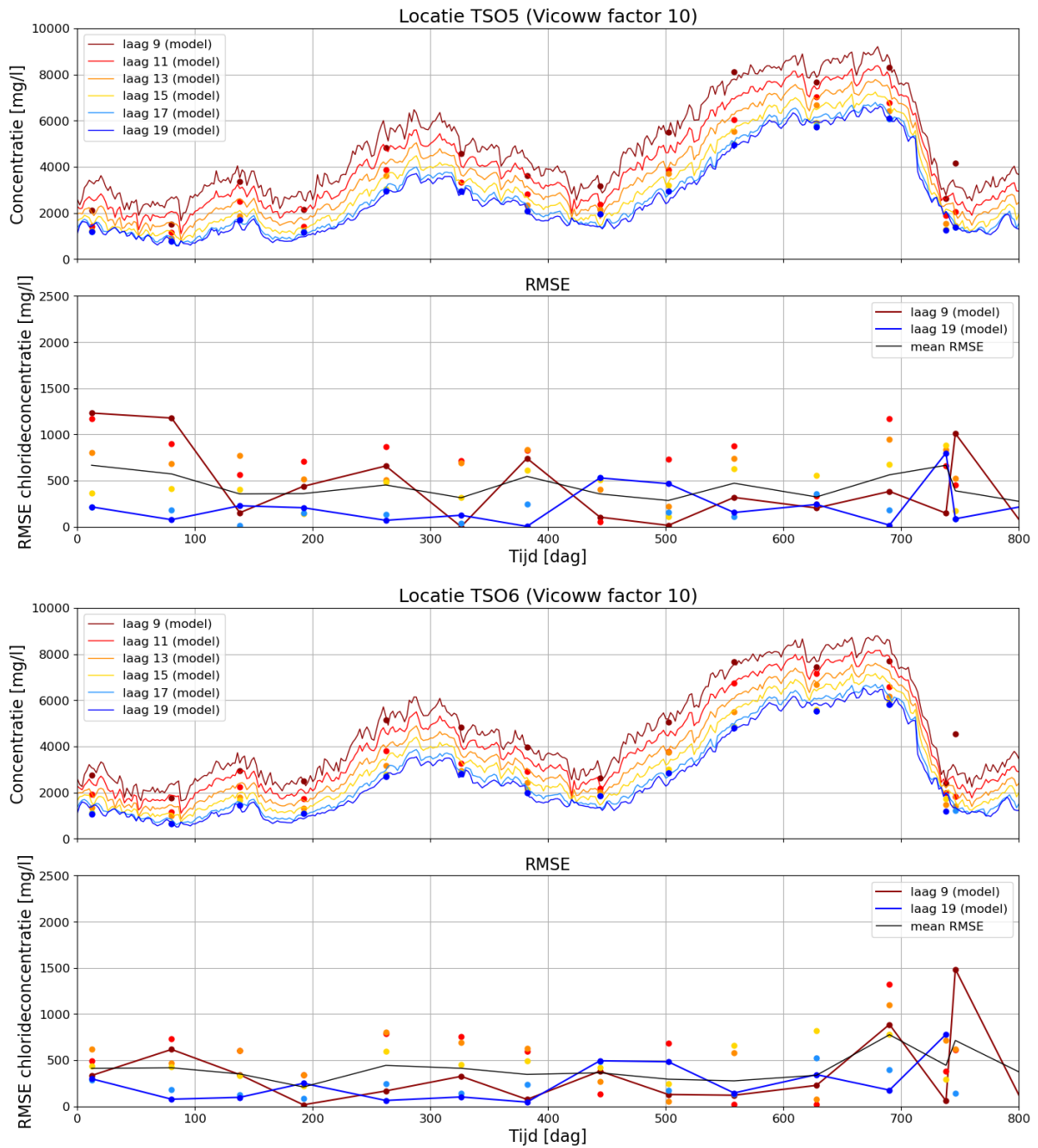


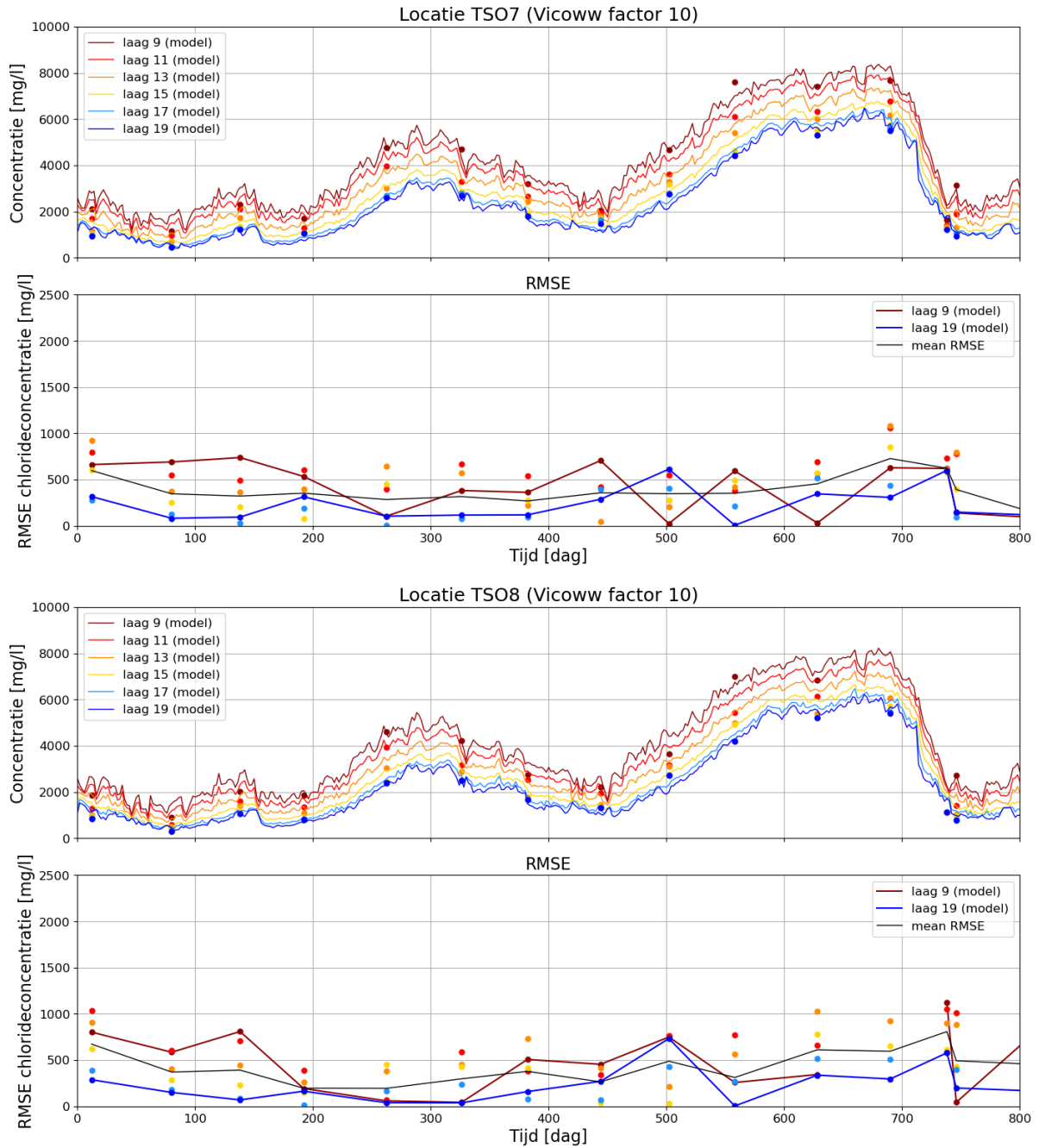


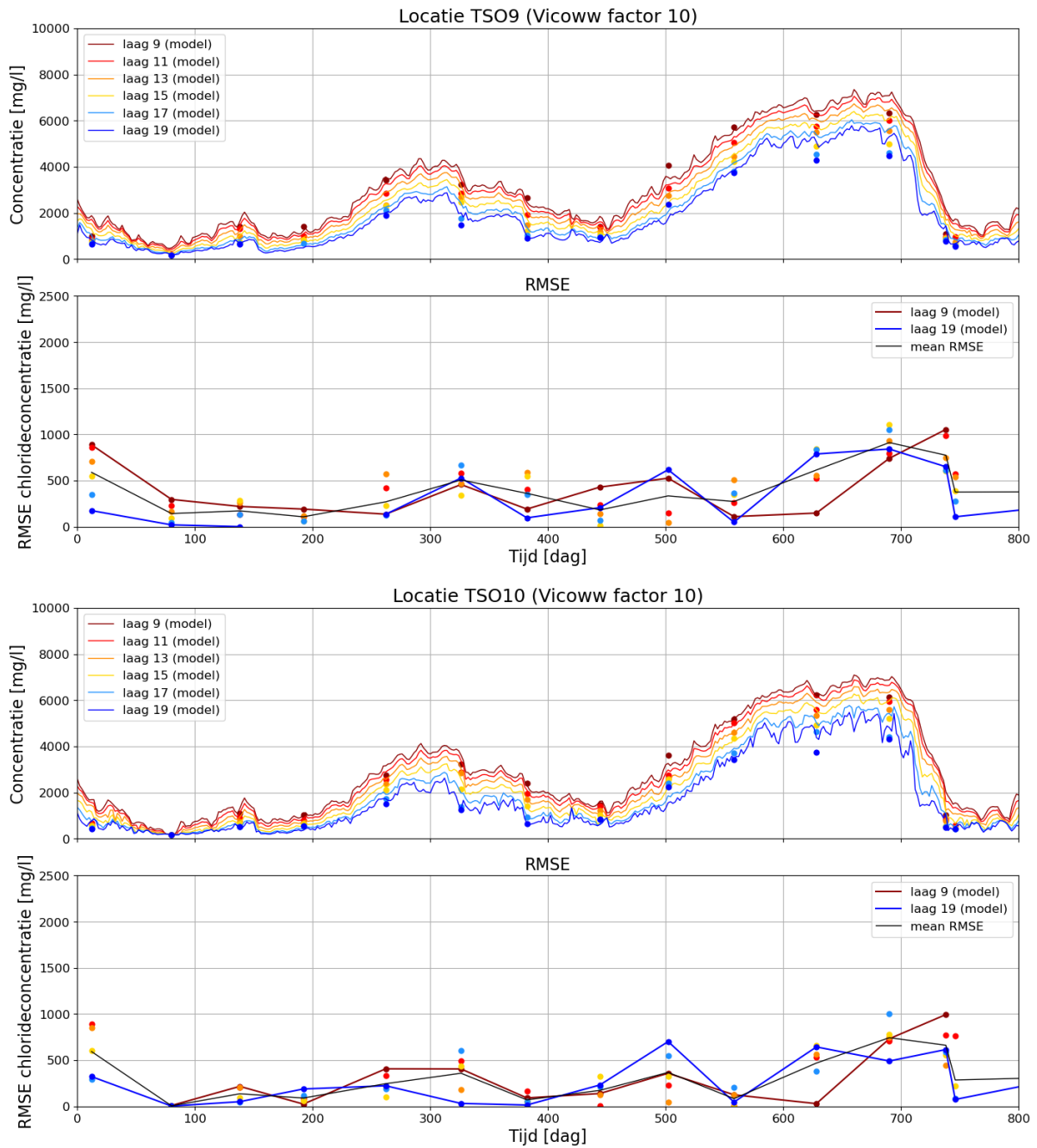
A.3 Chlorideconcentratie in de tijd op TSO-locaties

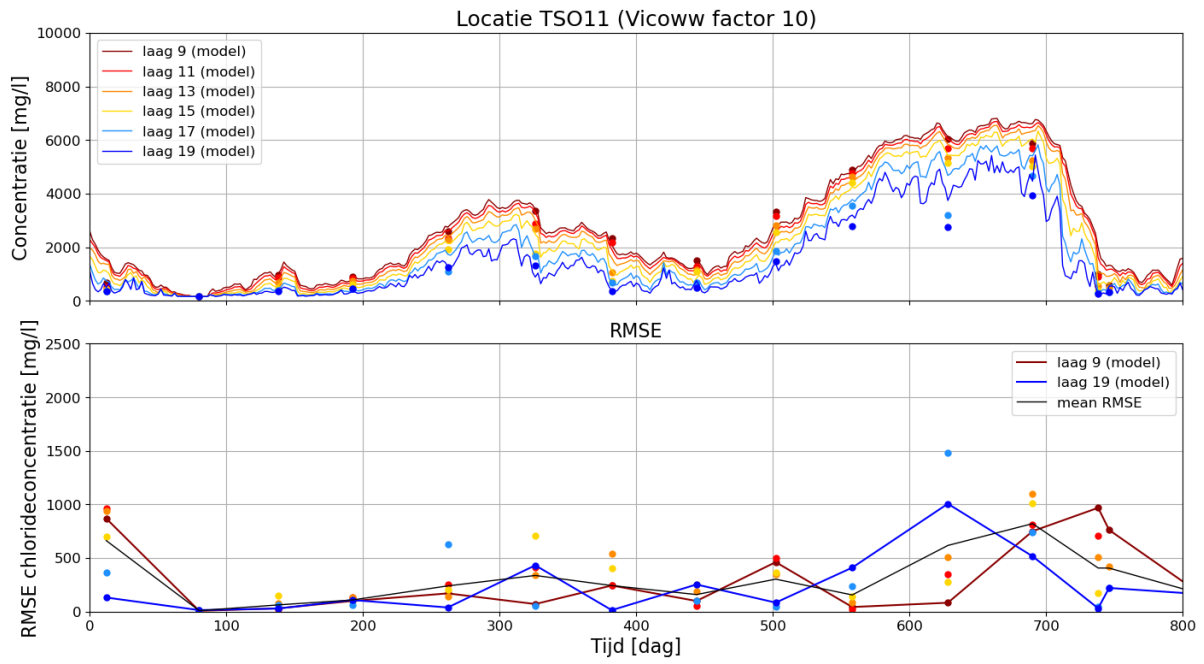






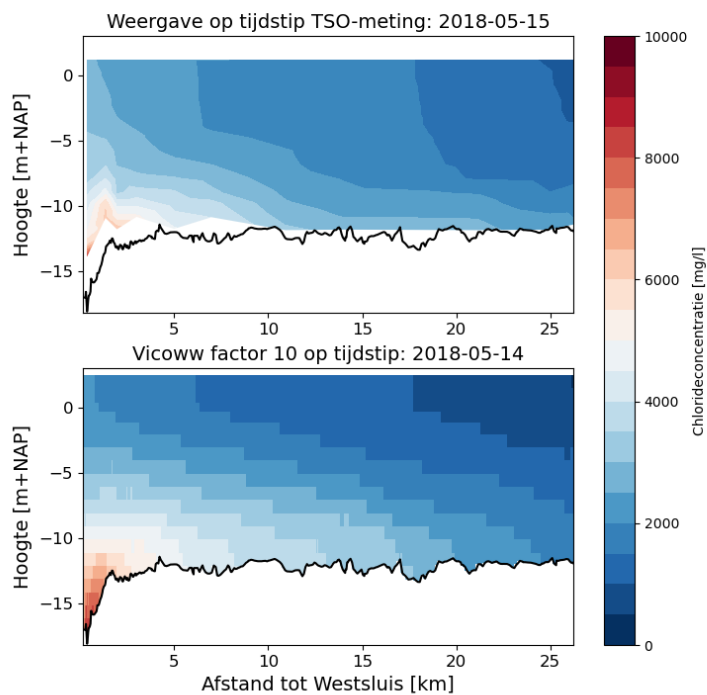
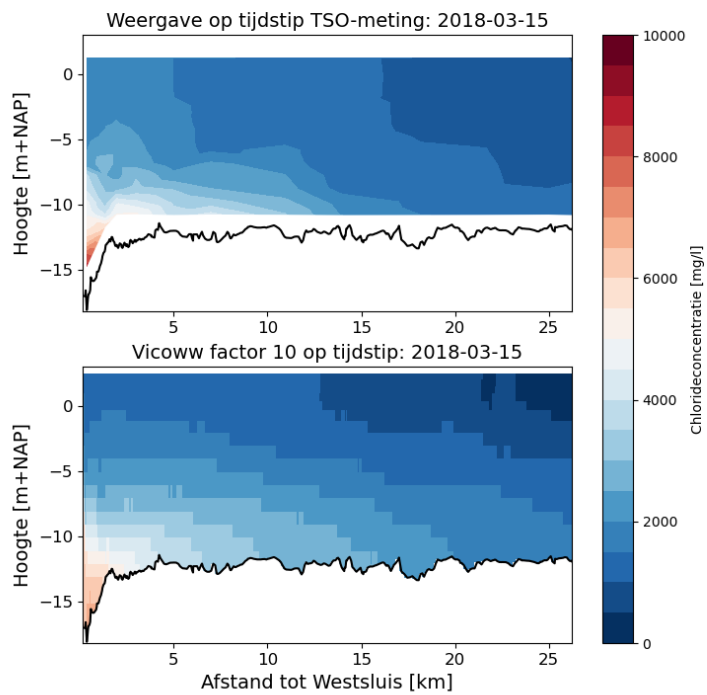


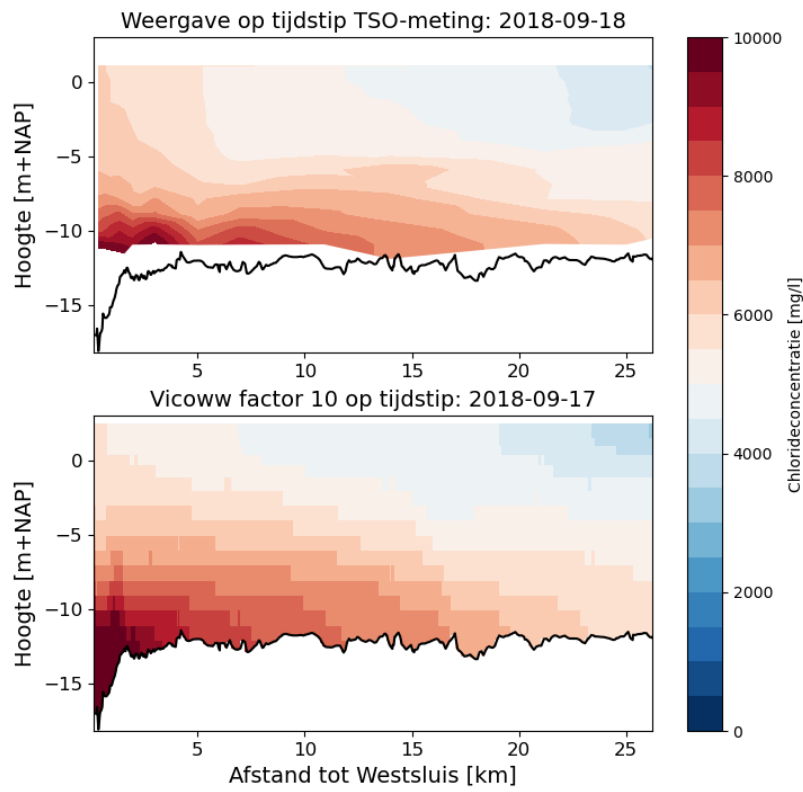
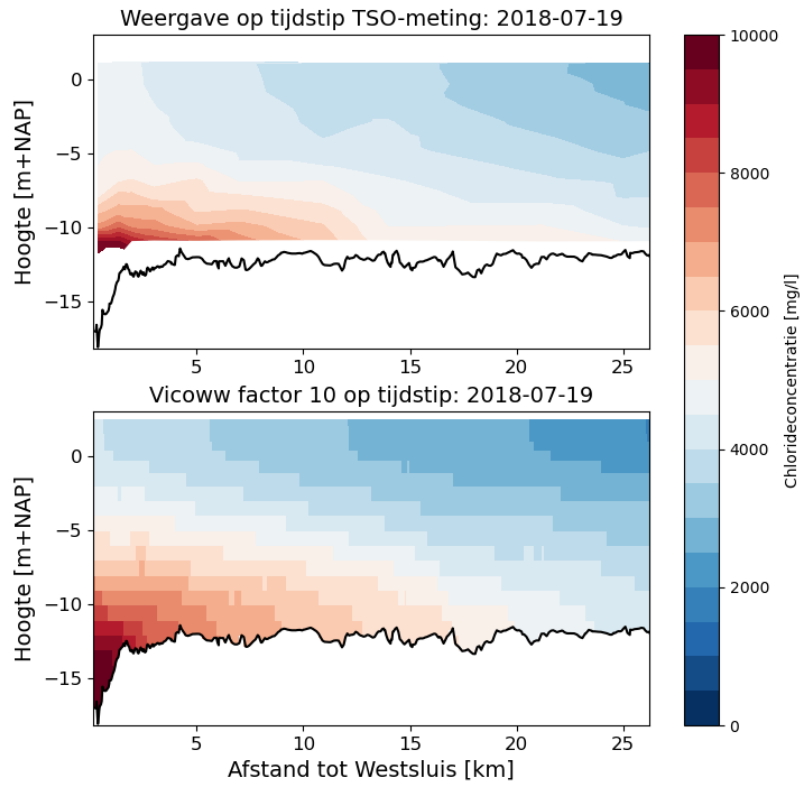


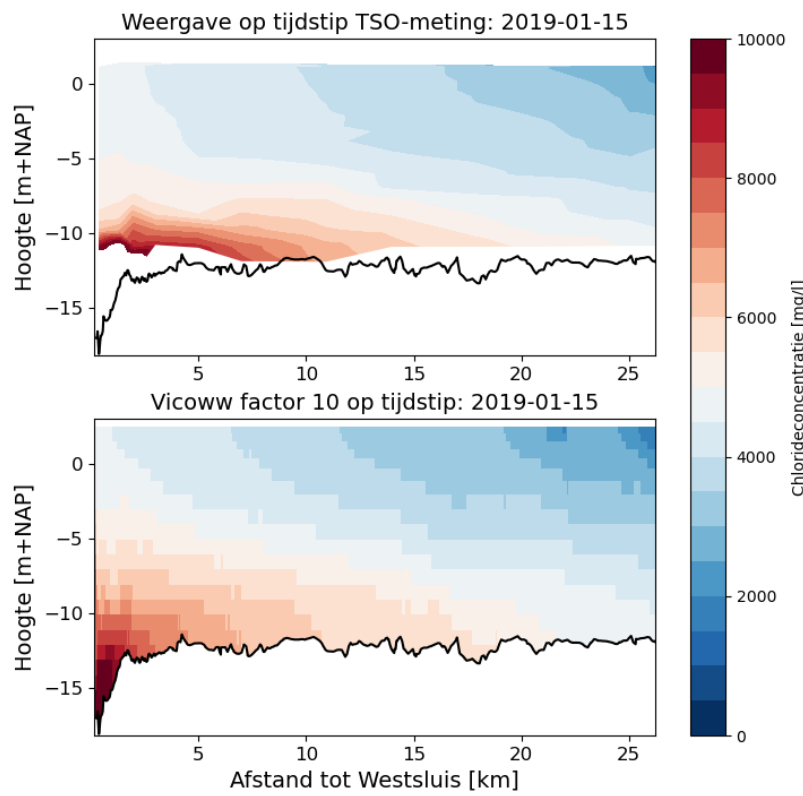
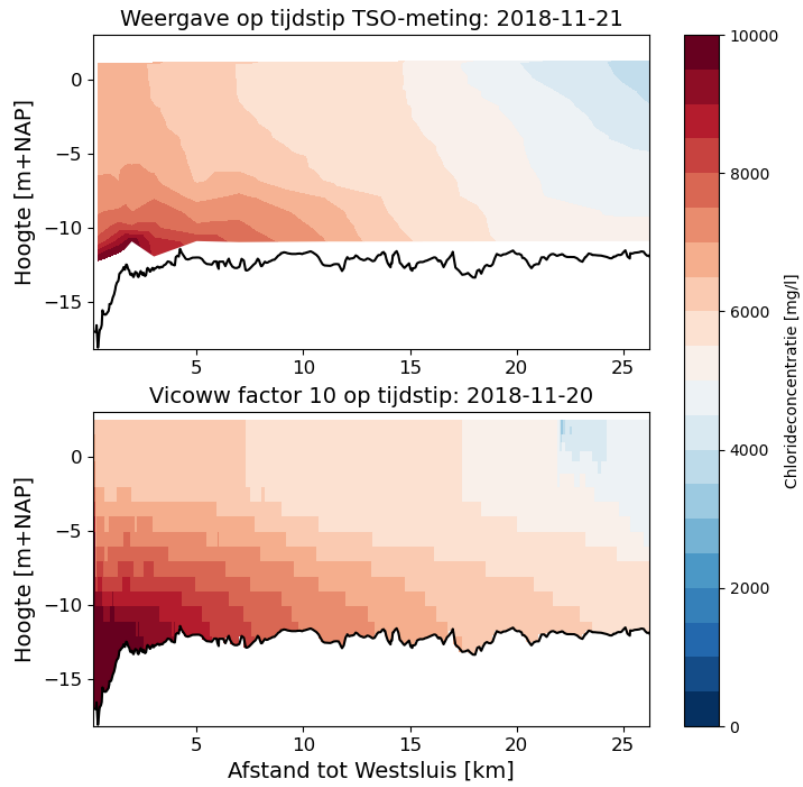


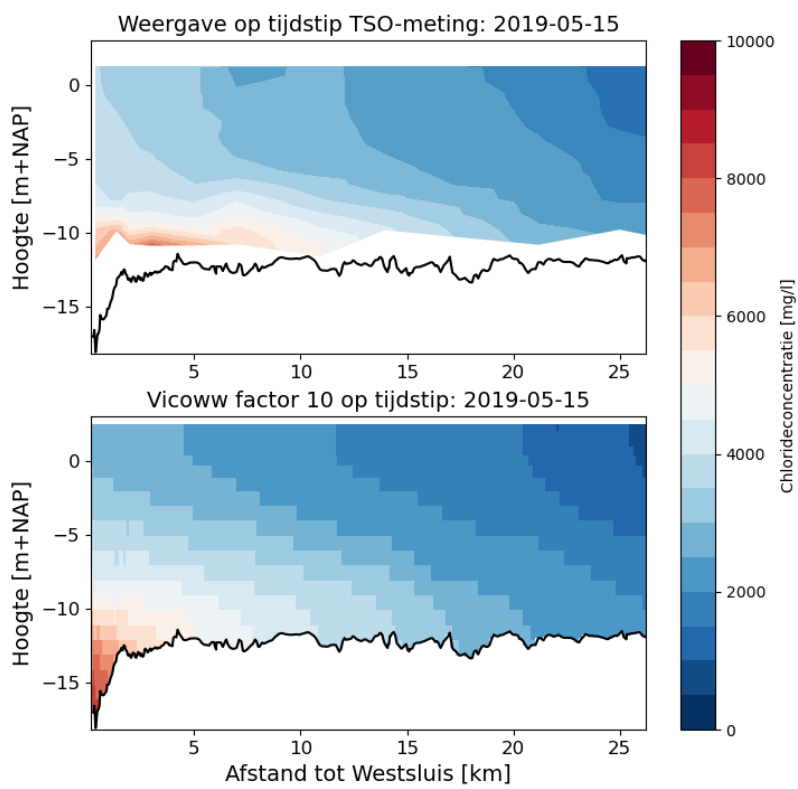
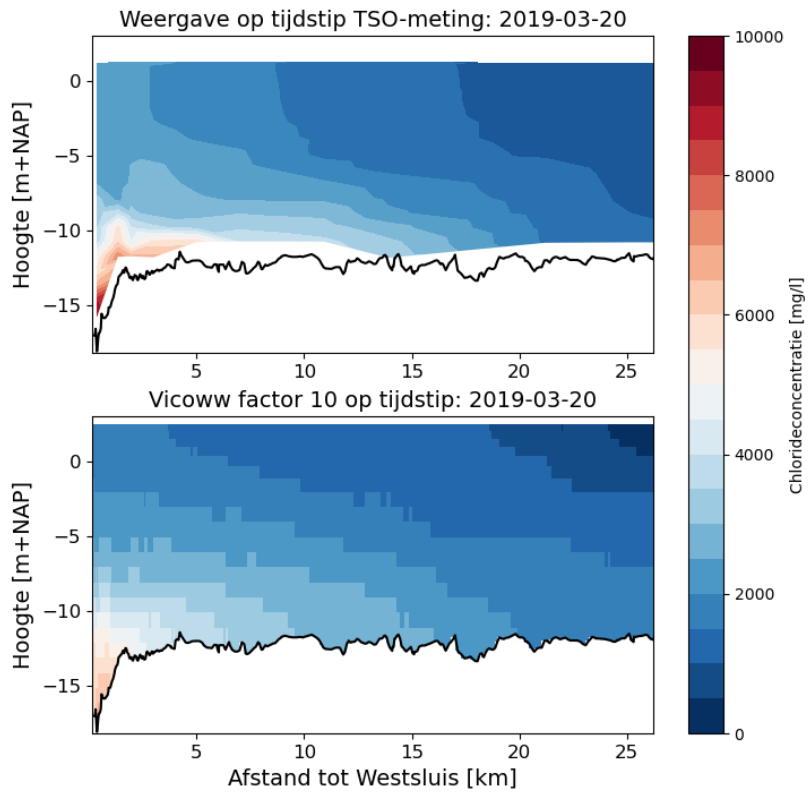
B Figuren validatie

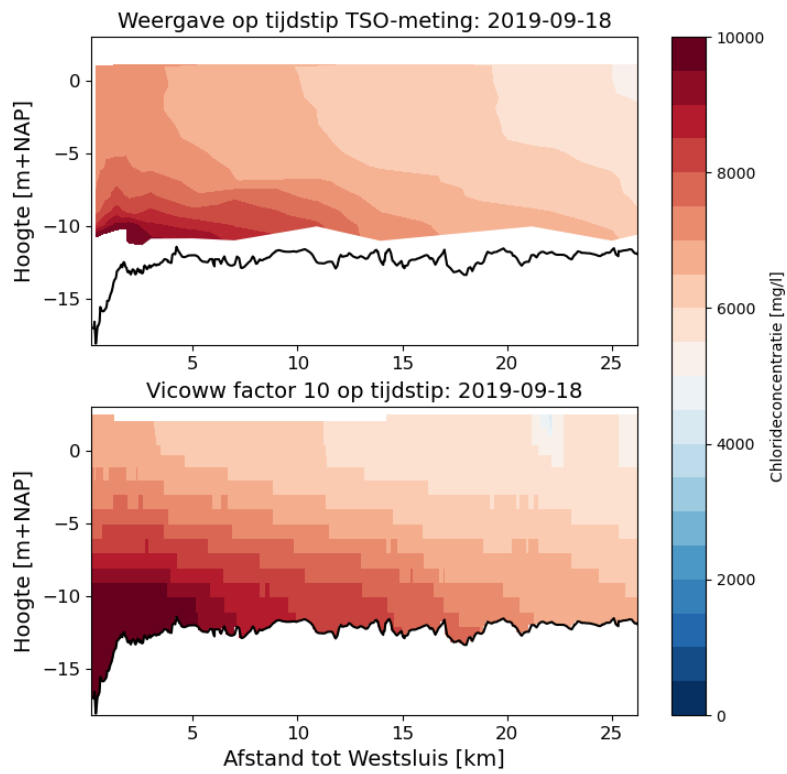
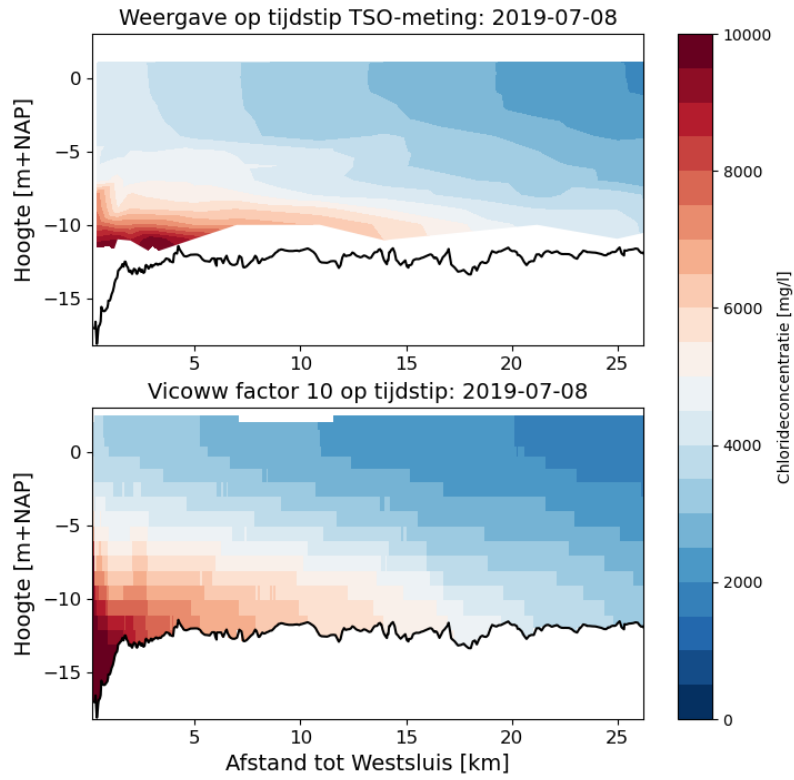
B.1 Langsdoorsnede

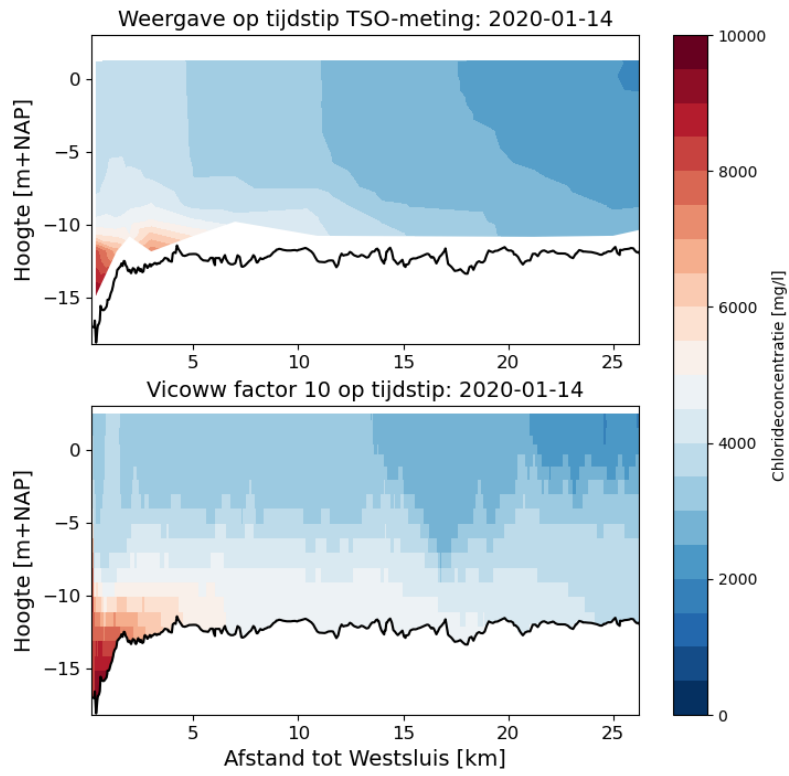
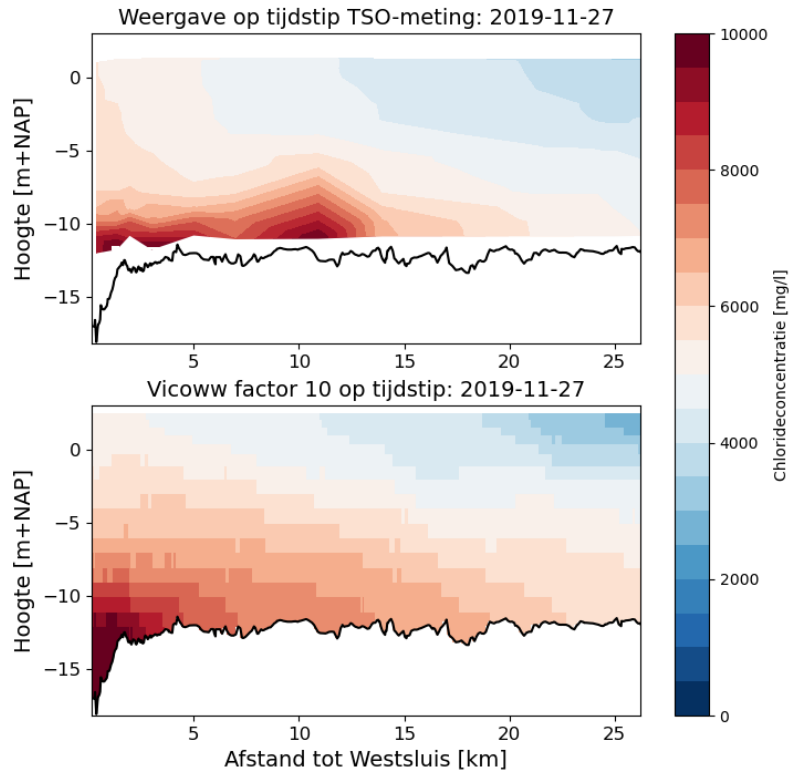


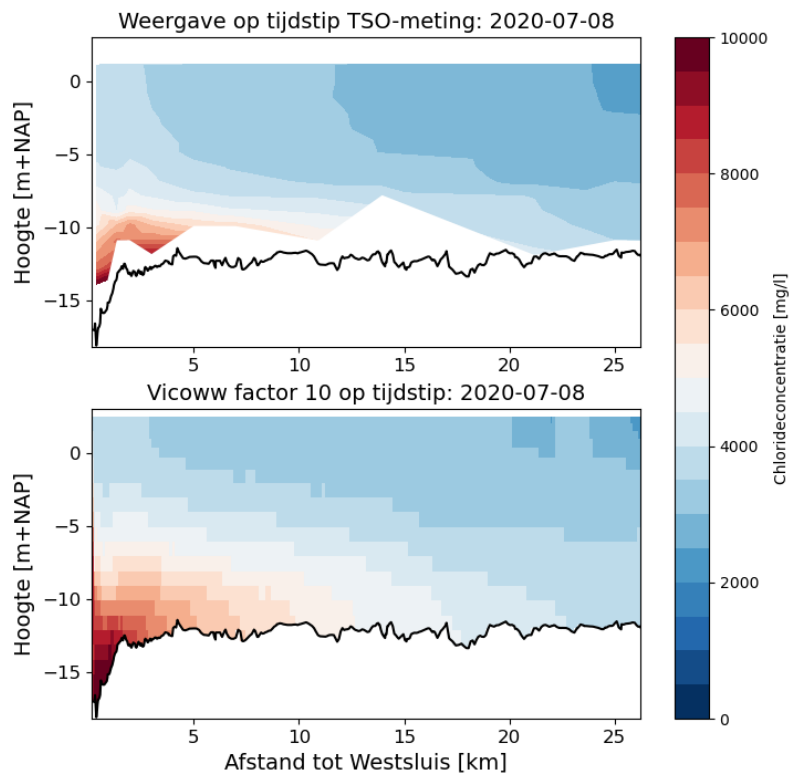
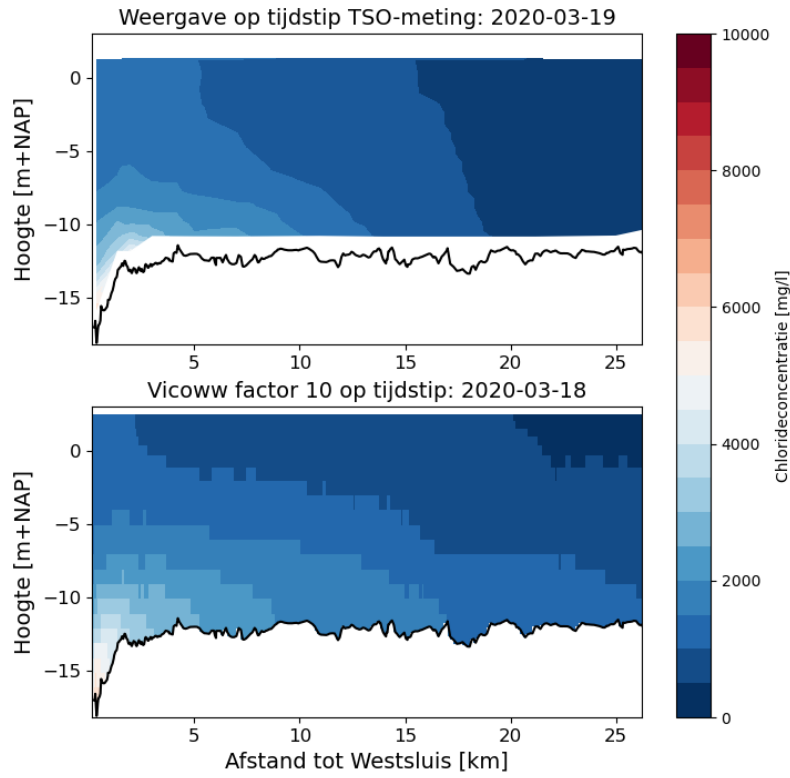


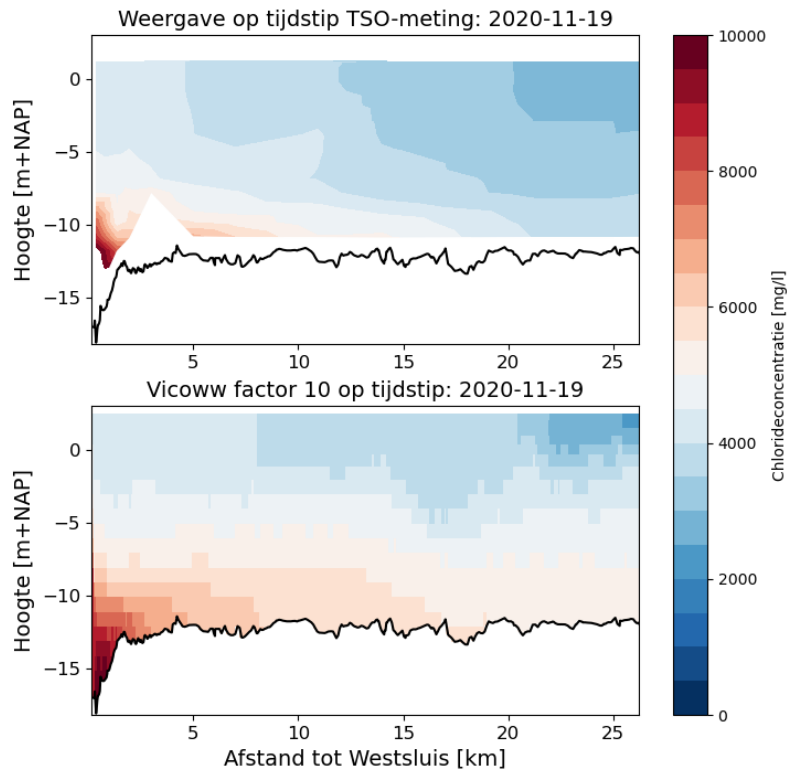
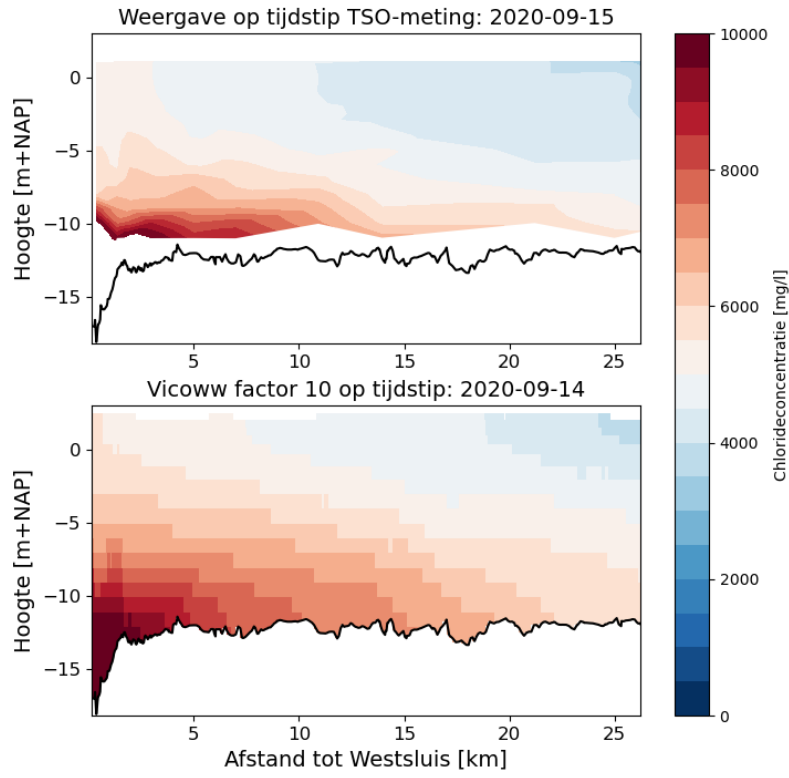




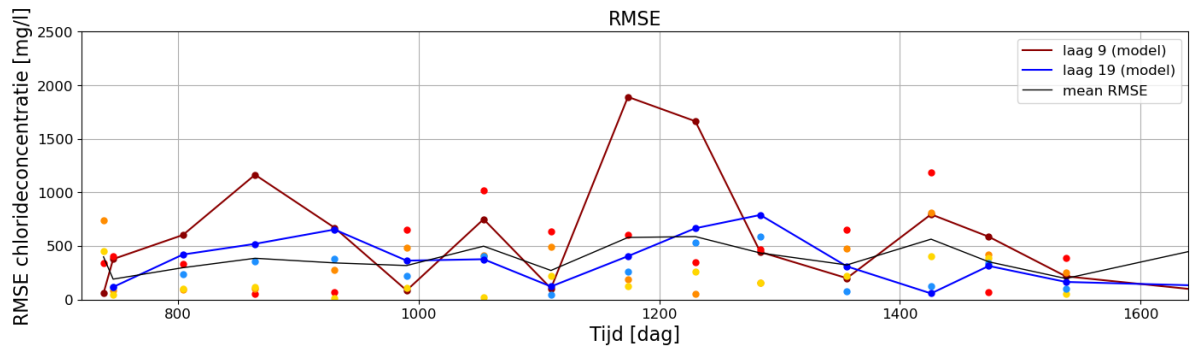
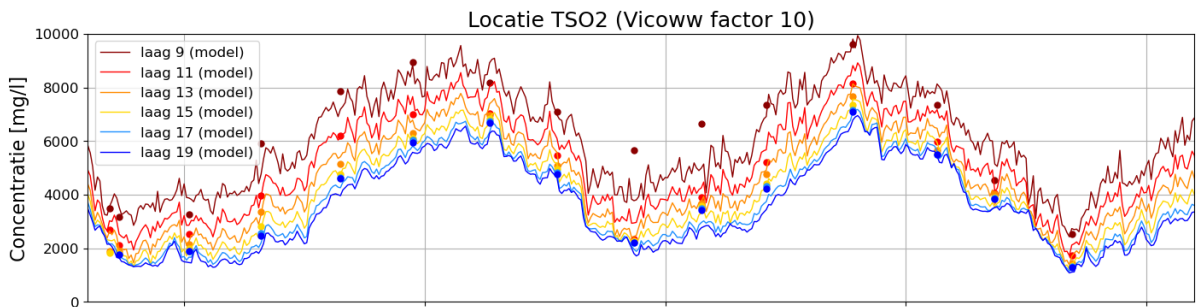
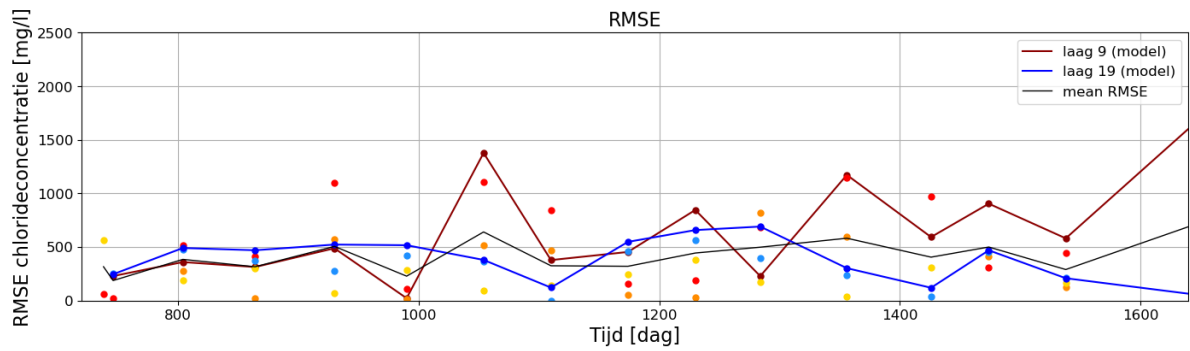
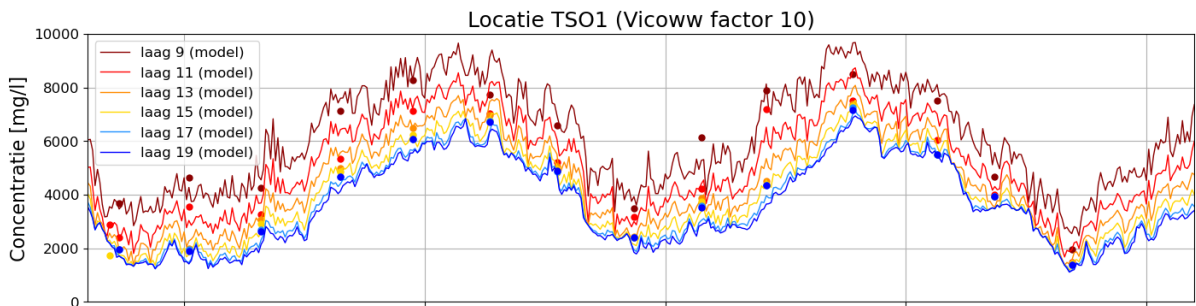


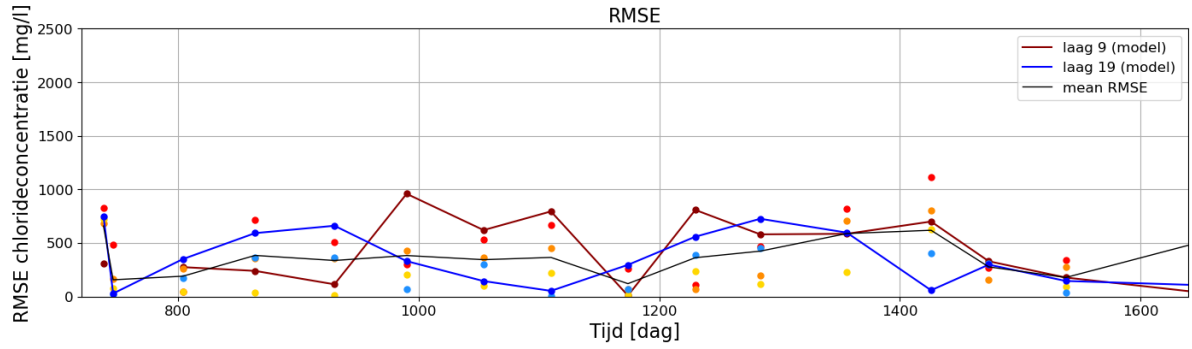
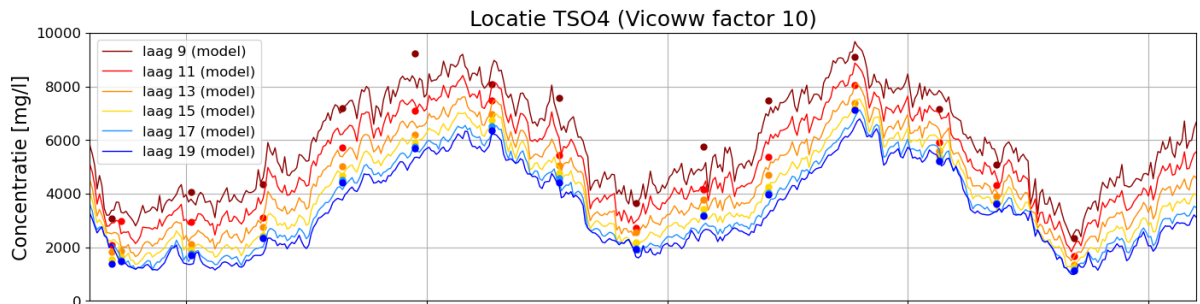
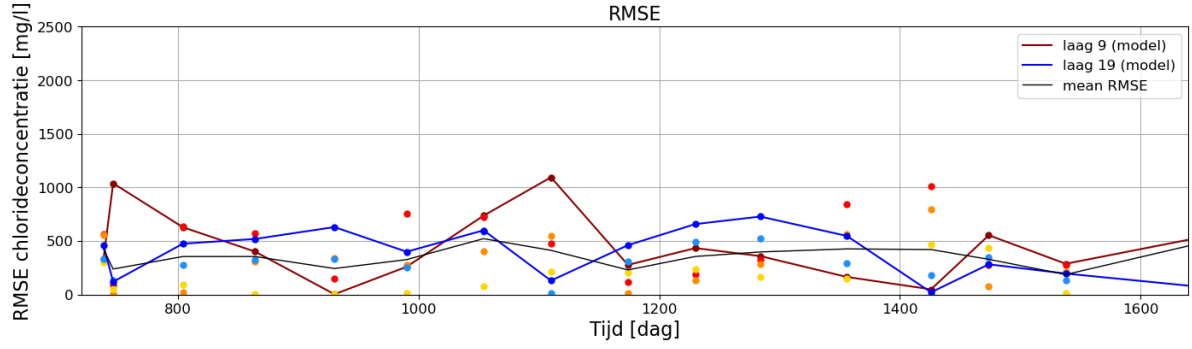
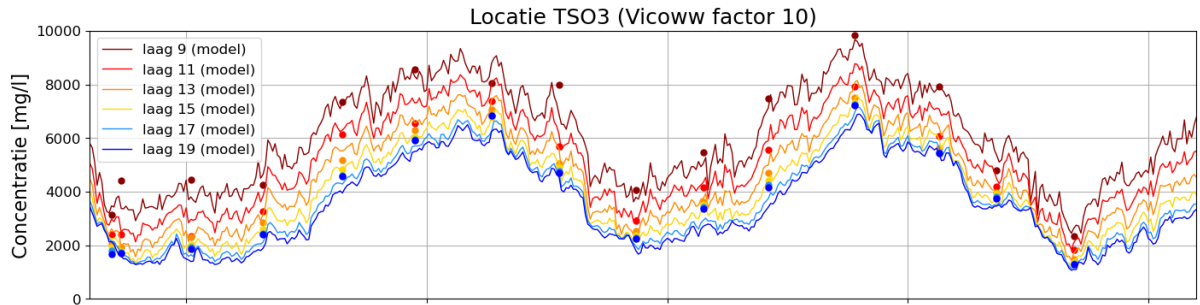




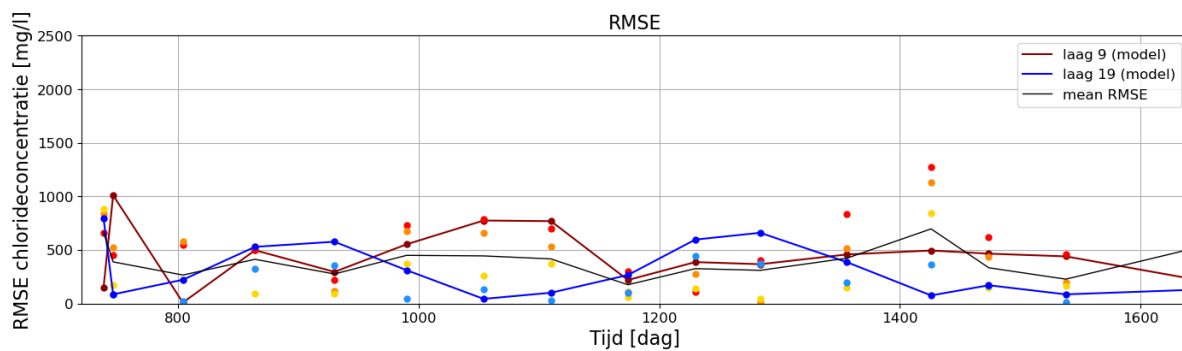
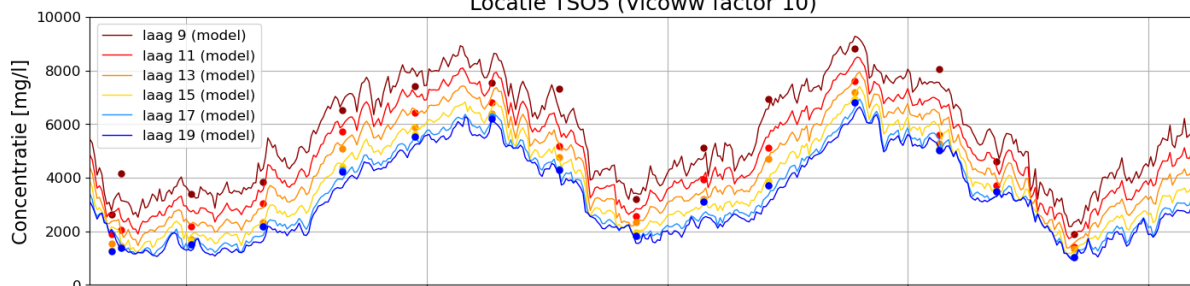


B.2 Chlorideconcentratie in de tijd op TSO-locaties

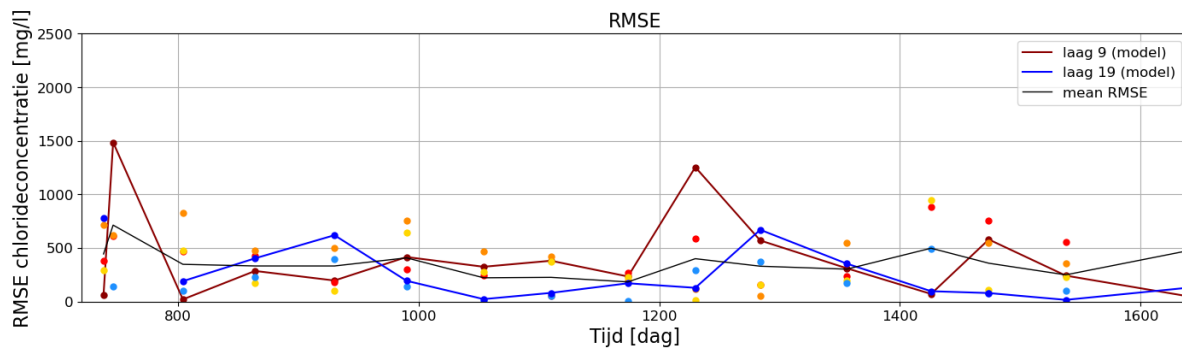
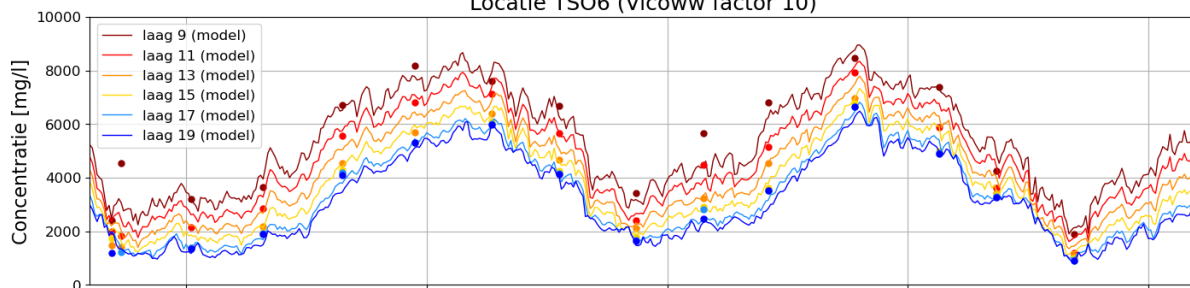




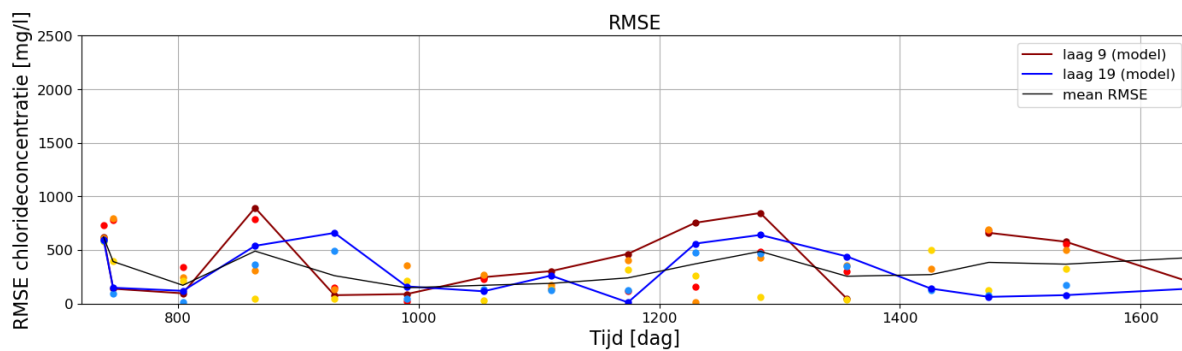
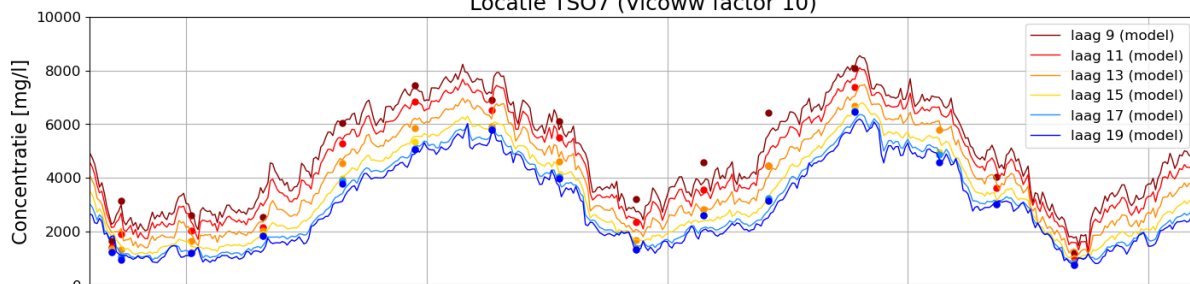
Locatie TSO5 (Vicoww factor 10)



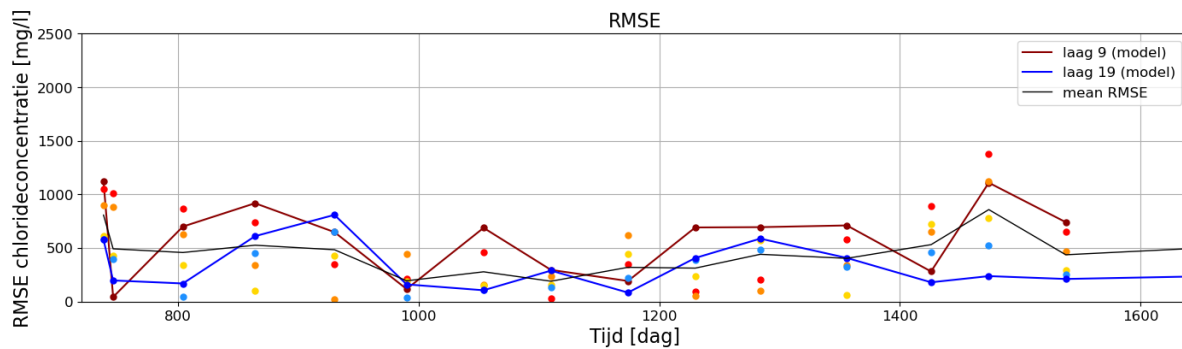
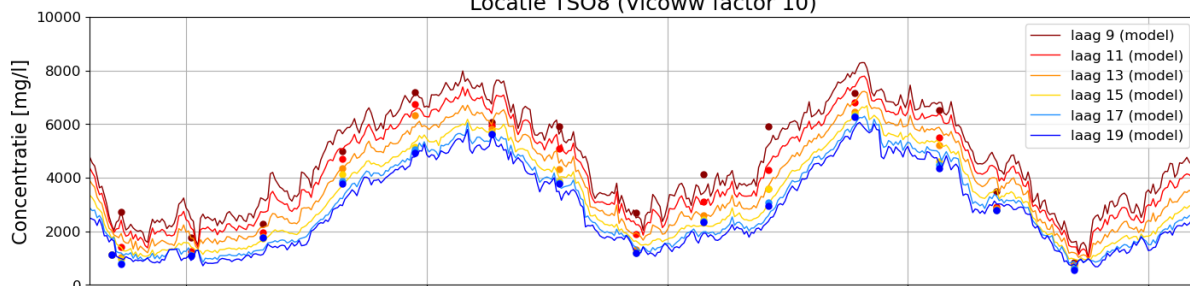
Locatie TSO6 (Vicoww factor 10)

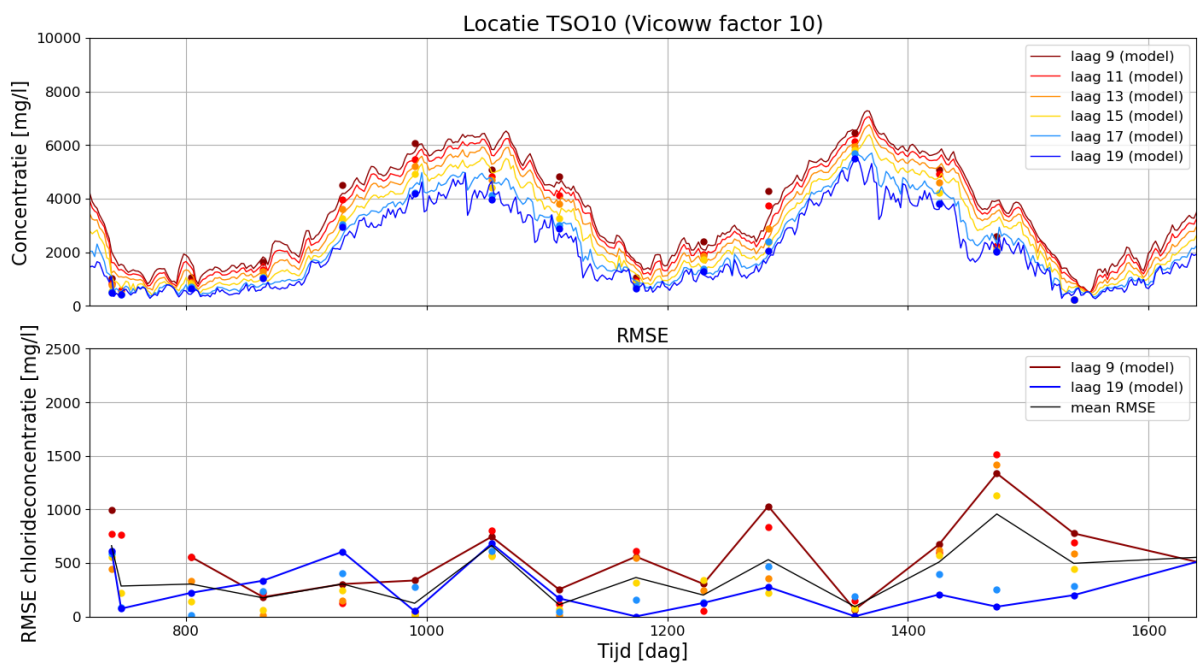
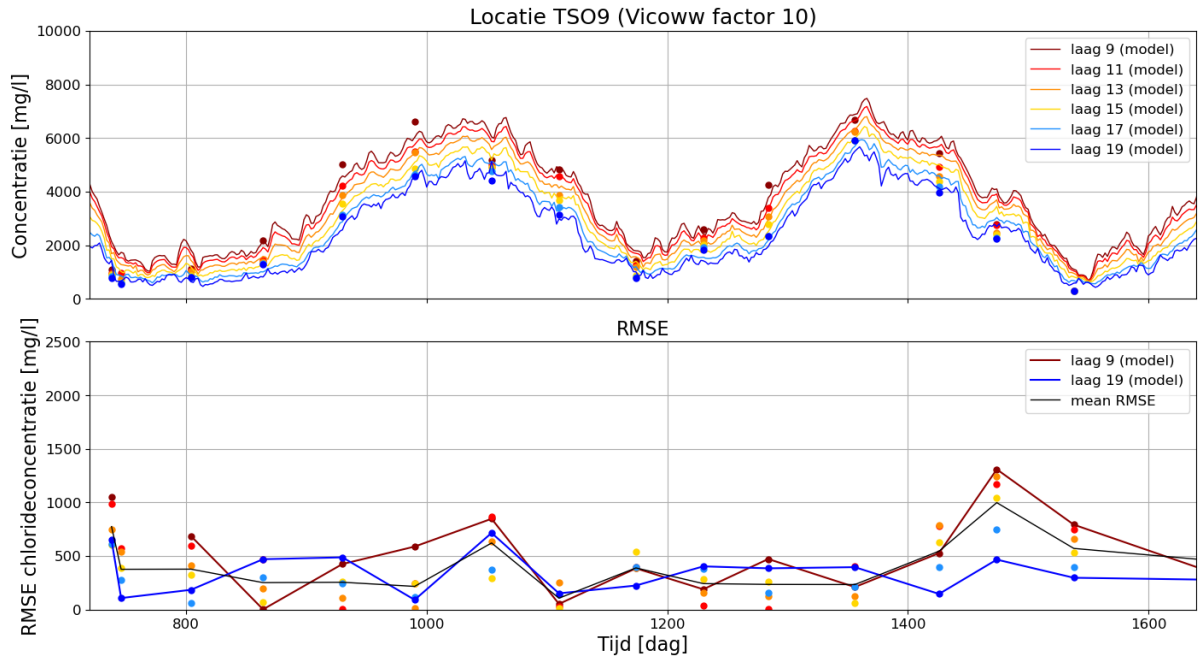


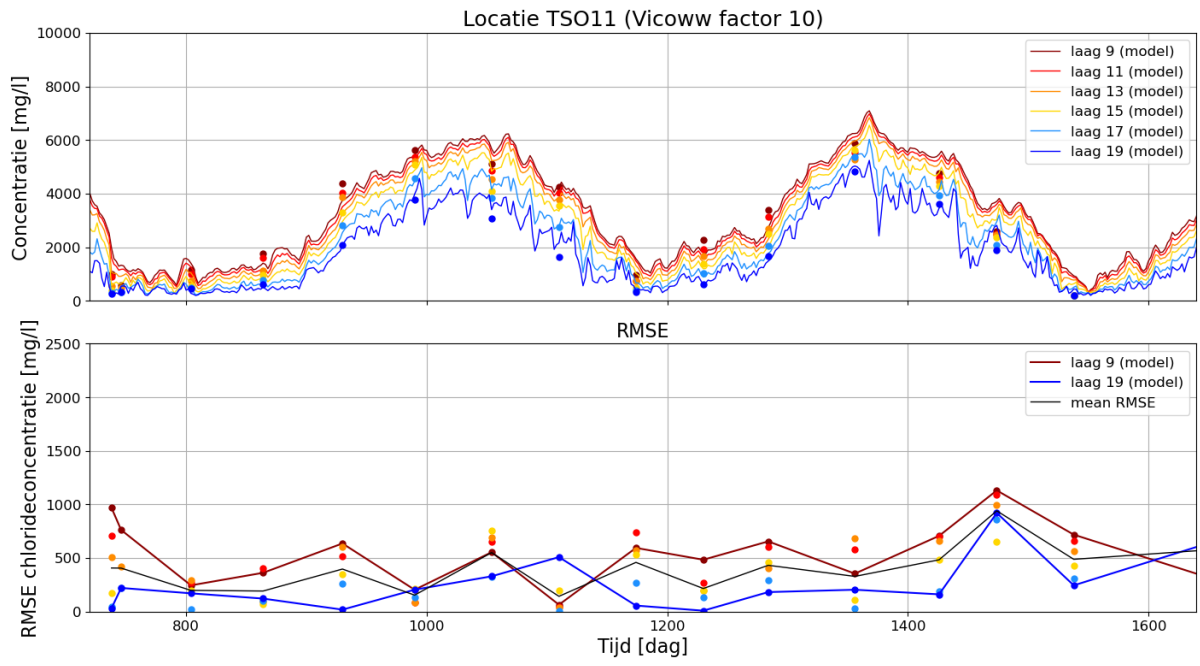
Locatie TSO7 (Vicoww factor 10)



Locatie TSO8 (Vicoww factor 10)







C Baseline

In het kader van deze opdracht is door middel van het uitgevoerde werk in HKV (2023b) een Baseline schematisatie voor het Kanaal van Gent naar Terneuzen vastgesteld. Bij aanvang was geen gebiedsschematisatie van het watersysteem beschikbaar. Met behulp van de gemaakte clipcontour (*clip_contour-kgt-j22_6-v1*) in HKV (2023b) en de meest recente versie van de gebiedsschematisatie van het Nederlandse hoofdwatersysteem van RWS in Baseline 6 (*baseline-nl_land-j22_6-v1*) is vervolgens de gebiedsschematisatie van het kanaal verkregen.

Ten behoeve van deze studie is vervolgens ook de gebiedsschematisatie geactualiseerd met behulp van de gemaakte Baseline-maatregel (*kg_uitb_a1*) in HKV(2023b) omdat anders essentiële delen van het model niet in voldoende mate gemodelleerd worden of inactief blijven. Zo zijn onder andere de Ringvaart richting Evergem, Moervaart, Zuidlede en de oude dokken bij Gent toegevoegd aan de schematisatie in het sectiebestand en voorzien van recente bodemhoogtegegevens.

Tijdens de uitvoering van deze opdracht bleek dat, in met name het Belgische deel van het kanaal, de projectie van de hoogtegegevens bij de buitenste cellen van het kanaal zorgde voor onrealistische bodemhoogtes in het midden van de cellen en dus een onrealistische representatie van het doorstroomoppervlakte. Er is daarom gekozen het hoogtemodel (*elevation_model_terrain*) te vervangen door een aangepast hoogtemodel (*special_elevation_model_terrain*).

Er is gewerkt met de meest recente versie van de baseline software: Baseline 6.3.2 Build 2739 voor ArcGis 10.6.1. (met patch).

C.1 Aanpassingen schematisatie

In HKV (2023b) zijn diverse baseline werkzaamheden in het kader van deze opdracht uitgevoerd. Dit betreft de onderstaande onderdelen:

- Het vaststellen van de modelboundary van het watersysteem
- Het vaststellen van de clipcontour van het watersysteem
- Het maken van een baseline-maatregel om de baseline gegevens in het kanaal te actualiseren

Voor aanvang van deze opdracht was nog geen deelgebied voor het KGT beschikbaar. Er is daarom aan de hand van de beschreven procedure in Deltares (2023b) een modelboundary en clipcontour gemaakt. Deze bestanden zijn opgenomen als twee aparte features in twee aparte geodatabases: *clip_contour-kgt-j22_6-v1.gdb* en *model_boundary-kgt-j22_6-v1.gdb*. Door middel van het clipcontour is een clip gemaakt uit Baseline-nl_land (*baseline-nl_land-j22_6-v1*) om de gebiedsschematisatie van het deelgebied KGT te verkrijgen.

Door middel van het wijzigingsbestand *kg_uitb_a1* is vervolgens de gebiedsschematisatie van het KGT (dus de gemaakte clip uit *baseline-nl_land*) geactualiseerd. Dit wijzigingsbestand (ofwel *baseline-maatregel*) bestaat uit de onderstaande onderdelen:

- Actualiseren van sectie 1 in *section_polygons* in het gehele kanaal. In België is het sectiebestand uitgebreid met de zijtakken: Ringvaart richting Evergem, Moervaart en Zuidlede. Tevens is het ook verlengd in de richting van Gent tot voorbij de Tolhuisstuw. In Nederland zijn de havens rondom Terneuzen aan sectie 1 toegevoegd.

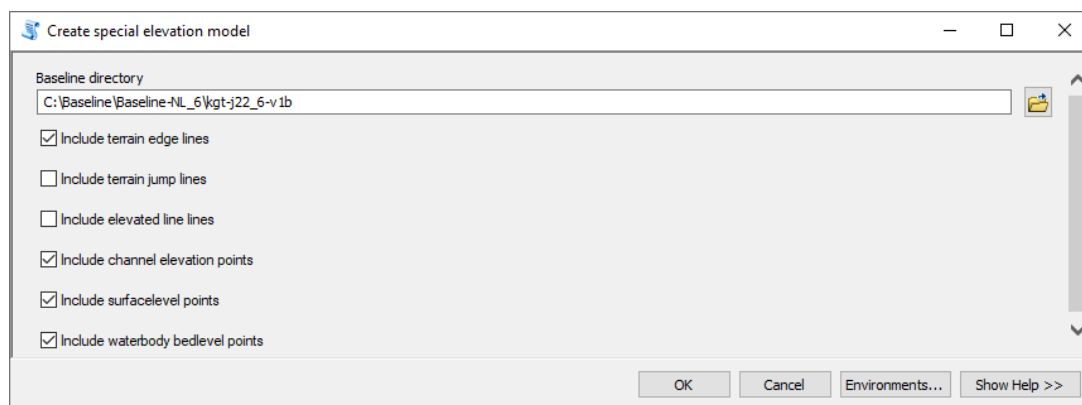
- Actualiseren van de bodemhoogtegegevens. In het Belgische deel van het kanaal zijn de recentste gemeten bodemgegevens aan toegevoegd. Zo zijn er bodemhoogtes van de Ringvaart richting Evergem, Moervaart, Zuidlede en de oude dokken van Gent toegevoegd. De gegevens in de hoofdgeul zijn geactualiseerd daar waar deze beschikbaar waren.
- De ligging van de grens van het kanaal is voor de Ringvaart richting Evergem, Moervaart, Zuidlede en het gedeelte richting Gent als *terrain_jump_3d_lines* toegevoegd. Tevens is de ligging van een aantal lijnen aangepast op basis van een actuele luchtfoto.
- Actualiseren van de ruwheid. Een ruwheidscode van 3400 is toegekend (gecommuniceerd met Ton Visser (Deltares)) aan het zomerbed van het kanaal in plaats van de niet-gedefinieerde code van 471. Tevens is daarom ook het 'roughcombination.ttd' bestand uitgebreid met deze ruwheidscode en bijbehorende ruwheid (Nikuradse ruwheidshoogte 0,15 m, zelfde als NZK/ARK)
- Actualiseren van uitvoerlocaties, cross-secties en de as van het kanaal. In het Belgische deel zijn kilometerpunten en de as van het kanaal toegevoegd. Kilometerpunten zijn genummerd van zuid (KG_1.00 nabij Gent) naar noord (KG_29.00 bij het sluizencomplex Terneuzen). Tevens is voor elk kilometerpunt een cross-sectie opgenomen.

De baseline-maatregel (*kg_uitb_a1*) is gecheckt door middel van de Content & Protocol check uit de Baseline toolbox.

Hieronder zijn de gevolgde stappen samengevat:

1. Vaststellen modelboundary (*model_boundary-kgt-j22_6-v1*) + clipcontour (*clip_contour-kgt-j22_6-v1*)
2. Deelgebied KGT vastgesteld door middel van clipcontour (*clip_contour-kgt-j22_6-v1*) in combinatie met baseline-nl_land schematisatie (*baseline-nl_land-j22_6-v1*)
3. Inmixen van het wijzigingsbestand (*kg_uitb_a1*) in het deelgebied van het KGT (*baseline-nl_land-j22_6-v1_clip*). Hiermee wordt de gebiedsschematisatie *kgt-j22_6-v1* verkregen.

Tijdens de uitvoering bleek dat, in met name het Belgische deel van het kanaal, de projectie van de hoogtegegevens bij de buitenste cellen van het kanaal zorgde voor onrealistische bodemhoogtes in het midden van de cellen en dus een onrealistische representatie van het doorstroomoppervlakte. Er is daarom gekozen het hoogtemodel (*elevation_model_terrain*) te vervangen door een aangepast hoogtemodel (*special_elevation_model_terrain*). Het aangepaste hoogtemodel is verkregen door gebruik te maken van de tool 'Create special elevation model' van de Baseline toolbox. Hierbij zijn de terrain jump en de elevated line lines niet meegenomen in de bepaling van het hoogtemodel, zie onderstaand screenshot.



De gebiedsschematisatie met het originele hoogtemodel is daarom *kgt-j22_6-v1a* genoemd en de gebiedsschematisatie met het aangepast hoogtemodel is *kgt-j22_6-v1b* genoemd. De laatstgenoemde is gebruikt voor de projectie op het rekenrooster (ofwel de conversie naar D-Flow FM).

C.2 Aanpassingen na Baseline projectie

Na de actualisatie van de Baseline gebiedsschematisatie zijn de gegevens uit Baseline geprojecteerd op het rekenrooster. Na deze projectie bleek dat de rondom de scheepvaartsluizen bij Terneuzen een handmatige aanpassing nodig was. Tevens zijn er nog een aantal extra uitvoerlocaties gedefinieerd.

- De bodem bij de Westsluis en Oostsluis is aangepast zodat in voldoende mate het water in en uit het model gemodelleerd kan worden. De hoogtes bij de Westsluis zijn aangepast naar NAP-17,0m en bij de Oostsluis naar NAP-6,6m.
- De geometrie van de Nieuwe Sluis Terneuzen is geïmplementeerd door de bodemhoogte aan te passen zodat deze aansluit op de huidige zoutvang en door de Middensluis met een hoogwatervrij vlak af te sluiten. De bestaande hoogwatervrije vlakken zijn hierbij allemaal verwijderd. Hierbij is gebruik gemaakt van toegeleverde ontwerptekeningen vanuit VNSC.
- Extra uitvoerlocaties opgenomen: alle elf TSO-locaties en vier locaties in de Moervaart, Zuidlede, Gent en de Ringvaart richting Evergem. Extra cross-secties zijn aangebracht bij de sluizen van Terneuzen en in de Moervaart, Zuidlede, Gent en Ringvaart richting Evergem.

Bestand	Toelichting
kgt-j22_6-v1b_bridges.pliz	Gebruikt in berekening
kgt-j22_6-v1b_calibration.cll	Niet gebruikt in berekening
kgt-j22_6-v1b_dry.pol	Aangepast met geometrie NST: kgt-j22_6-v1b_dry_NST.pol
kgt-j22_6-v1b_enc.pol	Niet gebruikt in berekening
kgt-j22_6-v1b_fwx.pliz	Niet gebruikt in berekening
kgt-j22_6-v1b_net.nc	Aangepast met bodemhoogtes sluizen en bodemhoogte NST: kgt-j22_6-v1b_corr_NST_net.nc
kgt-j22_6-v1b_thd.pli	Niet gebruikt in berekening
kgt-j22_6-v1b_trachytopes.arl	Gebruikt in berekening
kgt-j22_6-v1b_0_all_crs.pli	Aangepast met extra cross-secties: FlowFM_0_all_crs.pli
kgt-j22_6-v1b_0_all_obs.xyn	Aangepast met uitvoerlocaties: FlowFM_0_all_obs.xyn
sources_sinks\	Niet gebruikt in berekening
structures\	Niet gebruikt in berekening

D Modelinstellingen

```
# Generated on 11:04:49, 02-11-2020
# Deltares, D-Flow FM Version 1.2.105.67323M, Aug 01 2020, 21:10:01
# Source:https://svn.oss.deltares.nl/repos/delft3d/trunk/

#####
#                                     KGT model                                     #
#                                     D-HYDRO model: dflowfm3d-kgt-j22_6-v1a         #
#                                     #####                                     #
# Modeltype: D-Flow FM 3D                                                         #
# (bijv.: D-Flow FM 2D; D-Flow FM 2D + D-RTC; D-Flow FM 3D; D-Flow FM 3D + D-WAQ) #
# Bestandstype: Basis MDU-bestand zesde generatiemodellen RWS                   #
# Editable/Uneditable: Modeleigenschappen welke WEL/NIET mogen worden aangepast bij #
# toepassen van model                                                            #
# Invoer voor: testcase voor BOI met synthetische wind (draaiend met de klok mee), geen in- en #
# uitstroom op de randen ('gesloten bak') en initieel een (laag) meerpeil van -0.40 m +NAP #
#                                                                                   #
# Ontwikkelaar: HKV - Pepijn van Denderen, Jan-Willem van Lente, Paula Lambregts en Vincent Vuik #
#                                                                                   #
# Datum: 11-07-2023                                                               #
#                                                                                   #
# Opmerkingen:                                                                     #
# 1. ....                               #
# 2. ....                               #
# 3. ....                               #
# 4. ....                               #
#                                                                                   #
# Onregelmatigheden of problemen met deze modelschematisatie kunnen gemeld worden via het meldings- #
# formulier bij het Informatiepunt Leefomgeving (voorheen Helpdesk Water) onder Modelschematisaties: #
# https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/modelschematisaties/         #
#                                                                                   #
#####
[General]
#####
# Uneditable
#####
Program = D-Flow FM #
Program #
Version = 1.2.105.67323M #
Version number of computational kernel #
fileType = modelDef #
File type. Do not edit this. #
fileVersion = 1.09 #
File format version (do not edit this) #
AutoStart = 0 #
Autostart simulation after loading MDU (0: no, 1: autostart, 2: autostartstop) #
ModelSpecific = #
Optional 'model specific ID', to enable certain custom runtime function calls (instead of via MDU name). #
PathsRelativeToParent = 0 #
Default: 0. Whether or not (1/0) to resolve file names (e.g. inside the *.ext file) relative to their di- #
rect parent, instead of to the toplevel MDU working dir.

#####
[geometry]
#####
# Editable
#####
netfile = KGT_NST_aangepastebodemhoogte_net.nc #
*_net.nc #
GridEnclosureFile = #
Enclosure file to clip outer parts from the grid *.pol #
BedlevelFile = #
Bedlevels points file e.g. *.xyz, only needed for bedlevtype not equal 3 #
DryPointsFile = kgt_NST_dry.pol #
Dry points file *.xyz (third column dummy z values), or dry areas polygon file *.pol (third column 1/-1: #
inside/outside) #
WaterLevIniFile = #
Initial water levels sample file *.xyz #
LandBoundaryFile = #
Land boundaries file *.ldb, used for visualization #
ThinDamFile = #
Polyline file *_thd.pli, containing thin dams #
Cutcelllist = #
File with names of cutcell polygons, e.g. cutcellpolygons.lst #
FixedWeirFile = #
Polyline file *_fxw.pliz, containing fixed weirs with rows x, y, crest level, left ground level, right #
ground level #
PillarFile = .././geometry/kgt-j22_6-v1_org_bridges.pliz #
Polyline file *_pillar.pliz, containing four columns with x, y, diameter and Cd coefficient
```

```

Gulliesfile = #
Polyline file *_gul.pliz, containing lowest bed level along talweg x, y, z level #
Roofsfile = #
Polyline file *_rof.pliz, containing roofgutter heights x, y, z level #
VertplizFile = #
Vertical layering file *_vlay.pliz with rows x, y, Z, first Z, nr of layers, second Z, layer type #
ProflocFile = #
Channel profile location file *_proflocation.xyz with rows x, y, z, profile number ref #
ProfdefFile = #
Channel profile definition file *_profdefinition.def with definition for all profile numbers #
ProfdefxyzFile = #
Channel profile definition file _profdefinition.def with definition for all profile numbers #
IniFieldFile = ../../initial_conditions/wlev.ini #
Initial values and parameter fields file #
UseCaching = 0 #
Use caching for geometrical/network-related items (0: no, 1: yes) #
Uniformwidth1D = 2. #
Uniform width for channel profiles not specified by profloc #
Uniformheight1D = 3. #
Uniform height for channel profiles not specified by profloc #
Uniformtyp1Dstreetinlets = -2 #
Uniform type street inlets #
Uniformtyp1Droofgutterpipes = -2 #
Uniform type roof gutter pipes #
Dxwumin2D = 0. #
Smallest fraction dx/wu , set dx > Dxwumin2D*wu, Default = 0.1 #
ManholeFile = #
File *.ini containing manholes #
PipeFile = #
File *.pliz containing pipe-based 'culverts' #
ShipdefFile = #
File *.shd containing ship definitions #
WaterLevIni = 3 #
Initial water level at missing s0 values #
BedlevUni = -3. #
Uniform bed level used at missing z values if BedlevType > 2 #
BedlevType = 3 #
Bathymetry specification #
1: at cell centers (from BathymetryFile) #
2: at faces (from BathymetryFile) #
3: at nodes, face levels mean of node values #
4: at nodes, face levels min. of node values #
5: at nodes, face levels max. of node values #
6: at nodes, face levels max. of cell-center values #
PartitionFile = #
Domain partition polygon file *_part.pol for parallel run #
#-----
# Uneditable
#-----
AngLat = 51 #
Angle of latitude S-N (deg), 0: no Coriolis #
AngLon = 4. #
Angle of longitude E-W (deg), 0: Greenwich, used in solar heat flux computation. #
Conveyance2D = -1 #
-1: R=HU,0: R=H, 1: R=A/P, 2: K=analytic-1D conv, 3: K=analytic-2D conv #
Slotw2D = 0. #
- #
Kmx = 24 #
Maximum number of vertical layers #
Layertype = 2 #
Vertical layer type (1: all sigma, 2: all z, 3: use VertplizFile) #
Numtopsig = 0 #
Number of sigma layers in top of z-layer model #
Numtopsiguniform = 0 #
Number of sigma layers in top of z-layer model #
SigmaGrowthFactor = 1. #
Layer thickness growth factor from bed up #
StretchType = 1. #
Type of layer stretching, 0 = uniform, 1 = user defined, 2 = fixed level double exponential #
ZlayTop = 3 #
StretchCoef = 4.79 4.76 4.76 4.76 4.76 4.76 4.76 4.76 4.76 4.76 4.76 4.76 #
4.76 4.76 4.76 4.76 4.29 3.81 3.33 2.86 2.38 2.38 2.38 2.38 #
#-----
[trachytopes]
#-----
# Editable
#-----
TrtL = ../../geometry/kgt-j22_6-v1_org_trachytopes.arl #
File (*.arl) including distribution of trachytope definitions #
#-----

```

```

# Uneditable
#-----
TrtRou = Y
Include alluvial and vegetation roughness (trachytopes) (Y: yes, N: no)
TrtDef = ../../general/roughcombination-all-2021-v4-kgt.ttd
File (*.ttd) including trachytopes definitions
DtTrt = 60.
Trachytopes roughness update time interval (s)
TrtMxR = 8
Maximum recursion level for combined trachytopes definitions
TrtCll =
Calibration factor file for roughness from trachytopes (see also [calibration] block)
TrtMnH = 0.1
Minimum water depth for roughness computations
TrtMth = 1
Area averaging method, (1=Nikuradse k based, 2=Chezy C based (parallel and serial))

#####
#-----
[physics]
#-----
# Uneditable
#-----
UnifFrictCoef = 2.d-2
Uniform friction coefficient (0: no friction)
UnifFrictType = 1
Uniform friction type (0: Chezy, 1: Manning, 2: White-Colebrook, 3: idem, WAQUA style)
UnifFrictCoef1D = 2.d-2
Uniform friction coefficient in 1D links (0: no friction)
UnifFrictCoef1D2D = 2.d-2
Uniform friction coefficient in 1D links (0: no friction)
UnifFrictCoefLin = 0.
Uniform linear friction coefficient (0: no friction)
UnifFrictCoef1DgrLay = 5.d-2
Uniform ground layer friction coefficient for ocean models (m/s) (0: no friction)
Vicouv = 0.1
Uniform horizontal eddy viscosity (m2/s)
Dicouv = 0.1
Uniform horizontal eddy diffusivity (m2/s)
Vicoww = 5.d-5
Uniform vertical eddy viscosity (m2/s)
Dicoww = 5.d-5
Uniform vertical eddy diffusivity (m2/s)
Xlozmidov = 0.
Ozmidov length scale (m), default=0.0, no contribution of internal waves to vertical diffusion
Smagorinsky = 0.2
Smagorinsky factor in horizontal turbulence, e.g. 0.15
Elder = 0.
Elder factor in horizontal turbulence
irov = 0
0=free slip, 1 = partial slip using wall_ks
wall_ks = 0.
Wall roughness type (0: free slip, 1: partial slip using wall_ks)
Rhomean = 1000.
Average water density (kg/m3)
Idensform = 2
Density calculation (0: uniform, 1: Eckart, 2: Unesco, 3: baroclinic case)
Ag = 9.813
Gravitational acceleration
TidalForcing = 0
Tidal forcing, if jsferic=1 (0: no, 1: yes)
SelfAttractionLoading = 0
Self attraction and loading (0=no, 1=yes, 2=only self attraction)
SelfAttractionLoading_correct_wl_with_ini = 0
correct water level with initial water level in Self attraction and loading (0=no, 1=yes)
ITcap = 0.
Upper limit on internal tides dissipation (W/m^2)
VillemonteCD1 = 1.
Calibration coefficient for Villemonte. Default = 1.0.
VillemonteCD2 = 10.
Calibration coefficient for Villemonte. Default = 10.0.
Salinity = 1
Include salinity, (0=no, 1=yes)
InitialSalinity = 0.3
Uniform initial salinity concentration (ppt)
Temperature = 5
Include temperature (0: no, 1: only transport, 3: excess model of D3D, 5: composite (ocean) model)
InitialTemperature = 5.5
Uniform initial water temperature (degC)
Secchidepth = 2.
Water clarity parameter (m)
Stanton = -1.
Coefficient for convective heat flux, if negative, Ccon = abs(Stanton)*Cdwind
Dalton = -1.
Coefficient for evaporative heat flux, if negative, Ceva = abs(Dalton)*Cdwind
Soiltempthick = 0.1
Use soil temperature buffer if > 0, e.g. 0.2 (m)

```

```

Heat_eachstep                = 1 #
1=heat each timestep, 0=heat each usertimestep #
SecondaryFlow                = 0 #
Secondary flow (0: no, 1: yes) #

#####
[wind]
#####
# Editable
#-----
ICdtyp                      = 6 #
Wind drag coefficient type (1=Const; 2=Smith&Banke (2 pts); 3=S&B (3 pts); 4=Charnock 1955, 5=Hwang 2005, #
6=Wuest 2005, 7=Hersbach 2010 (2 pts) #
Relativewind                 = 0 #
Wind speed relative to top-layer water speed, 1=yes, 0 = no) #
Windhuorzwsbased             = 0 #
Wind hu or zws based , 0 = hu, 1 = zws #
PavBnd                       = 0. #
Average air pressure on open boundaries (N/m2) (only applied if > 0) #
Pavini                       = 0. #
Average air pressure for initial water level correction (N/m2) (only applied if > 0) #
Stericcorrection             = 0 #
Steric correction on waterlevel bnds, for which sal + temp should be prescribed #
#-----
# Uneditable
#-----
Rhoair                       = 1.205 #
Air density (kg/m3) #

#####
[numerics]
#####
# Uneditable
#-----
CFLMax                       = 0.7 #
Maximum Courant number #
AdvecType                    = 33 #
Advection type (0: none, 1: Wenneker, 2: Wenneker q(ui-u), 3: Perot q(ui-u), 4: Perot q(ui-u), 5: Perot #
q(ui-u) without itself), 33: as 3 using links (faster) #
TimeStepType                  = 2 #
Time step handling (0: only transport, 1: transport + velocity update, 2: full implicit step-reduce, 3: #
step-Jacobi, 4: explicit) #
Icoriolistype                 = 5 #
0=No, 5=default, 3,4 no weights, 5-10 Kleptsova hu/hs, 25-30 Ham hs/hu, odd: 2D hs/hu, even: hsk/huk #
Newcorio                      = 0 #
0=prior to 27-11-2019, 1=no normal forcing on open bnds, plus 12 variants ) #
Limtypmom                     = 4 #
Limiter type for cell center advection velocity (0: none, 1: minmod, 2: van Leer, 3: Kooren, 4: monotone #
central) #
Limtypsa                      = 4 #
Limiter type for salinity transport (0: none, 1: minmod, 2: van Leer, 3: Kooren, 4: monotone central) #
TransportMethod                = 1 #
Transport method (0: Herman's method, 1: transport module) #
TransportTimestepping          = 1 #
Timestepping method in Transport module, 0 = global, 1 = local (default) #
TransportAutoTimestepdiff      = # #
Vertadvtypsal                  = 6 #
Vertical advection type for salinity (0: none, 1: upwind explicit, 2: central explicit, 3: upwind implicit, #
4: central implicit, 5: central implicit but upwind for neg. stratif., 6: higher order explicit, no For- #
ester) #
Vertadvtypstem                 = 6 #
Vertical advection type for temperature (0: none, 1: upwind explicit, 2: central explicit, 3: upwind im- #
plicit, 4: central implicit, 5: central implicit but upwind for neg. stratif., 6: higher order explicit, no #
Forester) #
Vertadvtypmom                  = 6 #
Vertical advection type for ul: 0: No, 3: Upwind implicit, 4: Central implicit, 5: QUICKEST implicit., 6: #
centerbased upwind expl #
Zlayercenterbedvel            = 1 #
reconstruction of center velocity at half closed bedcells (0=no, 1: copy bed link velocities) #
icgsolver                     = 6 # Solver type , 1 = sobekGS_OMP, 2 = so- #
bekGS_OMPthreadsafe, 3 = sobekGS, 4 = sobekGS + Saadilud, 5 = parallel/global Saad, 6 = parallel/Petsc, 7 = #
parallel/GS #
Noderivedtypes                 = 5 #
0=use der. types. , 1 = less, 2 = lesser, 5 = also dealloc der. types #
FixedWeirScheme                = 9 #
Tlfsmo                         = 3600. #
Fourier smoothing time (s) on water level boundaries #
Logprofkepsbndin              = 0 #
inflow: 0=0 keps, 1 = log keps inflow, 2 = log keps in and outflow #
Slopedrop2D                    = 0. #
Apply drop losses only if local bed slope > Slopedrop2D, (<=0: no drop losses) #
Drop1D                         = 0 #
Apply drop losses in 1D (0: no, 1:yes) #
Drop3D                         = -999 #
Apply drop losses in 3D (0: no, 1:yes) #

```

```

Keepzlayeringatbed                = 2                                #
0:bedlayerthickness == zlayerthickness, 1:possibly very thin layer at bed, 2=equal thickness first two layers
cstbnd                             = 0                                #
Delft-3D type velocity treatment near boundaries for small coastal models (1: yes, 0: no)
Maxitverticalforestersal           = 0                                #
Forester iterations for salinity (0: no vertical filter for salinity, > 0: max nr of iterations)
Maxitverticalforestertem           = 0                                #
Forester iterations for temperature (0: no vertical filter for temperature, > 0: max nr of iterations)
Turbulencemodel                    = 3                                #
Turbulence model (0: none, 1: constant, 2: algebraic, 3: k-epsilon, 4: k-tau)
Epslu                               = 1.d-4                          #
Threshold water depth for wet and dry cells
jaupwindsrc                         = 1                                #
1st-order upwind advection at sources/sinks (1) or higher-order (0)
jasfer3D                            = 0                                #
corrections for spherical coordinates

#####
[time]
# Editable
-----
TStart                             = 0.                                #
Start time w.r.t. RefDate (in TUnit)
TStop                               = 31536000.                          #
Stop time w.r.t. RefDate (in TUnit) # 180 dagen = 15552000 # 6jaar = 189216000.
# Uneditable
-----
RefDate                            = 20240101                          #
Reference date (yyyymmdd)
Tzone                              = 0.                                #
Time zone assigned to input time series
DtUser                             = 30.                               #
Time interval (s) for external forcing update
DtNodal                            = 21600.                          #
Time interval (s) for updating nodal factors in astronomical boundary conditions
DtMax                               = 5.                                #
Maximal computation timestep (s)
Dtfacmax                           = 1.1                              #
Max timestep increase factor ( )
DtInit                             = 1.                                #
Initial computation timestep (s)
Timestepanalysis                   = 0                                #
0=no, 1=see file *.steps
AutoTimestep                       = 3                                #
0 = no, 1 = 2D (hor. out), 3=3D (hor. out), 5 = 3D (hor. inout + ver. inout), smallest dt
Tunit                              = S                                #
Time unit for start/stop times (D, H, M or S)

#####
[restart]
# Editable
-----
RestartFile                        =                               #
Restart netcdf-file, either *_rst.nc or *_map.nc
RestartDateTime                    =                               #
Restart date and time (yyyymmddhhmmss) when restarting from *_map.nc
RstIgnoreBl                       = 0                                #
Flag indicating whether bed level from restart should be ignored (0=no (default), 1=yes)

#####
[external forcing]
# Editable
-----
ExtForceFile                       = FlowFM_NST.ext                    #
Old format for external forcings file *.ext, link with tim/cmp-format boundary conditions specification
ExtForceFileNew                    =                               #
New format for external forcings file *.ext, link with bc-format boundary conditions specification

#####
[output]
# Editable
-----
OutputDir                          = results                          #
Output directory of map-, his-, rst-, dat- and timings-files, default: DFM_OUTPUT_<modelname>. Set to . for
current dir.
FlowGeomFile                       =                               #
Flow geometry NetCDF *_flowgeom.nc
ObsFile                            = ../../geometry/output_locations/FlowFM_0_all_obs.xyn    #
CrsFile                            = ../../geometry/cross_sections/FlowFM_crs.pli    #

```



```

FouFile = #
Fourier analysis input file *.fou #
FouUpdateStep = 0 #
Fourier update step type: 0=every user time step, 1=every computational timestep. #
HisFile = #
HisFile name *_his.nc #
MapFile = #
MapFile name *_map.nc #
HisInterval = 3600 #
History times (s), interval, starttime, stoptime (s), if starttime, stoptime are left blank, use whole simulation period #
XLSInterval = 0. #
Interval (s) XLS history #
MapInterval = 172800. #
Map times (s), interval, starttime, stoptime (s), if starttime, stoptime are left blank, use whole simulation period #
RstInterval = 31536000 #
Restart times (s), interval, starttime, stoptime (s), if starttime, stoptime are left blank, use whole simulation period #
MbaInterval = 0. #
Mass balance area output interval (s) #
MbaWriteCsv = 0 #
Write mass balance area output to a csv-file (1: yes, 0: no) #
MbaLumpFromToMba = 0 #
Lump MBA from/to other areas mass balance terms (1: yes, 0: no) #
MbaLumpBoundaries = 0 #
Lump MBA boundary mass balance terms (1: yes, 0: no) #
MbaLumpSourceSinks = 0 #
Lump MBA source/sink mass balance terms (1: yes, 0: no) #
MbaLumpProcesses = 0 #
Lump MBA processes mass balance terms (1: yes, 0: no) #
WaqOutputDir = #
Output directory of WAQ communication files (flowgeom, vol, flo, etc.), default: DFM_DELWAQ_<modelname>. Set to . for current dir. #
WaqInterval = 0. 0. 31104000. #
DELWAQ output times, given as "interval" "start period" "end period" (s) #
WaqHorAggr = #
DELWAQ output horizontal aggregation file (*.dwg) #
WaqVertAggr = #
DELWAQ output vertical aggregation file (*.vag) #
ClassMapInterval = -999. 0. 31104000. #
Class map times (s), interval, starttime, stoptime (s), if starttime, stoptime are left blank, use whole simulation period #
ClassMapFile = #
ClassMapFile name *_clm.nc #
StatsInterval = 600. #
Screen step output interval in seconds simulation time, if negative in seconds wall clock time #
TimingsInterval = 0. #
Timings statistics output interval #
TimeSplitInterval = 0 s #
Time splitting interval, after which a new output file is started. value+unit, e.g. '1 M', valid units: Y,M,D,h,m,s. #
#-----
# Write time series to his-file (1: yes, 0: no)
#-----
Wrihis_balance = 1 #
Write mass balance totals to his file (1: yes, 0: no) #
Wrihis_sourcesink = 1 #
Write sources-sinks statistics to his file (1=yes, 0=no) #
Wrihis_structure_gen = 0 #
Write general structure parameters to his file (1: yes, 0: no) #
Wrihis_structure_dam = 0 #
Write dam parameters to his file (1: yes, 0: no) #
Wrihis_structure_pump = 0 #
Write pump parameters to his file (1: yes, 0: no) #
Wrihis_structure_gate = 0 #
# Write gate parameters to his file (1: yes, 0: no) #
Wrihis_structure_weir = 0 #
Write weir parameters to his file (1: yes, 0: no) #
Wrihis_turbulence = 0 #
Write k, eps and vicww to his file (1: yes, 0: no) #
Wrihis_wind = 0 #
Write wind velocities to his file (1: yes, 0: no) #
Wrihis_rain = 0 #
Write precipitation to his file (1: yes, 0: no) #
Wrihis_temperature = 1 #
Write temperature to his file (1: yes, 0: no) #
Wrihis_waves = 0 #
Write wave data to his file (1: yes, 0: no) #
Wrihis_heat_fluxes = 0 #
Write heat fluxes to his file (1: yes, 0: no) #
Wrihis_salinity = 1 #
Write salinity to his file (1: yes, 0: no) #
Wrihis_density = 1 #
Write density to his file (1: yes, 0: no) #
Wrihis_waterlevel_s1 = 1 #
Write water level to his file (1: yes, 0: no) #

```

```

Wrihis_bedlevel          = 1                                #
Write bed level to his file (1: yes, 0: no)                  #
Wrihis_waterdepth       = 0                                #
Write waterd epth to his file (1: yes, 0: no)                #
Wrihis_velocity_vector  = 1                                #
Write velocity vectors to his file (1: yes, 0: no)           #
Wrihis_upward_velocity_component = 0                       #
Write upward velocity to his file (1: yes, 0: no)           #
Wrihis_sediment         = 0                                #
Write sediment transport to his file (1: yes, 0: no)        #
Wrihis_constituents     = 0                                #
Write tracers to his file (1: yes, 0: no)                   #
Wrihis_zcor             = 1                                #
Write vertical coordinates to his file (1: yes, 0: no)      #
#-----
# Write spatial output to map-file (1: yes, 0: no)
#-----
Wrimap_waterlevel_s0    = 0                                #
Write water levels for previous time step to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_waterlevel_s1    = 1                                #
Write water levels to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_volumel         = 0                                #
Write volumes to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_waterdepth_hu    = 0                                #
Write water depths on u-points to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_ancillary_variables = 0                             #
Write ancillary_variables attributes to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_flowarea_au      = 0                                #
Write flow areas au to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_velocity_component_u0 = 0                           #
Write velocity component for previous time step to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_velocity_component_u1 = 1                            #
Write velocity component to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_velocity_vector  = 1                                #
Write cell-center velocity vectors to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_velocity_magnitude = 0                             #
Write cell-center velocity vector magnitude to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_velocity_vectorq = 0                                #
Write cell-center velocity vectors (discharge-based) to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_upward_velocity_component = 1                         #
Write upward velocity component on cell interfaces (1: yes, 0: no)
Wrimap_density_rho      = 1                                #
Write flow density to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_horizontal_viscosity_viu = 1                          #
Write horizontal viscosity to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_horizontal_diffusivity_diu = 0                        #
Write horizontal diffusivity to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_flow_flux_q1     = 0                                #
Write flow flux to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_flow_flux_q1_main = 0                               #
Write flow flux in main channel to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_numlimdt         = 1                                #
Write the number times a cell was Courant limiting to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_taucurrent       = 0                                #
Write the shear stress to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_chezy            = 0                                #
Write the chezy roughness to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_salinity         = 1                                #
Write salinity to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_temperature      = 1                                #
Write temperature to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_turbulence       = 1                                #
Write vicww, k and eps to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_trachytopes      = 1                                #
trachytopo roughnesses (1: yes, 0: no)
Wrimap_wind             = 0                                #
Write wind velocities to map file (1: yes, 0: no)
Wri tek_CdWind          = 0                                #
Write wind friction coeffs to tek file (1: yes, 0: no)
Wrimap_rain             = 0                                #
Write rainfall rates to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_windstress       = 0                                #
Write wind stress to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_wet_waterdepth_threshold = 2.d-5                     #
Waterdepth threshold above which a grid point counts as 'wet'. Used for Wrimap_time_water_on_ground.
Wrimap_heat_fluxes      = 0                                #
Write heat fluxes to map file (1: yes, 0: no)
Wrimap_DTcell           = 0                                #
Write time step per cell based on CFL (1: yes, 0: no)
Wri tepart_domain       = 1                                #
Write partition domain info. for postprocessing (1: yes, 0: no)
Richardsononoutput      = 1                                #
Write Richardson numbers (1: yes, 0: no)
#-----
# Write grid-snapped features to shape file (1: yes, 0: no)
#-----

```

```

Wrishp_crs = 0 #
Write grid-snapped cross sections to shapefile (1: yes, 0: no) #
Wrishp_obs = 0 #
Write grid-snapped observation stations to shapefile (1: yes, 0: no) #
Wrishp_weir = 0 #
Write grid-snapped weirs to shapefile (1: yes, 0: no) #
Wrishp_thd = 0 #
Write grid-snapped thin dams to shapefile (1: yes, 0: no) #
Wrishp_gate = 0 #
Write grid-snapped gates to shapefile (1: yes, 0: no) #
Wrishp_emb = 0 #
Write grid-snapped 1d2d embankments to shapefile (1: yes, 0: no) #
Wrishp_fwx = 0 #
Write grid-snapped fixed weirs to shapefile (1: yes, 0: no) #
Wrishp_src = 0 #
Write grid-snapped source-sinks to shapefile (1: yes, 0: no) #
Wrishp_pump = 0 #
Write grid-snapped pumps to shapefile (1: yes, 0: no) #
Wrishp_dryarea = 0 #
Write a shape file for dry areas #
wrishp_genstruc = 0 #
Write a shape file for general structures #
#-----
WriteDFMinterpretedvalues = 0 #
Write DFMinterpretedvalues (1: yes, 0: no) #
WriteDetailedTimers = 0 #
Write detailed timers output file (1: yes, 0: no) #
MapOutputTimeVector = #
File (*.mpt) containing fixed map output times (s) w.r.t. RefDate #
FullGridOutput = 0 #
Full grid output mode (0: compact, 1: full time-varying grid data) #
EulerVelocities = 0 #
Euler velocities output (0: GLM, 1: Euler velocities) #
Wrirst_bnd = 1 #
Write waterlevel, bedlevel and coordinates of boundaries to restart files #
#-----
# Uneditable
#-----
MapFormat = 4 #
Map file format, 1: netCDF, 2: Tecplot, 3: netCFD and Tecplot, 4: NetCDF-UGRID #
NcFormat = 3 #
Format for all NetCDF output files (3: classic, 4: NetCDF4+HDF5) #
NcWriteLatLon = 0 #
Write extra lat-lon coordinates for all projected coordinate variables in each NetCDF file (for CF-
compliance).

#####
#-----
[processes]
#-----
SubstanceFile = #
substance file #
AdditionalHistoryOutputFile = #
extra history output file #
StatisticsFile = #
statistics file #
ThetaVertical = 0. #
theta vertical for waq #
DtProcesses = 0. #
waq processes time step #
DtMassBalance = 0. #
waq mass balance output time step #
ProcessFluxIntegration = 1 #
Process fluxes integration option (1: WAQ, 2: D-Flow FM) #
Wriwaqbot3Doutput = 0 #
Write 3D water quality bottom variables (1: yes, 0: no) #
VolumeDryThreshold = 1.d-3 #
DepthDryThreshold = 1.d-3 #
#-----
#####

```

E Memo: Nader onderzoek zoutlast sluizen Terneuzen

MEMO

Aan: Werkgroep Droogte van de VNSC
Van: Paula Lambregts, Vincent Vuik (HKV)
Datum: 29 maart 2024
Projectnummer: PR4728.33
Onderwerp: Nader onderzoek zoutlast sluizen Terneuzen

1 Aanleiding en doel

In een aantal stappen zijn een 1D SOBEK3-model (HKV, 2023a) en een 3D D-Flow FM model (HKV, 2023b) opgezet voor het modelleren van de chlorideconcentraties op het Kanaal Gent-Terneuzen (KGT). Het doel van deze modellen is in eerste instantie het in beeld brengen van de impact van droogte op het KGT. Een andere toepassing van de modellen is het onderzoeken van de effectiviteit van verschillende maatregelen tegen verzilting. Beide modellen zijn gekalibreerd op basis van TSO-metingen: tweemaandelijks metingen van onder andere de saliniteit over de gehele waterdiepte.

Zowel in het 1D SOBEK3-model als het 3D D-Flow FM model was sprake van structureel te hoge zoutgehalten op het KGT bij toepassing van de Zeesluisformulering (ZSF) voor het berekenen van de zoutlast vanuit de sluizen bij Terneuzen richting het KGT. De oorzaak van deze overschatting van de zoutlast is tot dusver nog onduidelijk. Daarom is een vermenigvuldigingsfactor in de orde van 0,5 toegepast op de uitwisselingsdebieten zoals berekend met de ZSF: een halvering van de zoutlast. Een dergelijke reductie was ook nodig bij studies voor de MER van de Nieuwe Sluis, waar heel andere modellen gebruikt werden voor het berekenen van de zoutlast. Ondanks allerlei denkwerk en testberekeningen met SOBEK3, ZSF en D-Flow FM is het tot dusver niet gelukt de vermenigvuldigingsfactor dichterbij 1,0 te krijgen.

Zonder duidelijkheid over de oorzaak van de overschatting van de zoutlast is ook onduidelijk of deze zoutlastreductie, gebaseerd op de situatie met het oude sluizencomplex met een dominante Westsluis, 1-op-1 overgezet mag worden naar de nieuwe situatie met zowel de Westsluis als de Nieuwe Sluis Terneuzen (NST). Hierdoor is het behoorlijk onzeker hoe de NST de zoutlast verandert en daarmee hoe zout het KGT gaat worden na realisatie van de NST. En als gevolg daarvan is het onduidelijk hoe uitgebreid het pakket zoutbeperkende maatregelen moet worden om het zoutgehalte onder bepaalde niveaus te kunnen houden.

Het doel van dit memo is meer grip te krijgen op de (berekende) zoutlast vanuit het sluizencomplex en de reproductie daarvan met de ZSF.

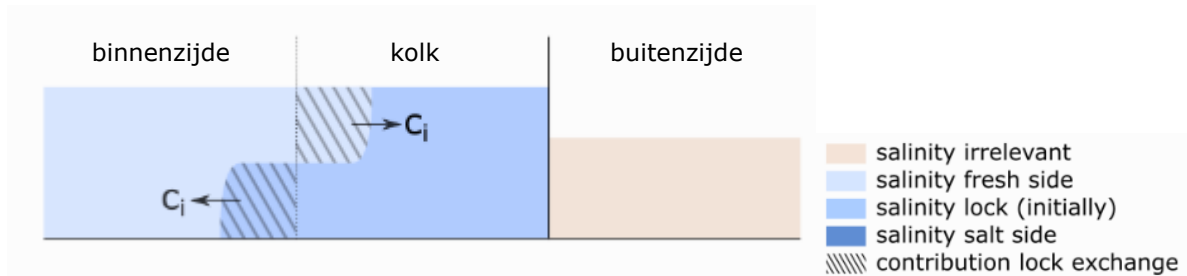
- Allereerst wordt in hoofdstuk 2 de beschrijving van de fysica in de ZSF beschouwd, met een indicatie van mogelijke afwijkingen in berekende zoutlast als gevolg van verschillende uitgangspunten.
- Daarna volgt in hoofdstuk 3 een gestructureerde analyse van verschillende bronnen van onzekerheid, waarbij testberekeningen met de ZSF inzicht geven in de invloed op de totale zoutlast vanuit het sluizencomplex richting het KGT.

- In hoofdstuk 4 worden nieuwe berekeningen uitgevoerd met het 3D D-Flow FM-model om na te gaan welke vermenigvuldigingsfactor op de zoutlast vanuit de ZSF nodig is na implementatie van de voorgestelde veranderingen uit hoofdstuk 3.
- Hoofdstuk 5 bevat de conclusies en aanbevelingen van het onderzoek, met een advies over toe te passen instellingen van de ZSF en (indien nodig) een aangepaste vermenigvuldigingsfactor op de zoutlast.

2 Beschouwing fysica in de ZSF

De Zeesluisformulering (ZSF) beschrijft de zoutuitwisseling tussen het water in de kolk en het water aan de binnen- en buitenzijde van de kolk.

Als de sluisdeuren openen, ontstaat een dichtheidsstroming als gevolg van het dichtheidsverschil tussen het water in en buiten de kolk. Het verschil in dichtheid tussen zoet en zout water zorgt voor een drukverschil, wat ervoor zorgt dat na openen van de deuren aan de zeezijde een zoute tong over ongeveer de halve kolkdiepte de kolk in stroomt. Tegelijkertijd stroomt een zoetwatertong over de bovenste helft van de kolkdiepte de kolk uit. Deze zoutuitwisseling staat bekend als het 'lock exchange' proces. Aan de zoete zijde van de kolk treden deze processen andersom op (Figuur 2-1). Behalve deze dichtheidsgedreven stroming zorgen ook processen als nivelleren en het in- en uitvaren van schepen voor uitwisseling van zoet en zout water (Deltares, 2016).



Figuur 2-1: Het lock exchange proces (bron: libzsf.readthedocs.io)

De startsnelheid (in m/s) van het 'lock exchange' proces $c_i = 0.5\sqrt{(\Delta\rho/\bar{\rho})gH}$ hangt af van:

- Het relatieve dichtheidsverschil $(\Delta\rho/\bar{\rho})$ (-)
- De waterdiepte boven de drempel van de sluis H (m)

De theoretische tijd (in s) voor deze kolkuitwisseling is aan de binnenzijde gebaseerd op de tijdsduur waarin de zoete tong de sluis inloopt en na reflectie weer terugloopt en zo tweemaal de kolk lengte L aflegt: $T_{LE} = 2L/c_i$. Bij kolkuitwisseling aan de buitenzijde gaat het om de tijd die de zoute tong heen- en terugloopt over de lengte van de kolk.

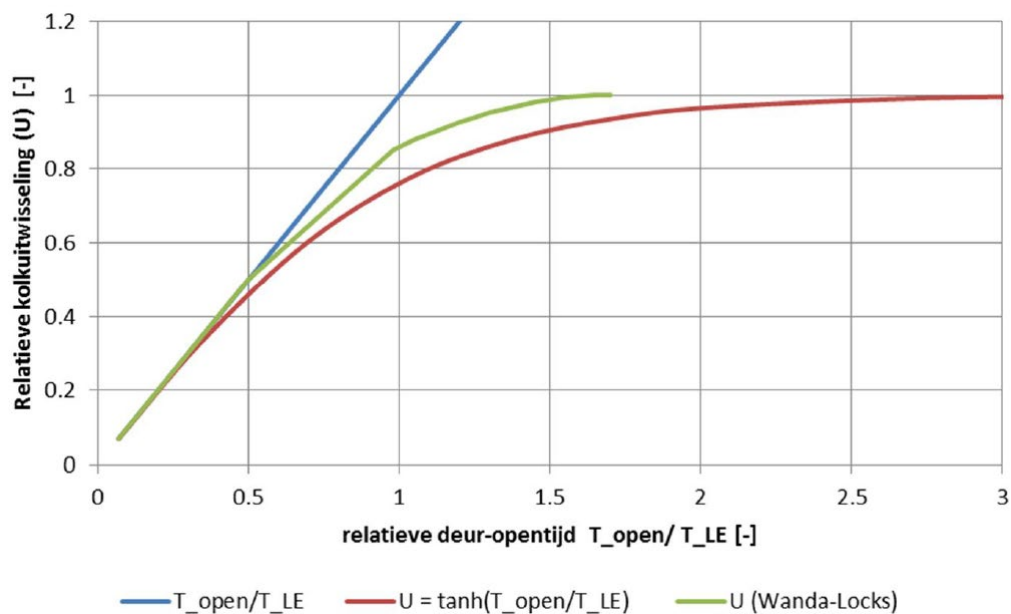
Het 'lock exchange' proces start op de maximale snelheid c_i en vertraagt volgens in de tijd (t), waardoor een asymptotisch verloop van de kolkuitwisseling ontstaat: $V_U = V_L \tanh(t/T_{LE})$, waarin V_U het uitgewisselde volume (in m³) en V_L het volume van de kolk is. Het uitwisselingsproces stopt als de sluisdeur weer wordt gesloten na $t = T_{open}$, de deuropentijd.

Figuur 2-2 toont het verloop van de relatieve kolkuitwisseling $U = V_U/V_L$ als functie van de relatieve deuropentijd T_{open}/T_{LE} . Deze figuur laat zien dat de tanh-curve uit de ZSF iets afwijkt van de curve die is geïmplementeerd in modellen als Wanda-Locks. In modellen als Wanda-Locks worden drie fasen van de kolkuitwisseling onderscheiden op basis van Shin et al. (2004): een fase zonder energieverlies als de zoete tong de kolk instroomt, een fase met enig energieverlies als de tong na reflectie tegen de achterste deur weer richting de deuren terugstroomt, en een fase met diffusief transport. In de curve van Wanda-Locks verloopt het laatste deel van de zoutuitwisseling relatief snel, terwijl de relatieve kolkuitwisseling volgens de tanh-curve asymptotisch richting 1.0 beweegt. Er is (voor zover bekend bij de auteurs) geen onderzoek gedaan naar de verschillende curves in het laatste deel van de curve, bij lange deuropentijden. Op basis van expert judgement kan worden gesteld dat een asymptotisch proces wat langzaam richting 1.0 beweegt (de tanh-

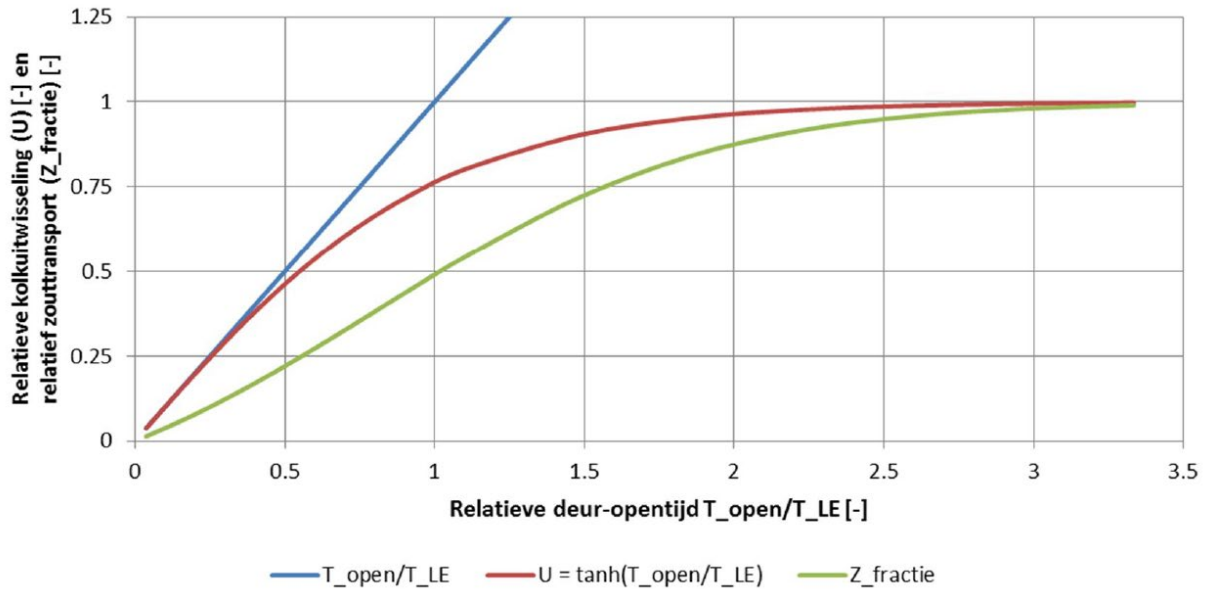
curve) geloofwaardiger is dan een proces wat relatief snel (bij $t = 1.5T_{LE}$) volledig naar 1.0 gaat (de Wanda-Locks curve).

Bij lange deuropentijden (zoals bij Terneuzen) is juist het laatste deel van de curve van belang. Daarnaast werkt een afwijking door in volgende schuttingen. Als de kolk aan de zoete zijde niet volledig uitwisselt, blijft de kolk wat zouter dan het kanaal aan het eind van de deuropentijd. Vervolgens gaan de deuren aan de zoute zijde open, en is het dichtheidsverschil kleiner, waardoor de zoutuitwisseling trager verloopt. Dit zorgt ervoor dat de kolk (bij een zelfde deuropentijd) minder zout wordt. Zo stapelt dit effect door en wordt het dichtheidsverschil zowel aan de binnenzijde als aan de buitenzijde kleiner waardoor de zoutuitwisseling wordt beperkt.

Figuur 2-3 toont de parameter $Z_{fractie}$: de ratio tussen de zoutvracht bij beperkte deuropentijden en de zoutvracht bij eindeloos lange deuropentijden voor een constante reeks van schuttingen. Als voorbeeld: bij een deuropentijd van $T_{open} = T_{LE}$ is de kolkuitwisseling bij een individuele schutting volgens de tanh-curve ongeveer 75%. Als de deuropentijden in een reeks van schuttingen continu worden gelimiteerd op $T_{open} = T_{LE}$, ontstaat een zoutlast van $Z_{fractie} = 50\%$ ten opzichte van de zoutlast bij eindeloos lange deuropentijden.



Figuur 2-2: Verloop van de relatieve kolkuitwisseling $U=V_u/V_L$ (bron Deltares, 2018)



Figuur 2-3: Relatie tussen relatieve kolkuitwisseling U en de fractie $Z_{fractie}$ van de maximale zoutvracht, als gevolg van het beperken van de deuropentijd in een constante reeks van schuttingen (uit Deltares, 2018).

In Deltares (2016) is een vergelijking uitgevoerd tussen metingen van de zoutlek bij de Stevinsluizen in de Afsluitdijk en de reproductie daarvan met Wanda-Locks. Daaruit volgde een goede representatie van de totale zoutlek. In de analyse is echter niet gedetailleerd onderzocht hoe de zoutuitwisseling in de tijd verloopt, en of de curve uit Wanda-Locks voor lange deuropentijden te snel of te langzaam verloopt. Er is (zoals eerder aangegeven) geen onderzoek gedaan naar de kwaliteit van de verschillende curves in dit laatste deel van de curve. Een eventuele kleine fout in de curve werkt door van de ene naar de andere schutting, en kan na verloop van tijd een grotere fout in de zoutlast tot gevolg hebben. Of de curve uit de ZSF beter of slechter is dan de curve uit Wanda-Locks, valt echter zonder gedetailleerd onderzoek niet te zeggen.

De ZSF bevat daarnaast nog enkele andere uitgangspunten die een mogelijke bron van onzekerheid vormen voor de zoutlast:

- Volledige menging van zout en zoet water in de kolk op het moment van openen van de deuren. Als er nog enige gelaagdheid aanwezig is in de kolk, zorgt dit ervoor dat het zout zich gemiddeld minder hoog in de verticaal bevindt: minder potentiële energie. Hierdoor wordt de sterkte van de dichtheidsstroming ook overschat (omzetting van potentiële energie in kinetische energie). Het uitgangspunt van volledige menging kan mogelijk een oorzaak zijn van een overschatting van de zoutlast.
- De zoutuitwisseling vindt plaats door dichtheidsstroming bij het openen van de deuren. Dit verschijnsel is uitgebreid onderzocht: het zogenaamde 'lock exchange problem'. In schutsluizen vormen de aanwezige schepen een complicerende factor. Ze beïnvloeden niet alleen de dichtheidsstroming, maar zorgen door hun waterverplaatsing ook voor aanvullende uitwisseling van water tussen zeezijde, kolk en kanaalzijde. In de ZSF zijn deze twee uitwisselingsprocessen van elkaar gescheiden. Eerst varen schepen de kolk uit. Het water wat dan de kolk instroomt leidt tot een nieuw zoutgehalte in de kolk. Met dat zoutgehalte wordt de dichtheidsstroming doorgerekend ('lock exchange'). Aan het eind van de deuropentijd varen schepen de kolk weer in, en stroomt extra water de kolk uit, met het zoutgehalte van de kolk van dit tijdstip binnen het kolkuitwisselingsproces. Of deze werkwijze correct is, is nooit goed onderzocht.

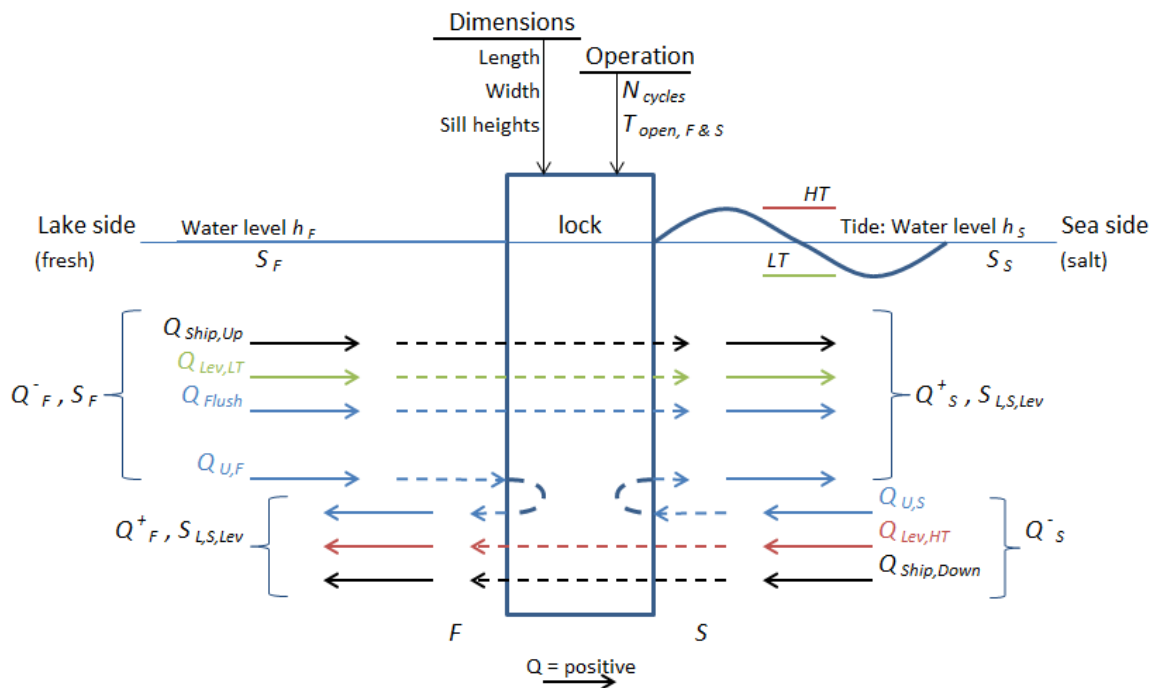
In de komende jaren worden gedetailleerde metingen uitgevoerd bij de Zeesluis IJmuiden. Ook voor de NST zijn plannen voor het uitvoeren van een meetcampagne. Het verdient aanbeveling om de curve voor het verloop van de relatieve kolkuitwisseling (Figuur 2-2) te kalibreren en valideren met de data die uit deze meetcampagnes voortkomt. Daarvoor zijn chloridemetingen op verschillende dieptes in de sluiscolk, en metingen direct voor de sluisdeuren belangrijk, eventueel aangevuld met snelheidsmetingen over de verticaal.

3 Gevoeligheidsanalyse ZSF

3.1 Inleiding

De benedenstroomse randvoorwaarden bij het sluiscomplex Terneuzen voor het modelleren van de verzilting van Kanaal Gent-Terneuzen zijn afgeleid met de Zeesluisformulering (ZSF) (Vreeken en Weiler, 2021). Deze formulering is toegepast voor de eenvoudige berekening van schutverliezen en voornamelijk voor het specificeren van de zoutuitwisseling tussen het zoute water aan de Westerscheldezijde (aangeduid als buitenconcentratie) en het brakke water aan de kanaalzijde (de binnenconcentratie). Daarbij is de totale zoutlast op het kanaal de optelsom van de inkomende en uitgaande debieten en hun bijhorende zoutconcentraties (Figuur 3-1).

De uitwisselingsdebieten (Q_U) ontstaan bij het openen van de sluisdeuren en worden bepaald door de interactie tussen zouter en zoeter water. Bij een groter dichtheidsverschil zal de initiële uitwisselingsstroomsnelheid hoger liggen. De inkomende en uitgaande uitwisselingsdebieten zijn gelijk en het netto debiet is nul. Wel vindt netto zouttransport plaats en zorgt het uitwisselen voor het overgrote deel van de zoutlast naar het kanaal. De overige debieten hebben te maken met nivellieren (Q_{Lev}), in- en uitvaren van schepen (Q_{Ship}) of spuien (niet weergegeven in Figuur 3-1). Deze fluxen hebben ook nog invloed op de netto zoutvracht bij het sluiscomplex van Terneuzen.



Figuur 3-1: Schematisch overzicht van het modelconcept van de ZSF: inkomende en uitgaande debieten aan beide zijden van de sluis met hun bijbehorende saliniteit (uit Vreeken en Weiler, 2021).

In eerdere modelberekeningen is een vermenigvuldigingsfactor toegepast om de zoutlast te reduceren (HKV, 2023a & 2023b). Deze factor is toegepast op de uitwisselingsdebieten zoals berekend met de ZSF om zo de zoutlast veroorzaakt door het uitwisselen met diezelfde factor te aan te passen. De factor is toegepast op de uitwisselingsdebieten omdat deze aanpassing dan geen effect heeft op de waterbalans.

In de gevoeligheidsanalyse in dit hoofdstuk is onderzoek gedaan naar het effect van een aantal aanpassingen in de randvoorwaarden voor de ZSF en de invloed daarvan op de zoutlast. Alle wijzigingen in zoutlast zijn uitgedrukt in termen van de zoutvracht in kg/s, gemiddeld over de periode waarvoor het SOBEK-model is gekalibreerd (2016-2020).

Voorbeelden van zouttransport bij Terneuzen:

- Het nivelleerdebiet, vermenigvuldigd met het zoutgehalte van het KGT;
- Het kolkuitwisselingsdebiet, vermenigvuldigd met het verschil in zoutgehalte kolk-KGT;
- Het debiet bij oppervlaktewaterspuien, vermenigvuldigd met het zoutgehalte van het KGT;
- Het debiet bij uitwisselingsspuien, vermenigvuldigd met het zoutgehalte van de zoutvang.

In de gevoeligheidsanalyse zijn alle aanpassingen individueel onderzocht. In werkelijkheid treedt een complexe interactie op tussen de verschillende aanpassingen, de concentratie in de kolk en de concentratie van het KGT. Bij inschattingen van effecten is het zoutgehalte van het KGT of van de zoutvang gebaseerd op TSO-metingen, en niet op de interne zoutconcentratie in het 3D-model. Getallen tonen daarom slechts een orde van grootte. De totale interactie wordt onderzocht in de simulatie met het 3D-model, beschreven in hoofdstuk 4.

3.2 Correctie kolkdimensies

In dit onderzoek zijn verbeterde kolkdimensies aangehouden, die in sommige gevallen afwijken¹ van de dimensies die zijn aangehouden bij de ontwikkeling van het 3D-model (HKV, 2023b), zie Tabel 3-1. Dit heeft gevolgen voor de zoutlast die is berekend met de ZSF.

Tabel 3-1: De kolkdimensies zoals gebruikt bij het opzetten van het 3D-model en de kolkdimensies zoals aangehouden in de huidige studie. Dimensies die aangepast zijn tussen de twee studies zijn uitgelicht in het blauw.

	Westsluis	Oostsluis	Middensluis	Nieuwe Sluis
Kolkdimensies in het 3D-model (HKV, 2023b)				
Breedte kolk (m)	40	24	24	55
Lengte kolk (m)	290	295	220	427
Bodemhoogte kolk (m+NAP)	-13,5	-7,5	-10,5	-16.5
Drempelhoogte binnenzijde (m)	0.0	0.9	2.2	2.4
Drempelhoogte buitenzijde (m)	0.7	1.0	2.9	0.7
Gebruikte kolkdimensies in de huidige studie				
Breedte kolk (m)	40	24	24	55
Lengte kolk (m)	290	295	235	427
Bodemhoogte kolk (m+NAP)	-12.82	-6.5	-7.58	-17.0
Drempelhoogte binnenzijde (m)	1.45	2.0	0.0	2.9
Drempelhoogte buitenzijde (m)	0.0	0.0	1.36	0.56

Zoals hierboven benoemd heeft het aanpassen van de sluisdimensies gevolgen voor de zoutlast die berekend is met de ZSF. Het effect op de zoutlast tijdens uitwisselen (bij het openen van de deuren) en nivelleren is voor de verschillende sluizen gekwantificeerd op basis van de kalibratieperiode 2016-2020 (Tabel 3-2). Verschillen in de zoutlast zijn bijna volledig toe te schrijven aan het uitwisselingsproces; de zoutlast door nivelleren verandert nauwelijks. Alleen bij de Middensluis is er ook een kleine toename in de uitgaande zoutlast tijdens nivelleren. De lengte en breedte van de Westsluis en

¹ De verschillen in dimensies zijn het gevolg van de uiteenlopende getallen die in omloop zijn in verschillende rapporten en websites. Er ontstaat onder andere verwarring door dieptes ten opzichte van NAP en dieptes ten opzichte van kanaalpeil. De aangepaste getallen, gebruikt in deze studie, zijn correct en geverifieerd door de sluisbeheerder.

Oostsluis zijn onveranderd waardoor de uitgaande zoutlast tijdens nivelleren gelijk is. De zoutlast bij uitwisselen en nivelleren neemt gemiddeld over de kalibratieperiode met 73.4 kg/s af, een reductie van 17%. Dit komt voornamelijk door de hogere drempels in de Oostsluis en Westsluis aan de kanaalzijde en door de ondiepere sluisbodempluis in de Westsluis, Oostsluis en Middensluis. Dit verklaart deels de overschatting van de zoutlast in eerdere studies en daarmee ook de zoutconcentraties op het kanaal zelf.

Tabel 3-2: De netto zoutlast richting het kanaal voor de kalibratieperiode tijdens het uitwisselen bij het openen van de sluisdeuren met de oude sluisdimensies zoals gebruikt bij het ontwikkelen van het 3D-model, en de nieuwe sluisdimensies die zijn aangehouden in deze studie.

Sluiskolk	Westsluis	Oostsluis	Middensluis	Totaal
Kolkdimensies "Ontwikkeling 3D-model Kanaal Gent-Terneuzen" (HKV, 2023b)				
Zoutlast uitwisselen [kg/s]	272.2	84.5	65.4	422.1
Zoutlast nivelleren [kg/s]	-27.2	-22.1	-5.1	-54.4
Gebruikte kolkdimensies in de huidige studie				
Zoutlast uitwisselen [kg/s]	236.7	62.0	50.5	349.2
Zoutlast nivelleren [kg/s]	-27.2	-22.1	-5.5	-54.8
Totaal effect [kg/s]	-35.5	-22.6	-15.3	-73.4

Nieuwe basisberekening

Voor de gevoeligheidsanalyse in dit memo is de berekening met de verbeterde sluisdimensies aangehouden als basisberekening. Hieronder volgt een overzicht van de debieten, zoutgehaltes² en zoutlasten die horen bij deze berekening, gemiddeld over de kalibratieperiode 2016-2020. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de drie sluizen, het uitwisselingsspuien via de riolen van de Westsluis en de overige spuidebieten. Voor de zoutgehaltes is onderscheid gemaakt tussen de concentraties "from lake" oftewel de concentraties voor debieten van het kanaal richting de kolk of de buitenhaven, en "to lake"; de concentraties van debieten die van de kolk richting het kanaal stromen.

² Het zoutgehalte is debietgemiddeld in de ZSF, dus gewogen op basis van de som van uitwisselingsdebieten en nivelleerdebieten. Dit betekent dat de gepresenteerde getallen niet helemaal representatief zijn voor alleen nivelleren of voor spuien. Alleen bij de kolom 'overig spuien' is het zoutgehalte "from lake" representatief gemaakt voor het oppervlaktewaterspuien.

Tabel 3-3: Gemiddelde zoutgehaltes, debieten en zoutlasten voor de drie sluisen, het uitwisselingsspuien via de riolen van de Westsluis en de overige spuidebieten tijdens de kalibratieperiode. Deze berekening is met aangepaste sluisdimensies en zonder schepen.

	West- sluis	Oost- sluis	Midden- sluis	Uitwisse- lingsspuien	Overig spuien	Totaal
Zoutgehalte "from lake" [ppt]	9.1	9.1	9.1	17.3	6.9	-
Zoutgehalte "to lake" [ppt]	21.1	18.7	21.0	-	-	-
Uitwisselings- debiet [m ³ /s]	19.7	6.4	4.2	-	-	-
Nivelleer- of spui- debiet [m ³ /s]	-3.1	-2.6	-0.6	-7.1	-10.0	-
Zoutlast uitwisse- len [kg/s]	236.7	62.0	50.5	-	-	349.2
Zoutlast nivelleren of spuien [kg/s]	-27.2	-22.1	-5.5	-123.0	-69.4	-247.2
Totale zoutlast [kg/s]	209.5	39.8	45.0	-123.0	-69.4	102

Het uitwisselen bij het openen van de sluisdeuren zorgt voor de binnenkomende zoutlast, waarbij de Westsluis verreweg het grootste aandeel heeft (236.7 kg/s). Voor de uitgaande zoutlast zorgt het spuien voor meer zoutexport dan het nivelleren. Daarbij zorgt het uitwisselingsspuien met 123.0 kg/s uitgaande zoutlast voor nog twee keer zoveel zoutexport als de overige spuidebieten (69.4 kg/s). Dit verschil komt met name door de hogere zoutgehaltes van het water in de zoutvang dat gebruikt wordt bij het uitwisselingsspuien ten opzichte van de lagere zoutgehaltes van het water bij oppervlaktewaterspuien in perioden met een hoog debiet op het KGT.

3.3 Zoutgehalte KGT-zijde

De snelheid waarmee zoutuitwisseling plaatsvindt tussen de kolken en het KGT is afhankelijk van het dichtheidsverschil en daarmee van het zoutgehalte aan de kanaalzijde. In de ZSF dient daarom de saliniteit van de kanaalzijde als randvoorwaarde te worden opgegeven. In de ZSF is hiervoor de gemeten saliniteit op het kanaal aangehouden (o.b.v. TSO-metingen). Daarnaast is direct vanuit het model van KGT buiten de ZSF om water onttrokken uit de diepe delen van de zoutvang bij de Westsluis voor het nivelleren en uitwisselingsspuien. Dit is op een grove manier gedaan in SOBEK o.b.v. de TSO-metingen (zie HKV, 2023a). In het 3D-model is selectief water uit de diepere lagen van de zoutvang onttrokken voor het uitwisselingsspuien (HKV, 2023b).

In deze paragraaf staat beschreven hoe gevoelig de resultaten zijn voor de exacte zoutgehaltes aan de KGT-zijde van de sluisen. Daarvoor is een gevoeligheidsanalyse gedaan met de ZSF met verschillende zoutconcentraties aan de kanaalzijde. Ook is een vergelijking gemaakt tussen de gelaagdheid in de zoutvang volgens het 3D-model ten opzichte van de TSO-meting in de zoutvang. Dit geeft een beeld of het 3D model de gelaagdheid goed reproduceert en daarmee of de juiste hoeveelheid zout onttrokken is uit het model.

Variatie zoutgehalte kanaal

In de berekeningen met het 3D-model en SOBEK is aan de kanaalzijde de gemeten dieptegemiddelde saliniteit bij meetlocatie TSO2 gebruikt bij het toepassen van de ZSF. Gemiddeld over de

kalibratieperiode is dit een saliniteit van 9.1 ppt. Om een beeld te krijgen van het effect van de gekozen saliniteit op de zoutlast is dezelfde berekening met de ZSF uitgevoerd met verschillende mate van saliniteit aan de kanaalzijde. Daarbij is gebruik gemaakt van gemeten chlorideconcentraties bij locaties TSO1 en TSO2, waarbij TSO1 zich in de zoutvang van de Westsluis bevindt en TSO2 net bovenstrooms daarvan op het KGT. In de gevoeligheidsanalyse is de saliniteit op meetlocatie TSO1 op verschillende manieren meegenomen: dieptegemiddeld over de volledige waterkolom, dieptegemiddeld boven de drempel, en dieptegemiddeld in de zoutvang. Ook zijn variaties op de oorspronkelijk gebruikte TSO2-meting meegenomen. De invloed van deze variaties in saliniteit aan de kanaalzijde op de zoutlast is weergegeven in Tabel 3-4.

*Tabel 3-4: Zoutlast van de Westsluis bij verschil in saliniteit aan de kanaalzijde, met het effect op de zoutlast t.o.v. de basisberekening. In de basisberekening is de saliniteit gemeten bij TSO2 aangehouden aan de kanaalzijde. De basisberekening is uitgelicht in het grijs. Het 'Effect' is de totale verandering ten opzichte van de basisberekening. De berekening met een * is gekozen in de 3D-berekening in hoofdstuk 4.*

Variant	Sali- nity_fro m_lake [ppt]	Sali- nity_to _lake [ppt]	Uitwis- selings- debiet [m ³ /s]	Zoutlast uitwis- selen [kg/s]	Zoutlast nivelle- ren [kg/s]	Zoutlast spuien [kg/s]	Effect [kg/s]
TSO1 boven drem- pel*	8.1	21.0	19.8	253.3	-24.3	-62.3	+26.6
TSO2 dieptege- middeld	9.1	21.1	19.7	236.7	-27.2	-69.4	-
TSO1 dieptege- middeld	10.5	21.3	19.5	209.9	-31.9	-80.7	-42.8
TSO2 +2ppt	11.1	21.4	19.4	200.6	-33.5	-84.7	-57.7
TSO2 +4ppt	13.1	21.7	19.1	164.8	-39.8	-100.0	-115.1
TSO2 +6ppt	15.1	22.0	18.6	129.5	-46.1	-115.3	-172.1
TSO1 zoutvang	18.2	22.6	16.9	81.4	-56.0	-139.3	-254.0

Bij toenemende saliniteit aan de kanaalzijde neemt de totale zoutlast af door veranderingen in zowel de zoutlast door uitwisselen, nivelleren en spuien. De zoutlast bij uitwisselen neemt af door een kleiner dichtheidsverschil en trager verlopende kolkuitwisseling. Het kleinere dichtheidsverschil en de kleinere uitwisselingsdebieten versterken elkaar en zorgen samen voor een lagere netto zoutlast bij het uitwisselen. Door de hogere saliniteit aan de kanaalzijde neemt de zoutexport bij nivelleren en spuien toe. Beide effecten zorgen voor een lagere netto zoutlast bij de sluisen.

Als de saliniteit op het kanaal oploopt, neemt de zoutlast af. Hierdoor wordt de verdere verzilting van het kanaal afgeremd naarmate de kanaalconcentratie dichter bij de buiten concentratie komt. Er zit dus van nature een negatieve feedbackloop in het systeem. Dit effect is in deze berekeningen met de ZSF waar de kanaalconcentratie op voorhand is opgelegd niet meegenomen. Met SOBEK is hiervoor een extra iteratie uitgevoerd die ook wordt geadviseerd bij toekomstige toepassingen van het 3D-model.

Gezien de geometrie van het sluisencomplex, de ligging van de meetpunten en de fysische processen die horen bij het uitwisselen zijn alleen de bovenste drie opties in Tabel 3-4 realistisch. Daarbij ligt meetlocatie TSO1 dichter bij de sluisen dan TSO2. Verder vindt het uitwisselen plaats over de gehele waterkolom tussen de kolkbodem en het wateroppervlak. Met deze reden is ervoor gekozen om de dieptegemiddelde saliniteit bij meetlocatie TSO1 boven de drempel van de Westsluis in het vervolg te gebruiken als kanaalconcentratie. Deze concentratie is gebruikt voor alle drie de sluisen omdat dit

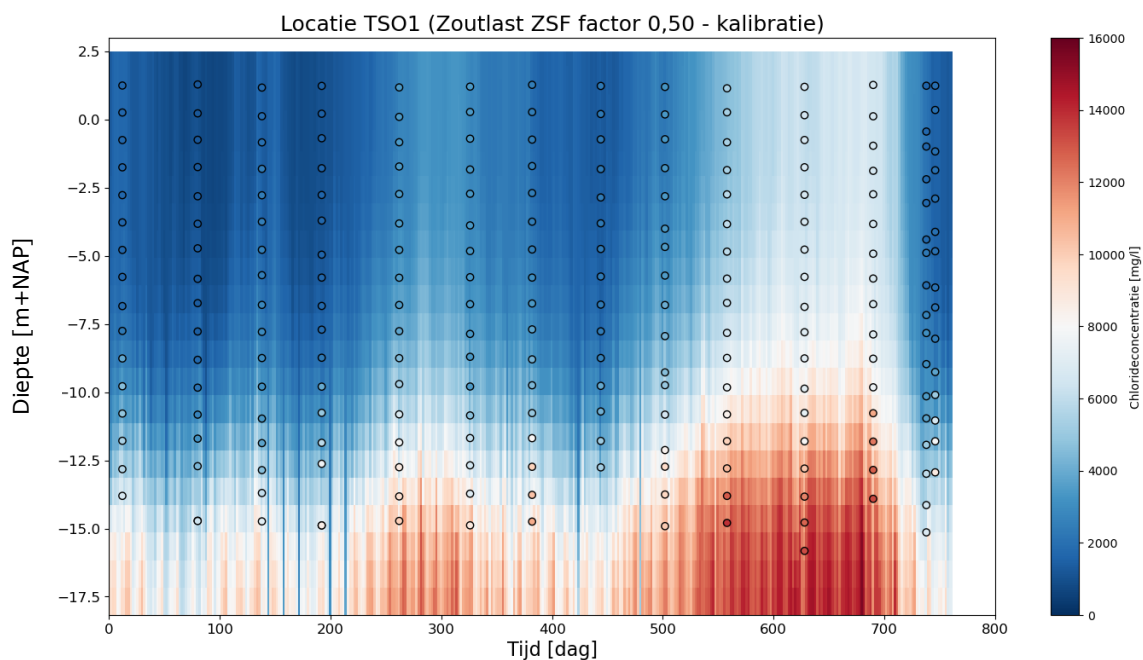
meetpunt het dichtst op het sluizencomplex ligt en voor de andere sluizen geen vergelijkbare meting beschikbaar is (Tabel 3-5). Het effect op de zoutlast door nivelleren en spuien (uitgezonderd uitwisselingspuien) is in dit geval een indicatie. Deze worden beide onttrokken uit het model (1 m boven de bodem) en zullen dus in een modelberekening de modelconcentratie meekrijgen.

*Tabel 3-5: Het effect op de zoutlast van het meenemen van de diepgemiddelde saliniteit boven de drempel van de Westsluis op meetlocatie TSO1. In de oorspronkelijke is de dieptegemiddelde saliniteit bij TSO2 meegenomen. De berekening met een * is gekozen in de 3D-berekening in hoofdstuk 4.*

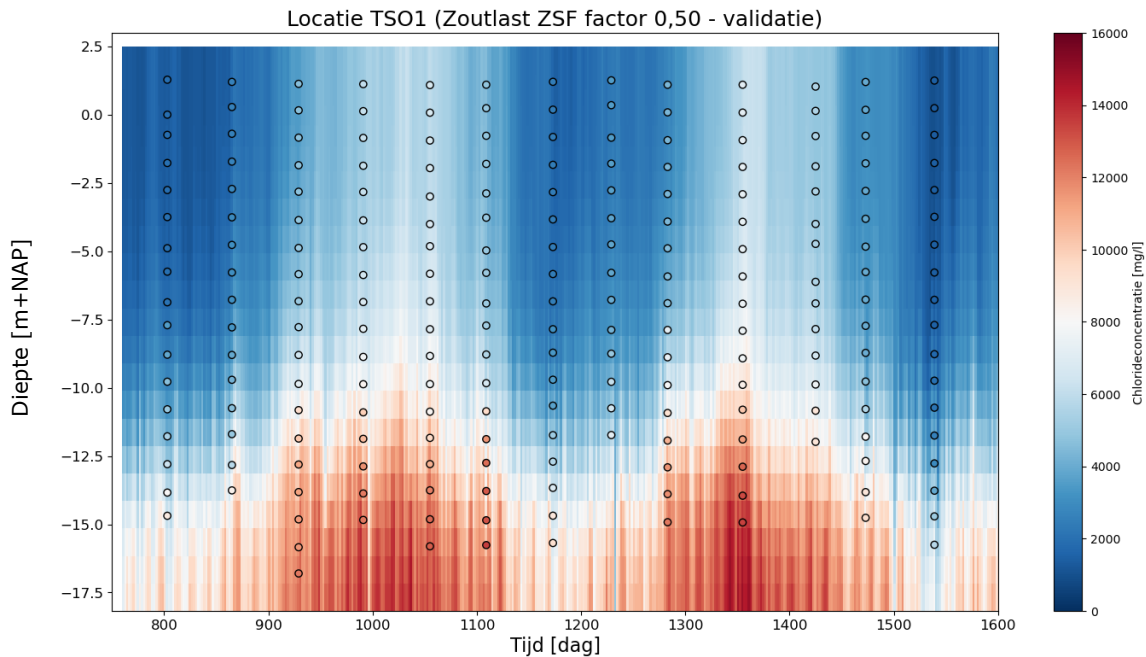
Variant	Effect zoutlast [kg/s]				Totaal
	Westsluis	Oostsluis	Middensluis	Opper-vlaktewater-spuien	
TSO1 boven drempel*	+19.5	+7.5	+4.3	+7.1	+38.4

Controle modellering zoutgehalte zoutvang

In het 3D-model wordt het uitwisselingsspuidebiet onttrokken uit de zoutvang van de Westsluis. De gemodelleerde saliniteit in de zoutvang is dus bepalend voor de hoeveelheid zout die wordt onttrokken. Om te verifiëren of in het 3D-model de juiste hoeveelheid zout is onttrokken uit de zoutvang is in Figuur 3-2 en Figuur 3-3 de vergelijking gemaakt tussen de gemodelleerde saliniteit en de gemeten saliniteit in de zoutvang gedurende de kalibratie- en validatieperiode (HKV, 2023b).



Figuur 3-2: De gemodelleerde saliniteit in de zoutvang van de Westsluis en de metingen (bolletjes) op meetlocatie TSO1 gedurende de kalibratie periode (2016 en 2017).

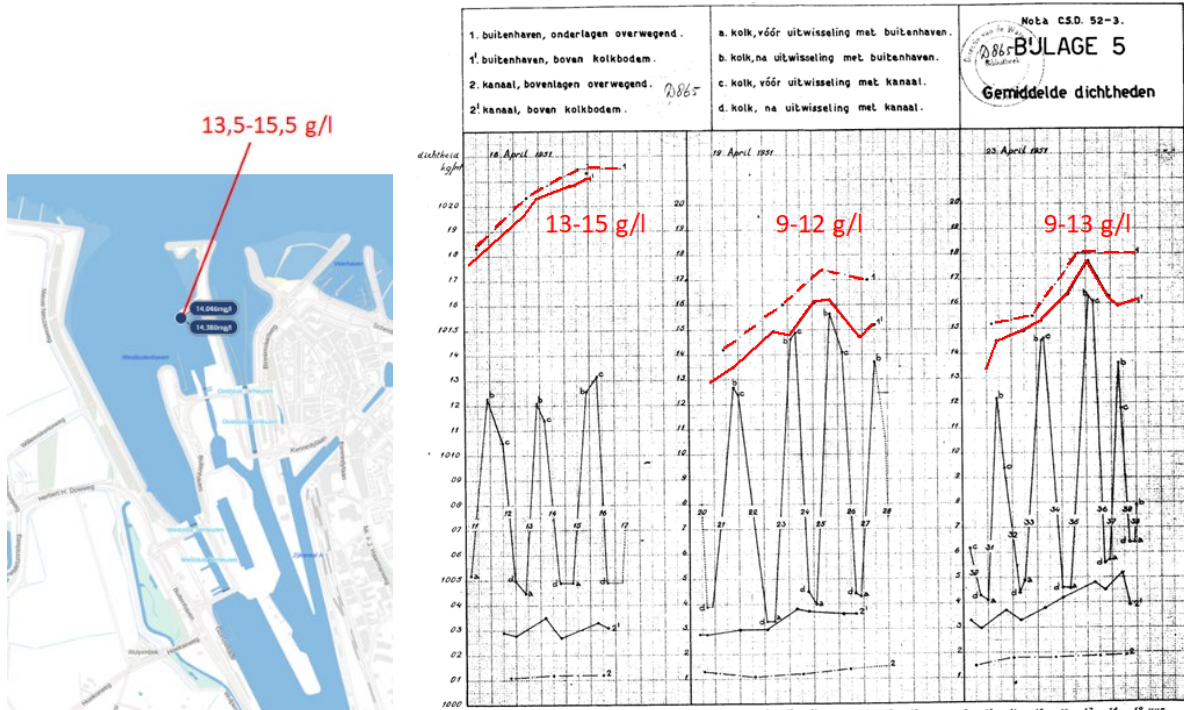


Figuur 3-3: De gemodelleerde saliniteit in de zoutvang van de Westsluis en de metingen (bolletjes) op meetlocatie TSO1 gedurende de validatie periode (2018 en 2019).

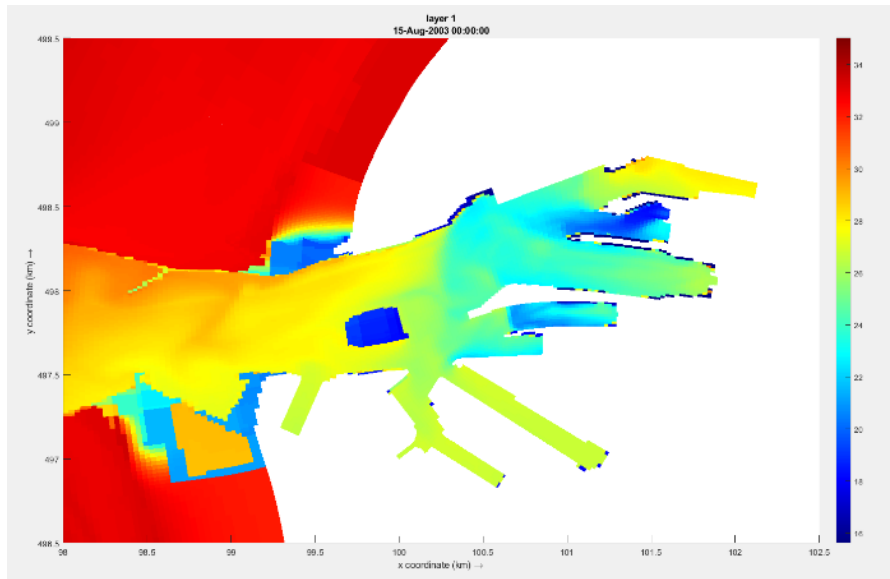
De gelaagdheid en saliniteit zoals gesimuleerd door het 3D-model komt vrij goed overeen met de metingen op locatie TSO1, zowel in de zomers als in de winters. Dit betekent dat de hoeveelheid zout die onttrokken wordt uit de zoutvang bij het uitwisselingsspuien realistisch is en dus ook niet de oorzaak is van de te hoge zoutgehalten op het KGT.

3.4 Zoutgehalte Westerscheldezijde

Het zoutgehalte aan de Westerscheldezijde van de sluisen is eveneens een randvoorwaarde voor de ZSF. Hiervoor is de gemeten saliniteit bij het meetpunt in de buitenhaven aangehouden (Figuur 3-4). Dit punt ligt echter op enige afstand van de Westsluis. Voor de buitenhaven zijn geen modelberekeningen beschikbaar. Uit modelberekeningen bij IJmuiden (met eveneens een combinatie van schutsluisen en spuisluisen) blijkt echter dat het zoutgehalte nabij de sluisdeuren duidelijk lager kan zijn dan op grotere afstand van de sluisen (Figuur 3-5). Hetzelfde volgt uit oude metingen uit 1951 bij de toenmalige Westsluis bij Terneuzen (Figuur 3-4), waar op drie meetdagen een chlorideconcentratie van 13-15, 9-13 en 9-12 g/l is gemeten bij de sluisdeuren, wat duidelijk lager is dan de chlorideconcentratie van 13,5-15,5 g/l bij het meetpunt in de buitenhaven. De deuren aan de buitenzijde gaan open direct nadat het relatief zoete nivelleerdebiet de bodemroosters uit is gestroomd richting de buitenhaven. Mogelijk stroomt dit relatief zoete water weer (deels) terug de sluis in zodra de deuren open gaan.



Figuur 3-4: De locatie van het meetpunt in de buitenhaven (links) en oude metingen voor de sluisdeuren van de Westsluis uit 1951 (rechts).



Figuur 3-5: Modelberekeningen bij IJmuiden waar de saliniteit nabij de sluisdeuren lager ligt dan op grotere afstand van de sluisen.

Een lager zoutgehalte bij de buitendeuren resulteert niet alleen in een lagere zoutlast voor het kanaal, maar zorgt ook voor een kleiner dichtheidsverschil over de sluisen. Dit resulteert in een trager verlopende zoutuitwisseling (langere zoutuitwisseltijd), waardoor er meer invloed is van deuropentijden en van bellenschermen die mogelijk worden meegenomen bij het doorrekenen van maatregelen.

Het lagere zoutgehalte bij de buitendeuren is met name van belang bij de Westsluis waar het zoete water in de voormalige geometrie van het sluisencomplex voor aanleg van de NST makkelijk bleef hangen door het smalle buitentoeleidingskanaal. Ook wordt via de Westsluis veel gespuid en

genivelleerd waardoor de toevoer van zoeter kanaalwater naar het gebied voor de sluisdeuren (buitenzijde) groter is dan bij de Middensluis en de Oostsluis.

In de berekeningen met het 3D-model en met SOBEK, is aan de buitenzijde de gemiddelde saliniteit van het bovenste en onderste meetpunt in de buitenhaven gebruikt. Gemiddeld over de kalibratieperiode is dit een saliniteit van 23.8 ppt. Om een beeld te krijgen van de invloed van de buitenconcentraties op de zoutlast, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met de ZSF waarbij een 1, 2, 3, 4, 5 ppt lagere saliniteit wordt aangehouden ten opzichten van het meetpunt in de buitenhaven (Tabel 3-6). Dit staat gelijk aan een verlaging in chlorideconcentratie met 600, 1100, 1700, 2200 en 2800 mg/l.

*Tabel 3-6: Zoutlast van de Westsluis bij verschil in saliniteit aan de buitenzijde, met het effect op de zoutlast t.o.v. de basisberekening. In de basisberekening is de saliniteit bij het meetpunt in de buitenhaven aangehouden. De basisberekening is uitgelicht in het grijs. De berekening met een * is gekozen in de 3D-berekening in hoofdstuk 4.*

Variant	Salinity to lake [ppt]	Uitwisselingsdebiet [m ³ /s]	Zoutlast uitwisselen [kg/s]	Zoutlast nivelleren [kg/s]	Effect [kg/s]
Buitenhaven	21.1	19.7	236.7	-27.2	-
Buitenhaven -1ppt	20.3	19.6	218.7	-27.2	-18.0
Buitenhaven -2ppt	19.4	19.4	200.7	-27.3	-36.1
Buitenhaven -3ppt	18.6	19.3	182.7	-27.3	-54.1
Buitenhaven -4ppt*	17.7	19.1	164.9	-27.4	-72.0
Buitenhaven -5ppt	16.9	18.9	147.1	-27.4	-89.8

Het verlagen van de buitenconcentratie zorgt voor een sterke afname van de zoutlast bij de kolkuitwisseling. Dit komt met name door de lagere inkomende zoutconcentraties ('salinity to lake'). De buitenconcentratie heeft namelijk een sterke invloed op de kolkconcentratie. Bij een afname van 1 ppt van de buitenconcentratie neemt de kolkconcentratie met ongeveer 0.8 ppt af. Door het kleinere dichtheidsverschil tussen de kolk en het kanaal nemen ook de uitwisselingsdebieten licht af, wat het verlagen van de zoutlast verder versterkt. De nivelleerdebeten en daarmee de zoutexport door het nivelleren verandert nauwelijks.

Het overschatten van de buitenconcentratie zou een belangrijk deel van de verklaring kunnen zijn voor het overschatten van de totale zoutlast. De zoutlast reageert sterk op de buitenconcentratie. Ook liggen de chloridemetingen nabij de sluisdeuren uit 1951 (Figuur 3-4) ongeveer 2 g/l lager dan de gemiddelde waarden bij het meetpunt in de buitenhaven, wat overeenkomt met een reductie van ongeveer 4 ppt. Deze aanpassing zou zorgen voor een reductie van de zoutlast van de Westsluis met 72.0 kg/s. De waarden uit 1951 zijn niet meer geheel representatief voor de huidige situatie, omdat de huidige Westsluis veel groter is en ook de geometrie van de buitenhaven is aangepast. Bij gebrek aan metingen voor de huidige situatie is de 4 ppt als beste schatting aangehouden. Metingen voor de nieuwe situatie worden sterk aanbevolen om dit belangrijke effect scherper in beeld te krijgen.

3.5 Deuropentijden

Het beperken van de deuropentijden zorgt dat er minder tijd is voor het uitwisselen van zoeter water uit het kanaal en zouter water uit de kolk, of tussen het zoutere water in de buitenhaven en het minder zoute water in de kolk. Omdat het uitwisselproces vroegtijdig wordt afgekap, kan dit de zoutlast verlagen. Zowel de registraties van Rijkswaterstaat als de output van SIVAK voorziet alleen in informatie over de tijdstippen waarop schepen passeren. Exacte registraties van de beweging van

de deuren kunnen tot op heden niet ontsloten worden. Het is alleen in algemene zin bekend dat het operationele team van Rijkswaterstaat ernaar streeft om de deuren te sluiten tussen einde uitvaren en begin invaren. Het scheepvaartverkeer is echter vaak te druk om de deuren tussentijds te sluiten. Ook krappe personele bezetting kan deze extra handeling onder druk zetten. Het is dus onduidelijk hoe vaak de deuren gesloten worden tussen uitvaren van de schepen in de kolk en invaren van nieuwe schepen.

Om inzicht te krijgen in het mogelijk effect van het tussentijds sluiten van de sluisdeuren is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met de ZSF. Daarbij worden de deuren tussentijds gesloten bij een tijdsduur van minimaal 5, 10, 15, etc. minuten tussen uitvaren en invaren. Deze tijdsduur wordt in het vervolg aangeduid als de drempeltijd. De deuren worden zowel aan de binnen- als aan de buitenzijde tussentijds gesloten aan de hand van de gekozen drempeltijd. Deze analyse is uitgevoerd o.b.v. de SIVAK-berekeningen, omdat daarin informatie aanwezig is over 'einde uitvaren' en 'begin invaren'. Deze detailinformatie ontbreekt in de registraties van werkelijke sluispassages die gebruikt zijn voor de kalibratie. De analyse is uitgevoerd voor alle drie de sluisen van het toekomstige sluisencomplex: Nieuwe Sluis, Westsluis en Oostsluis.

In Tabel 3-7 is de zoutlast van de NST weergegeven. Daarbij zijn de deuren gesloten tussen uit- en invaren als de tijd tussen het uitvaren van het laatste schip en het invaren van het eerste langer is dan de drempeltijd. Als de tijd tussen uit- en invaren inderdaad langer is, zijn de deuren in de berekening direct na het laatste uitvarende schip gesloten, en direct vóór het eerste invarende schip weer geopend.

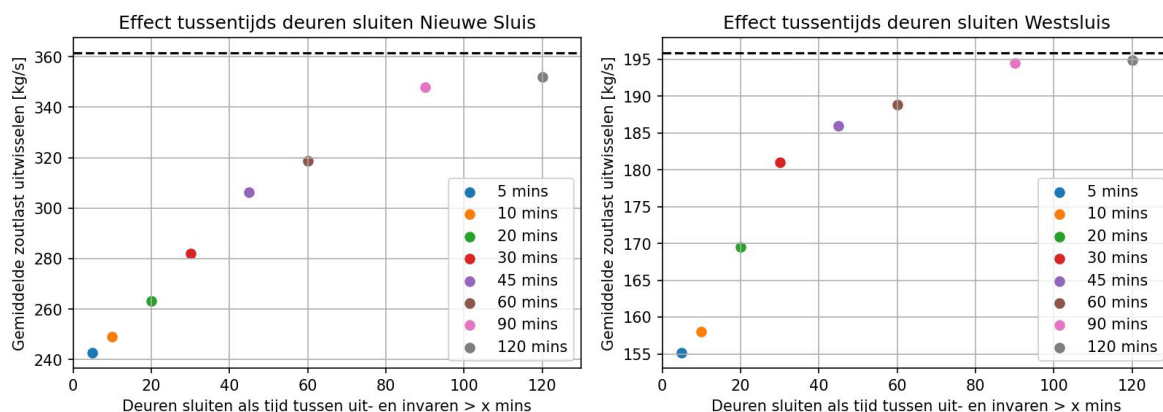
*Tabel 3-7: Zoutlast van de NST bij het tussentijds sluiten van de sluisdeuren, met het effect op de zoutlast t.o.v. de basisberekening. In de basisberekening (grijs) zijn de deuren niet gesloten tussen in- en uitvaren van de schepen. De berekening met een * is gekozen in de 3D-berekening in hoofdstuk 4.*

Variant – deuren sluiten bij x min tussen in- en uitvaren	Salinity to lake [ppt]	Uitwisselingsdebiet [m ³ /s]	Zoutlast uitwisselen [kg/s]	Zoutlast niverellen [kg/s]	Effect [kg/s]
Niet sluiten*	23.0	32.4	361.6	-47.7	-
120 min	22.9	31.8	351.9	-47.7	-9.8
90 min	22.7	31.9	348.0	-47.7	-13.6
60 min	22.1	30.9	318.8	-47.8	-42.9
45 min	21.9	30.3	306.3	-47.8	-55.5
30 min	21.5	29.0	281.9	-47.9	-80.0
20 min	21.2	28.0	263.2	-48.0	-98.8
10 min	20.8	27.7	249.2	-48.0	-112.8
5 min	20.6	27.7	242.6	-48.0	-119.4

Het tussentijds sluiten van de deuren zorgt voor een afname van de zoutlast. Het eerder sluiten van de deuren breekt het uitwisselingsproces eerder af. Hierdoor komt er minder zout vanuit de Westerschelde de kolk binnen en is het zoutgehalte "to lake" (van kolk naar kanaal) lager. Tegelijkertijd zorgt het kleinere dichtheidsverschil tussen de kolk en het kanaal ook voor lagere uitwisselingsstroomsnelheden, wat de reductie van de zoutlast bij uitwisselen versterkt. De fysische processen die hier omschreven zijn aan de hand van het voorbeeld bij de NST vinden op eenzelfde manier plaats bij de twee andere sluisen.

Zoals te zien is in Figuur 3-6 wordt het effect van het sluiten van de deuren groter als deze gesloten wordt bij een kortere tijdsduur tussen in- en uitvaren. Dit komt doordat de uitwisselingsdebieten

initieel het grootst zijn. Het effect van het tussentijds sluiten zwakt af naarmate de drempeltijd voor het sluiten van de deuren oploopt, omdat het uitwisselen dan al grotendeels voltooid is. Bij de NST heeft het tussentijds sluiten van de deuren bij veel langere drempeltijden effect dan bij de andere twee sluizen. Dit komt door de langere uitwisseltijd van de NST: de kolk van de NST is namelijk bijna twee keer zo lang als de kolken van de Westsluis en Oostsluis.



Figuur 3-6: Het effect van het tussentijds sluiten van de sluisdeuren op de zoutlast door uitwisselen van de NST (links) en de Westsluis (rechts). De zoutlast bij het niet tussentijds sluiten van de deuren is weergegeven met een zwarte lijn.

In Tabel 3-8 is de reductie van de zoutlast als gevolg van het tussentijds sluiten van de sluisdeuren weergegeven voor de drie sluizen. Hier is te zien dat het effect op de zoutlast bij de NST verreweg het grootst is. Ook is het zo dat het tussentijds sluiten van de deuren nog steeds effectief is als het pas gebeurt bij drempeltijden tussen uit- en invaren van 30 of 45 minuten. Zulke drempeltijden zijn in de praktijk veel realistischer dan 5 of 10 minuten. Bij een drempeltijd langer dan 30 of 45 minuten neemt de effectiviteit vooral bij de Westsluis en Oostsluis snel af.

*Tabel 3-8: De reductie van de zoutlast bij het tussentijds sluiten van de sluisdeuren voor de NST, Westsluis en Oostsluis. De deuren sluiten tussen uit- en invaren bij verschillende drempeltijden. De berekening met een * is gekozen in de 3D-berekening in hoofdstuk 4.*

Drempeltijd tussen-tijds sluiten [min]	Reductie zoutlast [kg/s]		
	Nieuwe Sluis	Westsluis	Oostsluis
Niet sluiten*	0.0	0.0	0.0
120	-9.8	-1	-0.4
90	-13.6	-1.4	-0.6
60	-42.9	-7.1	-2.4
45	-55.5	-9.9	-4.8
30	-80.0	-14.9	-7.0
20	-98.8	-26.4	-9.2
10	-112.8	-37.9	-11.9
5	-119.4	-40.8	-12.7

Uit bovenstaande analyse blijkt dat het tussentijds sluiten van de deuren wel degelijk effect heeft op de zoutlast, ook als de deuren pas gesloten worden bij langere deuropentijden van orde een half uur. Wel is het moeilijk om te achterhalen hoe het tussentijds sluiten van de deuren in de praktijk verloopt en hoe dit straks gaat verlopen bij de NST. Omdat iedere aanname over het sluiten van de deuren moeilijk te onderbouwen is, is ervoor gekozen om het tussentijds sluiten van de deuren niet mee te nemen in de aangepaste 3D-berekening.

3.6 Scheepsvolume meenemen

Tot dusver is het scheepsvolume niet meegenomen bij het berekenen van de zoutlast vanuit de sluisen richting het kanaal, omdat dit kan leiden tot negatieve neveneffecten (translatiegolven). Een deel van het kolkvolume (inschatting: orde 5-10%) is echter wel bezet door schepen. Dit percentage is relatief klein omdat de meeste schepen veel minder diep steken dan de kolkdiepte.

Om een beeld te krijgen van de invloed van schepen op de zoutlast, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met de ZSF. Daarbij zijn de scheepsvolumes uit de SIVAK-berekeningen voor het gemiddelde afvoerscenario meegenomen (Tabel 3-9). In de ZSF is de invloed van schepen meegenomen in de fase van het uitwisselen, die is opgesplitst in drie opeenvolgende stappen:

1. een waterverplaatsing door het uitvaren van de schepen,
2. het dichtheidsgedreven uitwisselen tussen de kolk en het kanaal of de Westerschelde,
3. een waterverplaatsing door het invaren van de schepen.

*Tabel 3-9: Gemiddelde scheepsvolumes uit de SIVAK berekening voor het gemiddelde afvoerscenario Q3. In de bovenste twee rijen is onderscheid gemaakt tussen schepen van de Westerschelde naar het kanaal (to lake) en vanaf het kanaal naar de Westerschelde (from lake). De onderste rij geeft het gemiddelde van de twee. De berekening met een * is gekozen in de 3D-berekening in hoofdstuk 4.*

Scheepsvolume	Westsluis	Oostsluis	Nieuwe Sluis
Gemiddelde to lake [m ³]	11981	6071	19706
Gemiddelde to_sea [m ³]	13248	5526	15342
Gemiddelde (gelijk in beide richtingen) [m ³]	12614	5798	17542

Tabel 3-10 laat zien hoe het meenemen van schepen de zoutlast van de NST beïnvloedt. Het meenemen van schepen zorgt voor een lagere zoutlast door uitwisselen. Daarbij is de lagere kolkconcentratie (salinity to lake) en het kleinere dichtheidsverschil aan de kanaalzijde dominant over de hogere uitwisselingsdebieten. De hogere uitwisselingsdebieten zijn het gevolg van de extra waterverplaatsing door het in- en uitvaren van schepen. De lagere kolkconcentratie komt door het grotere dichtheidsverschil aan de kanaalzijde dan de Westerscheldezijde. Bij het uitvaren van schepen wordt het volume dat werd ingenomen door schepen gevuld met water van buiten de kolk. Bij het invaren van schepen gaat dit andersom en stroomt het volume water dat bezet wordt door schepen de kolk uit. Het grotere dichtheidsverschil aan de kanaalzijde betekent dat het zoete water dat door schepen verplaatst wordt relatief meer invloed heeft op de kolkconcentratie dan het zoute water aan de buitenzijde.

Verder zorgt de grotere lading van schepen stroomopwaarts ten opzichten van stroomafwaarts voor een klein netto debiet richting de Westerschelde bij het uitwisselen. Als dit verschil in scheepsvolumes voor de twee schutrichtingen wordt meegenomen zorgt het grotere uitgaande uitwisselingsdebiet voor extra zoutexport en wordt de zoutlast verder gereduceerd. Hoe dit verder doorwerkt in de waterbalans is binnen deze studie niet verder onderzocht, al is de verwachting dat dit effect beperkt is omdat het extra water anders in het spuidebiet zou zijn meegenomen.

Tabel 3-10: Zoutlast van de NST bij het meenemen van scheepsvolumes, met het effect op de zoutlast t.o.v. de basisberekening. In de basisberekening (grijs) zijn de scheepsvolumes gelijk aan 0. De berekening met een * is gekozen in de 3D-berekening in hoofdstuk 4.

Variant	Salinity to lake [ppt]	Uitwisselingsdebiet to lake [m3/s]	Uitwisselingsdebiet from lake [m3/s]	Zoutlast uitwisselen [kg/s]	Effect [kg/s]
Zonder schepen	23.0	32.4	32.4	361.6	-
Met schepen (verschil op en af)	22.1	33.7	34.2	339.3	-22.4
Met schepen (gemiddeld volume)*	22.2	33.9	33.9	349.7	-11.9

In Tabel 3-11 is het effect op de zoutlast van het meenemen van scheepsvolumes voor alle drie de sluisen weergegeven. Het effect op de zoutlast schaal met het sluisvolume. Bij zowel de Oostsluis als de NST zorgt het meenemen van het verschil in diepgang van invarende en uitvarende schepen voor een grotere reductie van de zoutlast. Bij de Westsluis is dit niet het geval omdat de gemiddelde diepgang van uitvarende schepen groter is dan voor invarende schepen in de SIVAK berekeningen.

Tabel 3-11: Het effect van het meenemen van schepen op de zoutlast voor de drie sluisen t.o.v. de basisberekening. De berekening met een * is gekozen in de 3D-berekening in hoofdstuk 4.

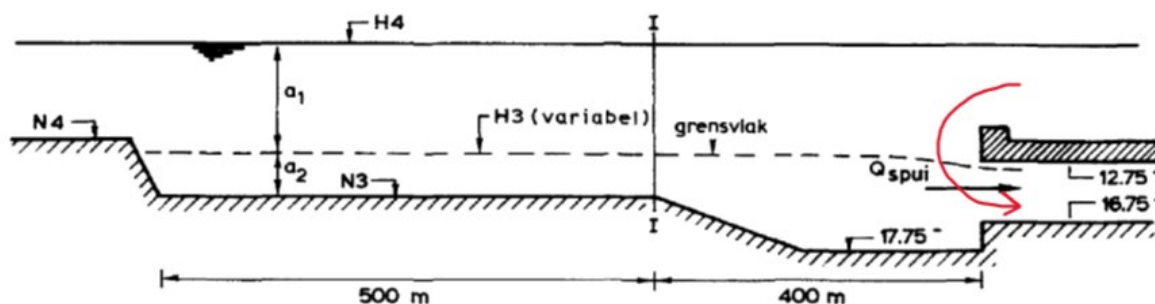
Variant	Reductie zoutlast [kg/s]			
	Nieuwe Sluis	Westsluis	Oostsluis	Totaal
Zonder schepen	-	-	-	
Met schepen (verschil op en af)	-22.4	-13.4	-8.3	-44.1
Met schepen (gemiddeld volume)*	-11.9	-14.3	-5.1	-31.3

Het meenemen van schepen zorgt dus voor een kleine reductie van de zoutlast. Met deze reden zijn schepen in de aangepaste 3D-berekening meegenomen. Om de volumebalans hetzelfde te houden is ervoor gekozen om een gemiddeld scheepsvolume aan te houden voor de twee vaarrichtingen. Voor het duiden van de vermenigvuldigingsfactor op de zoutlast is dit voldoende nauwkeurig. In de nieuwe situatie met NST geeft dit een reductie van de zoutlast van -31.3 kg/s. Voor de oude situatie zonder NST en met Middensluis geeft dit een geschatte reductie van -24.5 kg/s².

3.7 Representatie uitwisselingsspuien

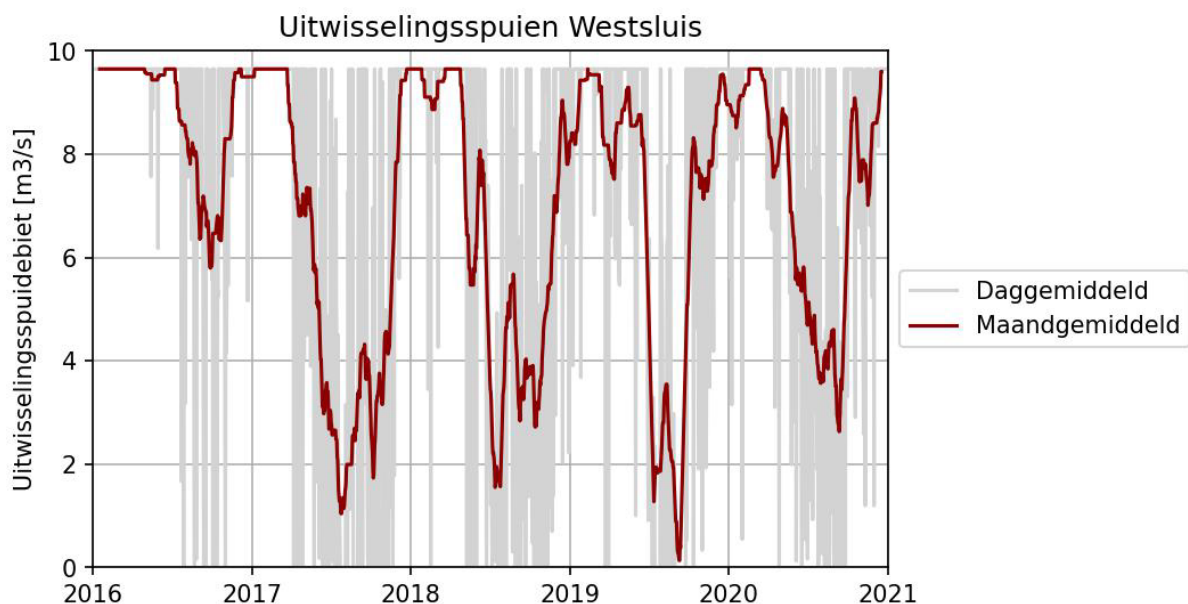
Met het 'systeem Terneuzen' wordt water gespuid via de riolen onder de Westsluis op het moment dat de deuren aan de kanaalzijde open staan. Dit zorgt ervoor dat de binnentredende zouttong (gedeeltelijk) weer wordt afgezogen (rode pijl in Figuur 3-7). Dit zogenaamde 'uitwisselingsspuien' kan alleen worden toegepast als daarvoor voldoende bovenafvoer beschikbaar is. Naast uitwisselingsspuien wordt ook 'continuspuien' toegepast: spuien van water via de riolen van de Westsluis op momenten dat deze sluis niet actief is. In de 3D-berekeningen is het uitwisselingsspuien geïmplementeerd via een daggemiddelde onttrekking uit de zoutvang, met een debiet dat leidt tot het juiste peil op het kanaal. Een daggemiddelde onttrekking is niet hetzelfde als het afzuigen van de binnentredende zouttong op momenten waarop de deuren open staan. In dit onderdeel van het onderzoek

is nagegaan of een deel van de overschatting van de zoutlast toe te schrijven is aan de onnauwkeurige representatie van het uitwisselingsspuien.



Figuur 3-7: Doorsnede van de zoutvang bij de Westsluis (Waterloopkundig Laboratorium, 1988) met het binnentredende uitwisselingsdebiet dat gelijk weer afgezogen wordt tijdens het uitwisselingsspuien (rode pijl).

De maximale spuicapaciteit voor het uitwisselingsspuien is $9,65 \text{ m}^3/\text{s}$ daggemiddeld. In juni 2021 is dit verhoogd naar $22 \text{ m}^3/\text{s}$ (HKV, 2023a). Het uitwisselingsspuien is niet gelijk verdeeld over het jaar: spuidebeten zijn hoger in de winter dan in de zomer (Figuur 3-8). Ook is er in een droge zomer zoals 2017 t/m 2020 minder gespuid dan in een natte zomer zoals 2016. Gedurende de kalibratieperiode heeft er op 11% van de dagen geen uitwisselingsspuien plaats gevonden. Op 58% van de dagen is de maximale spuicapaciteit van $9,65 \text{ m}^3/\text{s}$ gebruikt. De manier waarop het uitwisselingsspuien wordt geschematiseerd heeft dus meer invloed in de winter en in nattere zomers maar is ook in drogere zomers nog steeds van belang. Daar komt bij dat zoutvang een hogere saliniteit heeft in droge periodes en dat wanneer uitwisselingsspuien wel plaats kan vinden dit zal zorgen voor een grotere zoutexport.



Figuur 3-8: De uitwisselingsdebieten bij de Westsluis in 2016 t/m 2020 daggemiddeld (grijs) en maandgemiddeld (rood). In deze periode is de maximale spuicapaciteit voor het uitwisselingsspuien $9,65 \text{ m}^3/\text{s}$ daggemiddeld. Het resterende wateroverschot wordt op andere manieren gespuid.

Om het afzuigen van de binnenkomende zouttong bij de Westsluis na te bootsen is een berekening gedaan waarbij uitwisselingsspuidebeten van de binnenkomende kolkuitwisselingsdebieten worden afgetrokken, en niet meer daggemiddeld uit de zoutvang worden onttrokken. Dit sluit beter aan op

de werking van het uitwisselingsspuien. Op basis hiervan kan de reductie van de zoutlast bepaald worden.

In Tabel 3-12 is het effect op de zoutlast van de representatie van het uitwisselingsspuien weergegeven. Het direct afzuigen van de zouttong door de uitwisselingsspuidebieten af te trekken van het binnenkomende uitwisselingsdebiet zorgt voor een hogere zoutexport dan bij het daggemiddeld onttrekken uit de zoutvang. Dit komt door de hogere saliniteit van het onttrokken water; de spuidebieten zijn onveranderd. Als het uitwisselingsspuidebiet daggemiddeld onttrokken wordt uit de zoutvang heeft het water een gemiddelde saliniteit van 17.3 ppt (saliniteit o.b.v. TSO-metingen, modelconcentratie kan licht afwijken). Bij het verrekenen met de uitwisselingsdebieten is de gemiddelde concentratie van het uitwisselingsspuidebiet 21.1 ppt. De hogere saliniteit van het gespuide water zorgt gemiddeld voor 23.5 kg/s extra zoutexport.

*Tabel 3-12: Zoutlast met een aangepast representatie van het uitwisselingsspuien, met het effect op de zoutlast t.o.v. de basisberekening. In de basisberekening (grijs) is het uitwisselingsspuidebiet daggemiddeld onttrokken uit de zoutvang. De berekening met een * is gekozen in de 3D-berekening in hoofdstuk 4.*

Variant	Salinity UWS [ppt]	Uitwisselings-spuidebiet [m ³ /s]	Overig spuidebiet [m ³ /s]	ZL uitwisselings-spuien [kg/s]	ZL overig spuidebiet [kg/s]	Effect [kg/s]
daggemiddeld uit zoutput	17.3	7.1	10.0	-123.0	-69.4	-
zout uit uitwisseling*	21.1	7.1	10.0	-146.5	-69.4	-23.5

De alternatieve representatie van het uitwisselingsspuien waarbij het afzuigen van de zouttong is nagebootst zorgt voor een grotere zoutexport en daarmee een lagere netto zoutlast. Omdat deze rekenmethode beter overeenkomt met de werkelijkheid is ervoor gekozen om deze aanpassing mee te nemen in de 3D-berekening. Daarmee verandert alleen de zoutexport door het uitwisselings-spuien, het oppervlaktewaterspuien blijft onveranderd.

4 Gekoppelde berekening 3D-model

Op basis van de gevoeligheidsanalyses met de ZSF, is een keuze gemaakt voor een nieuwe set randvoorwaarden voor het 3D D-Flow FM-model. Hierin is een combinatie van aanpassingen doorgevoerd. Vervolgens zijn de resultaten van de ZSF opgelegd aan het 3D-model. Daarna is opnieuw onderzocht welke vermenigvuldigingsfactor nodig is om het zoutgehalte op het kanaal in overeenstemming te brengen met de TSO-metingen.

4.1 Aangepaste randvoorwaarden

Op basis van de gevoeligheidsanalyse met de ZSF is gekozen om de sluisdimensies, de saliniteit aan de kanaalzijde, saliniteit aan de buitenzijde, het meenemen van scheepvaart en de representatie van het uitwisselingsspuien aan te passen in de randvoorwaarden. Tabel 4-1 geeft een overzicht van alle aanpassing met een verklaring en het bijhorende effect op de zoutlast. Samen zorgen alle aanpassingen in de randvoorwaarden voor een reductie van 155 kg/s van de zoutlast ten opzichte van de randvoorwaarden zonder vermenigvuldigingsfactor die gebruikt zijn bij het ontwikkelen van het 3D model (HKV, 2023b). Dit is een benadering, in werkelijkheid zal er ook nog enige interactie zijn tussen de verschillende aanpassingen.

Tabel 4-1: De gekozen aanpassingen voor de gekoppelde 3D-modelberekeningen met het totale effect (van de drie sluiskolken) op de zoutlast in blauw. Aanpassingen zijn t.o.v. de kalibratieberekening die gemaakt is bij de modelontwikkeling (HKV, 2023b)

Aanpassing	Verklaring	Effect op zoutlast [kg/s]
Gecorrigeerde sluisdimensies	Deze sluisdimensies zijn realistischer en geverifieerd door de sluisbeheerder.	-73.4
Zoutgehalte KGT-zijde TSO1 boven drempel (alle sluisen)	Uitwisseling vindt plaats boven de drempel en meetpunt TSO1 ligt dicht op het sluisencomplex waardoor dit zoutgehalte realistischer is.	+38.4
Zoutgehalte buitenhavens -4 ppt voor ZSF (alleen Westsluis)	Modelresultaten bij IJmuiden en het vergelijken van de huidige metingen met oude metingen nabij de sluisdeuren suggereren dat het water direct voor de sluisdeuren zoeter is en dat er een correctie van orde -4 ppt nodig is t.o.v. de metingen in de buitenhaven.	-72.0
Geen tussentijds sluiten deuren	Het is moeilijk om te achterhalen of en wanneer de deuren tussentijds gesloten werden/zullen worden. Hierdoor kan er geen onderbouwde aanname worden gedaan over het tussentijds sluiten van de deuren.	-
Gemiddeld scheepsvolume meenemen (alle sluisen)	Het meenemen van scheepsvolumes in de kolken zorgt voor een reductie van de zoutlast. Daarbij is het meenemen van een gemiddeld scheepsvolume voldoende nauwkeurig.	-24.5
Uitwisselingsspuien door afzuigen zouttong	Het afzuigen van de zouttong is een realistischere representatie van het uitwisselingsspuien.	-23.5
Totaal		-155

Ter vergelijking is in Tabel 4-2 het effect van de vermenigvuldigingsfactor van 0,5 zoals eerder toegepast in het 3D-model weergegeven (HKV, 2023b). Het toepassen van de vermenigvuldigingsfactor

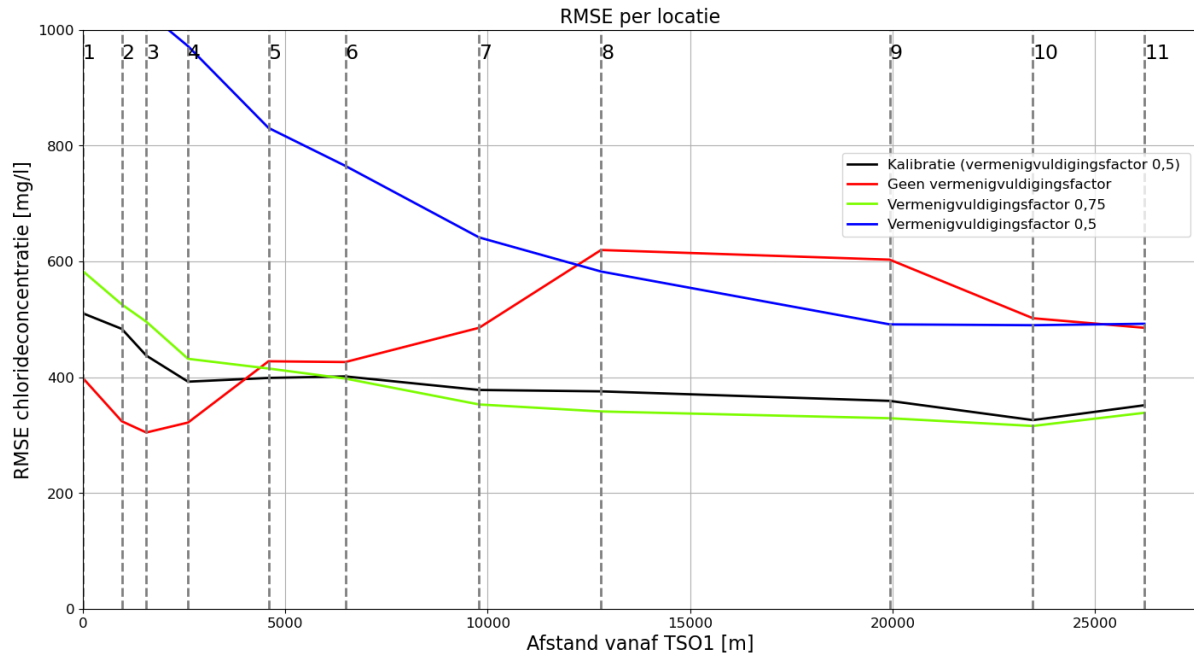
op de uitwisselingsdebieten zorgt voor een reductie van 211 kg/s van de zoutlast door uitwisselen. Een groot deel van deze reductie is dus te verklaren met de aanpassingen die hierboven zijn voorgesteld. Het resterende verschil zou voor een deel verklaard kunnen worden door het tussentijds sluiten van de deuren. Om met een vermenigvuldigingsfactor nog dichterbij de oorspronkelijke kalibratie te komen zou nog een vermenigvuldigingsfactor van orde 0,8 nodig zijn. De 3D-berekening dient om deze verwachting te toetsen.

Tabel 4-2: Het effect van de vermenigvuldigingsfactor op de zoutlast bij uitwisselen met totale effect op de zoutlast in blauw.

	Westsluis	Oostsluis	Middensluis	Totaal
Zoutlast uitwisselen zonder vermenigvuldigingsfactor [kg/s]	272.2	84.5	65.4	422.1
Zoutlast uitwisselen met vermenigvuldigingsfactor [kg/s]	136.3	42.3	32.2	210.8
Effect vermenigvuldigingsfactor [kg/s]	-135.9	-42.2	-33.2	-211.3

4.2 3D-berekening

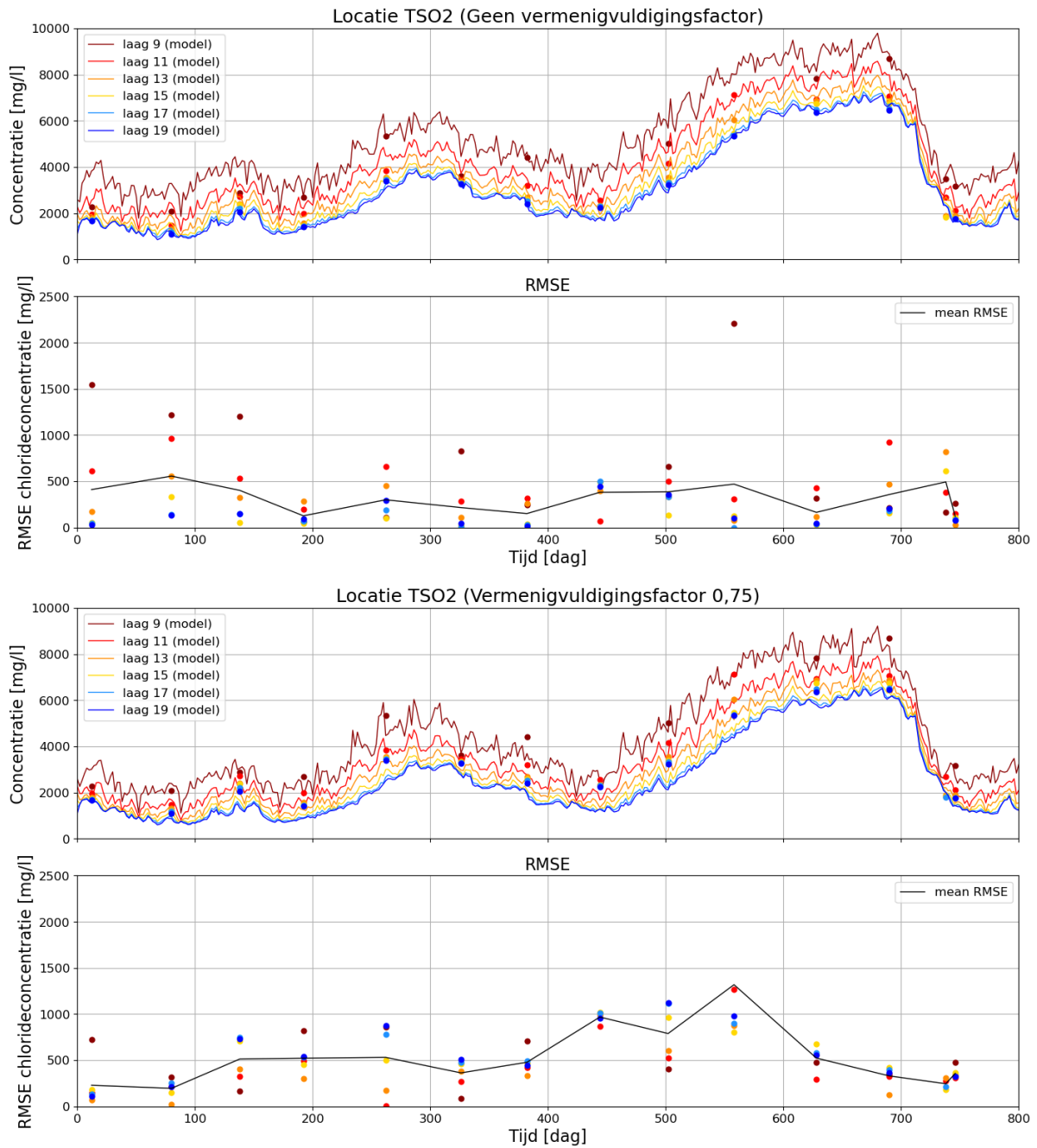
Met de aangepaste randvoorwaarden zijn een aantal 3D-berekeningen uitgevoerd om te onderzoeken welke vermenigvuldigingsfactor nodig is om het zoutgehalte op het kanaal in overeenstemming te brengen met de TSO-metingen. Figuur 4-1 maakt de vergelijking tussen de oorspronkelijke kalibratieberekening met vermenigvuldigingsfactor 0.50 (zwart) en de aangepaste modelberekeningen met nieuwe uitvoer van de ZSF i.c.m. vermenigvuldigingsfactoren 1.00, 0.75 en 0.50 (blauw, groen, rood). De afwijking van de dieptegemiddelde modeluitkomst gemiddeld over de kalibratieperiode ten opzichten van de TSO-metingen (RMSE) is weergegeven over de lengte van het kanaal. De aangepaste modelberekening met factor 0.75 heeft een vergelijkbare afwijking met de oorspronkelijk kalibratieperiode. De berekening zonder vermenigvuldigingsfactor presteert beter dan de oorspronkelijke berekening dichtbij het sluizencomplex en minder goed verder stroomopwaarts. De berekening met factor 0.50 presteert minder goed dan de andere berekeningen.



Figuur 4-1: De RMSE over de lengte van het kanaal voor 3D-berekening van oorspronkelijke kalibratie (met vermenigvuldigingsfactor 0.50), en de aangepaste randvoorwaarden zonder vermenigvuldigingsfactor (dat is: 1.00) en met een vermenigvuldigingsfactor van 0.50 en 0.75.

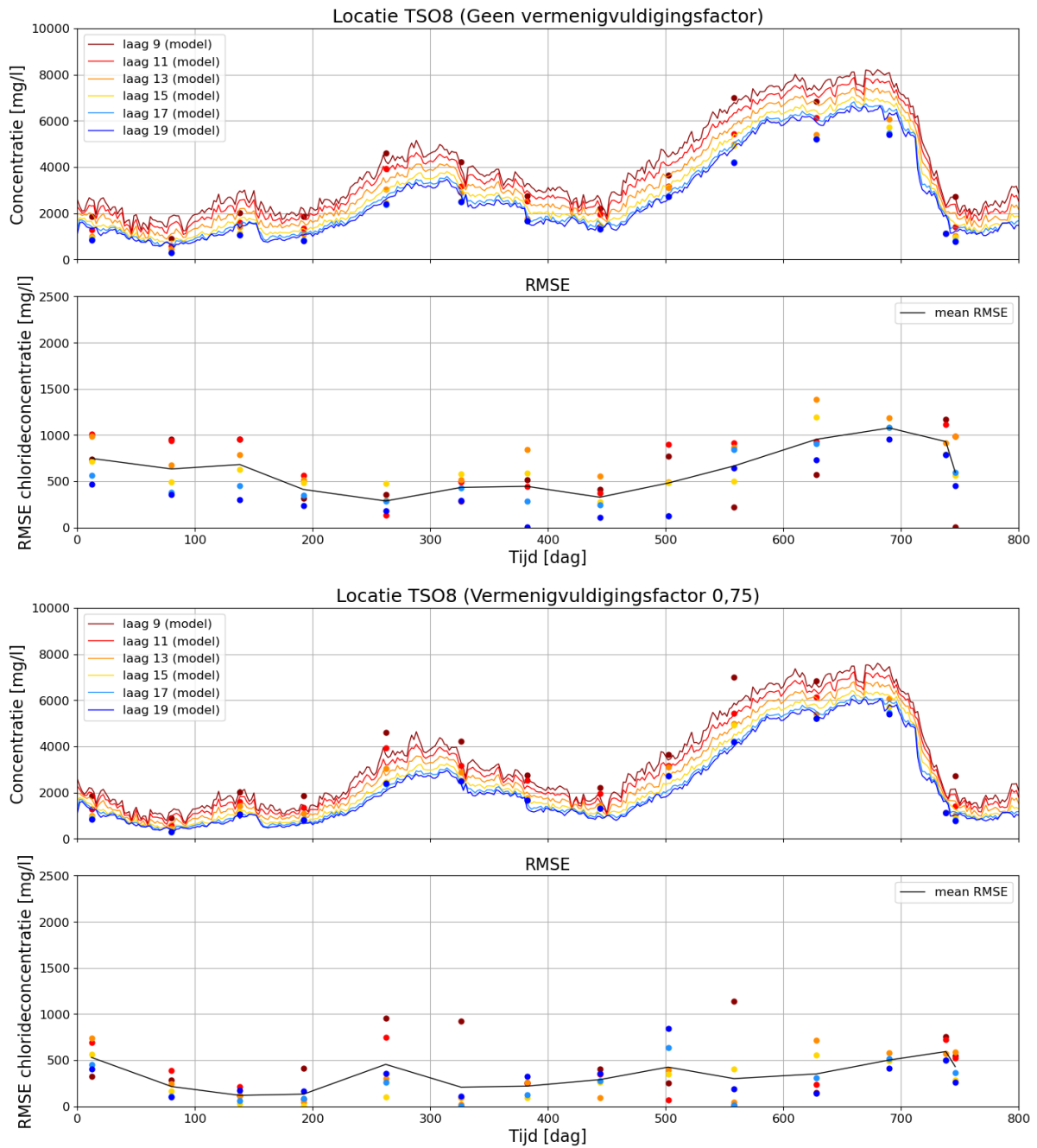
In de volgende alinea's is in meer detail te zien hoe de modelresultaten zich verhouden tot de TSO-metingen. In Figuur 4-2 zijn de modelresultaten voor 2016 t/m 2017 op TSO-locatie 2 weergegeven met vermenigvuldigingsfactor 1.00 (dat is: geen correctie) en met een factor 0.75. Beide modelresultaten komen dicht in de buurt van de TSO-metingen. Daarbij heeft de modelberekening met vermenigvuldigingsfactor 1.00 een kleinere afwijking. De RMSE-waarde ligt gemiddeld onder de 500 mg/l en is redelijk constant over de verschillende seizoenen. De berekening met factor 0.75 presteert minder goed in de droge zomer, waar de chlorideconcentraties worden onderschat. De chlorideconcentratie van de diepste laag lijkt het lastigst om goed te berekenen met het 3D-model. Dit beeld wordt bevestigd door de modelresultaten voor 2018 t/m 2019 zoals te zien is in Figuur A-1 in Bijlage 1.

De verbeterde chlorideconcentraties dichtbij het sluzencomplex suggereren dat met de aangepaste ZSF-randvoorwaarden geen vermenigvuldigingsfactor meer nodig is: een factor 1.00 geeft goede resultaten. De punten het dichtst op de zoutbron worden nu namelijk beter gereproduceerd.



Figuur 4-2: Modelresultaten voor de chlorideconcentratie bij TSO-locatie 2 nabij het sluiscomplex op Kanaal Gent-Terneuzen in 2016 en 2017 voor de aangepaste berekening met vermenigvuldigingsfactor 1.00 (boven) en met factor 0.75 (onder). De modelconcentraties zijn weergegeven op verschillende dieptes (lijnen) met de bijhorende TSO-metingen (bolletjes). Onder de modelresultaten is de RMSE-waarde per laag (bolletjes) en gemiddelde RMSE-waarde (zwarte lijn) weergegeven.

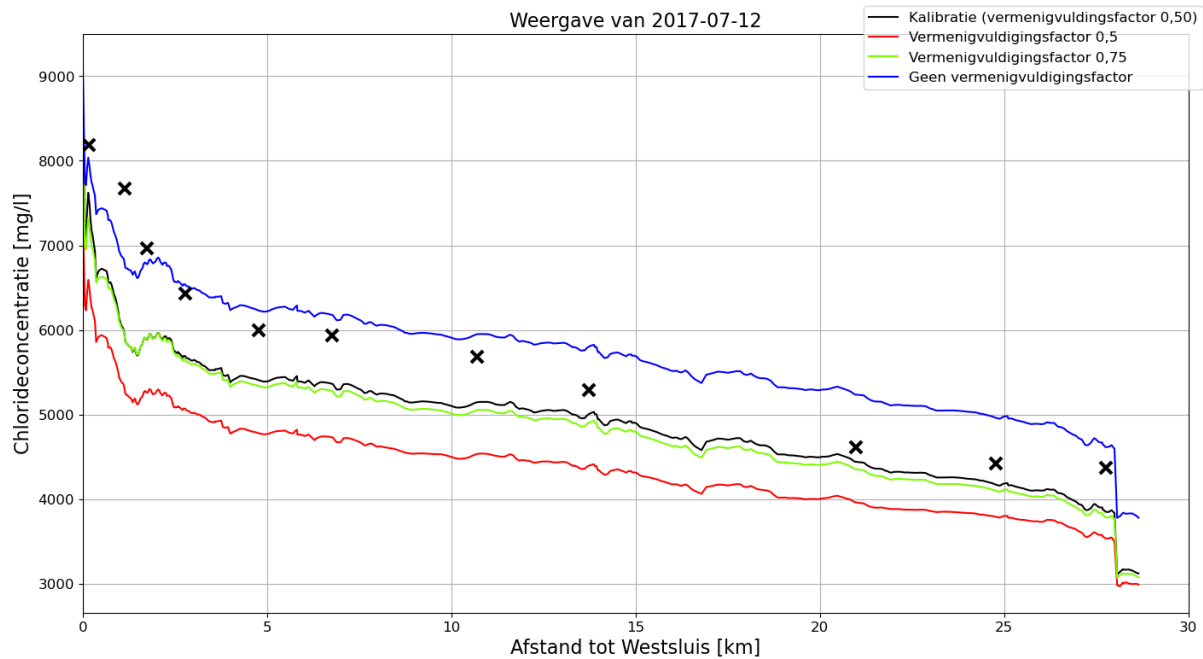
In Figuur 4-3 zijn de modelresultaten voor 2016 t/m 2017 op TSO-locatie 8 weergegeven met vermenigvuldigingsfactor 1.00 (dat is: geen correctie) en met een factor 0.75. TSO-locatie 8 ligt ongeveer halverwege het kanaal. Hier is te zien dat juist de modelberekening met vermenigvuldigingsfactor 0.75 beter presteert. De RMSE-waarde ligt gemiddeld bijna continu onder de 500 mg/l. De modeluitkomsten zonder vermenigvuldigingsfactor liggen iets minder dicht op de TSO-metingen. Met name in de droge zomer wordt de chlorideconcentratie door het model overschat. Deze afwijking komt ook terug in de hogere RMSE-waarde. Het beeld zoals in deze paragraaf omschreven wordt bevestigd door de modelresultaten voor 2018 t/m 2019 in Figuur A-2 in Bijlage A.



Figuur 4-3: Modelresultaten voor de chlorideconcentratie bij TSO-locatie 8 halverwege Kanaal Gent-Terneuzen in 2016 en 2017 voor de aangepaste berekening met vermenigvuldigingsfactor 1.00 (boven) en met factor 0.75 (onder). De modelconcentraties zijn weergegeven op verschillende dieptes (lijnen) met de bijhorende TSO-metingen (bolletjes). Onder de modelresultaten is de RMSE-waarde per laag (bolletjes) en gemiddelde RMSE-waarde (zwarte lijn) weergegeven.

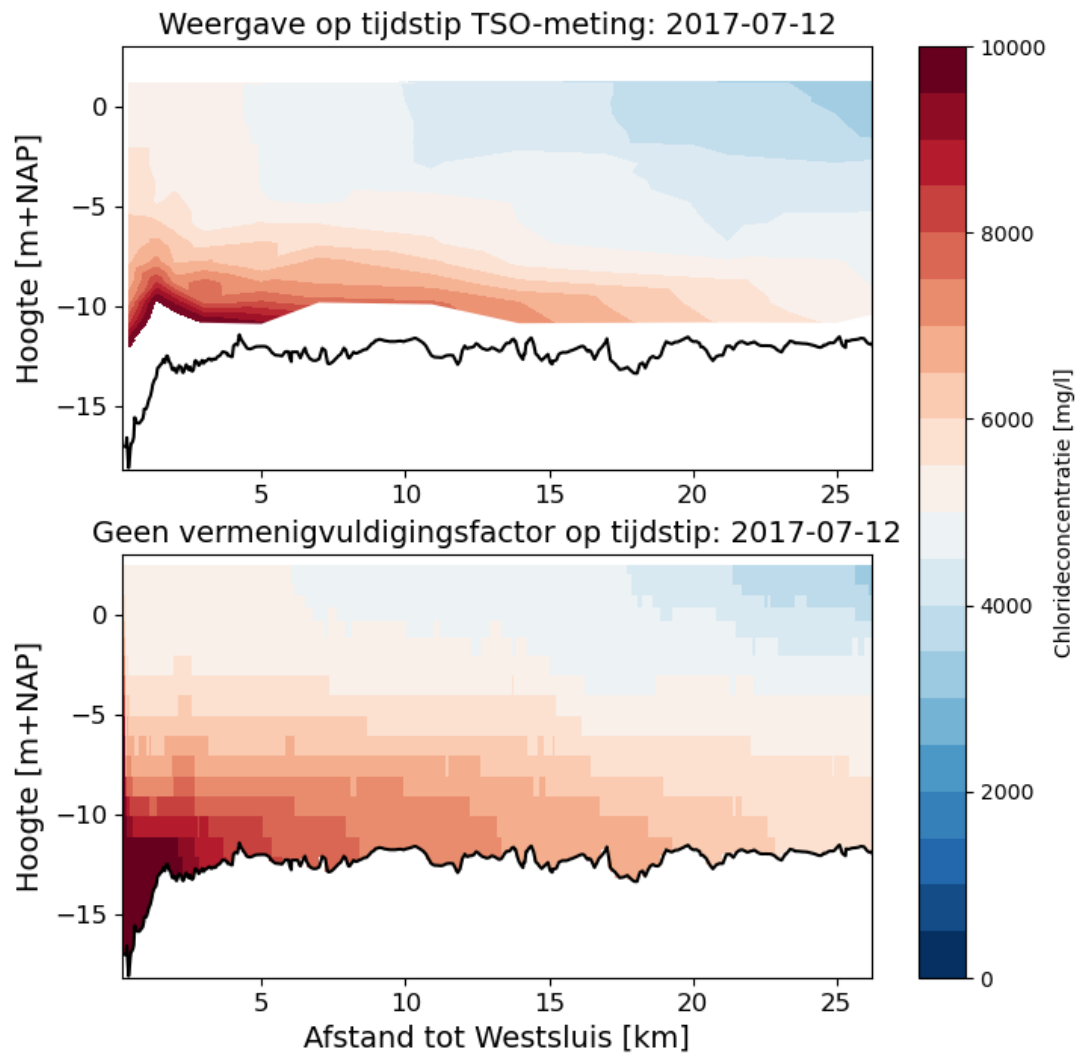
Gezien de betere prestatie van het model met vermenigvuldigingsfactor 1.00 nabij het sluisencomplex, is de overschatting van de chlorideconcentraties verder bovenstrooms naar verwachting niet het gevolg van de ZSF. Dit lijkt eerder te maken te hebben met de verplaatsing van de zouttong en de gelaagdheid binnen het modeldomein. Dit is ook te zien in Figuur 4-4, een langspiegel aan het begin van de zomer met daarin de modelresultaten en de TSO-metingen. Dichtbij het sluisencomplex (TSO-locaties 1 t/m 4) komen de modelresultaten met vermenigvuldigingsfactor 1.00 (blauw) goed overeen met de TSO-metingen. Op de meetlocaties verder bovenstrooms neemt de dieptegemiddelde chlorideconcentratie van de TSO-metingen sneller af dan in de modelresultaten. Daarbij wijken de modelresultaten aan het oppervlak verder af van de TSO-metingen dan bij de diepere lagen

(Figuur 4-3). De helling van de modelresultaten zou dus steiler moeten zijn, wat betekent dat het zout zich minder sterk verspreidt richting bovenstrooms.



Figuur 4-4: Een langs profiel op 12/07/2017 met de verschillende modelresultaten over de lengte van het model en de TSO metingen die op deze datum zijn uitgevoerd.

In Figuur 4-5 geeft een voorbeeld van de gelaagdheid binnen het model en in de metingen op 12/02/2017. Het algemene beeld van de chlorideconcentraties komt voor de metingen en modelresultaten goed overeen. Wel is het zo dat de gelaagdheid in de metingen iets sterker is, met name in de diepste lagen. Dit beeld komt ook terug op veel andere meetmomenten. In het 3D-model is de verticale diffusiecoëfficiënt gebruikt om de verspreiding en menging van het zout te kalibreren. Mogelijk kan de gelaagdheid en daarmee de verspreiding van het zout nog verder verbeterd worden met een aanvullende kalibratie van onder andere de verticale diffusiecoëfficiënt.



Figuur 4-5: De TSO-meting (boven) en modelresultaten zonder vermenigvuldigingsfactor (onder) op 12/07/2017 met de chlorideconcentraties over de model-as.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Discussie

In eerdere berekeningen was een vermenigvuldigingsfactor van 0.50 (3D D-Flow FM-model) tot 0.40 (1D SOBEK3-model) nodig op de uitwisselingsdebieten zoals berekend met de Zeesluisformulering (ZSF) om de gemeten zoutgehalten op het kanaal te kunnen reproduceren. Zonder die vermenigvuldigingsfactor werden de zoutgehalten in de modellen veel te hoog. Met de aanpassingen van de randvoorwaarden voor de ZSF zoals omschreven in dit memo is geen vermenigvuldigingsfactor meer nodig. De zoutlast die volgt uit de ZSF is verbeterd waardoor het 3D-model beter presteert dichtbij het sluisencomplex. Wel is nog aandacht nodig voor het transport van het zout in bovenstroomse richting in het 3D-model. Het advies is om de gelaagdheid en stroomopwaartse dispersie van zout beter te modelleren door het aanpassen van bijvoorbeeld de verticale dispersiecoëfficiënt in het 3D-model.

De aanpassingen van de randvoorwaarden die gemaakt zijn naar aanleiding van gevoeligheidsanalyse verklaren ongeveer 80% van de reductie van de zoutlast die in de eerdere studies met de vermenigvuldigingsfactor bereikt werd. De aanpassingen zijn hieronder opgesomd:

- Na afstemming met de sluisbeheerders zijn de **sluisdimensies** gecorrigeerd. Dit betreft met name de drempelhoogtes en de dieptes van de kolkbodem voor de Westsluis, Middensluis en Oostsluis. Deze aanpassing leidt tot een reductie van de gemiddelde zoutlast met -73 kg/s.
- De **saliniteit aan de kanaalzijde** is gemiddeld 1 ppt zoeter geworden omdat de dieptegemiddelde saliniteit boven de drempel op TSO-meetlocatie 1 is gebruikt in plaats van de dieptegemiddelde saliniteit op TSO-locatie 2. Dit is een realistischere weergave van de werkelijkheid die zorgt voor een toename van de zoutlast met +38 kg/s. Deze aanpassing betreft alleen een eerste iteratie; een tweede iteratie maakt gebruik van modelconcentraties nabij de binnendeuren.
- De **saliniteit aan de buitenzijde van de Westsluis** is gereduceerd met 4 ppt. Het meetpunt in de buitenhaven ligt op relatief grote afstand van de sluisdeuren. Naar verwachting zorgen het zoetere spui- en nivelleerwater voor een lagere saliniteit direct voor de sluisdeuren. Deze aanpassing leidt tot een reductie van de gemiddelde zoutlast met -72 kg/s.
- Het **tussentijds sluiten van de deuren** is bij het aanpassen van de randvoorwaarden niet meegenomen. Het is moeilijk om te achterhalen of en wanneer de deuren tussentijds gesloten zijn. Hierdoor kan er geen onderbouwde aanname worden gedaan over het tussentijds sluiten van de deuren.
- De gemiddelde **scheepsvolumes** zijn meegenomen. Dit zorgt voor een relatief kleine reductie van de zoutlast van ongeveer -25 kg/s.
- De **representatie van het uitwisselingsspuien** is aangepast. Het spuidebiet is niet meer daggemiddeld onttrokken uit de zoutvang, maar is direct afgezogen door het debiet af te trekken van het binnenkomende kolkuitwisselingsdebiet. Hierdoor daalt de netto zoutlast met -24 kg/s.

De gevoeligheidsanalyse en de testberekening met het 3D-model zijn grotendeels uitgevoerd voor de kalibratieperiode 2016-2020 met het toenmalige sluisencomplex. Voor de vertaling naar de nieuwe situatie met NST is het voordelig dat de vermenigvuldigingsfactor niet meer van toepassing is. Hierdoor vervalt de vraag of de vermenigvuldigingsfactor wel 1-op-1 vertaalbaar is van de bestaande sluisen naar de NST.

Wel is nog aandacht nodig voor een aantal van de aanpassingen in de ZSF en hoe die zijn te vertalen naar de NST. Hieronder bespreken we per aspect de implicaties voor de zoutlast in de toekomstige situatie met NST.

- Een deel van de voormalige overschatting van de zoutlast vanuit de ZSF was toe te schrijven aan de te **lage drempelhoogtes** in de Westsluis en Oostsluis en de te **lage bodemhoogtes** van de kolk in de Westsluis, Oostsluis en Middensluis in de oorspronkelijke berekeningen. In deze oorspronkelijke berekeningen waren de dimensies van de NST wel nagenoeg gelijk aan de werkelijke dimensies. Dit aandeel op de vermenigvuldigingsfactor op de zoutlast (zoals afgeleid voor de kalibratieperiode in HKV, 2023a,b) is dus niet van toepassing op de situatie met NST. In HKV (2023a) is de vermenigvuldigingsfactor wel 1-op-1 overgezet van de kalibratie naar de scenario-berekeningen. Dit betekent dat de zoutlast vanuit de NST in de scenario-berekeningen op dit aspect is onderschat.
- De aanpassing van het **zoutgehalte aan de kanaalzijde** zal op een vergelijkbare manier doorwerken bij de NST als bij de andere sluisen. Het effect zal in verhouding staan met de dimensies van de sluis. Voor deze aanpassing is de vermenigvuldigingsfactor terecht 1-op-1 overgezet van de kalibratie naar de scenario-berekeningen. Bij het uitvoeren van een tweede iteratie zal de invloed hiervan beperkt zijn in zowel de situatie met als zonder NST, omdat de modelconcentratie dan aangehouden wordt als binnenconcentratie ('salinity from lake') in de ZSF.
- Het **zoutgehalte aan de buitenzijde** (in de buitenhaven) heeft een sterke invloed op de zoutlast die berekend wordt met de ZSF. De geometrie van de buitenhaven gaat in de nieuwe situatie veranderen waardoor de concentraties voor de sluisdeuren hoger kunnen uitvallen dan in de huidige situatie. De vermenigvuldigingsfactor is wel 1-op-1 overgezet wat betekent dat de zoutlast vanuit de NST en de Westsluis in de scenario-berekeningen op dit aspect mogelijk is onderschat. Met een model van de buitenhaven en/of metingen is het mogelijk om meer grip te krijgen op de concentraties voor de sluisdeuren. Een (eenvoudig) model van de buitenhaven kan meer inzicht geven in de wijziging van de zoutgehalten van de oude geometrie naar de nieuwe geometrie van de buitenhaven bij de verschillende sluiscolken.
- Het **tussentijds sluiten van de deuren** had beperkte invloed op de Westsluis vanwege de kortere lengte. Als de kolk lengte een deel van de verklaring vormt, kan dat bij de langere NST meer invloed hebben. Hoe het tussentijds sluiten van de deuren van de NST in de praktijk zal verlopen is nog onbekend. De aanname dat de deuren niet tussentijds sluiten kan voor de NST leiden tot een overschatting van de zoutlast.
- Het meenemen van de **scheepvaart** heeft een vergelijkbare invloed op de verschillende sluisen. Hiervoor was het gebruik van de vermenigvuldigingsfactor voor zowel de oude als de nieuwe situatie correct.
- Het aanpassen van de **representatie van het uitwisselingsspuien** gebeurt buiten de ZSF om en is niet van toepassing op de Nieuwe Sluis. Bij de NST vindt geen uitwisselingsspuien plaats maar alleen oppervlaktewaterspuien. Dit aandeel van de vermenigvuldigingsfactor op de zoutlast (zoals afgeleid voor de kalibratieperiode in HKV, 2023a,b) is dus niet van toepassing op de situatie met NST. In HKV (2023a) is de vermenigvuldigingsfactor wel 1-op-1 overgezet van de kalibratie naar de scenario-berekeningen. Dit betekent dat de zoutlast vanuit de NST in de scenario-berekeningen op dit aspect is onderschat.

Naar aanleiding van de bovenstaande punten is de verwachting dat de zoutlast van het nieuwe sluisencomplex inclusief NST is onderschat in eerdere scenario-berekeningen (HKV, 2023c). Voor een accuratere schatting van de verzilting van het KGT dienen de scenario-berekeningen opnieuw uitgevoerd te worden met de aangepaste randvoorwaarden.

5.2 Conclusies

In eerdere berekeningen werd de zoutlast bij de sluizen van Terneuzen overschat bij toepassing van de ZSF. Daarom is in eerdere studies een vermenigvuldigingsfactor op de zoutlast toegepast.

In de huidige studie is onderzoek gedaan naar mogelijkheden tot aanscherping van de randvoorwaarden voor de ZSF. Het resultaat van deze aanscherping is dat de zoutlast nabij het sluizencomplex niet meer wordt overschat. De belangrijkste aanpassingen zijn:

- Corrigeren van de sluisdimensies
- Verlagen van de zoutconcentraties aan de buitenzijde van het sluizencomplex

De aanpassing van de randvoorwaarden van de ZSF en de bijbehorende aanpassing van de vermenigvuldigingsfactor op de zoutlast hebben gevolgen voor de verwachte zoutlast vanuit het sluizencomplex na ingebruikname van de NST. De verwachting is dat zoutgehalten op het KGT inclusief NST hoger komen te liggen dan eerder ingeschat.

5.3 Aanbevelingen

Uit de discussie volgen een aantal aanbevelingen voor modelverbeteringen en aanvullend onderzoek.

Modelverbeteringen

- Met de verbeterde randvoorwaarden wordt de chlorideconcentratie verder bovenstreams op het KGT overschat. Om de verspreiding stroomopwaarts van chloride te verbeteren is verdere kalibratie van bijvoorbeeld de verticale diffusiecoëfficiënt in het 3D-model nodig.
- In het huidige 3D-model zijn verouderde sluisdimensies gebruikt. Het 3D-model moet bijgewerkt worden zodat bodemhoogtes en de hoogtes van onttrekking afgestemd zijn op de NSTdimensies.
- Tot nu toe is alleen in het 1D-model een tweede iteratie uitgevoerd. Bij toepassing van het model voor scenarioberekeningen moet zowel met het 1D SOBEK3-model als met het 3D D-Flow FM-model een tweede iteratie uit worden gevoerd waarin de modelconcentraties worden meegenomen als binnenconcentratie in de ZSF. Hierdoor is de invloed van de in de eerste iteratie gekozen binnenconcentratie beperkt.
- De spuidebieten zijn nu daggemiddeld afgeleid op basis van de waterbalans en de capaciteiten van de verschillende spuumiddelen. Als er registraties van de spuikeppen beschikbaar zijn, is het mogelijk om de spuidebieten en bijhorende concentratie nauwkeuriger mee te nemen.
- Voor een nauwkeurige modellering is het van belang dat voor alle sluizen duidelijk is op welke diepte het nivelleerwater en spuiwater onttrokken wordt. Het advies is om in het 3D-model overall de posities van de onttrekkingen voor spuien en nivelleren te controleren en indien nodig aan te passen.

Aanvullende analyses en metingen

- In eerdere berekeningen is de concentratie bij het meetpunt in de buitenhaven gebruikt als buitenconcentratie. De buitenconcentratie heeft een sterke invloed op de zoutlast die berekend wordt met de ZSF. De geometrie van de buitenhaven gaat in de nieuwe situatie veranderen waardoor de concentraties bij de Westsluis en NST hoger zouden kunnen uitvallen dan in de voormalige situatie bij de Westsluis. Met metingen nabij de sluisdeuren en/of een model van de buitenhaven is het mogelijk om meer grip te krijgen op de concentraties voor de sluisdeuren. Een (eenvoudig) model van de buitenhaven kan meer inzicht geven in de wijziging van de zoutgehalten van de oude geometrie naar de nieuwe geometrie van de buitenhaven bij de verschillende sluiskolken.

- Het meenemen van het tussentijds sluiten van de sluisdeuren blijft lastig omdat er weinig informatie is over de (huidige en toekomstige) operationele praktijk. Het tussentijds sluiten van de deuren is dus zowel voor de kalibratie berekeningen als voor de scenarioberekeningen niet meegenomen. Met name bij de NST zou het al dan niet tussentijds sluiten van de deuren een belangrijk effect kunnen hebben op de zoutlast. Zonder verdere informatie is het moeilijk om een onderbouwde aanname te maken over het sluiten van de deuren. Daarom is dit effect ook niet meegenomen. Het automatisch registreren van het openen en sluiten van deuren zou in de toekomst uitkomst kunnen bieden.
- Het is onduidelijk hoe het sluiten van de sluisdeuren in de praktijk verloopt of in de toekomst zal verlopen. Het advies is om strak te sturen op het zo kort mogelijk openen van de deuren van de NST in de toekomst, aangezien uit het huidige onderzoek volgt dat dit bij de NST duidelijk meer invloed heeft dan bij de Westsluis en Oostsluis.
- Het continuspuien is in de huidige berekeningen niet los meegenomen maar als deel van het oppervlaktewaterspuien. Omdat het continuspuien vanuit de zoutvang gaat zou dit nog kunnen zorgen voor extra zoutexport. Wat dit betekent voor de zoutlast moet nog nader onderzocht worden. Hiervoor is aanvullend informatie nodig, zoals de beschikbare capaciteit voor continuspuien. Vooralsnog is weinig bekend over het continuspuien.

6 Referenties

Deltares, 2016

Validatierapport WANDA-Locks, het nieuwe zoutlekmodel. Deltares rapport 1209463-000, Ida de Groot – Wallast en Tjerk Vreeken, januari 2016.

Deltares, 2018

Zoutindringing door schutsluizen, overzicht projecten en aanzet formulering t.b.v. netwerkmodellen; Kennisprogramma Natte Kunstwerken 2017. Deltares rapport 11200741-003, Otto Weiler, juni 2018.

HKV, 2023a

Verzilting Kanaal Gent-Terneuzen: Rapportage oppervlaktewatermodellering. Schelde in Beeld, HKV-rapport PR4146.12, PR4728.10, Vincent Vuik en Paula Lambregts, 13 februari 2023.

HKV, 2023b

Ontwikkeling 3D-model Kanaal Gent-Terneuzen; Modelopzet, kalibratie en validatie. HKV-rapport pr4728.20, Pepijn van Denderen, Jan-Willem van Lente, Paula Lambregts en Vincent Vuik, december 2023.

HKV, 2023c

Oppervlaktewatermodellering op basis van SIVAK-simulaties. HKV-rapport PR4728.11, Paula Lambregts en Vincent Vuik. April 2023.

Shin et al., 2004

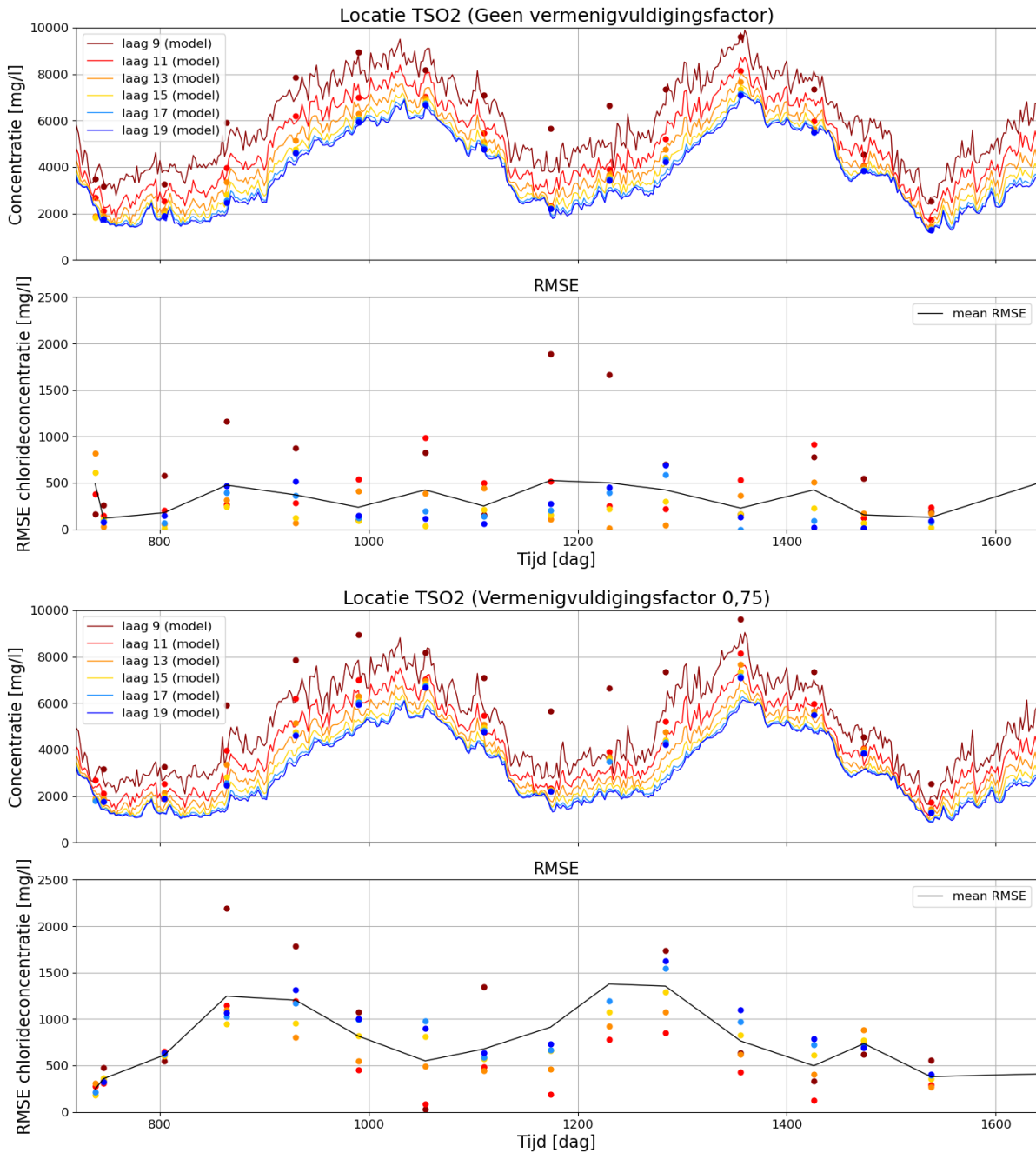
Gravity currents produced by lock exchange. J.O. Shin, S.B. Dalziel, P.F. Linden, Journal of Fluid Mechanics, vol. 521, pp. 1-34, 2004.

Vreeken en Weiler, 2021

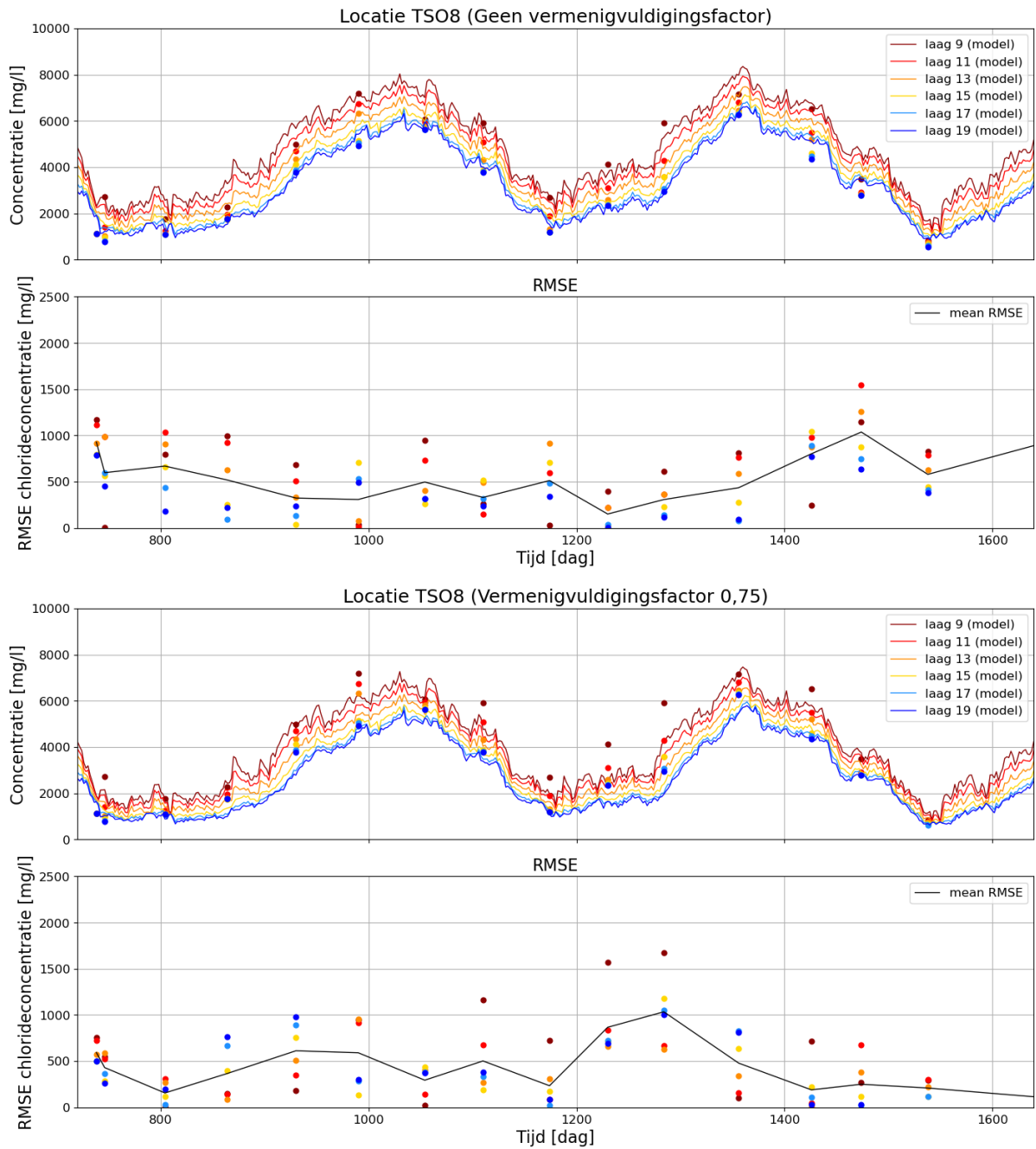
Documentatie Zeesluisformulering (libzsf). https://libzsf.readthedocs.io/_/downloads/en/latest/pdf/ Tjerk Vreeken en Otto Weiler, Deltares, 9 november 2021.

Bijlage A: Figuren validatieperiode

In deze bijlage staan aanvullende figuren voor de prestaties van het 3D-model in de validatieperiode.



Figuur A-1: Modelresultaten voor de chlorideconcentratie bij TSO-locatie 2 nabij het sluisencomplex op Kanaal Gent-Terneuzen in 2018 en 2019 voor de aangepaste berekening zonder vermenigvuldigingsfactor (boven) en met factor 0,75 (onder). De modelconcentraties zijn weergegeven op verschillende dieptes (lijnen) met de bijhorende TSO-metingen (bolletjes). Onder de modelresultaten is de RMSE-waarde per laag (bolletjes) en gemiddelde RMSE-waarde (zwarte lijn) weergegeven.

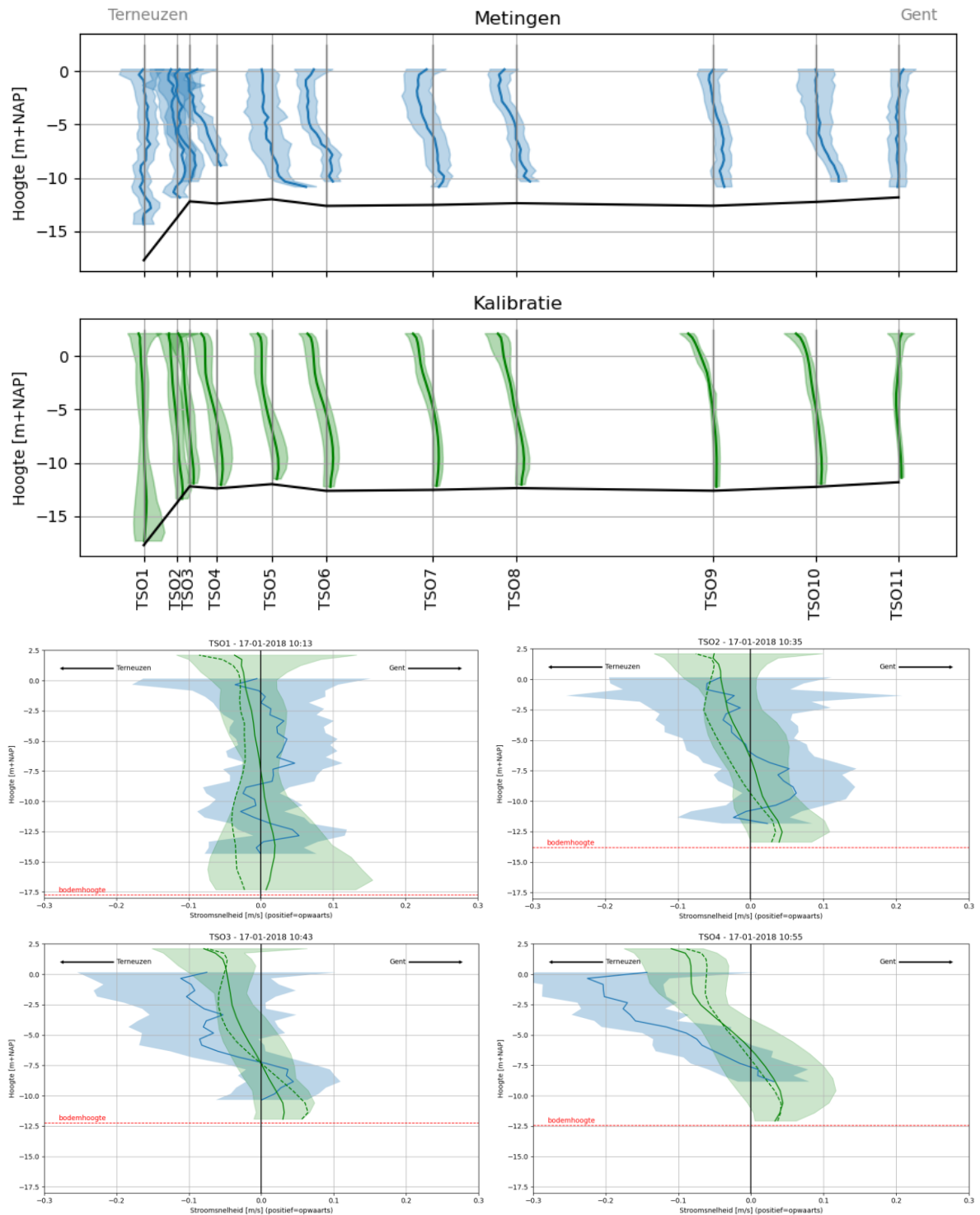


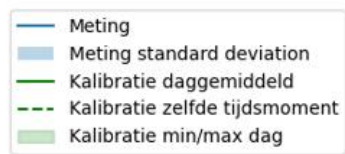
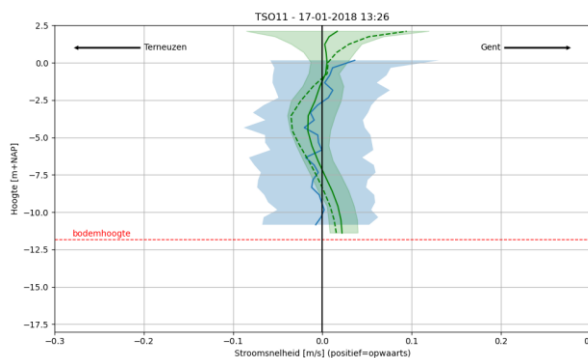
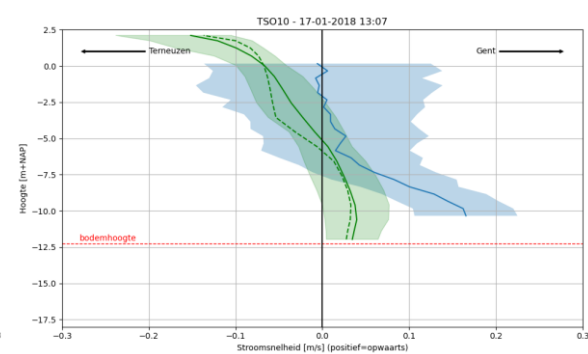
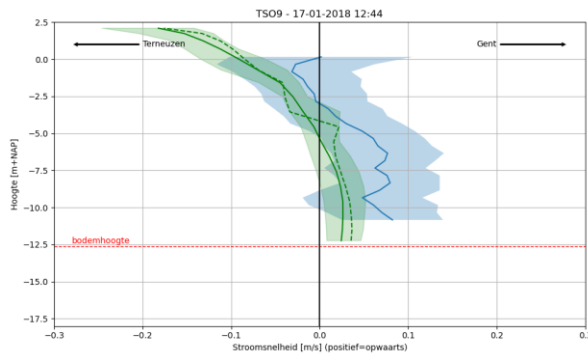
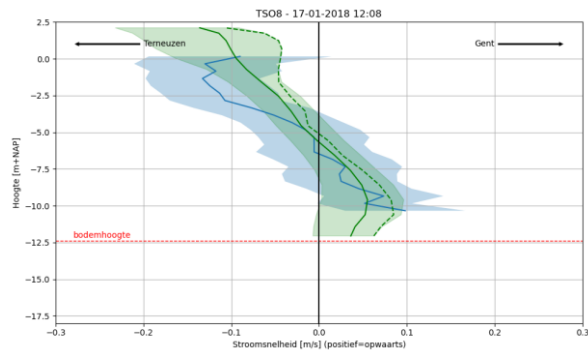
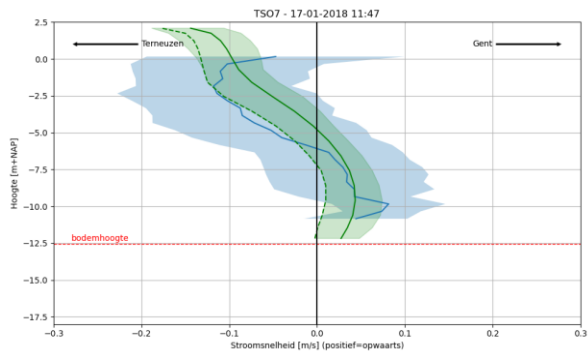
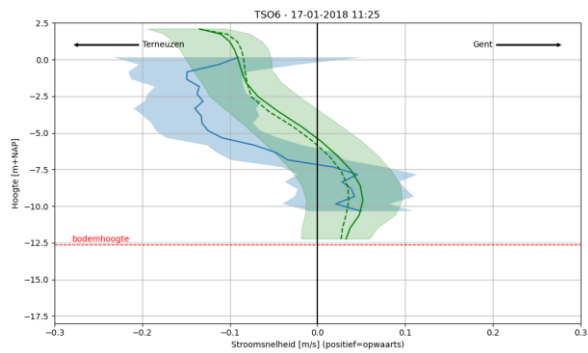
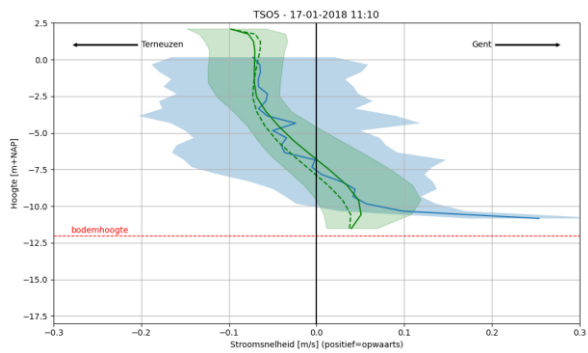
Figuur A-2: Modelresultaten voor de chlorideconcentratie bij TSO-locatie 8 halverwege het kanaal in 2018 en 2019 voor de aangepaste berekening zonder vermenigvuldigingsfactor (boven) en met factor 0,75 (onder). De modelconcentraties zijn weergegeven op verschillende dieptes (lijnen) met de bijhorende TSO-metingen (bolletjes). Onder de modelresultaten is de RMSE-waarde per laag (bolletjes) en gemiddelde RMSE-waarde (zwarte lijn) weergegeven.

F Vergelijking stroomsnelheden

F.1 17 januari 2018

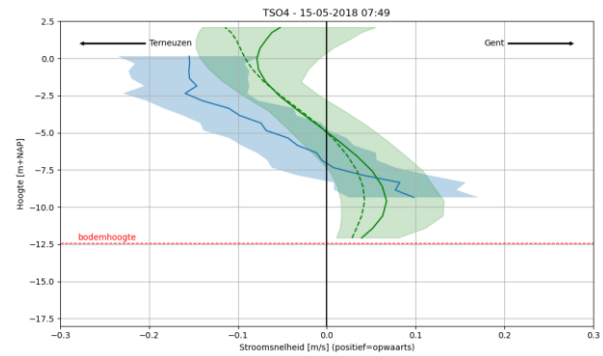
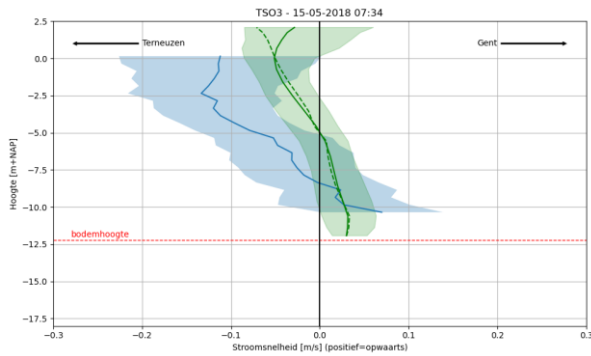
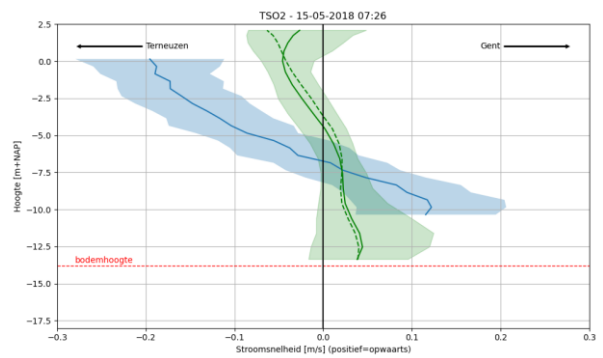
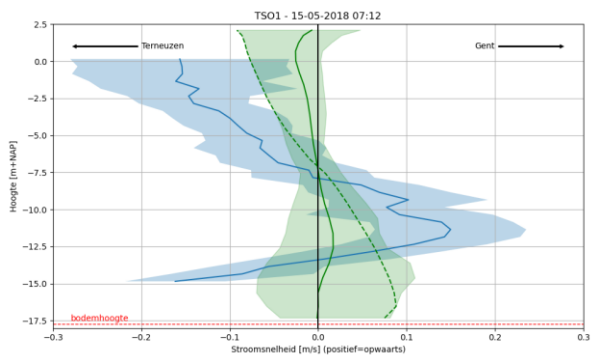
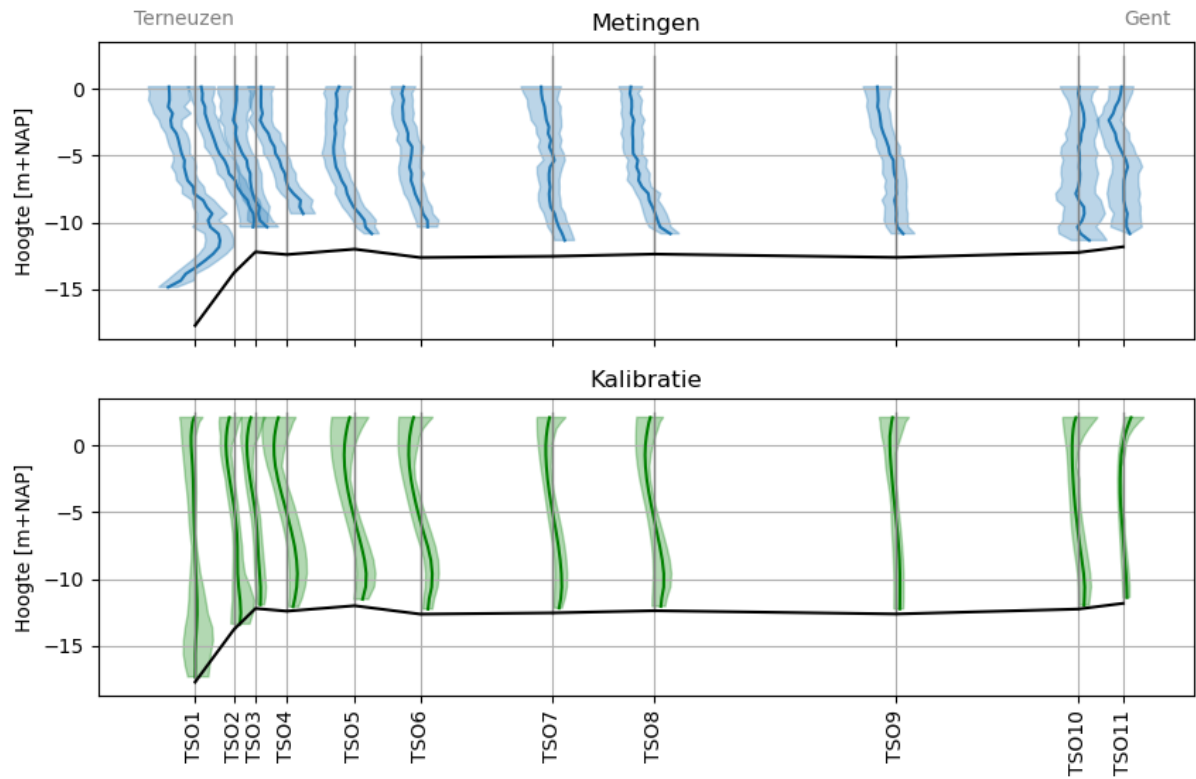
2018_01_17_Meetvaart TSO ADCP15-05-2018 10:39

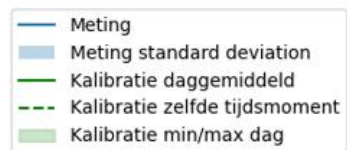
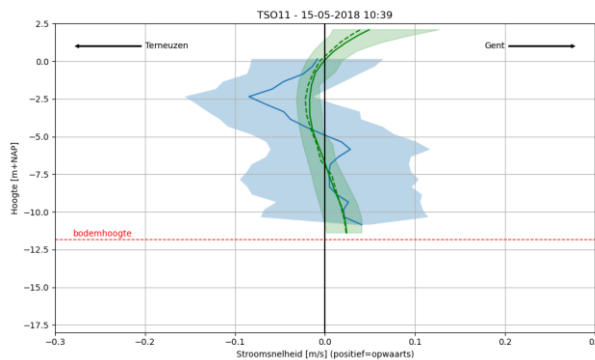
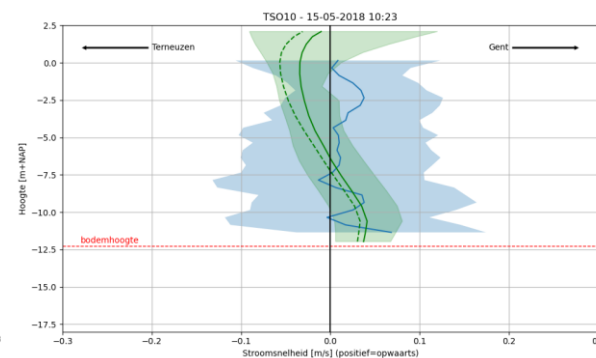
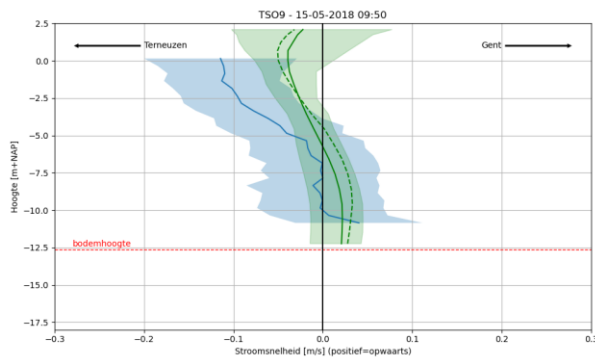
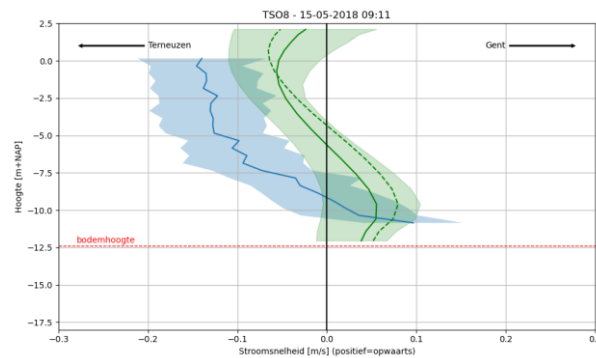
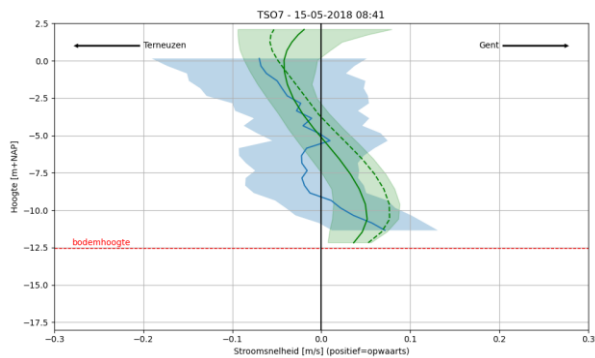
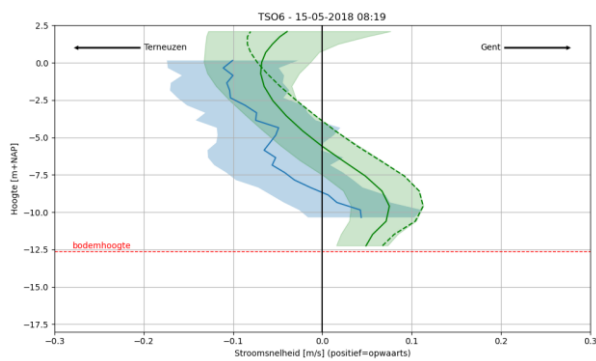
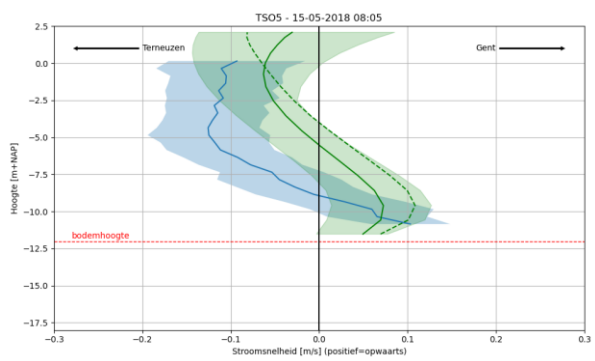




F.2 15 mei 2018

2018_05_15_Meetvaart TSO ADCP15-05-2018 10:39







HKV lijn in water BV

Locatie Lelystad

Botter 11-29
8232 JN Lelystad

Locatie Delft

Informaticalaan 8
2628 ZD Delft

Locatie Amersfoort

Berkenweg 7
3818 LA Amersfoort

0320 294242
info@hkv.nl
www.hkv.nl