

Verzilting Kanaal Gent-Terneuzen

Rapportage oppervlaktewatermodellering

Voor de Vlaams-Nederlandse Scheldecommissie

Contactpersonen	Eric Van Zanten Laurens Hermans
-----------------	------------------------------------

Projectmedewerkers Schelde-in-Beeld consortium

HKV lijn in water	Vincent Vuik Paula Lambregts
-------------------	---------------------------------

VNSC raamcontractnummers NOK-KGT-02, NOK-KGT-03

HKV projectnummers: pr4146.12, pr4728.10

Datum oplevering rapport: 13 februari 2023

Versie: 3.0

Status: Definitief

INHOUDSOPGAVE

1.	Inleiding	6
1.1.	Aanleiding	6
1.2.	Doelstelling.....	6
1.3.	Leeswijzer	6
2.	Systeembeschrijving.....	8
2.1.	Het kanaal.....	8
2.2.	Bergend oppervlak.....	8
2.3.	Schutsluizen	10
2.4.	Bovenaanvoer	11
2.5.	Peilbeheer	11
2.6.	Verzilting.....	12
2.7.	Wijzigingen door Nieuwe Sluis Terneuzen	16
3.	Definitie scenario's	19
3.1.	Inleiding.....	19
3.2.	Bovenaanvoer	19
3.2.1.	Aanpak MER Nieuwe Sluis Terneuzen.....	19
3.2.2.	Analyse bovenaanvoer 2010-2021.....	20
3.2.3.	Scenario's voor de bovenaanvoer.....	24
3.3.	Scheepvaart	27
3.3.1.	Aanpak MER Nieuw Sluis Terneuzen 2015.....	27
3.3.2.	Vergelijking met huidige situatie.....	28
3.3.3.	Scenario's voor scheepvaart	29
3.4.	Inzet schutsluizen en spuimiddelen.....	29
3.4.1.	Berekening schutverlies	29
3.4.2.	Handhaving kanaalpeil	31
3.4.3.	Effect van stremmingen	32
3.4.4.	Strategieën voor schutten en spuien	33
3.5.	Door te rekenen gecombineerde scenario's	44
4.	Werkwijze modellering	45
4.1.	Inleiding.....	45
4.2.	Oppervlaktewatermodel	45
4.2.1.	Van SOBEK2 naar SOBEK3	45
4.2.2.	Verlenging van zijtakken	48
4.3.	Randvoorwaarden: debieten	49
4.3.1.	Evergem (stuw)	49
4.3.2.	Evergem (schutsluis)	49
4.3.3.	Binnenstad van Gent	49
4.3.4.	Moervaart en Zuidlede.....	49

4.3.5.	Avrijevaart	50
4.3.6.	Schutverliezen Terneuzen	50
4.3.7.	Spuidebieten Terneuzen	50
4.4.	Randvoorwaarden: zoutuitwisseling	51
4.4.1.	Werkwijze met Zeesluisformulering	51
4.4.2.	Toepassing Zeesluisformulering voor KGT	53
4.4.3.	Afregeling kalibratiecoëfficiënt deuropentijden	55
4.4.4.	Koppeling Zeesluisformulering met SOBEK	57
4.4.5.	Effect zoutwaterput Westsluis	58
4.4.6.	Zoutgehalte bovenafvoer	59
4.5.	Kalibratie SOBEK-model	59
4.5.1.	Kalibratieperiode en randvoorwaarden	59
4.5.2.	Meetgegevens chlorideconcentraties	59
4.5.3.	Kalibratie uitwisselingsdebieten	60
4.5.4.	Kalibratie dispersiecoëfficiënt KGT	63
4.5.5.	Kalibratie dispersiecoëfficiënt zijtakken	65
4.5.6.	Eindresultaat kalibratie	72
4.6.	Doorrekenen scenario's	75
4.6.1.	Algemeen	75
4.6.2.	Toepassing Zeesluisformulering in scenarioberekeningen	75
4.6.3.	Waterstanden uit SOBEK	76
5.	Resultaten modellering	77
5.1.	Resultaten scenarioberekeningen	77
5.1.1.	Gemiddelde situatie	77
5.1.2.	Droge zomer met klimaatveranderingseffect	80
5.1.3.	Opeenvolging van droge jaren	82
5.2.	Overzicht chlorideconcentraties	85
5.2.1.	Seizoensgemiddelde concentraties bij Sas van Gent	85
5.2.2.	Maximale concentraties	87
5.3.	Nadere duiding van verschillen in chlorideconcentraties	87
5.3.1.	Zoutlast op een gemiddelde dag	88
5.3.2.	Zoutlast op een dag met schutbeperkingen	90
5.3.3.	Daggemiddelde zoutlasten	93
5.4.	Verzilting van zijtakken	94
5.5.	Effectiviteit van winterspoelingen	97
5.5.1.	Doelstelling	97
5.5.2.	Methode	97
5.5.3.	Resultaten	98
5.6.	Effectiviteit van stremmen op zoutlast	101
5.6.1.	Doelstelling	101
5.6.2.	Methode	101
5.6.3.	Resultaten	102
5.7.	Verbreiding of verdieping van het kanaal	103

6.	Statistische analyses	105
6.1.	Statistieken voor scheepvaartstremmingen	105
6.1.1.	Introductie.....	105
6.1.2.	Methode.....	105
6.1.3.	Statistieken voor spuien bij wateroverschot.....	106
6.1.4.	Statistieken per jaar voor stremmingen bij watertekort	106
6.1.5.	Stremmingen in een gemiddelde zomer	108
6.1.6.	Stremmingen bij de verschillende afvoerscenario's	110
6.1.7.	Vergelijking met studies voor de MER Nieuwe Sluis Terneuzen.....	113
6.1.8.	Slotopmerkingen	116
6.2.	Relatie bovenafvoer en verzilting	116
6.2.1.	Analyse metingen KGTS en KGTB	117
6.2.2.	Analyse SOBEK-resultaten voor KGTS en KGTB.....	119
6.2.3.	Analyse SOBEK-resultaten met Nieuwe Sluis Terneuzen	120
6.2.4.	Moervaart en Zuidlede.....	121
7.	Conclusies en aanbevelingen	122
7.1.	Conclusies	122
7.2.	Aanbevelingen	124
8.	Referenties	126

1. Inleiding

1.1. Aanleiding

Dit rapport is onderdeel van het verkennend onderzoek aanpak droogteproblematiek in het Kanaal Gent-Terneuzen (KGT). In dit onderzoek ligt de focus op de verzilting, waterafvoer en peilbeheer op het KGT onder invloed van (lage) bovenafvoer en de uitwisseling van zoet en zout water bij het sluizencomplex bij Terneuzen, inclusief de Nieuwe Sluis Terneuzen (NST).

In voorgaande studies, veelal in het kader van de MER Nieuwe Sluis Terneuzen, werd er vooral gefocust op de veranderingen van het kanaal en het sluizencomplex, maar werd (op basis van de huidige inzichten) het effect van de lage bovenafvoer onderschat. Concreet hebben we in de droge zomers afgelopen jaren een nog lagere afvoer gehad dan de meest extreme variant uit de MER. In de MER werd ook na realisatie van de NST geen overschrijding van 3000 mg/L chloride voorspeld (toetsing op zomergemiddeld chlorideconcentratie over meerdere jaren, gemeten 1,8 meter onder het wateroppervlak bij KGTS Sas van Gent, KGTS). We observeren echter dat de chlorideconcentratie al in verschillende recente jaren de voorspelling overschrijdt, terwijl de NST nog niet in gebruik is genomen. Uit de MER bleek dat nog een stijging van 40-60% te verwachten is bij ingebruikname van de NST. De inschattingen uit de MER zijn dus mogelijk een onderschatting van de verzilting die na realisatie van de NST op zal treden in tijden van droogte.

1.2. Doelstelling

Dit rapport beschrijft de oppervlaktewatermodellering die binnen het verkennende onderzoek is uitgevoerd. De oppervlaktewatermodellering moet het spanningsveld tussen verzilting, peilbeheer en scheepvaartstremmingen op het KGT in beeld brengen, onder invloed van een lage bovenafvoer in combinatie met de realisatie van de NST.

De te beantwoorden onderzoeksvragen zijn:

1. Hoe verandert de zoet-zoutverdeling onder drogere scenario's dan aangenomen tijdens de MER?
2. Hoe vertaalt zich dit in de meer opwaarts gelegen zijrivieren zoals de Moervaart?
3. Wat is de samenhang tussen bovenafvoer, verzilting, scheepvaartstremmingen en peilbeheer?

1.3. Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt het systeem Kanaal Gent-Terneuzen beschreven. In hoofdstuk 3 worden de scenario's voor de bovenafvoer, scheepvaart en schutregime omschreven. Hierbij bepalen de schutstrategieën hoe er wordt omgegaan met watertekort. Vervolgens wordt het model omschreven in hoofdstuk 4 met daarin de opzet van een SOBEK-model gekoppeld aan de Zeesluisformulering, de kalibratie van het model op historische meetreeksen, en het doorrekenen van zoutindringing in diverse scenario's. In hoofdstuk 5 volgen de resultaten van de oppervlaktewatermodellering. Hoofdstuk 6 bevat statistische

analyses van scheepvaartstremmingen en verzilting. Hoofdstuk 7 bevat de conclusies van het onderzoek. Bijlage A bevat figuren met resultaten van het gekalibreerde SOBEK-model in vergelijking met metingen. Bijlage B bevat de methode en resultaten van de toepassing van een 2DV-model, waarmee (in tegenstelling tot SOBEK) de verticale structuur van de stroming en het zoutgehalte kan worden gemodelleerd.

1.4. Kwaliteitsborging

Verskillende versies van dit rapport zijn gereviewd door de Werkgroep Droogte van de VNSC en door Tjerk Vreeken en Otto Weiler van Deltares als onafhankelijke experts.

2. Systeembeschrijving

Dit hoofdstuk beschrijft enkele kenmerken van het Kanaal Gent-Terneuzen en het sluizencomplex bij Terneuzen die relevant zijn voor de oppervlaktewatermodellering.

2.1. Het kanaal

De Westerschelde en de stad Gent worden met elkaar verbonden door het Kanaal Gent-Terneuzen (KGT) en de sluizen bij Terneuzen (Figuur 2-1). Het kanaal is ongeveer 32 km lang, waarvan 15 km in Nederland en 17 km in België. De kanaalbreedte is 150 m en de waterdiepte 13,5 m. De streefwaarde voor het kanaalpeil is NAP+2,10 m, ofwel TAW+4,45 m.

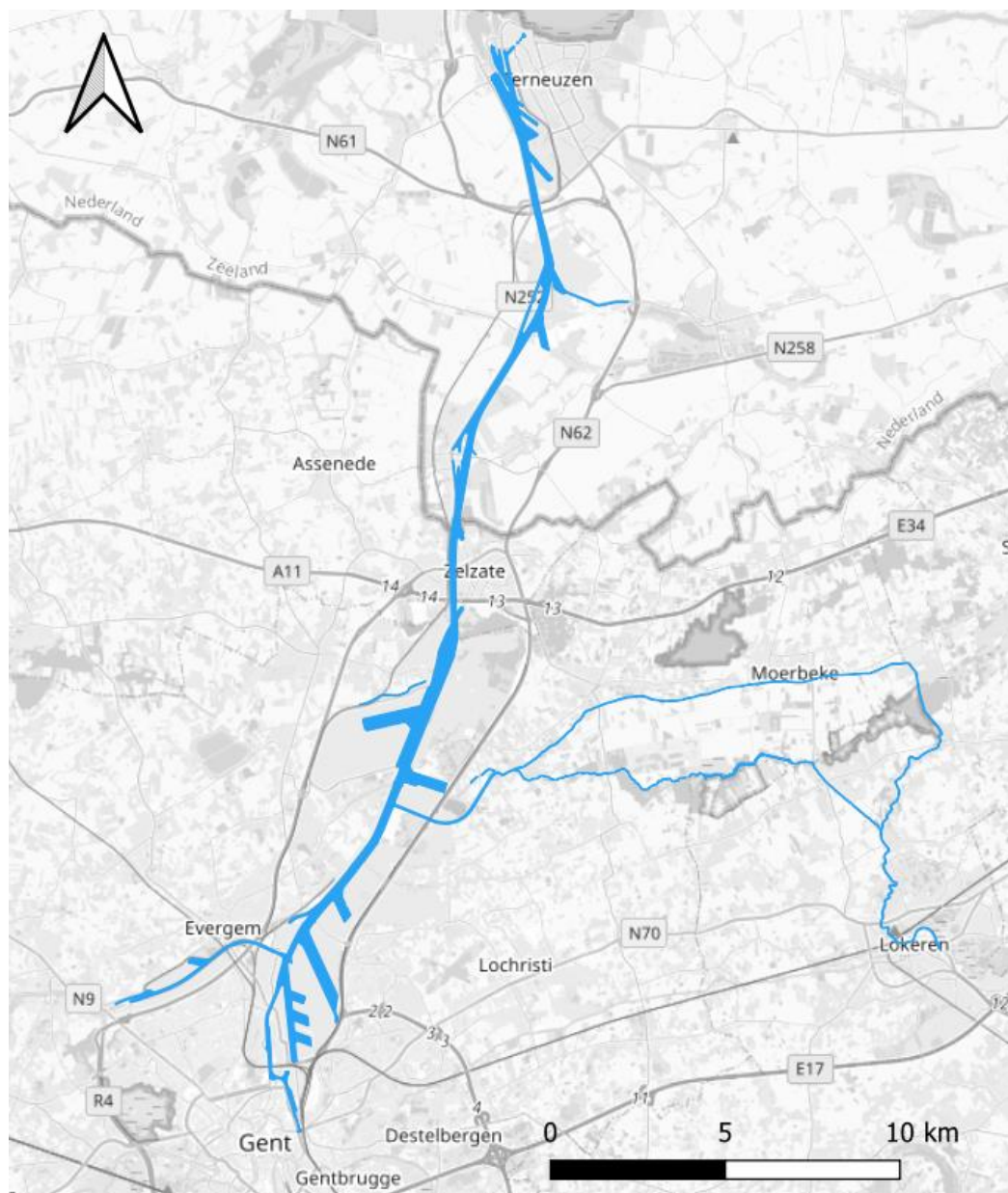
De afvoer door het kanaal is grotendeels afkomstig uit het sluizencomplex bij Evergem, waar een stuw en twee schutsluizen aanwezig zijn. Na de afvoer bij Evergem levert de afvoer vanaf de Moervaart de grootste bijdrage aan het totale debiet door het kanaal. Ook vanuit Gent stroomt water het kanaal op, onder andere via de Tolhuisstuw. De afvoer van water vindt plaats via schutverliezen en spuien onder vrij verval bij Terneuzen. Daarbij wordt gebruik gemaakt van het peilverschil van gemiddeld ongeveer 2 m tussen het kanaal en de Westerschelde.

2.2. Bergend oppervlak

In het MER deelrapport Water wordt aangegeven dat het totale bergende oppervlak van het kanaal inclusief zijtakken en havendokken ongeveer 10 km² bedraagt (Lieveense CSO, 2015). Enkele zijrivieren stromen uit op het kanaal: de Moervaart (na de samenvloeiing van de Moervaart en de Zuidlede), de Avrijevaart en enkele kleine beken zoals het Molenvaardeken, de Burggravenstroom en de Caelene.

Een nauwkeurige schatting van het bergend oppervlak is van belang om goed te kunnen berekenen hoe het kanaalpeil reageert op fluctuaties in bovenafvoer of in spui- en schutdebieten bij Terneuzen. Daarom is een nieuwe schatting uitgevoerd van het bergend oppervlak van het gehele KGT watersysteem. Hiervoor is gebruik gemaakt van de polygonen voor de verschillende onderdelen van de watergangen zoals vastgesteld in het BGT (Basisregistratie Grootchalige Topografie, NL) en in het GRB (Grootchalig Referentiebestand, BE). De waterlopen van het KGT inclusief havens/dokken, de Avrijevaart, de Moervaart t/m Lokeren, en de Zuidlede zijn hierin meegenomen (zie Figuur 2-1).

Tabel 2-1 toont het resultaat van de uitgevoerde analyse. Het totale bergende oppervlak van de hierboven genoemde waterlopen is 11,9 km². Hiervan is het overgrote deel onderdeel van het KGT zelf en ongeveer 1 km² van de zijtakken.



Figuur 2-1: De watergangen van Kanaal Gent-Terneuzen en zijtakken die zijn meegenomen om het bergend oppervlak te bepalen.

Tabel 2-1: Oppervlak van Kanaal Gent-Terneuzen en haar zijtakken

Watergang	Oppervlak (km ²)
Kanaal Gent-Terneuzen (incl. havens/dokken)	10,8
Moervaart	0,80
Zuidlede	0,23
Avrijevaart	0,05
Totaal	11,9

2.3. Schutsluizen

Tot 1 oktober 2021 bestond het sluizencomplex uit de Westsluis, de Middensluis en de Oostsluis, waarbij de zeevaart voornamelijk gebruik maakt van de Westsluis. De Middensluis is op 1 oktober 2021 buiten gebruik genomen en daarna gesloopt. Vanaf 2017 wordt gewerkt aan de bouw van de Nieuwe Sluis Terneuzen, een grote zeesluis die vanaf 2023 operationeel moet worden. Tabel 2-2 geeft een overzicht van de dimensies van de verschillende sluiskolken.

Tabel 2-2: Dimensies sluizen (bron: vaarweginfo.nl en nieuwesluisterneuzen.nl). Dieptes zijn t.o.v. kanaalpeil.

Schutsluis	NST	Oostsluis	Middensluis	Westsluis
Breedte kolk (m)	55	24	24	38
Lengte kolk (m)	427	280	140	290
Oppervlakte kolk (m ²)	23.485	6.720	3.360	11.020
Diepte kolk (m)	-16,5	-7,5	-10,5	-13,5
Drempeldiepte buiten (m)	-15,8	-6,5	-7,6	-12,8
Drempeldiepte binnen (m)	-14,1	-6,6	-8,3	-13,5

In dit rapport is een schutting een opschutting óf een afschutting. Een schutcyclus is een opschutting en een afschutting bij elkaar. Een schutting zonder schepen wordt aangeduid als een leegom schutting. Tabel 2-3 geeft een overzicht van het gemiddelde aantal schuttingen per dag in de afgelopen 6 jaar voor de drie sluiskolken. Het aantal schutcycli (laatste rij) is de helft van deze getallen. Voor schutverlies en zoutlast is het aantal volledige schutcycli van belang, en niet het aantal op- en afschuttingen. Daarom worden getallen voor gebruik van de schutsluizen in dit rapport veelal uitgedrukt in termen van het aantal schutcyclus.

Tabel 2-3: Gemiddeld aantal schuttingen per dag per sluiskolk voor verschillende jaren (bron: registratie passages en leegom schuttingen door Rijkswaterstaat). De laatste rij bevat het gemiddelde aantal schutcyclus per dag, wat de helft is van het aantal schuttingen. In 2019 is een correctie toegepast op de ruwe data, zie §4.3.6.

Jaar	Oostsluis	Middensluis	Westsluis
2016	32,9	21,2	24,1
2017	34,1	22,5	24,0
2018	33,6	21,4	24,3
2019	31,8	16,6	23,7
2020	31,1	15,5	23,3
2021	31,6	16,0	22,9
Gemiddeld	32,5	18,9	23,7
Schutcyclus	16,3	9,4	11,9

2.4. Bovenaanvoer

De bovanaanvoer naar het kanaal is voornamelijk een kwestie van verdeling van het water wat aankomt vanuit de Boven-Schelde en Leie (Figuur 2-2).



Figuur 2-2: Waterverdeling rond Gent (Rijkswaterstaat, 2020)

In het zogenaamde wijzigingsverdrag 1985 is vastgelegd dat de aanvoer van zoet water naar KGT minimaal 13 m³/s is, gemiddeld over twee maanden, of dat er alternatieve maatregelen worden genomen die zorgen voor eenzelfde verlichting van de zoutindringing. In de praktijk is het realiseren van deze aanvoer niet altijd mogelijk. Het afgesproken maximum debiet is 100 m³/s.

De wateraanvoer verloopt voornamelijk via de stuw bij Evergem. Daarnaast zijn er kleine bijdragen van de Tolhuisstuw, de schutsluizen van Evergem en de Moervaart.

2.5. Peilbeheer

In drie traktaten (1843, 1969 en 1985) zijn afspraken vastgelegd (Rijkswaterstaat, 2020):

- In Nederland vindt geen polderwaterafvoer plaats;
- Het kanaal heeft een streefpeil van NAP+2,10 m (TAW+4,45 m) met marges tot +/-25 cm
- Nederland zorgt dat de zoutindringing bij Terneuzen beperkt blijft;
- België staakt toevoer als het peil de waarde van NAP+2,35 m overschrijdt;
- België zorgt voor minimaal 13 m³/s aanvoer gemiddeld over 2 maanden (of neemt alternatieve maatregelen die de zoutindringing in dezelfde mate tegengaan).

De waarde van NAP+2,10 m is geldig sinds de NAP-correctie in 2005, die in Zeeuws-Vlaanderen 3 cm bedroeg; voorheen was het kanaalpeil NAP+2,13 m. De marges worden bewaakt via alarmgrenzen:

NAP+2,35 m als eerste bovenste alarmgrens en NAP+2,05 m als eerste onderste alarmgrens. Het verhang over het kanaal is maximaal 10 cm.

Bij het schutten stroomt kanaalwater van het KGT naar de Westerschelde: per volledige schutcyclus een hoeveelheid ter grootte van de schutschijf, bestaand uit het kolkoppervlak vermenigvuldigd met het waterstandsverschil tussen KGT en 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. In perioden van droogte kan dit schutverlies tot complicaties leiden voor het peilbeheer. Dit gebeurt als de bovenafvoer lager ligt dan het daggemiddelde schutverlies Q_{sch} in m^3/s , gesommeerd over de verschillende schutkolken:

$$Q_{sch} = \sum N_c * A_{kolk} * \Delta h / 86400,$$

Waarin N_c het aantal volledige schutcycli per dag is, A_{kolk} het kolkoppervlak in m^2 en Δh het waterstandsverschil in m, gemiddeld over de schuttijdstoppen op de dag. 86400 is het aantal seconden in een dag.

Bij een evenredige verdeling van de schutcycli over de dag geldt dat Δh bij benadering gelijk is aan het kanaalpeil minus de gemiddelde waterstand op de Westerschelde. Voor de Middensluis gold dat deze alleen rond hoogwater in bedrijf was om te schutten. Het geringe waterstandsverschil in combinatie met het kleine kolkoppervlak zorgde ervoor dat het schutverlies via de Middensluis zeer klein was.

Als de bovenaanvoer niet toereikend is, worden waterbesparende maatregelen genomen. De operationeel beheerders van Rijkswaterstaat VWM gaven tijdens een overleg op 6 december 2021 aan dat de volgende maatregelen zijn genomen in droge zomers (waarbij TAW=NAP+2,35 m):

1. Voorafgaand aan de droogte het peil opzetten tot ongeveer NAP+2,30 m;
2. Bij een kanaalpeil onder streefpeil van NAP+2,10 m geclusterd schutten;
3. Bij een kanaalpeil onder NAP+2,05 m gelden diepgangsbependingen;
4. Bij een kanaalpeil onder NAP+2,05 m wordt overgegaan tot scheepvaartstremmingen rond laagwater op de Westerschelde: eerst 1 uur voor tot 1 uur na laagwater, later ook 1,5 uur voor tot 1,5 uur na laagwater. Vooral deze scheepvaartstremmingen leveren hinder op.

Ook in Vlaanderen worden diverse maatregelen genomen om het peilbeheer op het Groot Pand te beheersen en te zorgen voor gelijke mate van bevaarbaarheid op het Groot Pand en het KGT.

In tijden van een hoge bovenaanvoer wordt water gespuid om het peil te reguleren. Daarvoor zijn de volgende mogelijkheden:

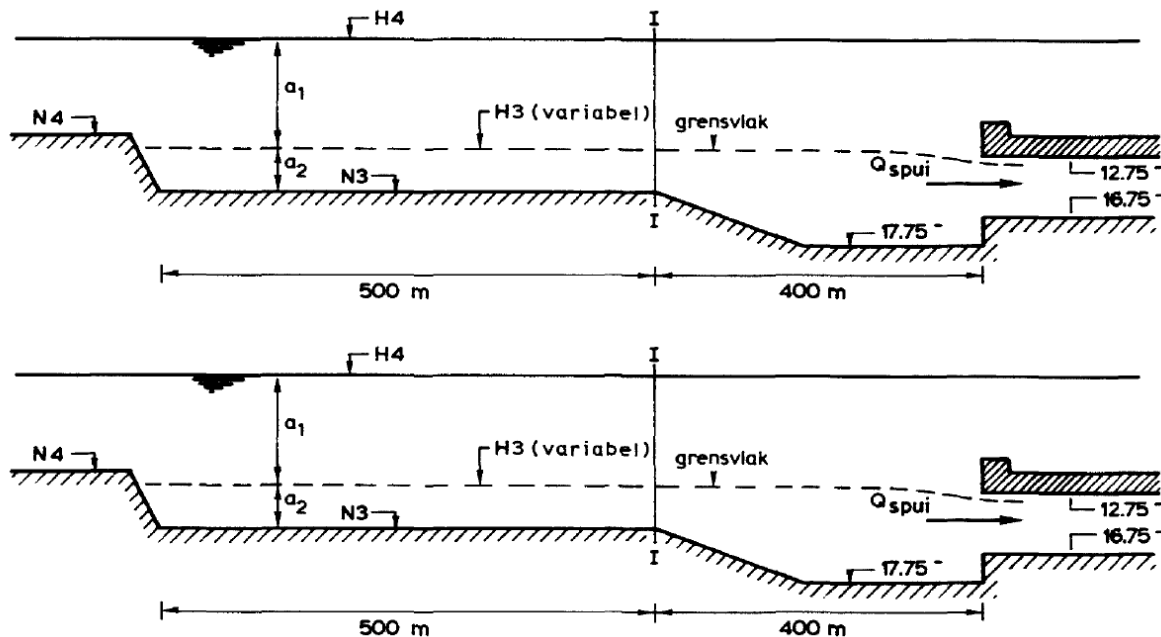
- Spuien via de riolen van de Westsluis (uitwisselingsspuien en continuspuien, zie §2.6);
- Spuien via de riolen en kleppen in de deuren van de Middensluis (tot 1 oktober 2021);
- Spuien via kleppen in de deuren van de sluiskolken rond laagwater, met scheepvaartstremming.

2.6. Verzilting

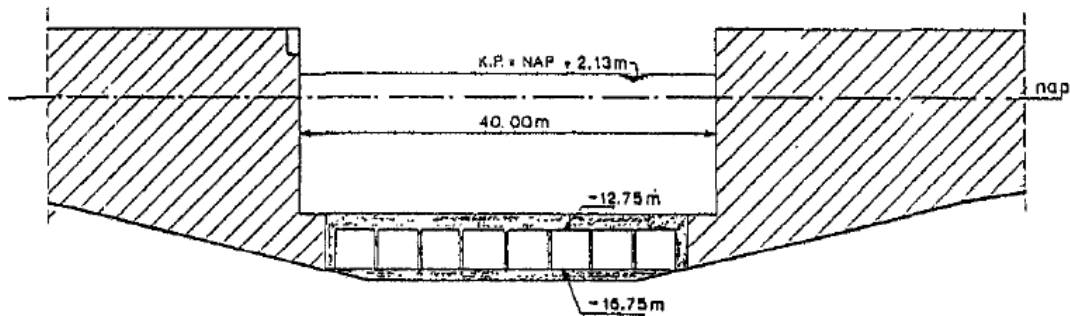
Voor chlorideconcentraties op het KGT gelden de volgende uitgangspunten (MER-rapport Water; Lievense CSO, 2015 en het Tracébesluit voor de Nieuwe Sluis):

- De doelstelling vanuit de Kaderrichtlijn Water (KRW) voor het KGT is dat de chlorideconcentratie tussen 300 en 3000 mg/l moet liggen, het bereik behorend bij het Goed Ecologisch Potentieel (GEP). De doelstelling geldt voor de zomergemiddelde chlorideconcentratie, gemiddeld over meerdere zomers (1 april tot 1 oktober), 1,8 meter onder het wateroppervlak bij meetpunt Sas van Gent (KGTS) (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, 2012). De doelstelling is ook verankerd in het Tracébesluit voor de Nieuwe Sluis, waardoor deze extra gewicht heeft gekregen.
- Wijzigingsverdrag 1985, Artikel 32. De beide regeringen zullen elk op haar gebied de nodige maatregelen treffen om te bewerkstelligen dat het zoutbezwaar beperkt blijft.

Om verzilting tegen te gaan, is een zoutwaterput aangelegd bij de Westsluis (zie Figuur 2-3). Zout water wat via de Westsluis binnenstroomt, accumuleert eerst in deze put. De entree van de omloopriolen van de Westsluis bevindt zich bij de bodem van de zoutwaterput (zie Figuur 2-4). Als er water gespuid wordt via de omloopriolen, wordt het relatief zoute water uit de zoutwaterput als eerste afgevoerd. Via deze mitigerende maatregel wordt de netto zoutindringing via de Westsluis beperkt.



Figuur 2-3: Doorsnede van de zoutvang bij de Westsluis (Waterloopkundig Laboratorium, 1988)

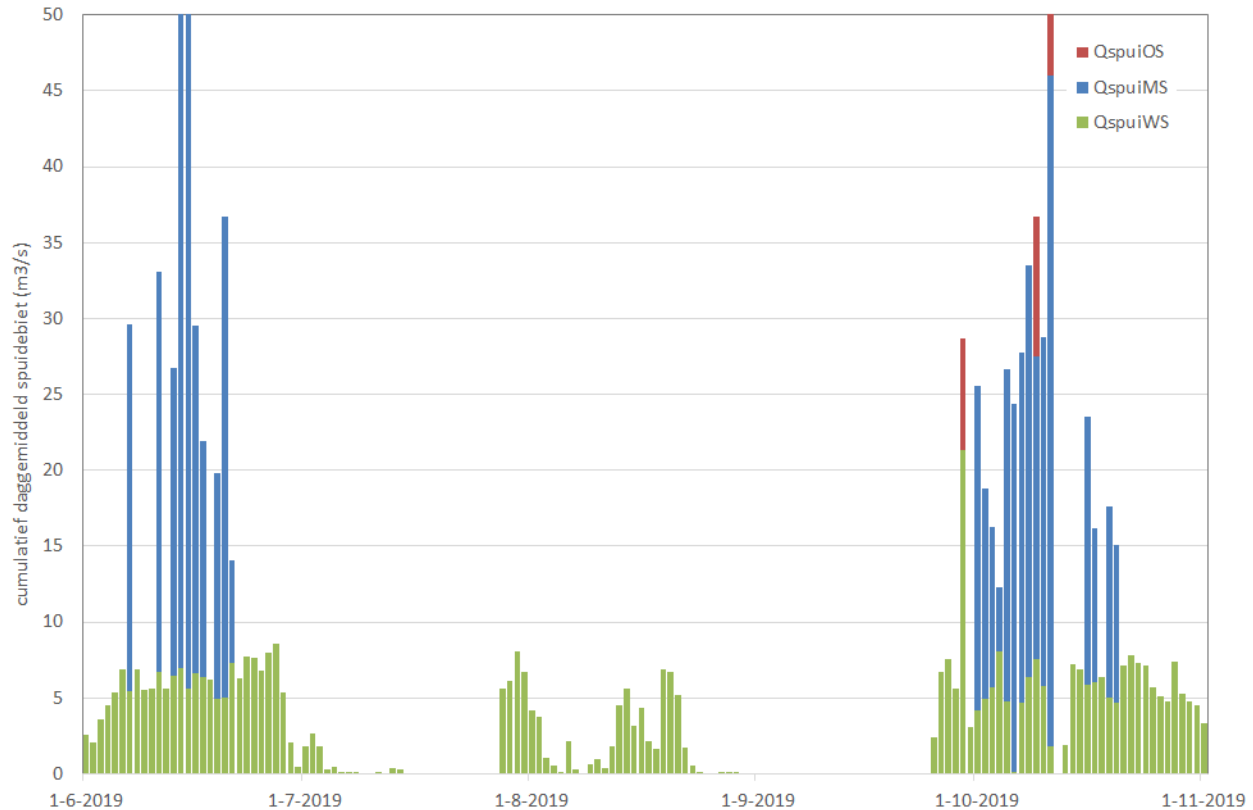


Figuur 2-4: Aanzicht binnenhoofd van de Westsluis met de entree van het omloopriool

Spuien via de Westsluis kan op drie manieren: uitwisselingsspuien, continuspuien of oppervlaktewater-spuien. De principes van uitwisselingsspuien en continuspuien zijn weergegeven in Figuur 2-6 en staan gezamenlijk ook wel bekend als het "systeem Terneuzen" (Rijkswaterstaat, 1984).

Bij uitwisselingsspuien worden de omloopriolen geopend gedurende de tijd dat de binnendeuren van de sluiskolk open staan. Het zoute water wat dan vanuit de sluiskolk richting het kanaal stroomt, wordt dan zoveel mogelijk weer direct afgevoerd richting de Westerschelde. Om dit mogelijk te maken, zijn de riolen van de Westsluis groot gedimensioneerd (zie Figuur 2-4). Hiervoor is extra water benodigd, bovenop het schutverlies. In principe moet uitwisselingsspuien verhinderen dat het zoute water in de zoutwaterput terecht komt. Het wordt direct weer afgevoerd bij de bron. In tijden van droogte is er echter vaak te weinig water beschikbaar om te kunnen uitwisselingsspuien (VNSC, 2015).

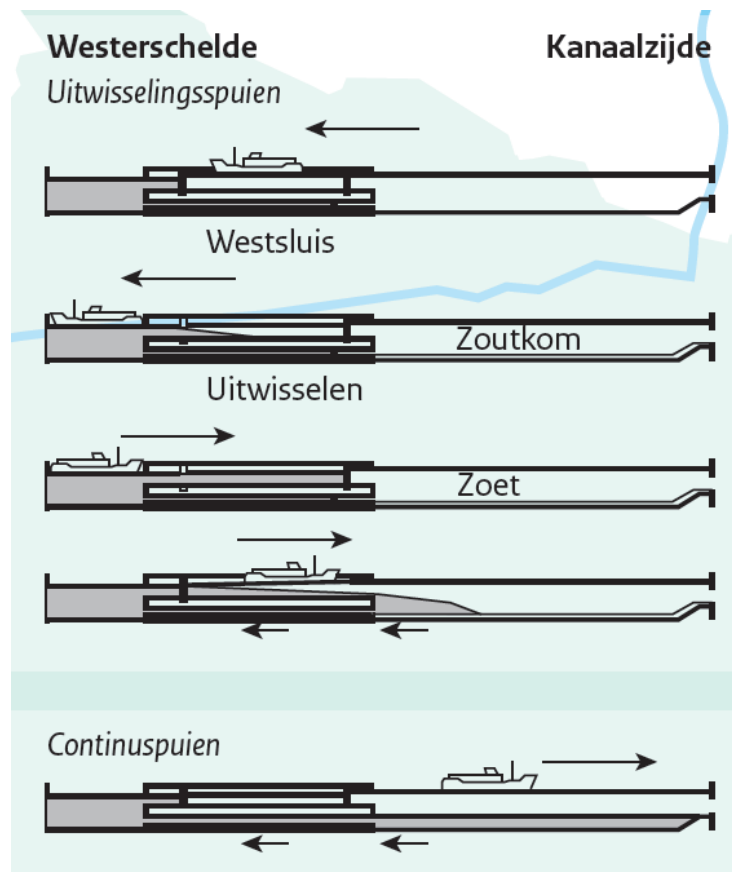
In bijlage 2 bij het MER deelrapport Water (technische onderbouwing spuien en schutverlies) werd gesteld dat stremvrij uitwisselingsspuien mogelijk was tot momentaan 35 m³/s. Aangezien dit getijdeafhankelijk is, leidt dit gemiddeld over de dag tot een stremvrije spuicapaciteit van 9,65 m³/s. De bovengrens voor uitwisselingsspuien is in juni 2021 verhoogd van 35 naar 80 m³/s tijdens spuien, omdat uit onderzoek en tests bleek dat de scheepvaart hier geen hinder van ondervond (informatie Rijkswaterstaat VWM). In dezelfde verhouding resulteert dit in 22 m³/s daggemiddeld.



Figuur 2-5: Verdeling van het spuidebiet over Westsluis (WS), Middensluis (MS) en Oostsluis (OS); periode in 2019

Zout water wat niet direct wordt afgevoerd via uitwisselingsspuien wordt tijdelijk opgeslagen in de zoutwaterput. Door het spuien van water via een spuiriol dat op de zoutvang is aangesloten, wordt het niveau van het zoute water in de zoutvang beheerd. Deze spuimethode wordt door de beheerder "continuspuien" genoemd (Rijkswaterstaat, 1984).

In extreme gevallen kan ook oppervlaktewater worden gespuid via de omloopriolen van de Westsluis, via de omloopriolen of sluisdeuren van de Middensluis of via de deuren van de Oostsluis. De sluizen zijn gestremd als gebruik gemaakt wordt van deze mogelijkheid.



Figuur 2-6: Principes van uitwisselingsspuien en continuspuien (Rijkswaterstaat, 2020)

2.7. Wijzigingen door Nieuwe Sluis Terneuzen

Sinds 1 oktober 2021 is de Middensluis niet meer in gebruik als schutsluis. In de loop van 2023 zal volgens planning de Nieuwe Sluis Terneuzen (NST) in gebruik worden genomen. De Middensluis is tot in de loop van 2022 nog wel beschikbaar om te spuien. Pas als de omloopriolen van de Nieuwe Sluis gereed zijn, wordt ook de spuimogelijkheid via de Middensluis verwijderd. Dit zal eerder zijn dan de ingebruikname van de Nieuwe Sluis voor het schutten.

De uiteindelijk gekozen variant heeft de volgende eigenschappen (VNSC, 2015):

- Dimensies 427x55x16,44 m (zie ook Tabel 2-2);
- Extra spuien via het omloopriool van de Nieuwe Sluis, dus geen extra spuimiddel;
- Peilbeheersing via stremmingen;
- Geen zoet-zoutscheiding, alleen sponningen voor eventueel toekomstig bellenscherm;
- Aanbrengen van een zoutdrempel aan de kanaalzijde van NAP-16,5 tot -14,1 m;
- Aanbrengen van een fundament voor een eventuele toekomstige extra drempel tot NAP-11,8 m.



Figuur 2-7: Schematische weergave van Nieuwe Sluis en zoutdrempel (bron: nieuwesluissterneuzen.eu)

Bij overschrijding van het stremvrije spuidebiet via uitwisselingsspuien moeten sluisen worden gestremd om extra te kunnen spuien. Voorheen was daarbij de volgorde: eerst de Middensluis, dan de Oostsluis, dan de Westsluis (bijlage 2 bij het MER Deelrapport Water, technische onderbouwing spuien en schutverlies). Er wordt geen apart spuumiddel aangelegd, dus er wordt ook na aanleg van de Nieuwe Sluis alleen gespuid via de schutsluisen.

In tijden van wateroverschot voorziet de Nieuwe Sluis in voldoende extra spuicapaciteit om het wegvalen van de Middensluis te compenseren. In tijden van wateroverschot wordt de stremvolgorde: Westsluis, Oostsluis, Nieuwe Sluis. De volledige spuicapaciteit van een sluis wordt benut, voordat begonnen wordt met stremming van een volgende sluis. In tijden van watertekort wordt de stremmingsvolgorde: Nieuwe Sluis, Oostsluis, Westsluis. Ook in deze situatie wordt de capaciteit van de eerste sluis helemaal gebruikt voordat een tweede sluis bij-gestremd wordt (VNSC, 2015).

Als er voldoende zoet water beschikbaar is, kan uitwisselingsspuien en continuspuien bij de Westsluis worden ingezet voor de afvoer van zout. Naar verwachting kan vaker gebruik gemaakt worden van continuspuien, omdat de Westsluis minder intensief gebruikt zal worden na opening van de Nieuwe Sluis.

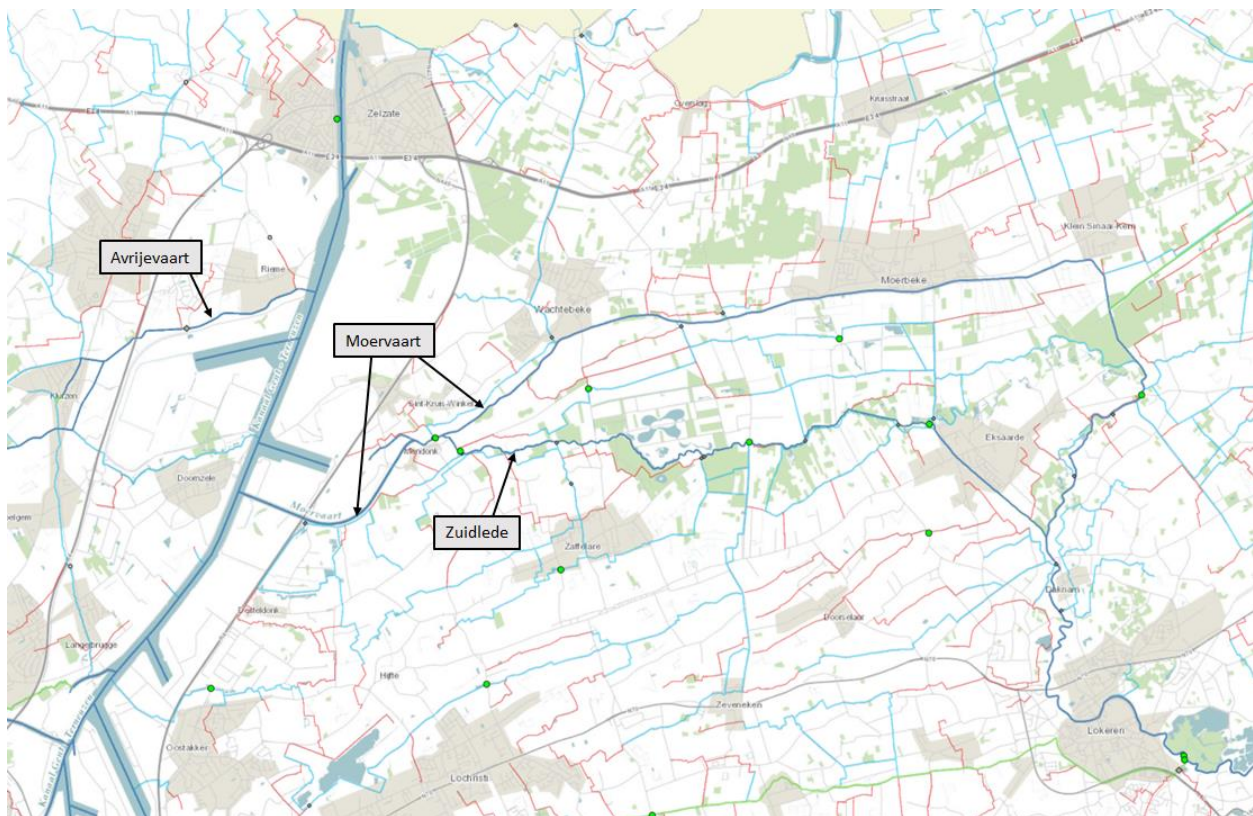
2.8. Zijtakken

In deze studie wordt aandacht gegeven aan de zijtakken Avrijevaart, Moervaart en Zuidlede. Figuur 2-8 laat zien waar deze zijtakken zich bevinden. Ze stromen alle drie uit op het Vlaamse deel van het KGT.

- De **Avrijevaart** staat slechts over ongeveer 2 km in open verbinding met het KGT. Via het Spiedamgemaal wordt overtollig water uit de Avrijevaart en de Burggravenstroom overgepompt naar het Kanaal Gent-Terneuzen ter hoogte van Rieme, net ten noorden van het Kluizendok. Benedenstrooms van het Spiedamgemaal kan verzilting optreden. In dit gebied is recent veel werk verzet om een ecologische verbetering te realiseren (oeverzwaluwwallen, rietaanplant, flauwe oevers).
- De **Moervaart** stroomt uit op het KGT ten zuiden van het Rodenhuizedok. De Moervaart stroomt vanuit Lokeren via Moerbeke en Wachtebeke naar Mendonk, waar de Zuidlede en de Moervaart samenvloeien. Diverse gemalen wateren af op de Moervaart. In tijden van droogte vinden er bij

Moerbeke onttrekkingen (watercaptaties) plaats voor agrarisch gebruik¹. Als het zout te ver de Moervaart op dreigt te gaan, kan de Vlaamse Waterweg een captatieverbod instellen. Op de Moervaart vindt enige scheepvaart plaats. Medio 2016 is er bij Lokeren een pompstation met vispassage in gebruik genomen, wat water vanuit de Moervaart richting de Benedendurme pompt. Hierdoor is de afvoer op de Moervaart (gemeten bij Sinaai) vanaf 2016 iets lager geworden.

- De **Zuidlede** bestaat uit een hoog en een laag pand. Het laag pand bevindt zich bovenstrooms van Eksaarde, het hoog pand benedenstrooms. Tussen beide panden bevindt zich een aarden dam. Er kan water worden gepompt vanuit het laag pand naar het hoog pand (via de Olentgracht). Verder pompen de omliggende watersystemen op diverse plaatsen water richting de Zuidlede. Vanwege het hoge peil in de Zuidlede, vindt er geen gravitaire afwatering plaats. Benedenstrooms, bij Mendonk, bevindt zich een stuw, maar deze is al ongeveer 10 jaar niet meer operationeel. In tijden van droogte wordt door beide panden een minimale doorspoeling gerealiseerd door aan de bovenstroomse zijde water uit de Moervaart in te laten. Als de afvoer door de Zuidlede erg laag is, kan tijdelijk omkering van de stroming optreden, waarbij de beheerder van VMM vermoedt dat dit de reactie is op waterstandsfluctuaties op het KGT.



Figuur 2-8: Locatie van de Avrijevaart, Moervaart en Zuidlede

¹ <https://www.vlaamsewaterweg.be/watercaptaties>

3. Berekende scenario's

3.1. Inleiding

De oppervlaktewatermodellering zal worden ingevuld aan de hand van scenario's. Een scenario is opgebouwd uit drie hoofdcomponenten: de bovenafvoer, de scheepvaartintensiteit en het beheer van de schutsluizen en spuimiddelen bij Terneuzen (kortweg aangeduid als 'schutstrategie'). Voor de bovenafvoer beschouwen we in §3.2 de periode 2010-2021 en vergelijken we deze met de getallen uit de MER. Voor de scheepvaartintensiteit maken we in §3.3 een keuze uit de beschikbare scheepvaartprognoses en verkeerssimulaties uit de MER en vergelijken we deze met de actuele scheepvaartintensiteiten. Verder gaan we in §3.4 in op peilhandhaving via schutten en spuien, gegeven een combinatie van bovenafvoer en scheepvaartintensiteit. Al deze elementen worden verwerkt in door te rekenen scenario's in §3.5.

3.2. Bovenafvoer

3.2.1. Aanpak MER Nieuwe Sluis Terneuzen

In het Deelrapport Water van de MER Nieuwe Sluis Terneuzen uit 2015 is op basis van benedenstroomse debieten tussen 2000-2012 een aantal karakteristieke waarden gedefinieerd voor het zoetwaterdebiet op het Kanaal Gent-Terneuzen:

1. Droge zomer 9,5 m³/s (debiet van de 2 zomers met de hoogste gemiddelde chlorideconcentratie)
2. Droge winter 25,8 m³/s (debiet van de 2 winters met de hoogste gemiddelde chlorideconcentratie)
3. Twee maanden laag debiet 8,0 m³/s (laagste 2-maandsgemiddelde waarde van het debiet)
4. Gemiddelde zomer 16,6 m³/s (gemiddeld zomerdebiet)
5. Gemiddelde winter 31,4 m³/s (gemiddeld winterdebiet)

De zomer is het halfjaar, gecentreerd rond de zomer (21 juni tot 21 september met anderhalve maand daarvoor en daarna), ofwel van 6 mei tot en met 5 november. Het winter is het halfjaar, gecentreerd rond de winter, ofwel van 6 november tot en met 5 mei.

Voor het Deelrapport Water van de MER zijn destijds twee verschillende databronnen geanalyseerd: het bovenstroomse en het benedenstroomse debiet. Het bovenstroomse debiet werd bepaald uit bassin neerslag-afvoer simulaties voor de verschillende takken die vanuit Gent en de Moervaart op het Kanaal Gent-Terneuzen uitkomen. Het benedenstroomse debiet werd afgeleid op basis van reconstructies van de spui- en schutdebieten door Rijkswaterstaat. Over 2000-2010 was het benedenstroomse gebied gemiddeld ongeveer 5 m³/s lager dan bovenstrooms en het minimale tweemaandsgemiddelde ongeveer 2 m³/s lager dan bovenstrooms. Het verschil schreef men toe aan simulatieonnauwkeurigheden in het neerslag-afvoermodel. Voor het simuleren van de verziltingsscenario's op het Kanaal Gent-Terneuzen werden in de MER de benedenstroomse debieten als leidend gezien, omdat dit lagere debiet resulteerde in conservatievere (hogere) chloridegehaltes.

Om inspeleeffecten te voorkomen, duurde elke simulatie 1 jaar. De zomersimulaties begonnen met 6 maanden winter en eindigden met 6 maanden zomer. De wintersimulaties begonnen met 6 maanden zomer en eindigden met 6 maanden winter. De simulaties met 2 maanden laag debiet begonnen met 6 maanden winter, gevolgd door 4 maanden zomer en dan 2 maanden laag debiet.

Het MER Deelrapport Water beschrijft niet expliciet welke debieten gebruikt zijn voor de inspeelperiode (de eerste 6 maanden). Onze veronderstelling is dat dit altijd de gemiddelde waarde betreft, dus dat bijvoorbeeld een zomersimulatie begon met 6 maanden gemiddelde winter en eindigde met een bepaald scenario voor de zomerafvoer.

Voor de MER modelberekeningen werd het zichtjaar 2030 gebruikt. Hiervoor hanteerde men de volgende uitgangspunten op basis van het KNMI W+ 2050 klimaatscenario met +2°C in 2050:

- Gebruik van 2050 in plaats van zichtjaar 2030 is een conservatieve benadering doordat de klimaatverandering toeneemt over de tijd. Er is geen klimaatscenario 2030 beschikbaar.
- Voor de situatie met klimaatveranderingen (W+ 2050) werd de bovenafvoer op het KGT aangepast ten opzichte van de karakteristieke waarden voor 2000-2012. Het zomerdebiet werd verlaagd met 35%, het winterdebiet werd verhoogd met 2% en het 2-maanden-laag debiet werd verlaagd met 45%. Deze aanpassingen zijn gebaseerd op de veranderingen van het Maasdebiet in het KNMI W+ 2050 klimaatscenario (Deltares, 2013).
- Maximaal 35 cm zeespiegelstijging volgens KNMI W+2050 is vertaald in een hogere zoutlast vanuit de Westerschelde richting het KGT, berekend met aanvullende FINEL3D simulaties.

Een overzicht van de debieten die zijn gehanteerd in de MER:

1. Droge zomer 9,5 m³/s
2. Droge winter 25,8 m³/s
3. Twee maanden laag debiet 8,0 m³/s
4. Gemiddelde zomer 16,6 m³/s
5. Gemiddelde winter 31,4 m³/s
6. W+ 2050 droge zomer (9,5 m³/s -35%) → 6,2 m³/s
7. W+ 2050 twee maanden laag (8,0 m³/s -45%) → 4,4 m³/s
8. W+ 2050 gemiddelde winter (31,4 m³/s +2%) → 32,0 m³/s

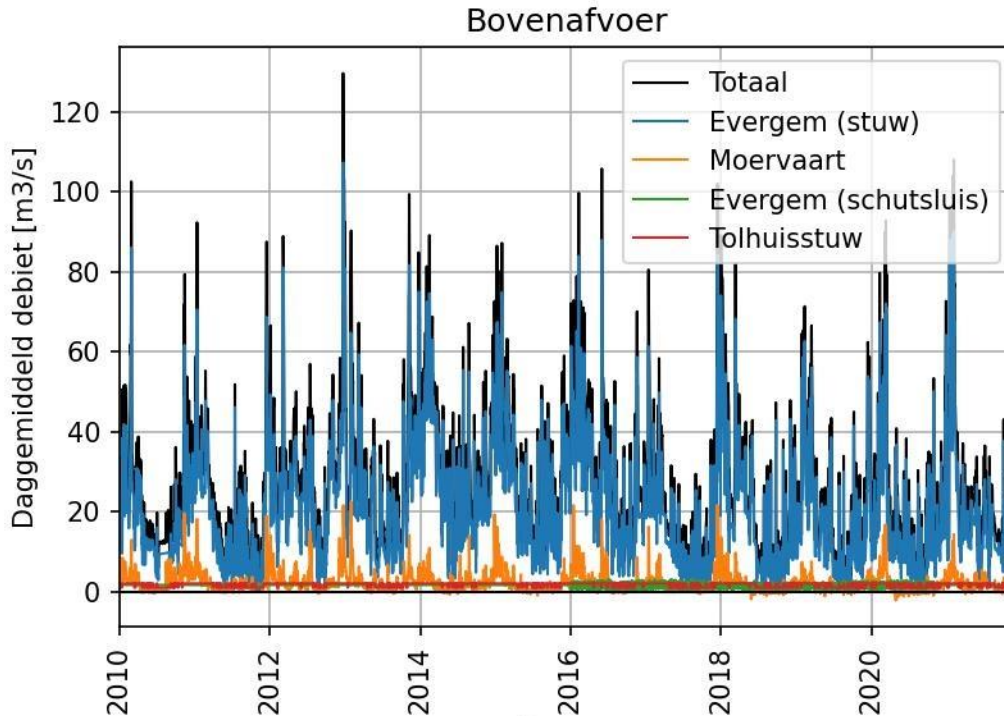
3.2.2. Analyse bovenafvoer 2010-2021

Om de scenario's voor de bovenafvoer in de context te plaatsen van de recente droge jaren zijn de begrippen droge zomer en droge winter opnieuw gekarakteriseerd op basis van gemeten afvoeren in de periode 2010-2021. Hiervoor zijn dezelfde definities gebruikt voor de karakteristieke waarden als berekend voor de MER op basis van 2000-2012.

Om het bovenstroomse debiet te bepalen zijn de debieten bij Evergem (stuw), Evergem (schutsluis), Mendonk (Moervaart) en de Tolhuisstuw bij elkaar opgeteld voor de periode 2010 t/m 2021 (zie Figuur 3-1). Voor Evergem (schutsluis) was alleen data voor 2016 t/m 2020 beschikbaar. Voor 2010-2015 en 2021 is de gemiddelde waarde van 1,6 m³/s als constante waarde aangehouden. Voor de afvoer vanuit de binnenstad van Gent via (onder andere) de Tolhuisstuw was geen afvoerdata beschikbaar. Daarvoor

was alleen informatie beschikbaar dat deze onder normale omstandigheden ongeveer $2 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt (Rijkswaterstaat, 2020). Deze waarde van $2 \text{ m}^3/\text{s}$ is een inschatting gebaseerd op communicatie met de beheerder en afgestemd met een lopende studie van de KU Leuven. Op basis van expert judgement is de keuze gemaakt om voor zeer droge perioden een waarde van $1 \text{ m}^3/\text{s}$ aan te houden voor de Tolhuisstuw. Voor de Avrijevaart zijn geen gegevens bekend. Er is een minimale afvoer van $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ aangehouden.

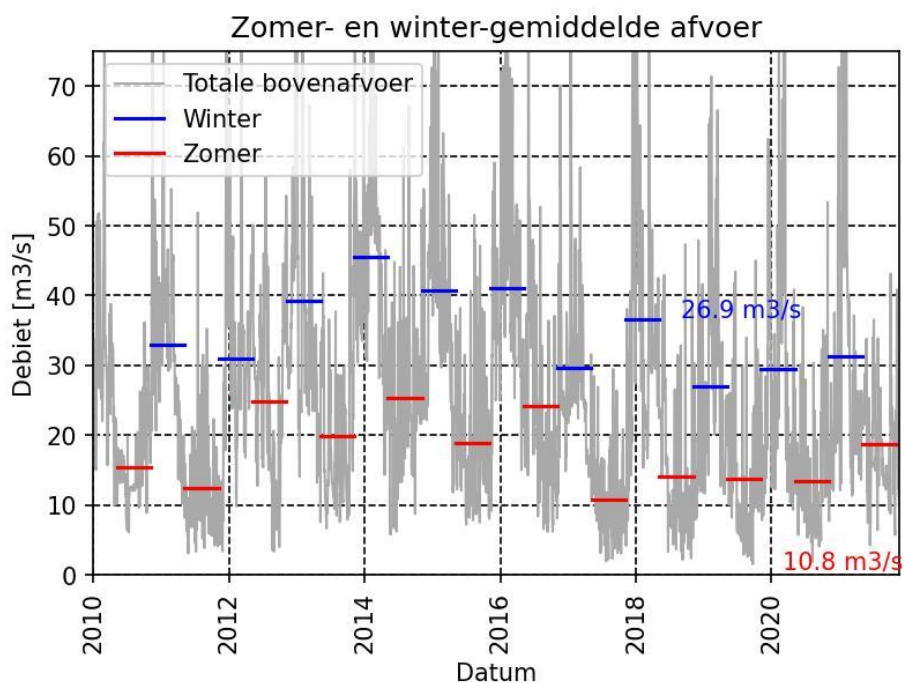
Opmerking: in tegenstelling tot het MER Deelrapport Water worden hier de bovenstroomse en niet de benedenstroomse debieten gebruikt, omdat er voor de schut- en spuidebieten bij Terneuzen alleen gereconstrueerde waarden beschikbaar zijn die lopen tot en met 2019. Dit maakt de resultaten minder eenvoudig te vergelijken. De beschikbare data voor de bovenafvoer voor 2010-2021 betreft daadwerkelijk opgetreden afvoeren bij Evergem (stuw) en Mendonk (Moervaart) op basis van metingen. Voor Evergem (schutsluis) is berekende data voor 2016-2020 meegenomen. Bij veel eerdere studies wordt enkel de stuwdata en niet het schutdebiet bij Evergem meegenomen, wat tot een onderschatting van de bovenstroomse debieten leidt. Vanwege het gebruik van meetdata voor de bovenafvoer is er geen correctie van $-2 \text{ m}^3/\text{s}$ nodig, zoals deze werd toegepast in de MER vanwege het verschil tussen de bovenstroomse debieten (gemodelleerd) en benedenstroomse debieten (gemeten/gereconstrueerd) in de periode 2010-2021. Het ging in de MER om een correctie voor simulatieonnauwkeurigheden in het neerslag-afvoermodel waarmee de bovenstroomse debieten werden berekend. Dat is in de huidige analyse niet aan de orde.



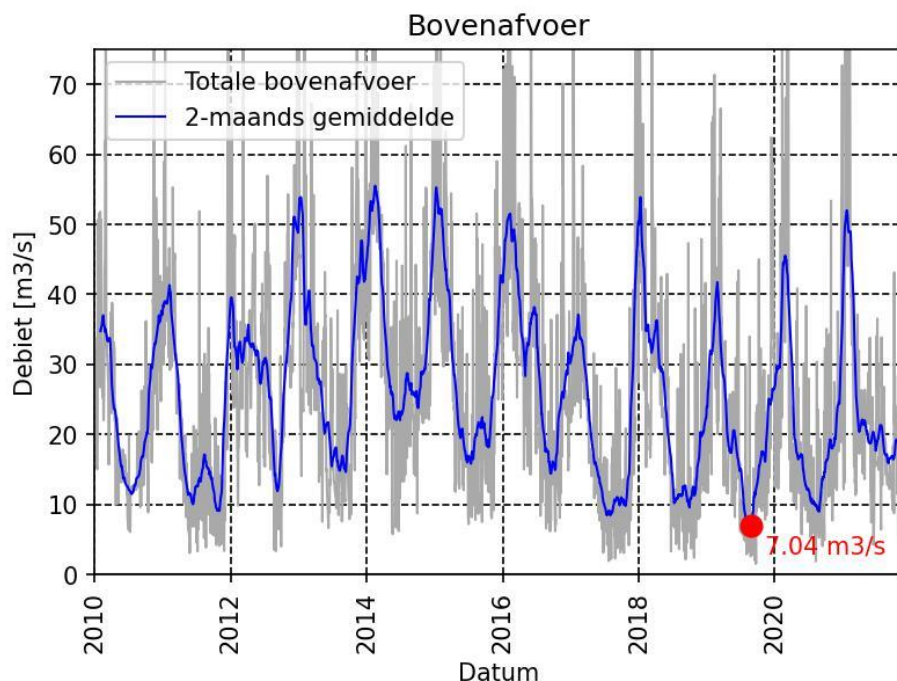
Figuur 3-1: Totale bovenafvoer voor de periode 2010-2021 als sommatie van de afvoer ter hoogte van Evergem (Gent), de Tolhuisstuw (Gent) en Mendonk (aan de Moervaart).

Op basis van deze bovenstroomse debieten zijn de begrippen droge zomer, droge winter, twee maanden laag debiet, gemiddelde zomer en gemiddelde winter opnieuw gekarakteriseerd voor de periode 2010-2021. Hiervoor is het winterhalfjaar gedefinieerd als de periode van 6 november tot en met 5 mei (de winter met 1,5 maand daarvoor en daarna) en het zomerhalfjaar als de periode van 6 mei tot en met 5 november. Hieruit volgen de volgende waarden voor de periode 2010-2021:

1. Droge zomer 11,6 m³/s (gemiddelde zomerafvoer voor de zomers met de laagste debieten (2017 gevolgd door 2011, zie Figuur 3-2);
2. Droge winter 28,2 m³/s (gemiddelde winterafvoer voor de twee winters met de laagste debieten (2018-2019 en 2019-2020, zie Figuur 3-2);
3. Twee maanden laag debiet 7,0 m³/s (laagste tweemaandsgemiddelde debiet in 2019, zie Figuur 3-3)
4. Gemiddelde zomer 17,7 m³/s (gemiddelde zomerdebiet in meetperiode 2010-2021 - Figuur 3-2)
5. Gemiddelde winter 34,9 m³/s (gemiddelde winterdebiet in meetperiode 2010-2021 - Figuur 3-2)



Figuur 3-2: De gemiddelde winter- en gemiddelde zomerafvoer voor de periode 2010-2021. De weergegeven getallen zijn de laagste seizoensgemiddelde waarden in de reeks.



Figuur 3-3: Het tweemaandsgemiddelde debiet voor de periode 2010-2021 met het laagste tweemaandsgemiddelde debiet (in 2019) aangegeven met een rode marker.

Ter vergelijking toont Tabel 3-1 respectievelijk de karakteristieke debieten voor de periode 2000-2012 (MER Deelrapport Water), de periode 2010-2021, het W+ klimaatscenario uit de MER en de herdefinitie daarvan op basis van 2010-2021. De seizoensgemiddelde debieten per jaar zijn opgenomen in Tabel 3-2.

Tabel 3-1: Karakteristieke debieten voor de periode 2000-2012 (MER Deelrapport Water), de periode 2000-2021, het W+ klimaatscenario en de te gebruiken waarden voor de aanvullende scenario's.

	MER 2000-2012	Nieuw 2010-2021	W+ 2050 MER	W+ 2050 nieuw
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Droge zomer	9,5	11,6	6,2 (-35%)	7,5 (-35%)
Droge winter	25,8	28,2		
2-mnd laag	8,0	7,0	4,4 (-45%)	3,9 (-45%)
Gem. zomer	16,6	17,7		
Gem. winter	31,4	34,9	32,0 (+2%)	35,6 (+2%)

Tabel 3-2: Seizoensgemiddelde bovenafvoeren (totaal van Evergem stuw, Evergem sluis, Moervaart bij Mendonk en Tolhuisstuw).

Zomer	Q gem	Winter	Q gem
	m ³ /s		m ³ /s
2010	15,5	2010-2011	32,9
2011	12,4	2011-2012	31,0
2012	24,9	2012-2013	39,2
2013	19,9	2013-2014	45,5
2014	25,3	2014-2015	40,8
2015	19,0	2015-2016	41,1
2016	24,2	2016-2017	29,6
2017	10,8	2017-2018	36,6
2018	14,1	2018-2019	26,9
2019	13,7	2019-2020	29,5
2020	13,4	2020-2021	31,3
2021	18,7		

Het valt op dat de definitie van een droge zomer op basis van 2010-2021 minder laag uitvalt dan op basis van 2000-2012. Het 2-maanden-laag debiet uit 2019 is wel lager dan de droogste 2 maanden uit 2000-2012. De gemiddelde zomers, gemiddelde winters en droge winters zijn allemaal iets natter. De vergelijking wordt beïnvloed door het verschil in gebruikte databronnen: gereconstrueerde debieten bij Terneuzen in getallen uit de MER, gemeten bovenafvoeren bij Gent en Moervaart in de nieuwe getallen. Een 1-op-1 vergelijking is daarom niet mogelijk. Verder geldt dat de afvoer op het KGT grote delen van het jaar meer een beheerkeuze is dan een natuurlijk fenomeen.

3.2.3. Scenario's voor de bovenafvoer

Deze paragraaf beschrijft welke scenario's voor de bovenafvoer worden doorgerekend in de oppervlaktewatermodellering.

Lengte van simulaties

In de Nota Ruimtelijke Verdeling (Antea, 2021) is het vermoeden uitgesproken dat een opeenvolging van droge zomers kan leiden tot een gestage toename van chlorideconcentraties op het kanaal. Om te kunnen onderzoeken of dit vermoeden juist is, is het van belang om niet alleen scenario's van één jaar lang te definiëren, zoals voor de MER is gedaan, maar ook een opeenvolging van droge zomers te beschouwen. Alle simulaties hebben daarom een lengte van 3 jaar (winter, zomer, winter, zomer, winter, zomer). De focus in de analyse ligt op het laatste jaar. Het effect van de beginsituatie in het model is in dit laatste jaar niet meer merkbaar, de chlorideconcentraties zijn in het tweede en derde jaar namelijk nagenoeg gelijk.

Type randvoorwaarden

In de SOBEK-berekeningen worden deze bovenafvoeren gecombineerd met een debietrandvoorwaarde bij Terneuzen voor de beschrijving van de schutverliezen en spuidebieten. Het kanaalpeil kan dan vrij variëren, afhankelijk van het verschil tussen bovenafvoer, schutverliezen en spuidebieten. Dit is een

andere aanpak dan in de SOBEK-berekeningen voor de MER is gevolgd, waarbij een waterstandsrandvoorwaarde (gelijk aan streefpeil) is gehanteerd bij Terneuzen. Bij de MER zijn de berekeningen van peilbeheer en scheepvaarstremmingen daarmee effectief losgekoppeld van de berekeningen van zoutindringing. In de voorliggende studie zijn bovenafvoer, peilbeheer, scheepvaartstremmingen en zoutindringing integraal meegenomen in de SOBEK-berekeningen.

Debietfluctuaties

In de berekeningen voor de MER voor het aspect zoutindringing werd gewerkt met een constante gemiddelde bovenafvoer. Omdat we in de huidige studie integraal rekenen aan peilfluctuaties, scheepvaartstremmingen en zoutindringing is het van belang om niet alleen te werken met een gemiddelde bovenafvoer, maar dat ook de fluctuaties in de bovenafvoer worden meegenomen. Bij een zeer lage bovenafvoer kan het peilbeheer namelijk al binnen een tijdsbestek van dagen tot weken problematisch worden. Om die reden worden werkelijk opgetreden bovenafvoeren uit bepaalde winters en zomers met elkaar gecombineerd in de scenarioberekeningen. Op die manier is een realistische debietfluctuatie gegarandeerd. Er wordt een selectie gemaakt uit de jaren 2016-2021, omdat voor die periode schutgegevens bij Evergem beschikbaar zijn. Waar nodig worden alle debieten geschaald met een bepaalde vermenigvuldigingsfactor om het effect van klimaatverandering mee te nemen.

Waterstand en zoutconcentratie Westerschelde

De waterstand en chlorideconcentratie op de Westerschelde zijn afkomstig van de metingen bij Terneuzen in de geselecteerde winters en zomers.

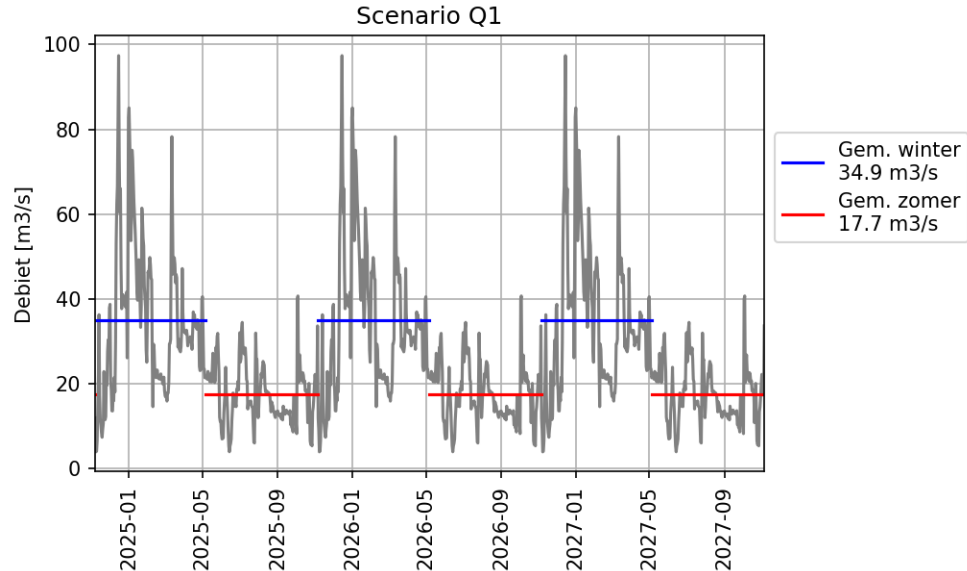
Definitie scenario's

Er worden 3 scenario's voor de bovenafvoer (aangeduid met een Q) doorgerekend in de oppervlakte-modellering. Daarbij is de bovenafvoer uit een jaar met gemiddelde afvoer dichtbij de gewenste gemiddelde afvoer geselecteerd en geschaald met een correctiefactor om op de gewenste gemiddelde afvoer uit Tabel 3-1 te komen. Alle afvoerscenario's zijn in de tijd geplaatst in de fictieve periode 6 november 2024 tot 6 november 2027.

Scenario Q1

Een gemiddeld scenario: een opeenvolging van 3 gemiddelde winters en 3 gemiddelde zomers.

- Gemiddelde winters: winter van 2017-2018, correctiefactor -4,5%.
- Gemiddelde zomers: zomer van 2021, correctiefactor -5,6%.

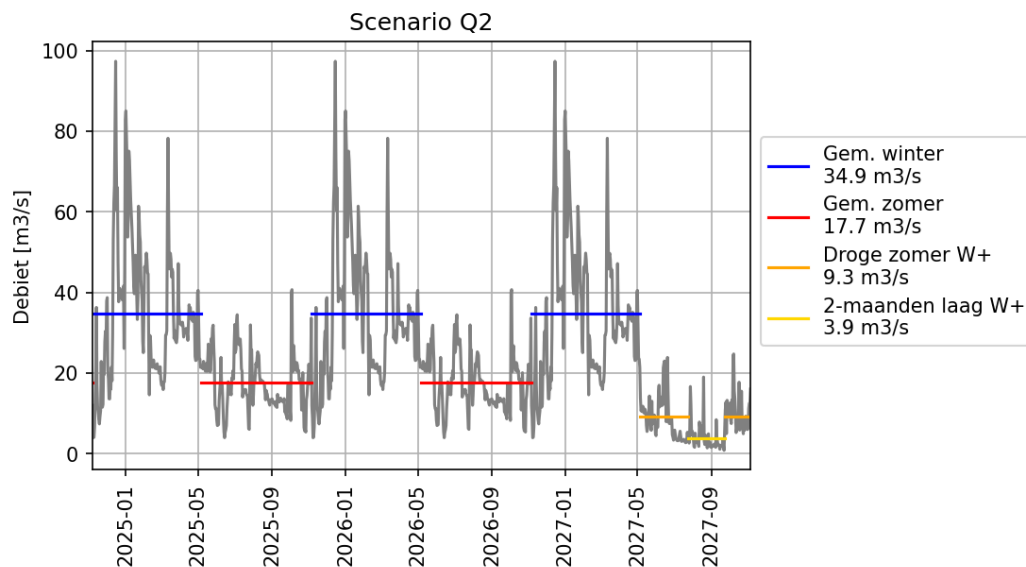


Figuur 3-4: Tijdreeks met totale bovenafvoer in scenario Q1

Scenario Q2

Een scenario met een extreem droge zomer, inclusief klimaatverandering

- Drie gemiddelde winters met daartussen twee gemiddelde zomers, overeenkomstig scenario Q1.
- Vervolgens een droge zomer met daarin '2 maanden laag': de zomer van 2019.
- De correctie van het debiet in de '2 maanden laag' periode: -45% (zie Tabel 3-1).
- De correctie van de andere 4 maanden van de droge zomer moet de hele zomer uit laten komen op 7,5 m³/s (Tabel 3-1). Hiervoor was een reductie van -45% nodig in de overige 4 maanden van 2019.

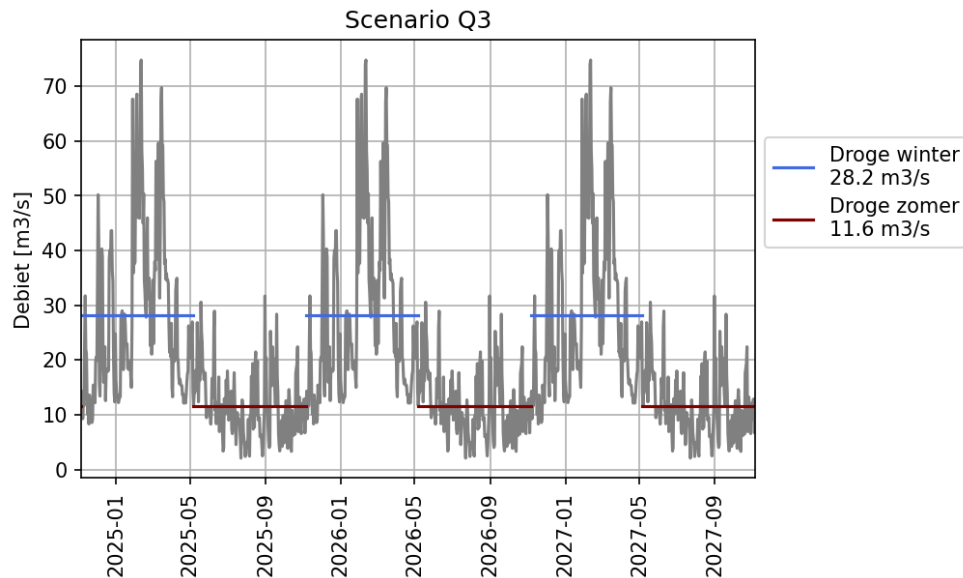


Figuur 3-5: Tijdreeks met totale bovenafvoer in scenario Q2

Scenario Q3

Een scenario met een opeenvolging van 3 droge winters en 3 droge zomers, zonder klimaatverandering

- Droge winters: winter van 2018-2019, correctiefactor +4,8%.
- Droge zomers: zomer van 2017, correctiefactor +7,5%.



Figuur 3-6: Tijdreeks met totale bovenafvoer in scenario Q3

3.3. Scheepvaart

3.3.1. Aanpak MER Nieuw Sluis Terneuzen 2015

In het deelrapport MER water (Lievense CSO, 2015) zijn drie verschillende vervoersscenario's doorge-rekend. Hierbij is het aantal schuttingen afhankelijk van de scheepvaartprognose. Met het model SIVAK is per vervoersscenario het aantal schuttingen berekend (MARIN, 2015). De drie vervoersscenario's die zijn meegenomen in Lievense CSO (2015) zijn:

1. Huidige situatie (scheepvaartaanbod 2012):

Dit scenario neemt het scheepvaartaanbod op basis van metingen in 2012 mee, en wordt gebruikt voor validatie en kalibratie. Hierbij wordt het sluisencomplex in de configuratie in 2012 meegenomen (met Middensluis, Oostsluis en Westsluis, dus zonder Nieuwe sluis). Dit scenario komt overeen met simulatie 1 uit MARIN (2015).

2. Projectalternatief (GE2030):

Scheepvaartaanbod conform het Global Economy 2030 scenario met aanleg Nieuwe Sluis. In dit scenario is het verkeersaanbod conform de prognose voor 2030 van het Global Economy scenario (GE2030), waarbij het verkeersaanbod op jaarbasis toeneemt met 33% ten opzichte van het scheepvaartaanbod in 2012. Hierbij wordt de toekomstige situatie gemodelleerd waarbij de Nieuwe Sluis de Middensluis vervangt. Daarbij wordt de buitenhaven verdiept, maar het bestaande kanaal niet aangepast. Dit scenario komt overeen met simulatie 17 uit MARIN (2015).

3. Autonome ontwikkeling (AO2030):

Scheepvaartaanbod in de autonome ontwikkeling bestaat uit GE2030 scheepvaart zonder aanleg van de Nieuwe Sluis. In dit scenario is het verkeersaanbod conform de prognose voor 2030 van het Global Economy scenario. Hierbij wordt de configuratie van het sluisencomplex in 2012 gebruikt zonder kanaalaanpassing en zonder nieuwe sluis. Dit scenario komt overeen met simulatie 9 uit MARIN (2015).

Voor de situatie met NST komt simulatie 17 uit MARIN (2015) overeen met het projectalternatief: de situatie in 2030 in combinatie met het "Global Economy" scenario voor 2030 (GE2030). Het economische scenario "Global Economy" (GE) resulteert in een relatief sterke toename van de goederenstroom (Royal Haskoning & Svašek, 2010). Behalve GE2030 is ook GE2020 doorgerekend met SIVAK: simulatie 16 uit MARIN (2015). In alle simulaties heeft MARIN (2015) het operationeel concept in termen van bijvoorbeeld schuttimes uitgevoerd zoals in 2012 gebruikelijk was. Voor het SIVAK-model houdt dit in dat er gesloten wordt als de kolk voor tenminste 20% gevuld is en er geen schepen in de buurt zijn.

Het aantal schepen en schuttimes in de SIVAK-simulaties 16 (GE2020) en 17 (GE2030) is weergegeven in Tabel 3-3. Opvallend is dat het aantal schuttimes licht afneemt in simulatie 17 (GE2030) ten opzichte van simulatie 16 (GE2020), terwijl het totaal aantal schepen wel aanzienlijk toeneemt. Bij een groter aantal schepen zijn de schutkolken voller, waardoor de totale schutprocedure meer tijd in beslag neemt en er minder schuttimes per dag kunnen worden uitgevoerd. Wel is het gevolg dat de wachttijden, passeertijden en deuropentijden oplopen (MARIN, 2015). Als het aantal schuttimes iets afneemt en de bezettingsgraad toeneemt, is de verwachting dat zowel het schutverlies als de zoutlast op het kanaal zullen afnemen van GE2020 naar GE2030. In GE2020 is mogelijk nog enige beperking van het aantal schuttimes mogelijk door meer geclusterd te schutten. Voor GE2030 is daarin minder ruimte voor optimalisatie, want de bezettingsgraad is al zeer hoog.

Tabel 3-3: Karakteristieken van de SIVAK-simulaties 16 (GE2020 inclusief NST) en 17 (GE2030 inclusief NST) uit MARIN (2015).

Simulatie SIVAK	Schuttimes per week				Schuttimes met schepen per week				Aantal schepen
	OS	MS	WS	NST	OS	MS	WS	NST	
16	280,1	-	208,7	167,1	228,9	-	182,5	150,3	74974
17	284,0	-	199,5	145,2	231,4	-	172,2	133,8	86358
	Schuttimes per dag								
16	20,0	-	14,9	11,9					
17	20,3	-	14,3	10,4					

3.3.2. Vergelijking met huidige situatie

Voor de situatie in 2021 (op basis van geanalyseerde data van Rijkswaterstaat, zie ook Tabel 2-3) geldt dat deze nog behoorlijk goed overeenkomt met de situatie uit 2012 (SIVAK-simulatie nummer 1 uit MARIN, 2015), zie Tabel 3-4. Het huidige aantal schuttimes ligt overwegend zelfs nog lager dan het aantal schuttimes uit 2012.

Om het aantal schuttingen uit GE2030 werkelijkheid te laten worden, zijn de volgende veranderingen in aantal schuttingen nodig in de periode tot 2030:

- Oostsluis: van 16,3 (2016-2021) naar 20,3 (GE2030) schuttingen per week (+25%)
- Westsluis: van 11,9 (2016-2021) naar 14,3 (GE2030) schuttingen per week (+20%)
- Van 9,4 schutcycli per dag via de Middensluis (2016-2020) naar 10,4 via de NST (GE2030)

Of dit aantal schuttingen ook werkelijkheid zal worden in 2030 hangt af van de economische ontwikkeling en de mate waarin de nieuwe sluis extra scheepvaartverkeer aantrekt. De huidige prognoses van North Sea Ports zijn dat de tonnages in 2030 ongeveer 5% hoger zullen liggen dan in de huidige situatie (2021): voor de zeevaart een toename van 71,5 naar 75 miljoen ton, voor de binnenvaart van 60 naar 65 miljoen ton (persoonlijke communicatie North Sea Ports). De vertaling van tonnages naar aantal schuttingen moet nog gemaakt worden, maar de prognoses uit de MER lijken een bovengrensbepending te zijn.

Tabel 3-4: Gemiddeld aantal schutcycli per dag voor de verschillende sluizen in de periode 2016-2020 in vergelijking met de SIVAK-simulatie nummer 1 uit MARIN (2015) met daarin het oude sluizencomplex uit 2012.

Jaar	totaal aantal schutcycli			schutcycli met schepen		
	Oostsluis	Middensluis	Westsluis	Oostsluis	Middensluis	Westsluis
2016	16,4	10,6	12,1	14,1	8,7	10,4
2017	17,1	11,3	12,0	14,9	9,4	10,6
2018	16,8	10,7	12,1	14,6	8,8	10,7
2019	15,9	8,3	11,9	14,0	6,4	10,9
2020	15,5	7,8	11,6	13,6	5,9	10,6
2021	15,8	8,0	11,4	13,9	6,2	10,1
Gemiddeld	16,3	9,4	11,9	14,2	7,6	10,6
SIVAK sim 1	19,0	9,7	13,8	16,2	7,3	12,5

3.3.3. Scenario's voor scheepvaart

In de doorgerkende scenario's zijn in alle scenario's de getallen van Projectalternatief met GE2030 aangehouden, SIVAK-simulatie nummer 17 uit Tabel 3-3.

3.4. Inzet schutsluizen en spuwmiddelen

In deze paragraaf wordt beschreven hoe het peilbeheer kan worden gehandhaafd, gegeven een bepaalde combinatie van bovenafvoer en scheepvaart. Dit is gebaseerd op een waterbalans met bovenafvoer, spuidebieten en schutverliezen als brontermen.

3.4.1. Berekening schutverlies

Voor het berekenen van daggemiddelde schutverliezen behorend bij het projectalternatief uit de MER met GE2030 zijn de volgende getallen aangehouden:

- Kanaalpeil: NAP+2,10 m (TAW+4,45 m);
- Gemiddelde waterstand Westerschelde: NAP+0,13 m (2016-2021, meetdata station Terneuzen);
- Gemiddelde schutwaterstand gelijk aan waterstand Westerschelde, behalve voor de Middensluis, waar deze gemiddeld NAP+1,13 m is (gemiddelde waterstand op schuttijdstoppen);
- Gemiddeld peilverschil: 0,97 m (Middensluis) of 1,97 m (andere sluizen);
- Dimensies sluizen conform Tabel 2-2, waarbij de diepte t.o.v. Kanaalpeil is gedefinieerd;
- De schutschijf is het peilverschil vermenigvuldigd met het kolkoppervlak;
- Aantallen schutcycli zijn gebaseerd op de getallen voor de SIVAK-simulaties uit Tabel 3-3 (schuttingen per week delen door 14 voor het aantal volledige schutcycli per dag);
- Schutverlies/dag is volume schutschijf vermenigvuldigd met het aantal schutcycli/dag;
- De Middensluis wordt standaard niet gebruikt rondom laag water en de overige sluizen worden de hele dag door gebruikt tenzij er gestremd wordt.

Een voorbeeld van de hierboven beschreven berekening van het schutverlies is te vinden in Tabel 3-5. Hiervoor is SIVAK-simulatie 17 (GE2030) uit Tabel 3-3 gebruikt, evenals in VNSC (2015). Dit resulteert in een totaal daggemiddeld schutverlies voor alle sluizen van 12,2 m³/s in het geval van scenario GE2030. Voor GE2020 komt dezelfde berekening uit op 13,2 m³/s.

Tabel 3-5: Berekening schutverlies (voorbeeld: vervoersscenario GE2030)

Schutsluis	NST	Oostsluis	Westsluis	Totaal
Oppervlakte kolk (m ²)	23485	6720	11020	
Volume schutschijf (m ³)	46265	13238	21709	
Schutcycli per dag	10,37	20,29	14,25	
Schutverlies (m ³ /dag)	479773	268607	309359	
Schutverlies (m ³ /s)	5,6	3,1	3,6	12,2

In het eerdere rapport van Svašek en Royal Haskoning (2010) werd een schutverlies van 10,5 m³/s berekend voor het GE2040 economisch scenario met Nieuwe Sluis, waarschijnlijk met schuttingsaantallen uit een eerdere SIVAK-simulatie dan gerapporteerd in MARIN (2015). Deze berekening verschilt op een aantal manieren van het voorbeeld hierboven:

1. Ten eerste werd een significant lager aantal schutcycli per dag aangehouden (zie Tabel 3-6), waardoor het daggemiddelde schutverlies lager is.
2. Ten tweede werd er gerekend met een schutschijf van 2,20 m in plaats van 1,97 m waardoor het schutverlies met 12% toeneemt.
3. Verder werd er 10% van het totale schutvolume afgetrokken om zo de aanwezigheid van schepen mee te nemen in de berekening. Dit laatste is echter niet correct, omdat het schutverlies onafhankelijk is van de aanwezigheid van schepen.

Tabel 3-6: Schuttingen per dag GE2040 zoals doorgerekend in Royal Haskoning en Svašek (2010), tabel 3.5b

Schutsluis	NST	Oostsluis	Middensluis	Westsluis
Schutcycli per dag	8,4	17,5	0	11,8

De berekende getallen van 12,2 en 13,2 m³/s zijn dus in lijn met de eerder gepresenteerde getallen.

3.4.2. Handhaving kanaalpeil

Om het kanaalpeil te handhaven, moet de bovenafvoer minimaal net zo groot zijn als het daggemiddelde schutverlies. Zodra de bovenafvoer lager is dan het schutverlies, zal het peil op het KGT zakken. De bovenafvoer in droge zomers (zie Tabel 3-1) is aanzienlijk lager dan de schutverliezen van 12,2 tot 13,2 m³/s behorend bij de scheepvaartprognoses GE2030 en GE2020. Dit geldt nog sterker voor droge zomers inclusief klimaatverandering (W+). In de periode 2016 tot en met 2020 was de totale bovenafvoer (vanuit Evergem, Gent en de Moervaart) gemiddeld 106 dagen per jaar lager dan 12,2 m³/s.

Het bergend oppervlak van het KGT is 11,9 km², zie §2.2. Als vuistregel op basis van de 11,9 km² kan worden aangehouden dat een netto afvoer van 1 m³/s uit het kanaal (afvoer-aanvoer) leidt tot bijna 1 cm waterstands daling per dag. Bij combinatie van een lage bovenafvoer met de schutstrategieën uit de MER zakt het kanaalpeil daarom met meerdere centimeters per dag. Dit betekent dat de schutstrategieën uit de MER niet haalbaar zijn in tijden van droogte zonder aanvullende maatregelen te nemen om het peilbeheer te handhaven (bijvoorbeeld geclusterd schutten, stremmingen, water oppompen bij de sluizen of waterterugwinning bij het nivelleren).

Ter vergelijking, het schutverlies zonder de nieuwe zeesluis op basis van schutdata uit 2016-2021 (de gemiddelde waarden uit Tabel 3-4) is 5,8 m³/s (zie Tabel 3-7 voor de berekening). Het vervangen van de relatief kleine Middensluis door de veel grotere Nieuwe Sluis zorgt (zonder stremmingen) dus ongeveer voor een verdubbeling van de bovenafvoer die nodig is om het kanaalpeil te handhaven. Deze hogere bovenafvoer komt hoofdzakelijk door de Nieuwe sluis maar voor een klein deel door de toename in het aantal schuttingen uit het GE2030 scenario ten opzichte van de schutdata uit 2016-2021. Bij de Westsluis leidt deze toename in het aantal schuttingen tot een toename in schutverlies van 2,98 naar 3,6 m³/s en bij de Oostsluis van 2,50 naar 3,1 m³/s.

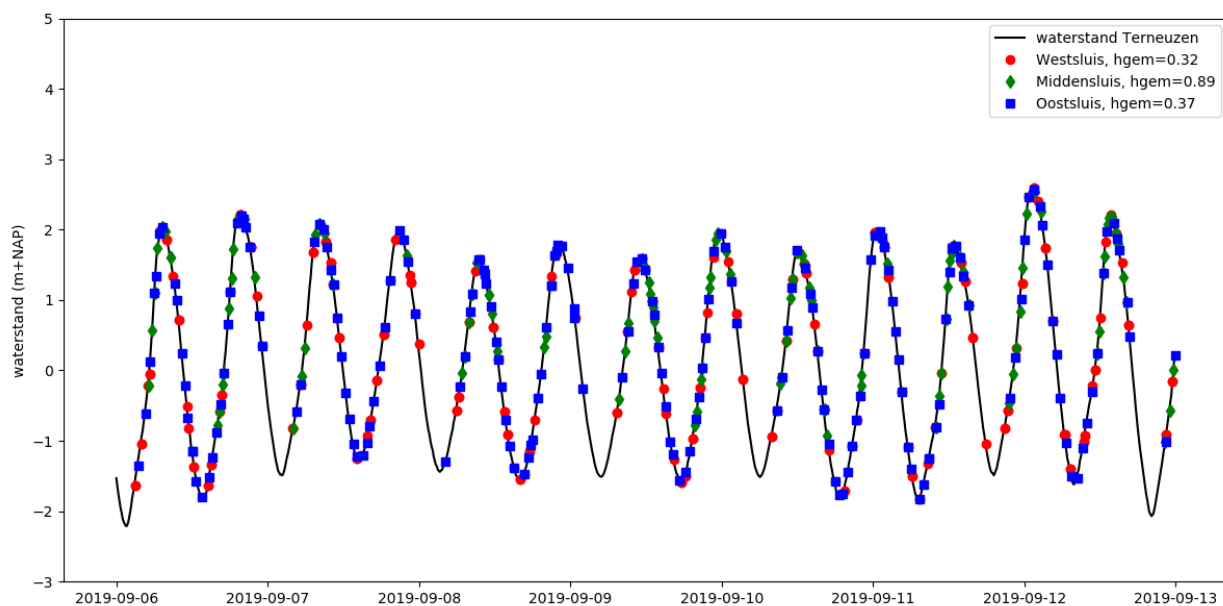
Tabel 3-7: Berekening schutverlies zonder Nieuwe Sluis (simulatie 1 MARIN (2015) met data 2012)

Schutsluis	NST	Oostsluis	Middensluis	Westsluis
Oppervlakte kolk (m ²)	23485	6720	3360	11020
Volume schutschijf (m ³)	46265	13238	3259	21709
Schutcycli per dag	0	16,29	9,43	11,86
Schutverlies (m ³ /dag)	0	215597	30730	257411
Schutverlies (m ³ /s)	0,00	2,50	0,36	2,98

Ook de waarde van 5,8 m³/s, behorend bij het huidige sluizencomplex en de huidige aantallen schutcycli, is groter dan de laagste afvoeren uit Figuur 3-3 voor de periode 2010-2021. Dit suggereert dat in de huidige situatie al bij tijden maatregelen moeten zijn getroffen om het kanaalpeil te handhaven binnen de marges van NAP+2,05 m en NAP+2,35 m (zie §2.5).

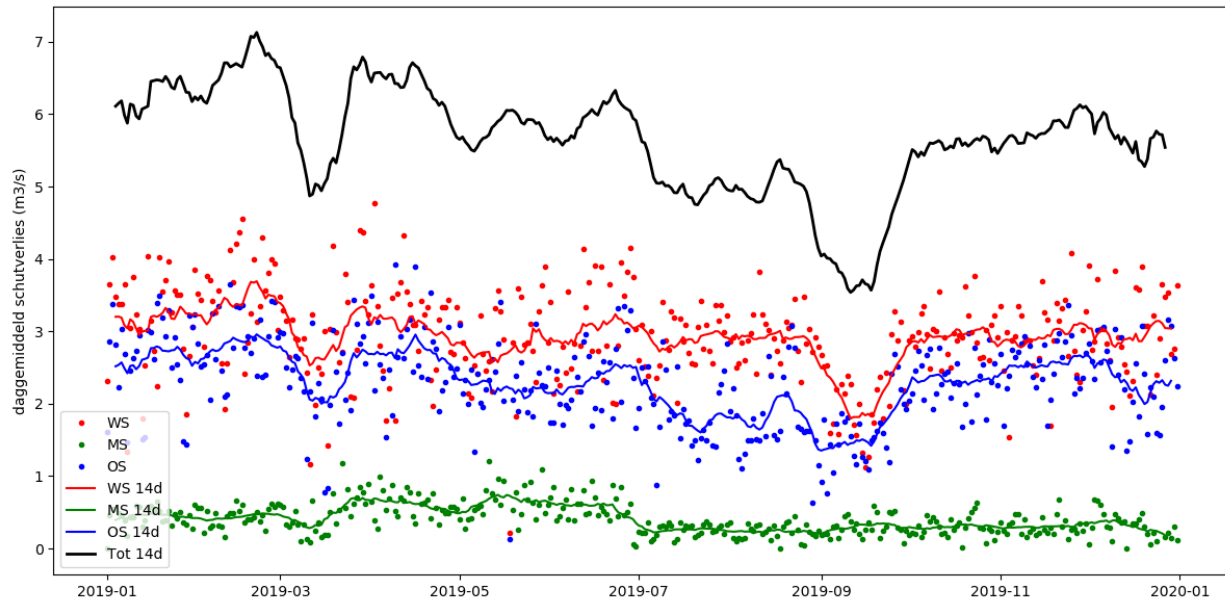
3.4.3. Effect van stremmingen

Voor een meer gedetailleerd beeld is de gehele tijdreeks met passages en leegom schuttingen onderzocht voor de periode 2016 tot en met 2021. Passages met een identiek aanvangstijdstip zijn daarbij als één en dezelfde schutting beschouwd. Figuur 3-7 geeft een voorbeeld van deze dataset voor een zeer droge periode in september 2019, samen met het waterstandsverloop in de Westerschelde bij Terneuzen. In deze perioden is de scheepvaart vrij consequent gestremd tijdens het laagwater in de avond/nacht. Dit is te zien aan het ontbreken van schuttingen rond laagwater. De gemiddelde waterstand tijdens de schuttingen ligt hierdoor relatief hoog: NAP+0,32 m bij de Westsluis en NAP+0,37 m bij de Oostsluis. Dit is duidelijk hoger dan de daggemiddelde waterstand bij Terneuzen van NAP+0,04 m. De waterstand bij de Middensluis ligt niet hoger dan gebruikelijk.



Figuur 3-7: Voorbeeld van schuttingen tijdens een periode met stremmingen rond laagwater in september 2019

Het stremmen leidt tot een daling van het schutverlies, zichtbaar in Figuur 3-8. Waar het daggemiddelde schutverlies normaal gesproken tussen 5 en 7 m³/s ligt, daalt dit in september 2019 naar 3,7 m³/s (gemiddeld over 14 dagen).



Figuur 3-8: Daggemiddelde schutverliezen in 2019 (markers) en voor visuele doeleinden een lopend gemiddelde met een periode van 14 dagen (lijnen)

3.4.4. Strategieën voor schutten en spuien

Gecombineerde scenario's zijn combinaties van bovenafvoer, scheepvaart en schutregime. De bovenafvoer is in droge tijden geen beleidskeuze, maar vrijwel randvoorwaardelijk. Daarom vormen deze het startpunt voor de gecombineerde scenario's.

In perioden met voldoende bovenafvoer wordt er in alle simulaties geschut conform het GE2030-scenario uit de MER (SIVAK-simulatie 17 uit Tabel 3-3). Voor spuien bij wateroverschot is de volgorde zoals beschreven in §2.5: eerst de Westsluis, dan de Oostsluis, dan de Nieuwe Sluis, waarbij de eerste 22 m³/s (daggemiddeld) stremvrij kan worden gespuid via uitwisselingsspuien bij de Westsluis. In perioden met watertekort wordt er niet gespuid. Het spuien en schutten verloopt volgens de volgende vier strategieën (aangeduid met een S).

Schutstrategie S1

Bij deze strategie worden de schuttingen ook in perioden van droogte gelijkmatig verspreid over de dag, ongeacht de waterstand op de Westerschelde. Het aantal schuttingen per dag wordt op droge dagen gereduceerd tot dat aantal waarbij het totale daggemiddelde schutverlies $Q_{sch,tot}$ gelijk is aan de gemiddelde bovenafvoer Q_{bov} op die dag. Dit komt neer op maximaal gegroepeerd schutten zonder rekeningen te houden met de waterstand op de Westerschelde, waarbij het maximale aantal schuttingen wordt bepaald vanuit de bovenafvoer in plaats van het aantal schepen.

$$Q_{sch,tot} = Q_{bov} = (N_{NST} \cdot A_{NST} + N_{OS} \cdot A_{OS} + N_{WS} \cdot A_{WS}) \cdot \Delta h / 86400 \quad (1)$$

Hierbij geldt dat Q een daggemiddeld debiet in m^3/s is, N het aantal schutcycli per dag, A het kolkoppervlak in m^2 (zie Tabel 2-2), Δh het waterstandsverschil in m op de betreffende dag en 86400 het aantal seconden in een dag. De subscripten staan voor de verschillende sluiskolken.

Als de bovenafvoer niet toereikend is, zakt in de berekeningen eerst het peil uit tot op de ondergrens van NAP+1,85 m, 25 cm onder het streefpeil. Als het peil onder deze ondergrens terecht dreigt te komen, worden de aantallen schuttingen gereduceerd: eerst van de Nieuwe Sluis, als dat nog niet toereikend is, dan ook van de Oostsluis, waarna uiteindelijk ook het aantal schuttingen via de Westsluis wordt teruggebracht.

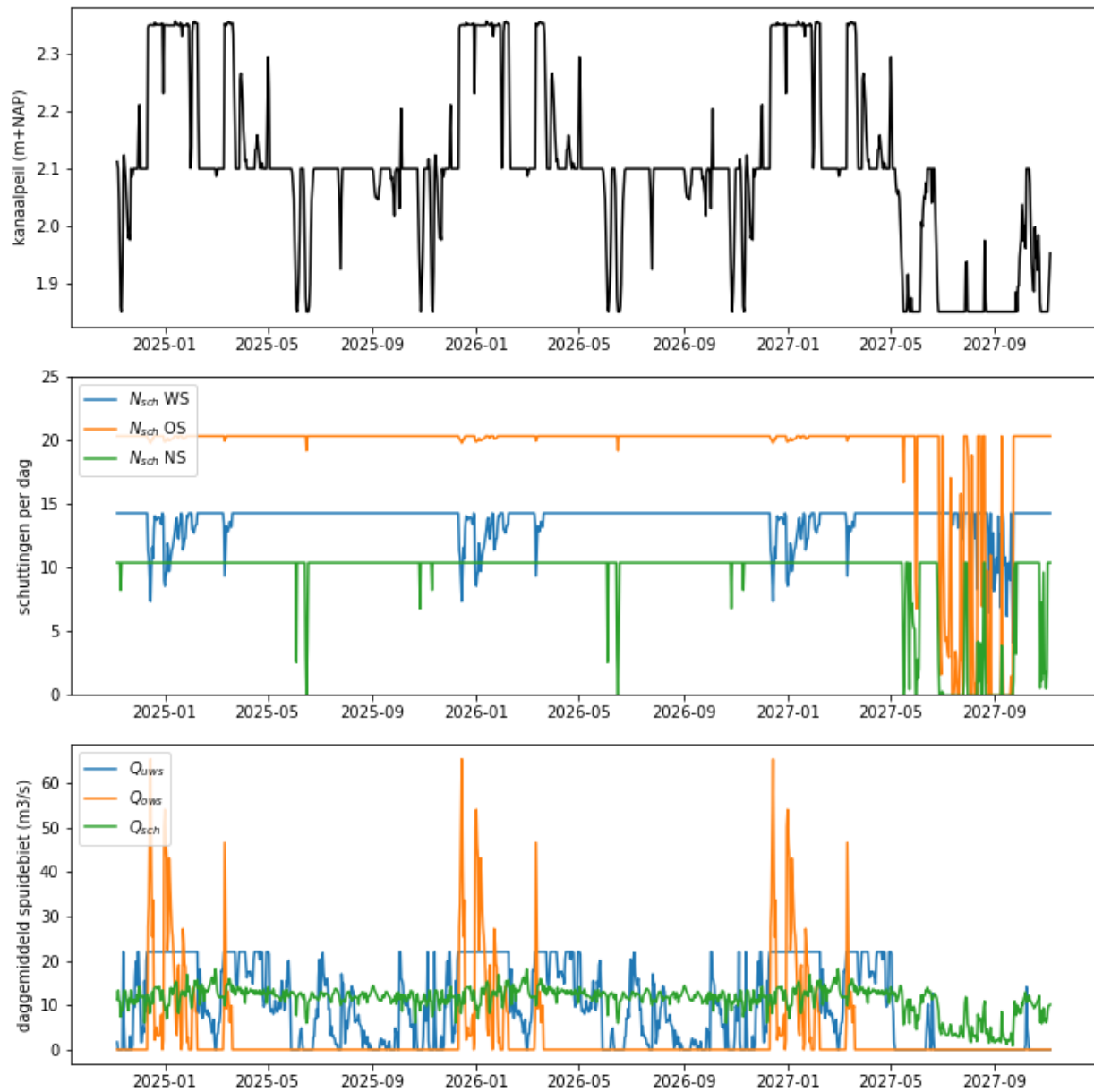
Uitwisselingsspuien van maximaal $Q_{uws}=22 \text{ m}^3/\text{s}$ daggemiddeld gebeurt als het peil zonder spuien boven streefpeil van NAP+2,10 m uitkomt na aftrek van schutverliezen. Oppervlaktewaterspuien via stremmen van schutkolken gebeurt als het peil na aftrek van schutverliezen en uitwisselingsspuien boven de bovengrens van NAP+2,35 m uit dreigt te komen. In dat geval worden de schutsluizen gestremd zo lang als nodig is, eerst de Westsluis, dan de Oostsluis, dan de Nieuwe Sluis. Gedurende deze stremduur zijn er geen schutverliezen, maar kan er wel $Q_{ows,max}=130 \text{ m}^3/\text{s}$ (Westsluis), $90 \text{ m}^3/\text{s}$ (Oostsluis) of $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (Nieuwe Sluis) worden gespuid. Dit zijn geen daggemiddelde waarden, maar debieten tijdens spuien. Tijdens het spuien wordt er niet geschut. Ook de reductie van het daggemiddelde schutverlies wordt meegenomen in de waterbalans.

Een nieuw kanaalpeil $h(t)$ wordt berekend op basis van het kanaalpeil op de voorgaande dag en de verschillende daggemiddelde debieten via:

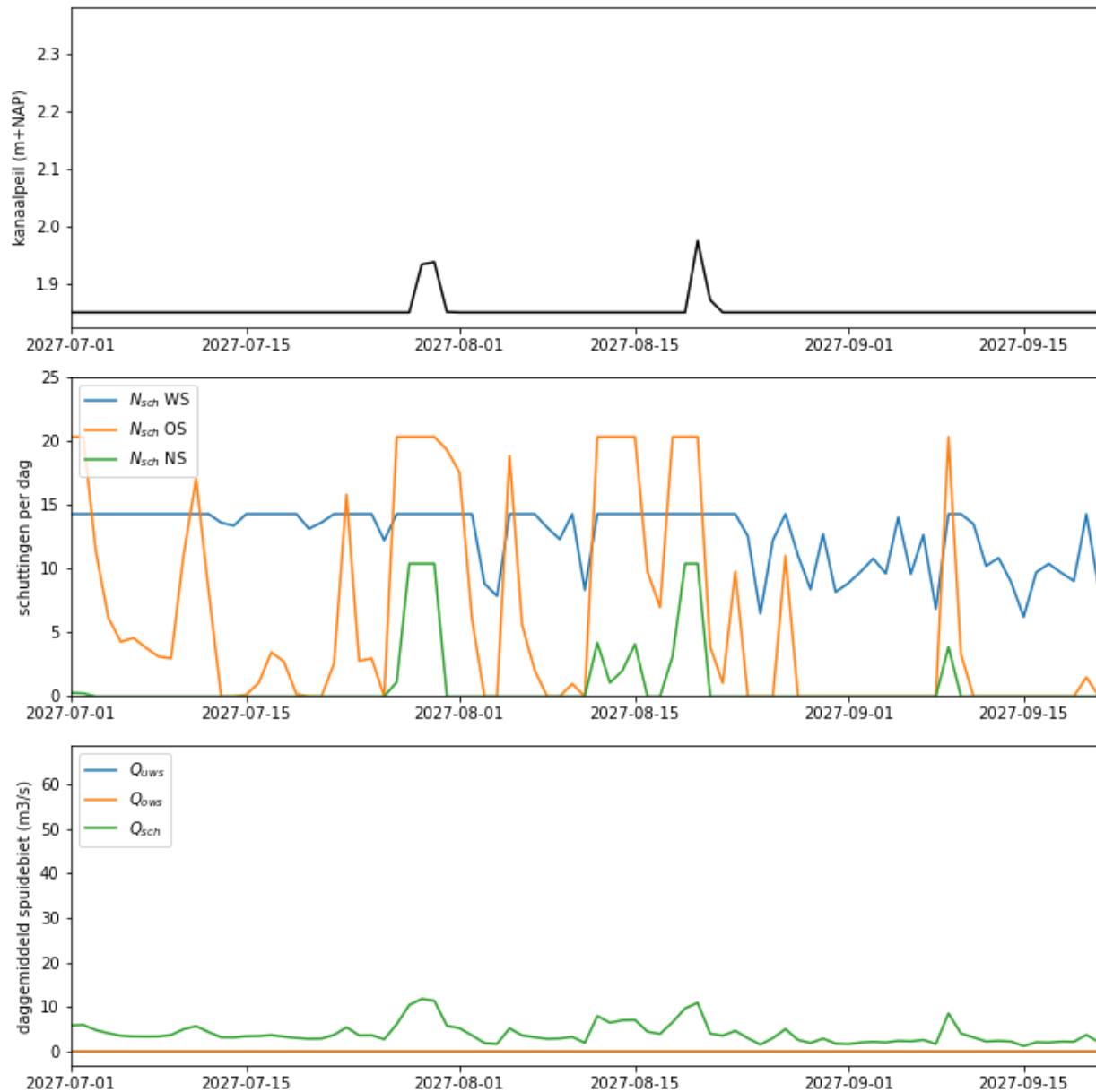
$$h(t) = h(t-1 \text{ dag}) + (Q_{bov} - Q_{sch,tot} - Q_{uws} - Q_{ows,tot}) * 86400 / A_{KGT} \quad (2)$$

Hierin is A_{KGT} het bergend oppervlak van het KGT. Deze waarde is $A_{KGT}=6,53 \text{ km}^2$, bepaald op basis van een simulatie met het SOBEK-model waarbij de waterstandsverandering in m/dag werd berekend als functie van het netto debiet (in-uit, in m^3/s) richting het KGT. Dit is lager dan het daadwerkelijke bergende oppervlak van het watersysteem van $11,9 \text{ km}^2$ (zie §2.2), omdat o.a. diverse zijdokken en wateren rond Gent ontbreken in het SOBEK-model. Het relatief kleine bergende oppervlak leidt tot een relatief snelle respons van de waterstand op debietfluctuaties in het model. De subscripten 'tot' geven aan dat het om het totaal van de verschillende schutsluizen gaat.

Figuur 3-9 en Figuur 3-10 geven een voorbeeld van deze strategie voor het nieuwe sluizencomplex (inclusief NST), gecombineerd met de bovenafvoer en zeewaterstand voor het afvoerscenario Q2.



Figuur 3-9: Berekend kanaalpeil (boven), aantal schuttingen per dag (midden) en de daggemiddelde spui- en schutdebieten (onder) op basis van schutstrategie S1 bij combinatie met afvoerscenario Q2.

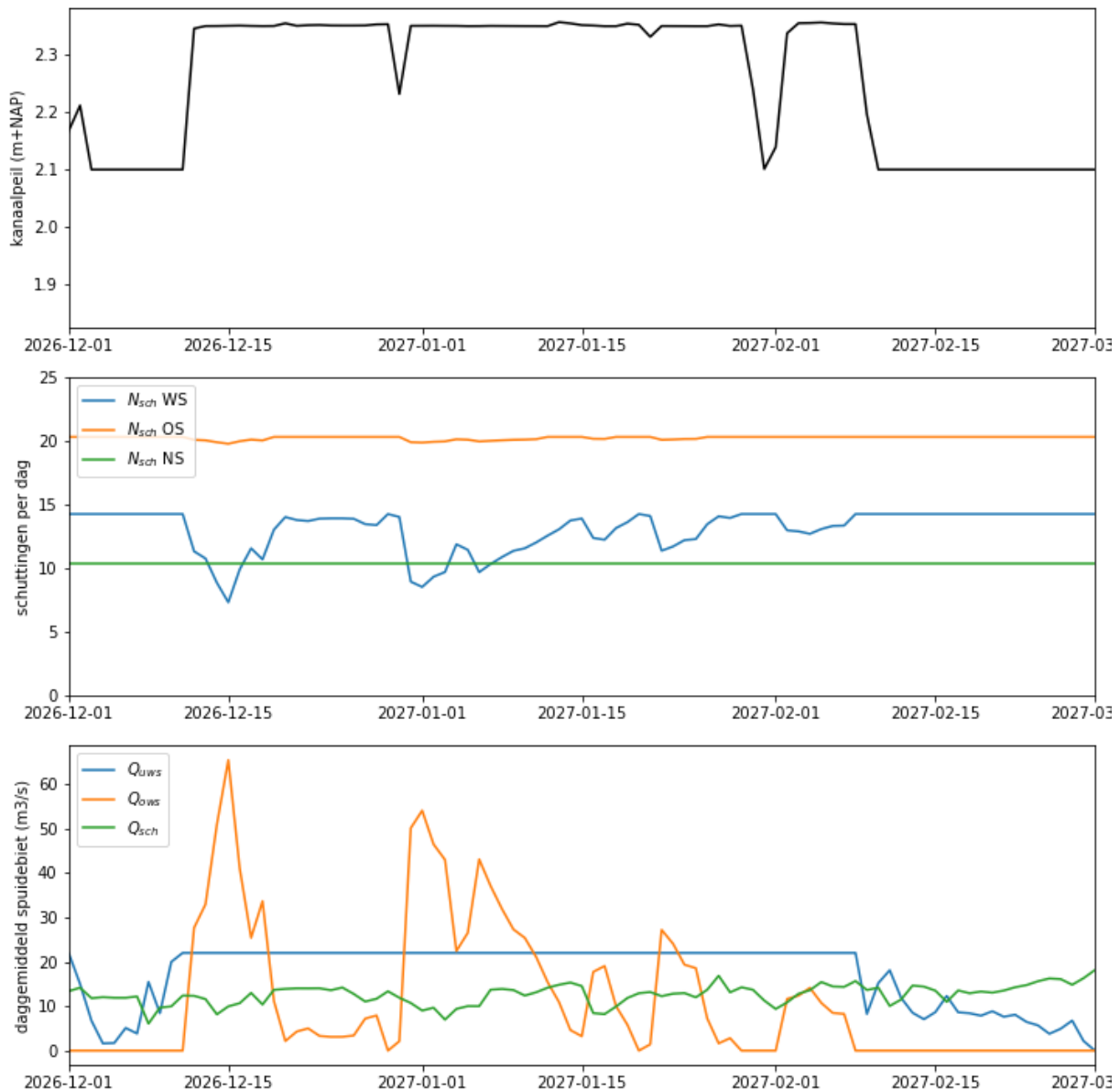


Figuur 3-10: Voorbeeld van het berekende kanaalpeil (boven), het aantal schuttingen per dag (midden) en de spui- en schutdebieten (onder) voor schutstrategie S1 bij combinatie met de bovenafvoer uit afvoerscenario Q2, tijdens de laagste 2 maanden met de laagste bovenafvoer en met een extra klimaateffect.

Te zien is dat het kanaalpeil bij deze strategie langdurig op de ondergrens van NAP+1,85 m hangt in een zeer droge periode. Het aantal schuttingen via de Nieuwe Sluis varieert tussen 0 en 10,37 schutcycli per dag (conform GE2030). Ook voor de Oostsluis gelden beperkingen, voornamelijk in september. Bij de Westsluis kan meestal het aantal schutcycli conform GE2030 worden afgewikkeld, behalve in de droogste periode in september. Er wordt niet gespuid in deze periode, omdat het kanaalpeil ook zonder spuien niet boven de streefwaarde van NAP+2,10 m uitkomt. Het opzetten van het kanaalpeil is in deze

vereenvoudigde schematisatie van het peilbeheer niet meegenomen, maar zou ook weinig soelaas bieden als droogte lang aanhoudt.

Figuur 3-11 geeft een voorbeeld van het spuien in een winterperiode uit scenario Q2 conform de geprogrammeerde beslisregels. Het peil zit in natte tijden vaak langdurig tegen de bovengrens aan. Er wordt maximaal gespuid via uitwisselingsspuien (22 m³/s daggemiddeld). Op verschillende momenten is er ook langdurig oppervlaktewaterspuien nodig, waardoor de Westsluis regelmatig gestremd wordt voor het afvoeren van het overtollige water, tot wel 7 uur per getijperiode (in december 2026). Voorheen werd de Middensluis gebruikt om overtollig water af te voeren.



Figuur 3-11: Voorbeeld van het berekende kanaalpeil (boven), het aantal schuttingen per dag (midden) en de spuien schutdebieten (onder) voor schutstrategie S1 bij combinatie met de bovenafvoer in de tweede winter uit afvoer-scenario Q2.

Schutzstrategie S2

Bij deze strategie worden sluizen gestremd in perioden van droogte gedurende een periode van maximaal 4 uur voor tot 4 uur na laagwater, dus 8 uur per getijperiode. Langer stremmen is niet zinvol voor het beperken van schutverliezen. Binnen het resterende deel van de getijperiode (rond hoogwater) wordt gesloten met hetzelfde interval tussen de schuttingen als in het GE2030-scenario. Dit is een bovengrensbepaling qua stremmingen, aangezien in de huidige praktijk (dus nog zonder Nieuwe sluis) zelden langer gestremd wordt dan 1,5 uur voor tot 1,5 uur na laagwater. De stremvolgorde is bij wattertekort opnieuw: eerst de Nieuwe Sluis, dan de Oostsluis, dan de Westsluis.

Stremmen is tot uitdrukking te brengen via een verhoging van de gemiddelde waterstand op de Westerschelde tijdens de schuttingen en daarmee in een verlaging van het daggemiddelde waterstandsverschil tussen de binnen- en buitenzijde van de sluizen Δh . Deze volgt uit:

$$\Delta h = \Delta h_0 - 0,0035 \cdot D, \quad (3)$$

waarbij D de stremmingsduur per getijperiode T is, in minuten. In deze strategie S2 bedraagt de stremmingsduur 480 minuten per getijperiode van 745 minuten (64% van de tijd). Dit resulteert in een gemiddeld waterstandsverschil tijdens de schuttingen van $\Delta h = 0,29$ m bij een daggemiddeld waterstandsverschil tussen KGT en Westerschelde van $\Delta h_0 = 1,97$ m. Deze formule is gebaseerd op een sinusvormig getijverloop en een kanaalpeil van NAP+2,10 m. Het werkelijke effect van stremmingen op het schutverlies hangt af van het kanaalpeil, de zeewaterstand, het exacte getijverloop (inclusief mogelijk getij-asymmetrie) en de exacte schuttijdstoppen. Het lineaire karakter van de formule is geldig tot ongeveer 8 uur stremming per getijperiode.

Ook het aantal schuttingen per dag N_s neemt af ten opzichte van het gewenste aantal N_{s0} volgens GE2030:

$$N_s = D/T \cdot N_{s0}. \quad (4)$$

De stremduur D werkt daarmee kwadratisch door in het schutverlies voor een bepaalde sluis. Bijvoorbeeld voor de Nieuwe Sluis wordt dit:

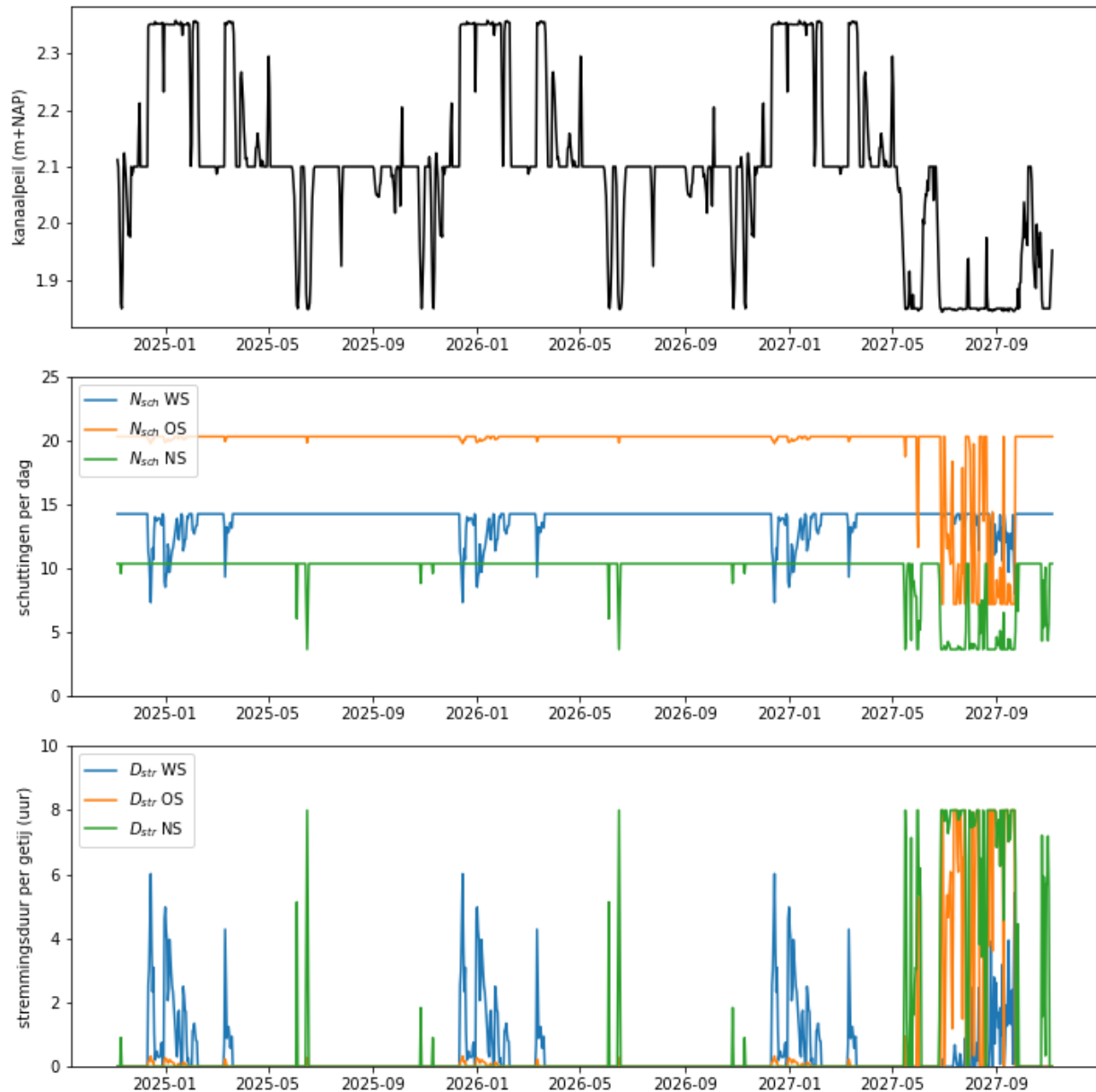
$$Q_{sch,NST} = N_s \cdot \Delta h \cdot A_{NST} / 86400 = D/T \cdot N_{s0} \cdot (1,97 - 0,0035 \cdot D) \cdot A_{NST} / 86400. \quad (5)$$

Door het oplossen van deze kwadratische vergelijking kan per sluis de stremmingsduur D worden bepaald die nodig is om met alle sluizen bij elkaar een bepaalde reductie van het schutverlies te bewerkstelligen. De analytische oplossing van de kwadratische vergelijking (5) is in de routine voor de strategieën S2 en S3 geïmplementeerd.

De lengte van de stremmingen voor de verschillende schutsluizen varieert van dag tot dag, afhankelijk van het kanaalpeil, de fluctuaties in de bovenaanvoer en de zeewaterstand. Net als in strategie S1 wordt alleen gestremd als het kanaalpeil zonder stremmen onder de ondergrens van NAP+1,85 m uit zou komen. Het spuien gebeurt identiek aan de werkwijze in strategie S1: eerst uitwisselingsspuien, dan oppervlaktewaterspuien via achtereenvolgens de Westsluis, Oostsluis en Nieuwe Sluis.

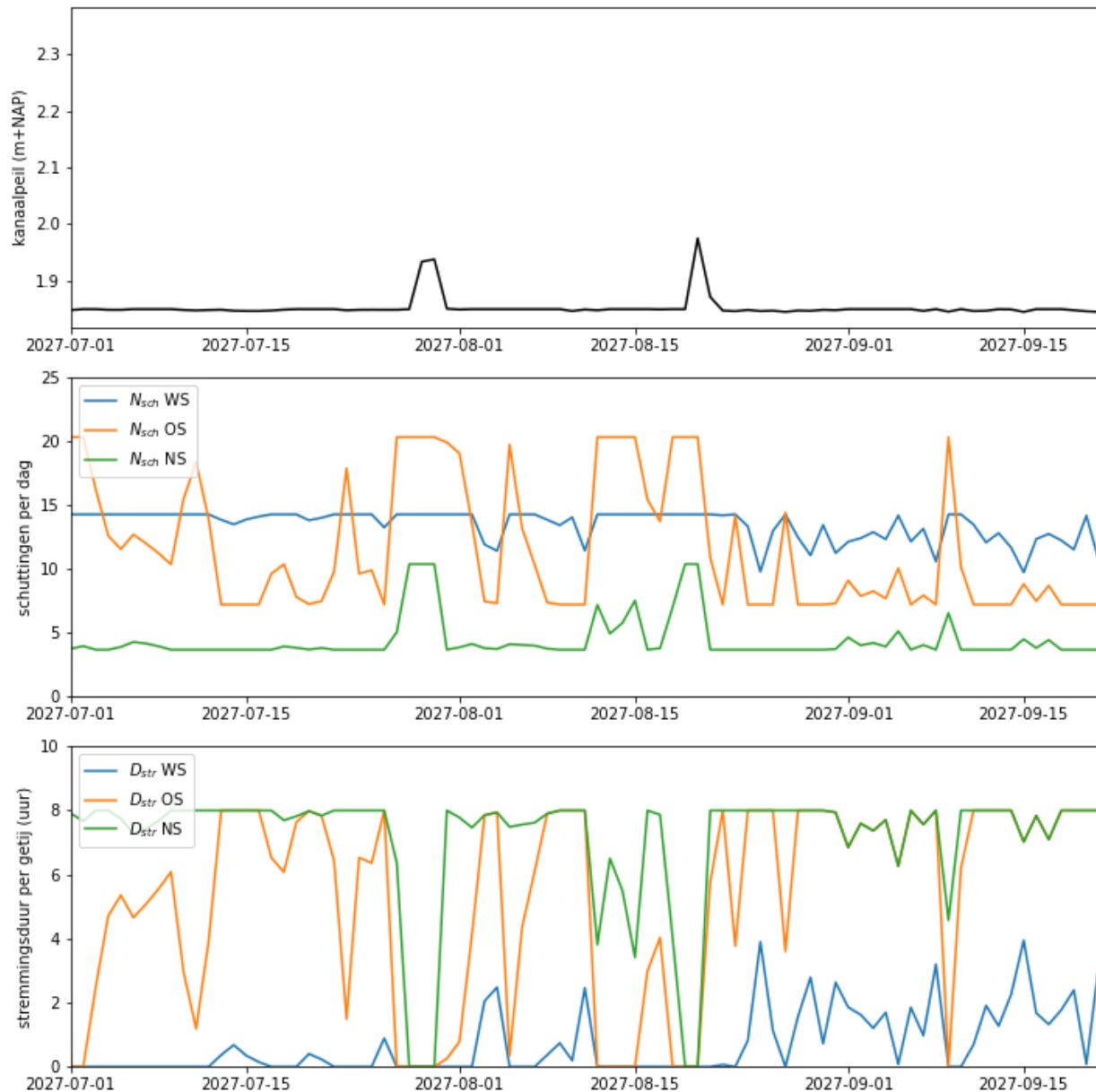
Figuur 3-12 laat zien hoe het kanaalpeil varieert bij dit schutregime in het geval van afvoerscenario Q2. In natte tijden wordt net als in strategie S1 regelmatig de bovengrens bereikt. Er is dan oppervlaktewaterspuien via een gestremde Westsluis nodig, veelal via korte stremmingen, maar soms tot wel 7 uur per getij. Voorheen werd de Middensluis gebruikt om overtollig water af te voeren.

In droge tijden fluctueert het kanaalpeil tussen ondergrens en streefpeil. De Nieuwe sluis wordt regelmatig 8 uur lang gestremd. Ook bij de Oostsluis zijn soms stremmingen nodig in droge tijden.



Figuur 3-12: Berekend kanaalpeil (boven), aantal schuttingen per dag (midden) en de stremmingsduur per getijperiode (onder) op basis van schutstrategie S2 bij combinatie met afvoerscenario Q2.

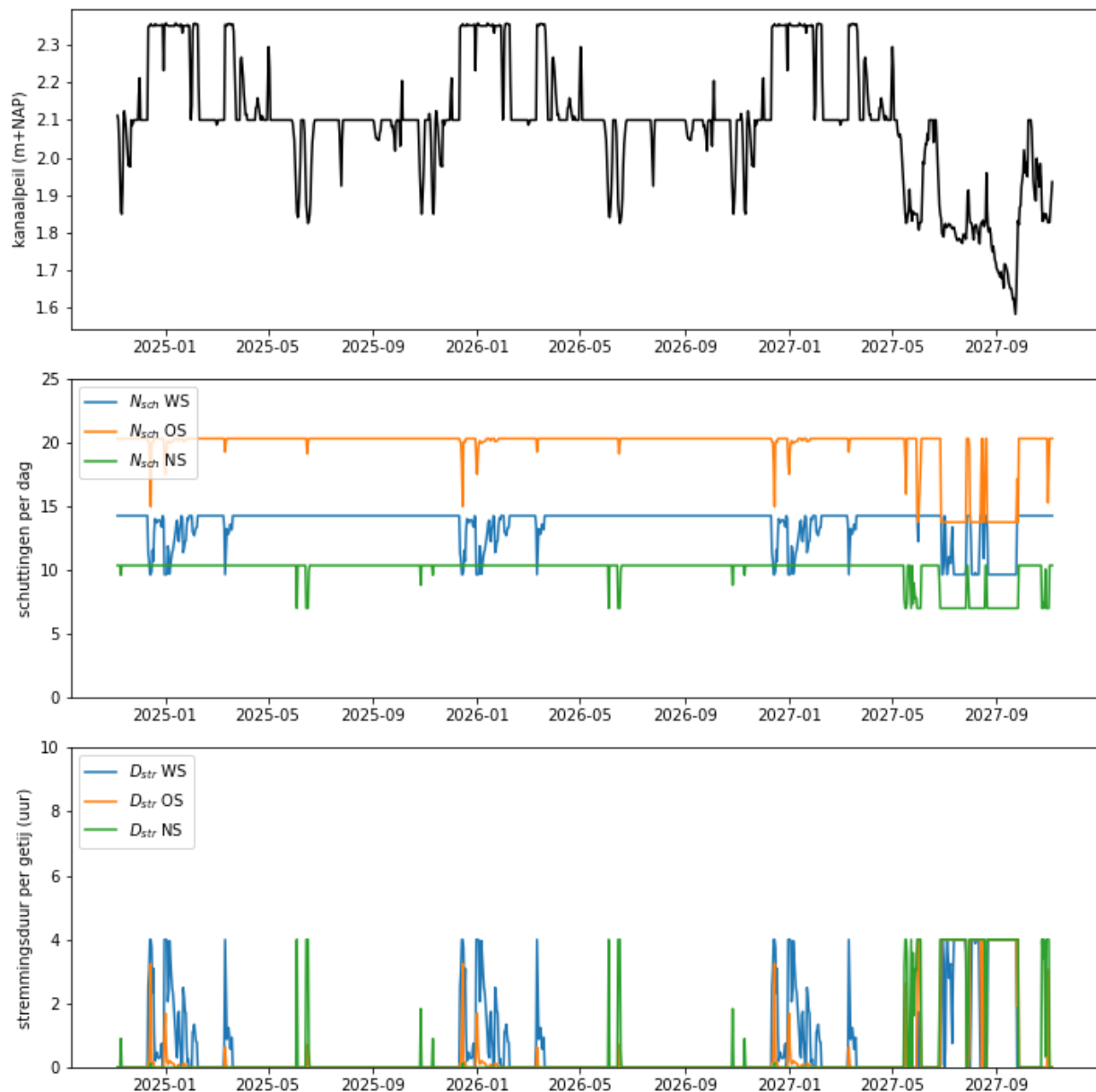
Figuur 3-13 toont een voorbeeld voor de extreem droge zomer aan het eind van afvoerscenario Q2. Het kanaalpeil hangt voortdurend tegen de ondergrens aan. De Nieuwe Sluis is vrij structureel 8 uur per getij gestremd, waardoor het aantal shutcycli per dag afneemt van 10,37 naar 3,69. Ook de Oostsluis is in deze zomer vrijwel dagelijks langdurig gestremd. Alleen bij de Westsluis fluctueert de stremmingsduur tussen 0 en 4 uur per getij.



Figuur 3-13: Voorbeeld van het berekende kanaalpeil (boven), het aantal shuttings per dag (midden) en de stremmingsduur per getijperiode (onder) voor shutstrategie S2 bij combinatie met de bovenafvoer in de tweede zomer uit afvoerscenario Q2.

Schutzstrategie S3

Deze strategie is gelijk aan strategie S2, maar de maximale stremmingsduur is korter: 4 uur per getijperiode. Dit houdt in dat de Nieuwe Sluis nog wat vaker gebruikt wordt. Om dit te compenseren, worden de Oostsluis en Westsluis vaker gestremd in tijden van droogte. Dit is in extreme vorm te zien in de derde zomer van afvoerscenario Q2, zie Figuur 3-15. Wekenlang zijn dan alle schutsluizen 4 uur gestremd rond elk laagwater. Toch kan dit niet voorkomen dat het kanaalpeil onder de ondergrens zakt, tot ongeveer NAP+1,60 m. Er zijn bij deze strategie dus zowel stremmingen als aanzienlijke diepgangsbeperkingen van kracht.



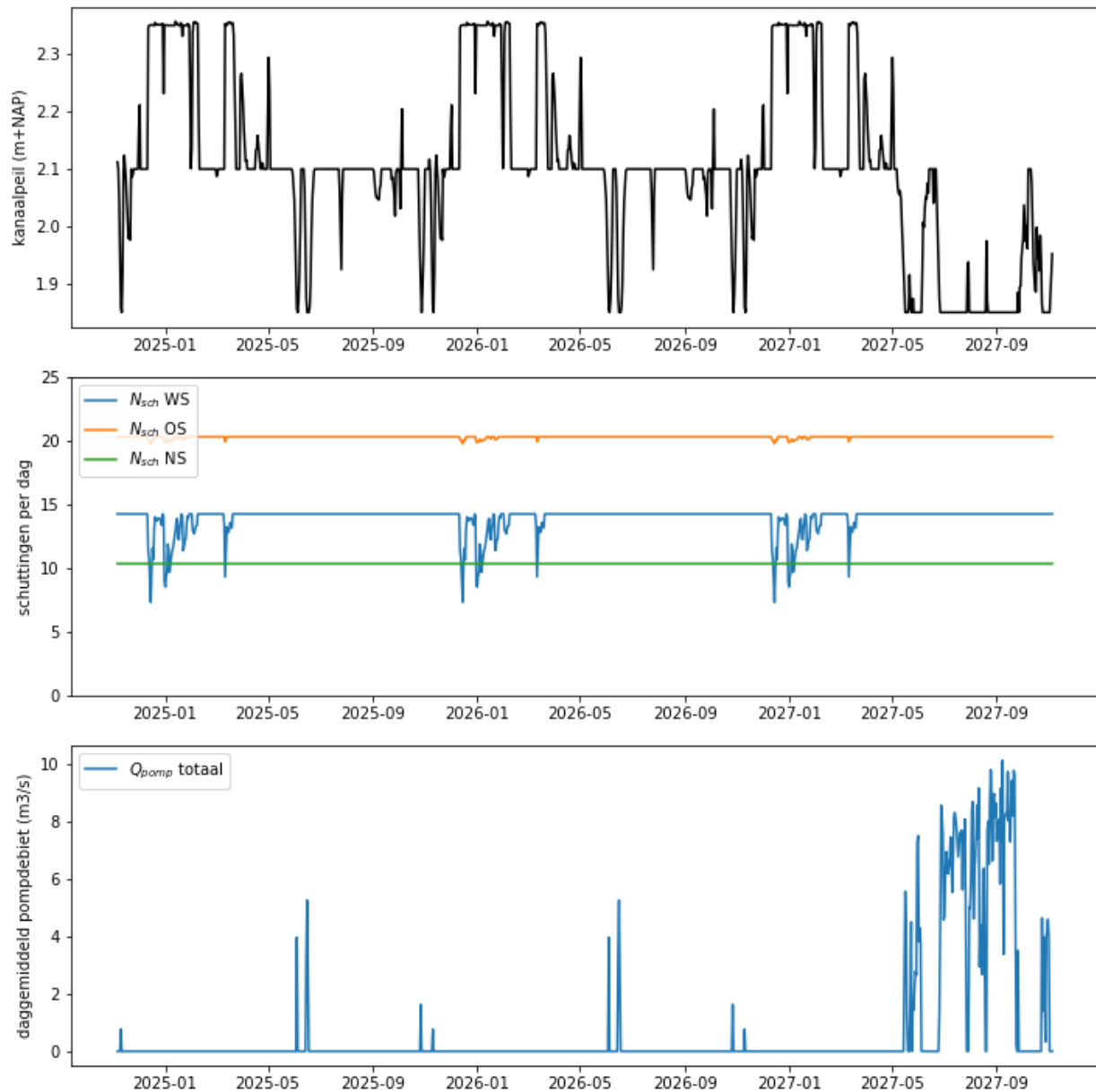
Figuur 3-14: Berekend kanaalpeil (boven), aantal schuttingen per dag (midden) en de stremmingsduur per getijperiode (onder) op basis van schutstrategie S3 bij combinatie met afvoerscenario Q2.



Figuur 3-15: Voorbeeld van het berekende kanaalpeil (boven), het aantal schuttingen per dag (midden) en de stremmingsduur per getijperiode (onder) voor schutstrategie S3 bij combinatie met de bovenafvoer in de derde zomer uit afvoerscenario Q2.

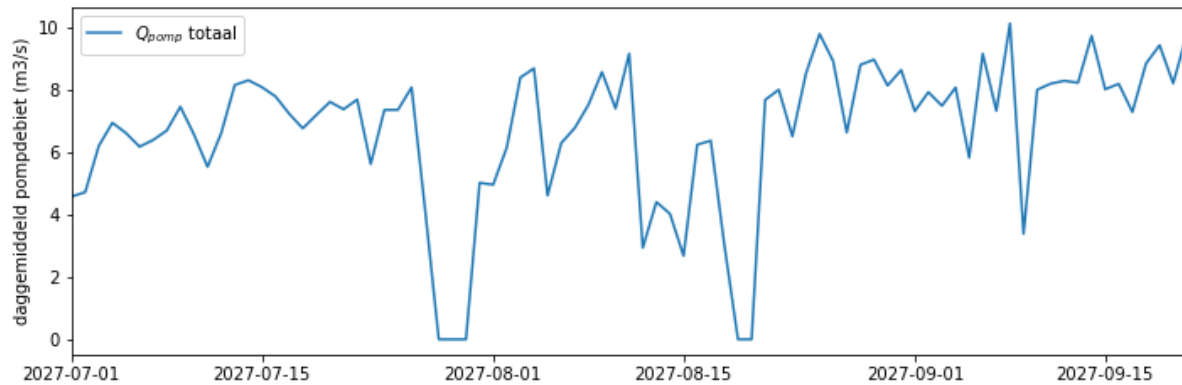
Schutstrategie S4

Schutten conform GE2030 zonder schutbeperkingen of uitzakken van het kanaalpeil, maar in perioden van droogte water vanuit de Westerschelde binnenlaten (gravitair of pompen) om het kanaalpeil te handhaven. Pompen is noodzakelijk om altijd gebruik te kunnen maken van deze maatregel. Uit Mast (2019) volgt namelijk dat gravitair inlaten van water tijdens doortijd niet mogelijk is, zie Figuur 3-18. Hoe het pompen precies plaatsvindt (richting kanaal of richting de kolken) is in deze oriënterende berekening niet verder uitgewerkt.

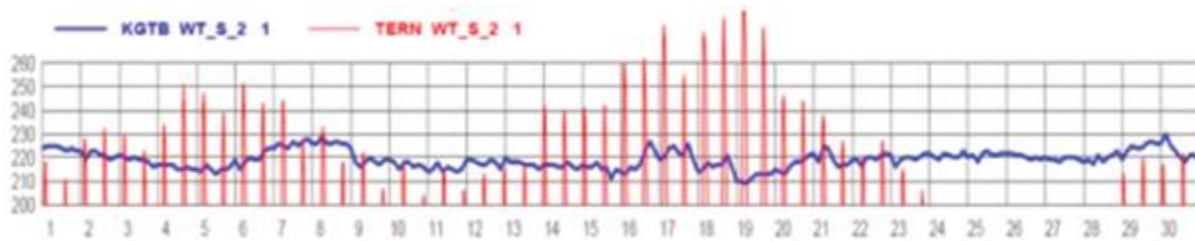


Figuur 3-16: Berekend kanaalpeil (boven), aantal schuttingen per dag (midden) en daggemiddeld pompdebiet (onder) voor schutstrategie S4 bij combinatie met de bovenafvoer in de derde zomer uit afvoerscenario Q2.

Figuur 3-16 laat zien dat het kanaalpeil bij deze strategie niet uitzakt onder NAP+1,85 m en de schut-frequentie in droge periodes niet hoeft te worden beperkt. Om dit te compenseren, wordt er zout water opgepompt, gemiddeld ongeveer 8 m³/s in de meest droge periode in het derde jaar van afvoerscenario Q2, met uitschieters tot daggemiddeld 10 m³/s, in detail te zien in Figuur 3-17.



Figuur 3-17: Voorbeeld van het daggemiddelde pompdebiet voor schutstrategie S4 bij combinatie met de bovenafvoer in de derde zomer uit afvoerscenario Q2.



Figuur 3-18: Vergelijking van waterstanden op het KGT (blauw) en op de Westerschelde bij Terneuzen (rood), in cm t.o.v. NAP (bron: Mast, 2019)

3.5. Door te rekenen gecombineerde scenario's

De 12 door te rekenen scenario's volgen uit het combineren van de 3 scenario's voor de bovenafvoer (Q1 t/m Q3) met de 4 strategieën voor het spui- en schutregime (S1 t/m S4) in combinatie met scheepvaartscenario GE2030 uit de MER.

4. Werkwijze modellering

4.1. Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de oppervlaktewatermodellering met SOBEK, gekoppeld met de Zeesluisformulering. In §4.2 wordt het oppervlaktewatermodel beschreven, in §4.3 de debietrandvoorwaarden, in §4.4 de zoutuitwisseling bij Terneuzen, in §4.5 de kalibratie van de zoutmodellering en in §4.6 de werkwijze voor het doorrekenen van scenario's met het oppervlaktewatermodel.

In dit hoofdstuk wordt onderscheid gemaakt tussen twee berekeningstypen:

1. **Kalibratieberekeningen**: berekeningen voor de periode 2016-2021 met het voormalige sluizencomplex, bedoeld om de zoutindringing in het SOBEK-model te kalibreren tegen gemeten concentraties.
2. **Scenarioberekeningen**: berekeningen van de zoutindringing in de scenario's zoals beschreven in hoofdstuk 3, waarbij de Middensluis is vervangen door de Nieuwe Sluis.

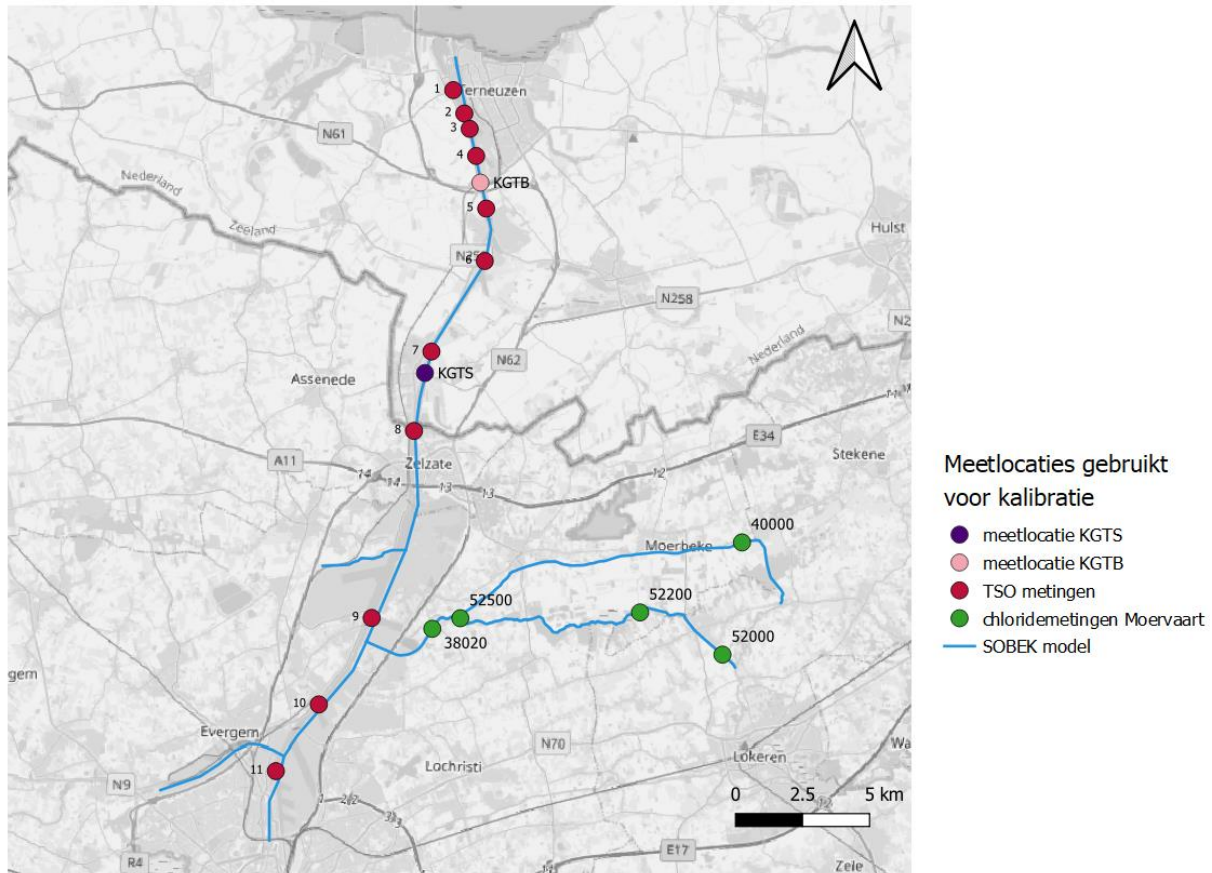
4.2. Oppervlaktewatermodel

4.2.1. Van SOBEK2 naar SOBEK3

Als basis voor het SOBEK-model is het SOBEK2-model uit de MER gehanteerd. Voor de MER is gebruik gemaakt van SOBEK2 in combinatie met de DELWAQ-module voor het berekenen van zoutverspreiding. Binnen SOBEK3 is het mogelijk om zoutverspreiding binnen SOBEK3 zelf te modelleren. Vanwege dat voordeel en de wens om gebruik te maken van een zo actueel mogelijk versie van SOBEK, is ervoor gekozen om het SOBEK2-model om te zetten naar SOBEK3. Het SOBEK3-model is weergegeven in Figuur 4-1, samen met de meetlocaties voor chloride die gebruikt zijn voor de kalibratie.

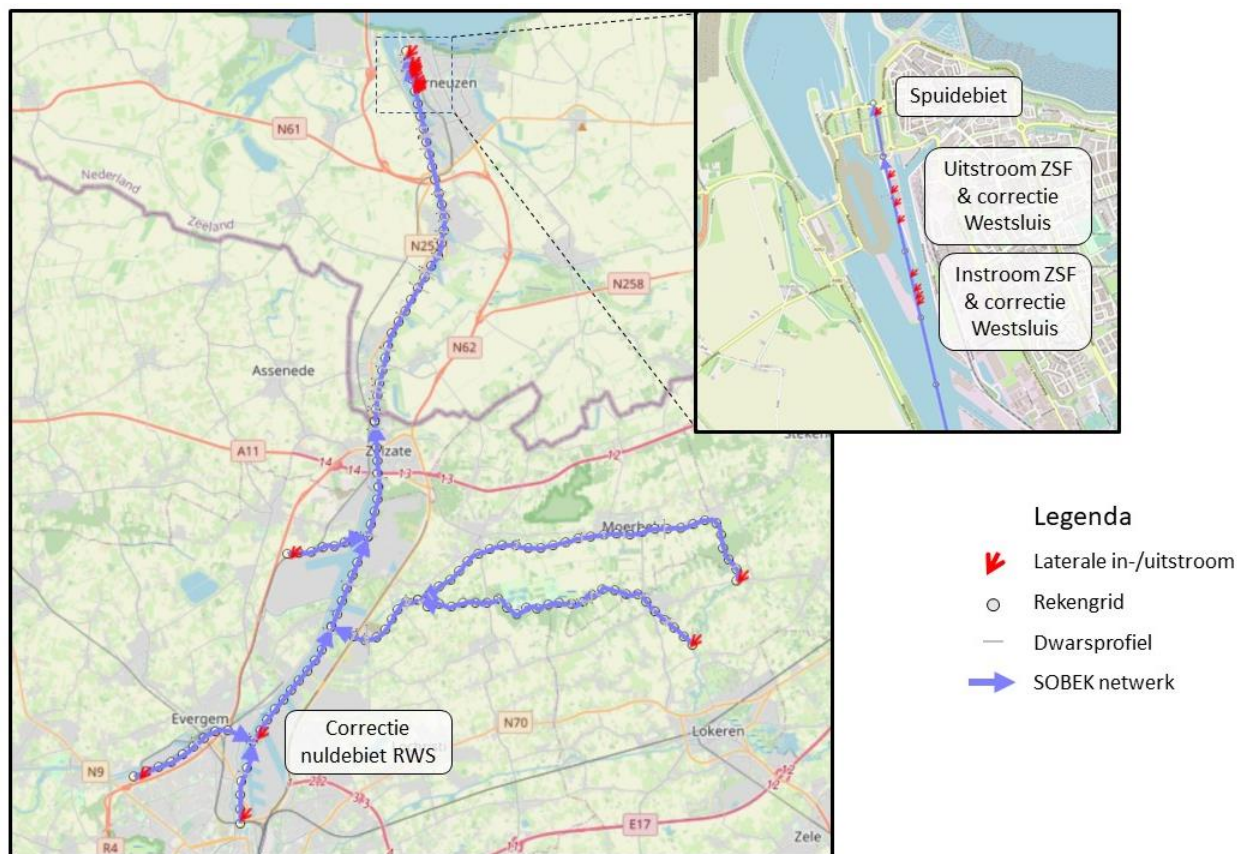
In het SOBEK2-model bleek een discrepantie aanwezig te zijn bij de landsgrens, waar het model netjes het KGT volgt in het Nederlandse deel, terwijl het model enkele honderden meters naast het KGT ligt in het Belgische deel. Deze onvolkomenheid wordt zichtbaar als het SOBEK-model op een kaart wordt geprojecteerd, zoals in Figuur 4-1, maar heeft geen invloed op de modelresultaten. Daarom is ervoor gekozen om deze discrepantie niet te herstellen in het nieuwe SOBEK3-model. Ook alle dwarsprofielen op het KGT zijn ongewijzigd overgenomen uit het SOBEK2-model.

Bij toepassing van een debietrandvoorwaarde of waterstandsrandvoorwaarde op het SOBEK3-model bleek de toegepaste saliniteit bij de rand een onevenredig sterke invloed te hebben op de saliniteit in het model. Dit ongewenste gedrag van SOBEK3 wordt door de softwareontwikkelaars bij Deltares verder onderzocht. Voor de modelstudie voor het KGT is besloten om geen randvoorwaarden aan het model op te leggen, maar te volstaan met onttrekkingen en lozingen (bron- en puttermen) voor de uitwisseling van water en zout. Figuur 4-2 geeft een overzicht van het uiteindelijke SOBEK3-model, inclusief alle locaties voor onttrekkingen en lozingen.



Figuur 4-1: Het SOBEK3-model met de in de kalibratie gebruikte meetlocaties

Bij het vergelijken van SOBEK2 met SOBEK3 is in eerste instantie gebruik gemaakt van een waterstandsrand bij Terneuzen. Dit leverde nagenoeg identieke waterstanden op in het model. Het rechtstreeks overnemen van de dispersiecoëfficiënten vanuit het SOBEK2-model in het SOBEK3-model resulteerde in de chlorideconcentraties uit Figuur 4-3. De chlorideconcentraties in SOBEK3 werden in deze testberekening nog verstoord door de invloed van de waterstandsrandvoorwaarde bij Terneuzen, zoals hierboven beschreven. De figuur geeft echter vertrouwen in de correcte omzetting van SOBEK2 naar SOBEK3. Via een omzetting van het type randvoorwaarde en een herkalibratie is het mogelijk om met SOBEK3 realistische chlorideconcentraties te berekenen op het KGT.

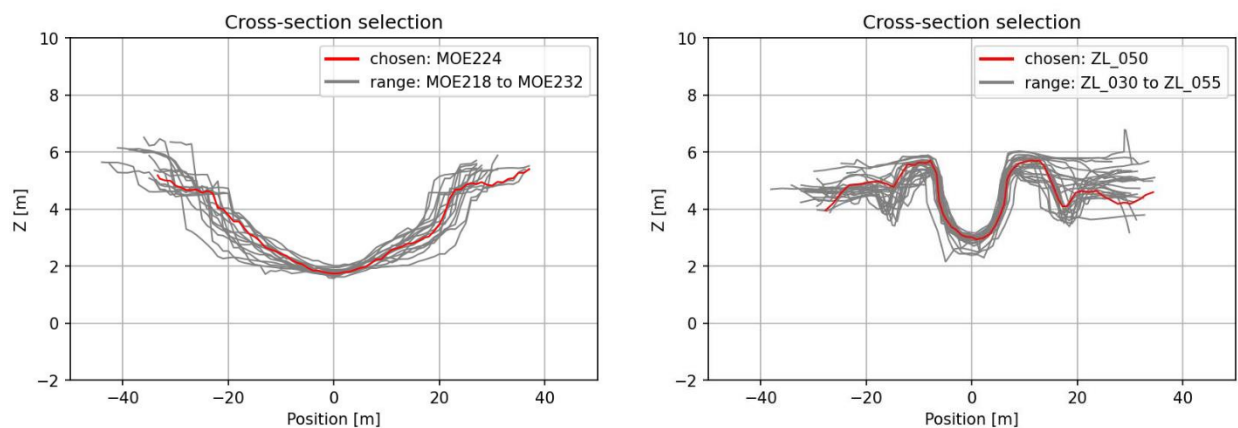


4.2.2. Verlenging van zijtakken

In §2.8 is een beschrijving gegeven van de zijtakken van het KGT. Deze zijtakken zijn in het SOBEK-model opgenomen. De Moervaart is verlengd ten opzichte van het SOBEK2-model uit de MER tot aan het meetpunt Sinaai. Daarnaast is de Zuidlede in zijn geheel aan het model toegevoegd, vanaf het punt waar de Zuidlede afsplitst van de Bovendurme tot het punt nabij Mendonk, waar de Zuidlede samen-vloeit met de Moervaart. De aarden dam bij Eksaarde bevindt zich niet in het model. Daardoor zijn de modelresultaten alleen realistisch in het hoog pand, tussen Eksaarde en Mendonk. De Avrijevaart heeft in het SOBEK3-model nog dezelfde lengte als in het SOBEK2-model: van de Moervaart tot aan het pompgemaal. De Canisvliet en zijdokken zijn niet opgenomen in het SOBEK3-model.

Voor de bodemhoogte van de Moervaart is gebruik gemaakt van dwarsprofielen uit het model van IMDC (2021). Deze zijn gebaseerd op een bathymetrische inmeting van de Moervaart uit 2016. Om de reken-tijd van SOBEK laag te houden, is een aantal representatieve dwarsprofielen geselecteerd, in totaal 15 voor de 19,6 km lange Moervaart tussen Sinaai en het KGT. Figuur 4-4 toont een voorbeeld van deze selectie. De diepte van de Moervaart is ongeveer 3,5 m nabij de monding en ongeveer 1,7 m verder bovenstrooms. In de Moervaart is tussen het KGT en de brug van de R4 een profiel met een grotere diepte toegepast op basis van metingen in 2020 en 2021, toegeleverd door het departement MOW.

Voor de Zuidlede is gebruik gemaakt van in 2018 ingemeten dwarsprofielen. Daarbij is de keuze ge-maakt om gebruik te maken van de bodemhoogte inclusief sliblaag. Ook hier is de brondata identiek aan IMDC (2021). Via GIS zijn de profielen geprojecteerd op de as van de waterloop voor toepassing in SOBEK. Ook voor de Zuidlede is een keuze gemaakt voor representatieve doorsneden, zie Figuur 4-4 voor een voorbeeld. In totaal zijn 20 profielen opgegeven voor de Zuidlede met een lengte van 12,5 km, met een kleinere onderlinge afstand op plaatsen waar het dwarsprofiel sterk varieert. Vervolgens zijn de lagere delen aan weerszijden van de oevers (zie Figuur 4-4) uit de dwarsprofielen verwijderd.



Figuur 4-4: Voorbeeld van de selectie van een representatief dwarsprofiel voor de Moervaart (links) en Zuidlede (rechts).

4.3. Randvoorwaarden: debieten

4.3.1. Evergem (stuw)

Bij de stuw van Evergem is de tijdreeks opgelegd, zoals opgenomen in waterinfo.be voor locatie Evergem/Ringvaart. In tijden van lage afvoer waren er incidenteel negatieve waarden aanwezig in de tijdreeks. Aangezien het fysisch gezien niet mogelijk is dat er water van het lagere benedenstroomse naar het hogere bovenstroomse pand stroomt, zijn deze waarden vervangen door een klein positief debiet van 0,1 m³/s.

4.3.2. Evergem (schutsluis)

Voor de schutsluis bij Evergem is gebruik gemaakt van een toegeleverde reconstructie door de KU Leuven. Deze beslaat de periode 1 januari 2016 t/m 5 november 2020. Voor het resterende deel van de tijdreeks is de gemiddelde waarde van 1,6 m³/s als constante waarde toegepast.

4.3.3. Binnenstad van Gent

Vanuit de binnenstad van Gent stroomt er water naar het KGT via diverse kunstwerken. Deels betreft dit doelbewust spuien, deels lekkage. Voor deze debieten zijn geen metingen beschikbaar. In het SO-BEK-model worden deze debieten samengevoegd als debiet bij de Tolhuisstuw. Zoals reeds vermeld in §3.2, is voor dit debiet 2 m³/s aangehouden, met uitzondering van droge periodes, waarvoor het debiet is gereduceerd tot 1 m³/s. Als grenswaarde voor droge periodes is een waarde bij Evergem (sluis plus stuw) van daggemiddeld 13 m³/s aangehouden.

4.3.4. Moervaart en Zuidlede

Voor de Moervaart en Zuidlede is gebruik gemaakt van de tijdreeksen uit waterinfo.be met de metingen bij Mendonk. Dit betreft het totale debiet voor de Moervaart en Zuidlede samen. Op de Moervaart is ook een meetlocatie bij Sinaai beschikbaar. De waarden bij Sinaai zijn overwegend echter veel lager dan bij Mendonk, doordat er tussen deze twee meetlocaties door diverse pompstations op de Moervaart wordt afgewaterd. Hierover is geen informatie beschikbaar. Voor de Zuidlede is geen afvoerdata beschikbaar. Om deze redenen is alleen de debietmeting op de Moervaart bij Mendonk gebruikt voor het totale debiet vanaf de Moervaart en Zuidlede samen.

Er zijn door de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) debieten afgeleid uit het model van IMDC (2021). Dit model geldt voor hoogwaterberekeningen. Uit een steekproef van vier hoogwaters volgde dat het aandeel van de Zuidlede ongeveer 45-51% was van het aandeel van de Moervaart (dus ongeveer een verhouding 1:2 voor Zuidlede:Moervaart). Rond de pieken viel dat aandeel terug naar 25% of steeg het tot 65%. Op basis van deze informatie is de globale inschatting gemaakt dat 2/3 van de afvoer bij Mendonk afkomstig is van de Moervaart en 1/3 van de Zuidlede. Bij gebrek aan andere informatie is deze bron van informatie toch ook toegepast voor droge periodes, in alle berekeningen en scenario's toegepast. Deze aanname is een grote bron van onzekerheid.

4.3.5. Avrijevaart

Voor de Avrijevaart zijn geen afvoergegevens bekend. Omdat een afvoer van nul numerieke problemen op kan leveren, is een afvoer van 0,1 m³/s toegepast als constante waarde.

4.3.6. Schutverliezen Terneuzen

Schutverliezen zijn berekend met de Zeesluisformulering (zie §4.4.1) en per sluis opgelegd aan SOBEK in de vorm van een onttrekking via een lateraal debiet. In de Zeesluisformulering is geïmplementeerd dat per schutcyclus een volume water het kanaal uitstroomt ter grootte van de schutschijf: het oppervlak van de betreffende sluiskolk vermenigvuldigd met het waterstandsverschil tussen het kanaal en de Westerschelde. Scheepsbezetting heeft geen invloed op schutverliezen. Voor de waterstanden op het kanaal is voor de kalibratie de waterstand bij meetpunt Sluiskil Brug (KGTB) aangehouden, voor de Westerschelde het meetpunt Terneuzen (TERNZN). De kolkoppervlaktes zijn toegepast zoals vermeld in Tabel 2-2.

De schutcycli zijn gebaseerd op de data van Rijkswaterstaat met daarin de tijdstippen van passages en leegom schuttingen. Passages met een identiek tijdstip en zelfde sluiskolk behoren tot dezelfde schutting. Per schutting (opschutting of afschutting) is een halve schutschijf in rekening gebracht als schutverlies, aangezien het schutverlies geldt voor een volledige schutcyclus. De schutverliezen zijn per dag omgezet naar een daggemiddeld schutverlies in m³/s door te sommeren en te delen door het aantal seconden in een dag (86400). Als passagetijdstippen te dicht opeen liggen, zijn deze beschouwd als één schutting. De minimale tijdsduur van een schutting (opschutting of afschutting, dus halve schutcyclus) is gebaseerd op Tabel 5-1 uit MARIN (2015) en is 13,1 minuten voor de Westsluis en 10 minuten voor de Oostsluis en Middensluis. De tijdsduur van een schutting betreft de totale tijd voor het openen van de deuren, het sluiten van de deuren en het nivelleren.

In de periode van 17 maart 2019 tot en met 25 juni 2019 waren in de data van Rijkswaterstaat alle schuttingen toegekend aan de Oostsluis. Deze fout in de data is pragmatisch hersteld door alle zeevaart toe te wijzen aan de Westsluis en de binnenvaart en recreatievaart via een verdeelsleutel aan de drie sluizen: Binnenvaart: Middensluis 20%, Oostsluis 50%, Westsluis 30%; Recreatievaart: Middensluis 33%, Oostsluis 67%. Deze verdeelsleutel is gebaseerd op de verdeling in de overige jaren tussen 2016 en 2021.

4.3.7. Spuidebieten Terneuzen

Voor de spuidebieten bij Terneuzen is geen meetreeks aangehouden, maar deze zijn gebruikt als sluitpost in de waterbalans, om het kanaalpeil overeen te laten komen met de metingen bij meetlocatie Sluiskil Brug (KGTB). De spuidebieten volgen dan op basis van de volgende daggemiddelde waterbalans:

$$Q_{\text{spui}} = Q_{\text{bov}} - Q_{\text{schut}} - A_{\text{KGT}} \cdot \Delta h_{\text{KGT}} / \Delta t, \quad (6)$$

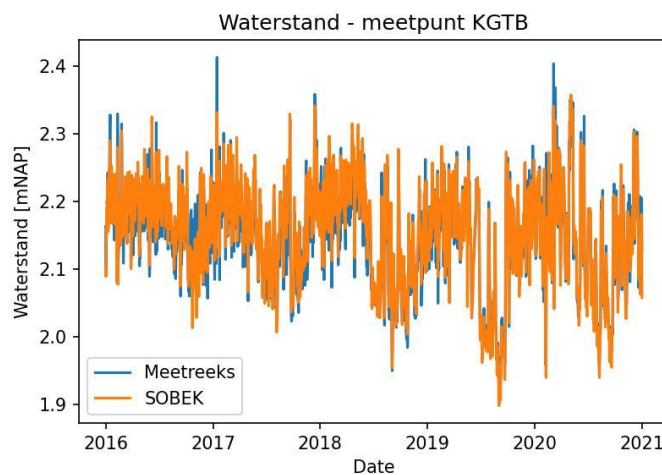
waarbij Q_{spui} het daggemiddelde spuidebiet bij Terneuzen is, Q_{bov} de cumulatieve bovenafvoer van alle brontermen, Q_{schut} het cumulatieve schutdebiet voor de drie sluizen bij Terneuzen (alle in m³/s), A_{KGT}

het oppervlak van het KGT in het SOBEK-model: $A_{KGT}=6,53 \cdot 10^6 \text{ m}^2$. Δh_{KGT} de verandering van de dag-gemiddelde waterstand op het KGT en $\Delta t=86400$ het aantal seconden in een dag.

Er zijn twee uitzonderingen toegepast:

- Als het spuidebiet negatief zou moeten zijn op basis van de waterbalans, stroomt er geen water binnen bij Terneuzen, maar is het zoetwaterdebiet bij de Tolhuisstuw verhoogd om de waterbalans op die dag kloppend te krijgen;
- Als het spuidebiet in de reconstructie van Rijkswaterstaat 0 is, dan hebben de spuikokers dicht gezeten. In zulke gevallen is de 0 een hard getal. Als de waterbalans dan toch om een onttrekking vraagt, is water onttrokken aan het KGT, net benedenstrooms van de samenvloeiing vanuit Evergem en de Tolhuisstuw. Dit punt is opgenomen in Figuur 4-2.

Deze werkwijze leidt tot een goede reproductie van de waterstandsfluctuaties op het kanaal, zo blijkt uit Figuur 4-5. Het is wel essentieel om de juiste beginvoorwaarde voor de waterstand aan het model op te geven, want de beginvoorwaarde heeft in de gehele berekening invloed in een berekening met alleen laterale debieten.



Figuur 4-5: Vergelijking van waterstanden in het SOBEK-model met meetwaarden bij Sluiskil, brug (KGTB)

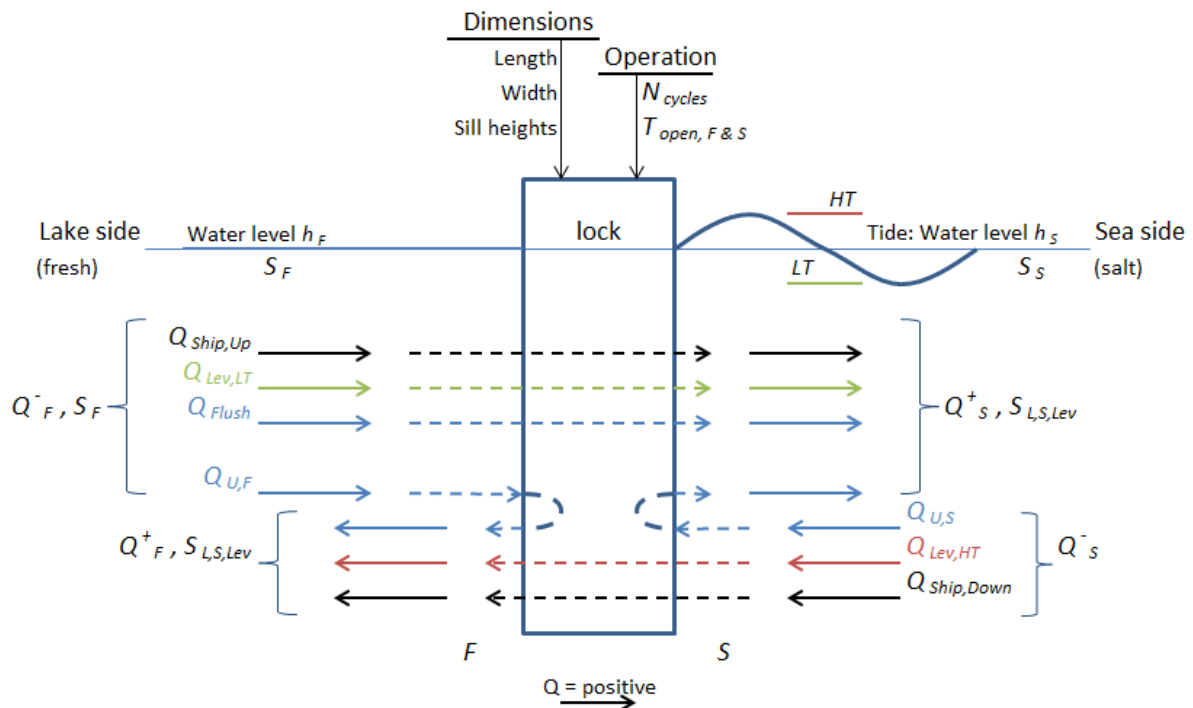
4.4. Randvoorwaarden: zoutuitwisseling

4.4.1. Werkwijze met Zeesluisformulering

De Zeesluisformulering (ZSF) (Vreeken en Weiler, 2021) is niet alleen toegepast voor de eenvoudige berekening van schutverliezen, maar voornamelijk voor het specificeren van de zoutuitwisseling tussen het zoute water aan de Westerscheldezijde en het brakke water aan de kanaalzijde.

De ZSF omschrijft de debieten (Q) in en uit de sluiskolk en de bijbehorende saliniteit (S) tijdens een schutcyclus zoals weergegeven in Figuur 4-6. Hierbij wordt water en zout uitgewisseld tussen de zoetere (F) en de zoutere kant (S) van de sluiskolk. De randvoorwaarden voor de ZSF zijn de waterstanden en saliniteit aan weerszijden van de sluiskolk. Deze randvoorwaarden, samen met de dimensies en het

operationeel beheer van de sluiskolk bepalen de debieten en saliniteit van het water dat de sluiskolk uitstroomt als gevolg van het shutproces. Hierbij is er naast een shutverlies door het waterstandsverschil aan weerszijden van de sluiskolk (Q_{Lev}), ook een uitwisselingsdebiet dat wordt veroorzaakt door de dichtheidsverschillen tussen de zoetere kanaalzijde en de zoutere Westerschelde (Q_U). De scheepvaart bezetting wordt niet meegenomen waardoor Q_{ship} niet van toepassing is. Hetzelfde geldt voor Q_{flush} , er is namelijk geen spraken van spoelen tijdens het shutten bij sluizencomplex Terneuzen.



Figuur 4-6: 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).

De ZSF kan worden toegepast in fasegewijze of cyclusgemiddelde modus. In een cyclusgemiddelde benadering is sprake van een evenwichtssituatie. In elke shutcyclus behoren de saliniteit in de kolk en de uitwisselingsdebieten dan bij een situatie waarbij de betreffende shutting oneindig vaak achter elkaar wordt afgewikkeld. Dit in tegenstelling tot een meer gedetailleerde fasegewijze aanpak, waarin de saliniteit wordt doorgegeven van de ene naar de andere shutcyclus, waarbij het van belang is hoe de deuropentijd varieert van shutting tot shutting.

Voor de huidige modellering is gekozen voor een cyclusgemiddelde aanpak en niet voor een fasegewijze aanpak. Deze keuze is voornamelijk gemaakt omdat voor de toekomstige situatie niet bekend is op welke tijdstippen de shuttingen zullen plaatsvinden en hoe korte en lange deuropentijden op elkaar zullen volgen. De scenario's vanuit de MER zijn alleen gedefinieerd in termen van daggemiddelde shut-frequenties. Op dit detailniveau ligt een cyclusgemiddelde aanpak het meest voor de hand. Wel is via een kalibratie de cyclusgemiddelde aanpak met constante shutfrequentie afgeregeld op een fasegewijze aanpak met variabel interval tussen de shuttingen. Deze kalibratie wordt in meer detail beschreven in §4.4.3.

4.4.2. Toepassing Zeesluisformulering voor KGT

Voor het toepassen van de Zeesluisformulering (ZSF) is per schutmoment een schutfrequentie, een zeewaterstand, een kanaalpeil, een saliniteit aan de zeezijde en een saliniteit aan de kanaalzijde van de sluizen nodig. Op onderdelen is de werkwijze verschillend in de kalibratieberekeningen en de scenario-berekeningen (zie §4.1).

Schutfrequentie:

- In de kalibratieberekeningen zijn de schuttijdstippen gebaseerd op de data van Rijkswaterstaat met daarin de tijdstippen van passages en leegom schuttingen voor de periode 2016 t/m 2021. Omdat het niet bekend is per schuttijdstip of het gaat om een op- of afschutting is de cyclusduur gedefinieerd als de tijd tussen het gegeven schutmoment en het tijdstip van twee schutmomenten later. Als de duur van 1 dag wordt gedeeld door de cyclusduur resulteert dit in de momentane schutfrequentie, uitgedrukt in schutcycli per dag.
- In de scenarioberekeningen is gebruik gemaakt van een vaste schutfrequentie voor de gehele dag, gebaseerd op de scheepvaartscenario's uit de MER (zie §3.3.3). Er wordt in de berekeningen gecorrigeerd voor het verschil in zoutlast tussen berekeningen met een vaste of wisselende schutfrequentie via een kalibratiecoëfficiënt (zie §4.4.3).

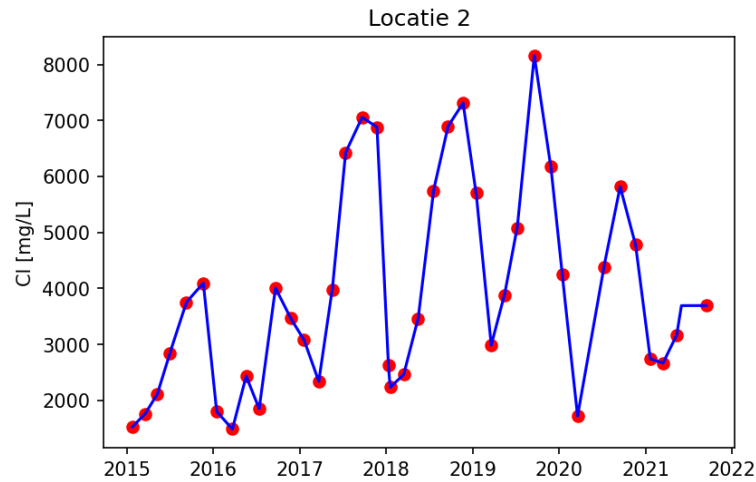
Waterstanden:

- Voor de waterstanden op het kanaal is voor de kalibratieberekeningen de waterstand bij meetpunt Sluiskil Brug (KGTB) aangehouden.
- Voor de scenarioberekeningen volgt het kanaalpeil uit een waterbalansmodel, waarbij de waterstand bij voorkeur op streefpeil wordt gehouden (NAP+2,10 m) en in tijden van watertekort of wateroverschot mag variëren tussen de ondergrens (NAP+1,85 m) en de bovengrens (NAP+2,35 m). Via stremmingen van schutsluizen wordt de ondergrens bewaakt, terwijl spuien ervoor moet zorgen dat de bovengrens niet wordt overschreden.
- De waterstand op de Westerschelde volgt in beide typen berekeningen uit de gemeten waterstanden bij het meetpunt Terneuzen (TERNZN).

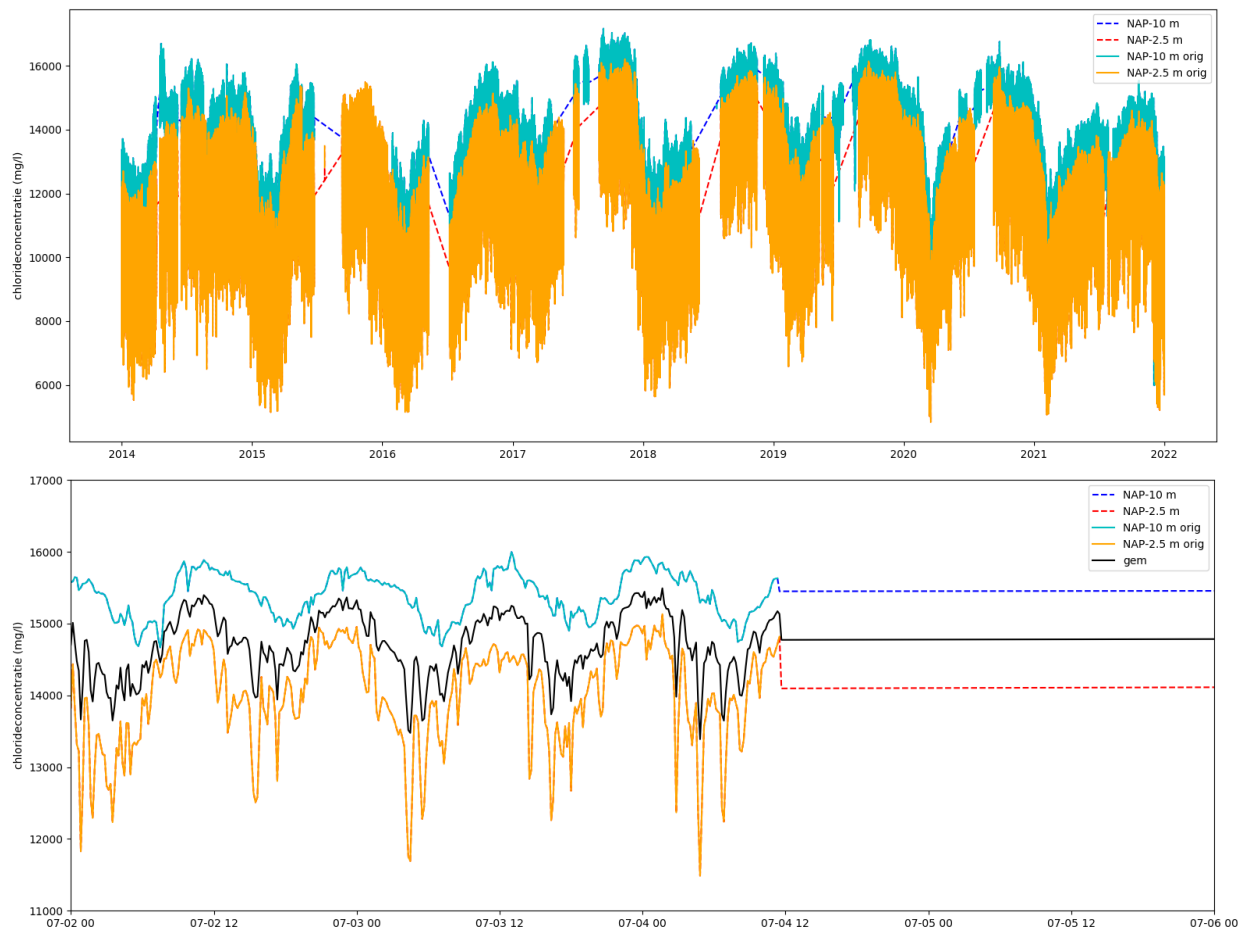
Saliniteit:

- Metingen van zout zijn vaak in termen van de chlorideconcentratie (mg/l), terwijl in de ZSF of in SOBEK het totale zoutgehalte (de saliniteit) gebruikt wordt voor het berekenen van dichtheidsverschillen. Voor het omzetten van tijdreeksen van chlorideconcentraties (g/l) in saliniteit (ppt of psu) is vermenigvuldigd met een standaard factor 1,807.
- In de kalibratieberekeningen is de saliniteit aan de kanaalzijde gebaseerd op de dieptegemiddelde chlorideconcentratie van de TSO-meting op locatie 2 (zie Figuur 4-7). TSO-locatie 2 ligt dicht bij het sluizencomplex maar wel net bovenstrooms van de zoutvang bij de Westsluis (Figuur 4-1).
- In de scenarioberekeningen is in eerste instantie eveneens de chlorideconcentratie bij TSO-locatie 2 gebruikt. Door het vervangen van de Middensluis door de Nieuwe Sluis wordt het KGT echter zouter. Daarom is in een twee iteratie met de ZSF de saliniteit aan de kanaalzijde vervangen door de saliniteit uit het SOBEK-model nabij de sluizen.
- De saliniteit aan de buitenzijde van het sluizencomplex is in beide typen berekeningen gebaseerd op de gemiddelde chlorideconcentratie van de meetreeksen op NAP-2,5 m en NAP-10,0 m in de

Buitenhaven. De gaten in de tijdsreeksen zijn opgevuld door de getijgemiddelde chlorideconcentraties te interpoleren (Figuur 4-8).



Figuur 4-7: Dieptegemiddelde chlorideconcentratie op basis van de 2-maandelijke TSO meting bij locatie 2.



Figuur 4-8: Werkwijze voor het opvullen van gaten in de tijdreeks van de chlorideconcentratie in de Buitenhaven en middeling over de twee verticale niveaus (boven: gehele tijdreeks, onder: detail uit 2017).

Naast deze forcerende krachten is de zoutuitwisseling in de ZSF afhankelijk van de sluisdimensies en de deuropentijden (zie Tabel 4-1 voor gemiddelde deuropentijden per sluis). De deuropentijden (zeezijde plus kanaalzijde) worden berekend als de cyclusduur minus tweemaal de tijdsduur voor nivelleren en bewegen van de deuren. De cyclusduur volgt rechtstreeks uit de schutfrequentie op elk moment. Voor de tijdsduur voor het nivelleren en bewegen van deuren is gebruik gemaakt van de tijden uit Tabel 5-1 van Bijlage 4 van het MER deelrapport Verkeer & Vervoer (2015), waarbij de nivelleertijd afhankelijk is van het waterstandsverschil over de sluis.

Tabel 4-1: Zoutuitwisseltijden en gemiddelde deuropentijden per sluis (bron: MER Deelrapport Water)

Sluis	Zoutuitwisseltijd TLE [min]	Gemiddelde deuropentijd uit SIVAK [min]	Gemiddelde verhouding deuropentijd/zoutuitwisseltijd
Middensluis	8	26	3
Oostsluis	16	32	2
Westsluis	13	42	3
Nieuwe Sluis	20	60	3

De bezettingsgraad door schepen had geen significante invloed op de zoutlast, en is daarom niet toegepast in de definitieve berekeningen met de ZSF.

Het werken met daggemiddelde zeewaterstanden, schutfrequenties en saliniteit leidde wel tot een andere daggemiddelde zoutlast. De variatie over de dag in de sturende parameters werkt sterk niet-lineair door naar de zoutlast richting het kanaal. Daarom is de vereenvoudiging naar een daggemiddelde toepassing van de ZSF niet gemaakt.

4.4.3. Afregeling kalibratiecoëfficiënt deuropentijden

Bij het berekenen van met de ZSF zijn twee vereenvoudigingen toegepast:

1. Een cyclusgemiddelde in plaats van een fasegewijze aanpak (zie §4.4.1)
2. Een constante cyclusduur in plaats van een afwisseling van korte en lange deuropentijden

Het werken met de cyclusgemiddelde modus van de ZSF met een constante schutfrequentie leidt in de praktijk vaak tot een overschatting van de zoutlast. In de cyclusgemiddelde modus wordt uitgegaan van een evenwichtssituatie aan het einde van de schutcyclus. Bij de fasegewijze aanpak wordt een opeenvolging van schutcycli doorgerekend en wordt geen evenwicht gezocht in alle individuele cycli. Voor de werkelijke zoutuitwisseling is het van belang dat de cyclusduur varieert. Een afwisseling van korte en lange deuropentijden leidt namelijk tot een lagere zoutlast dan een opeenvolging van gemiddelde deuropentijden. Als alleen gewerkt wordt met een gemiddelde cyclusduur, zal de zoutlast daarom worden overschat.

Om die reden is een vergelijking gemaakt tussen verschillende typen berekeningen (zie §4.1) met de ZSF:

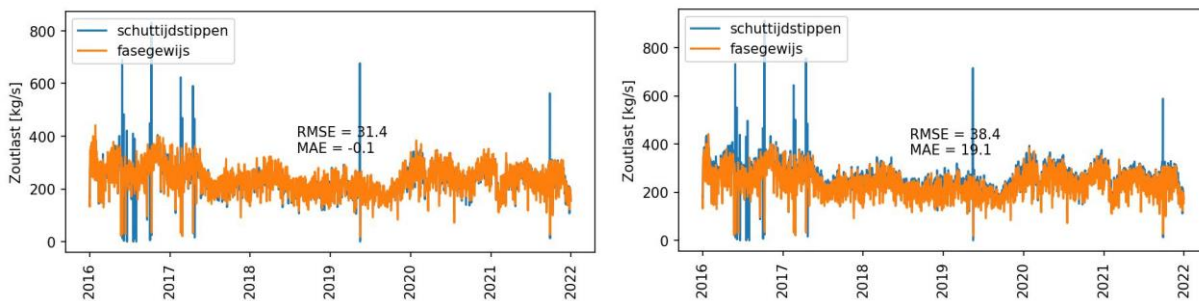
1. Een fasegewijze aanpak met variabele deuropentijden (de beste weergave van de zoutuitwisseling)

2. Een cyclusgemiddelde aanpak met variabele cyclusduur (toegepast in de kalibratieberekeningen)
3. Een cyclusgemiddelde aanpak met constante cyclusduur (toegepast in de scenarioberekeningen)

In de ZSF kan een kalibratiecoëfficiënt worden toegepast, waarmee de deuropentijden worden gereduceerd (bij een kalibratiecoëfficiënt kleiner dan 1,0). Zo kan de zoutlast worden aangepast om te compenseren voor de fouten die gemaakt worden door het toepassen van een cyclusgemiddelde aanpak en het werken met een constante schutfrequentie.

In de kalibratieberekeningen varieert de cyclusduur al op basis van de passagetijdstippen. Toepassing van een kalibratiecoëfficiënt is voor de kalibratie daarom alleen nodig om het effect van de cyclusgemiddelde aanpak in rekening te brengen. In de scenarioberekeningen is daarnaast ook sprake van een constante schutfrequentie (buiten de stremmingen). De kalibratiecoëfficiënt moet in dat geval dus beide vereenvoudigingen afdekken. Uit de vergelijking tussen berekening type 1 en 2 volgen de kalibratiecoëfficiënten voor de toepassing van de ZSF voor de kalibratieberekeningen. Uit de vergelijking tussen berekening type 1 en 3 volgen de kalibratiecoëfficiënten voor de toepassing van de ZSF voor de scenarioberekeningen.

Figuur 4-9 laat een voorbeeld zien van de afregeling van de kalibratiecoëfficiënt voor de cyclusgemiddelde aanpak op variabele schuttijdstippen voor de Westsluis. Bij een kalibratiecoëfficiënt van 1,00 (rechts) ligt de zoutlast gemiddeld 19,1 kg/s te hoog (Mean Absolute Error). Bij een kalibratiecoëfficiënt van 0,75 is de gemiddelde fout nagenoeg nul (links). De kalibratiecoëfficiënt is constant gekozen en varieert niet over de seizoenen of over perioden met of zonder stremmingen.



Figuur 4-9: Voorbeeld van de vergelijking tussen de fasegewijze uitvoer van de ZSF (oranje) en de cyclusgemiddelde uitvoer op variabele schuttijdstippen (blauw) voor de Westsluis bij een kalibratiecoëfficiënt van 0,75 (links) en 1,00 (rechts).

Alle afgeregelde kalibratiecoëfficiënten zijn weergegeven in Tabel 4-2. Voor de Nieuwe Sluis is de waarde voor de kalibratiecoëfficiënt niet bekend. Vanwege de vergelijkbare lengte en diepte van de sluiskolk zijn de waarden van de Westsluis overgenomen.

Tabel 4-2: Toegepaste kalibratiecoëfficiënten voor de deuropentijden in de ZSF bij de twee typen berekeningen en vier sluiskolken

Berekeningstype	WS	MS	OS	NST
Cyclusgemiddeld, variabele tijdstippen	0,75	0,75	0,88	-
Cyclusgemiddeld, constante schutfrequentie	0,65	-	0,75	0,65

4.4.4. Koppeling Zeesluisformulering met SOBEK

De uitkomsten van de Zeesluisformulering (ZSF) zijn via nivelleringsdebieten en uitwisselingsdebieten tussen de sluiskolk en het kanaal aan het SOBEK-model gekoppeld. Dit gebeurt via onttrekkingen en lozingen, waarbij lozingen de saliniteit hebben die de ZSF heeft berekend, terwijl onttrekkingen de saliniteit hebben van het water in het SOBEK-model. De locaties van lozingen en onttrekkingen in het SOBEK-model zijn weergegeven in Figuur 4-10. Hierbij is het netto debiet vanuit het kanaal naar de kolk gelijk aan het schutverlies. De bruto debieten zijn significant hoger omdat er naast het schutverlies ook uitwisseling van zoet en zout water plaatsvindt (de 'uitwisselingsdebieten').

Het bruto debiet van zout water vanuit de kolk naar het kanaal correspondeert met de "discharge to lake" met saliniteit "salinity to lake" uit de ZSF (Q_F^+ en $S_{L,S,Lev}$ uit Figuur 4-6). De afvoer van water vanuit het kanaal naar de kolk correspondeert aan de "discharge_from_lake" uit de ZSF (Q_F^- uit Figuur 4-6) en heeft de saliniteit "salinity from lake" van het SOBEK-modelsegment waar de onttrekking plaatsvindt. De bruto debieten en bijbehorende saliniteit worden uitgerekend per schutmoment (voor de kalibratieperiode) of met een 10-minuten interval (voor de scenario's), en vervolgens omgerekend naar daggemiddelde waarden.

Er bestaat een wederzijdse afhankelijkheid tussen de saliniteit van de kolk en de saliniteit van het kanaal. Daarom is in de scenarioberekeningen een iteratie uitgevoerd, zoals al benoemd in §4.4.2, waarbij de "salinity_from_lake" een update krijgt na het uitvoeren van een eerste berekening met SOBEK. Voor de kalibratieberekeningen is deze iteratieve werkwijze niet toegepast, omdat hier vastgehouden wordt aan de gemeten chlorideconcentraties aan de kanaalzijde.

Het spuidebiet staat los van de ZSF en wordt in het meest benedenstroomse segment van het SOBEK-model onttrokken (zie opnieuw Figuur 4-10).

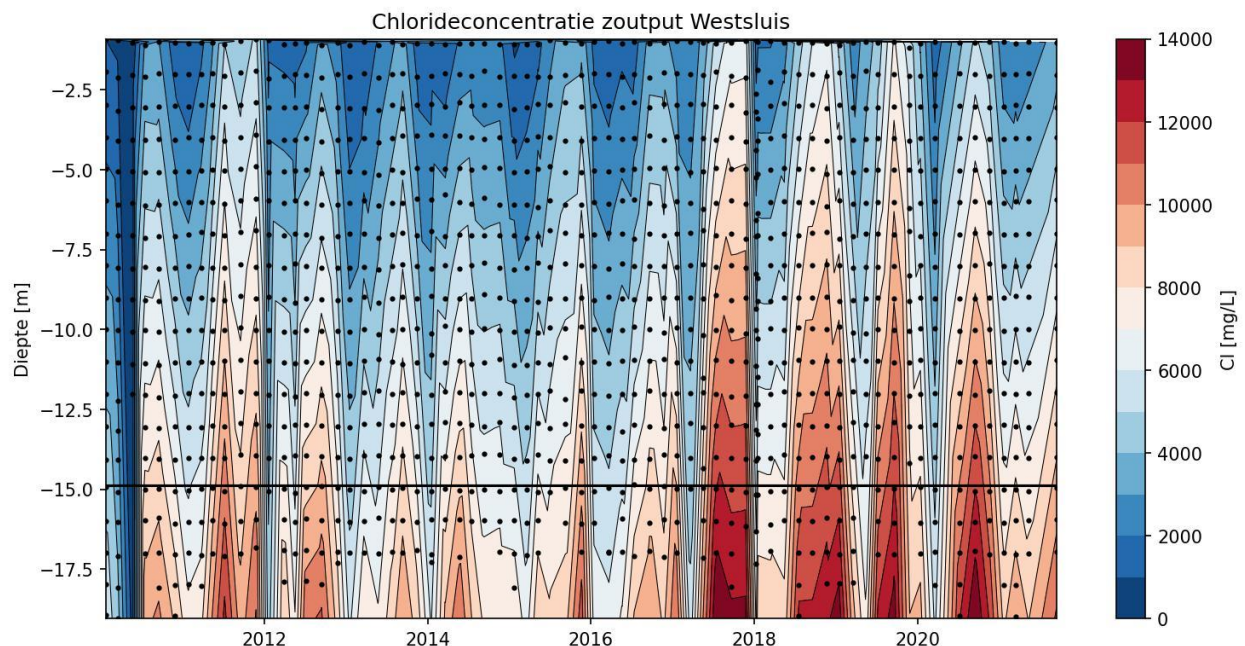


Figuur 4-10: De locaties voor de in- en uitvoer van de uitkomsten van de ZSF in het SOBEK-model.

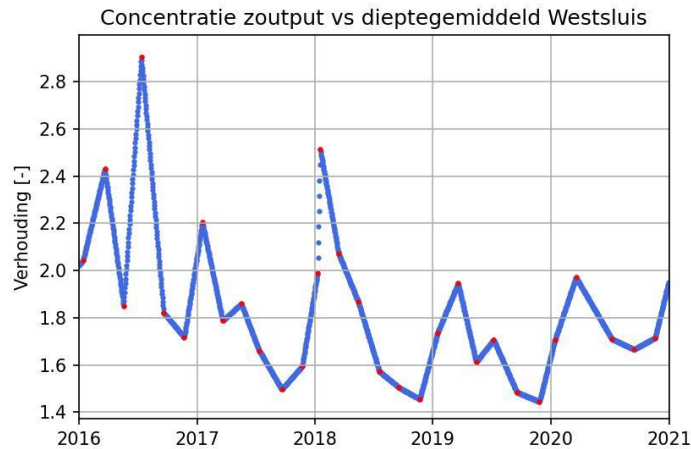
4.4.5. Effect zoutwaterput Westsluis

Om verzilting tegen te gaan, is (zoals reeds benoemd in §2.6) een zoutwaterput aangelegd bij de Westsluis. Vanwege de gelaagdheid is het water dat via de zoutwaterput wordt gespuid zouter dan de dieptegemiddelde concentratie. De gelaagdheid en de hogere concentratie in de zoutwaterput is zichtbaar in Figuur 4-11. Om hiervoor te compenseren is gekeken naar de verhouding tussen de dieptegemiddelde chlorideconcentratie en de gemiddelde chlorideconcentratie binnen de zoutwaterput bij TSO-locatie 1 ter hoogte van de zoutwaterput (Figuur 4-12).

Het water in de zoutwaterput is tussen 1,5 en 3 keer zouter dan dieptegemiddeld (aangeduid als verhouding R). Hiervoor is gecompenseerd door een hoeveelheid van $(R-1) \times \text{spuidebiet}$ extra zout water te onttrekken uit het SOBEK-model en evenveel water met een chlorideconcentratie van 0 mg/l toe te voegen. Qua waterbalans heeft deze werkwijze geen invloed, maar netto wordt er zout aan het model onttrokken. Het extra water wordt gespuid en ook weer toegevoegd op de locaties aangegeven in Figuur 4-10. In de kalibratieberekeningen varieert de verhouding in de tijd, zoals weergegeven in Figuur 4-12. In de scenarioberekeningen zijn representatieve waarden aangehouden: $R=1,6$ voor een droge zomer, 1,8 voor een gemiddelde zomer, 1,7 voor een droge winter en 2,0 voor een gemiddelde winter.



Figuur 4-11: Chlorideconcentratie bij TSO-meetlocatie 1 tussen 2010 en 2021. Diepte is ten opzichte van kanaal-peil. De bovengrens van het zoutriool is aangegeven met de zwarte lijn.



Figuur 4-12: De verhouding tussen de dieptegemiddelde chlorideconcentratie en de chlorideconcentratie binnen de zoutwaterput op basis van de TSO-metingen bij locatie 1.

4.4.6. Zoutgehalte bovenafvoer

Het zoutgehalte van de instroomdebieten bij Evergem, Tolhuisstuw, Moervaart, Zuidlede en Avrijevaart heeft in het SOBEK-model een vaste waarde van 0,1 ppt (zoet water). Dit komt overeen met een chlorideconcentratie van ongeveer 60 mg/l. Dit valt binnen het bereik van metingen op het bovenstroomse deel van de Moervaart (60-100 mg/l, locatie 4000 uit Figuur 4-1) en Zuidlede (50-100 mg/l, locatie 52000 uit Figuur 4-1).

4.5. Kalibratie SOBEK-model

4.5.1. Kalibratieperiode en randvoorwaarden

De zoutmodellering in het SOBEK-model is gekalibreerd op basis van de jaren 2016 tot en met 2020. In het SOBEK-model zijn de volgende instellingen toegepast:

- Bovenafvoeren gespecificeerd in de vorm van laterale debieten (zie §4.3);
- Zoutuitwisseling bij Terneuzen door koppeling met de ZSF (zie §4.4);
- Onttrekkingen en lozingen voor spui- en schutdebieten zoals weergegeven in Figuur 4-10.

Bij de kalibratie zijn twee parameters gevarieerd:

1. Een vermenigvuldigingsfactor op de uitwisselingsdebieten om het zoutgehalte aan de kanaalzijde van het sluizencomplex in overeenstemming te brengen met de TSO-metingen. (Deze factor komt bovenop de kalibratiecoëfficiënt die is afgeleid in §4.4.3).
2. Dispersiecoëfficiënten voor de verspreiding van zout in het KGT en zijtakken Moervaart en Zuidlede.

4.5.2. Meetgegevens chlorideconcentraties

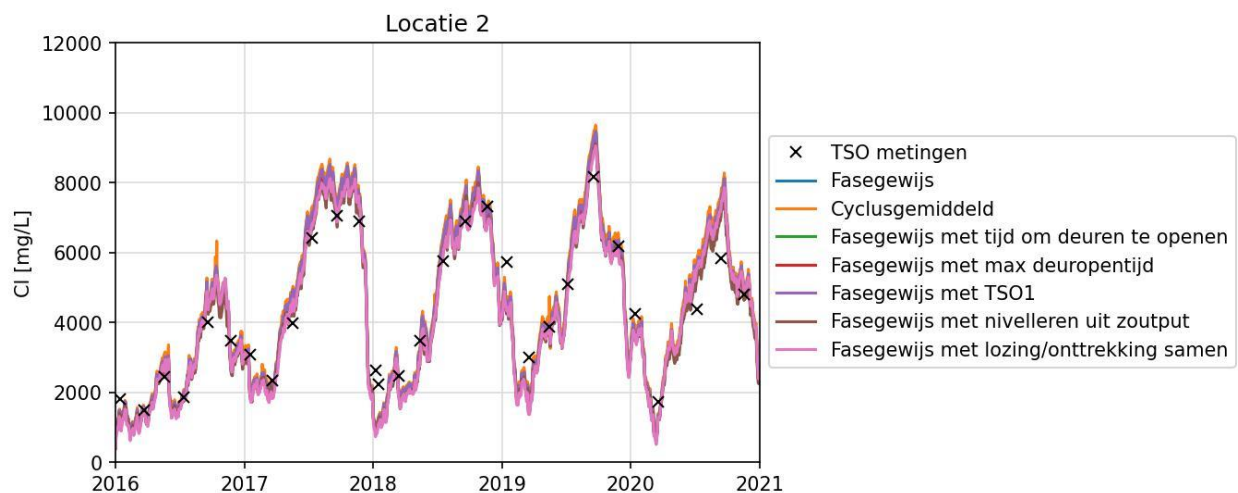
De chlorideconcentratie op het KGT zijn gekalibreerd aan de hand van de TSO-metingen, weergegeven in Figuur 4-1. Bij een TSO-meting (metingen van Temperatuur, Saliniteit en O₂, ofwel zuurstof) wordt een vastgesteld traject gevaren. Op een aantal plaatsen in dit traject wordt over de gehele waterdiepte,

met stappen van circa 1 meter, een aantal parameters gemeten. De TSO-locaties zijn genummerd van 1 bij Terneuzen naar 11 bij Gent. Meetlocatie 1 bevindt zich ter plaatse van de zoutvang bij de Westsluis. Het voordeel van deze metingen is dat ze de gehele verticaal beslaan, waardoor betrouwbaar een dieptegemiddelde concentratie is te berekenen ter vergelijking met SOBEK. Daarnaast bieden deze metingen een databron met een relatief hoog ruimtelijk detailniveau volgens een uniforme werkwijze.

Op de Moervaart en Zuidlede is gebruik gemaakt van metingen van de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). Het gaat dan om de meetpunten 38020 (Moervaart, Mendonk), 40000 (Moervaart, Klein Sinaai), 52500 (Zuidlede, Mendonk), 52200 (Zuidlede, midden), 52000 (Zuidlede, boven). Deze punten zijn in groen weergegeven in Figuur 4-1. Op deze locaties is vanwege de beperkte waterdiepte en het ontbreken van gelaagdheid aangenomen dat de gemeten concentratie gelijk is aan de dieptegemiddelde concentratie.

4.5.3. Kalibratie uitwisselingsdebieten

In het ideale geval leidt rechtstreekse toepassing van de ZSF in SOBEK tot de juiste saliniteit aan de kanaalzijde van het sluizencomplex bij Terneuzen. De saliniteit bleek echter vrij structureel te hoog te liggen in de droge zomers. Daarom zijn eerst diverse pogingen ondernomen om de zoutlast in de ZSF terug te brengen (zie Figuur 4-13). Daaruit bleek dat binnen de mogelijkheden van de ZSF het niet haalbaar was om de zoutlast voldoende ver te reduceren. Daarom is ervoor gekozen om als tussenstap tussen de ZSF en SOBEK een reductiefactor toe te passen op de uitwisselingsdebieten.



Figuur 4-13: Chlorideconcentratie bij TSO-locatie 2 in diverse testberekeningen (lijnen) in vergelijking met de metingen (kruisjes)

De volgende pogingen zijn ondernomen om de zoutlast te verlagen:

- Fasegewijs rekenen in plaats van cyclusgemiddeld,
- Het toevoegen van de tijd om deuren te openen en te sluiten ('deurbeweegtijden'),
- Het maximeren van de deuropentijd op de gemiddelde deuropentijden uit VNSC (2015),
- Het vervangen van de saliniteit aan de kanaalzijde van de reeks bij TSO-2 door TSO-1,
- Het nivelleerdebiet voor de Westsluis onttrekken uit de zoutwaterput via de methode van §4.4.5,

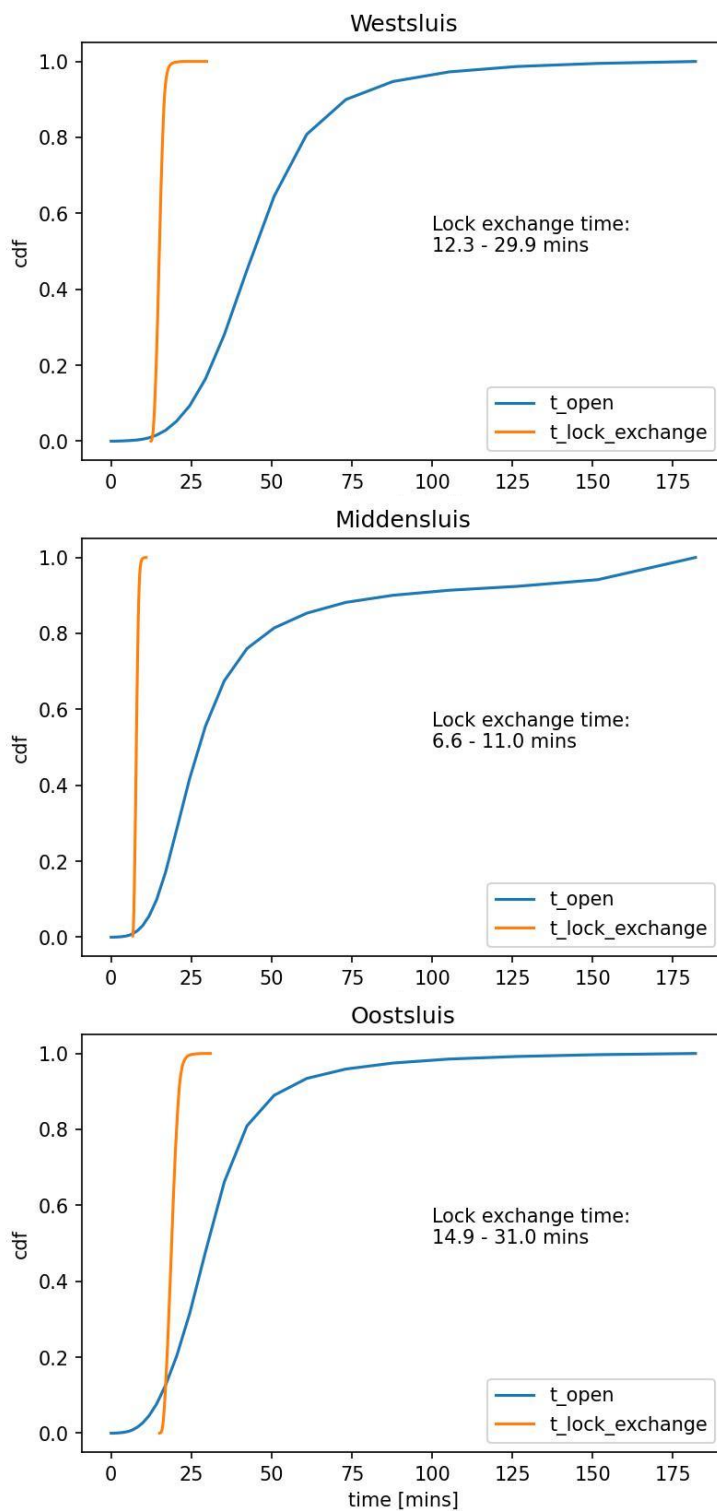
- Het lozen en onttrekken vanuit hetzelfde SOBEK-segment, dus het opheffen van de ruimtelijke scheiding uit Figuur 4-10.

Uit Figuur 4-13 blijkt dat deze tests weinig tot geen invloed hebben op de saliniteit aan de kanaalzijde van de sluizen. De lijnen liggen allemaal op elkaar, en in de zomers vrij structureel boven de metingen.

De beperkte invloed van alle aanpassingen kan deels worden verklaard door de verhouding tussen deuropentijd en zoutuitwisselingstijd te beschouwen. Figuur 4-14 toont deze tijdsduren voor de drie sluis-kolken die in de periode 2016-2021 actief waren. De zoutuitwisselingstijd in de ZSF hangt af van het dichtheidsverschil tussen de kolk en de kanaal- of Westerscheldezijde (die bepaalt de initiële snelheid van de dichtheidsstroming) en de lengte van de sluis-kolk. Omdat de zoutuitwisselingstijd gebaseerd is op de initiële snelheid van de dichtheidsstroming, en deze snelheid gedurende het uitwisselingsproces afneemt, is de zoutuitwisselingstijd een onderschatting van de werkelijke tijd die nodig is voor volledige kolkuitwisseling. Binnen de zoutuitwisselingstijd is ongeveer 80-90% van het zout uitgewisseld tussen de kolk en het kanaal. Voor de lange Oostsluis (280 m) en Westsluis (290 m) is de zoutuitwisselingstijd ongeveer 15 tot 30 minuten. De voormalige Middensluis was duidelijk korter (140 m), wat resulteert in een kortere zoutuitwisselingstijd van ongeveer 7 tot 11 minuten.

Als de cyclusduur wordt verminderd met twee maal de nivelleertijd en de tijd om de deuren te bewegen, resteert een bepaalde tijdsduur. In deze tijdsduur staan de deuren open aan één van de twee zijden van de kolk om de schepen uit en in te laten varen. In principe hebben de sluisbeheerders de instructies gehad om direct daarna de deuren weer te sluiten. Deuropentijden worden niet geregistreerd. Alleen de sluispassages worden bijgehouden in het IVS next (Informatie- en Volgsysteem voor de Scheepvaart). In de praktijk is het alleen vaak zo druk bij de sluizen (zeker nu de Middensluis buiten bedrijf is genomen) dat er eigenlijk nooit tijd is om de deuren tussendoor even dicht te doen. Er varen aan de lopende band schepen in en uit. Alleen in de nachtelijke uren gebeurt dit wel. (Bron: mondelinge communicatie met sluisbeheerders van Rijkswaterstaat). De praktijk is dus dat bij relatief korte schutcycli de deuropentijd niet wordt ingekort, en bij lange schutcycli wel.

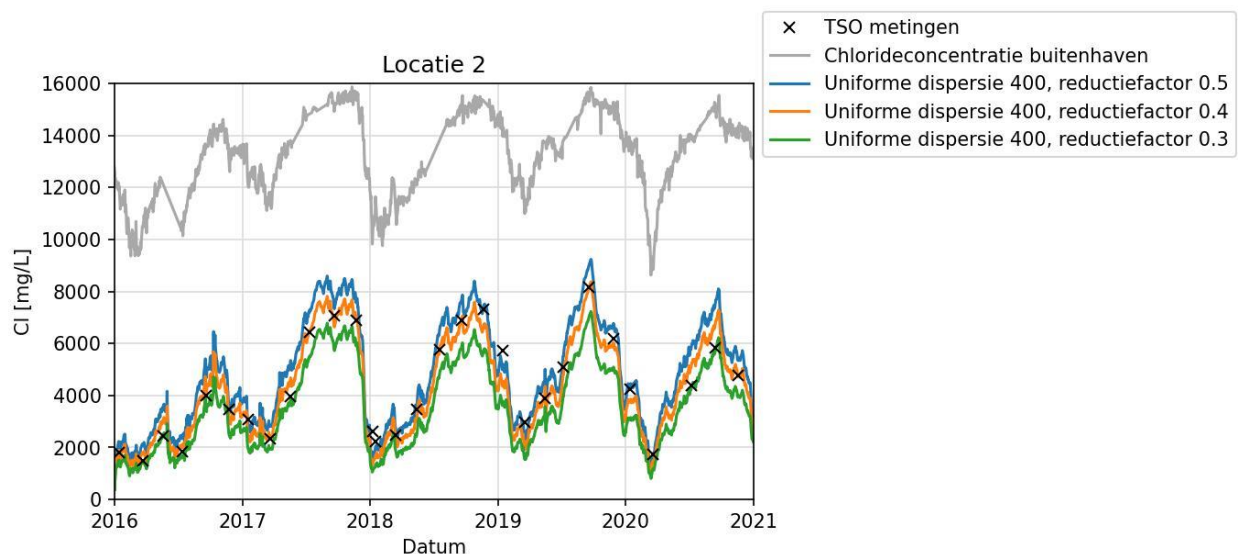
De blauwe lijnen in Figuur 4-14 tonen de verdeling van de maximale deuropentijd: de deuropentijd die ontstaat als de deuren altijd open staan als er niet genivelleerd, geopend of gesloten wordt. Uit deze figuur blijkt dat bij de Westsluis en Middensluis alleen de kortste deuropentijden in de buurt komen van de zoutuitwisselingstijd. In verreweg de meeste schuttingen is de deuropentijd zo lang dat het zout al lang en breed is uitgewisseld voordat de deuren weer dicht gaan. Enige verkorting van de deuropentijd heeft dan weinig effect op de zoutlast. Ook toepassing van het bellenscherm bij de Westsluis is dan niet zinvol, omdat dit alleen de zoutuitwisselingstijd met ongeveer een factor 2 verlengt. Ook dan zijn de deuropentijden veelal nog te lang. Alleen bij de Oostsluis ligt de schutfrequentie zo hoog, dat de deuropentijden in de buurt komen van de zoutuitwisselingstijd. Voor de totale zoutindringing is echter de Westsluis dominant. Bij deze sluis is in 95% van de gevallen de zoutuitwisselingstijd korter dan 17 minuten. De deuropentijd is in 95% van de gevallen langer dan 21 minuten. Slechts sporadisch heeft het inkorten van de deuropentijd dus effect op de zoutuitwisseling. In de meeste gevallen liggen de tijdsduren te ver uit elkaar. Dit maakt de berekende zoutindringing (en ook de werkelijke situatie) vrij ongevoelig voor details in het schutbedrijf, zoals het sneller of langzamer sluiten van de deuren of de inzet van een bellenscherm.



Figuur 4-14: Cumulatieve verdelingsfunctie (cdf) van de deuropentijden (blauw) en zoutuitwisselingstijden (oranje) voor de Westsluis (boven), Middensluis (midden) en Oostsluis (onder).

De conclusie is dat de combinatie van de zoutindringing op basis van de ZSF (gebruik makend van de nu beschikbare operationele data) en de verspreiding op het kanaal door SOBEK resulteert in een te hoge saliniteit in de droge zomers, maar dat er binnen de ZSF geen instellingen beschikbaar zijn waarmee een sterke reductie van de zoutlast kan worden afgedwongen. Daarom is een reductiefactor toegepast op de uitwisselingsdebieten die de ZSF berekent, voordat deze aan SOBEK worden opgelegd. De reductiefactor werkt alleen op de uitwisselingsdebieten, niet op de nivelleringsdebieten. De waterbalans wordt daarom niet beïnvloed.

Uit testberekeningen volgde dat een reductiefactor van 0,4 toegepast op de uitwisselingsdebieten (output van de ZSF) leidde tot de beste reproductie van de saliniteit aan de kanaalzijde van het sluizencomplex, te zien in Figuur 4-15. Er is geen reden om aan te nemen dat de reductiefactor verschillend moet zijn voor de drie sluiskolken. Er is een bellenscherm aanwezig aan beide zijden van de Westsluis, maar zoals eerder beargumenteerd, heeft deze weinig invloed op de zoutindringing. Daarnaast is het bellenscherm aan de binnenzijde van de Westsluis niet meer actief vanaf 2010. Sinds begin 2020 is ook het bellenscherm aan de buitenzijde uitgeschakeld (informatie Rijkswaterstaat Zee en Delta). Ook bij de Oostsluis zijn geen bellenschermen actief. De reductiefactor wordt daarom opgelegd bij alle sluiskolken (ook bij de Nieuwe Sluis).



Figuur 4-15: Kalibratie reductiefactor aan de hand van de chlorideconcentraties dichtbij Terneuzen (TSO-locatie 2). De dieptegemiddelde chlorideconcentratie aan de Westerscheldezijde van de sluizen is weergegeven in grijs.

4.5.4. Kalibratie dispersiecoëfficiënt KGT

In SOBEK wordt de zoutverspreiding in het KGT gemodelleerd via een advectie-diffusievergelijking, waarbij in de meest eenvoudige vorm een uniforme en stationaire dispersiecoëfficiënt wordt toegepast. Advectie is de meevoering van zout met de dwarsprofielgemiddelde stroming. Diffusie is de verspreiding van zout door de aanwezigheid van saliniteitsverschillen in combinatie met (turbulente) menging. In een 1D-model worden alle processen anders dan advectie gevangen in een dispersiecoëfficiënt. Deze

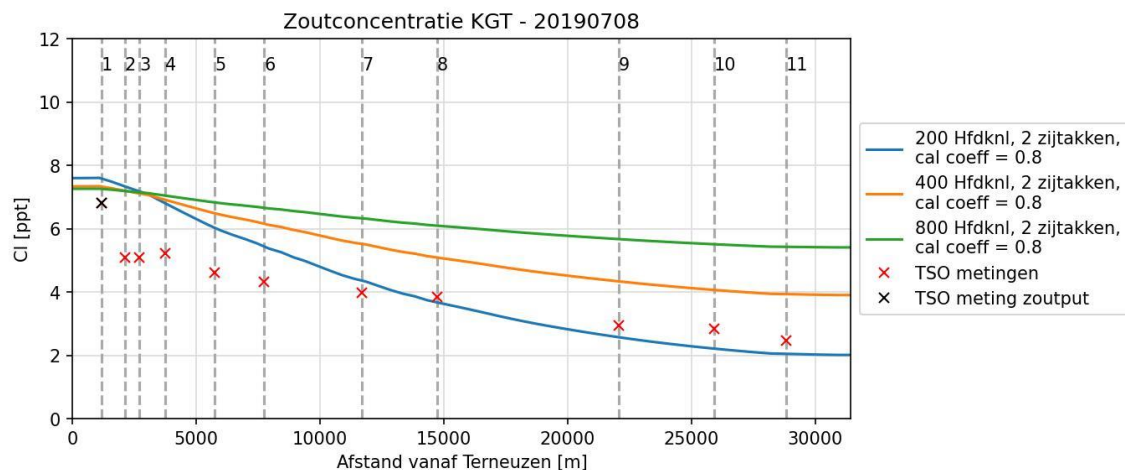
dispersiecoëfficiënt representeert het totaal van alle mengingsprocessen, zoals dichtheidsstroming (gravitatiecirculatie, waarbij zout langs de bodem binnendringt als gevolg van het dichtheidsverschil), scheepvaart en windgedreven stroming. Uit 2DV-modellering voor het KGT (zie Bijlage B: 2DV-modellering KGT) blijkt dat dichtheidsstroming de voornaamste aandrijvende kracht is voor de zoutindringing.

Als alternatief voor de constante dispersiecoëfficiënt zou ook de formulering van Kuipers-Van Rijn kunnen worden toegepast in SOBEK3. Deze formulering kent drie termen:

- Een f_1 -term met een constante dispersiecoëfficiënt
- Een f_3 -term voor schuifspanningsdispersie (shear dispersion)
- Een f_4 -term voor estuariene menging

Estuariene menging is niet aan de orde in een systeem zonder getij. Daarom is de f_4 -term op nul gezet. Het toevoegen van een f_3 -term aan het model leidde niet tot een merkbare verandering van de modelresultaten ten opzichte van de f_1 -term met constante dispersie. De mogelijkheid om de chlorideconcentraties in het watersysteem te beïnvloeden via de f_3 -term is zeer beperkt. Daarom is ervoor gekozen om de Kuipers-Van Rijn formulering niet toe te passen, en de zoutmodellering te beperken tot een eenvoudige advectie-diffusievergelijking met een stationaire dispersiecoëfficiënt. Deze dispersiecoëfficiënt kan eventueel wel ruimtelijk variëren. Meer achtergronden over zoutmodellering in SOBEK3 is te vinden in Deltares (2016) of Daniëls (2016).

Als de zoutlast bij het sluizencomplex van Terneuzen zodanig wordt gekozen dat de chlorideconcentraties nabij de sluizen goed worden gereproduceerd, kan de zoutindringing in bovenstroomse richting goed worden beschreven met een uniforme dispersiecoëfficiënt voor het gehele KGT. Figuur 4-16 toont een voorbeeld van een resultaat met uniforme dispersiecoëfficiënt (en zonder reductiefactor), met het verloop van de dieptegemiddelde chlorideconcentraties langs het kanaal op 8 juli 2019.



Figuur 4-16: Voorbeeld van reproductie van dieptegemiddelde chlorideconcentraties langs het KGT met een uniforme dispersiecoëfficiënt voor het gehele KGT (zonder reductiefactor op de zoutlast)

Waar met de reductiefactor op de uitwisselingsdebieten de zoutwaarde nabij de sluizen kan worden afgeregeld, kan de dispersiecoëfficiënt worden gebruikt om de gradiënt in dieptegemiddelde chloride-concentratie langs het KGT te reproduceren. De trend in de lijn van TSO-meetpunt 2 naar 11 kon het beste worden gereproduceerd met een dispersiecoëfficiënt van ongeveer 450 m²/s. In Bijlage B: 2DV-modellering KGT, is aangetoond dat deze hoge dispersiecoëfficiënt nodig is om het dominante effect van dichtheidsstroming te representeren, wat niet wordt gemodelleerd in het 1D SOBEK-model.

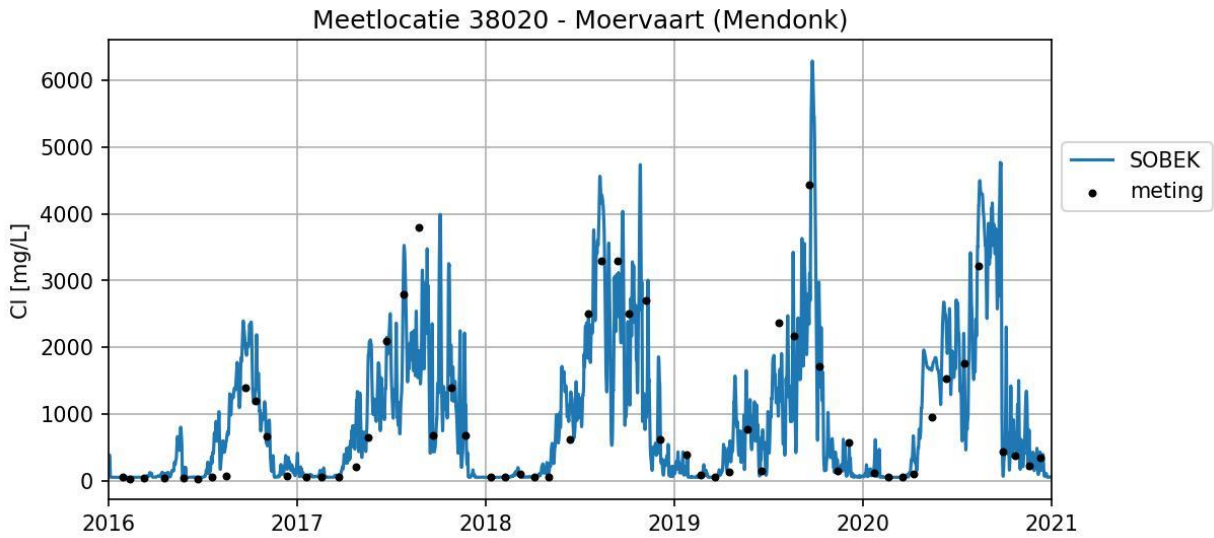
Het eindresultaat van de kalibratie is dus een reductiefactor op de uitwisselingsdebieten van 0,4 en een uniforme dispersiecoëfficiënt van 450 m²/s.

4.5.5. Kalibratie dispersiecoëfficiënt zijtakken

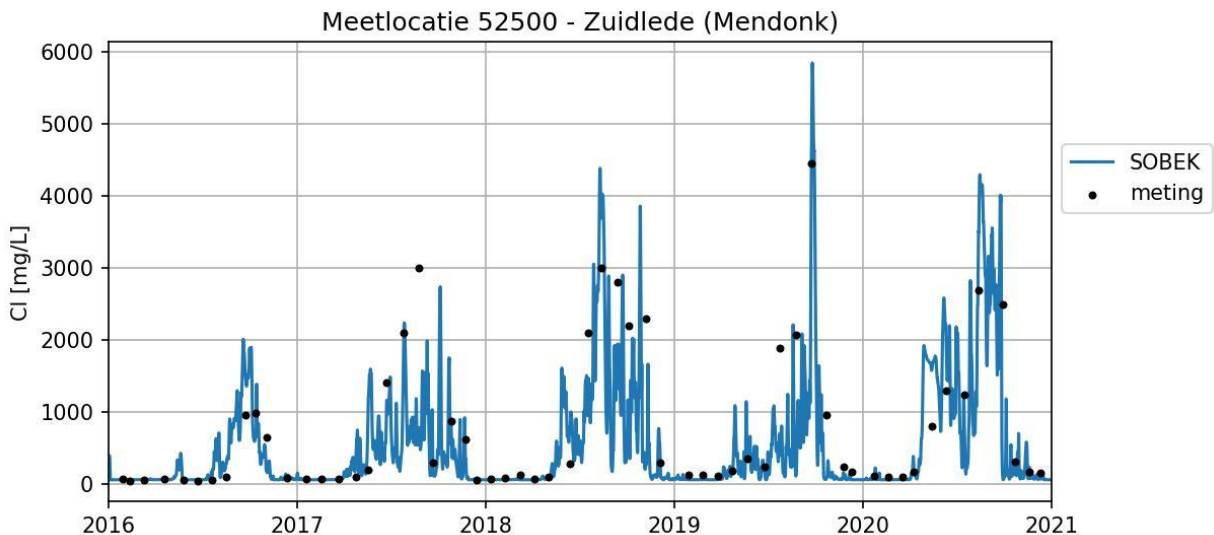
Na het kalibreren van de zoutverspreiding op het KGT is de vervolgstap gemaakt naar het kalibreren van de dispersiecoëfficiënten op de Moervaart en Zuidlede. Op deze zijtakken bleken lagere dispersiecoëfficiënten nodig te zijn dan op het KGT, om de zoutverspreiding in het model te laten aansluiten op de metingen in de zijtakken.

Figuur 4-1 toont de meetlocaties op de Moervaart en Zuidlede. Bij de punten die relatief dicht op het kanaal liggen, op de Moervaart bij Mendonk (meetlocatie 38020, Figuur 4-17) en op de Zuidlede bij Mendonk (meetlocatie 52500, Figuur 4-18), bleek een waarde van ongeveer 15 m²/s het meest geschikt. Daarom is de waarde van 15 m²/s gekozen voor beide zijtakken.

Het is fysisch goed verklaarbaar dat de benodigde dispersiecoëfficiënt voor de zijtakken (15 m²/s) veel lager is dan voor het KGT (450 m²/s). De Zuidlede en Moervaart zijn ondiepe waterlopen (1 à 2 meter diep), waarin geen dichtheidsstroming optreedt, waarin de turbulentie zeer beperkt is, en waarin weinig (Moervaart) tot geen (Zuidlede) scheepvaart plaatsvindt. De dispersie van zout is beperkt in dergelijke kanalen, en de zoutverspreiding wordt gedomineerd door advectie: meevoering van zout met de dieptegemiddelde stroming. Zout kan zich in een advectie-gedomineerd systeem alleen in bovenstroomse richting bewegen als de stromingsdruk nagenoeg wegvalt of als de stroming omkeert van richting.

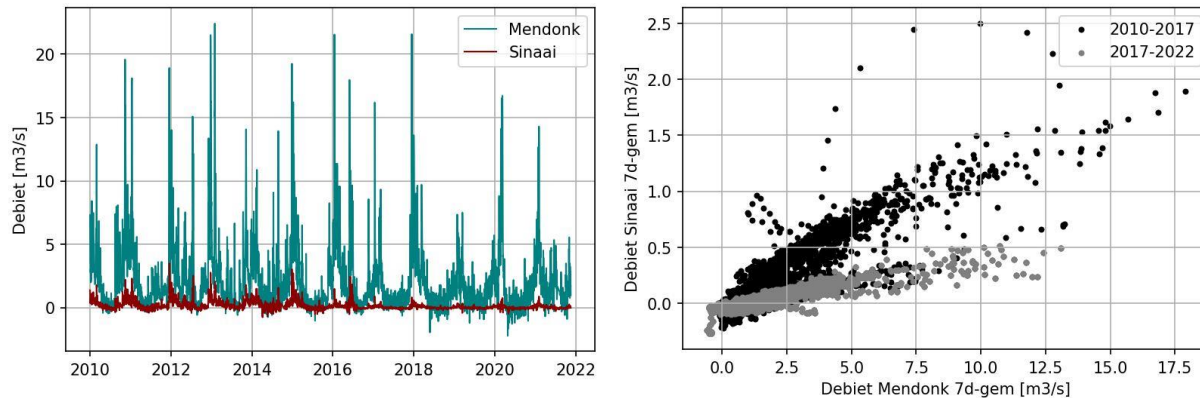


Figuur 4-17: Vergelijking tussen metingen en modelresultaten voor meetlocatie 38020 (Moervaart, Mendonk) bij een dispersiecoëfficiënt van $15 \text{ m}^2/\text{s}$ op de zijtakken



Figuur 4-18: Vergelijking tussen metingen en modelresultaten voor meetlocatie 52500 (Zuidlede, Mendonk) bij een dispersiecoëfficiënt van $15 \text{ m}^2/\text{s}$ op de zijtakken

Op de Moervaart bij Klein-Sinaai (meetlocatie 40000, Figuur 4-23) zijn in de gehele periode 2016 tot en met 2020 geen verhoogde chlorideconcentraties gemeten. Bij een dispersiecoëfficiënt van slechts 10 of $15 \text{ m}^2/\text{s}$ is er volgens SOBEK echter nog wel sprake van verzilting, maar dan gaat dit wel om kortdurende gebeurtenissen met een piekwaarde van minder dan 1000 mg/l . Dit verschil tussen model en metingen is toe te schrijven aan de eenvoudige aanname dat 2/3 van het debiet bij Mendonk over de gehele Moervaart stroomt (zie §4.3.4), helemaal vanaf Sinaai tot aan de samenvloeiing met de Zuidlede. In werkelijkheid is het debiet bij Sinaai echter veel lager dan 2/3 van het debiet bij Mendonk, zie Figuur 4-19.

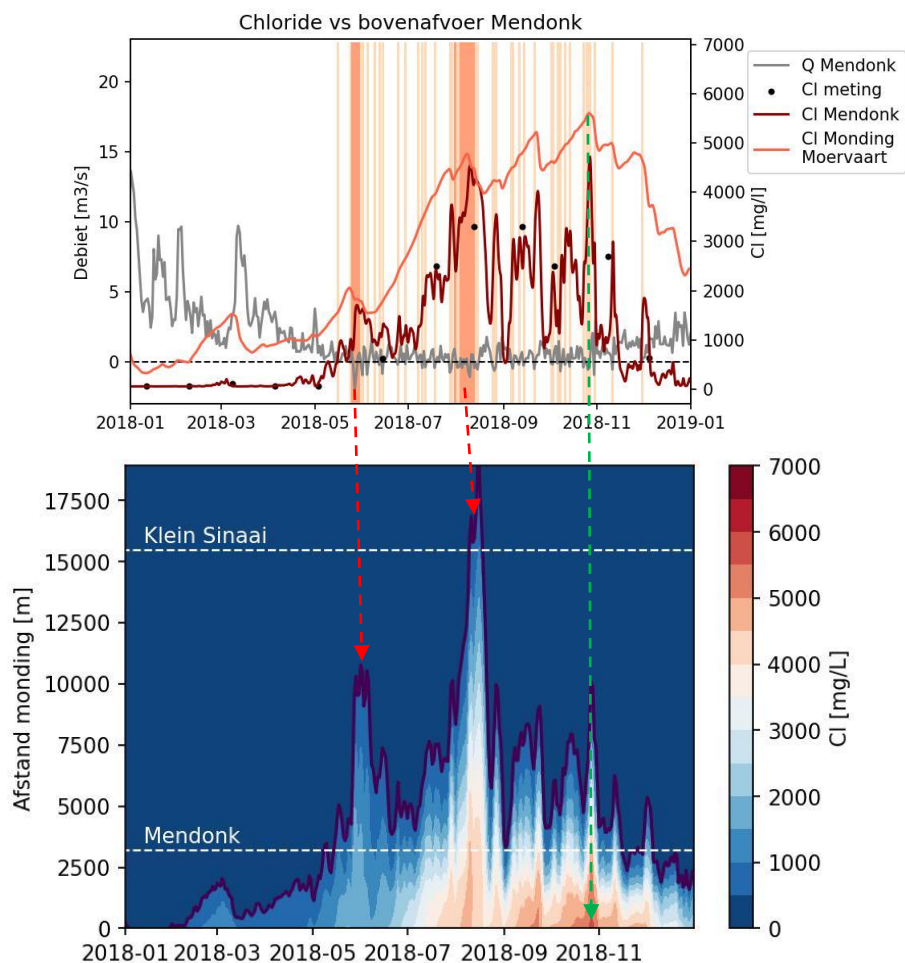


Figuur 4-19: Tijdreeksen van het debiet op de Moervaart bij Mendonk en Sinaai (links), en de verhouding tussen de 7-daags gemiddelde waarden voor 2010 t/m 2016 en 2017 t/m 2022 (rechts).

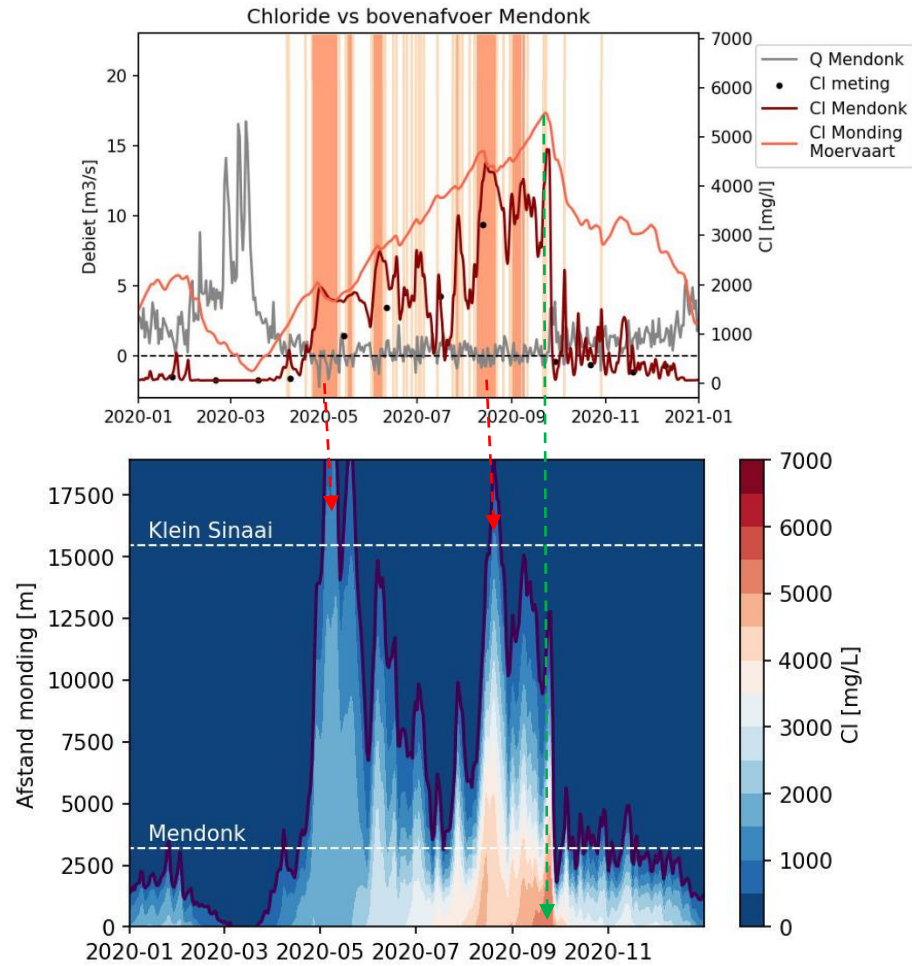
Zoals reeds benoemd in §2.8: een groot deel van het debiet bij Mendonk is afkomstig van diverse pompgemalen langs de Moervaart en Zuidlede, die vanwege een gebrek aan meetgegevens niet zijn opgenomen in het SOBEK-model. In perioden met veel neerslag houdt dit in dat het debiet, gaande van Mendonk richting Sinaai, steeds sterker wordt overschat.

Andersom geldt ook dat negatieve debieten op grote delen van de Moervaart en Zuidlede worden overschat. In de droge jaren 2017 tot en met 2022 is het regelmatig voorgekomen dat het debiet op de Moervaart bij Mendonk negatief is, met waarden van -1 tot -3 m³/s (zie Figuur 4-19). Onder de aanname dat 2/3 van het debiet bij Mendonk vanaf de Moervaart komt, stroomt in het SOBEK-model ook 2/3 van het negatieve debiet over de Moervaart, van Mendonk tot aan Sinaai, terwijl ze waarschijnlijk toe te schrijven zijn aan captaties door boeren rondom Moerbeke (zie §2.8).

Het optreden van negatieve debieten is belangrijk voor de zoutindringing op de Moervaart. Figuur 4-20 en Figuur 4-21 tonen twee voorbeelden van de reactie van het zout op de stroomrichting in de Moervaart, voor de droge zomers van 2018 en 2020. Perioden met een langdurig negatief debiet (oranje gearceerd in het bovenste deel van de figuren) gaan samen met pieken in de zoutindringing in SOBEK (het onderste deel van de figuren). De timing van de zoutpieken hangt af van het debiet door de Moervaart (rode pijlen), de hoogte van de zoutpieken hangt af van de chlorideconcentratie op het KGT, de bron van het zout (groene pijlen).



Figuur 4-20: Het debiet bij Mendonk (boven, grijs), met een indicatie van perioden met een negatief debiet (oranje arcering), samen met de zoutindringing uit SOBEK in dezelfde periode in 2018 (onder)



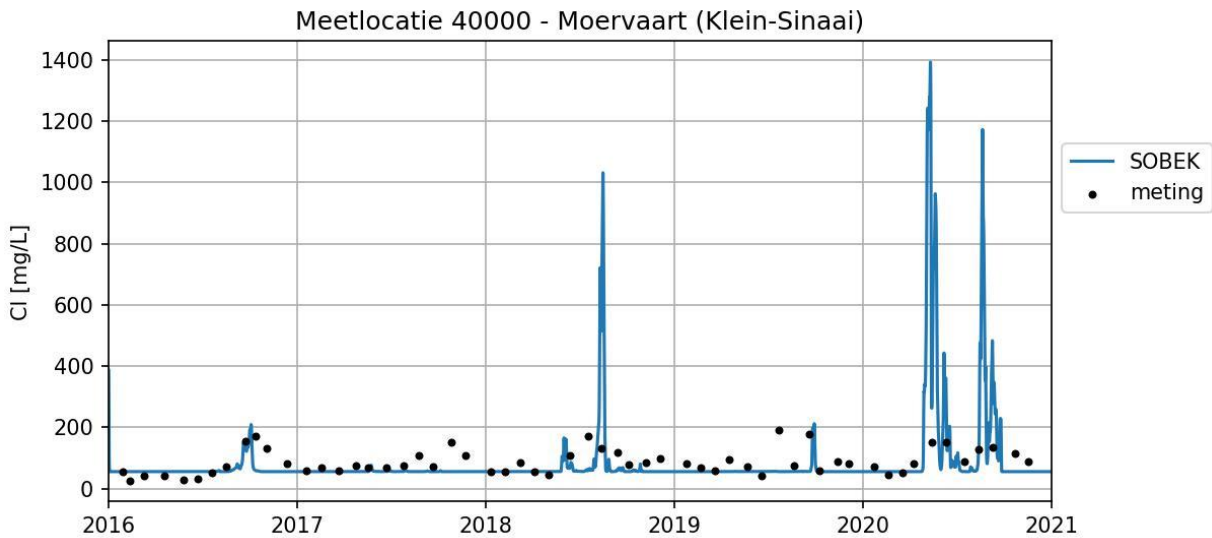
Figuur 4-21: Het debiet bij Mendonk (boven, grijs), met een indicatie van perioden met een negatief debiet (oranje arcering), samen met de zoutindringing uit SOBEK in dezelfde periode in 2020 (onder)

Op de Zuidlede zijn de modelresultaten van SOBEK alleen bruikbaar vanaf Eksaarde, omdat hier een aarden dam in het riviertje ligt (Figuur 4-22), waardoor de panden bovenstrooms en benedenstrooms van Eksaarde niet in open verbinding staan met elkaar. Benedenstrooms van Eksaarde (meetlocatie 52200, Figuur 4-24) treedt in de metingen regelmatig verzilting op. Het concentratieverloop lijkt hier in kwalitatieve zin op het verloop op de Zuidlede bij Mendonk (meetlocatie 52500). Het model geeft overwegend een onderschatting van de chlorideconcentraties nabij Eksaarde.

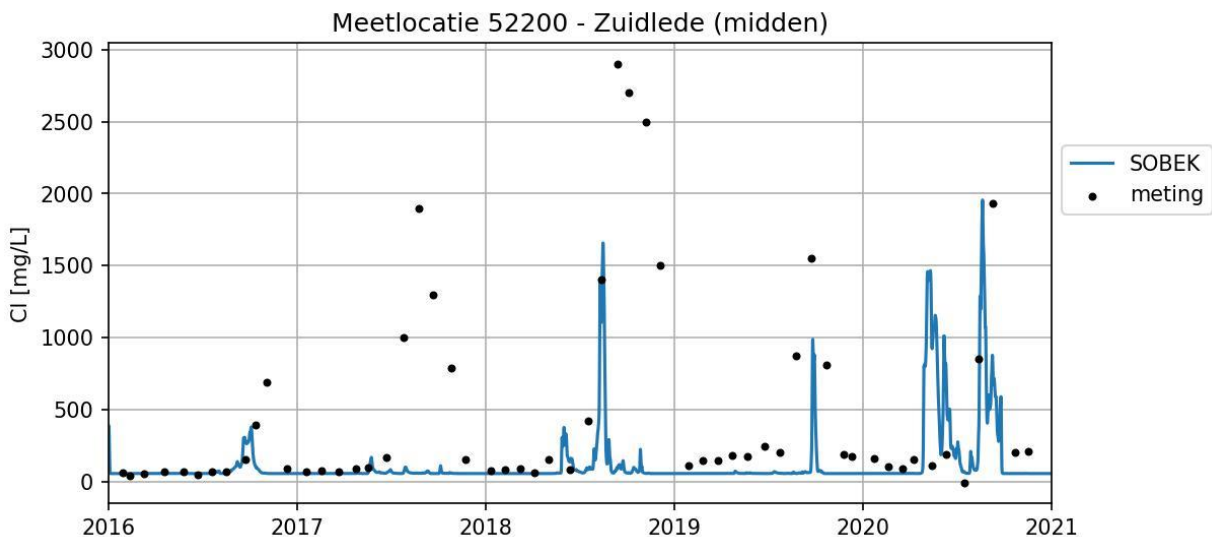
In tijden van droogte is er mogelijk nauwelijks afvoer over de Zuidlede. De ruwe aanname van een debiet van 1/3 van het debiet op de Moervaart bij Mendonk (zie §4.3.4) zou dan een overschatting zijn. De stroming keert volgens de beheerder ook regelmatig om als gevolg van waterstandsfluctuaties op het KGT (zie §2.8). Hierdoor kan zout vanaf de Moervaart vrij makkelijk helemaal doordringen tot aan Eksaarde. De onderschatting van de chlorideconcentraties nabij Eksaarde is dus naar verwachting meer het gevolg van het volledig ontbreken van informatie over debieten op de Zuidlede dan van een verkeerde dispersiecoëfficiënt in SOBEK.



Figuur 4-22: Aarden dam in de Zuidlede bij Eksaarde



Figuur 4-23: Vergelijking tussen metingen en modelresultaten voor locatie 40000 (Moervaart, Klein-Sinaai) bij een dispersiecoëfficiënt van $15 \text{ m}^2/\text{s}$ op de zijtakken

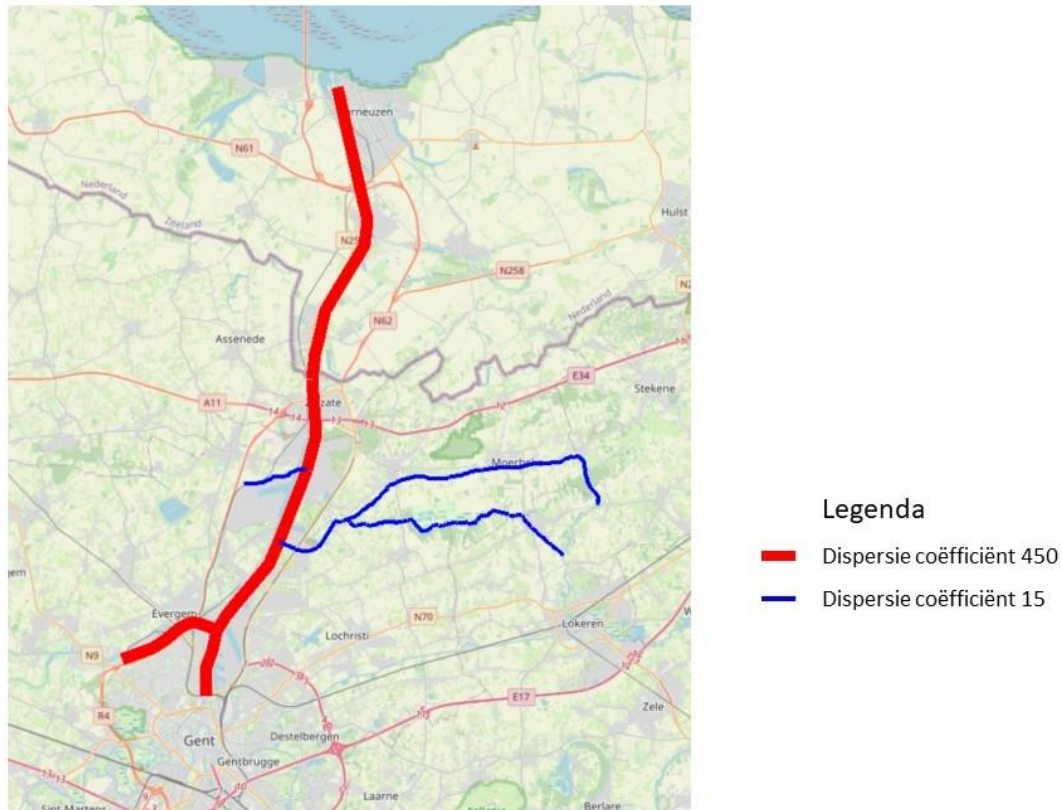


Figuur 4-24: Vergelijking tussen metingen en modelresultaten voor locatie 52200 (Zuidlede, midden) bij een dispersiecoëfficiënt van $15 \text{ m}^2/\text{s}$ op de zijtakken

De zoutmodellering op de Moervaart en Zuidlede verloopt dus vrij moeizaam door het ontbreken van gedetailleerde informatie over pompdebieten en onttrekkingen (captaties). De invloed daarvan is groot, zo blijkt bijvoorbeeld uit het verschil in afvoer op de Moervaart tussen Mendonk en Sinaai. Het is niet bekend hoe groot de debieten op de Zuidlede in droge perioden zijn. Een testberekening met een verhouding van 5:1 in plaats van 2:1 leidde niet tot een relevante verbetering van het resultaat. Maar de precieze details van het omkeren van de stroming op de Moervaart (door captaties) en Zuidlede (door waterstandsfluctuaties op het KGT) zullen de zoutverspreiding sterk beïnvloeden. Zonder debietmetingen op de Zuidlede is verdere kalibratie van het model niet zinvol. De resultaten van SOBEK zullen voor de Moervaart en Zuidlede met de nodige voorzichtigheid moeten worden geïnterpreteerd.

4.5.6. Eindresultaat kalibratie

Deze paragraaf geeft een vergelijking tussen model en metingen voor de dispersiecoëfficiënten uit Figuur 4-25.

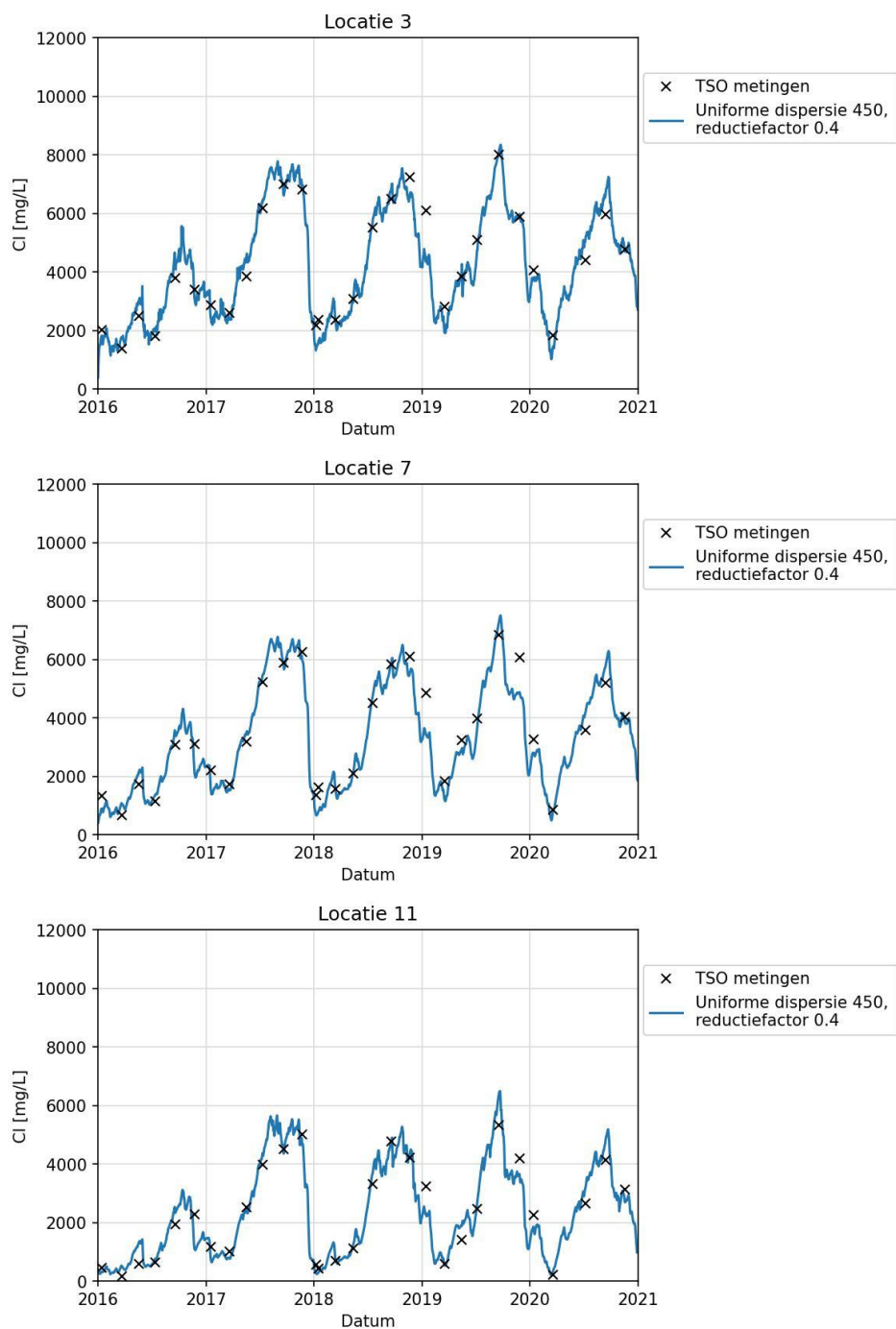


Figuur 4-25: Ruimtelijk variërende dispersiecoëfficiënten (in m^2/s) als eindresultaat van de kalibratie

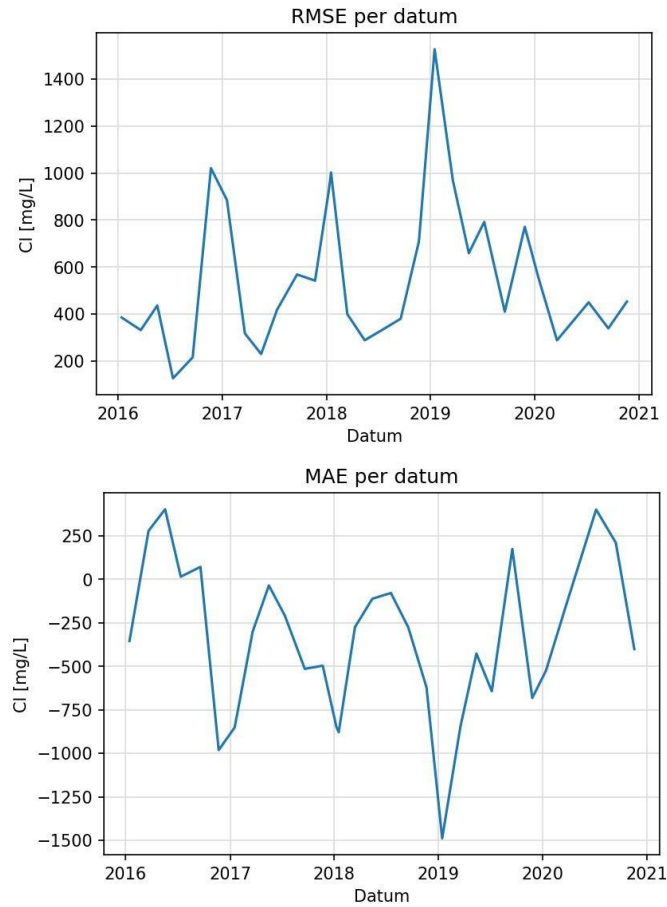
Uit Figuur 4-26 blijkt dat SOBEK goed in staat is om het verloop van de dieptegemiddelde chlorideconcentraties te reproduceren, van bovenstrooms (TSO-locatie 11) tot benedenstrooms (TSO-locatie 3). Bijlage A: kalibratie SOBEK geeft daarnaast in meer detail weer hoe goed de overeenkomst is tussen het model en de TSO-metingen voor alle TSO meetmomenten binnen de kalibratieperiode.

Figuur 4-27 toont de Root-Mean-Square Error (RMSE, wortel van de gemiddelde kwadratische fout) en de Mean Absolute Error (MAE, gemiddelde absolute fout) van de chlorideconcentratie voor het gehele model als functie van de tijd. Daaruit blijkt dat het model beter presteert in de zomers dan in de winters. De zomers zijn in het model afwisselend iets te zout (2016, 2019, 2020) of iets te zoet (2017, 2018) met een RMSE van orde 300 mg/l. De winters zijn overwegend te zoet (RMSE 800-1600 mg/l). Omdat in de tijd variërende dispersiecoëfficiënten niet mogelijk zijn in SOBEK, is een middenweg gezocht. Omdat deze studie zich focust op perioden van droogte, is een middenweg gekozen die vooral in de zomers dicht bij de metingen ligt. Dit is goed te zien in de MAE voor de TSO-metingen langs het kanaal, gemiddeld over de periode van 1 april tot 1 oktober voor 2016-2020, weergegeven in Figuur 4-28. De

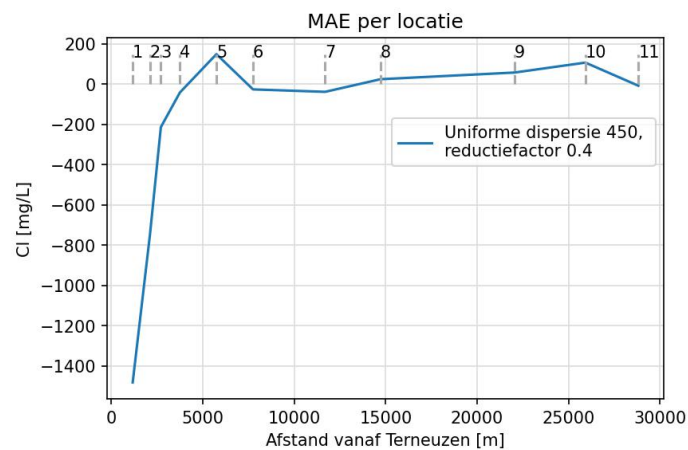
afwijking bij locatie 1 is een consequentie van de aanpak. De zoutvang is dieptegemiddeld in werkelijkheid zouter dan wordt meegenomen in het 1D SOBEK model.



Figuur 4-26: Vergelijking tussen SOBEK (blauwe lijn) en TSO-metingen (zwarte markers) voor de TSO-locaties 3 (bovenste figuur), 7 (middelste figuur) en 11 (onderste figuur)



Figuur 4-27: Het tijdsverloop van de Root-Mean-Square Error (RMSE, boven) en Mean Absolute Error (MAE, onder) voor het gehele gekalibreerde model



Figuur 4-28: Mean Absolute Error (MAE) per TSO-locatie, gemiddeld over de periode 1 april tot 1 oktober voor de jaren 2016 tot en met 2020

4.6. Doorrekenen scenario's

4.6.1. Algemeen

Bij het doorrekenen van de scenario's zijn de debietreeksen uit §3.2.3 aan SOBEK opgelegd, volgens dezelfde uitgangspunten en verdeelsleutels als beschreven in §4.3. Als beginvoorwaarde voor de chlorideconcentratie is een uniforme waarde van 700 mg/l aangehouden. De initiële waterstand is gelijk aan de initiële waterstand uit de betreffende reeks. Deze heeft slechts zeer kortstondig invloed op de berekening. De initiële chlorideconcentratie werkt aanzienlijk langer door. Daarom moet de focus in de analyse vooral liggen op het tweede en derde jaar van de simulaties.

4.6.2. Toepassing Zeesluisformulering in scenarioberekeningen

De scripts voor de schutstrategieën uit §3.3.3 resulteren in daggemiddelde schutfrequenties, stremmingsduren, schutverliezen en spuidebieten. Voor een nauwkeurige modellering van de zoutindringing met de Zeesluisformulering (ZSF) moeten deze daggemiddelde waarden worden omgezet in een tijdsverloop, waarin het verloop van de zeewaterstand en de stremmingen rond laagwater zijn opgenomen.

Voor deze omzetting is met een tijdstap van 10 minuten door de tijdreeksen heen gegaan. Daarbij zijn de laagwaters geselecteerd uit het getijverloop, en de halve stremmingsduur is toegepast aan weerszijden van het moment van laagwater. Binnen de stremming is de schutfrequentie nul, buiten de stremming is de schutfrequentie gelijk aan de streefwaarde uit het scheepvaartscenario GE2030. Bij het berekenen van de schutstrategieën is de vereenvoudiging van formule (3) toegepast. Deze formule is gebaseerd op een sinusvormig getijverloop en een kanaalpeil van NAP+2,10 m. Het werkelijke effect van stremmingen op het schutverlies hangt af van het kanaalpeil, het exacte getijverloop (inclusief mogelijk getij-asymmetrie) en de exacte schuttijdstippen. Deze 10 minuten-reeks vormt de invoer voor de ZSF, waarmee de uitwisselingsdebieten en de bijbehorende zoutconcentraties worden berekend. De uitwisselingsdebieten worden gecorrigeerd met dezelfde reductiefactor die is afgeleid bij de kalibratie (zie §4.5.3).

Om de schutverliezen in SOBEK exact aan te laten sluiten op de schutverliezen uit de scenario's van §3.4.4 (noodzakelijk voor peilbeheersing in SOBEK) is ervoor gekozen om de bruto debieten vanuit het kanaal naar de schutkolken (discharge from lake) aan te passen. Deze aanpassing is gemiddeld vrijwel 0, en varieert ongeveer tussen -0,5 en +0,5 m³/s, waar het daggemiddelde bruto debiet ongeveer 30-40 m³/s is. Deze maatregel voor peilbeheersing in SOBEK heeft geen merkbare invloed op de berekende chlorideconcentraties.

Er bestaat een wederzijdse afhankelijkheid tussen de saliniteit van de kolk en de saliniteit van het kanaal. Daarom is in de scenarioberekeningen een iteratie uitgevoerd, zoals al benoemd in §4.4.2 en §4.4.4, waarbij de saliniteit aan de kanaalzijde in de ZSF een update krijgt na het uitvoeren van een eerste berekening met SOBEK.

4.6.3. Waterstanden uit SOBEK

De met SOBEK berekende waterstanden zijn bij benadering gelijk aan de in de ZSF ingevoerde waterstanden (zoals gepresenteerd in §3.4.4). Er zijn afwijkingen van enkele centimeters, mogelijk door interpolatie in tijdreeksen met randvoorwaarden of numerieke benaderingen in SOBEK. Voor chlorideconcentraties hebben deze waterstandsverschillen geen invloed. Om deze reden zijn de gepresenteerde chlorideconcentraties in dit rapport gebaseerd op SOBEK en de waterstanden op de invoer van de ZSF.

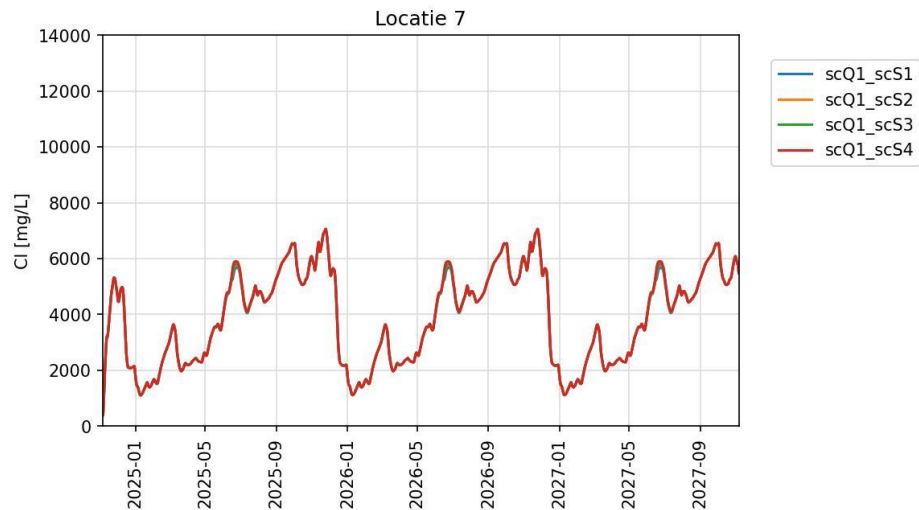
5. Resultaten modellering

Dit hoofdstuk presenteert de resultaten van de SOBEK-modellering voor de gecombineerde scenario's voor bovenafvoer en scheepvaart.

5.1. Resultaten scenarioberekeningen

5.1.1. Gemiddelde situatie

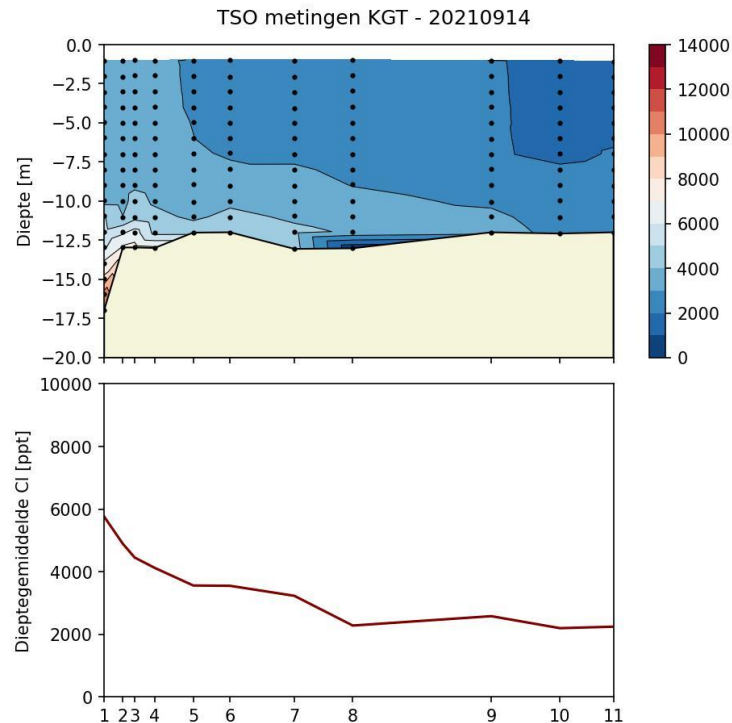
Deze paragraaf beschrijft de resultaten van de oppervlaktewatermodellering voor afvoerscenario Q1, waarin drie gemiddelde winters en drie gemiddelde zomers elkaar opvolgen (zie Figuur 3-4). Figuur 5-1 geeft een voorbeeld van het tijdsverloop van de chlorideconcentraties bij TSO-locatie 7, ongeveer halverwege het KGT. De simulatie beweegt in enkele maanden van zijn beginconcentratie af, waarna de verschillende winters en zomers vrijwel identiek zijn. In Figuur 5-3 wordt daarom voor drie locaties de focus gelegd op alleen het derde jaar van de simulatie (van 6 november tot 6 november). Ter referentie is bij locatie 7 het chloridegehalte bij meetpunt KGTS weergegeven.



Figuur 5-1: Tijdsverloop van de gemodelleerde chlorideconcentraties bij TSO-locatie 7 voor afvoerscenario Q1 i.c.m. de 4 schutstrategieën S1 t/m S4

In de gemiddelde winters daalt de berekende chlorideconcentratie tot ongeveer 2300 mg/l nabij Terneuzen (locatie 3). Nabij Gent (locatie 11) daalt de concentratie dan tot 400 mg/l, wat nog steeds hoger is dan de opgegeven concentratie van het zoete water (60 mg/l) vanuit Evergem en de Tolhuisstuw. In de winter zijn de modelresultaten nagenoeg gelijk aan de chloridemeting bij KGTS. Dit wordt deels veroorzaakt door een onderschatting van de chlorideconcentraties in de winter door het SOBEK model (zie §4.5.6).

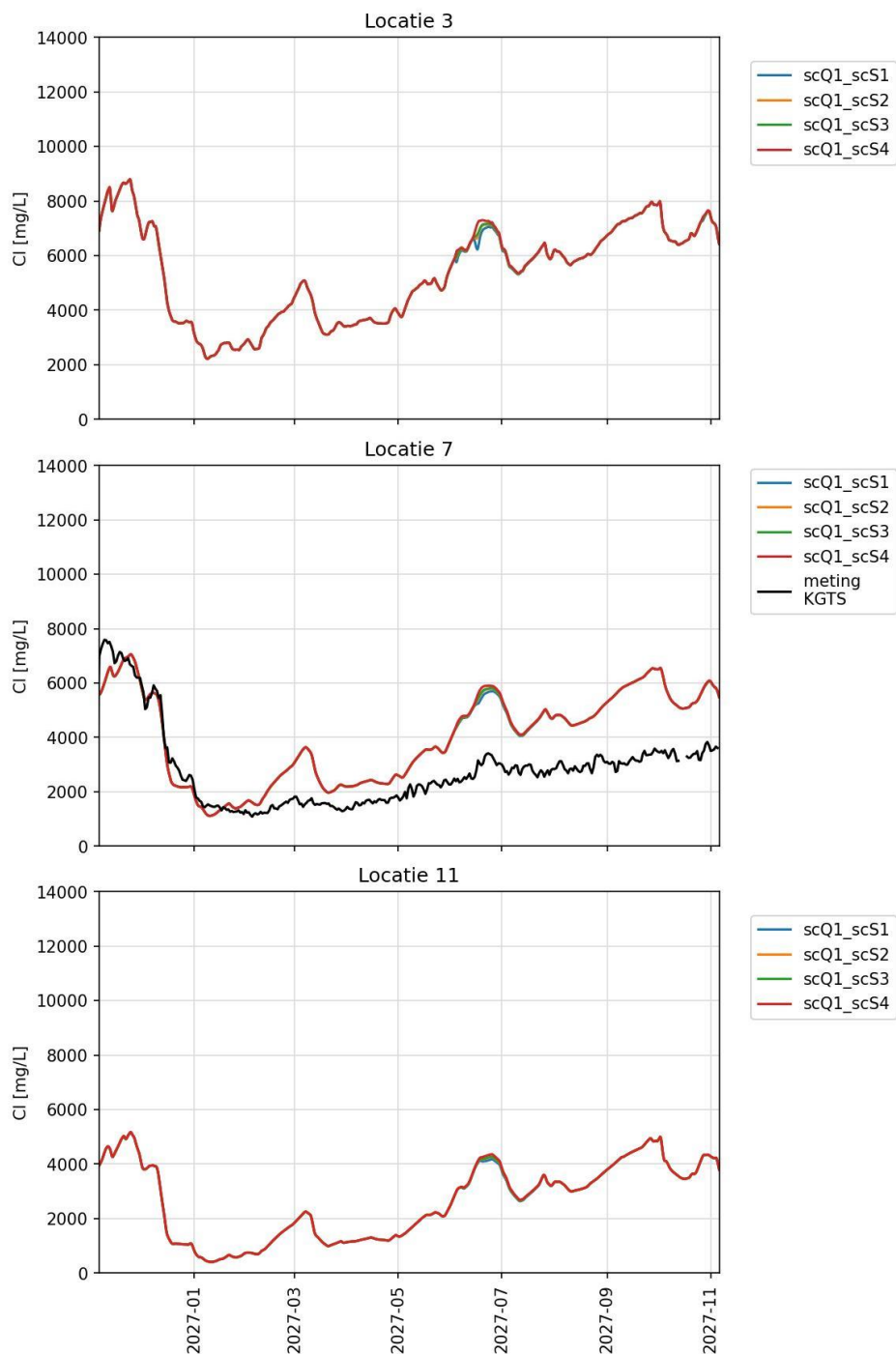
In de gemiddelde zomers stijgt de concentratie tot bijna 8000 mg/l bij Terneuzen (locatie 3) en 5000 mg/l bij Gent (locatie 11). De gemiddelde zomer was gebaseerd op de afvoer van de zomer van 2021 (zie §3.2.3). In de TSO-meting voor de nazomer van 2021 (14 september 2021, dus nog in de situatie met Middensluis) waren de dieptegemiddelde concentraties ongeveer 4500 mg/l bij Terneuzen (locatie 3) en ruim 2000 mg/l bij Gent (locatie 11), zie Figuur 5-2. Het verschil is toe te schrijven aan de vervanging van de Middensluis door de Nieuwe Sluis, een verandering van de scheepvaartintensiteit en (in mindere mate) aan het verschil in afvoer van -5,6% (zie §3.2.3).



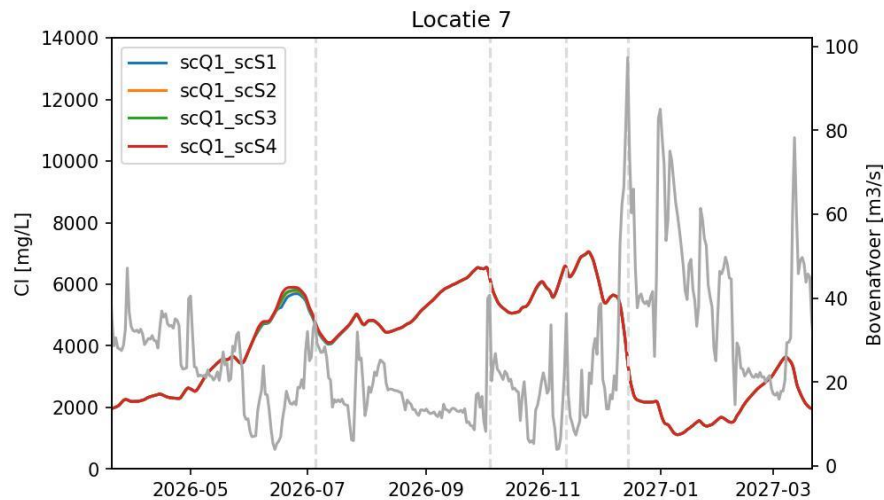
Figuur 5-2: TSO-meting op 14 september 2021 (boven) en de daarbij behorende dieptegemiddelde chlorideconcentratie (onder).

De verschillende schutstrategieën hebben nauwelijks invloed op de chlorideconcentraties in de gemiddelde zomers. Blijkbaar is de frequentie van de schutbeperkingen (strategie S1), stremmingen (strategieën S2 en S3) of het oppompen van zout water (strategie S4) in de gemiddelde zomers zo laag, dat de keuze voor een oplossingsrichting geen significante invloed heeft op de zoutindringing.

In Figuur 5-4 is te zien dat de chlorideconcentratie op het hoofdkanaal sterk wordt beïnvloed door variaties in de bovenafvoer. Tijdens aaneengesloten perioden met lage afvoeren loopt de chlorideconcentratie op het kanaal langzaam op, zoals bijvoorbeeld in de maanden juli t/m september 2026 van afvoerscenario Q1. Bij een piek in de bovenafvoer zoals begin december 2026 neemt de chlorideconcentratie sterk af.



Figuur 5-3: Chlorideconcentratie bij TSO-locaties 3, 7 en 11 voor afvoerscenario Q1 i.c.m. de 4 schutstrategieën. Bij locatie 7 wordt de chloridemeting bij KGTS (+23% vanwege de conversie van 1,8m diepte naar dieptegemiddeld) weergegeven.



Figuur 5-4: Chlorideconcentratie bij TSO-locatie 7 en de bijbehorende bovenafvoer voor afvoerscenario Q1 i.c.m. de 4 schutstrategieën.

5.1.2. Droge zomer met klimaatveranderingseffect

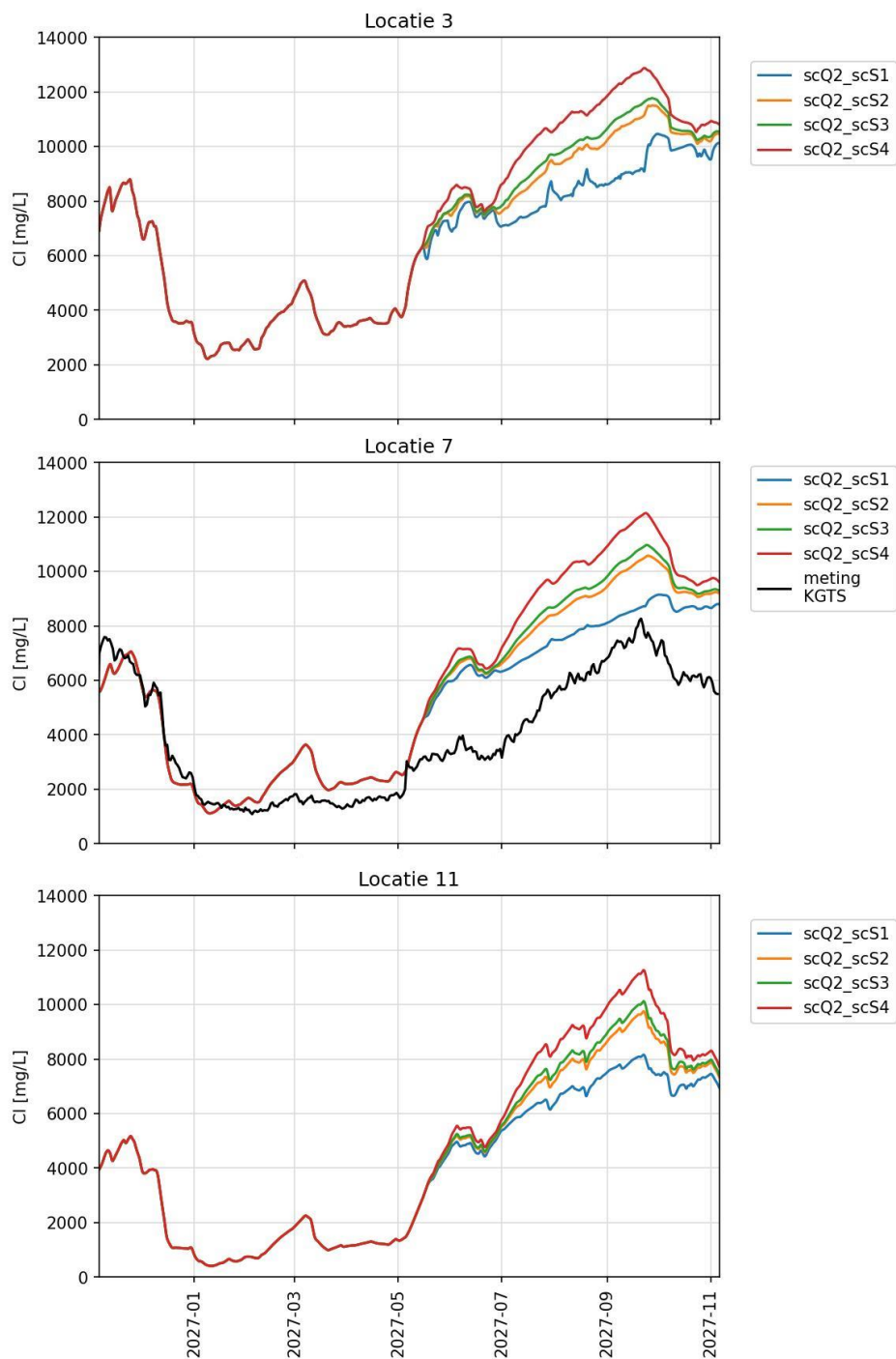
Deze paragraaf beschrijft de resultaten van de oppervlaktewatermodellering voor afvoerscenario Q2, waarin na twee gemiddelde zomers met daartussenin drie gemiddelde winters een zeer droge zomer volgt, inclusief een periode van '2 maanden laag' en het effect van klimaatverandering volgens klimaat-scenario W+ (zie Figuur 3-5). Het eerste deel van de simulatie is identiek aan de berekening voor afvoerscenario Q1. Figuur 5-5 toont daarom alleen de resultaten voor het derde jaar van de simulatie, met daarin de zeer droge zomer. Ter referentie is bij locatie 7 het chloridegehalte bij meetpunt KGTS weergegeven.

Deze droge zomer is gebaseerd op de zomer van 2019, maar dan inclusief toepassing van klimaatveranderingseffecten op de bovenafvoer. Daarnaast is de Middensluis vervangen door de Nieuwe Sluis, inclusief de bijbehorende verandering in scheepvaartintensiteit. In de zomer van 2019 liepen de gemeten chlorideconcentraties op tot ruim 8000 mg/l bij Terneuzen (locatie 3) en ongeveer 6500 mg/l bij Gent (locatie 11), zie Figuur 4-26. In de scenarioberekening is dit, afhankelijk van de toegepaste maatregelen bij de sluisen van Terneuzen, 10500-12900 mg/l bij Terneuzen (locatie 3) en 8000-11300 mg/l bij Gent (locatie 11).

Resultaten voor de verschillende schutstrategieën:

- S1. Het reduceren van de schutfrequentie gedurende de gehele dag (schutstrategie S1) heeft het grootste beperkende effect op de chlorideconcentraties.
- S2. Bij stremmen (scenario's S2 of S3) lopen de chlorideconcentraties in de droge zomer verder op, maar het onderlinge verschil is beperkt. Meest effectief zijn de lange stremmingen van 8 uur, waarbij met name de Nieuwe Sluis minder wordt gebruikt (S2).
- S3. Het toepassen van korte stremmingen van 4 uur (S3) zorgt ervoor dat de Nieuwe Sluis nog vrij intensief gebruikt wordt, wat gecompenseerd wordt door de Westsluis en Oostsluis relatief vaak te stremmen. Met deze strategie kan het peil niet gehandhaafd worden boven NAP+1,85 m, maar zakt het uit tot NAP+1,60 m (zie Figuur 3-15).

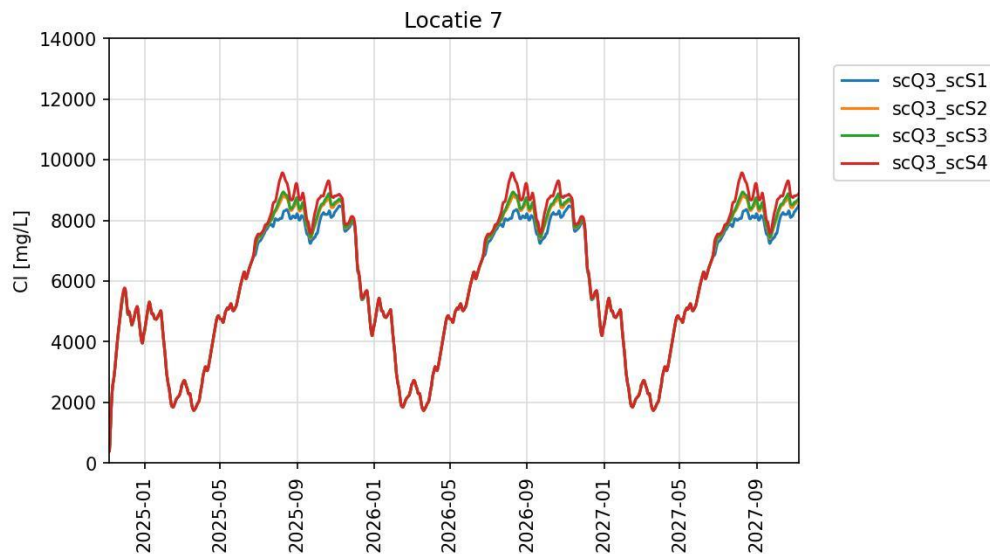
S4. Bij de strategie waarbij het kanaalpeil wordt gehandhaafd via oppompen van water uit de Westerschelde (S4) lopen de chlorideconcentraties sneller en hoger op, met een verschil in piekwaarde van ruim 1000 mg/l ten opzichte van de scenario's S2 en S3 met stremmingen.



Figuur 5-5: Chlorideconcentratie bij TSO-locaties 3, 7 en 11 voor afvoerscenario Q2 i.c.m. de 4 schutstrategieën. Bij locatie 7 wordt de chloridemeting bij KGTS (+23% vanwege de conversie van 1,8m diepte naar dieptegemiddeld) weergegeven.

5.1.3. Opeenvolging van droge jaren

Deze paragraaf beschrijft de resultaten van de oppervlaktewatermodellering voor afvoerscenario Q3, waarin droge winters en droge zomers elkaar drie jaar achtereenvolgens opvolgen (zie Figuur 3-6). Figuur 5-6 laat zien hoe de chlorideconcentraties in het midden van het KGT (bij locatie 7) variëren gedurende deze drie jaar. De drie winters en drie zomers verschillen nauwelijks van elkaar. Daaruit volgt dat er geen sprake is van cumulatie door de jaren heen. Ook in de TSO-metingen lijkt de chlorideconcentratie in elke winter zich weer behoorlijk goed te 'herstellen', zie bijvoorbeeld Figuur 4-26.



Figuur 5-6: Tijdsverloop van de gemodelleerde chlorideconcentratie bij TSO-locatie 7 voor afvoerscenario Q3 i.c.m. de 4 schutstrategieën S1 t/m S4

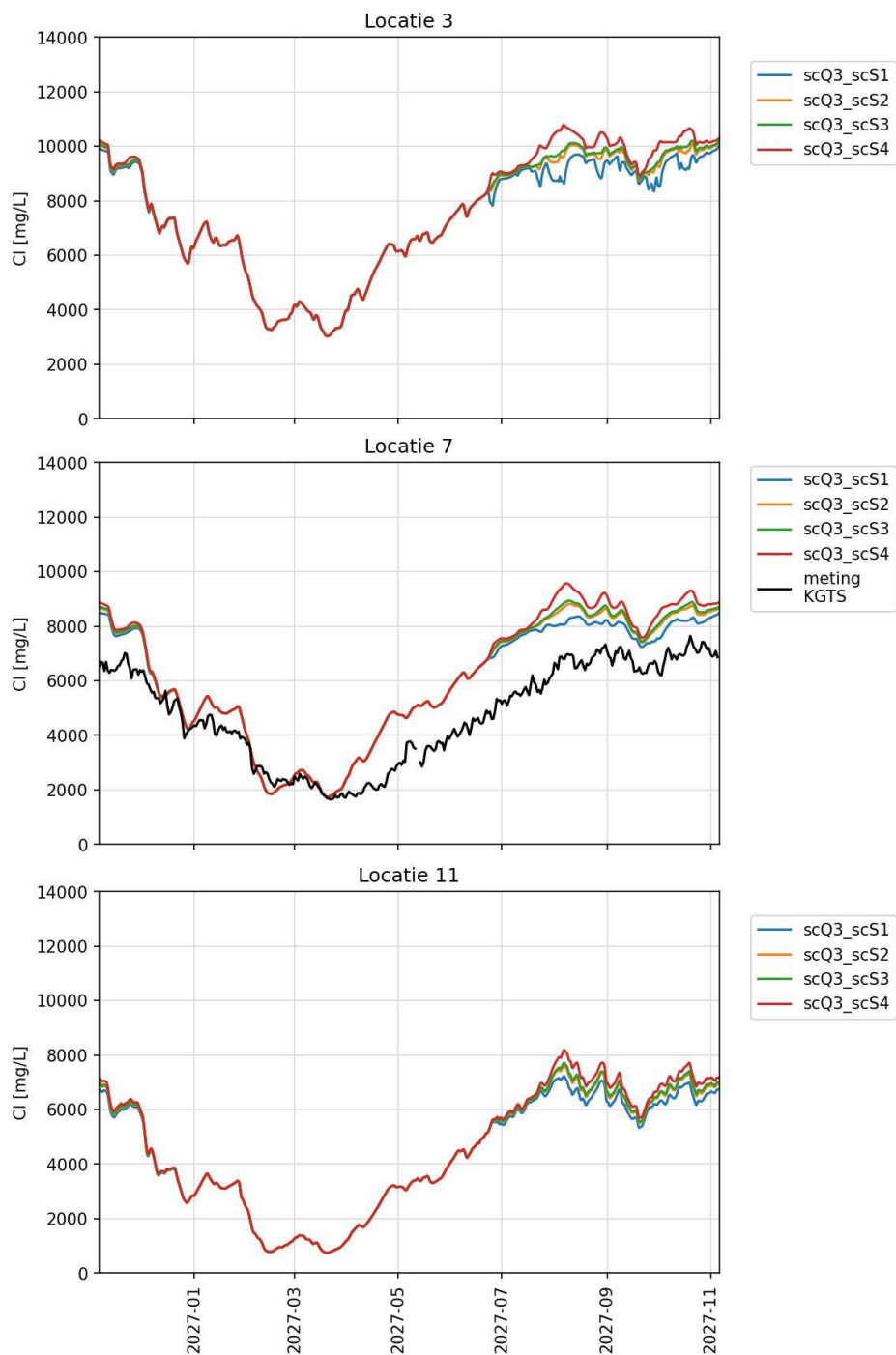
Figuur 5-7 geeft voor drie locaties op het kanaal de chlorideconcentraties weer in het laatste jaar van de simulatie. Ter referentie is bij locatie 7 het chloridegehalte bij meetpunt KGTS weergegeven. De concentraties in een droge zomer na een droge winter bereiken waarden van 10000-11000 mg/l bij Terneuzen (locatie 3) en ongeveer 7000-8000 mg/l bij Gent (locatie 11). De droge zomer is gebaseerd op de zomer van 2017, na een correctie van +7,5% op de bovenafvoer (zie §3.2.3). In de simulatie voor 2017 met oorspronkelijk sluizencomplex en daadwerkelijk afgewikkelde schuttingen stegen de chlorideconcentraties in het SOBEK-model tot ongeveer 7500 mg/l bij Terneuzen (locatie 3) en 5000 mg/l bij Gent (locatie 11), zie Figuur 4-26. Het verschil is toe te schrijven aan de vervanging van de Middensluis door de Nieuwe Sluis en een verandering van de scheepvaartintensiteit.

De concentraties in een droge winter dalen naar ongeveer 3000 mg/l bij Terneuzen (locatie 3) en ongeveer 750 mg/l bij Gent (locatie 11). Bij een gemiddelde winter (scenario Q1) lagen deze concentraties lager, dalend tot ongeveer 400 mg/l bij Gent. Toch is de afvoer in de zomer veel sterker bepalend voor de uiteindelijke chlorideconcentraties. Dit is bijvoorbeeld te zien aan de chlorideconcentraties aan het begin van de zomer (begin juni 2027). Dan zijn de concentraties bij een droge zomer met W+ na een gemiddelde winter al duidelijk hoger dan bij een droge zomer zónder W+ na een droge winter, zie Tabel 5-1. Een verschil in bovenafvoer in de zomer overstemt dus al snel het effect van een andere beginconcentratie vanuit de winter.

Tabel 5-1: Vergelijking van concentraties bij een droge zomer na een droge winter (scenario Q3) t.o.v. een zeer droge zomer (incl. W+ klimaatverandering) na een gemiddelde winter (scenario Q2), schutstrategie S2

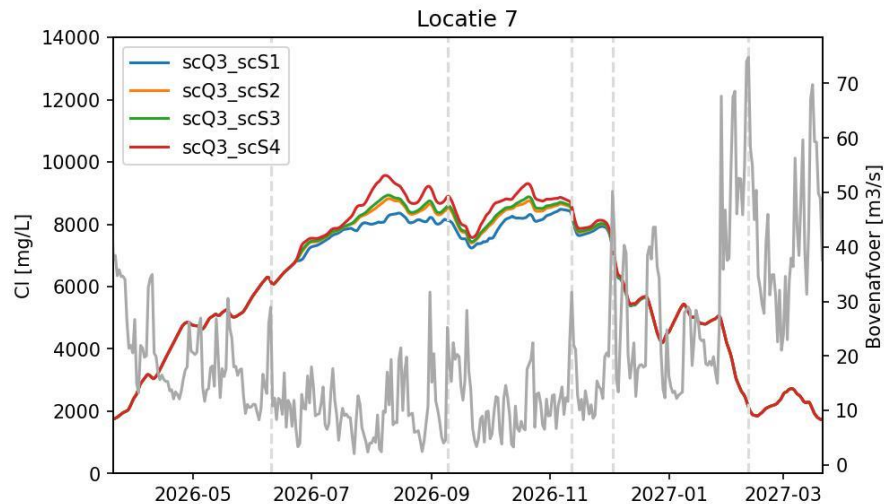
	Minimale concentratie winter	Concentratie begin juni 2027
scenario Q2	Gemiddelde winter (34,9 m ³ /s)	Droge zomer i.c.m. W+ (7,5 m ³ /s)
• locatie 3	2220	7490
• locatie 7	1120	6290
• locatie 11	410	4950
scenario Q3	Droge winter (28,2 m ³ /s)	Droge zomer (11,6 m ³ /s)
• locatie 3	3040	7380
• locatie 7	1740	5760
• locatie 11	740	4130

In de droge zomer van scenario Q3, dus zonder een zeer droge 2-maanden laag periode en zonder klimaatverandering, is het effect van de verschillende schutstrategieën minder groot dan bij het extreme scenario Q2. In het midden van het KGT, bij locatie 7, ligt de maximale chlorideconcentratie in de 'zoutste' strategie (S4) 1090 mg/l hoger dan in de 'zoetste' strategie (S1), ofwel ruim 10%. Dit procentuele verschil geldt qua orde van grootte voor het hele KGT, van Terneuzen tot aan Gent.



Figuur 5-7: Chlorideconcentratie bij TSO-locaties 3, 7 en 11 voor afvoerscenario Q3 i.c.m. de 4 schutstrategieën. Bij locatie 7 wordt de chloridemeting bij KGTS (+23% vanwege de conversie van 1,8m diepte naar dieptegemiddeld) weergegeven.

In Figuur 5-8 is te zien dat de fluctuaties in bovenafvoer een sterke invloed hebben op de chlorideconcentraties op het hoofdkanaal. Zoals ook het geval is bij een gemiddeld afvoerscenario (Q1) loopt de chlorideconcentratie langzaam op tijdens aaneengesloten perioden van lage afvoer, en neemt deze sterk af bij een piek in bovenafvoer.



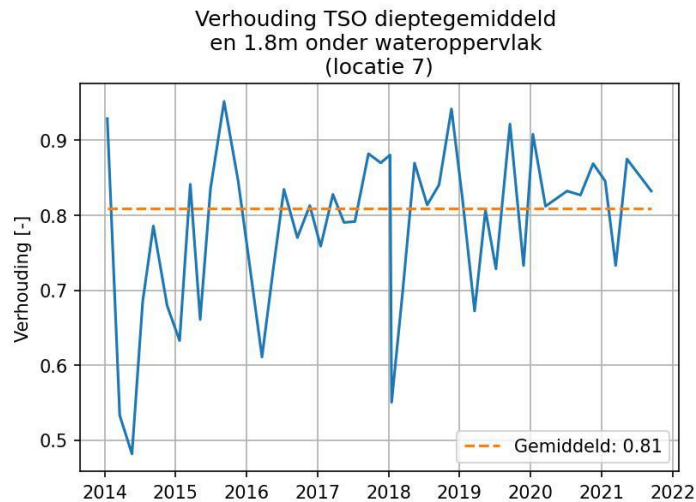
Figuur 5-8: Chlorideconcentraties bij TSO-locatie 7 en de bijbehorende bovenafvoer voor afvoerscenario Q3 i.c.m. de 4 schutstrategieën.

5.2. Overzicht chlorideconcentraties

5.2.1. Seizoensgemiddelde concentraties bij Sas van Gent

In het deelrapport Water van de MER is de verwachting uitgesproken dat de KRW GEP-waarde van 3000 mg/l chloride bij Sas van Gent (KGTS), gemeten op een diepte van 1,8 meter onder het wateroppervlak, niet zal worden overschreden in een gemiddelde zomer (Lievense CSO, 2015). Volgens Tabel 7-2 van het deelrapport Water zou de chlorideconcentratie bij meetpunt KGTS stijgen van 1420 mg/l in de huidige situatie naar 3000 mg/l in de voorkeursvariant met Nieuwe Sluis in 2030.

Ter vergelijking met de MER en de KRW-norm is ook voor de huidige modelresultaten de gemiddelde concentratie voor de periode van 1 april tot 1 oktober berekend voor de dicht bij KGTS gelegen TSO-locatie 7 (zie Figuur 4-1). De concentratie op 1,8 meter onder het wateroppervlak is ingeschat op basis van de dwarsprofielgemiddelde concentratie uit SOBEK. Voor de omzetting is gebruik gemaakt van een karakteristieke verhouding tussen de dieptegemiddelde concentratie en de concentratie op 1,8 m diepte bij TSO-locatie 7. Figuur 5-9 laat zien hoe deze verhouding in de tijd varieert. Een duidelijk seizoenseffect ontbreekt in deze verhouding. Daarom hanteren we de gemiddelde verhouding van 0,81 als vaste vermenigvuldigingsfactor voor het omzetten van de zoutconcentraties uit SOBEK in waarden op 1,8 meter onder het wateroppervlak.



Figuur 5-9: Verhouding tussen de concentratie op 1,8 meter onder het wateroppervlak en de dieptegemiddelde chlorideconcentratie bij TSO-locatie 7 op basis van de TSO-metingen.

Tabel 5-2 geeft de inschatting van de op deze manier berekende chlorideconcentraties voor de verschillende afvoerscenario's (Q1-Q3) en schutstrategieën (S1-S4). Uit deze SOBEK-berekeningen volgt dat de grenswaarde van 3000 mg/l wel wordt overschreden, zowel in een gemiddelde zomer binnen het huidige klimaat (3260-3290 mg/l) als in een droge zomer inclusief klimaatverandering (4610-5780 mg/l).

Tabel 5-2: Inschatting op basis van SOBEK van de seizoensgemiddelde chlorideconcentratie (mg/l) bij KGTS, 1,8 meter onder het wateroppervlak, gemiddeld over de periode 1 april tot 1 oktober voor de verschillende scenario's en schutstrategieën

Scenario	S1	S2	S3	S4
Q1: gemiddelde zomer, huidig klimaat	3510	3520	3530	3540
Q2: droge zomer met W+ 2050 klimaatverandering	4900	5410	5560	6010
Q3: droge zomer, huidig klimaat	5250	5370	5400	5530

Ter vergelijking toont Tabel 5-3 deze concentraties voor de metingen bij Sas van Gent in de jaren 2014 tot en met 2022. Volgens §3.2.3 is 2021 representatief voor een gemiddelde zomer (na correctie van -5,6%) en 2017 voor een droge zomer (na correctie van +7,5%). Dat betekent dat de aanleg van de Nieuwe Sluis bij realisatie van de schutfrequentie van GE2030 leidt tot een toename van de seizoensgemiddelde chlorideconcentratie bij Sas van Gent van ongeveer 2100 mg/l naar 3500 mg/l in een gemiddelde zomer en van ongeveer 4000 naar 5400 mg/l in een droge zomer. De toename is in beide gevallen ongeveer 1400 mg/l.

Tabel 5-3: Seizoensgemiddelde waarden voor totale bovenafvoer (m^3/s) en chlorideconcentratie (mg/l) op basis van metingen bij KGTS, bovenste meetpunt op 1,8 meter onder het wateroppervlak, gemiddeld over de periode 1 april tot 1 oktober voor 2014-2022. Rode waarden zijn hoger dan de KRW-norm van 3000 mg/l.

Jaar	Afvoer	Concentratie
2014	25,6	1443
2015	20,5	2010
2016	27,4	1277
2017	12,5	4057
2018	18,3	3379
2019	13,6	3602
2020	13,1	2819
2021	18,7	2121
2022	11,0	3454

5.2.2. Maximale concentraties

Naast de gemiddelde concentraties kunnen ook piekwaarden van belang zijn. Tabel 5-4 laat zien hoe hoog de piekwaarden oplopen in de verschillende scenario's en schutstrategieën bij Terneuzen (bij TSO-locatie 3) en Gent (TSO-locatie 11).

Tabel 5-4: Maximale dieptegemiddelde chlorideconcentratie (mg/l) bij Terneuzen (TSO-locatie 3) en Gent (TSO-locatie 11), berekend met SOBEK voor de verschillende scenario's en schutstrategieën.

Locatie	Terneuzen (TSO-3)				Gent (TSO-11)			
Scenario	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Q1: gemiddelde zomer, huidig klimaat	7990	7990	7990	7990	5000	5000	5000	5000
Q2: droge zomer met W+ 2050 klimaatverandering	10460	11500	11770	12870	8160	9750	10120	11270
Q3: droge zomer, huidig klimaat	9990	10130	10210	10780	7230	7620	7720	8190

5.3. Nadere duiding van verschillen in chlorideconcentraties

Uit de voorgaande paragrafen is gebleken dat de verschillende schutstrategieën in gemiddelde tot droge zomers slechts in beperkte mate van elkaar verschillen. Alleen bij grote droogte in scenario Q2 zijn de verschillen groter, omdat de diverse waterbesparende maatregelen dan intensief worden ingezet.

Het reduceren van de schutfrequentie gedurende de gehele dag leidt tot duidelijk lagere chlorideconcentraties, en het oppompen van zout water vanuit de Westerschelde tot duidelijk hogere chlorideconcentraties. De verschillen tussen lang stremmen (van met name de Nieuwe Sluis) en kort stremmen

(meer verdeeld over de drie schutkolken) zijn relatief beperkt. Deze paragraaf geeft aan de hand van enkele voorbeelden een uitleg van de oorzaak van deze verschillen.

5.3.1. Zoutlast op een gemiddelde dag

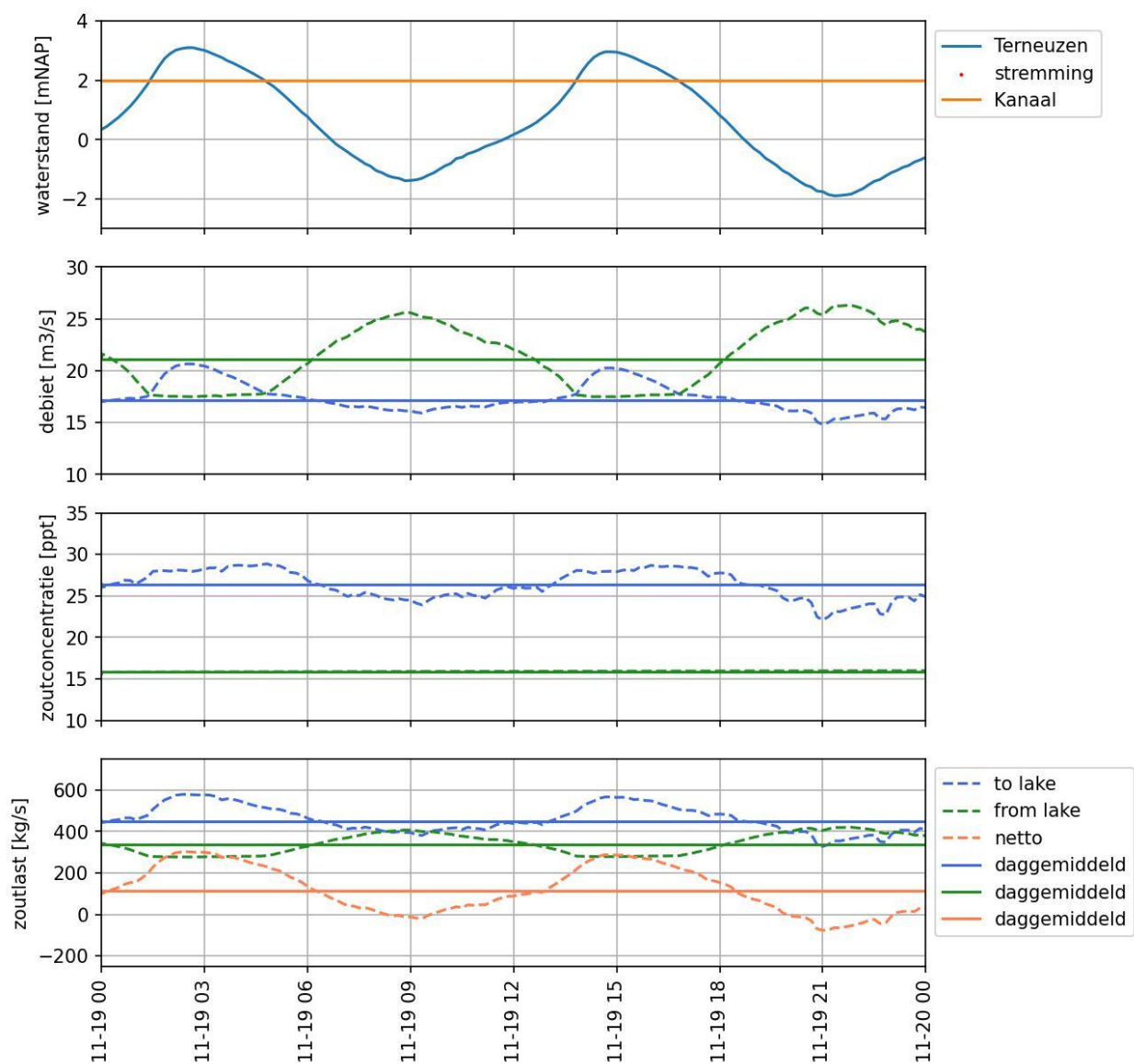
De uitleg start met een gemiddelde dag, zonder stremmingen of andere schutbeperkingen. Figuur 5-10 en Figuur 5-11 laten zien hoe de netto zoutlast op zo'n gemiddelde dag tot stand komt bij respectievelijk de Nieuwe Sluis en de Oostsluis. De Westsluis is qua gedrag vergelijkbaar met de Nieuwe Sluis. Alleen de uitwisselingsdebieten zijn wat kleiner vanwege de kleinere kolkafmetingen.

In de ZSF is de netto zoutlast gelijk aan de zoutlast vanuit de kolk naar het KGT (to lake) minus de zoutlast vanuit het KGT naar de kolk (from lake), zie Figuur 4-6. De zoutlast (kg/s) is gelijk aan het debiet (m^3/s) vermenigvuldigd met de zoutconcentratie (kg/m^3). In de ZSF en in SOBEK wordt de saliniteit gebruikt en niet de chlorideconcentratie, omdat de totale hoeveel opgeloste zouten representatief is voor het effect van zout op de dichtheid van water (zie ook §4.4.2). De debieten zijn de totale uitwisselingsdebieten die optreden gedurende de deuropentijd. Het verschil tussen de debieten "from lake" en "to lake" is het schutverlies door het waterstandsverschil over de sluisolk. De onderbroken lijnen tonen het verloop over de dag, de getrokken lijnen de daggemiddelde waarde.

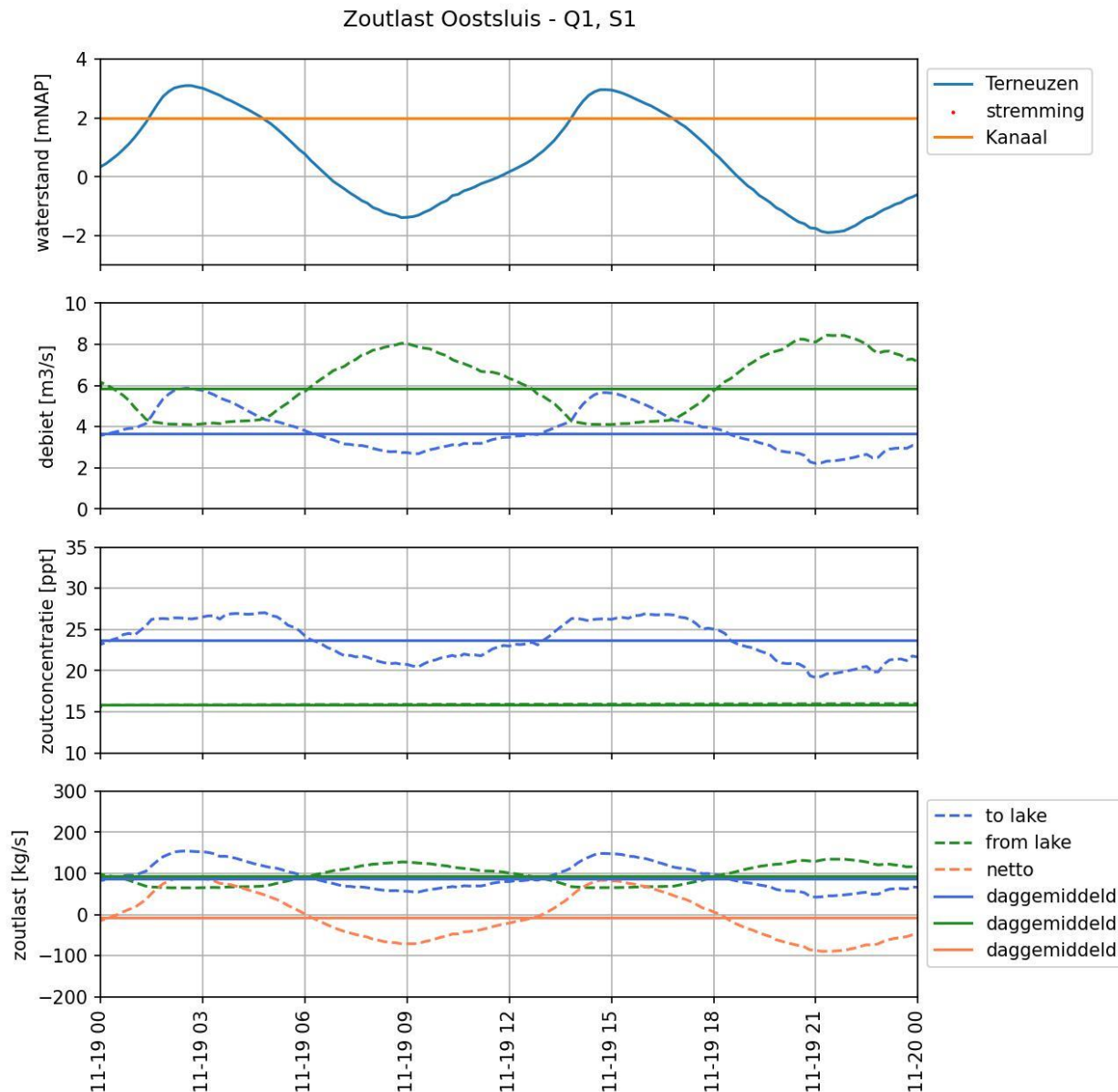
Bij de Nieuwe Sluis (Figuur 5-10) variëren de uitwisselingsdebieten tussen ongeveer 40 en 50 m^3/s . Als de zeewaterstand gelijk is aan het kanaalpeil zijn de uitwisselingsdebieten in beide richtingen gelijk aan elkaar. Bij hoogwater is er een klein netto debiet richting kanaal, bij laagwater is er een groot netto debiet richting Westerschelde (het verschil tussen beide lijnen). Daggemiddeld leidt dit tot een schutverlies van ongeveer 4 m^3/s via de Nieuwe Sluis (het verschil tussen de groene en blauwe lijn). Ook de saliniteit (chloride plus andere zouten, uitgedrukt in ppt) varieert met de buitenwaterstand. De saliniteit aan de kanaalzijde varieert nauwelijks. De saliniteit in de kolk is echter hoger bij hoogwater dan bij laagwater. Saliniteit en uitwisselingsdebiet interacteren met elkaar: bij een groot verschil in saliniteit zijn uitwisselingsdebieten door dichtheidsstroming groter, en grote uitwisselingsdebieten zorgen voor een afname van het verschil in saliniteit tussen kolk en kanaal. De zoutlast "to lake" is hoger bij hoogwater dan bij laagwater. De zoutlast "from lake" varieert slechts in beperkte mate over de dag. Netto is sprake van zoutimport bij hoogwater en (een kleine) zoutexport bij laagwater. Daggemiddeld leidt dit tot een zoutlast van orde 100 kg/s van kolk naar kanaal.

De Oostsluis (Figuur 5-11) is relatief klein en ondiep. Hierdoor zorgt het nivelleren met kanaalwater ervoor dat de menging relatief sterk is en de kolkconcentratie lager ligt dan bij de Nieuwe sluis en de Westsluis. De voornaamste flux is het nivelleringsdebiet, wat vanzelfsprekend zorgt voor export van zout bij laagwater. Daggemiddeld ligt de zoutlast van de Oostsluis dicht bij nul en exporteert de Oostsluis in sommige gevallen op sommige dagen zout uit het kanaal.

Zoutlast Nieuwe sluis - Q1, S1



Figuur 5-10: Waterstanden, uitwisselingsdebieten, saliniteit en zoutlast voor de Nieuwe Sluis op een normale dag zonder schutbeperkingen in scenario Q1, S1.

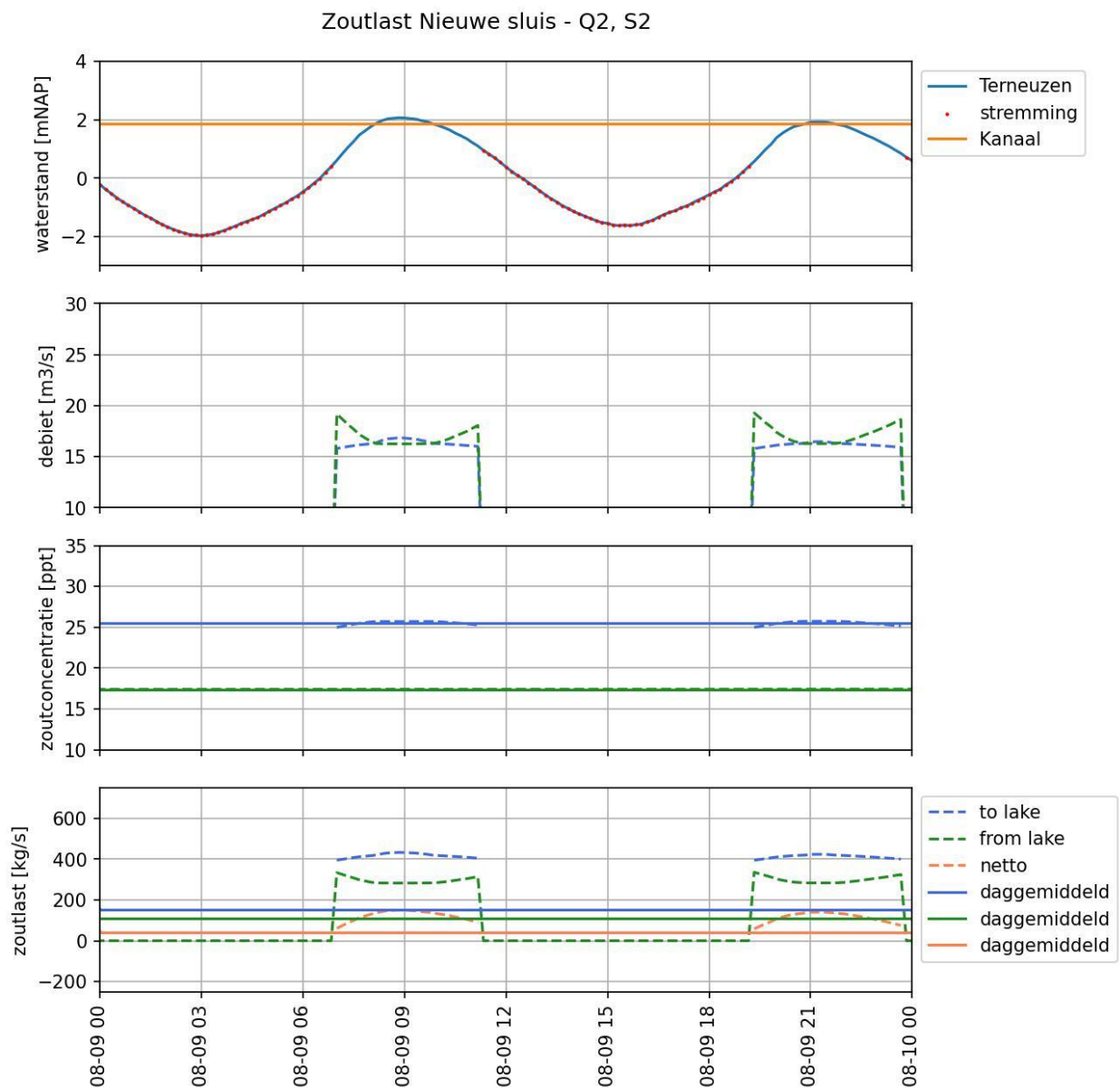


Figuur 5-11: Waterstanden, uitwisselingsdebieten, saliniteit en zoutlast voor de Oostsluis op een normale dag zonder schutbeperkingen in scenario Q1, S1.

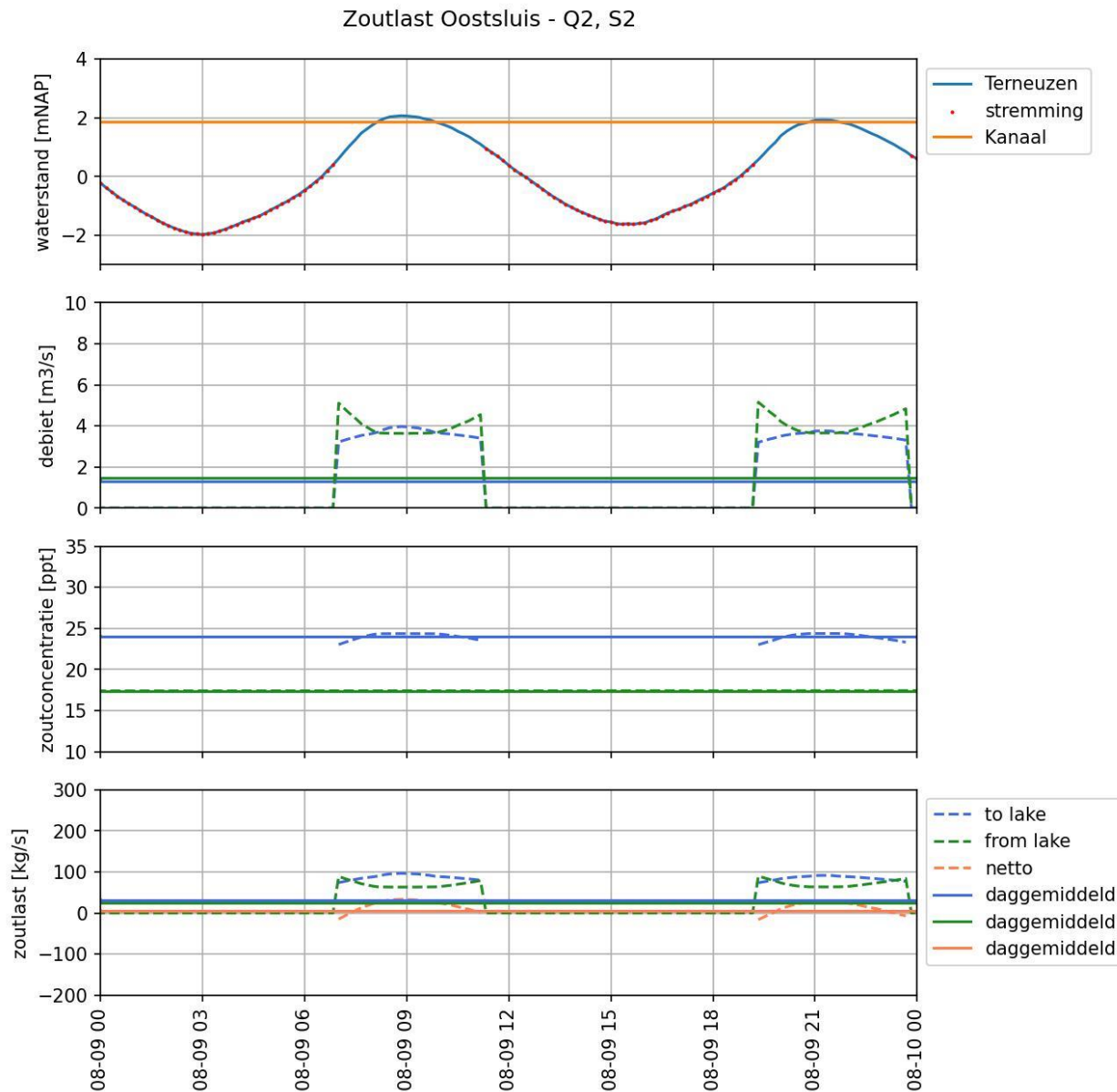
5.3.2. Zoutlast op een dag met schutbeperkingen

Vervolgens stappen we over naar een dag waarop schutbeperkingen van kracht zijn. In strategie S1 wordt alleen de schutfrequentie gereduceerd. Dit leidt niet tot fundamenteel ander gedrag, alleen de daggemiddelde zoutlast wordt gereduceerd. Daarnaast is de saliniteit aan de kanaalzijde relatief hoog in deze droge periode, wat dempend werkt op de uitwisselingsdebieten. In de strategieën S2 en S3 worden stremmingen toegepast. Figuur 5-12 en Figuur 5-13 geven inzicht in de opbouw van de netto zoutlast voor respectievelijk de Nieuwe Sluis en de Oostsluis op zo'n droge dag. Een belangrijk effect is dat stremmen ervoor zorgt dat de export van zout bij laagwater wegvalt en dat alleen de import van

zout bij hoogwater overblijft. Ondanks de beperkte schutbewegingen op deze dag is er hierdoor toch nog een aanzienlijke netto zoutlast richting het kanaal via de Nieuwe Sluis. De stremmingen bij de Oostsluis zorgen ervoor dat deze sluiscolk geen zout meer exporteert, maar zelfs een licht importerend karakter krijgt.



Figuur 5-12: Waterstanden, uitwisselingsdebieten, saliniteit en zoutlast voor de Nieuwe Sluis op een droge dag met stremmingen van 8 uur rond laagwater in scenario Q2, S2.



Figuur 5-13: Waterstanden, uitwisselingsdebieten, saliniteit en zoutlast voor de Oostsluis op een droge dag met stremmingen van 8 uur rond laagwater in scenario Q2, S2.

Als op deze zelfde dag zout water vanuit de Westerschelde wordt opgepompt (strategie S4), leidt dit vanzelf tot een grote bruto zoutlast richting het kanaal. Dit wordt echter weer grotendeels gecompenseerd door afvoer van het relatief zoute kanaalwater via de schutsluizen, voornamelijk bij laagwater. Het intensieve gebruik van de schutsluizen in combinatie met het oppompen van zout water zorgt ervoor dat het verschil in saliniteit tussen kanaal en schutkolk kleiner is dan in een situatie met stremmingen. Dit dempt de uitwisselingsdebieten ("to lake"). Netto is de zoutlast in strategie S4 wel groter dan in de strategieën S2 en S3.

5.3.3. Daggemiddelde zoutlasten

Tabel 5-5 en Tabel 5-6 tonen de daggemiddelde zoutlast voor de verschillende schutkolken voor respectievelijk de getoonde normale dag en droge dag.

Op de normale dag (Tabel 5-5) is te zien dat de Nieuwe Sluis het meeste zout importeert, ongeveer 2 keer zo veel als de Westsluis. De Oostsluis exporteert zout. Hoe zouter het kanaal, hoe kleiner de totale import van zout, vanwege de demping van de dichtheidsstroming van kolk naar kanaal bij een afnemend verschil in saliniteit.

Op de droge dag (Tabel 5-6) worden in strategie S1 de Westsluis en Oostsluis de gehele dag niet gebruikt. Dit leidt tot een relatief lage totale zoutlast. Bij lange stremmingen van de Nieuwe Sluis en Oostsluis in strategie S2 is de zoutimport via de Nieuwe Sluis nog steeds relatief groot, ondanks het beperkte aantal schuttingen (3,7 schutcycli per dag). De Oostsluis wijzigt van exporterend naar licht importerend (6 kg/s). Korte stremmingen in strategie S3 zorgen op deze specifieke dag voor een gunstiger beeld, met zoutexport via de Oostsluis en een kleinere zoutimport via de Nieuwe Sluis, ondanks het grotere aantal schuttingen (7,0 schutcycli per dag) dan in strategie S2 (3,7 schutcycli per dag). Bij strategie S4 is sprake van een grote bruto zoutlast door het oppompen van zout water (226 kg/s). Dit wordt echter weer grotendeels gecompenseerd door het exporteren van zout via alle drie de schutkolken, voornamelijk tijdens laagwater. Ook beide grote zeesluizen exporteren op deze dag daggemiddeld zout door een relatief lage waterstand op de Westerschelde en (mede daardoor) een relatief klein verschil tussen kanaalconcentratie en kolkconcentratie (Nieuwe Sluis: 10,4 schutcycli per dag).

Tabel 5-5: Daggemiddelde zoutlast (kg/s) via de verschillende schutkolken op een normale dag waarop niet wordt gestremd, gespuid of gepompt, behorend bij Figuur 5-10 en Figuur 5-11.

	Netto zoutlast			Zoutriool	Spui	Pomp	Totaal
	OS	WS	NS				
S1	-7	60	115	0	0	n.v.t.	169
S2	-7	60	115	0	0	n.v.t.	168
S3	-7	60	115	0	0	n.v.t.	168
S4	-7	60	115	0	0	0	168

Tabel 5-6: Daggemiddelde zoutlast (kg/s) via de verschillende schutkolken op een droge dag waarop de schutfrequentie wordt gereduceerd (S1), kolken worden gestremd (S2 en S3) of zout water wordt opgepompt (S4), behorend bij Figuur 5-12 en Figuur 5-13.

	Netto zoutlast			Zoutriool	Spui	Pomp	Totaal
	OS	WS	NS				
S1	0	41	0	0	0	n.v.t.	41
S2	6	8	43	0	0	n.v.t.	56
S3	-10	17	35	0	0	n.v.t.	42
S4	-52	-34	-42	0	0	226	99

De export en import van zout is afhankelijk van veel factoren en varieert sterk van dag tot dag. De getallen illustreren echter wel duidelijk dat stremmingen rond laagwater relatief ongunstig zijn voor de zoutbalans rond het sluizencomplex. Vergelijk daarvoor de getallen van de Nieuwe Sluis voor S4 (geen stremming, 10,4 schutcycli op deze dag, 42 kg/s zoutexport), S3 (korte stremmingen, 7,0 schutcycli, 35 kg/s zoutimport) en S2 (lange stremmingen, slechts 3,7 schutcycli, maar toch 43 kg/s zoutimport).

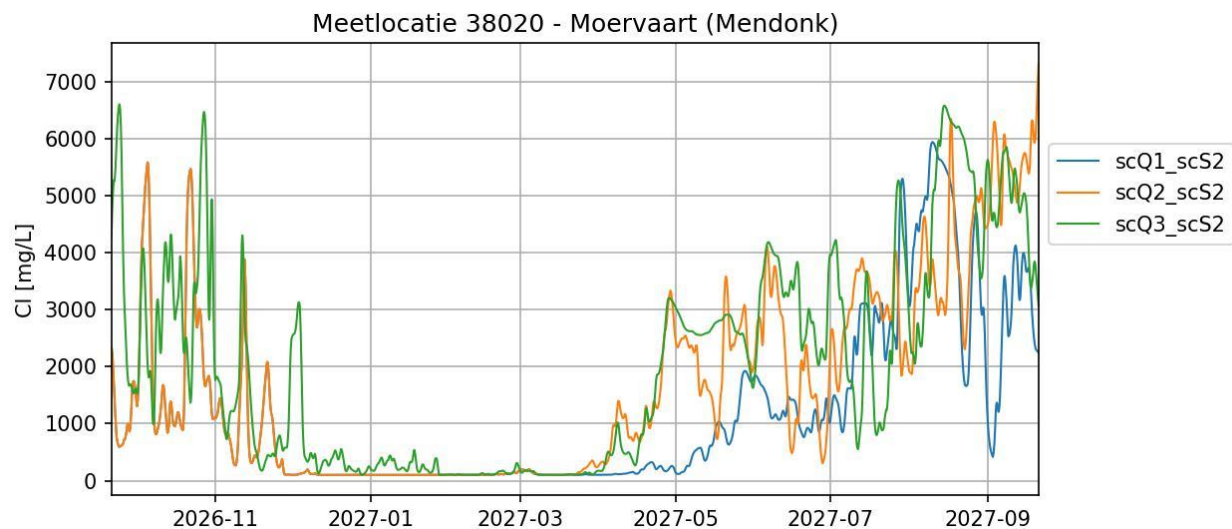
5.4. Verzilting van zijtakken

De zijtakken zijn beschreven in §2.8. In §4.3.4 en §4.3.5 staat beschreven hoe debieten op de zijtakken in SOBEK zijn opgelegd. In §4.5.5 is gepoogd de zoutverspreiding op de Moervaart en Zuidlede te kalibreren. Het ontbreken van debietmetingen op de Zuidlede en metingen van pomp- en captatiedebieten waren daarbij grote tekortkomingen, waardoor het model slechts als eerste indicatie bruikbaar is. In §4.5.5 werd reeds benoemd dat de timing van zoutpieken op de zijtakken afhankelijk is van het debiet door de Moervaart en Zuidlede, en dan meer specifiek van perioden waarin het debiet zeer klein of negatief is. De hoogte van de zoutpieken is afhankelijk van het zoutgehalte in de monding van de Moervaart, en dus indirect van het zoutgehalte op het KGT. In deze §5.4 staat de vraag centraal hoe verzilting op de twee zijtakken wijzigt als het KGT zouter wordt door de aanleg van de Nieuwe Sluis.

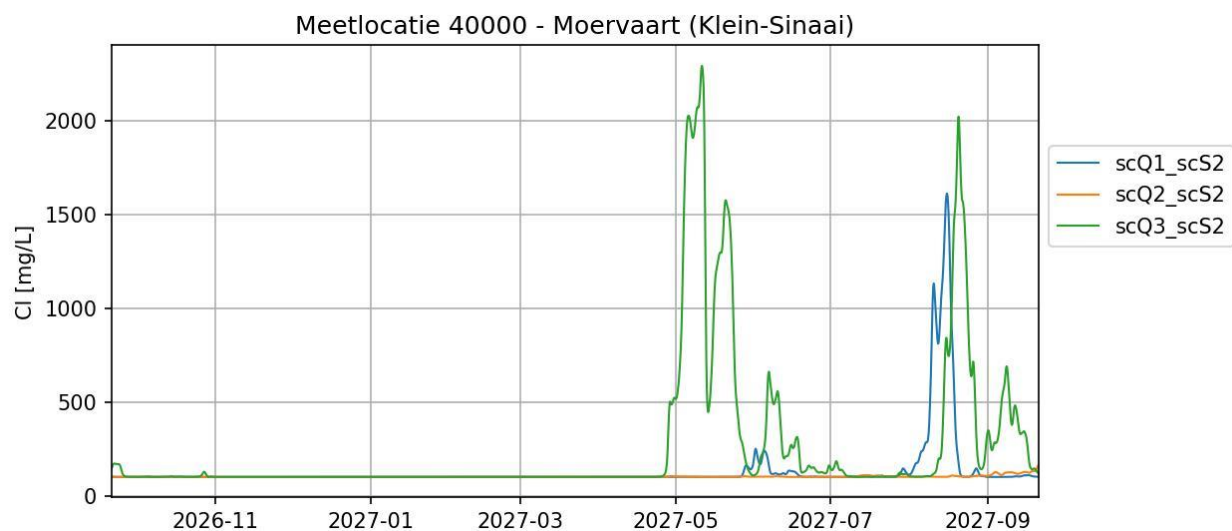
Opmerking: deze paragraaf is gebaseerd op een eerdere definitie van de afvoerscenario's, omdat daarin verzilting in de Moervaart tot aan Klein-Sinaai optreedt in het SOBEK-model. In de nieuwe afvoerscenario's uit §3.2.3 dringt het zout volgens het SOBEK-model niet tot aan Klein-Sinaai door. Dat maakt de nieuwe afvoerscenario's minder geschikt voor onderzoek naar verzilting van de zijtakken. Om verwarring te voorkomen, worden de eerdere afvoerscenario's aangeduid met de symbolen Q1a, Q2a en Q3a. In de eerdere afvoerscenario's was de gemiddelde zomer (Q1a) gebaseerd op 2018, de extreem droge zomer met klimaatverandering (Q2a) op 2019 en de droge zomer (Q3a) op 2020. De nieuwe afvoerscenario's zijn gebaseerd op 2021 (Q1), 2019 (Q2) en 2017 (Q3). Uit Figuur 4-23 en Figuur 4-24 blijkt dat de sterkste verzilting op de Moervaart en Zuidlede in de SOBEK-berekeningen optreedt in 2018 en 2020, dus in de oude afvoerscenario's Q1a en Q3a.

In Figuur 5-14 is te zien dat de droge zomer van Q2a leidt tot de meest langdurige hoge chlorideconcentraties bij Mendonk. Gemiddeld over de laatste zomer is de chlorideconcentratie op de Moervaart bij Mendonk 1800 mg/l in een gemiddelde zomer (Q1a), 2900 mg/l in een droge zomer (Q3a) en 2600 mg/l in een droge zomer met 2-maanden laag periode en klimaatverandering (Q2a). Voor de chlorideconcentraties verder in bovenstroomse richting is het debiet in de zijtakken echter van veel grotere invloed. Zo treedt in de periode met grote droogte in afvoerscenario (Q2a) geen verzilting op bij Moervaart (Klein-Sinaai) en Zuidlede (midden), terwijl dit in een gemiddelde zomer (Q1a) wel gebeurt (zie Figuur 5-15 en Figuur 5-16).

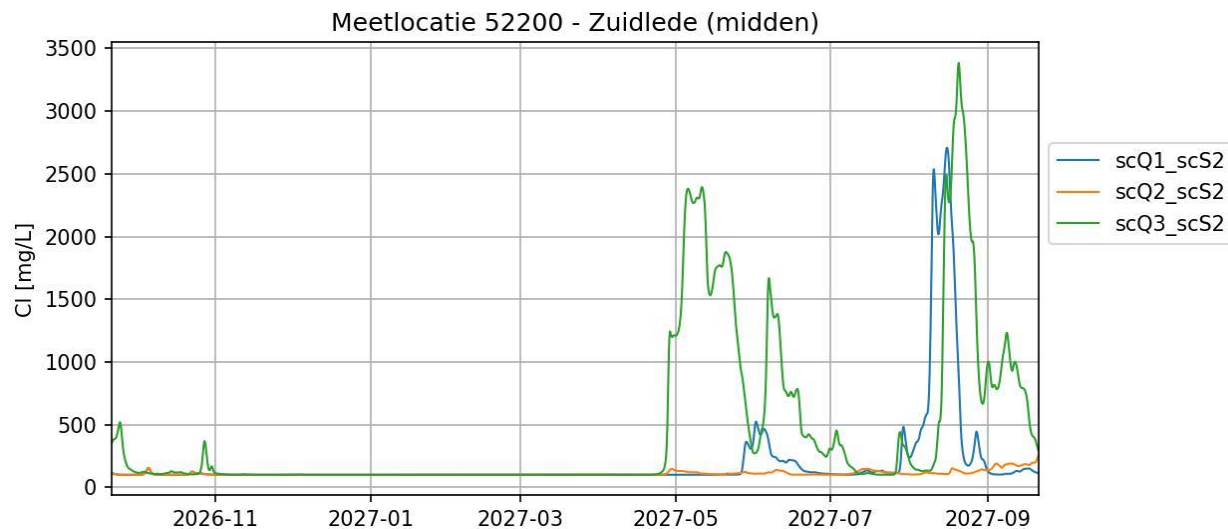
De gemodelleerde chlorideconcentraties op de Moervaart bij Klein-Sinaai zijn naar verwachting een overschatting, terwijl de concentraties bij Zuidlede (midden) mogelijk worden onderschat door het SOBEK-model (zie §4.5.5).



Figuur 5-14: Chlorideconcentraties bij Moervaart (Mendonk) in het laatste jaar van de afvoerscenario's Q1a, Q2a en Q3a



Figuur 5-15: Chlorideconcentraties bij Moervaart (Klein-Sinaai) in het laatste jaar van de afvoerscenario's Q1a, Q2a en Q3a



Figuur 5-16: Chlorideconcentraties bij Zuidlede (midden) in het laatste jaar van de afvoerscenario's Q1a, Q2a en Q3a (oude definitie)

Voor een meer gedetailleerd beeld beschouwen we het scenario Q3a. Dit is het jaar met de meest langdurige verzilting op de Moervaart en Zuidlede. Scenario Q3a was gebaseerd op de zomer van 2020. Er zijn twee duidelijke pieken zichtbaar: in mei-juni en augustus-september van 2020. Deze zijn in de scenarioberekeningen voor Q3a te zien in de denkbeeldige maanden mei-juni 2027 en augustus-september 2027. Tabel 5-7 geeft een vergelijking van de hoogte van de pieken. Daaruit volgt duidelijk dat de aanleg van de Nieuwe Sluis zorgt voor hogere zoutpieken op momenten waarop de zijtakken verzilt raken.

Op de zijtakken Moervaart en Zuidlede is de invloed van de verschillende scheepvaartscenario's S1-S4 minimaal. Alleen dicht bij de monding, ter hoogte van Mendonk, is het verschil in chlorideconcentratie op het KGT nog enigszins merkbaar. Daarom wordt in Tabel 5-7 geen onderscheid gemaakt tussen de verschillende scheepvaartscenario's.

Tabel 5-7: Vergelijking van de hoogte van de gemodelleerde piekwaarden van de chlorideconcentratie (mg/l) op twee pieken in 2020 voor drie locaties op de Moervaart en Zuidlede

Locatie	mei-juni 2020		augustus-september 2020	
	2020, geen NST	Q3a met NST	2020, geen NST	Q3a met NST
Moervaart (Mendonk)	2700	4000	4800	6500
Moervaart (Klein-Sinaai)	1300	2300	1200	2000
Zuidlede (midden)	1400	2400	2000	3400

De conclusie is dat de bovenafvoer de meest bepalende factor is voor de momenten waarop de Moervaart en Zuidlede te maken krijgen met verhoogde chlorideconcentraties. Op enige afstand vanaf de monding bij het KGT is niet de chlorideconcentratie in het KGT maatgevend voor het al dan niet optreden van verzilting, maar de debietfluctuaties op de zijtakken. Informatie uit metingen is te beperkt voor een gedegen analyse, maar kwalitatief valt wel te zeggen dat perioden met een debiet dat vrijwel nul is of zelfs omkeert van richting leiden tot verzilting die ver door kan dringen op de Moervaart en Zuidlede,

ongeacht de exacte chlorideconcentratie in de monding. Op momenten waarop de zijtakken verziltten, zorgt de aanleg van de Nieuwe Sluis er wel voor dat de pieken van de chlorideconcentratie hoger komen te liggen.

Er vindt ook verzilting plaats van de Avrijevaart tussen het pompemaal en het KGT. Ook hier geldt dat een verhoogde chlorideconcentratie op het KGT leidt tot verhoogde concentraties op dit korte deel van de Avrijevaart. Door het ontbreken van debietmetingen voor de Avrijevaart is een kwantitatieve analyse van de verziltingseffecten niet zinvol.

5.5. Effectiviteit van winterspoelingen

5.5.1. Doelstelling

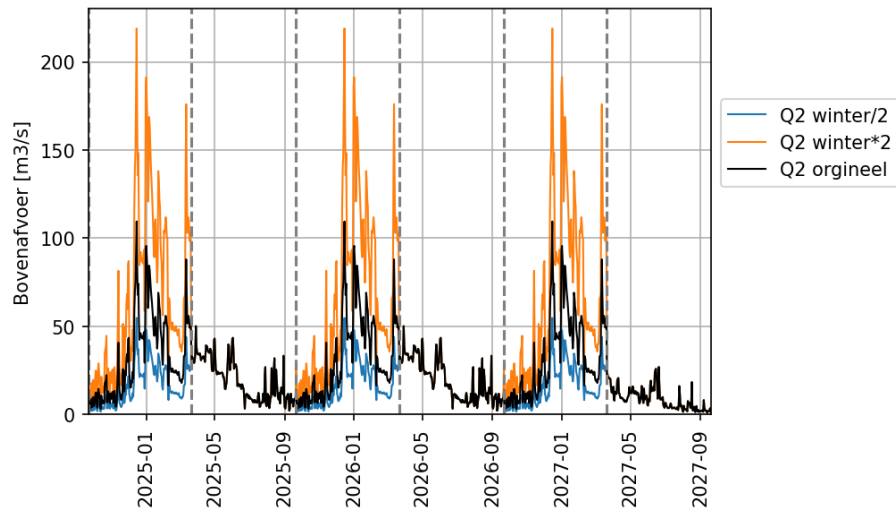
In de zomer is het handelingsperspectief vaak beperkt. Er is (vrijwel) geen water beschikbaar bij Gent wat verdeeld kan worden tussen de verschillende waterlopen. Vrijwel al het water wordt in deze perioden over het Kanaal Gent-Terneuzen geleid. In de winter zijn er wel keuzemogelijkheden beschikbaar. De vraag is of winterspoelingen van het kanaal effect hebben op de verziltingsproblematiek in de zomer.

De te beantwoorden vragen zijn:

1. Hoe veel sneller wordt het zoute kanaal zoeter door een verhoogde afvoer na 21 september?
2. Hoe lang heeft een verhoogde afvoer vóór 21 maart invloed op de chlorideconcentratie ná 21 maart?
3. Hoe beïnvloeden winterspoelingen de gemiddelde chlorideconcentratie van de KRW-norm?

5.5.2. Methode

Om de effectiviteit van winterspoelingen te toetsen zijn principetests met SOBEK uitgevoerd met een droge zomer met 2-maanden laag periode (scenario Q2), voorafgegaan door een gemiddelde winter, zeer droge winter (afvoer gehalveerd in de periode 21 september tot 21 maart) of zeer natte winter (afvoer verdubbeld). De bovenafvoer in voorjaar en zomer (21 maart tot 21 september) blijft in deze berekeningen ongewijzigd (Figuur 5-17). Hierbij is de gemiddelde bovenafvoer in winter en voorjaar bij afvoerscenario Q2 32,7 m³/s. Bij het halveren van de bovenafvoer wordt de gemiddelde bovenafvoer 16,4 m³/s en bij het verdubbelen 65,3 m³/s.



Figuur 5-17: De totale bovenafvoer voor afvoerscenario Q2 i.c.m. schutstrategie S2 met een verdubbelde en een gehalveerde bovenafvoer in de 6 wintermaanden. De overgangen tussen zomer- en wintermaanden is aangegeven met een stippellijn.

5.5.3. Resultaten

De resultaten van de oppervlaktewatermodellering voor verschillende winterafvoeren zijn weergegeven in Figuur 5-18.

Tijdens de winter daalt de chlorideconcentratie naar 550, 1550 of 3500 mg/l nabij Terneuzen (TSO-locatie 3) en ongeveer 100, 250 of 1500 mg/l nabij Gent (TSO-locatie 11) bij verdubbeling, gelijke of gehalveerde bovenafvoer. Zowel bij de gemiddelde bovenafvoer als bij de verdubbelde bovenafvoer in de winter daalt de chlorideconcentratie nabij Gent tot bijna 60 mg/l, wat gelijk is aan de opgegeven concentratie van het zoete water vanuit Evergem en de Tolhuisstuw. Wel houdt de lagere chlorideconcentratie bij een verdubbeling van de bovenafvoer tot verder benedenstrooms aan. Ook halverwege het kanaal (TSO-locatie 7) daalt de chlorideconcentratie bij een verdubbelde bovenafvoer naar ongeveer 150 mg/l, waar deze in een gemiddelde winter niet verder daalt dan 700 mg/l.

- De eerste vraag was: hoe veel sneller wordt het zoute kanaal zoeter door een verhoogde afvoer na 21 september?

Uit Figuur 5-18 blijkt dat in een gemiddeld najaar/winter de chlorideconcentratie na 21 september nog even doorstijgt. Bij een verdubbelde bovenafvoer gaat deze direct vanaf 21 september dalen. Het verdubbelen van de bovenafvoer in het najaar zorgt ervoor dat de chlorideconcentratie bij TSO-locatie 7 ongeveer 17 dagen eerder onder het niveau van 3000 mg/l komt.

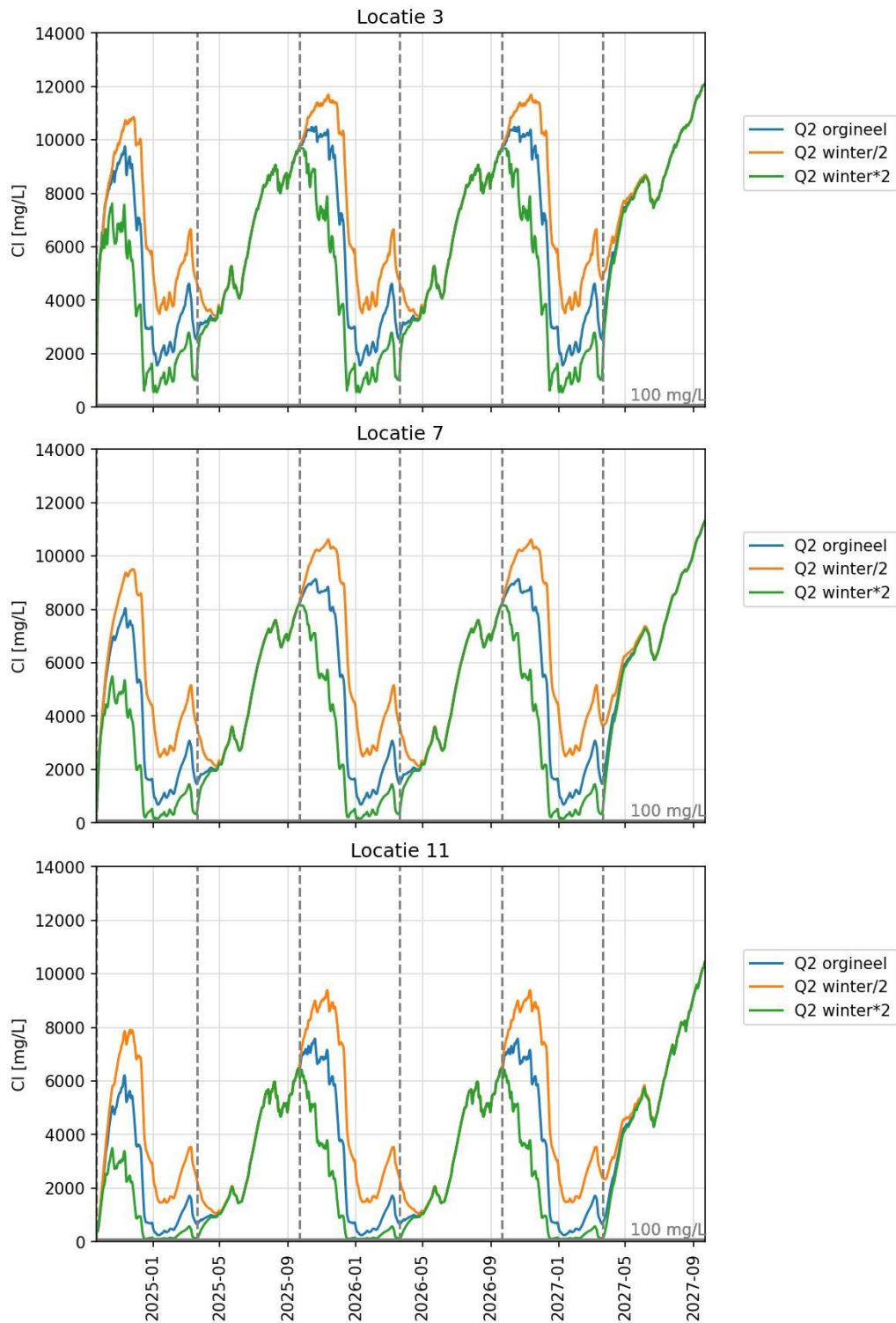
- De tweede vraag was: hoe lang heeft een verhoogde afvoer vóór 21 maart invloed op de chlorideconcentratie ná 21 maart?

Het antwoord op deze vraag is dat het effect van een verhoogde bovenafvoer in de winter zeer kort invloed heeft op de chlorideconcentraties in het voorjaar en de zomer (dus na 21 maart). In Figuur 5-18

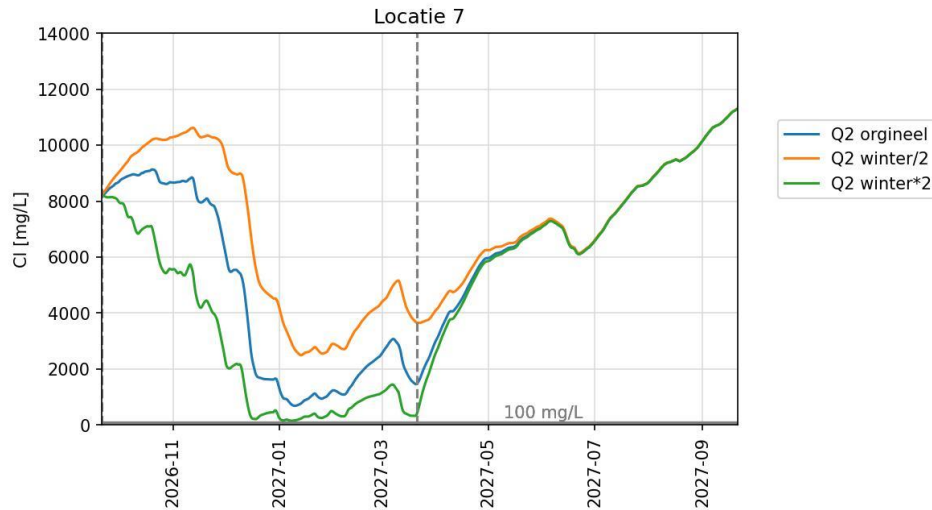
is te zien dat de lijnen voor een gemiddelde winter/voorjaar en een situatie met verdubbelde afvoer al snel weer op elkaar liggen. In Figuur 5-19 is de overgang tussen winter en voorjaar in meer detail te zien. De winterspoeling (verdubbelde afvoer) heeft na 21 maart nog effect tot ongeveer 1 mei. Daarna liggen de groene en blauwe lijn nagenoeg op elkaar. In de zomer zelf (na 21 juni) is er geen effect meer. De bovenafvoer in de zomer zelf is bepalend voor de chlorideconcentraties in de zomer. Deze conclusie volgt ook uit de 2DV-modellering, gepresenteerd in Bijlage B: 2DV-modellering KGT.

- De derde vraag was: hoe beïnvloeden winterspoelingen de gemiddelde chlorideconcentratie voor toetsing aan de KRW-norm?

De KRW-norm wordt getoetst aan de hand van de gemiddelde concentraties voor de periode 1 april tot 1 oktober. Bij benadering is dit gelijk aan de periode 21 maart tot 21 september, dus de periode zonder spoelingen in de berekeningen. De verdubbeling van de afvoer tussen 21 september en 21 maart zorgt voor een afname van de gemiddelde chlorideconcentratie in de periode van 21 maart tot 21 september van 7150 mg/l naar 7050 mg/l. Het reducerende effect is voor scenario Q2 dus slechts 1,2%. Dit houdt verband met de korte periode waarin de winterspoelingen invloed hebben op de chlorideconcentraties ná 21 maart (zie de tweede vraag).



Figuur 5-18: Chlorideconcentratie bij TSO-locaties 3, 7 en 11 voor afvoerscenario Q2 met een dubbele of halve bovenafvoer in de 6 maanden tussen 21 september en 21 maart. De overgangen winter-voorjaar en zomer-najaar op 21 maart en 21 september zijn aangegeven met een verticale stippellijn.



Figuur 5-19: Chlorideconcentratie bij TSO-locatie 7 voor afvoerscenario Q2 met een dubbele of halve bovenafvoer in de 6 maanden tussen 21 september en 21 maart. De overgang winter-voorjaar op 21 maart is aangegeven met een verticale stippellijn.

5.6. Effectiviteit van stremmen op zoutlast

5.6.1. Doelstelling

In de huidige operationele praktijk zijn de sluizen bij Terneuzen tot dusver alleen gestremd om het kanaalpeil in stand te houden. Er is nog nooit gepoogd om via stremmingen te proberen om de seizoensgemiddelde chlorideconcentratie onder de KRW-norm van 3000 mg/l te houden. Met het voormalige sluizencomplex werd de norm in droge zomers al regelmatig overschreden (zie Tabel 5-3). De verwachting is dat dit na ingebruikname van de Nieuwe Sluis ook in gemiddelde zomers zal gaan gebeuren (zie Tabel 5-2). Stremmingen voor peilbeheer vinden plaats rond laagwater op de Westerschelde, omdat het schutverlies dan het grootst is. Uit §5.3 volgt echter dat rond hoogwater de zoutindringing bij Terneuzen maximaal is. De maatregelen voor peilbeheersing zijn daarom niet optimaal voor zoutbeheersing. Daarom is onderzocht of het haalbaar is om de seizoensgemiddelde chlorideconcentratie onder de KRW-norm te houden via stremmingen rond hoogwater.

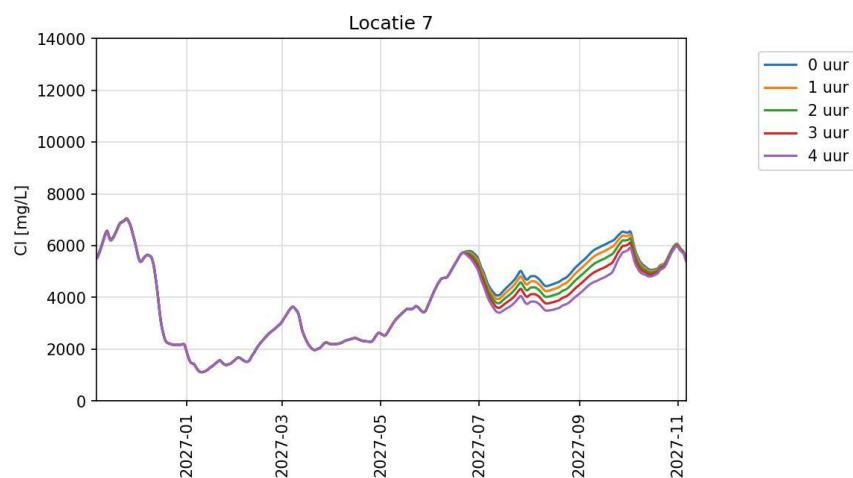
5.6.2. Methode

Het onderzoek is uitgevoerd in de gemiddelde zomer (scenario Q1), gebaseerd op het jaar 2021. Bij de bovenafvoer van deze zomer zijn er nauwelijks stremmingen nodig voor peilbeheer. Ook de Nieuwe Sluis kan vrijwel ongelimiteerd gebruikt worden volgens het GE2020 scenario. De seizoensgemiddelde chlorideconcentratie bij Sas van Gent loopt in deze zomer op tot 3520 mg/l (zie Tabel 5-2), wat hoger is dan de KRW-norm van 3000 mg/l. Aan de berekeningen met het waterbalansmodel, de ZSF en SOBEK zijn vervolgens stremmingen rond hoogwater toegevoegd. De stremmingen hebben een tijdsduur van 1, 2, 3 of 4 uur rond elk hoogwater in de gehele zomer (21 juni tot 21 september) en zijn in de berekeningen toegepast bij alle drie de sluizen (Westsluis, Nieuwe Sluis en Oostsluis). Schuttingen binnen de stremmingen zijn geschrapt. De schutfrequentie buiten de stremmingen is niet verhoogd, maar blijft

gelijk aan de schutfrequentie van GE2030, omdat niet bekend is of het realistisch is om de schutfrequentie verder te verhogen dan de frequenties uit GE2030. Deze aanpak is ook gevolgd bij de stremmingen rond laagwater voor peilbeheer.

5.6.3. Resultaten

Figuur 5-20 laat zien hoe stremmingen rond hoogwater de chlorideconcentraties halverwege het kanaal beïnvloeden (bij TSO-locatie 7, nabij Sas van Gent). Er is een invloed zichtbaar in de periode waarin de stremmingen worden toegepast. Na afloop van de stremmingen is de invloed al snel verwaarloosbaar klein.



Figuur 5-20: Invloed van stremmingen rond hoogwater van 0 tot 4 uur gedurende de periode van 21 juni tot 21 september op de chlorideconcentraties bij TSO-locatie 7 (nabij Sas van Gent)

Tabel 5-8 toont de bijbehorende seizoensgemiddelde chlorideconcentraties bij Sas van Gent, berekend op basis van de SOBEK-berekeningen volgens de rekenmethode die beschreven is in §5.2. De seizoensgemiddelde concentratie daalt met ongeveer 100 mg/l per uur stremmen rond elk hoogwater in de zomer (21 juni tot 21 september). Een stremmingsduur van 4 uur rond elk hoogwater is voor deze gemiddelde zomer nog niet genoeg om de seizoensgemiddelde chlorideconcentratie te laten dalen tot onder de KRW-norm van 3000 mg/l. Om dat wel te bereiken, zou de stremmingsduur nog langer moeten worden gekozen (ca. 5 uur per getijperiode), of ook in het voorjaar (bijvoorbeeld in mei en juni) moeten worden toegepast.

Tabel 5-8: Inschatting op basis van SOBEK van de seizoensgemiddelde chlorideconcentratie (mg/l) bij KGTS, 1,8 meter onder het wateroppervlak, gemiddeld over de periode 1 april tot 1 oktober, voor een gemiddelde zomer (Q1) met een bepaalde stremmingsduur (in minuten) rond elk hoogwater in de periode van 21 juni tot 21 september.

Stremmingsduur	Concentratie
0	3520
60	3440
120	3350
180	3240
240 min	3120 mg/l

5.7. Verbreding of verdieping van het kanaal

Verbreding van het kanaal beïnvloedt zowel de handhaving van het kanaalpeil als de zoutindringing. Bij verbreding neemt het bergend oppervlak van het kanaal toe, waardoor er meer water opgeslagen kan worden. Hierdoor zal het peil minder snel fluctueren bij wisselende bovenafvoeren, spuidebieten of schutfrequenties. In perioden van droogte zakt het peil minder snel. Hierdoor kan het stremmen vanwege droogte langer uitgesteld worden en is er langer profijt van het opzetten van het kanaalpeil voorafgaand aan droogte. Bij hogere bovenafvoeren stijgt het kanaalpeil minder snel. Dit heeft als gevolg dat er minder snel gestremd hoeft te worden voor oppervlaktewaterspuien bij hoge bovenafvoer maar ook dat het kanaalpeil na een periode van droogte zich minder snel herstelt. Bij langdurige perioden van watertekort of wateroverschot heeft verbreding van het kanaal geen invloed op het peilbeheer.

Zoutindringing zal toenemen bij zowel verbreding als verdieping van het kanaal. Doordat het oppervlak van de doorsnede van het kanaal toeneemt, nemen de stroomsnelheden af bij een gelijke bovenafvoer. Bij lagere stroomsnelheden ondervindt de dichtheidsstroming langs de bodem van het kanaal minder tegendruk, waardoor er netto meer zoutverplaatsing plaatsvindt in bovenstroomse richting. Bij een eventuele verdieping geldt wel dat mogelijk grotere verschillen in chlorideconcentratie zullen optreden tussen de bodem en het wateroppervlak.

6. Statistische analyses

6.1. Statistieken voor scheepvaartstremmingen

6.1.1. Introductie

Stremmingen van de scheepvaartsluizen worden ingezet om het peil te beheersen in tijden met een zeer hoge of lage bovenafvoer (zie §2.5). Bij een hoge bovenafvoer worden één of meer schutkolken gestremd om deze in te kunnen zetten voor het spuien van overtollig water (oppervlaktewaterspuien). Bij een lage bovenafvoer worden schutkolken gestremd om te voorkomen dat er te veel water het kanaal uitstroomt door het nivelleren. In beide situaties vinden de stremmingen plaats rond laagwater: bij een hoge bovenafvoer omdat bij laagwater de spuicapaciteit maximaal is en bij een lage bovenafvoer omdat bij laagwater de schutverliezen maximaal zijn.

Na realisatie van de Nieuwe Sluis zullen stremmingen vaker moeten worden toegepast. Dit heeft twee oorzaken:

1. Voor oppervlaktewaterspuien werd voorheen de Middensluis gebruikt: een getijdensluis die alleen operationeel was rond hoogwater. Rond laagwater was de schutkolk beschikbaar om te spuien. Nu de Middensluis niet meer bestaat, kan oppervlaktewaterspuien alleen plaatsvinden als een van de schutkolken wordt gestremd.
2. Schutverliezen via de Nieuwe Sluis zijn veel groter dan via de Middensluis (zie §3.4). Voornamelijk de Nieuwe Sluis zal in tijden van droogte relatief vaak moeten worden gestremd om te voorkomen dat het kanaalpeil te ver uitzakt.

6.1.2. Methode

Om in beeld te brengen hoe vaak scheepvaartstremmingen nodig zijn, is een berekening uitgevoerd met de bovenafvoer en zeewaterstand uit de periode 2010-2021 (zie Figuur 3-1) in combinatie met het nieuwe sluizencomplex en een beoogde schutfrequentie op basis van GE2030 (zie Tabel 3-3). Deze berekening laat dus zien hoe vaak stremmingen nodig zouden zijn in het hypothetische geval dat na realisatie van de Nieuwe Sluis de bovenafvoer uit de periode 2010-2021 zou optreden.

Stremmingen worden toegepast conform het vereenvoudigde schutregime uit §3.4.4:

1. Stremmingen worden toegepast als het kanaalpeil anders hoger wordt dan NAP+2,35 m of lager dan NAP+1,85 m.
2. Bij wateroverschot wordt eerst de Westsluis gestremd, dan de Oostsluis en daarna de Nieuwe Sluis. Bij watertekort is de volgorde andersom: eerst de Nieuwe Sluis, dan de Oostsluis en daarna eventueel ook de Westsluis.
3. De stremmingen duren 8 uur (strategie S2) of 4 uur rond laagwater (strategie S3). De alternatieven zijn het daggemiddeld reduceren van de schutfrequentie (strategie S1) of het oppompen van zout water uit de Westerschelde (strategie S4).

6.1.3. Statistieken voor spuien bij wateroverschot

Tabel 6-1 toont eerst de statistieken voor oppervlaktewaterspuien (aangeduid met OWS) en uitwisselingsspuien/continuspuien (aangeduid met UWS). De tabel toont het aantal dagen per jaar waarbij er gestremd wordt voor oppervlaktewaterspuien (ongeacht te tijdsduur) en de gemiddelde tijdsduur van dit spuien. De gemiddelde tijdsduur is dus niet gemiddeld over alle dagen van het jaar, maar gemiddeld over de dagen waarop oppervlaktewaterspuien plaatsvindt. Te zien is dat oppervlaktewaterspuien hoofdzakelijk via de Westsluis plaatsvindt, aangevuld door (overwegend kortdurend) spuien via de Oostsluis. De Nieuwe Sluis wordt niet gebruikt voor oppervlaktewaterspuien. Te zien is dat vooral veel gespuid wordt in jaren met een relatief hoge jaargemiddelde bovenafvoer (2014, 2016). Gemiddeld over deze 12 jaar wordt er op 56 dagen per jaar oppervlaktewater gespuid via een gestremde Westsluis. De gemiddelde tijdsduur van deze stremming is dan 115 minuten per getijperiode (222 minuten per 24 uur).

Tabel 6-1: Statistieken voor stremmen bij wateroverschot: dagen per jaar met oppervlaktewaterspuien (OWS) bij de Nieuwe Sluis (NS), Oostsluis (OS) en Westsluis (WS) en uitwisselingsspuien (UWS) bij de Westsluis, met de gemiddelde tijdsduur (minuten per getijcyclus) van het oppervlaktewaterspuien voor de dagen waarop gespuid wordt

Jaar	Q _{bov}	Dagen per jaar				Gemiddelde duur per getij		
	m ³ /s	OWS NS	OWS OS	OWS WS	UWS	OWS NS	OWS OS	OWS WS
2010	23,8	0	11	17	283	-	10	143
2011	21,0	0	10	50	179	-	11	68
2012	31,6	0	30	70	315	-	15	120
2013	29,2	0	32	66	290	-	10	117
2014	34,0	0	43	108	345	-	8	94
2015	29,0	0	39	71	300	-	9	108
2016	31,8	0	47	104	328	-	9	98
2017	20,6	0	12	33	193	-	12	106
2018	23,4	0	22	43	214	-	9	115
2019	21,0	0	17	34	232	-	8	99
2020	21,3	0	25	39	211	-	10	132
2021	24,9	0	24	35	262	-	13	176
Gemiddeld	26,0	0	26	56	263	-	10	115

6.1.4. Statistieken per jaar voor stremmingen bij watertekort

Stremmingen voor watertekort vinden hoofdzakelijk in de zomer (21 juni tot 21 september) plaats. Onderstaande tabellen en grafieken betreffen daarom statistieken voor de zomer, een periode van 92 dagen. Tabel 6-2 geeft statistieken voor watertekort voor de bovenafvoer uit elk jaar.

Wanneer het vernieuwde sluisencomplex bijvoorbeeld actief zou zijn bij de bovenafvoer uit 2019, zou de Nieuwe Sluis op 53 van de 92 zomerdagen gestremd moeten worden, gemiddeld 6,7 uur per getijperiode. Dit zorgt ervoor dat de zomergemiddelde schutfrequentie zou dalen van de gewenste 10,4 schutcycli per dag conform GE2030 naar 7,1. Tijdens 36 dagen zouden dan ook stremmingen van de Oostsluis rond laagwater nodig zijn. Voor de Westsluis is dat tijdens 5 dagen relatief kortdurend het

geval. Ondanks deze stremmingen zou het kanaalpeil gemiddeld in deze zomer op NAP+1,90 m uitkomen, 20 cm onder streefpeil.

Er zijn echter ook veel jaren met een bovenafvoer waarbij geen of slechts weinig stremmingen nodig zijn. Er is een duidelijke relatie met de zomergemiddelde bovenafvoer. In de periode 2017-2020 lag deze telkens rond de 10 m³/s, wat te weinig is om zonder beperkingen te kunnen schutten conform GE2030. In zomers met een gemiddelde bovenafvoer rond 20 m³/s treden er geen problemen op met het peilbeheer, waardoor stremmingen niet noodzakelijk zijn.

Bij de bovenafvoer van de periode 2010-2021 zou de Nieuwe Sluis gemiddeld 13 dagen per zomer gestremd moeten worden, de Oostsluis 6 dagen en de Westsluis 1 dag.

Tabel 6-2: Statistieken voor stremmen bij watertekort: dagen per zomer (21 juni tot 21 september) met stremmingen bij de Nieuwe Sluis (NS), Oostsluis (OS) en Westsluis (WS), met de gemiddelde tijdsduur (uren per getijcyclus) van het stremmen voor de dagen waarop gestremd wordt, de gemiddelde schutfrequentie in de zomer en het gemiddelde kanaalpeil in de zomer. Strategie S2 met stremmingen van maximaal 8 uur per getijperiode.

Jaar	Q _{bov}	Dagen met stremmingen			Gem duur per getij			Gem schutfrequentie			Kanaalpeil
	m ³ /s	NS	OS	WS	NS	OS	WS	NS	OS	WS	mNAP
2010	12,7	5	1	0	4,7	0,5	-	10,2	20,3	14,3	2,00
2011	14,8	6	3	0	4,9	3,4	-	10,1	20,1	14,3	2,03
2012	21,3	3	0	0	1,0	-	-	10,3	20,3	14,1	2,09
2013	17,4	0	0	0	-	-	-	10,4	20,3	14,3	2,08
2014	25,1	0	0	0	-	-	-	10,4	20,3	14,2	2,12
2015	19,2	0	0	0	-	-	-	10,4	20,3	14,3	2,08
2016	22,5	0	0	0	-	-	-	10,4	20,3	14,2	2,13
2017	10,1	31	15	5	5,4	5,3	1,4	8,9	18,9	14,2	1,91
2018	10,4	35	7	0	4,9	3,0	-	8,8	19,9	14,3	1,93
2019	7,9	53	36	5	6,7	3,7	0,8	7,1	17,9	14,2	1,90
2020	9,6	27	10	1	5,1	2,7	2,2	9,1	19,8	14,2	1,95
2021	18,8	0	0	0	-	-	-	10,4	20,3	14,3	2,09
Gemiddeld	15,8	13	6	1	5,5	3,8	1,2	9,7	19,9	14,2	2,03

Tabel 6-3 toont dezelfde statistieken voor strategie S3, met stremmingen van maximaal 4 uur per getijperiode. Daarbij is de gemiddelde stremmingsduur vanzelfsprekend korter. Dit leidt ertoe dat het peil gehandhaafd moet worden door niet alleen de Nieuwe Sluis vaak te stremmen, maar ook de Oostsluis en de Westsluis. Bij de bovenafvoer van 2019 zou dit bijvoorbeeld 56 dagen zijn voor de Nieuwe Sluis, 42 dagen bij de Oostsluis, en op 26 van de 92 dagen zijn alle drie de sluizen rond laagwater 3 tot 4 uur gestremd.

Tabel 6-3: Statistieken voor stremmen bij watertekort: dagen per zomer (21 juni tot 21 september) met stremmingen bij de Nieuwe Sluis (NS), Oostsluis (OS) en Westsluis (WS), met de gemiddelde tijdsduur (uren per getijcyclus) van het stremmen voor de dagen waarop gestremd wordt, de gemiddelde schutfrequentie in de zomer en het gemiddelde kanaalpeil in de zomer. Strategie S3 met stremmingen van maximaal 4 uur per getijperiode.

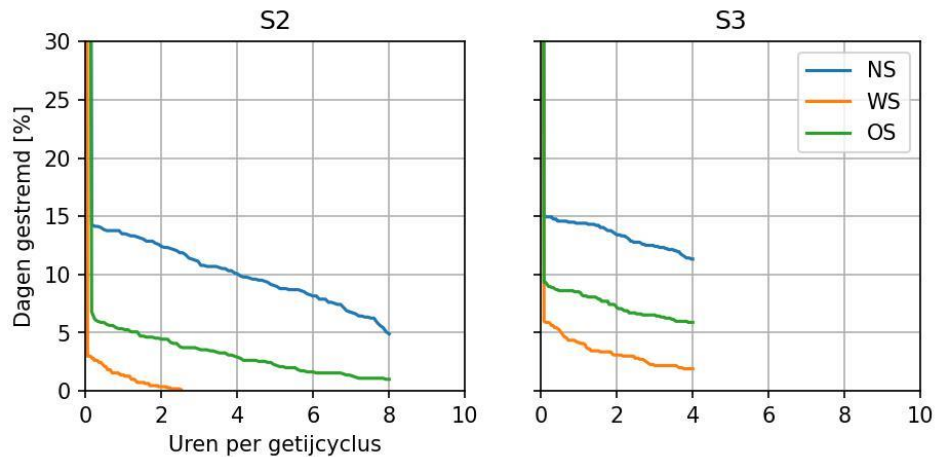
Jaar	Q _{bov}	Dagen met stremmingen			Gem duur per getij			Gem schutfrequentie			Ka-naal-peil
	m ³ /s	NS	OS	WS	NS	OS	WS	NS	OS	WS	mNAP
2010	12,7	6	2	0	2,8	2,1	-	10,2	20,2	14,3	2,00
2011	14,8	7	3	1	3,2	2,1	2,8	10,2	20,2	14,2	2,03
2012	21,3	3	0	0	1,0	-	-	10,3	20,3	14,1	2,09
2013	17,4	0	0	0	-	-	-	10,4	20,3	14,3	2,08
2014	25,1	0	0	0	-	-	-	10,4	20,3	14,2	2,12
2015	19,2	0	0	0	-	-	-	10,4	20,3	14,3	2,08
2016	22,5	0	0	0	-	-	-	10,4	20,3	14,2	2,13
2017	10,1	32	19	11	3,6	3,3	3,6	9,3	19,2	13,8	1,91
2018	10,4	36	20	2	3,5	2,5	2,0	9,2	19,4	14,2	1,93
2019	7,9	56	42	26	3,8	3,7	2,7	8,5	17,5	13,4	1,89
2020	9,6	27	14	6	3,6	3,3	1,7	9,5	19,5	14,1	1,95
2021	18,8	0	0	0	-	-	-	10,4	20,3	14,3	2,09
Gemid-deld	15,8	14	8	4	3,5	3,2	2,8	9,9	19,8	14,1	2,03

6.1.5. Stremmingen in een gemiddelde zomer

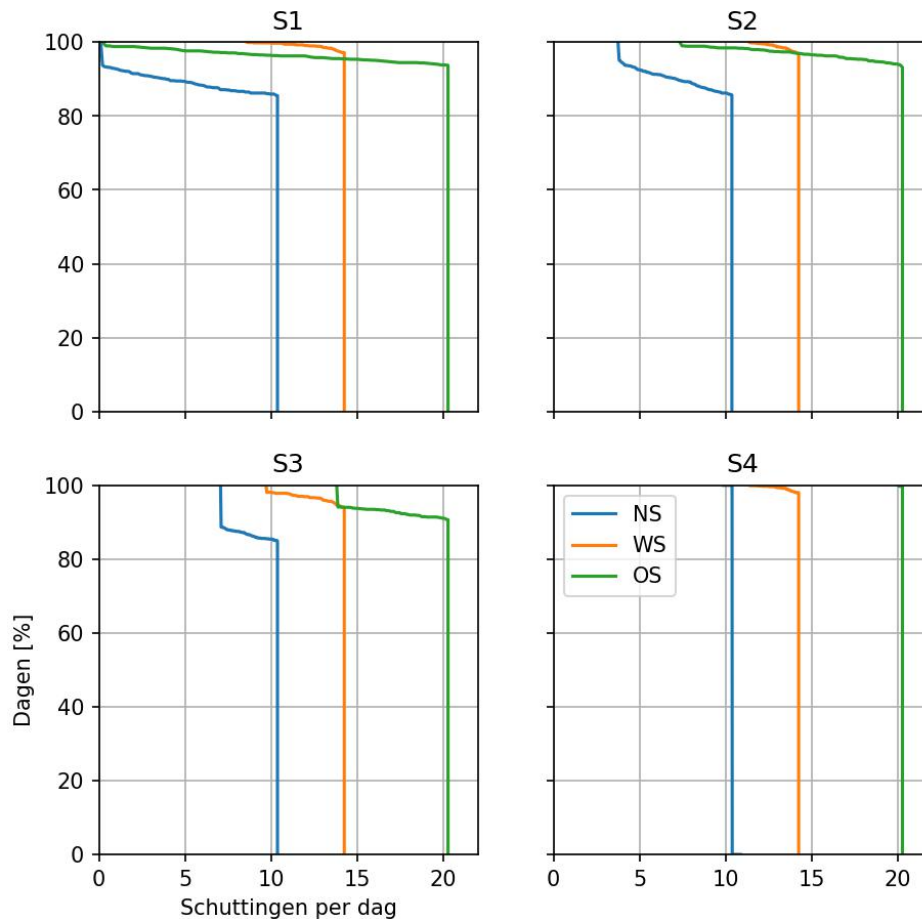
Figuur 6-1 geeft in meer detail de statistieken voor de gemiddelde situatie in de zomer (21 juni tot 21 september voor de bovenafvoer van de jaren 2010-2021). Op de horizontale as staat het aantal uur per getijperiode met stremming van de betreffende sluiskolk. Op de verticale as staat het percentage van de zomerdagen (21 juni tot 21 september) waarin deze stremmingen actief zijn. Bijvoorbeeld in strategie S2 is de Nieuwe Sluis gemiddeld genomen ongeveer 8% van de zomerdagen 6 uur per getijperiode gestremd. Bij strategie S3 duren de stremmingen maximaal 4 uur per getijperiode. Dat zorgt er wel voor dat gemiddeld genomen in 2% van de zomerdagen (dat is ongeveer 2 dagen per zomer) alle drie de sluizen 4 uur per getijperiode moeten worden gestremd om het kanaalpeil te beheersen.

Figuur 6-2 toont op een vergelijkbare manier de statistieken voor de schutfrequentie (schutcycli per dag), gemiddeld over de zomers van de jaren 2010-2021. In strategie S4 zijn geen schutbeperkingen van kracht, omdat bij watertekort water vanuit de Westerschelde wordt opgepompt. Alleen de Westsluis wordt incidenteel gestremd bij wateroverschot, maar in de zomers is dat zeer zeldzaam. De lijnen van de drie sluizen staan dan op de streefwaarden voor de schutfrequentie uit GE2030. Bij de strategieën S1, S2 en S3 is op ongeveer 15% van de dagen sprake van een gereduceerde schutfrequentie. Bij strategie S1 wordt de schutfrequentie gedurende de hele dag teruggebracht. Bij de Nieuwe Sluis zorgt

dat ervoor dat deze gemiddeld genomen bijna 10% van de zomerdagen in het geheel niet wordt gebruikt. Bij de strategieën S2 en S3 zijn de stremmingen alleen van kracht rond laagwater. Rond hoogwater kunnen alle sluizen worden benut.



Figuur 6-1: Percentage van de zomerdagen (verticaal) waarin de sluizen een aantal uur per getijperiode (horizontaal) gestremd zijn, gemiddeld voor de bovenafvoer van de periode 2010-2021, bij toepassing van strategie S2 met lange stremmingen (links) of strategie S3 met korte stremmingen (rechts).



Figuur 6-2: Percentage van de zomerdagen (verticaal) met een bepaalde schutfrequentie (horizontaal), gemiddeld voor de bovenafvoer van de periode 2010-2021 in de strategieën S1 t/m S4

6.1.6. Stremmingen bij de verschillende afvoerscenario's

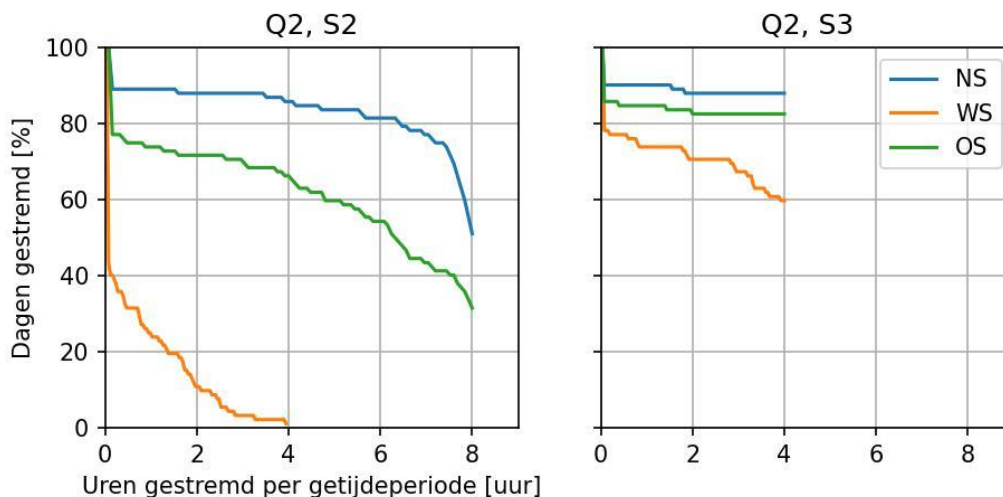
Als aanvulling op de statistieken bij de bovenafvoer van 2010-2021 bevat deze paragraaf ook statistieken voor de scenario's Q1 t/m Q3 zoals gedefinieerd in §3.2.3.

Onderstaande figuren bevatten statistieken voor het scenario Q2: de individuele droge zomer inclusief 2-maanden-laag periode en klimaatverandering conform W+ in 2050. De stremmingsstatistieken voor deze zomer zijn niet gebaseerd op 2010-2021, maar op de aangepaste tijdreeks uit het scenario Q2. Voor dit extreem droge afvoerscenario is het gebruik van de schutsluizen in de verschillende schutstrategieën als volgt:

- In schutstrategie S1 wordt in 80% van de zomerperiode van 21 juni tot 21 september de Nieuwe Sluis dan geheel buiten gebruik genomen (te zien in Figuur 6-4 bij Q2, S1). Alle zeevaart wordt dan afgewikkeld via de Westsluis. Voor zoutindringing in deze zeer droge dagen is dit een aantrekkelijke optie, maar de gevolgen voor het gebruik van de Nieuwe Sluis zijn groot. In ongeveer 40% van de zomerdagen wordt daarnaast ook de Oostsluis volledig buiten gebruik genomen.
- In schutstrategie S2 wordt gewerkt met lange stremmingen, van maximaal 8 uur (480 minuten) per getijperiode, ofwel 64% van de dag. Als eerste wordt de Nieuwe Sluis gestremd. In Figuur 6-3 (links)

is te zien dat de Nieuwe Sluis op 80% van de zomerdagen (verticale as) 6 uur per getijdeperiode (horizontale as) gestremd is, en op 50% van de zomerdagen 8 uur. Op 55% van de zomerdagen moet vervolgens ook de Oostsluis minimaal 6 uur per getijdeperiode worden gestremd. In uitzonderlijke gevallen is ook een stremming van de Westsluis nodig. Dit gaat dan om enkele uren per dag op 20-30% van de zomerdagen.

- In schutstrategie S3 wordt gewerkt met stremmingen van maximaal 4 uur (240 minuten) per getijdeperiode, ofwel 32% van de dag. Vanwege de korte stremmingen van de Nieuwe Sluis moeten ook de Oostsluis en Westsluis relatief vaak worden gestremd. Ongeveer 60% van de zomerdagen worden alle drie de sluisen 4 uur per getijdeperiode gestremd (Figuur 6-3, rechts).
- In schutstrategie S4 worden geen scheepvaartbeperkingen toegepast bij watertekort. Er wordt dan zout water opgepompt vanuit de Westerschelde.



Figuur 6-3: Percentage van de zomerdagen (verticaal) waarin de sluisen een deel van de dag (horizontaal) gestremd zijn, voor een droge zomer met klimaatverandering (Q2) en schutstrategie (S2-S3)

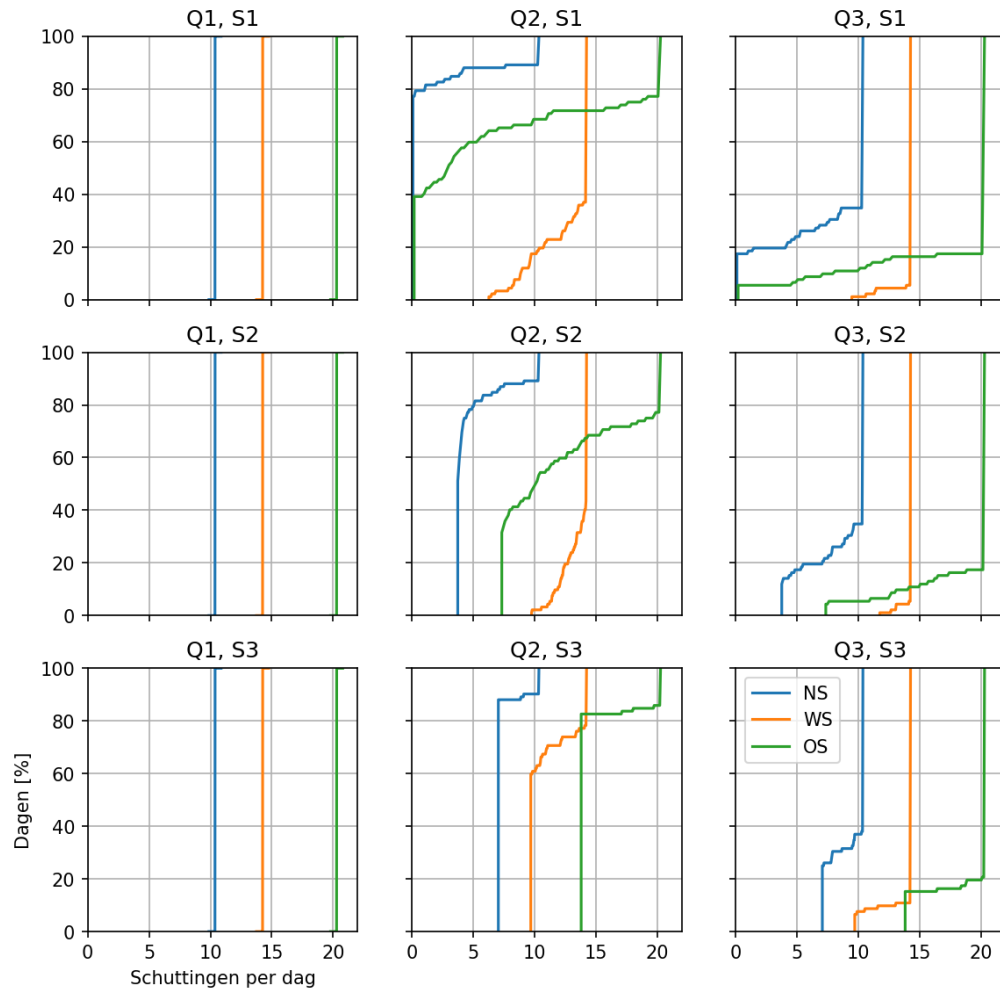
Figuur 6-4 toont het aantal schuttingen per dag in de zomer (21 juni tot 21 september) voor afvoerscenario's Q1 t/m Q3 en de schutstrategieën S1 t/m S3. Hiermee komt het reduceren van de schutfrequentie bij strategie S1 duidelijker in beeld dan wanneer er in termen van stremmingsduur gekeken wordt. In deze figuur is opnieuw te zien dat in de gemiddelde zomer (Q1) geen schutbeperkingen van kracht zijn. In de droge zomer met klimaatverandering (Q2) zijn de schutbeperkingen drastisch. De droge zomer (Q3) zit daar weer tussenin.

Het gebruik van de schutsluisen in scenario Q2 (Figuur 6-4, midden) is als volgt:

- Bij alle schutstrategieën kan er tijdens de 3 zomermaanden op ongeveer 10% van de dagen op volledige capaciteit gesloten worden met alle drie de sluisen. Buiten deze dagen moeten beperkingen worden toegepast, eerst voor de Nieuwe Sluis, daarna voor de Oostsluis en tenslotte ook voor de Westsluis.
- Bij schutstrategie S1 (reduceren van schutfrequentie) wordt de Nieuwe Sluis bijna 80% van de zomerdagen in het geheel niet gebruikt, ongeveer 10% van de dagen met beperkingen en 10% onbeperkt. Dit komt doordat het reduceren van de schutfrequentie bij deze strategie geen limietwaarde heeft en doorgaat tot een schutfrequentie van 0. Pas als de Nieuwe Sluis volledig uit bedrijf

is genomen, wordt overgegaan op het reduceren van de schutfrequentie bij de Oostsluis. Deze Oostsluis is ongeveer 40% van de dagen geheel buiten gebruik, 40% in gebruik met beperkingen en 20% zonder beperkingen. De Westsluis wordt bij deze strategie nooit geheel buiten gebruik genomen, maar in ongeveer 40% van de dagen zijn er wel beperkingen op de schutfrequentie.

- Bij schutstrategie S2 met stremmingen tot maximaal 8 uur komt het aantal dagen dat er per sluis op volledige capaciteit geschut wordt overeen met schutstrategie S1 (ca. 10%). Ongeveer 70% van de tijd is de maximale stremmingsduur van 8 uur per getijperiode van toepassing bij de Nieuwe Sluis. Voor de Oostsluis is dit 30%, bij de Westsluis 0%. Er wordt bij deze strategie voornamelijk via de Nieuwe Sluis meer geschut dan in S1, omdat het gebruik van de Nieuwe Sluis rond hoogwater nauwelijks tot extra schutverliezen leidt.
- Bij schutstrategie S3 worden de sluiskolken relatief vaak alle drie maximaal gestremd: 60% van de zomerdagen de volledige 4 uur per getijperiode. Ongeveer 20% van de zomerdagen zijn alleen de Nieuwe Sluis en Oostsluis 4 uur per getijperiode gestremd.



Figuur 6-4: Percentage van de zomerdagen (verticaal) waarin er een aantal keer geschut wordt voor elke combinatie van afvoerscenario (Q1-Q3) en schutstrategie (S1-S3)

6.1.7. Vergelijking met studies voor de MER Nieuwe Sluis Terneuzen

In de aanvulling op het deelrapport Water van de MER (VNSC, 2015) zijn ook prognoses gedaan van scheepvaartstremmingen voor wateroverschot en watertekort. Deze prognoses zijn gebaseerd op berekeningen uit Svašek Hydraulics (2014). Daarin is een waterbalansstudie gedaan volgens vergelijkbare principes als in de huidige studie. De sluizen zijn in Svašek Hydraulics (2014) net zo lang gestremd tot de waterbalans op orde is. Het stremmen stopt als het waterstandsverschil erg klein is geworden. Effectief is dit dan waarschijnlijk vergelijkbaar met circa 8 uur per getijperiode stremmen.

In VNSC (2015) zijn de resultaten gepresenteerd: gemiddelde percentages over meerdere jaren voor de voorkeursvariant, vervoersscenario GE2030 en klimaatscenario W+ 2030. De getallen zijn overgenomen in de laatste rij van Tabel 6-4. VNSC (2015) merkt daarbij op dat de getallen in een individueel jaar sterk kunnen verschillen. Dit blijkt inderdaad ook uit Tabel 6-2. De getallen uit VNSC (2015) liggen hoger dan de gemiddelde getallen op basis van 2010-2021, zowel voor wateroverschot als watertekort. Een 1-op-1 vergelijking is echter niet mogelijk, omdat in VNSC (2015) klimaatverandering is toegepast,

waar dit in de getallen op basis van 2010-2021 ontbreekt. Daarnaast is in VNSC (2015) een capaciteit van 10,9 m³/s aangehouden voor stremvrij uitwisselingsspuien, waar dit in de huidige studie 22 m³/s is vanwege de recente verhoging van de grenswaarde voor het uitwisselingsspuien (zie §2.6).

Tabel 6-4: Aantal uren stremming per jaar voor wateroverschot, watertekort en in totaal, inclusief een vergelijking met de getallen uit de MER (VNSC, 2015).

Scenario		Wateroverschot			Watertekort			Totaal		
Debiet	Scheepvaart	NS	OS	WS	NS	OS	WS	NS	OS	WS
2010-2021	S2	0	8	196	209	61	3	209	69	199
	S3	2	25	184	146	71	25	147	96	209
Q2	S2	0	9	210	1459	918	124	1459	927	335
	S3	0	9	210	848	695	523	848	703	733
VNSC (2015), W+ 2030 VKV		3	29	276	377	200	62	379	228	337

Een Topeis in de MER was dat per jaar de beschikbaarheid van de sluizen minimaal 95% zou moeten zijn en per 5 jaar minimaal 98%, voor de situatie na klimaatverandering en met GE2030 scheepvaart.

Tabel 6-5 geeft een overzicht van de beschikbaarheid van de drie sluizen voor de bovenafvoer in de jaren 2010-2021 en bij toepassing van lange stremmingen (S2) of korte stremmingen (S3). In de tabel zijn de jaren 2010-2021 opgenomen, het gemiddelde over deze periode en de situatie met bovenafvoer uit het extreem droge scenario Q2 (inclusief klimaatverandering).

Tabel 6-5: Jaargemiddelde beschikbaarheid van de drie sluizen voor de strategieën S2 en S3 bij de bovenafvoer uit de jaren 2010 tot en met 2021. Getallen in rood voldoen niet aan de topeis uit de MER.

Jaar	NS	OS	WS	NS	OS	WS
	Strategie S2			Strategie S3		
2010	99,5%	99,9%	99,1%	99,6%	99,8%	99,2%
2011	94,6%	98,6%	98,8%	95,8%	98,6%	98,4%
2012	99,6%	99,8%	96,9%	99,5%	99,3%	97,4%
2013	99,8%	99,9%	97,2%	99,8%	99,6%	97,4%
2014	100,0%	99,9%	96,3%	100,0%	99,8%	96,3%
2015	100,0%	99,9%	97,2%	100,0%	99,8%	97,2%
2016	100,0%	99,8%	96,2%	100,0%	99,6%	96,4%
2017	94,5%	97,7%	98,5%	96,2%	97,7%	97,9%
2018	94,9%	99,1%	98,2%	96,3%	98,3%	98,0%
2019	91,8%	96,7%	98,6%	95,1%	96,4%	97,0%
2020	96,6%	99,3%	98,1%	97,6%	98,7%	98,0%
2021	100,0%	99,9%	97,7%	100,0%	99,4%	98,1%
Gemiddeld	97,6%	99,2%	97,7%	98,3%	98,9%	97,6%
Q2	83,3%	89,4%	96,2%	90,3%	92,0%	91,6%

Voor de periode 2010-2021 is de minimale beschikbaarheid bij lange stremmingen (S2) gelijk aan 92% (Nieuwe Sluis, 2019 maatgevend), 97% (Oostsluis, 2019 maatgevend) en 96% (Westsluis, 2016 maatgevend). Het individuele jaar 2019 voldoet dus niet aan de eis van 95%. Dit geldt ook voor de jaren 2011, 2017 en 2018 (beschikbaarheid net onder 95%), en vanzelfsprekend voor het scenario van een droge zomer met klimaatverandering (Q2). Bij korte stremmingen (S3) zijn deze percentages gelijk aan 95% (Nieuwe Sluis, 2019 maatgevend), 96% (Oostsluis, 2019 maatgevend) en 96% (Westsluis, 2016 maatgevend). Bij toepassing van korte stremmingen is de beschikbaarheid van alle sluizen voor de bovenafvoer van 2010-2021 dus groter of gelijk aan de topeis van 95%. Alleen in een scenario van een droge zomer met klimaatverandering (scenario Q2) zakt de beschikbaarheid tot 90-92%.

De vereiste 98% voor perioden van 5 jaar wordt regelmatig niet gehaald, zo blijkt uit de waarden in Tabel 6-6. Door de opeenvolgende droge jaren in de periode 2017-2020 is de 5-jaars gemiddelde beschikbaarheid van de Nieuwe Sluis slechts 96-97%, afhankelijk van de stremmingsduur (strategie S2 of S3).

Voor al de bovenstaande getallen geldt dat klimaatverandering nog niet expliciet meegenomen, waar dat volgens de topeis wel meegenomen zou moeten worden.

Tabel 6-6: Gemiddelde beschikbaarheid over perioden van 5 jaar van de drie sluizen voor de strategieën S2 en S3 bij de bovenafvoer uit de jaren 2010-2021. Getallen in rood voldoen niet aan de topeis uit de MER.

Jaar	NS	OS	WS	NS	OS	WS
	Strategie S2			Strategie S3		
2010-2014	98,7%	99,6%	97,6%	99,0%	99,4%	97,7%
2011-2015	98,8%	99,6%	97,3%	99,0%	99,4%	97,3%
2012-2016	99,9%	99,9%	96,7%	99,9%	99,6%	96,9%
2013-2017	98,9%	99,4%	97,1%	99,2%	99,3%	97,0%
2014-2018	97,9%	99,3%	97,3%	98,5%	99,0%	97,2%
2015-2019	96,2%	98,6%	97,7%	97,5%	98,3%	97,3%
2016-2020	95,6%	98,5%	97,9%	97,0%	98,1%	97,5%
2017-2021	95,6%	98,5%	98,2%	97,0%	98,1%	97,8%
Gemiddeld	97,7%	99,2%	97,5%	98,4%	98,9%	97,4%

6.1.8. Slotopmerkingen

Stremmen gedurende een paar uur geeft een aanzienlijke verhoging van de gemiddelde passeertijd van de schepen gedurende de hele week. Het effect is groter dan enkel de schepen die tijdens de stremming wachten. Ook na de stremming is er nog een verhoging van de passeertijden aangezien er een wachtrij moet worden weggewerkt. Zelfs als de stremming in een rustige periode plaats vindt. Voornamelijk de zeevaart ondervindt de hinder van stremmingen (VNSC, 2015b).

In het model ligt de stremmingsvolgorde vast. Ook wordt elke stremming gezien als hinder voor de scheepvaart, waar in werkelijkheid ook enige flexibiliteit mogelijk is in de inzet van de drie sluizen zonder dat dit leidt tot hogere wachttijden voor de scheepvaart. De gepresenteerde getallen zijn daarom dus slechts een globale indicatie van de te verwachten effecten.

6.2. Relatie bovenafvoer en verzilting

Deze paragraaf laat zien hoe de chlorideconcentratie in het KGT reageert op de bovenafvoer. Voor de bovenafvoer is gebruik gemaakt van de totale bovenafvoer vanuit Gent en Mendonk (de reeks 'Totaal' in Figuur 3-1) voor de periode 2010 t/m 2021. Voor de chlorideconcentratie op het KGT zijn drie databronnen gebruikt:

- De gemeten chlorideconcentraties bij de meetpunten Sluiskil Brug (KGTB) en Sas van Gent (KGTS) op een niveau van NAP+0,25 m (dat is de bovenste meting, dus KGTBb en KGTSb) voor de periode 2014 t/m 2021;
- De overeenkomstige gemodelleerde zoutconcentraties uit het SOBEK-model;
- Deze gemodelleerde zoutconcentraties uit SOBEK na vervangen van de Middensluis door de NST.

6.2.1. Analyse metingen KGTS en KGTB

Het kantelpunt is gedefinieerd als de bovenafvoer waarbij de chlorideconcentratie stabiel is. Bij een bovenafvoer onder het kantelpunt nemen de chlorideconcentraties gemiddeld genomen toe, en omgekeerd voor bovenafvoeren boven het kantelpunt. In de zoektocht naar het kantelpunt is een relatie gelegd tussen de bovenafvoer Q (m^3/s) en de verandering van de chlorideconcentratie ΔCl (mg/l). Op basis van daggemiddelde debieten en chlorideconcentraties kon echter slechts een klein deel van de variantie van ΔCl worden verklaard. Daarom is de overstap gemaakt naar weekgemiddelde waarden.

De volgende parameters zijn beschouwd:

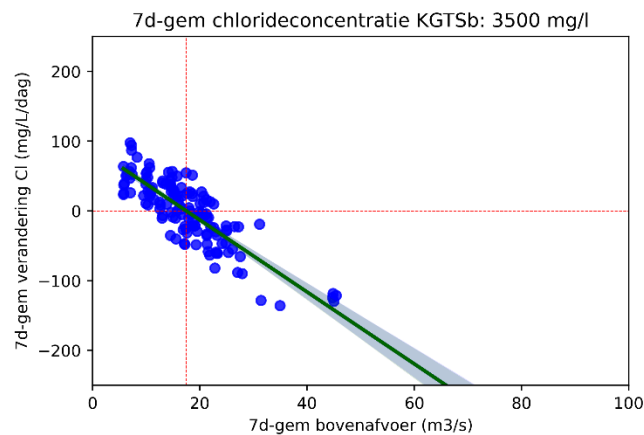
- De 7-daags gemiddelde chlorideconcentratie, kortweg aangeduid als $Z7$
- De verandering van de daggemiddelde chlorideconcentratie over een periode van 7 dagen ($\Delta Z7$)
- De 7-daags gemiddelde bovenafvoer, aangeduid als $Q7$

Het lineaire regressiemodel ziet er dan als volgt uit:

$$\Delta Cl7 = c_1 Q7 + c_2$$

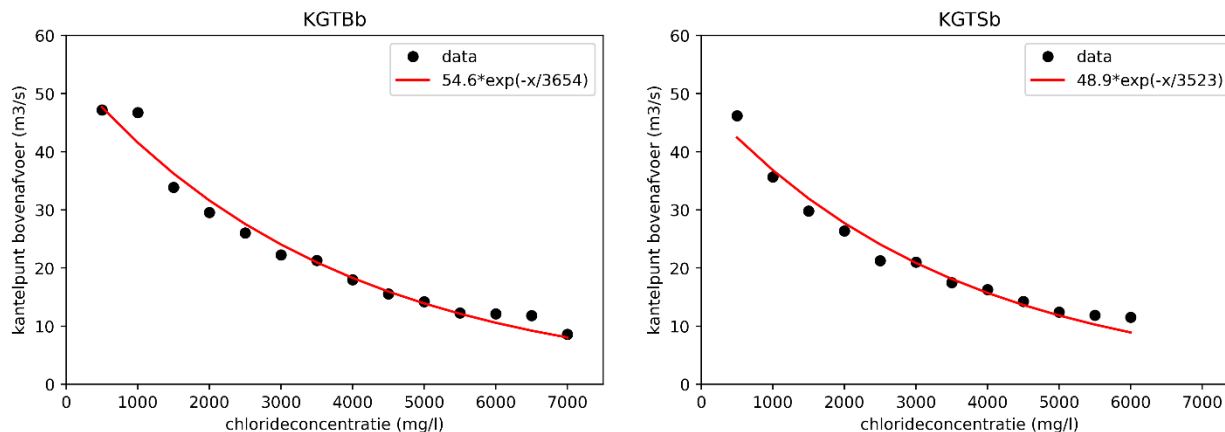
Het kantelpunt is dan de waarde voor $Q7$ waarbij $Z7$ stabiel is, ofwel $\Delta Z7 = 0$. Het kantelpunt bleek geen constante waarde te zijn, maar afhankelijk te zijn van de chlorideconcentratie zelf. Hoe zouter het kanaal, hoe lager de benodigde bovenafvoer om de chlorideconcentratie te laten dalen. Daarom is de data onderverdeeld in chlorideklassen voor $Z7$ met stappen van 500 mg/l en is voor elke chlorideklasse een afzonderlijke lineaire regressie uitgevoerd.

Figuur 6-5 geeft een voorbeeld van de lineaire regressie tussen $Q7$ en $\Delta Z7$ voor meetpunt Sas van Gent (KGTSb, waarbij de 'b' staat voor 'boven'), voor alle datapunten waarbij $Z7$ tussen 3250 en 3750 mg/l ligt (chlorideklasse 3500 mg/l). In dit voorbeeld ligt het kantelpunt bij ongeveer 18 m^3/s . Bij een lagere bovenafvoer stijgt de chlorideconcentratie gemiddeld genomen naar hogere waarden dan 3500 mg/l , bij een bovenafvoer boven het kantelpunt daalt de concentratie overwegend.



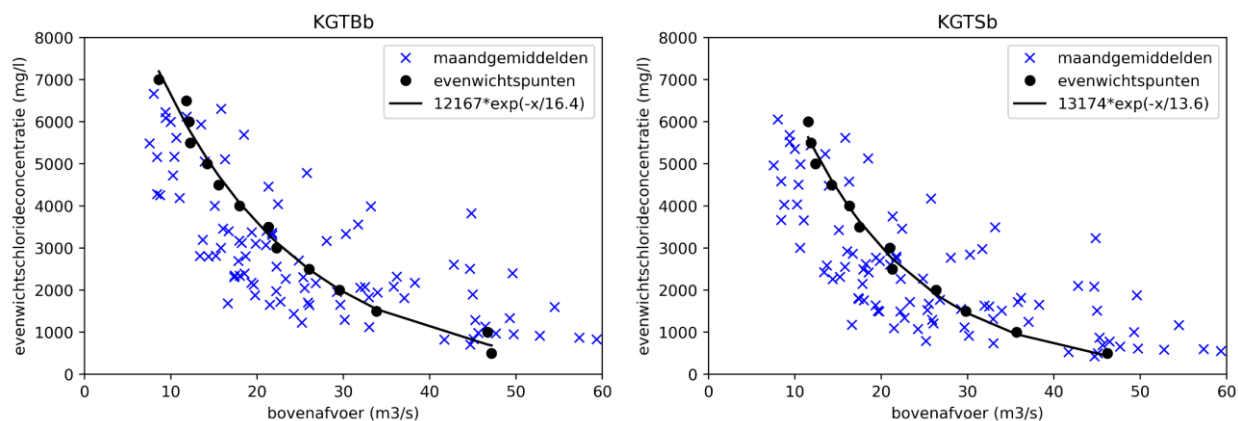
Figuur 6-5: Voorbeeld van een regressieanalyse om de relatie te bepalen tussen $Q7$ en $\Delta Z7$ voor meetpunt KGTSb voor de chlorideklasse van 3250-3750 mg/l

Als de kantelpunten voor alle chlorideklassen bij elkaar worden genomen, volgt een relatie tussen chlorideconcentratie en het kantelpunt, zie Figuur 6-6. Via de exponentiële trendlijn voor KGTSb kan bijvoorbeeld worden ingeschat dat een gemiddelde bovenafvoer van $48,9 \cdot \exp(-3000/3523) = 21 \text{ m}^3/\text{s}$ nodig is om de chlorideconcentratie continu onder het niveau van 3000 mg/l te houden (in de oude situatie met Middensluis).



Figuur 6-6: Het kantelpunt voor de bovenafvoer bij locatie Sluiskil brug (KGTB, links) en Sas van Gent (KGTS, rechts) als functie van de chlorideconcentratie

Andersom berekend kan deze relatie worden gebruikt om een evenwichtsconcentratie te bepalen bij een bepaalde bovenafvoer. Als de bovenafvoer langdurig aanhoudt, zal de chlorideconcentratie richting de evenwichtsconcentratie bewegen. Figuur 6-7 toont voor beide meetpunten de evenwichtsconcentraties als functie van de bovenafvoer (zwarte punten en zwarte gefitte lijn). Ter vergelijking zijn ook de gemeten combinaties van maandgemiddelde bovenafvoer en chlorideconcentratie in de figuren opgenomen (blauwe kruisjes). Daaruit volgt dat in veel maanden de gemiddelde concentratie afwijkt van de evenwichtsconcentratie, omdat de bovenafvoer niet lang genoeg constant is geweest.

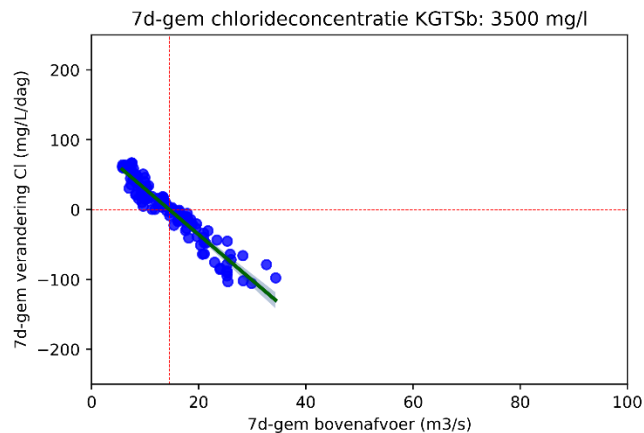


Figuur 6-7: Evenwichtsconcentratie (mg/l) bij locatie Sluiskil brug (KGTBb, links) en Sas van Gent (KGTSb, rechts) als functie van de totale bovenafvoer

6.2.2. Analyse SOBEK-resultaten voor KGTS en KGTB

Vervolgens is dezelfde analyse uitgevoerd voor het gekalibreerde SOBEK-model voor de periode 2016-2021, voor de situatie met het oude sluizencomplex. De dieptegemiddelde saliniteit uit SOBEK is daarbij omgezet in een chlorideconcentratie op 1,8 m onder het wateroppervlak, rekening houdend met een factor 1,8 tussen saliniteit en chlorideconcentratie en 0,81 als vermenigvuldigingsfactor voor het omzetten van de concentraties uit SOBEK in concentraties op ca. 1,8 m onder het wateroppervlak.

Figuur 6-8 toont hetzelfde voorbeeld als Figuur 6-5, maar dan met de gemodelleerde tijdreeks met chlorideconcentraties uit het SOBEK-model voor 2016-2021 in plaats van de gemeten chlorideconcentraties bij KGTSb. Hieruit wordt duidelijk dat het SOBEK-model een gladde representatie van de werkelijke situatie produceert: er is veel meer variatie aanwezig in de werkelijke metingen dan in de SOBEK-resultaten.

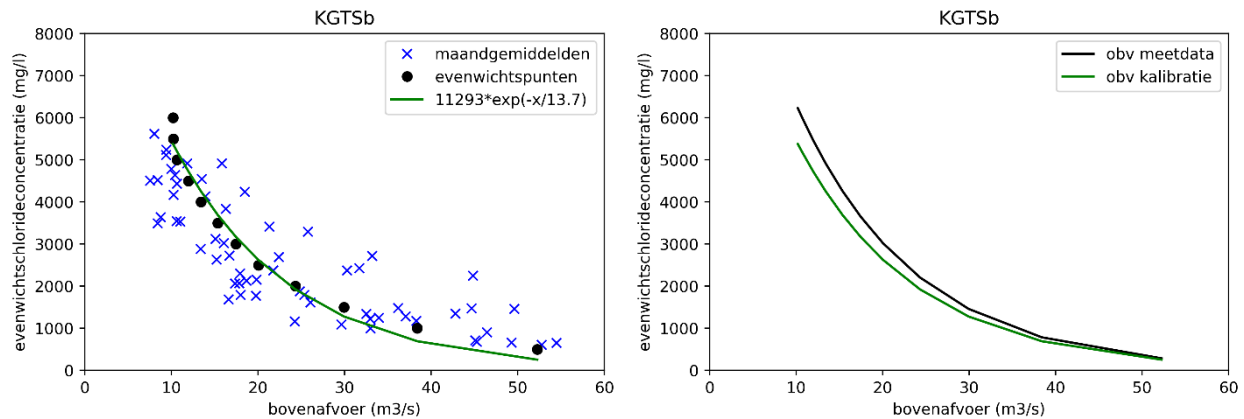


Figuur 6-8: Voorbeeld van een regressieanalyse om de relatie te bepalen tussen Q_7 en ΔZ_7 voor de SOBEK-resultaten voor 2016-2021 bij meetpunt KGTSb voor de chlorideklasse van 3250-3750 mg/l

Ook voor de SOBEK-resultaten zijn de kantelpunten samengevoegd en voor locatie Sas van Gent weer-gegeven in Figuur 6-9 (links). Rechts staat de vergelijking tussen het resultaat op basis van de metingen en het resultaat op basis van de tijdreeks uit SOBEK. Daaruit blijkt dat het evenwichtsgedrag van SOBEK anders is dan het evenwichtsgedrag in de werkelijke situatie. Bij een bepaalde aanvangsconcentratie is er in SOBEK minder afvoer nodig om het zout weer weg te spoelen. Het zout reageert in SOBEK dus makkelijker op de bovenafvoer dan in werkelijkheid.

De chlorideconcentraties in de zomerse TSO-metingen konden overwegend goed gereproduceerd worden (zie §4.5.6). Er is echter een verschil tussen werkelijke chlorideconcentraties (zie de blauwe kruisjes in Figuur 6-7) en evenwichtsconcentraties (de zwarte bolletjes in Figuur 6-7). Het SOBEK-model is gekalibreerd op de momentane waarden van de chlorideconcentraties tijdens de TSO-metingen (met een focus op de zomers). Dit betekent niet per definitie dat ook het evenwichtsgedrag van het SOBEK-model overeenkomt met de werkelijkheid. De evenwichtsconcentraties zijn gebaseerd op kantelpunten: de bovenafvoer die nodig is om het systeem te laten kantelen van verziltend naar ontziltend. Dit kantelpunt ligt blijkbaar lager in SOBEK, waar dieptegemiddelde stroming het dieptegemiddelde zout moet wegspoelen. In de werkelijkheid is er een zouttong aanwezig bij de bodem. Het is bekend dat een goed gemengd systeem makkelijker zoet te spoelen is dan een gelaagd systeem.

Bij het interpreteren van de evenwichtsconcentraties bij realisatie van de Nieuwe Sluis dient dit verschil in het achterhoofd te worden gehouden.

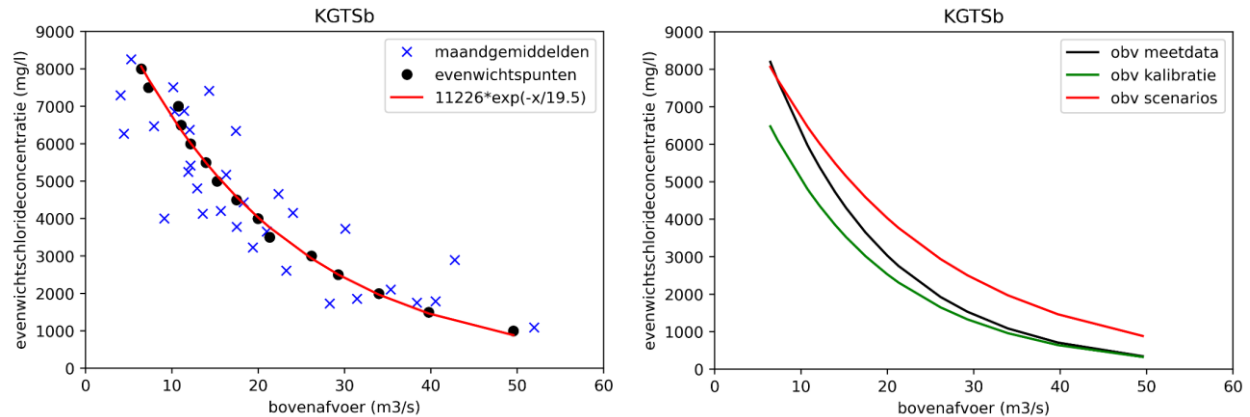


Figuur 6-9: Evenwichtsconcentratie (mg/l) bij locatie Sas van Gent (KGTSb) op basis van de SOBEK-berekeningen voor de kalibratieperiode (2016-2021) als functie van de totale bovenafvoer (links). Rechts staat een vergelijking tussen de evenwichtsconcentraties op basis van de chloridemetingen en op basis van de SOBEK-tijdreeksen.

6.2.3. Analyse SOBEK-resultaten met Nieuwe Sluis Terneuzen

Tot slot is beschouwd hoe de kantelpunten en evenwichtsconcentraties verschuiven bij aanleg van de Nieuwe Sluis. Daarvoor zijn de debiet- en chloridetijdreeksen voor de gemiddelde winter, gemiddelde zomer, droge winter, droge zomer en extreem droge zomer met klimaatveranderingseffect samengevoegd (allemaal met het scheepvaartscenario S2 met stremmingen van maximaal 8 uur). Uit de combinaties van bovenafvoer en gemodelleerde zoutconcentraties volgt het verband uit Figuur 6-10. Merk op: de evenwichtsconcentraties na aanleg van de Nieuwe Sluis, ingeschat op basis van het SOBEK-model (de rode lijn), is waarschijnlijk een onderschatting van de werkelijke evenwichtsconcentraties, rekening houdend met het in §6.2.2 benoemde verschil tussen de groene en zwarte lijn.

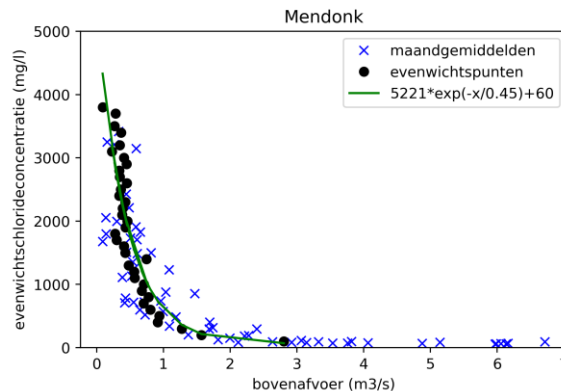
De groene en rode lijn volgen beide uit het SOBEK-model. Daardoor zijn deze twee lijnen goed met elkaar te vergelijken. Uit deze vergelijking volgt dat de evenwichtsconcentraties bij lage afvoeren (ca. 15 m³/s) met ongeveer 1500 mg/l toenemen bij Sas van Gent door de aanleg van de Nieuwe Sluis en de bijbehorende toename van de verkeersstromen (GE2030). Andersom beredeneerd: er is ongeveer een 8 m³/s hogere gemiddelde bovenafvoer nodig om te compenseren voor de aanleg van de Nieuwe Sluis (afgelezen bij ongeveer 3000 mg/l).



Figuur 6-10: Evenwichtsconcentratie (mg/l) bij locatie Sas van Gent (KGTSb) op basis van de SOBEK-berekeningen voor de samengestelde scenarioberekeningen (Q1, Q2 en Q3 i.c.m. S2) als functie van de totale bovenafvoer (links). Rechts staat een vergelijking tussen de evenwichtsconcentraties op basis van de chloridemetingen en op basis van de SOBEK-tijdreeksen voor de kalibratie (groen) en de samengestelde scenarioberekeningen (rood).

6.2.4. Moervaart en Zuidlede

Voor de Moervaart en Zuidlede is dezelfde analyse uitgevoerd. Omdat de metingen slechts eenmaal per maand plaatsvinden, is gebruik gemaakt van de met SOBEK gemodelleerde chlorideconcentraties op de Moervaart bij Mendonk voor de kalibratieperiode 2016-2020, en vergeleken met het gemeten debiet bij Mendonk (wat ook in SOBEK is opgelegd, verdeeld over de Moervaart en Zuidlede). Te zien is dat de Moervaart bij Mendonk is SOBEK pas sterk gaat verzilten bij een bovenafvoer onder 0,5 m³/s. Bij hogere afvoeren is de evenwichtsconcentratie op deze zijtak laag.



Figuur 6-11: Evenwichtsconcentratie (mg/l) bij locatie Mendonk op de Moervaart op basis van de SOBEK-berekeningen voor de kalibratieperiode (2016-2021) als functie van de totale bovenafvoer van de Moervaart.

7. Conclusies en aanbevelingen

7.1. Conclusies

Dit rapport beschrijft de oppervlaktewatermodellering voor het Kanaal Gent-Terneuzen (KGT), met een verkenning van de effecten van de aanleg van de Nieuwe Sluis in drie afvoerscenario's:

1. een opeenvolging van drie gemiddelde winters en gemiddelde zomers
2. een droge zomer met twee zeer droge maanden, inclusief klimaatveranderingseffecten (W+, 2050)
3. een opeenvolging van drie droge winters en droge zomers

Voor de scheepvaartintensiteit bij Terneuzen is gebruik gemaakt van het MER-scenario Global Economy 2030 (GE2030) voor de situatie met Nieuwe Sluis. Er zijn vier verschillende schutstrategieën onderzocht om in de drie afvoerstrategieën het kanaalpeil te reguleren:

1. reductie van de schutfrequentie,
2. lange stremmingen (maximaal 8 uur per getijperiode),
3. korte stremmingen (maximaal 4 uur per getijperiode),
4. geen beperkingen voor de scheepvaart, maar oppompen van zout water uit de Westerschelde.

Alle beperkingen zijn in droge tijden eerst opgelegd aan de Nieuwe Sluis, daarna aan de Oostsluis en tenslotte (indien nodig) ook aan de Westsluis.

Gemiddelde winters en gemiddelde zomers

De aanleg van de Nieuwe Sluis en de bijbehorende toename van de verkeersstromen (GE2030) zorgen voor verhoogde chlorideconcentraties op het KGT. De toename onder gemiddelde omstandigheden is op verschillende manieren gekwantificeerd:

- Bij lage afvoeren (ca. 15 m³/s) zorgen de genoemde wijzigingen voor een toename van de evenwichtsconcentraties van ongeveer 1500 mg/l bij Sas van Gent, een meetlocatie ongeveer halverwege het KGT, nabij de Vlaams-Nederlandse grens. Andersom beredeneerd: er is een ongeveer 8 m³/s hogere gemiddelde bovenafvoer nodig om te compenseren voor de aanleg van de Nieuwe Sluis.
- In een gemiddelde zomer varieerden voorheen de maximale dieptegemiddelde chlorideconcentraties op het kanaal tussen de 5000 mg/l bij Gent en 7000 mg/l bij Terneuzen. Na aanleg van de Nieuwe Sluis en bij realisatie van de scheepvaartprognoses van het MER-scenario GE2030 nemen deze piekwaarden voor de chlorideconcentratie volgens het oppervlaktewatermodel toe tot ongeveer 7000 mg/l bij Gent en 10000 mg/l bij Terneuzen.
- De seizoensgemiddelde chlorideconcentraties (1 april tot 1 oktober) bij meetpunt Sas van Gent, 1,8 meter onder het wateroppervlak, worden op basis van de uitgevoerde SOBEK-berekeningen ongeveer 3700 mg/l in een gemiddelde zomer, 4700 mg/l in een droge zomer en 5600 mg/l in een droge zomer met 2-maanden laag periode en klimaatverandering conform W+ in 2050. Al deze waarden zijn hoger dan de KRW-norm van 3000 mg/l.

De wijze waarop met schutbeperkingen het kanaalpeil wordt gereguleerd heeft in een gemiddelde zomer nauwelijks effect op de chlorideconcentraties, omdat de beperkingen slechts sporadisch worden toegepast.

Extreem droge zomer inclusief klimaatveranderingseffect

In een periode van 2 maanden met grote droogte, inclusief het effect van klimaatverandering, krijgen keuzes over het gebruik van de schutsluizen wel invloed op de chlorideconcentraties in het kanaal (zie Tabel 7-1):

- Als het peilbeheer wordt bewerkstelligd via een reductie van de schutfrequentie over de hele dag (strategie S1 in Tabel 7-1), zorgt dat voor de laagste chlorideconcentraties op het kanaal. Het effect op het totale aantal schuttingen is wel het grootst bij deze strategie, met name voor het gebruik van de Nieuwe Sluis.
- Toepassing van lange stremmingen rond laagwater (8 uur per getijperiode, strategie S2) leidt seizoensgemiddeld (1 april tot 1 oktober) tot ongeveer 500 mg/l hogere chlorideconcentraties dan het terugbrengen van de daggemiddelde schutfrequentie. De Nieuwe Sluis en Oostsluis worden dan regelmatig langdurig gestremd. Alleen scheepvaart via de Westsluis wordt relatief weinig gehinderd.
- Het alternatief is kortere stremmingen (4 uur per getijperiode, strategie S3). Dan worden de beperkingen meer gelijkmatig verdeeld over de drie sluizen. Dit leidt wel tot hogere chlorideconcentraties op het kanaal (seizoensgemiddeld 150 mg/l hoger dan de langere stremmingen). Daarnaast is 4 uur stremmen van alle schutsluizen bij tijden niet afdoende om het kanaalpeil boven de ondergrens van NAP+1,85 m (TAW+4,20 m) te houden.
- Een simulatie met oppompen van water uit de Westerschelde (strategie S4) leidt tot de hoogste chlorideconcentraties op het KGT, ongeveer 500-600 mg/l hoger dan bij toepassen van stremmingen.

Tabel 7-1: Effecten van 2 maanden extreme droogte (Q2) op chlorideconcentraties en schutfrequentie met: een inschatting van de seizoensgemiddelde chlorideconcentratie (mg/l) bij KGTS, 1,8 meter onder het wateroppervlak op basis van SOBEK, gemiddeld over de periode 1 april tot 1 oktober, en de gemiddelde daggemiddelde schutfrequentie tijdens de 3 maanden zomer voor een droge zomer met twee maanden extreme droogte (Q2).

	S1	S2	S3	S4
Chlorideconcentratie bij meetpunt KGTS	4900	5410	5560	6010
Schutfrequentie Nieuwe Sluis	1,5	4,8	7,4	10,4
Schutfrequentie Westsluis	12,9	13,6	11,0	14,3
Schutfrequentie Oostsluis	7,1	12,3	14,8	20,3

Opeenvolging van droge zomers

De berekening met een opeenvolging van droge winters en droge zomers laat zien dat de bovenafvoer en chlorideconcentraties in de winter slechts een zeer beperkte invloed hebben op de concentraties in de zomer. De bovenafvoer in de zomer heeft het effect van de begintoestand vanuit de winter al binnen enkele maanden tenietgedaan (dus ongeveer in mei). In de periode met de grootste droogte (juni-september) heeft de winter geen invloed meer.

Stremmen op zoutlast

Bovenstaande strategieën zijn allemaal gericht op peilbeheer. Als gestremd zou worden om zoutindringing te beperken, zou dat het best rond hoogwater kunnen gebeuren. Uit berekeningen volgt dat de

seizoensgemiddelde concentratie bij Sas van Gent (1 april tot 1 oktober) met ongeveer 100 mg/l daalt per uur stremmen rond elk hoogwater in de volledige zomer (21 juni tot 21 september). Een stremmingsduur van 4 uur rond elk hoogwater is voor een gemiddelde zomer nog niet genoeg om de seizoensgemiddelde chlorideconcentratie te laten dalen tot onder de KRW-norm van 3000 mg/l. Een stremming rond hoogwater draagt weinig bij aan het peilbeheer wat betekent dat er naast deze stremmingen rond hoogwater ook nog stremmingen nodig kunnen zijn om het peil op orde te houden.

Effecten op Moervaart en Zuidlede

De chlorideconcentraties op de zijtakken Moervaart en Zuidlede worden slechts in beperkte mate beïnvloed door de exacte chlorideconcentraties op het KGT. De bovenafvoer is de meest bepalende factor voor de momenten waarop de Moervaart en Zuidlede te maken krijgen met verhoogde chlorideconcentraties. Op enige afstand vanaf de monding bij het KGT is niet de chlorideconcentratie in het KGT maatgevend voor het al dan niet optreden van verzilting, maar de debietfluctuatie op de zijtakken. Uit metingen en overleg met de beheerders blijkt dat perioden met een debiet dat vrijwel nul is of zelfs omkeert van richting leiden tot verzilting die ver door kan dringen op de Moervaart en Zuidlede, ongeacht de exacte chlorideconcentratie in de monding. Op momenten waarop de zijtakken verzilt, zorgt de aanleg van de Nieuwe Sluis er wel voor dat de pieken van de chlorideconcentratie hoger komen te liggen.

7.2. Aanbevelingen

Wij doen de volgende aanbevelingen voor verdere aanscherping en verdieping van dit onderzoek:

- In deze studie is de aanname gedaan dat bij stremmingen schuttingen worden geschrapt en dat de schutfrequentie buiten de stremmingen niet wordt verhoogd. Scheepvaartsimulaties met SIVAK zijn nodig om te bepalen hoe de scheepvaart kan worden afgewikkeld in weken met intensieve stremmingen. Dit viel buiten de scope van de huidige studie.
- Bij het berekenen van het schutten, stremmen en spuien is het bergend oppervlak uit SOBEK aangehouden, zodat het peil in de SOBEK-berekeningen binnen de onder- en bovengrens blijft, en waar mogelijk op streefpeil. In werkelijkheid is het bergend oppervlak ongeveer een factor 1,8 groter, omdat o.a. diverse zijdokken en wateren rond Gent ontbreken in het SOBEK-model. Dit betekent dat de peilfluctuaties te sterk zijn in de huidige SOBEK-berekeningen. Bij kortdurend watertekort of wateroverschot kan dit verschil maken in de benodigde stremmingen. In toekomstig onderzoek naar scheepvaartstremmingen kan dit effect scherper worden meegenomen.
- In deze studie zijn enkele hoekpunten onderzocht qua bovenafvoer. Met name scenario Q2, met een droge zomer met 2-maanden laag en W+ 2050 klimaatverandering is een extreme situatie. We raden aan om ook enkele minder extreme scenario's door te rekenen voor een completer beeld van de effecten van de Nieuwe Sluis in combinatie met diverse bovenafvoeren.
- Bij het kalibreren van het model bleek het noodzakelijk te zijn om de zoutlast, zoals berekend met de Zeesluisformulering, te vermenigvuldigen met een reductiefactor van 0,4. Zonder reductiefactor werd de zoutlast richting het kanaal overschat. De reductiefactor is voornamelijk representatief voor de zoutlast via de grootste sluis: de Westsluis. Bij het toepassen van het model is de reductiefactor ook toegepast op de Nieuwe Sluis. Het is echter niet zeker of de reductiefactor generiek geldt voor de situatie bij Terneuzen, of alleen voor de Westsluis met zijn specifieke eigenschappen (een eventueel remmend effect van de aanwezigheid van de zoutvang op de dichtheidsstroming, het nivelleren en spuien met water uit de zoutvang, de aanwezigheid van bellenschermen, etc.). De toepassing

van de reductiefactor van 0,4 op de zoutlast via de Nieuwe Sluis kan mogelijk een onderschatting voor de zoutlast opleveren. We raden aan om na ingebruikname van de Nieuwe Sluis het zoutgehalte op het KGT nauwlettend te monitoren.

- Daarnaast bevelen we aan om de Zeesluisformulering te benutten om in meer detail te bestuderen wat de netto zoutlast is van de drie schutkolken, en hoe deze in de tijd varieert afhankelijk van het moment van schutten binnen de getijcyclus en het verschil in chlorideconcentratie tussen beide zijden van het sluizencomplex. Deze inzichten zijn nuttig om passende maatregelen tegen zoutindringing te kunnen modelleren.
- Zoutindringing is gevoelig voor deuropentijden van de sluisdeuren. Hier is momenteel weinig informatie over beschikbaar; alleen passagetijdstippen van schepen worden geregistreerd. Het verdient aanbeveling om deuropentijden in meer detail te registreren. Vervolgens kan ook meer duidelijkheid worden verkregen over de effectiviteit van bellenschermen (in het verleden en in de toekomst) en de noodzaak van toepassing van de reductiefactor van 0,4 op de zoutlast vanuit de verschillende schutkolken.
- Uit de 2DV-modellering (Bijlage B: 2DV-modellering KGT) blijkt dat het grootste deel van de 1D-dispersie in SOBEK toegeschreven moet worden aan dichtheidsstroming langs de bodem van het KGT. Dichtheidsstroming kan niet rechtstreeks gemodelleerd worden in een 1D-model. Het gekalibreerde SOBEK-model is daarom alleen van toepassing op de huidige geometrie van het kanaal. Als onderzoek uitgevoerd moet worden naar de invloed van veranderingen in geometrie van het KGT op zoutindringing (verbreding, versmalling, drempels, zoutputten, bellenschermen, enz.), raden wij sterk aan om een 3D-model op te zetten voor het simuleren van de zoutindringing. Daarbij kunnen de randvoorwaarden voor zoutuitwisseling eveneens worden overgenomen uit de Zeesluisformulering.
- In de huidige studie zijn vrij rigide scenario's doorgerekend voor de schutstrategieën, waarbij het peil eerst mag uitzakken tot de ondergrens, waarna de sluizen op een vaste volgorde worden gestremd om het kanaalpeil te reguleren. Wij raden aan om te onderzoeken welke ruimte er is voor optimalisatie, gegeven de verwachting voor de bovenafvoer van het KGT in de dagen die komen gaan. Bij een dergelijke optimalisatiestudie is koppeling aan SIVAK-berekeningen noodzakelijk om te kunnen bepalen welke stremming tot welke hinder voor de scheepvaart leidt.

8. Referenties

Antea (2021)

Nota Ruimtelijke Verdeling Zoutgehalte; Verkennende analyse van de ruimtelijke verspreiding van chloride op het kanaal en de zijlopen. Versie 1.0, 29/11/2021.

Biemond et al. (2022)

Biemond, B., de Swart, H. E., Dijkstra, H. A., & Díez-Minguito, M. (2022). Estuarine salinity response to freshwater pulses. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, e2022JC018669.

Daniëls (2016)

Dispersion and dynamically one-dimensional modeling of salt transport in estuaries. MSc. thesis Technische Universiteit, Jeroen Daniëls, 4 november 2016.

Deltares (2016)

Modelleren van zoutverspreiding met SOBEK 3 en SOBEK-RE. Deltares rapport 1230077-003, Ymkje Huismans et al., december 2016.

IMDC (2021)

Oppervlaktewaterkwantiteitsmodellering van de Zuidlede en het Kanaal van Stekene. Deelrapport 3, Opbouw hydrologisch en hydraulisch model. IMDC in opdracht van Vlaamse Milieumaatschappij, Afdeling Operationeel Waterbeheer. 29 oktober 2021.

Lievense CSO (2015)

Nieuwe Sluis Terneuzen; Deelrapport MER Water. Rapport Vlaams Nederlandse Scheldec commissie VNZT-R-127-7, 23 maart 2015.

MARIN (2015)

Capaciteitsonderzoek Nieuwe Grote Zeesluis Kanaal Gent-Terneuzen. MARIN-rapport 27565-2-MSCN-rev.7, D. ten Hove en A.M. Bilinska, 19 maart 2015.

Mast (2019)

Tussen zoet en zout; Verandering in chlorideconcentratie beïnvloed door klimaatverandering. Afstudeerscriptie HZ University of Applied Sciences, Ivory Mast, 6 juni 2019.

Rijkswaterstaat (1984)

Chlorideconcentratie op het kanaal van Gent naar Terneuzen. Periode 1975-1981. Directie Waterhuishouding en waterbeweging, distrikt Zuidwest. Notanummer 71.013.01, Dordrecht, mei 1984.

Vreeken en Weiler (2021)

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

Waterloopkundig Laboratorium (1988)

Onderzoek naar zoutbestrijding volgens systeem Terneuzen. Verslag bureaustudie. R1860/Q281. WL-rapport C6201, H.W.R. Perdijk, maart 1988.

Rijkswaterstaat (2020)

Operationeel Watermanagement Kanaal Gent-Terneuzen; Factsheet Rijkswaterstaat WMCN, September 2020.

Royal Haskoning & Svašek (2010)

Verkenning maritieme toegankelijkheid Kanaal Gent-Terneuzen - Aanvullend oppervlaktewateronderzoek. Rapport 9V4098.A0, Thomas Vijverberg et al., 22 juli 2010.

Svašek Hydraulics (2014)

Aanvullende waterkwantiteitssimulaties KGT. Memo 1724/U15004/LdW/A, 8 januari 2014.

VNSC (2015)

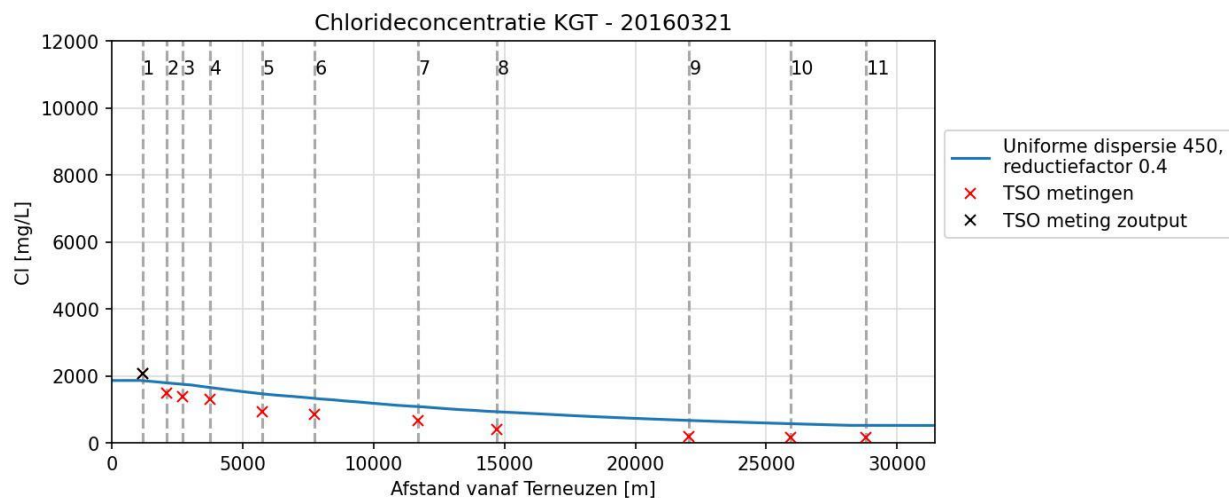
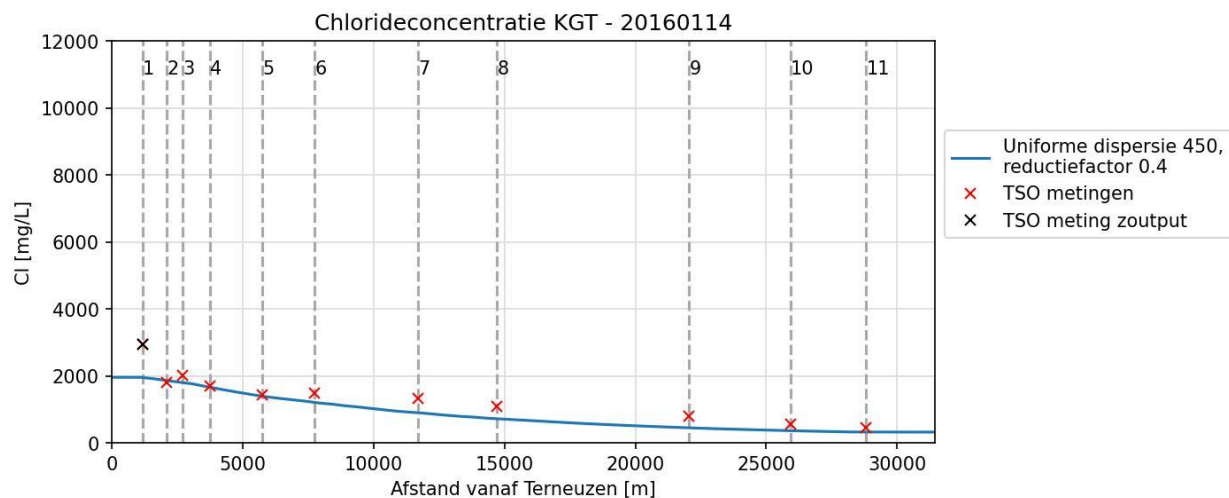
Aanvulling deelrapport MER Water. Rapport Vlaams Nederlandse Scheldec commissie, uitgevoerd door Svasek Hydraulics, Rapportnummer VNZT-R-404-3, 22 september 2015.

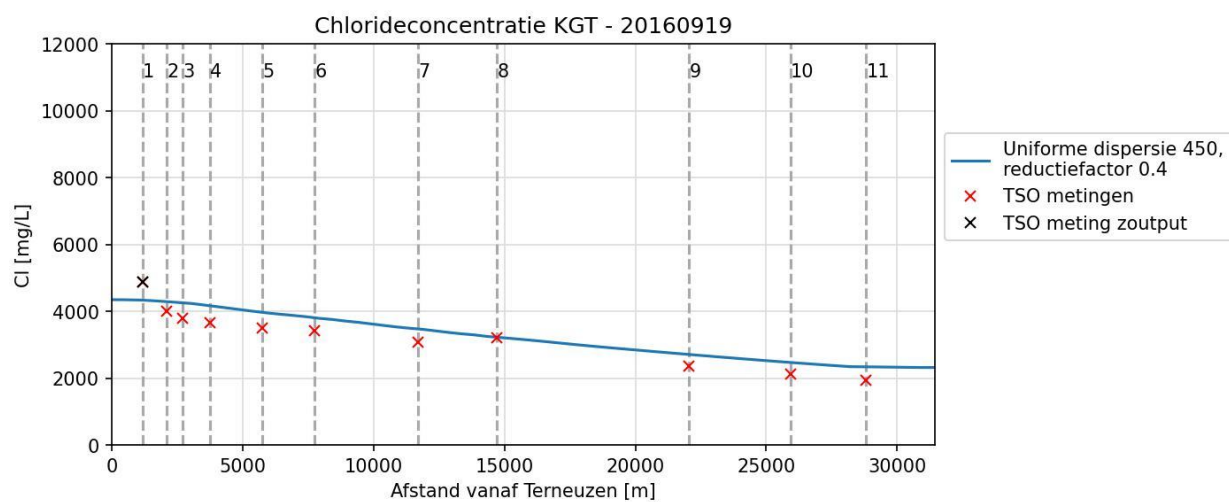
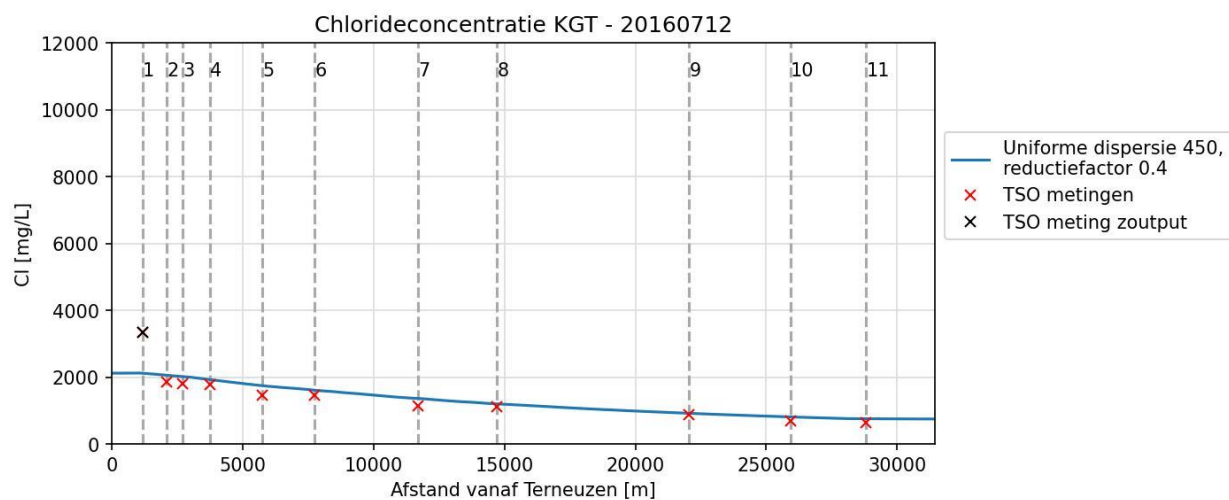
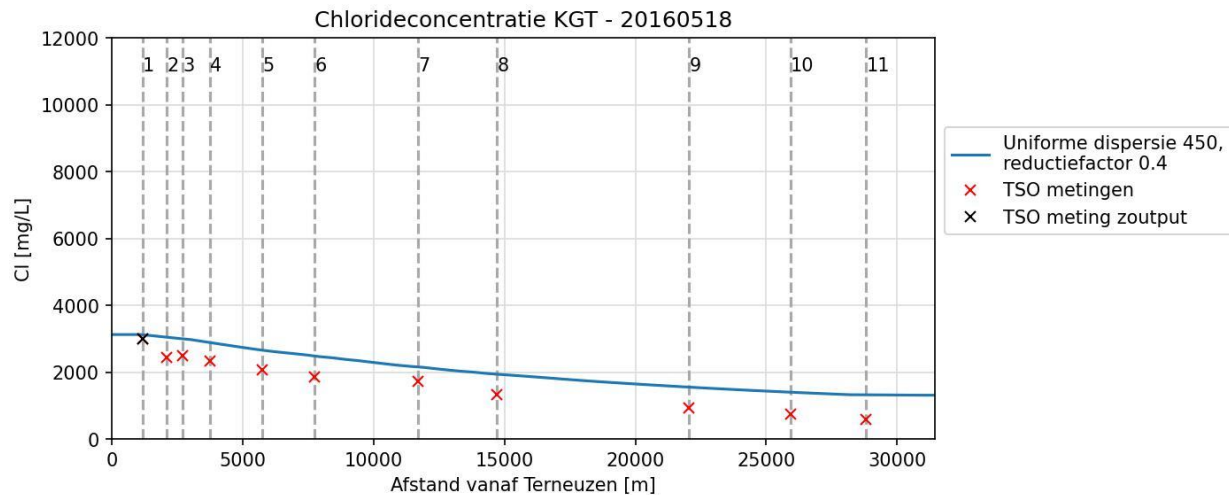
VNSC (2015b)

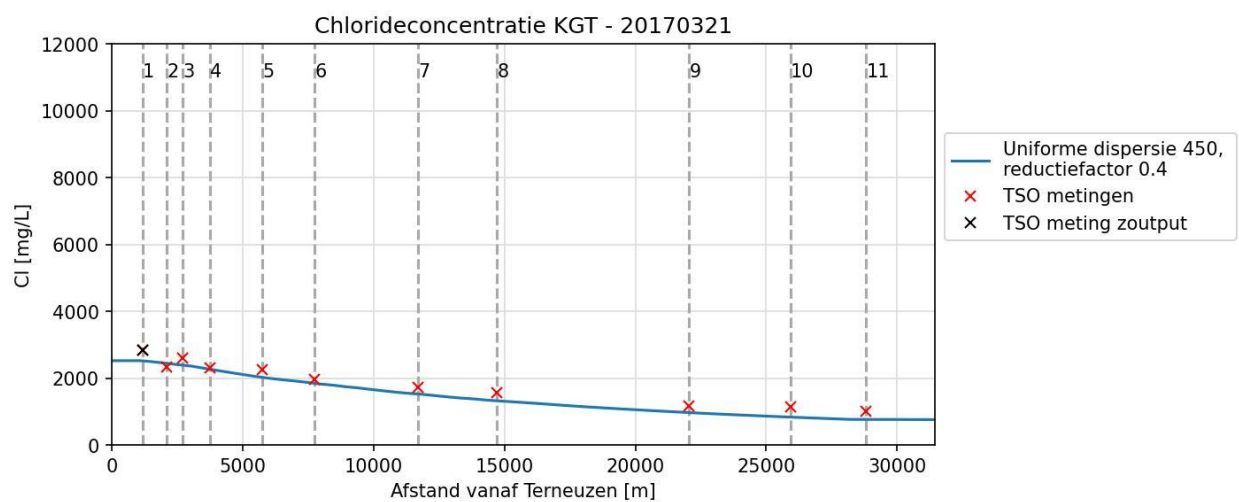
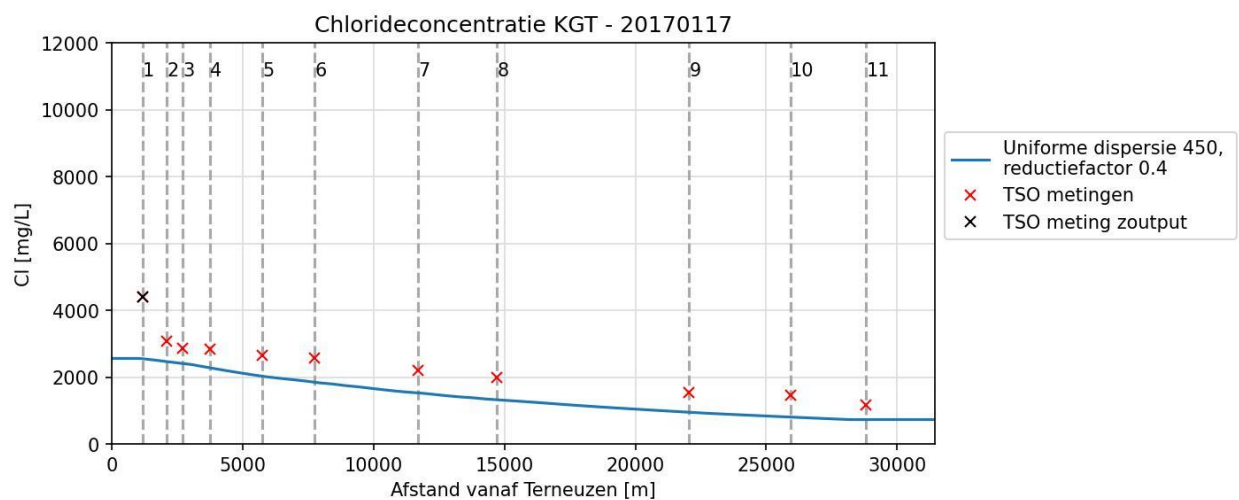
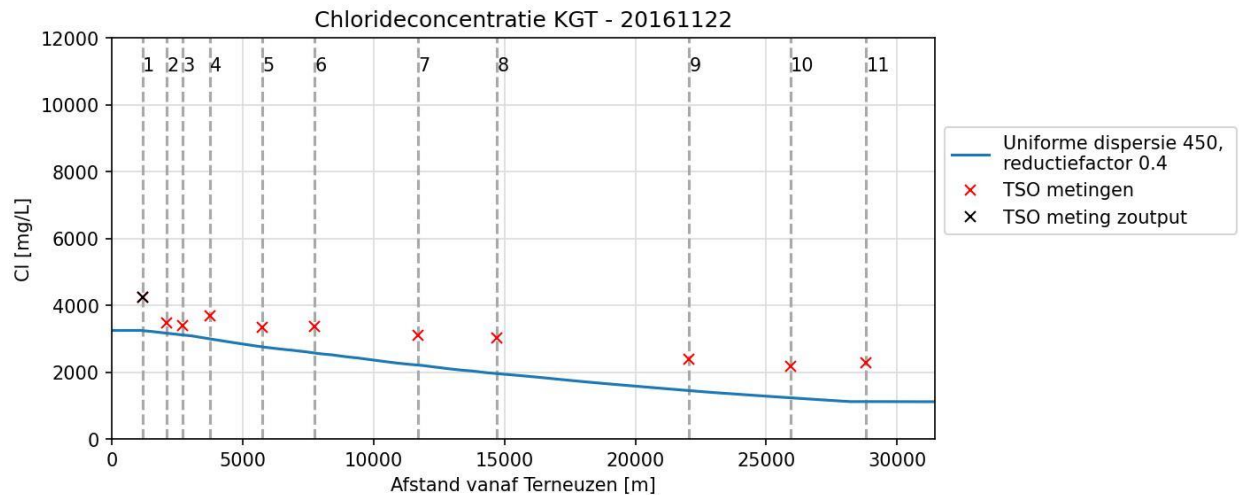
Aanvulling deelrapport MER Verkeer en vervoer. Rapport Vlaams Nederlandse Scheldec commissie, uitgevoerd door LieveenseCSO, Rapportnummer VNZT-R-397-3, 22 september 2015.

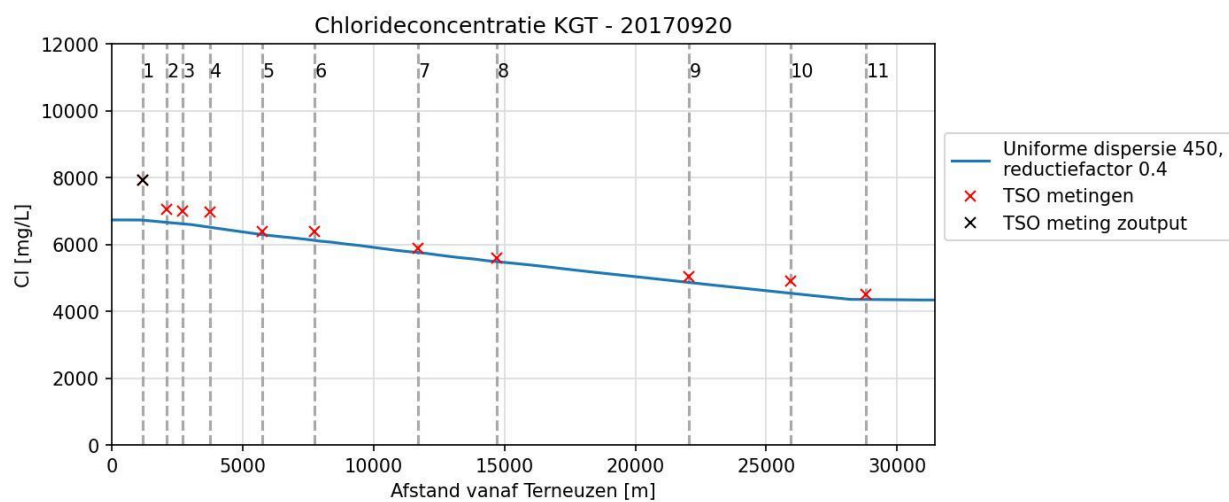
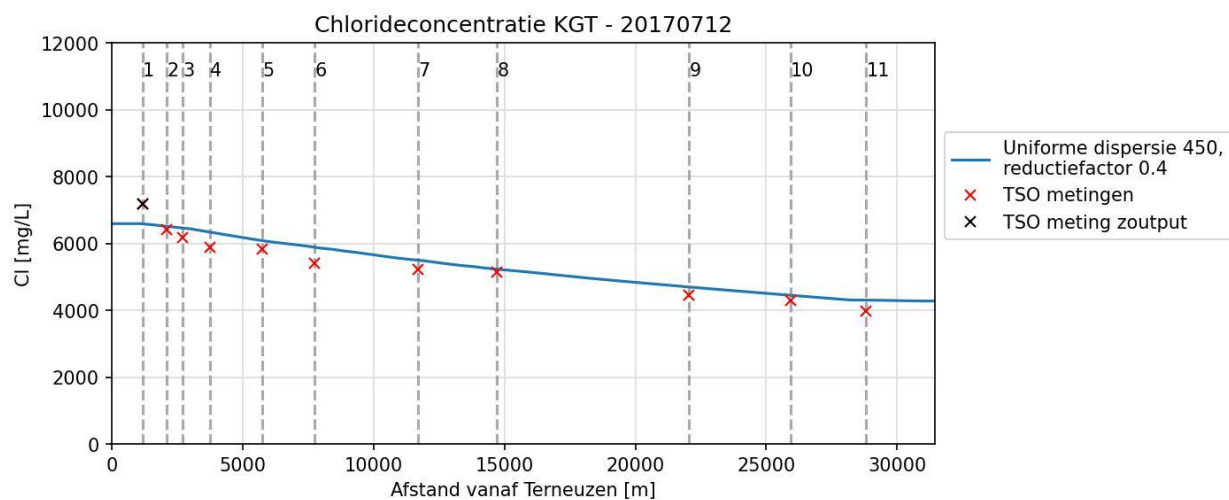
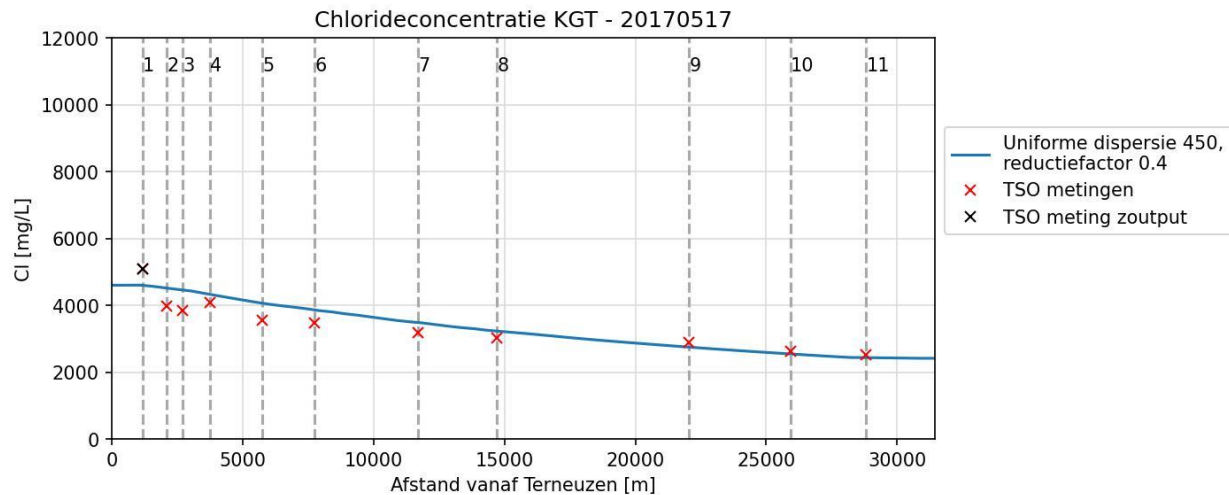
Bijlage A: kalibratie SOBEK

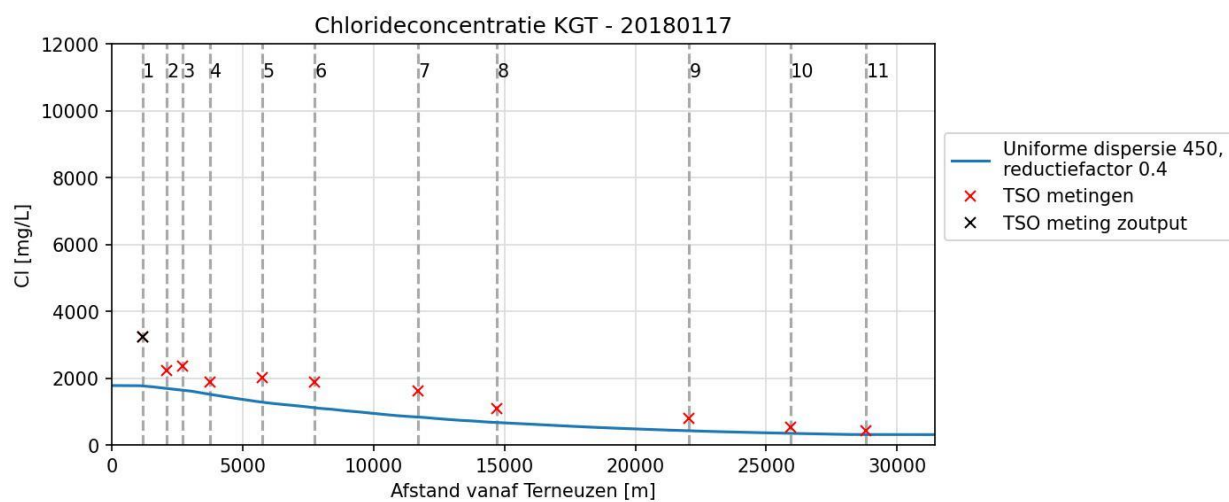
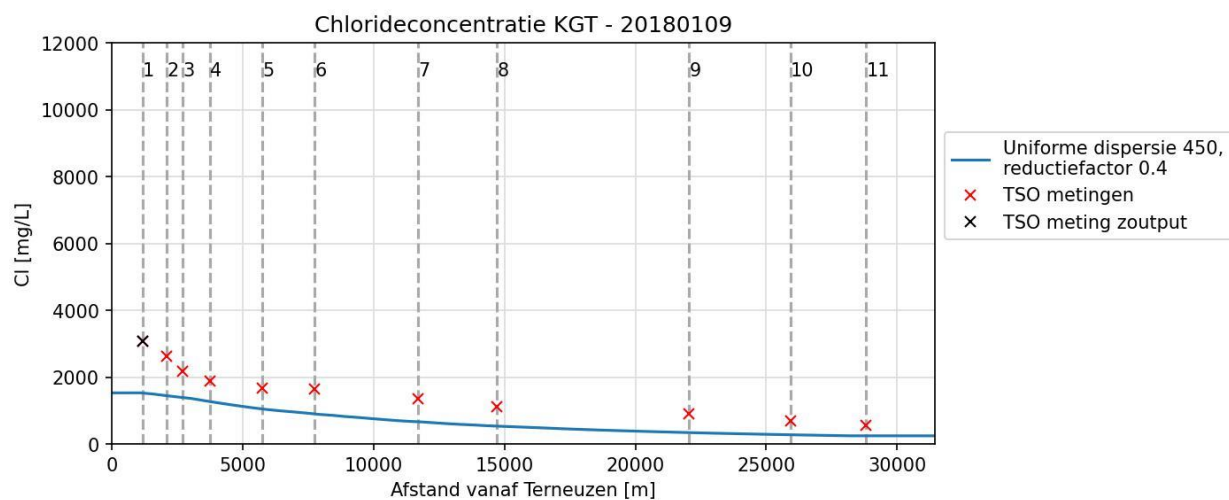
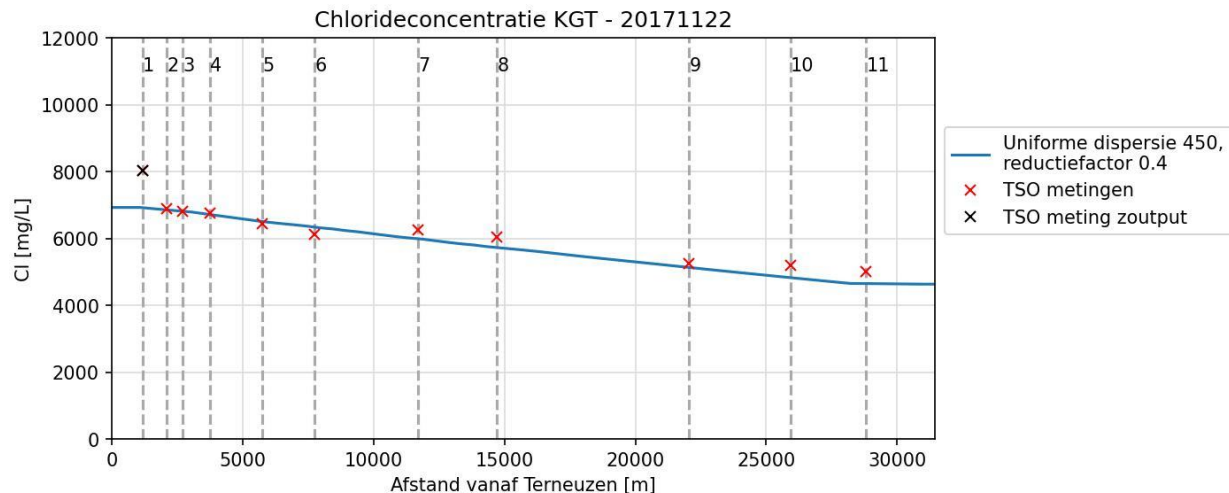
Deze bijlage bevat de vergelijking tussen het SOBEK3-model met de definitieve modelinstellingen met de TSO-metingen. De figuren geven per datum van de TSO-metingen de modelresultaten en metingen weer als functie van de afstand langs het KGT, gemeten vanaf Terneuzen.

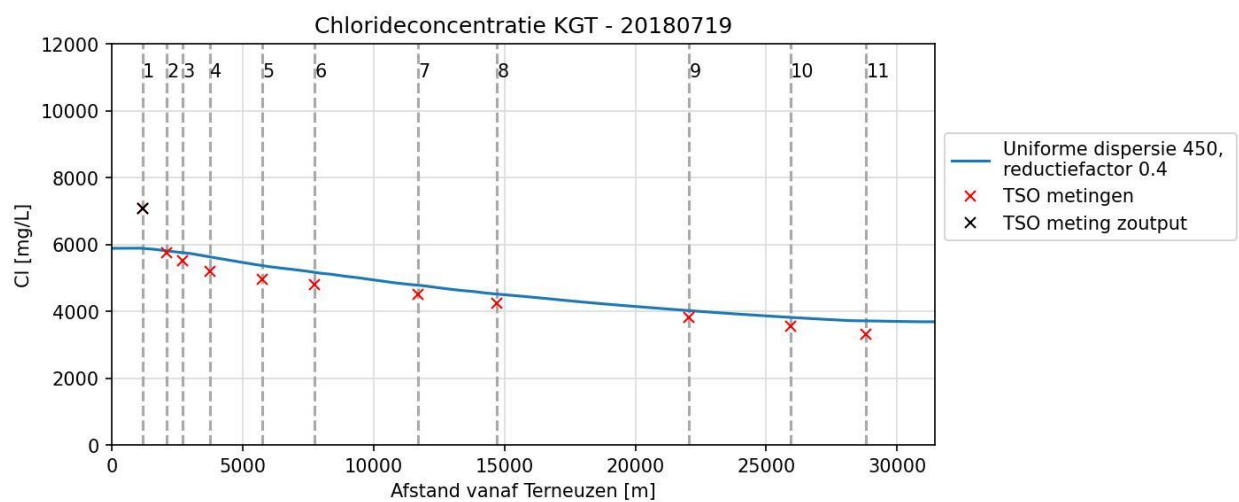
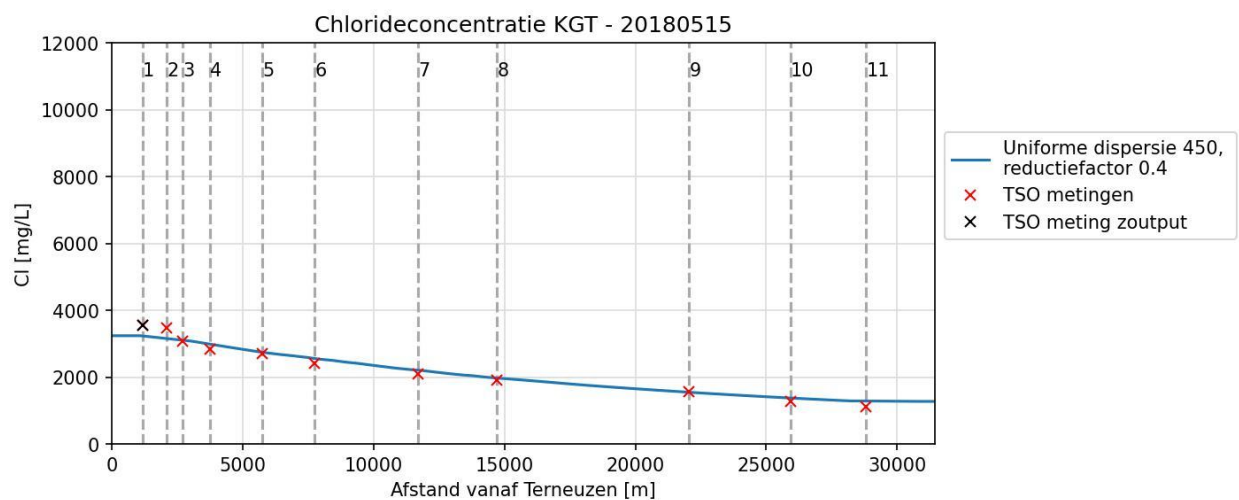
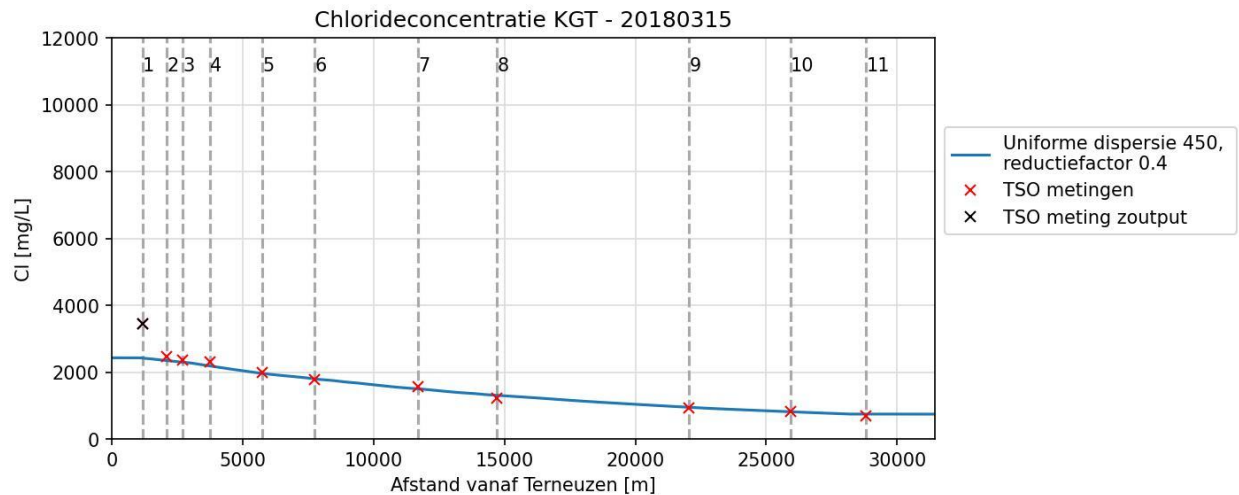


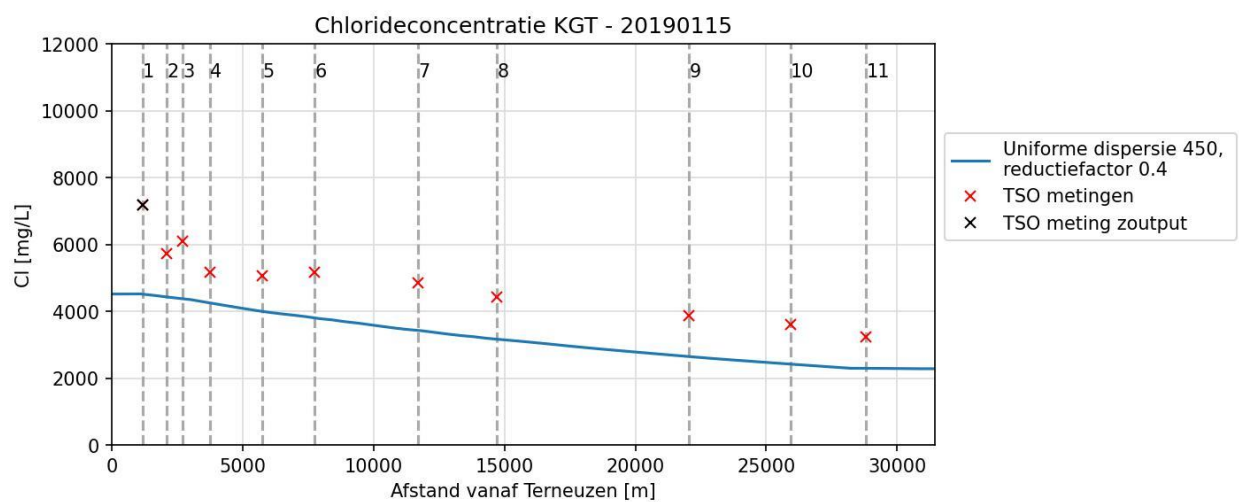
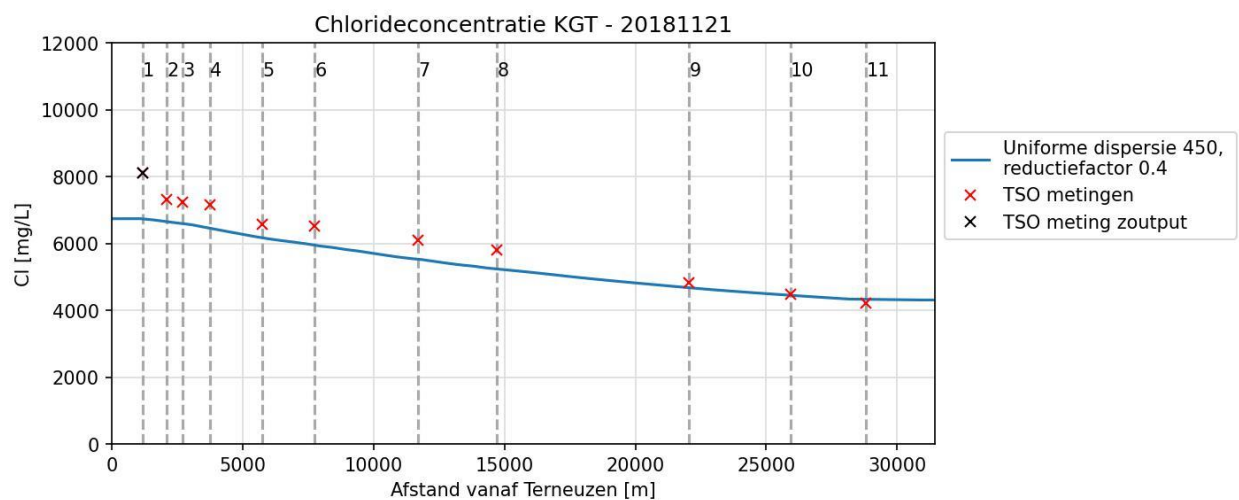
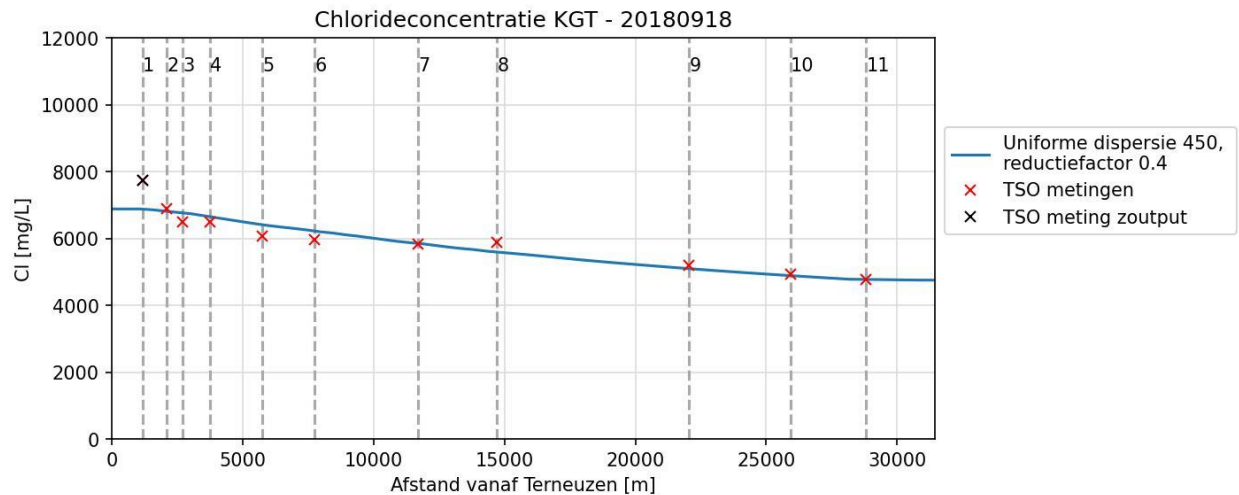


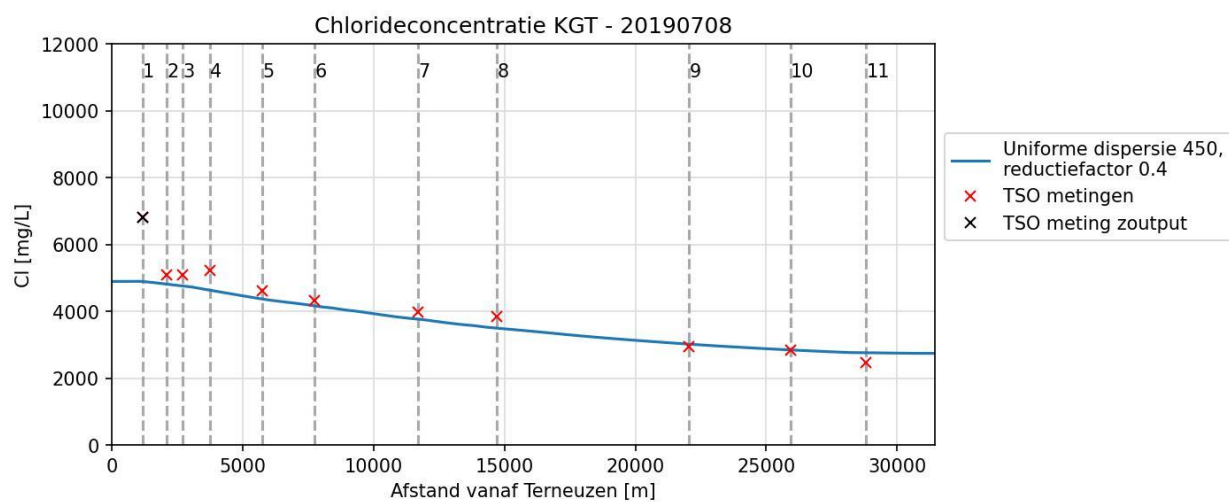
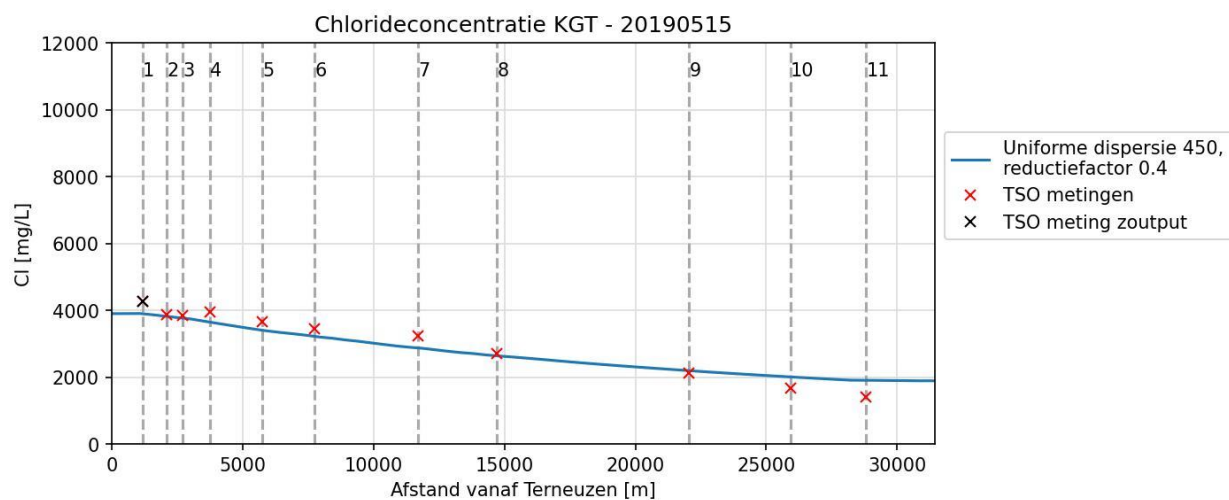
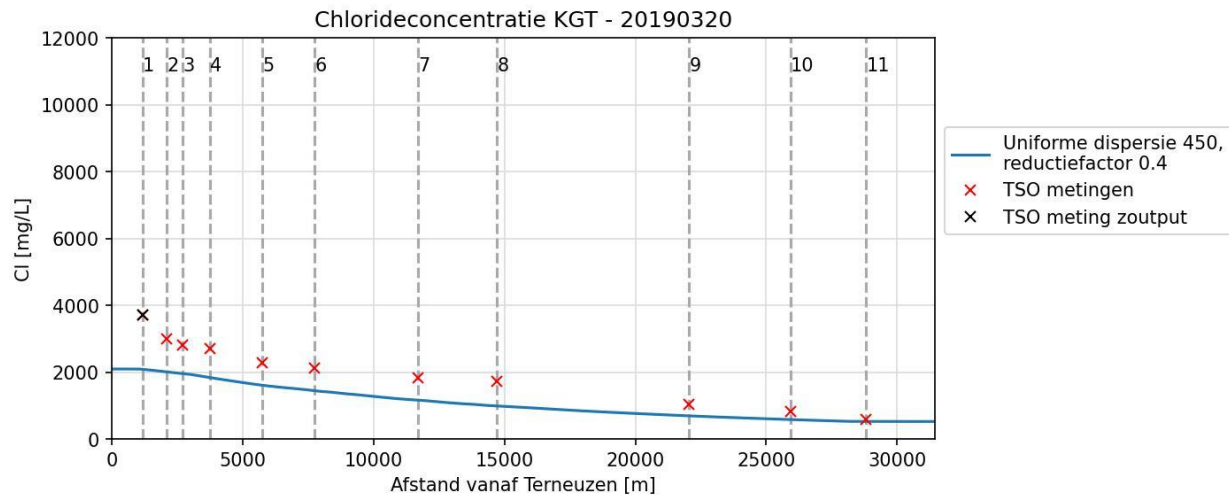


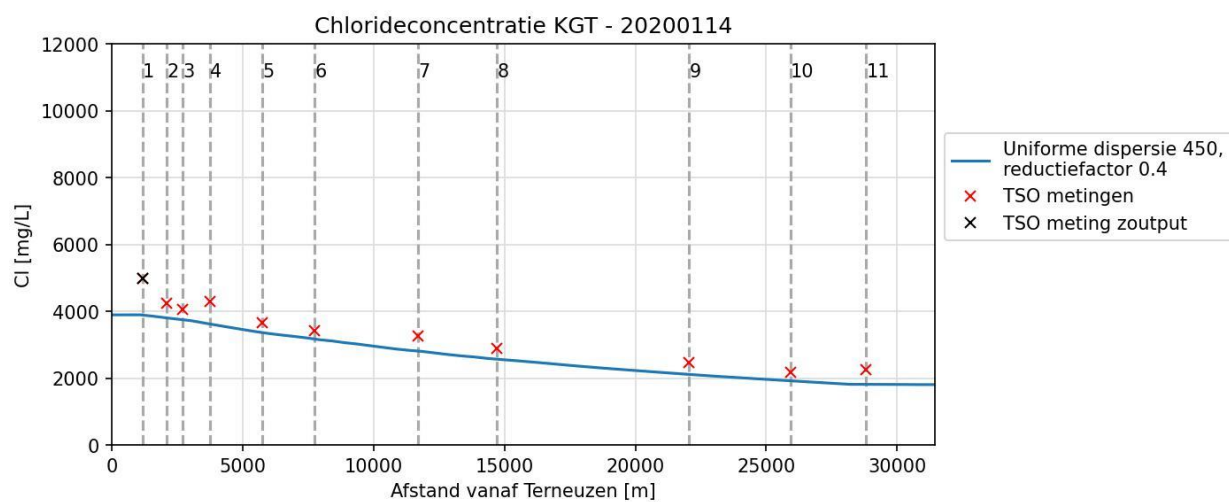
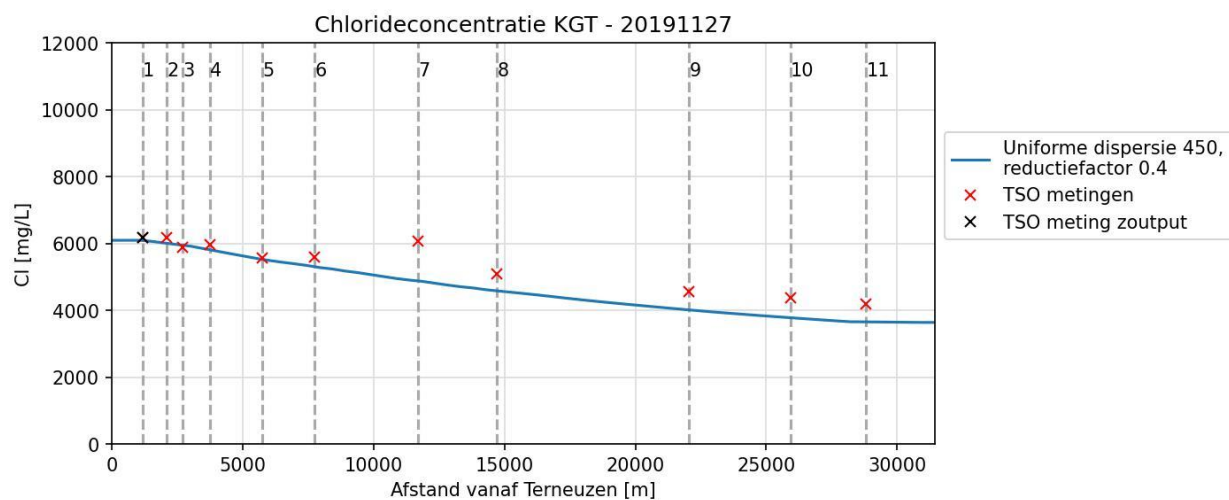
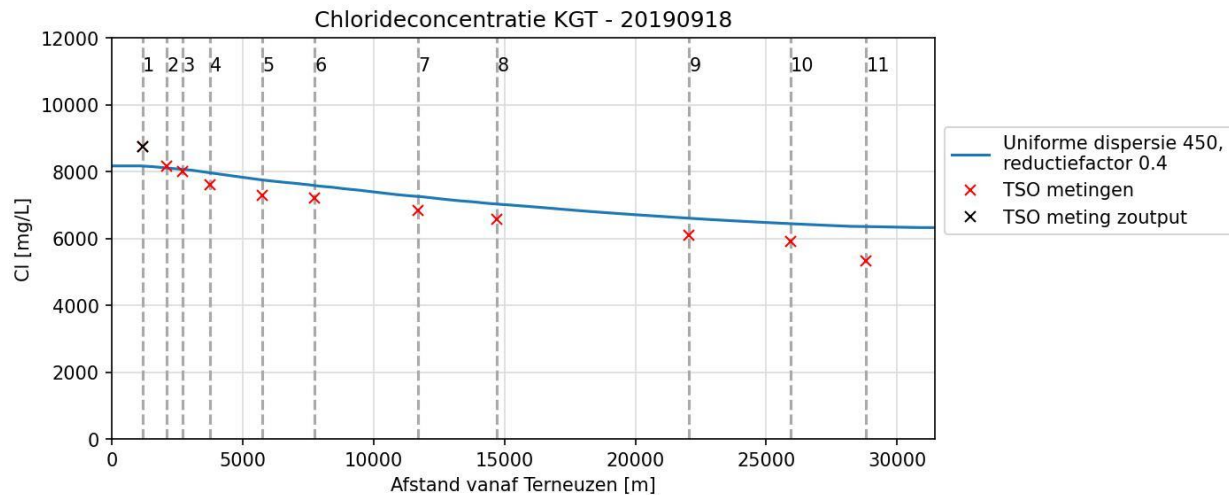


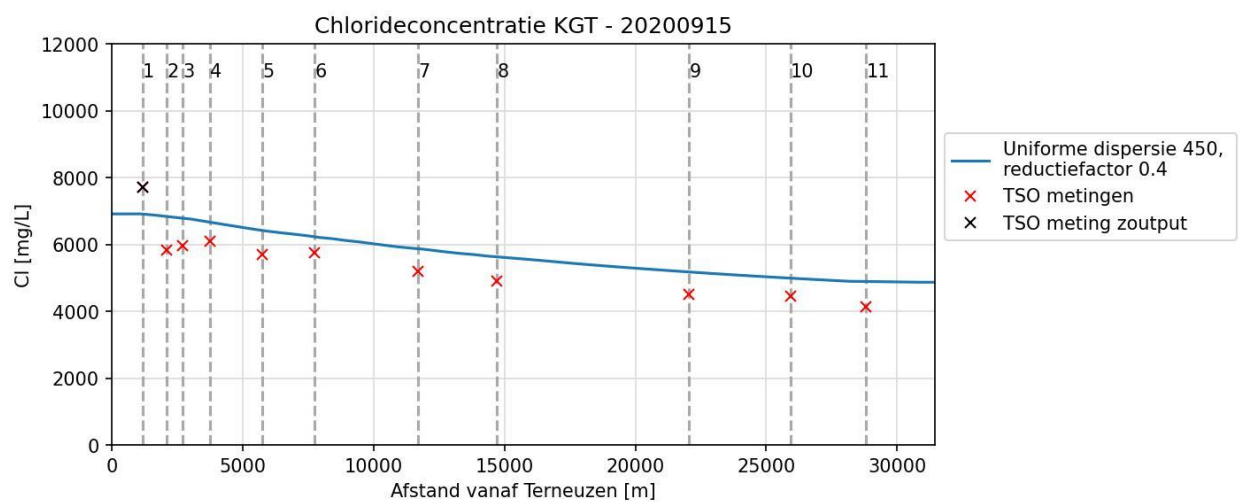
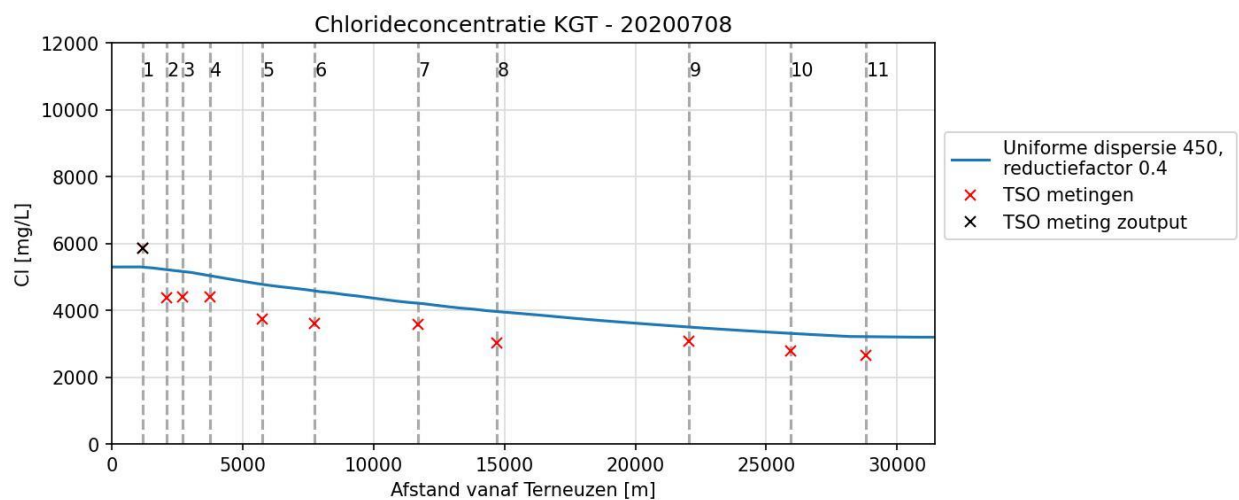
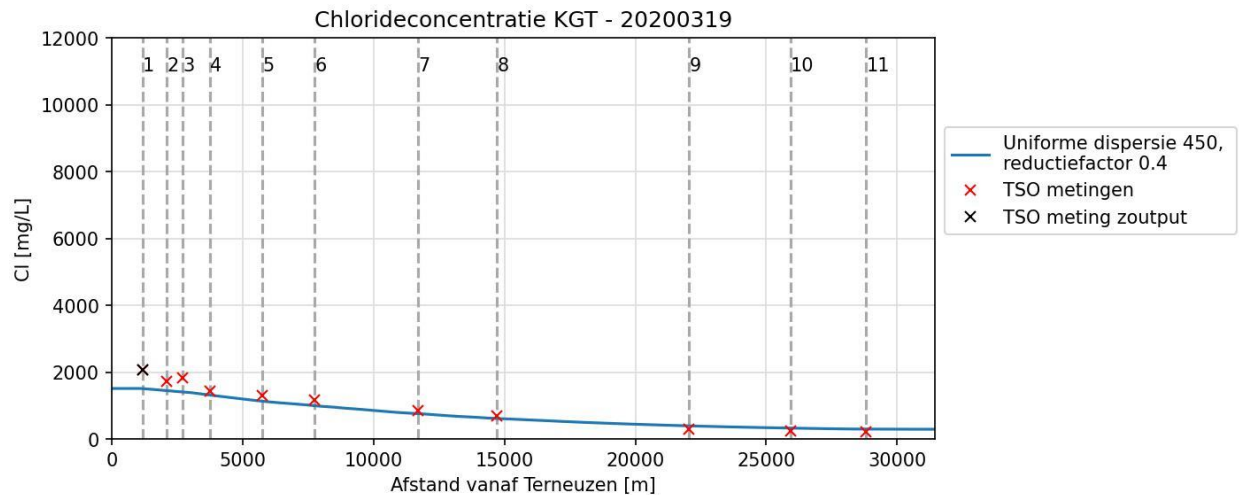


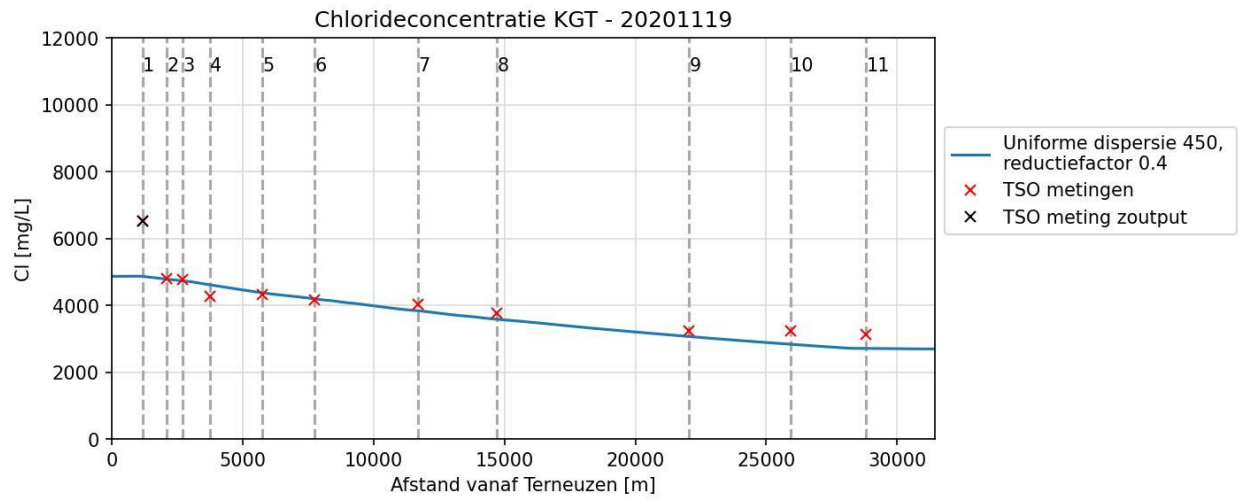












Bijlage B: 2DV-modellering KGT

SOBEK beschrijft de verspreiding van zout in het KGT met 1D-vergelijkingen. Dat betekent dat er alleen variaties in stroming en zoutgehalte zijn in de lengterichting van het kanaal. Alle variaties in dwarsrichting en over de diepte zijn uitgemiddeld. In werkelijkheid is sprake van een gelaagd systeem met dichtheidsstroming in het KGT (zie bijvoorbeeld Figuur 5-2), waarbij zout water langs de bodem naar binnen stroomt in de vorm van een zouttong. Het zoetere water stroomt daaroverheen naar buiten. Dit stromingspatroon, met een tegengestelde stroomrichting bij de bodem ten opzichte van de stroming hoger in de waterkolom, staat bekend als gravitatiecirculatie.

In SOBEK wordt de zoutindringing beschreven door middel van een advectie-diffusievergelijking. Advectie is meevoering van zout met de gemiddelde stroming. Deze gemiddelde stroming beweegt van Gent naar Terneuzen en zorgt dus voor afvoer van zout. Zoutindringing wordt volledig bepaald door de diffusieterm in de diffusievergelijking. Omdat deze term niet alleen pure diffusie omvat, maar allerlei processen die niet expliciet worden gemodelleerd, wordt deze term vaak aangeduid als dispersie: verspreiding van zout van gebieden met een hogere concentratie naar gebieden met een lagere concentratie. De sterkte van de dispersie wordt afgeregeld met de dispersiecoëfficiënt. Deze is in de huidige studie afgeregeld door middel van kalibratie (zie §4.5.4).

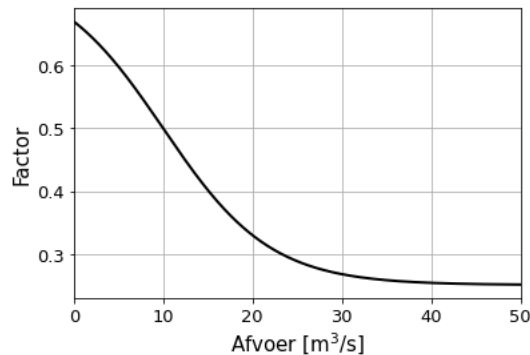
In 2DV-modellen (2D-verticaal) wordt de dwarsrichting van een waterloop eveneens gemiddeld. De variaties in stroming en zoutgehalte over de verticaal worden, in tegenstelling tot 1D-modellen, wel expliciet gemodelleerd. Om meer inzicht te krijgen in dominante processen en tijdschalen is het KGT ook gemodelleerd met een 2DV-model, het zogenaamde MC07-model, beschreven in Biemond et al. (2022). De berekeningen zijn uitgevoerd door Bouke Biemond, Universiteit Utrecht, in samenwerking met het projectteam van HKV.

In het MC07-model is een vereenvoudigde representatie van het KGT opgenomen. Het model heeft de volgende eigenschappen:

- Een recht kanaal van 27,2 km lang met een constante representatieve dwarsdoorsnede van 13,5 m diep en 150 m breed. Een testberekening met een variërende bodemhoogte leverde geen significant andere zoutindringing op. Daarom is ervoor gekozen om te werken met een uniforme diepte.
- Debiet bij Gent, identiek aan de debieten voor 2016-2021, zoals opgegeven aan SOBEK.
- Zoutconcentratie bij Terneuzen (buitenzijde van de sluizen) uit 2016-2021.
- Een vereenvoudigde representatie van het reducerende effect van het sluizencomplex bij Terneuzen op het zoutgehalte op het KGT via een debietafhankelijke parameterisatie:

$$S_{\text{fac}}(Q) = (c_1 + c_2)/2 + (c_1 - c_2) \cdot \tanh[(Q - Q_{\text{switch}})/c_3], \quad (7)$$

waarin c_1 , c_2 en c_3 empirische afregelcoëfficiënten zijn: $c_1 = 0,25$, $c_2 = 0,75$ en $c_3 = 12 \text{ m}^3/\text{s}$. Het omslagpunt waarbij $S_{\text{fac}} = 0,5$ is $Q_{\text{switch}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$. De debietafhankelijke factor ziet er dan uit zoals weergegeven in Figuur B-1.



Figuur B-1: Debietafhankelijke reductiefactor op de zoutconcentratie voor Terneuzen (buitenzijde) als randvoorwaarde voor het model voor het KGT

- Een no-flux randvoorwaarde voor zout bij Gent

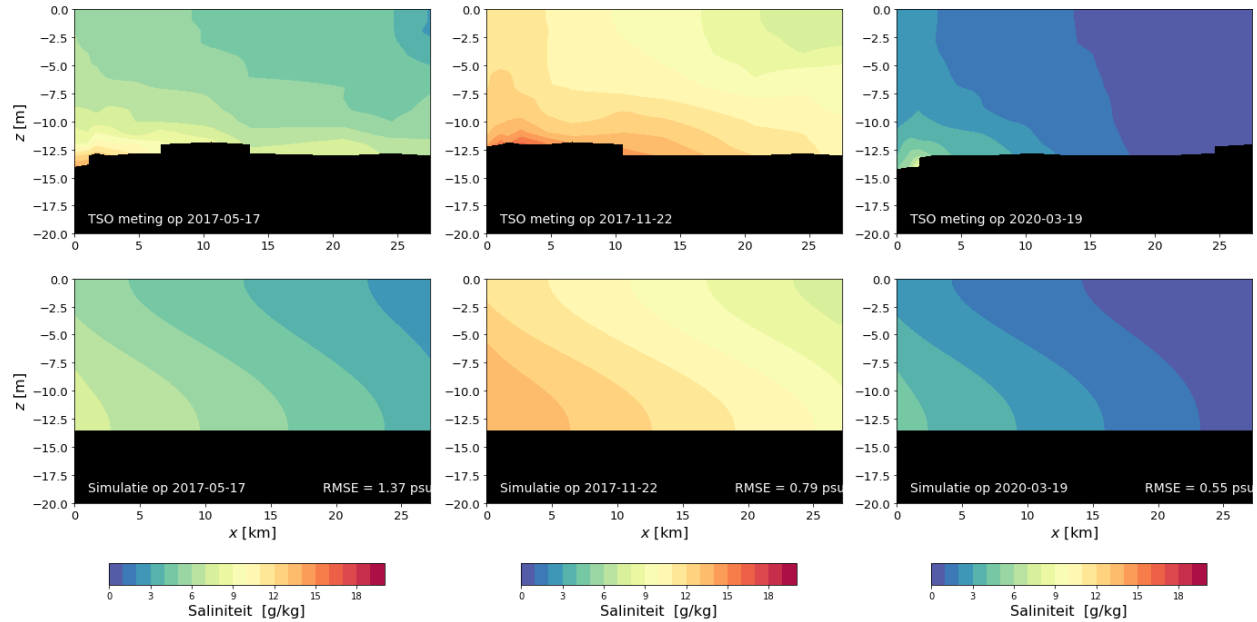
Het model is gekalibreerd op basis van de TSO-metingen tussen 2014 en 2021, zowel qua reproductie van de dieptegemiddelde zoutgehalten als qua sterkte van de gelaagdheid in het model ten opzichte van de metingen. De kalibratie heeft geresulteerd in de modelparameters uit Tabel B-1. Deze modelparameters resulteren in een model met een RMSE van 1,16 ppt (g/kg), wat acceptabel is bij een saliniteit in de orde van 0 tot 20 ppt.

Tabel B-1: Modelparameters van het MC07-model, als resultaat van de uitgevoerde kalibratie

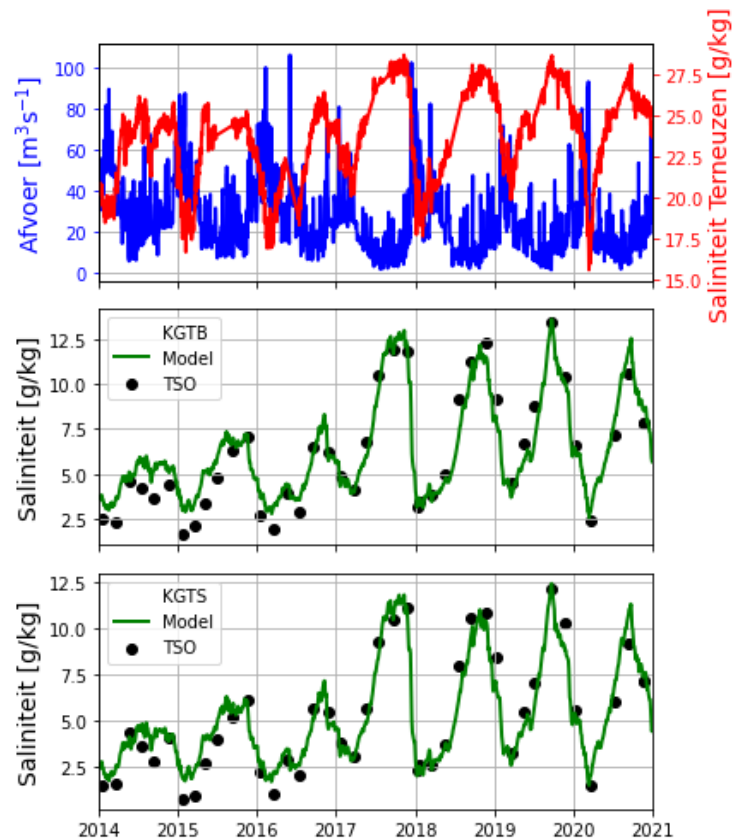
Grootheid	Afkorting	Waarde	Eenheid
Verticale viscositeit	A_v	$7,09 \cdot 10^4$	m^2/s
Verticale dispersiecoëfficiënt	K_v	$3,22 \cdot 10^4$	m^2/s
Horizontale dispersiecoëfficiënt	K_h	20	m^2/s

Figuur B-2 toont drie voorbeelden van de overeenkomst tussen de TSO-metingen en de modelresultaten. Het zoutgehalte ligt in dezelfde orde van grootte. Ook de gelaagdheid vertoont sterke overeenkomsten, hoewel het model niet in staat is om de bij tijden zeer sterke gelaagdheid bij de bodem te reproduceren. Bijvoorbeeld op 17 mei 2017 zijn de saliniteitscontouren bij de bodem nagenoeg horizontaal.

Figuur B-3 laat zien hoe de saliniteit in de tijd varieert in het model ten opzichte van de meetlocaties Sluiskil Brug (KGTB) en Sas van Gent (KGTS), in beide gevallen dieptegemiddeld. De dieptegemiddelde meetwaarden zijn niet gebaseerd op de tijdreeksen bij deze twee meetlocaties, maar op de incidentele TSO-metingen (ongeveer 1 getal per maand). De overeenkomst tussen dieptegemiddelde modelresultaten en TSO-metingen is goed in de droge zomers (2017 t/m 2020) en wat minder goed in de nattere zomers (2014 t/m 2016). Dit is acceptabel, aangezien de focus van deze studie op perioden van droogte ligt.



Figuur B-2: Vergelijking tussen drie TSO-metingen (boven) en de gemodelleerde saliniteit (onder) op drie tijdstippen, waarbij $x=0$ bij Terneuzen ligt en $x=27,2$ km bij Gent.



Figuur B-3: Tijdsverloop van de saliniteit bij de meetpunten Sluiskil Brug (KGTB, midden) en Sas van Gent (KGTS, onder) op basis van de TSO-metingen (punten) en het 2DV-model (groene lijn).

Een belangrijk resultaat van de kalibratie is dat de benodigde horizontale dispersiecoëfficiënt van 20 m²/s veel kleiner is dan de dispersiecoëfficiënt van 450 m²/s die nodig was om de zoutindringing in SOBEK te modelleren (zie §4.5.4). Dit betekent dat de dispersie van zout wordt gedomineerd door gravitatiecirculatie (met dichtheidsstroming langs de bodem). Dit proces wordt in het 2DV-model expliciet gemodelleerd, en hoeft niet te worden meegenomen in de dispersiecoëfficiënt. Het expliciet modelleren van de gravitatiecirculatie zorgt ervoor dat de dispersieterm met een factor 22,5 kan worden verkleind. Met 2DV-modellering is het belang van kalibratie van de dispersiecoëfficiënt daarom ook veel kleiner dan met 1D-modellering.

Na de kalibratie van het 2DV-model zijn diverse scenario's doorgerekend. De onderzoeksvraag is hoe het zout reageert op debietvariaties op verschillende tijdschalen. Het is bekend dat een goed gemengd zout systeem sterker en sneller zoet kan worden gespoeld met een verhoogde bovenafvoer dan een sterk gelaagd systeem. Daarom is de verwachting dat het 2DV-model beter in staat is om te modelleren hoe sterk en hoe snel het zout reageert op variaties in bovenafvoer dan een 1D-model.

De volgende scenario's zijn doorgerekend:

- Referentiesituatie: de gemeten bovenafvoer in een relatief nat jaar (2016) en enkele droge jaren (2017, 2018, 2019).
- Scenario 1: gladgestreken bovenafvoer over de periode van 21 juni tot 21 september van 2016 en 2017, waarbij de cumulatieve bovenafvoer in deze periode gelijk is aan de referentiesituatie.
- Scenario 2: als scenario 1, maar met afwisselend 6 dagen lage bovenafvoer en 1 dag zeer hoge bovenafvoer (zoetwaterpulsen).
- Scenario 3: de referentiesituatie, maar met een verdubbelde bovenafvoer in het winterhalfjaar (winterspoeling, zoals ook met SOBEK onderzocht in §5.5).
- Scenario 4: de referentiesituatie, maar met een extra puls van 75 m³/s zoetwater op 1 en 2 augustus, representatief voor een kortdurende periode met intense regenval in een verder droge zomer.

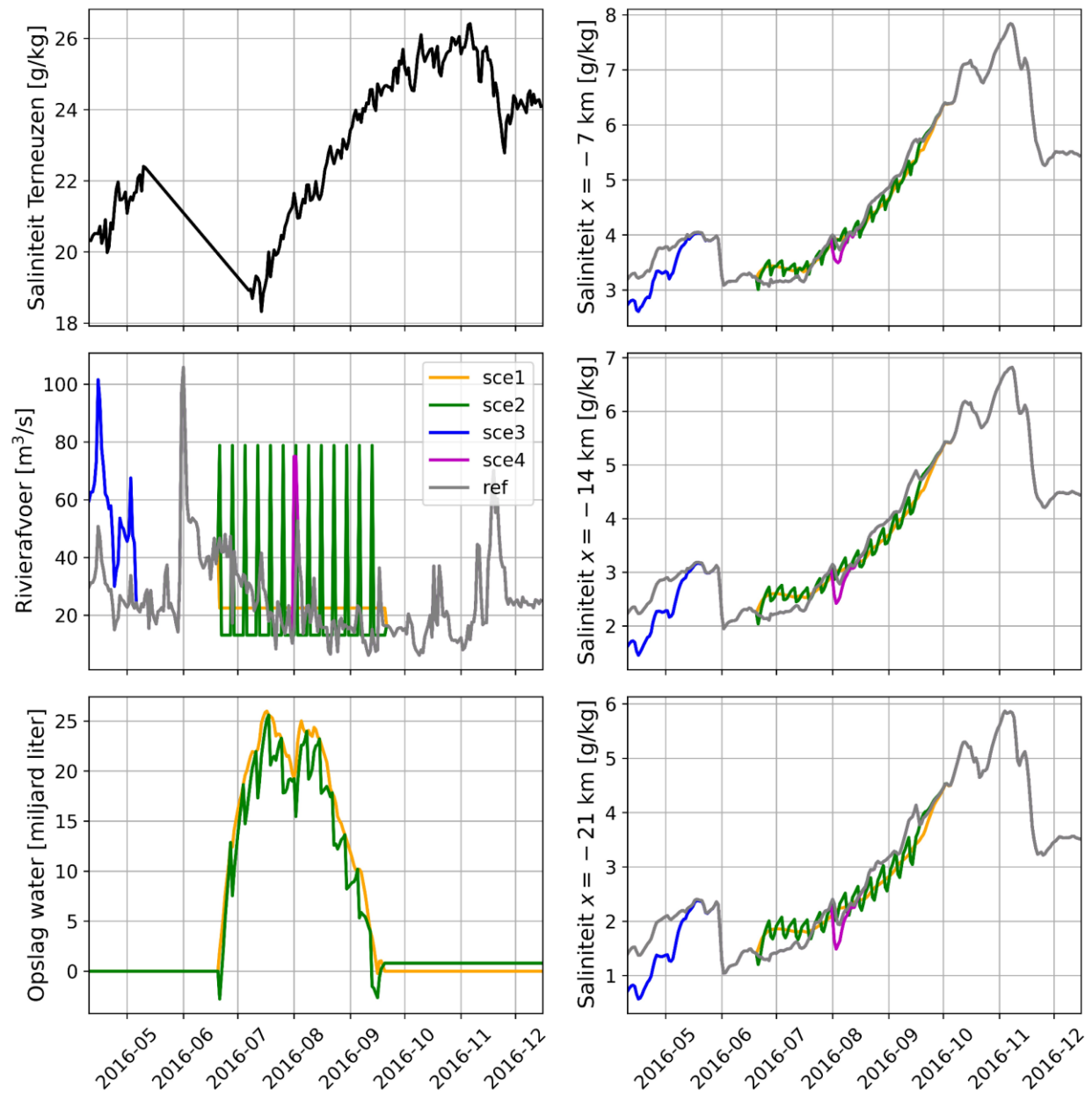
Figuur B-4 t/m Figuur B-7 tonen de resultaten voor de vier verschillende jaren. De figuren bevatten de volgende subplots:

- Linksboven de saliniteit aan de buitenzijde van de sluizen bij Terneuzen (in g/kg of ppt)
- Linksmidden de bovenafvoer van het KGT (in m³/s)
- Linksonder de benodigde buffercapaciteit bovenstrooms van Gent om het verschil tussen de referentiesituatie en scenario 1 en 2 te realiseren (in miljard liter, ofwel miljoen m³).
- Rechts de saliniteit op 7, 14 en 21 km vanaf Terneuzen. Ter referentie: Gent ligt op 27,2 km.

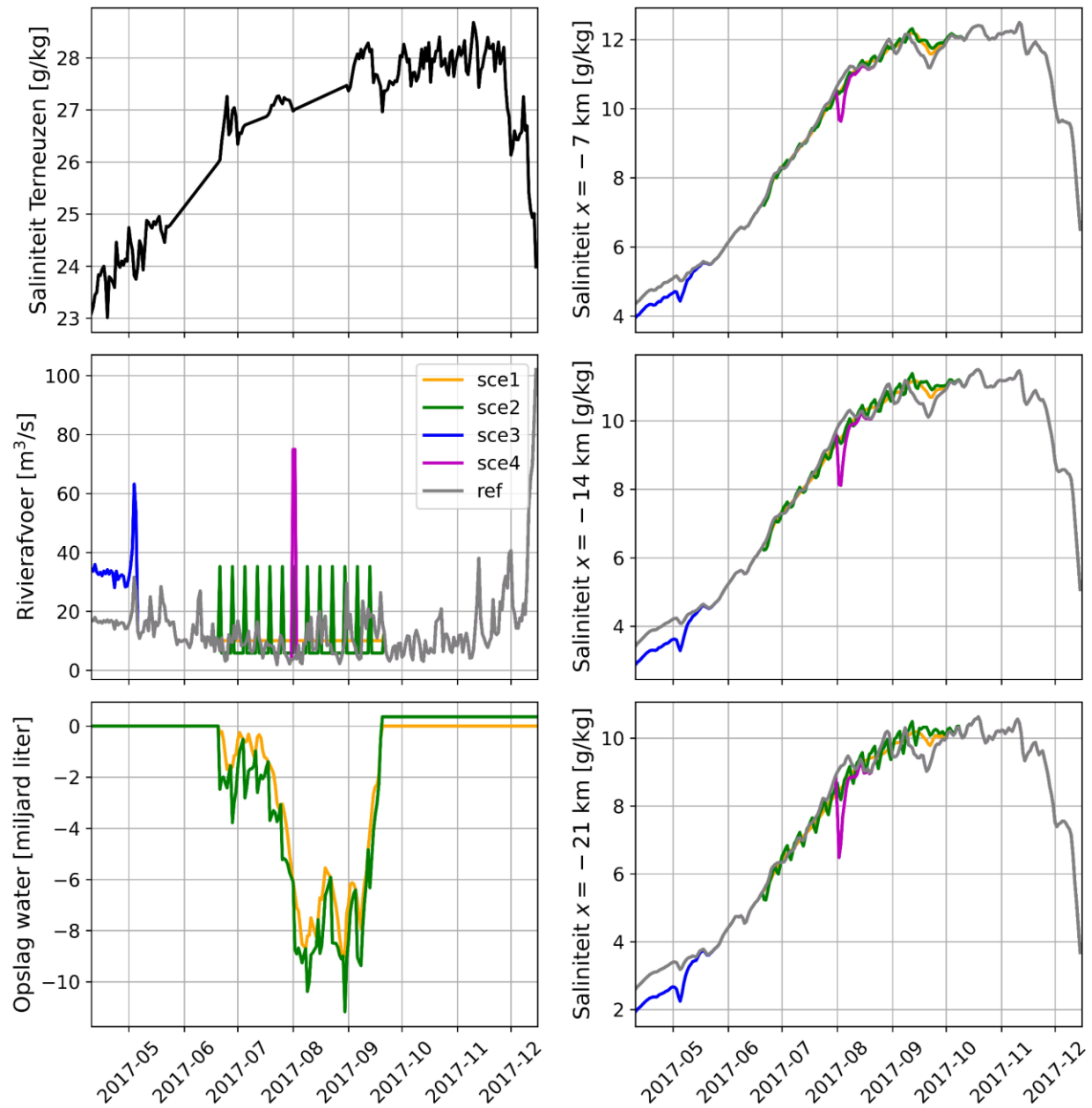
De benodigde buffercapaciteit voor het gladstrijken van de bovenafvoer gedurende de zomer loopt op tot 25 miljoen m³ in 2016 en 8 miljoen m³ in 2019. Ter vergelijking: bij een afvoer van 13 m³/s stroomt er 1,1 miljoen m³ water per dag door het KGT. En ter indicatie van het benodigde oppervlak om een dergelijke hoeveelheid water te kunnen bergen: bij 25 miljoen m³ gaat dit om een gebied van 5x5 km waar 1 m water in wordt geborgen, bij 8 miljoen m³ om 3x3 km. In sommige simulaties vraagt het gladstrijken van de afvoer om een 'negatieve buffercapaciteit'. Dit is geen realistisch scenario, maar de vergelijking tussen constante afvoer en lage afvoer gevolgd door hogere afvoer in een droge zomer kan nog steeds gemaakt worden.

De conclusies op basis van de scenarioberekeningen zijn als volgt:

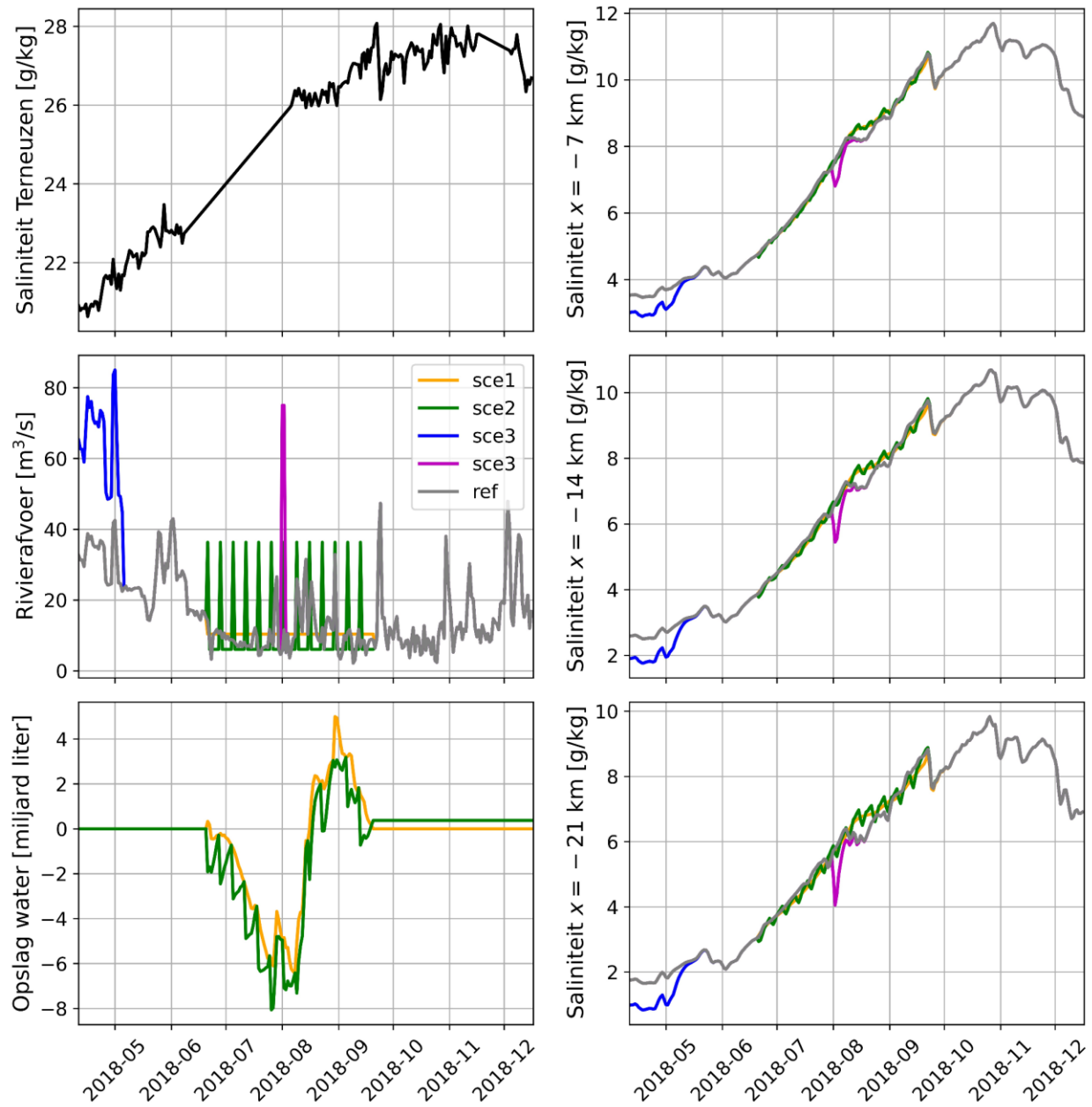
- Het egaliseren van water over de zomer (scenario 1, oranje ten opzichte van grijs) zorgt voor een verlagend effect op de zoutgehaltes als in de zomer een drogere periode volgt na een nattere periode, dus eerst water vasthouden en later meer water over het kanaal leiden. Dit is het geval in 2016 en (in mindere mate) in 2019. De verschillen in zoutgehalte zijn echter beperkt, maximaal (in 2016) gaat het om orde 0,5 g/kg, ofwel 250 mg/l, ondanks de grote hoeveelheid buffercapaciteit die hiervoor vereist is. Als de totale hoeveelheid water die over het kanaal stroomt gelijk is, heeft een andere verdeling in de tijd relatief weinig invloed.
- De wekelijkse pulsen door het kanaal (scenario 2) hebben zeer weinig effect op het zoutgehalte. De scenario's 1 en 2 (oranje en groene lijnen) liggen nagenoeg op elkaar.
- Een winterspoeling (scenario 3) heeft geen significant effect op de zoutgehaltes in de verschillende zomers. Het 2DV-model bevestigt daarmee de conclusies die op basis van SOBEK zijn getrokken in §5.5.
- Een korte intense spoeling met 75 m³/s gedurende twee dagen (scenario 4) zorgt voor een kortstondige daling van de zoutgehaltes op het gehele kanaal van ongeveer 1 à 2 g/kg (ppt), ofwel ongeveer 500-1000 mg/l chloride. De daling duurt echter nauwelijks langer dan de zoetwaterpuls zelf, en heeft geen langdurige invloed in de weken die daarop volgen.



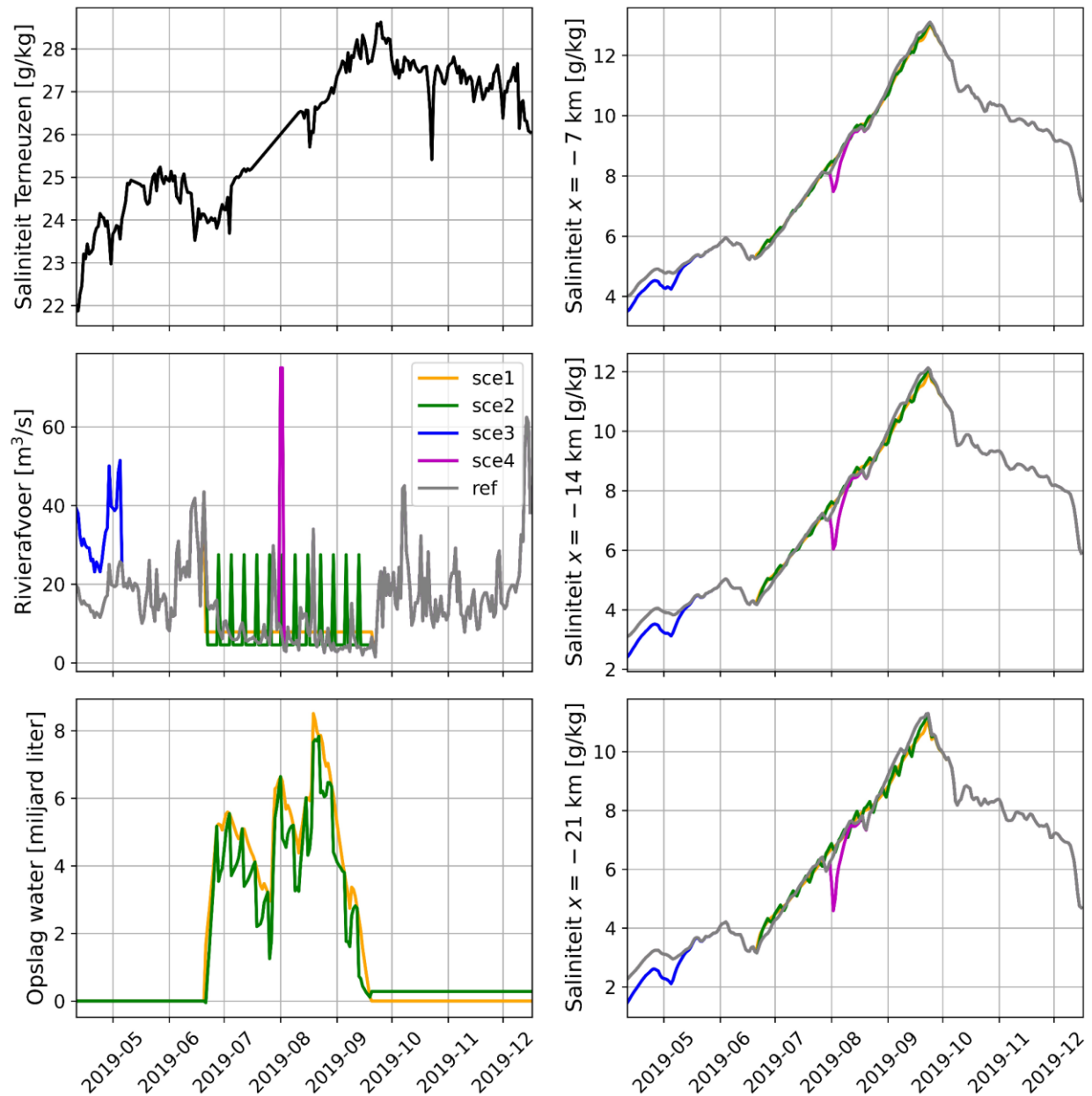
Figuur B-4: De resultaten van de scenarioberekeningen voor het relatief natte jaar 2016



Figuur B-5: De resultaten van de scenarioberekeningen voor het droge jaar 2017



Figuur B-6: De resultaten van de scenarioberekeningen voor het droge jaar 2018



Figuur B-7: De resultaten van de scenarioberekeningen voor het droge jaar 2019