

3D modelonderzoek verdieping vaargeul naar Kornwerderzand



3D modelonderzoek verdieping vaargeul naar Kornwerderzand

Auteur(s)

Arnout Bijlsma

Victor Chavarrias

Menno Genseberger

3D modelonderzoek verdieping vaargeul naar Kornwerderzand

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving & Rijkswaterstaat Midden-Nederland
Contactpersoon	de heer ir. W.J. Werkman
Referenties	-
Trefwoorden	IJsselmeer, Kornwerderzand, vaargeul verdieping, verzilting, D-Hydro Suite, D-Flow Flexible Mesh, KPP

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	08-11-2022
Projectnummer	11208075-002
Document ID	11208075-002-ZWS-0001
Pagina's	129
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

0.2	A.C. Bijlsma, V. Chavarrias & M. Genseberger	
1.0	A.C. Bijlsma, V. Chavarrias & M. Genseberger	

Samenvatting

De provincies Fryslân, Flevoland en Overijssel hebben het voornemen om de komende jaren een grotere scheepvaartsluis aan te leggen in de Afsluitdijk bij Kornwerderzand, en om daarop aansluitend de vaargeul van Kornwerderzand naar de binnenhavens aan het IJsselmeer te verdiepen. Zout water dat door de schuttingen met de scheepvaartsluizen het IJsselmeer binnendringt, wordt gewoonlijk zoveel mogelijk weer via de spuisluizen naar zee afgevoerd zodat het IJsselmeer voldoende zoet blijft o.a. voor de drinkwaterwinning door PWN bij Andijk. Uit een eerste analyse en beoordeling in 2021 bleek dat door de verdieping van de vaargeul naar Kornwerderzand het risico op verzilting van het IJsselmeer toeneemt, ook als de zoutlast van de vernieuwde scheepvaartsluizen ten opzichte van het huidige complex gelijk blijft. Vanwege de ruime onzekerheidsmarge in deze beoordeling heeft RWS-MN behoefte aan een nauwkeurigere schatting van dit toegenomen risico voor de informatievoorziening aan de bestuurders en voor de gesprekken met de aanvragers van de ontgrondings-vergunningen voor de vaargeul naar Kornwerderzand.

De vraag was gericht op vijf situaties voor de vaarwegverdieping naar Kornwerderzand (KWZ), en meer specifiek het gedeelte vanaf 1,2 km van de scheepvaartsluizen (ten zuiden van de Binnenhaven) tot aan de vaarweg Urk – Den Oever (UDO) op ruim 5 km van Andijk. Het betreft een referentiesituatie en vier verdiepingsscenario's:

0. Oorspronkelijke situatie tot 2020, de referentiesituatie zonder verdiepte vaargeul;
1. Vaargeulverdieping door zandwinning over het hele traject KWZ-UDO tot gemiddeld -10m NAP (variërend tussen -8 en -12 m NAP);
2. Vaargeulverdieping over het hele traject KWZ-UDO tot -6,7m NAP;
3. Vaargeulverdieping conform Scenario 1, maar gecombineerd met drie drempels (een van -6,7 m binnen de concessie van de Provincie Fryslân, een van -5 m ter plaatse van de kruising van de gasleidingen, en een van -6,7 m ter plaatse van de Rug van Lacon).
4. Verdieping tot -10 m NAP beperkt tot de zandwinningsconcessie van de Provincie Fryslân (lengte 4,5 km).

Om nauwkeuriger te kunnen schatten hoeveel de verzilting van het IJsselmeer toeneemt als de vaargeul naar Kornwerderzand verdiept wordt, zijn voor bovenstaande situaties water- en zouttransportberekeningen uitgevoerd met een speciaal daarvoor aangepast 3D numeriek model van het IJsselmeer. Het horizontale rooster is verfijnd om de verdiepte vaargeul goed weer te geven. Ook de verticale resolutie is sterk verhoogd en voor de zoutlast bij de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand wordt gebruik gemaakt van een meer nauwkeurige schatting gebaseerd op de Zeesluisformulering. Omdat de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand de voornaamste bron voor zouttoevoer naar de (verdiepte) vaargeul naar Kornwerderzand zijn, zijn alleen deze beschouwd en zijn de zoutlasten van de scheepvaartsluis bij Den Oever en van de spuisluizen weggelaten. Voor de overige zoutbronnen en de initiële conditie is een constante achtergrondswaarde voor chloride toegepast. Door deze vereenvoudigingen en door de vergelijking van de resultaten van de scenario's met die van de referentiesituatie zijn de effecten van de vaargeulverdieping goed te duiden.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor de periode van juni – december 2018 met de toen opgetreden afvoer- en windcondities en de operatie van de scheepvaartsluizen. Het verbeterde model met de gemodelleerde condities is na een korte vergelijking met data en eerdere resultaten geschikt bevonden voor de studie naar de effecten van vaargeulverdieping op de zoutindringing, maar bij de interpretatie van de resultaten moet nog

wel gelet worden op de mogelijke invloed van andere afvoercondities (lange termijn effecten, mitigerende maatregelen volgens huidig waterbeheer), en op de kwaliteit van de modelering bij sterke verdieping. Deze aspecten zijn meegenomen in de uiteindelijke schatting van het verhoogde risico op verzilting.

Daarmee komen we voor het meest diepe Scenario 1 (vaargeulverdieping tot -10 m NAP over 31 km) uit op een verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer van circa 5 mg/l. Dit is aan de onderkant van de bandbreedte uit de eerdere expert beoordeling uit 2021. Ter plaatse van Andijk geldt een vergelijkbare verhoging van de gemiddelde waarde, maar daar moet ook rekening gehouden worden met een toename van de hoogte van optredende chloridepieken, tot 75 mg/l hoger. Het opnemen van drempels in de verdiepte geul (Scenario 3) remt de zoutindringing iets af en is daarom vanuit dat perspectief wat gunstiger. Scenario's met een geringere verdieping van de vaargeul tot -6,7 m NAP (Scenario 2), of een korte verdiepte geul van 4,5 km en -10 m NAP in het noorden bij Kornwerderzand (Scenario 4) leveren nog minstens de helft van deze effecten op.

Een verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer met 5 mg/l mag misschien relatief klein lijken, maar als gekeken wordt wat de watervraag zou zijn om dit effect enigszins te kunnen beperken dan blijkt dat deze aanzienlijk is, namelijk ruim meer dan 20 m³/s voor Kornwerderzand alleen al en over een langere periode van orde een half jaar. Verder bleek dat de grotere chloridepieken die het gevolg zijn van de vaargeulverdieping nauwelijks verlaagd worden door extra afvoer. Daarom lijkt extra spuien geen geschikte methode om de extra zoutindringing ten gevolge van vaargeulverdieping in het meest diepe scenario tegen te gaan, met name niet in droge jaren waarin de waterbeschikbaarheid niet kan worden gegarandeerd.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Achtergrond	9
1.2	Doel	10
1.3	Aanpak	11
1.3.1	Modelaanpassingen en -gebruik	11
1.3.2	Scenario's	12
1.3.3	Gebruikte hardware en software	12
1.4	Leeswijzer	12
2	Opzet 3D model en scenario's	13
2.1	Gebruikte gegevens	13
2.2	Aanpassingen aan 3D D-Hydro model IJsselmeer	14
2.2.1	Horizontale rekenrooster	14
2.2.2	Verticale rekenrooster	16
2.2.3	Bodemgeometrie	16
2.2.4	Debietrandvoorwaarden en waterbalans	17
2.2.5	Zoutrandvoorwaarden	18
2.2.6	Wind	20
2.2.7	Simulatieperiode en tijdstap	20
2.2.8	Overige modelinstellingen	21
2.3	Scenario's	21
2.4	Model output	25
2.5	Postprocessing	25
3	Resultaten referentiesituatie, Scenario 0	27
3.1	Waterstanden	27
3.2	Verloop van chloride in de tijd	27
3.3	Transportpatronen chloride	29
3.4	Cumulatieve spuidebieten Den Oever en Kornwerderzand	30
3.5	Zoutbalans ten opzichte van achtergrondswaarde	31
3.6	Representativiteit van het model	33
3.6.1	Beoordeling voor referentiesituatie	33
3.6.2	Representativiteit van de gebruikte condities	33
3.6.3	Representativiteit zoutdynamica bij verdieping	34
4	Resultaten Scenario's 1 tot en met 4	35
4.1	Verhoging gemiddelde chloridegehalte IJsselmeer ten opzichte van achtergrondswaarde	35

4.2	Verhoging gemiddelde chloridegehalte IJsselmeer ten opzichte van de referentiesituatie	37
4.3	Tijdreeksen van verhoging van het chloridegehalte aan het oppervlak	40
4.4	Zouttransport in de (verdiepte) vaargeul	43
4.5	Conclusies	44
5	Resultaten Scenario's met extra spuien	46
5.1	Aanpassing randvoorwaarden spuisluizen	46
5.2	Verhoging gemiddelde chloridegehalte IJsselmeer ten opzichte van achtergrondswaarde	46
5.3	Verhoging gemiddelde chloridegehalte IJsselmeer ten opzichte van referentiesituatie	48
5.4	Tijdreeksen van verhoging van het chloridegehalte aan het oppervlak	50
5.5	Zouttransport in de (verdiepte) vaargeul	51
5.6	Conclusies	51
6	Discussie	52
6.1	Methodiek	52
6.2	Implicatie voor de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte	53
6.2.1	Inspeleffecten en lange termijn respons	53
6.2.2	Verdisconteren mogelijk effect van menging bij instroming in verdiepte vaargeul	56
6.3	Implicatie in termen van extra watervraag	56
6.4	Relevante processen voor zoutindringing door verdieping van de scheepvaartgeul naar Kornwerderzand	59
7	Conclusies en aanbevelingen	61
7.1	Conclusies op hoofdlijnen	61
7.2	Nadere bevindingen	62
7.2.1	Methodiek	62
7.2.2	Invloed van de scenario's op de globale zoutbalans van het IJsselmeer	62
7.2.3	Gemiddelde verhoging chloridegehalte op lange termijn	63
7.2.4	Gemiddelde verhoging chloridegehalte vanwege dichtheidsstroming over steil talud	64
7.2.5	Verhoging chloridegehalte bij Andijk	64
7.2.6	Extra watervraag	65
7.2.7	Inzicht in de systeemwerking van toename zoutindringing door verdieping van de scheepvaartgeul naar Kornwerderzand	65
7.3	Aanbevelingen	66
7.3.1	Aanbevelingen ter verbreding van de conclusies	66
7.3.2	Aanbevelingen om de betrouwbaarheid verder te vergroten	67
8	Referenties	69
A	Details modelopzet	70
A.1	Ligging monitoring stations	70
A.2	Aanpassing bodem ten opzichte van baseline-ijsselmeer-j19_6-v2	73

B	Zoutlast scheepvaartsluizen Kornwerderzand	74
C	Maandplots chloridegehalte aan de bodem in geselecteerde stations in de vaargeul versus randvoorwaarden, Scenario 0 - 4	75
C.1	Scenario 0	77
C.2	Scenario 1	84
C.3	Scenario 2	91
C.4	Scenario 3	98
C.5	Scenario 4	105
D	Dichtheidsstroming over steil talud	112
E	Maandplots chloridegehalte aan de bodem in geselecteerde stations in de vaargeul versus randvoorwaarden, Scenario 0a en 1a	115
E.1	Scenario 0a	116
E.2	Scenario 1a	123

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De provincies Fryslân, Flevoland en Overijssel hebben het voornemen om de komende jaren bij Kornwerderzand in de Afsluitdijk, zie Figuur 1-1, een grotere scheepvaartsluis aan te leggen, en daarop aansluitend de vaargeul van Kornwerderzand naar de binnenhavens aan het IJsselmeer te verdiepen. Als gevolg van het schutproces dringt in de huidige situatie via de schutsluizen in de Afsluitdijk zoutwater het IJsselmeer binnen. Dit zoute water wordt normaliter via de spuisluizen zoveel mogelijk weer afgevoerd naar zee omdat aan het chloridegehalte van het IJsselmeer hoge eisen worden gesteld vanwege de drinkwaterfunctie van het meer, specifiek de drinkwaterwinning van PWN bij Andijk. Door verdieping van de vaargeul neemt echter het risico op verzilting van het IJsselmeer toe, ook als de zoutlast van de vernieuwde scheepvaartsluizen ten opzichte van het huidige complex gelijk blijft. Het zoute water afkomstig van de scheepvaartsluizen kan zich van de Binnenhaven van Kornwerderzand via een verdiepte vaargeul makkelijker en verder het IJsselmeer in verspreiden dan bij de onverdiepte geul. In 2020 is een gedeelte van de vaargeul bij Kornwerderzand middels zandwinning over een afstand van 1,7 kilometer naar ruim -9 m NAP verdiept. Dit is een eerste stap in de verdieping van de vaargeul die volgens plan de komende jaren zal worden uitgebreid.

In een eerste analyse en beoordeling in 2021 op basis van de geldende chloridenormen, langjarige chloridemetingen bij Kornwerderzand en Andijk en een water- en zoutbalans voor het IJsselmeer, zie [1], is bevestigd dat de beoogde verdieping van de vaargeul naar Kornwerderzand een verziltingsrisico voor het IJsselmeer oplevert. Een 'worst case' schatting gaf een verhoging van het jaargemiddelde chloridegehalte van 17 – 35 mg/l op (17 mg/l



Figuur 1-1 Lorentzsluizen in de Afsluitdijk bij Kornwerderzand. Op de voorgrond de spuisluizen, in het midden de grote en kleine scheepvaartsluis met rechts daarvan de Binnenhaven en het IJsselmeer (bron: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat / Joop van Houdt).

gemiddeld over het IJsselmeer en mogelijk hoger bij Andijk). De wijze van schatten was echter met de nodige onzekerheid omgeven, zodat er rekening werd gehouden met een grote bandbreedte van zo'n 5 – 50 mg/l voor de verhoging van het jaargemiddelde chloridegehalte bij Andijk. In [1] is ook aangegeven dat de toepassing van een 3D numeriek zoutmodel van het IJsselmeer de aangewezen methode is voor een betere schatting met geringere onzekerheid. Een dergelijk model kan ook worden toegepast bij de beantwoording van andere vragen die leven, zoals het bepalen van de effecten op de verzilting van vaargeulverdieping naar Den Oever, en van korte en lange termijn maatregelen tegen zoutindringing, al dan niet in combinatie met de nieuwe scheepvaartsluis bij Kornwerderzand. Het voorliggende rapport richt zich echter uitsluitend op de verdieping van de vaargeul naar Kornwerderzand onder gelijkblijvende overige omstandigheden. Voor RWS-MN is het van belang een betere schatting te krijgen van het risico op verzilting van het IJsselmeer door de verdieping van de vaargeul naar Kornwerderzand. Dit is nodig voor de informatievoorziening aan de bestuurders en voor de gesprekken met de aanvragers van de ontgrondingsvergunningen voor de vaargeul naar Kornwerderzand.

1.2 Doel

Doel van deze modelstudie is de onzekerheid waarmee de schatting van de toename van de verzilting van het IJsselmeer door de verdieping van de vaargeul naar Kornwerderzand in [1] was omgeven te verkleinen. Dit wordt gedaan door via modelsimulaties het inzicht in de processen die spelen bij de toename van zoutindringing door de vaargeulverdieping naar Kornwerderzand te vergroten, en door de vergelijking van de vier verdiepingsscenario's uit [1] te voorzien van een kwantitatieve basis.

De focus van de studie ligt op de vaarwegverdieping vanaf de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand (KWZ) tot aan 'UDO' (vaarweg Urk – Den Oever), en de daarvoor in [1] genoemde vijf situaties (referentiesituatie en vier verdiepingsscenario's):

0. Oorspronkelijke situatie tot 2020, de referentiesituatie zonder verdiepte vaargeul;
1. Vaargeulverdieping door zandwinning over het hele traject KWZ-UDO tot gemiddeld - 10m NAP (variërend tussen -8 en -12 m NAP);
2. Vaargeulverdieping over het hele traject KWZ-UDO tot -6,7m NAP;
3. Verdiepte vaargeul van situatie 1 gecombineerd met nader te definiëren drempels;
4. Verdieping tot -10 m NAP beperkt tot de zandwinningsconcessie van de Provincie Fryslân (lengte 4,5 km).

Andere effecten, bijvoorbeeld van mitigerende maatregelen, of effecten van andere voorgenomen vaargeulverdiepingen zoals op het traject Urk – Den Oever, zijn geen onderdeel van dit onderzoek. Ook de mogelijkheid van vrijkomen van zout uit de onderwaterbodem als gevolg van de ontgroning zal niet worden beschouwd.

Ten aanzien van het vergroten van inzicht in de processen die spelen bij zoutindringing spelen bij RWS de volgende vragen:

- Hoeveel zout afkomstig uit de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand komt de (verdiepte) vaargeul in vanuit de Binnenhaven?
- Hoe snel verloopt in de diverse scenario's het zouttransport door de verdiepte vaargeul het IJsselmeer in, in vergelijking met de referentiesituatie?
- Helpt opmenging en afvoer van zout uit de geul door wind om de zoutindringing tegen te gaan, of zorgt dit in sommige situaties juist voor ongewenste verspreiding?
- Wat is de invloed van spuien op het zouttransport in de (verdiepte) vaargeul, speciaal bij (grote) spuigangen bij de spuisluizen van Kornwerderzand? In hoeverre kan een verdiepte en onverdiepte geul worden zoetgespoeld bij (grote) spuigangen bij de spuisluizen van Kornwerderzand?

- Welke invloed heeft de verdieping van de geul op de stroming voor de beschreven opties (treedt er bijv. een retourstroom op in de verdiepte geul, tegen de wind in)?

1.3 Aanpak

Op basis van de expertsessies in [1] is besloten om uit te gaan van het bestaande D-Hydro model van het IJsselmeer uit [2] en [3] en hiermee berekeningen uit te voeren voor de genoemde vijf situaties (referentiesituatie en vier verdiepingsscenario's). Deze berekeningen moeten beter inzicht geven in de relevante processen en de zoutindringing in de verschillende scenario's beter kwantificeren.

1.3.1 Modelaanpassingen en -gebruik

Het bestaande 3D D-Hydro model van het IJsselmeer is een eerste versie die destijds is opgezet ter ondersteuning van de analyse van de waargenomen zoutindringing in 2018 [2]. Daarbij zijn diverse aannamen gedaan, onder andere over de zoutlast van de scheepvaartsluizen en de spuisluizen. Om de rekentijd te beheersen werd bovendien gerekend met slechts 5 sigma-lagen in de verticaal. Vanwege deze beperkingen is het model destijds niet verder gekalibreerd en gevalideerd voor de weergave van zoutverspreiding in het IJsselmeer. Wel werd op basis van een vergelijking van de verkregen resultaten met beschikbare metingen het toegepaste 3D model geschikt geacht voor het globaal verkennen van inrichtingsmaatregelen en het toepassen in relatieve beschouwingen. Voor meer gedetailleerde studies werd o.a. de verbeteringen van de zouttrandvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen en de verticale roosterschematisering aanbevolen, zie [2].

Voor de huidige studie worden aan de ene kant vereenvoudigingen in het 3D model aangebracht, maar aan de andere kant ook een aantal noodzakelijke aanpassingen en verbeteringen. De vereenvoudigingen houden in dat de berekeningen zoveel mogelijk worden versimpeld door alleen te kijken naar de zoutindringing veroorzaakt door de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand omdat dit de voornaamste bron voor zouttoevoer naar de verdiepte vaargeul is. De zoutlasten van de scheepvaartsluis bij Den Oever en van de spuisluizen worden weggelaten. Voor de overige zoutbronnen en de initiële conditie (het zoutgehalte in het IJsselmeer bij de start van de berekening) wordt een constante achtergrondswaarde voor chloride gehanteerd, conform de aanpak in [3] voor de bestudering van de tijdelijke inzet van Gemaal Lely. Door deze vereenvoudiging wordt het effect van de verdieping geïsoleerd en zijn de resultaten beter te duiden. De aanpassingen houden in dat voor de zoutlast bij de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand een meer nauwkeurige schatting wordt toegepast, gebaseerd op de Zeesluisformulering¹, die de transporten over de sluishoofden berekent op basis van de schutoperatie. Daarnaast wordt het horizontale rooster langs de te verdiepen vaargeul verfijnd om de geometrische details van de scenario's in het model te kunnen opnemen en wordt voor het verticale rooster overgegaan op de combinatie van vaste lagen en sigma-lagen met voldoende resolutie om de zoutdynamica in de verschillende scenario's te kunnen weergeven.

Ondanks de verbeteringen ontbreekt ook in de huidige studie de mogelijkheid om eerst een uitgebreide modelkalibratie en -validatie voor zouttransport uit te voeren. In plaats daarvan wordt de representativiteit van het aangepaste model voor de huidige studie (globaal) geverifieerd op basis van de resultaten voor de referentiesituatie. Dit heeft uiteraard gevolgen voor de te behalen nauwkeurigheid van het model. Ondanks het ontbreken van een uitgebreide validatie is de nauwkeurigheid van het 3D model aanzienlijk beter dan die van de eerdere gemaakte schattingen. Bovendien gebruiken we het model in een relatieve beschouwing om de verschillen in zouttransport ten gevolge van vaarwegverdieping nader te kwantificeren. Het resultaat is dan minder afhankelijk van onzekerheden in randvoorwaarden.

¹ Zie <https://libzsf.readthedocs.io/en/latest/index.html>

1.3.2 Scenario's

Het 3D model wordt toegepast voor de afvoer- en windcondities van 2018. Aan deze keuze liggen praktische redenen ten grondslag. Er ligt al veel bruikbaar uitgangsmateriaal voor 2018, zoals afvoerrandvoorwaarden en een waterbalans. Anderzijds was de impact van de droogte destijds zeer groot, waardoor automatisch de interesse naar deze periode uitgaat. Een punt van aandacht is hoe representatief deze omstandigheden zijn, o.a. omdat het waterbeheer sinds die tijd is gewijzigd in de zin dat er tegenwoordig meer water voor de bestrijding van verzilting beschikbaar is. Wellicht ten overvloede: door de gemaakte modelkeuzes mag de berekening zonder verdieping niet als een *hindcast* van 2018 beschouwd worden.

Ondanks de vereenvoudigingen en restricties verwachten we dat door interpretatie van de resultaten van de simulaties het risico op een toename van de verzilting onder invloed van de verschillende verdiepingsscenario's goed kan worden ingeschat en het inzicht in de relevante processen vergroot. Begonnen wordt met berekeningen voor de referentiesituatie (vaargeulsituatie tot 2020) en de vier Scenario's voor vaargeulverdieping. Deze berekeningen leveren belangrijke eerste informatie op over de effecten van de scenario's op verzilting. Op basis daarvan is vervolgens besloten om voor één scenario en de referentiesituatie ook te kijken naar andere afvoercondities die meer in overeenstemming zijn met het huidige spuibeleid. De windcondities, een belangrijke factor voor menging en transport in het IJsselmeer, zijn niet gevarieerd.

1.3.3 Gebruikte hardware en software

De berekeningen zijn uitgevoerd op de Nationale Supercomputer Snellius bij SURF in Amsterdam (Lenovo ThinkSystem SR645 met nodes met elk 2 AMD Rome 7H12 processoren, 64 cores per processor, 2.6 GHz per core, 256 GB geheugen per node). Op 2 nodes x 64 cores (128 partities) vergde 208 dagen simulatie tussen de 4 en 5 dagen rekentijd².

De gebruikte software is D-HYDRO / Delft3D FM 2022.03 container/singularity (beta versie) uit de 2022.03 release.

1.4 Leeswijzer

Het rapport is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 worden de aanpassingen aan het 3D model nader beschreven, samen met de scenario's waarvoor in deze studie simulaties zijn uitgevoerd. Hoofdstuk 3 bespreekt de resultaten van de referentieberekening. Op basis daarvan wordt beoordeeld hoe geschikt het 3D model is voor de huidige studie-aanpak. Hoofdstuk 4 bevat de resultaten van de Scenario's 1 tot en met 4. De resultaten van de extra berekeningen voor de referentiesituatie en Scenario 1 met extra spuien, in overeenstemming met het huidige spuibeleid worden gepresenteerd in hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 bespreekt de betekenis van de resultaten voor de belangrijkste vragen uit hoofdstuk 1, leidend tot de conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 7.

² We acknowledge that parts of the results of this research have been achieved using the Distributed European Computing Initiative (DECI) resources Cartesius and Snellius at SURF with support from the Partnership for Advanced Computing in Europe (PRACE). The support of Maxime Mogé and Maksim Masterov from SURF to the technical work is gratefully acknowledged.

2 Opzet 3D model en scenario's

Zoals aangegeven in paragraaf 1.3 gaan we voor deze studie uit van het 3D D-Hydro model dat eerder is gebruikt voor simulaties van het IJsselmeer over de periode van juni tot december 2018. Dit model is op een aantal punten aangepast, waarbij gebruik is gemaakt van de gegevens beschreven in paragraaf 2.1. In paragraaf 2.2 worden de aanpassingen nader beschreven. In paragraaf 2.3 worden de verschillende scenario's nader gedefinieerd en de verschillen in bodemgeometrie geïllustreerd. 2.4 beschrijft hoe de resultaten tijdens de berekeningen worden weggeschreven. Paragraaf 2.5 geeft een overzicht van de vaste nabewerkingen op de resultaten in de vorm van animaties en plots die voor alle berekeningen beschikbaar zijn.

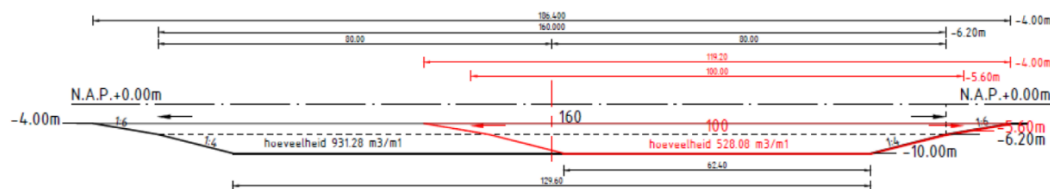
2.1 Gebruikte gegevens

Om het model geschikt te maken voor de huidige studie zijn gegevens nodig over de oorspronkelijke bodemligging en de vorm van de vaargeul KWZ-UDO in de beoogde scenario's. Daarnaast zijn gegevens nodig om de randvoorwaarden te bepalen in de vorm van afvoeren (met een sluitende waterbalans) en van de zoutlasten bij de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand (schutregistraties plus gemeten waterstanden en chloridegehaltes of zoutgehaltes aan weerszijden van de sluizen).

Geometrie

De gedetailleerde diepte-informatie is ontleend aan Baseline 2019 (baseline-ijsselmeer-j19_6-v2). Aanvullende diepte-informatie om baseline in diverse havens te corrigeren is ontleend aan de waterkaart [4], zie verder Bijlage A.

RWS heeft de ligging (contour en as) van de vaargeul toegeleverd. Het beoogde dwarsprofiel is ontleend aan de zandwinvergunningen, zie Figuur 2-1 overgenomen uit [5]. Hiermee kunnen de contouren voor de roosterverfijning en de 'samples' voor de bodemligging van de te verdiepen vaargeulen worden gedefinieerd.



Figuur 2-1 Dwarsprofiel zoals opgenomen in de beschikking ten aanzien van ontgraving in de vaargeul Kornwerderzand in het IJsselmeer door de provincie Fryslân (het rode profiel betreft de genoemde vergunning, het zwarte profiel betreft de toekomstige vaargeul inclusief zandwinning). Bron: Bijlage 3a in [5].

Tussen mei en september 2020 is de meest noordelijke sectie van de vaargeul naar Kornwerderzand over een lengte van 1,7 km verdiept. Lodinggegevens van 29 oktober 2020 met een resolutie van 1x1 m van deze sectie zijn eveneens digitaal ter beschikking gesteld, zie [6], maar gezien de vraagstelling niet in de huidige scenario's verwerkt.

Waterbalans

Voor de waterbalans is gebruikgemaakt van de gegevens uit een eerdere studie [2]. In aanvulling daarop is voor de afvoeren bij de Houtrib spuisluizen, Krabbersgat spuisluizen, Lorentz spuisluizen (Kornwerderzand) en Stevin spuisluizen (Den Oever) overgegaan van 60

minuten waarden naar 10 minuten waarden om het spuiverloop netter weer te geven. Deze 10 minuten gegevens zijn verkregen via MATROOS (matroos.rws.nl). Voor de berekeningen met extra spuien in de droge periode van 2018 (zie paragraaf 5.1) heeft Rijkswaterstaat de tijdreeksen met extra spuien bij Den Oever en Kornwerderzand toegeleverd.

Zoutlast scheepvaartsluizen Kornwerderzand

De dimensies van de scheepvaartsluizen zijn ontleend aan [7].

De schutregistraties uit het IVS 90 systeem zijn voor beide kolken bij Kornwerderzand beschikbaar voor 2018 uit eerdere studies: zowel registraties van één regel per schutting, inclusief de zogenaamde leeg-om schuttingen, als registraties per passerend schip.

Verder zijn waterstandsmetingen van Kornwerderzand Binnen en Kornwerderzand Buiten en de zoutmetingen in het IJsselmeer (FL16 - Kornwerderzand) en in de Waddenzee (Doove Balg Oost en West) gebruikt, afkomstig van waterinfo.nl.

2.2 Aanpassingen aan 3D D-Hydro model IJsselmeer

Het startpunt is het 3D D-HYDRO deelmodel IJsselmeer, opgezet en gerapporteerd in [2] en toegepast in [3] bij de beoordeling van de tijdelijke inzet van Gemaal Lely tijdens het voorjaar van 2021. Dit model bevat naast het IJsselmeer ook het Ketelmeer, het Vossemeer, de Ramsgeul en het Zwarte Meer, maar niet de IJssel-Vecht delta.

2.2.1 Horizontale rekenrooster

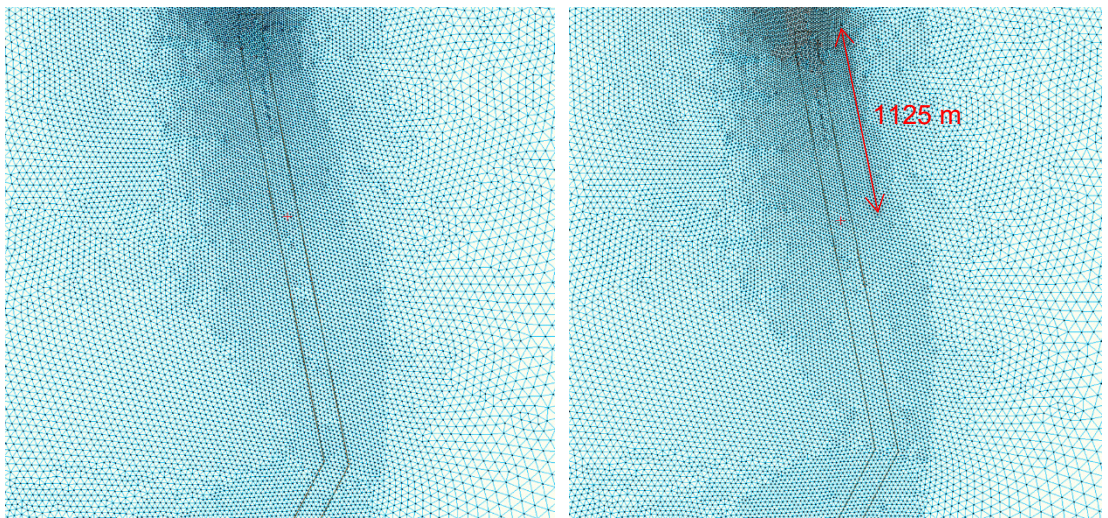
Het rekenrooster van het bestaande model (grid_20200226_net.nc) is als uitgangspunt gebruikt en vervolgens verfijnd. Figuur 2-2 geeft een algemene indruk van de roosterverfijning. Deze is gebaseerd op de volgende overwegingen:

- Het rooster is uitgelijnd op de contouren van de bodem van de verdiepte vaargeul KWZ-UDO zodat 'kartelranden' op de overgang naar het talud worden vermeden. De contour van het gedeelte op -10 m NAP is 129,6 m breed, afgeleid uit de vaargeul begrenzing met een breedte van 160 m op -6,2 m NAP (zie Figuur 2-1) verminderd met tweemaal 15,2 m voor de hellingen van 1:4 tussen -6,2 m en -10 m NAP aan weerszijden.
- Binnen deze contour is een verfijnd rooster gegenereerd met 6 cellen over de breedte van 129,6 m. De cellen vormen bij benadering gelijkzijdige driehoeken met zijdes van ca. 25 m (en een hoogtelijn met lengte 21,6 m).
- Het rooster in de noordelijkste 1125 m van de verdiepte vaargeul (zie Figuur 2-3) is niet aangepast omdat het bestaande rooster met ca. 15 m al fijner is dan de beoogde afmeting van 25 m.
- Aansluitend is in een overgangszone van ca. 520 m (ten zuiden van de 1125 m) de aansluiting gemaakt tussen de bestaande roosteroriëntatie, die niet was afgestemd op de geometrie van de verdiepte vaargeul, en het zorgvuldig uitgelijnde rooster in de vaargeul.
- Buiten de contour van -10 m NAP is eerst over ca. 300 m in dwarsrichting vergroefd naar een roosterafmeting van 50 m, en waar nodig aansluitend over ca. 1700 m naar het oorspronkelijke rooster. De totale invloed van de verfijning reikt tot maximaal ca. 2 km vanaf de -10 m contour, zie bijvoorbeeld Figuur 2-4 met het detail van het rooster bij het zuidelijke uiteinde van de te verdiepen vaargeul.
- Het rooster van de vaargeul in Binnenhaven en de aansluitende vaargeulen naar Makkum en naar de verdiepte geul KWZ-UDO bleven ongewijzigd.

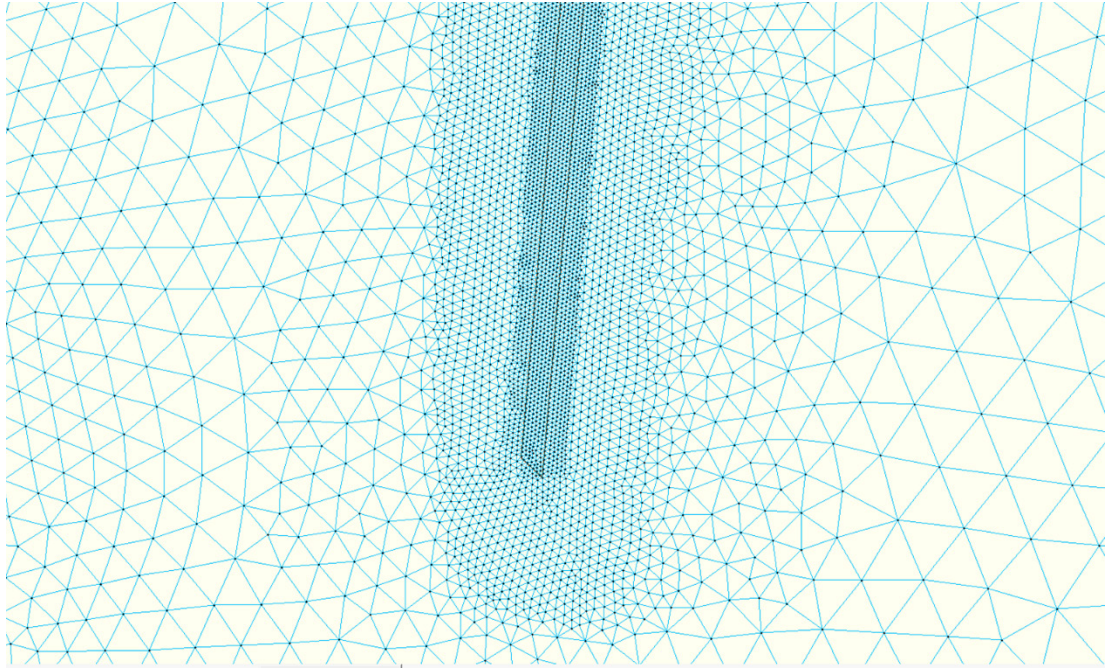
De nieuwe roosteromvang is 428333 elementen (toename 16%) en 222430 nodes (toename 15%).



Figuur 2-2 Rekenrooster in het noordelijke deel van het IJsselmeer. Links het oorspronkelijke rooster uit 2020 met de contouren van de te verdiepen vaargeul en rechts het rooster van de huidige studie, verfijnd langs de vaargeul KWZ-UDO.



Figuur 2-3 Detail noordelijke einde verdiepte vaargeul. Links het oorspronkelijke rooster, rechts het aangepaste rooster (eerste 1125 m ongewijzigd).



Figuur 2-4 Detail van de rooster verfijning bij het zuidelijke uiteinde van de te verdiepen vaargeul. De relatief grove roosters aan weerszijden geven een indruk van de oorspronkelijke resolutie.

2.2.2 Verticale rekenrooster

Het oorspronkelijke verticale rekenrooster, bestaande uit 5 sigma-lagen³, voldoet niet voor de huidige studie. De weergave van de zoutdynamica in verdiepte geulen en putten in een meer vereist de toepassing van vaste lagen (z-lagen). Nabij het wateroppervlak zijn deze gecombineerd met sigma-lagen, conform de praktijk bij andere D-Hydro gebiedsmodellen. In verband met de vraagstelling is een relatief hoge mate van detail nodig om de dichtheidsstroming in minimaal 5 m diep water weer te geven en om onderscheid te kunnen maken tussen vaargeulbodems op -10 m, -6,7 en ca. -5 m NAP. Verder moet de erosiekuil bij Kornwerderzand met een maximale diepte van ca. -13 m NAP goed weergegeven worden. Dieptes onder -13 m NAP hoeven niet gedetailleerd opgelost te worden in het verticale rooster, want dat betreft alleen de zandwinputten in de zuidelijke IJsselmeer, met lokale maximum dieptes van ca. -17 tot -27 m NAP. Deze liggen buiten het huidige interessegebied. Er zijn in totaal 30 lagen gedefinieerd, 25 z-lagen met daar bovenop 5 sigma-lagen:

- Boven de -2 m NAP zijn 5 sigma-lagen aanwezig met een laagdikte van 0,36 m bij een waterstand van -0,2 m NAP.
- Tussen -7 m en -2 m NAP zijn 10 vaste lagen aanwezig met een dikte van 0,5 m.
- Daaronder neemt de laagdikte telkens met 10% toe, tot ca. 2 m onderin de diepste putten.

2.2.3 Bodemgeometrie

Voor de bodemligging van de referentiesituatie is gebruikgemaakt van een nieuwe baseline projectie: baseline-nl_land-j19_6-v2. De in 2020 gerealiseerde eerste verdiepte sectie van 1,7 km in de concessie van de Provincie Fryslân zit hier niet in, en blijft ook volgens afspraak buiten deze studie. Op deze projectie is wel een correctie toegepast voor de dieptes in diverse havens omdat deze nog al eens in de buurt van lokale onttrekkingen en lozingen liggen. Dit is verder toegelicht in Bijlage A (paragraaf A.2).

Voor de bodemgeometrie van de scenario's zie paragraaf 2.3.

³ Bij sigma-lagen heeft de waterkolom overal hetzelfde aantal lagen met dezelfde verdeling, ongeacht de waterdiepte.

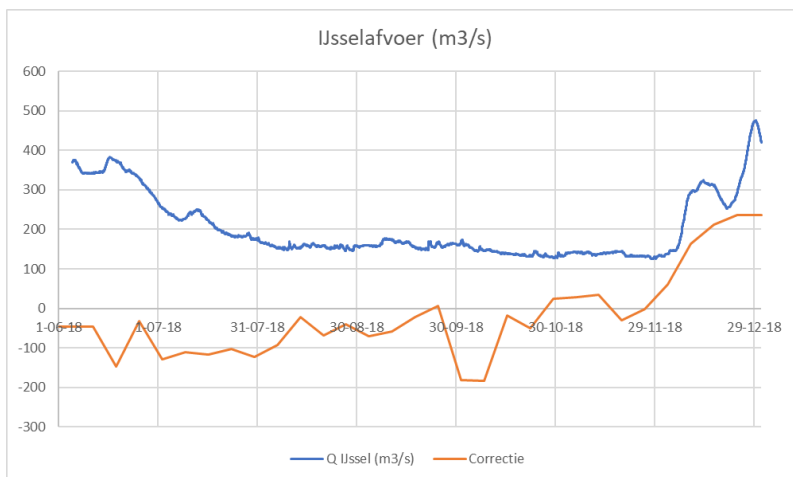
2.2.4 Debietrandvoorwaarden en waterbalans

Zoals in de aanpak beschreven, zijn er in de randvoorwaarden vereenvoudigingen aangebracht ten opzicht van de randvoorwaarden van het bestaande model. Bij de spuisluisen is de lek van zoutwater van Waddenzee naar IJsselmeer weggelaten. Dat geldt ook voor de afvoer van zoutwater uit de erosiekuilen door de hevels bij Den Oever en Kornwerderzand, die klein is en waarvan het tijdsverloop niet goed bekend is voor 2018. Voor de debieten ten gevolge van uitwisselingsstromingen en nivellering bij de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand is een nieuwe schatting gemaakt op basis van de Zeesluisformulering, zie paragraaf 2.2.5. Dezelfde termen bij Den Oever blijven buiten beschouwing. Voor de instroming van de IJssel en de stroming door de Houtrib, Krabbersgat, Lorentz en Stevin spuisluisen zijn de debietrandvoorwaarden met uurswaarden van het bestaande model vervangen door 10 minuten waarden om het verloop van de debietcurve gedurende een spuiperiode beter weer te geven.

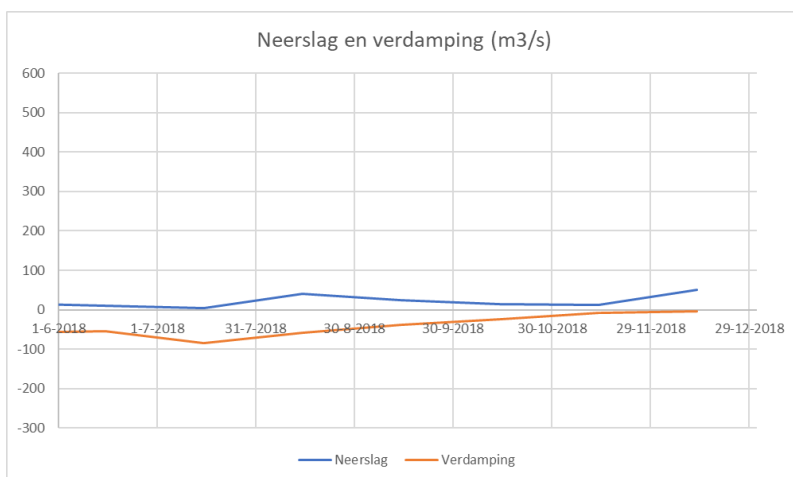
Voor een correcte werking van het model is het van belang dat de waterbalans gebaseerd op de debietrandvoorwaarden sluitend gemaakt wordt, zodanig dat de waterstanden goed worden weergegeven. Hierbij is gebruikt gemaakt van een gewogen gemiddelde van de (10 minuten) waterstanden in Den Oever, Kornwerderzand, Houtribsluizen-noord en Lemmer, met respectievelijke wegingsfactoren van 0,22, 0,30, 0,35 en 0,13⁴. Met behulp de gewogen waterstanden en de overige debietrandvoorwaarden is een tijdreeks van correctie-debieten bepaald om de waterbalans sluitend te maken. De correctie-debieten zijn toegevoegd aan de IJsselafvoer. Het interval van de correctie-debieten is vergroot naar 7 dagen om alleen op de gemiddelde condities te sturen. Deze correctie is inclusief neerslag en verdamping. De neerslag en verdamping wordt dus niet aan het wateroppervlak opgelegd. In een droge periode met een verdampingoverschot leidt dit tot minder IJsselafvoer in plaats van lokale verdamping en dus tot een iets andere invloed op het chloridegehalte.

Figuur 2-5 laat het verloop van het IJsseldebit zien, en de daarop toegepaste correctie ter verkrijging van een sluitende waterbalans. Figuur 2-6 laat op dezelfde schaal zien in hoeverre neerslag en verdamping op het IJsselmeer de correctie kan verklaren. Opvallend is de grote negatieve correctie van ca. -180 m³/s die begin oktober nodig is. Deze is eigenlijk te groot voor de IJsselafvoer, die dan namelijk maar 150 – 170 m³/s bedraagt. Bij navraag binnen RWS bleek dat in de periode van begin 28 september tot 10 oktober 2018 wel is gespuid, in tegenstelling tot de toestand in de huidige set randvoorwaarden. Eind december blijkt een correctie van ca. +235 m³/s nodig op een IJsselafvoer van ca. 300 – 450 m³/s. Slechts een relatief klein deel hiervan is toe te schrijven aan de neerslag. De oorzaak voor deze verschillen moet waarschijnlijk gezocht worden in de kwaliteit van de registratie van de debieten bij Olst (IJssel), bij de Houtribsluizen en Krabbersgatsluizen en bij de Stevinluizen en Lorentzsluizen.

⁴ Wegingsfactoren gekozen in overeenstemming met de applicatie BALANS.



Figuur 2-5 IJsseldebiet en toegepaste correctie voor de waterbalans (m^3/s).



Figuur 2-6 Bijdrage van neerslag en verdamping aan de waterbalans (m^3/s).

De meeste termen van de waterbalans zijn gedefinieerd in de vorm van 'sink' en 'source' termen in het model (zie [2] voor details). De spuisluizen die waren gedefinieerd als zogenaamde 'lateralen' zijn echter vervangen door debietranden om de bestaande problemen aldaar met de randafhandeling op basis van lateralen (negeren van onttrekkingen bij overschrijden tijdstapcriterium) op te lossen.

2.2.5 Zoutrandvoorwaarden

Zoals aangegeven bij de aanpak in paragraaf 1.3 ligt de focus in de huidige modelopzet op de zoutindringing veroorzaakt door de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand. De zoutlasten van de scheepvaartsluis bij Den Oever en van de spuisluizen worden weggelaten. Voor de overige zoutbronnen, waaronder de IJssel, en de initiële conditie wordt een constante achtergrondswaarde van 110 mg/l voor chloride gehanteerd (equivalent met 0,1987205 psu in het model).

Voor de zoutlast van de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand is in deze studie een verbeterde benadering toegepast, vergeleken met eerdere studies. Deze benadering is gebaseerd op de Zeesluisformulering (ZSF), die de transporten over de sluishoofden berekend op basis van de schutoperatie, echter nog zonder dynamische koppeling met het 3D model. Dit type zoutrandvoorwaarde is eerder toegepast in de studie *Zeesluizen Farmsum: zoutlast op het Eemskanaal*, zie [11]. De ZSF heeft zoutgehalten net buiten de sluiscolken nodig, maar deze zijn niet beschikbaar uit metingen. Als oplossing zijn er in dit project voor de voorhavens aan weerskanten van de sluisen 'bakjes' gedefinieerd waarin het

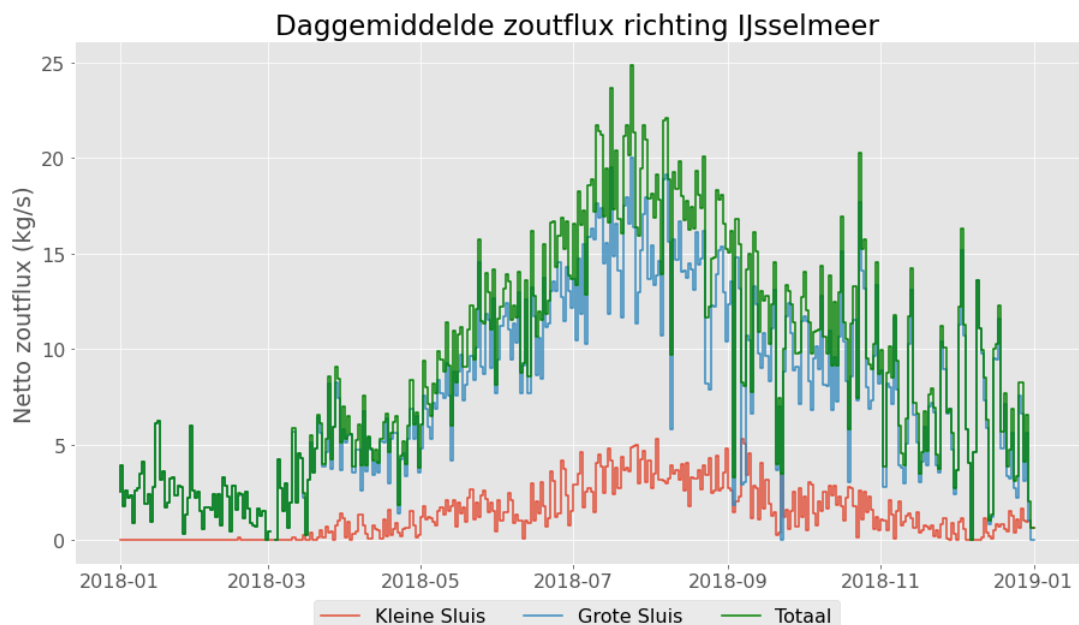
zoutgehalte bepaald wordt door de ZSF en door de uitwisseling met het open water van het IJsselmeer en de Westelijke Waddenzee, waar het verloop van het zoutgehalte beter bekend is. Voor details zie Bijlage B.

De volgende randvoorwaarden worden aan het binnenhoofd van de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand opgelegd in het 3D-model:

- Tijdreeksen van het debiet de sluizen in (het model uit) berekend door de ZSF. Het zoutgehalte van dit uitgaande debiet wordt bepaald door de saliniteit die aanwezig is in de Binnenvoorhaven in het model.
- Tijdreeksen van het debiet en de saliniteit de sluizen uit (het model in), beide berekend door de ZSF.

De tijdreeksen zijn gebaseerd op de fasen van het schutproces wat leidt tot grote zoutlasten in korte perioden per schutting. Voor het meer algemene beeld geeft Figuur 2-7 de daggemiddelde zoutflux door de Grote en de Kleine Sluis naar het IJsselmeer en de som van beiden zoals afgeleid met de ZSF en het bakjesmodel. Deze zoutflux is groot in de zomer, met een maximum van 25 kg zout/s (ca. 14 kg chloride/s) eind juli 2018. In de winter is de zoutflux aanzienlijk lager, tussen 0 en 6 kg/s (0 – 3 kg chloride/s) in januari en februari 2018. Gebruikmakend van de beschikbare schutregistraties uit het IVS 90 systeem is op deze manier een vrij realistische beschrijving van de zouttransporten verkregen, veroorzaakt door de operatie van de beide sluizen. Daarin is de invloed van de variaties in de schutoperatie over het jaar, maar ook de concentratie van schuttingen overdag en de afhankelijkheid van het getij meegenomen (niet zichtbaar in Figuur 2-7). Niet alleen varieert het aantal schuttingen sterk over het jaar, maar ook het zoutgehalte in de Waddenzee doet dat. Beide effecten versterken elkaar in de zomer met veel schuttingen en een hoog zoutgehalte in de Waddenzee. Door gedane aannamen, zoals voor de deur-opentijden, kent ook deze schatting een bepaalde onzekerheid, die waarschijnlijk veel kleiner is dan die van eerdere schattingen.

De verschillende scenario's kunnen leiden tot relatief kleine veranderingen in het zoutgehalte van het IJsselmeer. Maar omdat de zoutlast vooral bepaald wordt door de grote zoutgradiënt tussen Waddenzee en IJsselmeer kunnen deze kleine verschillen in de bepaling van de zoutrandvoorwaarden verwaarloosd worden. De uitwisselingsdebieten en het zoutgehalte van het inkomende water zijn daarom voor de referentiesituatie en de scenario's gelijk verondersteld.

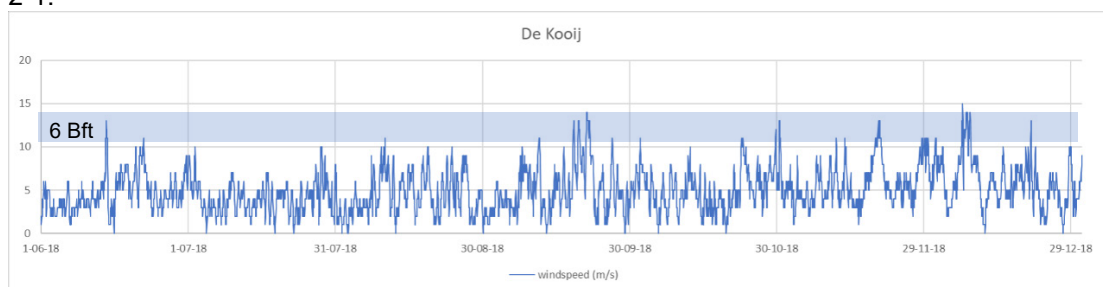


Figuur 2-7 Daggemiddelde zoutflux (kg zout/s) door de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand in de richting van het IJsselmeer.

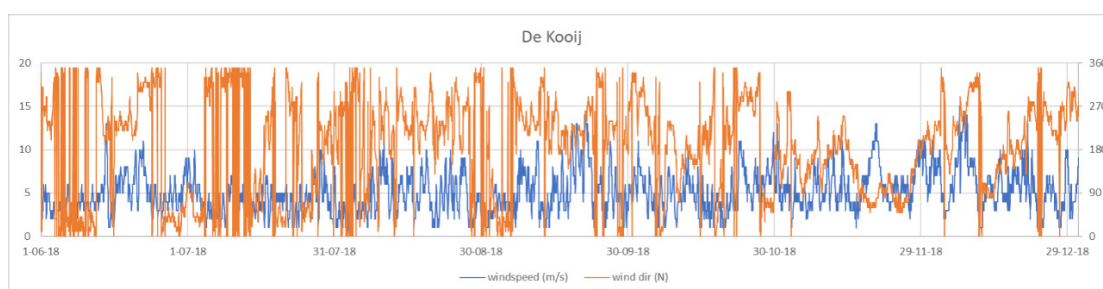
2.2.6 Wind

Figuur 2-8 geeft het verloop van de toegepaste uurlijkse windsnelheid (m/s) bij De Kooij gedurende de simulatie, met een blauwe band voor een windkracht van 6 Beaufort. Figuur 2-9 geeft de windrichting (°N) met op de achtergrond de windsnelheid ter referentie.

Krachtige wind van (minimaal) 6 Beaufort treedt op bij een negental gelegenheden, zie Tabel 2-1.



Figuur 2-8 Windsnelheid (m/s) bij De Kooij, inclusief band van 6 Beaufort (krachtig, 10,8-13,8 m/s).



Figuur 2-9 Windrichting (°N) bij De Kooij (windsnelheid in m/s op de achtergrond).

Tabel 2-1 Waargenomen wind van minimaal 6 Bft langer dan 2 uur.

Datum in 2018	Tijdvak en duur (uur)	Richting	Max. windsnelheid (m/s)
14 juni	7-14 (8)	ZW (200-220 °N)	13
22 juni	1-13 (13)	NW (310-320 °N)	11
11 sept.	8-12 (5)	ZW (230-240 °N)	11
18 sep.	10-15 (6)	ZW (210-230 °N)	13
19 sept.	10-19 (10)	ZW (210-220 °N)	13
21 sept.	2-21 (20)	Z-W (190-290 °N)	14
23 okt.	7- 9 (3)	W (270-280 °N)	11
30 okt.	20-24 (5)	W (260-280 °N)	13
19-20 nov	13-18 (30)	O (60-90 °N)	13
7 dec.	8-13 (6)	ZW (210 °N)	15
7-8 dec.	19-15 (21)	ZW-W (240-270 °N)	14
8-9 dec.	19- 4 (10)	ZW-W (240-290 °N)	14
21 dec.	12-15 (4)	ZW-W (240-260 °N)	13

2.2.7 Simulatieperiode en tijdstap

De simulatieperiode is identiek genomen aan die van de eerdere berekeningen, van 5 juni – 30 december 2018. Gegeven de initiële conditie van een uniform meerpeil, geen stroming en een uniform (achtergronds-) zoutgehalte moet in de resultaten rekening gehouden worden met de invloed van lange inspeeltijden van de transportprocessen.

Voor de rekentijdstep wordt automatische tijdstep bepaling toegepast volgens AutoTimestep = 3 zoals aanbevolen voor de combinatie van z- en sigma-lagen in de Technical Reference Manual. Aanvullend is de tijdstep beperkt tot maximaal 5 s ($Dt_{max} = 5$)⁵. Bij de numerieke afhandeling van de debietranden bij de spuisluizen kan tijdelijk een automatische tijdstep beperking optreden, bijvoorbeeld tot 0,2 s.

2.2.8 Overige modelinstellingen

De instellingen in de *Master Definition Unstructured* (mdu-) file van het model voor *numerics*, *physics* en *wind* zijn vrijwel geheel gelijk aan die van het oorspronkelijke model, zie [2]. Enige afwijkingen van betekenis is het maximum toegestane Courant getal toegepast in de automatische tijdstep bepaling. Dit getal staat op CFLMax = 0,7 in overeenstemming met het advies voor D-Hydro in verband met het gebruikte expliciete advection schema (0,7 of lager).

2.3 Scenario's

De berekeningen worden uitgevoerd voor de referentiesituatie en vier verdiepingsscenario's. Daarbij onderscheiden de scenario's zich alleen door een andere bodemgeometrie:

0. Referentiesituatie met de oorspronkelijke bodemligging tot 2020, zonder verdiepte vaargeul (dus ook zonder de thans aanwezige eerste verdiepte sectie van 1,7 km in de concessie van de Provincie Fryslân);
1. Vaargeulverdieping door zandwinning over het hele traject KWZ-UDO tot een uniform toegepaste gemiddelde diepte van -10 m NAP (NB in praktijk variërend tussen -8 en -12 m NAP). Geen drempels (ook niet bij de kruising van de gasleidingen);
2. Vaargeulverdieping over het hele traject KWZ-UDO tot -6,7 m NAP. Geen drempel ter plaatse van de kruising van de gasleidingen;
3. Vaargeulverdieping conform Scenario 1, maar gecombineerd met drempels.
Uiteindelijke keuze:
 - drempel -6,7 m binnen concessie van Provincie Fryslân,
 - drempel -5 m ter plaatse van de kruising van de gasleidingen,
 - drempel -6,7 m ter plaatse van de Rug van Lacon.
4. Vaargeulverdieping tot -10 m NAP, maar beperkt tot de concessie van Provincie Fryslân (lengte 4,5 km).

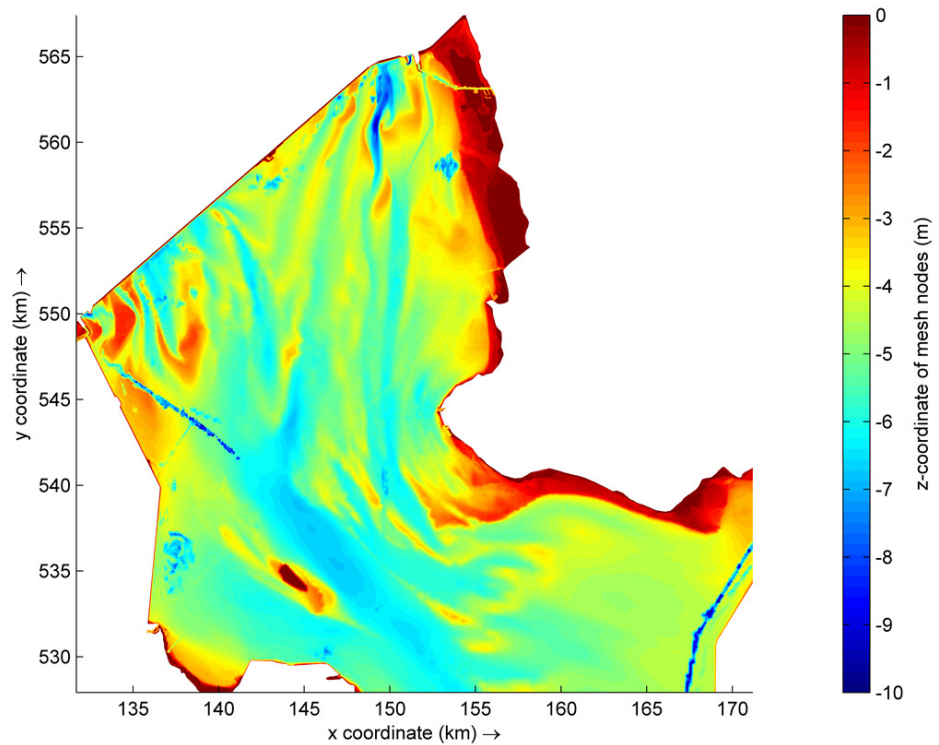
In de scenario's is alleen de geometrie van de vaargeul KWZ-UDO gewijzigd met uitzondering van de eerste 1,2 km vanaf de scheepvaartsluizen (deels in de Binnenhaven), die ongewijzigd blijft. De zijtakken naar Makkum en Workum etc. zijn niet verdiept. De vaargeul UDO, die deels reeds is verdiept, is ook niet gewijzigd. Voor de resulterende bodemligging van de referentiesituatie en vier verdiepingsscenario's zie Figuur 2-10 tot en met Figuur 2-14.

De volumes van de vaargeulverdieping in de verschillende scenario's ten opzichte van de referentiesituatie zijn gegeven in Tabel 2-2. Dit geeft enige indicatie van de relevantie van de scenario's voor de zandwinning, zij het dat de economische winbare hoeveelheden per scenario nog van veel andere parameters afhankelijk zullen zijn.

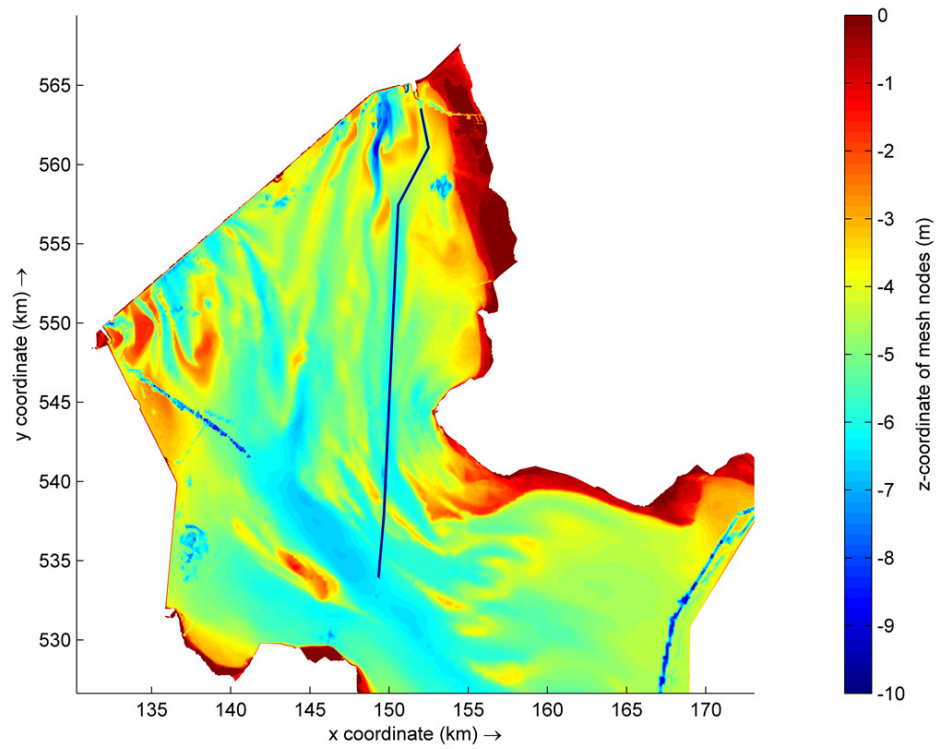
⁵ Onder andere ter voorkoming van WARNING's bij 'sink' termen als "*Extraction flux larger than cell volume at ...*".

Tabel 2-2 Volumes van de vaargeulverdieping van de Scenario's vergeleken met de referentiesituatie.

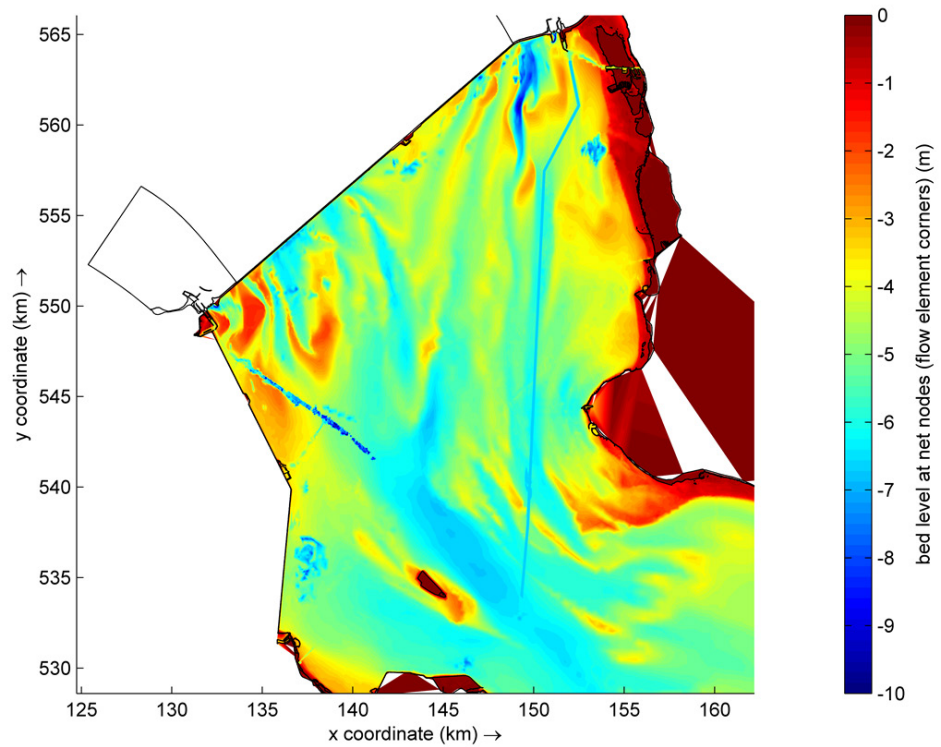
Scenario	Volume verdieping tov referentiesituatie	Vergeleken met Scenario 1
	m ³	%
1	2.155 10 ⁷	100%
2	5.083 10 ⁶	24%
3	2.118 10 ⁷	98%
4	3.706 10 ⁶	17%



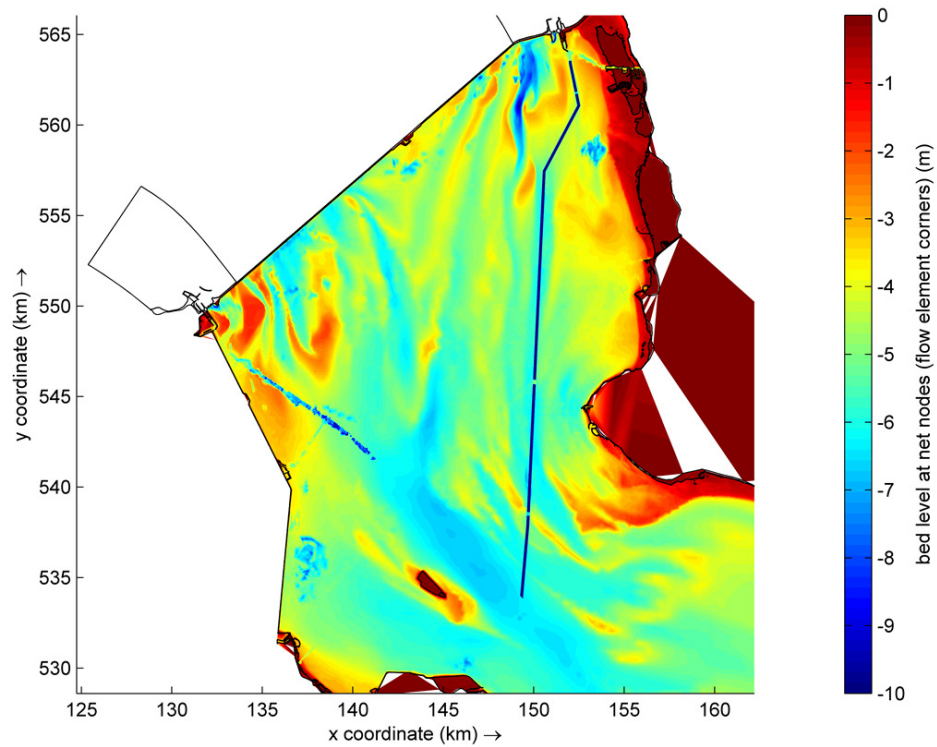
Figuur 2-10 Bodemligging IJsselmeer, referentiesituatie tot 2020, zonder verdieping van de vaargeul tussen KWZ en UDO (m NAP).



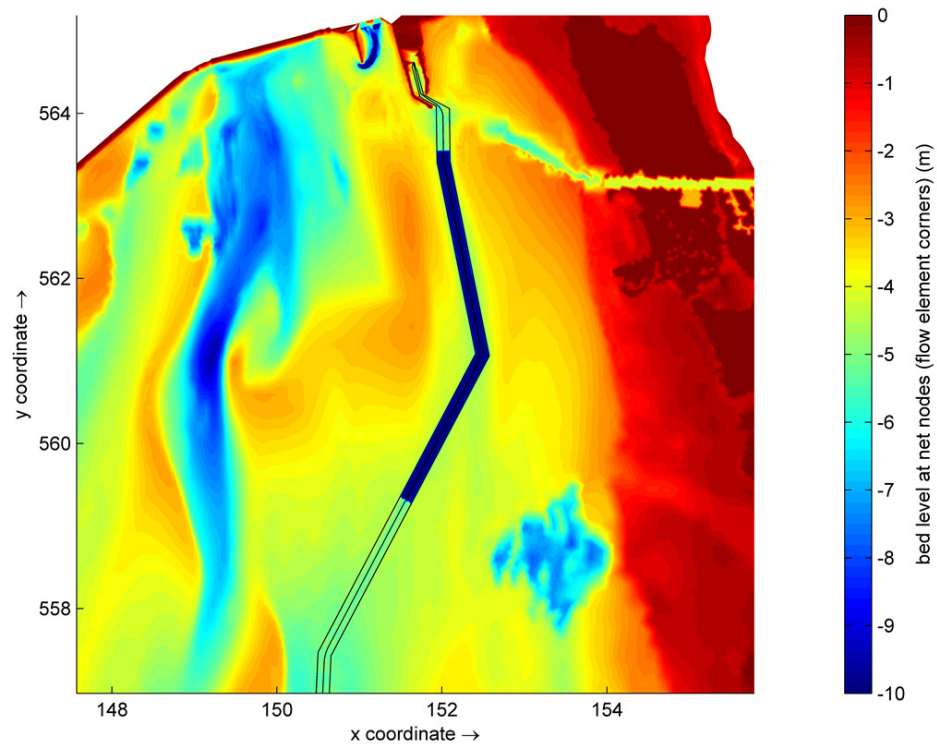
Figuur 2-11 Bodemligging IJsselmeer, Scenario 1, vaargeul tussen KWZ en UDO verdiept tot -10 m NAP.



Figuur 2-12 Bodemligging IJsselmeer, Scenario 2, vaargeul tussen KWZ en UDO verdiept tot -6,7 m NAP.



Figuur 2-13 Bodemligging IJsselmeer, Scenario 3, vaargeul tussen KWZ en UDO verdiept tot -10 m NAP met drempels in de concessie van Provincie Fryslân, bij de kruising van gasleidingen en bij de Rug van Lacon.

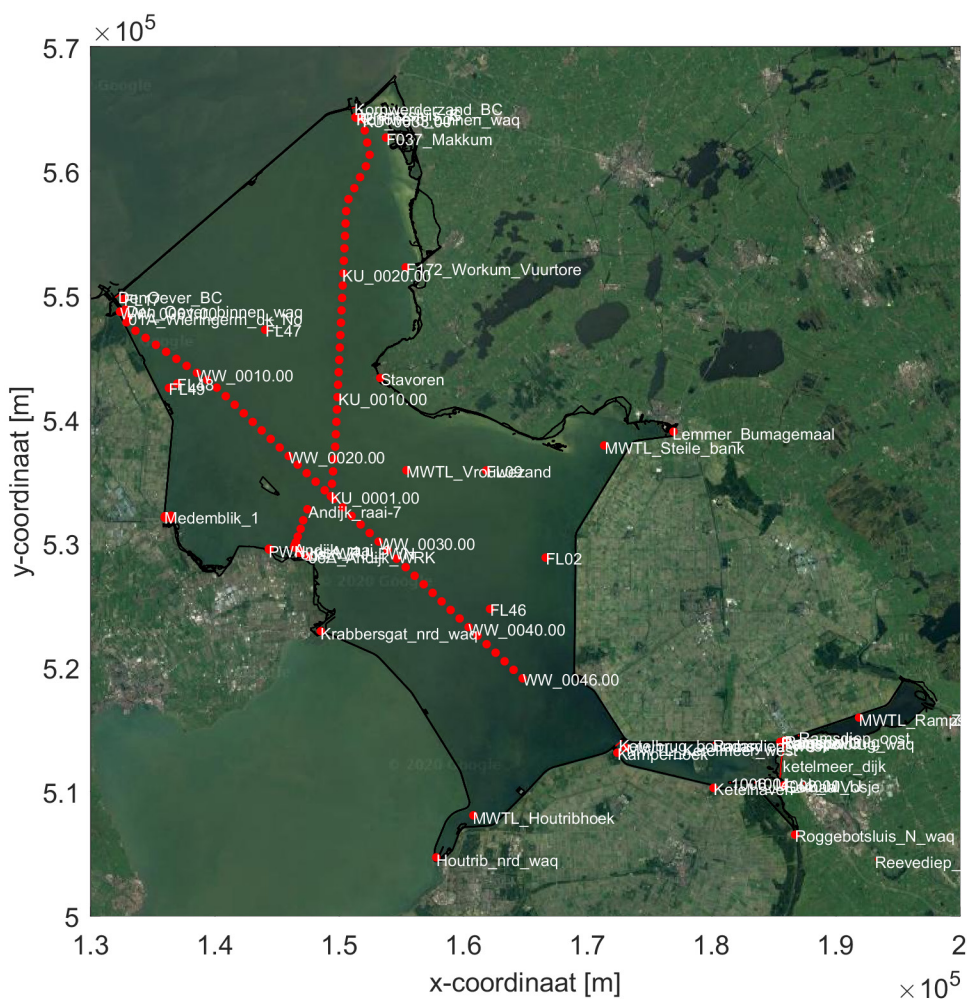


Figuur 2-14 Bodemligging IJsselmeer, Scenario 4, eerste 4,5 km van de vaargeul tussen KWZ en UDO verdiept tot -10 m NAP.

2.4 Model output

Gedurende de berekeningen worden de resultaten op de volgende manieren opgeslagen:

- In de monitoringstations en raaien worden de tijdreeksen van de resultaten weggeschreven met een interval 10 minuten (de zgn. history-files), zie de overzichtsploot in Figuur 2-15. Bijlage A bevat meer gedetailleerde plots van deelgebieden. Langs twee vaargeulen zijn op elke kilometer monitoringstations gedefinieerd: langs de vaargeul Urk - Den Oever (UDO) de stations WW_0001 tot WW_0046 en langs de vaargeul Kornwerderzand – UDO de stations KU_0001 tot KU_0033.
- Map-files met de resultaten in alle roosterpunten worden elke 24 uur weggeschreven gedurende de hele berekening.
- Restart-files worden elke 20 dagen weggeschreven. Deze bieden de mogelijkheid om meer gedetailleerde resultaten te genereren doormiddel van relatief korte sommen die starten vanaf een restart-file, indien gewenst.



Figuur 2-15 Positie van de monitoring stations en raaien in het IJsselmeer.

2.5 Postprocessing

Een goede visualisatie van de berekeningsresultaten is belangrijk om te kunnen zien welke processen een rol spelen en om de verkregen inzichten over te brengen. Voor alle berekeningen zijn de resultaten door middel van scripts verwerkt tot een serie van animaties

en plots. Een gedeelte daarvan is gebruikt in de rapportage, en een deel is afzonderlijk opgeleverd aan Rijkswaterstaat.

De volgende animaties voor de periode van 5 juni – 30 december 2018, met een interval van 24 uur, zijn opgeleverd voor de referentiesituatie (run r030) en de 4 scenario's (respectievelijk runs r031, r032, r033 en r034):

- **Chloridegehalte aan het wateroppervlak** (mg/l): *sal_map_01_r030*.mp4, enz.* Deze animaties geven een beeld van de ontwikkeling van de chloridegehalten in ruimte en tijd.
- **Diepte geïntegreerde chloridemassa boven de achtergrondswaarde** (kg chloride/m²): *map_sal_mass_01_r030*ref_02.mp4, enz.* Deze animaties geven een beeld van de verspreiding van de chloridemassa vanuit de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand in ruimte en tijd.
- **Diepte geïntegreerde stroomsnelheid of watertransport** (m²/s): *map_q_01_r030*.mp4, enz.* De magnitude en de oost en noord componenten geven de grootte en richting van het watertransport weer voor de verschillende scenario's.
- **Langsraai door de vaargeul** van Kornwerderzand tot aan Andijk: *sal_ls_02_r030*.mp4, enz.* Deze animatie toont de ontwikkeling van het chloridegehalte en snelheden (de longitudinale, dwars en verticale snelheidscomponenten) in de vaargeul in de tijd. Het interval van 24 uur bemoeilijkt evenwel het volgen van de ontwikkeling van het zouttransport in de (verdiepte) vaargeul.
- Een eerste aanzet van **3D animaties van de zouttong bij Kornwerderzand** op basis van het 400 mg/l isovlak (0,72262 psu): *map_sal3D_01_r030*.mp4, enz.* Deze animaties geven een beeld van hoe de zouttong zich vanuit de Binnenhaven richting vaargeul verspreidt in de verschillende scenario's.
- **Vershil in het chloridegehalte aan het oppervlak** (mg/l) tussen scenario en referentiesituatie: *map_sal_01_diff_r031_r030*clim_02.mp4, enz.* Deze animaties geven inzicht in de invloed van de 4 scenario's op het chloridegehalte aan het wateroppervlak.
- **Vershil in diepte geïntegreerde chloridemassa boven de achtergrondswaarde** (kg chloride/m²) tussen scenario en referentiesituatie: *map_sal_mass_01_diff_r031_r030*ref_02.mp4, enz.* Deze animaties geven inzicht in de invloed van de 4 scenario's op de verspreiding van de chloridemassa in ruimte en tijd.

Daarnaast zijn plots beschikbaar van:

- Tijdreeksen van het chloridegehalte aan het wateroppervlak (mg/l) in de monitoring stations voor alle runs.
- Tijdreeksen van het verschil in chloridegehalte aan het wateroppervlak (mg/l) tussen de Scenario's en de referentiesituatie (zie ook paragraaf 4.3).
- Maandplots met tijdreeksen van het chloridegehalte aan de bodem in geselecteerde stations langs de vaargeul, vergeleken met de zoutlast van de scheepvaartsluizen, het cumulatieve chloridetransport bij de spuisluizen en de windsnelheid en richting. (zie Bijlage C en E). Deze plots illustreren o.a. het verloop van het zouttransport in de vaargeul voor de referentiesituatie en de scenario's in relatie tot de randvoorwaarden.

3 Resultaten referentiesituatie, Scenario 0

Het is belangrijk dat de berekeningen de processen die relevant zijn voor de huidige studie, en dus voor de referentiesituatie en verdiepingsscenario's, behoorlijk weergeven. Het aangepaste model is eerst geverifieerd door resultaten van de berekening voor de referentiesituatie te vergelijken met metingen en met de resultaten van een eerdere studie [2]. Het gaat daarbij niet om een exacte reproductie van de metingen of het eerdere model maar om het globale gedrag. Van de referentiesituatie vergelijken we de berekende tijdreeksen van waterstanden en chloridegehalte in enkele stations met metingen en met resultaten van een eerdere berekening voor 2018 gerapporteerd in [2]. Aansluitend worden velden van het chloridegehalte aan het oppervlak vergeleken met die van de eerdere berekening voor 2018. Daarna bespreken we de cumulatieve afvoeren van de spuisluizen bij Den Oever en Kornwerderzand, en de zoutbalans ten opzichte van de achtergrondswaarde. Naast (globale) verificatie van het model aan de hand van de referentiesimulatie, is ook van belang na te gaan in hoeverre de weergave van de zoutdynamica bij een sterke verdieping en de gekozen condities representatief zijn voor de studie. .

3.1 Waterstanden

De gemodelleerde waterstand (blauw) en de gemeten waterstand (groen) bij Kornwerderzand en de Houtribsluizen Noordzijde zijn vergeleken in Figuur 3-1. Zowel de variabiliteit op korte tijdschalen onder invloed van wind, als het gemiddelde peil onder invloed van debietrandvoorwaarden worden goed weergegeven door het model. Dit bevestigt dat de waterbalans goed sluitend gemaakt is door correctie van de IJsselafvoer.

3.2 Verloop van chloride in de tijd

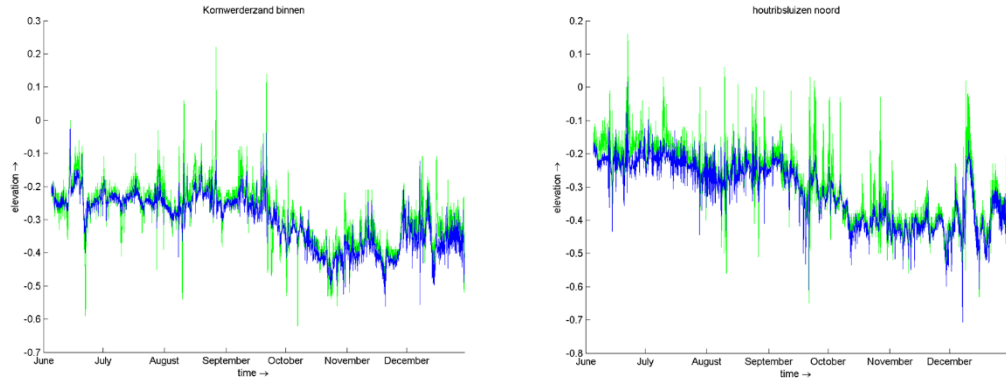
Verder zijn in Figuur 3-2 tijdreeksen van het berekende chloridegehalte aan het oppervlak (blauw) bij de stations FL16 (Kornwerderzand) en FL38 (Andijk) vergeleken met het gemeten chloridegehalte (groen) op -1,5 m NAP.

Bij FL16 is het verloop in het model substantieel lager dan gemeten in 2018: de metingen geven een gemiddeld zomermaximum van ruim 400 mg/l terwijl dit voor het model ongeveer 300 mg/l is. Dit verschil kan verklaard worden uit de grote zoutlek bij de spuisluizen van Kornwerderzand in 2018 die niet in de berekening is meegenomen. Dat het resultaat representatief is voor een situatie zonder excessieve lek bij de spuisluizen blijkt als vergeleken wordt met de metingen van 2019 en 2020, toen de oorzaken van de grote zoutlek bij de spuisluizen waren weggenomen en het gemiddelde zomer maximum tussen de 200 en 300 mg/l lag, zie Figuur 9 uit [1]. Het gemeten verloop in die jaren sluit dus goed aan bij het modelresultaat voor 2018, een indicatie dat de zoutlasten berekend voor de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand realistisch zijn.

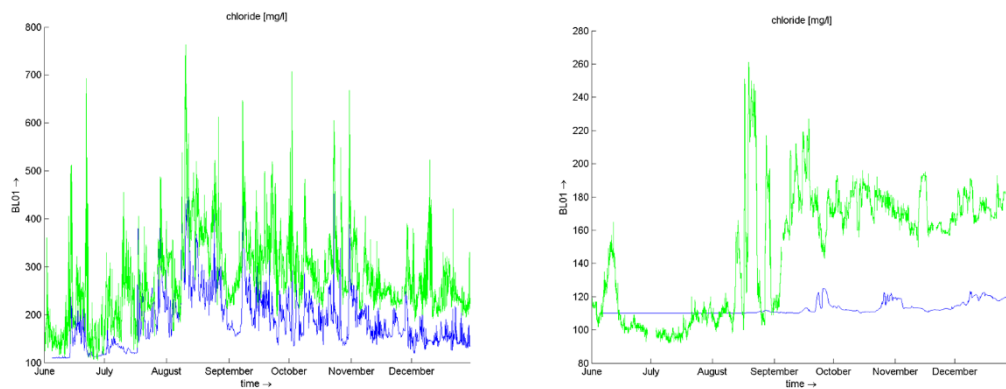
Bij Andijk (FL38) blijkt het verschil tussen het geschematiseerde model en de meting veel groter. Wat speelt is dat alleen de invloed van de zoutlast van de scheepvaartsluizen bij KWZ gemodelleerd is, die bovendien als gevolg van inspelen pas maanden na aanvang van de berekening merkbaar wordt bij Andijk. Volgens de berekening zijn dus onder normale omstandigheden de effecten bij Andijk ten gevolge van de scheepvaartsluizen van KWZ klein, maximaal 10 – 15 mg/l. Ook hier lijken de metingen van 2019 en 2020 dat te bevestigen, met slechts geringe verhogingen in de tweede helft van het jaar bij Andijk, zie eveneens Figuur 9 uit [1]. Behalve het weglaten van de zoutlast bij de scheepvaartsluis van Den Oever en de spuisluizen van Den Oever en Kornwerderzand, speelt ook het ontbreken

van het oplopende zoutgehalte van de IJssel in de berekening een rol bij het grote verschil met de metingen van 2018. Uit grafiek 1.4 van [8] blijkt dat het chloridegehalte van de Rijn in juli 2018 sterk oploopt, van ca. 70 naar meer dan 130 mg/l. Deze verhoging zal met een kleine vertraging in het IJsselmeer en met name bij Andijk merkbaar zijn.

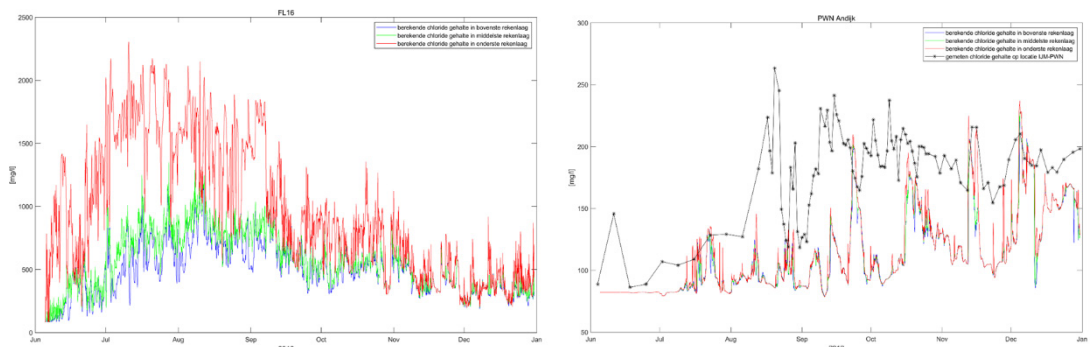
Aanvullend vergelijken we de resultaten voor het chloridegehalte aan het oppervlak bij Kornwerderzand en Andijk met de resultaten van de eerdere berekening voor dezelfde



Figuur 3-1 Gemeten waterstand (groen) bij Kornwerderzand (links) en de Houtribsluizen Noordzijde (rechts) vergeleken met de gemodelleerde waterstand (blauw) voor Scenario 0.



Figuur 3-2 Gemeten chloridegehalte (groen) bij FL16 (Kornwerderzand) en FL38 (Andijk) vergeleken met modelresultaat (blauw) voor Scenario 0 (NB. de schaal op de verticale as verschilt).



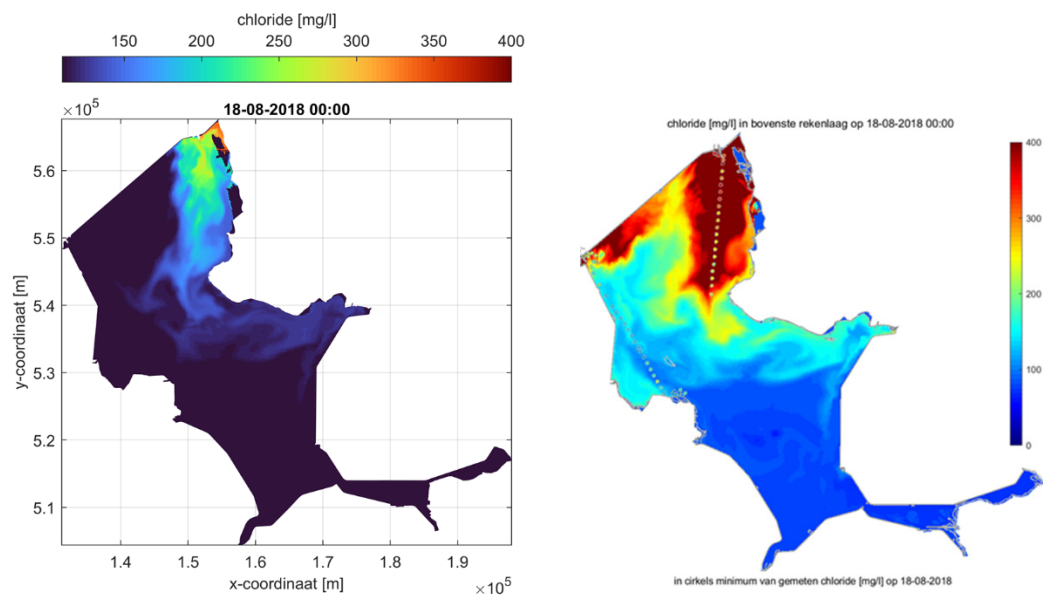
Figuur 3-3 Berekende chloride (mg/l) in station FL16 bij Kornwerderzand (links) en berekende en gemeten chloride (mg/l) nabij PWN in Andijk, Figuur G.34 en G.33 uit [2]. Berekende chloride in bovenste (blauw), middelste (groen) en onderste laag (rood) van 5 sigma-lagen en gemeten chloride (zwart met ●).

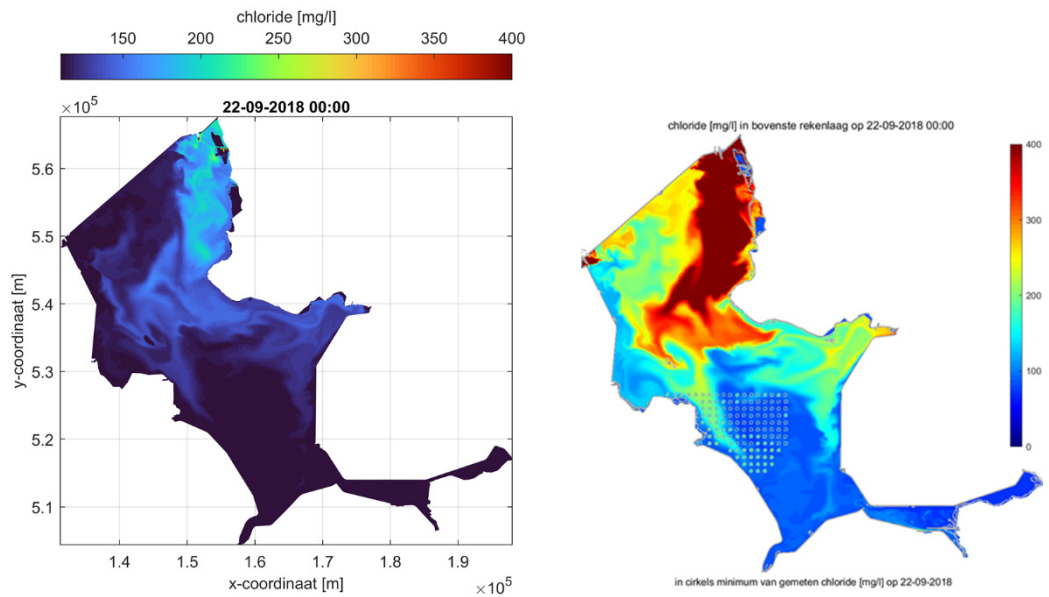
periode, zie Figuur 3-3. Deze berekening resulteerde destijds voor Kornwerderzand (FL16) in een gemiddelde zomer maximum tussen 800 en 1000 mg/l aan het oppervlak. Dit is aanzienlijk hoger dan gemeten, en wordt geweten aan de vrij hoge schattingen voor de zoutlekken bij de scheepvaartsluizen en de spuisluisen in de betreffende berekening. Bij Andijk laat de oude modelberekening desondanks over het algemeen een onderschatting zien van de gemeten chloridegehalten. In [2] werd geopperd dat in het (oude) model gebaseerd op 5 sigma-lagen mogelijk minder (horizontale) menging optreedt dan in werkelijkheid gebeurt. Anderzijds ontbrak ook in die berekening de aanzienlijke verhoging van het chloridegehalte in de IJssel dat in die berekening constant gehouden werd op 73 mg/l. Samen met inspeleeffecten is hiermee tenminste een deel van de verschillen met de metingen bij Andijk te verklaren.

In de huidige berekening zou horizontale menging en transport verbeterd moeten zijn voor zover het de invloed van de verticale modelschematisatie betreft (combinatie van z- en sigma-lagen en een hogere resolutie). Een ander aspect zou variatie in tijd en ruimte van de windaandrijving kunnen zijn, maar die is niet veranderd. Alles overziend, is de bescheiden invloed van de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand op het chloridegehalte bij Andijk (FL38) in de referentiesituatie een opvallend resultaat, dat toch grotendeels verklaarbaar is.

3.3 Transportpatronen chloride

De transportpatronen van het zout in de referentiesituatie zijn beoordeeld door enkele velden van het berekende oppervlakte chloridegehalte te vergelijken met die uit de eerdere studie voor 2018 [2], zie Figuur 3-4. De vergelijking is gemaakt op twee tijdstippen, waar 5 weken tussen liggen. In de figuren van de eerdere studie zijn ook de resultaten van de mobile zoutmetingen uit die periode geplot. De eerdere berekening bevat geschematiseerde zoutlasten bij alle spuisluisen en scheepvaartsluizen van Den Oever en Kornwerderzand als voornaamste zoutbronnen (initiële chlorideconcentratie 82,26 mg/l). Ondanks de overschatting van de zoutlek lijken de transportpatronen van de eerdere modelberekening over het algemeen goed overeen te komen met de (mobile) metingen [2]. In de berekening voor de referentiesituatie is uitgegaan van een nieuwe (lagere) zoutlast bij alleen de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand en een achtergrondswaarde voor chloride van 110 mg/l. Ondanks de grote verschillen in randvoorwaarden en de daaruit volgende concentratieverschillen (en de verschillen in legenda) zijn de transportpatronen die zich vanaf Kornwerderzand langs de Friese kust naar het zuiden ontwikkelen in de berekening voor de



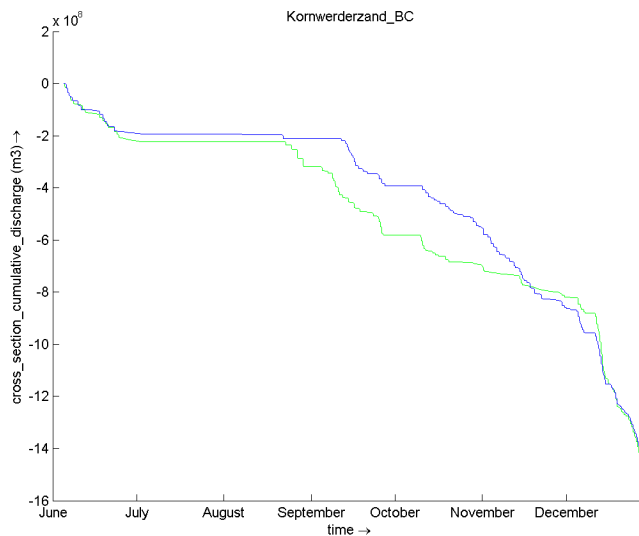


Figuur 3-4 Oppervlakte zoutgehalte (mg/l) op 18 augustus en 22 september 2018 uit de berekening voor de referentiesituatie (links) en uit de eerdere modelberekening (rechts), resp. Figuur G.5 en G.10 uit [2].

referentiesituatie zeer goed te herkennen in de eerdere berekening, zowel wat betreft structuur als omvang van het beïnvloede gebied. Dit geeft vertrouwen in het resultaat.

3.4 Cumulatieve spuidebieten Den Oever en Kornwerderzand

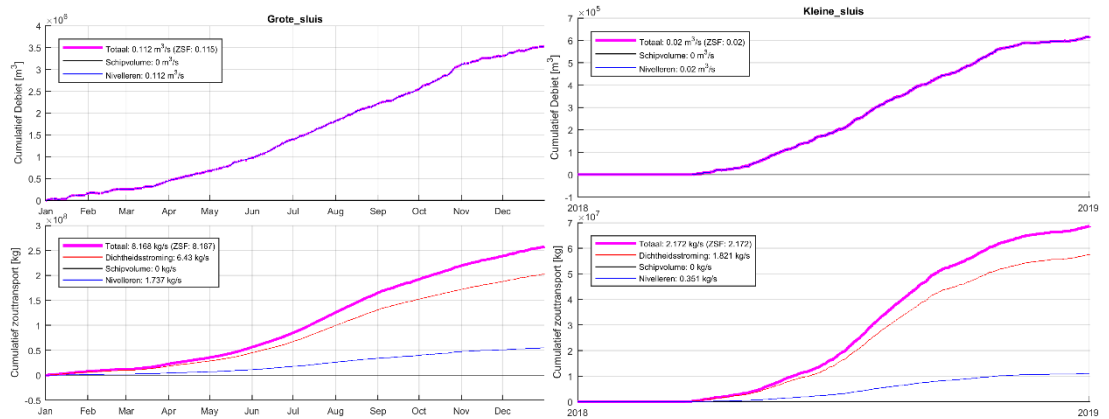
Uit de cumulatieve debieten van de cross secties bij de spuisluizen van Den Oever en Kornwerderzand, zie Figuur 3-5, valt af te leiden dat er van eind juni tot 2^{de} helft van augustus niet is gespuid. Daarna is tot half november meer gespuid via Den Oever, en van half november tot half december meer via Kornwerderzand. Gerekend vanaf begin juni tot einde december is er via beide spuicomplexen vrijwel evenveel water gespuid. De lange periode zonder spuien heeft invloed op het gedrag van chloride in de 'inspeelperiode' (naast de windcondities).



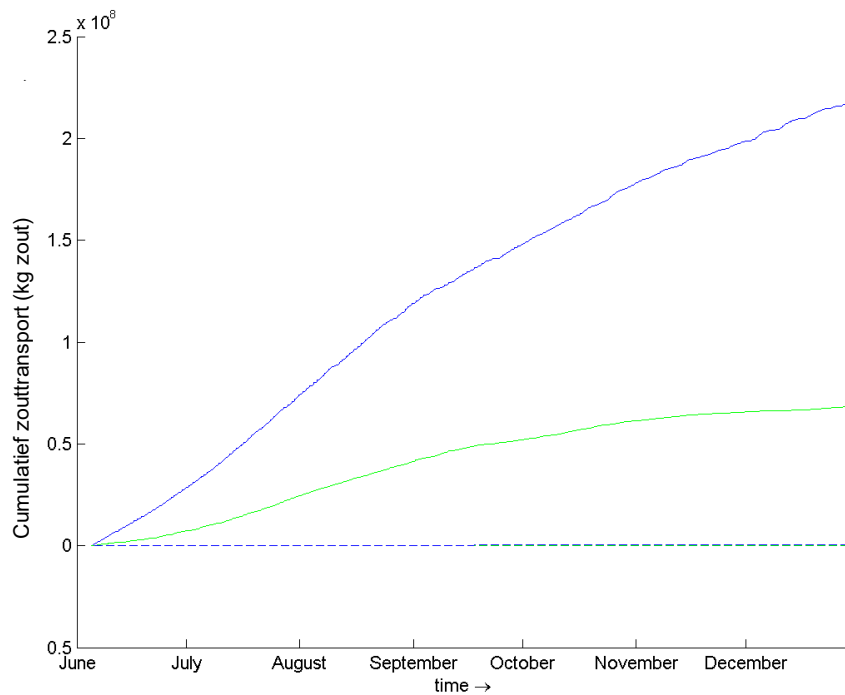
Figuur 3-5 Cumulatieve spuidebieten bij Den Oever (groen) en Kornwerderzand (blauw).

3.5 Zoutbalans ten opzichte van achtergrondswaarde

Bij wijze van controle is de cumulatieve zoutlast van de scheepvaartsluizen zoals dat is geschat met de Zeesluisformulering en is verwerkt in de randvoorwaarden, vergeleken met het cumulatieve zouttransport gerealiseerd in de crosssecties bij de schutsluizen (ligging zie Figuur A-1). Vervolgens is de zoutbalans van het model onderzocht door het cumulatieve zouttransport door de crosssecties bij de schutsluizen te vergelijken met de cumulatieve zoutafvoer door de spuisluizen van Den Oever en Kornwerderzand, alles ten opzichte van de achtergrondswaarde.



Figuur 3-6 Cumulatieve debiet (m³) boven, en zoutlast (kg zout) onder, van grote sluis Kornwerderzand (links) en de Kleine sluis (rechts) geschat met de Zeesluisformulering voor heel 2018. Totale zoutlast (roze lijn), zoutlast door dichtheidsstroming (rode lijn), zoutlast door nivelleren (blauwe lijn).

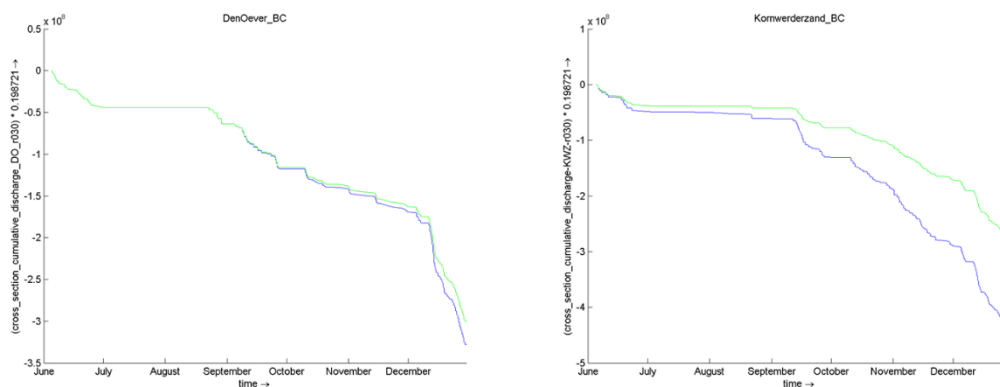


Figuur 3-7 Cumulatief zouttransport (kg zout) uit het model voor de grote sluis (blauw) en de kleine sluis (groen) en de vrijwel verwaarloosbare correctie voor de achtergrondswaarde (gebroken lijnen) voor de periode 5 juni – 30 december 2018.

Figuur 3-6 geeft voor beide scheepvaartsluizen van Kornwerderzand het cumulatieve debiet ten gevolge van de uitwisselingsstromingen door dichtheidsverschillen en het nivelleren en het resulterende cumulatieve zouttransport (de zoutlast) zoals geschat met de Zeeluisformulering en omgezet naar de randvoorwaarden van het model. Bij de grote sluis is de zoutlast $2,6 \cdot 10^8$ kg zout over heel 2018, waarvan ca. $2,0 \cdot 10^8$ kg over de simulatieperiode van juni – december. Bij de kleine sluis is de zoutlast veel kleiner, $0,7 \cdot 10^8$ kg zout over heel 2018, en $0,6 \cdot 10^8$ kg over juni – december. Het totaal over de simulatieperiode is ca. $2,6 \cdot 10^8$ kg zout.

De berekening geeft over de volledige periode van 5 juni – 30 december 2018 in de crosssectie van de grote sluis een cumulatief zouttransport van $\sim 2,178 \cdot 10^8$ kg zout het IJsselmeer in, zie Figuur 3-7. Hierop is een geringe correctie van toepassing van het cumulatieve debiet vermenigvuldigd met de achtergrondconcentratie van 0,198721 psu (110 mg/l) of $-5 \cdot 10^5$ kg zout om cumulatieve zouttransport ten opzichte van de achtergrondswaarde te verkrijgen. De crosssectie bij de kleine sluis geeft een cumulatief zouttransport van $\sim 0,685 \cdot 10^8$ kg het IJsselmeer in. De correctie is hier gelijk aan $-1 \cdot 10^5$ kg zout. Totaal komt er over de hele simulatieperiode bij de grote en de kleine scheepvaartsluis van Kornwerderzand $\sim 2,857 \cdot 10^8$ kg zout het IJsselmeer in boven de achtergrondswaarde. Dit is ongeveer 10% meer dan de ca. $2,6 \cdot 10^8$ kg zout geschat op basis van de Zeeluisformulering (correctie voor achtergrondswaarde verwaarloosbaar). Het verschil tussen beide wordt geweten aan het verschil tussen het zoutgehalte in het gemengd veronderstelde Binnenhaven 'bakje' in de toepassing van de Zeeluisformulering, met een gemiddeld zomer maximum van ongeveer 4 psu (zie Bijlage B), en het zoutgehalte in toplaag van de Binnenhaven in de 3D-berekening voor de referentiesituatie dat aanmerkelijk lager is (in de zomer tussen 0,5 - 1 psu in de havenmond). Hierdoor wordt er in het 3D model minder zout het model uit getransporteerd via het uitwisselingsdebiet dan met de Zeeluisformulering is geschat. Gezien alle verdere onzekerheden in de schatting (zie Bijlage B) is dit acceptabel.

Over de hele simulatieperiode komt er dus $\sim 2,857 \cdot 10^8$ kg zout het IJsselmeer in boven de achtergrondswaarde. Een deel van dit zout verlaat het modelgebied via de spuisluizen bij Kornwerderzand en Den Oever. De cumulatieve zoutafvoer bij Kornwerderzand en Den Oever zijn weergegeven met de blauwe lijnen in Figuur 3-8. Aan het eind van de berekening is de waarde $4,619 \cdot 10^8$ kg bij Kornwerderzand en $3,279 \cdot 10^8$ kg bij Den Oever. De bijdrage ten gevolge van het achtergrondzoutgehalte is verkregen door de cumulatieve debieten uit Figuur 3-5 te vermenigvuldigen met de achtergrondconcentratie. Aan het eind van de berekening zijn deze waarden $2,933 \cdot 10^8$ kg bij Kornwerderzand en $3,279 \cdot 10^8$ kg bij Den Oever. De zoutafvoer boven de achtergrondswaarde is relatief groot bij Kornwerderzand en vrij klein bij Den Oever, waar het ook maanden langer duurt voor er enig effect is te zien. Ten opzichte van de achtergrondswaarde wordt bij Kornwerderzand in de simulatieperiode $1,686 \cdot 10^8$ kg zout afgevoerd uit het IJsselmeer. Dit is 59% van de inkomende zoutmassa in bij scheepvaartsluizen van Kornwerderzand. Bij Den Oever wordt $0,276 \cdot 10^8$ kg zout afgevoerd boven de achtergrondswaarde. Dit is 10% van de inkomende zoutmassa in bij scheepvaartsluizen van Kornwerderzand. 31% van de gedurende de simulatieperiode binnengekomen zoutmassa boven de achtergrondswaarde (of $0,894 \cdot 10^8$ kg zout) is nog niet afgevoerd uit het model. Dit is equivalent met een gemiddelde verhoging in IJsselmeer van 0,018 psu of 9,8 mg/l chloride ten opzichte van de achtergrondswaarde van 110 mg/l op 30 december 2018. Aan het einde van de berekening is er dus nog geen evenwicht van zouttoevoer en zoutafvoer. De verwachting is dat dit getal nog daalt bij een langere simulatieperiode onder invloed van de hoge afvoeren in de winter.



Figuur 3-8 Cumulatief zouttransport (kg zout) bij Den Oever (links) en Kornwerderzand (rechts) in de referentiesituatie (blauw), vergeleken met het cumulatief zouttransport gebaseerd op de achtergrondswaarde van 0,198721 psu (110 mg/l chloride, groen).

3.6 Representativiteit van het model

3.6.1 Beoordeling voor referentiesituatie

In de voorgaande paragrafen is de plausibiliteit van de referentieberekening gecheckt, o.a. door vergelijking met een eerdere studie [2] en met metingen. Het verticale rooster van het model is verbeterd en voor de zoutlast van de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand is een betere schatting gemaakt met behulp van de Zeesluisformulering. De resultaten van de vergelijking geven vertrouwen in de weergave van de zoutlast bij Kornwerderzand, en in de windgedreven stroming en menging (transportpatronen) en afvoer van zout door de spuisluizen. Anderzijds is het model sterk geschematiseerd door toepassing van een achtergronds-chloridegehalte van 110 mg/l en het weglaten van de zoutlast bij de scheepvaartsluizen van Den Oever en de zoutlek bij alle spuisluizen.

Echter, naast de kwaliteit van de modelresultaten voor 2018 spelen nog (tenminste) twee aspecten ten aanzien van de representativiteit van het model voor de huidige studie naar de effecten van vaargeulverdiepingsscenario's op de zoutindringing in het IJsselmeer: de gekozen condities en de weergave van de zoutdynamica bij een sterke verdieping.

3.6.2 Representativiteit van de gebruikte condities

De representativiteit van de referentiesituatie is vooral afhankelijk van de optredende afvoeren, windcondities en zoutlasten. Qua afvoeren is een recent droog jaar genomen dat al eerder is gemodelleerd, met bijbehorende windcondities. Voor de zoutbelasting is er echter voor gekozen om de extreme zoutlast die in 2018 bij de spuisluizen optrad niet mee te nemen in de beschouwing. Qua zoutlast wordt een meer normale situatie weergegeven voor de zoutlast van de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand. Deze worden representatief geacht voor het huidige gebruik, er van uitgaande dat de scheepvaartintensiteit en sluisoperatie niet zijn veranderd. De windcondities bepalen de menging en het transport van zout op de kortere termijn. Over een lange periode genomen zullen afwisselende windcondities voor een zekere mate van middeling kunnen zorgen. 2018 bevat niet alleen (sterke) verzilting van uit Kornwerderzand, maar ook een periode met hoge afvoeren bij Kornwerderzand en Den Oever in december, relevant voor de afvoer van het extra zout. NB. het verzoeten van het IJsselmeer na sterke zoutindringing (mogelijk sterker voor de scenario's) vergt een langere simulatie dan nu is voorzien.

3.6.3 Representativiteit zoutdynamica bij verdieping

In het aangepaste model is het horizontale rooster verfijnd om de geometrie van de verdiepte vaargeul in de andere scenario's goed weer te geven. De kwaliteit van de modellering van de transportprocessen bij verdieping met stroming over steile taluds is niet geverifieerd. Daarvoor zal extra aandacht nodig zijn bij de uitvoering van de scenarioberekeningen.

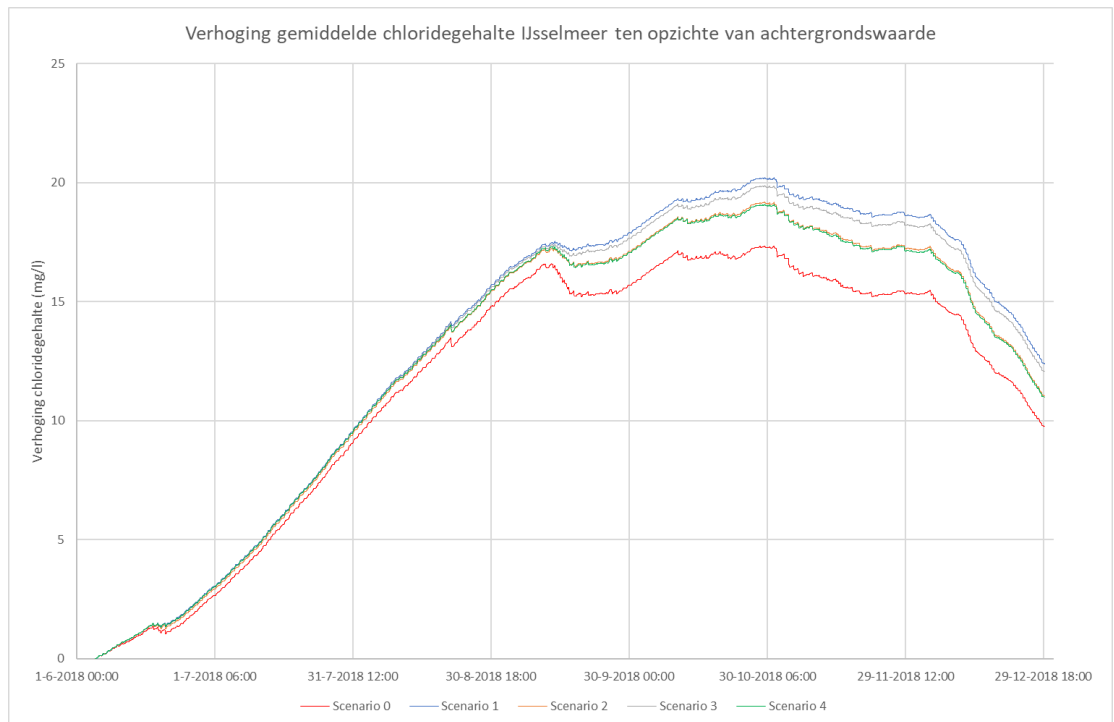
De conclusie is dat het verbeterde model met de gemodelleerde condities representatief is voor de studie naar de effecten van vaargeulverdieping op de zoutindringing, maar dat bij de uitvoering van de studie gelet moet worden op de mogelijke invloed van andere afvoercondities op de resultaten (bijvoorbeeld mitigerende maatregelen volgens huidig waterbeheer), en op de kwaliteit van de modelering bij sterke verdieping. Deze aspecten zullen worden meegenomen in de inschatting van het verhoogde risico op verzilting.

4 Resultaten Scenario's 1 tot en met 4

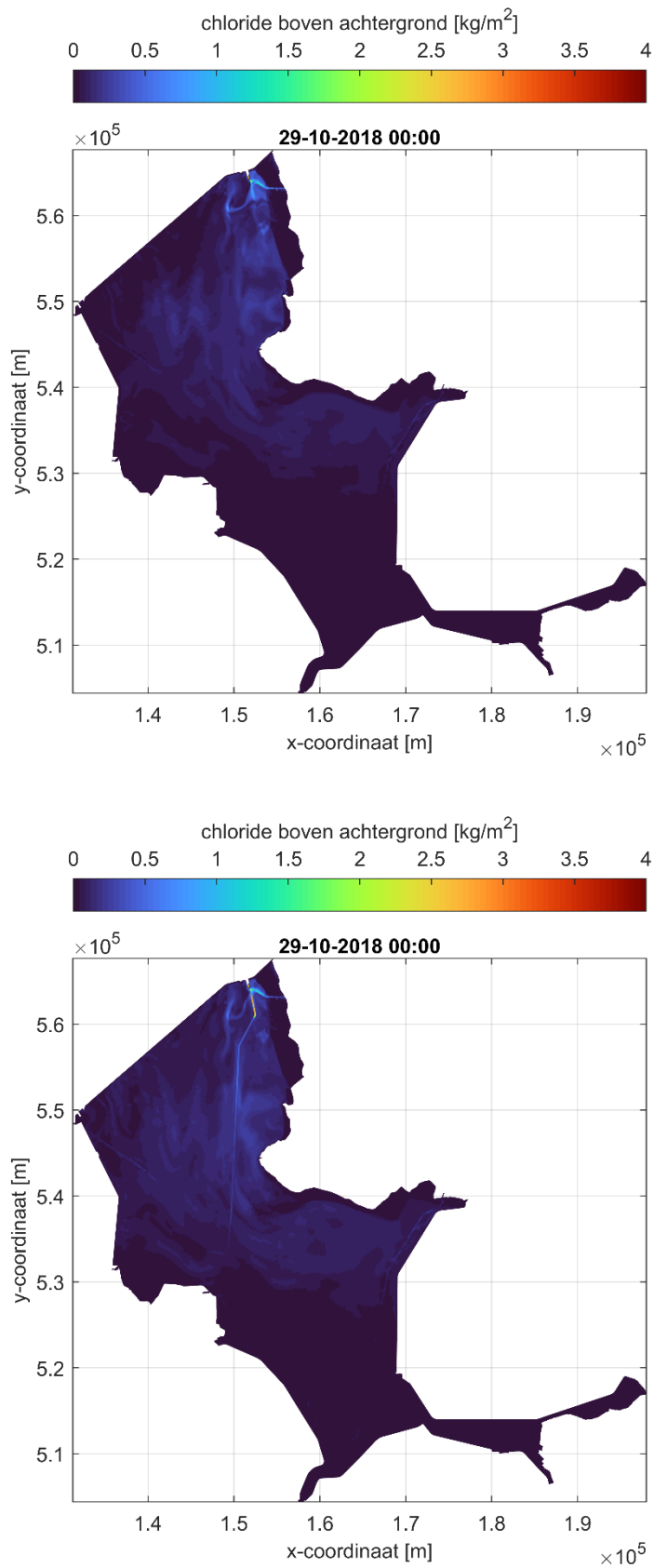
In dit hoofdstuk presenteren we de resultaten van de Scenario's 1 tot en met 4. Eerst wordt gekeken naar de gevolgen voor het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer. Daarna wordt de invloed op het verloop in de tijd bekeken voor een aantal belangrijke stations, waaronder de beide inlaten van PWN bij Andijk. Vervolgens komt het zouttransport door de al dan niet verdiepte vaargeul aan bod, en de rol van de randvoorwaarden (zoutlast, zoutafvoer en wind) daarbij.

4.1 Verhoging gemiddelde chloridegehalte IJsselmeer ten opzichte van achtergrondswaarde

Een globale beeld van het effect van de vaargeulverdiepingsscenario's wordt verkregen door het verloop van de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer ten opzichte van de achtergrondswaarde te beschouwen, zie Figuur 4-1. Deze verhoging is afgeleid uit de chloridebalans van alle grote termen: het cumulatieve zouttransport bij de grote en de kleine sluis van Kornwerderzand (brontermen) en bij de spuisluisen van Kornwerderzand en Den Oever (puttermen), allen gecorrigeerd voor het cumulatieve debiet vermenigvuldigd met het achtergrondzoutgehalte. De invloed van de overige bron- en puttermen is nihil (achtergrondzoutgehalte) of verwaarloosbaar (kleine onttrekkingen met gering verhoogd zoutgehalte). De aldus gevonden zoutmassa is met het momentane volume van het IJsselmeer, beschikbaar als tijdreeks uit de modelberekeningen, omgezet naar de verhoging van de gemiddelde chlorideconcentratie in het IJsselmeer, weergegeven in Figuur 4-1.



Figuur 4-1 Verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer ten opzichte van de achtergrondswaarde voor Scenario 0 (referentie), Scenario 1 (-10 m NAP), Scenario 2 (-6,7 m NAP), Scenario 3 (-10 m NAP met 3 drempels), Scenario 4 (-10 m NAP over eerste 4,5 km).



Figuur 4-2 Ruimtelijke verdeling van de chloridemassa boven de achtergrondswaarde (kg chloride/m²) voor de referentiesituatie (boven) en Scenario 1 (onder) op 29 oktober 2018.

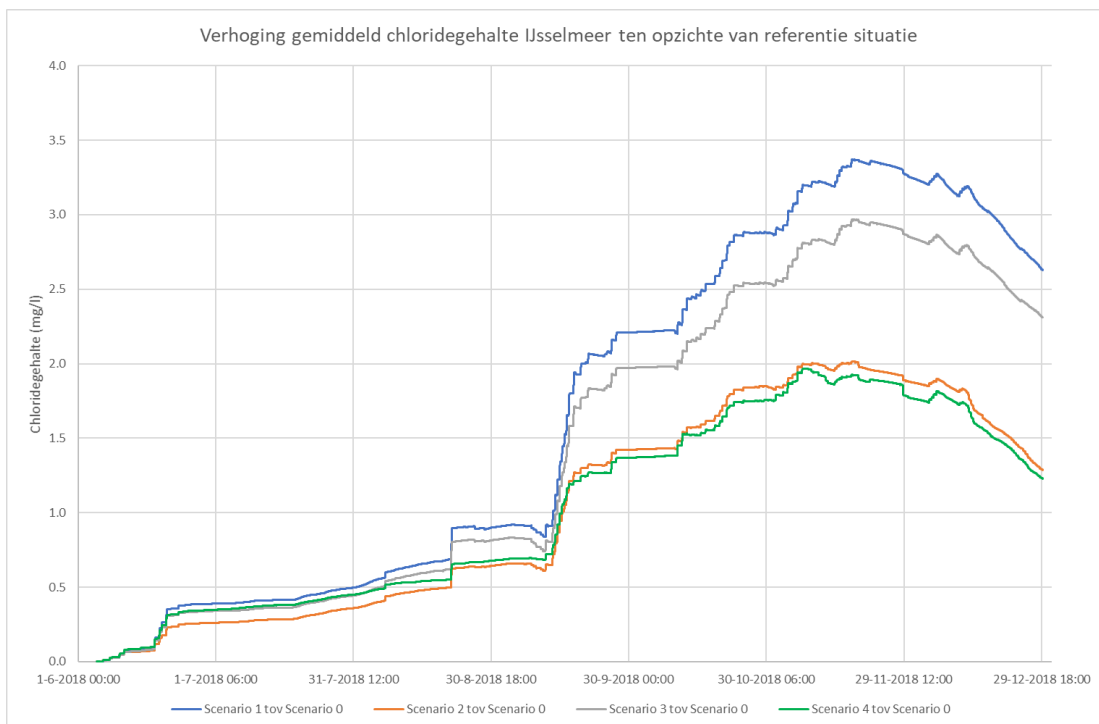
Figuur 4-1 laat het verloop zien van de referentiesituatie (of Scenario 0) en de vier verdiepingsscenario's. De onderste curve (rode lijn) is van de referentiesituatie. Van het begin van de berekening op 5 juni tot ca. 13 september zijn de onderlinge verschillen van Scenario 1 t/m 4 gering, en neemt het verschil met de referentiesituatie alleen tijdens spuismomenten een klein beetje toe, behalve in begin juni als de zoutgehaltes bij de spuisluizen in alle scenario's nog nauwelijks zijn verhoogd (inspeleeffect). In juli en augustus is de zoutlast van de scheepvaartsluizen het grootst, terwijl er van juli tot begin september er maar weinig wordt gespuid bij Kornwerderzand. Hierdoor stijgt de verhoging van het chloridegehalte in deze periode sterk voor alle scenario's. Bij Den Oever wordt in die periode meer gespuid, zie Figuur 3-5, maar zijn de zoutgehaltes nog nauwelijks verhoogd. Daarna ontwikkelt Scenario 1 (-10 m NAP; blauwe lijn) de meest extreme curve met een maximum van 20,2 mg/l eind oktober, op korte afstand gevolgd door Scenario 3 met een iets lager maximum van 19,9 mg/l (grijze lijn) onder invloed van de 3 drempels in de tot -10 m NAP verdiepte vaargeul. De maximum verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van Scenario 2 en Scenario 4 is praktisch gelijk met 19,2 en 19,1 mg/l. In deze periode van 13 september tot eind oktober neemt de zoutlast geleidelijk af en de zoutafvoer bij de spuien toe, tot de maximum verhoging van het gemiddelde chloridegehalte over het IJsselmeer is bereikt. Vanaf begin november daalt de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het meer onder invloed van een verder dalende zoutlast en toenemende spuidebieten, eerst geleidelijk en daarna sneller in december.

Figuur 4-2 geeft voor de referentiesituatie en Scenario 1 de ruimtelijke verdeling van de over de diepte geïntegreerde chloridemassa boven de achtergrondswaarde (kg chloride/m²) op het moment van de maximale verhoging van het gemiddelde chloridegehalte boven de achtergrondswaarde. In de verdiepte vaargeul van Scenario 1 is duidelijk meer chloride aanwezig en in een groot gebied verderaf van Kornwerderzand is de chloridemassa licht verhoogd.

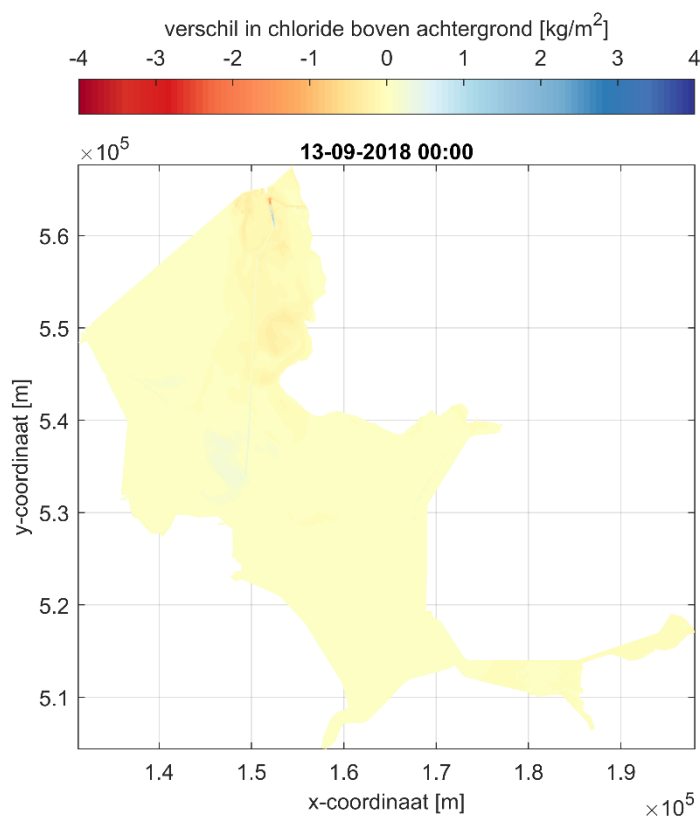
4.2 Verhoging gemiddelde chloridegehalte IJsselmeer ten opzichte van de referentiesituatie

De verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer ten opzichte van de achtergrondswaarde voor de Scenario's 1 t/m 4 uit Figuur 4-1 kunnen ook weergegeven worden ten opzichte van de referentiesituatie. Deze verschillen zijn weergegeven in Figuur 4-3. Duidelijk zichtbaar is nu de sterke toename vanaf 13 september die optreedt als bij Kornwerderzand weer fors gespuid wordt. Zolang er niet of weinig gespuid wordt bij Kornwerderzand, tot 13 september, verschillen de scenario's weinig van de referentiesituatie: het binnenkomende zout blijft in alle gevallen vrijwel volledig in het model. Wanneer er fors gespuid wordt dan neemt in de referentiesituatie de zoutmassa sterker af dan in de scenario's, waarin de verdiepte vaargeulen het zout effectief verder het IJsselmeer in voeren ondanks het spuien. Met andere woorden: door de verdieping van de vaargeul worden de spuingangen in deze fase iets minder effectief. Voor Scenario 1 word het maximum verschil van 3,4 mg/l in november pas bereikt. Voor Scenario 3 is dit 3 mg/l en voor Scenario 2 en 4 is het 2 mg/l. Deze maxima vallen een tot enkele weken later dan de maxima in Figuur 4-1. Pas na half november zien we de verschillen weer afnemen. Dan nemen de zoutgehaltes in de buurt van de spuisluizen ook in de scenario's weer toe.

Figuur 4-4 illustreert de ruimtelijke verdeling van het verschil in chloridemassa boven achtergrondswaarde tussen Scenario 1 en de referentiesituatie op 13 september 2018. Het verschil in de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte lijkt dan nog klein (< 1 mg/l), maar er zijn duidelijke verschillen zichtbaar tussen de zone met verlaagde chloridemassa van Kornwerderzand tot en met de Friese kust (exclusief vaargeul) en een verhoogde chloridemassa in de verdiepte vaargeul en een zone bij het zuidelijke uiteinde.



Figuur 4-3 Verschil in verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer ten opzichte van de referentiesituatie voor Scenario 1 (-10 m NAP), Scenario 2 (-6,7 m NAP), Scenario 3 (-10 m NAP met 3 drempels) en Scenario 4 (-10 m NAP over eerste 4,5 km).



Figuur 4-4 Verschil in chloridemassa boven achtergrondswaarde (kg chloride/m^2), tussen Scenario 1 en de referentiesituatie ('blauw' betekend hoger in Scenario 1 in vergelijking met de referentiesituatie).

Tabel 4-1 geeft een overzicht van het effect van de scenario's op de berekende verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer afgeleid uit de zoutbalans ten opzichte van de achtergrondswaarde. Kolom 2 geeft de maximum verhoging van het chloridegehalte ten opzichte van de referentiesituatie, d.w.z. de maximum waarden uit Figuur 4-3. In kolom 3 wordt de maximale waarde gegeven van de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer ten opzichte van de achtergrondswaarde zoals getoond in Figuur 4-1. De 4^e kolom bevat de verschillen van de waarden uit kolom 3 ten opzichte van de referentiesituatie. Deze zijn iets lager dan de waarden uit kolom 2, maar tonen wel dezelfde verhoudingen. NB. De maxima uit kolom 3 treden rond 30 oktober op en de maxima uit kolom 2 vallen wat later. In kolom 5 is voor elk scenario het volume van de (schematische) ontgroning (volume van de vaargeulverdieping ten opzichte van de referentiesituatie, zie Tabel 2-2), vergeleken met Scenario 1.

Het blijkt dat Scenario 1 (verdieping tot -10 m NAP over een lengte van ruim 30 km) leidt tot de grootste verhoging van het chloridegehalte vergeleken met de referentiesituatie namelijk 3,4 en 2,9 mg/l, gevolgd door Scenario 3 met 3 en 2,5 mg/l onder invloed van de drie drempels. Scenario 2 (verdieping tot -6,7 m NAP) en Scenario 4 (verdieping tot -10 m NAP over 4,5 km) geven vrijwel identieke resultaten gemiddeld over het meer: 2 en 1,8 mg/l. Afgezet tegen het volume van de (schematische) ontgroning in kolom 5 levert Scenario 3 de beste verhouding van verzilting ten opzichte van ontgrondingsvolume op, kort gevolgd door Scenario 1. Scenario 2 en 4 leveren voor een klein ontgrondingsvolume relatief veel verhoging van het chloridegehalte op. Reden is vooral dat de natuurlijke barrière voor zouttransport ten zuiden van Kornwerderzand effectief doorbroken wordt door de vaargeulverdieping in deze scenario's. Merk op dat dat voor een deel nu al het geval met de eerste verdieping over 1,7 km in 2020.

Tabel 4-1 Overzicht van het effect van de scenario's op de berekende verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer ten opzichte van de achtergrondswaarde, vergeleken met verschillen in volumes van de vaargeulverdieping.

Scenario	Maximum verhoging t.o.v. referentiesituatie uit Figuur 4-3 (mg/l)	Maximale verhoging per scenario uit Figuur 4-1 (mg/l)	Maximale verhoging, verschil met referentiesituatie (mg/l)	Volume vaargeulverdieping tov referentiesituatie, vergeleken met Scenario 1
0	-	17,3	-	-
1	3,4	20,2	2,9	100%
2	2,0	19,2	1,8	24%
3	3,0	19,9	2,5	98%
4	2,0	19,1	1,8	17%

Als we kijken naar de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer ten opzichte van de referentiesituatie afgezet tegen het volume van de verdieping dan levert Scenario 3 het beste resultaat op van de bestudeerde Scenario's, zeker als wordt meegenomen dat twee van de drie drempels ook om andere redenen worden overwogen (vervulde grond, gaspijpleidingen). Aanbevolen wordt om van de derde drempel bij de Rug van Lacon na te gaan wat daarvan de effectiviteit is. NB. Deze getallen geven slechts een globale indruk, waarbij niet is gekeken naar welk gedeelte van de ontgroningen economisch interessant is.

Een ander alternatief dat mogelijk de moeite waard is, zou uit kunnen gaan van de reeds uitgevoerde verdieping van 1,7 km, aangevuld met de verdieping van de door Mineralis

aangevraagde concessie in het zuidelijke deel van de vaargeul naar Kornwerderzand, of een deel daarvan.

De gemiddelde verhoging over de simulatieperiode in de 4 scenario's is niet bepaald omdat dit getal sterk beïnvloed wordt door inspeleeffecten. In hoofdstuk 6 zal verder worden ingegaan op inspeleeffecten en de lange termijn respons.

Gezien de lange periode zonder spuien, voor Kornwerderzand praktisch van eind juni tot begin september, en de voorname rol daarvan in de berekeningsresultaten doet zich de vraag voor in welke mate deze resultaten beïnvloed zouden zijn als het huidige spuibeleid was toegepast, waarin meer water beschikbaar is om verzilting tegen te gaan. In hoofdstuk 5 wordt hier verder naar gekeken.

4.3 Tijdreeksen van verhoging van het chloridegehalte aan het oppervlak

Naast de respons van het IJsselmeer als geheel is het van belang om tijdreeksen van chloride te beschouwen om te zien wat de invloed is van de scenario's op de extremen (pieken) en op de ruimtelijke verdeling van de chlorideverhoging. Dit is gedaan aan de hand van de tijdreeksen van het verschil van het chloridegehalte van de 4 scenario's ten opzichte van de referentiesituatie voor geselecteerde stations van Kornwerderzand, langs de Friese kust naar Andijk en terug naar Den Oever: FL16 (Kornwerderzand), Makkum, Workum, Stavoren, Vrouwenzand, KU_0001, PWN-PSA (westelijk inname punt Andijk), PWN-WPJ (oostelijk inname punt Andijk), FL49, en FL17 (Den Oever), zie Figuur 4-5.

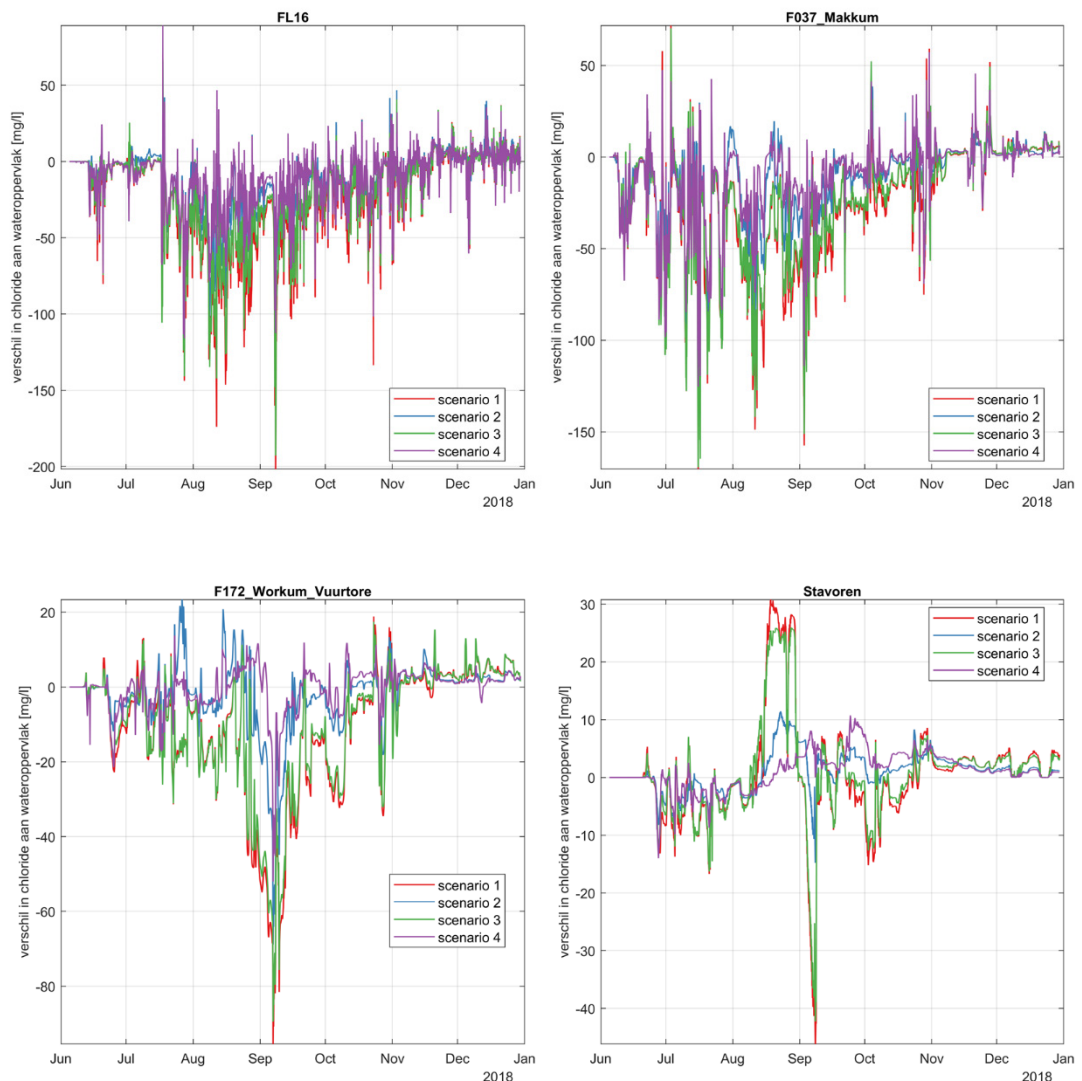
Uit deze tijdreeksen maken we het volgende op:

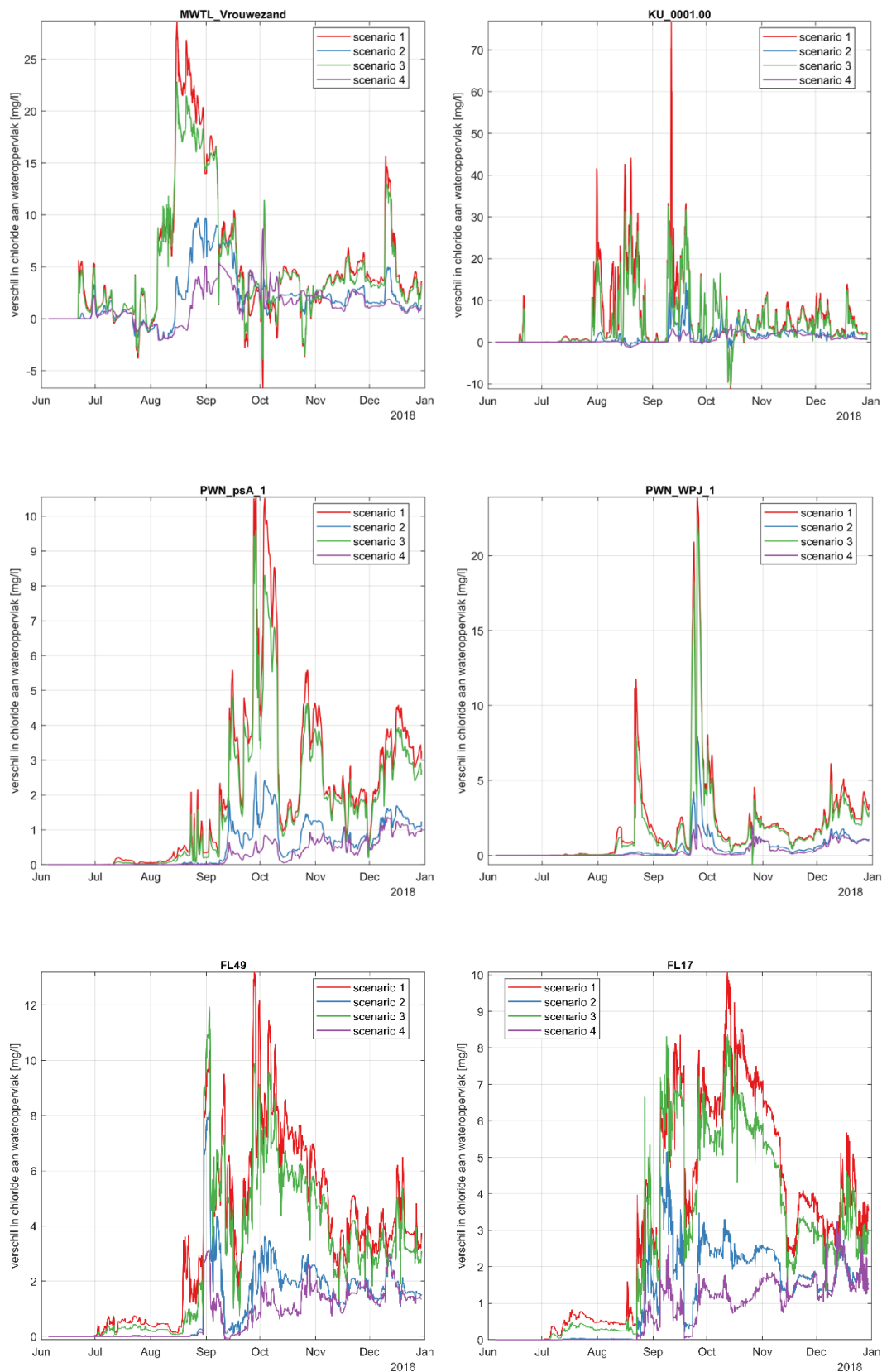
- Scenario 1 en 3 hebben een vergelijkbare impact op de verhoging van het chloridegehalte ten opzichte van de referentiesituatie in alle stations, waarbij die van Scenario 1 het grootst is. De impact van Scenario's 2 en 4 is aanmerkelijk lager, waarbij die van Scenario 4 het kleinst is.
- Bij Kornwerderzand en Makkum is er aanvankelijk een frequente verlaging van de chloridegehalten. Dit duurt tot circa half november, en daarna is een geringe verhoging zichtbaar. Dit is te beschouwen als een inspeleeffect van de scenario's (het systeem moet opladen en wordt uiteindelijk iets zouter). In werkelijkheid gebeurt iets dergelijks eerder in het jaar, als de zoutlast toeneemt na de winter.
- Bij Workum valt de grote negatieve piek van ca. -90 mg/l begin september op in Scenario's 1 en 3. In Stavoren is een vergelijkbare piek van ca. -45 mg/l voor de Scenario's 1 en 3, die echter wordt voorafgegaan door een verhoging tot 30 mg/l in de 2^e helft van augustus. In Vrouwenzand overheerst de verhoging van de 2^e helft van augustus tot begin september, met een maximum verhoging van ruim 25 mg/l in Scenario 1.
- In Workum, Stavoren, en Vrouwenzand is in alle scenario's een geringe verhoging van het chloridegehalte waar te nemen in november en december.
- In station KU_0001, aan het begin van de vaargeul naar Kornwerderzand, is vanaf eind juli sprake van pieksgewijze verhogingen van het chloridegehalte. Er worden meer en hogere pieken gesignaleerd dan bij Andijk. De maxima liggen bij ca. 40 mg/l (31 juli, 16 en 19 augustus) en 75 mg/l (11 september) in Scenario 1.
- Bij PWN inlaat PSA (west) zien we een oplopende trend ongeveer vanaf augustus voor Scenario's 1 en 3 en vanaf september voor Scenario's 2 en 4. De verhoging is uiteindelijk ca. 3 mg/l voor Scenario's 1 en 3 en 1 mg/l voor Scenario's 2 en 4 eind december. De pieken in Scenario 1 lopen op tot 10 mg/l op 28 september en 3 oktober. De pieken in Scenario 3 zijn iets lager en de verhoging bij Scenario's 2 en 4 blijft onder de 3 mg/l.
- Bij PWN inlaat WPJ (oost) zien we eveneens een oplopende trend vanaf begin augustus voor Scenario's 1 en 3 en vanaf half september voor Scenario's 2 en 4. De

verhoging is uiteindelijk ca. 3 mg/l voor (Scenario's 1 en 3 en 1 mg/l voor Scenario's 2 en 4 eind december. De pieken in Scenario 1 lopen op tot maximaal 24 mg/l op 25 september. De pieken van Scenario 3 zijn enigszins lager. Wel zijn deze pieken veel hoger dan bij inlaat PSA.

- De oplopende trend bij Andijk tot ca. 3 mg/l in Scenario's 1 en 3 en tot ca. 1 mg/l in Scenario's 2 en 4 eind december past bij de gemiddelde toename geschat uit de zoutbalans van 2,6 mg/l voor Scenario 1, 2,4 mg/l voor Scenario 3 en 1,2 mg/l voor Scenario 2 en 4, zie Figuur 4-3.
- Bij FL49 en FL16 (Den Oever) begint de verhoging van het chloridegehalte begin juli. Aanvankelijk is de verhoging nog gering, maar vanaf half augustus wordt hij sterker. De maxima in Scenario's 1 en 3 vinden eind september (FL49) en begin oktober (FL16) plaats. Alle scenario's laten een systematische verhoging tot eind december zien in deze stations.

Opvallend is het grote verschil in tijd en hoogte van de grootste pieken bij de relatief dicht bij elkaar gelegen stations KU_0001, PWN-WPJ en PWN-PSA (afstand WPJ-PSA ca. 2,3 km, KU_0001 op ruim 5 km). Uit inspectie van de animaties blijkt dat er een zone met verhoogd chloridegehalte is die op 11 september bij KU_0001 de piek van ca. 75 mg/l geeft, die na menging en vervolgens verplaatsing in zuidoostelijke richting zorgt voor pieken van 20 en 24 mg/l op 23 en 25 september bij PWN-WPJ en later na omkering van het transport in een





Figuur 4-5 Tijdreeksen van het verschil in oppervlakte chloridegehalte (mg/l) van de 4 scenario's ten opzichte van de referentiesituatie voor de stations FL16 (Kornwerderzand), Makkum, Workum, Stavoren, Vrouwenzand, KU_0001, PWN-PSA, PWN-WPJ, FL49, en FL17 (Den Oever).

relatief smalle zone langs de oever van Andijk nog aanleiding geeft tot piekjes van zo'n 10 mg/l bij PWN-PSA op 28 september en 3 oktober. Dit specifieke gedrag is erg afhankelijk van de optredende windcondities, de voornaamste aandrijving van het watertransport in dit gebied. Onder andere windcondities zou een ander resultaat voor dergelijke variaties zijn verkregen. Het voorkomen (frequentie en hoogte) van dergelijke pieken is dus moeilijk exact te duiden, maar afgaande op de pieken bij KU_0001 aan het begin van de vaargeul zijn piekwaarden van 40 – 75 mg/l hoger bij Andijk denkbaar.

4.4 Zouttransport in de (verdiepte) vaargeul

Om het zouttransport door de (verdiepte) vaargeul te begrijpen zijn animaties gemaakt van het chloridegehalte in een langsdorsnede van de vaargeul, van Kornwerderzand tot de aansluiting op de vaargeul UDO in het zuiden en verder doorgezet tot aan de oever bij Andijk (*sal_ls_02_r030*.mp4, enz*). Ook de longitudinale, dwars en verticale snelheidscomponenten zijn gegeven. Deze animaties blijken echter lastig te interpreteren omdat de verschillen over het beschikbare tijdsinterval van 24 uur vrij groot kunnen zijn.

Bij wijze van alternatief zijn daarom aanvullende plots gemaakt met continue tijdseries op basis van de monitoring stations in het model. De ontwikkeling van het zouttransport is te volgen op basis van het chloridegehalte aan de bodem in geselecteerde stations langs de vaargeul, vanaf de havenmond (KU_0033) tot zuidelijk van de Rug van Lacon (KU_0006). Daarnaast worden de aandrijvende termen getoond: de zoutlast van de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand (momentaan en lopend-gemiddelde over 25 uur), de cumulatieve zoutafvoer door de spuisluizen van Den Oever en Kornwerderzand, en windsnelheid en -richting, zie Bijlage C.

In deze plots valt het volgende op:

- De zoutlast is praktisch identiek voor alle Scenario's.
- Bijgevolg zijn ook de zoutgehalten aan de bodem in de havenmond vrijwel gelijk voor alle scenario's. Deze zoutgehalten in de havenmond variëren sterk over een dag, afhankelijk van de inzet van de scheepvaartsluizen (gekoppeld aan het getij). De maximale waarde bedraagt ca. 8000 mg/l en komt voor in juli en augustus.
- De maximale zoutlast treedt eind juli op, en is gemiddeld ongeveer 15 kg chloride/s. De piekwaarde van het 25-uurs gemiddelde is ca. 19 kg chloride/s op 26 juli.
- Tijdelijk kan een lagere zoutlast (dip) voorkomen, wat doorwerkt in de chloridegehalten van de vaargeul. Dit valt soms samen met harde wind (bijv. op 9 en 27 augustus, 21 september, 23 oktober, 9 en 15 december), die daarnaast ook zorgt voor extra menging en transport in het IJsselmeer.
- Er is geen duidelijke respons van zoutgehalten in de vaargeul op het optreden van spuien bij Kornwerderzand of Den Oever zichtbaar.

In de scenario's loopt een dichtheidsstroming vanaf de Binnenhaven naar de rand van de verdiepte vaargeul en vervolgens over een steil talud van 1:4 naar beneden. Hierbij treedt een vrij grote mate van menging op, wat is te zien aan de verhouding van het (dag-) gemiddelde zoutgehalte aan de bodem bij de havenmond (station KU_0033) en het zoutgehalte aan de bodem in het eerste station in de geul, slechts 1 km verder (station KU_0032), zie Tabel C-1 in Bijlage C. Aan het begin van de berekening, rond 11 juni, zijn de resultaten vrij stabiel. Dan is in de beide scenario's met de diepe geul van -10 NAP de maximum concentratie aan de bodem bij KU_0032 met 1000 mg/l ongeveer een factor 3,5 lager (ca. 70% minder) dan bij de havenmond (gem ca. 3500 mg/l). In de referentieberekening is de afname veel geringer (ca. 30%). Het scenario met de geul van -6,7 m NAP ligt er tussen in (ca. 45% minder). Later komen hogere waarden voor, bijv. half juli maximaal 2100 mg/l aan de bodem in station KU_0032 in Scenario 4. Aan de bodem in de haveningang schatten we een gemiddelde waarde van ongeveer 4600 mg/l, wat een factor

van 2,2 oplevert (55% minder). In dezelfde tijd worden in Scenario 1 lagere waarden van ca. 1600 mg/l geregistreerd aan de bodem in station KU_0032 (factor 2,9 lager), wat duidelijk maakt dat er in de kortere verdiepte geul van Scenario 4 accumulatie van zout plaatsvindt.

In Bijlage D is de dichtheidsstroming over het steile instroomtalud in wat meer detail bekeken. Omdat deze taluds met 1:4 steiler zijn dan waarvoor de toegepaste software is bedoeld (helling maximaal ca. 1:10) is het nodig om de mogelijke gevolgen hiervan op de resultaten onzekerheid nader af te schatten. Een eerste mogelijkheid daarvoor zouden de beschikbare chloridemetingen bij de Binnenhaven en in de huidige verdiepte geul kunnen bieden, maar een verificatie op basis van mobiele zoutmetingen in de bestaande verdiepte geul van 1,7 km blijkt toch lastig. Eerstens verschilt het aanwezige talud met het model. Voor een deel is het steiler (ongeveer 1:2,5), maar onder- en bovenrand zijn meer afgerond. Verder zijn er op het moment van schrijven slechts een gering aantal zoutprofielmetingen beschikbaar [9] of metingen die sterker in de tijd variëren dan in bovenstaand voorbeeld [10]⁶. Kijkend naar de verschillen tussen de maximum gemeten chloridegehalten in de havenmond en de verdiepte geul, wordt zowel een geringere als een vergelijkbare afname waargenomen⁷. Vooralnog moeten we er rekening mee houden dat de menging in het model bij het instromen van zouttong in de verdiepte geul wat wordt overdreven. Dit zou leiden tot lagere chloridegehalten in de geul, waardoor een zouttong zich iets minder snel voortplant, en het zout makkelijker kan worden opgemengd door de stroming in de bovenlaag. De menging bij instroming van de zouttong in de verdiepte geul is een schakel in het zouttransport verder het IJsselmeer in, waardoor het mogelijk is dat de zoutindringing iets wordt onderschat. Vergelijkbare situaties komen voor bij de drempels en bij het einde van de verdiepte geul. Bij de zijtaluds van de verdiepte vaargeul speelt het veel minder omdat de stroming voornamelijk evenwijdig het talud verloopt. Merk op dat dichtheidsstroming niet het enige transport mechanisme is voor chloride door de verdiepte geul, maar dat windgedreven stroming ook een grote rol speelt.

Voor de korte termijn, bij de interpretatie van de resultaten, moeten we er dus rekening mee houden dat het model de verzilting iets gunstiger voorstelt dan het in werkelijkheid is. Voor de langere termijn is de menging die optreedt als de dichtheidsstroming over de rand de verdiepte vaargeul in- of uitloopt een aspect dat nadere verificatie behoeft.

4.5 Conclusies

De uitkomsten van de scenarioberekeningen vergeleken met de referentieberekening en gemiddeld over het IJsselmeer zijn gegeven in Tabel 4-1. Voor Scenario 1 is de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte vergeleken met de referentiesituatie het grootst, namelijk 3,4 mg/l. Dit wordt gevolgd door Scenario 3 met 3 mg/l. Scenario 2 en Scenario 4 zijn veel lager met 2 mg/l. Afgezet tegen het theoretische volume van de verdieping (ontgroning) is Scenario 3 het meest effectief in termen van verhoging van het gemiddeld chloridegehalte per volume ontgroning.

Voor individuele stations is het lastiger conclusies te trekken omdat verloop van de verhoging van het chloridegehalte ten opzichte van de referentiesituatie mede bepaald wordt door het aanwezige watertransport, dat erg door de windcondities wordt bepaald. Bij Andijk zijn twee

⁶ In augustus 2022 werden in de verdiepte geul van 1,7 km chloridegehalten gemeten van ruim 10000 mg/l. Dit is veel hoger dan bijvoorbeeld maximaal 2100 mg/l zoals gemodelleerd in Scenario 4 (verdiepte geul over 4,5 km). Diverse factoren kunnen aan dit verschil hebben bijgedragen: van hogere zoutgehalten in de uitwisselingsstroming bij de scheepvaartsluizen (o.a. afwijkend schutten, namelijk zoveel mogelijk met volle kolken), tot de genoemde geringere menging (numerieke code, maar huidige talud is ook anders) en meer accumulatie van zout in de relatief korte sectie van de verdiepte geul. Er is ook enkele graden temperatuurstratificatie waargenomen.

⁷ Gemeten maximum chloridegehalten nabij de bodem uit [9]: op 14 januari 2021: van 3586 in de havenmond naar gemiddeld 1880 mg/l in de verdiepte geul (ca. 50% minder), en in de periode 22-25 maart 2021 van maximaal 4000 mg/l in de havenmond (24° 21:50) naar 1250 mg/l (25° 0:18) (ca 70% minder).

inlaten van PWN op slechts enkele kilometers afstand, die al verschillende hoogtes en tijden van pieken laten zien: van 10 – 24 mg/l. Op ruim 5 km afstand, aan het begin van de vaargeul naar Kornwerderzand, in station KU_0001 is de piek met ca. 75 mg/l nog veel hoger. Onder andere windcondities zou een berekening bij PWN dus een ander resultaat voor dergelijke pieken kunnen opleveren. Afgaande op de pieken bij KU_0001 aan het begin van de vaargeul zijn piekwaarden tot 75 mg/l hoger bij Andijk niet uit te sluiten. Afgezien van de variabiliteit met pieken volgt de algehele verhoging van het chloridegehalte bij PWN het algemene beeld.

In deze conclusies is nog geen rekening gehouden met de invloed van inspeleffecten en lange termijn ontwikkelingen, of met een marge om een mogelijke te sterke menging bij de dichtheidsstroming over het steile talud van de verdiepte vaargeul te verdisconteren (zie hoofdstuk 6). De invloed van afvoercondities op de mate van verzilting in de scenario's wordt in hoofdstuk 5 nader bekeken.

5 Resultaten Scenario's met extra spuien

In dit hoofdstuk onderzoeken we het effect van extra spuien op de mate van verzilting in de scenario's. Dit gebeurt door toevoeging van extra spuien in de droge periode conform het huidige spuibeleid. Met de aangepaste randvoorwaarden bij de spuisluizen zijn de berekeningen voor Scenario 0 (de referentiesituatie) en Scenario 1 overgedaan.

5.1 Aanpassing randvoorwaarden spuisluizen

In het nieuwe spuibeleid voor het IJsselmeer dat is opgesteld na de droogte van 2018 is 40 m³/s beschikbaar in droge perioden, d.w.z. bij (dreigend) watertekort. Dit kan worden ingezet voor zoutbestrijding in de vorm van flinke spuien van ca. 15 Mm³ bij Den Oever en Kornwerderzand eenmaal per 8 dagen, waarmee het zout uit de ontgrondingskuilen bij de spuisluizen en de naaste omgeving kan worden afgevoerd. De tijdseries van de extra spuien zijn opgesteld en toegeleverd door Rijkswaterstaat. De spuien hebben een realistisch verloop in de tijd, afhankelijk van het getij. De debieten zijn afgeleid uit de afvoerformules en de opgetreden vervallen bij de spuisluizen en waar nodig iets geknepen om het gewenste spuivolume te benaderen.

- Bij Kornwerderzand zijn 9 spuien gedefinieerd, namelijk op 3, 11, 19 en 27 juli, op 4, 12 en 30 augustus, op 7 september en op 4 oktober.
- Bij Den Oever zijn 7 spuien gedefinieerd, namelijk op 3, 11, 19 en 27 juli, en 4 en 12 augustus en op 4 oktober.

De extra spuien zijn vervolgens toegevoegd aan de bestaande randvoorwaarden bij de spuisluizen. De waterbalans is niet gecorrigeerd voor deze extra spuien, zodat de gemiddelde waterstand ca. 0,2 m daalt (het meervolume neemt daardoor met ca. 5% af). De totale toename van de afvoer over de gehele berekeningsperiode bedraagt 8,5%, of 7,2% bij Den Oever (1,08 10⁸ m³ extra) en 9,8% bij Kornwerderzand (1,45 10⁸ m³ extra). De randvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen zijn niet gewijzigd, d.w.z. dat het effect van de extra daling van het meerpeil op de uitwisseling niet is verdisconteerd.

Met deze nieuwe afvoerreeksen bij Den Oever en Kornwerderzand zijn twee nieuwe berekeningen gedaan:

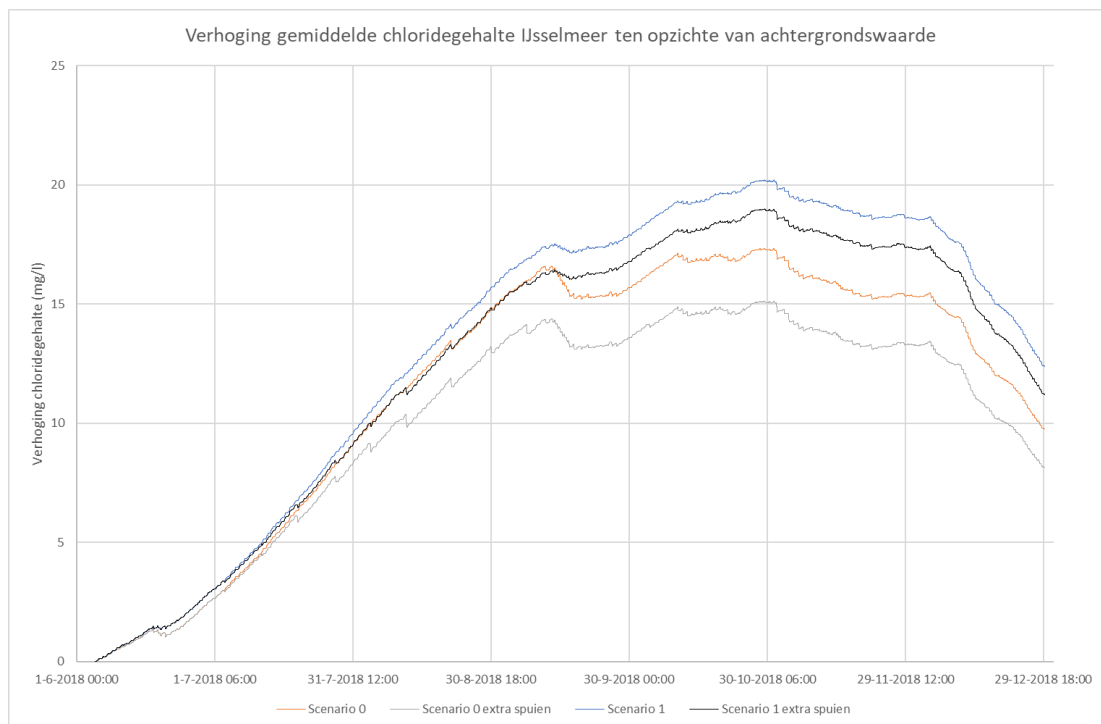
- Scenario 0a, Scenario 0 met extra spuien als nieuwe referentiesituatie.
- Scenario 1a, Scenario 1 met extra spuien.

Conform de opgelegde randvoorwaarden voor de zoutlast in deze scenario's voeren de extra spuien dus alleen zout af afkomstig van de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand, en geen zout van de scheepvaartsluis bij Den Oever of van de spuisluizen.

5.2 Verhoging gemiddelde chloridegehalte IJsselmeer ten opzichte van achtergrondswaarde

Op dezelfde wijze als in paragraaf 4.1 is de tijdreeks van de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer ten opzichte van de achtergrondswaarde bepaald voor Scenario 0a (referentie met extra spuien) en Scenario 1a (-10 m NAP, met extra spuien), zie Figuur 5-1. Het verloop van Scenario 0 (oorspronkelijke referentiesituatie) en Scenario 1 (-10 m NAP) zonder extra spuien uit Figuur 4-1 is toegevoegd ter vergelijking.

Figuur 5-1 laat zien dat de maximale verhoging voor Scenario 0a ongeveer 2 mg/l lager is dan de maximale verhoging in Scenario 0 (van 17,3 naar 15,1 mg/l) als gevolg van de extra



Figuur 5-1 Verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer ten opzichte van de achtergrondswaarde voor Scenario 0 (referentie), Scenario 1 (-10 m NAP), Scenario 0a (referentie met extra spuien), Scenario 1a (-10 m NAP, met extra spuien).

spuien (de spuigangen zijn zichtbaar als kleine snelle dalingen in de tijdreeksen). Voor Scenario 1 is de verlaging van de maximale verhoging kleiner, Scenario 1a is slechts 1,2 mg/l lager dan Scenario 1 (van 20,2 naar 19,0 mg/l). Bij de verdiepte vaargeul zijn de extra spuien dus wel effectief, maar minder dan in de referentiesituatie. Aan het eind van de berekening is het verschil tussen Scenario 1 en 1a ook 1,2 mg/l (12,4 minus 11,2 mg/l). Het blijkt dat dit verschil hoofdzakelijk is opgebouwd tijdens de 9 extra spuiperioden, zie Figuur 5-2.

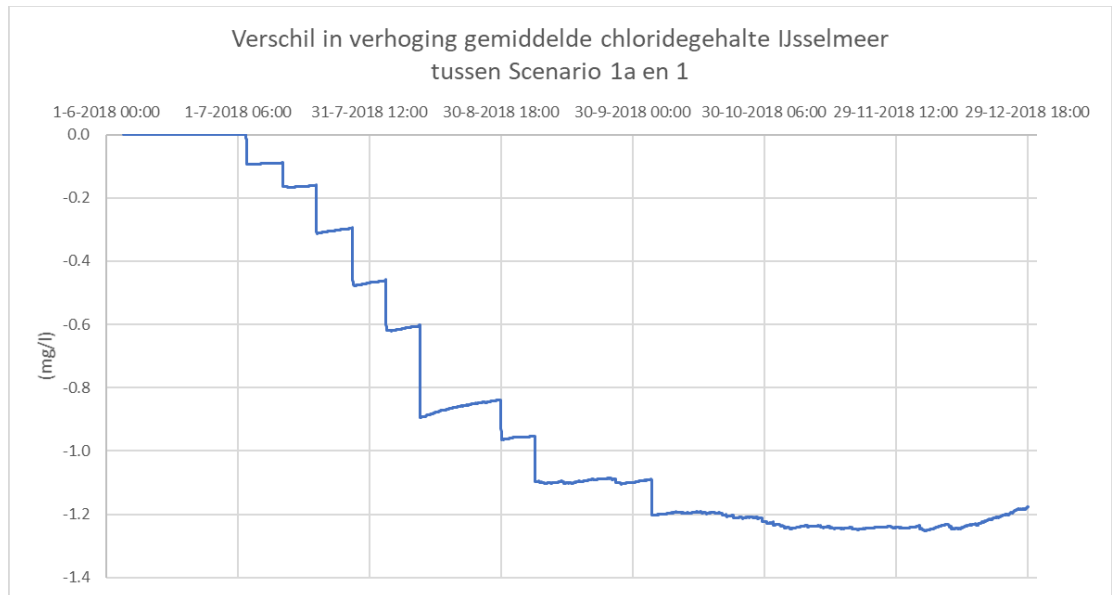
Figuur 5-1 laat tevens zien dat tot half september het Scenario 1a met extra spuien het verloop van de referentiesituatie zonder extra spuien (Scenario 0) volgt. Dat houdt in dat de extra spuien in deze periode het effect van de vaargeulverdieping (gemiddeld over het IJsselmeer) kunnen mitigeren, d.w.z. dat het meer niet sneller oplaadt. Daarna ontstaat eind oktober alsnog een verhoging van 1,7 mg/l ten opzichte van de referentiesituatie Scenario 0 (een maximum van 19,0 tegenover 17,3 mg/l).

Bij wijze van controle is gekeken welk deel van de verlaging van de zoutmassa in het IJsselmeer ten opzichte van de achtergrondswaarde het (directe) gevolg is van meer spuien en welk deel veroorzaakt wordt door een lagere zoutlast bij de scheepvaartsluizen. Dit leverde het volgende op:

- 30 oktober: 11% verlaging van de zoutmassa, waarvan 77% door een hogere zoutafvoer als gevolg van spuien en 23% ten gevolge van een lagere zoutlast bij de scheepvaartsluizen (alleen ten opzichte van achtergrondswaarde).
- 30 december: 14% verlaging van de zoutmassa, waarvan 60% door een hogere zoutafvoer als gevolg van spuien en 40% ten gevolge van een lagere zoutlast bij de scheepvaartsluizen (alleen ten opzichte van achtergrondswaarde).

Een dergelijke relatief grote bijdrage van de scheepvaartsluizen is niet zondermeer verwaarloosbaar. De oorzaak is niet bekend, maar wel dat deze zich geleidelijk ontwikkeld vanaf 4 juli (na aanvang extra spuigangen) op de momenten dat er geschut wordt. Mogelijk is er een relatie met de dalende waterstand en de wijze waarop de randvoorwaarden bij de

scheepvaartsluizen zijn opgelegd. NB. Eerder was een *toename* van de zoutlast onder invloed van het oplopend waterstandsverschil tussen Waddenzee en IJsselmeer al verwaarloosd. Door deze onzekerheden ten aanzien van de indirecte invloed van de extra afvoer op de zoutlast van de scheepvaartsluizen zal bij de conclusies over het effect van extra spuien enige voorzichtigheid betracht moeten worden.



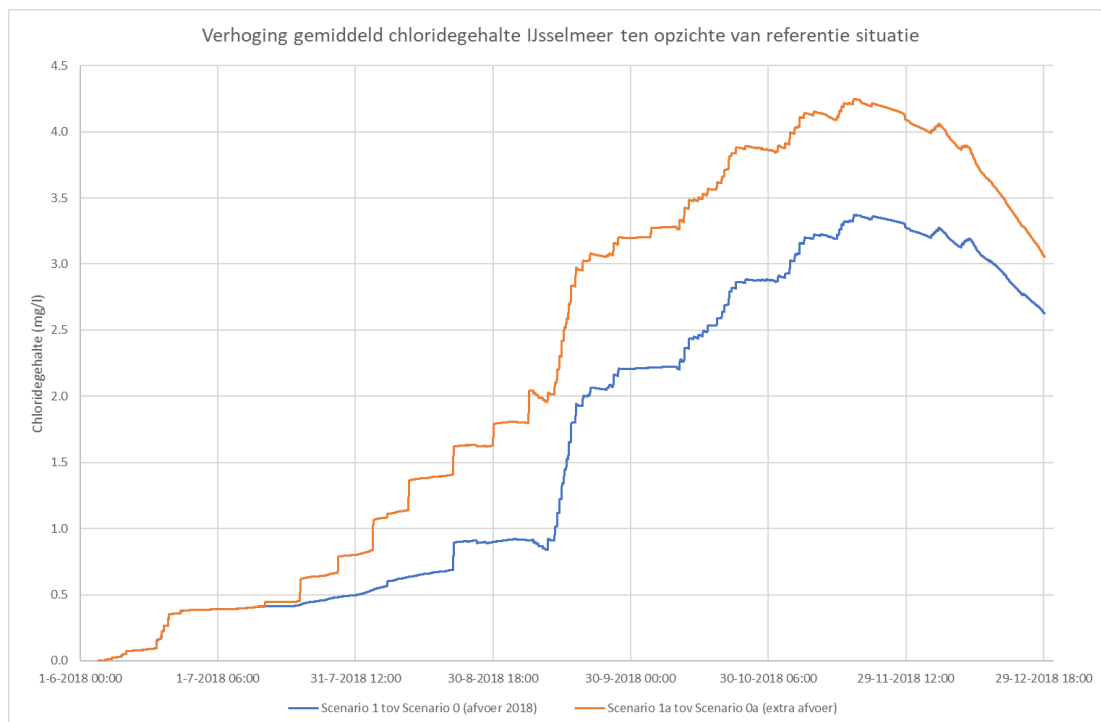
Figuur 5-2 Vershil in verhoging gemiddelde chloridegehalte IJsselmeer (mg/l) tussen Scenario 1a en 1.

5.3 Verhoging gemiddelde chloridegehalte IJsselmeer ten opzichte van referentiesituatie

Wanneer we de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer in Scenario 1a (-10 m NAP met extra spuien) bepalen ten opzichte van corresponderende referentiesituatie Scenario 0a (met extra spuien), dan volgt de oranje curve in Figuur 5-3. Ter vergelijking is de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van Scenario 1 (-10 m NAP) ten opzichte van referentiesituatie Scenario 0 zonder extra spuien uit Figuur 4-3 hieraan toegevoegd.

Ook hier blijkt dat extra spuien een groter verschil oplevert tussen de scenario's en hun respectieve referentiesituaties: maximaal 4,3 voor Scenario 1a en 3,4 mg/l voor Scenario 1 in de 2^e helft van november. Duidelijk zichtbaar is dat het verschil tussen beide curves vooral groeit in de periode van half juli tot begin september als gevolg van de extra spuien. In december tijdens hoge afvoeren neemt het verschil weer af.

Tabel 5-1 is een uitbreiding van Tabel 4-1 met de Scenario's 0a en 1a met extra spuien. Kolom 2 geeft de maximum verhoging van het chloridegehalte ten opzichte van de referentiesituatie, d.w.z. de maximum waarden uit Figuur 4-3 en Figuur 5-3. In kolom 3 wordt de maximale waarde gegeven van de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer ten opzichte van de achtergrondswaarde zoals getoond in Figuur 4-1 en Figuur 5-1. De 4^e kolom bevat de verschillen van de waarden uit kolom 3 ten opzichte van de respectieve referentiesituaties.



Figuur 5-3 Verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer in Scenario 1 (-10 m NAP) ten opzichte van referentiesituatie Scenario 0, en in Scenario 1a (-10 m NAP met extra spuien) ten opzichte van referentiesituatie Scenario 0a (met extra spuien).

Voor Scenario 1a, met extra spuien blijkt de verhoging met 4,3 mg/l (kolom 2) en 3,9 mg/l (kolom 4) groter uit te vallen dan voor Scenario 1 met respectievelijk 3,4 en 2,9 mg/l (0,9 en 1,0 mg/l lager). Maar uit kolom 3 blijkt dat dit vooral komt door de verlaging van het maximum chloridegehalte in Scenario 0a, het referentiescenario met extra spuien. Scenario 1a ligt qua maximum zoutgehalte ca. 1 mg/l onder Scenario 1 (kolom 3).

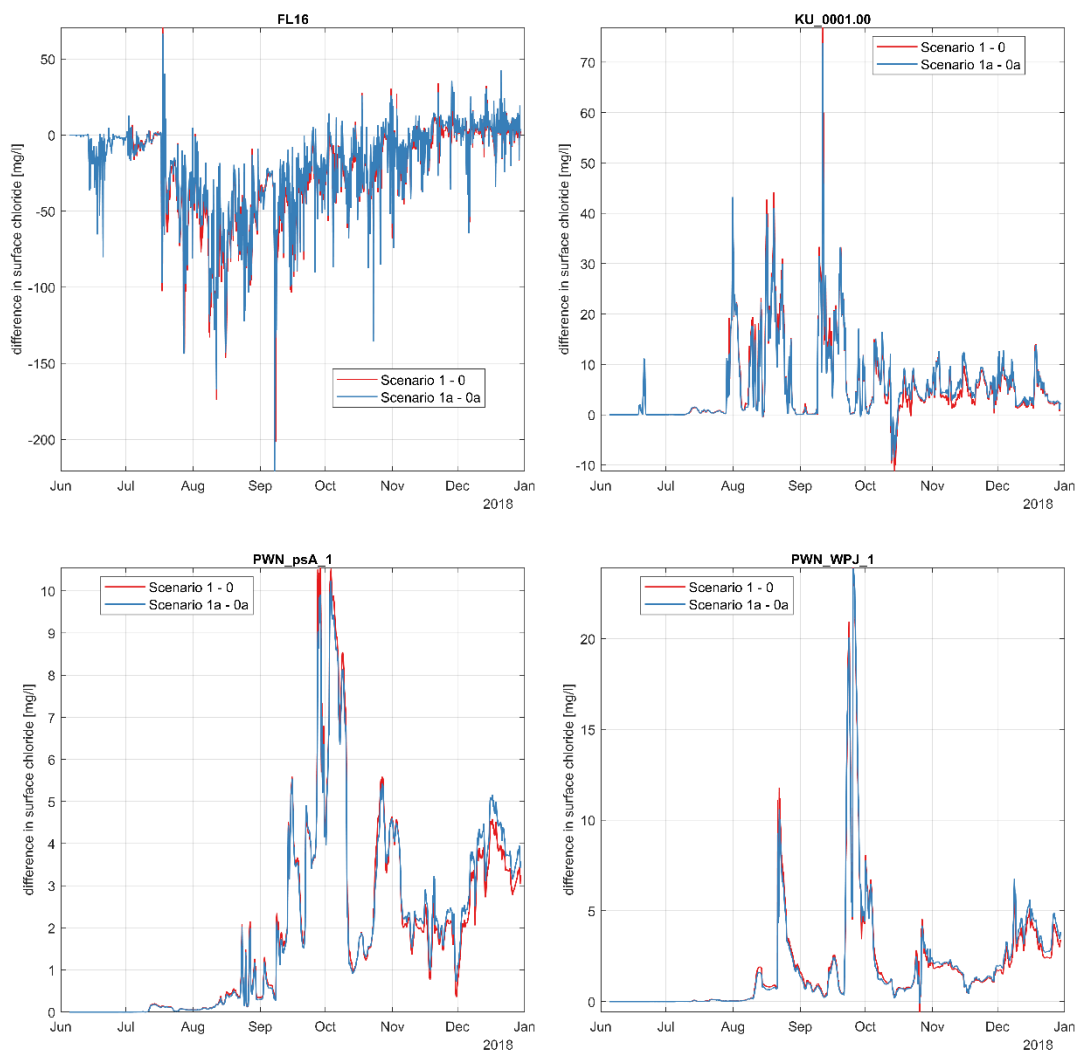
Tabel 5-1 Overzicht van het effect van de scenario's op de berekende verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer ten opzichte van de achtergrondswaarde, vergeleken met verschillen in volumes van de vaargeulverdieping. Scenario 1 t/m 4 ten opzichte van referentiesituatie Scenario 0, en Scenario 1a (met extra spuien) ten opzichte van referentiesituatie Scenario 0a (met extra spuien).

Scenario	Maximum verhoging tov referentiesituatie uit Figuur 4-3 en Figuur 5-3 (mg/l)	Maximale verhoging per scenario uit Figuur 4-1 en Figuur 5-1 (mg/l)	Maximale verhoging, verschil met referentiesituaties (mg/l)	Volume vaargeulverdieping tov referentiesituatie, vergeleken met Scenario 1
0	-	17,3	-	-
1	3,4	20,2	2,9	100%
2	2,0	19,2	1,8	24%
3	3,0	19,9	2,5	98%
4	2,0	19,1	1,8	17%
0a	-	15,1	-	-
1a	4,3	19,0	3,9	100%

5.4 Tijdreeksen van verhoging van het chloridegehalte aan het oppervlak

De invloed van extra spuien op het verloop van de verhoging van het (oppervlakte) chloridegehalte ten opzichte van de referentiesituatie wordt voor enkele stations getoond in Figuur 5-4. Het verschil in oppervlakte chloridegehalte van de Scenario 1a ten opzichte van de referentie Scenario 0a (blauwe lijn) is vergeleken met dat van Scenario 1 ten opzichte van de referentiesituatie Scenario 0 (rode lijn) voor de stations FL16 (Kornwerderzand), KU_0001, PWN-PSA, en PWN-WPJ.

De verschillen zijn algemeen klein. Men zou verwachten dat de blauwe lijn een fractie lagere chloridegehaltenes laat zien dan de rode lijn als gevolg van de extra spuien. Dit blijkt echter niet altijd het geval te zijn, zie november en december in de stations KU_0001, PWN_PSA en PWN-WPJ. Dit betreft de verschillen. De berekende chloridegehaltenes zijn van Scenario 1a doorgaans wel lager dan van Scenario 1 als gevolg van de extra afvoer, in overeenstemming met de gemiddelde trend in Figuur 5-1.



Figuur 5-4 Tijdreeksen van het verschil in oppervlakte chloridegehalte (mg/l) van de Scenario 1a ten opzichte van de referentie Scenario 0a (blauwe lijn) en voor Scenario 1 ten opzichte van de referentiesituatie Scenario 0 (rode lijn) voor de stations FL16 (Kornwerderzand), KU_0001, PWN-PSA, en PWN-WPJ.

5.5 Zouttransport in de (verdiepte) vaargeul

Net als in paragraaf 4.4 is het zouttransport in de (verdiepte) vaargeul voor de berekeningen van Scenario 0a en 1a het tijdsverloop van het chloridegehalte aan de bodem in geselecteerde stations langs de vaargeul vergeleken met de aandrijvende termen: de zoutlast van de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand (momentaan en lopend gemiddelde over 25 uur), de cumulatieve zoutafvoer door de spuisluisen van Den Oever en Kornwerderzand, en windsnelheid en -richting, zie Bijlage E.

De extra spuien van 3 juli – 7 september en op 4 oktober zijn goed herkenbaar in de figuren van de cumulatieve zoutafvoer van de spuisluisen bij Den Oever en Kornwerderzand (3^e venster). De verschillen in de tijdreeksen van het chloridegehalte aan de bodem vergeleken met Scenario 0 en 1 (Bijlage C) zijn echter vrij subtiel, dat wil zeggen dat de variabiliteit door variërende zoutlasten en windcondities overheersen. Het chloridegehalte aan de bodem in Scenario 0a is iets lager dan Scenario 0, vooral in de stations die verder van Kornwerderzand afliggen (let ook op de schaling van de y-as voor de stations KU_0028 – KU_0006). Voor het chloridegehalte aan de bodem in Scenario 1a is dit in mindere mate het geval.

5.6 Conclusies

Door de extra spuien geeft Scenario 1a ten opzichte van Scenario 0a een groter verschil in de maximum verhoging in vergelijking met Scenario 1 ten opzichte van Scenario 0. Dit betekent dat bij extra spuien de verzilting ten gevolge van een verdieping zoals in Scenario 1 naar verhouding groter is. Daarbij moet echter wel bedacht worden dat de maximum verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer altijd lager ligt bij extra spuien.

De extra spuien zoals gedefinieerd in deze simulatie zorgen er tevens voor dat de gevolgen voor de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer van Scenario 1 vergeleken met de referentiesituatie, tot half september volledig gemitigeerd kunnen worden. De getallen voor Scenario's 0a en 1a in Tabel 5-1 moeten met enige voorzichtigheid gebruikt worden vanwege onzekerheden in de effecten van het extra spuien op de randvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen.

Over het verloop van het chloridegehalte in individuele stations, bijvoorbeeld bij Andijk, moeten we constateren dat de pieken maar weinig lager zijn onder invloed van de extra spuien. De vaargeulverdieping zorgt dus voor een toename van de tijdelijke verhogingen van het chloridegehalte, die minder goed te mitigeren zijn met extra spuien dan de gemiddelde verhoging in het IJsselmeer.

Over de gehele simulatieperiode is 8,5% extra water afgevoerd in Scenario 1a ten opzichte van Scenario 1. Aan het einde van de berekening is er ca. 5% minder water in IJsselmeer. In de praktijk is dit extra water in droge perioden ook nodig voor de bestrijding van de zoutindringing via de spuisluisen en de scheepvaartsluis in Den Oever, die nu niet in het model zijn opgenomen.

6 Discussie

In dit hoofdstuk gaan we in op de implicaties van de gevolgde methodiek voor de uiteindelijke verhoging van het chloridegehalte in het IJsselmeer, de vertaling van deze verhoging in termen van een extra watervraag en wat de resultaten zeggen over het systeemgedrag. Bij dit laatste onderwerp wordt ingegaan op de door Rijkswaterstaat gestelde vragen (zie paragraaf 1.2).

6.1 Methodiek

Idealiter wordt de studie naar het risico van verzilting van het IJsselmeer door het verdiepen van de vaargeul naar Kornwerderzand uitgevoerd met een volledig gekalibreerd en gevalideerd 3D stromings- en transportmodel voor zout en temperatuur. Bij aanvang van de studie ontbrak hiervoor echter nog de juiste kennis en informatie. Het bestaande 3D D-Hydro model van het IJsselmeer is een eerste versie waarin gewerkt is met (soms forse) correcties op de waterbalans en schattingen van de zoutlasten van scheepvaartsluizen en de zoutlasten ten gevolge van lekkage bij spuisluizen. Gezien de zwaarte van het model is simulatieduur en rekentijd ook een factor om rekening mee te houden.

Omdat de effecten van verdieping van de vaargeul naar Kornwerderzand op de verzilting van het IJsselmeer vrijwel volledig veroorzaakt worden door de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand zijn de berekeningen vereenvoudigd door volledige te focussen op de zoutlast van deze scheepvaartsluizen. Dit is namelijk de belangrijkste bron voor zout in de verdiepte vaargeul naar Kornwerderzand omdat er geen directe verbindingseul is van de ontgrondingskuil bij de spuisluizen naar de verdiepte vaargeul. De zoutlast van spuisluizen bij Kornwerderzand en van de scheepvaartsluis en spuisluizen bij Den Oever zijn daarom weggelaten uit de berekening. Alle andere zoutbronnen zoals de IJssel en diverse gemalen kregen een constante achtergrondwaarde. Door deze vereenvoudiging is het effect van de verdieping geïsoleerd en zijn de resultaten beter te duiden.

Het rekenrooster van het bestaande model is aangepast om de verdiepte vaargeul met voldoende detail weer te kunnen geven. Het aantal rekenpunten nam hierdoor met ca. 15% toe. Het verticale rooster is door toepassing van een combinatie van vaste lagen en sigma-lagen met 30 lagen sterk verbeterd t.o.v. het oorspronkelijke model). Daarnaast is er voor de zoutlast van de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand een betere schatting gemaakt door toepassing van de Zeesluisformulering (zie paragraaf 2.2.5 en Bijlage B).

Omdat er geen kalibratie en validatie was voorzien in dit project is de geschiktheid van het 3D-model getoetst voor de referentieberekening door vergelijking met metingen en met een eerdere studie [2]. Daaruit bleek dat de zoutlast bij de scheepvaartsluizen realistisch is en dat de horizontale transportpatronen van het zout in overeenstemming zijn met deze eerdere studie. De invloed van de zoutlast van de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand op de chloridegehalten bij Andijk bleken in de referentieberekening echter tamelijk klein. Dat wijst erop dat de thans ontbrekende zoutlasten van de andere sluizen en de verhoogde zoutlast van de IJssel bij Andijk waarschijnlijk dominant zijn. Onduidelijk is of onvoldoende horizontale menging hierbij nog een rol speelde, een suggestie uit [2]. Dit is o.a. mede afhankelijk van windschematisering en zou later uitgezocht moeten worden (zie aanbevelingen).

Een ander aspect dat nadere aandacht behoeft is de mate van menging die optreedt als de dichtheidsstroming over de rand de verdiepte vaargeul inloopt, zie paragraaf 4.4. De stroming over dergelijke steile taluds valt strikt genomen buiten het toepassingsbereik van de software. Vanwege het belang van deze menging voor het verdere transport door de geul en voor de opmenging uit de geul, is nadere verificatie gewenst (zie paragraaf 7.3). Voor nu houden we

er rekening mee dat deze menging in het model enigszins wordt overdreven en dat daardoor de zoutindringing iets wordt onderschat, zie verder paragraaf 6.2.2.

Tenslotte wordt als gevolg van de starttijd en de relatief korte duur van de simulatie (7 maanden) de interpretatie van de resultaten bemoeilijkt door inspeleeffecten. Op basis van het volume van het meer en de gemiddelde afvoer wordt de gemiddelde verblijftijd van het water geschat op 4 maanden. Bij volledige menging zou 63% van het zout zijn afgevoerd in die tijd. De inspeelperiode van een simulatie is gewoonlijk een veelvoud van deze termijn, bijvoorbeeld 1 jaar. Starten in de winter op een moment dat de effecten van de vaargeulverdieping relatief klein zijn, kan een acceptabel compromis zijn met een verkorte inspeelperiode. De invloed van de inspeleeffecten op de resultaten zou nader uitgezocht moeten worden, zie de aanbeveling in paragraaf 7.3. Voor nu is getracht bij de interpretatie rekening te houden met de invloed van inspeleeffecten en de effecten op langere termijn op basis van de eigenschappen van het eerder toegepaste box-model [1], zie paragraaf 6.2.1.

Voor een deel zijn de onzekerheden omzeild door toepassing van een relatieve aanpak: er wordt gekeken naar verschillen tussen Scenario's en een referentieberekening, in plaats van naar absolute resultaten. Kleine afwijking in de randvoorwaarden worden daardoor minder belangrijk, zolang de belangrijkste processen maar zijn weergegeven. De uitkomsten op globaal niveau (gemiddeld over het meer) zijn redelijk betrouwbaar. Bij de interpretatie van uitkomsten in individuele stations moet met een wat grotere betrouwbaarheidsmarge rekening worden gehouden. De uitkomsten in individuele stations zijn bovendien veel sterker afhankelijk van de optredende windcondities. Om de nauwkeurigheid van de berekeningen preciezer te duiden, zouden aanvullende berekeningen nodig zijn, zie paragraaf 7.3.

6.2 Implicatie voor de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte

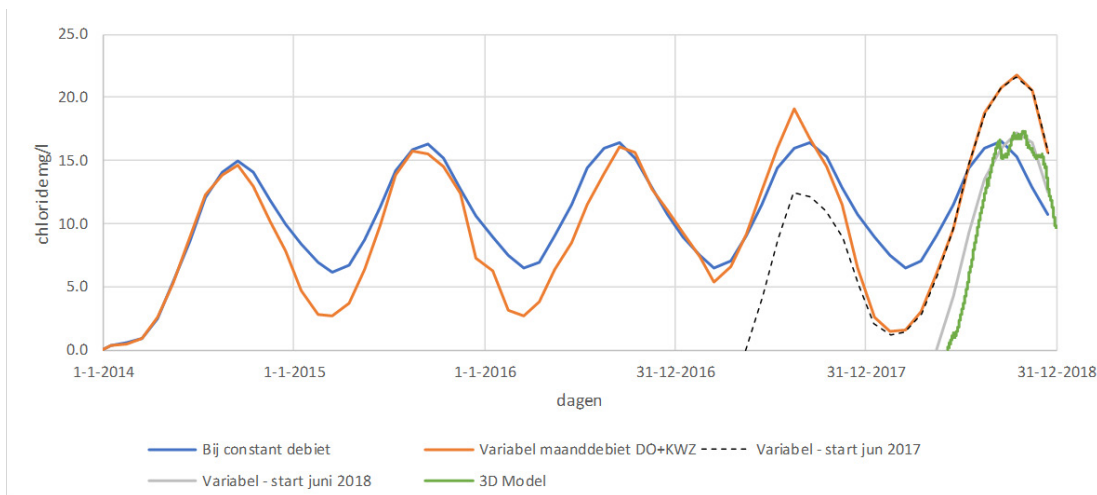
Bij de bespreking van de scenarioberekeningen zijn enkele beperkingen gesignaleerd, waarvan de mogelijke gevolgen hieronder verder worden besproken: de beperkte lengte van de berekening met oog op inspeleeffecten en lange termijn systeemrespons en de mogelijk te grote menging in het model bij de instroming van zoutwater in de verdiepte vaargeul.

6.2.1 Inspeleeffecten en lange termijn respons

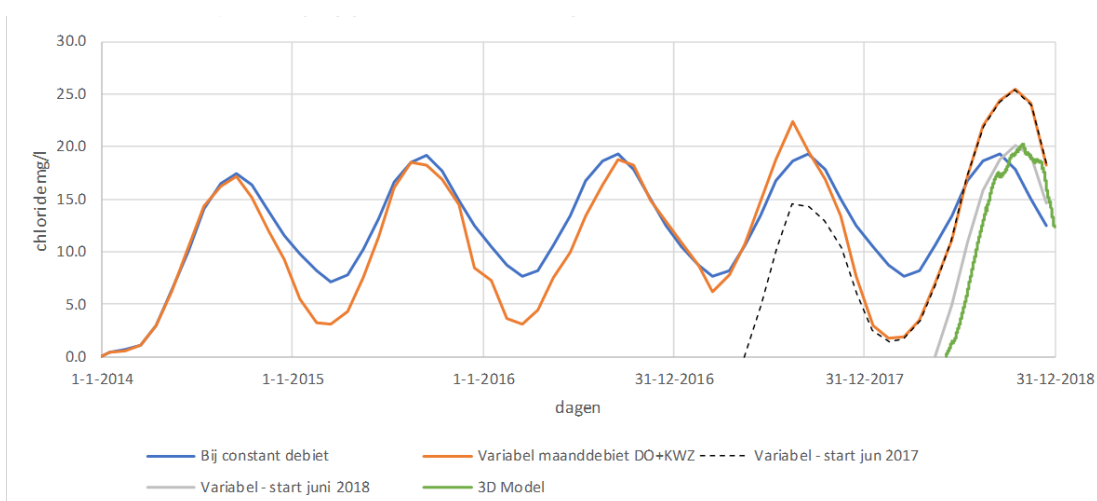
In het in Tabel 5-1 gegeven overzicht van de resultaten voor de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer ten opzichte van de achtergrondswaarde is door de beperkte lengte van de simulatie nog geen rekening gehouden met de mogelijke invloed van inspeleeffecten en de lange termijn respons op de vaargeulverdieping. De potentiële invloed daarvan is daarom verkend door het box-model uit [1] te fitten op de resultaten van het 3D model voor Scenario 0 en Scenario 1⁸. Dit is gedaan door de zoutlast bij de scheepvaartsluizen in het box-model zodanig aan te passen dat een berekening met het box-model voor de periode juni – december 2018 past bij de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer berekend met het 3D model in deze periode. Die aangepaste zoutlast is vervolgens cyclisch voorgeschreven in een langere berekening met hetzelfde box-model.

Voor Scenario 0 wordt dit geïllustreerd in Figuur 6-1. De berekening met het box-model gestart in juni 2018 (grijze lijn) is gefit op het 3D model resultaat (groene lijn) voor dit scenario, afkomstig uit Figuur 4-1. Met de daaruit verkregen zoutlast (cyclisch per jaar) is een

⁸ Het eenvoudige model in [1] berekent de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer uit de zoutbalans, gegeven een maandgemiddelde (extra) zoutlek van de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand en de maandgemiddelde afvoer bij de Afsluitdijk.



Figuur 6-1 Lange termijn verloop van de maandgemiddelde verhoging van het chloridegehalte van het IJsselmeer in Scenario 0 (referentiesituatie) ten gevolge van de zoutlast bij de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand volgens het box-model uit [1] (oranje lijn).

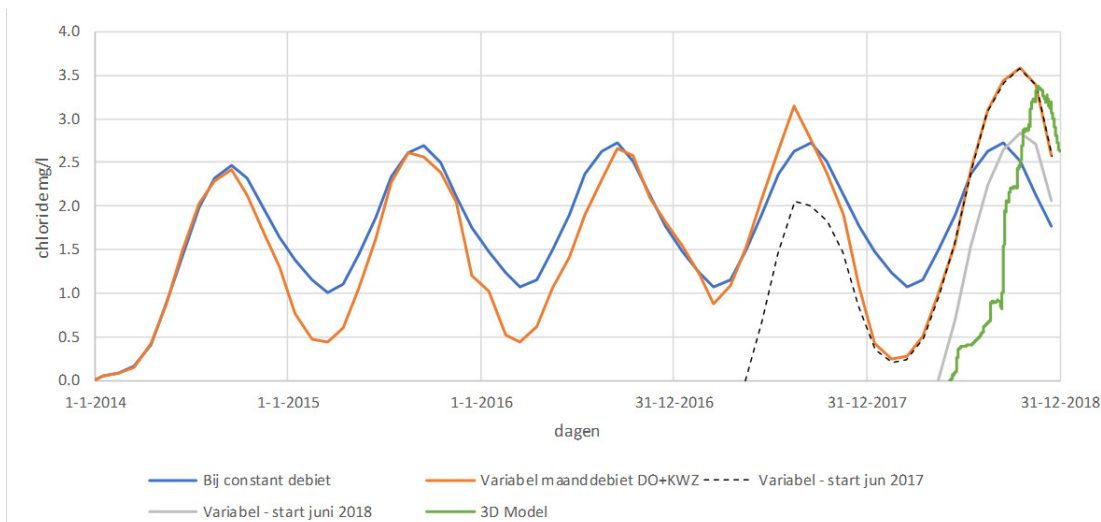


Figuur 6-2 Lange termijn verloop van de maandgemiddelde verhoging van het chloridegehalte van het IJsselmeer in Scenario 1 ten gevolge van de zoutlast bij de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand volgens het box-model uit [1] (oranje lijn).

langere periode met het box-model doorgerekend met een constante afvoer van $400 \text{ m}^3/\text{s}$ (blauwe lijn) en met een variabele maandgemiddelde afvoer zoals opgetreden (oranjelijn). Het gemiddelde en de extremen van de oranje lijn over 2015 – 2018 laten zien dat voor het IJsselmeer gemiddeld het nodig is om rekening te houden met inspeleeffecten en variaties op wat langere termijn, zie Tabel 6-1.

Figuur 6-2 laat zien wat het resultaat is voor Scenario 1. De berekening met het box-model gestart in juni 2018 (grijze lijn) is gefit op het 3D model resultaat (groene lijn) voor dit scenario, afkomstig uit Figuur 4-1. De gemiddelde waarden en extremen zijn opgenomen in Tabel 6-1.

Figuur 6-3 laat zien wat het resultaat is voor het verschil tussen Scenario 1 en Scenario 0. De berekening met het box-model gestart in juni 2018 (grijze lijn) is gefit op het 3D model resultaat (groene lijn) voor dit scenario, afkomstig uit Figuur 4-3. De zoutlast is getuned op 7%, het verschil van de zoutlasten getuned voor Scenario 1 en Scenario 0. Waar de fits voor



Figuur 6-3 Lange termijn verloop van de maandgemiddelde verhoging van het chloridegehalte van het IJsselmeer in Scenario 1 ten opzichte van Scenario 0 ten gevolge van de zoutlast bij de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand volgens het box-model uit [1] (oranje lijn).

Scenario 0 en 1 redelijk zijn, blijkt de fit voor het verschil moeilijker te maken, zie Figuur 6-3. In Tabel 6-1 zijn de gemiddelde en extreme verhoging die hierbij horen opgenomen voor 7%, maar ook voor 10%. In dat laatste geval zou de fit op het dalend deel van de grijze lijn liggen en worden er hogere waarden voor het gemiddelde en de extremen gevonden. De cijfers voor 7% en 10% geven een indruk van de marges voor de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer als gevolg van de vaargeulverdieping, die uit de verkenning met het box-model volgen.

Uit Tabel 6-1 leiden we af dat rekening gehouden moet worden met een verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer met 2 – 3 mg/l. Over het jaar gezien varieert dit, voor 2018 tussen ongeveer 0 en 6 mg/l op basis van maandgemiddelde afvoeren.

In de berekeningen voor Scenario 1 is uitgegaan van een verdieping tot een uniforme diepte van -10 m NAP. In feite is de gemiddelde diepte -10 m NAP en mag de werkelijke diepte volgens de vergunning variëren tussen -8 en -12 m NAP. De aard van de variatie die uiteindelijk gerealiseerd wordt, is niet bekend. Mogelijk ontstaan er diepe putten gescheiden door ondiepere 'drempels', zoals elders in het IJsselmeer. Aan de andere kant is in 2020 in de eerste 1,7 km van KWZ-UDO geul met een vrij uniforme diepte ontstaan. In lijn met de uitkomsten van Scenario's 1 en 3, verwachten we dat in geval van een sterk variërende geulbodem met drempels en putten de effecten geringer zullen zijn dan voor Scenario 1.

Tabel 6-1 Verhoging van het gemiddelde chloridegehalte op langere termijn, geschat met behulp van het box-model.

Scenario	Zoutlast obvtunen %	Constant debiet 400 m ³ /s			Variabel maanddebit			
		gem. mg/l	laag mg/l	hoog mg/l	gem. mg/l	laag mg/l	hoog mg/l	dec-18 mg/l
Scenario 0	40%	11,4	6,7	16,6	10,3	1,5	21,8	15,7
Scenario 1	47%	13,4	7,8	19,4	12,0	1,8	25,5	18,4
Vershil Scenario 1-0	7%	1,9	1,1	2,7	1,7	0,3	3,6	2,6
Vershil Scenario 1-0	10%	2,9	1,7	4,2	2,6	0,4	5,6	4,0

6.2.2 Verdisconteren mogelijk effect van menging bij instroming in verdiepte vaargeul

In paragraaf 4.4 is een verschil gesignaleerd in de mate van menging bij instroming van de verdiepte vaargeul in het model in een bescheiden aantal metingen. De conclusie was dat we er rekening mee moeten houden dat de menging in het model hier te groot kan zijn. Hierdoor wordt de zoutindringing mogelijk iets onderschat. Vergelijkbare situaties komen voor bij de drempels en bij het einde van de verdiepte geul. Het speelt niet bij de zijtaluds van de verdiepte vaargeul, waar de stroming hoofdzakelijk evenwijdig aan loopt.

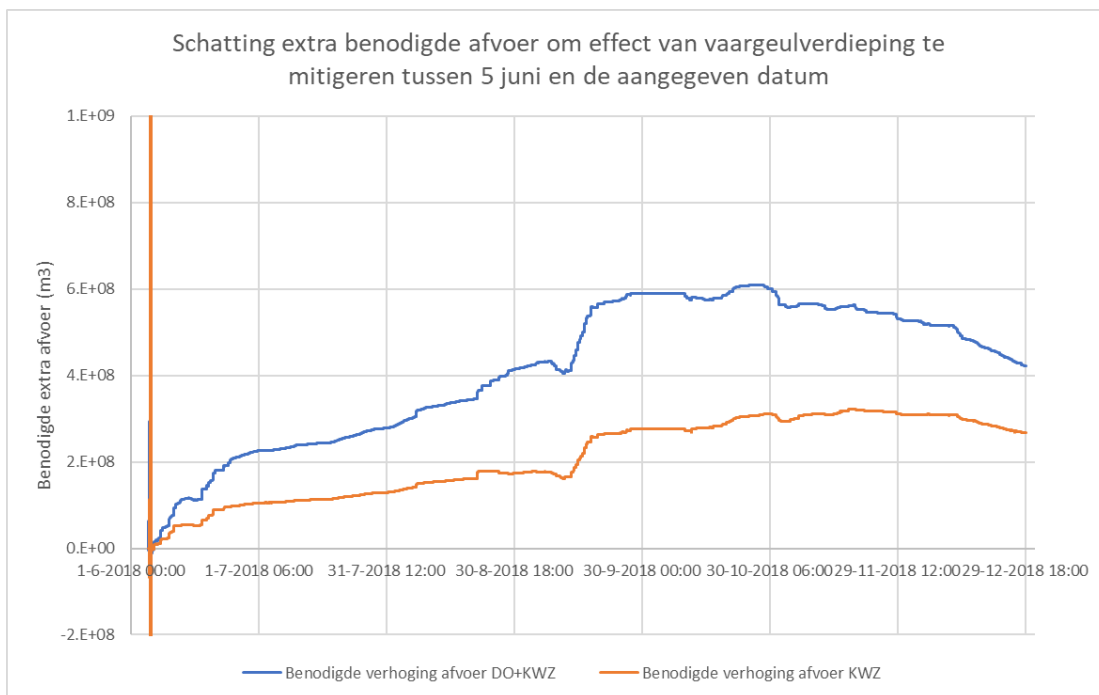
Afgaande op getallen uit paragraaf 4.4 zou de maximum concentratie aan de bodem bijvoorbeeld factor 1,5 à 2 hoger kunnen zijn dan nu gemodelleerd. Een hogere zoutconcentratie zorgt voor een grotere voortplantingssnelheid van de dichtheidsstroming en een vermindering van de opmenging van de zoute onderlaag naar de zoetere bovenlaag. Een kleine versnelling van de dichtheidsstroming kan een kleine, systematische bijdrage leveren aan het zouttransport, waarin verder windgedreven stroming een grote rol heeft. Het effect op de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer boven de achtergrondswaarde is waarschijnlijk niet erg groot, omdat het zout al in het meer zit en alleen de ruimtelijke verdeling wat minder gunstig wordt in relatie tot de afvoer van zout door de spuisluisen. We rekenen daarom met een kleine verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer boven achtergrondswaarde van 2-3 mg/l naar maximaal 5 mg/l. Het effect op de extreme chloridegehalten kan groter zijn, bijvoorbeeld door meer buffering van zout in de diepe delen gedurende rustige perioden, dat op enig moment massaal wordt verspreid. Echter, de verhoging tot 75 mg/l bij Andijk (gebaseerd op de pieken bij KU_0001 aan het begin van de vaargeul, zie paragraaf 4.3) is al dusdanig ruim dat verdere verhoging niet nodig is.

6.3 Implicatie in termen van extra watervraag

Inzicht in de extra watervraag om de effecten van de vaargeulverdieping te mitigeren kan op meerdere manieren worden verkregen. Hier maken we gebruik van de resultaten voor de verhoging van chloridemassa in het IJsselmeer in Scenario 1 (vaargeul maximaal verdiept) ten opzichte van de referentiesituatie, en van de resultaten van de overeenkomstige berekeningen met extra spuien.

Eerst maken we een schatting voor Scenario 1 door na te gaan hoeveel extra spuivolume nodig is als functie van de tijd om de verhoging van chloridemassa in het IJsselmeer ten opzichte van de referentiesituatie te compenseren. Hoeveel extra water nodig is bij Den Oever en Kornwerderzand samen of alleen bij Kornwerderzand om de extra aanwezige hoeveelheid zout af te voeren, is geschat onder aanname dat het chloridegehalte van het gespuide water niet verandert. Figuur 6-4 laat het verloop van deze schattingen zien als functie van de tijd. In het begin zijn de getallen niet representatief door de korte evaluatieperiode. Aan het eind van de berekening, op 30 december 2018, zou de extra watervraag ter mitigering van het effect van de vaargeulverdieping voor Den Oever en Kornwerderzand samen $4,22 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ zijn en $2,67 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ voor Kornwerderzand alleen. Dit is equivalent met respectievelijk $23,5 \text{ m}^3/\text{s}$ voor Den Oever en Kornwerderzand samen en $14,8 \text{ m}^3/\text{s}$ voor Kornwerderzand alleen over hele voorafgaande periode van het begin van de berekening. Gemiddeld van juni tot december is het verschil in verhoging van het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer van Scenario 1 ten opzichte van de referentiesituatie gelijk aan $1,7 \text{ mg/l}$ (vergelijk Figuur 4-3). Gemiddeld over de simulatieperiode is de afvoer voor Den Oever en Kornwerderzand samen $166 \text{ m}^3/\text{s}$, waarvan ongeveer de helft ($82 \text{ m}^3/\text{s}$) bij Kornwerderzand. De extra afvoer om de verhoging van $1,7 \text{ mg/l}$ te bestrijden zou dan respectievelijk 14% en 18% van de aanwezige afvoer zijn.

Kijkend naar de *maximale* watervraag dan bedraagt die $6,07 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ voor Den Oever en Kornwerderzand samen voor de periode tot en met 24 oktober 2018, of $49,9 \text{ m}^3/\text{s}$ over deze



Figuur 6-4 Schatting van de extra benodigde afvoer (m³) om het gemiddelde effect van vaargeulverdieping in Scenario 1 te mitigeren tussen 5 juni en de aangegeven datum, betrokken op de spuien bij Den Oever en Kornwerderzand (DO+KWZ, blauwe lijn) en betrokken op alleen Kornwerderzand (KWZ, oranje lijn).

hele periode. De maximale watervraag voor Kornwerderzand alleen is $3,22 \cdot 10^8$ m³ voor de periode tot en met 19 november 2018, of 22,3 m³/s over die hele periode.

Tabel 6-2 geeft een overzicht voor de geschatte watervraag voor Den Oever en Kornwerderzand samen en Tabel 6-3 geeft dit overzicht voor de analyse betrokken op alleen Kornwerderzand. Kolom 2 van deze tabellen geeft de verhoging van het chloridegehalte van Scenario 1 ten opzichte van de referentiesituatie zoals gepresenteerd in Figuur 4-3, gemiddeld over de aangegeven periode. Dit representeert de hoeveelheid chloride die moet worden afgevoerd. Kolom 3 bevat de gemiddelde afvoeren over de aangegeven periode en kolom 4 de schatting van het extra debiet nodig om de verhoging uit kolom 2 te bestrijden. Aan de tabellen is ook de periode van 5 juni – 13 september toegevoegd, omdat 13 september een onderscheidend moment is in de diverse figuren van de verhoging van het chloridegehalte.

De getallen voor Kornwerderzand zijn het meest relevant, omdat bij Den Oever relatief weinig bijdraagt aan het spuien van extra chloride tot begin september (mede door inspeleeffecten). Uit Tabel 6-3 concluderen we dat voor Kornwerderzand over een langere periode (ongeveer

Tabel 6-2 Gemiddelde verhoging van het chloridegehalte en de afvoer bij Den Oever en Kornwerderzand over de aangegeven periode voor Scenario 1 en de geschatte extra watervraag uitgedrukt in een gemiddeld afvoerdebiet over de aangegeven periode.

Periode van 5 juni tot	Verhoging chloridegehalte, gemiddeld over periode (mg/l)	Q _{gem} DO+KWZ (m ³ /s)	Geschatte extra Q _{gem} DO+KWZ (m ³ /s)
13 september 2018	0,5	76	48 (+63%)
24 oktober 2018	1,0	98	50 (+51%)
19 november 2018	1,3	108	39 (+36%)
30 december 2018	1,7	166	24 (+14%)

Tabel 6-3 Gemiddelde verhoging van het chloridegehalte en de afvoer bij Kornwerderzand over de aangegeven periode in voor Scenario 1 en de geschatte extra watervraag uitgedrukt in een gemiddeld afvoerdebiet over de aangegeven periode.

Periode van 5 juni tot	Verhoging chloridegehalte, gemiddeld over periode (mg/l)	Q_{gem} KWZ (m ³ /s)	Geschatte extra Q_{gem} KWZ (m ³ /s)
13 september 2018	0,5	25	19 (+75%)
24 oktober 2018	1,0	41	25 (+60%)
19 november 2018	1,3	54	22 (+41%)
30 december 2018	1,7	82	15 (+18%)

6 maanden) naar schatting 20 m³/s of meer aan extra afvoer nodig zou zijn om een gemiddelde verhoging van 1,3 mg/l tegen te gaan, een verhoging van meer dan 40% te opzichte van de aanwezige afvoer in die periode. Let op dat deze schatting alleen betrekking heeft op de gemiddelde effecten.

In Scenario 1a is 1,45 10⁸ m³ extra gespuid bij Kornwerderzand en 1,08 10⁸ m³ extra bij Den Oever, vergeleken met de eerdere Scenario's (totaal 2,53 10⁸ m³ extra). Deze extra spuien vonden voornamelijk plaats in juli en augustus. Tot half september blijkt dit genoeg om het effect van vaargeulverdieping tegen te gaan, maar daarna treed er toch een verhoging van de chloridemassa op vergeleken met de referentiesituatie zonder extra spuien, zie Figuur 5-1. De toegepaste extra spui volumes zijn dan ook minder dan de helft van de extra watervraag die hierboven is geschat, 42% voor Den Oever en Kornwerderzand samen (periode 5 juni – 24 oktober) en 45% voor Kornwerderzand alleen (periode 5 juni – 19 november). De hoeveelheid water die beschikbaar was voor extra spuien in droge perioden (40 m³/s) bood soelaas tot begin september, maar ook in de periode daarna is veel extra spuidebiet nodig, terwijl in die periode toch al meer gespuid werd.

Let op dat deze schattingen betrekking hebben op de gemiddelde effecten in de besproken berekeningen (maximaal 1,7 mg/l over de hele periode in Scenario 1). In paragraaf 6.2.2 is de (jaar-) gemiddelde verhoging op 5 mg/l gesteld, waardoor de watervraag nog aanmerkelijk hoger zal uitkomen. Een vergelijking van de tijdreeksen in paragraaf 5.4 laat bovendien zien dat de piekwaarden veroorzaakt door de vaargeulverdieping in Scenario 1 nauwelijks verlaagd worden door de extra afvoer in Scenario 1a. Al met al lijkt extra spuien geen geschikte oplossing voor de extra zoutindringing ten gevolge van vaargeulverdieping in het meest diepe scenario, zeker niet in droge jaren waarin de waterbeschikbaarheid niet kan worden gegarandeerd.

Een alternatief voor extra spuien zou een reductie van de zoutlast bij de scheepvaartsluizen kunnen zijn, die misschien wel 15 – 30 % zal moeten bedragen⁹, ook in de zomer als het druk is. Ook deze maatregel heeft vooral invloed op het gemiddelde chloridegehalte. De pieken die bij Andijk optreden als gevolg van de verdiepte vaargeul laten zich minder makkelijk reduceren. Dergelijke maatregelen kunnen worden onderzocht middels berekeningen met nieuwe zoutrandvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen, die zijn afgeleid na toepassing van de voorziene maatregel(en) in de Zeesluisformulering.

⁹ Afgaande op benodigde reductie van de zoutmassa in het IJsselmeer in Scenario1 (boven de achtergrondswaarde) naar die van de referentie situatie (boven de achtergrondswaarde).

6.4 Relevante processen voor zoutindringing door verdieping van de scheepvaartgeul naar Kornwerderzand

Rijkswaterstaat heeft vragen gesteld om het inzicht in het dynamisch gedrag van zoutindringing bij verdieping van de scheepvaartgeulen en het 'systeembegrip' in het IJsselmeer te vergroten, zie paragraaf 1.2. Aan de hand van deze vragen en de studieresultaten komen we tot een beschrijving van de relevante processen voor zoutindringing door de verdieping van de scheepvaartgeul naar Kornwerderzand. De vragen zijn hieronder herhaald (vetgedrukt).

Hoeveel zout afkomstig uit de scheepvaartsluizen komt de (verdiepte) vaargeul in van uit de Binnenhaven?

De zoutlast van de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand is geschat met behulp van de Zeesluisformulering. Dit heeft geleid tot een betere beschrijving van de zoutlast van de scheepvaartsluizen, die aanmerkelijk lager is dan in de eerdere modelstudie voor 2018. Opvallend is grote invloed van de seizoensvariatie in de schuttingen en in het zoutgehalte van de Waddenzee. Ook bleek dat de zoutlast afhankelijk kan zijn van het weer. Bij slecht weer kan het aantal schuttingen dalen zodat de zoutlast merkbaar afneemt. Tegelijkertijd kan er onder dergelijke omstandigheden (bijv. veel wind) meer menging en transport optreden in het IJsselmeer. Verder varieert de zoutlast sterk over de dag doordat het drukte bij de sluisen afhangt van het getij.

Het verschil in zoutlast tussen de Scenario's onderling is over het algemeen verwaarloosbaar. In de huidige opzet is dit voor de Scenario's 1 – 4 alleen afhankelijk van kleine verschillen in het zoutgehalte van het oppervlakte water, dat bij het schutten van uit de Binnenhaven de sluisen inloopt. In de Binnenhaven is de dichtheidsstroming meestal dominant, waardoor het zoutgehalte in de havenmond voor al deze scenario's vrijwel identiek is.

Vanaf de mond van de Binnenhaven verspreidt het zout zich hoofdzakelijk via dichtheidsstroming verder in de richting van de (verdiepte) vaargeul en de geulen aan weerszijden. Bij deze verspreiding is sprake van entrainment¹⁰ van zoeter oppervlaktewater waardoor de zoutgehaltes in de onderlaag over het algemeen afnemen naarmate de stroming verder van de havenmond is verwijderd. In de onderlaag worden verhoogde stroomsnelheden bij het havenhoofd waargenomen, terwijl in de bovenlaag met enige regelmaat verhoogde snelheden gerelateerd aan windgeïnduceerde stroming zichtbaar zijn. Uit de 3D animaties van de referentieberekening en de Scenario's maken we op dat er in het algemeen in de Scenario's iets minder zout naar de geulen aan weerszijden gaat in vergelijking met de referentiesituatie. Bij een verdiepte vaargeul loopt er ook minder zout over de randen van de vaargeul in perioden van sterke zoutindringing.

Hoeveel zout afkomstig uit de scheepvaartsluizen de (verdiepte) vaargeul in komt is niet gemonitord in het model. Wel geven de animaties van het *Verskil in kg chloride/m² boven achtergrondswaarde en ten opzichte van Scenario 0* aan dat deze hoeveelheid sterk varieert in de tijd, maar uit de *3D animaties van de zouttong bij Kornwerderzand* kunnen we afleiden dat doorgaans een groot deel van de zouttong uit de Binnenhaven de vaargeul in loopt. Het resterende deel komt in de gebieden aan weerszijden van de vaargeul terecht. Uit een globale schatting¹¹ volgt nog wel dat in de verdiepte vaargeul van Scenario 1 ongeveer 10% meer zout afkomstig van de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand terecht komt dan in de referentiesituatie.

¹⁰ Entrainment is het transport van vloeistof door een grensvlak tussen twee water massa's door een door wrijving geïnduceerde turbulente flux, bijvoorbeeld bij dichtheidstroming.

¹¹ Schatting gebaseerd op Scenario 1 vergeleken met de referentiesituatie. Figuur 4-3 geeft de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van Scenario 1 ten opzichte van de referentiesituatie. Vermenigvuldigd met het volume van het IJsselmeer geeft dit de totale verhoging van de chloridemassa in het meer. Deze verhoging is gemiddeld 9% en maximaal 12% (op 23 november) van de cumulatieve chloridelast van de scheepvaartsluizen (boven achtergrondswaarde) over de periode augustus – december.

Hoe snel verloopt het zouttransport door de verdiepte vaargeul het IJsselmeer in vergelijking met de referentiesituatie?

Het zouttransport door de verdiepte vaargeul wordt bepaald door dichtheidsstroming en windgedreven stroming. Beide worden versterkt door de vaargeulverdieping. Het hogere zoutgehalte aan de bodem en de grotere diepte van de vaargeul versterkt de dichtheidsstroming. Maar de verdieping versterkt ook het windgedreven transport door de vaargeul, zowel naar het zuiden als naar het noorden (afhankelijk van de windcondities). Gezien de aanwezig zoutgradiënt, resulteert dit uiteindelijk in een versterking van het zouttransport naar het zuiden. Over het algemeen gaat het transport door de verdiepte vaargeul betrekkelijk langzaam, in Scenario 1 in de orde van kilometers per dag, maar afhankelijk van de windgedreven stroming kan het ook sneller gaan, zie bijvoorbeeld Bijlage C. Dit is wel aanmerkelijk langzamer dan de schatting van 1-2 dagen over 30 km in [1] waar van dichtheidsstroming met grote dichtheidsverschillen was uitgegaan.

Het zouttransport in Scenario 1 loopt door de verdieping sneller dan in de referentiesituatie, zie de eerste week van de berekeningen in Bijlage C. Later in de berekening, en op grotere afstand van Kornwerderzand wordt de vergelijking bemoeilijkt omdat de mate van menging erg verschilt tussen beide situaties.

Helpt opmenging en afvoer van zout uit de geul door wind om de zoutindringing tegen te gaan, of zorgt dit in sommige situaties juist voor ongewenste verspreiding?

Het eerste is doorgaans het geval, maar de tweede situatie kan ook voorkomen. De lokale en de grootschalige effecten van wind op de stroming zorgen voor opmenging en afvoer van zout uit de (verdiepte) vaargeul en (uiteindelijk) tot het spuien van het extra zout. Een en ander is afhankelijk van de diepte van de vaargeul, de aanwezigheid van drempels, en de lengte van de verdieping. Bij een relatief korte vaargeulverdieping dicht bij Kornwerderzand (bijv. 4,5 km in Scenario 4, of de huidige 1,7 km) kan accumulatie van zoutwater optreden met verhoudingsgewijs hoge chloridegehaltes. Bij plotselinge menging onder invloed van harde wind komt veel zout in de oppervlakte laag terecht, en dat kan afhankelijk van de windgedreven stroming ver het IJsselmeergebied worden ingevoerd en zo leiden tot pieken in het chloridegehalte van de individuele stations.

Wat is de invloed van spuien op het zouttransport in de (verdiepte) vaargeul, speciaal bij (grote) spuigangen bij de spuisluisen van Kornwerderzand? (In hoeverre kan de verdiepte en onverdiepte geul worden zoetgespoeld bij (grote) spuigangen bij de spuisluisen van Kornwerderzand?)

De spuigangen hebben geen of nauwelijks merkbaar effect op het zout in de (on)verdiepte vaargeul naar Kornwerderzand (zie bijvoorbeeld de geringe verschillen tussen Scenario 1 en 1a in Bijlages C en E). De variatie in dichtheidsstroming door het sluisgebruik en variatie door windeffecten overheersen de dynamica in de vaargeul. Zoetspoelen van de vaargeul naar Kornwerderzand door spuien is niet mogelijk.

Welke invloed heeft de verdiepte geul op de stroming voor de beschreven opties (treedt er bijv. een retourstroom op in de verdiepte geul, tegen de wind in)?

In het algemeen zorgt een verdiepte geul voor een toename van de water (en zout) transporten in het betreffende gebied. Waar het de grootschalige waterbeweging betreft die door wind is opgewekt, kan dat twee kanten op zijn. Deze windgedreven stroming kan de zoutindringing door dichtheidsstroming tegenwerken en versnellen. In bijzondere gevallen kan een retourstroom optreden in de verdiepte geul, tegen de wind in. Lokaal kunnen zeer complexe 3D stroombeelden ontstaan door een combinatie van wind, verhangstroming, dichtheidsstroming, taluds met menging en eventueel een spuiroom. De stroomsnelheden blijven daarbij over het algemeen laag

In de beschouwingen zijn de mogelijke invloed van golven op turbulentie en menging als ook de invloed van scheepvaart op menging verwaarloosd.

7 Conclusies en aanbevelingen

In deze studie zijn water- en zouttransportberekeningen uitgevoerd om nauwkeuriger te schatten hoeveel de verzilting van het IJsselmeer zou toenemen als de vaargeul naar Kornwerderzand verdiept wordt. Hiertoe zijn voor verschillende verdiepingsscenario's berekeningen uitgevoerd met een speciaal daarvoor aangepast 3D numeriek model. Dit hoofdstuk beschrijft de conclusies en aanbevelingen uit deze studie, met in paragraaf 7.1 de conclusies op hoofdlijnen, in paragraaf 7.2 een nadere beschrijving van de effecten van de bestudeerde scenario's en de verworven inzichten in de systeemwerking en in paragraaf 7.3 de aanbevelingen.

7.1 Conclusies op hoofdlijnen

Op basis van de modelberekeningen vinden we voor het meest diepe scenario (vaargeulverdieping tot -10 m NAP over 31 km) een verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer van circa 5 mg/l. Dit is aan de onderkant van de bandbreedte uit de eerdere expert beoordeling uit 2021 [1]. Ter plaatse van Andijk geldt een vergelijkbare verhoging van de gemiddelde waarde, maar op deze locatie moet ook rekening gehouden worden met een toename van optredende chloridepieken, bijv. tot 75 mg/l hoger. Het opnemen van drempels in de verdiepte geul remt de zoutindringing iets af en is daarom vanuit dat perspectief wat gunstiger. Scenario's met een geringere verdieping van de vaargeul tot -6,7 m NAP, of een korte verdiepte geul van 4,5 km en -10 m NAP in het noorden bij Kornwerderzand leveren nog minstens de helft van deze effecten op.

Een verhoging van het meerjarig gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer met 5 mg/l mag misschien relatief klein lijken, maar als gekeken wordt wat de watervraag zou zijn om dit effect enigszins te kunnen beperken dat blijkt dat deze toch aanzienlijk is. Om een veel geringere verhoging van gemiddeld 1,3 mg/l over 5½ maand uit de berekening voor het meest diepe scenario tegen te gaan, is bijvoorbeeld al 20 m³/s of meer nodig voor Kornwerderzand alleen, wat meer dan 40% is van de aanwezige afvoer bij Kornwerderzand in deze lange periode. De watervraag om een verhoging van 5 mg/l tegen te gaan zal nog aanzienlijk groter zijn. Verder bleek dat de grotere chloridepieken die het gevolg zijn van de vaargeulverdieping nauwelijks verlaagd worden door extra afvoer. Daarom lijkt extra spuien geen geschikte methode om de extra zoutindringing ten gevolge van vaargeulverdieping in het meest diepe scenario tegen te gaan, met name niet in droge jaren waarin de waterbeschikbaarheid niet kan worden gegarandeerd.

De berekeningen geven ook meer inzicht in de processen die zorgen voor een toename van de zoutindringing door de vaargeulverdieping naar Kornwerderzand. Van het zout afkomstig van de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand komt doorgaans een groot deel in de vaargeul terecht, en in de verdiepte vaargeul van Scenario 1 lijkt ongeveer 10% meer zout terecht te komen dan in de referentiesituatie. Daarbij loopt de dichtheidsstroming over een steil talud de verdiepte vaargeul in, waarbij menging optreedt. Vervolgens dringt het zoute water onder invloed van dichtheidsstroming en windgedreven stroming via de verdiepte geul verder het IJsselmeer in. Afhankelijk van de windcondities wordt onderweg meer of minder zout uit de geul afgevoerd door de windgedreven stroming. Behalve het gemiddelde chloridegehalte worden ook de pieken hoger. In de verdiepte vaargeul genereren (grote) spuingangen geen opvallende stroming. Wel helpt spuien om op grotere schaal het extra zout (chloride) ten gevolge van de vaargeulverdieping meer in het noorden en noordwesten van het IJsselmeer te houden.

7.2 Nadere bevindingen

7.2.1 Methodiek

De studie is gebaseerd op berekeningen met het 3D D-Hydro model van het IJsselmeer, inclusief Ketelmeer, Vossemeer, Ramsgeul en Zwarte Meer. Met het 3D model zijn berekeningen uitgevoerd voor een referentiesituatie en vier verdiepingsscenario's:

0. Oorspronkelijke situatie tot 2020, de referentiesituatie zonder verdiepte vaargeul naar Kornwerderzand;
1. Vaargeulverdieping door zandwinning over het hele traject van 31 km naar Kornwerderzand tot -10m NAP;
2. Vaargeulverdieping over het hele traject tot -6,7m NAP;
3. Verdiepte vaargeul van situatie 1 gecombineerd met drie drempels;
4. Verdieping tot -10 m NAP beperkt tot de zandwinningsconcessie van de Provincie Fryslân met lengte 4,5 km in het noordelijke deel bij Kornwerderzand.

De berekeningen zijn gebaseerd op de afvoer- en windcondities tijdens de droge periode van juni tot december 2018 waarvoor eerder al modelberekeningen waren gedaan [2]. Omdat de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand de belangrijkste bron voor zout in de (verdiepte) vaargeul naar Kornwerderzand zijn, konden de zoutrandvoorwaarden sterk worden vereenvoudigd door de overige zoutbronnen weg te laten (spuisluizen bij Kornwerderzand en Den Oever, scheepvaartsluis Den Oever) of een constante achtergrondwaarde voor het zoutgehalte te geven (o.a. de IJssel). Hiermee werd goed inzicht verkregen in de invloed van vaarwegverdieping naar Kornwerderzand op de verzilting van het IJsselmeer

De studie heeft geresulteerd in een nieuwe methode om de zoutlast van de scheepvaartsluizen bij de Afsluitdijk te schatten met behulp van de Zeesluisformulering gekoppelde aan box-modellen voor de voorhavens (zie paragraaf 2.2.5 en Bijlage B). Voor Kornwerderzand resulteerde dit in realistische resultaten voor het chloridegehalte in het nabij gelegen meetstation FL16. De zoutlast in het model was ongeveer 10% hoger dan de oorspronkelijke schatting op basis van de Zeesluisformulering omdat er in het 3D model minder zout het model uit werd getransporteerd via het uitwisselingsdebiet dan in de berekening met de Zeesluisformulering.

Van de verdiepingsscenario's 0 en 1 zijn ook berekeningen gemaakt met afvoercondities die beter aansluiten bij het huidige waterbeheer, waarin in droge perioden totaal 40 m³/s beschikbaar is om extra te spuien, waarbij het meerpeil uitzakt. Deze berekeningen zijn aangeduid met Scenario 0a en 1a.

Op basis van de berekeningsresultaten is geconcludeerd dat het tijdstip waarop de berekening begint in de jaarlijkse cyclus van verzilting (onder invloed van seizoensvariatie in zoutlast en afvoeren) en de relatief korte duur van de simulatie (7 maanden) van invloed zijn op de uitkomsten van de studie. De invloed van inspeleffecten en het verloop van de verhoging van het chloridegehalte op langere termijn is verder beschouwd in paragraaf 7.2.3.

Verder bleek dat dat nog een aspect nadere aandacht behoeft, namelijk de mate van menging die optreedt als de dichtheidsstroming over de rand de verdiepte vaargeul inloopt. De stroming over dergelijke steile taluds valt strikt genomen buiten het toepassingsbereik van de software. Zie verder paragraaf 7.2.4.

7.2.2 Invloed van de scenario's op de globale zoutbalans van het IJsselmeer

Een globaal beeld van het zouttransport boven de achtergrondwaarde in de referentiesituatie is als volgt. Aan het eind van de berekening is van de gedurende de simulatieperiode binnengekomen zoutmassa boven de achtergrondwaarde bij

scheepvaartsluizen van Kornwerderzand 59% afgevoerd door de spuisluisen van Kornwerderzand, 10% is afgevoerd door de spuisluisen bij Den Oever en 31% is nog niet afgevoerd uit het model. Daardoor is het gemiddelde chloridegehalte aan het eind van de berekening nog 9,8 mg/l verhoogd.

De uitkomsten van de berekeningen voor de Scenario's 1 t/m 4 vergeleken met de referentieberekening en gemiddeld over het IJsselmeer zijn samengevat in Tabel 4 1. Voor Scenario 1 is de maximale verhoging van het gemiddelde chloridegehalte vergeleken met de referentiesituatie het grootst, namelijk 3,4 mg/l. Dit wordt gevolgd door Scenario 3 met 3 mg/l. Scenario 2 en Scenario 4 zijn veel lager met 2 mg/l.

Als de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer ten opzichte van de referentiesituatie wordt vergeleken met het volume van de ontgroning dan levert Scenario 3 het beste resultaat op van de bestudeerde scenario's, zeker als wordt meegenomen dat twee van de drie drempels ook om andere redenen worden overwogen (vervuilde grond, gaspijpleidingen).

De verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer ten opzichte van de referentiesituatie is vrij groot voor de Scenario's 2 en 4 in vergelijking met de volumes van de ontgroning. De reden hiervoor is dat de natuurlijke barrière voor zouttransport ten zuiden van Kornwerderzand effectief doorbroken wordt door de vaargeulverdieping in deze scenario's. Merk op dat dat voor een deel nu al het geval met de eerste verdieping over 1,7 km in 2020.

In de berekeningen voor Scenario 1 is uitgegaan van een verdieping tot een uniforme diepte van -10 m NAP. In feite is -10 m NAP de gemiddelde diepte en mag de werkelijke diepte variëren tussen -8 en -12 m NAP. Hoe de bodemligging er uiteindelijk uit zal zien, is nog niet bekend. Er kunnen diepe putten ontstaan, gescheiden door ondiepere 'drempels', zoals elders in het IJsselmeer. Maar ook een vrij uniforme diepte is mogelijk, zoals bleek bij de eerste 1,7 km verdieping van de vaargeul naar Kornwerderzand die in 2020 is gerealiseerd. In lijn met de uitkomsten van Scenario 3 verwachten we dat in geval van een sterk variërende geulbodem met drempels en putten de effecten geringer zullen zijn dan voor Scenario 1.

De invloed van afvoercondities op de mate van verzilting is in twee extra scenarioberekeningen onderzocht, Scenario 0a en 1a. Voor deze berekeningen zijn in de droge perioden extra spuien toegevoegd aan de afvoeren bij Den Oever en Kornwerderzand. Als gevolg van deze extra spuien daalt de gemiddelde waterstand ca. 0,2 m en het neemt het volume van het IJsselmeer met ca. 5% af.

De uitkomsten van de berekeningen voor beide scenario's zijn vergeleken met die van de andere scenario's in Tabel 5-1. Door de extra spuien geeft Scenario 1a ten opzichte van Scenario 0a een groter verschil in de maximum verhoging in vergelijking met Scenario 1 ten opzichte van Scenario 0, namelijk 4,3 mg/l. Dit betekent dat bij extra spuien de verzilting ten gevolge van een verdieping zoals in Scenario 1 naar verhouding groter is. Daarbij moet echter wel bedacht worden dat de maximum verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer altijd lager ligt bij extra spuien, in dit geval 1,2 mg/l lager (Scenario 1a ten opzichte van Scenario 1). De getallen voor Scenario's 0a en 1a moeten met enige voorzichtigheid gebruikt worden vanwege onzekerheden die geconstateerd zijn in de randvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen als gevolg van de verlaagde waterstand veroorzaakt door de extra spuien.

7.2.3 Gemiddelde verhoging chloridegehalte op lange termijn

De invloed van inspeleeffecten en het verloop van de verhoging van het chloridegehalte op langere termijn is verkend met een box-model dat is gefit op de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer uit de berekeningen. Daaruit blijkt dat rekening gehouden moet worden met een verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer van 2 – 3 mg/l voor Scenario 1 (vaargeulverdieping van -10 m NAP over 31 km).

Over het jaar gezien varieert de verhoging, voor 2018 tussen ongeveer 0 en 6 mg/l op basis van maandgemiddelde afvoeren.

7.2.4 Gemiddelde verhoging chloridegehalte vanwege dichtheidsstroming over steil talud

Bij de instroming van de zouttong in de verdiepte vaargeul treedt menging op, die door het model mogelijk wordt overschat. Vergelijkbare situaties komen voor bij de drempels en bij het einde van de verdiepte geul. Het speelt niet bij de zijtaluds van de verdiepte vaargeul, waar de stroming hoofdzakelijk evenwijdig aan loopt.

Omdat dit mengproces een schakel is in het zouttransport verder het IJsselmeer in, kan de zoutindringing hierdoor iets worden onderschat. Minder menging zou zorgen voor een hogere zoutconcentratie waardoor de voortplantingssnelheid van de dichtheidsstroming wat toeneemt en de opmenging van de zoute onderlaag naar de zoetere bovenlaag vermindert. Een geringe versnelling van de dichtheidsstroming kan een kleine, systematische bijdrage leveren aan het zouttransport, waarin verder windgedreven stroming een grote rol heeft. Het effect op de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer boven de achtergrondswaarde is waarschijnlijk niet erg groot, omdat alleen de ruimtelijke verdeling wat minder gunstig wordt in relatie tot de afvoer van chloride door de spuisluisen.

We rekenen daarom met een kleine verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer boven achtergrondswaarde van 2-3 mg/l naar maximaal 5 mg/l voor Scenario 1. Het effect op de extreme chloridegehalten kan groter zijn, bijvoorbeeld door meer buffering van zout in de diepe delen gedurende rustige perioden, dat op enig moment massaal wordt verspreid.

De verhoging van 5 mg/l is in de buurt van de ondergrens van de eerdere schatting. De reden dat deze nieuwe schatting relatief laag uitpakt, is dat uit de modelberekeningen volgt dat een veel kleiner deel van de zoutlast van de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand via de verdiepte vaargeul bijdraagt aan de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer dan eerder verondersteld voor het box-model in [1].

7.2.5 Verhoging chloridegehalte bij Andijk

De invloed van de zoutlast van de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand op de chloridegehalten bij Andijk bleek in de berekening voor de referentiesituatie relatief klein vergeleken met de verhoging van het chloridegehalte in de metingen van 2018. In deze situatie hebben de thans ontbrekende zoutlasten van de andere sluizen en de verhoogde zoutlast van de IJssel waarschijnlijk een grotere invloed bij Andijk. De vaargeulverdieping zorgt voor verhoging van het chloridegehalte in de omgeving van Andijk. Vooral de pieken worden versterkt.

Het basisniveau bij Andijk wordt tijdens de berekening geleidelijk hoger, met globaal (over het IJsselmeer-gemiddeld) 3 mg/l voor de Scenario's 1 en 3 en ongeveer 1 mg/l voor de scenario's 2 en 4 in december.

Aan het begin van de vaargeul KWZ-UDO (ZW-zijde) zijn deze pieken in de huidige berekeningen maximaal tot 40 – 75 mg/l hoger. Bij de inlaten van PWN, ca. 5 km verder, is dit minder, tot ruim 10 mg/l bij PSA en ca. 24 mg/l bij WPJ. De hoogste waarden treden op bij Scenario's 1 en 3. De duur van deze pieken is enkele dagen. Behalve van de verdiepingsscenario's is het optreden van pieken erg afhankelijk van de opgelegde windcondities. Bij andere windcondities is het denkbaar dat de pieken bij de inlaten van PWN 3 tot 4 maal hoger zouden uitvallen dan nu, met waarden zoals die aan het begin van de vaargeul optreden (40 – 75 mg/l hoger).

Over de invloed van de extra spuien op het verloop van het chloridegehalte bij Andijk moeten we constateren dat de waarden hierdoor in Scenario 1a maar weinig lager zijn dan in Scenario 1. Hieruit valt af te leiden dat de toename van de pieken in het chloridegehalte

veroorzaakt door de vaargeulverdieping veel minder goed te mitigeren zijn met extra spuien dan een gemiddelde verhoging in het IJsselmeer.

Deze conclusies zijn gebaseerd op de resultaten van de scenarioberekeningen. De invloed van inspeleeffecten en de lange termijn respons, en van de mogelijk te grote menging bij instroming van de dichtheidsstroming in de verdiepte vaargeul is hierin nog niet verwerkt.

7.2.6 Extra watervraag

De extra watervraag om de effecten van de vaargeulverdieping te mitigeren is geschat door na te gaan hoeveel extra water moet worden gespuid om de op enig moment extra aanwezige chloridemassa in het IJsselmeer in Scenario 1 (vaargeulverdieping tot -10 m NAP over 31 km) ten opzicht van de referentiesituatie af te voeren. Daarbij is gemakshalve verondersteld dat het chloridegehalte van het gespuide water hierdoor niet verandert. De getallen voor Kornwerderzand zijn het meest relevant, omdat bij Den Oever relatief weinig bijdraag aan het spuien van extra chloride tot begin september (mede door inspeleeffecten). De maximale watervraag voor Kornwerderzand wordt gevonden voor de periode van 5½ maand tot 19 november 2018 en bedraagt $3,22 \cdot 10^8 \text{ m}^3$. Dit is equivalent met gemiddeld $22 \text{ m}^3/\text{s}$, of een verhoging van de afvoer bij Kornwerderzand in deze periode met 41%. Daarmee zou een gemiddelde verhoging van het chloridegehalte over deze periode van $1,3 \text{ mg/l}$ moeten worden tegen gegaan¹².

In de scenario's met extra spuigangen is $1,45 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ extra gespuid bij Kornwerderzand en $1,08 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ extra bij Den Oever vergeleken met de oorspronkelijke scenario's. Deze extra spuien waren geformuleerd op basis van het huidige spuibeleid waarin $40 \text{ m}^3/\text{s}$ beschikbaar is in droge perioden. Tot half september bleek dit genoeg om het effect van vaargeulverdieping tot -10 m NAP over 31 km tegen te gaan, maar daarna treedt er toch een verhoging van de chloridemassa op vergeleken met de referentiesituatie zonder extra spuien. Het toegepaste extra spuivolume van Kornwerderzand is circa 45% van de extra watervraag die hierboven is geschat voor de periode van 5 juni – 19 november. Vanaf september zou dus ook extra spuidebiet nodig zijn, terwijl in die periode toch al meer werd gespuid.

Deze schattingen zijn gebaseerd op de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte van het IJsselmeer in de berekeningen. De uiteindelijke verhoging van het gemiddelde chloridegehalte komt hoger uit, op 5 mg/l . De watervraag om een dergelijke verhoging tegen te gaan zal aanzienlijk groter zijn dan de bovenstaande schatting.

7.2.7 Inzicht in de systeemwerking van toename zoutindringing door verdieping van de scheepvaartgeul naar Kornwerderzand

Op basis van de studie is het inzicht in de processen die spelen bij de toename van zoutindringing door de vaargeulverdieping naar Kornwerderzand sterk verbeterd.

De zoutlast van de scheepvaartsluizen kent een sterke variatie over de dag en over het jaar als gevolg van het sluisgebruik en de seizoensvariatie van het zoutgehalte in de westelijke Waddenzee (sterk afhankelijk van de spuidebieten aan de Afsluitdijk). In de zomer, als de IJsselafoer afneemt, is de zoutlast van de scheepvaartsluizen in de Afsluitdijk maximaal. De schuttingen bepalen de dichtheidsstroming in de Binnenhaven. Er is dan ook nauwelijks verschil tussen het chloridegehalte aan de bodem in de mond van de Binnenhaven in de referentieberekening en de scenariosimulaties.

¹² Deze verhoging van $1,3 \text{ mg/l}$ is relatief gering omdat 1) is uitgegaan van een niet ingespeeld model terwijl Figuur 3-6 laat zien dat jaarrond effecten van de verdieping verwacht mogen worden, en 2) de typische omstandigheden van het de doorgerekende periode van jaar 2018 waarbij lange tijd niet is doorgespoeld.

Uit de 3D animaties bleek dat de dichtheidsstroming vanaf de havenmond zich vooral via de diepere delen verspreidt, d.w.z. naar het zuiden naar de (al dan niet verdiepte) vaargeul en naar de weerszijden (oost en west). Uit de onverdiepte vaargeul stroomt het zout bij tijd en wijle ook zijdelinks af. Als de vaargeul verdiept is, gebeurt dat niet (of minder). Ook lijkt het dwarstransport dicht bij de havenmond dan iets geringer. Uit een globale schatting volgt dat in de verdiepte vaargeul van Scenario 1 ongeveer 10% meer zout afkomstig van de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand terecht komt dan in de referentiesituatie.

Wanneer de dichtheidsstroming over het steile talud de verdiepte vaargeul inloopt, treedt er menging op. Dit is van invloed op de snelheid van de dichtheidsstroming en het gemak waarmee het zoute water verderop uit de geul kan worden opgemengd. In alle gepresenteerde scenario's voert de verdiepte vaargeul onder invloed van dichtheidsstroming en windgedreven stroming effectief zout verder het IJsselmeer in, door het eerste relatief ondiepe gebied ten zuiden van Kornwerderzand heen. Behalve tot een verhoging van het gemiddelde chloridegehalte leidt de verdieping van de geul volgens alle scenario's ook tot een toename van de hoogtes van de pieken in het chloridegehalte, bijvoorbeeld bij Andijk.

Naast de dichtheidsstroming speelt menging en transport door windgedreven stroming een grote rol. De stroming is een combinatie van lokale aandrijving door de wind en stroming ten gevolge van de meer grootschalige waterbeweging verbonden aan op- en afwaai. De stroming kan daardoor een sterk 3D karakter hebben (zowel stroomrichting als snelheid kunnen sterk variëren met de diepte), dat verder gecompliceerd wordt door sterke bodemvariaties bij de verdiepte vaargeul.

De extra spuien bleken voor zowel de referentiesituatie als de maximaal verdiepte vaargeul slechts een uiterst kleine invloed op het chloridegehalte aan de bodem in de vaargeul te hebben. Dat betekent dat de variabiliteit door variërende zoutlasten en windcondities in het chloridegehalte overheersen. Meer spuien helpt wel om op grotere schaal het extra zout (chloride) ten gevolge van de vaargeulverdieping meer in het noorden en noordwesten van het IJsselmeer te houden.

Een van de inzichten uit de studie is ook dat in geval van grotere spuibolumes de toename van de zoutindringing ten gevolge van de vaargeulverdieping afgezet tegen de referentiesituatie (het relatieve effect) ook groter wordt, maar dat de maximale verhoging van het zoutgehalte (in absolute zin) toch lager is dan in situaties zonder extra spuien.

7.3 Aanbevelingen

7.3.1 Aanbevelingen ter verbreding van de conclusies

De volgende aanbevelingen en suggesties betreffen aanvullende scenario's die desgewenst kunnen helpen de conclusies verder uit te breiden onder gebruikmaking van het huidige modelinstrumentarium.

Nagaan wat de gevolgen zijn van de bestaande verdieping over een lengte van 1,7 km gecombineerd met verdieping in het zuidelijke deel

Omdat het doorsnijden van het relatief ondiepe gebied ten zuiden van Kornwerderzand een relatief groot effect heeft op de verhoging van het chloridegehalte in het IJsselmeer (zie Scenario 4), valt te overwegen of het voorlopig zoveel mogelijk handhaven van het resterende deel van deze ondiepe zone een werkbaar alternatief is, zolang er geen zoutlekbeperkende maatregelen zijn genomen bij de scheepvaartsluizen. Het resterende deel van de concessie van de provincie Fryslân blijft dan onaangeroerd (d.w.z. buiten de 1,7 km die reeds ontgraven is), en de aangevraagde concessie van Mineralis wordt geheel of alleen

voor het zuidelijke deel gerealiseerd. Wanneer dat relevant is, kan deze optie met het 3D modelinstrumentarium uit de huidige studie verder onderzocht worden.

Nagaan effectiviteit van derde drempel bij Rug van Lacon in Scenario 3

Mocht Scenario 3, de vaargeulverdieping met drie drempels, worden overwogen, dan kan het nog nuttig zijn doormiddel van een extra modelberekening na te gaan wat de effectiviteit is van de verst afgelegene drempel bij de Rug van Lacon. Voor de andere twee drempels zijn ook andere redenen om ze te laten staan, zoals vervuilde grond en de aanwezigheid van gaspijpleidingen.

Mitigeren door zoutlastreductie bij de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand

Een effectieve en solide zoutlastreductie bij de scheepvaartsluizen (door maatregelen op of bij de sluizen, zoals bellenschermen, etc.) kan helpen het verziltingsprobleem van het IJsselmeer door de vaarwegverdieping te verminderen. Deze reductie zou mogelijk 15 – 30 % moeten bedragen, en vooral in de zomer bij een drukke sluis goed moeten werken. De verwachting is wel dat dit met name de verhoging van het gemiddelde chloridegehalte helpt tegengaan, maar minder bijdraagt aan de reductie van de hogere pieken bij Andijk. Aanbevolen wordt om de reductiemethode eerst middels nieuwe berekeningen te onderzoeken, bijvoorbeeld door aanpassing van de zouttrandvoorwaarden op basis van de Zeesluisformulering.

NB. Het eerste gedeelte van de vaargeul, met een lengte van 1,2 km vanaf de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand, was in de huidige Scenario's niet verdiept. Indien dit gedeelte in een latere fase van de geplande vaarwegverdieping ook verdiept wordt tot bijvoorbeeld -6,7 m NAP moet er rekening mee gehouden worden dat het zouttransport naar de verdiepte vaargeul verder toeneemt, waardoor zwaardere maatregelen nodig zullen zijn dan hierboven voorgesteld.

7.3.2 Aanbevelingen om de betrouwbaarheid verder te vergroten

De volgende aanbevelingen en suggesties betreffen activiteiten om de betrouwbaarheid van de berekeningen verder te vergroten. Afhankelijk van de diepgang en omvang kunnen deze in een vervolgfase worden meegenomen of zullen er aparte onderzoeken voor moeten worden geformuleerd.

Indicatie van invloed van menging bij instroming zouttong in de verdiepte vaargeul

De menging die optreedt in de verdiepte vaargeul als gevolg van dichtheidsstroming over het steile talud aan het begin van de verdiepte vaargeul is een cruciale schakel in de transportketen die niet automatisch goed wordt weergegeven door het model. Aanbevolen wordt om de gevolgen van die onzekerheid nader af te schatten. In een eerste relatief snelle benadering is dit mogelijk door een berekening uit te voeren met flauwere hellingen aan het begin en einde van de verdiepte vaargeul (1:10 of flauwer) waarvan de effecten beter worden weergegeven door de software, en die naar verwachting aanleiding geven tot minder menging. Dit zou dan een indicatie van de bovengrens voor de verzilting kunnen opleveren. Daarnaast is verificatie van resultaten gewenst op basis van chloridemetingen in het prototype, bij de Binnenhaven en in de huidige verdiepte geul. Een meer fundamentele aanpak wordt verderop besproken.

Langere berekeningen om inspeleeffecten te onderzoeken

Aanbevolen wordt om een of meer langere berekeningen uit te voeren om te onderzoeken in welke mate inspeleeffecten een rol spelen in het beantwoorden van de vragen. Een bescheiden en toch effectieve verlenging is mogelijk al te bereiken door in januari of maart 2018 met de berekening te starten (5 à 3 maanden extra), als de verhoging van het chloridegehalte door vaargeulverdieping minimaal is. Het maximum in oktober zou dan

volgens het box-model goed kunnen worden geschat. Om ook het minimum goed te schatten is echter een langere inspeelperiode nodig door eerder te starten of langer door te rekenen.

Indicatie modelnauwkeurigheid

Om een scherper beeld van de modelnauwkeurigheid voor de huidige vragen te krijgen wordt aanbevolen om aanvullend op bovenstaande aanbevelingen enkele gevoeligheidsberekeningen uit te voeren voor de belangrijkste variabelen zoals windcondities en eventueel afvoercondities en zoutlasten bij de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand. Voor de berekeningen met extra spuien, waarin de zoutlast bij de scheepvaartsluizen onverwacht afnam, zouden deze randvoorwaarden opnieuw bepaald kunnen worden met de Zeesluisformulering, rekening houdend met de optredende daling van het meerpeil.

Onderzoek van menging bij instroming van een zouttong in een verdiepte vaargeul of zoutvang

Afgezien van de praktische benadering die boven is beschreven, is een meer fundamentele benadering wenselijk door verificatie en zo mogelijk validatie van de software op basis van geschematiseerde condities voor dichtheidsstroming over een helling waarvoor schaalmodelproeven zijn uitgevoerd en gepubliceerd, of waarvoor modelberekeningen met speciaal op dit probleem toegesneden codes worden gemaakt. Dit heeft een breder toepassingsgebied dan alleen vaargeulverdieping in het IJsselmeer, denk bijvoorbeeld aan de toepassing van zoutvangen voor de bestrijding van verzilting.

Kalibratie en verificatie 3D IJsselmeermodeel

Aanbevolen wordt om voor toekomstig gebruik te streven naar een gekalibreerd en gevalideerd 3D model voor transport van water, zout, warmte en stoffen in het IJsselmeer. De eerste aandachtpunten daarbij zijn de verbetering van de sluiting van de waterbalans en een verbetering van de zoutlasten bij scheepvaartsluizen en spuisluisen. Daarvoor is onder andere een uitbreiding van de monitoring gewenst, bijvoorbeeld van deur-opentijden van de scheepvaartsluizen, en monitoring van de zoutgehalten in de voorhavens en de spuihavens. Ander punten van aandacht zijn de uitbreiding van het IJsselmeermodeel met een temperatuurmodel, maar ook de schematisering van de wind (variatie in ruimte en tijd, formulering wrijvingscoëfficiënt) en de daarmee gepaard gaande menging.

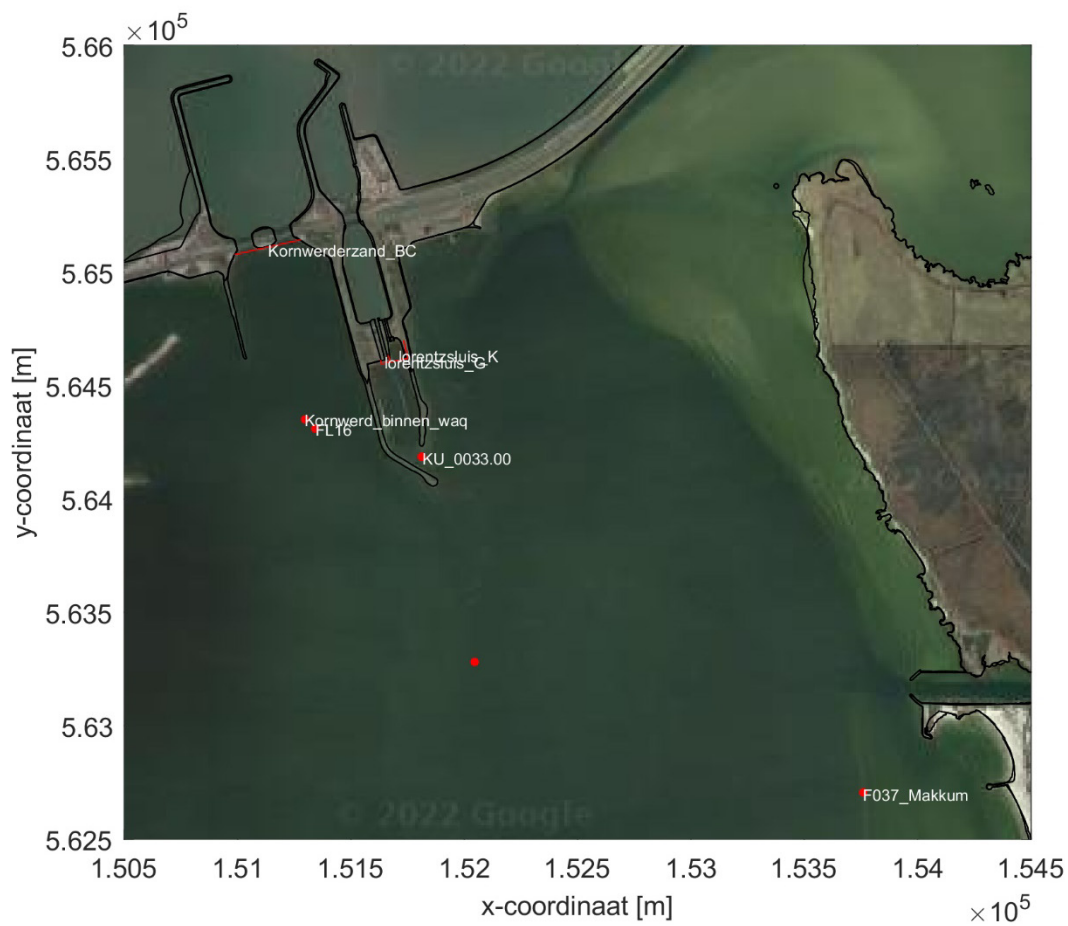
8 Referenties

- [1] Bijlsma, A.C. en M. Genseberger (2021). *Risico op toename verzilting IJsselmeer door verdieping vaargeul naar Kornwerderzand*. Deltares memo 11206830-021-ZWS-0003, 14 juli 2021.
- [2] Genseberger, M., A. Fujisaki en C. Eijsberg-Bak (2020). *D-HYDRO deelmodel IJsselmeer - modelbouw, eerste modelresultaten waterstanden in 2DH en zoutverspreiding in 3D*. Deltares rapport 11205258-008-ZWS-0005, Versie 1.3, 6 oktober 2020.
- [3] Bijlsma, A.C. en M. Genseberger (2020). *Scenario berekeningen voor beoordeling tijdelijke inzet Gemaal Lely - Periode maart – april 2021*. Deltares rapport 11206287-001, 27 november 2020.
- [4] NV Atlas Nederland NL3 - IJsselmeer & Randmeren, editie 2021.
- [5] Rijkswaterstaat Midden Nederland (2020). *Besluit inzake een vergunning op grond van de Ontgrondingenwet voor het ontgronden van een deel van de bodem in de vaarweg Kornwerderzand in het IJsselmeer door de provincie Fryslân*. Kenmerk RWS-2020/1068. Beschikking dd. 14 januari 2020.
- [6] Van Oord (2020). *Uitloding vaargeul Kornwerderzand - Workum-ASB-Dredging - A1 - 15.4756_508*. Survey datum 29 oktober 2020.
- [7] Weiler, O.M. (2019). *Verkenning noodmaatregelen verzilting IJsselmeer. Schutoperatie en bellenschermen*. Deltares, rapport 11203735-005-ZWS-0002, oktober 2019.
- [8] RIWA – Rijn (2020) Jaarrapport 2019 - De Rijn. RIWA-Rijn, Vereniging van Rivierwaterbedrijven, september 2020. ISBN/EAN 978-90-6683-181-0.
- [9] Veen, N. van (2021). *Zoutgedrag in de diepe delen bij Kornwerderzand*. Rijkswaterstaat-WVL Memo, Versie 1, 22 februari 2021.
- [10] Veen, N. van & S. van Doorn (2021). *Inzet omloopriolen grote schutsluis Kornwerderzand ten behoeve van zoutwaterafvoer*. Rijkswaterstaat-Informatie.
- [11] Weiler, O.M. (2019). *Zeesluizen Farmsum: zoutlast op het Eemskanaal*, Deltares rapport 11203735-012-ZWS-0003, 23 oktober 2019.

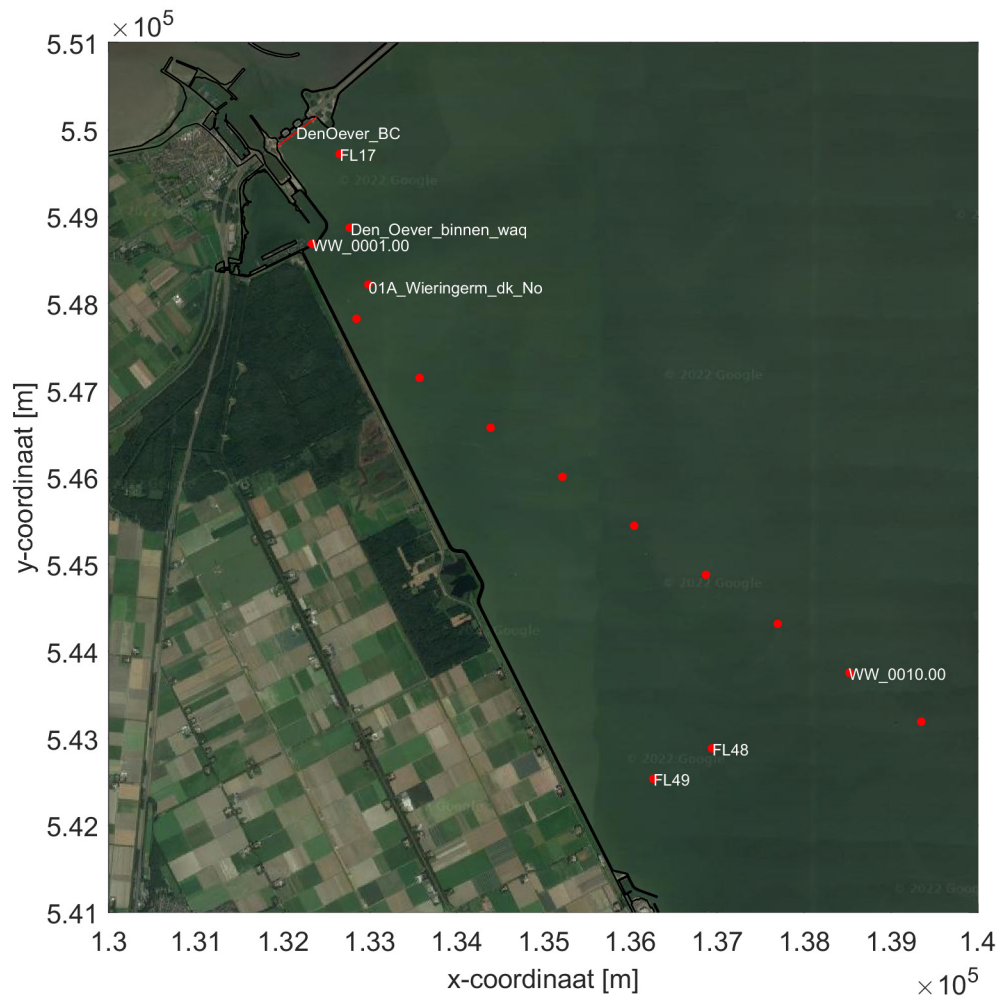
A Details modelopzet

A.1 Ligging monitoring stations

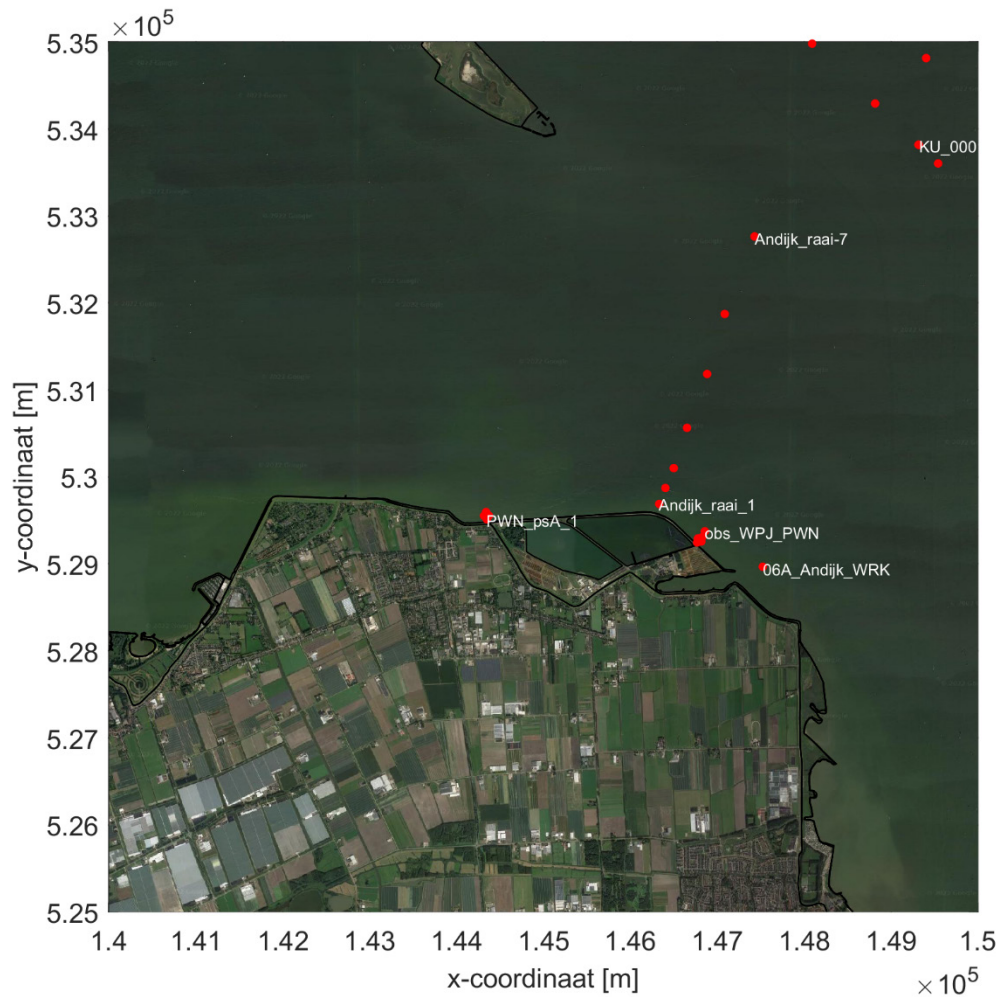
Figuur 2-15 geeft een overzicht van de ligging van de monitoring stations en raaien in het IJsselmeer. Figuur A-1 – Figuur A-4 geven meer gedetailleerde plots van deelgebieden.



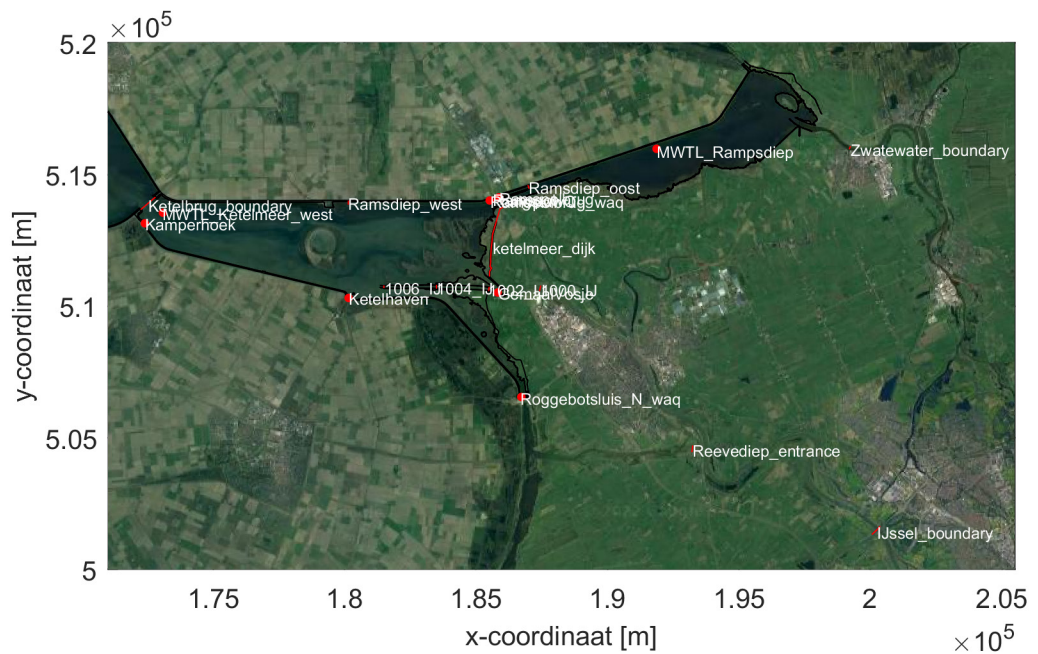
Figuur A-1. Ligging monitoring stations en cross-secties bij Kornwerderzand.



Figuur A-2. Ligging monitoring stations en cross-sectie bij Den Oever.



Figuur A-3. Ligging monitoring stations bij Andijk.



Figuur A-4. Ligging monitoring stations en cross-secties bij Ketelmeer, Vossemeer, Ramsgeul en Zwarte Meer.

A.2 Aanpassing bodem ten opzichte van baseline-ijsselmeer-j19_6-v2

Memo

Datum 25 januari 2022	Ons kenmerk 11206830-022-ZWS-0002	Aantal pagina's 1 van 9
Contactpersoon Menno Genseberger	Doorkiesnummer +31(0)88 335 8453	E-mail Menno.Genseberger@deltares.nl

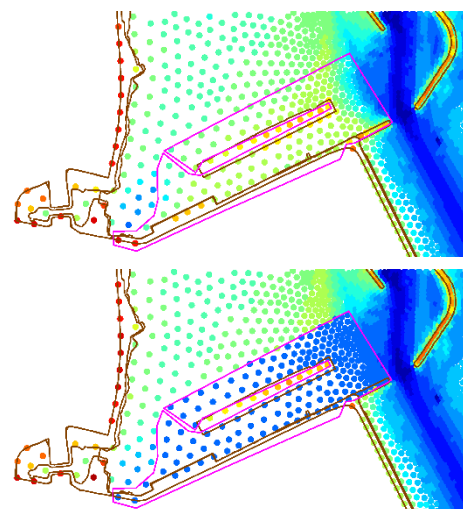
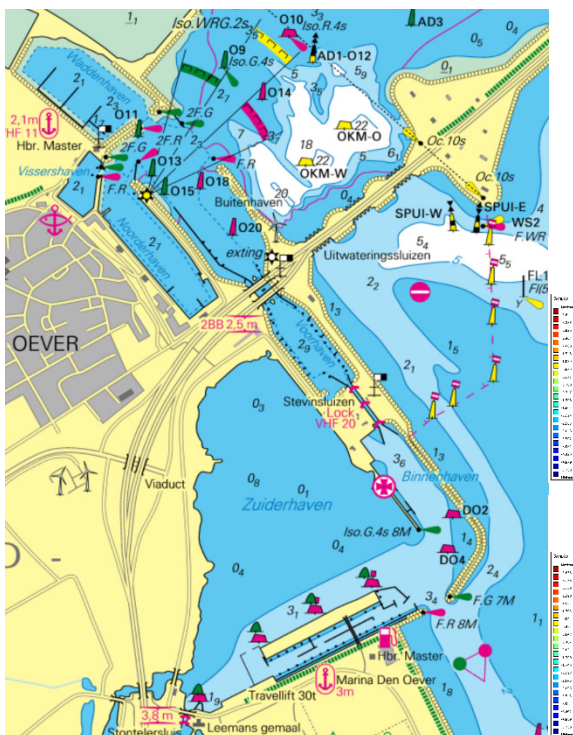
Onderwerp
aanpassingen bodemhoogte D-HYDRO model IJsselmeer (dflowfm3d-ijsselmeer-j19_6-w7)

1 Inleiding

De bodemhoogte voor het D-HYDRO model IJsselmeer dflowfm3d-ijsselmeer-j19_6-w7 is nagelopen en aangepast. De oorspronkelijke bodemhoogte van dit model is gebaseerd op Baseline versie baseline-ijsselmeer-j19_6-v2. Dit model bevat naast het IJsselmeer ook het Ketelmeer, het Vossemeer, de Ramsgeul en het Zwarte Meer.

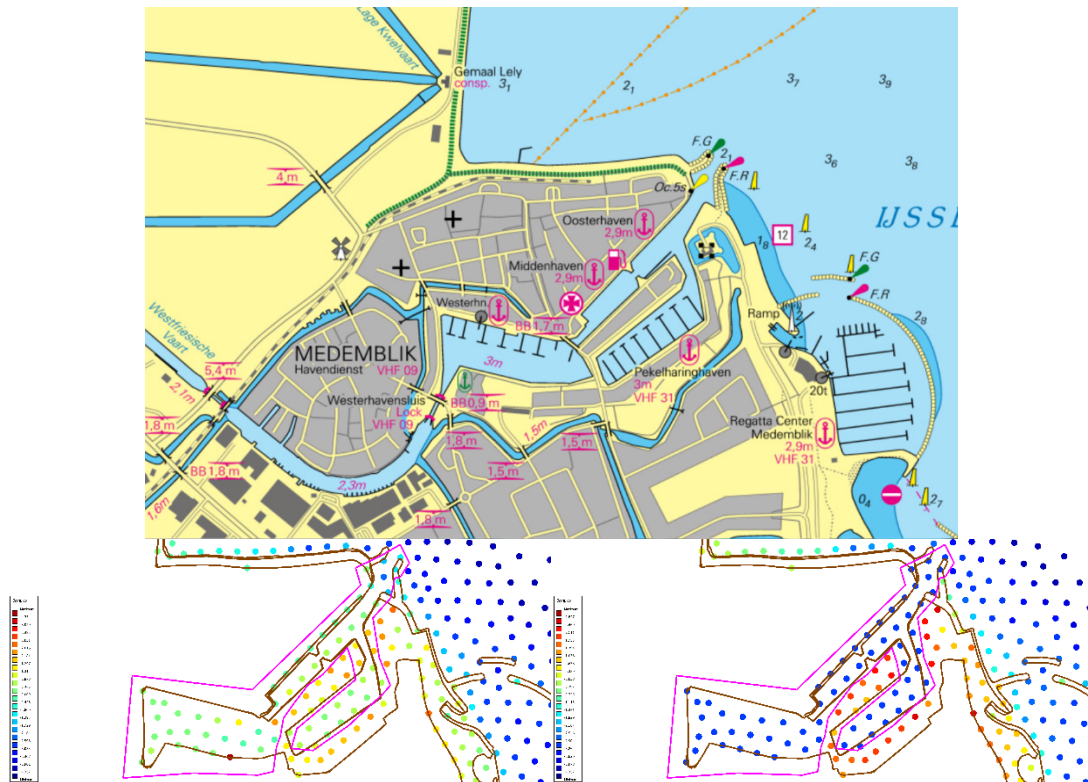
Gebruikte waterkaart om bodemhoogte na te lopen: NV Atlas Nederland NL3 - IJsselmeer & Randmeren, editie 2021 (zowel papieren als digitale versie, figuren in deze memo bevatten uitsneden van de digitale versie). Het nalopen is begonnen bij Kornwerderzand en dan via de randen van de meren in dit model tegen de klok in. In het Vossemeer, de Ramsgeul en het Zwarte Meer zijn geen opvallende zaken gezien. Tevens zijn in dit document een aantal lozingslocaties gemeld die zijn aangepast vanwege de lokale bodemhoogte.

2 Den Oever



Aanpassingen voor Zuiderhaven / Marina Den Oever bij Den Oever. Links waterkaart. Rechtsboven oorspronkelijke samples op roosterpunten van bodemhoogte. Rechts onder omcirkeld door polygoon (bestandsnaam Zuiderhaven_Den_Oever_op_min_3m1_NAP.pol) naar -3.1 m +NAP aangepaste samples op basis van waterkaart.

3 Medemblik



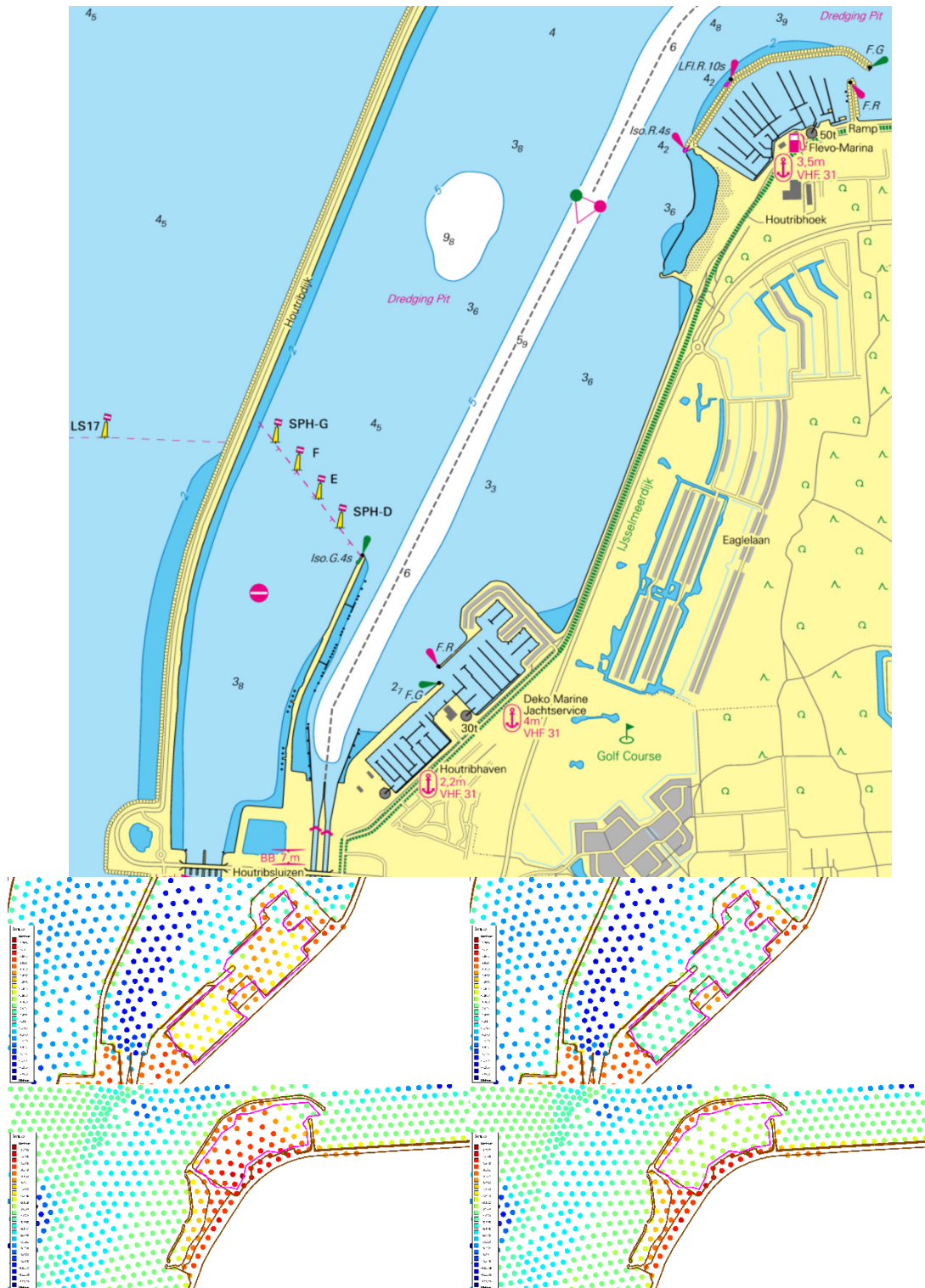
Aanpassingen voor havens bij Medemblik. Boven waterkaart. Linksonder oorspronkelijke samples op roosterpunten van bodemhoogte. Rechtsonder omcirkeld door polygoon (bestandsnaam havens_Medemblik_op_min_3m_NAP.pol) naar -3.0 m +NAP aangepaste samples op basis van waterkaart.

4 Enkhuizen



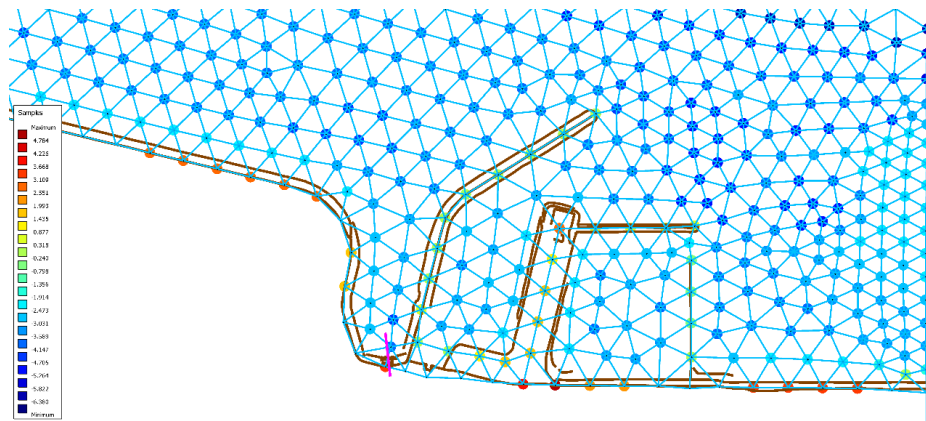
Aanpassingen voor havens bij Enkhuizen. Boven waterkaart. Links daaronder oorspronkelijke samples op roosterpunten van bodemhoogte bij Compagnieshaven. Rechts daarvan omcirkeld door polygoon (bestandsnaam Compagnieshaven_Enkhuizen_op_min_3m2_NAP.pol) naar -3.2 m +NAP aangepaste samples op basis van waterkaart. Links daaronder oorspronkelijke samples op roosterpunten van bodemhoogte bij Buitenhaven en Veerhaven. Rechts daarvan omcirkeld door polygoon (bestandsnaam Buitenhaven_en_Veerhaven_Enkhuizen_op_min-3m_NAP.pol) naar -3.0 m +NAP aangepaste samples op basis van waterkaart. Links onderaan oorspronkelijke samples op roosterpunten van bodemhoogte bij Buyshaven en Krabbershaven. Rechts onderaan omcirkeld door polygoon (bestandsnaam Buyshaven_en_Krabbershaven_Enkhuizen_op_min_3m_NAP.pol) naar -3.0 m +NAP aangepaste samples op basis van waterkaart.

5 Lelystad



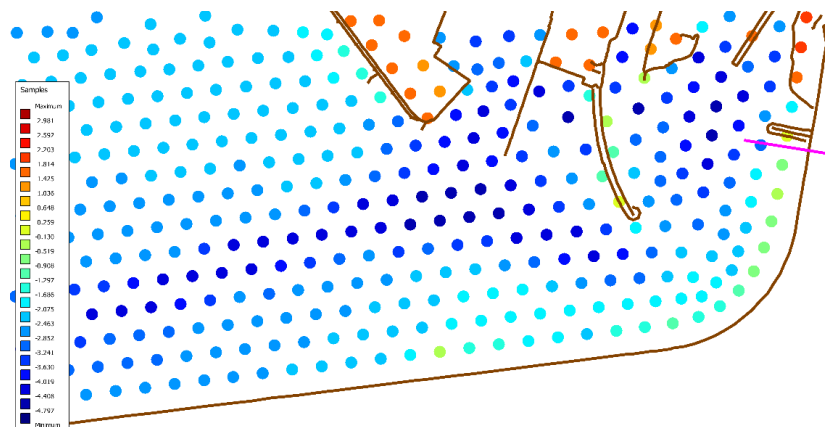
Aanpassingen voor havens bij Lelystad. Boven waterkaart. Links midden oorspronkelijke samples op roosterpunten van bodemhoogte bij Houtribhaven. Rechts midden omcirkeld door polygoon (bestandsnaam Houtribhaven_Lelystad_op_min_2m2_NAP.pol) naar -2.2 m +NAP aangepaste samples op basis van waterkaart. Links onderaan oorspronkelijke samples op roosterpunten van bodemhoogte bij Flevo Marina. Rechts onderaan omcirkeld door polygoon (bestandsnaam Flevo-Marina_Lelystad_op_min_3m5_NAP.pol) naar -3.5 m +NAP aangepaste samples op basis van waterkaart.

6 Ketelmeer

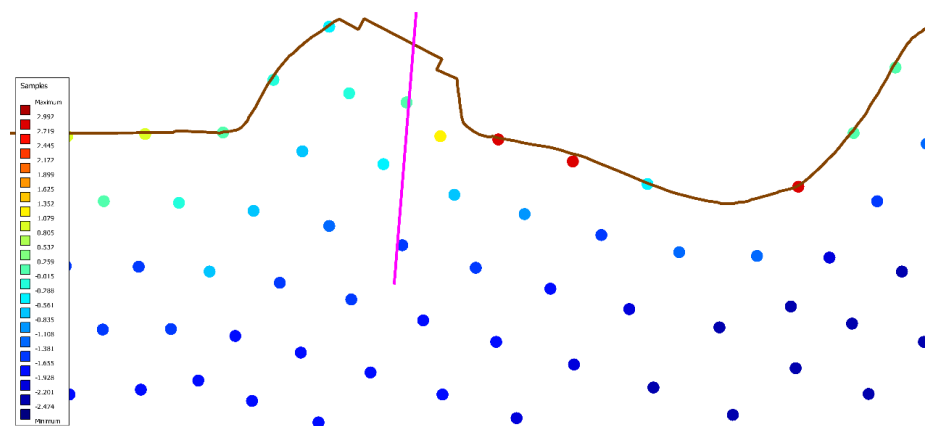


Aanpassing lozingslocatie gemaal Colijn hoog en laag in Ketelmeer ter hoogte van IJsseloo, nieuwe locatie is het uiteinde van het roze lijnstukje binnen drie bodemhoogte samples.

7 Lemmer

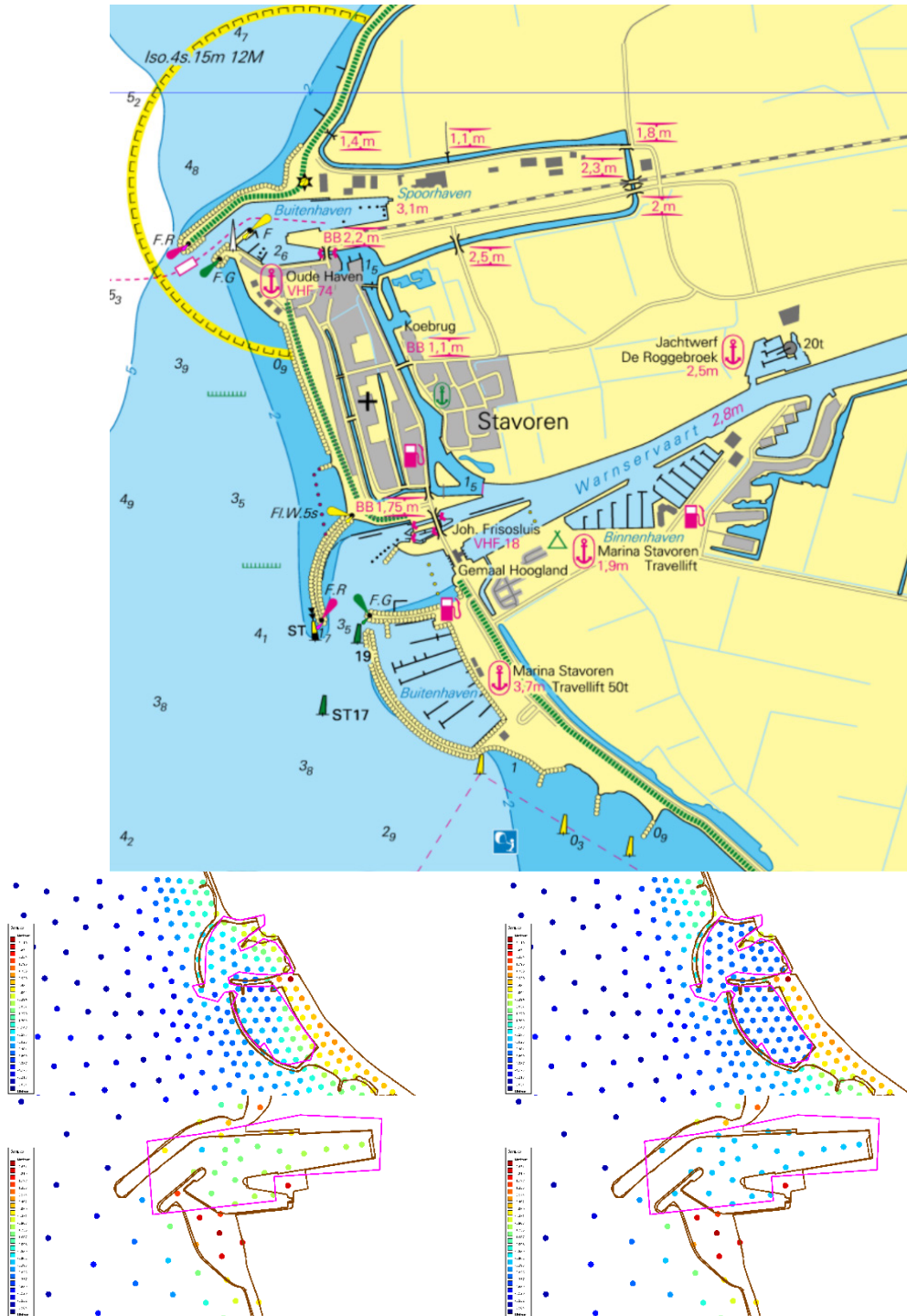


Aanpassing lozingslocatie gemaal Buma bij Lemmer, nieuwe locatie is het uiteinde van het roze lijnstukje binnen drie bodemhoogte samples.



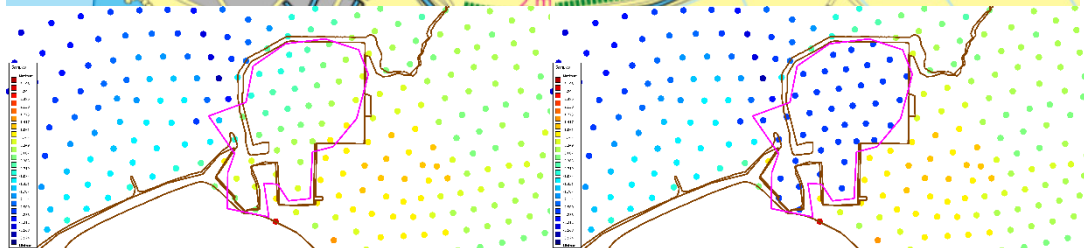
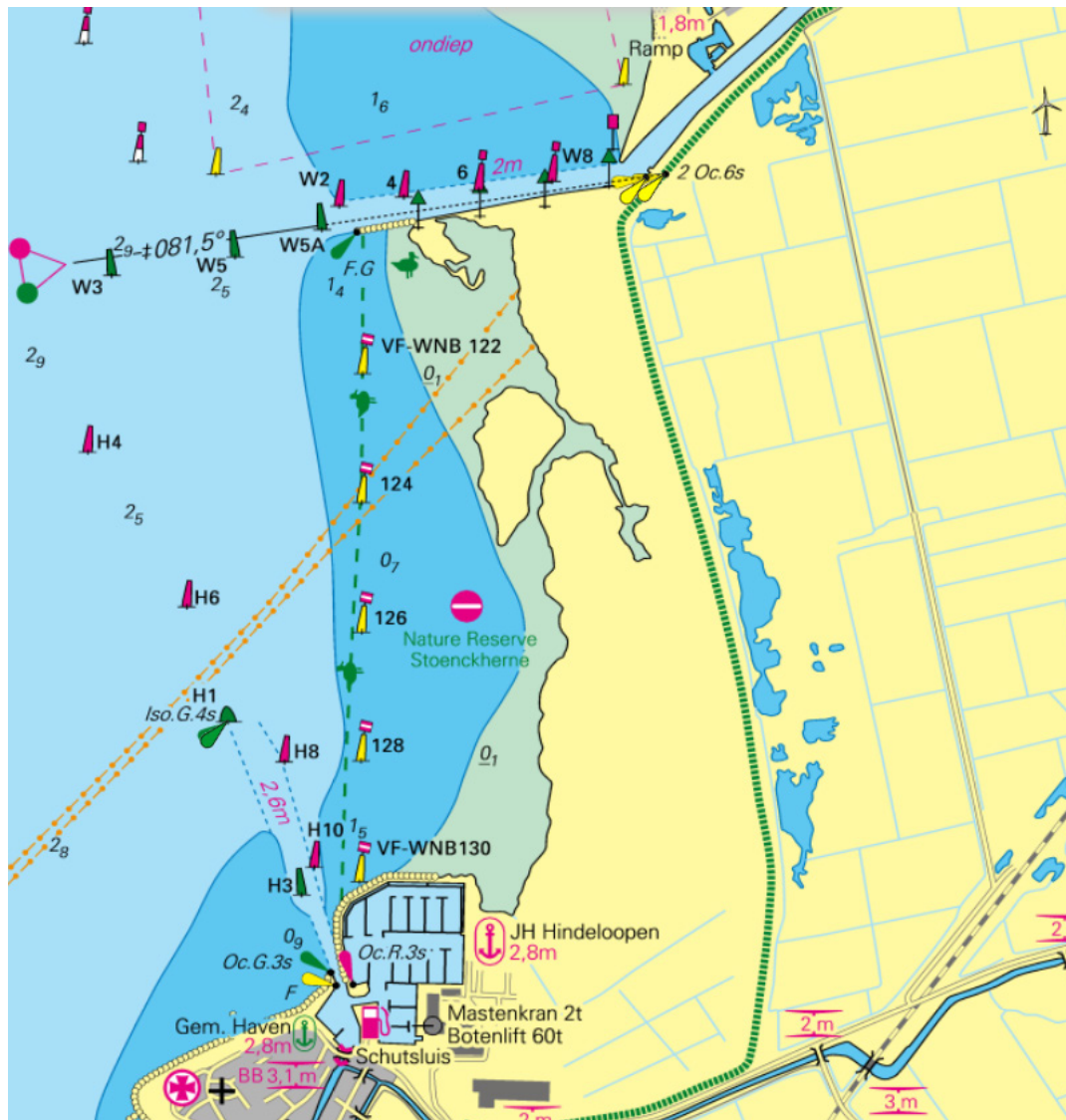
Aanpassing lozingslocatie Wouda gemaal bij Lemmer, nieuwe locatie is het uiteinde van het roze lijnstukje binnen drie bodemhoogte samples.

8 Stavoren



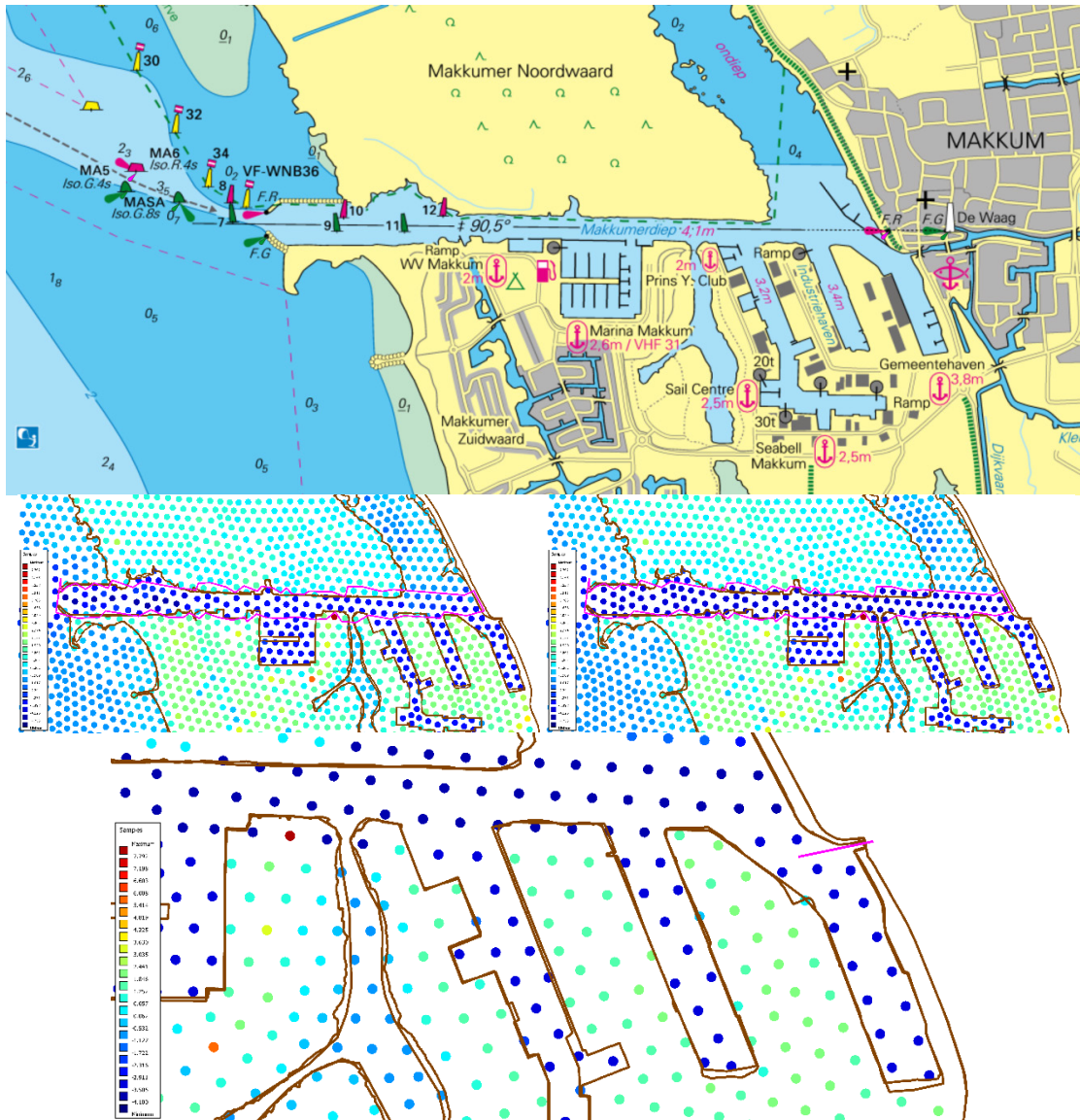
Aanpassingen voor havens bij Stavoren. Boven waterkaart. Links midden oorspronkelijke samples op roosterpunten van bodemhoogte bij Marina Stavoren. Rechts midden omcirkeld door polygoon (bestandsnaam Marina-Stavoren_op_min_3m5_NAP.pol) naar -3.5 m +NAP aangepaste samples op basis van waterkaart. Links onderaan oorspronkelijke samples op roosterpunten van bodemhoogte bij Buitenhaven van Stavoren. Rechts onderaan omcirkeld door polygoon (bestandsnaam Buitenhaven_Stavoren_op_min_3m1_NAP.pol) naar -3.1 m +NAP aangepaste samples op basis van waterkaart.

9 Hindeloopen



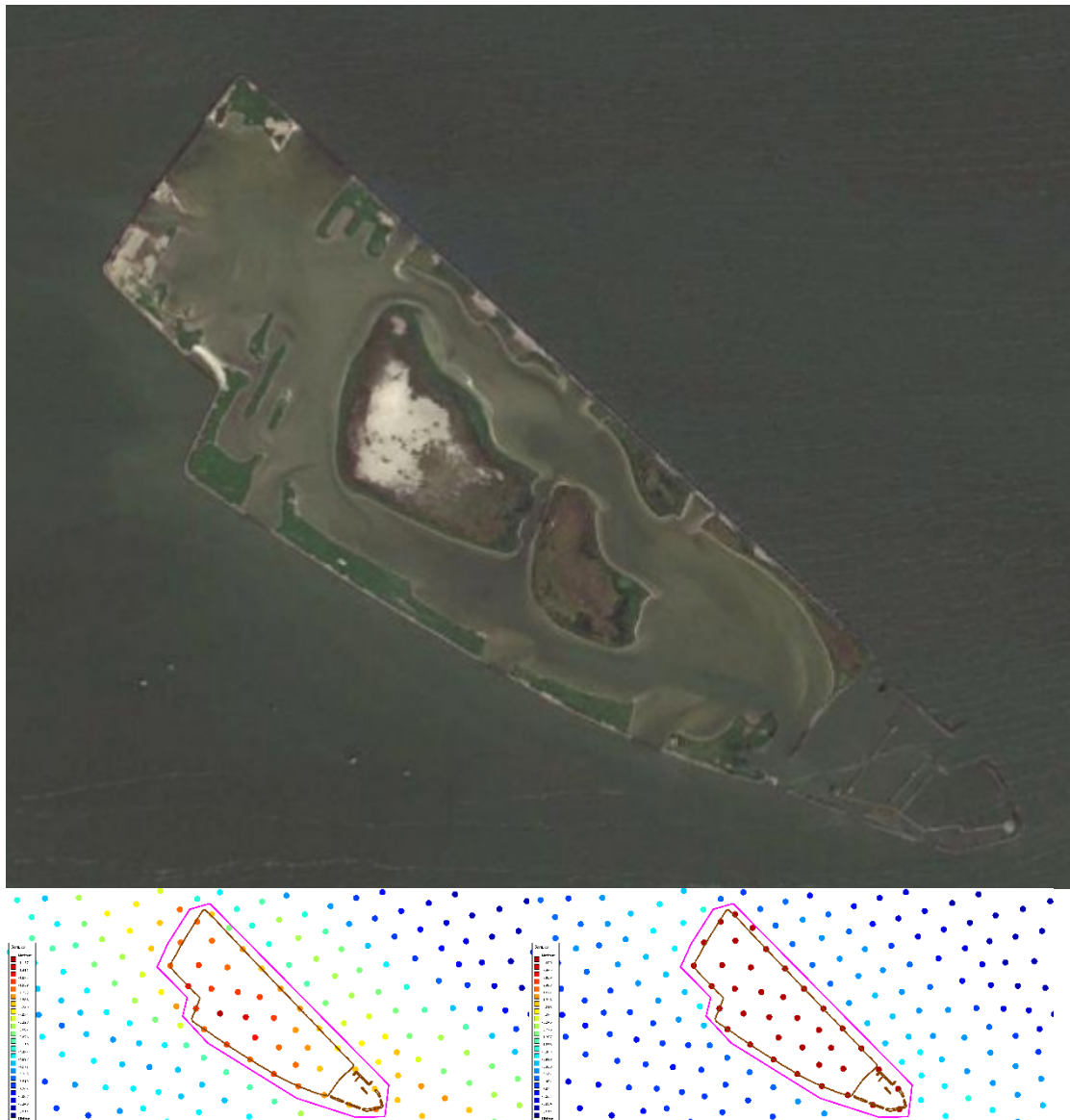
Aanpassingen voor Jachthaven Hindeloopen. Boven waterkaart. Links onderaan oorspronkelijke samples op roosterpunten van bodemhoogte. Rechts onderaan omcirkeld door polygoon (bestandsnaam jachthaven_Hindeloopen_op_min_2m8_NAP.pol) naar -2.8 m +NAP aangepaste samples op basis van waterkaart.

10 Makkum



Aanpassingen bij Makkum. Boven waterkaart. Links midden oorspronkelijke samples op roosterpunten van bodemhoogte bij Makkumerdiep. Rechts midden omcirkeld door polygoon (bestandsnaam Makkumerdiep_op_min_4m1_NAP.pol) naar -4.1 m +NAP aangepaste samples op basis van waterkaart. Onderaan aanpassing lozingslocatie schutsluis Makkum, nieuwe locatie is het uiteinde van het roze lijnstukje binnen drie bodemhoogte samples.

11 De Kreupel



Eiland De Kreupel in het IJsselmeer boven Andijk. Boven beeld van september 2021 vanuit Google Earth. Op dit beeld lijkt de oeverbescherming door te lopen, op een aantal locaties is het wel nat maar er lijkt geen hoofdstroming te zijn. Ruurd Noordhuis van Deltares gaf aan dat op een aantal plekken het 4m +NAP is. Daarom De Kreupel nu overal voorlopig – totdat er betere gegevens zijn van Rijkswaterstaat – op 4m +NAP droog gezet. Links onder oorspronkelijke samples op roosterpunten van bodemhoogte. Rechts onder omcirkeld door polygoon (bestandsnaam De-Kreupel_op_plus_4m_NAP.pol) naar +4.0 m +NAP aangepaste samples.

B Zoutlast scheepvaartsluizen Kornwerderzand

Memo

Datum

25 juli 2022

Aantal pagina's

1 van 10

Contactpersoon

Noor ten Harmsen van der Beek
Otto Weiler

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 7911

E-mail

Noor.tenHarmsenvanderBeek@deltares.nl

Onderwerp

Aanpak zeesluisformulering voor Kornwerderzand

1 Inleiding

Het 3D-model van het IJsselmeer heeft behoefte aan randvoorwaarden, waaronder de zoutvracht die naar binnenkomt door het schutproces van de sluizen te Kornwerderzand. Om deze randvoorwaarden te berekenen wordt gebruik gemaakt van de Zeesluisformulering (ZSF). Om de berekening met de ZSF te doen is het zoutgehalte net buiten de sluiscolken nodig, maar dat is onbekend, en wordt bovendien mede bepaald door de schutoperatie. Om die reden zijn in dit project aan weerskanten van de sluizen 'bakjes' gekoppeld aan de ZSF, waarmee er een relatie wordt gelegd met het zoutgehalte in de Waddenzee c.q. het IJsselmeer: die beide zoutgehalte zijn randvoorwaarden voor de berekening.

Hierbij wordt verondersteld dat het zoutgehalte op de Waddenzee niet wezenlijk wordt beïnvloed door de schutsluizen. Hetzelfde geldt min of meer voor het IJsselmeer: de variatie van het zoutgehalte op de IJsselmeer is weliswaar relevant voor de zoetwaterfunctie, maar de variatie is tegelijkertijd dermate klein dat deze het transport van zout door de schutsluizen niet of nauwelijks zal beïnvloeden. De waarden aan beide kanten worden daarom gebaseerd op metingen, waarmee het typisch verloop over het jaar wordt meegenomen in de berekeningen.

De transporten tussen de bakjes worden bepaald o.b.v. advectief transport en dichtheidsstroming. De transporten over de sluishoofden wordt berekend met de ZSF, o.b.v. de schutoperatie. De transporten berekend door de ZSF voor het binnensluishoofd worden als randvoorwaarden opgelegd aan het 3D-model, dat vervolgens de verspreiding van het zout over de Binnenhaven en over het IJsselmeer berekent.

2 Invoer

De invoer van het bakjesmodel inclusief de ZSF bestaat uit de geometrie, de randvoorwaarden (saliniteit en waterstanden aan beide kanten van het bakjesmodel) en de operatie van de schutsluizen.

2.1 Geometrie

Er zijn twee sluizen in Kornwerderzand: de Grote Sluis en de Kleine Sluis. De sluizen zijn via de Binnenhaven verbonden met het IJsselmeer en via de Voorhaven en Buitenhaven met de Waddenzee, zie Figuur 2-1.



Figuur 2-1 Bakjes model Kornwerderzand

2.1.1 Geometrie sluiskolken

De geometrie van de sluiskolken is overgenomen uit Weiler (2019), zie Tabel 2-1. Het gaat hier om de totale lengte tussen de deuren en totale kolkbreedte.

Tabel 2-1 Afmetingen sluiskolken Kornwerderzand.

	Grote Sluis	Kleine Sluis
Afstand tussen deuren	148 m	74 m
Kolkbreedte	14 m	9 m
Kolkbodem	-4.7 mNAP	-4.7 mNAP
Drempelhoogte	0.3 m (beide kanten)	0.3 m (beide kanten)

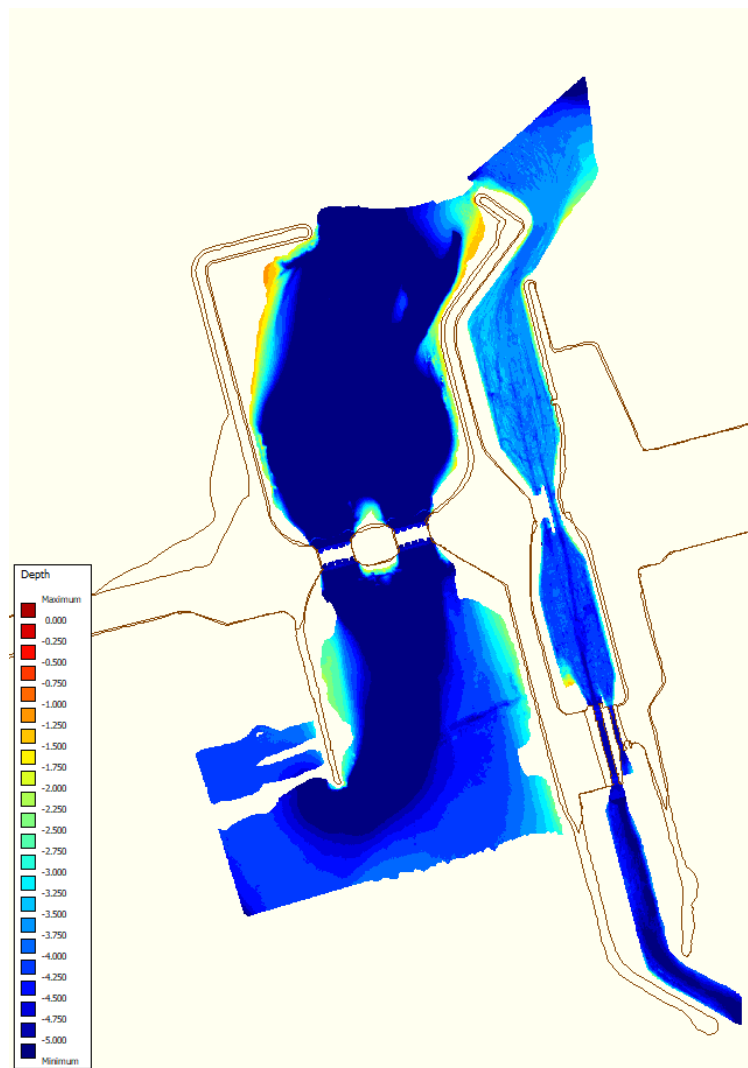
2.1.2 Bakjesmodel

Voor het bakjesmodel is de diepte en breedte van de monding tussen de havenbassins en het volume van elk havenbassin van belang. Deze afmetingen zijn geschat aan de hand van een beschikbare survey van 9-12-2015 (Reijmerink en Bijlsma, 2016), gemiddeld naar een 5x5m rooster met extrapolatie voor de ontbrekende dieptes, zie Tabel 2-2.

Het volume in de bakjes wordt constant gehouden. In de werkelijkheid is het volume per bakje afhankelijk van de waterstand. Vooral bij de Voorhaven en bij de Buitenhaven zal dit voor een verschil zorgen. In de berekening wordt er met massa zout gerekend. Samen met het volume van het bakje geeft dit de saliniteit. Het niet meenemen van het veranderende volume geeft daardoor dus ook een verschil in saliniteit (zie voor andere effecten paragraaf 3.1).

Tabel 2-2 Afmetingen van de bakjes voor de Binnenhaven, Voorhaven en Buitenhaven van Kornwerderzand.

	Binnenhaven	Voorhaven	Buitenhaven
Diepte monding	-4 m NAP	-4 m NAP	-5 m NAP
Breedte monding	60 m	33 m	50 m
Geschat volume t.o.v. gemiddelde waterstand	222 377 m ³	216 261 m ³	254 164m ³



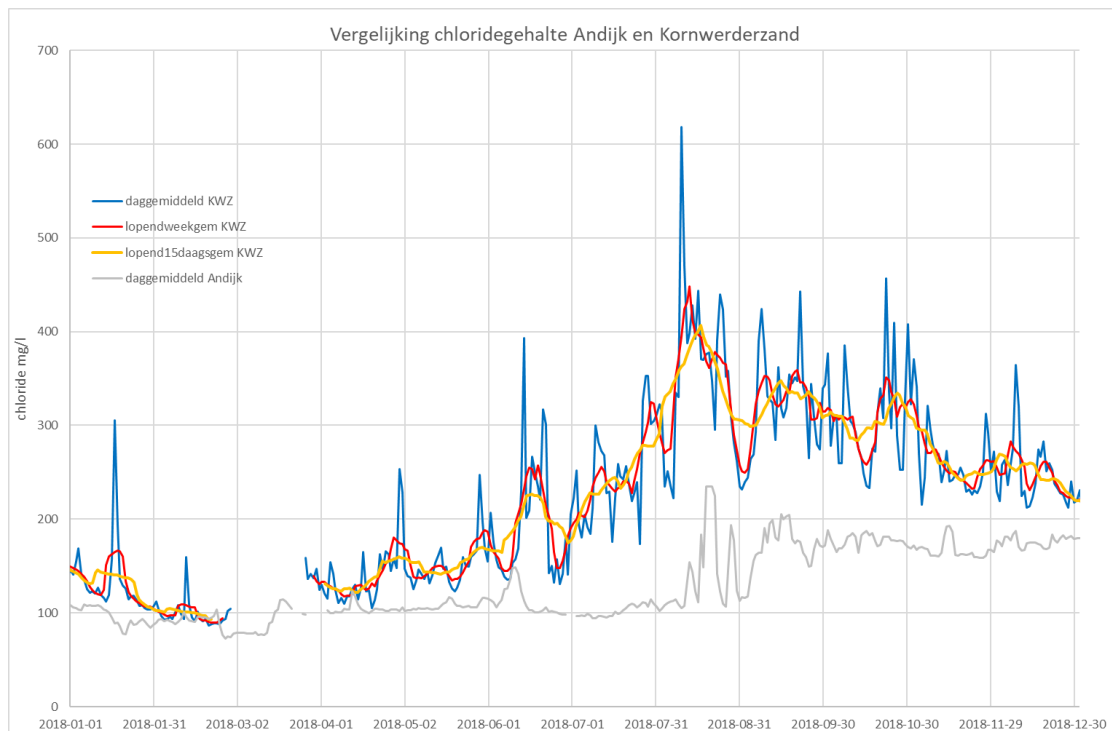
Figuur 2-2 Bodemniveau rondom spui- en schutsluizen Kornwerderzand in m ten opzichte van NAP.

2.2 Randvoorwaarden bakjesmodel

De randvoorwaarden voor het bakjesmodel bestaan uit de saliniteiten, aan beide kanten (op het IJsselmeer en op de Waddenzee), de waterstanden en de schutoperatie. Door het beschouwen van de transporten tussen de bakjes volgen de randvoorwaarden (saliniteiten) bij de sluisdeuren zoals benodigd voor de Zeesluisformulering.

2.2.1 Saliniteit IJsselmeer

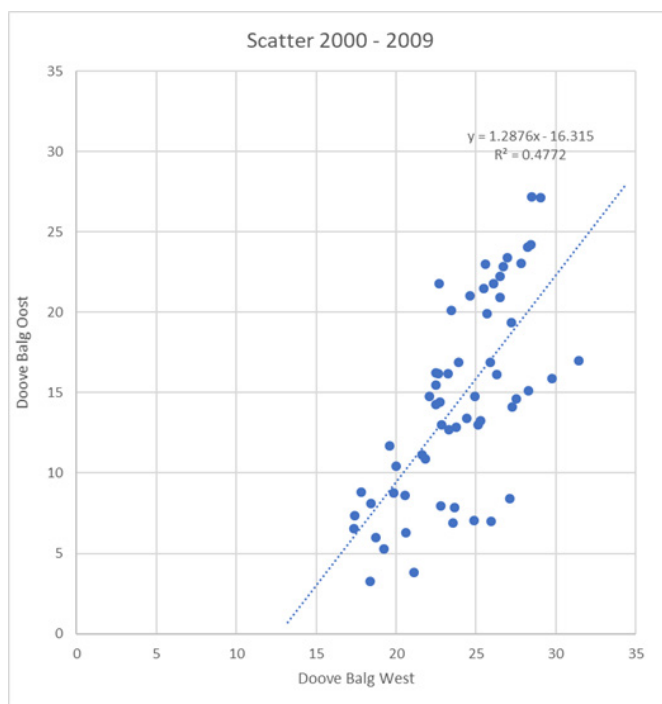
Voor het zoutgehalte op het IJsselmeer wordt het lopend weekgemiddelde van de saliniteit in station FL16 Kornwerderzand (rode lijn in Figuur 2-3, op basis van gegevens van RWS (2021a)) aangehouden. De saliniteit is gegeven in mg/L Cl en vervolgens omgerekend naar kg/m³ zout via de Unesco 1981 formulering (temperatuur als 15 graden aangenomen) voor toepassing in het bakjesmodel en de Zeesluisformulering. De periode met ontbrekende data is aangevuld door middel van lineaire interpolatie.



Figuur 2-3 Chloridegehalte bij station FL16 bij Kornwerderzand over 2018.

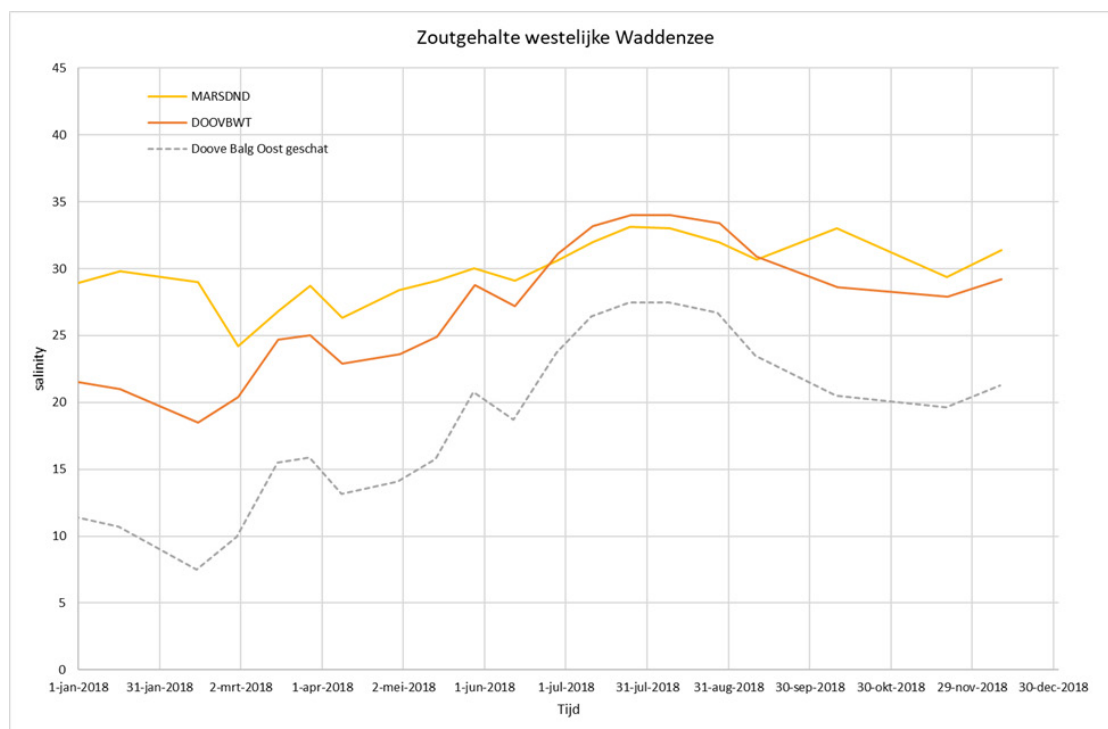
2.2.2 Saliniteit Waddenzee

Voor de saliniteit op de Waddenzee zou meetlocatie Doove Balg Oost geschikt zijn. Voor 2018 is hiervoor echter geen meetreeks beschikbaar. Daarom wordt gebruikgemaakt van een meetreeks voor Doove Balg West en een trendrelatie tussen Doove Balg Oost en West uit een scatterplot van MWTL metingen uit de periode 2000-2009, zie Figuur 2-4.



Figuur 2-4 Scatterplot van MWTL metingen van het zoutgehalte (psu) van het oppervlakte water bij Doove Balg Oost en Doove Balg West over de periode 2000-2009, met de geschatte trendrelatie tussen beide reeksen.

Gebruikmakend van de trendrelatie is een berekening gemaakt voor het verloop van de saliniteit bij Doove Balg Oost in 2018 o.b.v. het gemeten verloop bij Doove Balg West in 2018 (RWS, 2021a), zie Figuur 2-5. De variatie hierin loopt van 7.5 tot 27.5 PSU. De schatting begint relatief zoet en loopt daarna hoog op. Vergelijking met 2003 (27 PSU maximaal gemeten) en 2012 (29 PSU maximaal geschat) geeft aan dat het een realistische schatting is. Het zoutgehalte blijft in de schatting in het najaar relatief hoog vanwege de langdurige droogte en dit is consistent met de metingen bij Doove Balg West en Marsdiep Noord, die verder westelijk liggen en daarom een geringere zoetwater invloed laten zien.

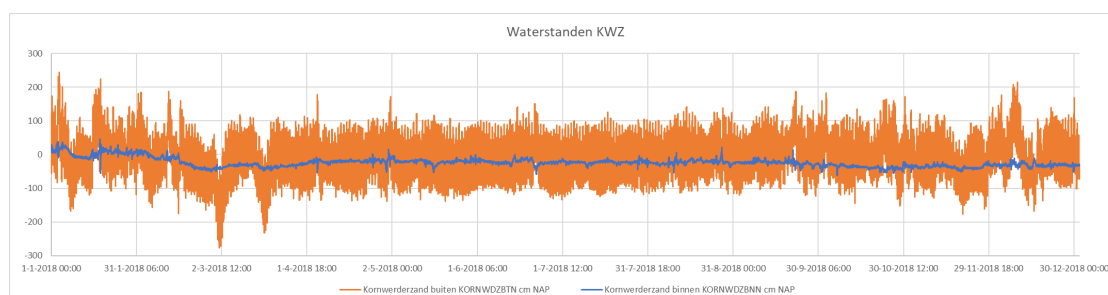


Figuur 2-5 Zoutgehalte (psu) geschat voor Doove Balg Oost in 2018, vergeleken met metingen bij Doove Balg West en Marsdiep Noord.

Voor gebruik in het bakjesmodel en de Zeesluisformulering zijn deze waarden vervolgens omgerekend naar kg/m^3 zout via de Unesco 1981 formulering (met de temperatuur als 15 graden aangenomen).

2.2.3 Waterstand

De waterstand aan beide kanten (RWS, 2021a – Waterstand Kornwerderzand binnen en buiten) wordt gebruikt als invoer voor de berekening met de Zeesluisformulering. Het getij en de fluctuaties aan de IJsselmeerkant worden echter (nog) niet meegenomen in de uitwisseling tussen het buitengebied en de voorhavens (zie paragraaf 2.1.2 hierboven).



Figuur 2-6 Waterstanden bij Kornwerderzand buiten en binnen over 2018.

2.3 Sluisoperatie

De sluisoperatie wordt afgeleid van de registratie door RWS in IVS 90. Deze registratie beschrijft primair de sluispassages. Dit wordt omgeschreven naar een sluisoperatie voor de Zeesluisformulering onder de volgende aannames:

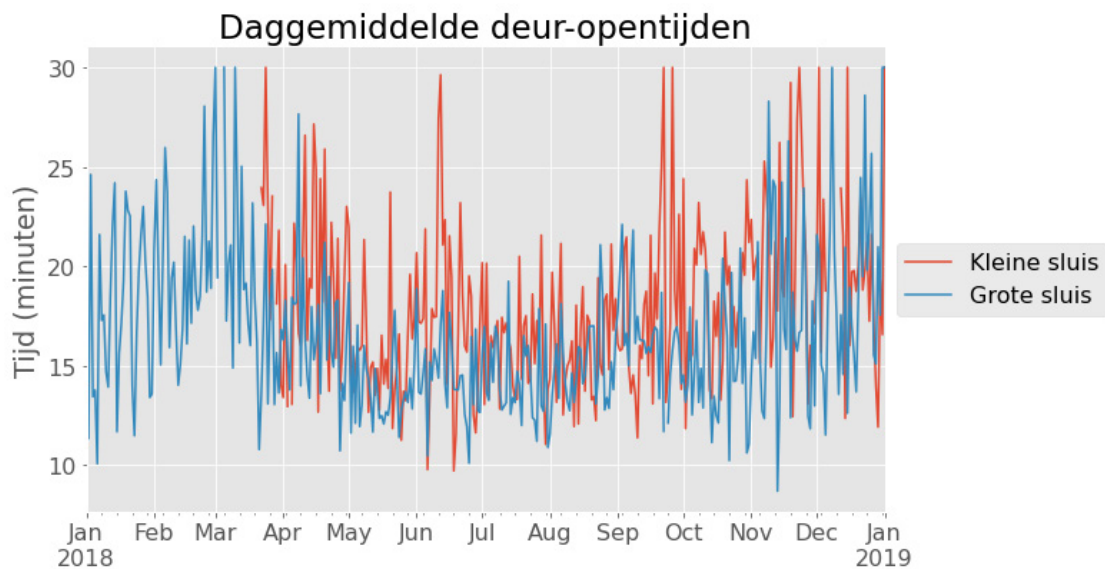
- Tijd om deur te openen of te sluiten: 2 minuten
- Maximale deur-opentijd: 30 minuten
- Minimale deur-opentijd: 2 minuten
- Nivelleertijd, een lineair verband tussen
 - 0 m verval: 3 minuten
 - 4 m verval: 10 minuten
- De waterverplaatsing door de schepen wordt verwaarloost om translatiegolven in het 3D-model te voorkomen. De invloed van de waterverplaatsing op de totale zoutlast is beperkt.

De registratie van de sluispassages bevat een uitvaartijdstip per schutting. Dit tijdstip wordt gebruikt als het tijdstip waarop de deur aan de kant van het uitvaren geopend is (klaar is met open gaan). Dit wordt vervolgens gecontroleerd op twee punten. Er wordt gekeken of de volgende schutting niet eerder eindigt dan de vorige. Als dat wel het geval is wordt deze schutting overgeslagen. De tweede controle is dat er bij twee schuttingen in dezelfde richting een lege schutting wordt tussengevoegd.

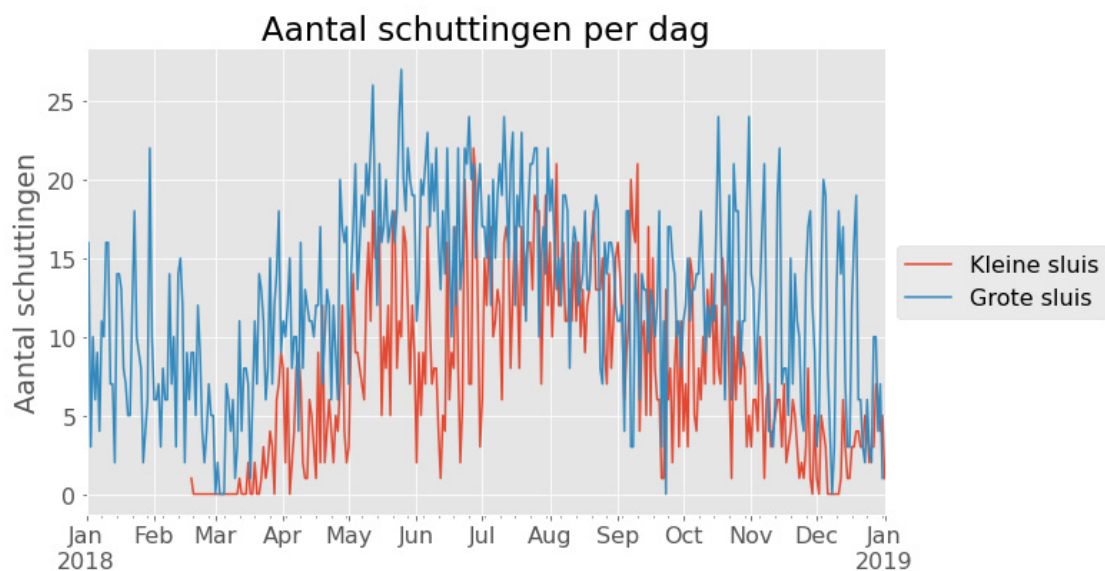
Vervolgens wordt met behulp van bovenstaande aannames geschat wanneer, voor dezelfde passage, de sluisdeur aan de kant van het invaren dicht ging. Dit wordt gedaan door het in rekening brengen van de tijd om de deuren te openen voor het uitvaren en ook, daaraan voorafgaand, de tijd voor het nivelleren. Het begin van het nivelleren is dan het tijdstip dat de deur aan de kant van het invaren gesloten was. De duur van het nivelleren wordt bepaald aan de hand van het verval over de sluisdeuren. Vervolgens wordt er gecontroleerd of de nivelleertijden niet overlappen met de deur-opentijden en eventueel één minuut verschoven.

De gemiddelde deur-opentijd varieert over het jaar, zie Figuur 2-7. In periodes met veel schuttingen is de deur-opentijd korter en naarmate het minder druk is en er minder schuttingen per dag plaatsvinden, wordt de gemiddelde deur-opentijd langer. Dit lijkt onlogisch, maar is als volgt te begrijpen: bij minder schuttingen neemt de tijd tussen schuttingen toe en wordt vaker de (aangenomen) maximale deur-opentijd van 30 minuten aangehouden. Hoe dit in de werkelijkheid gebeurt is niet bekend. Om beter zicht te krijgen op de sluisoperatie is een directe registratie van de sluisoperatie noodzakelijk, dat wil zeggen, van de tijdstippen van het openen en sluiten van de deuren.

Er zijn geen schuttingen voor de Kleine Sluis geregistreerd tot en met half februari. Er is verder een duidelijke zomerpiek zichtbaar in het aantal schuttingen, zie Figuur 2-8.



Figuur 2-7 Daggemiddeld verloop van de geschatte deur-opentijden van de Kleine Sluis en de Grote Sluis bij Kornwerderzand over 2018.



Figuur 2-8 Aantal schuttingen per dag van de Kleine Sluis en de Grote Sluis bij Kornwerderzand over 2018.

3 Methode

3.1 Grote Sluis en bakjesmodel

De zoutflux door de Grote Sluis wordt berekend met de Zeesluisformulering waarbij de randvoorwaarden uitgerekend worden met een bakjesmodel. Zowel de Zeesluisformulering als het bakjesmodel rekenen fasegewijs, d.w.z dat voor elke fase van het schutproces, van elke individuele schutting, de verplaatste volumes worden berekend, met de bijbehorende zoutgehalten. Het bakjesmodel bevat aan de zeezijde de Buitenhaven en de Voorhaven en aan de IJsselmeer kant de Binnenhaven.

De berekening in het bakjesmodel bevat twee delen. Het advectief transport van water en zout verplaatst door het nivelleren is één deel. Hetzelfde volume water wordt in elk bakje verplaatst met een bijbehorende saliniteit en dus verplaatste massa zout.

Het andere deel is de uitwisseling van zout tussen de bakjes aan de hand van het dichtheidsverschil tussen de bakjes. Hiervoor wordt de diepte van de mondig tussen bakjes, de waterstand en de breedte van de monding tussen de bakjes gebruikt. Dit gaat aan de hand van een formule voor een dichtheidsgolf. Deze wordt gereduceerd met een factor 0.19. Deze waarde is gevonden door kalibratie voor het Volkerak-Zoommeer voor de uitwisseling tussen de voorhaven het Volkerak-Zoommeer (Vreeken en Zwanenburg, 2016).

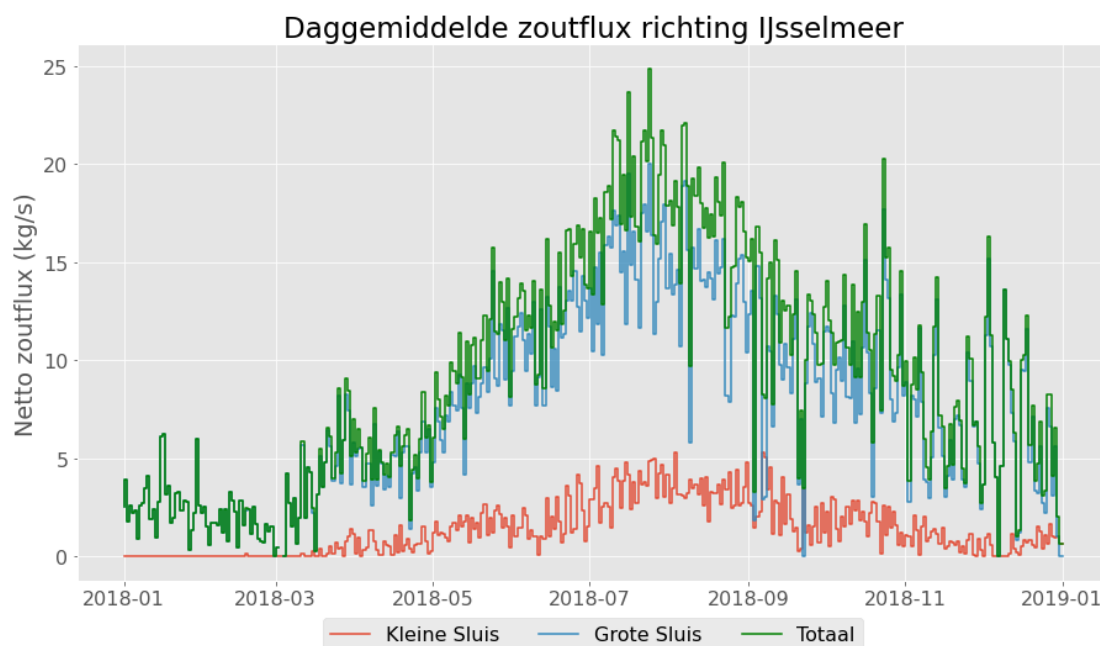
De vulling en lediging van de Buitenhaven en de Voorhaven door het getij leidt tot extra uitwisseling van water met de Waddenzee. Deze wordt in de huidige berekeningen niet meegenomen. Verwacht mag worden dat dit zou leiden tot hogere berekende zoutgehalten in deze beide bassins. Immers, tijdens de vloed zal er zouter water worden toegevoegd aan elk van de bassins (van de Waddenzee naar de Buitenhaven en van de Buitenhaven naar de Voorhaven). In het bakjesmodel leidt dit tot een hoger gemiddeld zoutgehalte in het betreffende bassin. Tijdens de eb is er een debiet richting Waddenzee, maar daarbij blijft zoutgehalte in elk van de bassins onveranderd. De vloed leidt dus tot een verhoging van het zoutgehalte, maar de eb leidt niet tot een verlaging van het zoutgehalte. Het meenemen van de uitwisseling door het getij zal dus leiden tot hogere zoutgehalten aan de zoute kant, en daarmee tot grotere transporten van zout naar het IJsselmeer dan nu berekend o.b.v. uitwisseling door het verschil in dichtheid, geschaald met een coëfficiënt.

3.2 Kleine Sluis

Bij de Kleine Sluis wordt de Zeesluisformulering zonder het bakjesmodel toegepast. Als randvoorwaarde worden de saliniteiten van de voorhaven en de binnenhaven gebruikt zoals berekend voor de Grote Sluis en het bakjesmodel. De transporten met de Kleine Sluis worden in een latere stap opgeteld bij de transporten van de Grote Sluis.

4 Resultaten

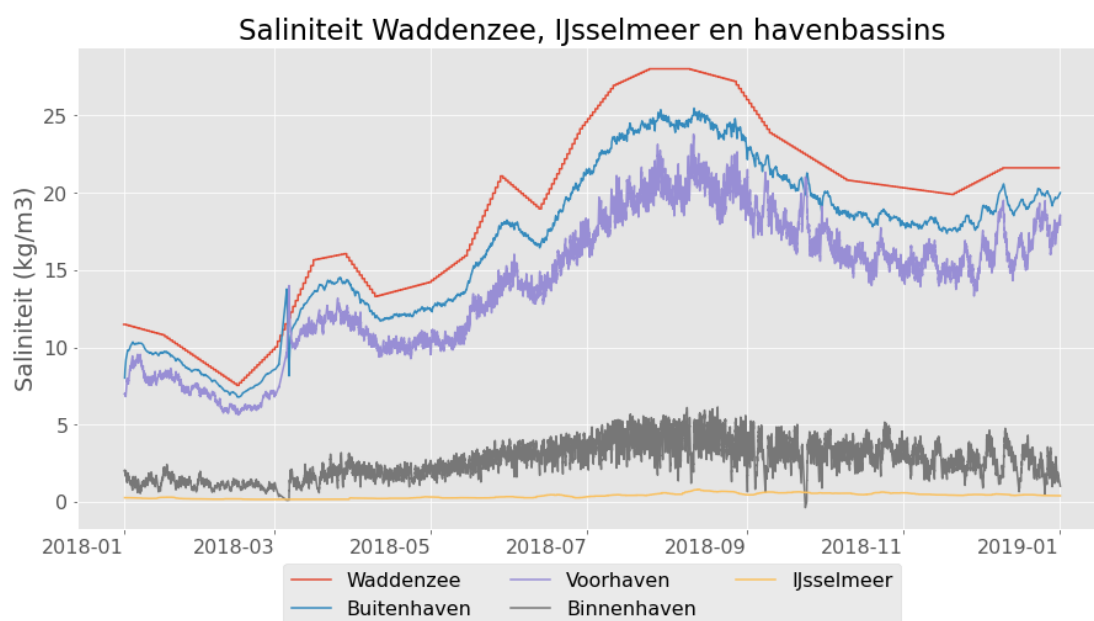
De resultaten worden fasegewijs berekend. Dit leidt tot grote transporten in korte episodes. Voor overzicht en vergelijking met eerdere schattingen worden hieronder daggemiddelde waarden gegeven, zie Figuur 4-1.



Figuur 4-1 daggemiddelde zoutflux (kg zout/s) over 2018 van de Kleine Sluis en de Grote Sluis bij Kornwerderzand, en de som van beide.

De zoutflux varieert over het jaar en piekt in de zomer met als maximum 25 kg/s. In het begin van het jaar zijn er geen schuttingen voor de Kleine Sluis geregistreerd en is de zoutlast rond de 2 à 3 kg/s.

De afbeelding in Figuur 4-2 hieronder geeft de resulterende saliniteit in de voorhavens en de opgelegde randvoorwaarden op de Waddenzee en het IJsselmeer. Dit voldoet redelijk aan eerdere metingen. In de periode 22-25 maart 2021 is in de binnenhaven 2.7 PSU, in de voorhaven 12.6 PSU en in de buitenhaven 14.4 PSU gemeten (RWS, 2021b). Dit vergelijkt goed met de waardes uit de Zeesluisformulering in maart.



Figuur 4-2 Gegeven zoutgehalte in de Waddenzee (Doove Balg Oost) en het IJsselmeer en het berekende zoutgehalte in de Binnenhaven, de Voorhaven en de Buitenhaven van Kornwerderzand.

De resulterende zoutlast is lager dan eerdere aannames voor de zomer zoals bijv. Weiler (2019), zie Tabel 4-1. Dit valt te verklaren uit de toevoeging van de voorhavens, die voor een lager dichtheidsverschil over de sluisen zorgen. Ook is het aantal schuttingen kleiner dan eerder aangenomen.

Tabel 4-1 Vergelijking van de nieuwe schatting van de zoutlast bij Kornwerderzand met eerdere schattingen.

	Huidige studie (gemiddelde waarden juli tot en met september)	Aannamen Weiler (2019) (vaste / variërende deur- opentijden)
Saliniteit buitenzijde	19.7 kg/m ³	25 kg/m ³
Saliniteit binnenzijde	4.20 kg/m ³	1 kg/m ³
Schuttingen per dag	16 Grote Sluis 13 Kleine Sluis	24 per dag voor elke sluis
Deur-opentijden	15 minuten	22 minuten / tussen 6 en 12 minuten
Zoutflux Grote sluis	14.5 kg/s	56.1 kg/s / 33.5 kg/s
Zoutflux Kleine sluis	3.45 kg/s	19.8 kg/s / 14.6 kg/s
Verhouding Kleine sluis / Grote sluis	0.238	0.353 / 0.436

5 Conclusie

De hier gevolgde werkwijze leidt tot een realistische beschrijving van de zouttransporten veroorzaakt door de operatie van de beide sluisen. De berekende saliniteit in de havenbassins voor maart 2018 komt overeen met gemeten waarden in maart 2021. De resultaten komen wel lager uit dan eerdere aannames voor de zomerpiek. Dit valt te verklaren door een verschil in randvoorwaarden en aantal schuttingen.

Hierbij zijn er nog zaken te verbeteren, zoals:

- Het meenemen van het getij in de havenbassins voor de transporten tussen Buitenhaven en Voorhaven. De zoutflux door de scheepvaartsluisen zou hierdoor nog iets kunnen toenemen.
- Het kalibreren van de uitwisselingcoëfficiënt tussen de bassins.
- Het bepalen van de schutoperatie o.b.v. een registraties: daar zitten aannames in waarvan nu niet is vast te stellen welke afwijking die veroorzaken.
- Het scheepsvolume is nu niet meegenomen (nog niet goed in Zeesluisformulering) om translatiegolven in het IJsselmeer model te voorkomen.

6 Referenties

- S.P. Reijmerink en A.C. Bijlsma (2016). Stroombeeldberekeningen asymmetrisch spuien Afsluitdijk. Deltares (1221319)
- RWS (2021a). Waterinfo. www.waterinfo.rws.nl
- RWS (2021b). *Inzet omloopriolen grote schutsluis Kornwerderzand ten behoeve van zoutwaterafvoer*. Concept memo, 6 aug 2021. Auteurs Nathalie van Veen & Sylvia van Doorn
- T. Vreeken en S. Zwanenburg (2016). Prestatie Innovatieve Zout-Zoet Scheiding op de Krammersluizen. Berekening met WANDA-Locks. Deltares (1210765-009-HYE-0002)
- O. Weiler (2019). Verkenning noodmaatregelen verzilting IJsselmeer. Schutoperatie en bellenschermen. Deltares (11203735-005-ZWS-0002)

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Juli 2022	Noor ten Harmsen van der Beek, Otto Weiler		Otto Weiler		Arnout Bijlsma	

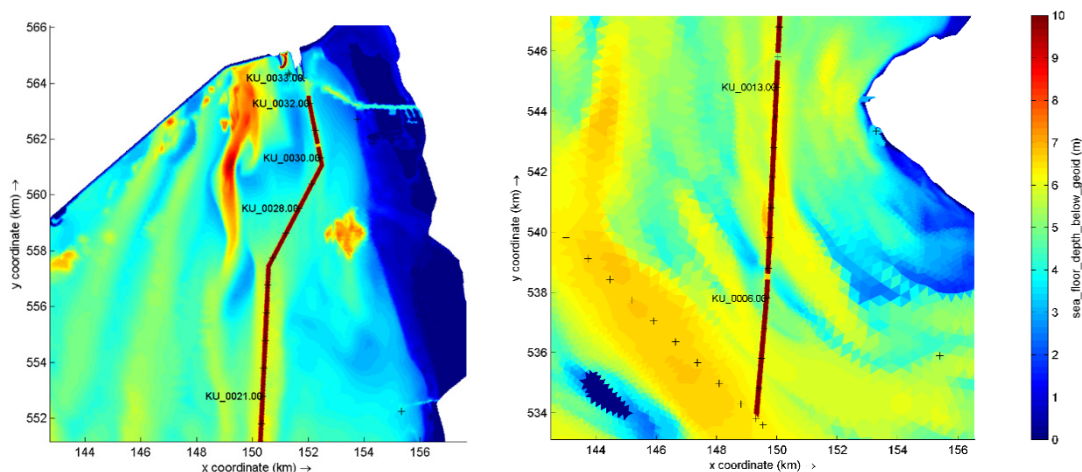
C Maandplots chloridegehalte aan de bodem in geselecteerde stations in de vaargeul versus randvoorwaarden, Scenario 0 - 4

In 7 maandplots per berekening zijn de tijdreeksen van het chloridegehalte aan de bodem in geselecteerde stations in de vaargeul (bovenste venster) vergeleken met de randvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen, de spuilsuizen en de wind.

De volgende stations zijn geselecteerd om het chloridegehalte aan de bodem weer te geven:

- KU_0033, gelegen tussen de havenhoofden.
- KU_0032, 1 km zuidelijker, eerste punt in de verdiepte geul in de Scenario's.
- KU_0030, 2 km verder zuidelijk, ten zuiden van de drempel van Scenario 3 en in het midden van de 4,5 km sectie van Scenario 4.
- KU_0028, aan het eind van de 4,5 km sectie van Scenario 4.
- KU_0021, tussenpunt.
- KU_0013, ten zuiden van de drempel bij de gasleiding in Scenario 3.
- KU_0006, ten zuiden van de drempel bij de Rug van Lacon in Scenario 3.

Zie Figuur C-1 voor de ligging van deze punten ten opzichte van de bodem van Scenario 3 (-10 m NAP met 3 drempels). De bodemdiepte in deze punten kan per Scenario verschillen, zie paragraaf 2.3.



Figuur C-1 Posities van geselecteerde stations met de bodem van Scenario 3 (-10 m NAP met 3 drempels).

Per maand toont het bovenste venster de tijdreeksen van het chloridegehalte aan de bodem in de geselecteerde stations langs de vaargeul. Omdat aan de bodem het hoogste chloridegehalte optreedt kan hiermee het verloop van het zouttransport in de tijd goed gevolgd worden. De ontwikkeling van het zouttransport kan worden vergeleken met de randvoorwaarden in de drie vensters daaronder. Het 2^e venster geeft de zoutlast van de scheepvaartsluizen van Kornwerderzand in kg chloride/s, en het 25 uren lopend gemiddelde daarvan. Het 3^e venster geeft de cumulatieve chloride afvoer bij Kornwerderzand en Den Oever (kg chloride). De onderste plot geeft de windsnelheid en de windrichting. Het interval van 6 Bft (krachtige wind) is in blauw weergegeven om de grootste wind events te herkennen.

Achtereen volgens worden de volgende scenario's gepresenteerd:

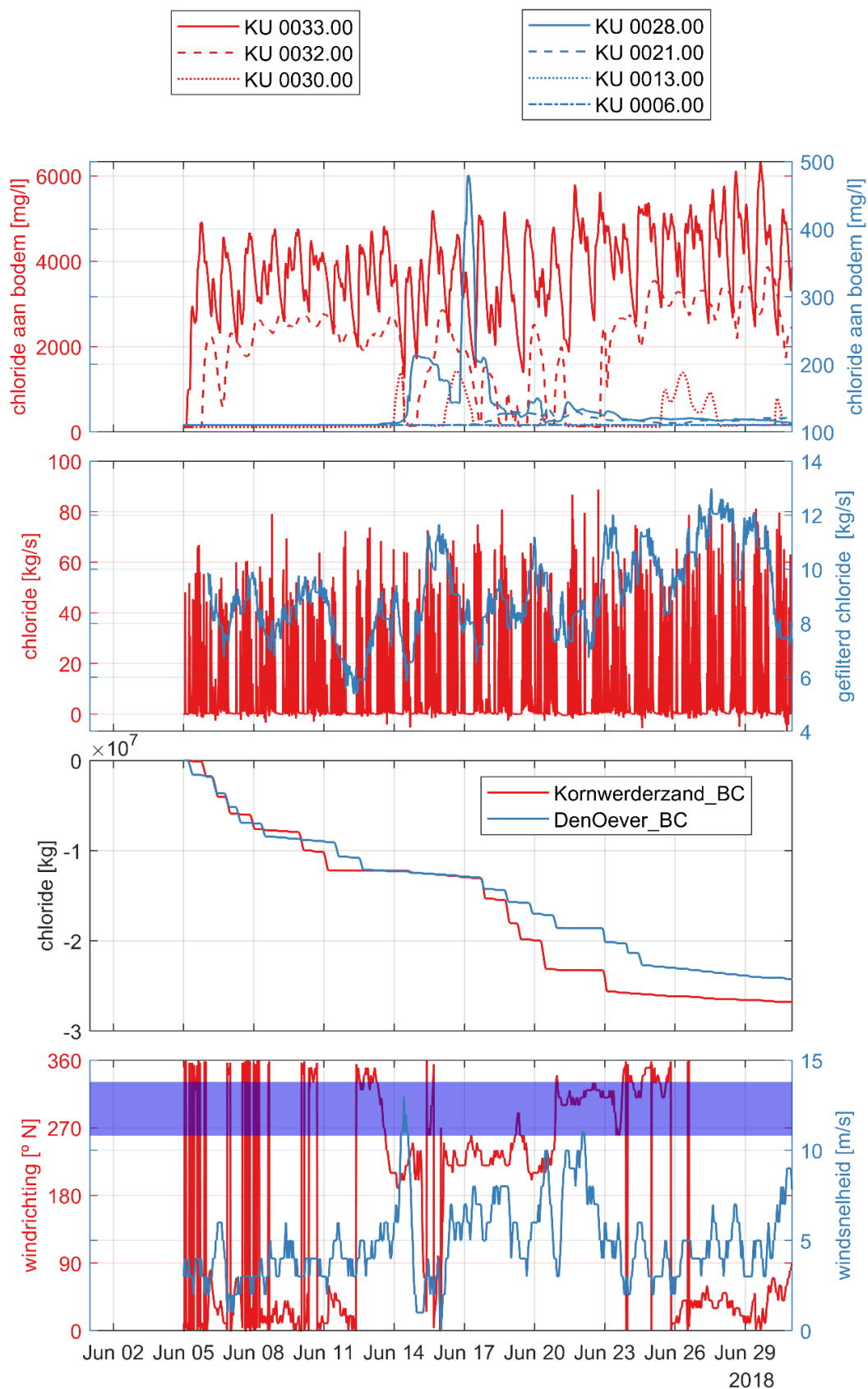
- Referentiesituatie, zonder verdiepte vaargeul (pagina 3 – 9).
- Scenario 1, vaargeul verdiept tot -10 m NAP (pagina 10 – 16).
- Scenario 2, vaargeul verdiept tot -6,7 m NAP (pagina 17 – 23).
- Scenario 3, vaargeul verdiept tot -10 m NAP met 3 drempels (pagina 24 – 30).
- Scenario 4, vaargeul verdiept tot -10 m NAP over 4,5 km (pagina 31 – 37).

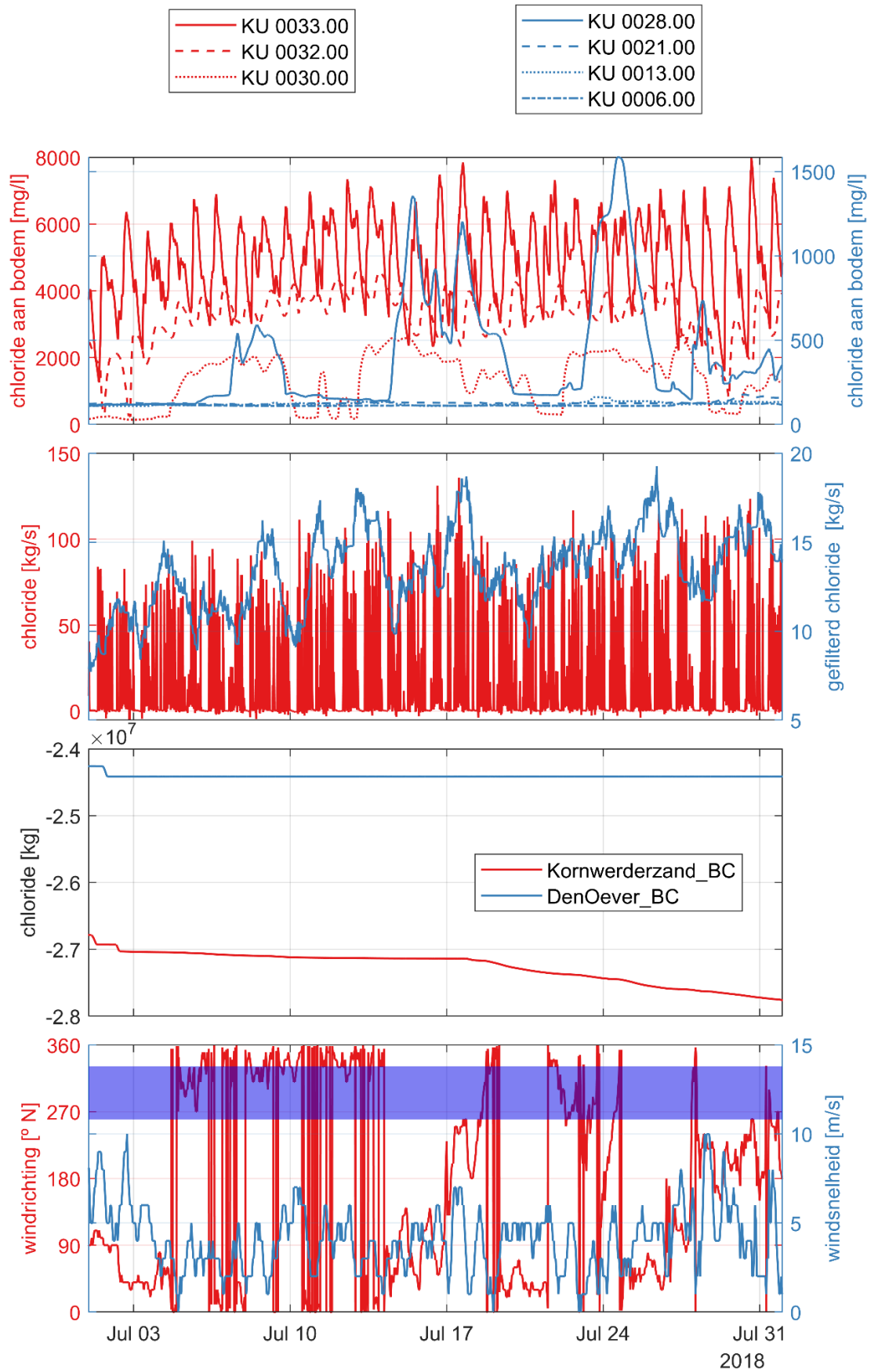
Opvallend is de sterke variatie over de dag van het chloridegehalte aan de bodem in station KU_0033. Dit wordt veroorzaakt door de variatie in de schuttingen over de dag. Merk op dat dit praktisch gelijk is voor alle Scenario's. Verder valt de sterke verdunning van station KU_0033 naar station KU_0032 op, dat 1 km zuidelijker ligt. In de Scenario's 1- 4 is de bodem hier verdiept. Tabel C-1 geeft een illustratie van de verdunning op 11 juni aan het begin van de berekening als er nog geen extra zout is 'opgehoopt' in het model. Voor KU_0033 schatten we de gemiddelde waarde op ongeveer 3500 mg/l. Voor de overige waarden zie de tabel.

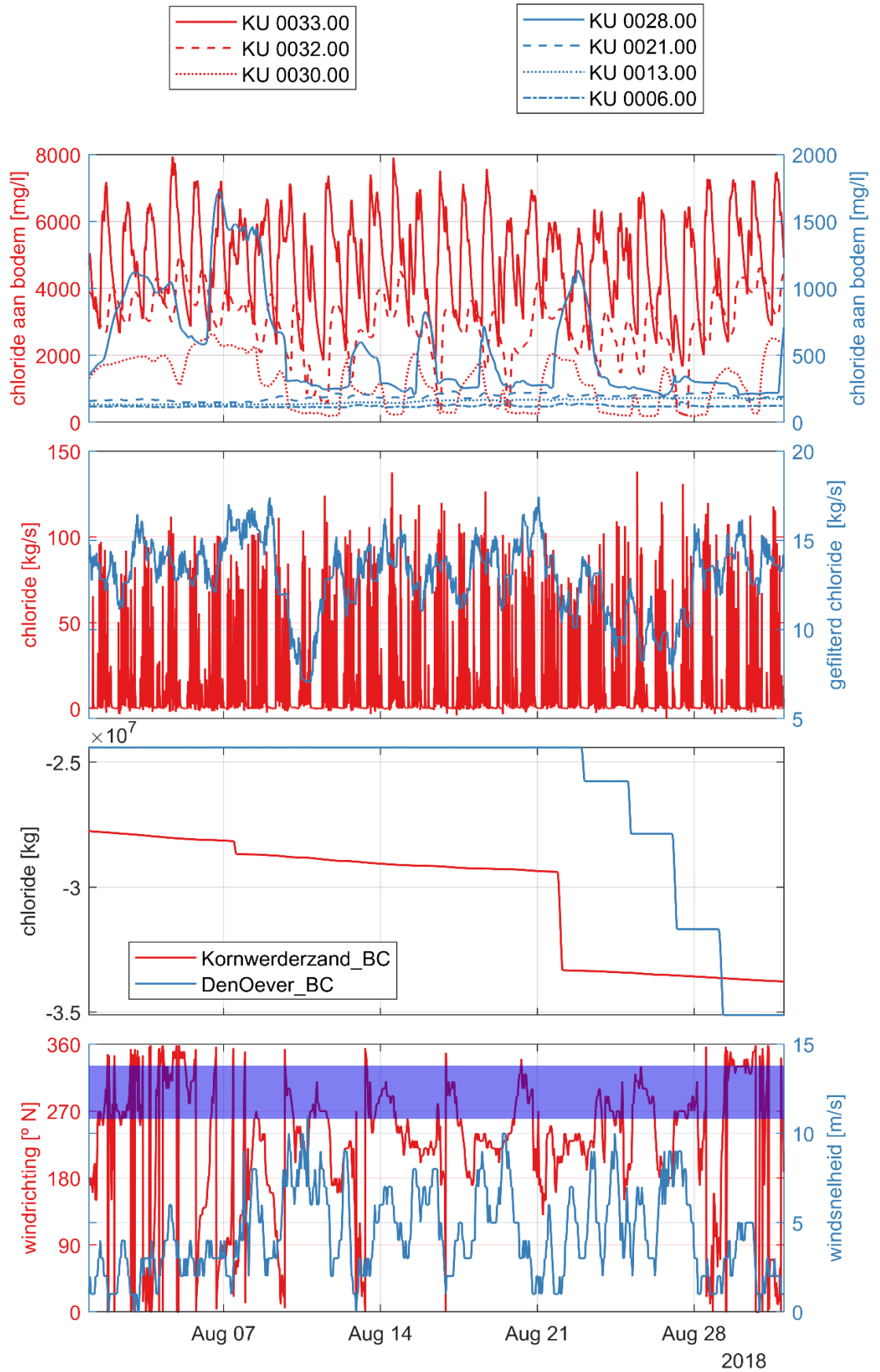
Tabel C-1 Bodem chloridegehalte in stations KU_0033 en KU_0032 en de onderlinge verhouding (globaal).

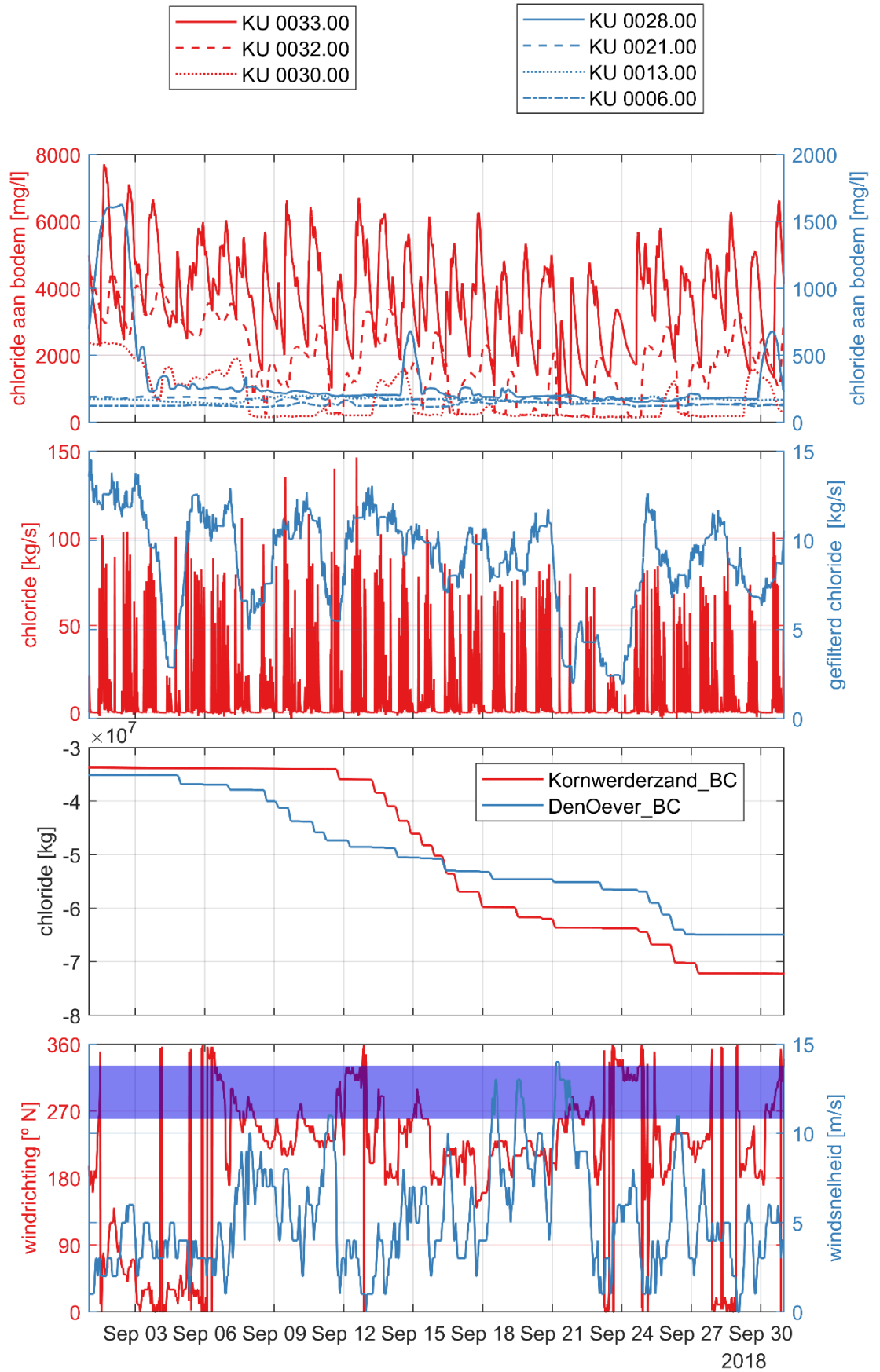
Scenario	KU_0033 Gem. 10-11 juni	KU_0032 Gem. 11 juni	Ratio
Referentiesituatie	3500	2600	1,3
Scenario 1	"	1000	3,5
Scenario 2	"	1800	1,9
Scenario 3	"	1100	3,2
Scenario 4	"	1000	3,5

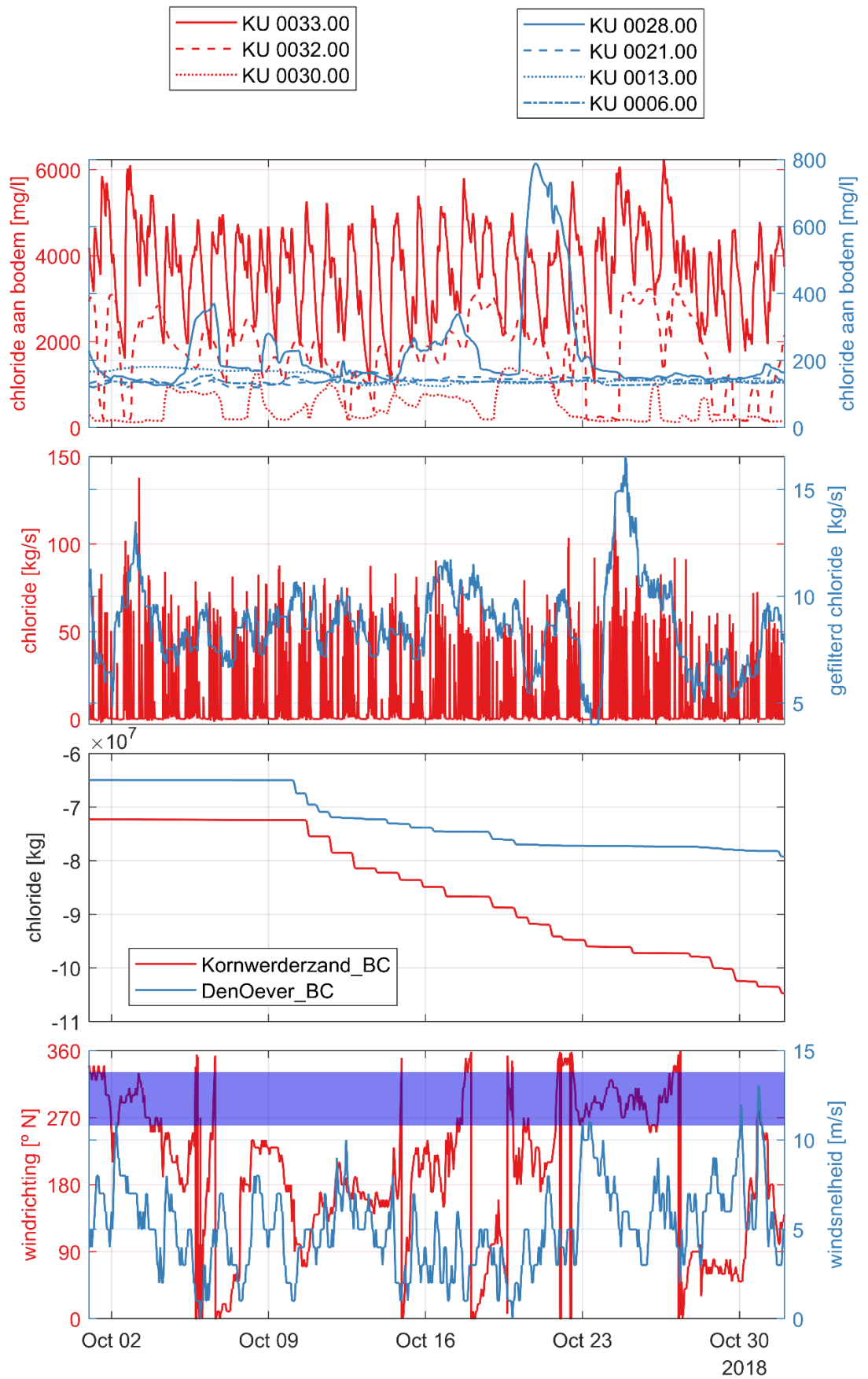
C.1 Scenario 0

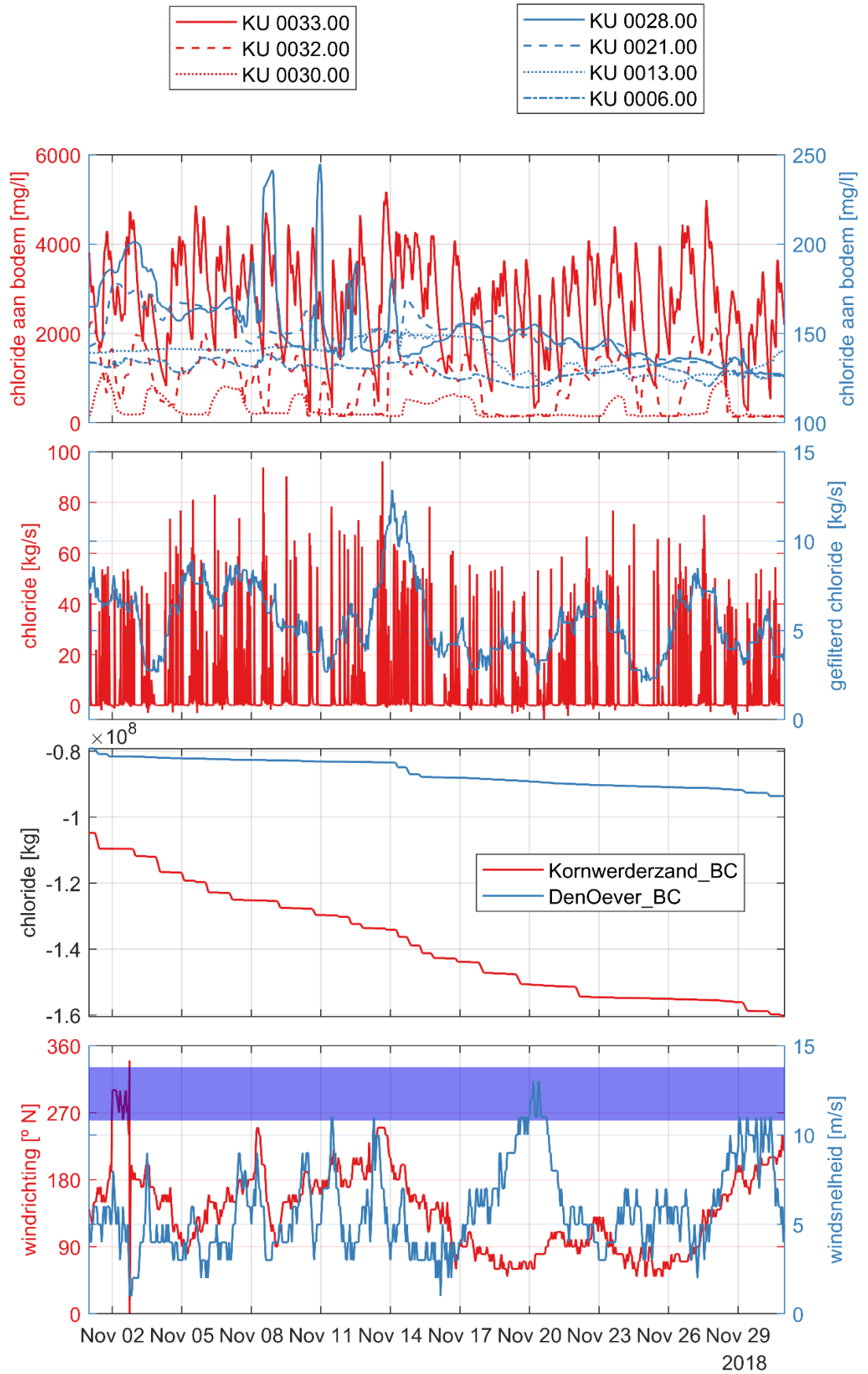


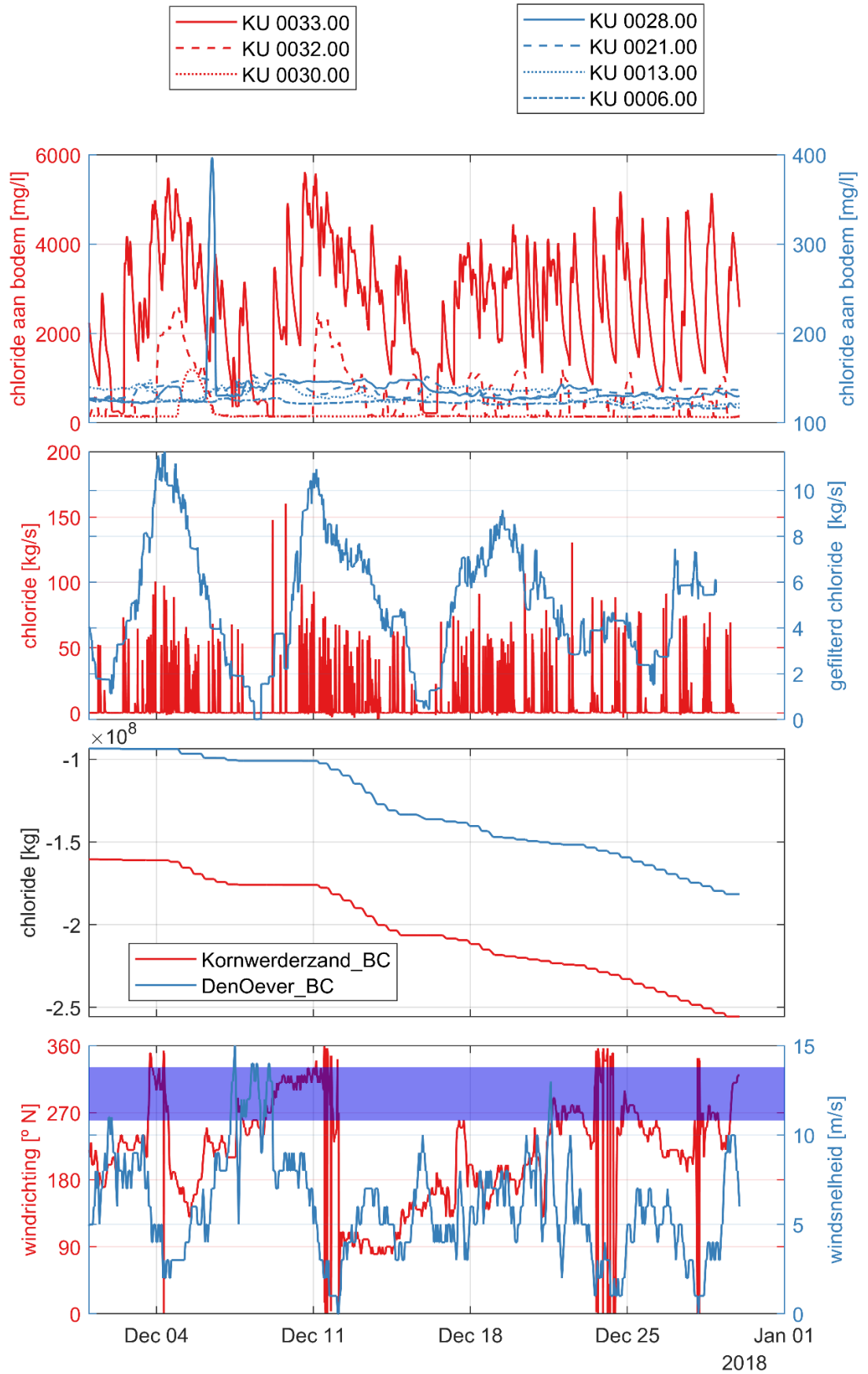




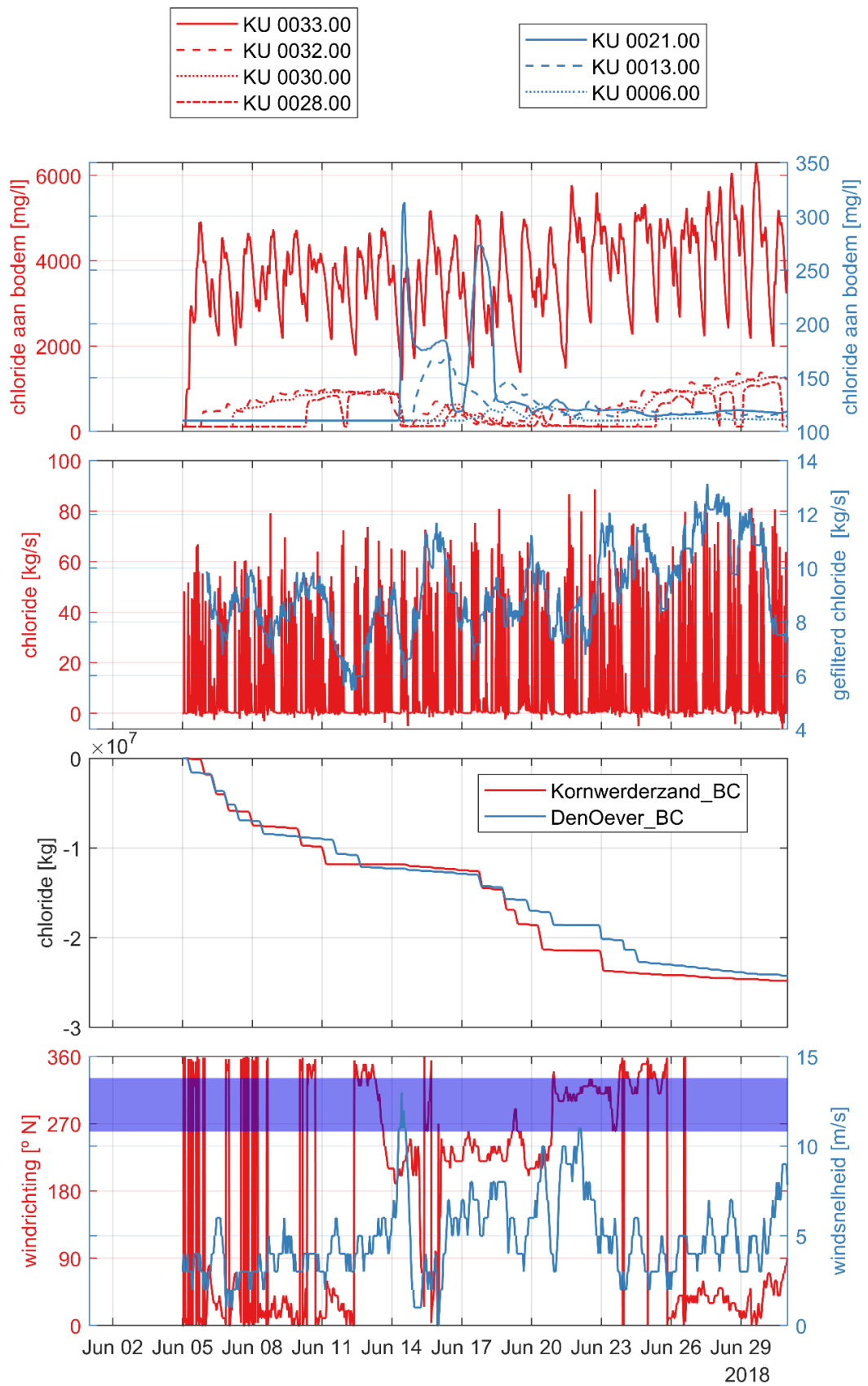


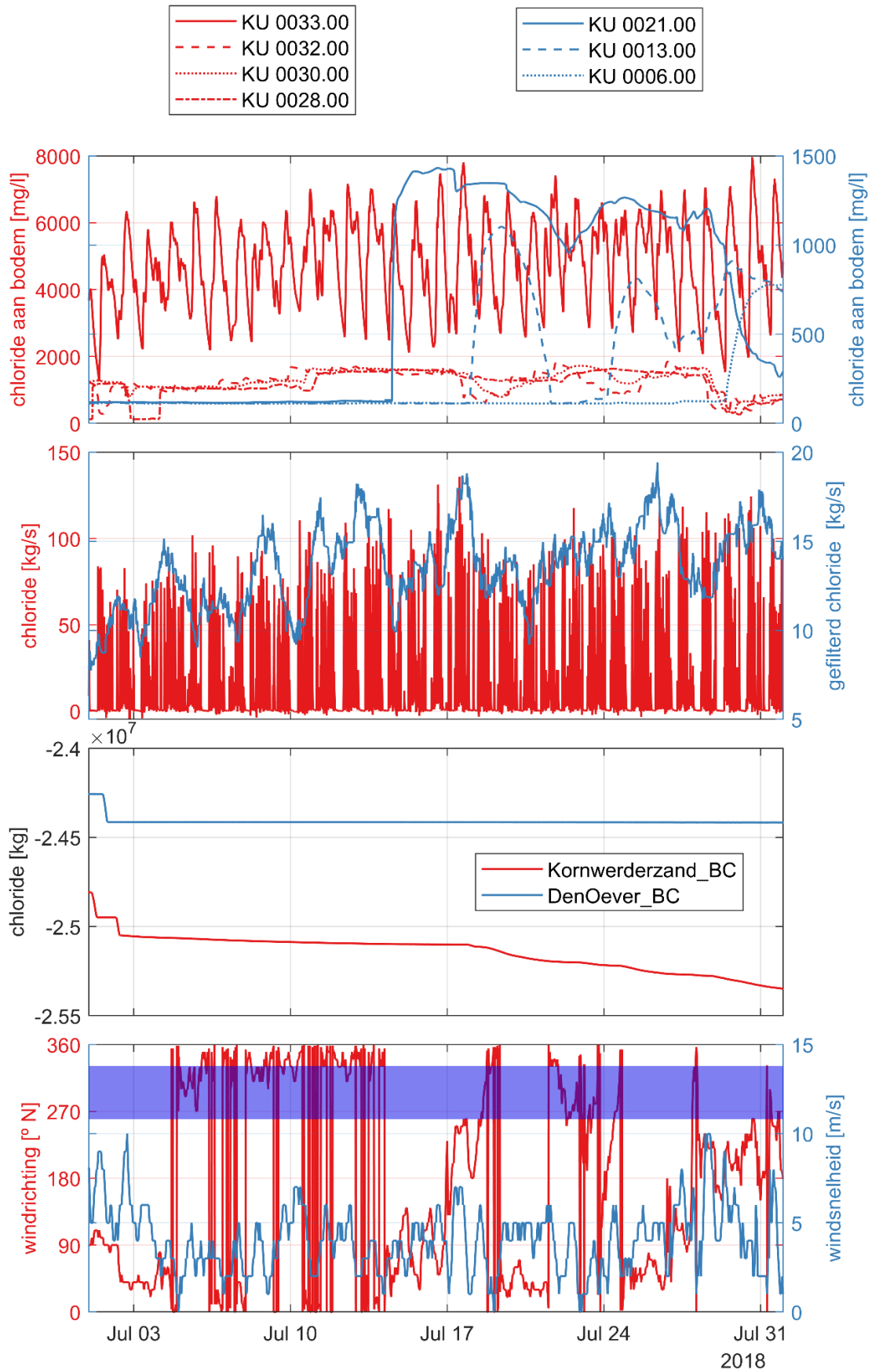


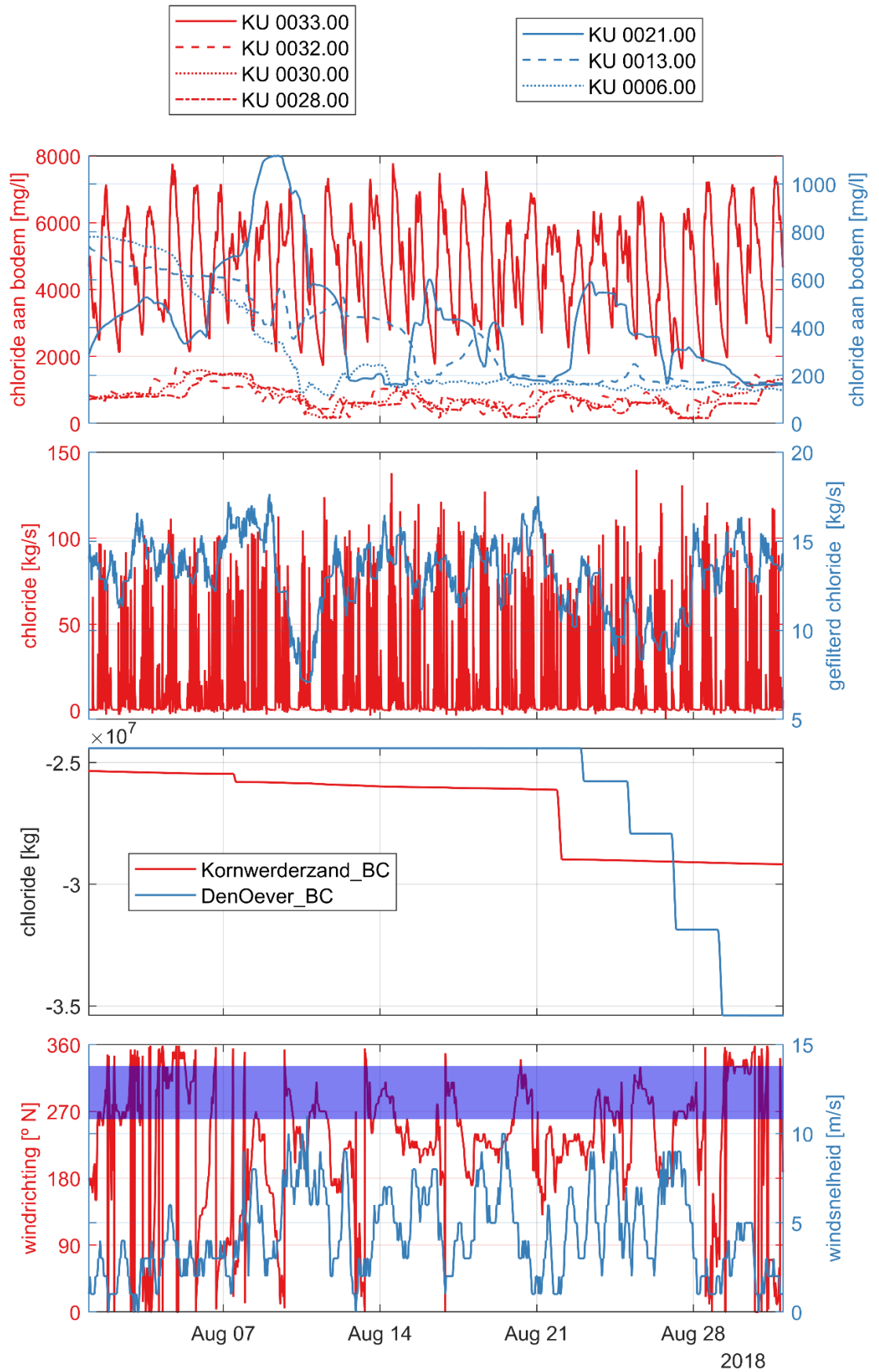


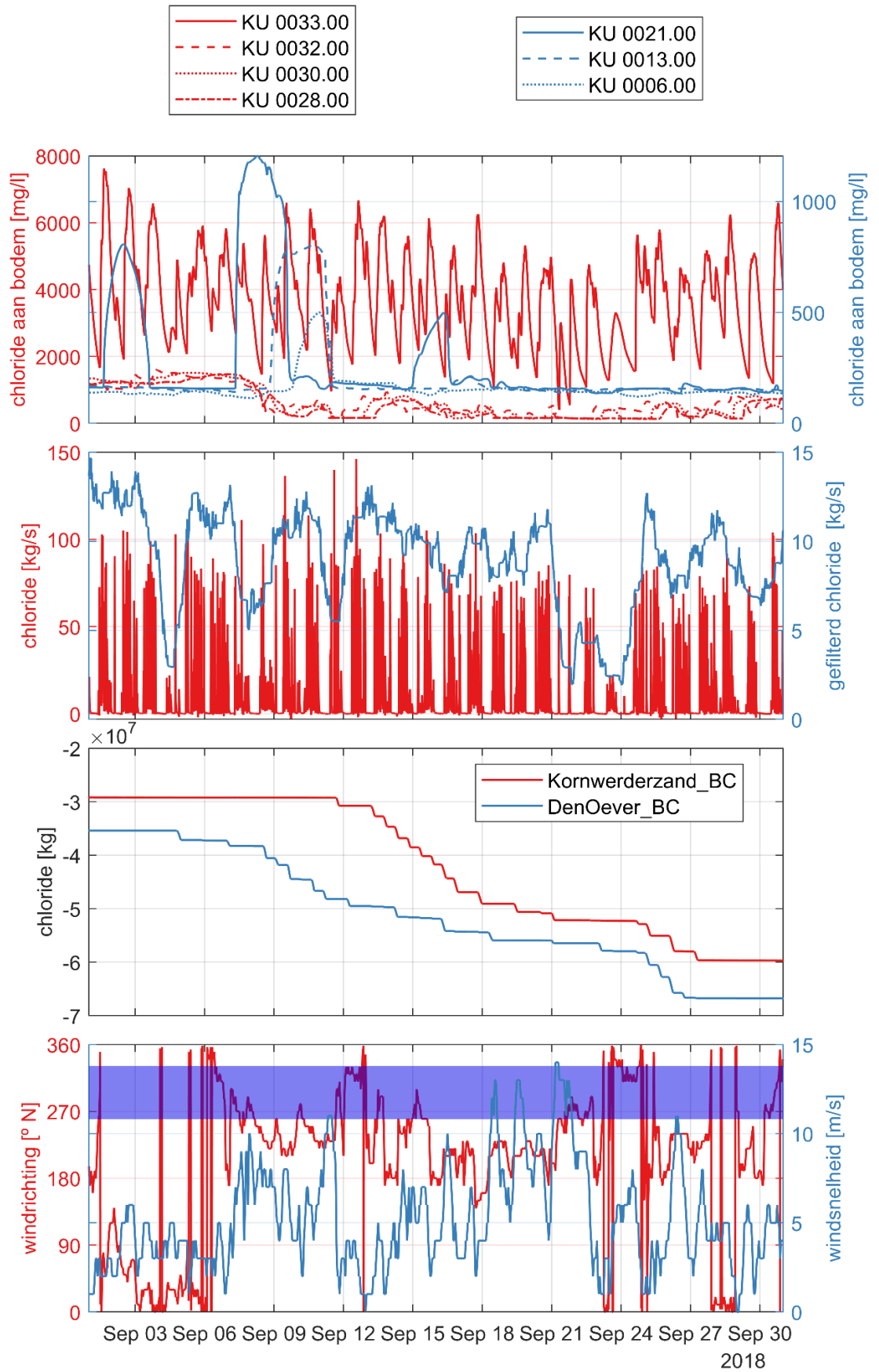


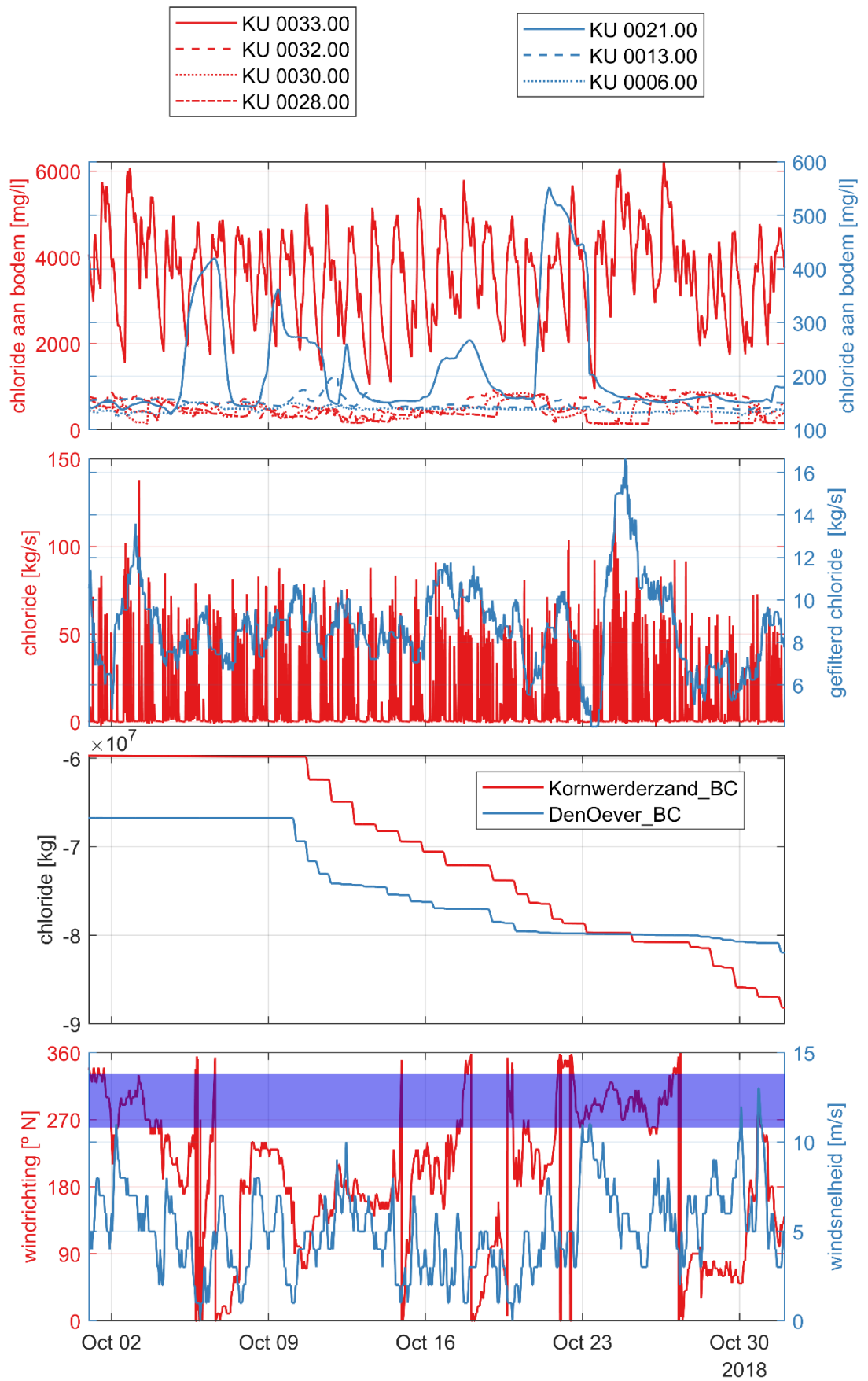
C.2 Scenario 1

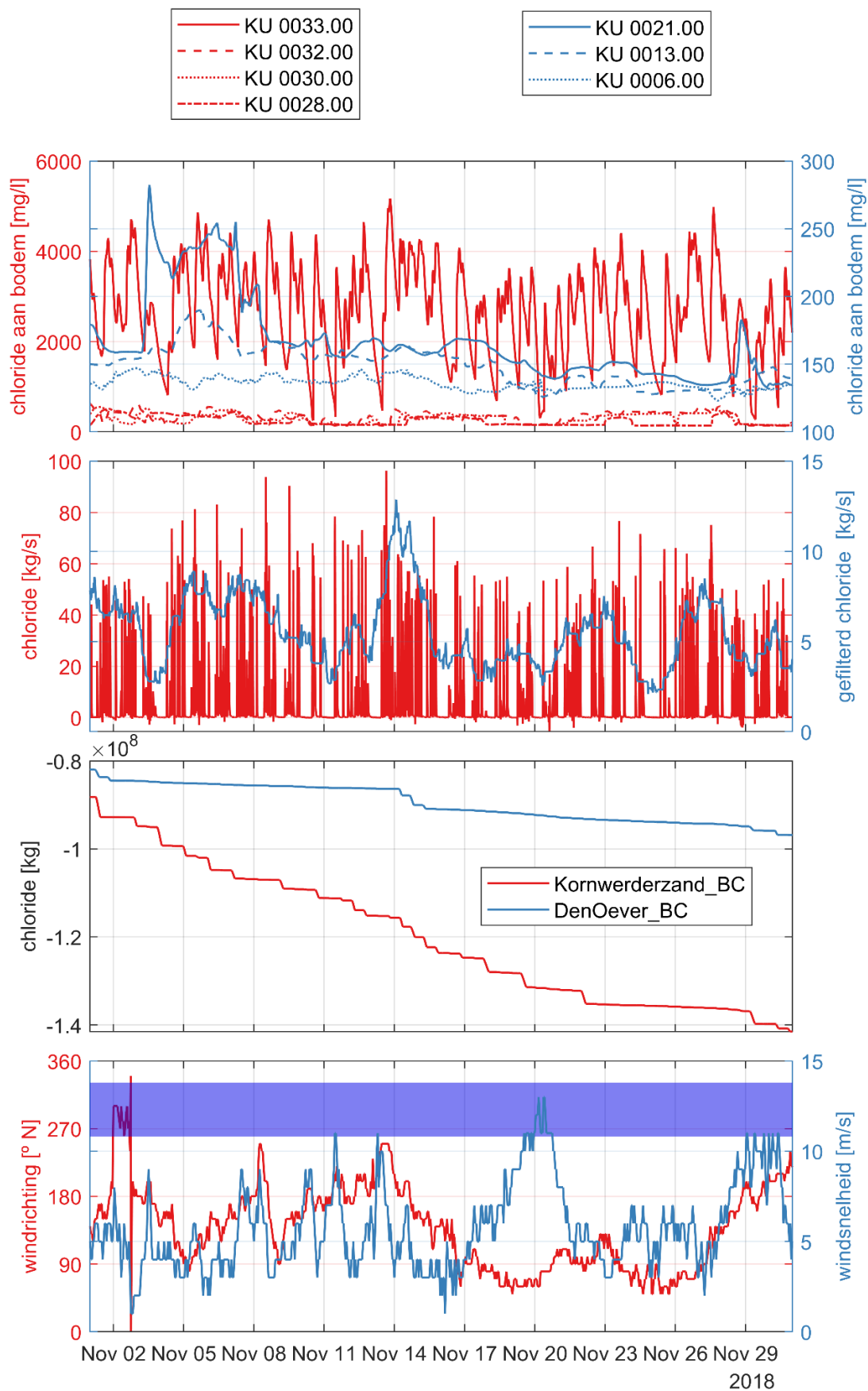


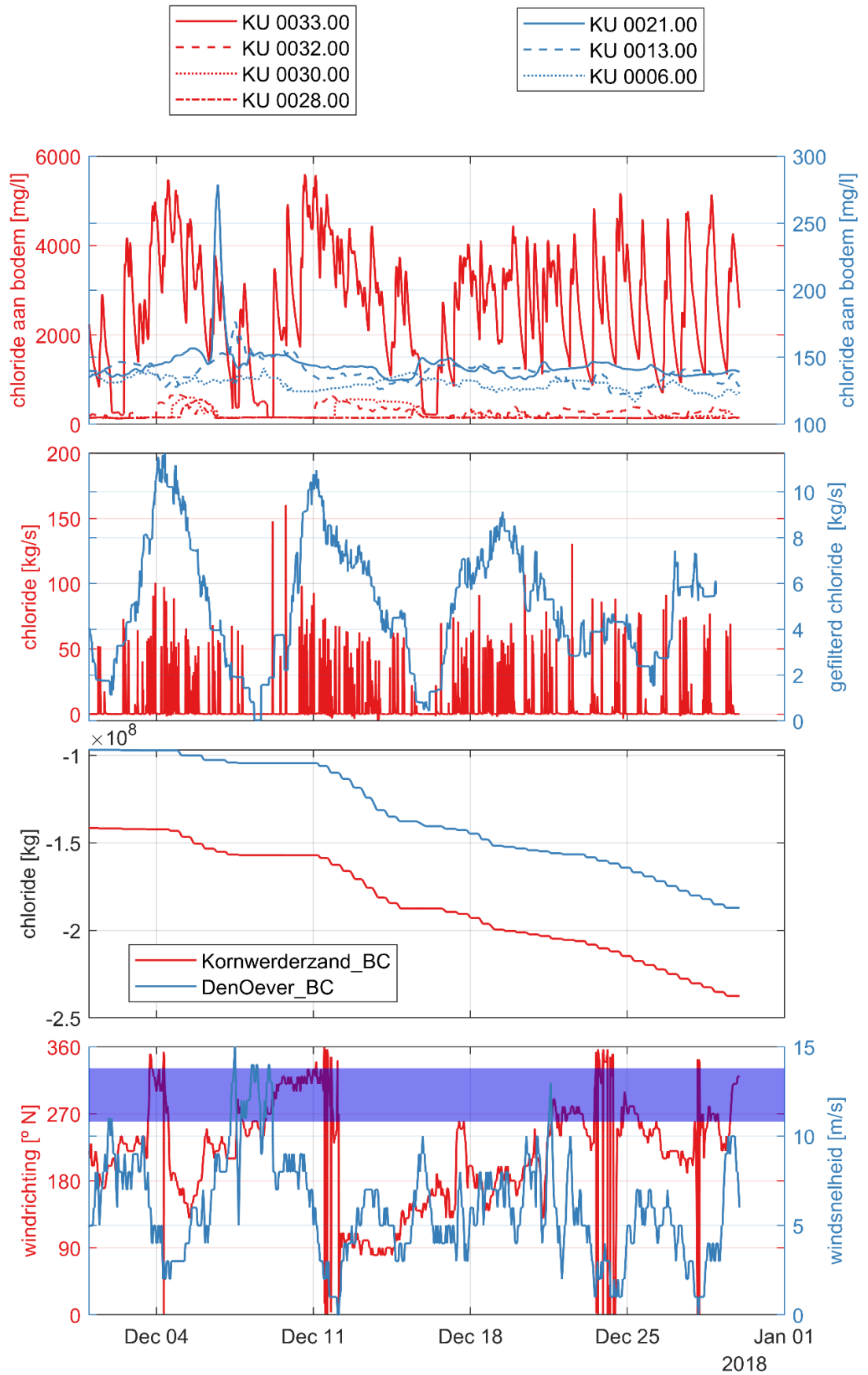




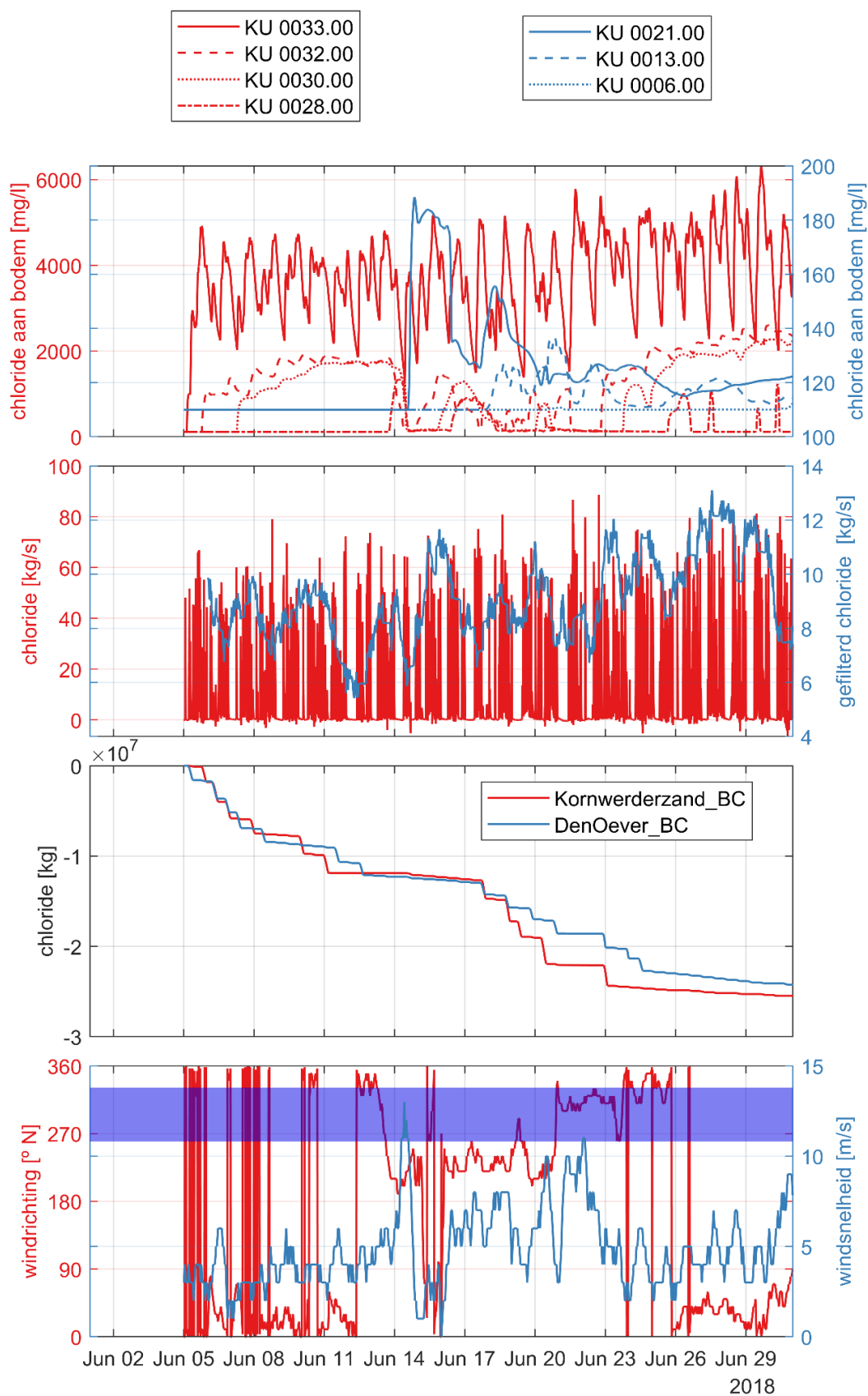


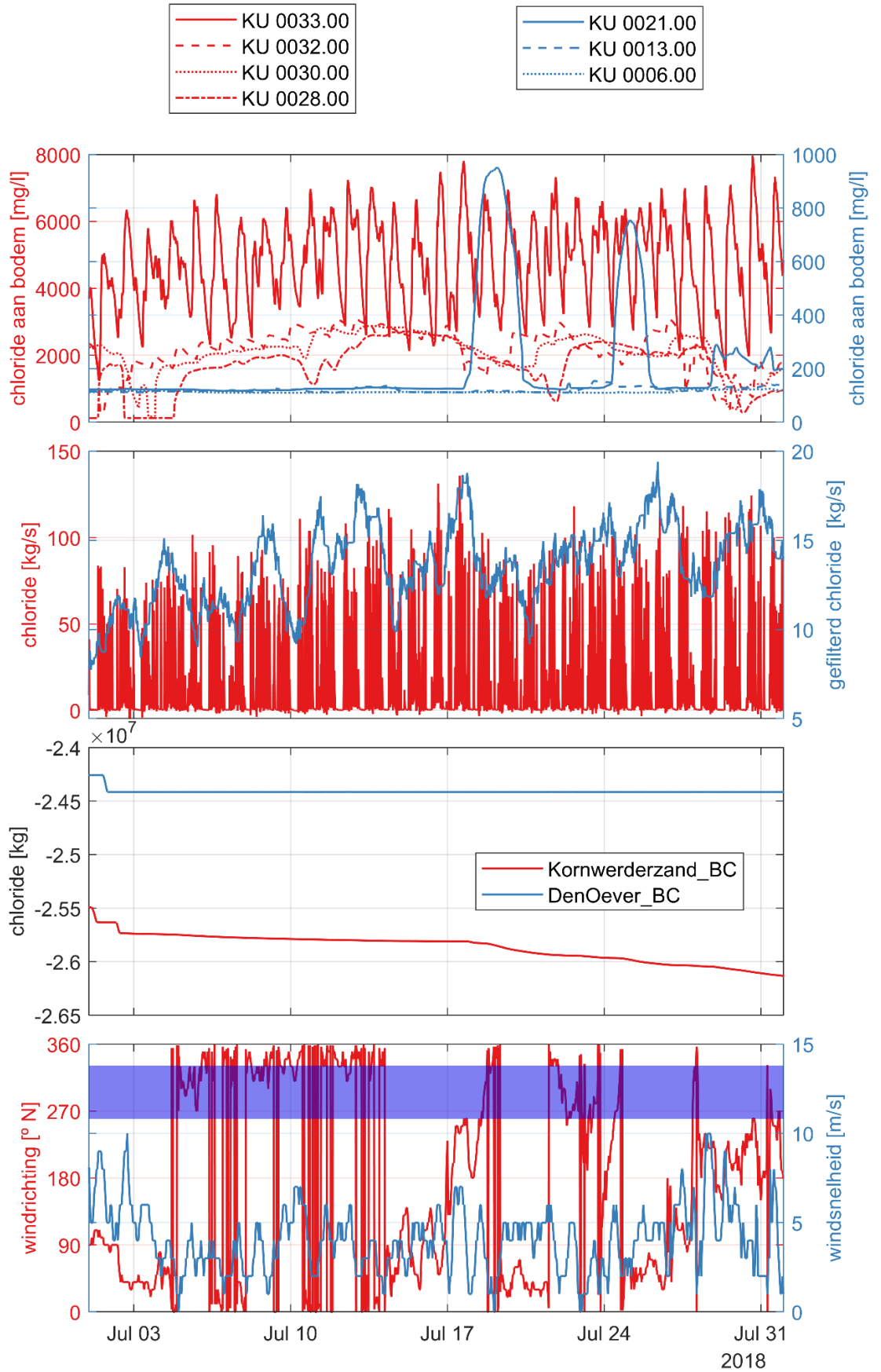


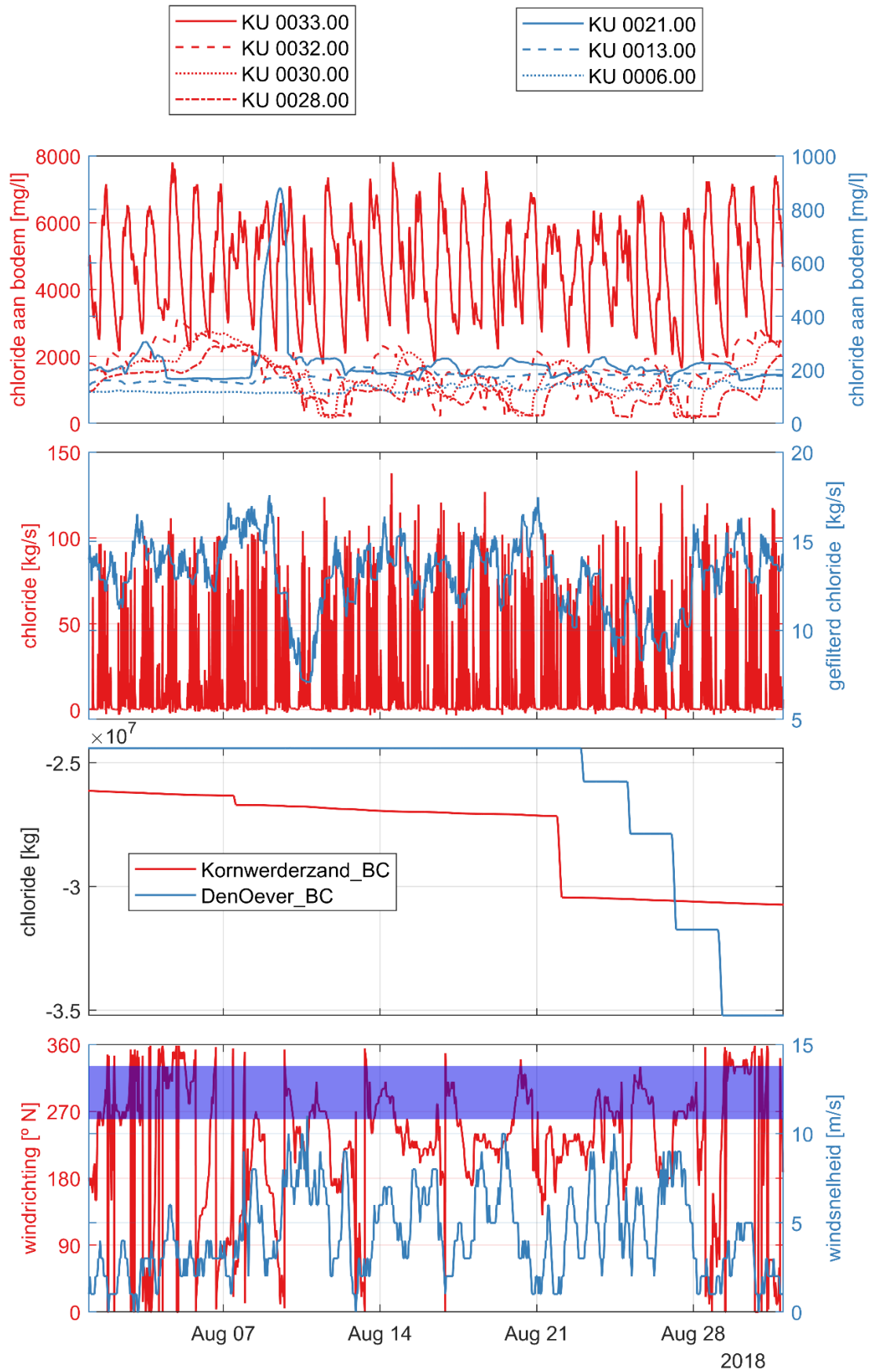


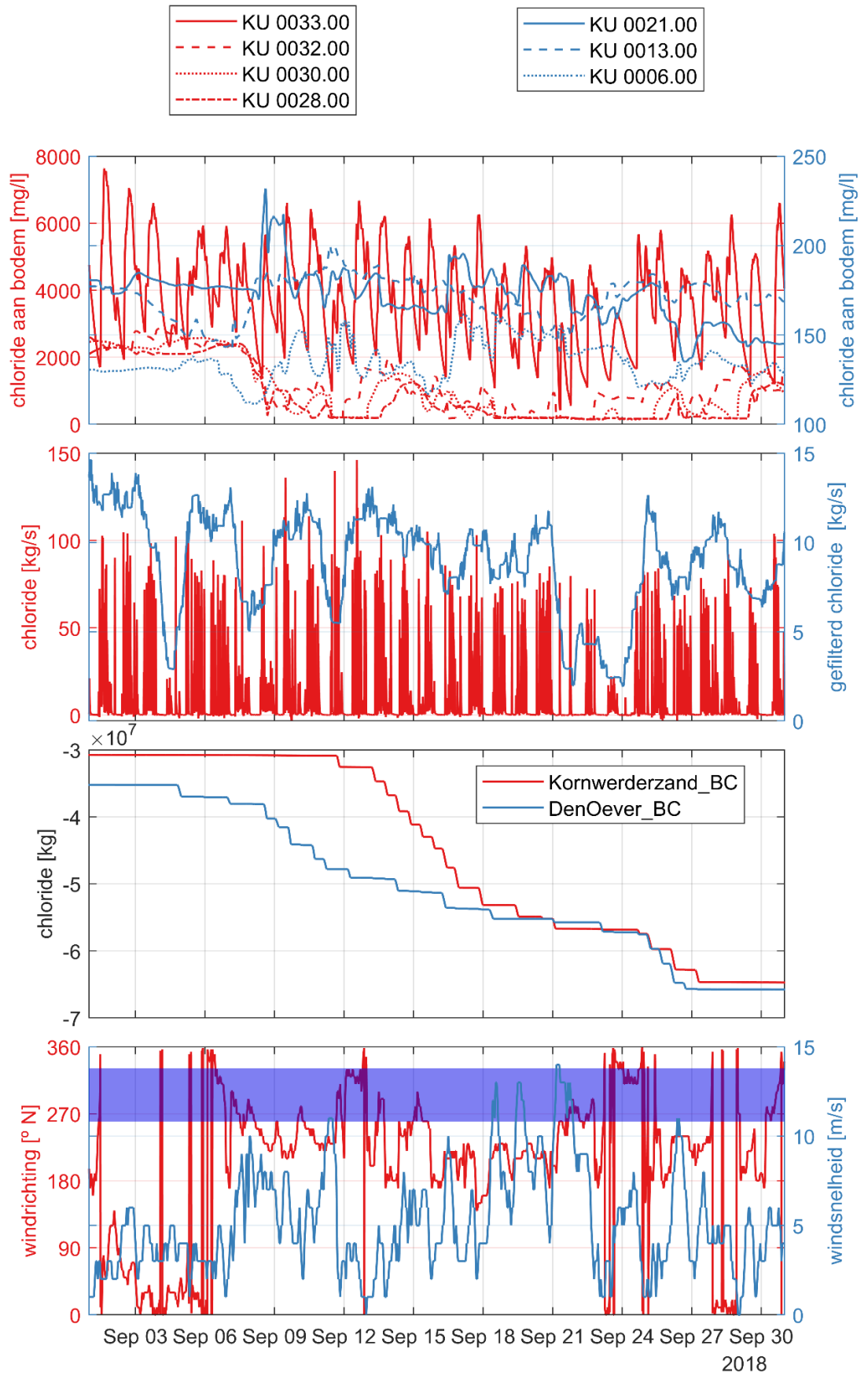


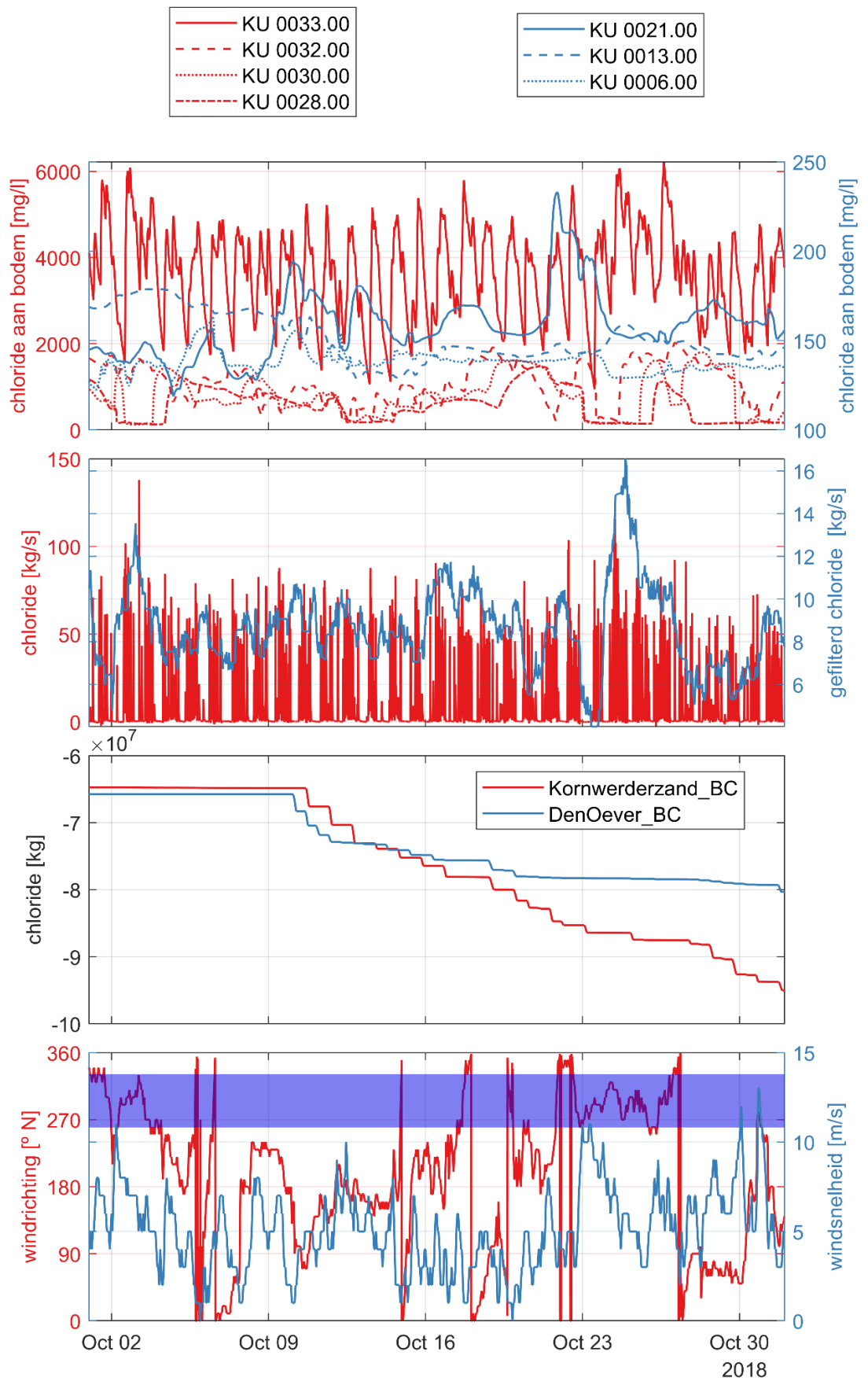
C.3 Scenario 2

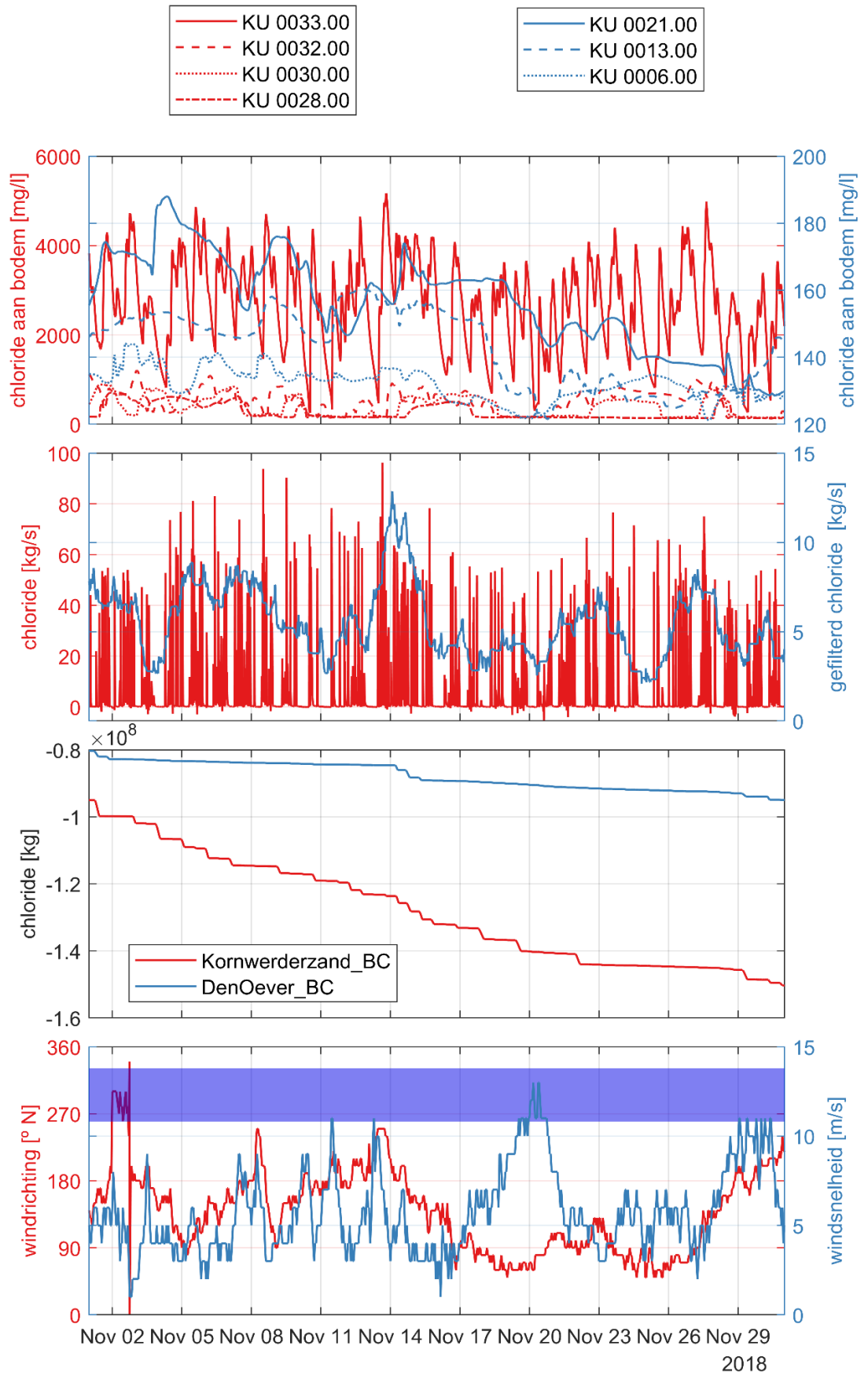


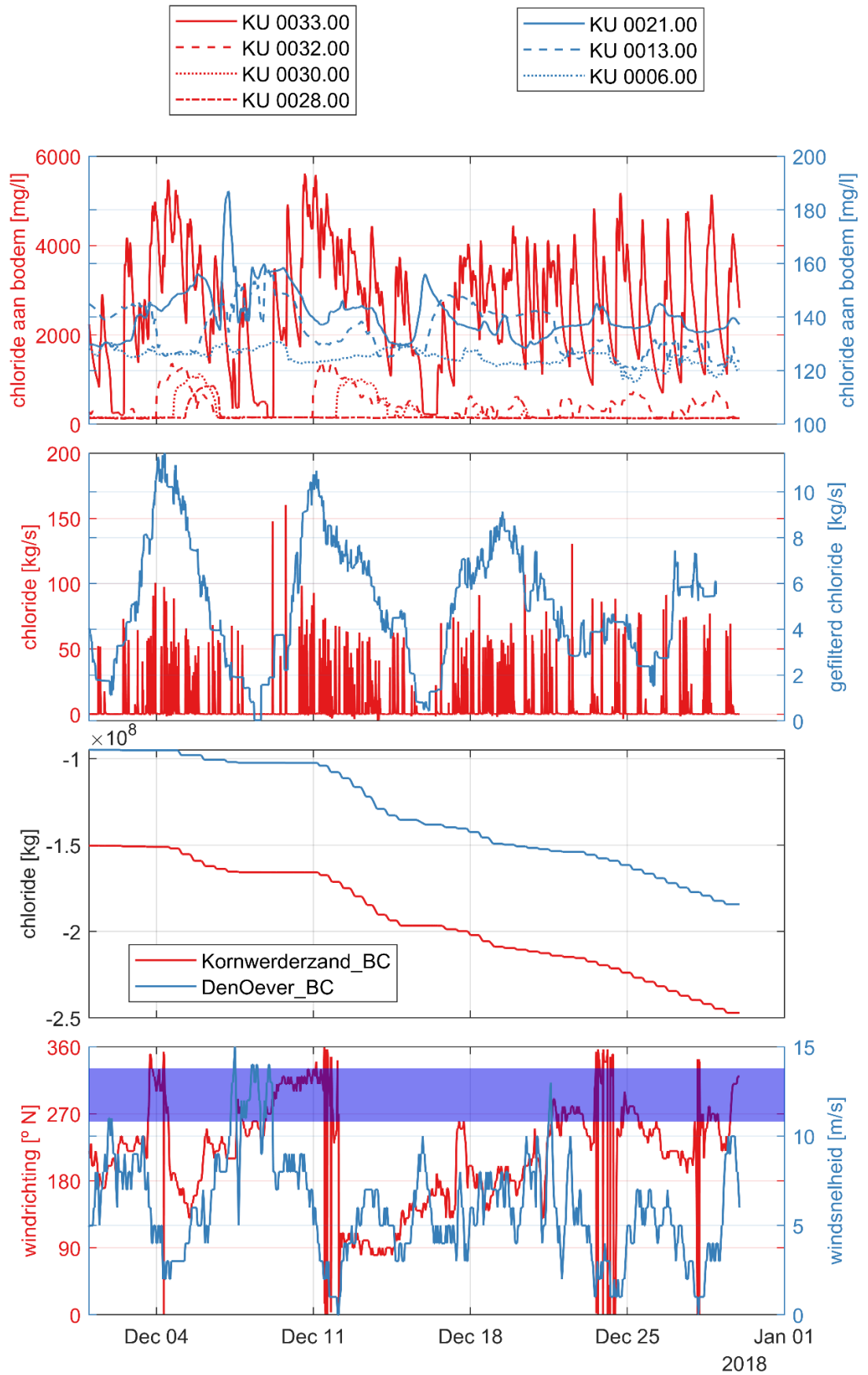




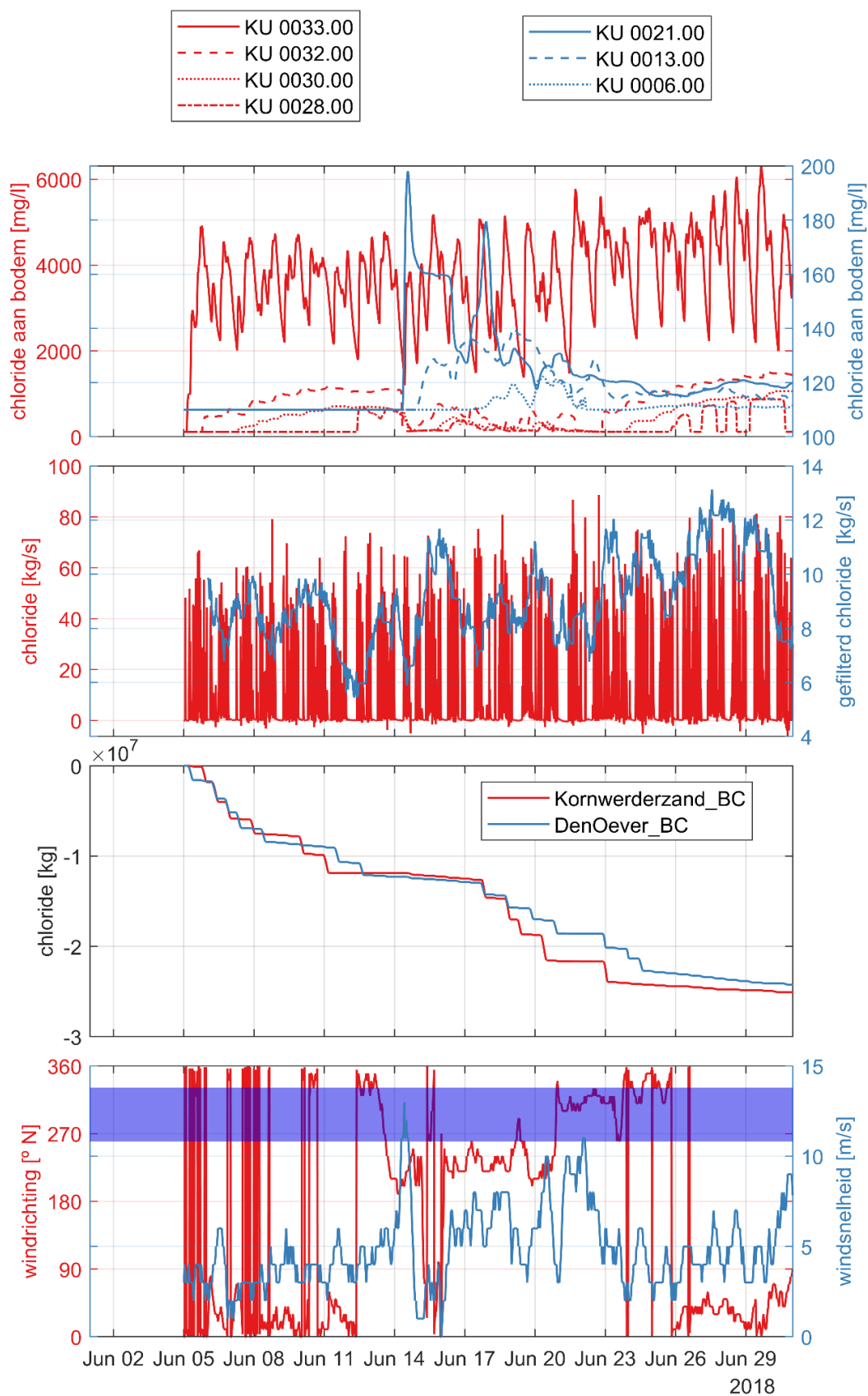


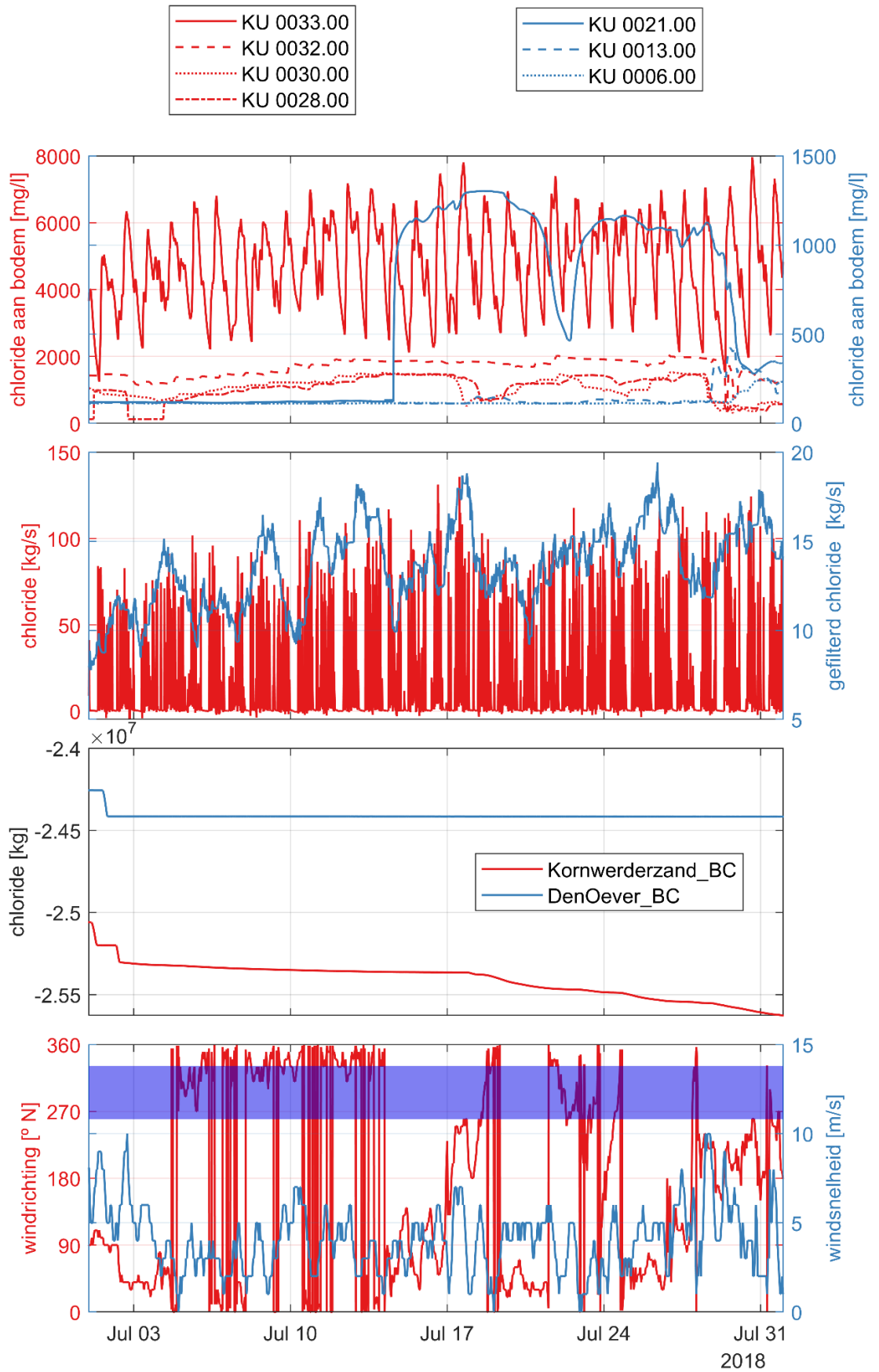


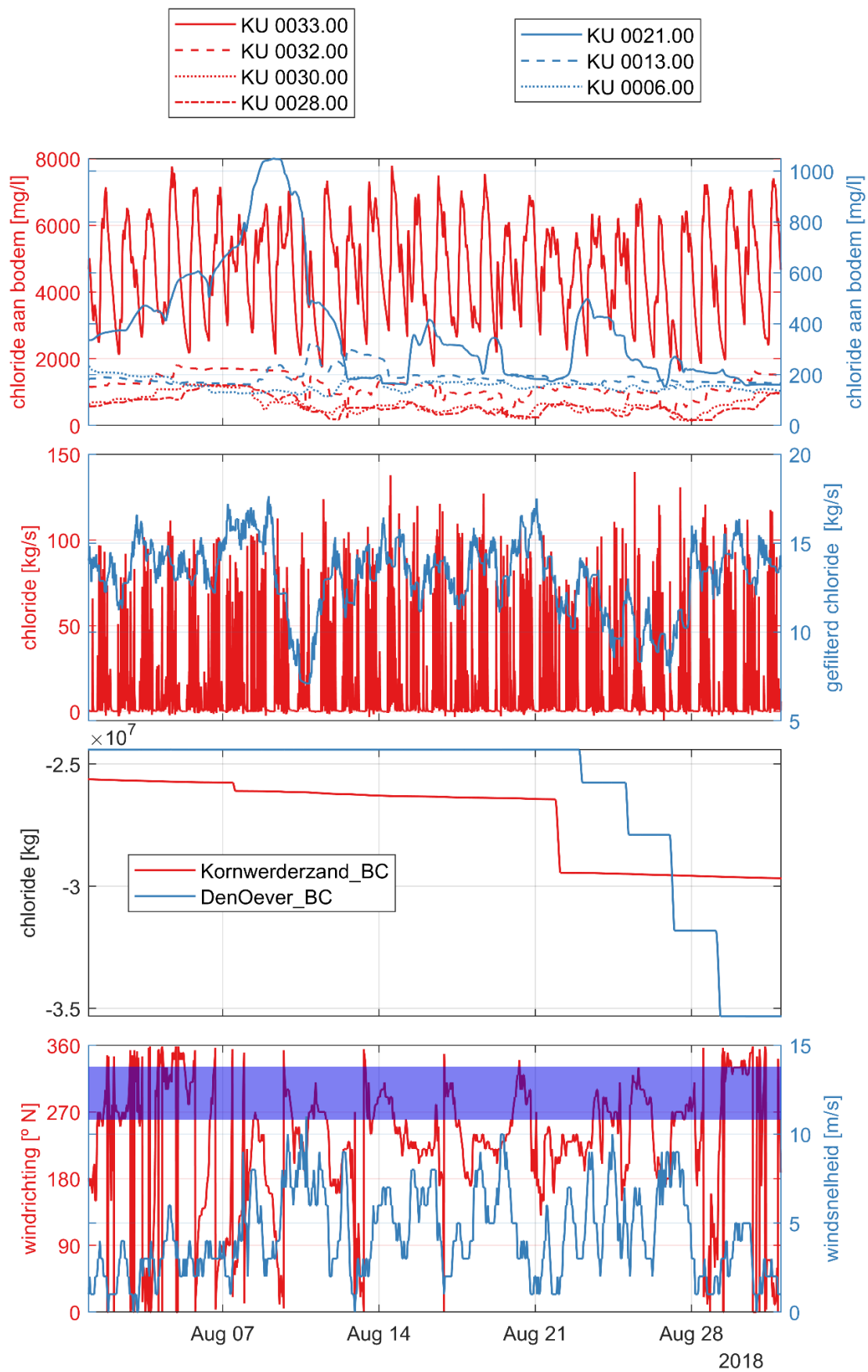


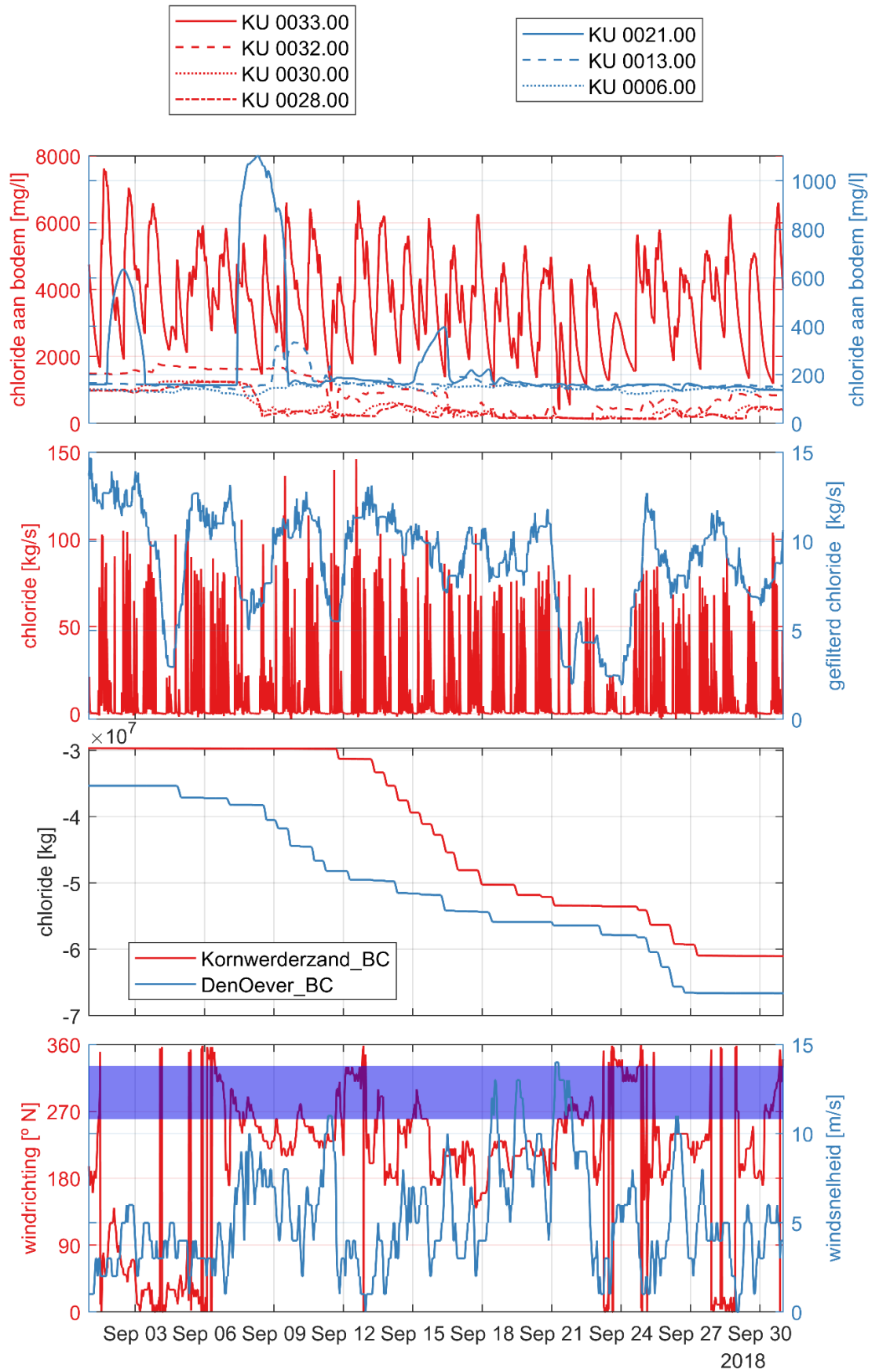


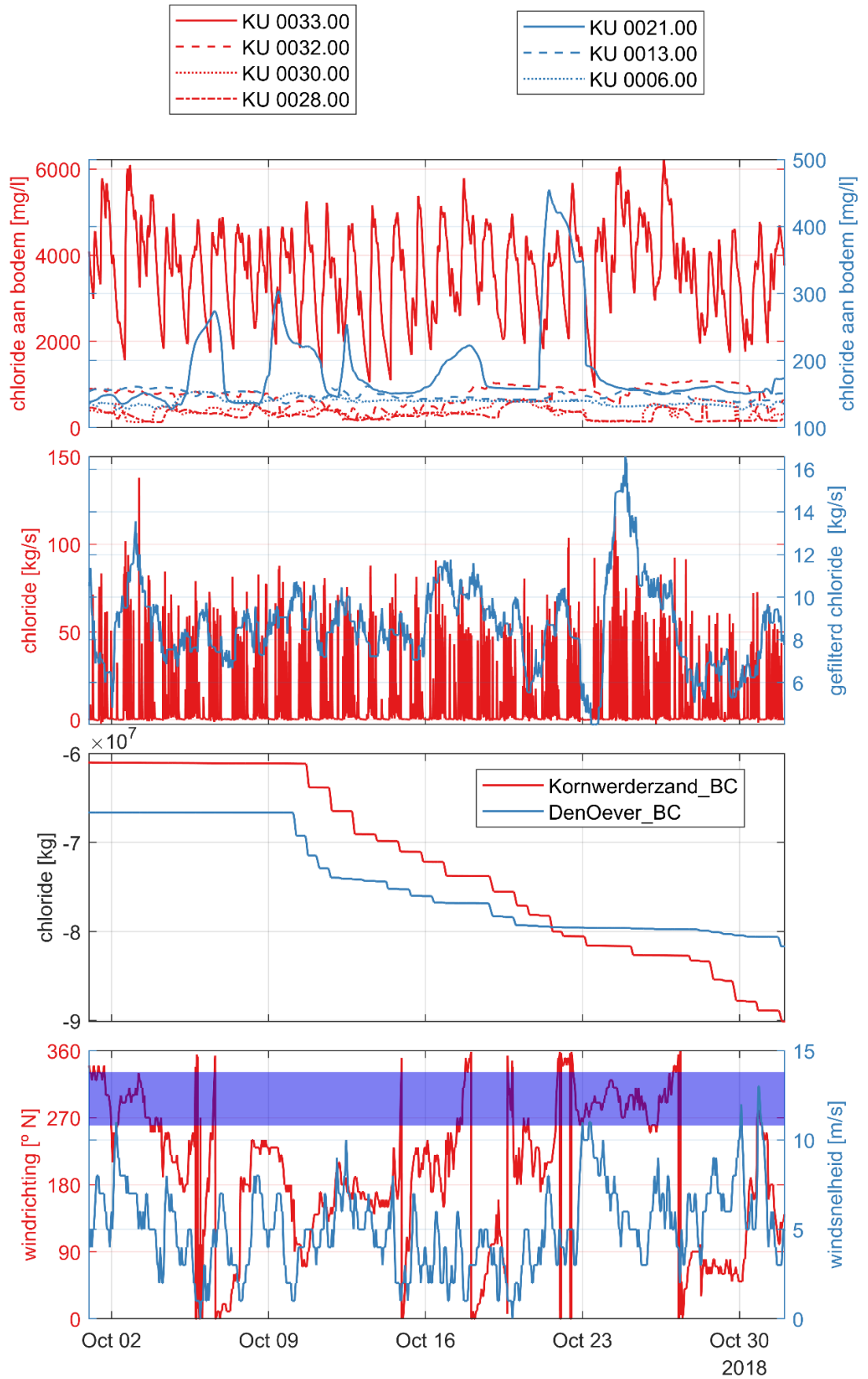
C.4 Scenario 3

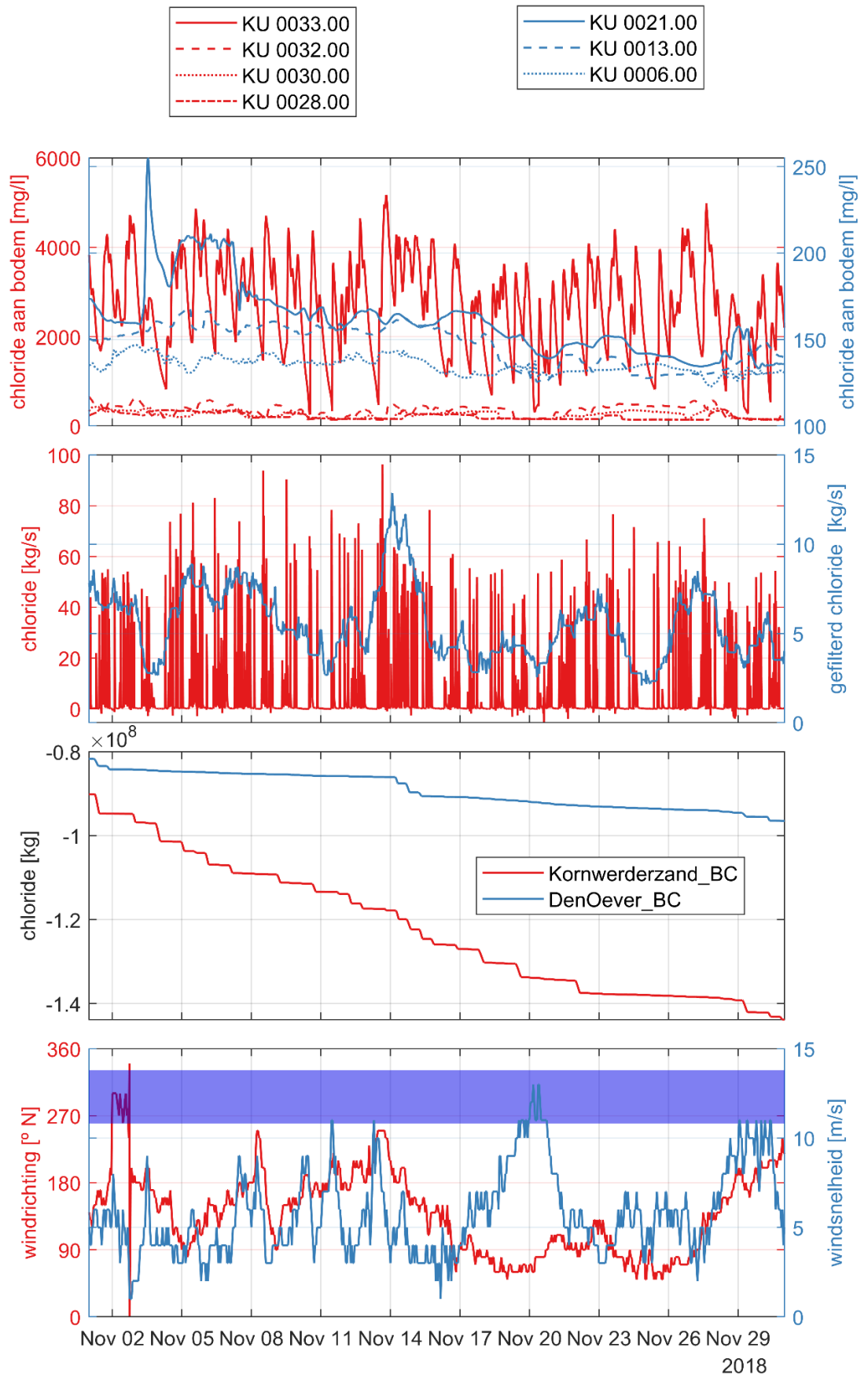


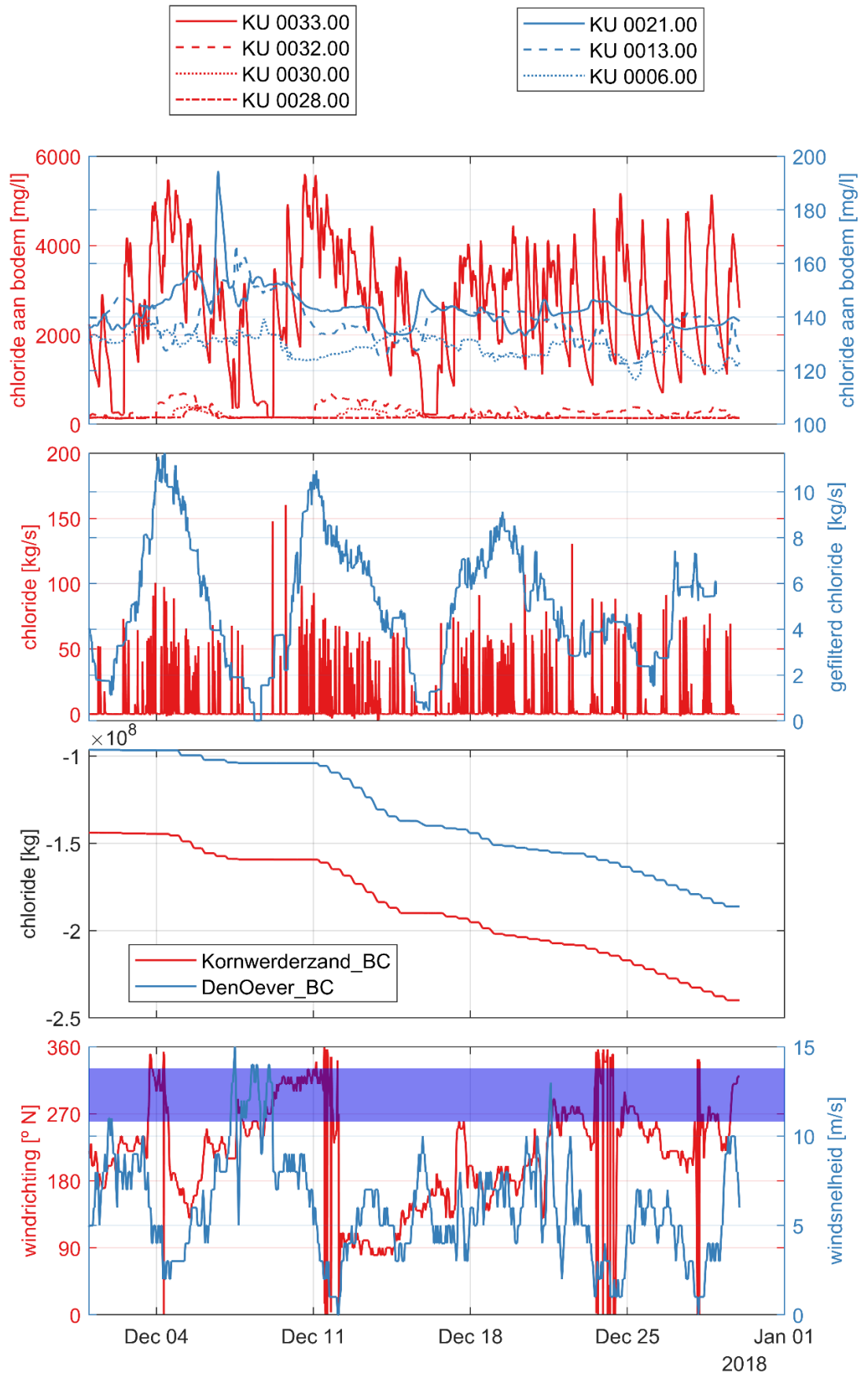




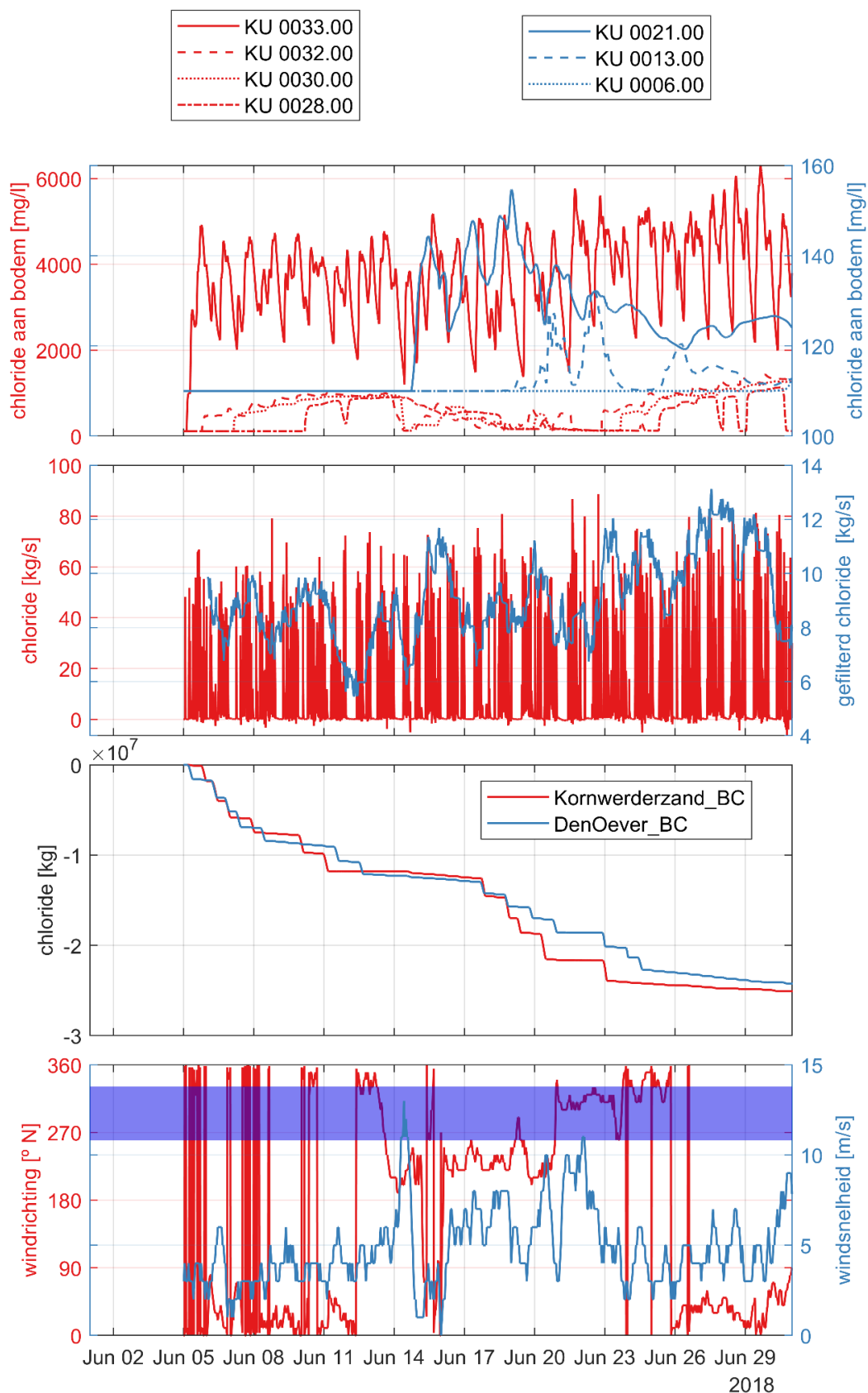


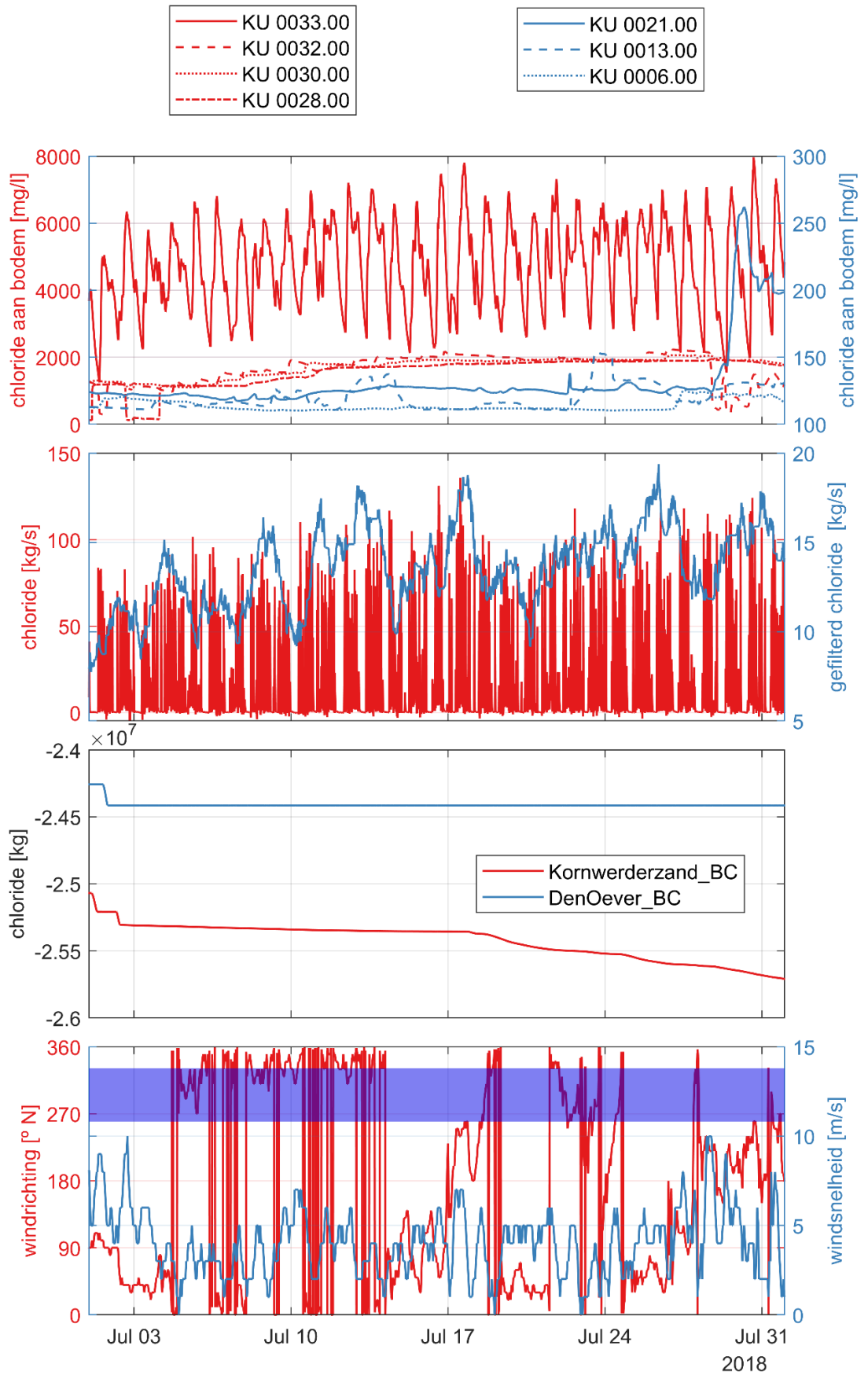


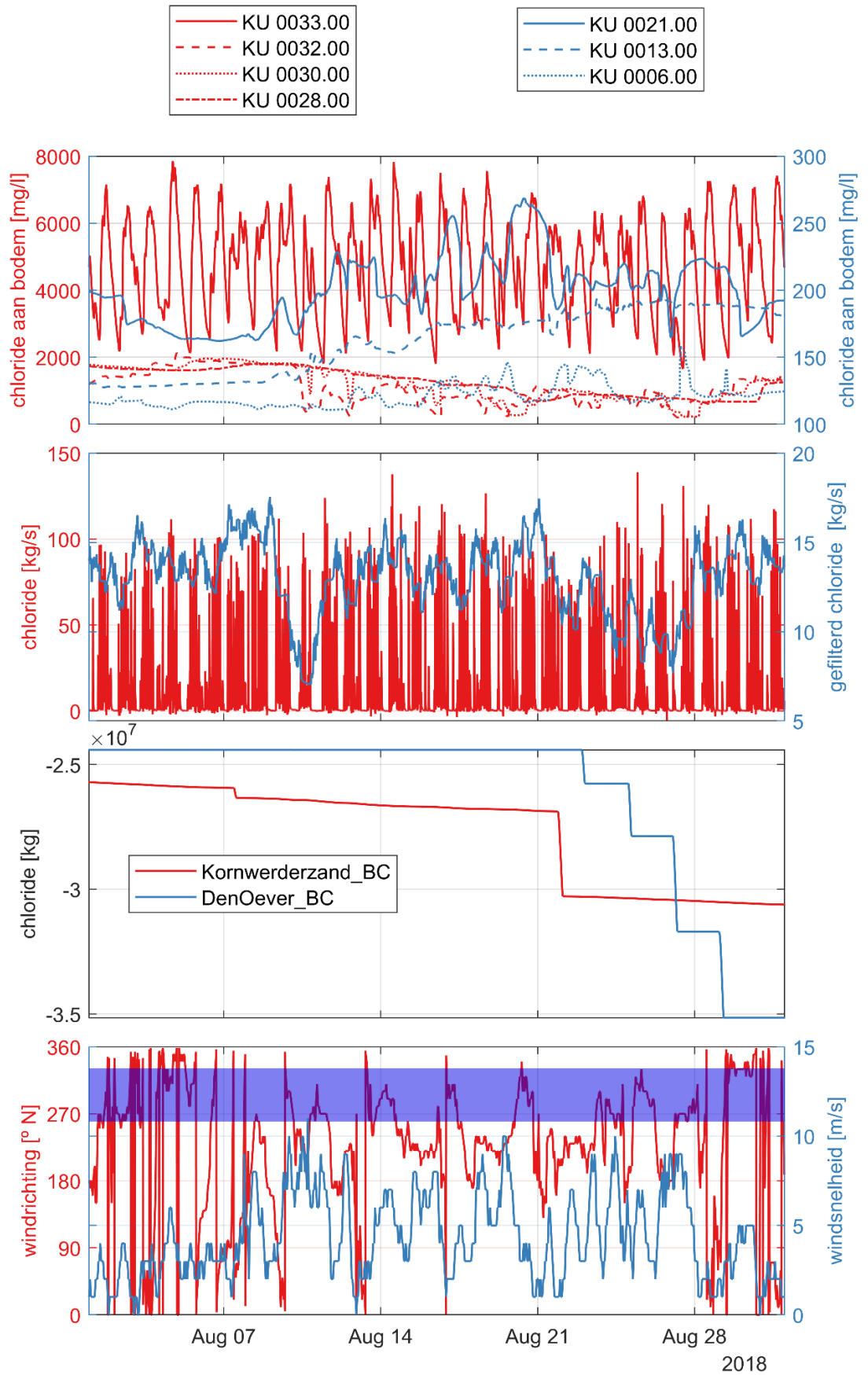


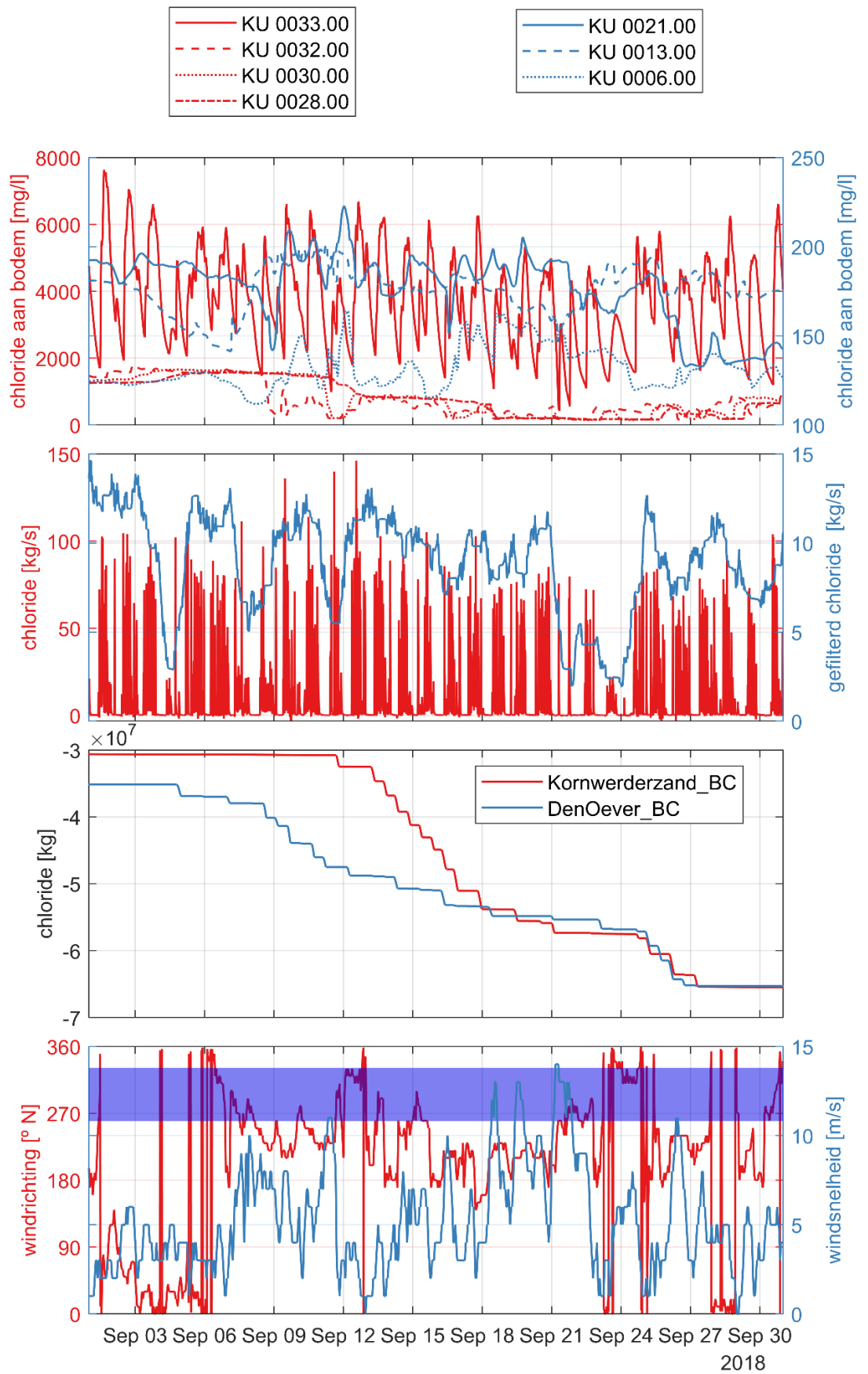


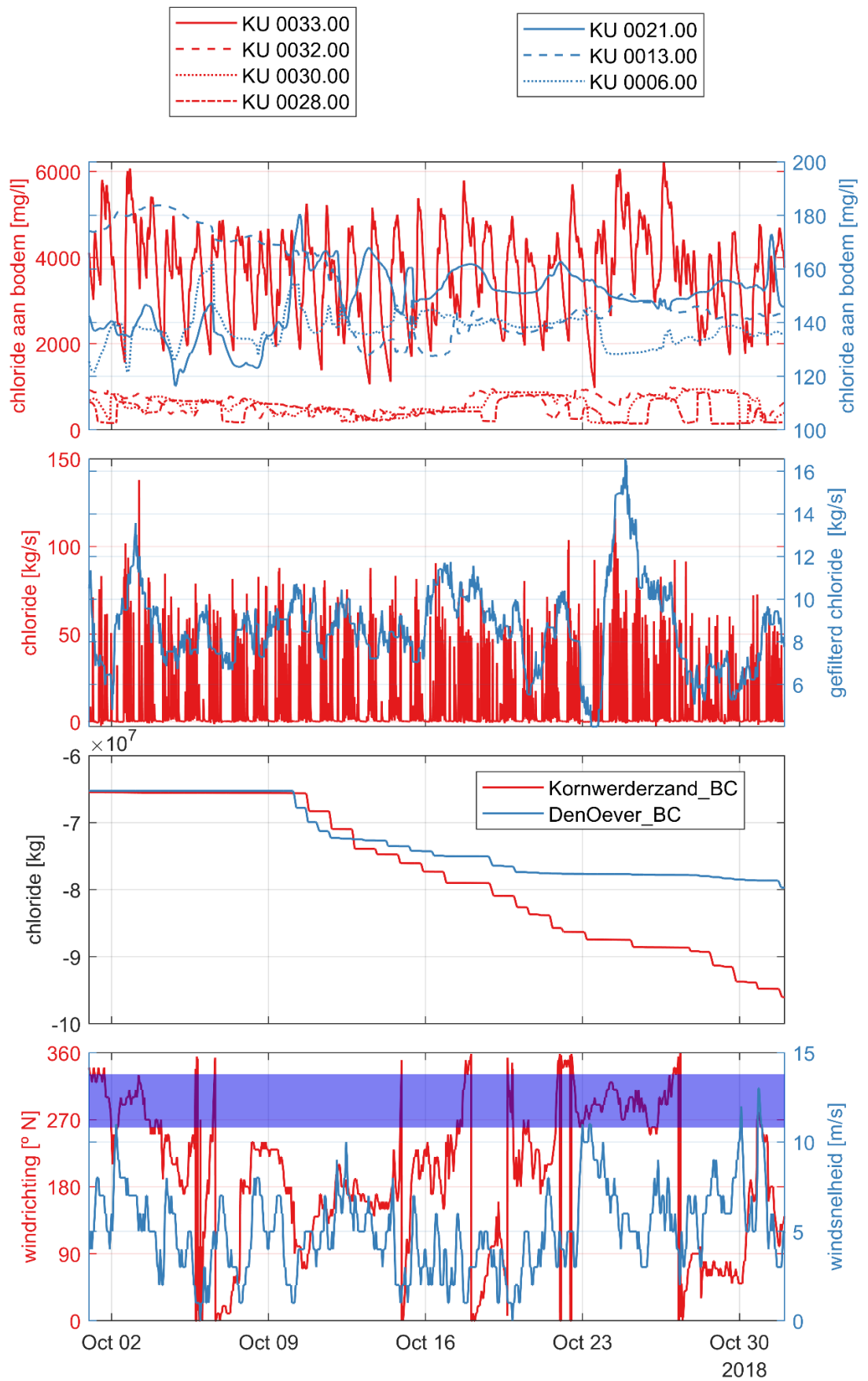
C.5 Scenario 4

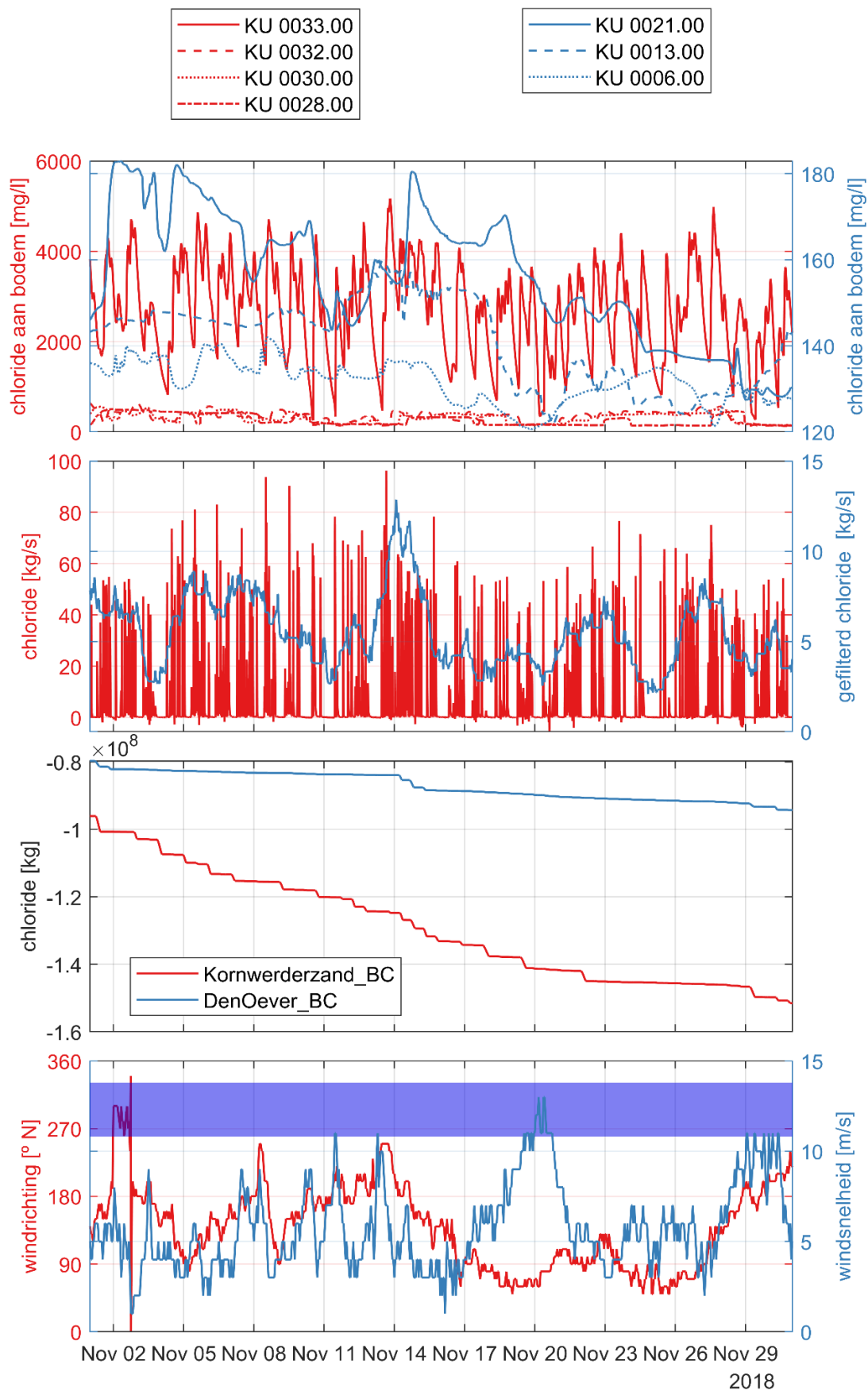


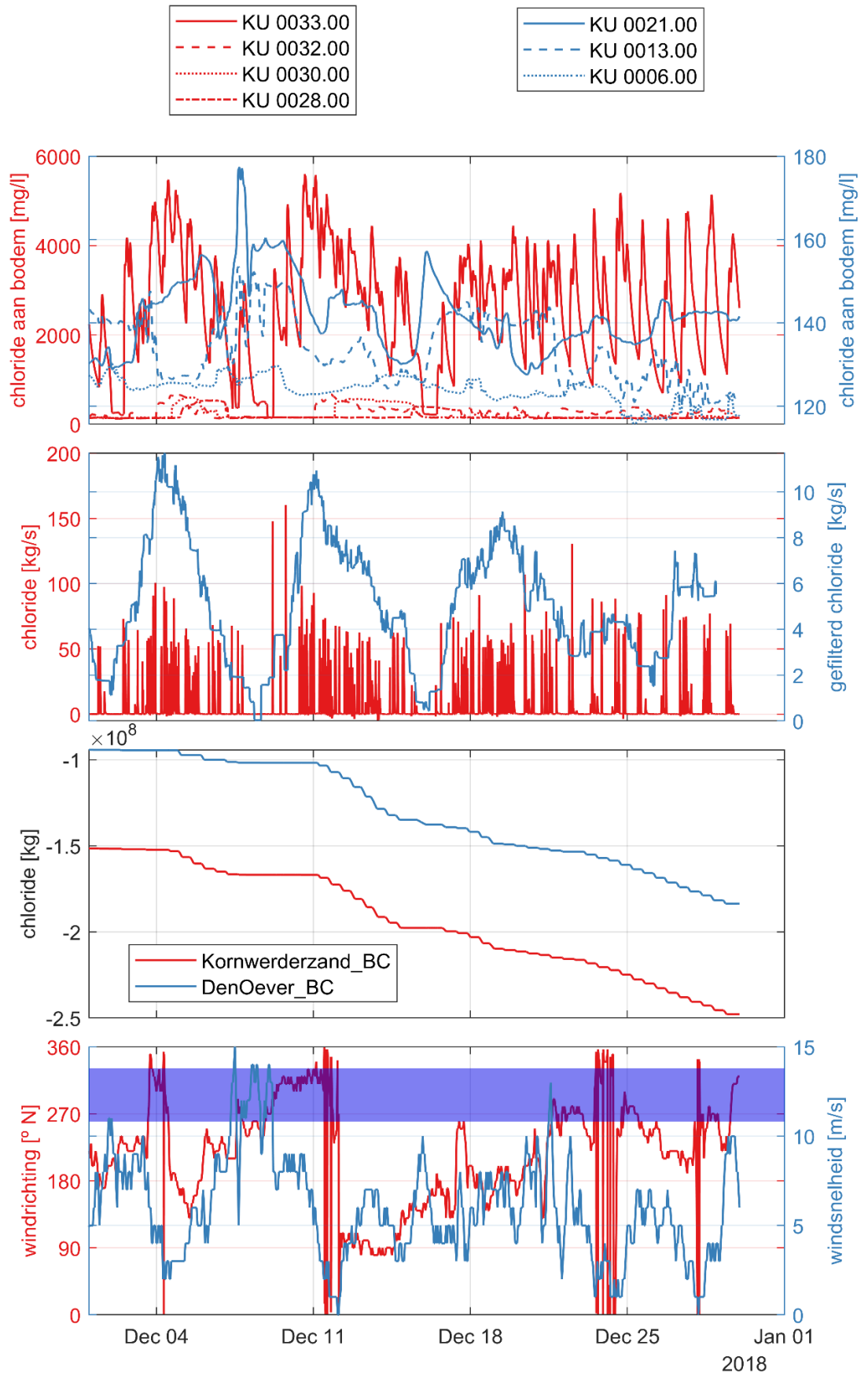








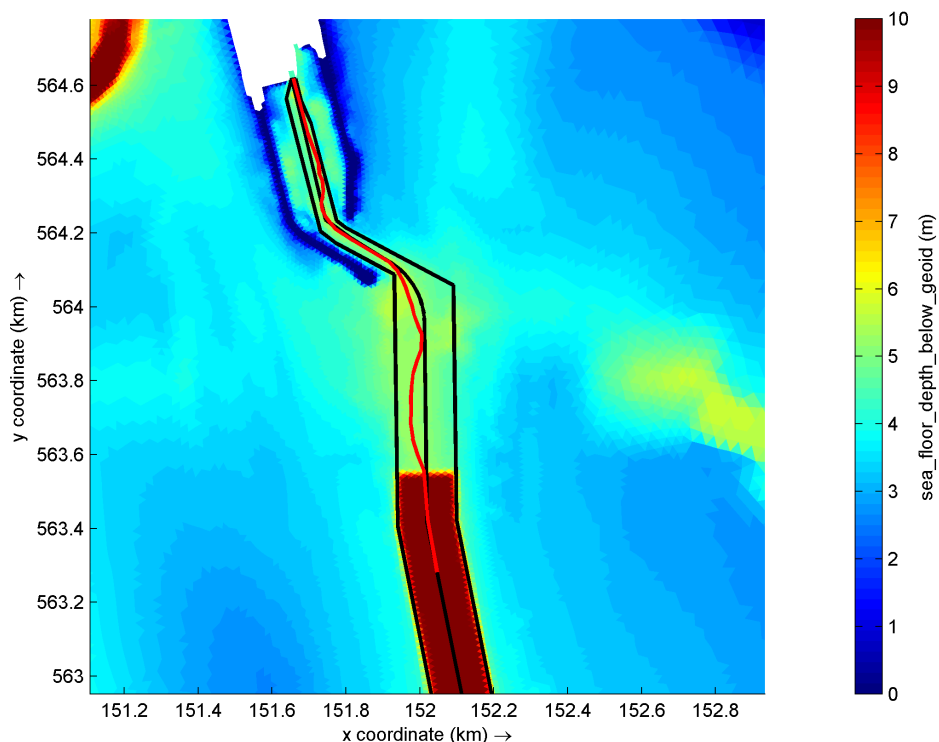




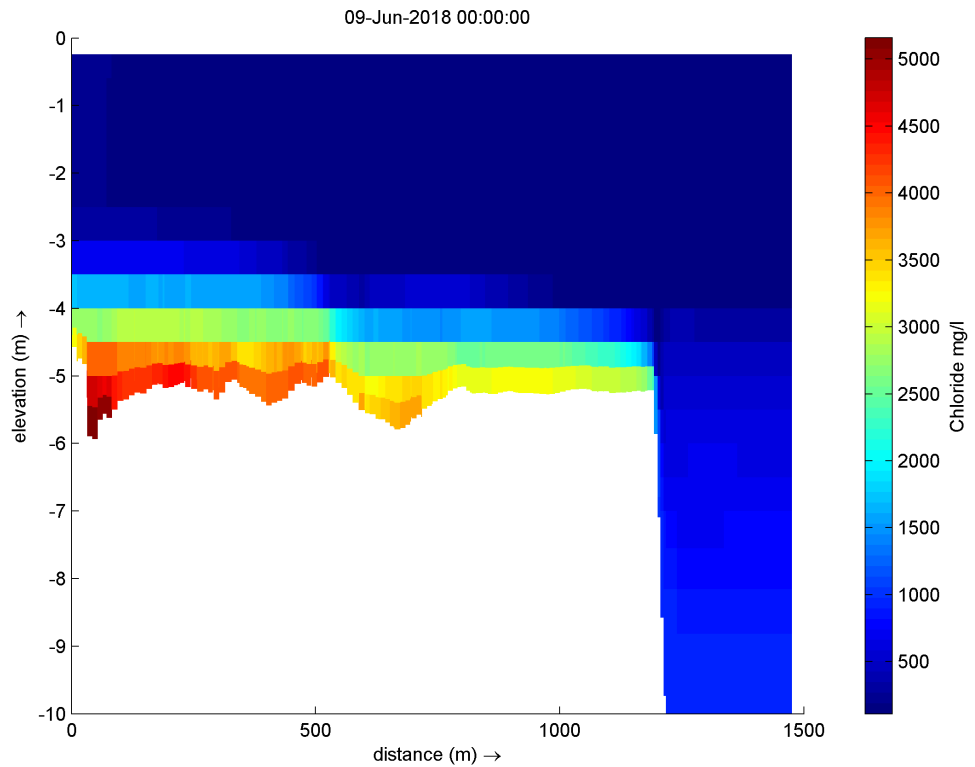
D Dichtheidsstroming over steil talud

Het 3D D-Hydro model van het IJsselmeer maakt gebruik van gecombineerde z- en sigma-lagen (5 sigma-lagen bovenop z-lagen) met een kenmerkende laagdikte van 0,5 m. Het model is hydrostatisch. De dichtheidsstromingen afkomstig uit de scheepvaartsluizen bij Kornwerderzand (KWZ) lopen de Binnenhaven uit en verspreiden zich dan in het IJsselmeer, waarbij een deel naar de verdiepte vaargeul loopt. Bij de verdiepte geul loopt de dichtheidsstroming over de rand, en dan over een steil talud naar beneden. Daarbij treedt entrainment van het omringende water op, resulterend in menging en verlaging van concentraties van de zoute instroming. De vraag is of deze menging enigszins realistisch wordt weergegeven in het model, gezien de steilte van de taluds. Die zijn met 1:4 namelijk steiler dan waar de toegepaste software voor bedoeld is (helling maximaal ca. 1:10). Dit is relevant omdat deze initiële menging bij het inlopen van de geul sterk bepaalt wat er verderop in de geul gebeurt. De voortplantingssnelheid van de dichtheidsstroming in de verdiepte geul en het opmengen door wind en windgedreven stromingen is namelijk sterk afhankelijk van de gerealiseerde dichtheidsverschillen.

Ter illustratie is een 2DV sectie gemaakt van het chloridegehalte en de stroomsnelheid langs de 'thalweg' (rode lijn) van de grote sluis bij KWZ naar monitoringpunt KU_0032 ca. 1500 m verder in het begin van de verdiepte vaargeul voor Scenario 4, zie Figuur D-1. De eerste 1200 m is de diepte ca. -5,5 m NAP, de verdiepte vaargeul is -10 m NAP. Voor het talud is in het model 1:4 aangenomen.



Figuur D-1 'Thalweg' (rode lijn) van de grote sluis bij Kornwerderzand naar het begin van de verdiepte vaargeul (monitoringpunt KU_0032) in Scenario 4. Diepte in m onder NAP.

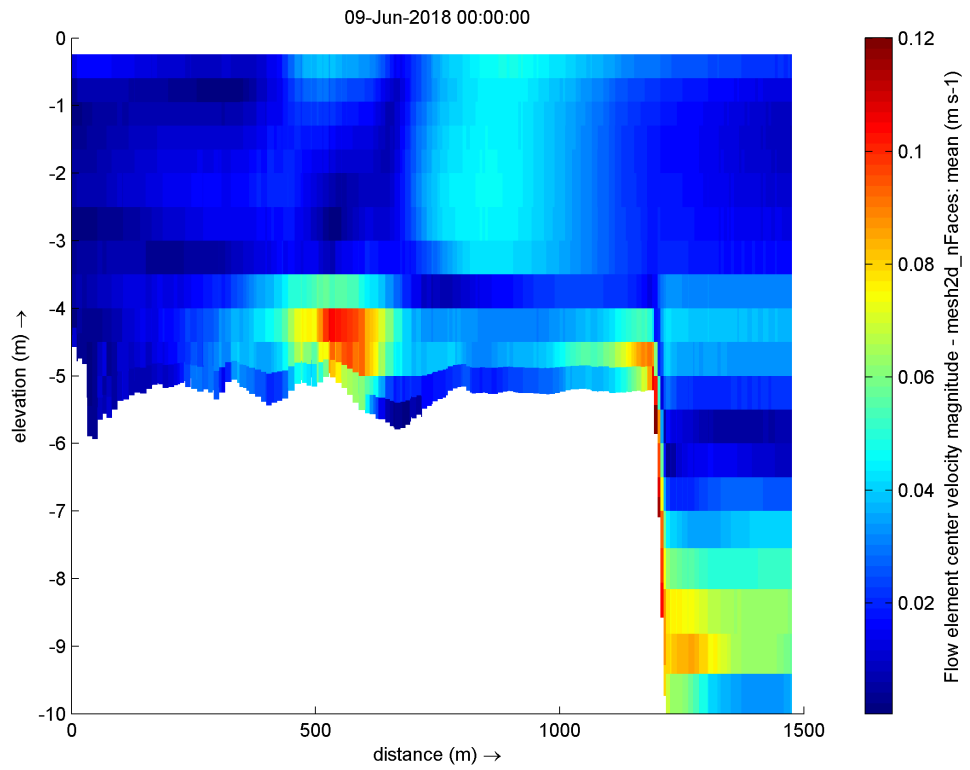


Figuur D-2 Verdeling van het chloridegehalte (mg/l) langs de thalweg, 4 dagen na begin van de berekening voor Scenario 4.

Als kenmerkend voorbeeld geven we het verloop van het chloridegehalte langs de thalweg 4 dagen na de start van de berekening, zie Figuur D-2. Aan de bodem tussen de havenhoofden (op 500 m) is de waarde ca. 4000 mg/l. Dit laatste punt valt samen met monitoringstation KU_0033, waar het zoutgehalte sterk varieert over de dag als gevolg van de schuttingen (ongeveer tussen 2800 en 4600 mg/l op 8 juni). Bij het over de rand gaan verdunt het chloridegehalte van ca. 2500 mg/l naar ca. 1000 mg/l op de bodem van de verdiepte vaargeul. Boven de rand zit tussen -4 en -5,5 m een dipje in het chloridegehalte. Links hiervan stroomt de zouttong naar de rand toe, en rechts hiervan stroomt water toe ten gevolge van de entrainment in de stroming langs het talud.

De bijbehorende magnitude van de stroomsnelheden staan in Figuur D-3. De getoonde magnitude is onafhankelijk van stroomrichting, d.w.z. niet beperkt tot snelheden in het getoonde 2D verticale vlak. Langs het talud treden snelheden op van ca. 0,1 m/s. Dit is de snelheid waarmee het water in een smalle zone (orde 10 m in horizontale richting) omlaag stroomt langs het talud. Het andere snelheidsmaximum van 0,1 m/s ongeveer tussen 500 en 600 m heeft vermoedelijk te maken met enige concentratie van stroming voor de havenmond.

Of de menging als gevolg van de dichtheidsstroming over een steil talud goed wordt weergegeven door het model vereist nadere verificatie op basis van metingen in het prototype of op basis van theorie of schaalmodelproeven of numerieke modelproeven met CFD codes. Een andere mogelijkheid is een berekening uit te voeren met flauwere hellingen van 1:10 aan het begin en einde van de verdiepte vaargeul. De effecten worden dan beter weergegeven door de software. Omdat het flauwere talud naar verwachting met minder menging gepaard gaat, zou dit een bovengrens voor de verzilting kunnen opleveren.



Figuur D-3 Verdeling van de magnitude van de stroomsnelheid (m/s) langs de thalweg, 4 dagen na begin van de berekening voor Scenario 4.

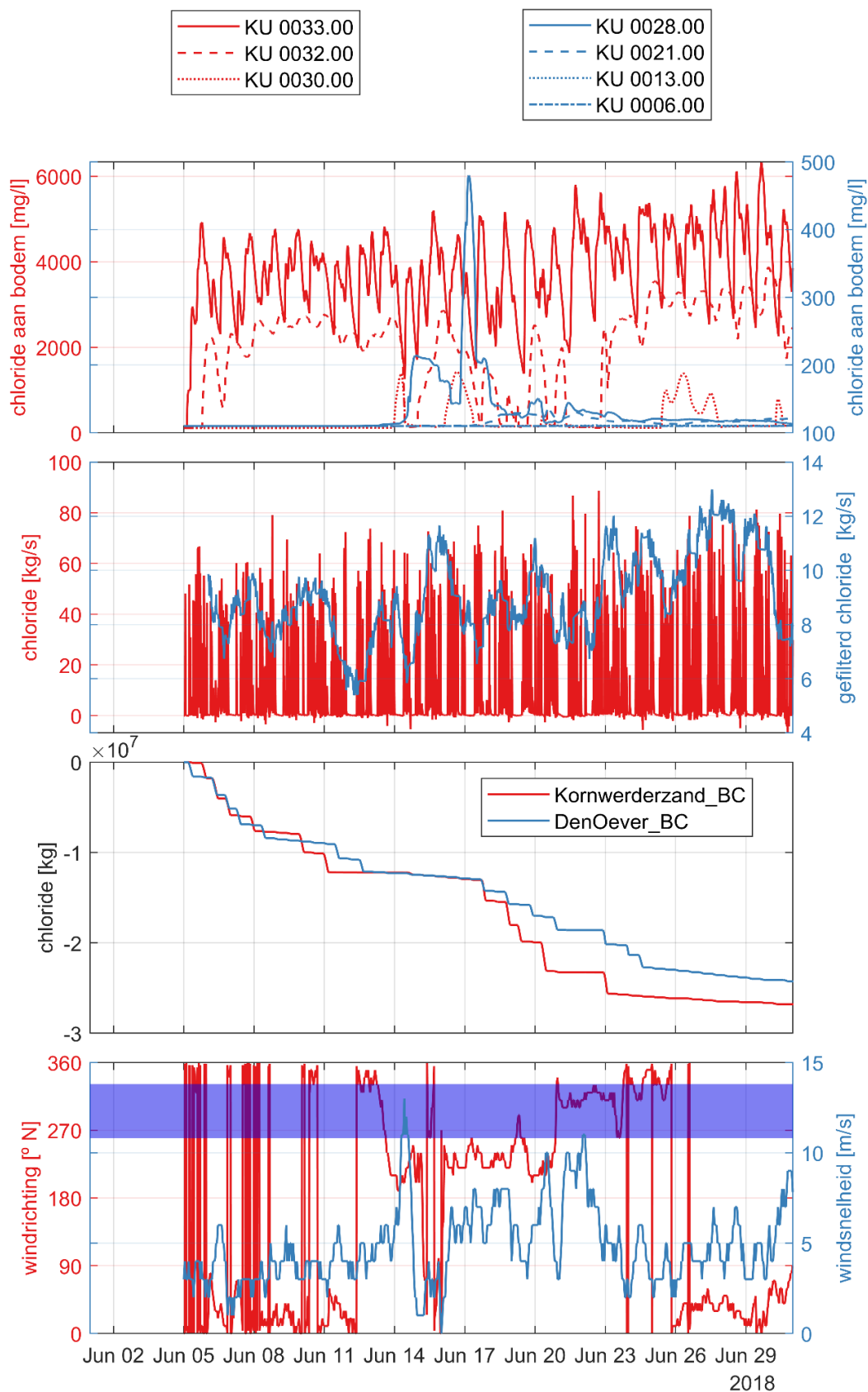
E Maandplots chloridegehalte aan de bodem in geselecteerde stations in de vaargeul versus randvoorwaarden, Scenario 0a en 1a

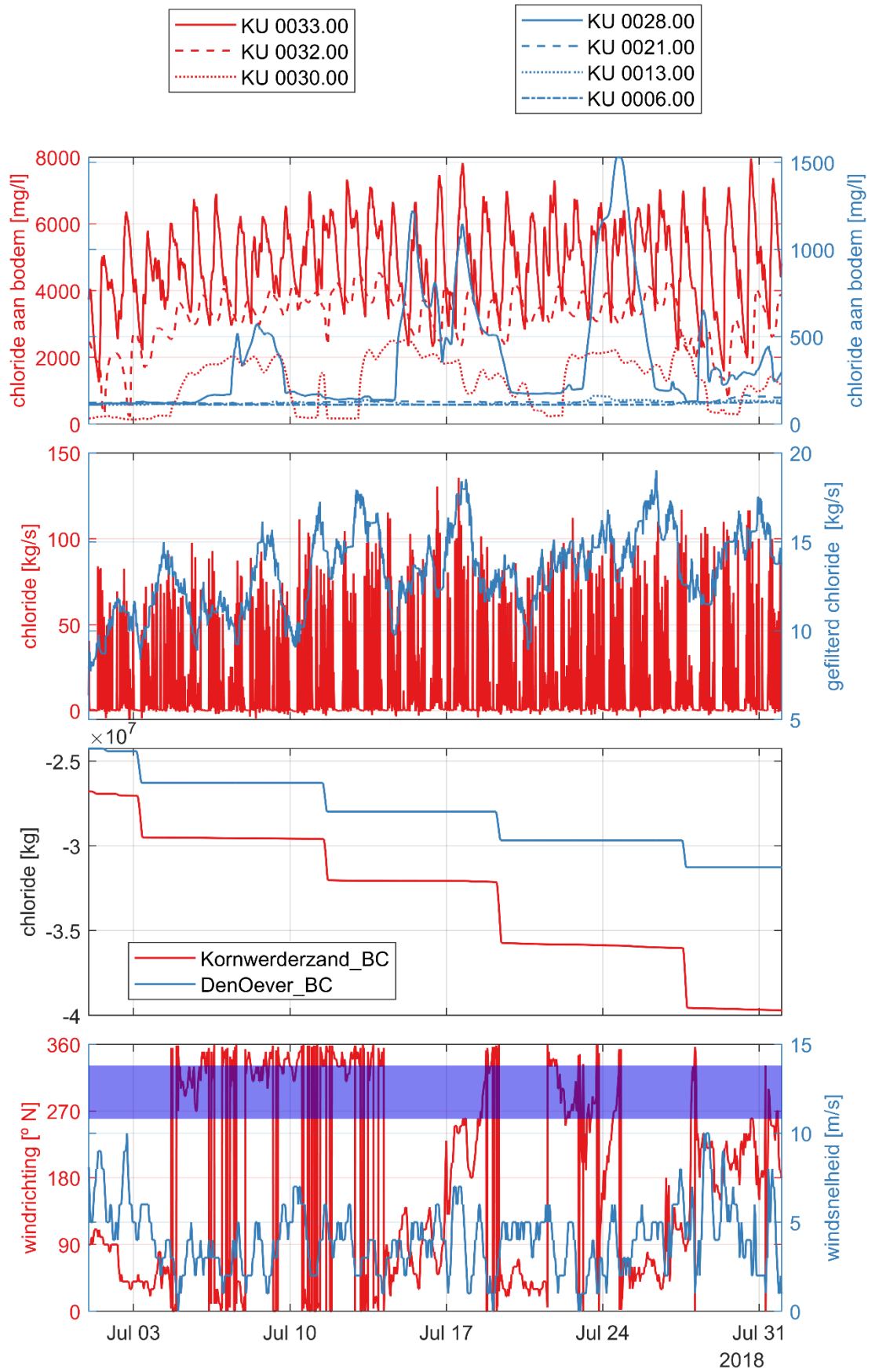
Deze Bijlage geeft voor de Scenario's 0a en 1a (Scenario 0 en 1 met extra spuien) de 7 maandplots per berekening met de tijdreeksen van het chloridegehalte aan de bodem in geselecteerde stations in de vaargeul (bovenste venster) en de randvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen, de spuisluizen en de wind. Zie Bijlage C voor een verder beschrijving

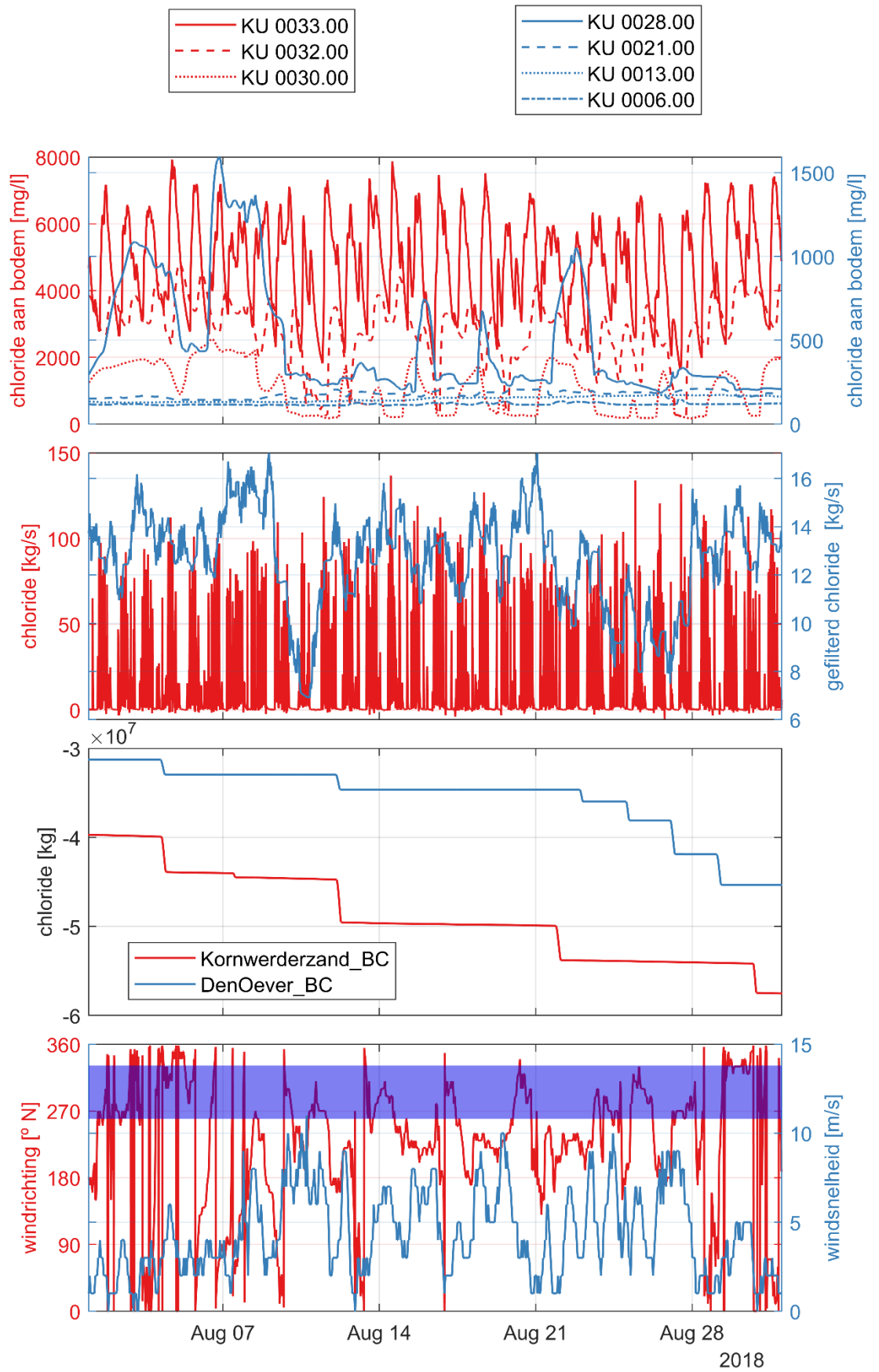
Achtereen volgens worden de volgende scenario's gepresenteerd:

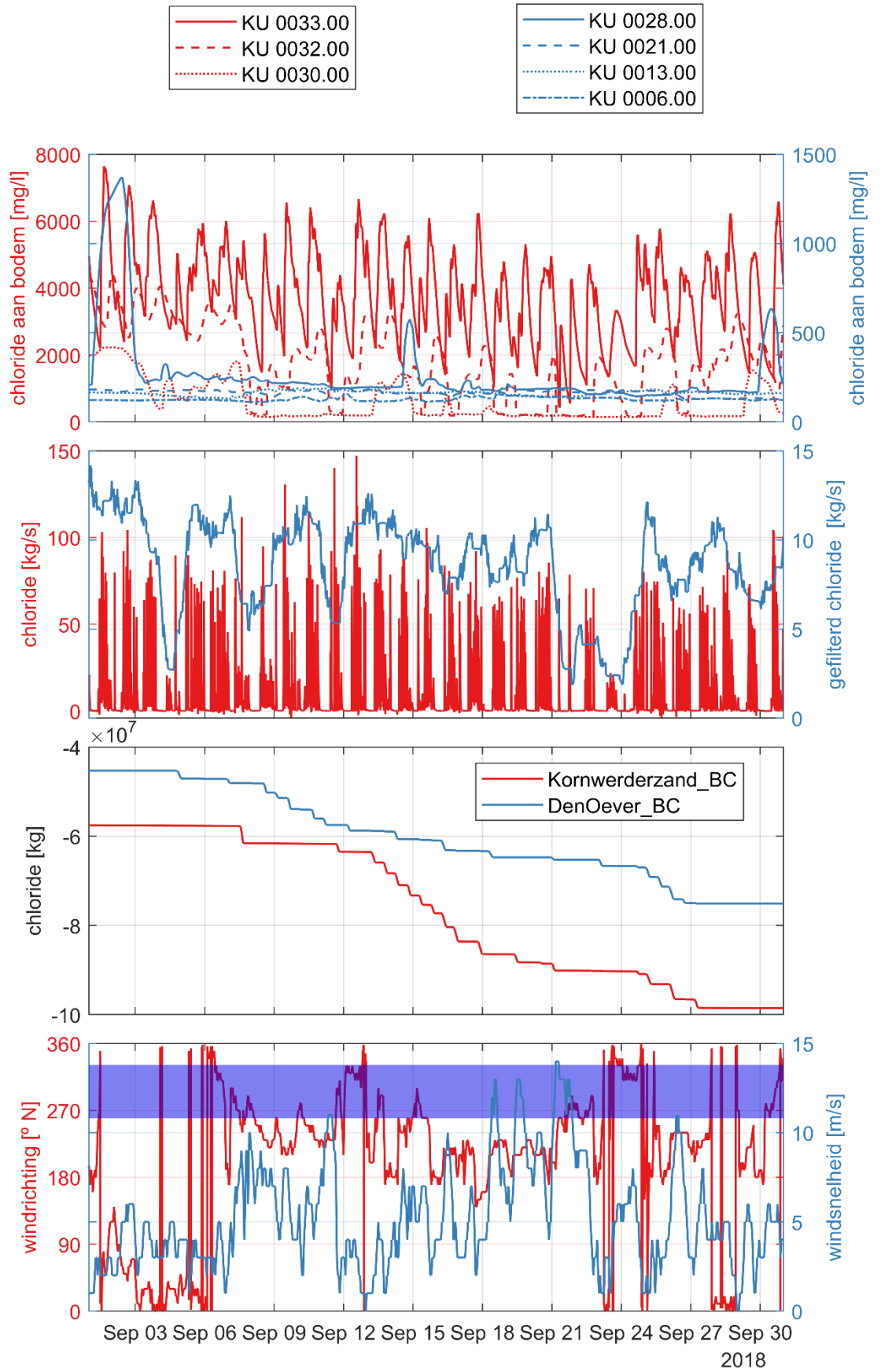
- Scenario 0a, nieuwe referentiesituatie met extra spuien, zonder verdiepte vaargeul (pagina 80 – 86).
- Scenario 1a, met extra spuien, vaargeul verdiept tot -10 m NAP (pagina 87 – 93).

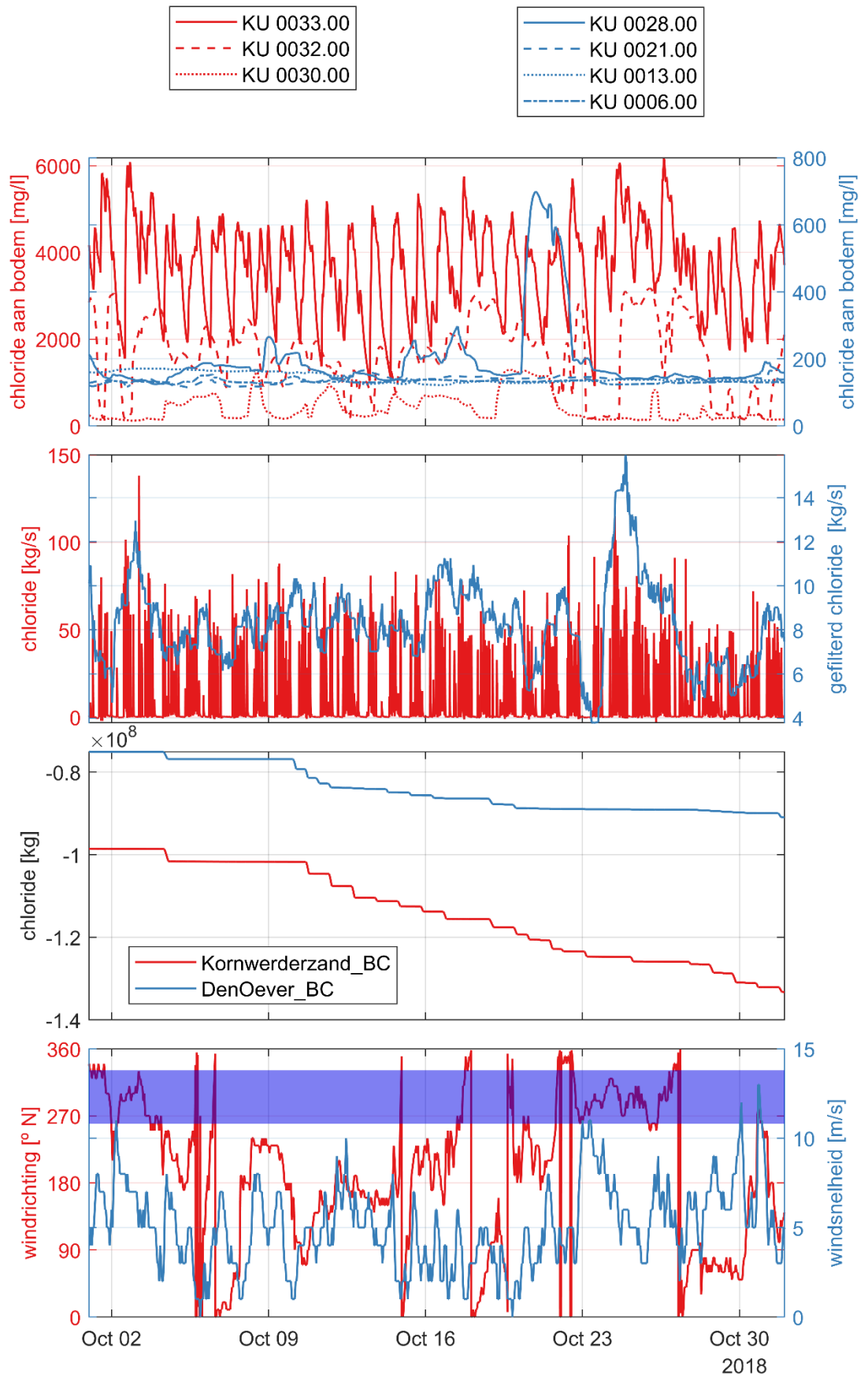
E.1 Scenario 0a

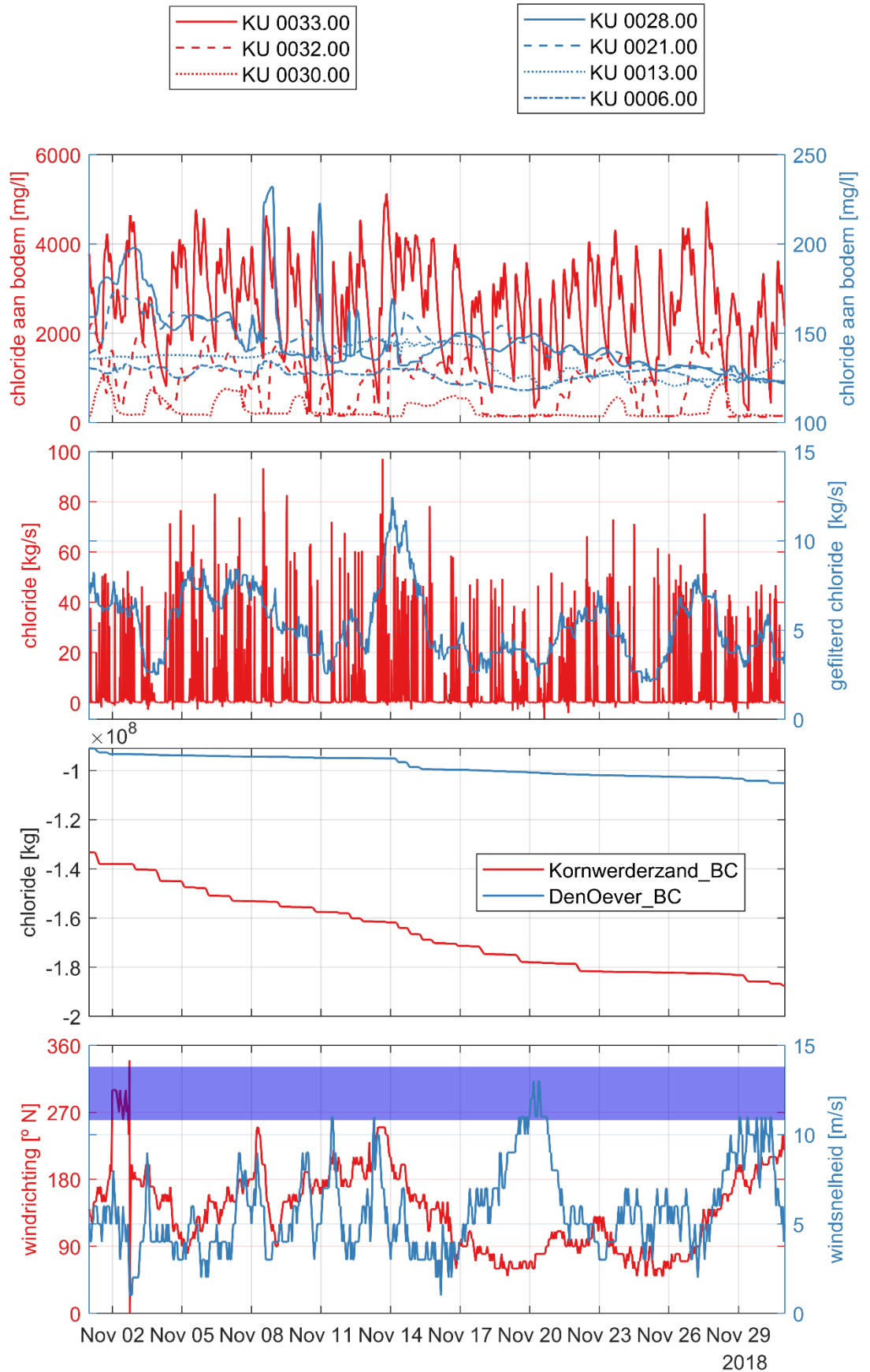


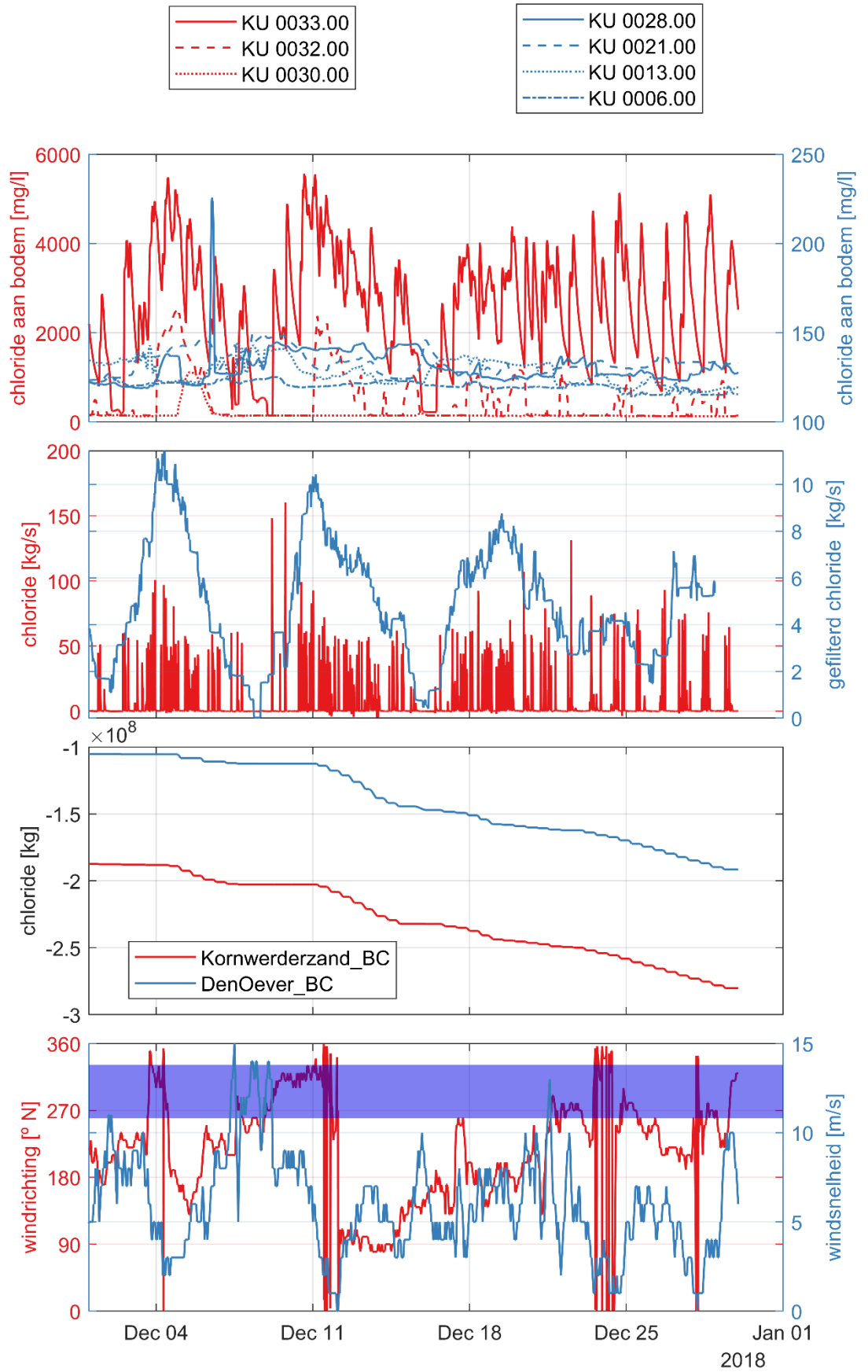




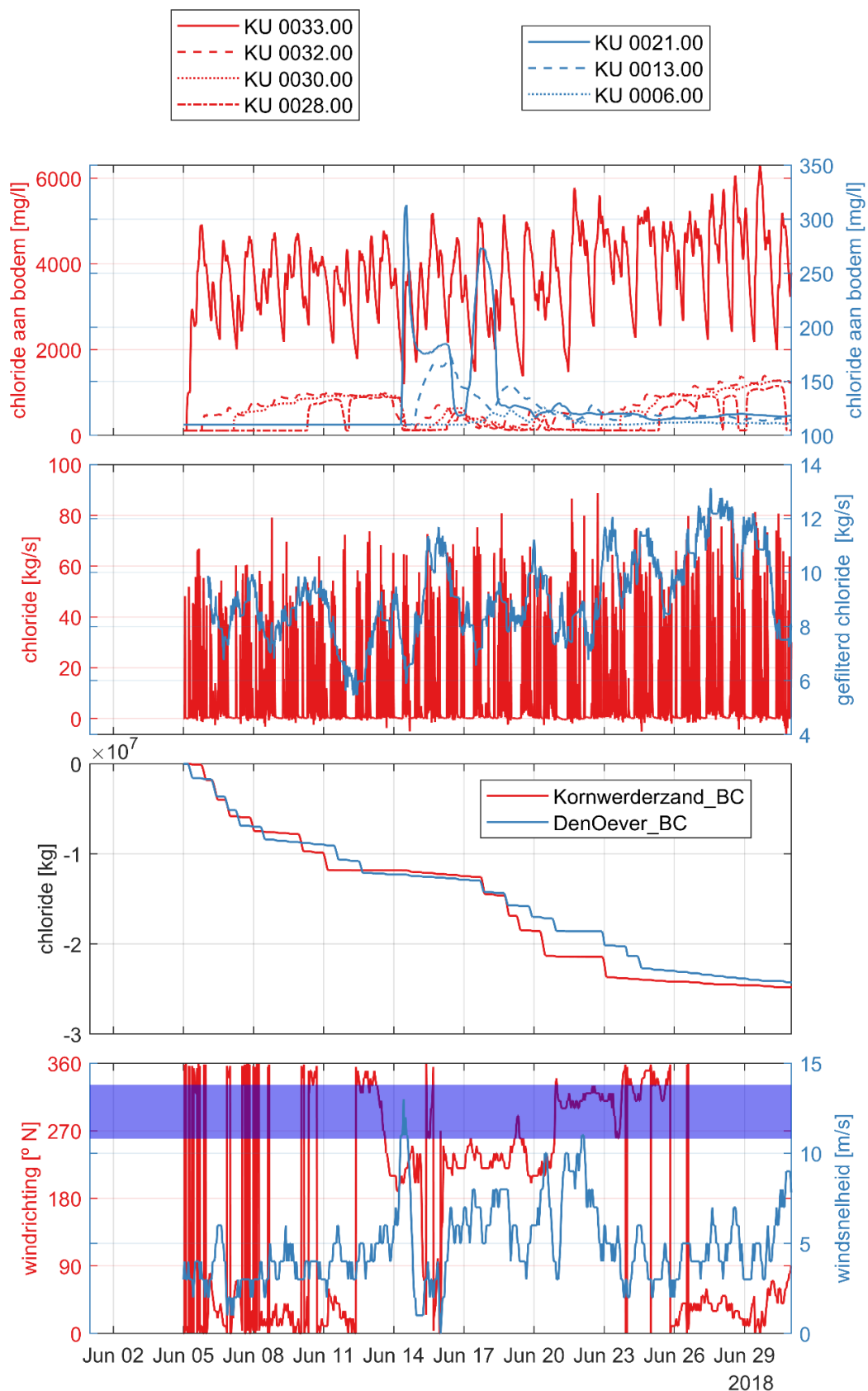


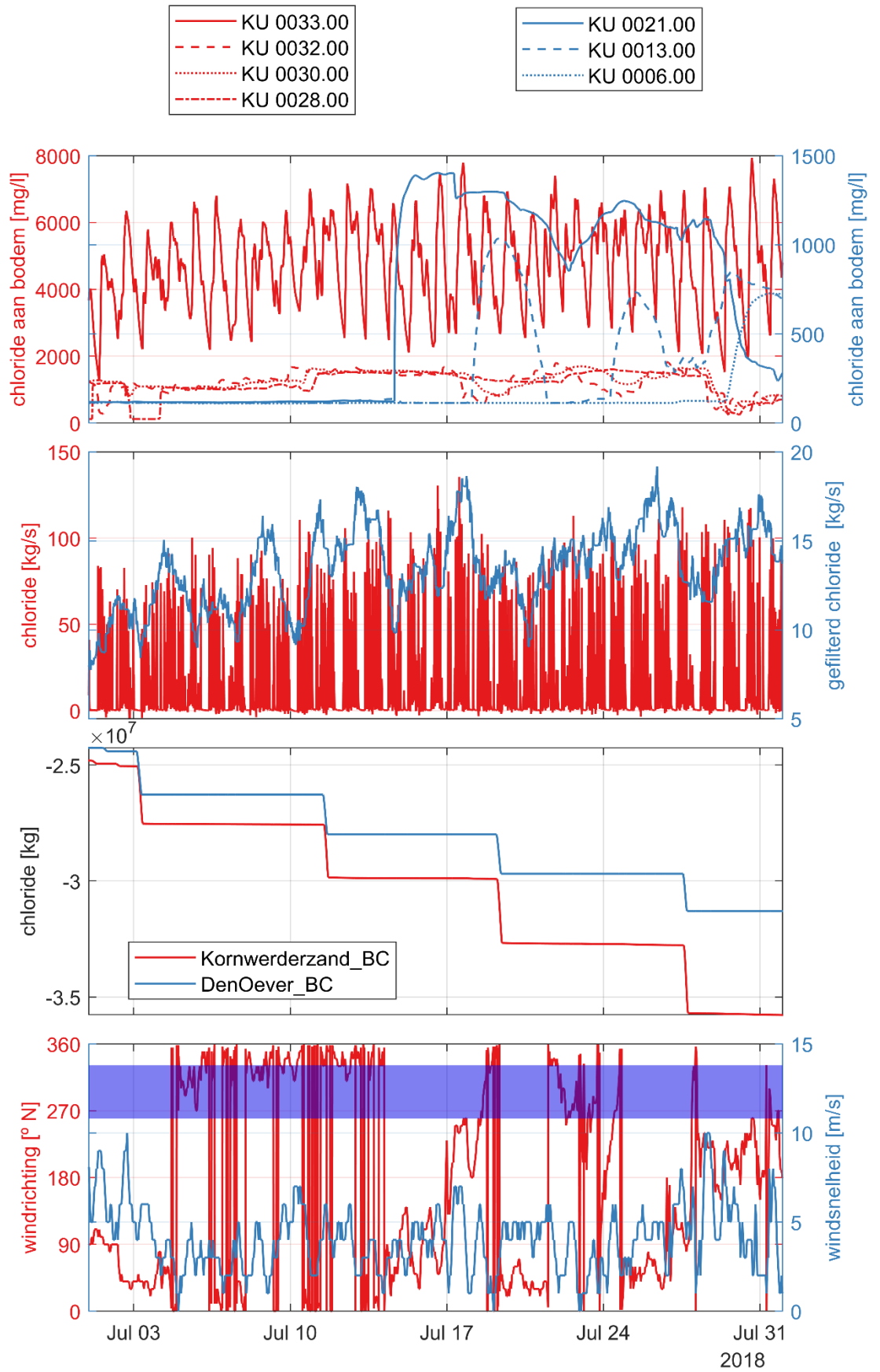


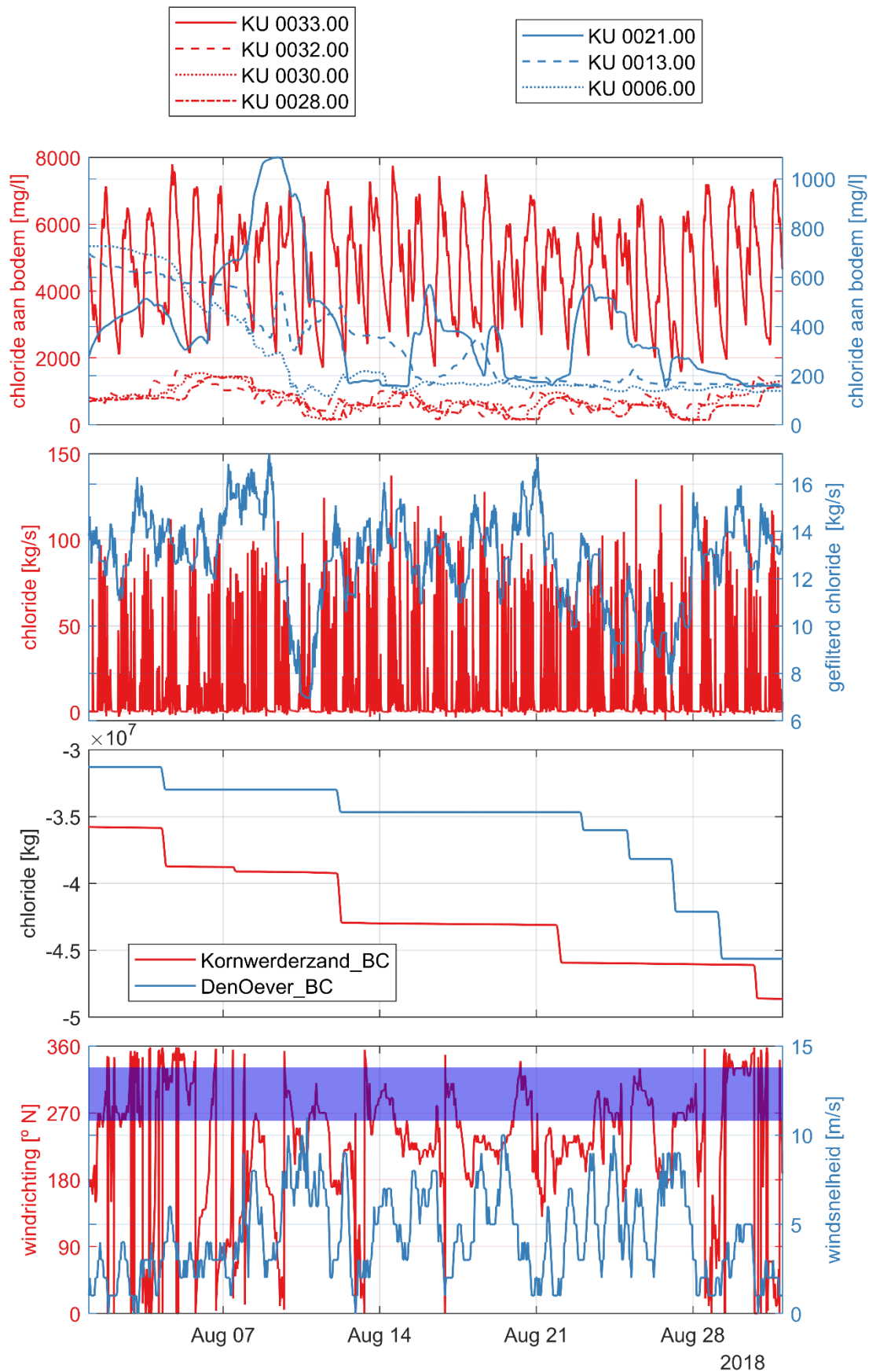


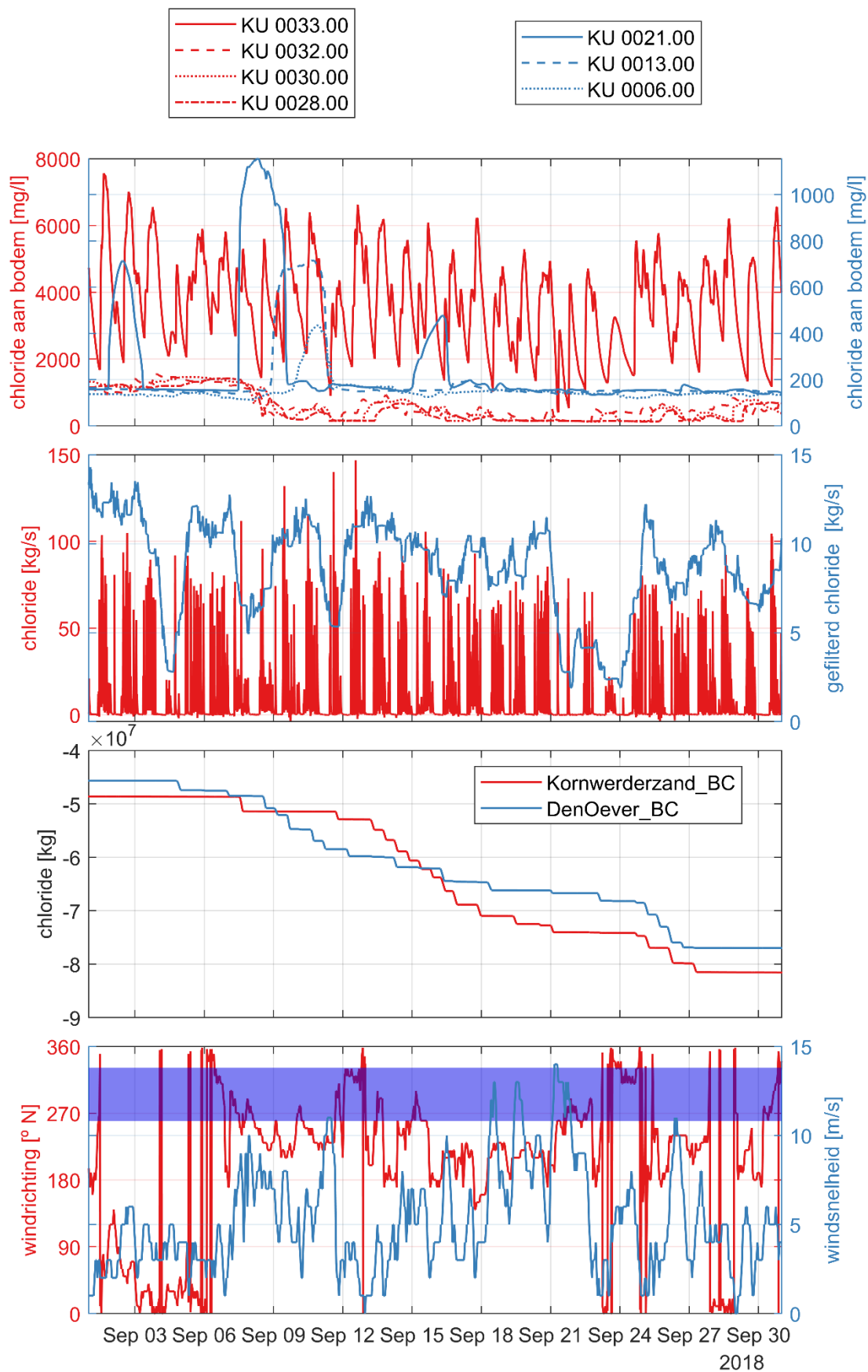


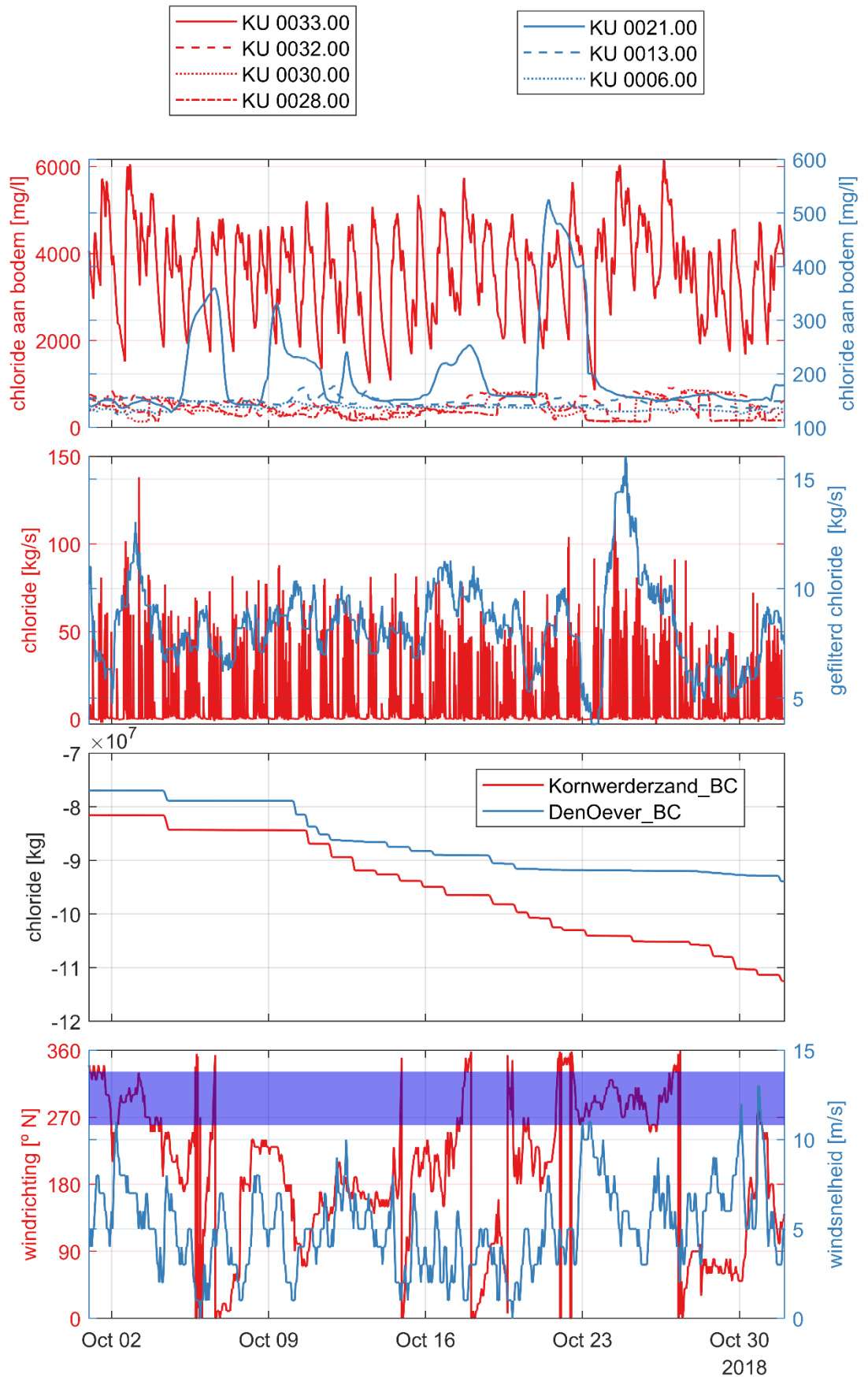
E.2 Scenario 1a

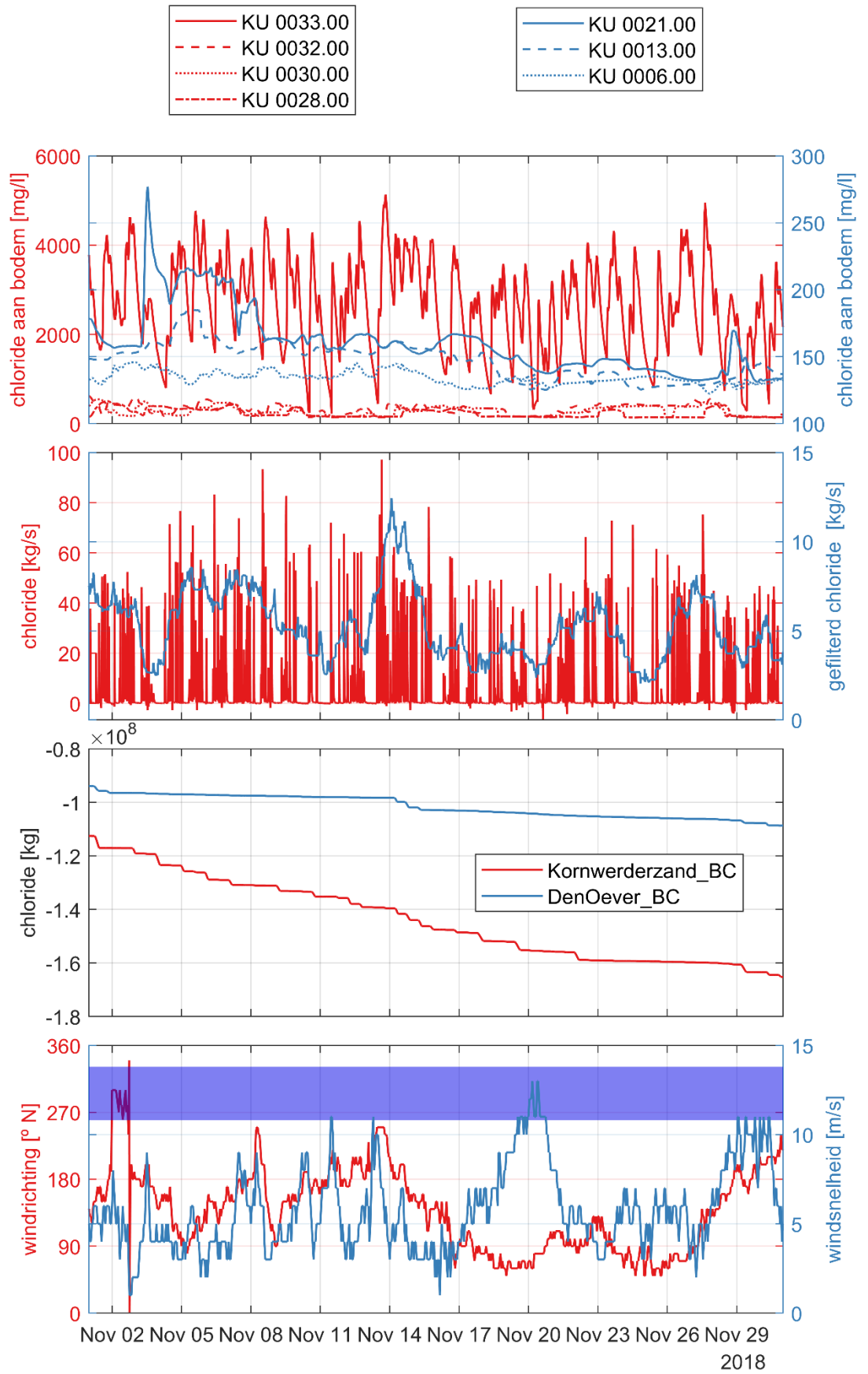












Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl