

Bijlage B
Bouwsteen 2
Toekomstbestendig
Regionaal Waterbeheer

Modellering

1.1 KELP-SW model opzet Negenboerenpolder

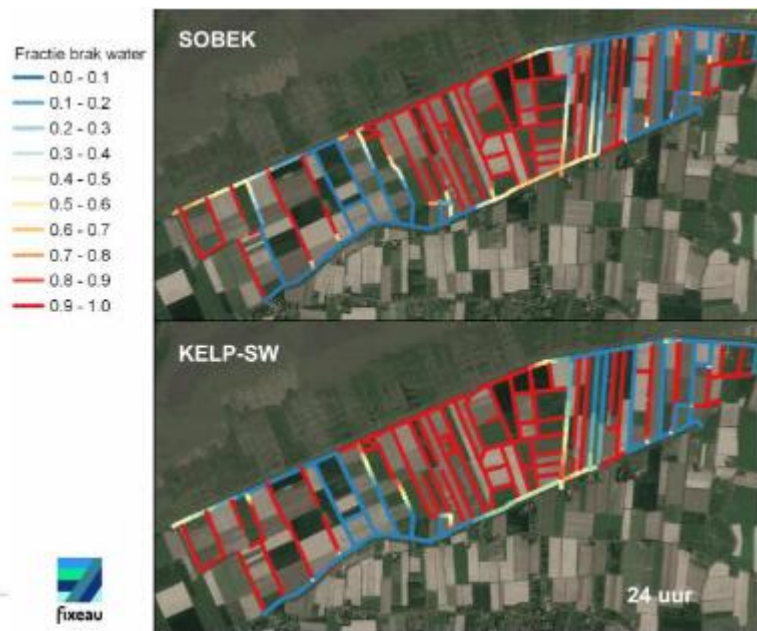
Introductie KELP-SW

Huidige hydrologische modellen zijn zo omvangrijk en complex dat deze zich niet lenen voor 'real-time' berekeningen van de waterkwaliteit van oppervlaktewater. Voor de analyse van het oppervlaktewatersysteem wordt traditioneel gebruik gemaakt van het landelijke model SOBEK. Het nadeel van SOBEK is dat dit een goed 2D model is om enkele varianten door te rekenen maar dat het veel rekentijd vergt. Binnen dit project wordt een nieuw type zeer snel rekenend model ingezet waarmee op basis van slimme algoritmes het stromingsbeeld wordt gevangen. Het nieuw ontwikkelde model is genaamd KELP-SW (surface water).

De uitgangspunten zijn dat het nieuwe model de verspreiding/verplaatsing zoutconcentraties snel kan uitrekenen en voorspellen. Voor een SOBEK model zijn vele input parameters nodig. Voor het KELP-SW model zijn relatief weinig input gegevens nodig.

Het KELP-SW model heeft als primair doel om inzicht te krijgen in de verspreiding van zout in bijvoorbeeld een polder met sloten. Het model neemt aan dat meeliften met water (advectie) het belangrijkste transport mechanisme is van het zout en dus is het noodzakelijk om de stroming van het water in de sloten te modelleren. Dit wordt gedaan met een simpel netwerk van waterbakjes en waterlopen met als basisprincipe dat het water streeft naar een vlak wateroppervlak. Er wordt gewerkt met een klein aantal modelparameters, waardoor 'overmodellering' voorkomen wordt. Met dit stromingsmodel en een efficiënte administratie van waar het zout zich bevindt, kan er veel sneller gerekend worden aan de verspreiding van het zout, terwijl de resultaten vergelijkbaar zijn met SOBEK.

Een vergelijking tussen de eerste versies van KELP-SW en SOBEK laten zien dat dat de runtijd van SOBEK 12-15 minuten, en van KELP-SW 15 seconden voor eenzelfde scenario. Door een slimme rekentechniek, rekent KELP-SW 50 tot 100 keer sneller dan SOBEK. De onderstaande figuur toont het resultaat van een testmodel van de Negenboerenpolder (Groningen) waarbij in de figuur een vergelijking is gemaakt tussen SOBEK en KELP-SW. Het resultaat is zeer vergelijkbaar met als verschil dat SOBEK voor de berekening 15 minuten nodig heeft versus ca. 10 seconden voor KELP-SW.

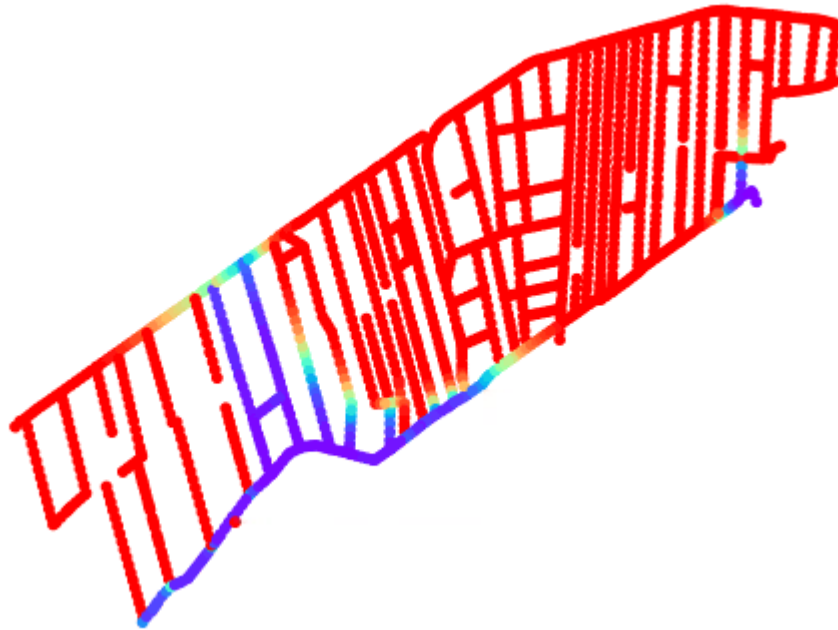


Figuur 1. Vergelijking tussen SOBEK en KELP-SW van een simulatie voor de Negenboerenpolder, waarin zoet water inlaat wordt gesimuleerd in startsituatie met een brakke sloten.

De snelle rekentijd opent mogelijkheden om 'real time' met het model te spelen of om veel scenario's door te rekenen en daarmee vat te krijgen op onzekerheden of optimalisatie. Dit alles met als doel om sneller en beter begrip en inzicht te krijgen in het watersysteem. Maar ook om heel simpel het effect van een ingreep (bijv. het plaatsen van een stuw of additionele inlaat) in het watersysteem vrijwel 'real time' door te rekenen en direct visueel te maken. Het KELP-SW model zal gebruikt worden tijdens het project om scenario's voor waterbeheer en interventies te analyseren.

Model informatie

Het KELP-model is gebied dekkend, en werkt met nodes ofwel knooppunten waarin een bakje van water wordt gesimuleerd. De principes van het KELP model zijn gebaseerd op de vloeistofdynamica: behoud van water, en hoogteverschil en weerstand als krachten (impulsbehoud). De waterstroom is evenredig met de helling van de waterspiegel.



Figuur 2. Verschillende nodes/bakjes zijn zichtbaar in de animaties die uit KERP-SW komen. Per 50 m watergang wordt er minimaal 1 bakje gesimuleerd in het model.

Op dit moment kunnen verschillende scenario's opgebouwd worden met KERP-SW. De simulatie van gebied dekkende fluxen is op dit moment ingebouwd (neerslag, kwel), net als punt specifieke fluxen zoals een inlaat of een onttrekking van het oppervlaktewater. Ook kunnen traditionele stuwen in het systeem worden geplaatst om een bepaalde waterhoogte te simuleren. In 2024 is de functionaliteit van een kwelkaart toegevoegd, daarmee kunnen kwel zones worden gesimuleerd. Ook is het model verder ontwikkeld wat het mogelijk maakt om gemalen met een bepaalde pompcapaciteit toe te voegen.

1.2 Ribasim model opzet Opmaling Nes

Introductie Ribasim

Ribasim is een hydrologisch model dat waterverdeling en -stroming simuleert op basis van een knooppunten-netwerk. Het stelt gebruikers in staat om het ontwerp en het beheer van het watersysteem te evalueren en optimaliseren.

Het model is een zogenaamd *bakjesmodel*, waarbij het watersysteem wordt gerepresenteerd door knooppunten (nodes). Het detailniveau van het model is afhankelijk van de toepassing. In dit specifieke geval is gekozen voor een hoog detailniveau (oftewel veel nodes), zodat de ruimtelijke invloed van kwel meegenomen kan worden in de simulaties. Elk knooppunt in het model representeert hier een segment van 50 meter van een watergang.

De stroming tussen de knooppunten wordt bepaald op basis van peilverschillen tussen deze punten. Hierbij wordt gebruikgemaakt van de formule van Manning. Aangezien Ribasim specifiek ontwikkeld is voor het simuleren van de waterbalans en waterverdeling in oppervlaktewatersystemen, is het niet mogelijk om waterkwaliteit direct in Ribasim te modelleren.

Om de waterkwaliteit te modelleren wordt daarom gebruikgemaakt van een offline koppeling met D-Water Quality (Delwaq) – een model ontwikkeld door Deltares. D-Water Quality gaat uit van de wet van behoud van massa en bestaat uit twee samenwerkende onderdelen:

1. Het berekent het transport van stoffen door stroming van water (advectie en dispersie).
2. Het modelleert de processen die invloed hebben op stoffen in het water, zoals chemische reacties, biologische omzetting en fysische processen.

In dit specifieke geval wordt D-Water Quality alleen ingezet om het gedrag van zout (chloride) te modelleren. Aangezien chloride in het algemeen niet onderhevig is aan biologische of chemische omzettingsprocessen (zoals afbraak of omzetting), wordt uitsluitend het transport ervan gemodelleerd.

Het model is toepasbaar op stroming in oppervlaktewater en/of grondwater in verschillende dimensies: 1D, 2D of 3D. D-Water Quality berekent zelf geen stroming, maar is afhankelijk van externe modellen die de waterstroming simuleren. In deze studie levert het Ribasim-model de benodigde stromingsdata (de stroming tussen de knooppunten) aan D-Water Quality, waarmee vervolgens de zouttransporten worden doorgerekend.

Opzet model

De inlaat (en evt. uitlaat) in het model - vanaf de Dongerawei - wordt gemodelleerd met een opgegeven waterhoogte van -0.80 mNAP (LevelBoundary). Dit komt overeen met het zomerpeil in dit peilvak. Gemaal Nes is opgenomen als een Pump, oftewel een knooppunt dat een opgegeven flux van een specifieke node naar een andere node pompt. Dit gemaal heeft een maximale capaciteit van 25.02 m³ per minuut, wat neerkomt op 0.42 m³ per seconde. Data van Wetterskip Fryslân laat zien dat het gemaal in de zomerperiode vaak tussen de 1 en 10 uur per dag draait op volle capaciteit. Deze variatie in bedrijfstijd wordt meegenomen in de modellering, omdat het mogelijk invloed heeft op het effect van de gesloten waterkringloop binnen het systeem.

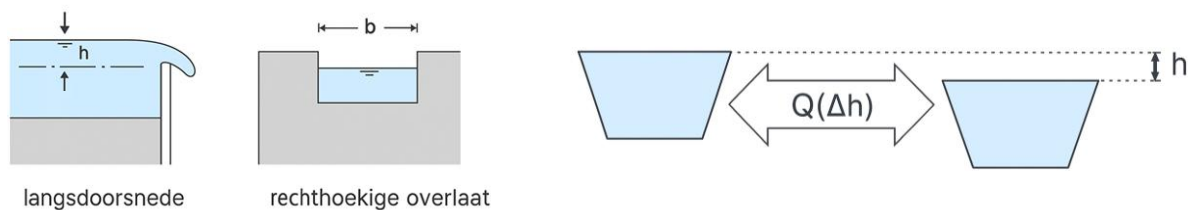
In het studiegebied staan twee stuwtjes: één bij de Dyksterwei en één bij de Wiesterwei. De stuwtjes zijn in Ribasim meegenomen als TabulatedRatingCurve: hierbij wordt de afvoer uit een Basin node bepaald door een Q(h)- relatie. De relatie geeft aan welk debiet (Q) hoort bij een bepaalde waterstand (h). Hiervoor is uitgegaan van de volgende relatie gebaseerd op stroming over een rechthoekige overlaat (Bot, 2016):

$$Q = 1.8 \left(1 - \frac{h}{10b}\right) bh^{1.5}$$

Waarbij Q het debiet over de stuw is in m³/s, b de doorstroombreedte in m, en h de waterhoogte boven de stuw in m (Figuur 3, links).

De stuw bij de Dyksterwei is het uitlaatpunt van het model. Hier wordt water ingelaten naar het gebied ten oosten van de opmaling voor peilhandhaving en doorspoeling. In Ribasim is dit gemodelleerd d.m.v. een Terminal-node. Al het water dat in een Terminal-node stroomt, wordt uit het model verwijderd. Er kan geen water vanuit een Terminal-node het model binnenkomen

De Basin-nodes, oftewel de zogenaamde "bakjes", zijn trapezoïde. Voor de modellering is uitgegaan een talud van 1:1.5 en een bodembreedte gebaseerd op de gegevens uit de legger. De bodemhoogte zoals opgenomen in de legger bepaalt de onderkant van het profiel, oftewel de hoogte van de bodem van het bakje (Figuur 3, rechts). Opgemerkt moet worden dat er voor de kwelsloot parallel aan de zeedijk geen gegevens beschikbaar waren; de bodemhoogtes zijn daarom afgeleid van aangrenzende waterlopen. De bodembreedtes zijn geschat op basis van het talud en de breedte van het wateroppervlak zoals te zien op satellietbeelden.



Figuur 3. Overzicht van stroming over een rechthoekige stuw (links) en stroming tussen twee Basin-nodes gebaseerd op Manning (rechts).

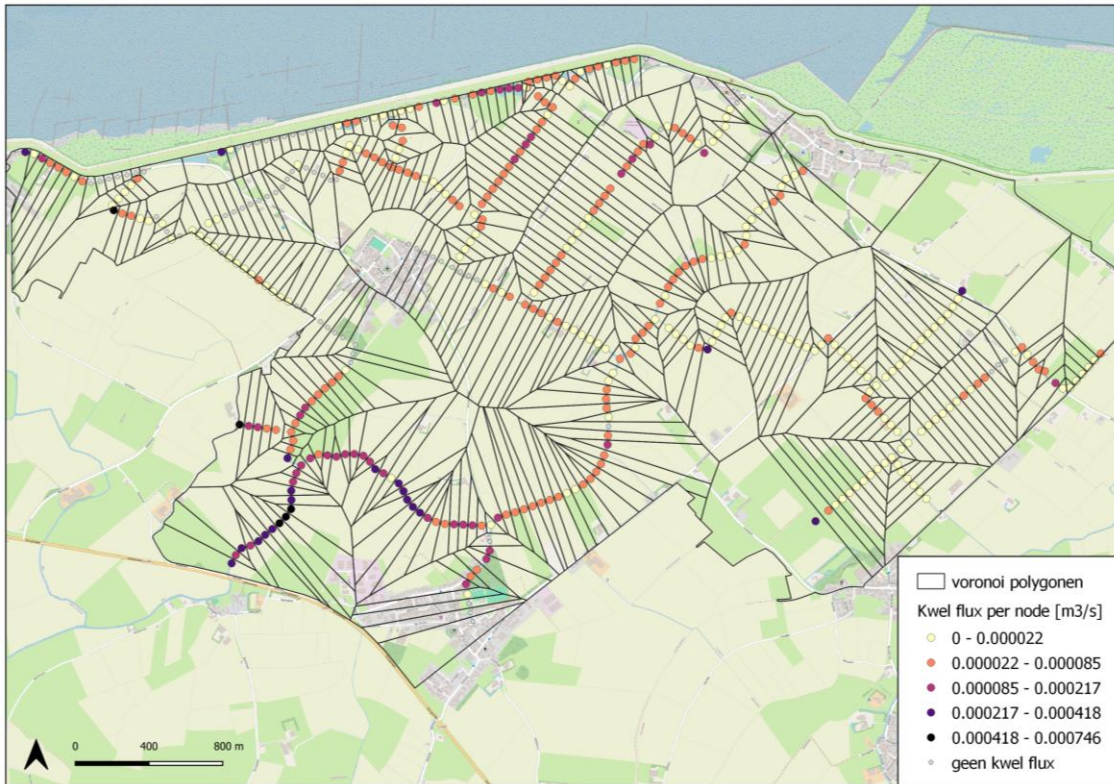
De stroming tussen de bakjes wordt bepaald met behulp van de formule van Manning. Tussen alle Basin-nodes zit een ManningResistance-node die het debiet tussen twee Basin-nodes berekent op basis van hun waterstanden (Figuur 3, rechts). Het debiet wordt bepaald met behoud van energie en met de Manning-Gauckler-formule om het energieverlies door wrijving te schatten. Hierbij is een Manning-coëfficiënt van 0.04 aangehouden, wat overeenkomt met een bochtige, natuurlijk waterloop.

Meer informatie over de toegepaste nodes en de onderliggende concepten zijn te vinden in de Ribasim documentatie: <https://ribasim.org/reference/node/basin.html>

Kwel

Op dit moment is het nog niet mogelijk om een kwelflux direct te modelleren in Ribasim. Wel kan de invloed van drainage worden meegenomen, wat vergelijkbaar is met een kwelflux: namelijk een instroom (positieve flux) in een Basin-node. Aangezien de mogelijkheid bestaat om een bepaalde concentratie toe te kennen aan deze flux, kan het zouttransport later in de Delwaq simulatie worden doorgerekend. Op deze manier kan kwel indirect worden meegenomen in de modellering.

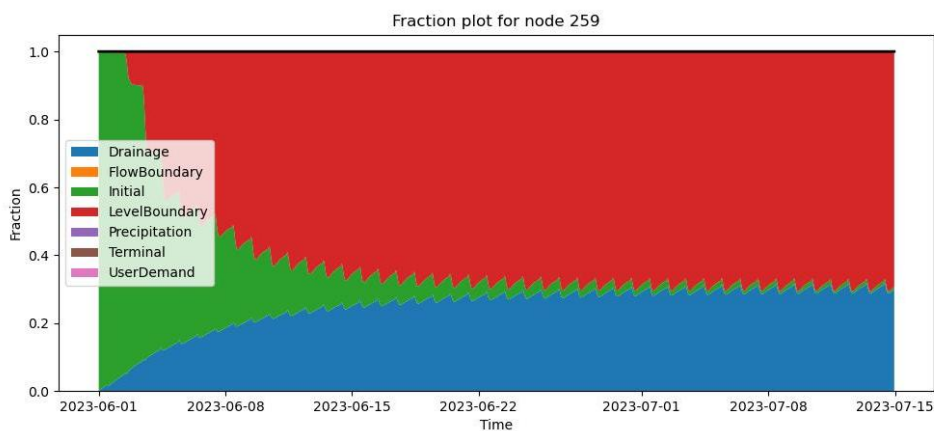
Na afstemming met het Wetterskip en de betrokken agrariërs is ervoor gekozen om binnen dit project de door Acacia Water ontwikkelde kwelkaart uit het Spaarwater-project te gebruiken (in plaats van MIPWA of LHM). De vertaling van de kwelkaart naar de instroom in individuele nodes gebeurt met behulp van Voronoi-diagrammen. Voor elke node is het bijbehorende Voronoi-polygoon bepaald. Vervolgens is de kwelflux in m^3/s per node berekend door de gemiddelde kwelflux te vermenigvuldigen met het oppervlak van het bijbehorende Voronoi-polygoon. In gevallen waar de gemiddelde kwelflux negatief is, oftewel waar sprake is van een infiltratiesituatie, wordt deze waarde op nul gezet. Figuur 4 geeft een overzicht van de toegekende kwelfluxen per node. Aangenomen is dat kwel een chlorideconcentratie van 10 g/L heeft.



Figuur 4. Toekenning van de kwelflux aan de nodes op basis van de Voronoi polygoenen.

Initiële condities

De initiële waterhoogte is gebaseerd op de verschillende zomerpeilen in het studiegebied: $-0,3$ m NAP voor de polder van Nes en $-0,8$ m NAP voor het boezemgebied. Omdat het model geen mogelijkheid biedt om ruimtelijk variërende initiële condities toe te passen, is aan het begin van de simulatie een 'warm-up'-periode van 30 dagen opgenomen. Na deze periode is de waterverdeling in de Basin-nodes min of meer stabiel (Figuur 5). Zoals te zien is, is de invloed van de opgelegde initiële condities vanaf dat moment minimaal. Om de rekentijd te beperken is daarom gekozen voor een totale simulatieduur van 1,5 maand, waarbij de resultaten worden geanalyseerd vanaf het einde van de 30 dagen durende warm-up-periode.



Figuur 5. Ribasim fractie plot waarbij de waterverdeling voor een Basin-node wordt weergegeven over tijd.

2 Scenario's Opmaling Nes

2.1 Beschrijving scenario's

Basisscenario

Het basis scenario weerspiegelt de huidige situatie in de polder. Gemaal Nes heeft een maximale capaciteit van 0.42 m³ per seconde. Data van Wetterskip Fryslân laat zien dat het gemaal in de zomerperiode vaak tussen de 1 en 10 uur per dag draait op volle capaciteit. In deze modelstudie zijn de draaiuren in de maand juni van een droog jaar (2018) aangehouden. Dit betekent dat Gemaal Nes in dit scenario 5 uur per dag draait op volle capaciteit.

Aangezien het voorgebied van de polder van invloed is op de kwaliteit van het inlaatwater bij gemaal Nes en we te maken hebben met een "gesloten kringloop", valt een groot gedeelte van de Peazens – ongeveer vanaf Bollingawier - binnen de modelgrens. Figuur 6 toont het modelgebied en de verschillende randvoorwaarden (*boundary conditions*) van het basisscenario.



Figuur 6. Overzicht van het basisscenario.

Toekomstscenario

In het toekomstscenario wordt de situatie in de polder in 2050 gesimuleerd. Binnen het project Spaarwater zijn de effecten van klimaatverandering, bodemdaling en zeespiegelstijging op het toekomstige verziltingsrisico al in kaart gebracht voor de Waddenregio. Er is een aangepaste kwelkaart ontwikkeld voor het jaar 2050, die rekening houdt met de toenemende kweldruk als gevolg van bodemdaling en zeespiegelstijging. Deze kwelkaart is in dit scenario toegepast (Figuur 7). Een uitgebreide toelichting op de gehanteerde aanpak voor de ontwikkeling van de kaart is te vinden in hoofdstuk 4 van de technische rapportage "Versterken zoetwaterlens: anti-verziltingsdrainage" (Acacia Water, 2019)¹.

¹ https://www.spaarwater.com/content/27227/download/clnt/87224_SW2-03-19_-_technische_rapportage_zoetwaterlens_11-3-2019.pdf

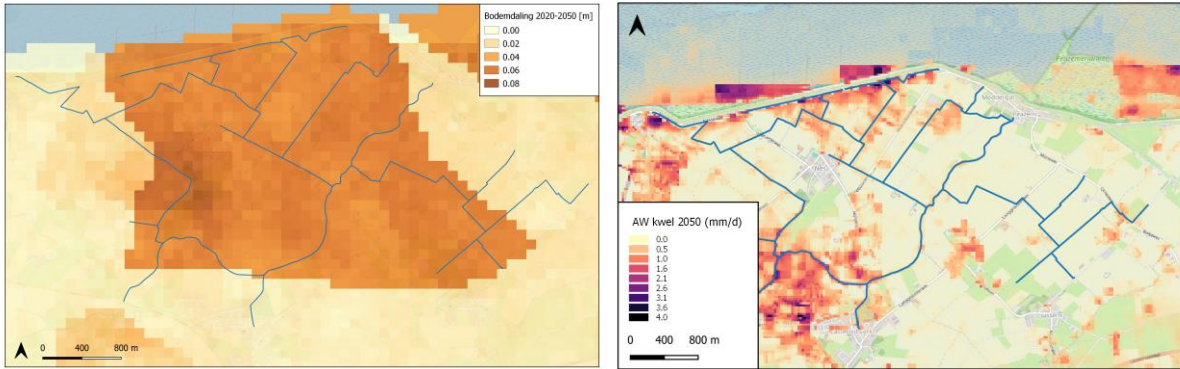
Naast de toename in kweldruk is ook het effect van bodemdaling op de ligging van de waterlopen meegenomen in dit scenario. De bodemhoogte van de waterlopen is aangepast op basis van de bodemdalingskaart uit 2021, ontwikkeld door Deltares, TNO en Wageningen Environmental Research (Erkens, Kooi, & Melman, 2021). Het scenario met sterke klimaatverandering en peilindexatie is daarbij toegepast (scenario hoog). De verschillen met scenario laag zijn in het studiegebied echter verwaarloosbaar, omdat de bodemdaling hier voornamelijk wordt veroorzaakt door gaswinning. Meer informatie over de ontwikkeling van de bodemdalingskaart is te vinden in het rapport: *“Actualisatie bodemdalingsvoorspellingskaarten”* (Erkens, Kooi, & Melman, 2021).

Aangezien de bodemdalingskaart in het studiegebied is gebaseerd op prognoses uit de winningsplannen van actieve olie-, gas- en zoutvelden (2021), is er sprake van een zekere mate van onzekerheid. In deze winningsplannen wordt de verwachte bodemdaling berekend als gevolg van de geplande winningen. Deze prognoses zijn gebruikt om de resterende bodemdaling voor de periode 2020–2050 te schatten (Erkens, Kooi, & Melman, 2021). Omdat het om prognoses gaat, blijft onzekerheid onvermijdelijk.

Ook het gebruik van de kwelkaart brengt onzekerheden met zich mee. Voor de ontwikkeling van de 2050-kwelkaart is gebruikgemaakt van een oudere versie van de bodemdalingskaart uit 2017. Inmiddels is de gaswinning sterk afgebouwd, waardoor de voorspellingen van de bodemdalingssnelheid in de recentere versie naar beneden zijn bijgesteld (Erkens, Kooi, & Melman, 2021).

Daarnaast is er gebruikgemaakt van de KNMI-klimaatscenario's uit 2014 voor prognoses van zeespiegelstijging. De nieuwe klimaatscenario's laten echter zien dat - afhankelijk van de hoeveelheid toekomstige broeikasgasemissies - voor de Nederlandse kust rond 2050 een verdere zeespiegelstijging verwacht wordt van 16-34 cm in het lage, en 19-38 cm in het hoge uitstootscenario (Bessembinder, et al., 2023). Voor het opstellen van de kwelkaart 2050 is destijds uitgegaan van een zeespiegelstijging van 40 cm, wat hoger is dan de maximaal verwachte stijging in de nieuwe KNMI-klimaatscenario's 2023.

Door beide aannames zijn de kwelfluxen in de 2050-kwelkaart mogelijk overschat. Dit geldt met name langs de zeedijk, aangezien het effect van zeespiegelstijging op het verziltingsrisico voornamelijk de eerste 300 meter vanaf de kust beïnvloedt (Acacia Water, 2019).



Figuur 7. Links de toegepaste bodemdalingskaart 2050 (Erkens, Kooi, & Melman, 2021) en rechts de 2050-kwelkaart (Acacia Water, 2019).

Scenario Moddergat Pomp

In dit scenario is de Peazens verbonden aan de waterloop die via de NAM-locatie richting Moddergat loopt. Op deze manier wordt er extra doorspoeling gecreëerd en wordt de zoetwater aanvoer richting dit deel verbeterd. Doordat de Peazens lager ligt, is het plaatsen van een doorpomp gemaal noodzakelijk. Het doorpomp gemaal heeft een debiet van $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ en draait synchroon met gemaal Nes.

Voor deze beheermaatregel is ook een toekomstscenario doorgerekend. De opzet daarvan is hetzelfde als hierboven beschreven en weergegeven in Figuur 8. De enige aanpassingen zijn het toepassen van de kwelkaart 2050 en het meenemen van het effect van bodemdaling op de diepteligging van de waterlopen (Figuur 7).



Figuur 8. Overzicht van het scenario Moddergat Pomp.

Scenario Wierum

Het scenario Wierum houdt rekening met een mogelijke toekomstige ontwikkeling: Rijkswaterstaat onderzoekt de aanleg van een vispassage ten westen van Wierum. De aanleg hiervan zou de afvoer van brak water vanuit de polder naar de zee kant mogelijk maken. Om water vanuit de polder van Nes richting de mogelijke vispassage af te voeren is in dit scenario ten zuiden van Wierum een verbinding gecreëerd (Figuur 9).

In het model is een extra gemaal toegevoegd met een debiet van 0.1 m³/s en dezelfde draaiuren als gemaal Nes. Daarnaast is de kwelsloot langs de zeedijk doorgetrokken om ook het brakke water in de kwelsloot af te kunnen voeren. De verbinding richting Wierum is in dit onderzoek niet verder uitgewerkt, omdat dit buiten de scope van de studie valt. In het model zijn daarom de bestaande modelgrenzen aangehouden en is de afvoer gepositioneerd ten zuiden van Wierum.

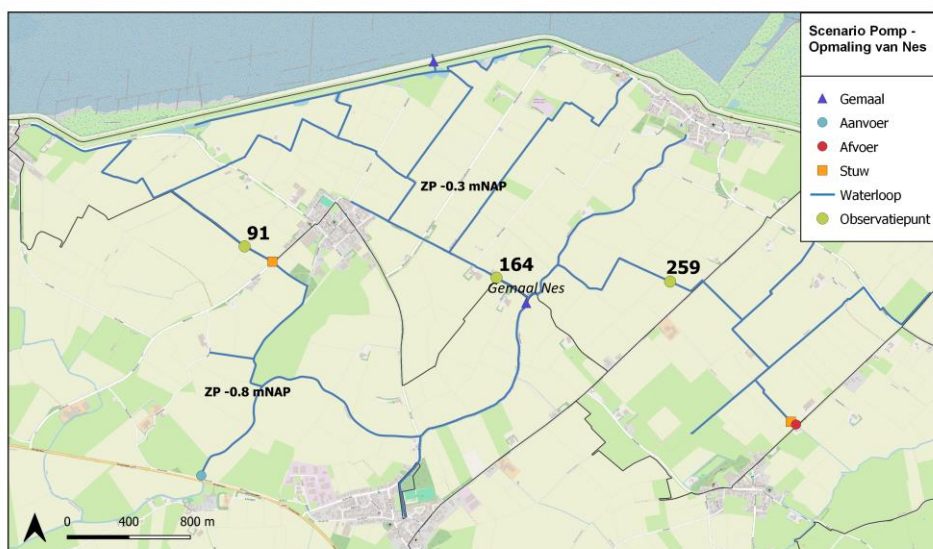
Voor deze beheermaatregel is ook een toekomstscenario doorgerekend. De opzet daarvan is hetzelfde als hierboven beschreven en weergegeven in Figuur 9. De enige aanpassingen zijn het toepassen van de kwelkaart 2050 en het meenemen van het effect van bodemdaling op de diepteligging van de waterlopen (Figuur 7).



Figuur 9. Overzicht van het scenario Wierum.

Scenario Pomp

In dit scenario wordt brak water via een pomp over de zeedijk geloosd, waardoor een scheiding ontstaat tussen het zoete hoofdwatersysteem en het brakke systeem langs de zeedijk. Het extra gemaal draait hierbij gelijktijdig met gemaal Nes.

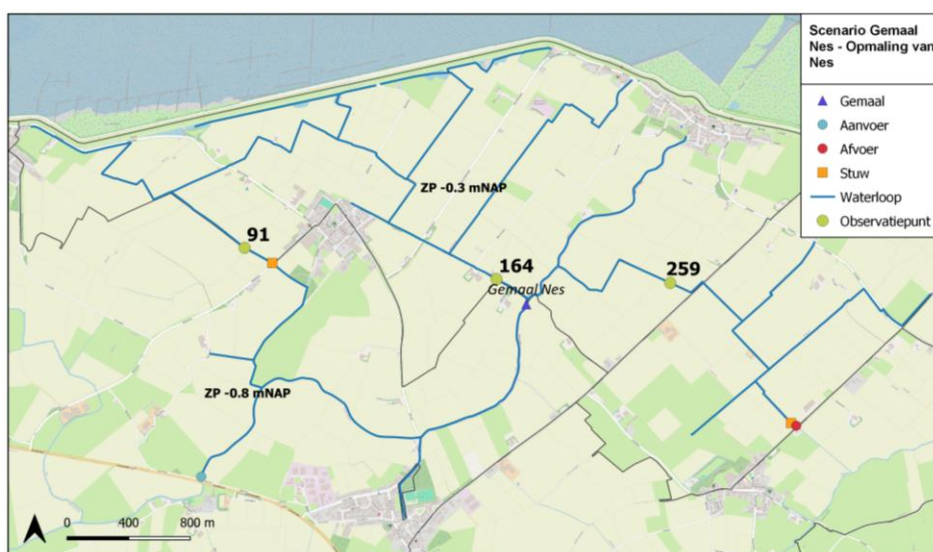


Figuur 10. Overzicht van het scenario Pomp.

Gemaal Nes

In het scenario Gemaal Nes is gekeken of er met het aanpassen van de debieten en draaiuren van het gemaal een verbetering in zoutconcentratie kan worden behaald in de polder. In het basisscenario is zichtbaar dat kwel het hoofdsysteem binnenstroomt wanneer het gemaal niet draait. Het idee achter dit scenario is daarom om een constantere doorspoeling te realiseren, zodat de inmenging van brak water uit de doodlopende waterlopen wordt beperkt.

Omdat de focus ligt op toekomstbestendig waterbeheer, is het uitgangspunt dat er niet meer water wordt ingelaten dan in de huidige situatie. Daarom is het debiet van gemaal Nes aangepast naar $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$, met een verlengde bedrijfstijd van zeven uur. Dit leidt tot een dagelijkse inlaat van 7560 m^3 , dezelfde hoeveelheid als in de huidige situatie. Een belangrijk voordeel van dit scenario is dat slechts minimale aanpassingen aan het bestaande waterbeheersysteem nodig zijn.



Figuur 11. Overzicht van het scenario Gemaal Nes.

2.2 Parameter overzicht

Een overzicht van de gebruikte parameters wordt weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1. Parameters gebruikt in de verschillende scenario's van het Ribasim/Delwaq oppervlaktewater model voor polder van Nes. * de toekomstscenario's zijn gebaseerd op dezelfde parameters.

	Pompflux [m ³ /s]		Draaiuren		Kruinhoogte [mNAP]	
	Gemaal Nes	Extra gemaal	Gemaal Nes	Extra gemaal	Dyksterwei	Wiersterwei
Basis	0.42	-	5	-	-0.4	-0.4
Toekomst	0.42	-	5	-	-0.4	-0.4
Moddergat Pomp*	0.42	0.05	5	5	-0.4	-0.4
Moddergat	0.42	-	5	-	-0.4	-0.4
Wierum*	0.42	0.1	5	5	-0.4	-0.4
Pomp	0.42	0.2	5	5	-0.4	-0.4
Gemaal Nes	0.30	-	7	-	-0.4	-0.4

2.3 Model resultaten

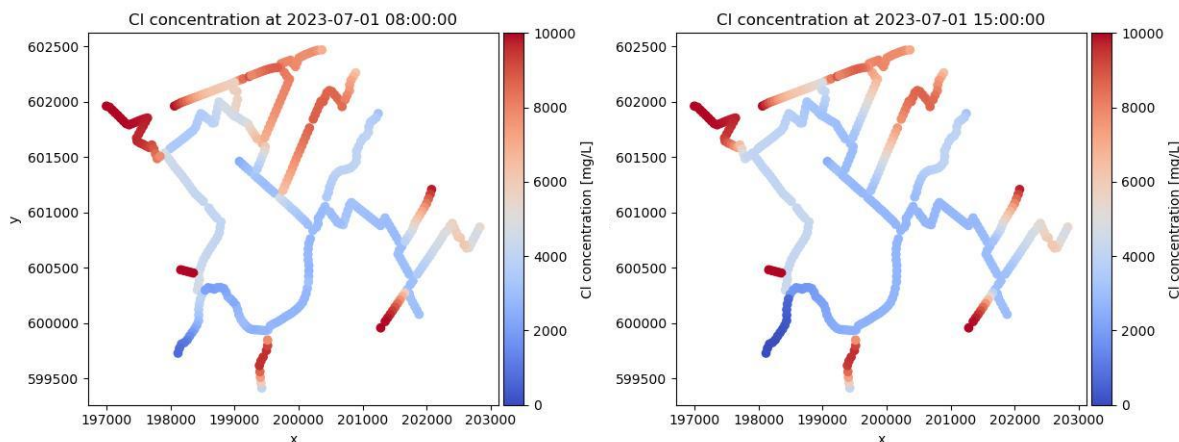
Basisscenario Opmaling Nes

De resultaten van het basisscenario worden ruimtelijk weergegeven in Figuur 12. In het linker figuur is de uitgangssituatie te zien vlak vóórdat gemaal Nes in werking treedt (na de warm-up periode). De invloed van kwel op de zoutconcentratie in de waterloop tegen de zeedijk komt hierbij duidelijk naar voren. Ook de effecten van de kwelgebieden rond Wierum en bij de NAM-locatie Moddergat zijn goed zichtbaar in de resultaten.

Het rechterfiguur in Figuur 12 toont de situatie vlak ná de opmaling via gemaal Nes. Van het aanvoerwater dat de polder wordt ingepompt, stroomt ca. 43% in noordwestelijke richting en de resterende 57% naar het noordoosten via de Peazens, om vervolgens de polder te verlaten via de stuw bij de Dyksterwei. Tijdens de opmaling verzoet een deel van de aftakking vanaf Moddergat. Ook de aftakkingen vanaf de kwelsloot langs de zeedijk verzoeten gedeeltelijk. De verlaging in zoutconcentratie van de waterloop vanaf Wierum - in het noordwesten van het studiegebied - is minimaal.

De resultaten van het basisscenario laten zien dat in drogere perioden het brakke water uit de kwel sloten het centrale watersysteem - met doorstromende waterlopen - bereikt. Hierdoor ligt de zoutconcentratie bij punt 91 (Figuur 11) ongeveer 39% hoger dan bij de andere twee observatiepunten. Echter, houdt de doorspoeling via gemaal Nes de verzilting van het centrale watersysteem nog relatief beperkt. Hierdoor is de negatieve invloed van de "gesloten kringloop" onder de huidige omstandigheden nog niet direct zichtbaar. De modelresultaten tonen aan dat verzilting op dit moment dus vooral een probleem vormt langs de zeedijk en in de doodlopende waterlopen. Dit beeld komt overeen met de ervaringen van agrariërs in het gebied (pers. communicatie, 20 oktober

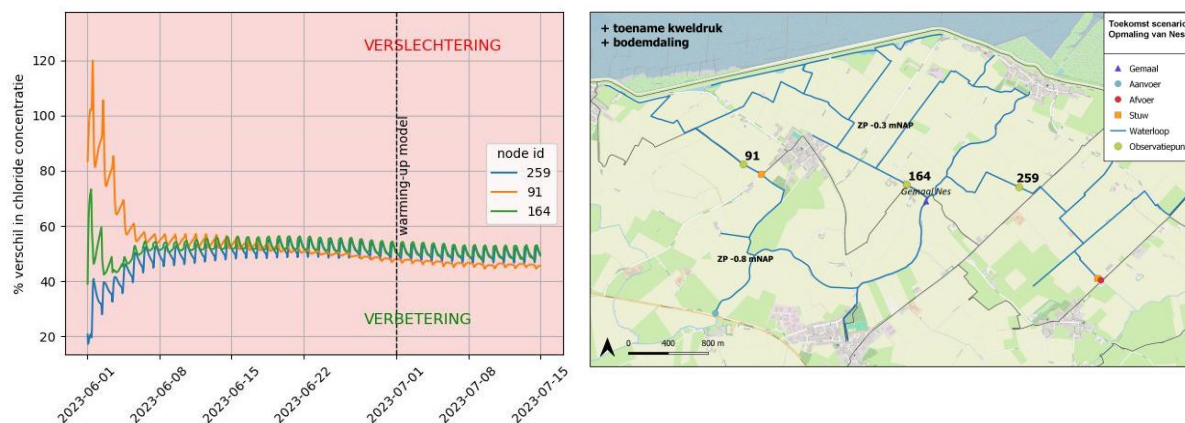
2025). Opgemerkt moet worden dat de weergegeven absolute chlorideconcentraties in Figuur 12 relatief hoog uitvallen vanwege de toegepaste “worst-case” modelbenadering.



Figuur 12 Ruimtelijke weergave van de zoutconcentratie op twee tijdstippen in het basisscenario: links de situatie vlak voordat de opmaling plaatsvindt via gemaal Nes, rechts de situatie vlak na de opmaling.

Toekomstscenario

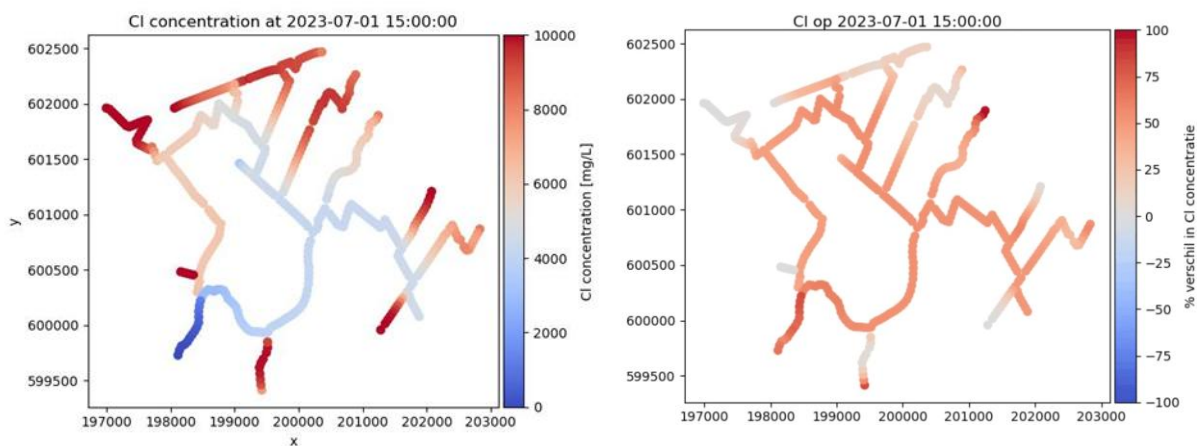
In Figuur 13 zijn de verschillen in zoutconcentraties tussen het toekomst- en het basisscenario weergegeven over tijd. Volgens het model zal de zoutconcentratie in dit scenario op alle drie de observatiepunten toenemen met zo'n 50% ten opzichte van het basisscenario.



Figuur 13 Relatieve verschil in zoutconcentratie in procent over tijd ter hoogte van de drie observatiepunten tussen het toekomst- en basisscenario (links) en de locaties van de observatiepunten (rechts).

Opvallend is dat verzilting niet alleen optreedt waar de kweldruk toeneemt, maar ook in kwel neutralere gebieden, zoals de oostkant van de polder (Figuur 13, rechts). Dit komt doordat water dat eerder de polder in noordwestelijke richting doorspoelt, deels weer wordt ingelaten via gemaal Nes, waardoor verzilting in grote delen van het systeem optreedt. De modelresultaten laten zien dat dit negatieve effect van de zogenaamde “gesloten kringloop” in de toekomst sterker wordt, vooral door de toename van kweldruk in het noordelijke deel van het studiegebied.

Verder laten de resultaten zien dat de invloed van bodemdaling ($\pm 2-8$ cm) op de stroming beperkt is. De verdeling van het inlaatwater over de noordoostelijke en noordwestelijke tak blijft vrijwel gelijk ten opzichte van het basisscenario. De toename in kweldruk rond Wierum, in combinatie met de ruimtelijke verschillen in bodemdaling, leidt daarentegen wel tot een grotere stroming vanuit de doodlopende watergang richting het centrale watersysteem. In het toekomstscenario is deze stroming gemiddeld ongeveer drie keer zo groot als in het basisscenario, wat resulteert in een sterkere inmenging van brak water en dus in een verdere verzilting van het systeem. Dit is duidelijk terug te zien in Figuur 14 (links).

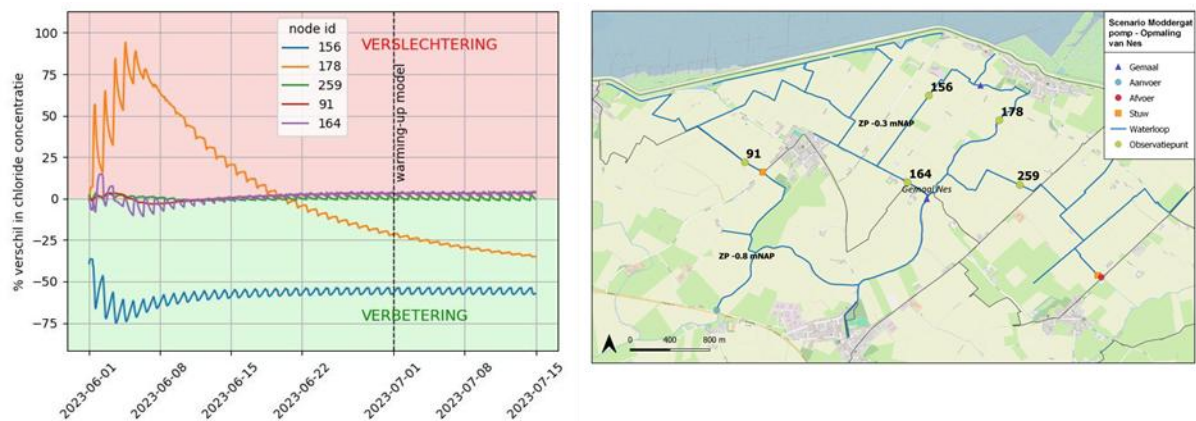


Figuur 14. Ruimtelijke weergave van de zoutconcentratie vlak na doorspoeling in het toekomstscenario (links). Het percentuele verschil in zoutconcentratie op hetzelfde moment ten opzichte van het basisscenario (rechts).

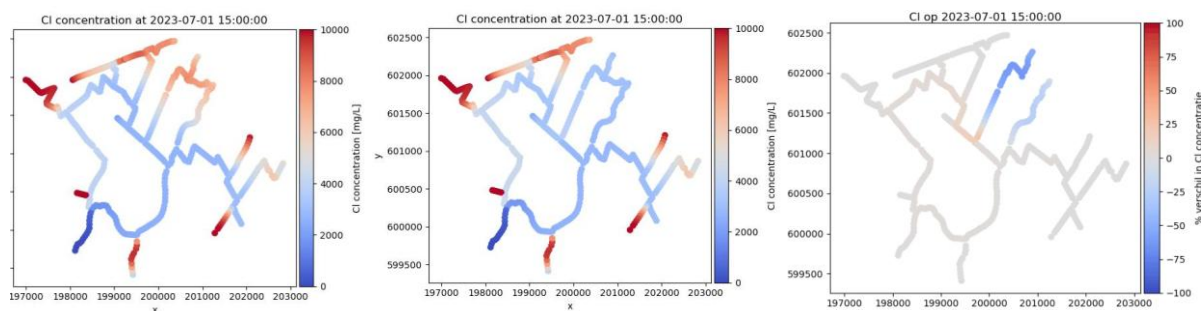
Scenario Moddergat Pomp

In Figuur 15 en Figuur 16 zijn de resultaten weergegeven. Figuur 15 links, laat de resultaten zien van het scenario zónder doorpompemaal. Hierin komt duidelijk naar voren dat het plaatsen van een extra gemaal noodzakelijk is om doorspoeling te creëren. Omdat de Peazens lager ligt, wordt kwel vanuit het kwelgebied bij de NAM-locatie Moddergat namelijk in verbinding gebracht met de Peazens. Zonder het doorpompemaal leidt dit tot verzilting van de Peazens.

De resultaten van het scenario mét doorpompemaal laten zien dat het zoutgehalte een paar procent toeneemt bij de Wiesterwei (punt 91, zie Figuur 15, rechts) en net ten westen van gemaal Nes (punt 164) ten opzichte van het basisscenario. Richting het oosten (punt 259) blijft de zoutconcentratie min of meer gelijk. Daarentegen verbetert de situatie in de aftakking vanaf Moddergat sterk in vergelijking met het basisscenario, met een 40-60% afname in zoutgehalte. Ook in de Peazens verbetert de doorspoeling in vergelijking met het scenario zonder maatregel. Het zoutgehalte neemt daar met ca. 18-32% af (afhankelijk van de locatie).



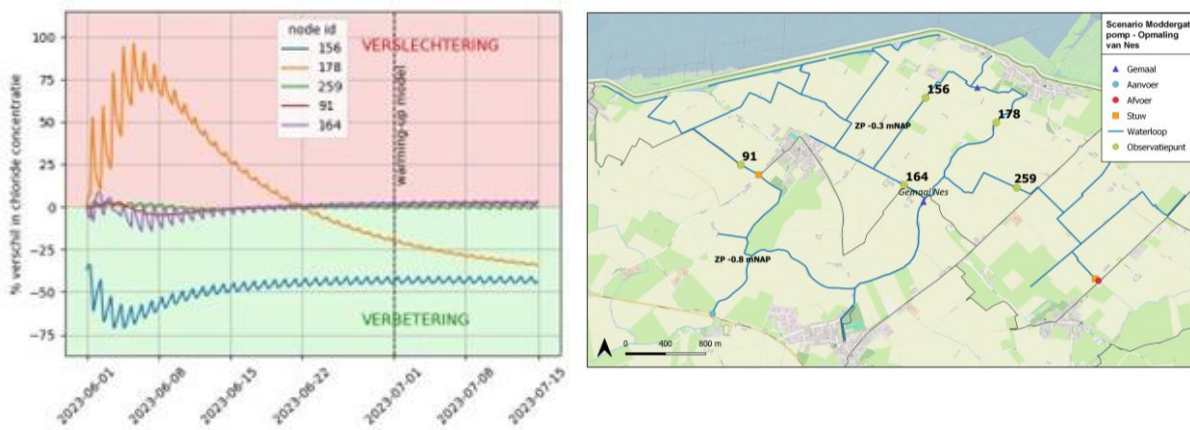
Figuur 15. Relatieve verschil in zoutconcentratie in procent over tijd ter hoogte van de vijf observatiepunten tussen het Moddergat Pomp en basisscenario (links) en de locaties van de observatiepunten (rechts).



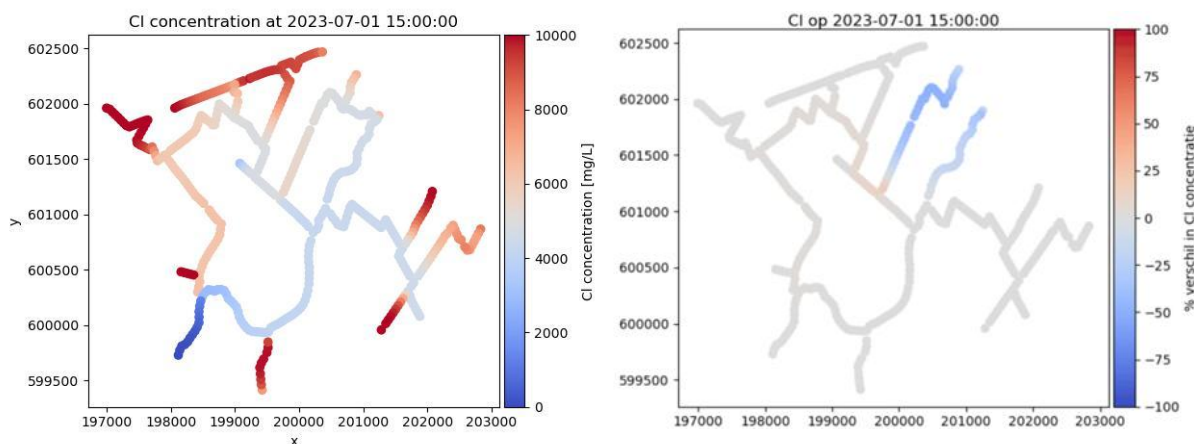
Figuur 16. Ruimtelijke weergave van de zoutconcentratie vlak na doorspoeling in het Moddergat scenario zonder extra gemaal (links) en het Moddergat Pomp scenario (midden). Het percentuele verschil in zoutconcentratie op hetzelfde moment tussen het Moddergat Pomp en het basisscenario (rechts).

Toekomstscenario Moddergat Pomp

In de toekomst zal het doortrekken van de waterloop bij Moddergat, ter hoogte van observatiepunt 156, leiden tot een afname van het zoutgehalte met ongeveer 47% in vergelijking met het toekomstscenario zonder deze maatregel (Figuur 17). In de Peazens zal de verbetering in de toekomst oplopen tot 20-43%, met de grootste afnames in zoutgehalte dichterbij Peazens-Moddergat (Figuur 18). In de rest van het watersysteem (punten 259, 91 en 164) blijven de verschillen tussen het toekomstscenario mét maatregel en zonder maatregel min of meer gelijk met de verschillen onder de huidige omstandigheden, oftewel er zal een minimale verslechtering plaatsvinden ter hoogte van punt 91 en 164.



Figuur 17. Relatieve verschil in zoutconcentratie in procent over tijd ter hoogte van de vijf observatiepunten tussen het toekomstscenario Moddergat Pomp en het toekomstscenario zonder maatregel (links) en de locaties van de observatiepunten (rechts).

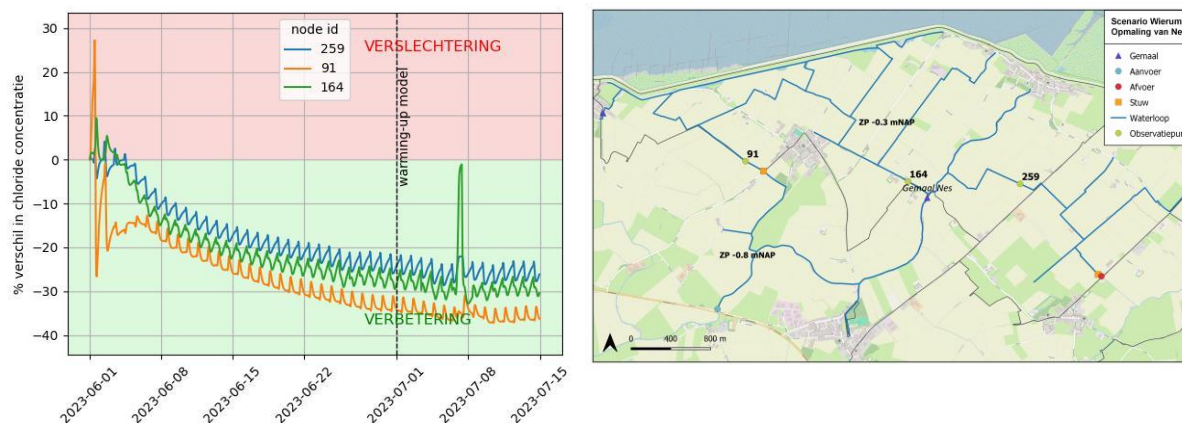


Figuur 18. Ruimtelijke weergave van de zoutconcentratie vlak na doorspoeling in het toekomstscenario Moddergat Pomp (links). Het percentuele verschil in zoutconcentratie op hetzelfde moment ten opzichte van het toekomstscenario zonder maatregel (rechts).

Scenario Wierum

In Figuur 19 zijn de resultaten van scenario Wierum weergegeven over tijd. Van de drie observatiepunten zijn de grootste verbeteringen te zien bij punt 91, de stuw bij de Wiersterwei, met een afname in zoutconcentratie van circa 35% (Figuur 19). Over het hele studiegebied gezien, zijn de grootste verbeteringen zichtbaar in het noordwesten. Uit de modelberekeningen blijkt dat door het creëren van doorspoeling het zoutgehalte in het oppervlaktewater rondom Wierum afneemt met $\pm 60\%$ ten opzichte van het basisscenario. Ook de waterkwaliteit in de kwelsloot langs de zeedijk verbetert sterk, met een afname in zoutgehalte tot circa 50% (Figuur 19).

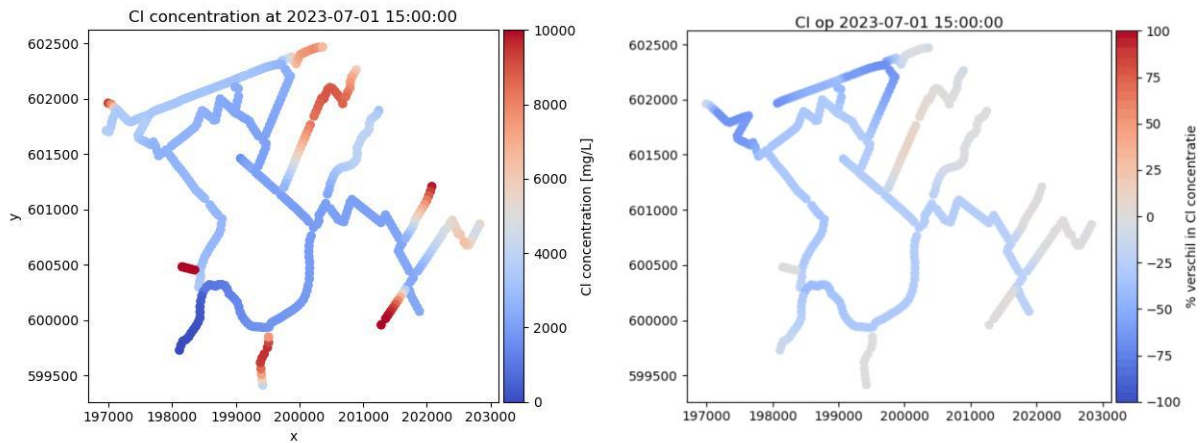
Opvallend is de piek rond 7 juli bij het observatiepunt gelegen ten westen van gemaal Nes (punt 164; Figuur 19, rechts). De afvoer richting Wierum zorgt ervoor dat het zoute front uit de waterloop afkomstig van Moddergat op dat moment het centrale watersysteem bereikt, waarna het oostwaarts stroomt richting punt 164. In het basisscenario bereikt dit zoutfront, veroorzaakt door het kwelgebied rond de NAM-locatie Moddergat, het centrale watersysteem niet.



Figuur 19. Relatieve verschil in zoutconcentratie in procent over tijd ter hoogte van de drie observatiepunten tussen het Wierum en basisscenario (links) en de locaties van de observatiepunten (rechts).

Daarnaast wordt door het afvoeren van (een gedeelte van) het brakke water richting Wierum het effect van de “gesloten kringloop” op het watersysteem verminderd. De stroming over de stuw bij de Wiesterwei neemt met 30% af ten opzichte van het basisscenario. Dit komt ten goede aan de waterkwaliteit in andere delen van de polder, bijvoorbeeld ter hoogte van punt 259. Alleen in de waterloop langs de NAM-locatie Moddergat neemt de zoutconcentratie licht toe, met ongeveer 5%.

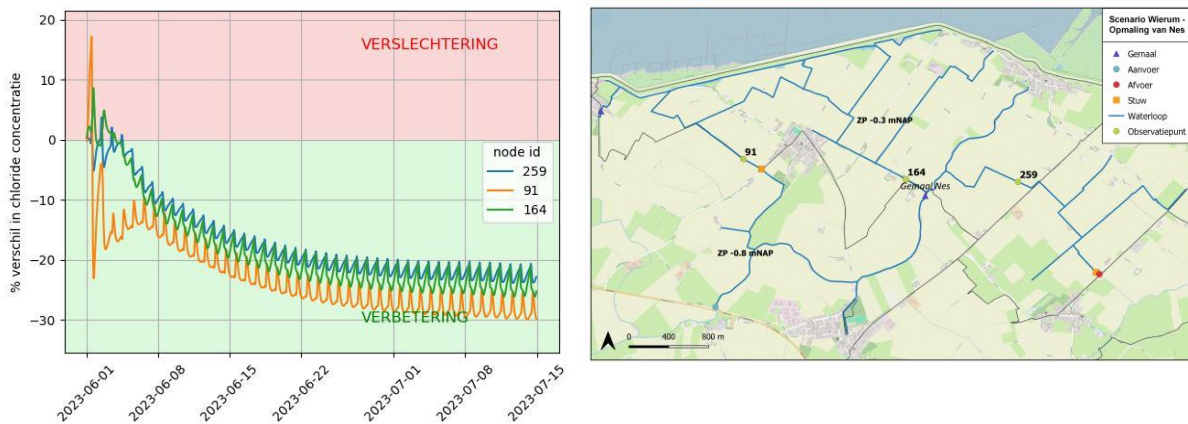
In dit scenario is uitgegaan van een dagelijkse waterafvoer van 1800 m³ richting Wierum. Een verdere verhoging van deze afvoer zou mogelijk tot een grotere verbetering in de polder van Nes kunnen leiden. Of dit haalbaar en wenselijk is, hangt onder andere af van het debiet en de draaiuren van het mogelijke zeedijkgemaal bij de vispassage, en van de hoeveelheid benodigd water om een optimale doorspoeling van de Nesser Opfeart te behouden.



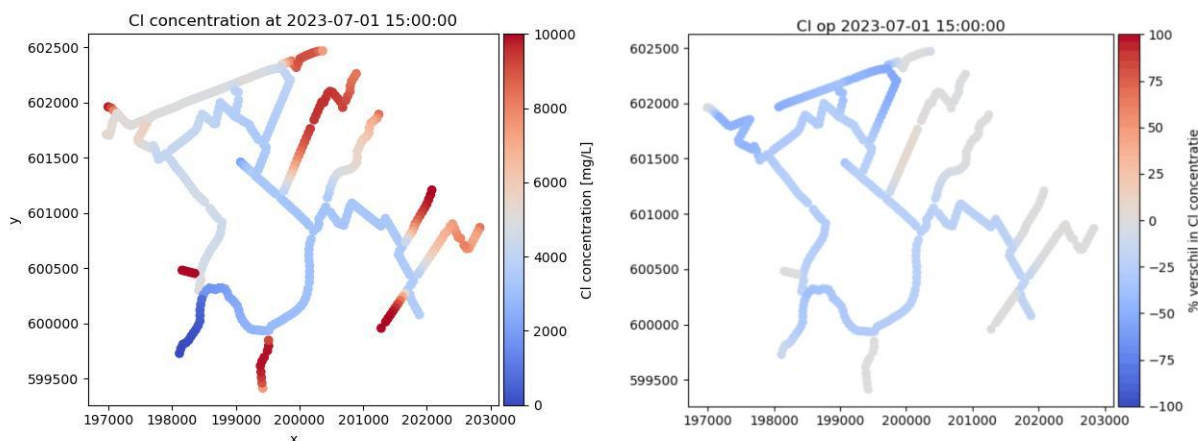
Figuur 20. Ruimtelijke weergave van de zoutconcentratie vlak na doorspoeling in het scenario Wierum (links). Het percentuele verschil in zoutconcentratie op hetzelfde moment ten opzichte van het basisscenario (rechts).

Toekomstscenario Wierum

In het toekomstige scenario zijn de verbeteringen ter hoogte van de drie observatiepunten nog steeds terug te zien in het scenario Wierum. De verschillen tussen de punten zijn echter wel verminderd; de afnames in zoutconcentratie in vergelijking met het scenario zonder maatregel liggen voor alle punten tussen de 20-30%. De grootste verbeteringen blijven zichtbaar in het noordwesten van het studiegebied, met verlagingen in zoutconcentratie van zo'n 45% ten opzichte van het toekomstscenario zonder aanpassingen in waterbeheer. De resultaten tonen aan dat dit scenario naar verwachting ook in de toekomst het risico op verzilting in de gehele polder zal verminderen.



Figuur 21. Relatieve verschil in zoutconcentratie in procent over tijd ter hoogte van de drie observatiepunten tussen het toekomstscenario Wierum en het toekomstscenario zonder maatregel (links) en de locaties van de observatiepunten (rechts).



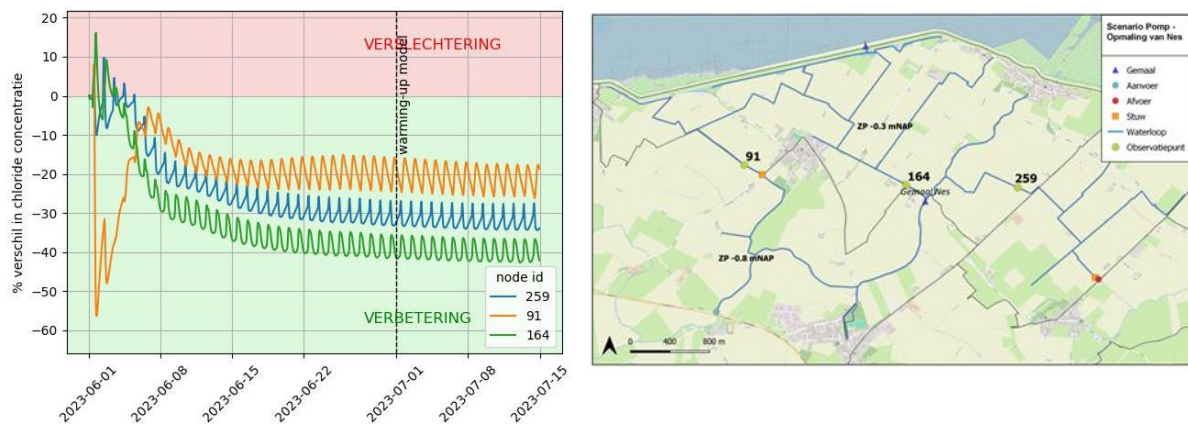
Figuur 22. Ruimtelijke weergave van de zoutconcentratie vlak na doorspoeling in het toekomstscenario Wierum (links). Het percentuele verschil in zoutconcentratie op hetzelfde moment ten opzichte van het toekomstscenario zonder maatregel (rechts).

Pomp

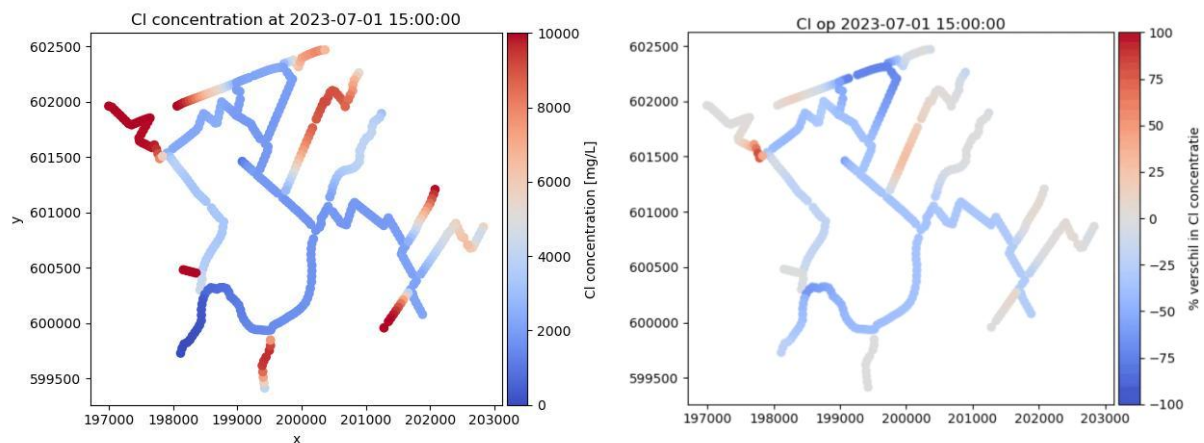
In dit scenario is voor de drie observatiepunten een sterke verbetering van de waterkwaliteit te zien, variërend van 20 tot 40%, met de grootste verbetering bij punt 164, net ten westen van de opmaling (Figuur 23). De resultaten laten zien dat een deel van het water van de opmaling richting de kwelsloot wordt getrokken, waardoor deze gedeeltelijk verzoet. Door het extra gemaal wordt de stroming richting de westelijke tak min of meer verdubbeld.

Ondanks de verminderde doorspoeling richting de oostelijke tak (punt 259), verbetert ook hier de waterkwaliteit; het zoutgehalte neemt met circa 20% af. Dit kan worden verklaard door het afnemen van het negatieve effect van de gesloten kringloop. Doordat het brakke water vanuit de kwelsloten in dit scenario minder inmengt in het hoofdwatersysteem, daalt het zoutgehalte hier aanzienlijk. Hierdoor blijft het water van betere kwaliteit, wat ook leidt tot een verlaging van het zoutgehalte in het inlaatwater bij gemaal Nes. Doordat meer water richting de kwelsloot stroomt worden de waterlopen vanuit Wierum en Peazens-Moddergat echter minder doorgespoeld. Dit leidt lokaal tot een verslechtering in zoutconcentratie ten opzichte van het basisscenario (Figuur 24).

Een belangrijk nadeel van dit scenario is de praktische uitvoerbaarheid: vanwege veiligheidsregels is het in veel gevallen moeilijk om een vergunning te krijgen voor het plaatsen van een gemaal op de zeedijk. Omdat het scenario werd aangekaart door meerdere agrariërs in het gebied, is het toch doorgerekend onder de huidige omstandigheden. Het toekomstscenario is, omdat de regelgeving het minder realistisch maakt, achterwege gelaten.



Figuur 23. Relatieve verschil in zoutconcentratie in procent over tijd ter hoogte van de vijf observatiepunten tussen het Pomp en het basisscenario (links) en de locaties van de observatiepunten (rechts).

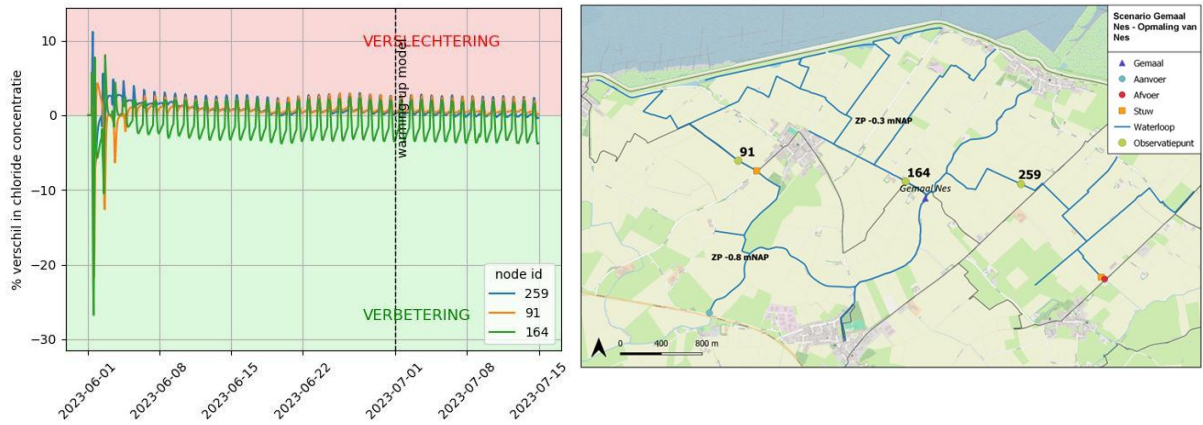


Figuur 24. Ruimtelijke weergave van de zoutconcentratie vlak na doorspoeling in het scenario Pomp (links). Het percentuele verschil in zoutconcentratie op hetzelfde moment ten opzichte van het basisscenario (rechts).

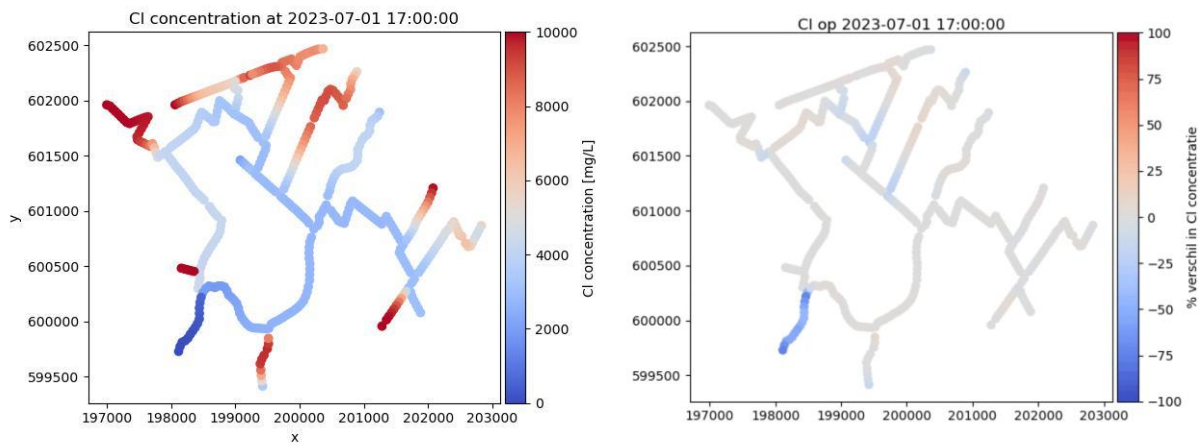
Gemaal Nes

Als gevolg van het lagere debiet van gemaal Nes, is in dit scenario aan het begin van de opmaling een kleine verslechtering te zien ten opzichte van het basisscenario (Figuur 25). Aan het eind van de opmaling, treedt enige verzoeting op in het begin van de doodlopende watergangen door de langere bedrijfstijd van het gemaal. Verderop in de aftakkingen is, doordat het water minder ver reikt, sprake van een verslechtering in zoutconcentratie ten opzichte van het basisscenario (Figuur 26, rechts).

Gemiddeld gezien, over de drie locaties en de hele simulatieperiode, verbetert de situatie licht, waarbij de grootste afname in zoutconcentratie te zien is bij punt 164, net ten westen van de gemaal Nes. De verbeteringen zijn echter verwaarloosbaar, waardoor dit scenario - ondanks de minimale ingrepen in het huidige systeem - niet als effectief wordt beschouwd. Om deze reden is er geen toekomstscenario doorgerekend waarin deze beheermaatregel is getoetst.



Figuur 25. Relatieve verschil in zoutconcentratie in procent over tijd ter hoogte van de vijf observatiepunten tussen het Gemaal Nes en het basisscenario (links) en de locaties van de observatiepunten (rechts).



Figuur 26. Ruimtelijke weergave van de zoutconcentratie vlak na doorspoeling in het scenario Gemaal Nes (links). Het percentuele verschil in zoutconcentratie op hetzelfde moment ten opzichte van het basisscenario (rechts).