



Slim Watermanagement Slim Sturen op Inlaat- vensters

Zaaknummer 31162869

Opdrachtgever

PR4357.10
juni 2021



Auteurs:

Nils van der Vliet
Vincent Vuik
Cor-Jan Vermeulen



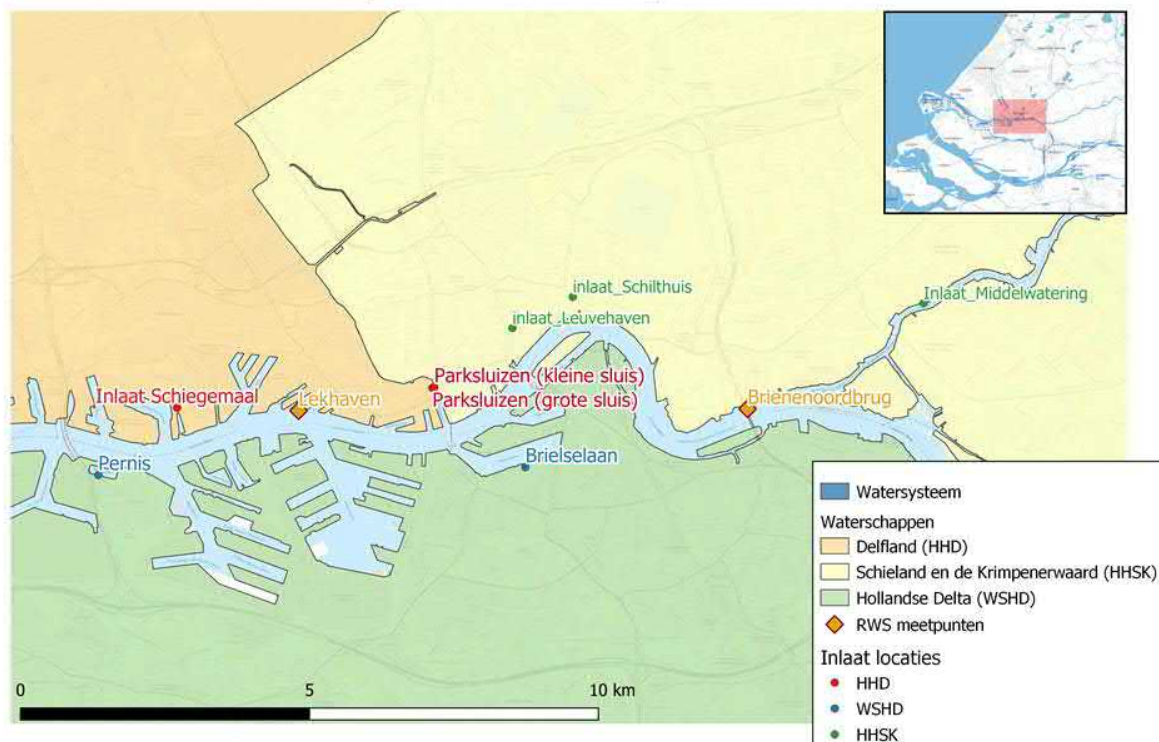
Samenvatting

Slim Watermanagement beoogt watertekorten en wateroverlast te verminderen door de beschikbare capaciteit van het Nederlandse watersysteem beter en duurzamer te benutten. Het is een optimalisatie van het operationele waterbeheer (<http://slimwatermanagement.nl/>). In Slim Watermanagement wordt het watersysteem als een geheel beschouwd en wordt over de grenzen van beheergebieden heen gekeken.

In tijden van watertekort wordt water ingelaten vanuit Rijkswater naar het regionale watersysteem. In de regio Rijn-Maasmonding moet daarbij rekening worden gehouden met de kwaliteit (de chlorideconcentratie) van het in te laten water. Perioden waarin de chlorideconcentratie voldoende laag is om in te kunnen nemen, worden aangeduid als inlaatvensters. Het doel van het project 'Slim sturen op Inlaatvensters' is het verbeteren van de strategie voor het inlaten van zoet water, waarbij optimaal gebruik wordt gemaakt van de momenten waarop de chlorideconcentratie van het in te laten water laag is: de inlaatvensters. Aan de hand van de actuele en voor de komende dagen voorspelde inlaatvensters kan de waterbeheerder bepalen wanneer er daadwerkelijk water kan worden ingelaten. Het kan zijn dat er wordt geanticipeerd op een watervraag en er eerder water wordt ingelaten, of dat gewacht wordt met inlaten tot een beter moment.

De inlaatvensters zijn afgeleid voor zeven inlaatlocaties aan de Rijn-Maasmonding van het waterschap Hollandse Delta en de hoogheemraadschappen Delfland en Schieland en Krimpenerwaard (zie onderstaande figuur).

Rijn-Maasmonding inlaten



Voor het afleiden van inlaatvensters is gestart met een systeembeschrijving van het watersysteem in relatie tot de inlaatpunten. Vervolgens is een uitgebreide tijdreeks- en statistische analyse gemaakt van de inlaatlocaties om een model op te stellen waarmee een inschatting gemaakt kan worden van de chlorideconcentratie bij de inlaatlocaties voor de komende tien getijperioden.

Voor zes inlaten aan de Nieuwe Maas, waarbij de chlorideconcentratie sterk schommelt en afhankelijk is van getij en rivierafvoer, zijn statistische modellen ontwikkeld die een voorspelling geven van de chlorideconcentraties gedurende de komende ± 10 getijden. Dit instrument is een hulpmiddel voor beheerders om beter te kunnen anticiperen op het groter of kleiner worden van de periodes om geschikt water in te laten (inlaatvensters). De benodigde invoer voor de berekening voor de zijhavens bestaat uit de voorspelde concentraties op de Nieuwe Maas bij meetlocatie Lekhaven en een inschatting van (indien aanwezig) de gemaalafvoer met de bijbehorende zoutconcentratie. De nauwkeurigheid van de voorspelde chlorideconcentratie op de Nieuwe Maas bij Lekhaven bepaalt voornamelijk de kwaliteit van de berekeningen voor de zijhavens.

Het door getij beïnvloede deel van de Hollandsche IJssel is complex en meer gebeurtenis afhankelijk. Voor de inlaat in dit deel van de Hollandsche IJssel is het niet gelukt een goed werkend statistisch model te maken. Dit komt voornamelijk doordat de Hollandsche IJssel gevoelig is voor verziltingsgebeurtenissen, die vervolgens gedurende langere tijd (dagen tot weken) invloed blijven hebben. Wel is het gelukt om voor dit deel van de Hollandsche IJssel kentallen te bepalen op basis van historische gegevens. Met de kentallen kan ingeschat worden onder welke omstandigheden van rivierafvoer en getijgemiddelde waterstand er sprake is van permanent zoet water (< 400 mg/l), inlaatvensters of permanent verzilt water (> 400 mg/l).

Het instrument voor inschatten van de inlaatvensters 10 getijden vooruit geeft over het algemeen een goede indicatie van de chlorideconcentraties. Dit betekent dat het instrument gebruikt kan worden om het expert judgement van waterbeheerders te ondersteunen: gaan de inlaatvensters beter of slechter worden in de komende dagen? Het is aan te bevelen om de waterbeheerders eerst enkele casestudies voor te leggen, zodat zij in kunnen schatten of deze informatie (in deze vorm) voor hen van toegevoegde waarde is. Als dat het geval is, kan het ontwikkelde model in een operationele context (bijvoorbeeld via de informatieschermen van Slim Watermanagement) worden geïmplementeerd.

Het instrument presteert het best voor een paar getijden vooruit. Hierdoor is het aan te raden om na elk getij te instrument opnieuw te draaien zodat er weer een nieuwe (en betere) voorspelling voor de komende getijden ontstaat. Op deze manier is de korte termijn voorspelling steeds gebaseerd op de meest recente waarden.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Slim Watermanagement	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Aanpak	1
1.4	Leeswijzer	2
2	Systeembeschrijving	3
2.1	Gebiedsbeschrijving	3
2.2	Innamepunten zoetwater en huidige sturingsregels	3
2.3	Verziltingsmechanismen	7
2.4	Verdieping van de Nieuwe Waterweg	10
2.5	Verziltling op insteekhavens aan de Nieuwe Maas	10
3	Overzicht meetdata	11
3.1	Rijkswaterstaat	11
3.2	Hoogheemraadschap Delfland	13
3.3	Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard	15
3.4	Waterschap Hollandse Delta	16
4	Analyse tijdreeksen	18
4.1	Nieuwe Maas: stations Lekhaven en Brienoord	18
4.2	Inlaat Schiegemaal	19
4.3	Inlaat Parksluizen	24
4.4	Inlaat Schilthuis	30
4.5	Inlaat Leuvehaven	34
4.6	Inlaat Brielselaan	38
4.7	Inlaat Pernis	43
4.8	Vergelijking zijhavens Nieuwe Maas	45
4.9	Inlaat Middelwatering	49
5	Statistische analyse	58
5.1	Modelkeuzes Nieuwe Maas	58
5.1.1	Direct of indirect modelleren van zijhavens	58
5.1.2	Absoluut model of verschilmodel	62
5.1.3	Definitie verklarende parameter voor rivierafvoer	62
5.1.4	Definitie verklarende parameter voor de zeewaterstand	63
5.1.5	Afvoerafhankelijke respons	64
5.2	Modellering locatie Lekhaven, Nieuwe Maas	65
5.2.1	Modelbeschrijving	65

5.2.2	Resultaten	66
5.3	Modellering zijhavens van de Nieuwe Maas	73
5.3.1	Modelbeschrijving	73
5.3.2	Resultaten zijhavenmodellen	74
5.4	Modellering Hollandsche IJssel	78
5.4.1	Modelkeuzes	78
5.4.2	Statistiek van chlorideconcentraties	78
6	Operationele inlaatstrategie	83
6.1	Voorspellen chlorideconcentratie Lekhaven	83
6.2	Voorspellen chlorideconcentratie zijhavens	86
6.3	Beheerdersperspectief	88
7	Toekomstbestendigheid	93
8	Conclusies en aanbevelingen	94
8.1	Conclusies	94
8.1.1	Conclusie inlaten aan de Nieuwe Maas	94
8.1.2	Conclusie inlaat Middelwatering aan de Hollandsche IJssel	95
8.2	Aanbevelingen	96
9	Literatuurlijst	98
A	Bijlage	100

1 Inleiding

1.1 Slim Watermanagement

Slim Watermanagement beoogt watertekorten en wateroverlast te verminderen door de beschikbare capaciteit van het Nederlandse watersysteem beter en duurzamer te benutten. Het is een optimalisatie van het operationele waterbeheer (<http://slimwatermanagement.nl/>). In Slim Watermanagement wordt het watersysteem als een geheel beschouwd en wordt over de grenzen van beheergebieden heen gekeken. Het programma richt zich zowel op wateroverschot als op watertekort. De droogte in de zomer van 2018 heeft het belang van het programma voor watertekort onderstreept.

In tijden van watertekort wordt water ingelaten vanuit Rijkswater naar het regionale watersysteem. In de regio Rijn-Maasmonding moet daarbij rekening worden gehouden met de kwaliteit (de chlorideconcentratie) van het in te laten water. Perioden waarin de chlorideconcentratie voldoende laag is om in te kunnen nemen, worden aangeduid als inlaatvensters. In de huidige situatie worden de perioden voor inlaten van zoet water niet altijd optimaal benut. Daarom is het deelproject 'Slim Sturen op Inlaatvensters' geïnitieerd.

1.2 Doelstelling

Het doel van het project 'Slim sturen op Inlaatvensters' is het verbeteren van de strategie voor het inlaten van zoet water, waarbij optimaal gebruik wordt gemaakt van de momenten waarop de chlorideconcentratie van het in te laten water laag is: de inlaatvensters. Aan de hand van de actuele en voor de komende dagen voorspelde inlaatvensters kan de waterbeheerder bepalen wanneer er daadwerkelijk water kan worden ingelaten. Het kan zijn dat er wordt geanticipeerd op een watervraag en er eerder water wordt ingelaten, of dat gewacht wordt met inlaten tot een beter moment. Dit betekent per inlaatlocatie:

- Voorspellen van inlaatvensters in de komende dagen;
- Advies voor een operationele inlaatstrategie.

1.3 Aanpak

Voor deze studie zijn de volgende stappen doorlopen:

1. De studie is gestart met een literatuuronderzoek over verzilting in het interessegebied: de Nieuwe Maas en de Hollandsche IJssel. Dit beeld van het watersysteem is aangescherpt door interviews met waterbeheerders.
2. Vervolgens zijn diverse databronnen van Rijkswaterstaat en waterschappen geüniformeerd en samengevoegd voor verdere analyse.
3. Op basis van de samengestelde dataset is allereerst een visuele analyse uitgevoerd voor elk van de verschillende beschouwde inlaatlocaties. Het gaat daarbij om het duiden van variaties in de chlorideconcentratie bij de inlaatlocaties aan de hand van waterstanden, rivierafvoeren en uitmaaldebieten.

4. Vervolgens is een vorm van machine learning toegepast om patronen en relaties in de data te ontdekken: self-organizing maps.
5. Tenslotte is een statistische analyse uitgevoerd, waarbij de chlorideconcentratie bij de inlaatpunten zo goed mogelijk wordt voorspeld aan de hand van diverse sturende parameters.
6. De voornaamste leerpunten uit de verschillende analyses zijn samengevoegd in een advies voor een operationele inlaatstrategie.

1.4 Leeswijzer

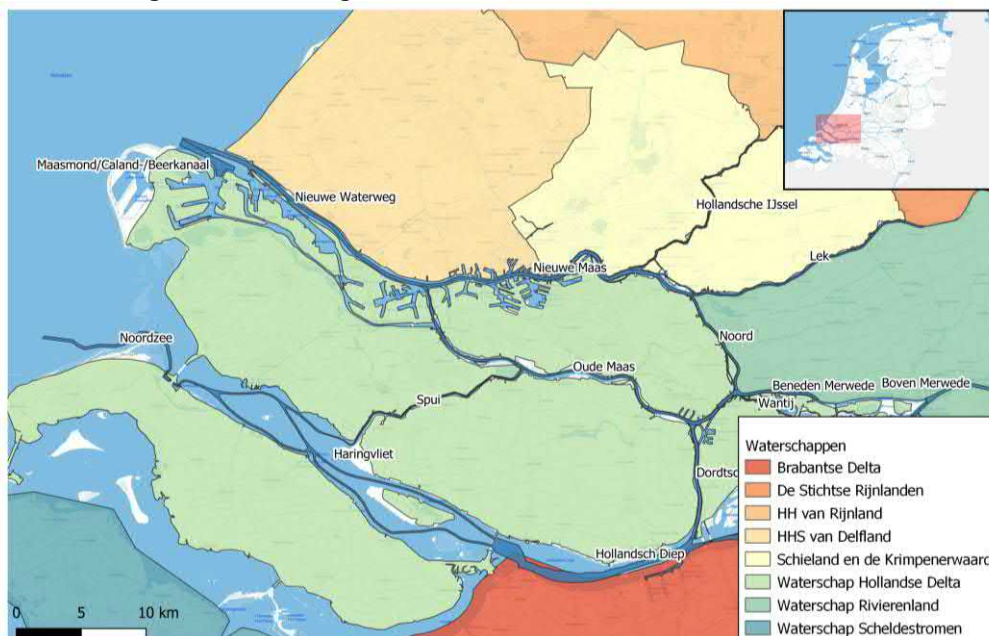
Dit rapport is als volgt opgebouwd:

- Hoofdstuk 2 geeft een gebiedsbeschrijving op basis van het uitgevoerde literatuuronderzoek;
- Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de gebruikte meetdata;
- Hoofdstuk 4 bevat voorbeelden uit de meetdata om het gedrag van de chlorideconcentraties bij de verschillende inlaatlocaties inzichtelijk te maken;
- Hoofdstuk 5 bevat de methoden en resultaten van de statistische analyse die is uitgevoerd;
- Hoofdstuk 6 voegt de voornaamste resultaten samen en vertaalt die in een advies voor een operationele inlaatstrategie;
- Hoofdstuk 7 bevat een beschouwing van de toekomstbestendigheid;
- Hoofdstuk 8 concludeert de resultaten en geeft gebruiks- en toekomstige aanbevelingen.

2 Systeembeschrijving

2.1 Gebiedsbeschrijving

De Rijn-Maasmonding (RMM) is een multifunctioneel gebied. Het is een gebied met scheepvaart, industrie (waaronder de haven van Rotterdam), natuur en recreatie. Zoals de naam het al zegt is dit het gebied waar de Rijntakken en de Maas samenkomen en via de Nieuwe Waterweg in zee uitmonden. De invloed van het getij is in het gebied aanwezig. Diverse waterschappen zijn afhankelijk van zoetwater uit dit systeem voor de zoetwaterbehoefte van het achterland. De beheergebieden van de waterschappen Delfland, Hollandse Delta en Schieland en de Krimpenerwaard liggen in de Rijn-Maasmonding. Een overzicht van het gebied van de Rijn-Maasmonding is te zien in Figuur 1.



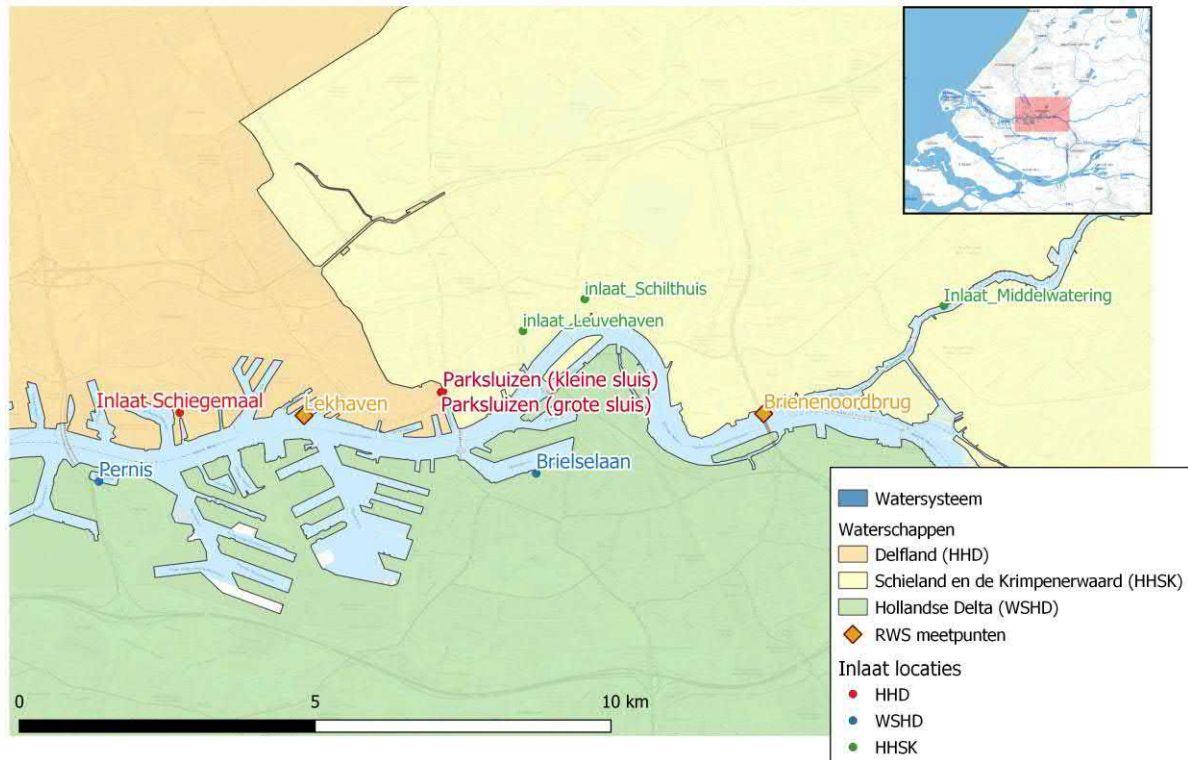
Figuur 1: Overzichtskartaal van de Rijn-Maasmonding

2.2 Innamepunten zoetwater en huidige sturingsregels

De waterschappen in de Rijn-Maasmonding maken gezamenlijk gebruik van het beschikbare zoet water in het systeem. Voor dit project hebben waterschap Hollandse Delta en de hoogheemraadschappen Delfland en Schieland en Krimpenerwaard in totaal zeven inlaatlocaties aangeleverd waarvan de inlaatvensters centraal staan in het voorliggende rapport. De zeven inlaten zijn onderhevig aan het getij wat effect heeft op de waterstand maar ook de chlorideconcentraties door instroom van zeewater door de RMM. De variatie in chlorideconcentratie door de invloed van het getij zorgt ervoor dat er niet altijd water met de gewenste chlorideconcentratie ingelaten kan worden. Dit maakt het interessant om naar de inlaatvensters van deze inlaten te kijken. Door het systeem beter te begrijpen kunnen de inlaatvensters beter benut worden. Zes van de zeven inlaten onttrekken water aan de Nieuwe Maas en één inlaat onttrekt water aan het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel. De inlaatlocaties zijn te vinden in Figuur 2. Vanwege de locaties van de zeven

inlaten zijn de Nieuwe Maas en Hollandsche IJssel uitgebreider beschreven in de systeembeschrijving. De meetlocaties worden in Hoofdstuk 3 per beheerder weergegeven in figuren. De meetlocaties worden in Hoofdstuk 3 per beheerder weergegeven in figuren.

Rijn-Maasmonding inlaten



Figuur 2: Overzicht onderzochte inlaatlocaties

Hoogheemraadschap Delfland

Voor Hoogheemraadschap Delfland (HHD) zijn twee inlaten bekeken voor deze studie, de inlaat bij het Schiegemaal en bij de Parksluizen. De inlaat Schiegemaal is het meest benedenstrooms gelegen van de twee. HHD gaf hierbij aan dat de inlaatvensters vrij klein zijn bij het Schiegemaal. De Nieuwe Maas is gemiddeld 12 meter diep, waardoor de bovenste laag water de Jachthaven in stroomt (Interview december 2020, HHD). Rond het Schiegemaal zijn drie EC-meters¹ aanwezig, waarvan één binnendijks in de boezem (± 1.5 meter diepte), één buitendijks voor het gemaal en één in de jachthaven. De dieptes van de buitendijkse EC-meetpunten zijn niet bekend. De meetlocaties voor EC zijn terug te zien in Figuur 6. Wanneer het Schiegemaal water afvoert naar de Nieuwe Maas wordt er relatief zoet water geloosd en ziet het hoogheemraadschap een verlaging van de chlorideconcentraties terug buitendijks in de jachthaven.

De inlaat bestaat uit een automatisch gestuurde onderspuier in een jachthaven aan de Nieuwe Maas van gemiddeld drie meter diep. De inlaat heeft 3 beveiligingsregels:

- Peilen voor en achter worden gemeten, bij onregelmatigheden gaat de schuif dicht
- Als de EC bij een van de 3 EC-meters boven de 1.5 S/m (gelijk aan ongeveer 340 mg/l) komt gaat de schuif dicht
- Bij een stroomstoring gaat de schuif dicht

¹ Een Electric Conductivity meter meet de geleidbaarheid van water, waar de zoutconcentratie uit kan worden afgeleid

Bij de Parksluizen is op dit moment geen inlaat aanwezig, maar een schutsluis waarbij veel zout kan lekken wanneer er geschut wordt met hoogtij. Vanwege de meer bovenstroomse ligging van de Parksluizen t.o.v. het Schiegemaal wordt er overwogen om bij de Parksluizen een inlaatmogelijkheid te realiseren. Er zijn hier buitendijks in de Parkhaven twee EC-meters aanwezig, waarvan één bij de bodem en de ander dicht bij het wateroppervlak, de exacte dieptes zijn niet bekend. Binnendijks van de Parksluizen, de Coolhaven, zijn twee EC-meters aanwezig, waarvan ook hier één dicht bij de bodem en één dicht bij het wateroppervlak. De exacte dieptes van de EC-meters in de Coolhaven zijn niet bekend, voor de locaties van de meetpunten zie Figuur 6. Delfland is niet afhankelijk van de inlaat Schiegemaal of een eventueel toekomstige inlaat bij Parksluizen. Wanneer er onvoldoende kwalitatief zoet water ingelaten kan worden, wordt er alleen water onttrokken uit de zoetwatervoorziening het Brielse Meer via gemaal Winsemius. De Schie heeft een groot verziltingsrisico. De zoutprop in de Schie op afstand houden kost veel water. Doorspoelen van de Schie wordt gedaan met water uit het Brielse meer tijdens droge periodes wanneer de inlaat Schiegemaal te zout water zou inlaten.

Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard

Voor Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard (HHSK) zijn drie inlaten bekeken voor deze studie: inlaat Middewatering, inlaat Leuvehaven en inlaat Schilthuis. Zoals in de overzichtsfiguur van Figuur 2 te zien is, is inlaat Middewatering de enige inlaat binnen dit onderzoek gelegen aan de Hollandsche IJssel. Inlaat Middewatering voorziet stedelijk gebied van water. Buitendijks is een EC meter aanwezig welke ook omgerekend is naar chlorideconcentratie. Dit meetpunt meet op één hoogte.

De inlaat wordt gesloten als de chlorideconcentratie boven de 400 mg/l komt (interview december 2020, HHSK). De diepte van de EC meter is niet bekend. De inlaat wordt automatisch gestuurd op de behoefte van het achterland (bebouwd gebied Capelle) op basis van het binnendijkse peil. Wanneer er in de waterbehoefte niet voorzien kan worden vanwege te hoge zoutconcentraties bij inlaat Middewatering kan er via de Ringvaart water worden aangevoerd. Dit water is ook afkomstig vanuit de Hollandsche IJssel, maar vanuit de meer bovenstroomse inlaat Snelle Sluis.

Inlaat Leuvehaven en Schilthuis voorzien beiden de Rotte en het achterliggende gebied van aanvoer. De achterliggende gebieden zijn vrij divers met akkerbouw, recreatie en natuur, zodat verschillende zoutgrenzen van belang zijn. De kritische gebruikers voor de zoutgrens liggen op relatief grote afstand van het inlaatpunt, wat betekent dat korte periodes inlaten van zouter water voor deze gebruikers weinig invloed heeft. De Rotte fungeert hierbij als buffer tussen de inlaat en de gebruikers. Inlaat Schilthuis kan niet via vrij verval inlaten maar via een hevelwerking met een van de persleidingen van het gemaal. Deze leiding is lang en valt droog met laagtij. Het onder druk zetten van de hevel waardoor water ingelaten kan worden moet via het gemaal gebeuren door eerst water af te voeren. Dit betekent dat er maar een beperkte periode is om water in te laten vanaf het moment dat het water gaat oplopen na laagwater. Bijkomend nadeel is dat er veel water verloren gaat in het proces om de persleiding/hevel onder druk te zetten door eerst uit te malen. De inlaatlocatie ligt in een zijarm van de Nieuwe Maas, het Boerengat, waarin enige doorspoeling optreedt via de duikersluis Buizengat (Interview december 2020, HHSK). Het Boerengat staat op twee plaatsen in verbinding met de Nieuwe Maas, en op één plaats met de Leuvehaven. Dit betekent dat er in het Boerengat enige verversing plaatsvindt. In het Boerengat is ook een EC meter aanwezig (ook omgerekend naar chlorideconcentratie) op ongeveer dezelfde diepte als de persleiding. Binnendijks op de Rotte, op 2 kilometer vanaf inlaat Schilthuis, is nog een EC meter aanwezig, welke ook omgerekend is naar chlorideconcentratie.

De sturing is peil gestuurd bij Schilthuis en is gericht op een chlorideconcentratie grens van 400 mg/l. Dit is geen harde grens voor inlaten wanneer het peil te laag is. De EC meter buitendijks bij Schilthuis wordt voornamelijk gebruikt zodat er niet tijdens te grote zoutpieken water wordt ingelaten. De peilbeheerder er stuurt er daarnaast op dat de chlorideconcentratie bij de meetlocatie van de Rotte niet boven de 800 mg/l mag komen. Wat betekent dat tijdens langdurig hoge zoutconcentraties op de Nieuwe Maas inlaten tot 1000 à 1500 mg/l voor kan komen. Als het water in de Nieuwe Maas te zout wordt, gaat er water vanuit de Hollandsche IJssel via de Snelle Sluis, via watergangen en een gemaal naar het gebied van de Rotte. Dit water is ook afkomstig van de Ringvaart, net als bij inlaat Middelwatering in zoute periodes.

Vanwege de beperkingen van inlaat Schilthuis is in 2020 de inlaat Leuvehaven gerealiseerd [Website Schieland en de Krimpenerwaard 2020]. De inlaat ligt in de Leuvehaven, een zijarm van de Nieuwe Maas. Deze haven staat op één plaats in verbinding met de Nieuwe Maas. Daarnaast is er aan de oostzijde een open verbinding met andere zijhavens, zoals het Boerengat. De doorstroming is minder in vergelijking met het Boerengat. Er zijn buitendijks twee EC-meetpunten aanwezig (tevens omgerekend naar chlorideconcentraties), op -2 m NAP en op -0.5 m NAP. Het meetpunt op -2 m NAP ligt ongeveer op de hoogte van de inlaat.

De inlaat van Leuvehaven ligt diep genoeg om niet droog te vallen en er wordt volledig automatisch gestuurd op gemeten peilen en chlorideconcentraties. De inlaat is in 2021 operationeel in gebruik genomen. Hij sluit automatisch bij een chlorideconcentratie van ongeveer 400 mg/l, op basis van de EC-meting.

Waterschap Hollandse Delta

Voor waterschap Hollandse Delta zijn twee inlaten bekeken voor deze studie, inlaat Brielselaan en inlaat Pernis. De drempelhoogte van inlaat Brielselaan ligt op -0.80 m NAP. Gezien de staat en leeftijd van de inlaat wordt overwogen deze op non-actief te stellen en de inlaat aan de andere kant van het gebied, bij de Oude Maas te gebruiken.

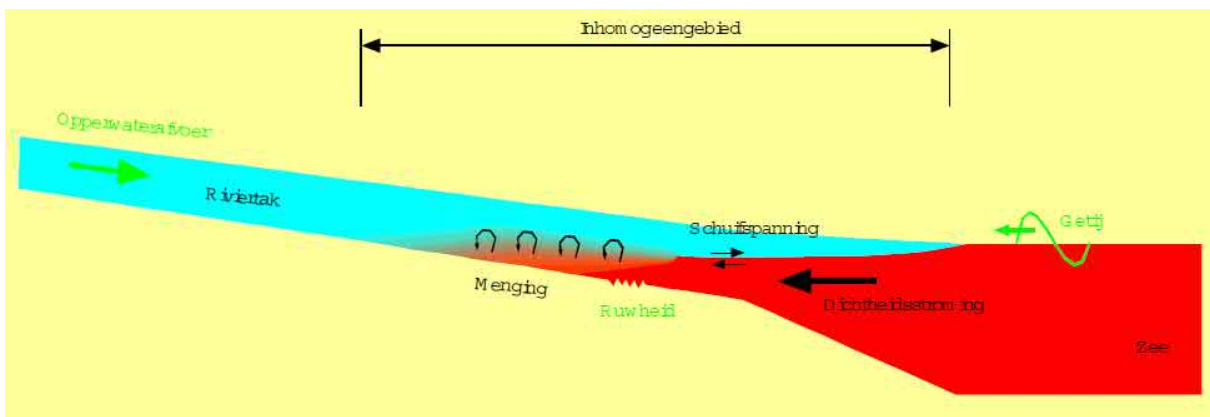
De inlaat Brielselaan is een handmatig gestuurde inlaat, waar de wens aanwezig is deze in de toekomst te automatiseren. Buitendijks bij inlaat Brielselaan is een meetpunt aanwezig dat de chlorideconcentratie meet. Dit meetpunt wordt gebruikt voor waarschuwingmeldingen bij het overschrijden van een gemeten chlorideconcentratie van 800 mg/l. De diepte van de chloridemeter is niet bekend. Achterliggend gebied heeft een stedelijke functie waarbij peil leidend is boven kwaliteit (Interview december 2020, HHD). De inlaat wordt in de praktijk niet gestopt vanwege te hoge zoutconcentraties. De inlaat is gelegen in de Maashaven waar naar verwachting weinig doorstroom aanwezig is.

De inlaat bij Pernis is het meest benedenstrooms gelegen inlaatpunt van de zeven inlaten en bevindt zich in de Madroelhaven. De inlaat is geautomatiseerd en de drempelhoogte zit op -1.50 m NAP. De combinatie hiervan maakt dit een punt waar de inlaatvensters erg kort zijn. Er zit een meetpunt dat de chlorideconcentratie meet aan de binnendijkse kant van de inlaat. Er is een hoge alarmwaarde ingesteld op de waarden van het binnendijkse meetpunt wat een melding verstuurd van hoge zoutconcentraties. Het achterland heeft een stedelijke functie waarmee weer het peil leidend is boven de chlorideconcentratie.

2.3 Verziltingsmechanismen

Vanwege de open verbinding van riviertakken met de zee kan een deel van de Rijn-Maasmonding verzilt onder bepaalde omstandigheden. Bij vrije uitstroom van rivieren op zee is er vaak sprake van een zouttong die landinwaarts beweegt, onder het zoete water door. Door het verschil in dichtheid tussen zoet en zout water kan een scheiding van zoet en zout water bestaan. Bij lage tot geen turbulente stroming leidt dit tot een duidelijke overgang van zoet naar zout. Bij turbulenter stroming zal het water meer gemengd zijn. Zulke mengingsprocessen kunnen afhangen van interactie tussen riviertakken, wind, vorm van het onderwaterprofiel en uitwisseling met zijhavens (Hydrologic, 2015a). Bij weinig uitwisseling tussen de rivier en de zijhavens kunnen de zijhavens moeilijk verzoeten wanneer deze eenmaal verzilt zijn.

De mate en reikwijdte landinwaarts van de verzilting zal afhangen van voornamelijk twee natuurlijke hoofdcomponenten: de zeewaterstand en de rivierafvoer. Deze twee componenten zijn in balans met elkaar. In periodes met windopzet op zee zal het zoute zeewater verder landinwaarts stromen. Getij en windopzet zorgen daarnaast voor een constante aanwezigheid van dynamiek in de instroom van zeewater en daarmee de zoutconcentraties. Droge periodes, waarin de rivierafvoer laag is, zullen er eveneens voor zorgen dat zout water verder landinwaarts stroomt. In een groot deel van het systeem treedt verzilting pas op wanneer aanvoer vanuit de grote rivieren naar de Rijn-Maasmonding te laag is. Het terugspoelen van zout tijdens eb is dan onvoldoende sterk, waardoor de zouttong gestaag verder landinwaarts beweegt (Hydrologic, 2015a). De wisselwerking tussen het zeewater en getij met de rivierafvoer is te zien in Figuur 3.



Figuur 3: Zouttong werking Estuarium. Bron: Rijkswaterstaat (2004)

Menselijke ingrepen kunnen daarnaast effect hebben op het zoutconcentratie in de Rijn-Maasmonding. Wateronttrekkingen via gemalen of inlaten beïnvloeden de afvoer van het systeem en daarmee de mate van verzilting. Verdieping van waterlopen kan zorgen voor een sterkere zoutindringing. Verzilting van de binnenlandse rivieren brengt problemen met zich mee voor de zoetwaterbehoefte van gebruikers in de Rijn-Maasmonding. Ook speelt de achtergrondchlorideconcentratie van de rivierafvoer, bijvoorbeeld uit industrieën in het stroomgebied van de Rijn, een rol in de mate van verzilting in de Rijn-Maasmonding (Deltares, 2015a). Deze zoutvracht is flink afgenomen door de sluiting van de mijnen.

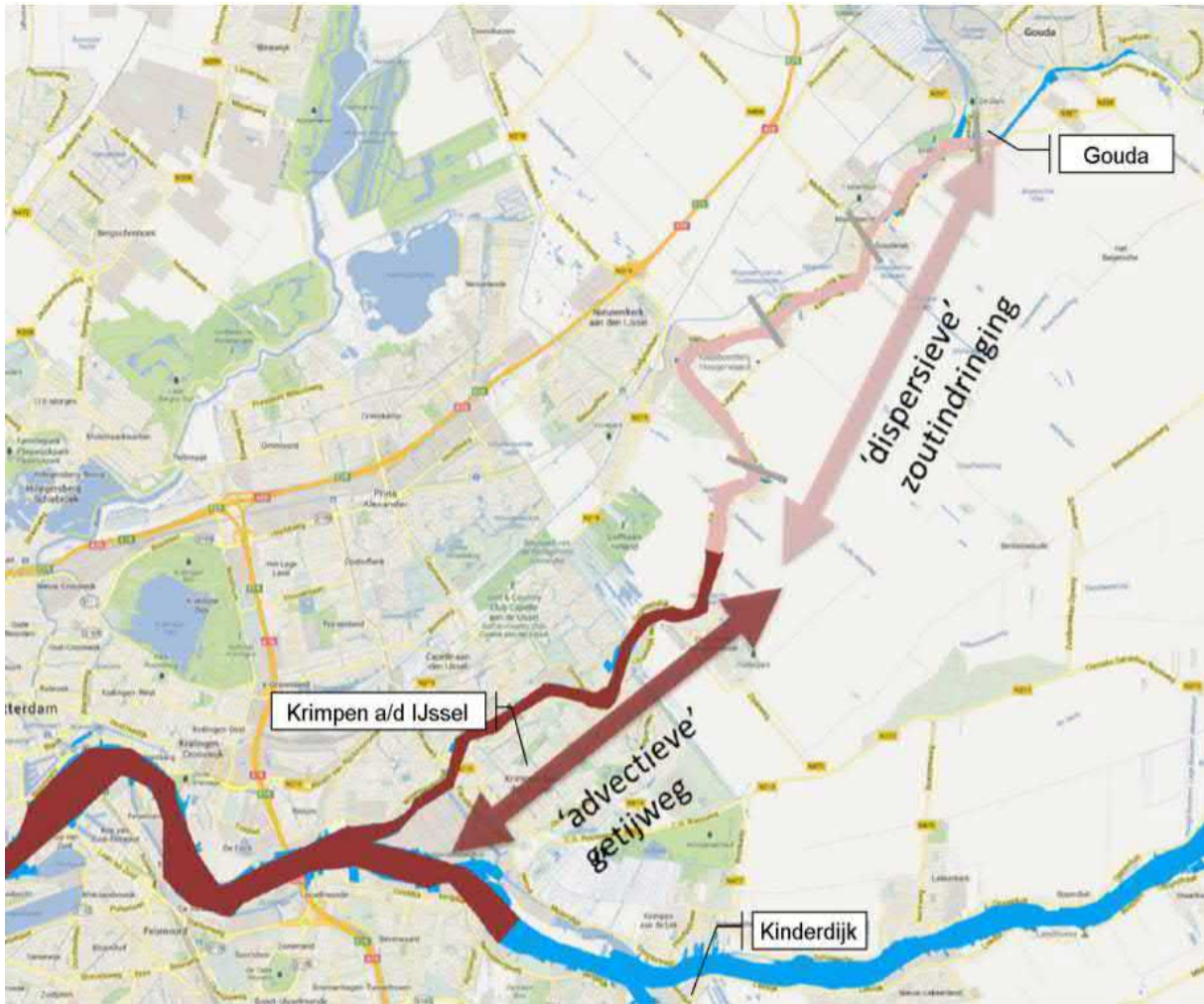
Hydrologic (2015a) onderscheidt vier verschillende gebieden voor verzilting in de Rijn-Maasmonding:

1. De **Nieuwe Maas** wordt gedomineerd door de Rijnafvoer waarbij voornamelijk rivierafvoergedreven verzilting een rol speelt. Schommelingen in getijden en windopzet worden redelijk snel geneutraliseerd door de hoge doorstroming van de bovengelige riviertakken. Inlaten bij Pernis en de Parksluizen verziltten.

2. Verzilting bij de monding van de **Hollandsche IJssel** wordt voornamelijk gedreven door rivierafvoer van de Rijn en waterstanden samen met zoetwateronttrekking (Grootste onttrekkingen: gemaal Pijnacker-Verdoold bij Gouda en de Snelle Sluis bij Moordrecht) en het ontbreken van grote doorspoeling in deze riviertak. Vanwege het ontbreken van doorspoeling in deze tak is deze rivier ook gevoelig voor windopzet en wordt de Hollandsche IJssel moeizaam weer zoet als deze eenmaal verzilt is.
3. De **Lek** heeft eenzelfde karakter als de Hollandsche IJssel, maar ligt verder stroomopwaarts, waardoor deze rivier minder gevoelig is voor verzilting dan de Hollandsche IJssel. In droge periodes is er weinig afvoer in de Lek. Er is wel de mogelijkheid om deze door te spoelen door bediening van de stuw bij Hagestein. Er moet dan een keuze gemaakt worden tussen de verhouding van het doorspoelen van het Amsterdam-Rijnkanaal en/of de Lek met het water dat vanuit de Rijntakken aanstroomt.
4. Het **Spui** en de **Dordtse Kil** kunnen kortdurend verzilten door windopzet, waarbij zout water via de Nieuwe Waterweg en Oude Maas het Spui en de Dordtse Kil binnendringt (zie Figuur 1). Het Haringvliet wordt onder normale omstandigheden alleen belast door zout water vanuit de Haringvlietsluizen (Haringvliet Kier). De afspraak is dat deze sluizen zo bediend worden dat het zoute water nooit de lijn van Middelharnis naar de monding van het Spui overschrijdt. Bij langdurige storm en lage Rijnafvoer kan het Haringvliet echter ook verzilten met water vanuit de Nieuwe Waterweg via het Spui. Als dit zoute water het inlaatpunt voor het Brielse Meer bereikt (langs het Spui, dicht bij het Haringvliet), spreekt men van achterwaartse verzilting. Achterwaartse verzilting kan leiden tot verzilting van het Haringvliet en langdurige nalevering van zout water vanuit het Haringvliet richting het Spui en de Dordtse Kil (Deltares, 2018a).

De Nieuwe Waterweg is de belangrijkste bron van verzilting in de RMM. Lage Rijnafvoeren, onder 1200 m³/s bij Lobith, leiden voornamelijk tot het verder stroomopwaarts kruipen van zout water via de Nieuwe Waterweg over de Nieuwe Maas. Dit kan ook bij hogere afvoerwaarden voorkomen. Het stroomopwaarts kruipen zal soms gemengd en soms gelaagd gebeuren (Deltares, 2015a). Dit kan ervoor zorgen dat de benedenstroomse inlaten zoals Pernis en Schiegemaal verzilten.

Onder normale omstandigheden is de monding van de Hollandsche IJssel niet verzilt door de getijdewerking die via de Nieuwe Maas de monding van de Hollandsche IJssel kan bereiken. Wanneer tijdens hoogwater zout in de monding van de Hollandsche IJssel terecht is gekomen, stroomt dit bij laagtij niet geheel terug en zal dit via dispersie langzaam naar boven kruipen. Bij een combinatie van lage afvoeren en hoge onttrekkingen bij Gouda kan daarbij ook een zuigende werking ontstaan, waarbij de Hollandsche IJssel door advectie nog sterker zal verzilten (Hydrologic, 2015a). Verzilting van de Hollandsche IJssel bij Krimpen a/d IJssel treedt in de praktijk op bij een Rijnafvoer bij Lobith onder de 1400 m³/s wat te zien is bij de tijdreeksanalyse van inlaat Middelwatering, zie paragraaf 4.8.



Figuur 4: Advectieve en dispersieve zoutindringing op de Hollandsche IJssel. Advectief transport van zout vindt plaats binnen de gemiddelde getijweg, als de monding van de Hollandsche IJssel verzilt is geraakt. Bron: Hydrologic (2013).

2.4 Verdieping van de Nieuwe Waterweg

Een dynamisch systeem zoals de Rijn-Maas monding zoekt naar een balans tussen aanwezige krachten. De verdieping van de Nieuwe Waterweg naar -16.2 m NAP maar ook de Botlekhaven en een deel van de Nieuwe Maas in 2018, zorgen ervoor dat het systeem veranderd is naar een nieuw evenwicht. De verdieping is een verandering buiten de altijd aanwezig dynamische verandering van het getij. In de MER studie door Svasek Hydraulics (2015) is te zien dat de zouttong verder bovenstrooms kan trekken door de verdieping van deze drie delen van de Rijn-Maasmonding.

Rond dezelfde periode is ook een MER studie gedaan naar de effecten van de verdieping op de verzilting van de aanwezige inlaten (Hydrologic, 2015b). Bij Krimpen aan de IJssel wordt in deze studie de 400 mg/l chloride grens 18% vaker overschreden dan voor de verdieping, hoewel dit nog steeds minder is dan 1% van het aantal dagen in de zomerperiode. De monitoring naar de daadwerkelijk effecten loopt nog.

De verdieping van de Nieuwe Maas zorgt wel voor een toename van de verzilting in de Nieuwe Maas, volgens deze MER studies. In Svasek Hydraulics (2015) komt naar voren dat bij gemaal Schilthuis in de zijhaven het Boerengat de overschrijdingsduur van de grenswaarde van 400 mg/l chloride drie tot vijf procent hoger is dan voor de verdieping voor verschillende Rijnafoeren bij Lobith. Met de grenswaarde van 400 mg/l in acht genomen zal bij het Boerengat de tijdsduur van de inlaatvensters dagelijks met 0 tot 2 uur afnemen (Hydrologic, 2015b).

De voorlopig verwachte toename van het chlorideconcentratie, afkomstig uit de MER studies, zal voor een verhoging van de zoutbelasting op de boezem van Delfland kunnen zorgen. Om de boezem extra door te spoelen ter mitigatie van de extra zoutvracht die via de Parksluizen naar binnen komt is er maandgemiddeld ongeveer 0.1 tot 0.2 m³/s extra nodig (Hydrologic, 2015b).

2.5 Verzilting op insteekhavens aan de Nieuwe Maas

Er is nog niet veel bekend over het chloridegedrag van insteekhavens aan de Nieuwe Maas ten opzichte van het chloridegedrag op een aanliggende rivier, zoals de Nieuwe Maas. De insteekhavens kunnen als zoutvang werken door hun kombergend volume (Hydrologic, 2015a). Het advectieve in/uitstromen van de Nieuwe Maas op de zijhavens speelt een rol in de wisselwerking van zout concentraties. Dichtheidsverschillen tussen rivier en haven via dispersie kunnen hierbij ook een rol spelen, afhankelijk van de geometrie van de zijhaven. Daarnaast zijn de zijhavens vaak minder diep waardoor er alleen wisselwerking is met het relatief zoetere deel van de rivierkolom, de bovenste laag.

Er is een verschil in verversing tussen eenzijdig aangetakte insteekhavens zoals de Spuihaven en tweezijdig aangetakte insteekhavens zoals het Boerengat. Waterschap HHSK merkt dat in het Boerengat door de tweezijdige aantakking enige doorspoeling en verversing plaatsvindt, dit is in mindere mate aanwezig bij de tweezijdig aangetakte Leuehaven en wat niet het geval is in de eenzijdig aangetakte Spuihaven. Eenzijdig aangetakte insteekhavens ontzilten pas na langere tijd, of als er zoetwater op de haven wordt geloosd.

3 Overzicht meetdata

De data die benut zijn uit deze studie, zijn afkomstig van verschillende waterbeheerders, uit verschillende systemen. Daarom worden deze in dit hoofdstuk eerst per waterbeheerder beschreven.

3.1 Rijkswaterstaat

De diverse meetdata in beheer bij Rijkswaterstaat zijn opgevraagd voor de periode van 2000 tot eind 2020. Hieruit zijn tien waterstandslocaties ontvangen voor de opgevraagde periode waarvan er twee afwijken en pas in 2006 en 2016 beginnen, zie Tabel 1.

Er zijn acht afvoerlocaties ontvangen welke belangrijk werden geacht voor deze studie. De geleverde periode loopt van 2000 tot variërend eind 2019 en eind 2020. Twee reeksen beginnen pas in 2005 en 2012, zie het overzicht in Tabel 2.

Verder zijn er twaalf chloride meetpunten ontvangen, waarvan een aantal op dezelfde locatie maar met verschillende diepte. De meetpunten en reeksperiodes zijn te vinden in Tabel 3.

Een overzicht van de meetlocaties is te vinden in Figuur 5. De codes uit Tabel 1, Tabel 2 en Tabel 3 corresponderen met de codes in Figuur 5.

Tabel 1: Meetpunten RWS, waterstand

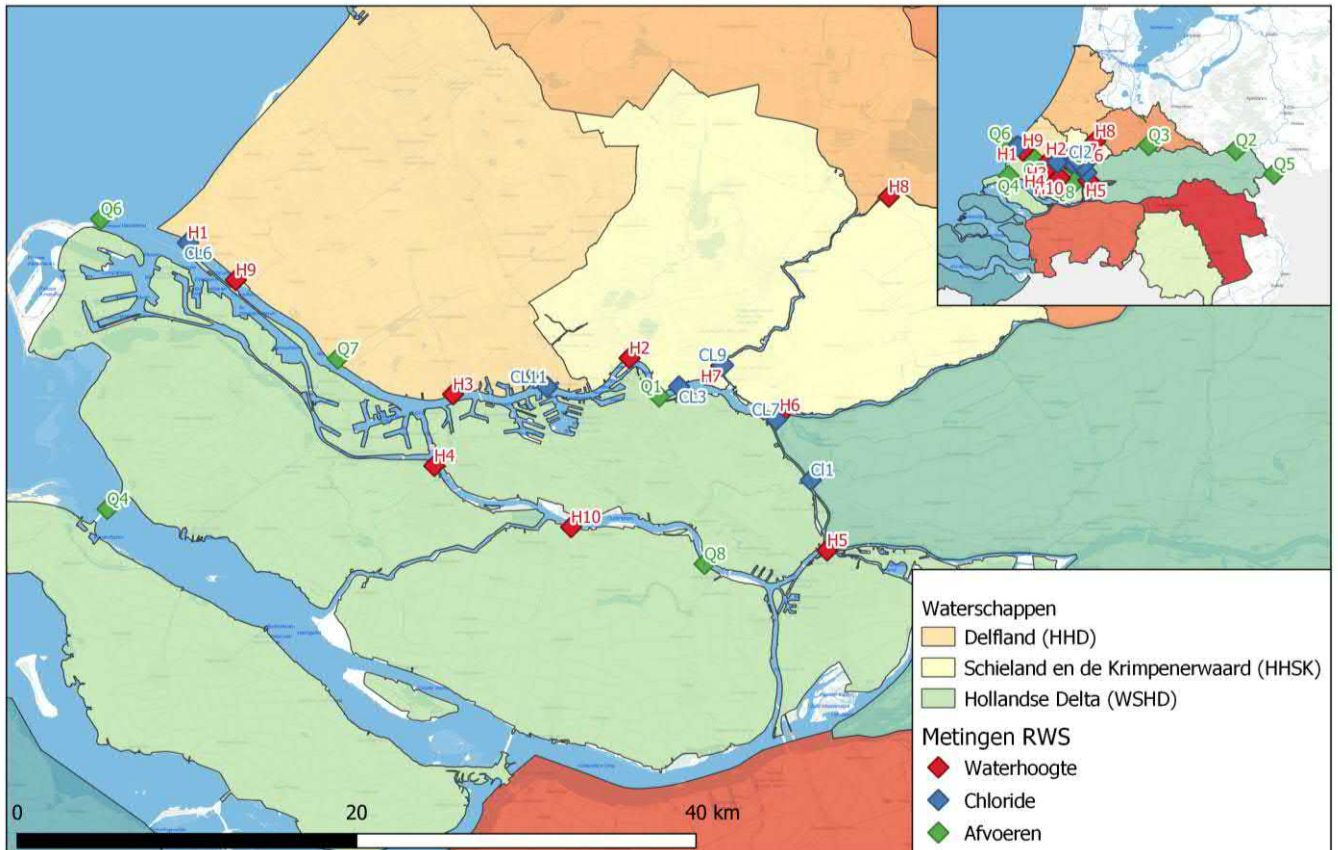
Meetpunt	code	Waterloop	startdatum	einddatum
Hoek van Holland	H1	Nieuwe Waterweg	2000-01-01	2020-12-23
Rotterdam	H2	Nieuwe Maas	2000-01-01	2020-12-23
Vlaardingen	H3	Nieuwe Maas	2000-01-01	2020-12-23
Spijkensisse	H4	Oude Maas	2000-01-01	2020-12-23
Dordrecht	H5	Beneden Merwede	2016-04-03	2020-12-23
Krimpen a/d Lek	H6	Lek	2000-01-01	2020-12-23
Krimpen a/d IJssel	H7	Hollandsche IJssel	2000-01-01	2020-12-23
Gouda brug	H8	Hollandsche IJssel	2000-01-01	2020-12-23
Maeslantkering zeezijde	H9	Nieuwe Waterweg	2006-09-26	2020-12-23
Goidschalxoord	H10	Oude Maas	2000-01-01	2020-12-23

Tabel 2: Meetpunten RWS, afvoer. De codes met een * zijn berekende debieten.

Meetpunt	code	Waterloop	startdatum	einddatum
Brienoord (km 996.5)	Q1*	Nieuwe Maas	2000-01-07	2019-12-31
Driel boven	Q2	Neder-Rijn	2000-01-01	2020-12-22
Hagestein boven	Q3	Lek	2000-01-01	2020-12-22
Haringvlietsluizen binnen	Q4*	Haringvliet	2000-01-07	2019-12-31
Lobith	Q5	Rijn	2000-01-01	2020-12-22
Maasmond	Q6*	Nieuwe Waterweg	2005-01-07	2019-12-31
Maassluis	Q7*	Nieuwe Waterweg	2000-01-07	2019-12-31

Tabel 3: Meetpunten RWS, Chlorideconcentraties

Meetpunt	Code	Waterloop	startdatum	einddatum
Alblasserdam rechteroever (nabij brug) -2 m NAP	Cl1	Noord	2000-01-01	2005-04-19
Brienoordbrug rechter oever (km995.2) -2.5 m NAP	CL2	Nieuwe Maas	2000-01-01	2020-12-22
Brienoordbrug rechter oever (km995.2) -6.5 m NAP	CL3	Nieuwe Maas	2008-01-01	2020-12-22
Hoek van Holland rechter oever (km1030.1) -2.5 m NAP	CL4	Nieuwe Waterweg	2000-01-01	2020-12-22
Hoek van Holland rechter oever (km1030.1) 4.5 m NAP	CL5	Nieuwe Waterweg	2000-01-01	2020-12-22
Hoek van Holland rechter oever (km1030.1) -9 m NAP	CL6	Nieuwe Waterweg	2000-01-01	2020-12-22
Kinderdijk Linkeroever (km988.8) -5 m NAP	Cl7	Lek	2001-02-01	2020-12-22
Krimpen a/d IJssel linker oever (km18.0) -4 m NAP	Cl8	Hollandsche IJssel	2000-01-01	2020-12-22
Krimpen a/d IJssel linker oever (km18.0) -5.5 m NAP	Cl9	Hollandsche IJssel	2000-01-01	2020-12-22
Lekhaven rechter oever (km1005.2) -2.5 m NAP	Cl10	Nieuwe Maas	2000-01-01	2020-12-22
Lekhaven rechter oever (km1005.2) -5 m NAP	Cl11	Nieuwe Maas	2000-01-01	2020-12-22
Lekhaven rechter oever (km1005.2) -7 m NAP	Cl12	Nieuwe Maas	2000-01-01	2020-12-22



Figuur 5: Overzicht meetlocaties Rijkswaterstaat (RWS)

3.2 Hoogheemraadschap Delfland

Hoogheemraadschap Delfland heeft acht EC-meetreeksen, vijf waterstandsmetingen en twee gemaalafvoeren bij de inlaten aangeleverd. De locaties hiervan zijn te zien in Figuur 6 hieronder. De waterstandsmetingen zijn op dezelfde locaties als de EC-metingen. De lengte van de meetreeksen zijn wisselend, de start en einddatum van de metingen zijn te zien in Tabel 4, Tabel 5 en Tabel 6. De binnendijkse metingen zijn niet gebruikt gezien het systeembedrag aan de buitenkant onderzocht is.

Tabel 4: Metingen Delfland, EC

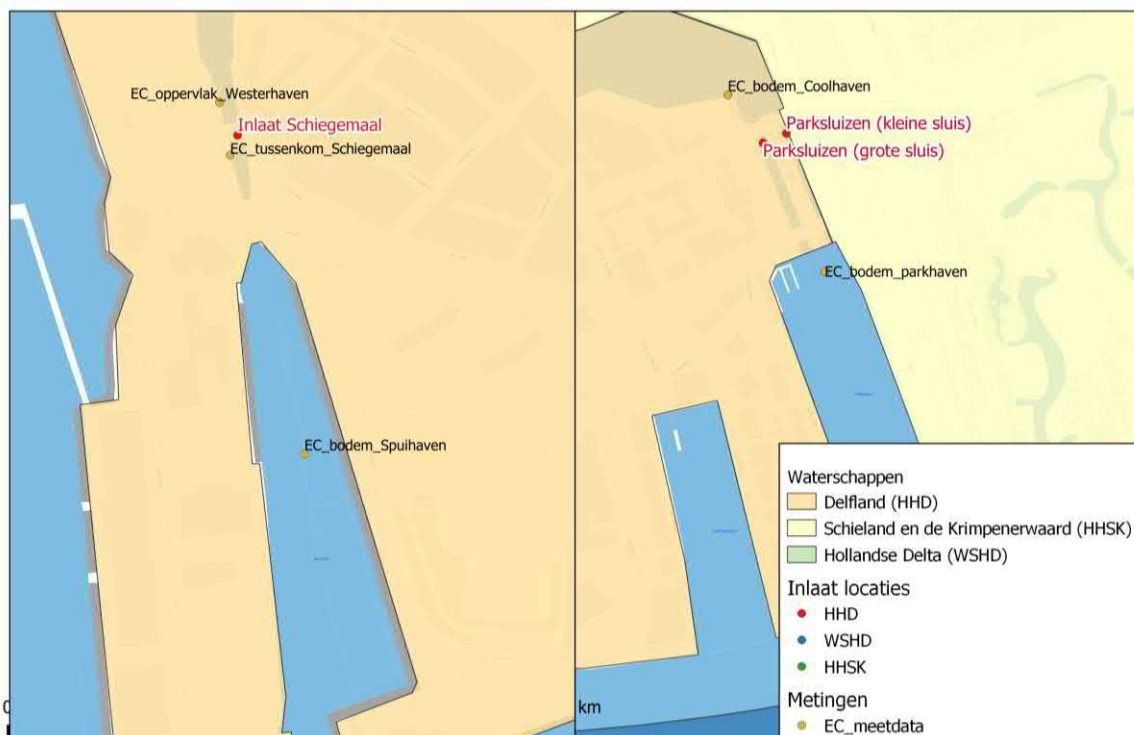
Meetpunt	Waterloop	startdatum	einddatum
bodem_Coolhaven	Nieuwe Maas	2015-01-01	2020-12-10
Oppervlak_Coolhaven	Nieuwe Maas	2015-01-01	2020-12-10
bodem_parkhaven	Nieuwe Maas	2014-05-28	2020-12-10
oppervlak_parkhaven	Nieuwe Maas	2014-05-28	2020-12-10
bodem_Spuihaven	Nieuwe Maas	2020-01-28	2020-12-10
bodem_Westerhaven	Nieuwe Maas	2016-09-14	2020-12-10
oppervlak_Westerhaven	Nieuwe Maas	2016-09-14	2020-12-10
tussenkomp_Schiegemaal	Nieuwe Maas	2016-09-14	2020-12-10

Tabel 5: Metingen Delfland, Waterstand

Meetpunt	Waterloop	startdatum	einddatum
Parksluis_buitendijks	Nieuwe Maas	2014-12-27	2020-12-11
Parksluis_binnendijks	Nieuwe Maas	2014-12-27	2020-12-11
Schiegemaal_buitendijks	Nieuwe Maas	2014-12-27	2020-12-11
Schiegemaal_tussenkomp	Nieuwe Maas	2014-12-27	2020-12-11
Schiegemaal_binnendijks	Nieuwe Maas	2014-12-27	2020-12-11

Tabel 6: Metingen Delfland, Gemaalafvoer

Meetpunt	Waterloop	startdatum	einddatum
Schiegemaal	Nieuwe Maas	2014-08-29	2021-03-09
Gemaal Parksluizen	Nieuwe Maas	2012-09-04	2021-03-15



Figuur 6 Overzicht meetlocaties Delfland (HHD)

3.3 Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard

Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard heeft vier meetlocaties aangeleverd met EC- en chloridewaarden. De EC-reeks is langer dan de Chlorideconcentratie reeks. De verschillen zijn te zien in Tabel 7 en Tabel 8. Daarnaast zijn er drie waterstandsreeksen en twee gemaalafvoer reeksen aangeleverd, zie Tabel 9 en Tabel 10. De locaties van de meetpunten zijn te zien in Figuur 7.

Tabel 7: Metingen HHSK, EC

Meetpunt	Waterloop	startdatum	einddatum
Schilthuis	Nieuwe Maas	2015-06-18	2020-12-02
Leuehaven_-0.5 m NAP	Nieuwe Maas	2020-05-04	2020-12-02
Leuehaven_-2.0 m NAP	Nieuwe Maas	2020-05-04	2020-12-02
Middelwatering	Hollandsche IJssel	2018-08-10	2020-12-07

Tabel 8: Metingen HHSK, chlorideconcentratie

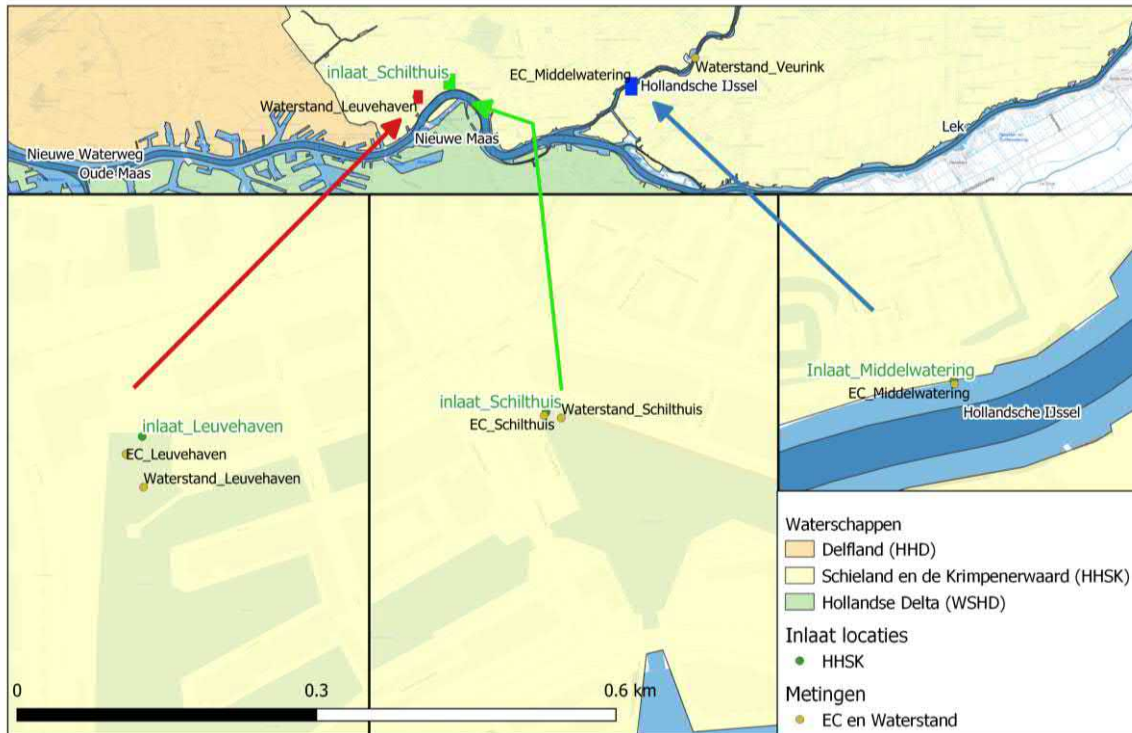
Meetpunt	Waterloop	startdatum	einddatum
Schilthuis buitendijks	Nieuwe Maas	2015-09-25	2020-12-02
Schilthuis binnendijks	Rotte	2016-04-26	2021-03-15
Leuehaven_-0.5mNAP	Nieuwe Maas	2020-05-04	2020-12-02
Leuehaven_-2.0mNAP	Nieuwe Maas	2020-05-04	2020-12-02
Middelwatering	Hollandsche IJssel	2018-08-13	2020-12-07

Tabel 9: Metingen HHSK, waterstand

Meetpunt	Waterloop	startdatum	einddatum
Schilthuis_buitendijks	Nieuwe Maas	2015-09-25	2020-12-02
Veurink_buitendijks	Hollandsche IJssel	2018-04-18	2020-12-02
Leuehaven_buitendijks	Nieuwe Maas	2019-12-31	2020-12-02

Tabel 10: Metingen HHSK, Gemaalafvoer

Meetpunt	Waterloop	startdatum	einddatum
Gemaal Schilthuis	Nieuwe Maas	2015-09-25	2021-03-14
Gemaal Middelwatering	Hollandsche IJssel	2018-08-14	2021-03-13



Figuur 7: Overzicht meetlocaties Schieland en de Krimpenerwaard (HHSK)

3.4 Waterschap Hollandse Delta

Waterschap Hollandse Delta heeft drie meetpunten met chlorideconcentraties en EC aangeleverd. De start en einddatum van deze reeksen zijn, respectievelijk te vinden in Tabel 11 en Tabel 12. Naast chlorideconcentratie en EC-metingen bij de twee onderzochte inlaten is er ook een chlorideconcentratie en EC-metpunt vlak bij de monding van de Hollandsche IJssel aangeleverd. Daarnaast zijn er twee waterstandsreeksen en de gemaalafvoer (alleen voor inlaat Brielselaan in de vorm van een aan/uit reeks per pomp en de pompcapaciteit per pomp) aangeleverd bij de hevels, zie Tabel 13 en Tabel 14. De waterstand van Pernis is binnendijsk waarop de hevel wordt gestuurd. Voor dit onderzoek zal deze niet gebruikt worden. De locaties van de meetpunten zijn te zien in Figuur 8.

Tabel 11: Metingen WSHD, chlorideconcentraties

Meetpunt	Waterloop	startdatum	einddatum
Hevel Brielselaan	Nieuwe Maas	2015-01-01	2021-02-04
Hevel IJsselmonde-Oostdijk	Nieuwe Maas	2018-08-01	2020-10-06
Hevel Pernis	Nieuwe Maas	2015-01-01	2021-02-04

Tabel 12: Metingen WSHD, EC

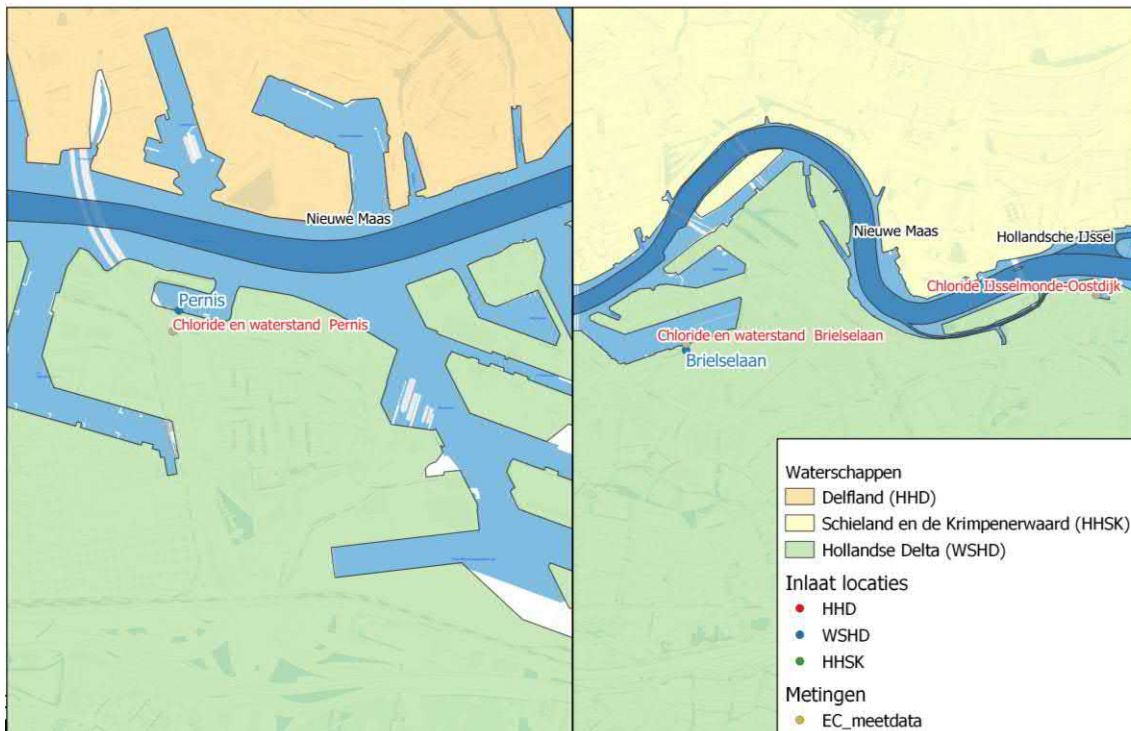
Meetpunt	Waterloop	startdatum	einddatum
Hevel Brielselaan	Nieuwe Maas	2011-05-02	2021-02-04
Hevel IJsselmonde-Oostdijk	Nieuwe Maas	2018-08-01	2020-10-06
Hevel Pernis	Nieuwe Maas	2011-05-02	2021-02-04

Tabel 13: Metingen WSHD, waterstand

Meetpunt	Waterloop	startdatum	einddatum
Brielselaan_buitendijks	Nieuwe Maas	2015-01-01	2020-12-09
Pernis_binnendijks	Nieuwe Maas	2015-01-01	2020-12-09

Tabel 14: Metingen WSHD, Gemaalafvoer

Meetpunt	Waterloop	startdatum	einddatum
Gemaal Hillevliet (Brielselaan)	Nieuwe Maas	2016-12-31	2021-03-08



Figuur 8: Overzicht meetlocaties Hollandse Delta (WSHD)

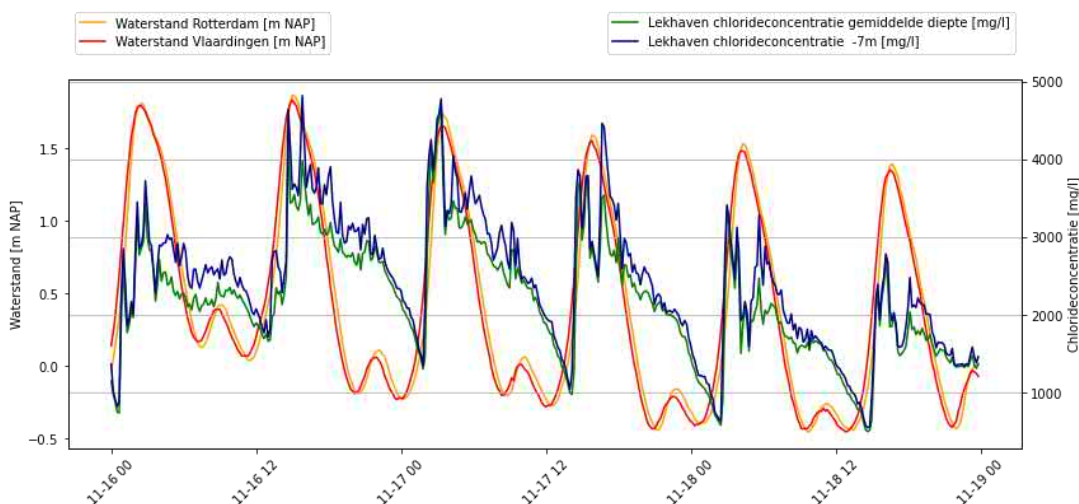
4 Analyse tijdreeksen

Dit hoofdstuk geeft inzicht in het gedrag van de chlorideconcentratie bij de verschillende inlaatlocaties aan de hand van een aantal voorbeelden, waarvoor tijdreeksen van chlorideconcentraties, waterstanden, afvoeren en spuidebieten naast elkaar zijn gezet. De EC-waarden ($\mu\text{S}/\text{m}$) van de waterschappen zijn allen omgezet naar chlorideconcentraties c (mg/l) via onderstaande formule, welke gehanteerd wordt door HHSK. De gebruikte formule is temperatuur onafhankelijk.

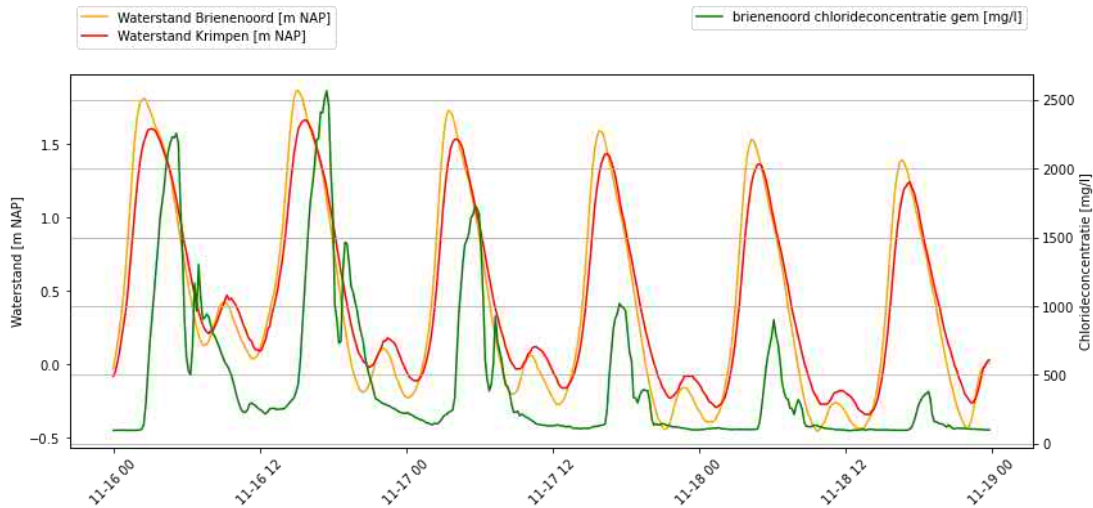
$$c = 0.2867 \cdot \text{EC} - 87.31 \quad (1)$$

4.1 Nieuwe Maas: stations Lekhaven en Brienoord

Op de Nieuwe Maas zijn twee meetstations, Lekhaven en Brienoord, in de buurt van de beschouwde inlaten aan de Nieuwe Maas. De twee meetstations vertonen niet hetzelfde gedrag zoals te zien is in Figuur 9 en Figuur 10 voor respectievelijk Lekhaven en Brienoord.



Figuur 9: Waterstand en chloride verloop Lekhaven, 16-11 t/m 18-11 2020



Figuur 10: Waterstand en chloride verloop Brienoord beneden, 16-11 t/m 18-11 2020

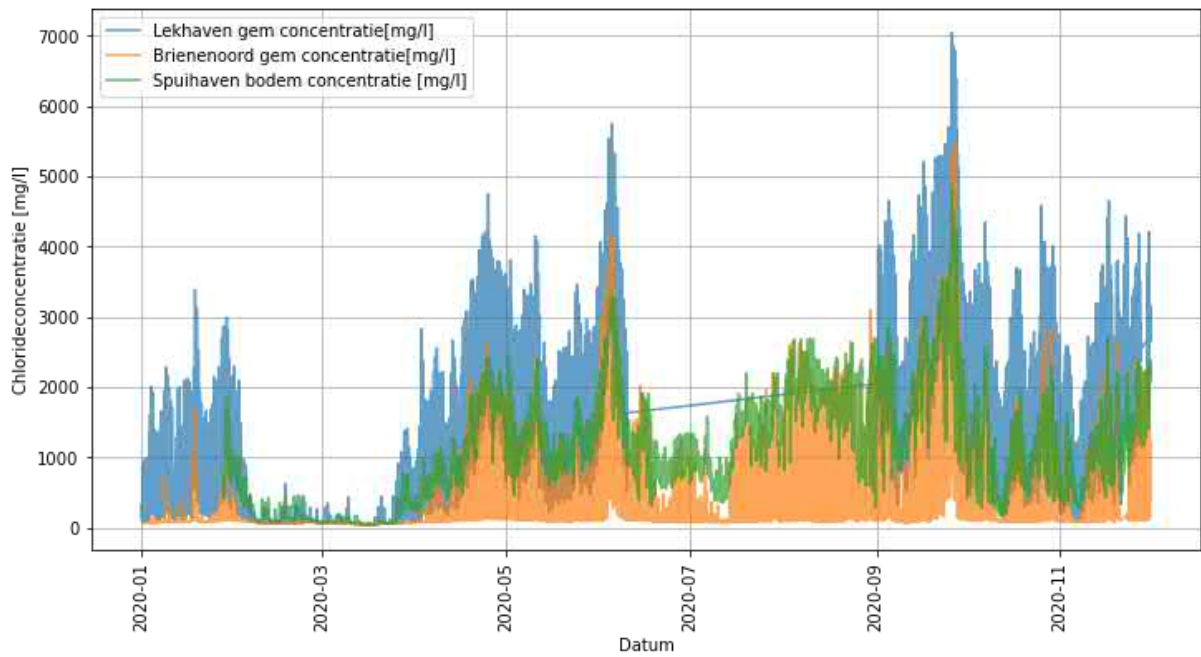
Het meetstation Lekhaven ligt in de monding van de zijhaven Lekhaven, waardoor er mogelijk een verschil is tussen de chlorideconcentratie in de rivieras van de Nieuwe Maas en het meetpunt. Het chlorideverloop bij Lekhaven (Figuur 9) laat een zaagtandverloop zien met een maximale chlorideconcentratie rondom hoogwater, een plotselinge stijging tijdens opkomend water en een langzame daling tijdens afgaand water. De plotselinge stijging kan mogelijk worden verklaard door de zouttong langs de bodem die al vóór dieptegemiddelde kentering stroomopwaarts komt schuiven vanwege het eerder kenteren van de onderste lagen. De langzame daling na vloed komt mogelijk door nalevering vanuit verschillende zijhavens en zijtakken van het bovenstroomse gebied.

Het meetstation Brienoord is meer landinwaarts (oostelijk) gelegen dan meetstation Lekhaven en registreert concentraties aan de oever van de Nieuwe Maas. Het verloop van de chlorideconcentratie (Figuur 10) is hier gladder dan bij Lekhaven. De maximale chlorideconcentratie bij meetpunt Brienoord treedt op bij kentering van vloed naar eb, circa 3 uur na hoogwater. Tijdens het dalen van het verloop tijdens eb is vaak een dal in de chlorideconcentratie zichtbaar. Dit komt naar verwachting door de invloed van uitstroming van de Hollandsche IJssel waarbij relatief zoet water de Nieuwe Maas op stroomt wanneer de Nieuwe Maas bij Brienoord nog relatief zout is.

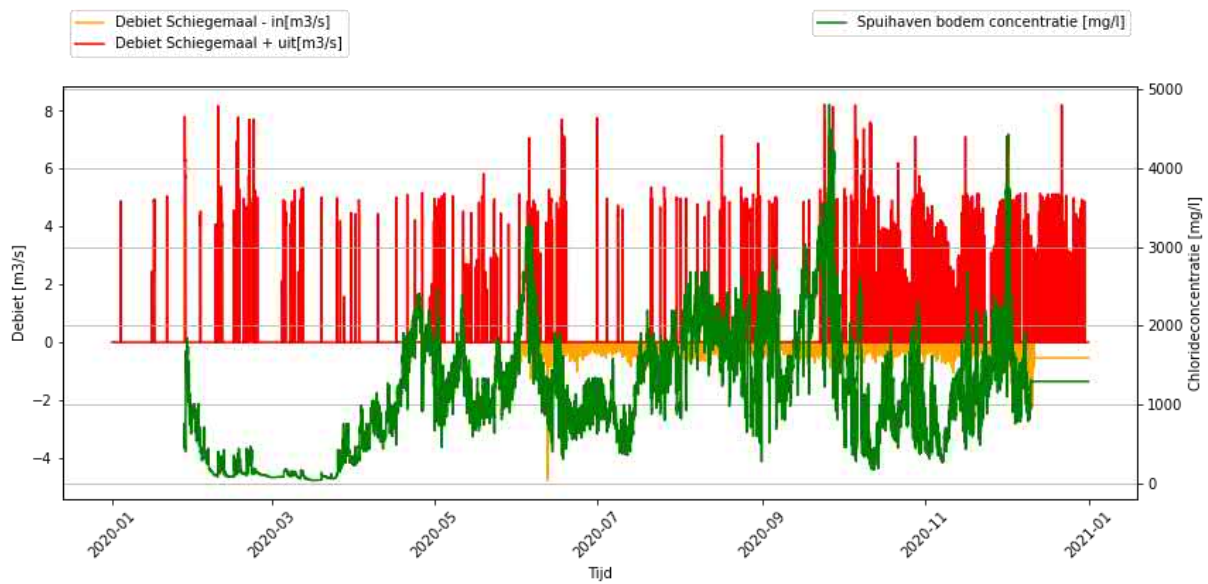
4.2 Inlaat Schiegemaal

De inlaat Schiegemaal is via de Spuihaven verbonden aan de Nieuwe Maas. De Spuihaven ligt ongeveer 2 km benedenstrooms van meetpunt Lekhaven van RWS en ongeveer 12 km benedenstrooms van meetpunt Brienoord van RWS. Ondanks dat het meetpunt Spuihaven benedenstrooms ligt van meetpunt Lekhaven is de gemeten chlorideconcentratie in de zijhaven lager dan op de Nieuwe Maas bij Lekhaven (zie Figuur 11 voor het jaar 2020). De bodem van de Spuihaven ligt op ongeveer -4 m NAP [Website Spuihaven 2021] en heeft een oppervlak van circa 30.000 m² (schatting op basis van satellietfoto's).

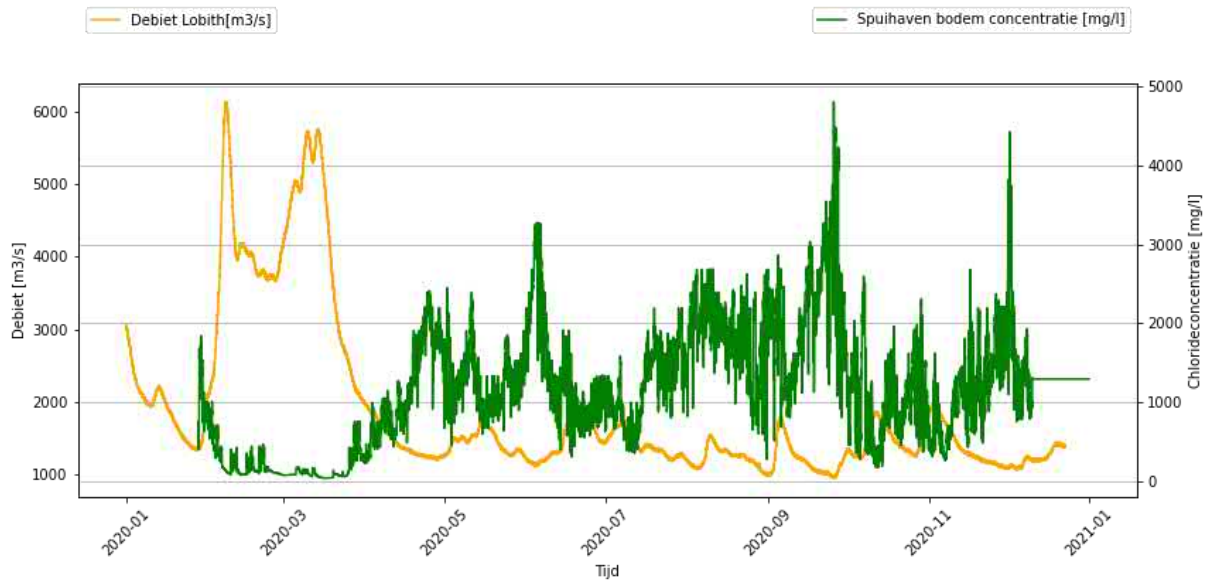
Voor het Schiegemaal zijn vanwege databeschikbaarheid alleen voorbeelden mogelijk uit het jaar 2020. De afvoer van de Nieuwe Maas bij Brienoord en Maassluis zijn (nog) niet beschikbaar voor het jaar 2020 en zijn daarom niet meegenomen in de analyse. Het inlaatdebiet is vanaf juni 2020 en het maaldebiet vanaf september 2014 beschikbaar voor het Schiegemaal, zie Figuur 12 voor dit overzicht. De (onbekende) afvoer in de Nieuwe Maas is afhankelijk van de afvoer van de Rijn bij Lobith. Daarom is de afvoer bij Lobith toegevoegd aan Figuur 13, om in algemene zin duidelijk te krijgen hoe de chlorideconcentratie afhangt van de rivierafvoer.



Figuur 11: Chlorideconcentraties 2020: Spuihaven 2km benedenstrooms van Lekhaven (meetpunt Nieuwe Maas RWS, niet in zijhaven) en 12km benedenstrooms van Brienoord (meetpunt Nieuwe Maas RWS, niet in zijhaven).



Figuur 12: Schiegemaal debiet, positief is uitmalen, negatief is inlaten

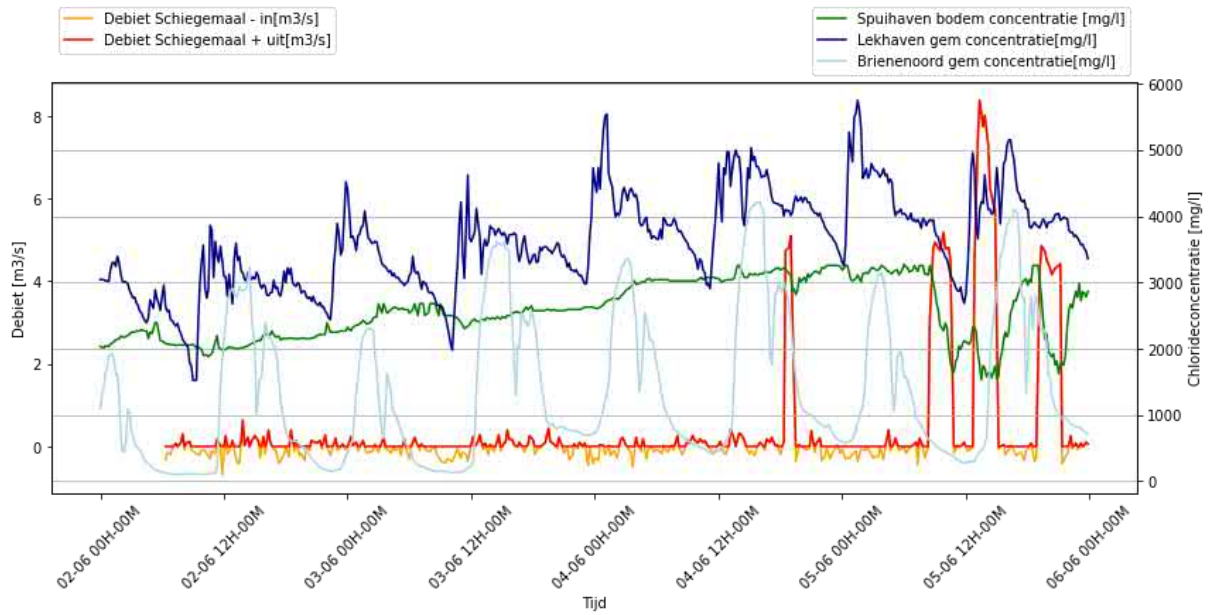


Figuur 13: Debiet Lobith, Chlorideconcentratie Schiegemaal

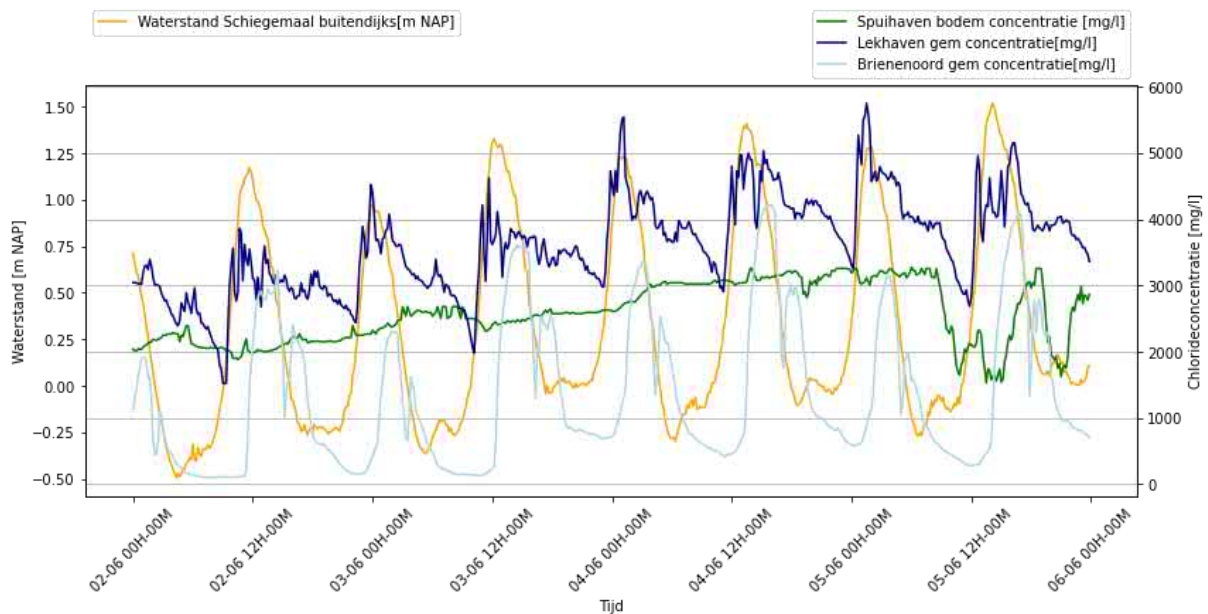
Figuur 13 laat zien dat in februari een hoge afvoer bij Lobith is gemeten. In diezelfde periode is sprake van een lage chlorideconcentratie in de Spuihaven, wat erop wijst dat de chlorideconcentratie afhangt van de afvoer over de Nieuwe Maas, zijnde Lobith in dit voorbeeld als benadering. Dit effect van de rivierafvoer is ook te zien bij de chloridemeetpunten Lekhaven en Brienoord in Figuur 11.

In Figuur 11 is te zien dat de chlorideconcentratie in de Spuihaven een stuk lager is dan op de Nieuwe Maas bij de bovenstroomse locaties Lekhaven en Brienoord. Figuur 14 toont tijdreeksen voor een periode met vrij hoge chlorideconcentratie. Daarvoor geldt dat bij grote uitmaling van zoet boezemwater via het Schiegemaal (zoals rond 5 juni 2020, 12 uur) de chlorideconcentratie van de Spuihaven tijdelijk daalt richting de binnendijkse concentratie en weer op niveau komt wanneer het uitmalen stopt. Dit geeft een indicatie dat de chlorideconcentratie in de Spuihaven beïnvloed wordt door gemaalafvoer. Verder is in deze 4 dagen de chlorideconcentratie constant lager dan bij het bovenstroomse meetpunt Lekhaven. Dit zou waarschijnlijk niet mogelijk zijn zonder significante invloed van een bron van zoetwater. De chlorideconcentratie in de zijhaven fluctueert ook minder sterk met de getijbeweging dan de concentratie op de Nieuwe Maas. De chlorideconcentratie stijgt geleidelijk bij de Spuihaven, waar bij het meetstation Lekhaven langs de Nieuwe Maas een sterke getij-gerelateerde variatie zichtbaar is rond de stijgende trend.

In Figuur 15 is een getijslag van 1.0-1.5 m te zien, waarbij de hoogwaterstand rond de 1.0 m NAP ligt. De waterdiepte in de Spuihaven komt dan op 5.0 m (bodem -4 m NAP). Dit betekent dat bij hoogwater ongeveer 30% van het water in de Spuihaven afkomstig is uit de Nieuwe Maas ($1.5 \text{ m getijslag} / 5.0 \text{ m diepte} = 0.30$). De overige 70% van het water betreft water dat al aanwezig was in de Spuihaven bij laagwater. Variaties in zoutconcentratie op de Nieuwe Maas werken dus slechts gedempt door in variaties in de zijhaven.



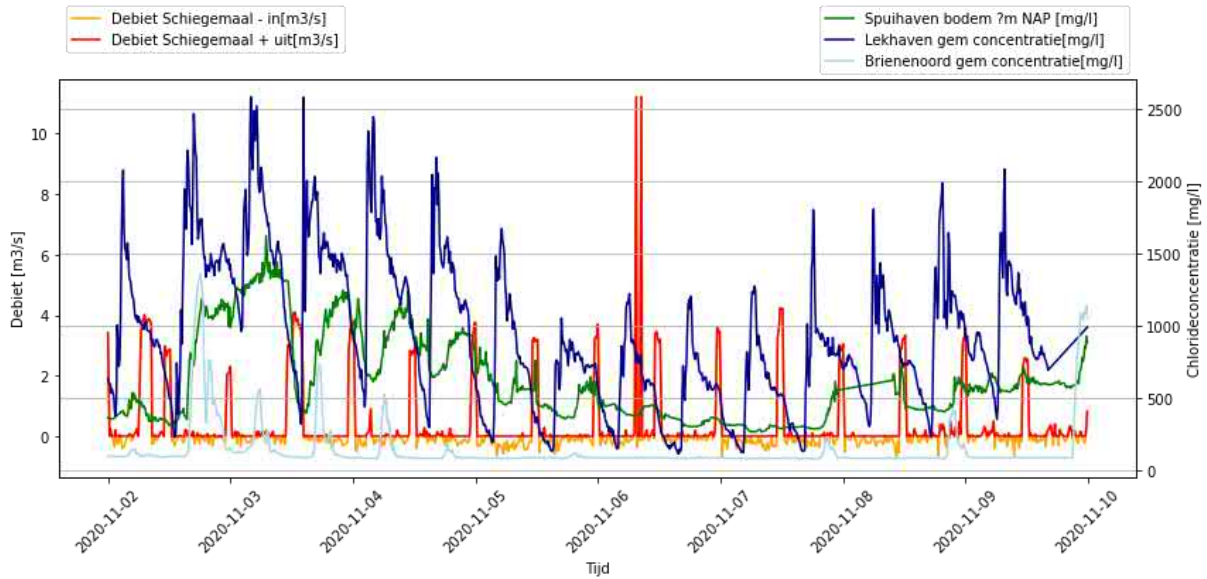
Figuur 14: Chlorideconcentraties met het debiet van het Schiegemaal voor de periode 2 juni tot 6 juni 2020 (positief is uitmalen, negatief is inlaten)



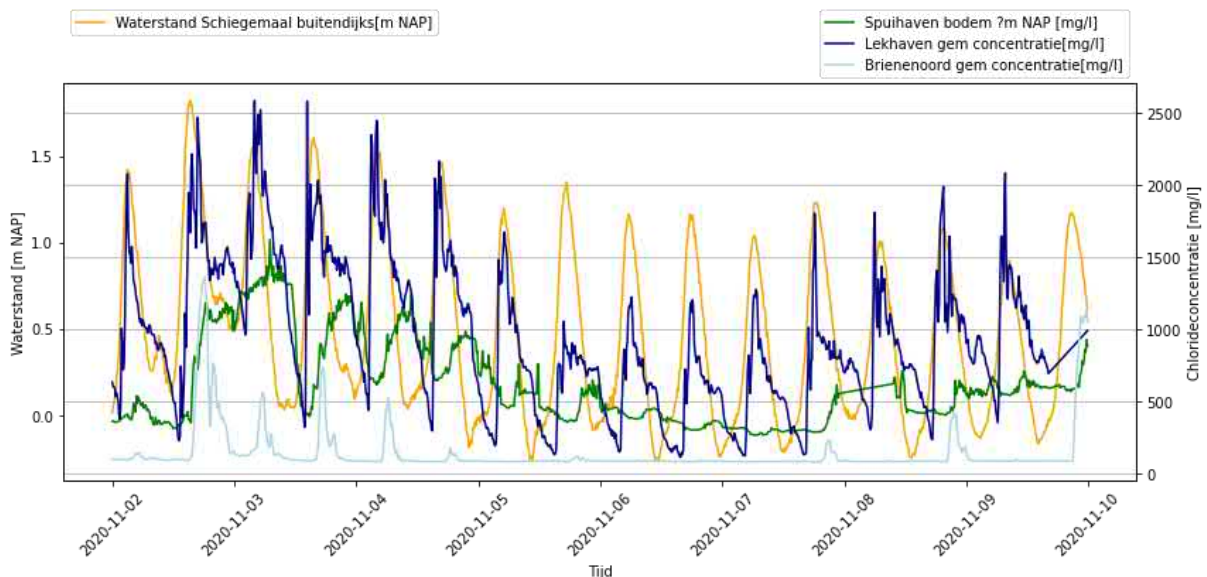
Figuur 15: Chlorideconcentraties met de waterstand bij het Schiegemaal voor de periode 2 juni tot 6 juni 2020

Later in het jaar, rond november, reageert de chlorideconcentratie opnieuw sterk op uitmalen van boezemwater via het Schiegemaal, zie Figuur 16. Gedurende vrijwel elke periode met uitmalen (de rode lijn) daalt de chlorideconcentratie (de groene lijn).

Rond 6 en 7 november 2020 in Figuur 17 is het doottij, met lagere hoogwaterstanden vergeleken de eerste paar dagen van november. Dit resulteert in een daling van de chlorideconcentraties in de Spuihaven, wat eveneens terug te zien is bij de Lekhaven. In deze periode daalt de chlorideconcentratie gestaag door de dagelijkse gemaalafvoer tijdens de laagwaters en stijgt vervolgens weer als de getijslag en de chlorideconcentraties op de Nieuwe Maas toenemen.

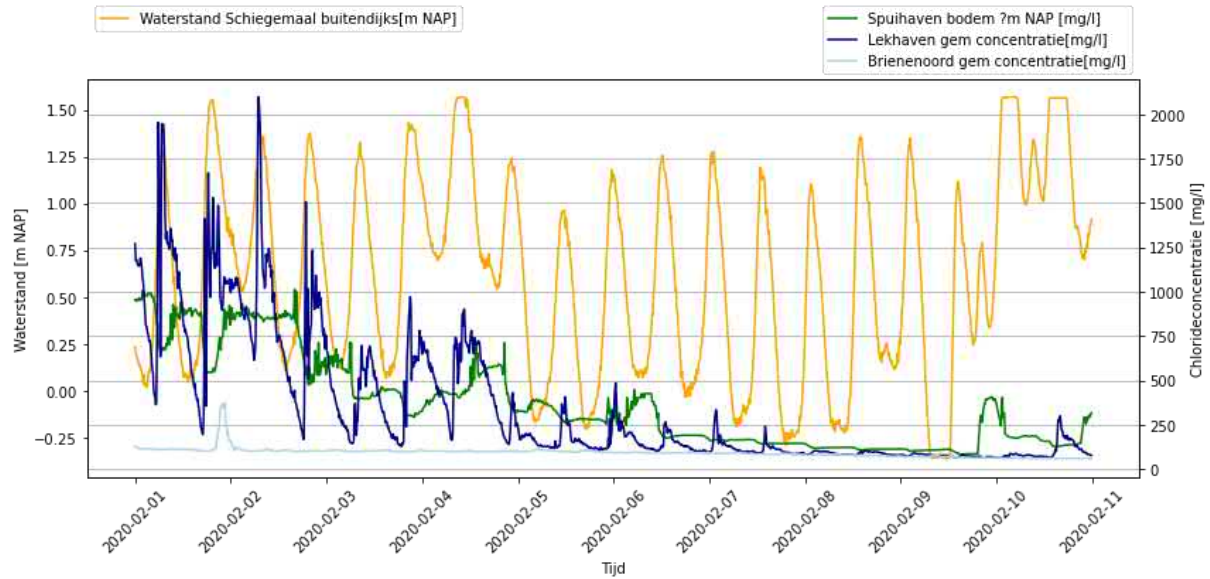


Figuur 16: Chlorideconcentraties met het debiet van het Schiegemaal voor de periode 2 november tot 9 november 2020 (positief is uitmalen, negatief is inlaten)



Figuur 17: Chlorideconcentraties met de waterstand bij het Schiegemaal voor de periode 2 november tot 9 november 2020

In perioden met lage chlorideconcentraties op de Nieuwe Maas (minder dan ongeveer 500 mg/l) is te zien dat bij elk getij de chlorideconcentratie in de Spuihaven langzaam daalt. Ook dit komt door de slechts gedeeltelijke verversing van het water in de zijhaven bij elk getij. Weer ontbreken de getijpieken die wel bij de Lekhaven te zien zijn. Tijdens de gekozen periode van Figuur 18 is de rivierafvoer bij Lobith vrij hoog (tot 6000 m³/s, zie Figuur 13). Op 10 februari 2020 is een plotselinge piek te zien, waarbij de hoog- en laagwaterstand flink verhoogd zijn. Dit was het moment dat storm Ciara voorbij kwam en voor verhoogd water op de Nieuwe Maas zorgde. Deze storm zorgde voor een stijging van de chlorideconcentraties in de Spuihaven.



Figuur 18: Chlorideconcentraties met de waterstand bij het Schiegemaaal voor de periode 1 februari tot 11 februari 2020

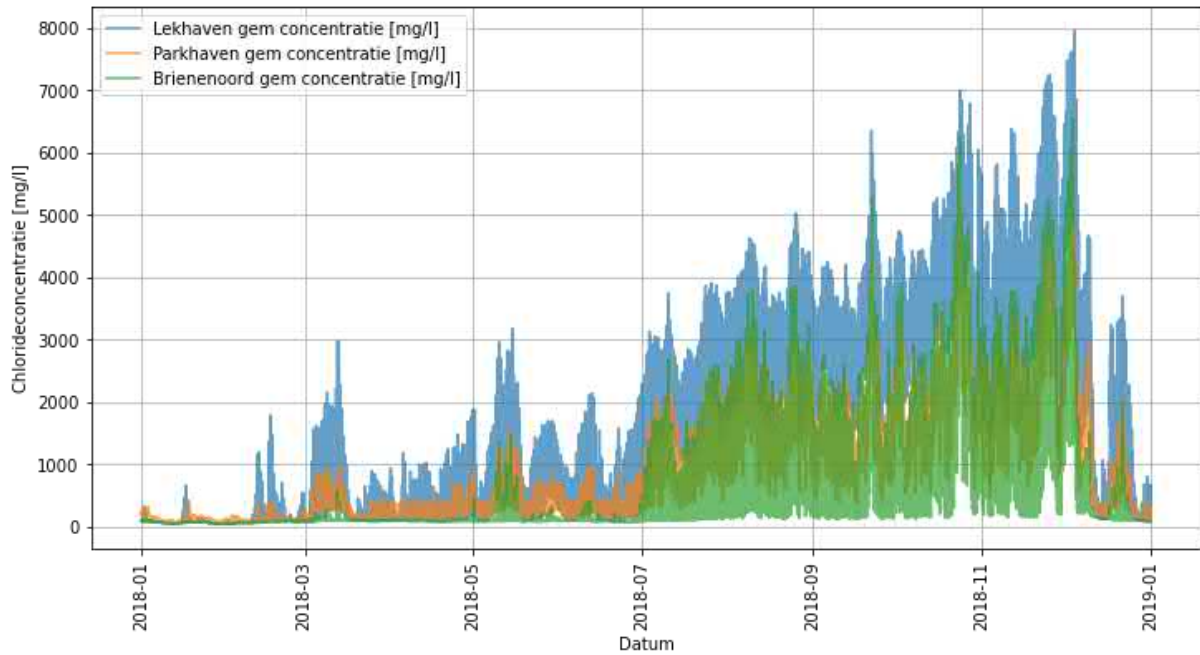
Samenvattend geldt het volgende voor de inlaat Spuihaven:

- Een hoge rivierafvoer bij Lobith ($\pm 3000\text{m}^3/\text{s}$) leidt tot lage chlorideconcentraties;
- Een verhoogde zeewaterstand leidt tot een toename van chlorideconcentraties;
- Fluctuaties in chlorideconcentraties op de Nieuwe Maas werken gedempt door in de zijhaven;
- Uitmalen van zoet boezemwater zorgt dagelijks voor een daling van de chlorideconcentraties welke afhankelijk is van de hoogte van de huidige chlorideconcentratie;
- Door dit uitmalen ligt de chlorideconcentratie in de Spuihaven gemiddeld genomen lager dan de concentraties in de Nieuwe Maas bij locatie Lekhaven, ondanks dat de Spuihaven 2 km dichter bij zee ligt dan locatie Lekhaven.

4.3 Inlaat Parksluizen

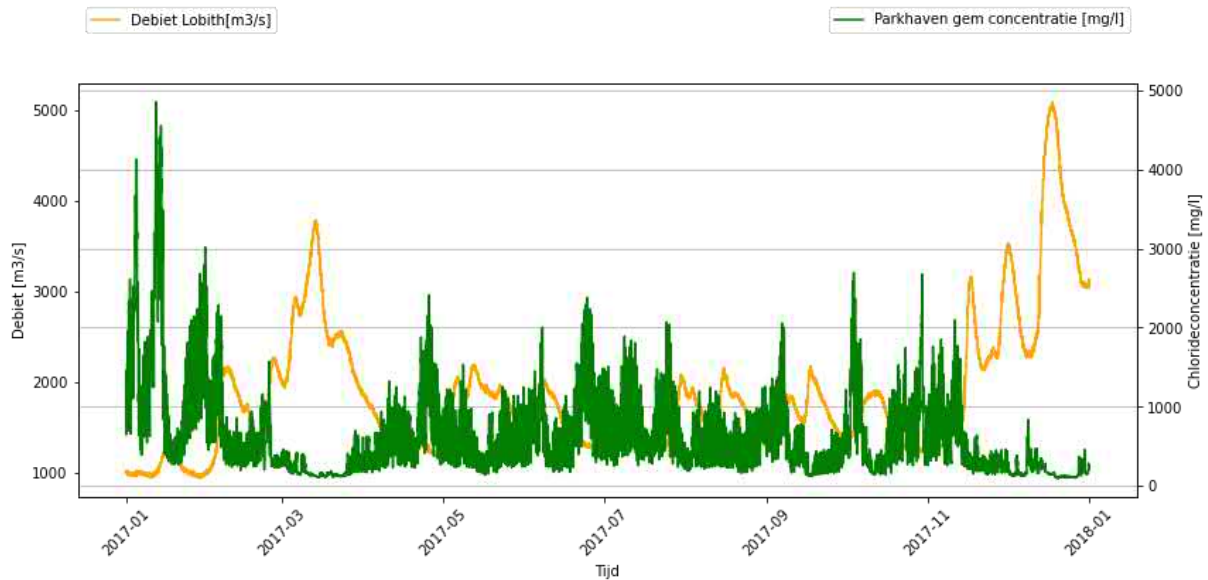
De locatie Parksluizen is gekozen als mogelijk toekomstige inlaat omdat deze bovenstrooms ligt van het Schiegemaaal en daarmee in principe minder gevoelig is voor verzilting wanneer alleen naar de locatie gekeken wordt. Bij de Parksluizen komen wel schuttingen voor wat voor ander gedrag kan zorgen dan bij de Spuihaven. De Parksluizen zijn via de Parkhaven verbonden aan de Nieuwe Maas. De Parkhaven ligt ongeveer 2.7 km bovenstrooms van meetpunt Lekhaven en ongeveer 8 km benedenstrooms van meetpunt Brienoord.

Bij de Parksluizen zit ook een gemaal zoals bij de locatie Schiegemaaal, waarvan de gemaalgegevens van september 2012 t/m februari 2021 beschikbaar zijn. De drempel van de grote Parksluis ligt op ongeveer -4.65 m NAP [Website Parksluizen] en de Parkhaven waar de inlaat in ligt heeft grofweg een oppervlak van 65.000 m^2 , geschat vanuit satellietfoto's. Figuur 19 laat zien dat de chlorideconcentratie bij de Parkhaven lager ligt dan op de Nieuwe Maas bij het verder benedenstroomse meetpunt Lekhaven. Dit verschil zou deels toe te schrijven kunnen zijn aan de bovenstroomse ligging van de Parkhaven. Daarnaast is het verschil in de diepte van de metingen ook een invloed dat meespeelt.

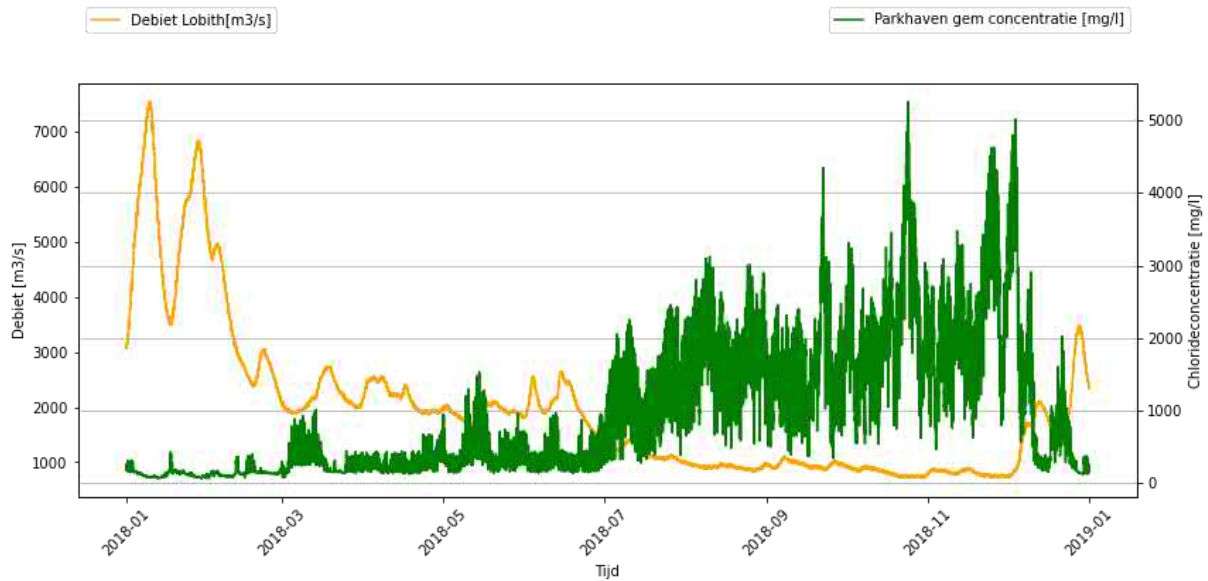


Figuur 19: Chlorideconcentraties 2018: Parkhaven 2.7km bovenstrooms van Lekhaven (meetpunt nieuwe maas RWS, niet in zijhaven) en 8km benedenstrooms van Brienoord (meetpunt nieuwe maas RWS, niet in zijhaven)

In Figuur 20 en Figuur 21 is voor respectievelijk de jaren 2017 en 2018 te zien dat de afvoer bij Lobith een rol speelt in de chlorideconcentratie bij de Parkhaven. Hoge afvoeren geven lage chlorideconcentraties en omgekeerd. Uit de figuur volgt dat bij een afvoer bij Lobith van ongeveer 2000 m³/s een omslagpunt optreedt in de chlorideconcentratie.

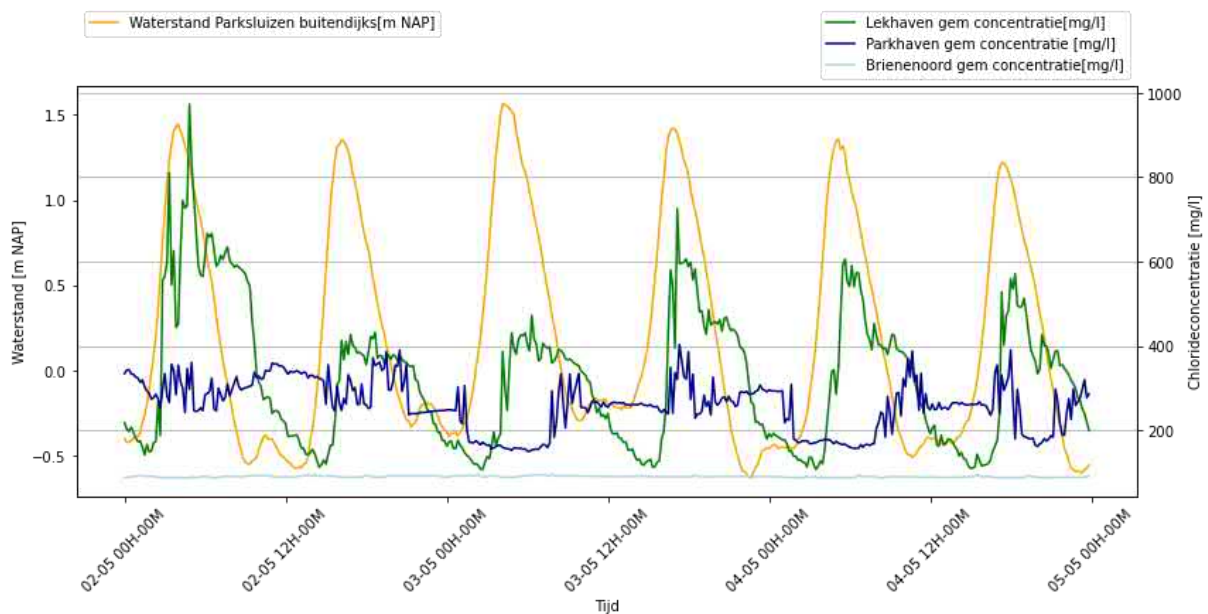


Figuur 20: Debiet Lobith en chlorideconcentratie Parkhaven 2017

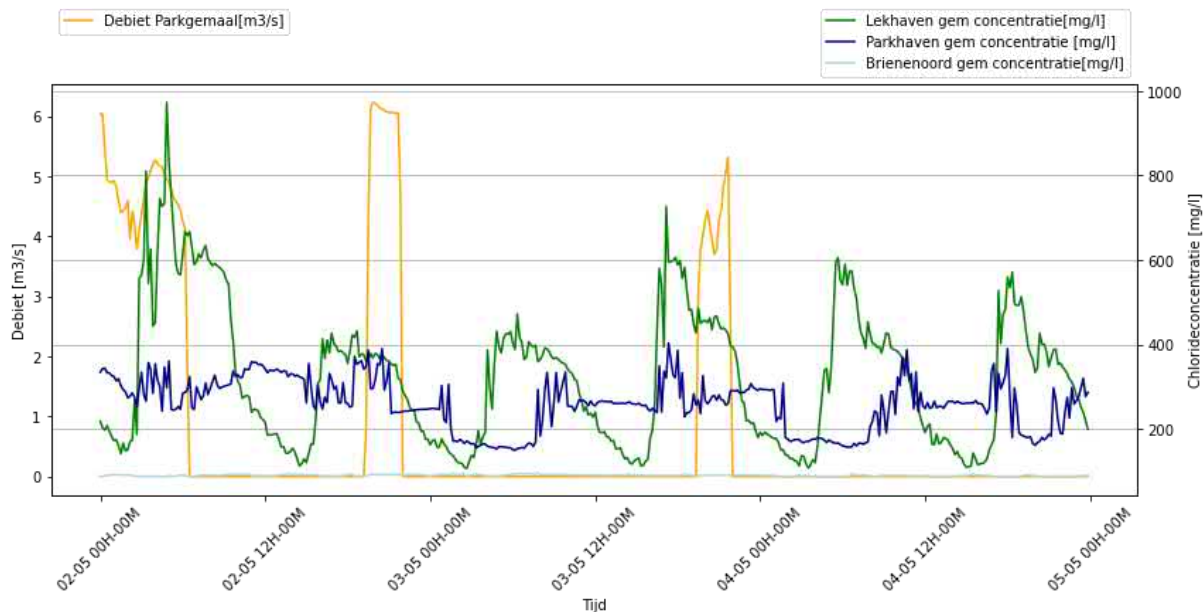


Figuur 21: Debiet Lobith en chlorideconcentratie Parkhaven 2018

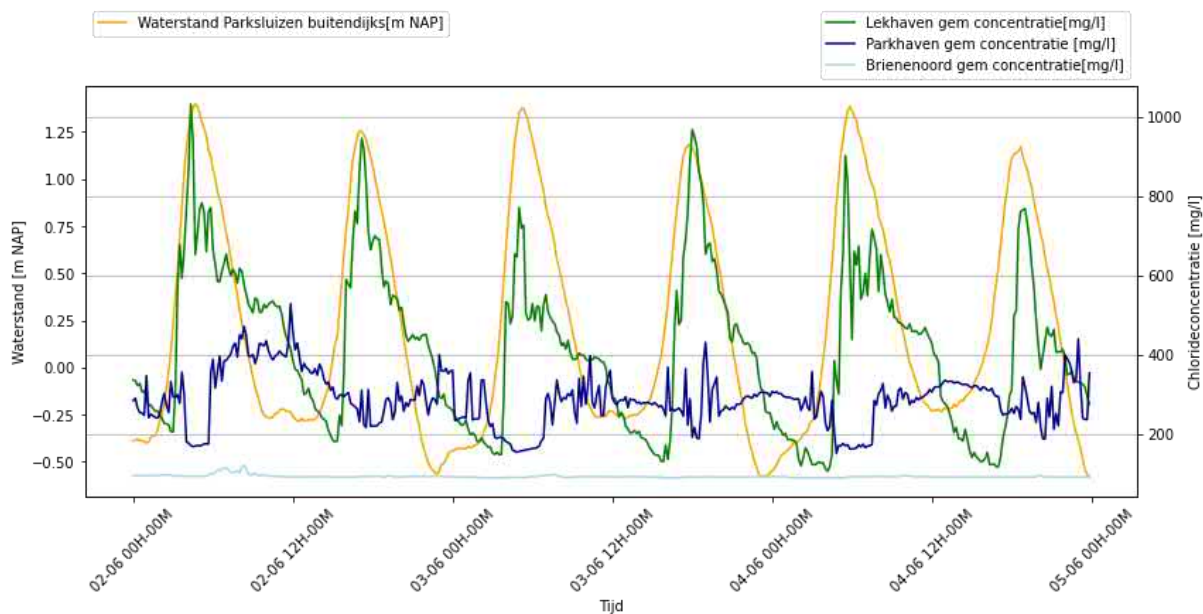
Op momenten dat de concentratie in de Nieuwe Maas bij de Lekhaven onder ± 1500 mg/l blijft, zoals ook al te zien in Figuur 19, is er een beperkte reactie van zoutconcentratie op de Parkhaven, zie Figuur 22 en Figuur 24. Veelal fluctueert de chlorideconcentratie op deze momenten onder de 400 mg/l, de grenswaarde die vaak aangehouden wordt bij de definitie van zoet naar te verzilt water om in te laten. Rond 4 tot 10 uur zijn er abrupte dalingen in chlorideconcentraties te zien in Figuur 22, Figuur 23 en Figuur 24. Op basis van Figuur 23, waar afvoermomenten te zien zijn, lijkt dit op deze momenten niet door boezemwaterlozing te komen. Scheepvaartbewegingen door de sluis zouden voor dit verschil kunnen zorgen in deze zijhaven.



Figuur 22: Chlorideconcentraties met de waterstand bij de Parkhaven voor de periode 2 mei tot 5 mei 2018, lage concentraties

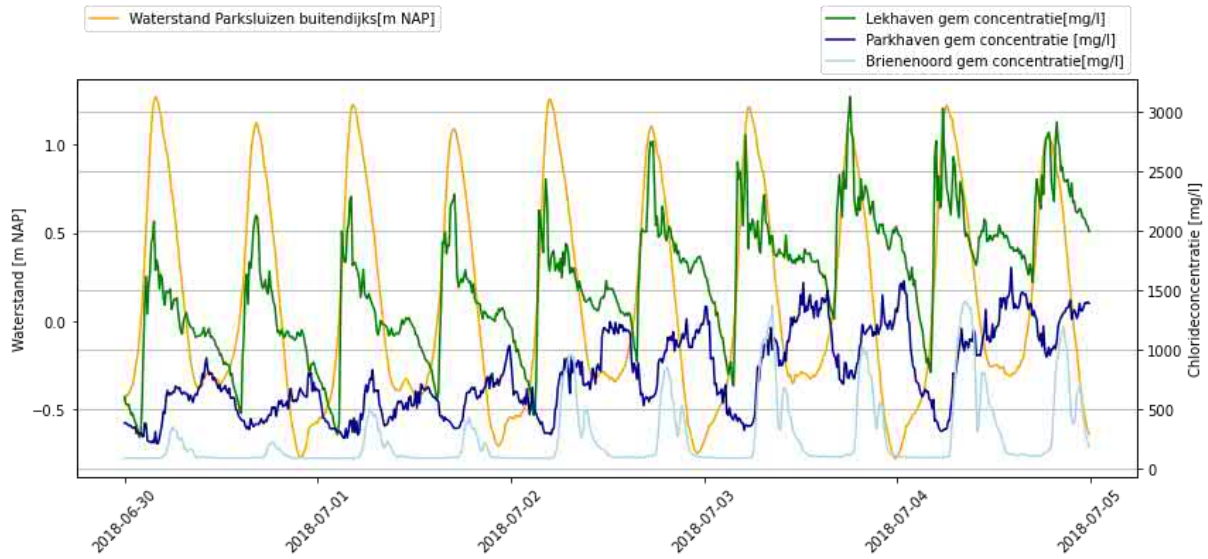


Figuur 23: Chlorideconcentraties met de gemaalafvoer bij de Parkhaven voor de periode 2 mei tot 5 mei 2018, lage concentraties



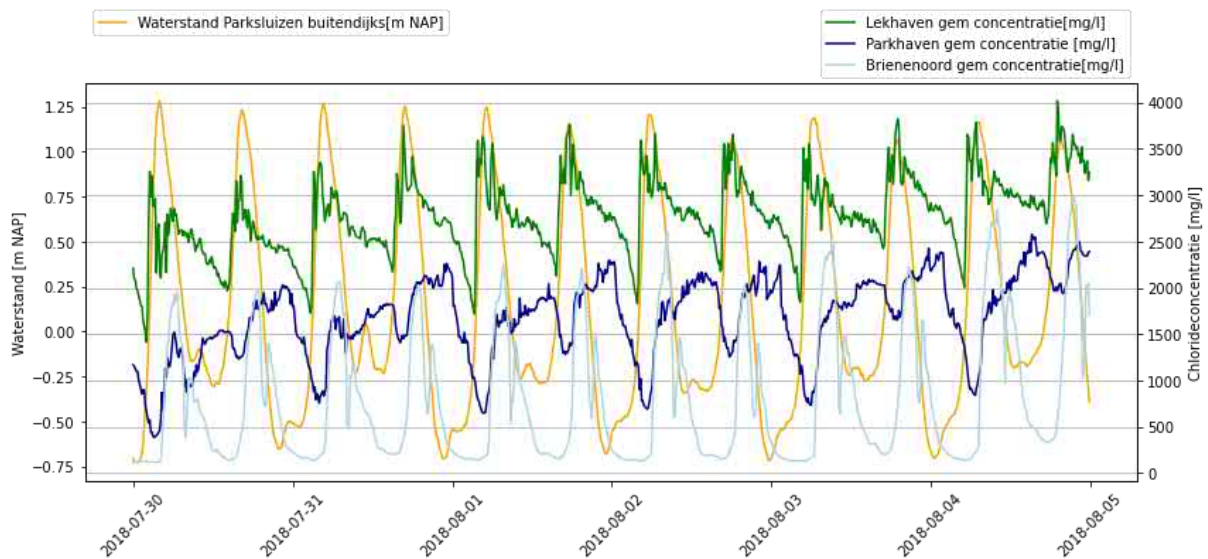
Figuur 24: Chlorideconcentraties met de waterstand bij de Parkhaven voor de periode 2 juni tot 5 juni 2018, lage concentraties

Wanneer de chlorideconcentratie bij meetlocatie Lekhaven (gemiddelde over de drie dieptemetingen) boven de grofweg 1500 mg/l komt, zoals in juli 2018 in Figuur 25, gaat de concentratie bij Parkhaven ruim over de 400 mg/l grens en komt de concentratie dagenlang nauwelijks meer onder de 400 mg/l.



Figuur 25: Chlorideconcentraties met de waterstand bij de Parkhaven voor de periode 30 juni tot 5 juli 2018, middelmatige concentraties

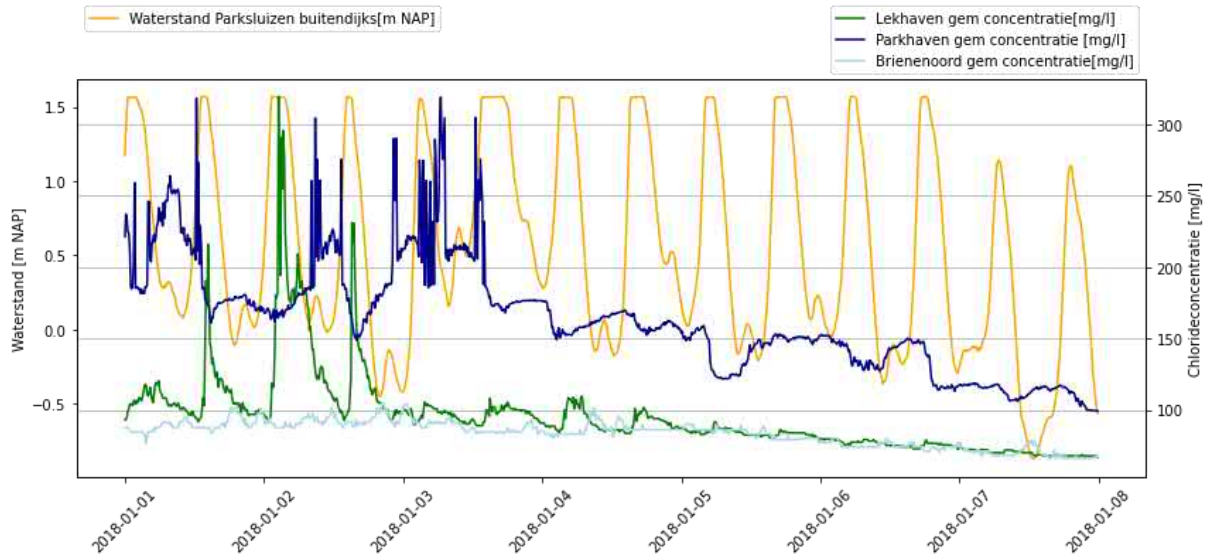
Het jaar 2018 was een erg droog jaar en dat is te zien in de chlorideconcentratie van eind juli tot begin augustus in Figuur 26. Bij zulke hoge concentraties op de Nieuwe Maas komt de chlorideconcentratie bij de Parkhaven tussen hoog en laag tij niet onder de 400 mg/l.



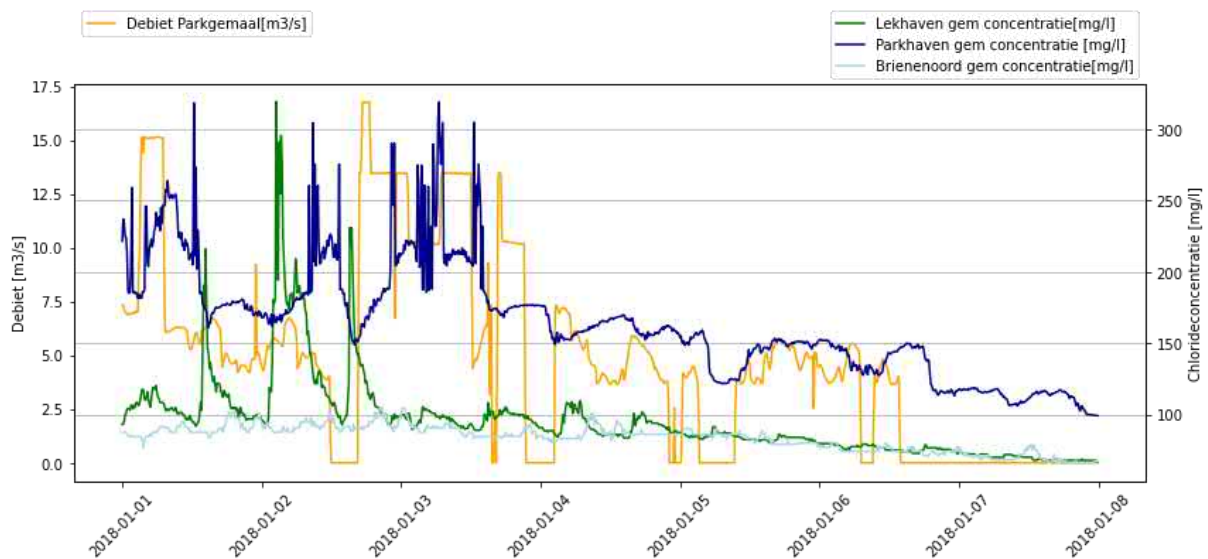
Figuur 26: Chlorideconcentraties met de waterstand bij de Parkhaven voor de periode 30 juli tot 5 augustus 2018, hoge concentraties

In januari 2018 zijn de zoutconcentraties op de Nieuwe Maas erg laag (Figuur 27). Hierbij daalt de concentratie bij Parkhaven vrij langzaam ten opzichte van meetpunt Lekhaven. Dat kan het effect zijn van het deels verversen van de zijhaven per getij, zoals ook beschreven bij inlaat Schiegemaal. Zout water blijft dan relatief lang hangen in de zijhaven. Voor de Parkhaven geldt een getijslag van 1.6 m op een waterdiepte bij hoogwater van ongeveer 6.2 m, ofwel een schatting van de verversing gedurende vloed van $1.6/6.2=26\%$. In de praktijk kan de menging groter zijn door mengingsprocessen naast alleen de getijbeweging. Fluctuaties in zoutconcentratie op de Nieuwe Maas werken dus gedempt door in de Parkhaven. Daarnaast is de kans groot dat hier een lozing van enigszins verzilt boezemwater via schutten en uitmalen te zien is, waardoor de concentratie langere tijd een stuk hoger blijft dan op de Nieuwe Maas. Zo is er rond 3 januari 2018

een piek in chloride te zien, terwijl de concentratie bij locatie Lekhaven niet stijgt. In Figuur 28 is het gemaaldebiet bij Parksluizen weergegeven, welke rond de piek van 3 januari aan het uitmalen is. Echter is de gemaalafvoer voor en na de piek een stuk hoger. De plotselinge piek is hierdoor redelijk lastig te koppelen aan de gemaal afvoer.



Figuur 27: Chlorideconcentraties met de waterstand bij de Parkhaven voor de periode 1 januari tot 8 januari 2018, extreem lage concentraties



Figuur 28: Chlorideconcentraties bij de Parkhaven met het gemaaldebiet bij Parksluizen voor de periode 1 januari tot 8 januari 2018, extreem lage concentraties

Samenvattend geldt het volgende voor de mogelijk toekomstige inlaat Parksluizen:

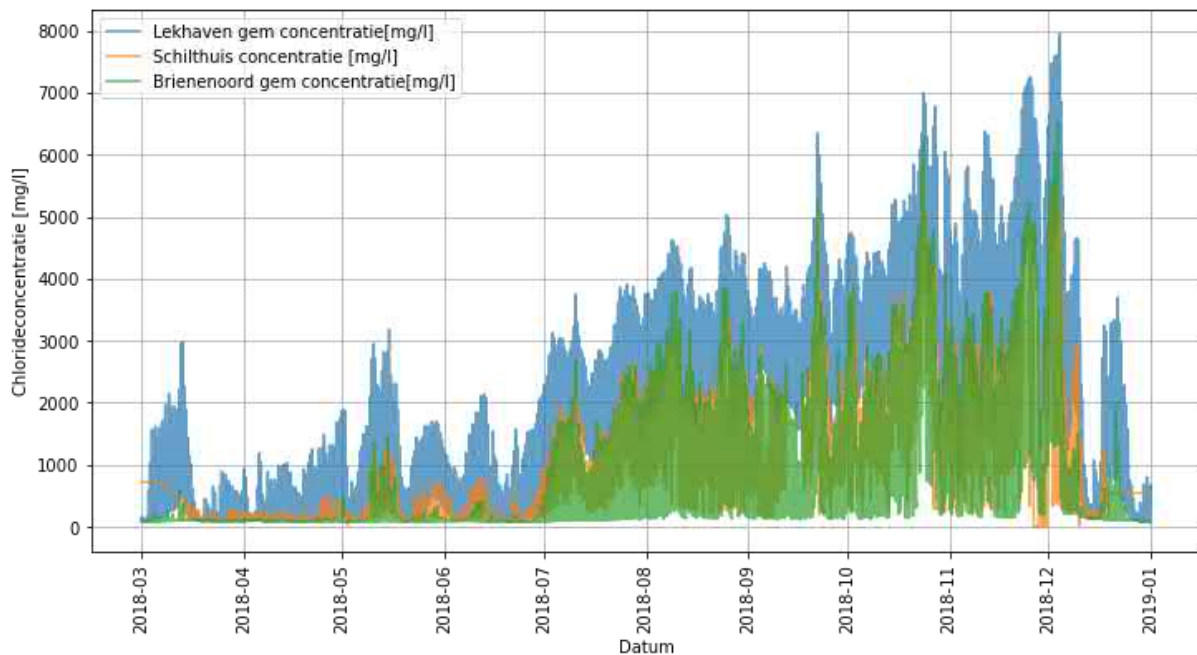
- Bij rivierafvoeren gemeten bij Lobith onder ongeveer 2000 m³/s treedt verzilting op;
- Fluctuaties in chlorideconcentraties op de Nieuwe Maas werken gedempt door in de zijhaven;
- Soms is de concentratie in de Parkhaven hoger dan op de Nieuwe Maas, wat grotendeels veroorzaakt wordt door het malen van enigszins verzilt boezemwater;

4.4 Inlaat Schilthuis

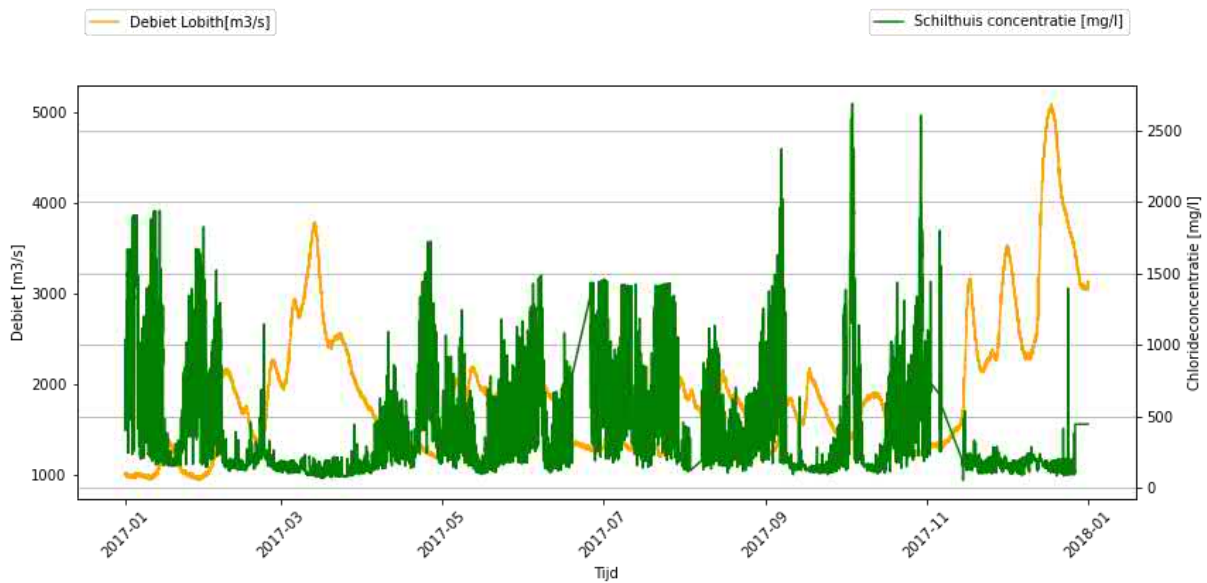
Inlaat Schilthuis is via het Boerengat (zijhaven) op twee plaatsen verbonden aan de Nieuwe Maas. Het Boerengat ligt ongeveer 5.8 km bovenstrooms van de Lekhaven en 4.7 km benedenstrooms van meetpunt Brienoord. De diepte van het Boerengat onder de Boerengatbrug ligt op ongeveer -4.0m NAP [Website Boerengatbrug 2021]. Het oppervlak is lastig te schatten gezien de omliggende havens hier met elkaar verbonden zijn. Het Boerengat staat aan de westzijde ook in directe verbinding met de Leuvehaven.

De inlaat Schilthuis is onderdeel van een gemaal, waarvan de data voor de periode oktober 2015 t/m februari 2021 beschikbaar is. In Figuur 29 is te zien dat de chlorideconcentratie bij Schilthuis in dezelfde orde ligt als de concentratie van de Nieuwe Maas bij het bovenstroomse meetpunt Brienoord. Waar bij Lekhaven flink wat hogere concentraties zijn gemeten, is dit bij Schilthuis en Brienoord niet het geval. In periodes met lagere chlorideconcentraties, zoals in maart 2018 t/m juni 2018, is de chlorideconcentratie bij Schilthuis hoger dan bij meetpunt Brienoord. Bij hogere concentraties lijkt dit verschil kleiner te zijn.

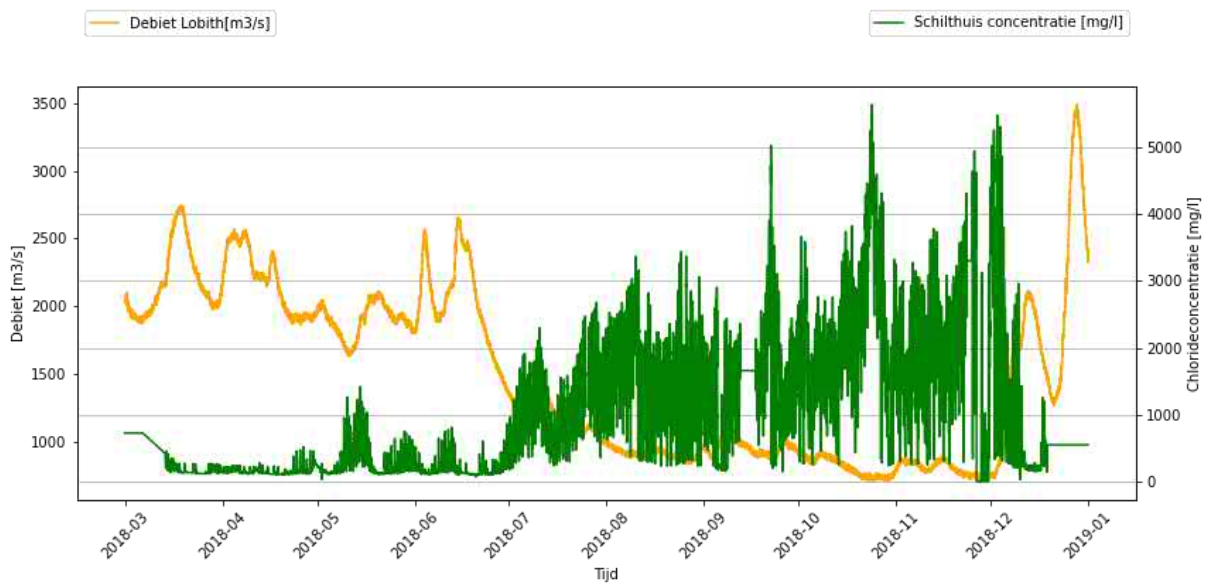
De rivierafvoer bij Lobith speelt een rol in de chlorideconcentratie op de Nieuwe Maas en de chlorideconcentratie op de Maas beïnvloedt de concentratie bij Schilthuis. Het debiet bij Lobith en de chlorideconcentratie bij Schilthuis is voor 2017 en 2018 respectievelijk te zien in Figuur 30 en Figuur 31.



Figuur 29: Chlorideconcentraties Lekhaven, Boerengat (Schilthuis) en Brienoord overzicht

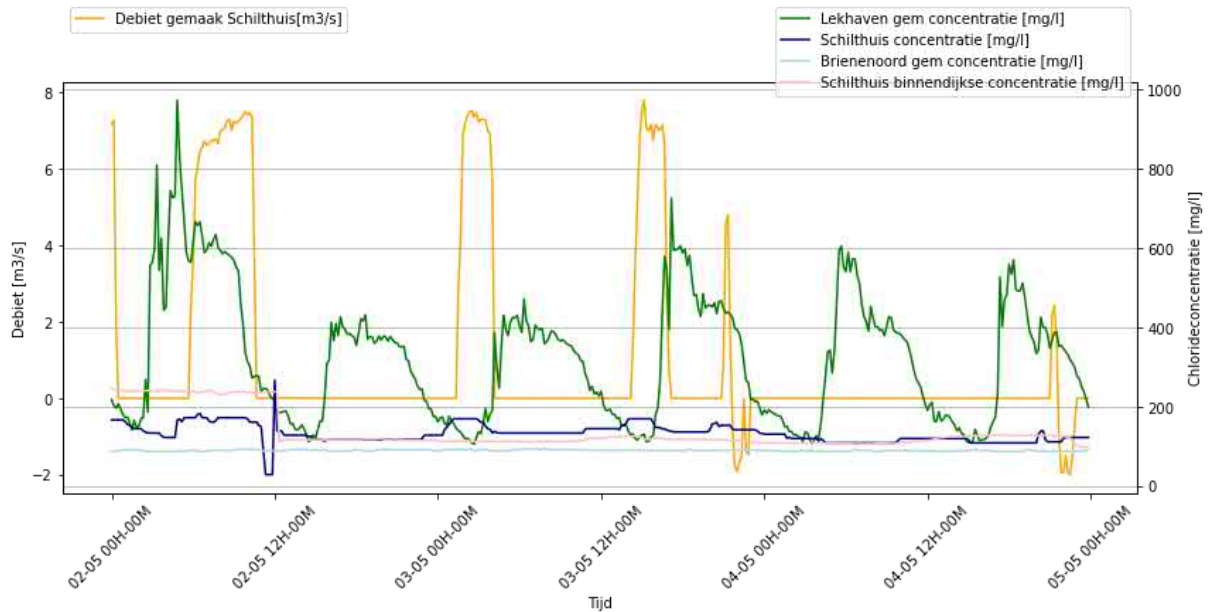


Figuur 30: Debiet Lobith en chlorideconcentratie Schilthuis 2017



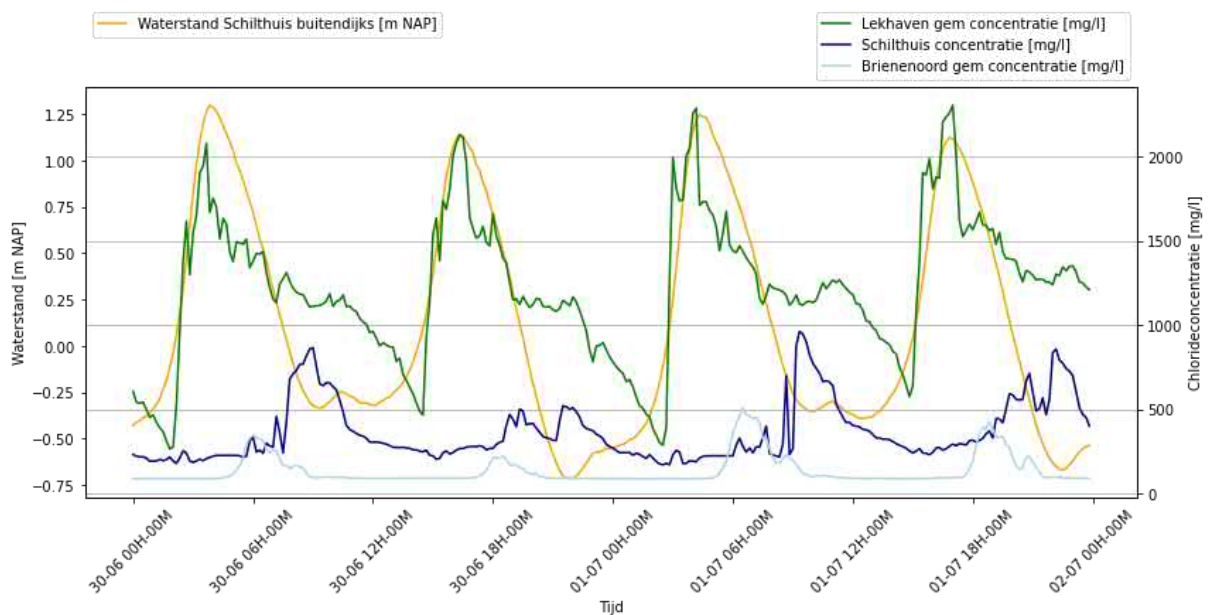
Figuur 31: Debiet Lobith en chlorideconcentratie Schilthuis 2018

Op momenten waarop de concentratie in de Nieuwe Maas bij de Lekhaven laag is, zoals te zien in Figuur 32, is er een vertraagde en beperkte reactie van zoutconcentratie bij Schilthuis die niet terug te zien is bij Brienoord. Het uitmalen van boezemwater gebeurt op de momenten dat deze beperkte verandering te zien is in de concentratie bij Schilthuis. De chlorideconcentratie gemeten op de Rotte (het binnendijkse meetpunt van inlaat Schilthuis) is lager dan de concentratie die wordt gemeten bij inlaat Schilthuis tijdens het uitmalen van het boezemwater. Dit kan erop wijzen dat de EC-meters wat afwijken. Te verwachten is dat het afgevoerde boezemwater zouter is wat voor de verhoging zorgt. Begin mei in Figuur 32 zijn pieken in de concentratie te zien t.h.v. Lekhaven die ongeveer even groot zijn. Deze pieken zijn niet in dezelfde mate terug te zien bij het Boerengat, wat waarschijnlijk komt door het lozen van boezemwater.

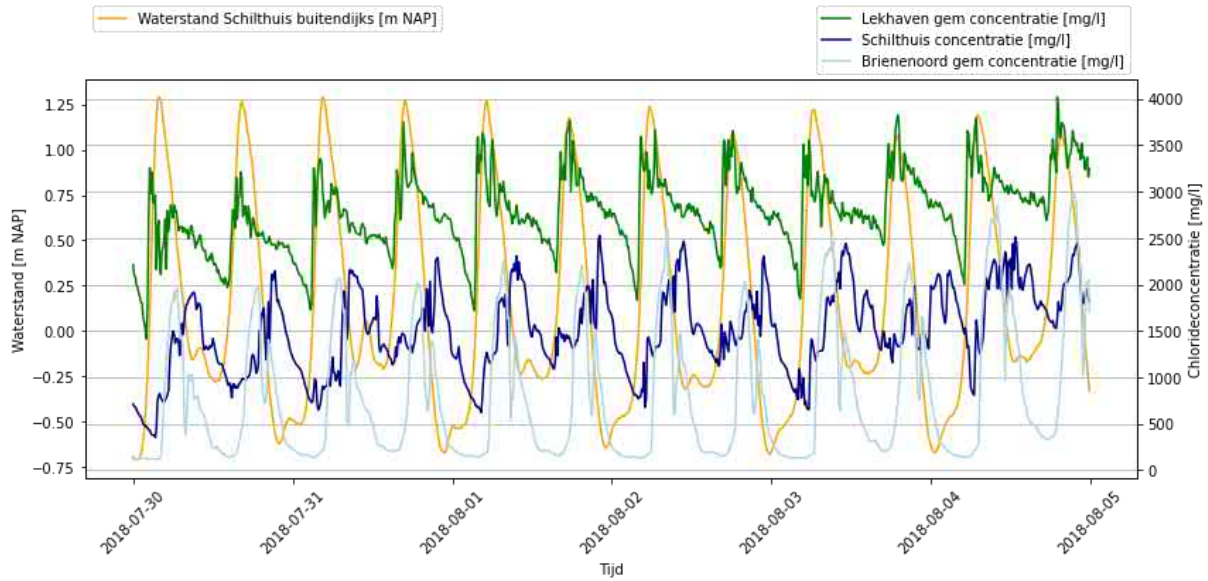


Figuur 32: Chlorideconcentraties met het maaldebiet bij inlaat Schilthuis voor de periode 2 mei tot 5 mei 2018, lage concentraties

Meetpunt Schilthuis laat sterkere reacties zien in chlorideconcentratie dan meetpunt Brienoord wanneer de concentratie op de Nieuwe Maas stijgt door lagere rivierafvoer. Het valt hierbij op dat de reactie van Schilthuis op vloed later is dan bij Brienoord. Dit is ook bij de hogere concentraties het geval (zie Figuur 34). Zodra de chlorideconcentratie bij Lekhaven over de 2500 mg/l gaat, zijn er geen tot nauwelijks inlaatvensters bij inlaat Schilthuis onder de grens van 400 mg/l. Meetpunt Brienoord heeft aanzienlijk meer invloed van de zoetere rivierafvoer, aangezien hier nog concentraties onder de 400 mg/l worden gemeten tijdens eb. Het Boerengat is een zijhaven waar enigszins doorstroming in aanwezig is, wat ook terug te zien is aan het weer dalen van de chlorideconcentratie tijdens eb.

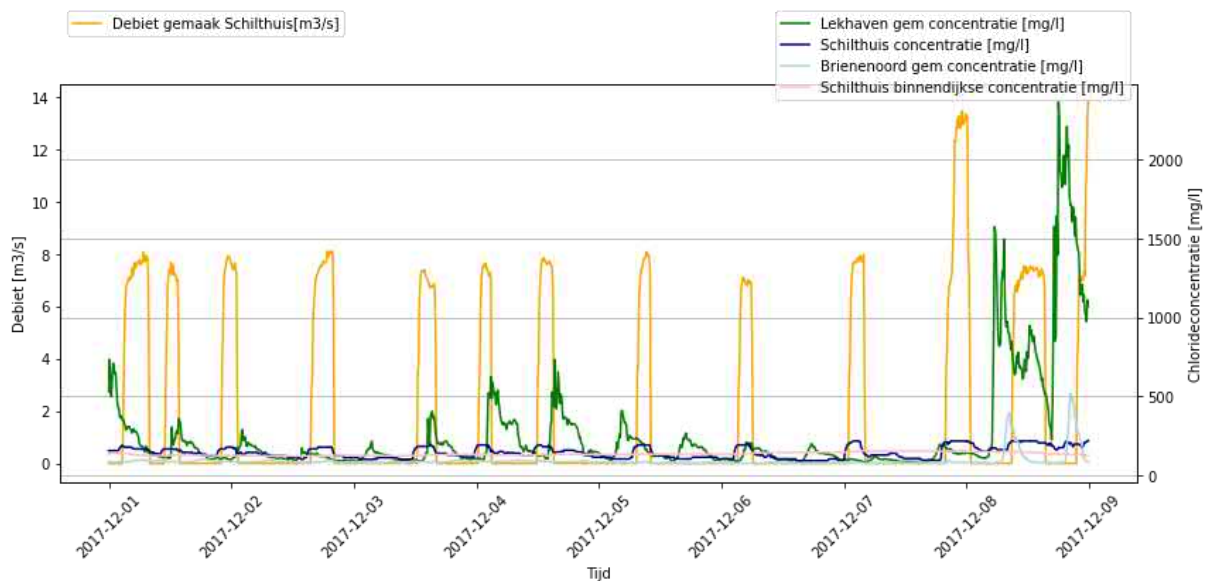


Figuur 33: Chlorideconcentraties met de waterstand bij inlaat Schilthuis voor de periode 30 juni tot 5 juli 2018, middelmatige concentraties



Figuur 34: Chlorideconcentraties met de waterstand bij inlaat Schilthuis voor de periode 30 juli tot 5 augustus 2018, hoge concentraties

In december 2017 zijn de zoutconcentraties op de Nieuwe Maas erg laag (Figuur 35). Hierbij is te zien dat de concentratie bij Schilthuis beperkt reactie lijkt te hebben tijdens vloed.



Figuur 35: Chlorideconcentraties met het maaldebiet bij inlaat Schilthuis voor de periode 1 december tot 8 december 2017, extreem lage concentraties

Samenvattend geldt het volgende voor de inlaat Schilthuis in het Boerengat:

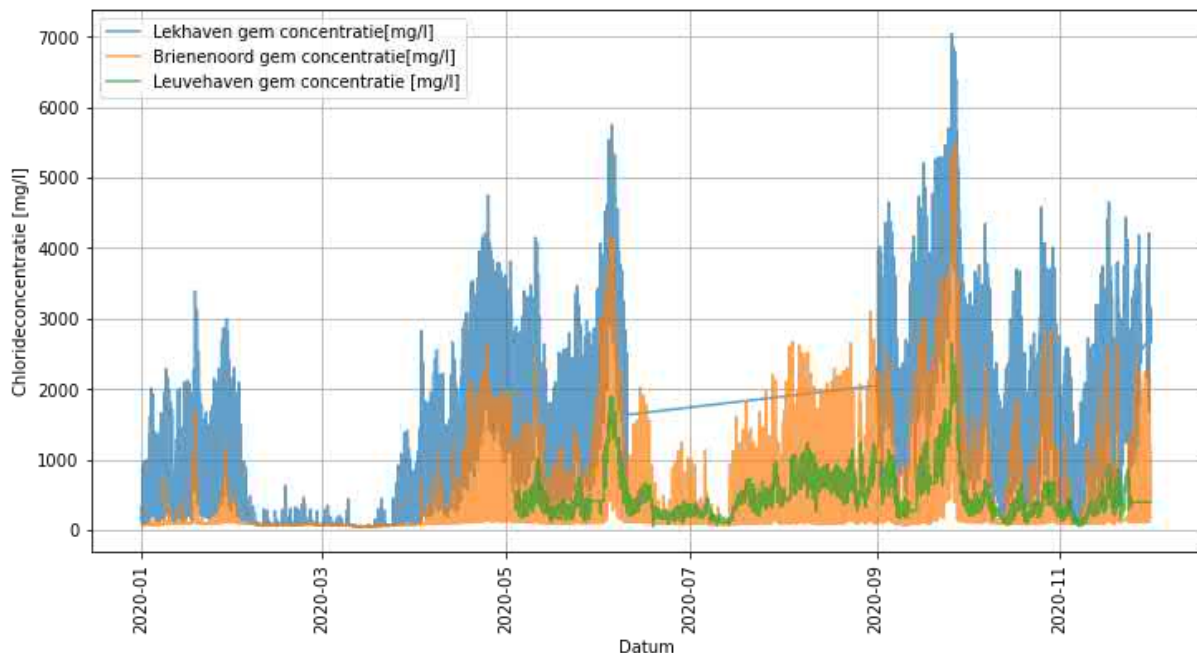
- In droge periodes, zoals in de zomer van 2018, kan het water bij inlaat Schilthuis langdurig verzilt zijn;
- Er is enige doorstroming in het Boerengat, waardoor de chlorideconcentratie tijdens eb en vloed sterker varieert dan in eenzijdig aangetakte zijhavens;
- Soms is de concentratie in het Boerengat hoger dan op de Nieuwe Maas, wat veroorzaakt wordt door het malen van enigszins verzilt boezemwater;

4.5 Inlaat Leuehaven

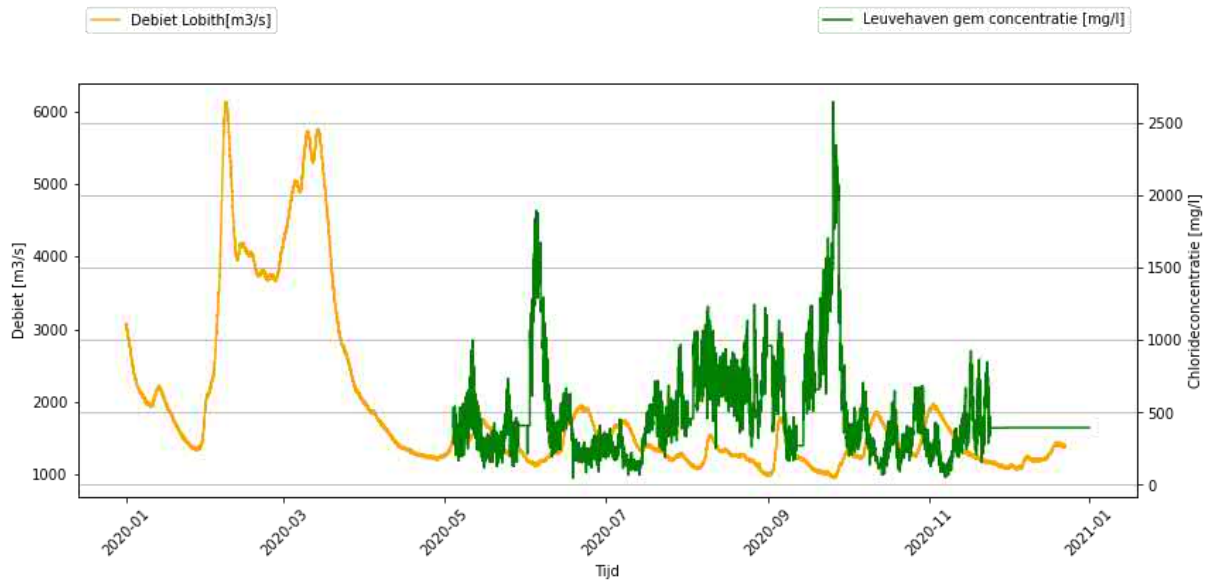
Inlaat Leuehaven is via de Leuehaven (zijhaven) verbonden aan de Nieuwe Maas. De Leuehaven ligt ongeveer 4.5 km bovenstrooms van de Lekhaven en 5.6 km benedenstrooms van meetpunt Brienoord. De bodem van de Leuehaven ligt op ongeveer -4 m NAP [Website Leuehaven 2021] en heeft grofweg een oppervlak van 98.000m² (geschat o.b.v. satellietfoto's). Bij inlaat Leuehaven zit geen gemaal, zoals bij inlaat Schilthuis wel het geval is. Ook zijn er pas sinds mei 2020 meetreeksen beschikbaar.

In Figuur 36 is te zien dat de chlorideconcentratie bij Leuehaven een stuk lager is dan de chlorideconcentratie van de omliggende meetpunten Lekhaven en Brienoord maar wel reageert op stijgingen en dalingen van de concentratie op de Nieuwe Maas. Zoals eerder al beschreven is de Leuehaven een zijhaven met weinig doorstroom. De algemene trend van de chlorideconcentratie komt overeen met dat van de Lekhaven en Brienoord.

De afvoeren op de Nieuwe Maas bij Brienoord zijn zoals eerder benoemd nog niet beschikbaar voor 2020, vanwege een nog uit te voeren validatieproces. In Figuur 37 is het Debiet bij Lobith om deze reden weergegeven als proxy voor de rivierafvoer. De concentraties op de Nieuwe Maas hangen sterk af van de rivierafvoer. De concentratie in de Leuehaven reageert vervolgens weer op de concentraties in de Nieuwe Maas. Deze wisselwerking is te zien in Figuur 37 waarbij de chlorideconcentratie telkens stijgt bij een daling van de afvoer bij Lobith.

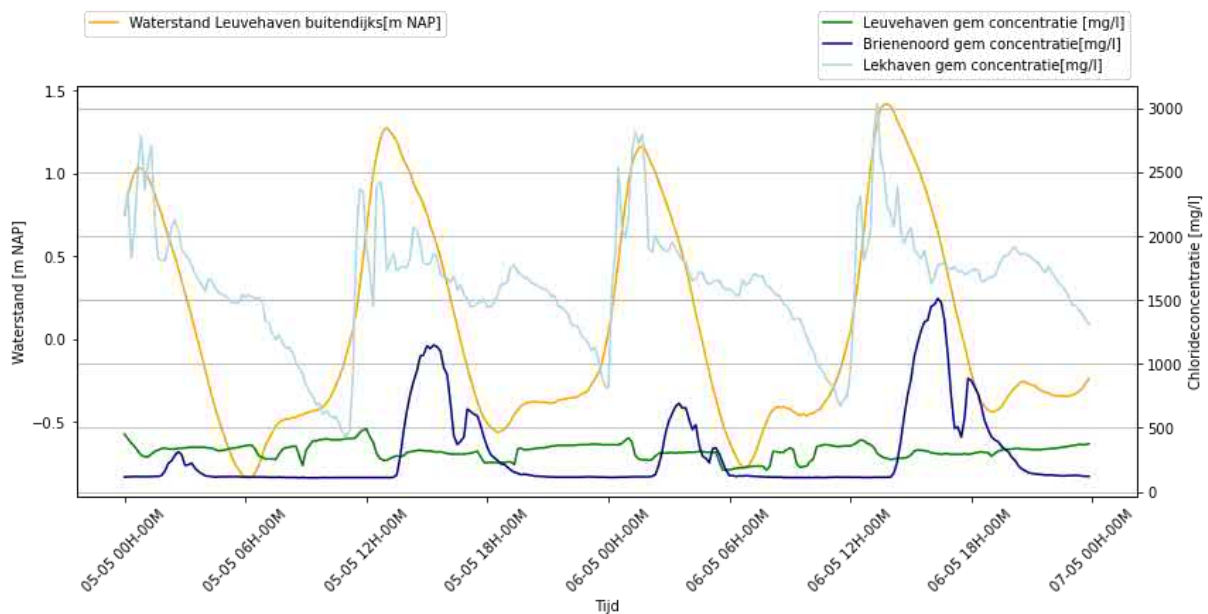


Figuur 36: Chlorideconcentraties bij de Lekhaven, Leuehaven en Brienoord 2020

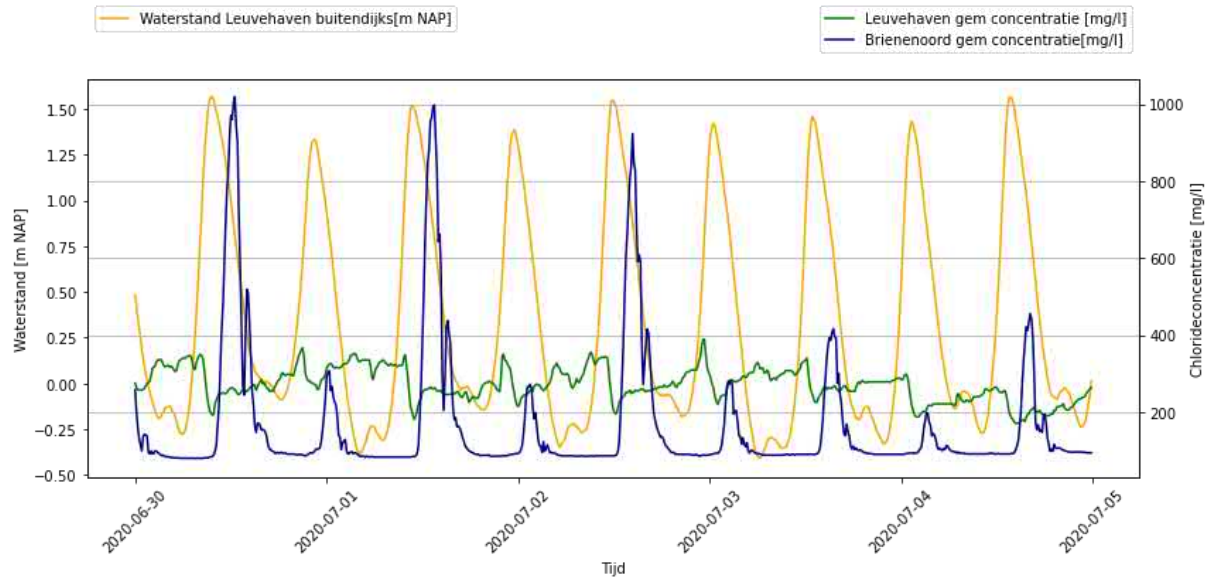


Figuur 37: Debiet bij Lobith, Chlorideconcentratie bij de Leuvehaven 2020

Metingen van begin 2020 missen bij Leuvehaven waar erg lage chlorideconcentraties zijn gemeten bij de meetpunten op de Nieuwe Maas, zoals in Figuur 11 voor het Schiegemeal te zien is. Voor de periode van begin mei is de dynamiek van het getij in de concentratie voor Leuvehaven niet terug te zien in Figuur 38. De concentratie blijft rond de 400 mg/l hangen. Ditzelfde uitdempingseffect was ook terug te zien in de zijhaven van het Schiegemeal. Lage chlorideconcentraties op de Nieuwe Maas zorgen ervoor dat de concentratie in de Leuvehaven redelijk constant blijft, zoals ook in Figuur 39 te zien is.



Figuur 38: Chlorideconcentraties met de waterstand bij inlaat Leuvehaven voor de periode 2 mei tot 5 mei 2020, lage concentraties

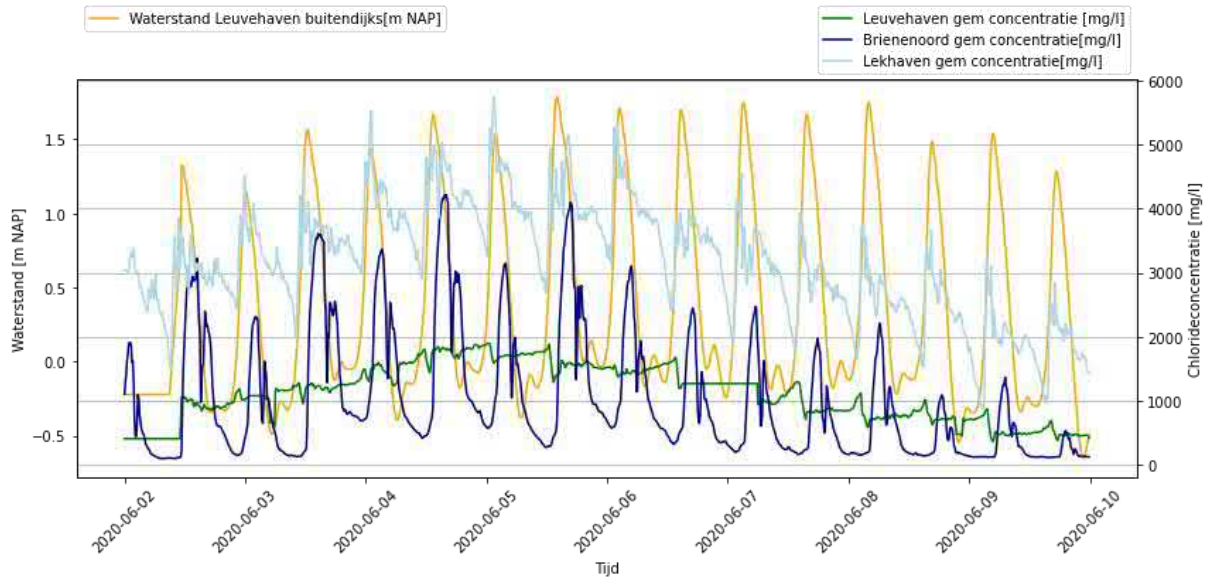


Figuur 39: Chlorideconcentraties met de waterstand bij inlaat Leuvehaven voor de periode 30 juni tot 5 juli 2020, lage concentraties (Meetlocatie Lekhaven mist data in deze periode en is daarom niet weergegeven)

Begin juni 2020 stijgt de chlorideconcentratie op de Nieuwe Maas. Daarbij stijgt de concentratie bij Leuvehaven mee, maar met een beperkte reactie op vloed en eb (zie Figuur 40). De metingen bij Brienoord variëren tijdens eb en vloed rondom de gemeten concentraties van Leuvehaven. Dit bevestigt dat er nauwelijks doorstroming is in de zijhaven, buiten de trage in- en uitstroom om de waterstand in de zijhaven mee te laten bewegen met eb en vloed. In Figuur 40 is daarnaast te zien dat er bij Brienoord nog sprake is van inlaatvensters, terwijl dit voor de Leuvehaven niet het geval is. De demping van variatie in concentratie speelt een grote rol voor de inlaatvensters bij Leuvehaven.

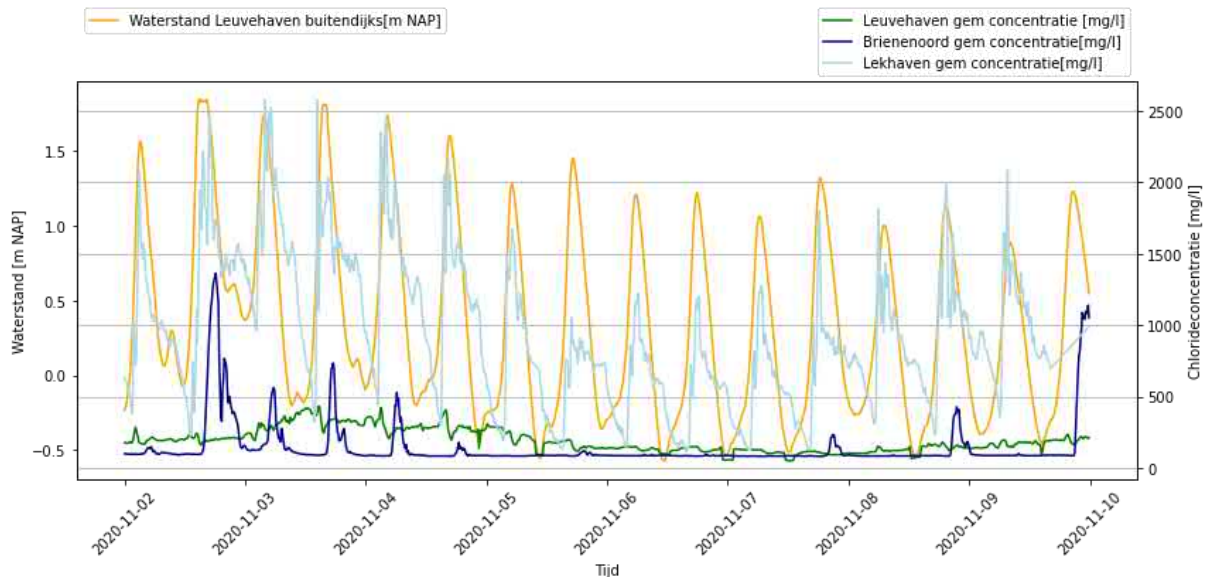
In Figuur 40 is er grofweg 1.75 m getijslag te zien waarbij de hoogwaterstand met eb rond de 1.6 m NAP ligt. De diepte in de Leuvehaven is dan bij hoogwater 5.6 m (bodem -4.0m NAP). Dit betekent dat bij hoogwater ongeveer 30% van het water in de Leuvehaven afkomstig is uit de Nieuwe Maas ($1.75 \text{ m getijslag} / 5.6 \text{ m diepte} = 0.31$). De overige 70% van het water betreft water dat al aanwezig was in de Leuvehaven bij laagwater. De menging kan in de praktijk groter zijn door mengingsprocessen anders dan alleen de getijbeweging. Tijdens eb stroomt het, voor zover dit gebeurd is, gemengde water weer naar buiten. Variaties in zoutconcentratie op de Nieuwe Maas werken dus slechts gedempt door in variaties in de zijhaven.

Bij een verhoogde chlorideconcentratie bij Lekhaven stroomt tijdens vloed (opkomend water) relatief zout water de Leuvehaven in. Bij eb stroomt er netto water uit de zijhaven. Op de Nieuwe Maas is sprake van een constante aanvoer van zoet water door de aanwezige rivierafvoer, waardoor de chlorideconcentratie bij eb ook daalt. Deze daling werkt echter niet door in de Leuvehaven, omdat die slechts leeg stroomt. Dit verschil tussen de Nieuwe Maas en de zijhaven verklaart waarom in de Leuvehaven veel minder duidelijke getij-effecten te zien zijn dan op de Nieuwe Maas.



Figuur 40: Chlorideconcentraties met de waterstand bij inlaat Leuvehaven voor de periode 2 juni tot 10 juni 2020, hoge concentraties

In Figuur 41 is te zien dat de chlorideconcentratie bij Leuvehaven langzaam naar beneden gaat wanneer de concentratie bij Lekhaven en Brienoord sterk daalt. Dit langzaam dalen wordt dan ook veroorzaakt door het concept wat hierboven beschreven is maar dan met de instroom van relatief zoeter water uit de Nieuwe Maas tijdens vloed. In Figuur 41 is dan ook een periode te zien waar de chlorideconcentratie in de Leuvehaven langdurig niet boven de 400 mg/l komt, terwijl dit stroomopwaarts bij Brienoord wel af en toe gebeurt.



Figuur 41: Chlorideconcentraties met de waterstand bij inlaat Leuvehaven voor de periode 2 november tot 10 november 2020, extreem lage concentraties

Samenvattend geldt het volgende voor de inlaat Leuvehaven:

- Een hoge rivierafvoer bij Lobith leidt tot lage chlorideconcentraties;
- Fluctuaties in chlorideconcentraties op de Nieuwe Maas werken gedempt door in de zijhaven;
- Doordat er geen uitmaaldebiet aanwezig is in de Leuvehaven, kan de chlorideconcentratie voornamelijk dalen als de chlorideconcentratie op de Nieuwe Maas bij vloed gedurende meerdere getijden op rij lager ligt dan de concentratie in de Leuvehaven.

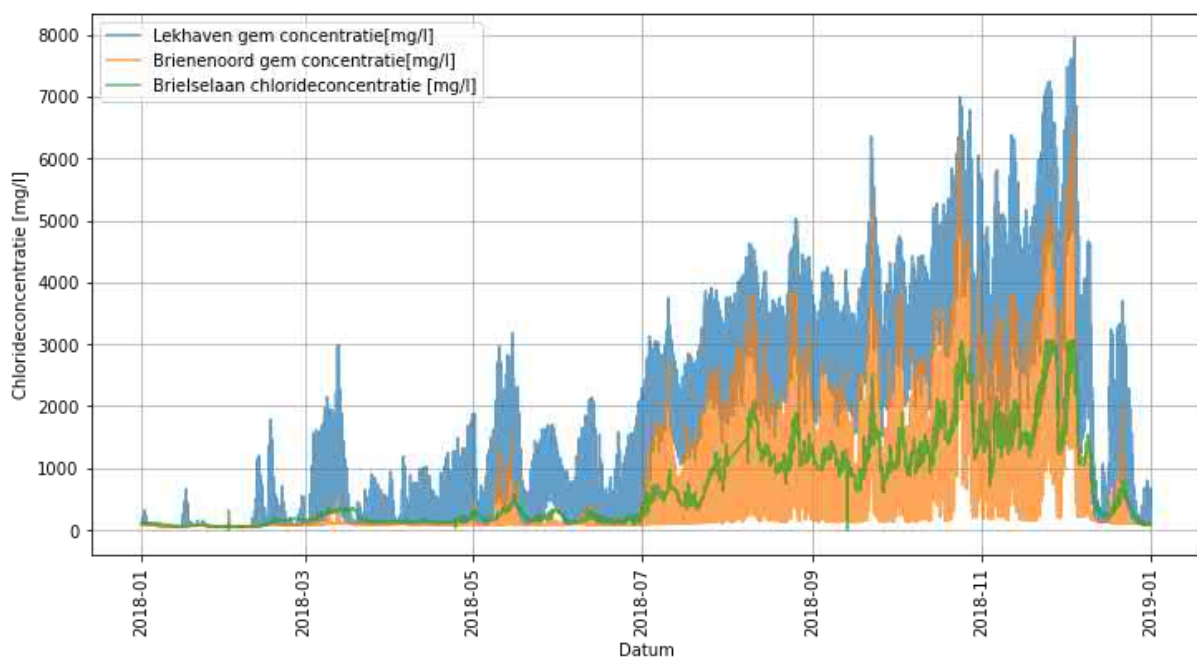
4.6 Inlaat Brielselaan

Inlaat Brielselaan is via de Maashaven (zijhaven) verbonden aan de Nieuwe Maas. De opening van de Maashaven ligt ongeveer 2.8 km bovenstrooms van de Lekhaven en 7.3 km benedenstrooms van meetpunt Brienenoord. De bodem van de Maashaven ligt op ongeveer -3.65 m NAP [Website Maashaven 2021] en heeft grofweg een oppervlak van 570.000 m² (geschat o.b.v. satellietfoto's). Bij inlaat Brielselaan zit gemaal Hillevliet, waar de capaciteit en aan/uit gegevens van beschikbaar zijn. Dit is omgerekend naar een gemaaldebiet. De capaciteit van het Hillevliet gemaal is beperkt en de chlorideconcentratie van het polderwater is continue bekend. Periodiek liggen deze waarden tussen de 50 en 150 mg/l. Hierdoor kan er alleen gekeken worden of er tijdens het uitmalen een effect te zien is in de Maashaven.

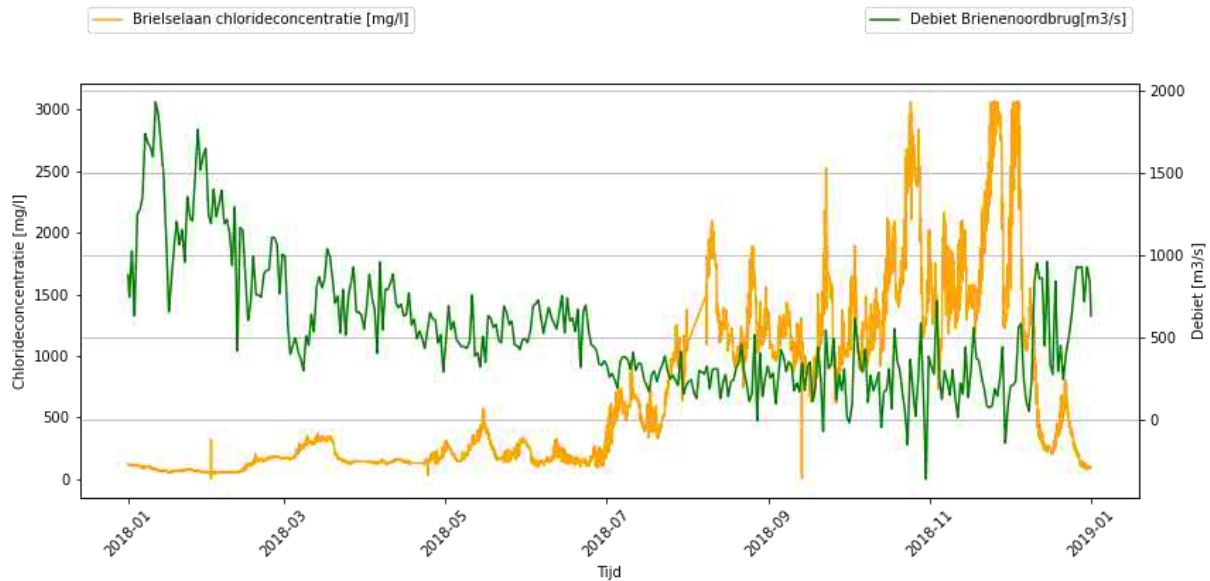
In Figuur 42 is te zien dat de chlorideconcentratie bij Brielselaan een stuk lager is dan de chlorideconcentratie van de omliggende meetpunten Lekhaven en Brienenoord maar wel reageert op stijgingen en dalingen van de concentratie op de Nieuwe Maas. De dynamiek van de chlorideconcentratie bij Brielselaan lijkt in lijn met dat van de Lekhaven en Brienenoord.

In Figuur 43 is het Debiet bij Brienenoord weergegeven samen met de chlorideconcentratie bij Brielselaan. De concentraties op de Nieuwe Maas hangen grotendeels af van de rivierafvoer en de waterstand. De concentratie in de Maashaven reageert net zoals de andere zijhavens op de concentraties van de Nieuwe Maas. Deze wisselwerking is te zien in Figuur 43 waarbij de chlorideconcentratie stijgt bij een daling van de afvoer bij Brienenoord.

Op het moment lijkt de waterstandsmeting niet te kloppen, gezien de omliggende metingen van de andere waterschappen worden er waterstanden verwacht rond de -0.5 tot 1.5 m NAP. In Figuur 44 zijn waterstanden te zien welke rond de -1.5 tot -0.6 m NAP liggen. Het getijdesignaal komt wel duidelijk naar voren waardoor de waterstand toch in de figuren van deze paragraaf verwerkt is.

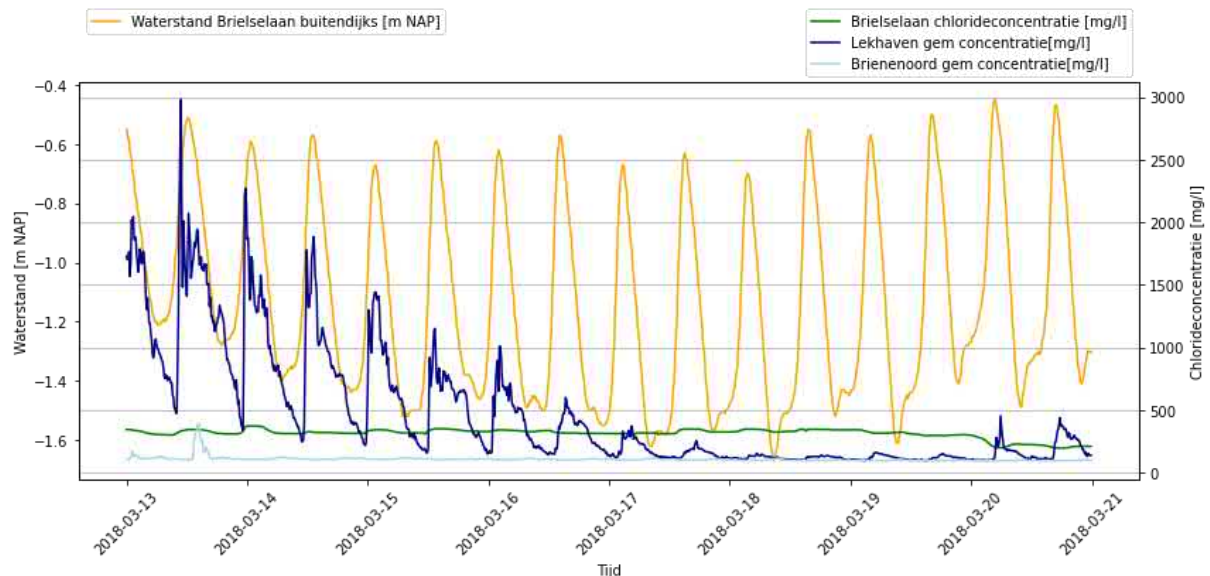


Figuur 42: Chlorideconcentraties bij de Lekhaven, Maashaven (Brielselaan) en Brienenoord 2018

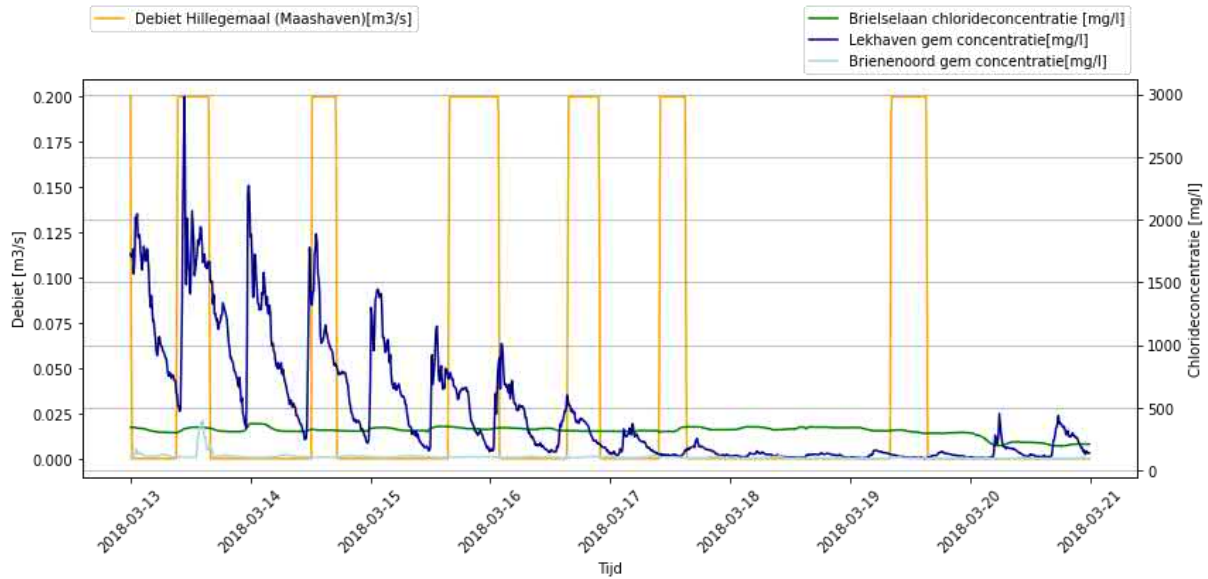


Figuur 43: Debiet bij Brienoord en chlorideconcentraties bij de Maashaven (Brielselaan) 2018

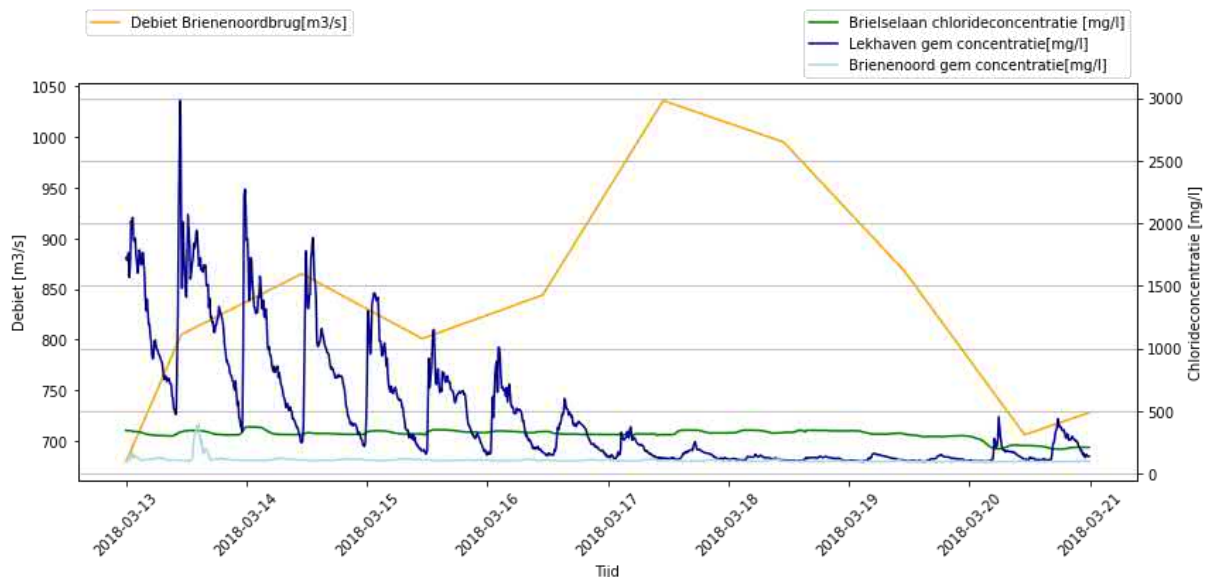
In Figuur 44 is te zien dat de schommelingen in chlorideconcentratie bij de Lekhaven weinig invloed hebben op de concentratie bij de Maashaven en Brienoord, tijdens lage concentraties. Het effect van debiet schommelingen op de Nieuwe Maas heeft in deze week nog geen invloed bovenstrooms van de Nieuwe Maas in chlorideconcentratie bij Brienoord. De concentratie bij de Brielselaan blijft hier lange tijd rond de 400 mg/l hangen ondanks het dalen van de concentratie op de Nieuwe Maas. Het Hillegemaal heeft een vrij kleine capaciteit en is een paar keer in werking gegaan in de periode van 13 maart t/m 20 maart (Figuur 45). Dit lijkt erop te wijzen dat het Hillegemaal niet voor de constante chlorideconcentratie zorgt maar dat de grootte van de Maashaven voor de afvlakking van variaties zorgt.



Figuur 44: Chlorideconcentraties met de waterstand bij inlaat Brielselaan voor de periode 13 maart tot 21 maart 2018, lage concentraties. Let op: Foutieve waterhoogte, getijdesignaal wordt wel als representatief beschouwt.

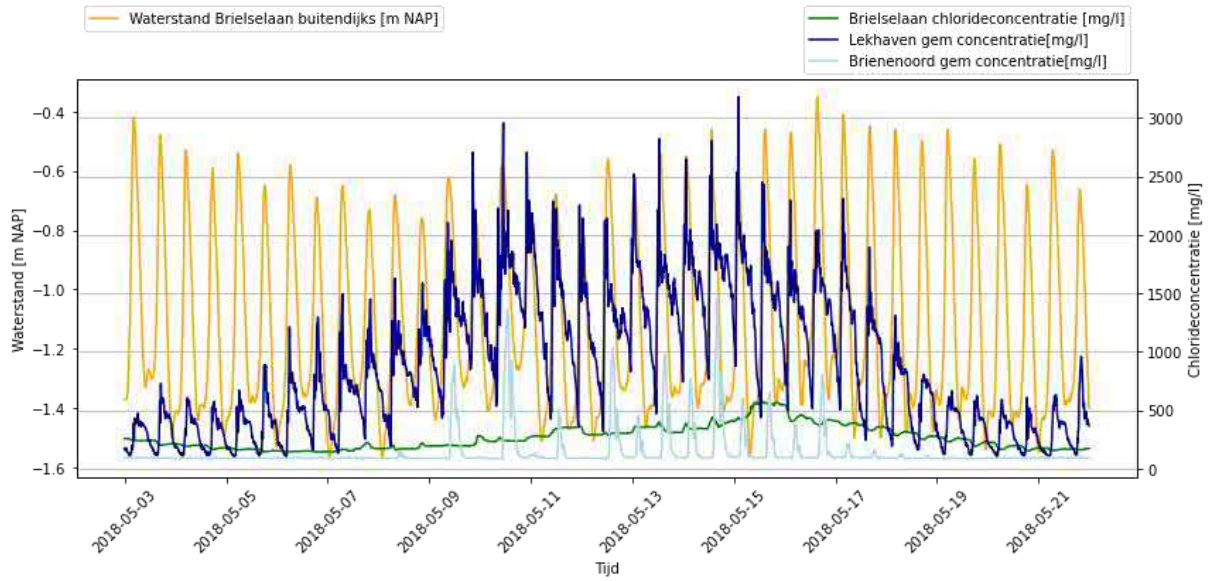


Figuur 45: Chlorideconcentraties bij inlaat Brielselaan en afvoer gemaal Hillelviet voor de periode 13 maart tot 21 maart 2018, lage concentraties

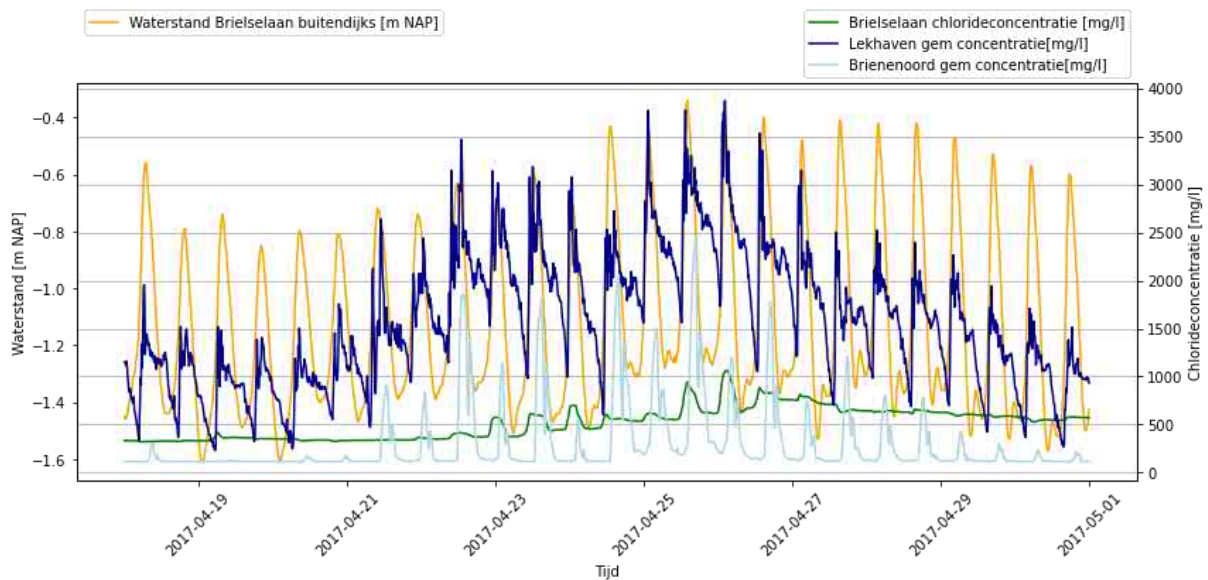


Figuur 46: Chlorideconcentraties bij inlaat Brielselaan en debiet bij Brienoord voor de periode 13 maart tot 21 maart 2018, lage concentraties

Wanneer de concentratie bij Lekhaven in die pieken rond de 2500 mg/l chlorideconcentratie komt gaat de chlorideconcentratie bij Brienoord ook variëren met het getij, zie Figuur 47. In de figuur is ook te zien dat de concentratie bij Brielselaan stijgt en langzaam weer daalt nadat de concentratie op de Nieuwe Maas weer afneemt. De Brielselaan heeft in deze periode een kort moment waar de grens van 400 mg/l chloride wordt overschreden. Het moment dat de chlorideconcentratie bij Brienoord gaat variëren met het getij lijkt het moment dat de concentratie bij Brielselaan stijgt (Lekhaven boven de 2500 mg/l) en op den duur over de grens van 400 mg/l gaat. Figuur 48 laat dit ook duidelijk zien voor april 2017. Deze periode begint met een constante concentratie welke stijgt bij het bereiken van een hogere concentratie bij Brienoord.

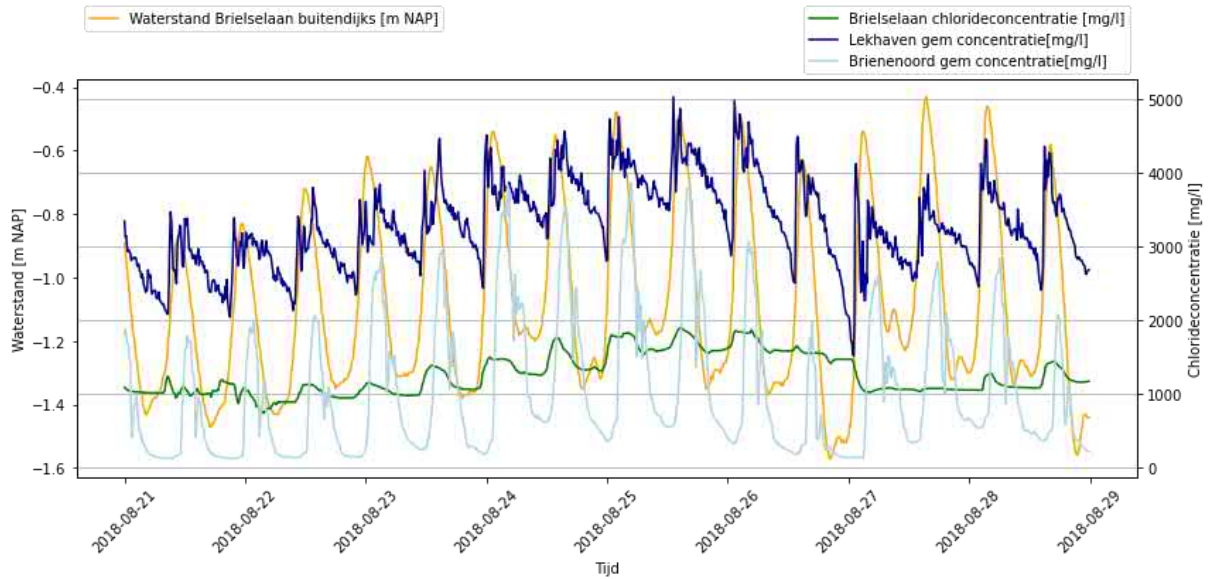


Figuur 47: Chlorideconcentraties met de waterstand bij inlaat Brielselaan voor de periode 3 mei tot 21 mei 2018, lage concentraties. Let op: Foutieve waterhoogte, getijdesignaal wordt wel als representatief beschouwt.

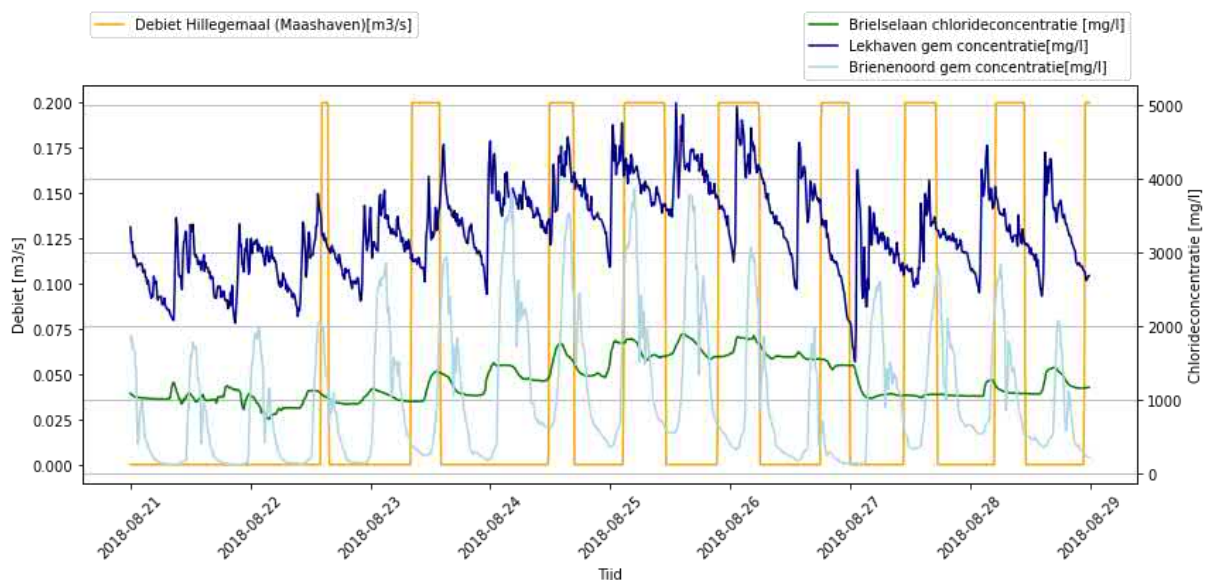


Figuur 48: Chlorideconcentraties met de waterstand bij inlaat Brielselaan voor de periode 19 april tot 1 mei 2017, laag tot hoge concentraties. Let op: Foutieve waterhoogte, getijdesignaal wordt wel als representatief beschouwt.

Bij hoge concentraties op de Nieuwe Maas komt de Brielselaan lange tijd niet onder de 400 mg/l grens zoals te zien is in Figuur 43 voor 2018 en ingezoomd op augustus in Figuur 49 en Figuur 50. De metingen bij Brielselaan vertonen bij hoge concentraties wel schommelingen waarbij dit niet direct te koppelen is aan de aanwezigheid van boezemwaterafvoer gezien de afvoer momenten in Figuur 50. Als er geen doorstroom is, zou te verwachten zijn dat de concentraties tijdens eb nauwelijks veranderen wat ook terug te zien is in Figuur 48 en Figuur 49.



Figuur 49: Chlorideconcentraties met de waterstand bij inlaat Brielselaan voor de periode 21 augustus tot 28 augustus 2018, hoge concentraties. Let op: Foutieve waterhoogte, getijdesignaal wordt wel als representatief beschouwt.



Figuur 50: Chlorideconcentraties met het gemaalafvoer Hillevliet bij inlaat Brielselaan voor de periode 21 augustus tot 28 augustus 2018, hoge concentraties

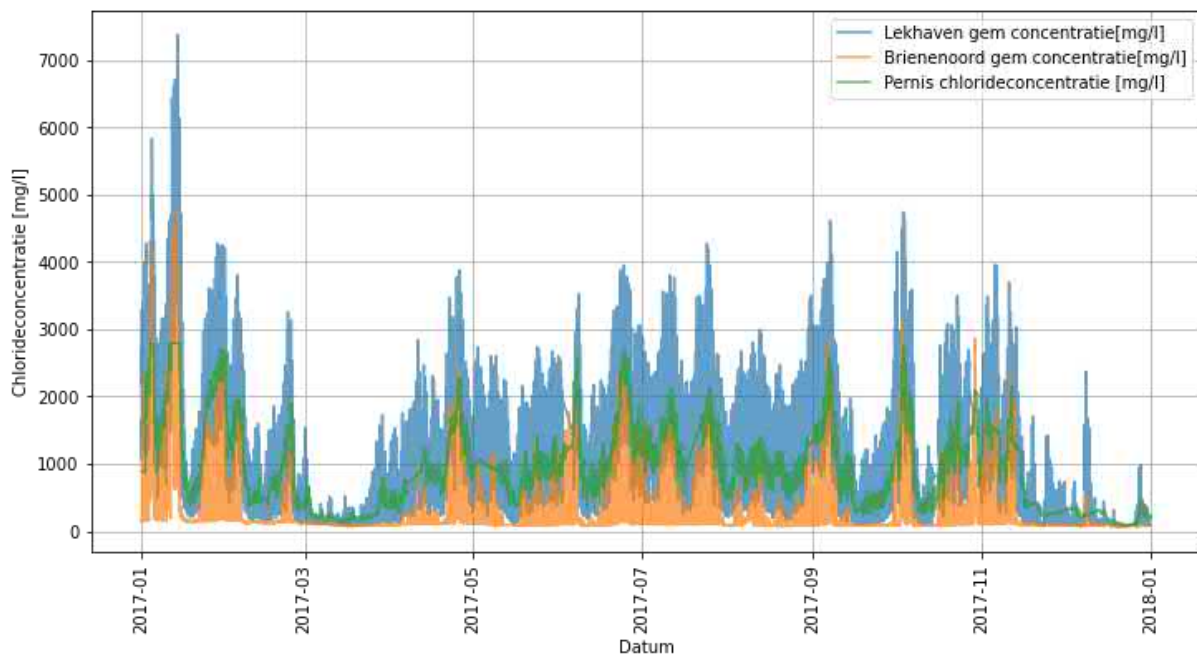
Samenvattend geldt het volgende voor de inlaat Brielselaan aan de Maashaven:

- Fluctuaties in chlorideconcentraties op de Nieuwe Maas werken gedempt door in de zijhaven;
- Indien eenmaal verzilt, kan het vrij lang duren voordat de Maashaven weer zoet is, ook al is de chlorideconcentratie op de Nieuwe Maas weer gedaald;
- Het uitgeslagen boezemwater van gemaal Hillevliet heeft geen of nauwelijks invloed op de chlorideconcentraties in de Maashaven. De gemaalcapaciteit is dan ook erg klein vergeleken de grootte van de Maashaven.

4.7 Inlaat Pernis

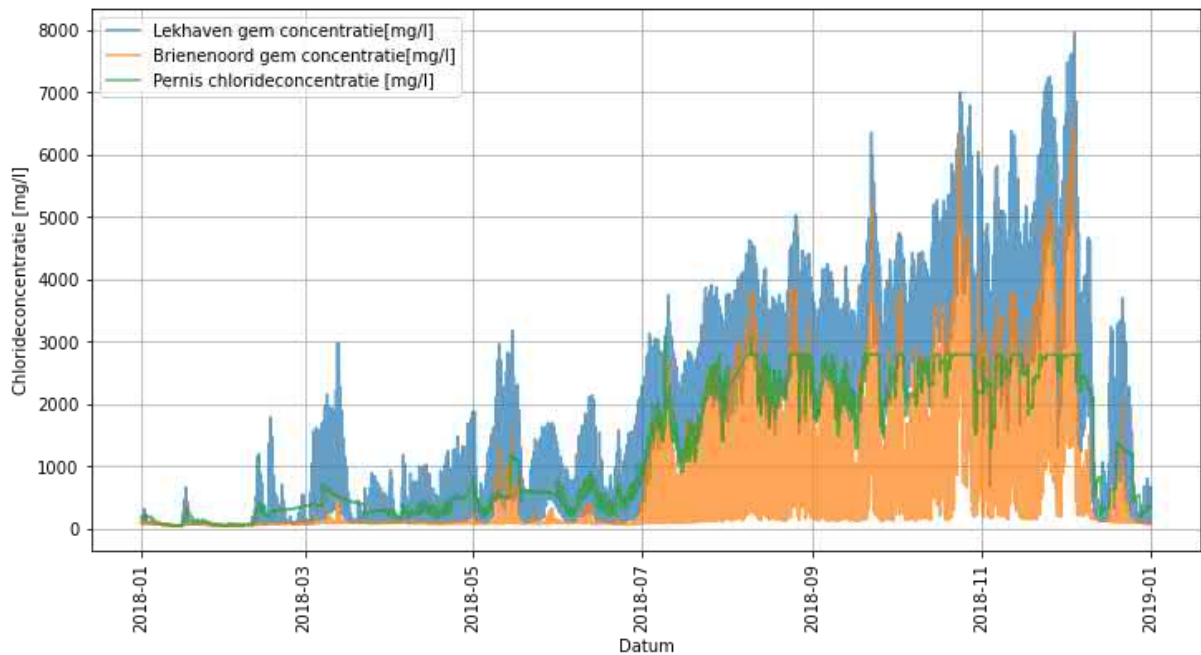
Inlaat Pernis is via de Madroelhaven (zijhaven) verbonden aan de Nieuwe Maas. De opening van de Madroelhaven ligt ongeveer 3.4 km benedenstrooms van de Lekhaven en 13.3 km benedenstrooms van meetpunt Brieneoord. Dit is het meeste benedenstrooms langs de Nieuwe Maas gelegen inlaat die beschouwd wordt in deze studie. De vaarwegbodem van de Madroelhaven ligt op ongeveer -7.7 m NAP [Website Madroelhaven 2021] en heeft een oppervlak van circa 73.000 m² (geschat o.b.v. satellietfoto's). Bij inlaat Pernis is geen gemaal aanwezig. De chlorideconcentratie wordt bij Pernis binnendijks gemeten. Tijdens het inlaten zal de concentratie van het ingelaten water worden gemeten, aangezien de EC-meter gelijk na de inlaat zit.

In Figuur 51 en Figuur 52 is te zien dat de chlorideconcentratie bij Pernis lager is dan het bovenstroomse punt Lekhaven, wat mede kan komen doordat er binnendijks gemeten wordt bij Pernis. De dynamiek van de chlorideconcentratie bij Pernis schommelt wel mee met de variatie die te zien is bij de Lekhaven. Dit toont aan dat er ondanks de chlorideconcentratie op de Nieuwe Maas toch ingelaten wordt. Dit bleek ook zo te zijn tijdens het interview, waar peilhandhaving het belangrijkste was.

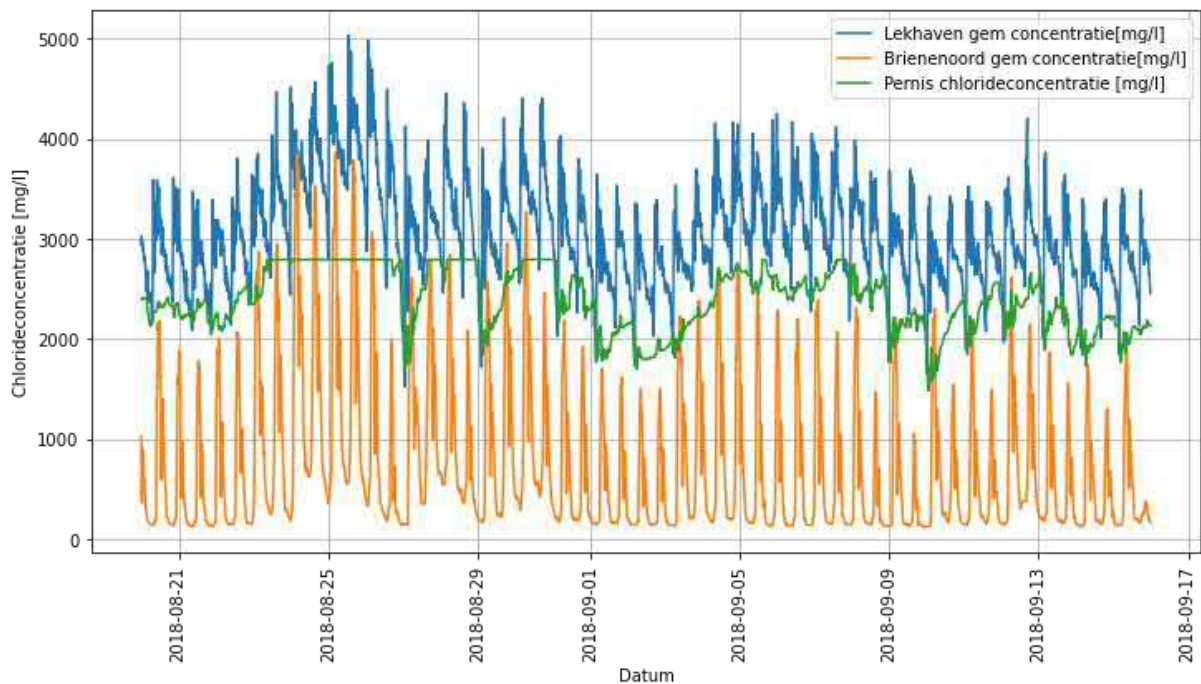


Figuur 51: Chlorideconcentratie de Lekhaven, Madroelhaven (Pernis) en Brieneoord 2017

In de zomer van 2018 (Figuur 52) is te zien dat de chlorideconcentratie binnendijks afvlakt op ongeveer 2800 mg/l, dit blijkt na navraag een meetlimitatie te zijn van de EC meter. Dit effect is ook goed te zien in de ingezoomde periode van Figuur 53.

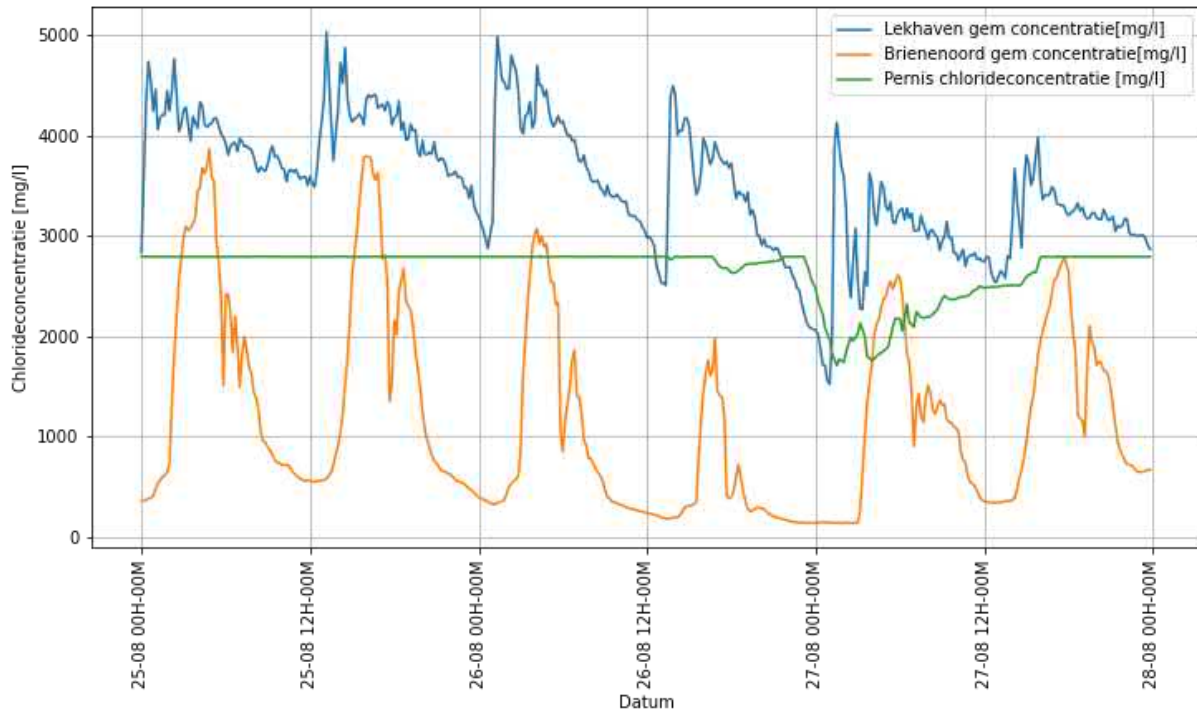


Figuur 52: Chlorideconcentratie de Lekhaven, Madroelhaven (Pernis) en Brienoord 2018



Figuur 53: Chlorideconcentratie bij de Madroelhaven (Pernis) voor de periode 21 augustus tot 16 augustus 2018

De verwachting is dat de binnendijkse chlorideconcentratie kan dalen in twee situaties. Nadat het inlaten van relatief zout water is gestopt, wordt een mengproces van ingelaten en binnendijkse water verwacht. En tijdens het inlaten van relatief zoet water vergeleken het binnendijkse water. Het laatstgenoemde is waarschijnlijk een verklaring voor de daling in concentratie bij Pernis op 27 augustus 2018 van Figuur 54, waar bij Lekhavenconcentraties gemeten worden lager dan de binnendijkse concentratie van Pernis. Dit wordt weer gevolgd door een stijging bij Lekhaven boven de binnendijkse concentratie waarna Pernis weer een stijging laat zien door waarschijnlijk het inlaten van relatief zouter water.



Figuur 54: Chlorideconcentratie bij de Madroelhaven (Pernis) voor de periode 25 augustus tot 28 augustus 2018

Samenvattend geldt het volgende voor de inlaat Pernis aan de Madroelhaven:

- Er is alleen een meting van het binnendijkse zoutconcentratie beschikbaar. Dit bemoeilijkt de analyse van getijdensters.
- Er is een meetlimitatie van 2800 mg/l (rond de 10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) zichtbaar.
- De chlorideconcentratie kan weer dalen door menging in het boezemsysteem of door inlaat van zoeter water vanuit de Madroelhaven.

4.8 Vergelijking zijhavens Nieuwe Maas

De verschillende zijhavens van de Nieuwe Maas vertonen significante verschillen in concentratieverloop. In deze paragraaf worden deze verschillen benoemd en worden hypothesen geformuleerd om deze verschillen te verklaren.

De chlorideconcentratie in zijhavens kan op twee manieren wijzigen:

1. Door getijstrooming: de waterstand op de Nieuwe Maas stijgt, de waterstand in de zijhaven stijgt mee en water stroomt de zijhaven binnen. Het binnenstromende water mengt met het reeds aanwezige water, waardoor de gemiddelde chlorideconcentratie verandert. Dit proces stopt als de waterstand op de Nieuwe Maas weer gaat dalen. Dan begint de zijhaven uit te stromen. Uitstroom heeft een kleine invloed op de chlorideconcentratie omdat de haven niet volledig gemengd is.
2. Door menging in combinatie met een dichtheidsverschil: ook zonder netto in- of uitstroom kan er nog uitwisseling van water en zout zijn tussen de rivier en de zijhaven, bijvoorbeeld door (in willekeurige volgorde) in- en uitvarende schepen, primaire scheepsgolven, circulatiecellen in de monding van de zijhavens en dichtheidsstroming. Deze menging zorgt voor een toename van concentraties in de zijhavens als de concentratie in de Nieuwe Maas hoger ligt dan in de zijhaven.

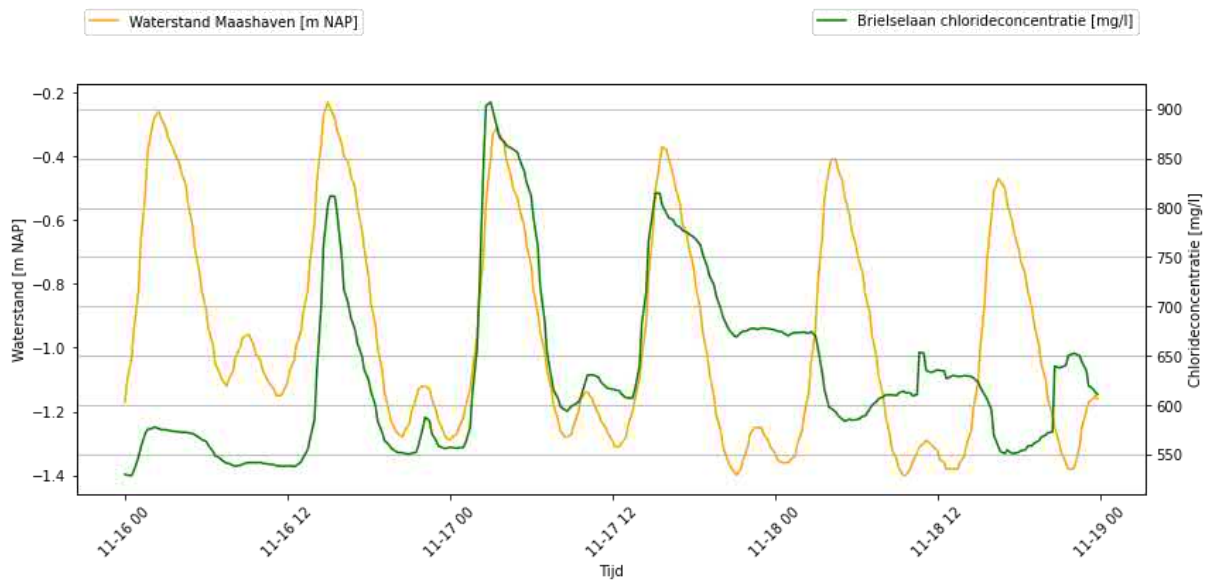
Onze hypothese is dat zijhavens grofstoffelijk zijn onder te verdelen in zijhavens waarin getijstroming domineert en zijhavens waarin mengingsprocessen tussen de rivier en de zijhaven domineren.

Getijgedomineerde zijhavens

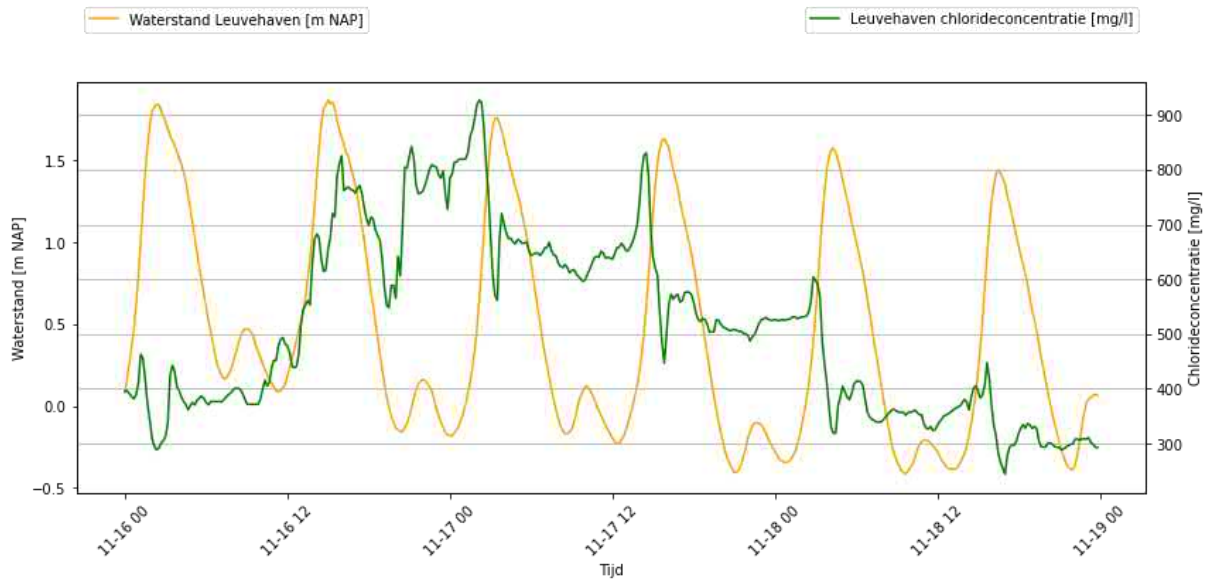
In zijhavens waarin de gemiddelde getijstroming domineert (het vullen tijdens vloed en het ledigen tijdens eb), is een glad verloop van de chlorideconcentratie zichtbaar, zonder veel hoogfrequente pieken en dalen. Hier is te zien dat de chlorideconcentraties alleen wijzigen tijdens vloed, tot op het punt van hoogwater op de Nieuwe Maas. Vanaf hoogwater blijven de concentraties vrijwel constant, tot aan de volgende getijcyclus, waarbij tijdens vloed weer het water van de Nieuwe Maas met de concentratie van dat moment de haven binnen stroomt.

De door getijstroming gedomineerde zijhavens zullen hun piek in concentratie hebben op het moment van hoogwater. Na hoogwater beginnen ze met uitstromen. Dit betreft de zijhavens Leuehaven en Maashaven (met inlaat Brielselaan). Beide havens hebben een relatief groot bergend oppervlak. De Leuehaven heeft daarnaast een kleine instroomopening. Dit zorgt ervoor dat mengingsprocessen relatief weinig invloed hebben.

Onderstaande figuren tonen een voorbeeld van dit gedrag, voor 16-18 november 2020. Bij de Maashaven (locatie Brielselaan) is het gedrag het duidelijkst. Tijdens vloed (opkomend water, instroom) kunnen de chlorideconcentraties stijgen (bijvoorbeeld op 17 november rond 3:00) of dalen (bijvoorbeeld 18 november rond 3:00), afhankelijk van de chlorideconcentratie van de Nieuwe Maas op het moment van instroom ten opzichte van de chlorideconcentratie in de zijhaven. Bij Leuehaven is het verloop grilliger, maar ook hier is telkens een duidelijke stijging of juist daling van de concentratie tijdens vloed (instroom) zichtbaar, terwijl tijdens eb (uitstroom) de concentratie meer constant blijft. Vaak zal tijdens vloed de concentratie op de Nieuwe Maas nog relatief laag zijn: zie het gedrag van locatie Brienenoord, beschreven in §4.1.



Figuur 55: waterstand en chlorideconcentratie in de Maashaven bij meetpunt Brielselaan voor 16-18 nov. 2020



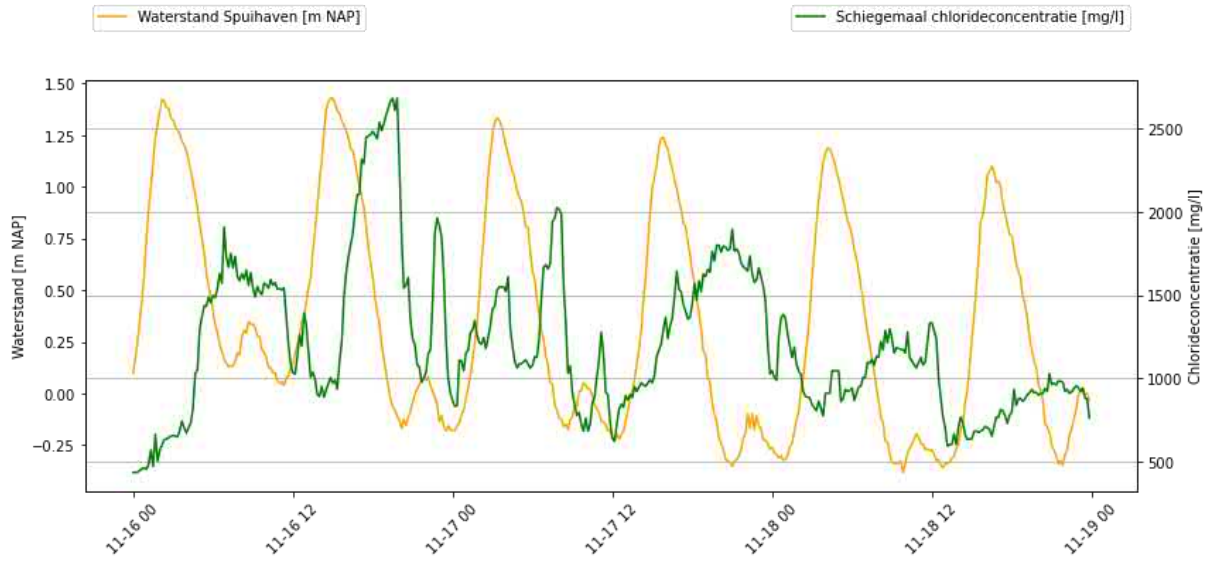
Figuur 56: waterstand en chlorideconcentratie in de Leuvehaven voor 16-18 nov. 2020

Mengingsgedomineerde zijhavens

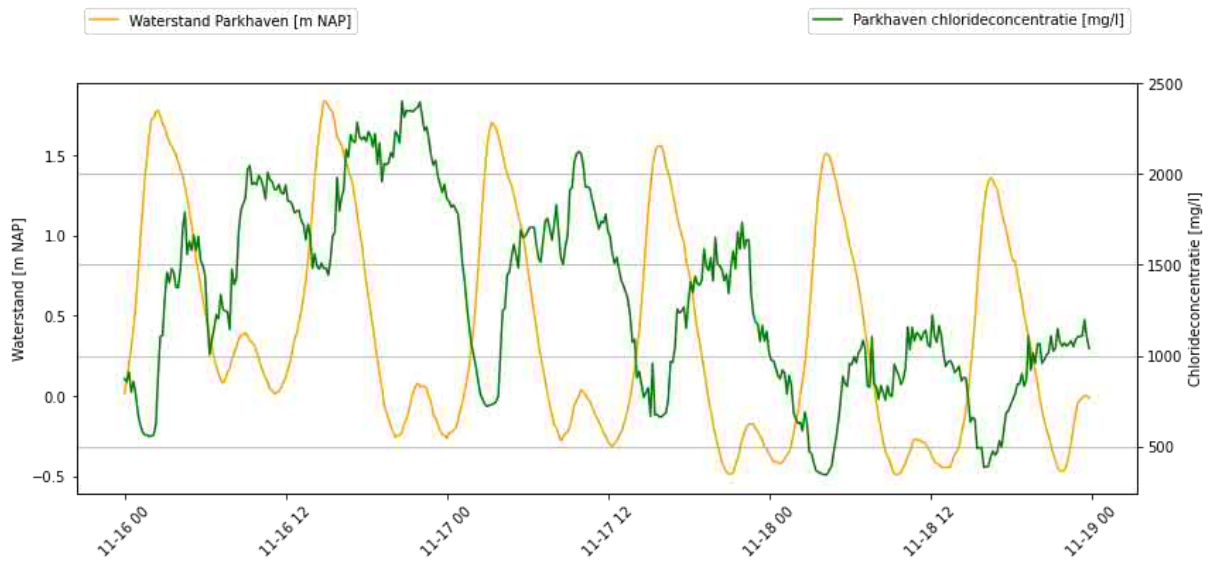
In andere zijhavens domineren volgens onze hypothese de mengingsprocessen in de monding van de zijhaven. De door menging gedomineerde zijhavens zullen hun piek in concentratie hebben op het moment waarop de concentratie in de zijhaven hoger ligt dan de concentratie op de Nieuwe Maas. De Nieuwe Maas heeft tot enkele uren na hoogwater nog een relatief hoge concentratie. Dit geldt zowel voor locatie Lekhaven als locatie Brienoord (zie §4.1). Daarom treedt de maximale concentratie in deze zijhavens pas op enkele uren na hoogwater.

Dit gedrag is zichtbaar in de zijhavens Boerengat, Parkhaven en Spuihaven. Zie onderstaande figuren voor een voorbeeld in de periode 16-18 november 2020. In deze havens treedt consequent een faseverschil op tussen maximale waterstand en maximale chlorideconcentratie. In het Boerengat is doorstroming aanwezig, omdat deze haven tweezijdig aangetakt is. Dit veroorzaakt relatief sterke menging tussen de Nieuwe Maas en het Boerengat. De Parkhaven en Spuihaven zijn allebei relatief kleine havens die haaks op de Nieuwe Maas staan. Primaire scheepsgolven (de waterstandsval rond varende schepen) en circulatiecellen in de monding kunnen daar voor relatief sterke uitwisseling en menging zorgen. Voor de Madroelhaven is op basis van de binnendijkse meting bij Pernis geen goede uitspraak mogelijk.

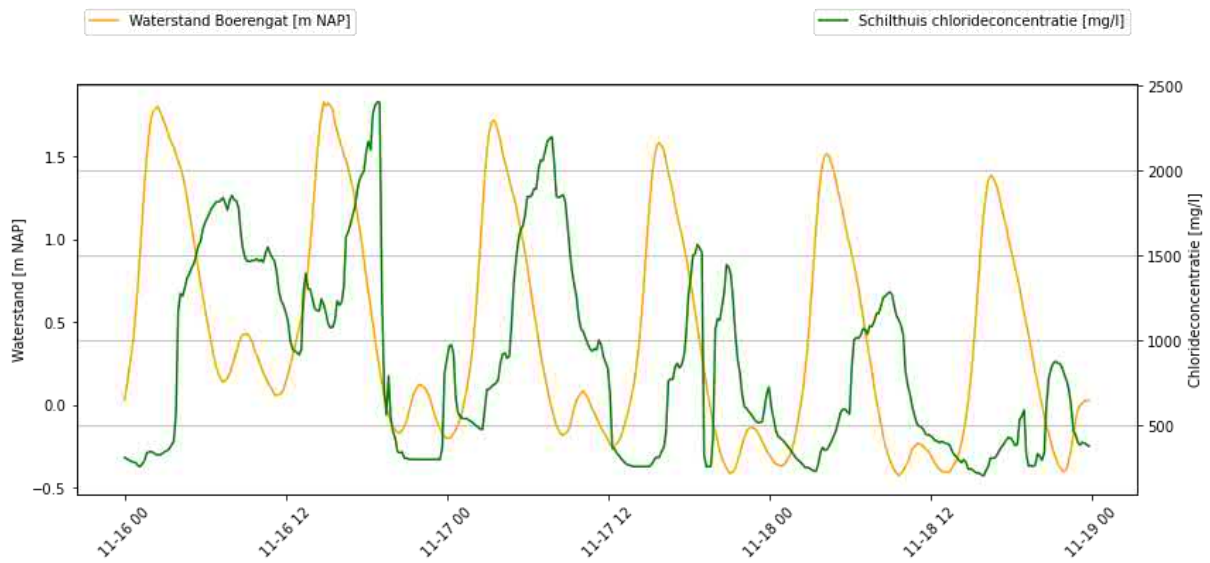
In deze paragraaf zijn diverse hypothesen geformuleerd over de geobserveerde verschillen in het verloop van de chlorideconcentraties in de verschillende zijhavens. Nader onderzoek is nodig om deze hypothesen om te zetten in krachtiger statements over de werking van zijhavens.



Figuur 57: waterstand en chlorideconcentratie in de Spuihaven bij meetpunt Schiegemaal voor 16-18 nov. 2020



Figuur 58: waterstand en chlorideconcentratie in de Parkhaven voor 16-18 nov. 2020



Figuur 59: waterstand en chlorideconcentratie in het Boerengat bij meetpunt Schilthuis voor 16-18 nov. 2020

Overzichtstabel

In Tabel 15 wordt het gedrag van de verschillende zijhavens samengevat, gekenmerkt door de grilligheid van het concentratieverloop, het tijdsverschil tussen maximale waterstand en maximale chlorideconcentratie en het bereik van de chlorideconcentraties (voor de periode 16-18 november, dus alleen voor onderlinge vergelijking).

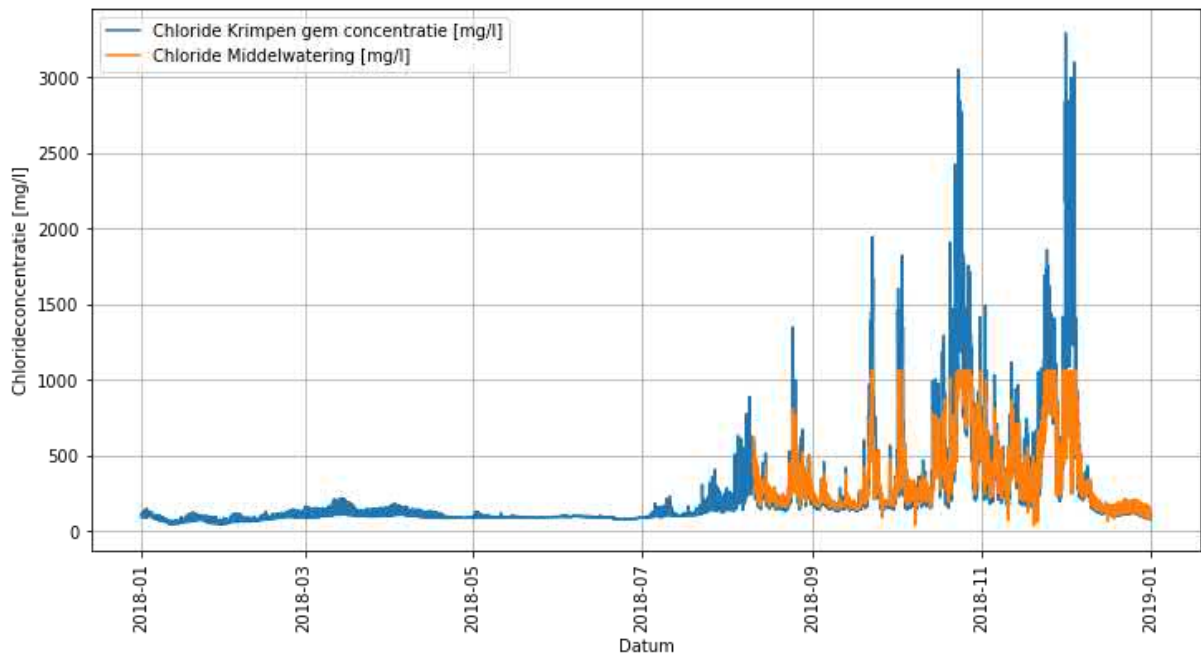
Tabel 15: meetlocaties langs de Nieuwe Maas en in zijhavens, met een indicatie van hun karakteristieken, de grilligheid van het concentratieverloop, het faseverschil tussen maximum hoogwater en maximum chlorideconcentratie en het bereik aan concentraties in de periode 16-18 november 2020 (conform de figuren)

Locatie	Haven	Karakteristieken	Grilligheid verloop Cl	Max Cl na HW	Bereik Cl (mg/l)
Brienoord	n.v.t.	Langs rivier	Hoog	±2 uur	100-2600
Schilthuis	Boerengat	Vrij groot, doorstroming via 2-zijdige aantakking	Vrij hoog	±4 uur	200-2400
Leuehaven	Leuehaven	Vrij veel berging, kleine opening	Beperkt	gelijktijdig	300-900
Brielselaan	Maashaven	Veel berging, schuin aangetakt	Minimaal	gelijktijdig	550-900
Parkhaven	Parkhaven	Haaks, kleine haven	Vrij hoog	±3 uur	500-2400
Lekhaven	Lekhaven	Langs rivier, in de monding van kleine haven	Hoog	'Zaagtand'	600-4800
Schie-gemaal	Spuihaven	Haaks, kleine haven	Vrij hoog	±3 uur	500-2700
Pernis	Madroelhaven	Binnendijks	Minimaal	Onbekend	580-660

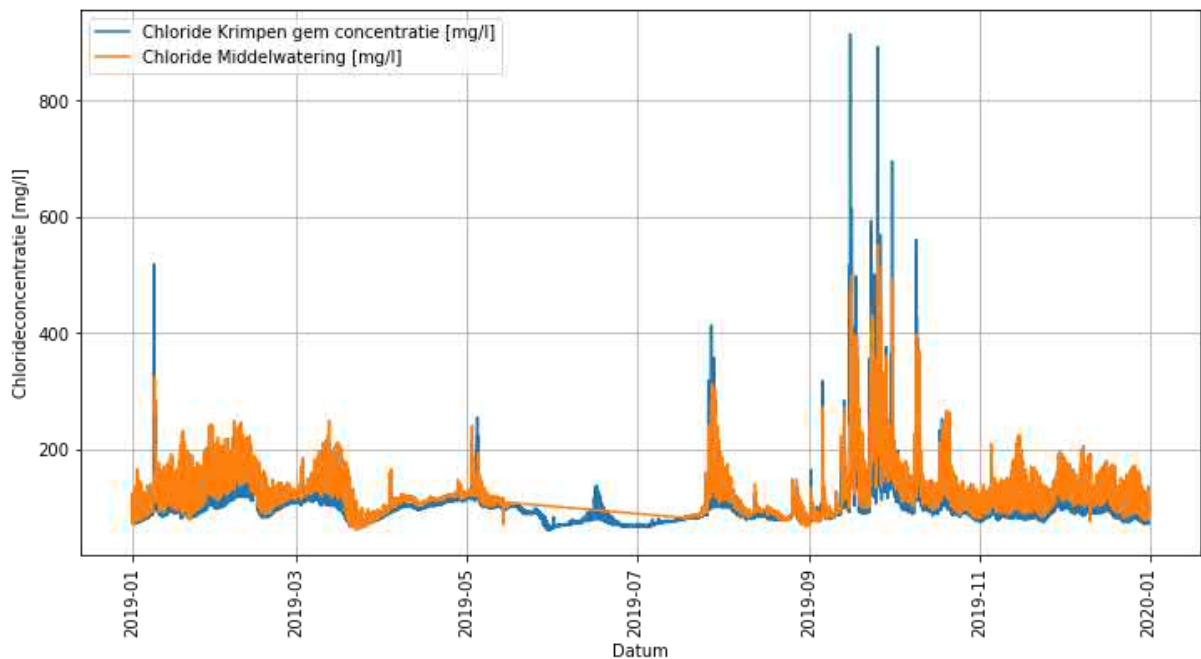
4.9 Inlaat Middelwatering

Inlaat Middelwatering is als enige van de zeven onderzochte inlaten niet in een zijhaven gelegen, maar direct aan de rivier. Daarnaast is deze inlaat zoals eerder benoemd niet gelegen aan de Nieuwe Maas maar aan de Hollandsche IJssel. Dit zorgt voor een wezenlijk andere reactie dan bij de inlaten in zijhavens aan de Nieuwe Maas. De inlaat Middelwatering ligt ongeveer 0.9 km bovenstrooms van het chloridemeetpunt Krimpen a/d IJssel. Het meetpunt Krimpen a/d IJssel ligt aan de noordzijde (dus binnenzijde) van de stormvloedkering van de Hollandsche IJssel.

Bij inlaat Middelwatering is een gemaal aanwezig, waar vanaf september 2018 t/m februari 2021 afvoergegevens van bekend zijn. In de Hollandsche IJssel is er ter hoogte van inlaat Middelwatering nauwelijks sprake van inlaatvensters door het getij, zie Figuur 60 en Figuur 61 voor de jaren 2018 en 2019. In het jaar 2019 is de chlorideconcentratie van de Hollandsche IJssel ter hoogte van inlaat Middelwatering over het algemeen onder de grens van 400 mg/l. Op momenten waarop de Hollandsche IJssel verzilt zal de chlorideconcentratie boven de 400 mg/l grens komen en daar meerdere getijperiodes boven blijven, zoals in het droge jaar 2018 te zien is.

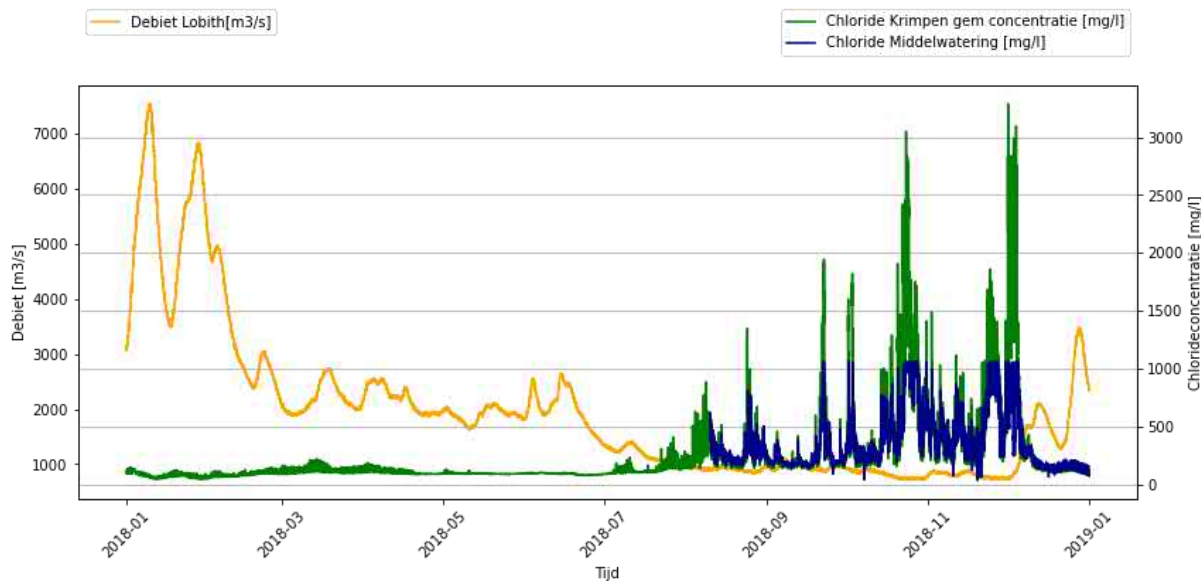


Figuur 60: Chlorideconcentratie bij Krimpen a/d IJssel en Middelwatering 2018

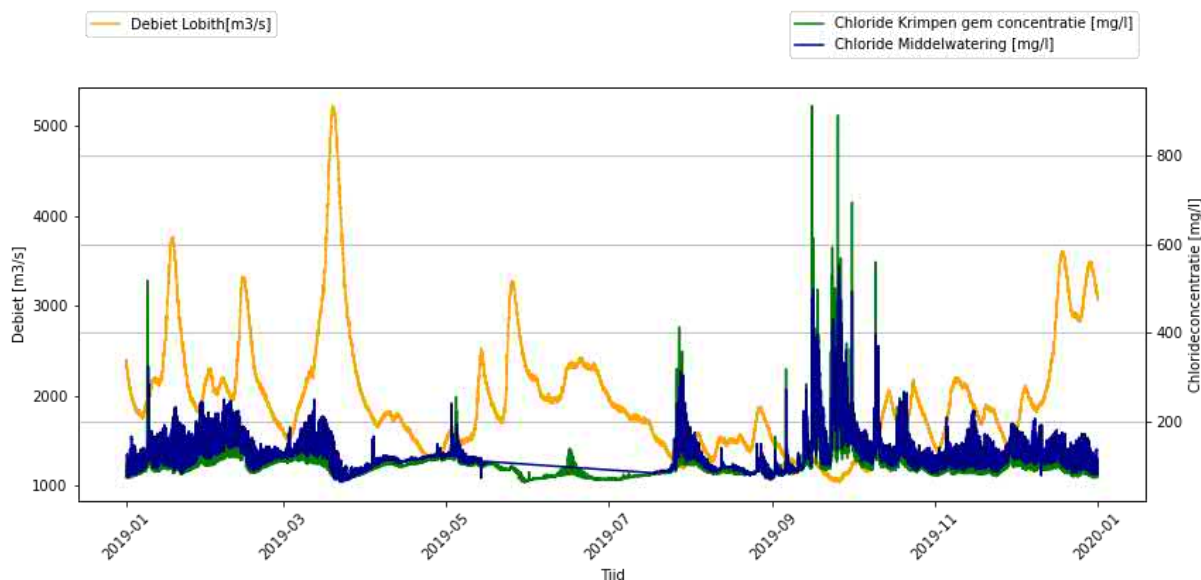


Figuur 61: Chlorideconcentratie bij Krimpen a/d IJssel en Middelwatering 2019

Verzilting van de Hollandsche IJssel bij Krimpen a/d IJssel en inlaat Middelwatering ontstaat voornamelijk bij lagere Rijnafoeren bij Lobith, zie Figuur 62 en Figuur 63. Rijnafoeren onder de 1400 m³/s lijken verzilting als gevolg te hebben bij Krimpen a/d IJssel. In het jaar 2018 worden hoge chlorideconcentraties gemeten bij Middelwatering. Rond november lijken deze afgevlakt te worden. Uit de meetdata blijkt dat de metingen bij Middelwatering een geleidbaarheid van maximaal 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, wat omgerekend een chlorideconcentratie van 1059 mg/l is, bevat. Dit is fors lager dan bij Krimpen aan den IJssel. Dit lijkt op een limitatie van de EC meter of deze data is in een validatie stap eruit gefilterd bij het waterschap.

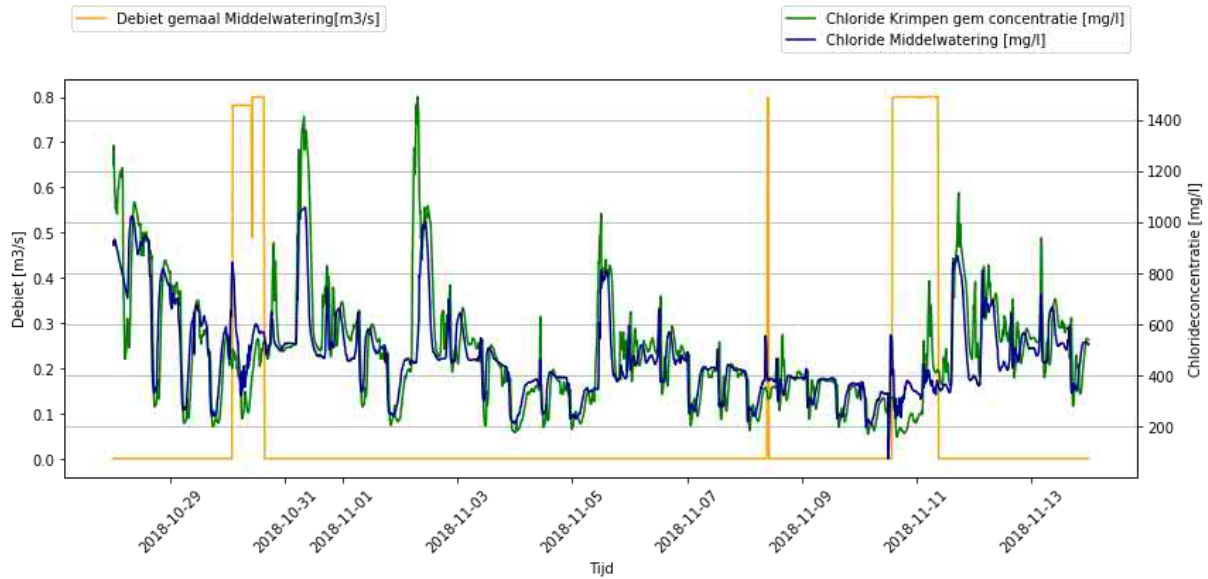


Figuur 62: Chlorideconcentraties bij inlaat Middelwatering en het debiet bij Lobith, 2018

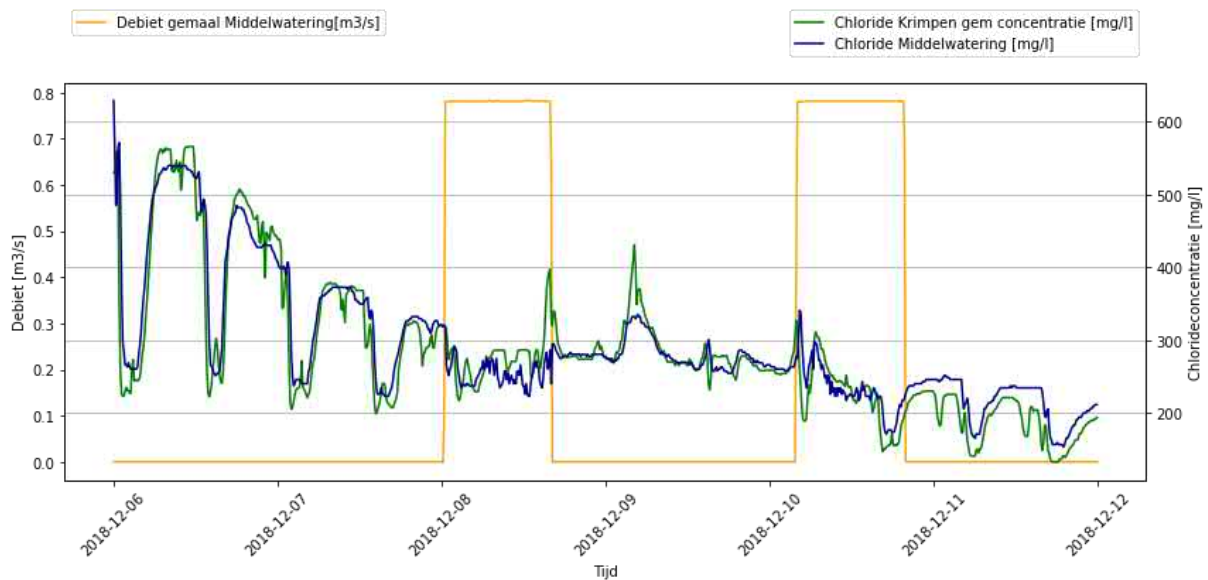


Figuur 63: Chlorideconcentraties bij inlaat Middelwatering en het debiet bij Lobith, 2019

De chlorideconcentratie wordt eind oktober van 2018 nauwelijks beïnvloed door het afvoer van water via het gemaal bij Middelwatering. Wel is bij de drie periodes van lozen een korte piek in de chloridemeting te zien bij Figuur 64. Een maand later, in begin december 2018, lijkt de chlorideconcentratie ook niet beïnvloed te worden door het uitmalen van polderwater echter zijn de korte pieken hier niet te zien, Figuur 65.



Figuur 64: Chlorideconcentraties met het uitmaaldebiet bij inlaat Middelwatering voor de periode 29 oktober tot 13 november 2018

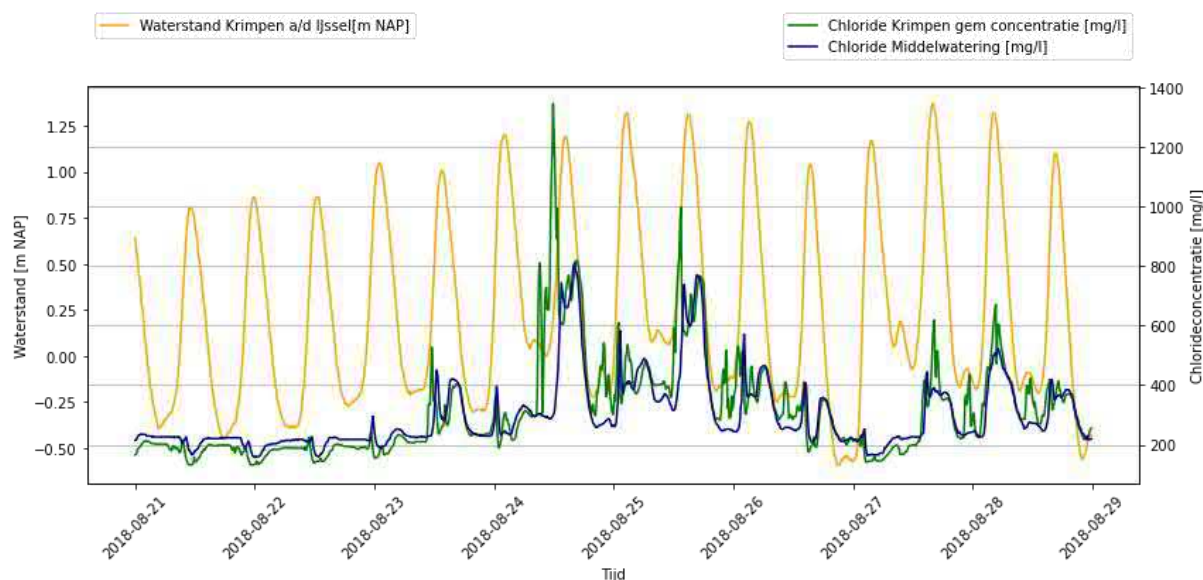


Figuur 65: Chlorideconcentraties met het uitmaaldebiet bij inlaat Middelwatering voor de periode 6 december tot 12 december 2018

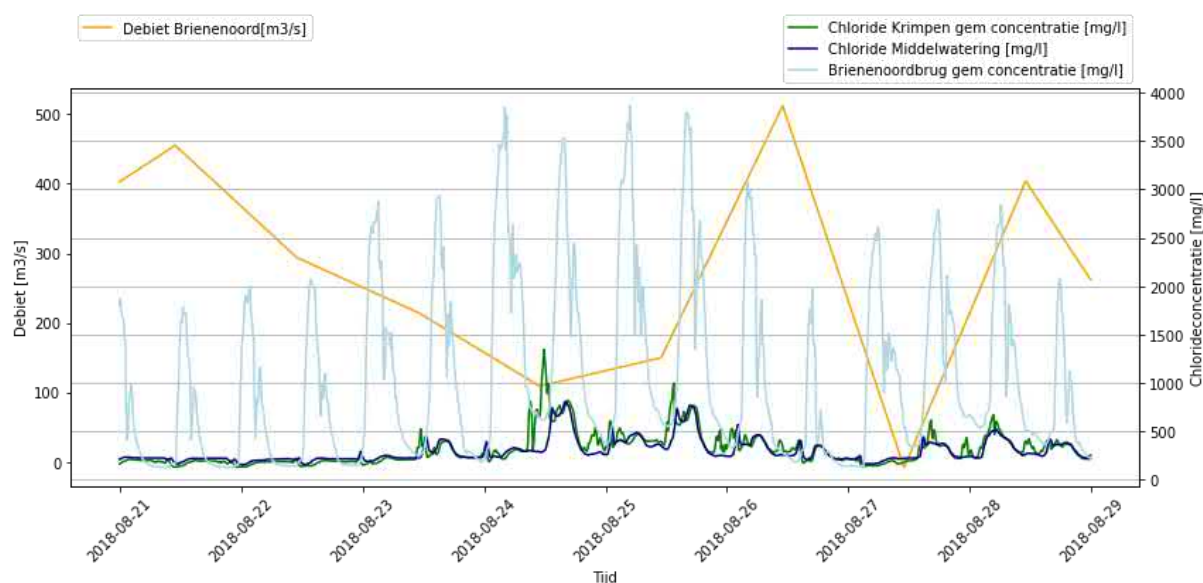
In Figuur 66 is de chlorideconcentratie en waterstand voor begin augustus 2018 weergegeven. In deze figuur is goed te zien dat de chlorideconcentratie bij Middelwatering en Krimpen a/d IJssel erg sterk overeenkomen. Dit laat zien dat het Krimpen a/d IJssel meetpunt gebruikt kan worden om waar nodig de meetreeks van Middelwatering te verlengen.

Verder valt het op dat van 21 t/m 23 augustus de chlorideconcentratie bij Krimpen a/d IJssel en Middelwatering naar beneden gaat tijdens instroom vanuit de Nieuwe Maas gedurende vloed. De hypothese is dat op het moment van instroom van de Hollandsche IJssel de Nieuwe Maas voor de monding zoeter is dan het water op de Hollandsche IJssel. Met vloed wordt dit zoete water vanuit de monding de Hollandsche IJssel op gestuwd. Tijdens eb is er een constante chlorideconcentratie terug te zien. Dit zal hoogstwaarschijnlijk de achtergrondconcentratie van het water op de Hollandsche IJssel zijn. Op 24 Augustus is in de figuur een hoge piek te zien in de

chlorideconcentratie. Deze piek valt gelijk met een verhoogde waterstand tijdens eb. Op 24 augustus is windkracht 5 gemeten bij Rotterdam wat waarschijnlijk een door windopzet verhoogde waterstand tijdens eb heeft veroorzaakt en daarmee een verzilte monding van de Hollandsche IJssel. Hetzelfde is zichtbaar op 27 augustus.

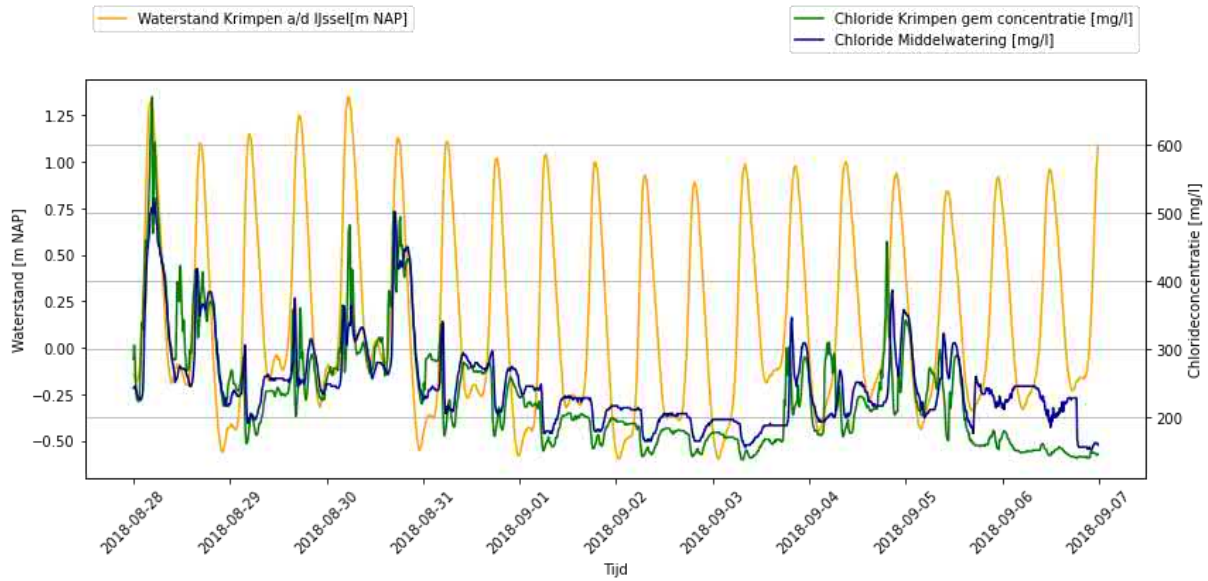


Figuur 66: Chlorideconcentraties met de waterstand bij inlaat Middelwatering voor de periode 21 augustus tot 29 augustus 2018

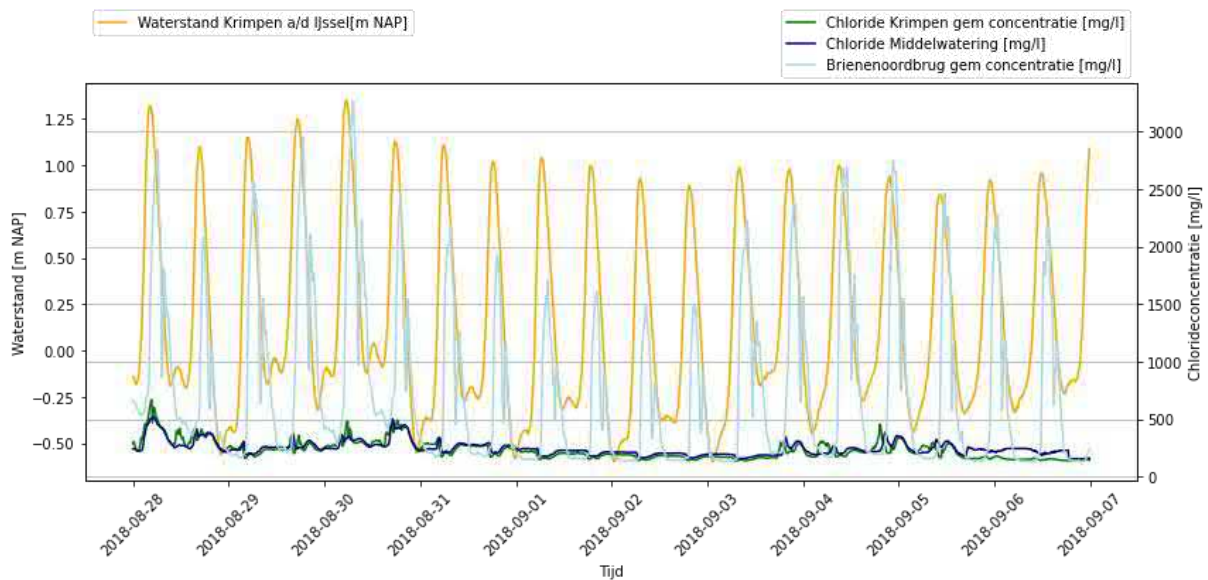


Figuur 67: Chlorideconcentraties bij inlaat Middelwatering en het debiet bij Brienenoord voor de periode 21 augustus tot 29 augustus 2018

In Figuur 68 is een mooie tweedeling te zien, met getijden waarvoor bij vloed de concentratie omhoog piekt (mondning verzilt/zouter dan Hollandsche IJssel) en getijden waarvoor bij vloed de concentratie daalt (mondning zoet). In Figuur 69 is de concentratie benedenstrooms bij Brienenoord toegevoegd. Het verschil in concentratie is bij Brienenoord (op de Nieuwe Maas) ook terug te zien, wat een indicatie kan zijn voor momenten waarbij de monding verzilt is.

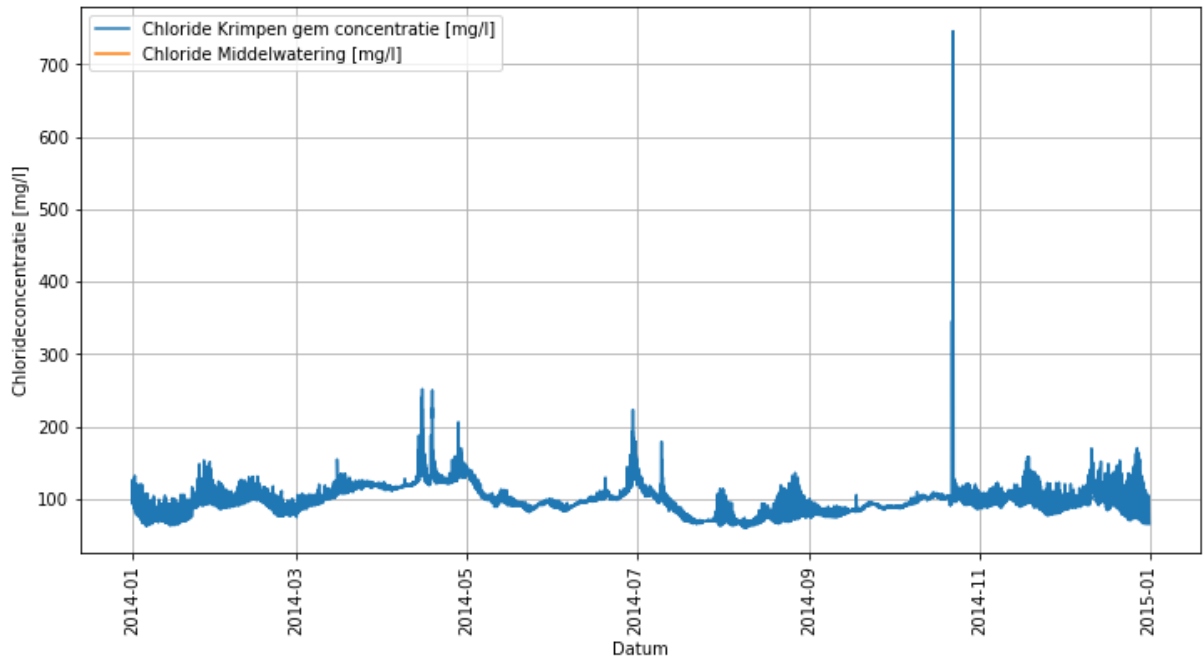


Figuur 68: Chlorideconcentraties met de waterstand bij inlaat Middelwatering voor de periode 28 augustus tot 7 september 2018

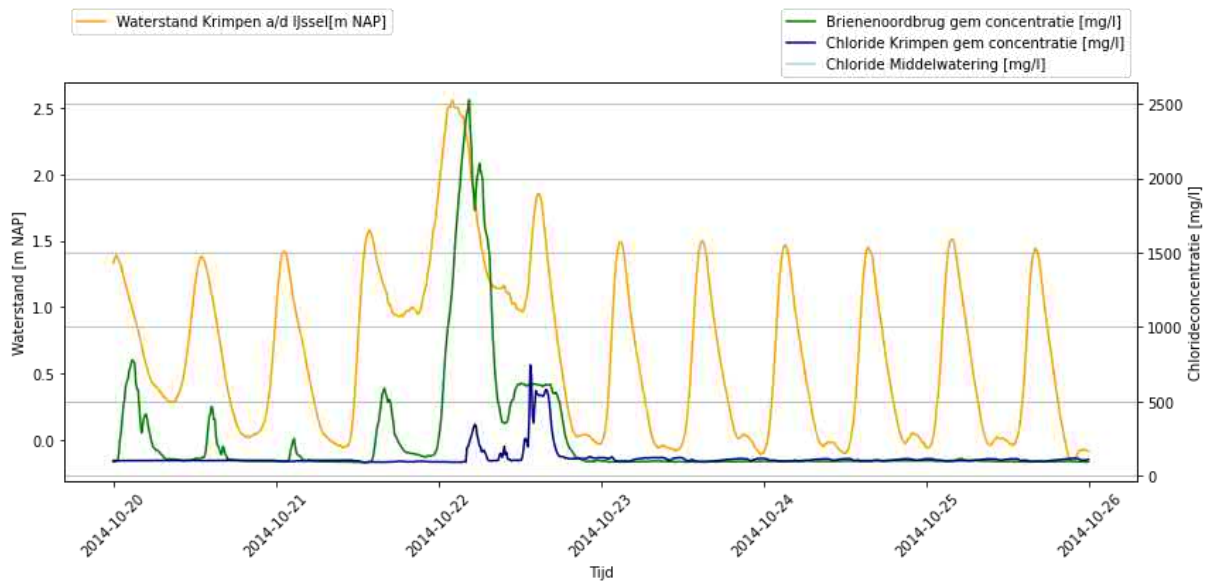


Figuur 69: Chlorideconcentraties met de waterstand bij inlaat Middelwatering met Brienoord voor de periode 28 augustus tot 7 september 2018

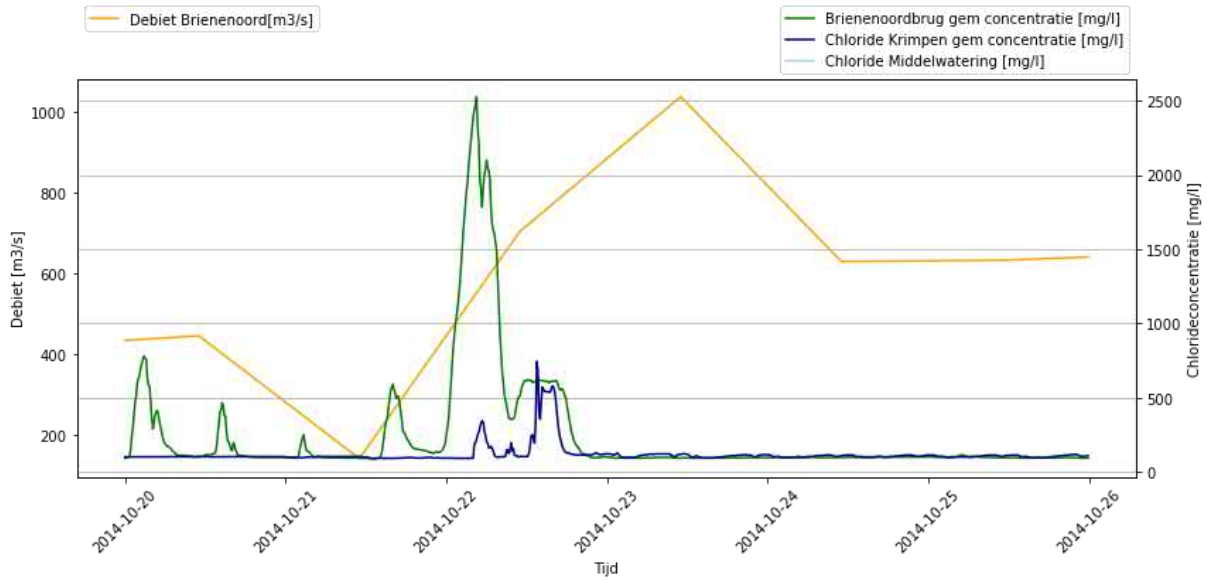
In Figuur 70 is rond oktober een piek in de chlorideconcentratie te zien in het jaar 2014. Hierop is ingezoomd in Figuur 71. In de ingezoomde figuur is te zien dat voor de grote piek een verhoogd hoogwater is gemeten, waarna de chlorideconcentratie stijgt. Het daarop volgende getij laat een extra hoge gemeten chlorideconcentratie zien. Het extra hoogwater is een gevolg van een herfststorm op 21 oktober 2014 waarbij de stormvloedkering Hollandsche IJssel ook is gesloten. Door de storm is het gebied tussen de monding en de Hollandsche IJsselkering tijdelijk sterk verzilt. Tijdens het volgende getij, wanneer de kering weer open is, beweegt dit verzilte water stroomopwaarts de Hollandsche IJssel op. De gemeten afvoer op de Nieuwe Maas bij Brienoord is door de windopzet van de storm ook lager, wat te zien is in Figuur 72.



Figuur 70: Chlorideconcentraties met de waterstand bij Krimpen a/d IJssel, 2014 (Middelwatering bevat geen meting in deze periode)

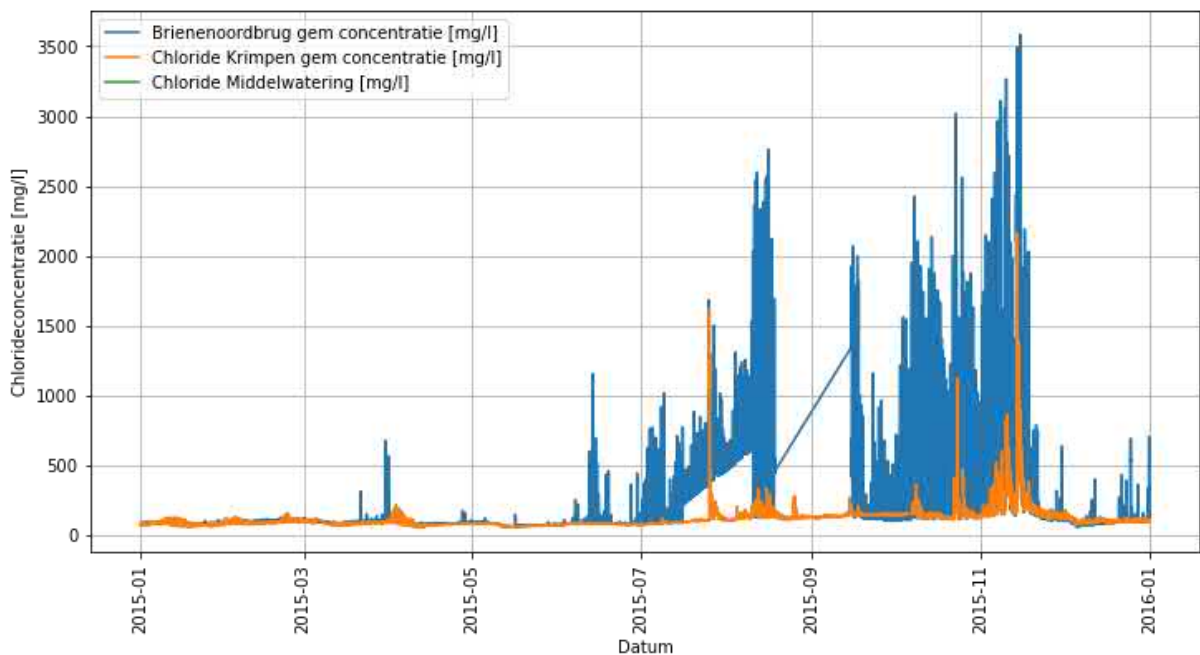


Figuur 71: Chlorideconcentraties met de waterstand bij Krimpen a/d IJssel voor de periode 20 oktober tot 26 oktober 2014 (Middelwatering bevat geen meting in deze periode)



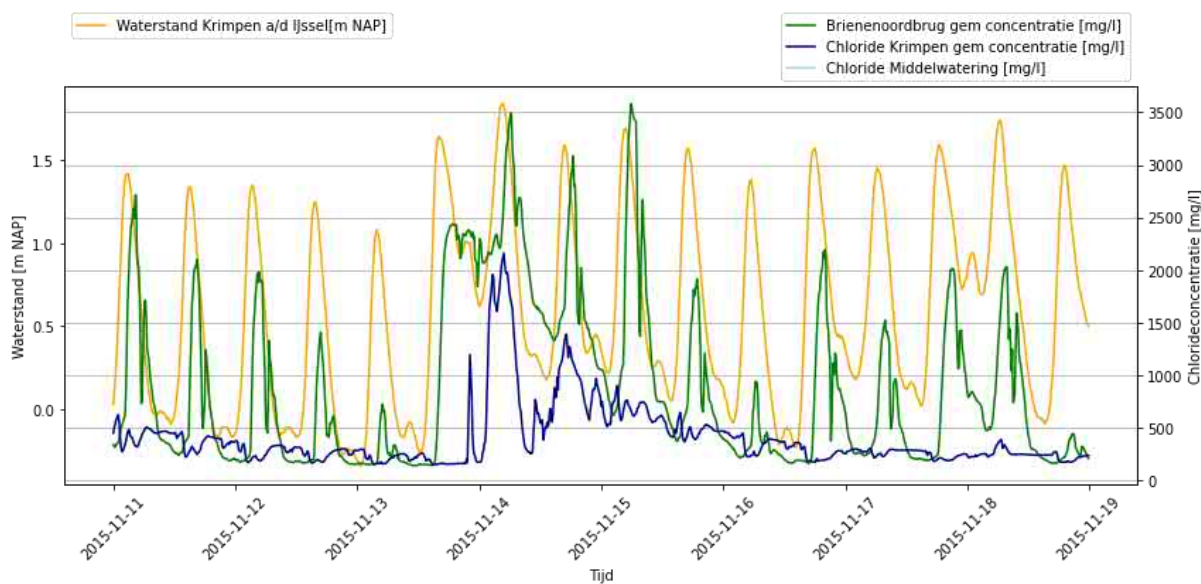
Figuur 72: Chlorideconcentraties bij Krimpen a/d IJssel en het debiet bij Brienoord voor de periode 20 oktober tot 26 oktober 2014 (Middelwatering bevat geen meting in deze periode)

In 2015 op 25 juli is eenzelfde principe te zien, waar een relatief zware zomerstorm overkwam en voor een verhoogde hoogwaterstand zorgde bij Krimpen aan den IJssel. Het getij daarna resulteert weer in een verhoogde chlorideconcentratie. Korte stormen lijken dus een goede proxy voor aankomende verhoogde chlorideconcentraties.

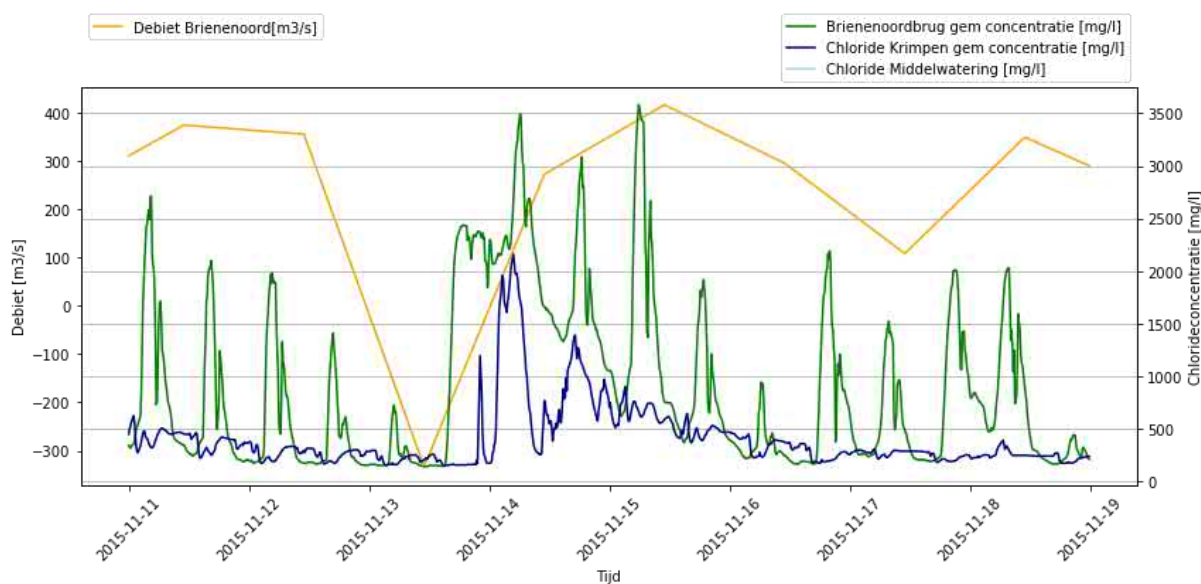


Figuur 73: Chlorideconcentraties met de waterstand bij Krimpen a/d IJssel, 2015 (Middelwatering bevat geen meting in deze periode)

In Figuur 73 is een langere periode met verhoogde chlorideconcentratie zien rond november van 2015. Op 13 november 2015 is een storm geweest met verhoogd water door windopzet, ingezoomd te zien in Figuur 74. De monding blijft langer verzilt na de novemberstorm dan bij de storm van 22 oktober 2014 en 25 juli 2015. Met de verhoogde waterstand tijdens de storm is weer een verlaagde afvoer bij Brienoord gemeten, te zien in Figuur 75.



Figuur 74: Chlorideconcentraties met de waterstand bij Krimpen a/d IJssel voor de periode 11 november tot 19 november 2015



Figuur 75: Chlorideconcentraties bij Krimpen a/d IJssel en het debiet bij Brienenoord voor de periode 11 november tot 19 november 2015

Samenvattend geldt het volgende voor de inlaat Middelwatering aan de Hollandsche IJssel:

- Onder normale omstandigheden is het water hier voldoende zoet, met chlorideconcentraties onder 400 mg/l. Verhoogde chlorideconcentraties komen voor door windopzet en in zeer droge periodes.
- Tijdens vloed is een stijging van chlorideconcentraties zichtbaar als de monding verzilt is en een daling als de monding zoet is.
- In augustus 2018 was sprake van een bijzondere combinatie van droogte en krachtige westenwind, waardoor de Hollandsche IJssel vrij langdurig verzilt is geweest.
- Er treedt verzilting op bij Rijnafvoeren onder de 1400 m³/s.

5 Statistische analyse

Dit hoofdstuk geeft inzicht in de analyse die is uitgevoerd om tot de sturingsregels te komen voor de verschillende inlaten met betrekking tot zoetwaterinlaatvensters. Vanwege de getijde invloed in de Rijn-Maasmonding is het van meerwaarde om inzicht te hebben in de te verwachte inlaatvensters komende dagen. In paragraaf 5.1 zijn verschillende methodes en aanpakken benoemd welke goed en minder goed werken. Het testen van mogelijke variabelen en methodes is voornamelijk steeds één getij vooruit gedaan. Het doel was hierbij om 10 getijden vooruit te voorspellen waarvoor ook de resultaten van de gebruikte modellen en de modellen zelf zijn weergegeven (§5.2 en §5.3).

Van de zeven onderzochte inlaten zijn er zes die via een zijhaven aan de Nieuwe Maas liggen. Daarom start dit hoofdstuk met de modelkeuzes (§5.1) en modelbeschrijving (§5.2) voor de chlorideconcentraties op de Nieuwe Maas. Vervolgens komen de inlaatpunten in de zes zijhavens aan de orde (§5.3). Deze vertonen gedrag wat in de tijdreeksanalyse ook naar voren is gekomen, met demping van de fluctuaties ten opzichte van de Nieuwe Maas. Vervolgens verschuift de focus van de Nieuwe Maas naar de Hollandsche IJssel (§5.4).

5.1 Modelkeuzes Nieuwe Maas

Voor de verkenning van relaties binnen de dataset van de Nieuwe Maas is gebruik gemaakt van de tijdreeksanalyse (H4) en een SOM-analyse. Een SOM-analyse is een techniek waarmee verbanden binnen datasets gevonden kunnen worden door overeenkomstige groepen te visualiseren. De resultaten van deze SOM-analyse zijn te vinden in bijlage A.1. De SOM-analyse heeft geen verrassende inzichten geleverd voor de Lekhaven. De inzichten die naar voren kwamen waren redelijk voor de hand liggend: rivierafvoer en zeewaterstand (eventueel indirect, in de vorm van het verhang) zijn de bepalende parameters voor de zoutconcentratie.

Voor de inlaten aan de Nieuwe Maas zijn verschillende benaderingen toegepast en vergeleken. Deze worden hier op hoofdlijnen beschreven, met de focus op de succesvolle benaderingen. Het benoemen van de minder succesvolle pogingen blijft daarnaast ook waardevol voor toekomstige studies. De onderzochte inlaten aan de Nieuwe Maas onttrekken allemaal water vanuit een zijhaven.

5.1.1 Direct of indirect modelleren van zijhavens

Vanwege de ligging in zijhavens van de onderzochte inlaten aan de Nieuwe Maas was het van belang om te onderzoeken of de chlorideconcentratie het beste direct of indirect in de zijhaven berekend kon worden.

Met directe zijhaven modellering wordt een statistisch model bedoeld wat rechtstreeks de chlorideconcentratie in de zijhaven Cl_{haven} voorspelt aan de hand van diverse verklarende parameters. Dit model ziet er in formulevorm bijvoorbeeld als volgt uit:

$$Cl_{\text{haven},t} = a_1 Cl_{\text{haven}, t-T} + a_2 Q_{\text{Lobith}, t-30h} + a_3 Cl_{\text{Lek}, t-T} + a_4 (Q_{b,t} Cl_{b,t}) \quad (2)$$

Waarin:

- $Cl_{haven,t}$ is de chlorideconcentratie in de zijhaven op tijdstip t (mg/l)
- $Cl_{haven,t-T}$ is de chlorideconcentratie in de zijhaven één getijperiode T voor het tijdstip t (mg/l)
- $Cl_{Lekh,t-T}$ is de chlorideconcentratie op de Nieuwe Maas bij locatie Lekhaven één getijperiode T voorafgaand aan het tijdstip t (mg/l)
- $Q_{Lobith,t-30h}$ is de rivierafvoer bij Lobith, 30 uur voor het tijdstip t (m^3/s)
- $Q_{b,t}$ is de boezemafvoer op tijdstip t (m^3/s)
- $Cl_{b,t}$ is de chlorideconcentratie van het boezemwater op het tijdstip t (mg/l)
- a_1 t/m a_4 zijn regressiecoëfficiënten

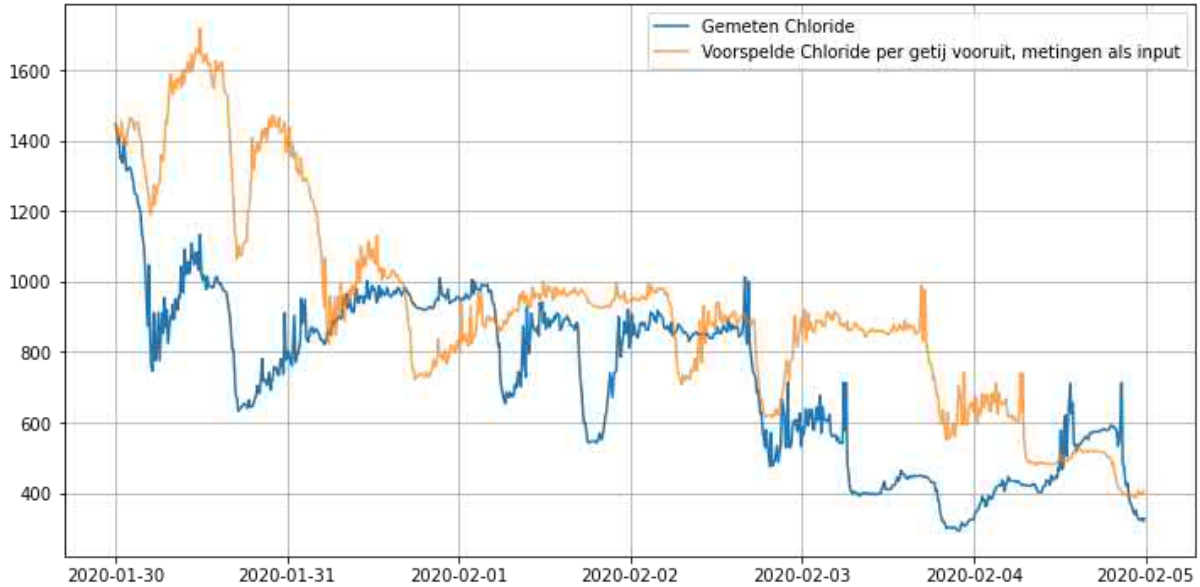
Met indirecte modellering van de zijhavens wordt bedoeld dat een statistisch model wordt toegepast voor het berekenen van chlorideconcentratie op de Nieuwe Maas bij meetlocatie Lekhaven als tussenstap, waarna vanaf de Nieuwe Maas de zijhavens in wordt gerekend. De concentraties bij Lekhaven zijn in dit onderzoek beschouwt als concentraties op de Nieuwe Maas. In werkelijkheid ligt het meetpunt langs de Nieuwe Maas, in de monding van een insteekhaven. Mogelijk is hier daarom een hybride vorm van het gedrag op de Nieuwe Maas en enigszins zijhavengedrag zichtbaar. Dit betekent dat Lekhaven representatief is voor de chlorideconcentratie in de monding van de zijhavens langs de Nieuwe Maas. Bij de zijhavens is het moment van hoogtij en de maximale chlorideconcentratie vaak gelijk. Bij de Nieuwe Maas, afhankelijk van de locatie, is het moment van maximale chlorideconcentratie een aantal uur na hoogtij zoals bij de meetlocatie Brienoordbrug, wat ook te zien is in §4.1.

Voor het berekenen van de chlorideconcentratie in de zijhaven op basis van de concentraties op de Nieuwe Maas wordt op elk tijdstip gebruik gemaakt van een fysische benadering, waarbij de chlorideconcentratie in de zijhaven op elke tijdstip wordt geforceerd door het concentratieverschil tussen de zijhaven en de Lekhaven en (indien van toepassing) het uitgemalen boezemwater op het voorgaande tijdstip (10 minuten geleden).

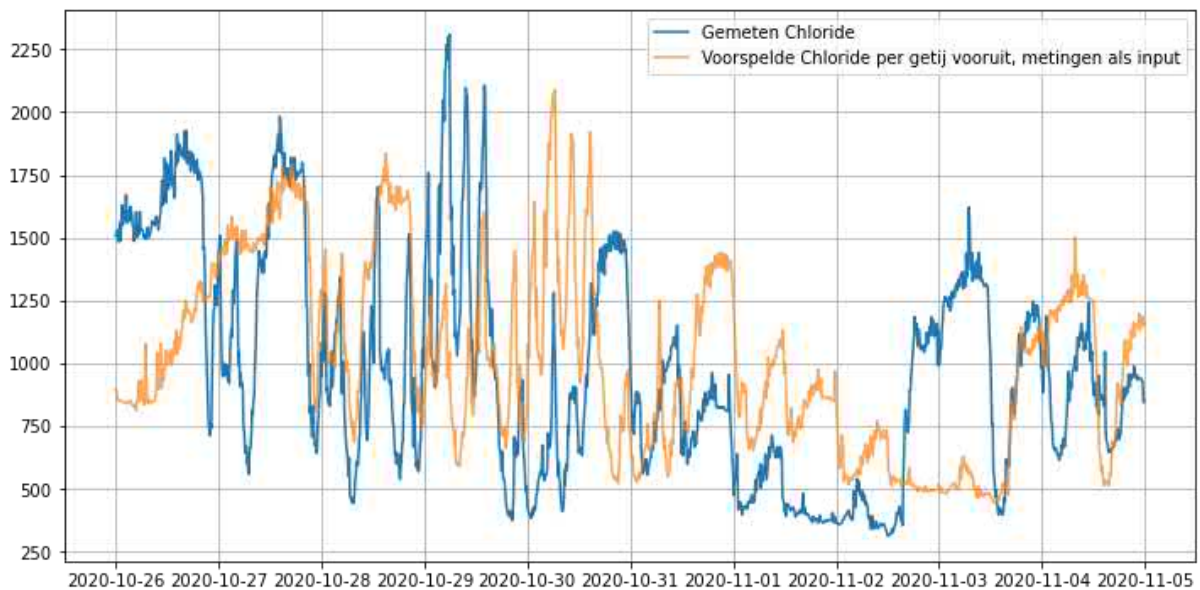
Het vooruit voorspellen met het statistisch model met twee getijden vooruit geeft de beste resultaten, wat verband houdt met de dagelijkse ongelijkheid van het getij. Bij het direct modelleren van de zijhaven via een statistisch model is gebleken dat de kleinste fout behaald wordt bij het gebruik van:

- Chlorideconcentratie in de zijhaven 2 getijden terug;
- Rivierafvoer bij Lobith met een vertraging van 30 uur;
- De waterstand bij Hoek van Holland met een vertraging van 120 minuten.

De resultaten van het direct modelleren laten zien dat de invloed van de chlorideconcentratie het voorgaande getij dominant is over de rivierafvoer en de waterstand (op basis van minimaliseren van de kwadratische fout (RMSE)). Dit resulteert in Figuur 76 en Figuur 77, waarbij te zien is dat de voorspelling erg veel lijkt op de gemeten chlorideconcentratie, maar dan twee getijden verschoven. Daarmee heeft het statistische model weinig voorspellende waarde, anders dan veronderstellen dat de chlorideconcentratie gelijk zal zijn aan de concentratie van twee getijden terug.

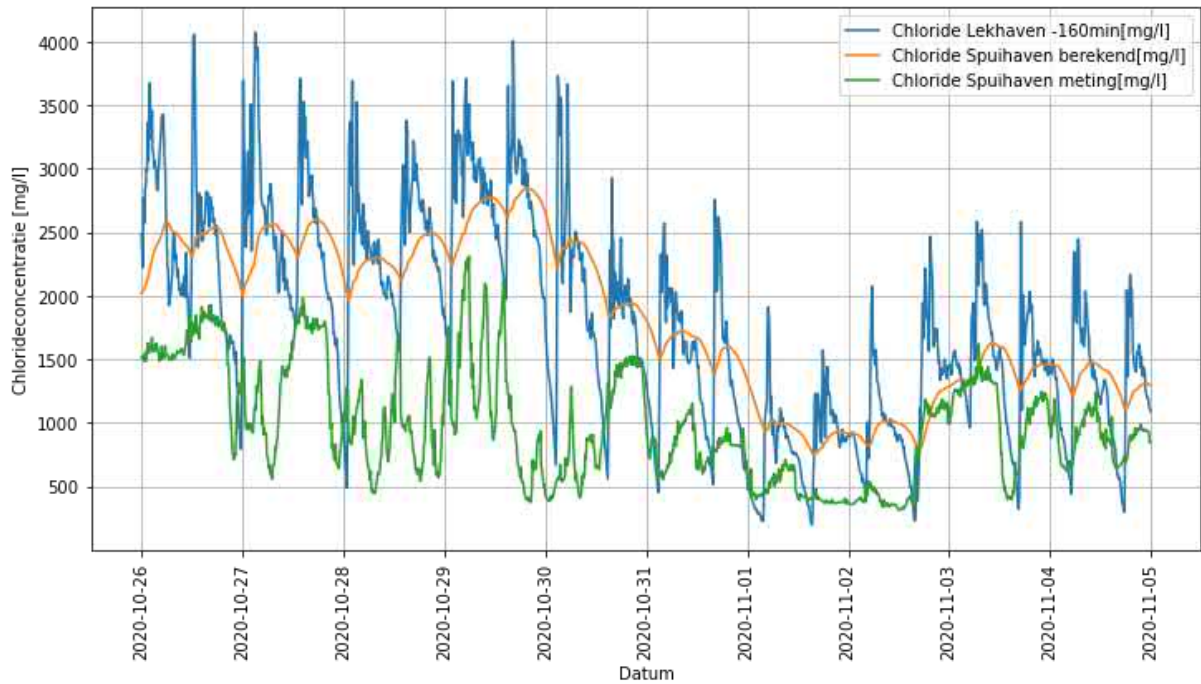


Figuur 76: Directe modellering Spuihaven, begin februari 2020, voorspelling één getijperiode vooruit per keer

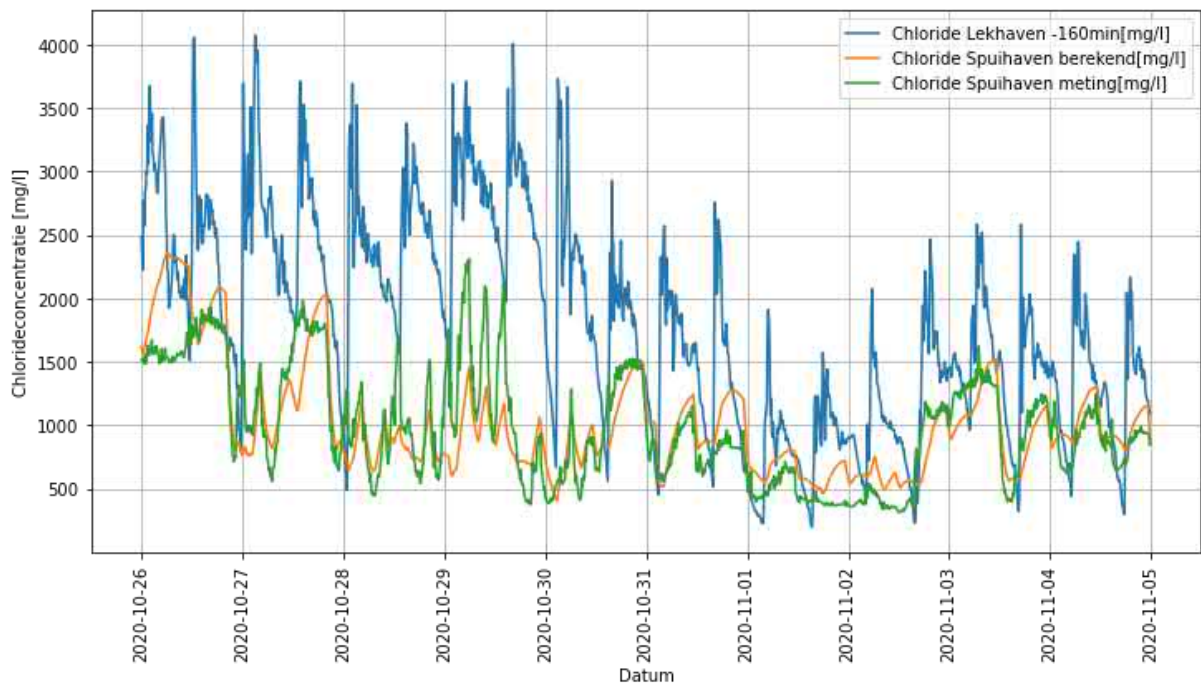


Figuur 77: Directe modellering Spuihaven, eind oktober 2020, voorspelling één getijperiode vooruit per keer

Directe statistische modellering van de zijhavens heeft niet tot goede resultaten geleid. Indirect de concentratie in de zijhavens voorspellen geeft betere resultaten. De formule voor het indirect modelleren is te vinden in §5.3.1. In Figuur 78 is het resultaat te zien waarbij de boezemafvoer via het Schiegemaal initieel op 0 is gezet, zodat het effect hiervan inzichtelijk wordt. Verder voor het overzicht is in dit voorbeeld nog de gemeten Lekhaven concentratie gebruikt als invoer voor de indirecte zijhaven bepaling. De volledige zijhaven bepaling bevat het voorspellen van Lekhaven voorgaand. In Figuur 79 is de boezemafvoer wél meegenomen. Het verschil in resultaat laat zien dat de boezemafvoer in de Spuihaven een grote rol speelt in de chlorideconcentratie van deze zijhaven. Bij het berekenen van de concentraties in de Spuihaven (de oranje lijn) is in het geheel geen gebruik gemaakt van de gemeten concentraties in de Spuihaven (de groene lijn). Toch is er een goede overeenkomst tussen de berekende en gemeten concentraties.



Figuur 78: Indirect modelleren Spuihaven zonder uitmaaldebiet, start begin van de reeks zonder reset tussendoor.



Figuur 79: Indirect modelleren Spuihaven met uitmaaldebiet, start begin van de reeks zonder reset tussendoor.

Conclusie

Uit deze resultaten wordt geconcludeerd dat indirect modelleren van de zijhaven een betere aanpak is dan direct de zijhaven statistisch modelleren. Dit betekent dat de chlorideconcentratie bij meetlocatie Lekhaven voorspeld moet worden, zodat in een tweede stap de chlorideconcentratie in de zijhavens kan worden voorspeld. De volgende paragrafen beschrijven het proces dat heeft geleid tot een model om de chlorideconcentratie bij locatie Lekhaven te modelleren.

5.1.2 Absoluut model of verschilmodel

In de vorige paragraaf is gebleken dat de chlorideconcentratie op de Nieuwe Maas bij locatie Lekhaven gebruikt kan worden om de zijhavens in te rekenen. Voor het statistisch modelleren van de chlorideconcentratie bij Lekhaven zijn er twee mogelijkheden:

1. Een absoluut model, waarin de absolute chlorideconcentratie wordt gemodelleerd door het vermenigvuldigen van verschillende verklarende parameters met een regressiecoëfficiënt.
2. Een verschilmodel, waarin het verschil in chlorideconcentratie over een bepaalde periode (in dit geval: een getijperiode) wordt gemodelleerd aan de hand van het verschil in verschillende verklarende parameters over dezelfde periode, vermenigvuldigd met een regressiecoëfficiënt.

Voor deze twee mogelijkheden zijn hieronder in formulevorm weergegeven voor een voorbeeld waarin de verklarende parameters (i) chlorideconcentratie in het voorgaande getij, (ii) rivierafvoer bij Lobith Q_{Lobith} en (iii) waterstand bij Hoek van Holland h_{HvH} :

Absoluut model:

$$Cl_t = a_1 * Cl_{t-T} + a_2 * Q_{Lobith,t-30h} + a_3 * h_{HvH,t} \quad (3)$$

Vershilmodel:

$$Cl_t - Cl_{t-T} = a_1(Cl_{t-T} - Cl_{t-2T}) + a_2(Q_{Lobith,t-30h} - Q_{Lobith,t-30h-T}) + a_3(h_{HvH,t} - h_{HvH,t-T}) \quad (4)$$

Uit beide manieren blijkt dat 1 à 2 getijden vooruit voorspellen vrij goed gaat. Absoluut modelleren geeft een onderschatting bij de lagere chlorideconcentraties, vanaf ongeveer de 400 mg/l, maar benadert het hele bereik beter. Het verschilmodel resulteert in een model dat minder fluctuatie laat zien, maar ook minder een onderschatting modelleert. In beide gevallen is de chlorideconcentratie of het verschil in chlorideconcentratie in het voorgaande getij de dominante verklarende parameter.

Met het gebruik van de chlorideconcentratie in het vorige getij als invoervariabele bleek deze parameter een erg dominante regressiecoëfficiënt te krijgen, waardoor het signaal in de volgende getijden zeer sterk bleef lijken op de voorgaande getijden. Echter, zonder gebruik te maken van de concentratie in het voorgaande getij was er onvoldoende respons van de chlorideconcentratie op de invoervariabelen afvoer en waterstand om het gedrag van chlorideschommelingen accuraat te beschrijven.

5.1.3 Definitie verklarende parameter voor rivierafvoer

De invloed van rivierafvoer is getest, waarbij verschillende locaties en bewerkingen zijn toegepast. Twee locaties zijn onderzocht: de rivierafvoer bij Lobith en de rivierafvoer bij Brienenoord. Het gebruik van de rivierafvoer bij Lobith geeft met het meenemen van een tijdsvertraging van 30 uur betere resultaten dan de rivierafvoer bij Brienenoord. De rivierafvoer bij Brienenoord is daarnaast ook niet real-time beschikbaar omdat de afvoer afgeleid wordt met een model door Rijkswaterstaat. De rivierafvoer bij Lobith is afgeleid van een real-time meetwaarde (Q-h relatie), waarbij ook een verwachting vooruit beschikbaar is.

De gebruikte tijdsvertraging van 30 uur voor de afvoer bij Lobith is bepaald door de correlatie tussen de rivierafvoer Lobith en de chlorideconcentratie Lekhaven te maximaliseren. Het gebruik van een tijdsvertraging bleek tot betere resultaten te leiden. De resultaten verbeterden verder door het gebruik van een exponentfunctie voor de rivierafvoer in de vorm van $Q_{exp} = \exp(-Q/1000)$. Het delen door 1000 m³/s zorgt ervoor dat de exponent niet te klein wordt en naar nul gaat, waarbij het debiet varieert ongeveer tussen de 700 en 9400 m³/s op basis van de data. Echter de relatieve

debietverandering (relatieve verandering over een getij, ΔQ_{rel}) wel. De relatieve debietverandering komt neer op:

$$\Delta Q_{rel} = \frac{(Q_{Lobith\ t-30h} - Q_{Lobith\ t-30h-T})}{Q_{Lobith\ t-30h-T}} \quad (5)$$

Het gebruik van de relatieve debietverandering zorgt voor een verdere verbetering in het voorspelmogelijk van het verschilmodel voor de chlorideconcentratie bij Lekhaven. Door niet het absolute maar het relatieve verschil mee te nemen, wordt meegenomen dat een verandering met bijvoorbeeld 50 m³/s meer invloed heeft bij 1000 m³/s dan bij 5000 m³/s.

5.1.4 Definitie verklarende parameter voor de zeewaterstand

Ook de invloed van (zee)waterstand is getest voor verschillende locaties en bewerkingen. De zeewaterstand bij Hoek van Holland (h_{HvH}) is als basis genomen. Het gebruik van de zeewaterstand bij Hoek van Holland resulteert met het meenemen van een tijdsvertraging van 120 minuten in betere resultaten. De gebruikte tijdsvertraging van 120 minuten is bepaald door de correlatie tussen de zeewaterstand Hoek van Holland en de chlorideconcentratie bij Lekhaven te maximaliseren.

Daarnaast is ook de waterstand bij Rotterdam en Maassluis getest. Hierbij kwam de (zee)waterstand bij Hoek van Holland naar voren als invoervariabele die resulteerde in de kleinste RMSE van de drie locaties.

Het Getij Gemiddelde Verhang (GGV), een parameter die Rijkswaterstaat gebruikt binnen een vuistregel voor het voorspellen van verzilting (Rijkswaterstaat 2018), gaf een beter resultaat dan de zeewaterstand $h_{HvH\ t-120min}$. De in dit onderzoek gebruikte GGV is aangepast door Hoek van Holland tot Rotterdam te gebruiken i.p.v. tot Moerdijk, waardoor dit niet exact dezelfde parameter is als Rijkswaterstaat gebruikt. Met deze variabele wordt het verhang over het afgelopen getij gesommeerd, evenals het verhang over het getij daarvoor. Hierbij telt de som van het meest recente getij dubbel, waardoor de meest recente verandering meer invloed heeft. In formule vorm ziet dit er als volgt uit:

$$GGV = 2 * \sum_{t-T}^t verhang_{HvH-Rotterdam} + 1 * \sum_{t-2T}^{t-T} verhang_{HvH-Rotterdam} \quad (6)$$

In eerdere pogingen gaf het verhang alleen geen toegevoegde waarde boven de variabele zeewaterstand bij Hoek van Holland. Dit gaf de aanleiding om het principe van een getijgemiddelde ook toe te passen op de zeewaterstand Hoek van Holland in de vorm van:

$$GGdh = 2 \sum_{t-T}^t (h_{HvH, t-120min} - h_{HvH, t-120min-T}) + \sum_{t-2T}^{t-T} (h_{HvH, t-120min-T} - h_{HvH, t-120min-2T}) \quad (7)$$

De som van het verhang over het afgelopen getij (verschil waterstand afgelopen getij met het getij ervoor) maal twee plus de som over het getij daarvoor wordt gezien als de GGdH. Het verhang is hierbij bepaald door het verschil in waterstand van een moment met hetzelfde moment een getij geleden. De GGdh geeft als invoervariabele een betere voorspelling van chlorideconcentratie bij Lekhaven dan de GGV.

Verder zijn er nog alternatieve beschrijvingen van het effect van de zeewaterstand geprobeerd die minder goed het gedrag van de chlorideconcentratie beschreven dan de GGdh in de regressiemodellen zoals:

- Waterstand bij Rotterdam (Nieuwe Maas)
- Waterstand bij Maassluis (Nieuwe Maas)
- Verhang (Hoek van Holland tot Rotterdam)
- Verhang (Hoek van Holland tot Maassluis)
- Δh (Verschil in waterstand Hoek van Holland tussen nu en een getij geleden)

5.1.5 Afvoerafhankelijke respons

In de bovenstaande paragrafen is naar voren gekomen dat de relatieve debietverandering (ΔQ_{rel}) en de Getij Gewogen Waterstandsverandering HvH ($GGdh$) verklarende variabelen zijn waarmee de chlorideconcentratie bij Lekhaven 1 à 2 getijden vooruit goed voorspeld kan worden. Echter viel het op dat het nog niet overall even goed ging, vooral niet bij verder dan 2 getijden vooruit voorspellen. De invloed van de vorige chlorideconcentratie of verandering in chlorideconcentratie kreeg een hoge regressiecoëfficiënt en domineert toekomstige concentraties. De respons op veranderingen in zeewaterstanden en debiet was vaak onvoldoende sterk, zeker als deze vrij plotseling optreden. Daarnaast is in hoofdstuk 4 bij de tijdreeksanalyses te zien dat chlorideconcentraties sneller reageren op veranderingen in debiet en waterstand bij lage afvoeren dan bij hoge rivierafvoeren.

Om deze reden is ervoor gekozen om niet met één set regressiecoëfficiënten te werken, maar over te stappen op een afvoerafhankelijke set regressiecoëfficiënten, dat zonder de informatie over voorgaande chlorideconcentraties de concentratieverandering bepaalt (verschilmodel, zie §5.1.2). Dit komt neer op het bepalen van de invloed van de relatieve debietverandering (ΔQ_{rel}) en de $GGdh$ op de verandering in chlorideconcentratie van de huidige tijdstap ten opzichte van 1 getij geleden (ΔCl). Hiervoor is per debietsklasse, in stappen van 500 m³/s, onderzocht wat de mediane respons is van de chlorideconcentratie op deze twee verklarende parameters: $\Delta Cl/\Delta Q_{rel}$ en $\Delta Cl/GGdh$. De mediane responsen zijn nog iets aangescherpt door het verder minimaliseren van de RMSE tussen model en metingen bij Lekhaven. In deze geoptimaliseerde vorm worden deze responsen gebruikt als regressiecoëfficiënten r_Q en r_h voor ΔQ_{rel} en $GGdh$ in de afvoerafhankelijke formule.

De afvoerafhankelijke formule is te vinden in §5.2.1, waar de formule en de bepaalde coëfficiënten verder beschreven worden. Omdat voor beide invoervariabelen de regressiecoëfficiënten apart zijn bepaald, is er nog een kalibratiecoëfficiënt nodig waarbij de combinatie van beide invoervariabelen tot de kleinste RMSE komt, in dit geval om daarmee 10 getijden vooruit te modelleren. Elke 10 getijden wordt de gemeten chlorideconcentratie overgenomen. Op basis daarvan voorspelt het model het volgende getij. Deze voorspelling wordt iteratief 9 keer doorgegeven aan volgende getijden, waarbij veranderingen in de rivierafvoer en zeewaterstand voor verandering kunnen zorgen.

Deze afvoerafhankelijke aanpak geeft een grote verbetering ten opzichte van een enkele set regressiecoëfficiënten dat het hele bereik aan chlorideconcentraties moet beschrijven. Met deze afvoerafhankelijke aanpak is de invloed van de invoervariabele veel beter te bepalen in de verschillende bereiken van het systeem. Bij lage rivierafvoer is een verandering in debiet of zeewaterstand sterker van invloed op de chlorideconcentratie dan tijdens hoge rivierafvoeren, waarbij de rivier het zeewater verder stroomafwaarts duwt. Deze aanpak verhelpt het in §5.1.2 gesignaleerde probleem dat een enkele set regressiecoëfficiënten de variatie over het gehele bereik aan rivierafvoeren en waterstanden niet adequaat kon beschrijven.

5.2 Modelling locatie Lekhaven, Nieuwe Maas

In paragraaf 5.1.1 is gebleken dat de chlorideconcentratie bij Lekhaven gebruikt kan worden om de zijhavens in te rekenen. De chlorideconcentratie bij Lekhaven kan bepaald worden door statistisch de chlorideconcentratie te modelleren. Het uiteindelijk gekozen model, een verschilmodel met afvoerafhankelijke regressiecoëfficiënten, wordt in deze paragraaf beschreven. Hierbij wordt steeds 10 getijden vooruit voorspelt.

5.2.1 Modelbeschrijving

Deze paragraaf beschrijft het model dat uiteindelijk tot de beste resultaten leidt voor locatie Lekhaven: een verschilmodel (§5.1.2) met afvoerafhankelijke regressiecoëfficiënten (§5.1.5). Deze aanpak modelleert de verandering in chlorideconcentratie ten opzichte van één getij geleden voor een variabel aantal getijden vooruit. De verandering in chlorideconcentratie wordt bepaald door verandering in rivierafvoer bij Lobith in de vorm van de ΔQ_{rel} (§5.1.3) en de verandering in waterstand bij Hoek van Holland in de vorm van de $GGdh$ (§5.1.4).

Het statistische model heeft de volgende vorm:

$$Cl_{Lekhaven, t} = \max (cl_{min}, cl_{Lekhaven, t-T} + C_{\Delta Q_{rel}} * r_{\Delta Q_{rel}} * \Delta Q_{rel} + C_{GGdh} * r_{GGdh} * GGdh) \quad (8)$$

Met:

- t: tijd van interesse
- T: een getij periode
- $cl_{min} = 50 \frac{mg}{l}$ minimum aan chlorideconcentratie
- $r_{\Delta Q_{rel}}$ en r_{GGdh} = debietklasse afhankelijke regressiecoëfficiënt voor $\frac{\Delta cl}{\Delta Q_{rel}}$ en $\frac{\Delta cl}{GGdh}$
- $C_{\Delta Q_{rel}}$ en C_{GGdh} = regelbare kalibratiecoëfficiënt voor ΔQ_{rel} en $GGdh$
- $C_{\Delta Q_{rel}} = 2.0$ en $C_{GGdh} = 1.2$ bepaalt door het minimaliseren van de RMSE
- $\Delta Q_{rel} = \frac{(Q_{Lobith, t-30h} - Q_{Lobith, t-30h-T})}{Q_{Lobith, t-30h-T}}$
- $GGdh = 2 * \sum_{t-T}^t (h_{HvH, t-120min} - h_{HvH, t-120min-T}) + 1 * \sum_{t-2T}^{t-T} (h_{HvH, t-120min-T} - h_{HvH, t-120min-2T})$

Via minimaliseren van de RMSE tussen metingen en 10 getijden vooruit voorspellen van het model zijn de kalibratiecoëfficiënten ingesteld op $c_Q = 2.0$ en $c_h = 1.2$.

De afvoerafhankelijke regressiecoëfficiënten beschrijven de respons van de chlorideconcentratie op een verandering van een verklarende parameters over één getijperiode. Deze regressiecoëfficiënten zijn bepaald door in de dataset de mediane $\Delta Cl / \Delta Q_{rel}$ en $\Delta Cl / GGdh$ te bepalen per debietklasse. Bijvoorbeeld de debietklasse van 1000 m³/s bevat dan alle tijdstippen in de tijdreeks met een rivierafvoer bij Lobith tussen 750 en 1250 m³/s. Vervolgens zijn de regressiecoëfficiënten nog aangescherpt om de RMSE per debietklasse te minimaliseren. Het eindresultaat is te zien in Tabel 16. Hierbij is goed terug te zien dat de invloed van een verandering van beide verklarende parameters groter is bij lage rivierafvoeren. Dit betekent wanneer de afvoer 10% toeneemt in een getij periode, ΔQ_{rel} is dan gelijk aan 0.1, dan daalt de chlorideconcentratie met 125 mg/l (=0.1*1250) binnen de debietsklasse van 1500 m³/s. Hier komt dan eenzelfde soort verandering bij welke bepaald wordt door de GGdH term.

Tabel 16: Afvoerafhankelijke regressiecoëfficiënten voor Lekhaven per debietklasse voor de afvoer bij Lobith, inclusief de RMSE tussen gemeten en gemodelleerde chlorideconcentraties per debietklasse

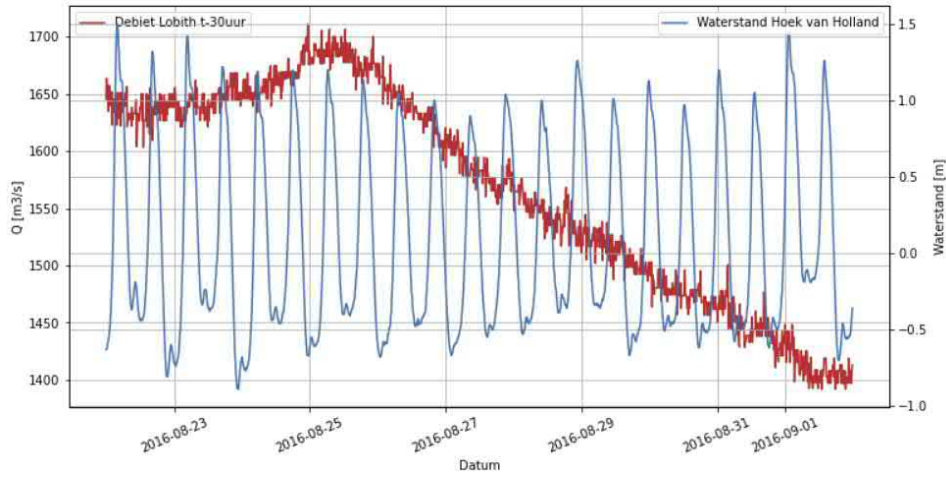
Q_{lobith}	r_Q [mg/l]	r_h [mg/l/m]	RMSE [mg/l]
500	-1700	14.00	766
1000	-1700	10.00	594
1500	-1250	7.82	564
2000	-1000	3.14	402
2500	-500	0.90	236
3000	-200	0.31	141
3500	-100	0.30	116
4000	-100	0.06	70
4500	-100	0.05	70
5000	-50	0.05	41
5500	-50	0.05	25
6000	-50	0.04	12
6500	-50	0.01	10
7000	-50	0.01	8
7500	-50	0.01	2

5.2.2 Resultaten

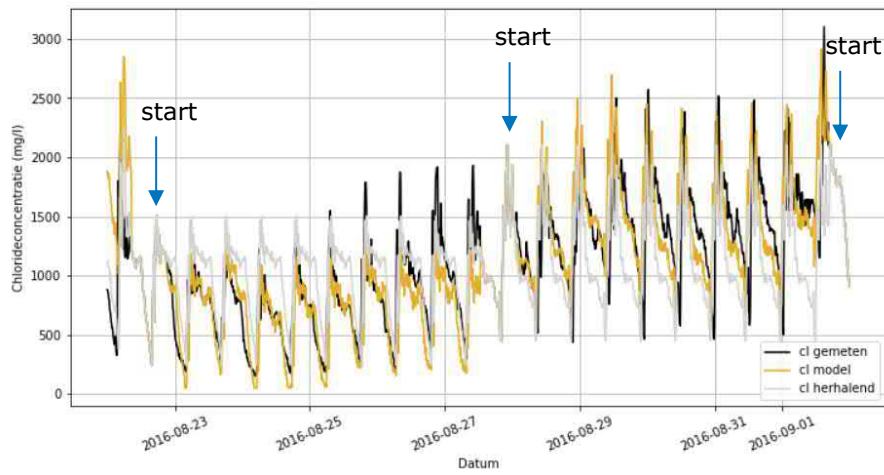
Deze paragraaf presenteert verschillende casestudies om inzicht te geven in de prestaties van het afvoerafhankelijke regressiemodel voor de chlorideconcentratie bij Lekhaven. Op deze manier zullen de sterke punten en de minder sterke punten in kaart worden gebracht. De figuren tonen de gemeten chlorideconcentratie bij Lekhaven (zwart), 10 getijden achtereen een identiek concentratieverloop (grijs) en een voorspelling voor dezelfde 10 getijden met het regressiemodel (oranje). De voorspelling is op basis van achteraf gemeten rivierafvoer bij Lobith en achteraf gemeten waterstanden bij Hoek van Holland. De grijze lijn vormt de 'base case' met het label 'herhalend': je verwacht dat de verzilting in de komende getijden identiek zal zijn aan de verzilting in het afgelopen getij zonder nadere informatie over de ontwikkeling van de zeewaterstand en de rivierafvoer. Het streven is om het regressiemodel meerwaarde te geven boven deze 'base case'. In de figuren is het 'start' moment aangegeven van de 10 getijden vooruit voorspelperiode. Na elke 10 getijden vooruit is er weer 1 getij gelijk aan de meting welke gebruikt wordt om de volgende 9 getijden te voorspellen.

Augustus 2016

Eind augustus 2016 is een afname te zien in de rivierafvoer bij Lobith (Figuur 80). De chlorideconcentratie bij Lekhaven neemt geleidelijk toe in de periode, zie Figuur 81. Voor deze hele periode benadert het Lekhaven model de gemeten concentraties behoorlijk goed. Rond 23 t/m 27 augustus is te zien dat de maxima van de pieken wat minder goed worden benaderd. De momenten dat de chlorideconcentratie in de Nieuwe Maas onder de inlaatgrens van 400 mg/l komt, 22 t/m 27 augustus, worden vrij goed gemodelleerd.



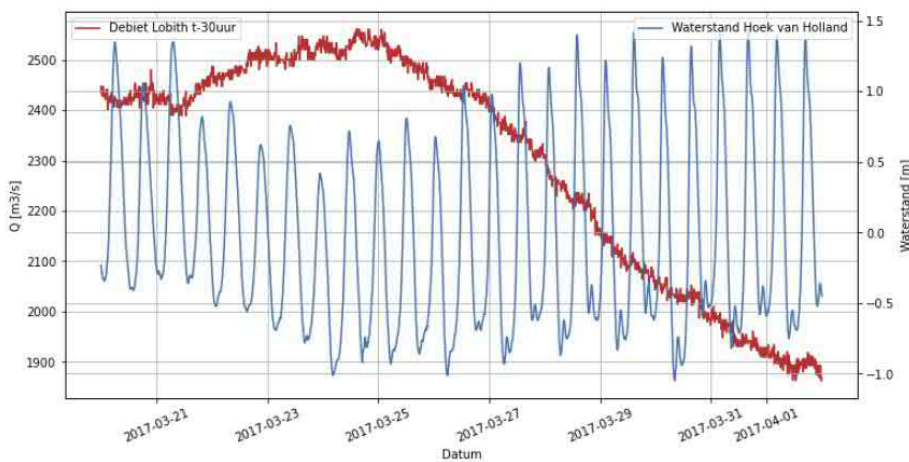
Figuur 80: Rivierafvoer Lobith en waterstand Hoek van Holland, augustus 2016



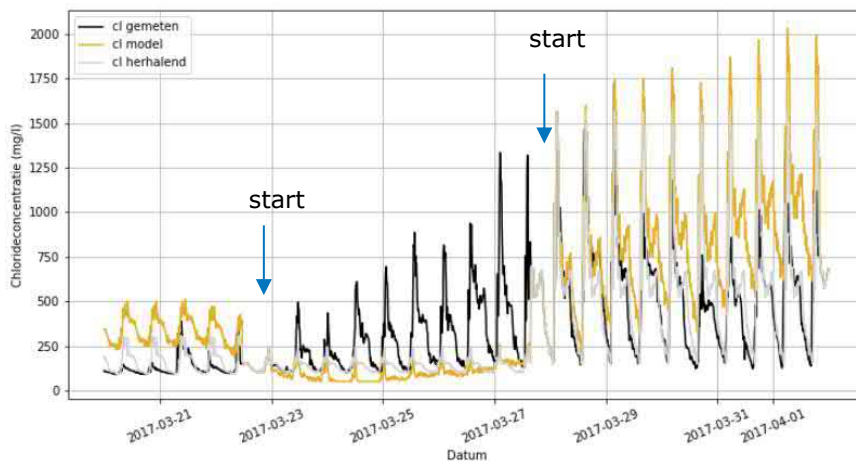
Figuur 81: Chlorideconcentratie bij Lekhaven, 22 augustus t/m 31 augustus 2016

Maart 2017

Eind maart 2017 is een kort toename gevolgd door een afname in rivierafvoer bij Lobith te zien (Figuur 82). De afvoerafhankelijke regressiecoëfficiënten van Tabel 16 zorgen ervoor dat de variabelen $GGdh$ en ΔQ_{rel} een relatief kleine invloed hebben bij deze relatief hoge rivierafvoer bij Lobith. Rond 23 t/m 27 maart is de reactie van het Lekhaven model te zwak om de gemeten chlorideconcentratie goed te benaderen, zie Figuur 83. Dit komt doordat het model start met de zeer lage concentraties op 23 maart. Op 27 maart neemt het model na 10 getijden weer de gemeten concentratie over. Na deze periode zie je dat de concentraties volgens het model toenemen, terwijl de metingen een daling laten zien. Dit is een periode met een duidelijk dalende rivierafvoer en vrij constante hoge zeewaterstanden. De gemodelleerde stijging van de chlorideconcentratie ligt dan ook in de lijn der verwachting. Dit houdt in dat er nog een ander effect aanwezig is dat niet compleet in de gekozen variabelen vervat is. Mogelijk spelen effecten op een langere tijdschaal dan twee getijden (zoals aanwezig in de $GGdh$) een rol.



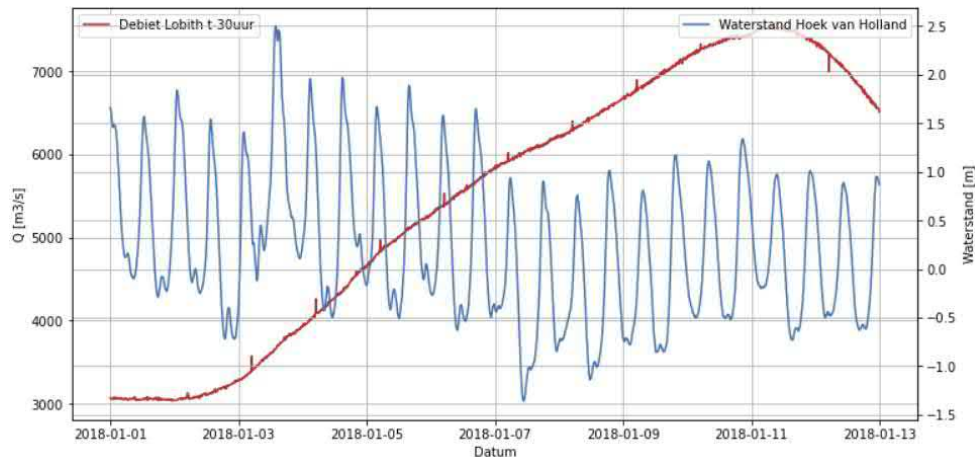
Figuur 82: Rivierafvoer Lobith en waterstand Hoek van Holland, 20 maart t/m 31 maart 2017



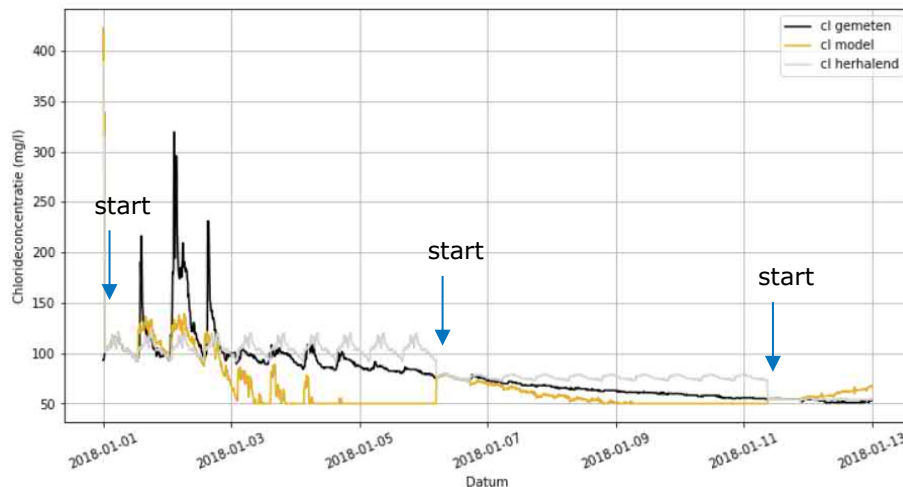
Figuur 83: Chlorideconcentratie bij Lekhaven, 20 maart t/m 31 maart 2017

Januari 2018

Begin januari 2018 is een sterke toename in de rivierafvoer bij Lobith te zien (Figuur 84). De rivierafvoer gaat in deze periode van ongeveer 3000 m³/s naar 7300 m³/s. Van 3 januari tot 6 januari is te zien dat het Lekhaven model te snel daalt door deze toename in rivierafvoer. De metingen laten tijdens het tweede getij van 1 januari een plotselinge piek zien, welke niet goed wordt gereproduceerd door het model. Dit zijn echter allemaal periodes waarin de chlorideconcentratie ver onder de inlaatgrens van 400 mg/l liggen. Vanaf 7 januari gaat de chlorideconcentratie bij Lekhaven van 75 naar 50 mg/l, zie Figuur 85. Het Lekhaven model benadert dit vrij goed, een duidelijke verbetering ten opzichte van de 'base case' met een 10 getijden herhalende chlorideconcentratie.

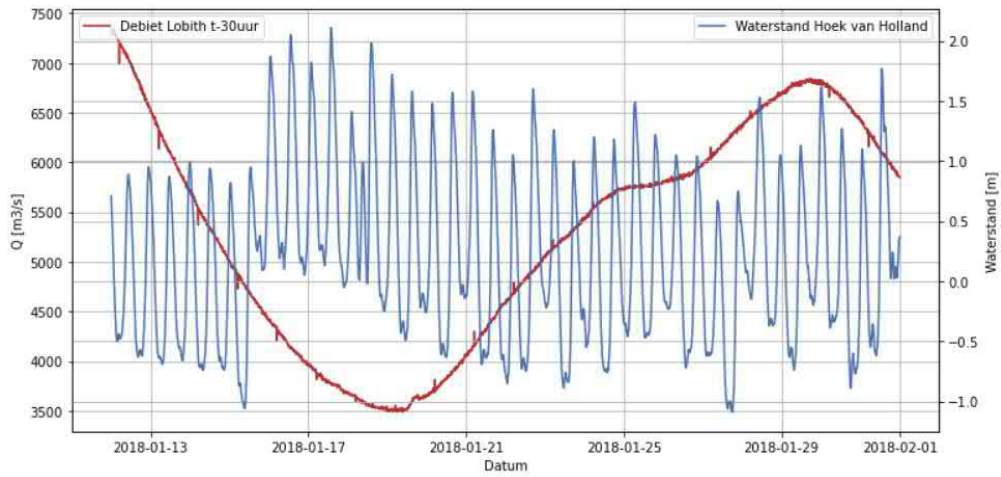


Figuur 84: Grote toename in rivierafvoer bij Lobith en waterstand bij Hoek van Holland, januari 2018

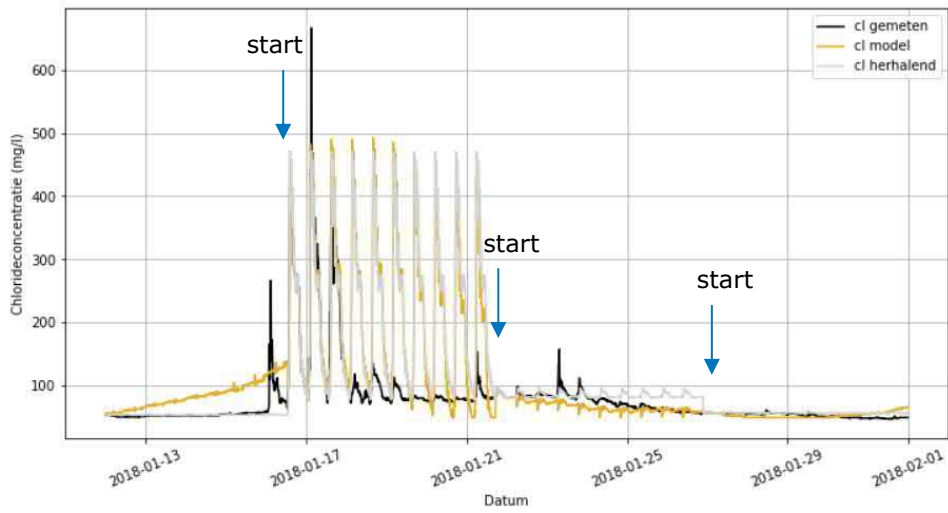


Figuur 85: Chlorideconcentratie bij Lekhaven, 1 januari t/m 12 januari 2018

Na de grote toename in rivierafvoer is een paar dagen later eenzelfde daling te zien tot 3500 m³/s bij Lobith. Dit gaat gepaard met verhoogde waterstanden waarna de afvoer weer toeneemt. De verhoogde waterstanden zijn door een storm veroorzaakt. Terwijl de Lekhaven voorafgaand aan de storm erg lage chlorideconcentraties laat zien, zorgt deze storm rond 16 januari voor een plotselinge stijging in chlorideconcentratie. De daling in chlorideconcentraties gaat te snel voor het model, hoewel het modelresultaat beter is dan de base case met een herhalend concentratieverloop. Ook hier geldt dat dit een periode is met zeer lage chlorideconcentraties, waarin verzilting niet tot problemen zal leiden.



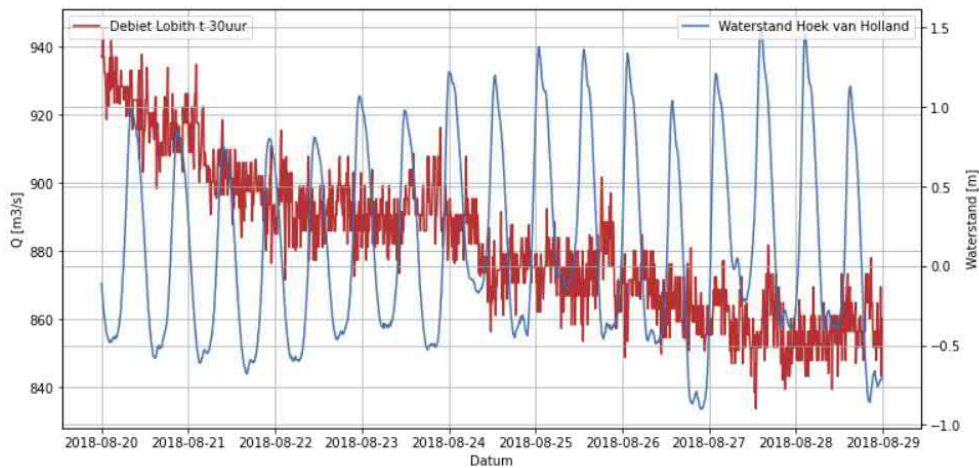
Figuur 86: Afname en toename in rivierafvoer bij Lobith en waterstand bij Hoek van Holland, januari 2018



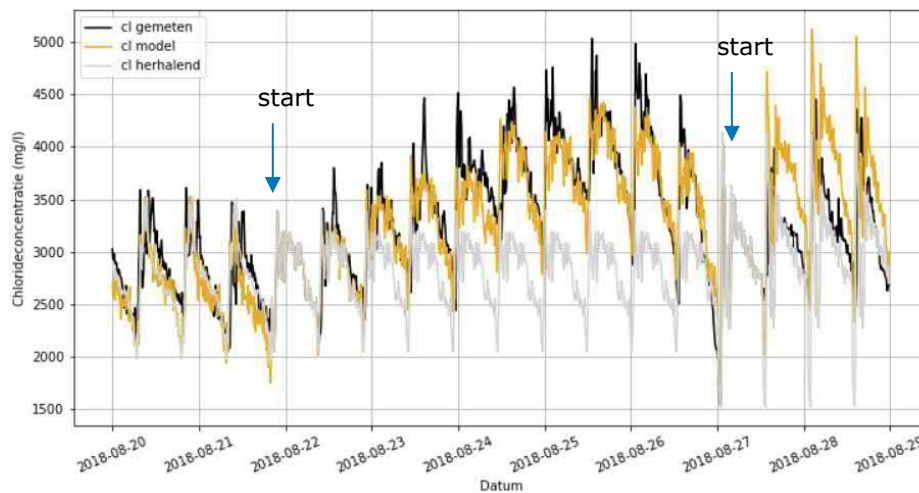
Figuur 87: Chlorideconcentratie bij Lekhaven, 12 januari t/m 31 januari 2018

Augustus 2018

In augustus 2018 is sprake van sterk verhoogde chlorideconcentraties op de Nieuwe Maas bij Lekhaven, met waarden tussen 2000 en 5000 mg/l, zie Figuur 89. Op 24, 25 en 27 augustus van 2018 zijn verhoogde laagwaterstanden te zien in Figuur 88, wat een week is geweest met regen en stormachtige wind. In Figuur 89 is ook een toename in gemeten chlorideconcentratie te zien in deze periode. Hierbij is te zien dat het Lekhaven model (oranje lijn) goed meestijgt met de gemeten chlorideconcentratie. De invoervariabelen werken goed door in de gemodelleerde stijging. De base case met een 10 getijden herhalende concentratie (de grijze lijn) doet het duidelijk slechter op dit moment. Voor de periode van 23 t/m 26 augustus is wel te zien dat het model voor Lekhaven de hoogste pieken iets onderschat.



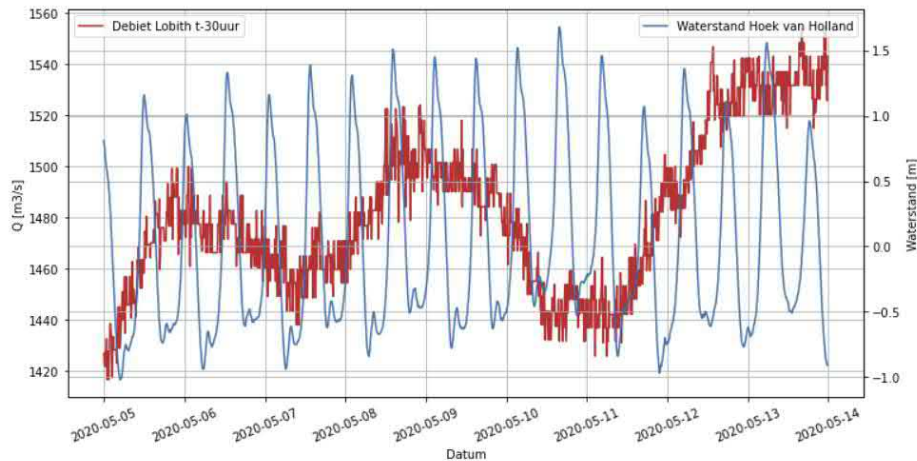
Figuur 88: Waterstand bij Hoek van Holland en afname rivierafvoer Lobith, 20 augustus t/m 28 augustus 2018



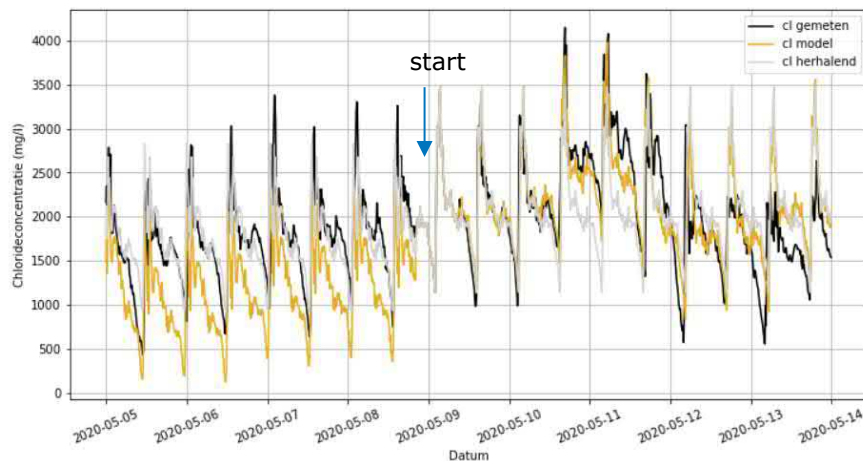
Figuur 89: Chlorideconcentratie bij Lekhaven, 20 augustus t/m 28 augustus 2018

Mei 2020

In de periode van 5 t/m 13 mei 2020 zijn schommelingen in rivierafvoer bij Lobith te zien in Figuur 90. De chlorideconcentraties bij Lekhaven voor de periode 5 mei t/m 8 mei 2020 worden onderschat door het model doordat deze niet genoeg meestijgt. Op 9 mei wordt de gemeten concentratie weer overgenomen door het model (getij 1 van 10). De stijging en daling in de daarop volgende getijden worden goed gereproduceerd door het model.



Figuur 90: Rivierafvoer Lobith en waterstand Hoek van Holland, 5 mei t/m 13 mei 2020



Figuur 91: Chlorideconcentratie bij Lekhaven, 5 mei t/m 13 mei 2020

Alle casestudies overziend, is het model een duidelijke verbetering ten opzichte van de aanname dat de chlorideconcentratie in volgende getijden identiek zullen zijn aan de gemeten concentraties in het huidige getij. Het toevoegen van informatie over de zeewaterstand en rivierafvoer is duidelijk van toegevoegde waarde. Regelmatig is er wel een verschil tussen de metingen en het model te zien, vooral bij vrij plotselinge veranderingen in chlorideconcentratie die niet duidelijk veroorzaakt worden door een verhoogde zeewaterstand of verandering in rivierafvoer. Uiteindelijk is locatie Lekhaven op de Nieuwe Maas slechts een tussenstap in de indirecte modellering (§5.1.1). In de volgende paragraaf zal duidelijk worden hoe relevant deze afwijkingen zijn voor de concentratiefluctuaties in de zijkhavens.

Tabel 17: Coëfficiënten per inlaat, inrekenen zijhavens. Leuehaven en Pernis hebben geen gemaal, dus $c_Q = 0$

Inlaat	Zijhaven	c_r	c_Q	c_D
Schilthuis	Boerengat	0.60	65	0.07
Leuehaven	Leuehaven	0.22	0	0.04
Parksluizen	Parkhaven	0.55	90	0.25
Brielselaan	Maashaven	0.30	5	0.02
Schiegemaal	Spuihaven	0.80	25	0.02
Pernis	Madroelhaven	0.75	0	0.03

De coëfficiënten verschillen tussen de zijhavens. Hieronder is een overzicht van een aantal kenmerken per inlaathaven gesommeerd.

Schilthuis:

- Kleine toegangsegeul
- Relatief grote haven
- Doorstroming door driezijdige aantakking (verklaart de wat hogere dempingscoëfficiënt)

Leuehaven:

- Kleine toegangsegeul
- Relatief grote haven zonder gemaalafvoer
- Beperkte doorstroming aanwezig door tweezijdige aantakking

Parksluizen:

- Toegangsegeul bevindt zich richting het sluizencomplex
- Smalle en lange zijhaven
- Gemaalafvoer en schuttingen aanwezig (verklaart de hoge dempingscoëfficiënt, veel wisselwerking)

Brielselaan

- Grote zijhaven met een groot bergend oppervlak
- Kleine gemaalafvoer t.o.v. grootte zijhaven (verklaart de lage coëfficiënt voor de invloed van het gemaal)

Schiegemaal

- Kleine toegangsegeul
- Doodlopende zijhaven

Pernis:

- Binnendijkse metingen beschikbaar
- Toegangsegeul groter dan de andere zijhavens
- Kleine zijhaven welke het meest benedenstrooms ligt van de zijhavens.

In §4.9 is beschreven hoe de verschillen in havengeometrie leiden tot verschillen in het tijdsverloop van de chlorideconcentratie.

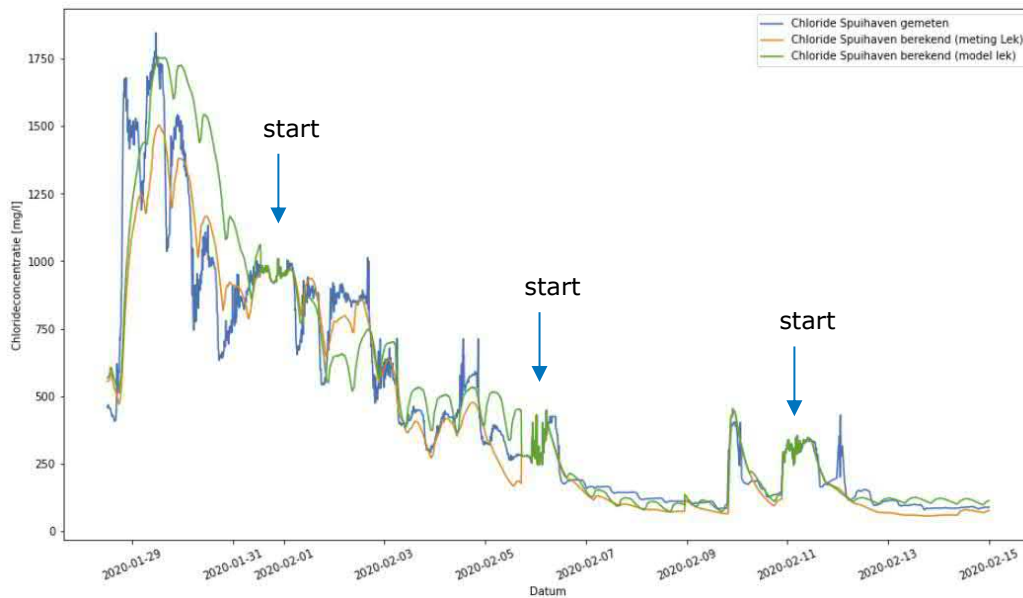
5.3.2 Resultaten zijhavenmodellen

In bijlage A.2 zijn voor de zes inlaten aan de Nieuwe Maas casestudies te vinden die de resultaten van de berekening voor de zijhavens laten zien ten opzichte van de gemeten concentraties. Dit is telkens in stappen van 10 getijden gedaan. Het eerste getij is gelijk aan de gemeten concentratie. De gebruikte coëfficiënten in de formules zijn geoptimaliseerd op basis van de gemeten chlorideconcentraties bij Lekhaven en gemeten gemaalafvoeren. Vervolgens wordt inzichtelijk gemaakt wat de invloed is van de modelleringsfouten van Lekhaven op de zijhavenconcentratie door

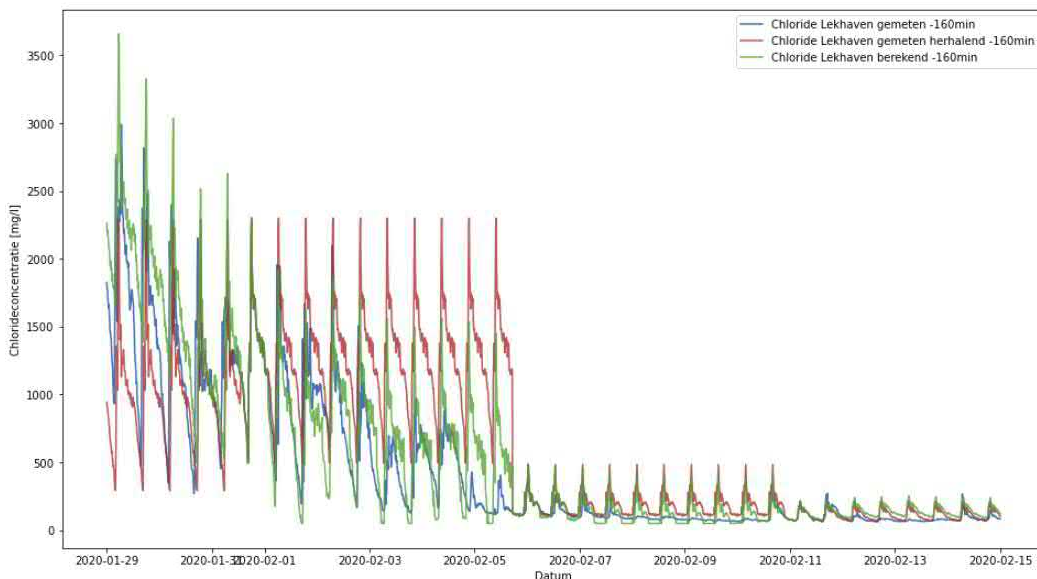
zowel een berekening uit te voeren met de gemeten concentraties bij Lekhaven als met de gemodelleerde concentraties.

5.3.2.1 Conclusie zijhavenberekening Spuihaven (inlaat Schiegemeal)

De werking van het model voor de zijhaven Spuihaven is in bijlage A.2.1 inzichtelijk gemaakt door middel van casestudies. Voor de Spuihaven wordt de chlorideconcentratie in deze zijhaven vrij goed berekend, zie ook Figuur 92 hieronder. Dit geldt voor zowel de zijhavenberekening met gemeten als gemodelleerde concentraties bij Lekhaven als invoervariabele. Voor dezelfde periode is de gemeten, herhaalde en berekende Lekhaven concentratie weergegeven in Figuur 93. Voor deze zijhaven is de periode van de chloridemeting beperkend: die is pas vanaf 28 januari 2020 beschikbaar. Daarnaast mist er voor de meetlocatie Lekhaven betrouwbare data van juli t/m september 2020. Dit maakt de periode vrij kort waarop de Spuihaven vergeleken kan worden. De reproductie van chlorideconcentraties gaat onder de inlaatgrens van 400 mg/l erg goed. In oktober ging dit iets minder goed door een afwijking bij het modelleren van de concentratie bij Lekhaven in die periode.



Figuur 92: Chlorideconcentratie Spuihaven, 29 januari t/m 14 februari 2020



Figuur 93: Chlorideconcentratie Lekhaven, 29 januari t/m 14 februari 2020

5.3.2.2 Conclusie zijhavenberekening Parkhaven (inlaat Parksluizen)

De werking van het model voor de zijhaven Parkhaven is in bijlage A.2.2 inzichtelijk gemaakt door middel van casestudies. De berekening van Parkhaven met gemodelleerde concentratie bij Lekhaven gaat vrij goed bij de lagere chlorideconcentraties. Wel is bij deze lage concentraties de invloed van de gemaalafvoer flink aanwezig, wat ervoor zorgt dat de berekende concentratie in de zijhaven rondom de meting schommelt. Er is enige invloed te zien van modelleringsfouten van Lekhaven in de berekening, wanneer de zijhavenberekening met gemeten en gemodelleerde Lekhaven worden vergeleken. De invloed is wisselend in negatieve maar ook in positieve zin. Een wat grotere afwijking in modellering van Lekhaven zoals op 9 december 2017 is goed te zien in de zijhavenberekening in de bijlage. Wat verder opvalt is dat de zijhavenberekening met gemeten Lekhavenconcentraties erg goed gaat, wat laat zien dat het goed voorspellen van de Lekhaven van waarde is. De meeste afwijkingen van de zijhavenberekening zijn het gevolg van een afwijking in de Lekhaven modelering.

5.3.2.3 Conclusie zijhavenberekening Boerengat (inlaat Schilthuis)

De werking van het model voor de zijhaven Boerengat (inlaat Schilthuis) is in bijlage A.2.3 inzichtelijk gemaakt door middel van casestudies. Ook voor inlaat Schilthuis wordt de zijhaven vrij goed berekend. In het hele lage bereik wordt de concentratie vaak onderschat, maar blijft de meting ook ver onder de inlaatgrens. Rond concentraties van 500 mg/l en hoger gaat het inrekenen vrij goed. In juni 2018 is goed te zien dat ook de (fout in de meetreeks van de) boezemconcentratie, in combinatie met gemaalafvoer, flink van invloed is op de berekende zijhaven concentraties.

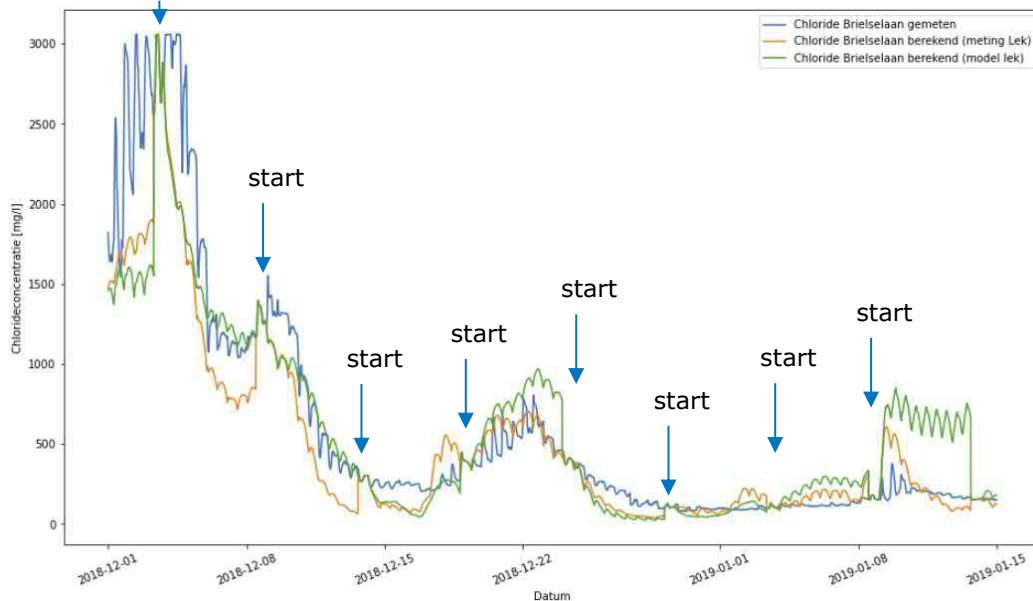
5.3.2.4 Conclusie zijhavenberekening Leuvehaven (inlaat Leuvehaven)

De werking van het model voor de zijhaven Leuvehaven is in bijlage A.2.4 inzichtelijk gemaakt door middel van casestudies. Voor de Leuvehaven wordt chlorideconcentratie in deze zijhaven redelijk goed berekend, ook met de gemodelleerde Lekhavenconcentratie als invoervariabele. In de Leuvehaven is geen sprake van boezemwaterafvoer, doordat er geen gemaal aanwezig is. Voor deze zijhaven is de gemeten periode van de chloridemeting beperkend en pas vanaf begin mei 2020 beschikbaar. Daarnaast mist er voor de meetlocatie Lekhaven betrouwbare data van juli t/m half september 2020. Dit maakt de periode erg kort waarop de Leuvehaven vergeleken kan worden. De gemeten chlorideconcentraties worden onder de inlaatgrens van 400 mg/l voor de beschikbare data redelijk goed gereproduceerd door het model. Boven de 500 mg/l, zoals in de tweede helft van september, gaat het minder goed met de gebruikte coëfficiënt op de Lekhavenconcentratie, zie paragraaf 5.3 voor de formule van de zijhavenberekening. Mogelijk dat ook hier invloed van rivierafvoer in de gebruikte coëfficiënten voor een verdere verbetering zou kunnen zorgen.

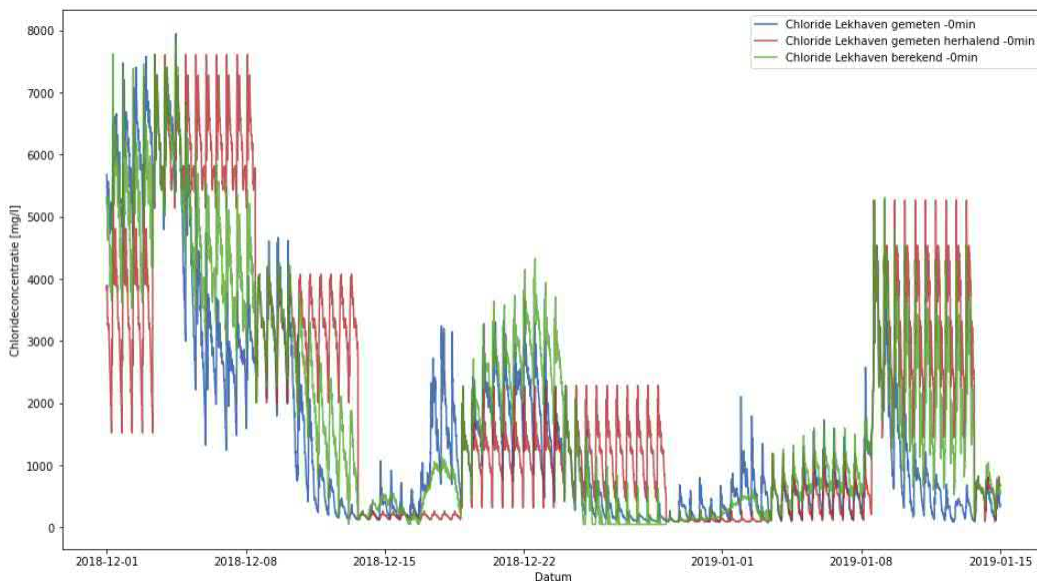
5.3.2.5 Conclusie zijhavenberekening Maashaven (inlaat Brielselaan)

De werking van het model voor de zijhaven Maashaven bij inlaat Brielselaan is in bijlage A.2.5 inzichtelijk gemaakt door middel van casestudies. De berekening van Brielselaan met de gemodelleerde Lekhaven concentratie gaat vrij goed gezien het algemene verloop, zie ook Figuur 94 hieronder. Bij het lagere bereik aan chlorideconcentraties zijn de metingen bij Brielselaan vrij constant, terwijl de berekende zijhavenconcentratie redelijk fluctueert. Bij dit lagere bereik is dit minder van belang aangezien de momenten van lage chlorideconcentraties goed zijn en de concentratie op deze momenten ruim onder de inlaatgrens ligt. De momenten dat de chlorideconcentratie voorbij de 400 mg/l stijgt, zijn de berekeningen vrij goed en wordt het verloop goed meegenomen. De invloed van het gemaal is erg klein voor de Maashaven waar de inlaat Brielselaan is geplaatst. De Maashaven is vrij groot en het gemaaldebiet vrij klein, waardoor het effect van boezemwater afvoeren naar de Maashaven klein is op de concentratie. De binnendijkse boezemwaterconcentratie is niet bekend en is in deze studie ook aangenomen op 250 mg/l. De Maashaven ligt ter hoogte van de Parkhaven echter de coëfficiënt c_r , ter correctie van de invloed van

Lekhaven is een stuk lager voor de Maashavenberekening. De Maashaven is een stuk groter dan de Parkhaven, dit zorgt waarschijnlijk voor een groter bergend effect waardoor de invloed in chlorideconcentratie bij Lekhaven (Nieuwe Maas) minder invloed heeft.



Figuur 94: Chlorideconcentratie Brielselaan, 1 december 2018 t/m 15 januari 2019



Figuur 95: Chlorideconcentratie Lekhaven, 1 december 2018 t/m 15 januari 2019

5.3.2.6 Conclusie zijhavenberekening Madroelhaven (inlaat Pernis)

De werking van het model voor de binnendijkse chlorideconcentratie bij inlaat Pernis is in bijlage A.2.6 inzichtelijk gemaakt door middel van casestudies. Uit de metingen lijkt het erop dat er vrij regelmatig ingelaten wordt gezien het chlorideverloop qua dynamiek vrij gelijk op gaat met die van de Lekhaven. Dit zorgt er ook voor dat de binnendijkse concentratie bij Pernis vrij goed berekend kan worden met de Lekhaven concentratie als invoervariabele. Hierbij is te zien dat wanneer de binnendijkse meting niet constant blijft, waarschijnlijke inlaatmomenten, dat de berekende waarden vrij goed overeenkomen. De chloridemeting wordt dicht bij de inlaat aan de binnendijkse zijde gemeten, waardoor bij inlaten de gemeten chlorideconcentratie een goede indicatie vormt voor de zijhavenconcentratie. Wanneer de gemeten waarde vlak is, wordt er waarschijnlijk niet ingelaten. Op

deze momenten fluctueert de berekende concentratie in de zijhaven nog wel, aangezien deze niet weet wanneer er wel of niet wordt ingelaten. Er is meer meetdata nodig, vooral aan de buitenzijde, om dit goed te kunnen vergelijken.

5.4 Modelling Hollandsche IJssel

5.4.1 Modelkeuzes

Voor de inlaat, inlaat Middelwatering, aan de Hollandsche IJssel is gekeken of dit met een statistisch model beschreven kon worden. Zoals bij de tijdreeksanalyse voor Middelwatering in §4.8 naar voren is gekomen, is de chlorideconcentratie gemeten bij Krimpen aan den IJssel een goede proxy voor de gemeten chlorideconcentratie bij Middelwatering. Gezien de metingen bij Middelwatering relatief kort zijn, kon deze reeks verlengd worden met de metingen bij Krimpen aan den IJssel.

Het getijgevoelige deel van de Hollandsche IJssel, het meest benedenstroomse deel, is erg gevoelig voor verziltingsgebeurtenissen. Over het algemeen is er geen sprake van inlaatvensters bij Middelwatering/Krimpen aan den IJssel, aangezien de chlorideconcentratie onder de meeste condities onder de inlaatgrens van 400 mg/l blijft. Voornamelijk door incidentele gebeurtenissen zoals stormopzet of extreem lage rivierafvoeren kan de monding van de Hollandsche IJssel verzilt raken, met chlorideconcentraties boven de 400 mg/l. De Hollandsche IJssel kan vervolgens ook vrij langdurig (dagen tot weken) verzilt blijven. Dit soort gebeurtenis-gedreven gedrag met een relatief langdurige doorwerking (geschiedeniseffect) is lastig te vatten met een statistisch model. Er is wel een poging gedaan tot statistisch modelleren met verschillende verklarende parameters voor de zeewaterstand, het verhang en de rivierafvoer, zoals grotendeels voor de Lekhaven ook is toegepast, maar deze was niet succesvol. De omslag van een niet-verzilde naar een verzilde situatie en omgekeerd konden niet goed worden gemodelleerd.

Om die reden kiezen we voor de Hollandsche IJssel voor het presenteren van statistische informatie over het al dan niet optreden van verzilting en inlaatvensters binnen de metingen.

5.4.2 Statistiek van chlorideconcentraties

De verzilting op de Hollandsche IJssel is onderzocht op basis van de dieptegemiddelde concentraties in de relatief lange meetreeks bij Krimpen aan den IJssel, linkeroever (km 18). De tijdreeks van 2000 tot en met 2020 is daarvoor geanalyseerd. Dat houdt in dat de gepresenteerde statistiek zowel de situatie voor als na de verdieping van de Nieuwe Waterweg omvat.

Eerst is de tijdreeks verdeeld in categorieën, afhankelijk van twee variabelen:

- Het debiet bij Lobith met een fasevertraging van 30 uur, afgerond op 250 m³/s
- De waterstand bij Hoek van Holland, gemiddeld over het afgelopen getij, met een fasevertraging van 200 minuten, afgerond op 0.25 m

Dit resulteert in de aantallen 10-minuten waarden per combinatie uit Tabel 18. Alleen rivierafvoeren bij Lobith tot 2500 m³/s zijn weergegeven, omdat voor hogere rivierafvoeren er nooit sprake is van verzilting (chlorideconcentratie boven 400 mg/l) op de Hollandsche IJssel. Logischerwijs komen combinaties met een getijgemiddelde zeewaterstand rond 0 m+NAP het meeste voor en zijn sterk verhoogde en verlaagde zeewaterstanden veel zeldzamer.

Tabel 18: Aantal 10-minuten waarden in de tijdreeks (tussen 2000 -2020) met chlorideconcentraties bij Krimpen aan den IJssel per combinatie van rivierafvoer en zeewaterstand

h \ Q	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
750			182	1321	3371	2767	872	139			
1000			64	2268	18955	11665	2612	1020	366	80	
1250		13	128	4406	28126	21187	4841	677	95		
1500		36	136	2171	17894	12306	2550	1267	37		
1750		7	230	3504	19709	12455	2575	537	383	95	26
2000		182	423	4292	23264	12910	2985	634	126	8	
2250	28	77	135	2250	11169	5755	2096	905	176		
2500			230	2356	6971	3814	924	301	138		

Per getijperiode zijn twee karakteristieke punten gedefinieerd in de tijdreeks van de chlorideconcentratie:

1. De minimale concentratie. Als het minimum onder de 400 mg/l komt, is het mogelijk om ergens in de getijperiode zoet water in te laten (gedurende een inlaatvenster of continu).
2. De maximale concentratie. Als het maximum onder de 400 mg/l blijft, is er geen sprake van inlaatvensters. Gedurende de gehele getijperiode kan dan zoet water worden ingelaten.

Tabel 19: Interpretatie van de grenswaarde van 400 mg/l voor de minimale en maximale concentratie

	Lager dan 400 mg/l	Hoger dan 400 mg/l
Minimale concentratie	In deze getijperiode kan kortere of langere tijd zoet water worden ingelaten	In deze getijperiode is zoet water inlaten continu onmogelijk
Maximale concentratie	In deze getijperiode is zoet water inlaten continu mogelijk	In deze getijperiode is het water kortere of langere tijd verzilt

Allereerst beschouwen we de statistiek van de minimale concentratie (het getijminimum). Daaruit is informatie af te lezen over het al dan niet aanwezig zijn van inlaatvensters. Bij een minimale concentratie boven 400 mg/l is er geen mogelijkheid om zoet water in te laten. In Tabel 20 zijn drie karakteristieke waarden van deze minimale concentratie opgenomen:

1. De mediane waarde: wat is gemiddeld genomen van toepassing?
2. De 95%-percentielwaarde: wat is in 95% van de situaties van toepassing?
3. De maximale waarde: het hoogste getijminimum in de gehele periode 2000-2020

Getallen boven 400 mg/l zijn weergegeven in rood, onder 400 mg/l in blauw.

Gemiddeld genomen (de mediaan) is zoet water inlaten altijd ergens mogelijk binnen de getijperiode (kortere of langere tijd), met uitzondering van extreem lage rivierafvoeren (700-875 m³/s bij Lobith) in combinatie met een >0.5 m verhoogde getijgemiddelde zeewaterstand. In die situatie zijn geen inlaatvensters te verwachten.

Vanaf 1000 m³/s bij Lobith is het in 95% van de getijden mogelijk om zoet water in te laten (kortere of langere tijd), tenzij de getijgemiddelde zeewaterstand >0.5 m verhoogd is. Vanaf 1250 m³/s is in 95% van de getijden inlaten van zoet water mogelijk, ongeacht de zeewaterstand.

Boven 1500 m³/s bij Lobith is in 2000-2020 altijd (het maximum, dus in 100% van de gevallen) een inlaatvenster van kortere of langere duur opgetreden, ongeacht de zeewaterstand. Voor 1250 m³/s geldt dit ook, zolang de zeewaterstand niet verhoogd is.

Tabel 20: Statistiek van de minimale chlorideconcentratie per getijperiode voor verschillende combinaties van rivierafvoer bij Lobith en getijgemiddelde zeewaterstand bij Hoek van Holland: de mediaan (boven), de 95%-percentielwaarde (midden) en de maximale waarde (onder)

Minimale concentratie (mg/l), mediaan											
H \ Q	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
750			210	189	277	297	782	1001			
1000			159	140	138	146	223	281	268	301	
1250		89	102	116	108	109	113	106	107		
1500		89	96	98	95	93	101	112	150		
1750		92	131	92	88	89	95	112	108	90	88
2000		86	116	86	87	87	90	92	89	100	
2250	87	87	86	77	81	85	91	90	84		
2500			70	84	78	85	89	95	83		

Minimale concentratie (mg/l), 95% waarde											
h \ Q	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
750			268	322	981	1107	1534	1229			
1000			175	192	208	288	511	686	714	333	
1250		89	116	150	144	159	160	153	135		
1500		89	100	138	138	135	152	230	271		
1750		92	136	131	123	114	142	259	266	115	88
2000		118	136	136	111	112	118	114	96	102	
2250	87	87	86	131	106	122	116	107	91		
2500			103	105	104	106	108	104	104		

Minimale concentratie (mg/l), maximale waarde											
h \ Q	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
750			268	566	1181	1479	1534	1292			
1000			203	364	414	503	822	822	714	375	
1250		89	116	159	229	503	429	171	135		
1500		89	100	145	156	171	218	271	271		
1750		92	136	136	156	154	190	271	271	115	88
2000		118	139	156	156	132	131	121	96	103	
2250	87	87	139	148	144	174	120	114	92		
2500			103	111	111	117	119	104	104		

Vervolgens beschouwen we de statistiek van de maximale concentratie (het getijmaximum). Daaruit is informatie af te lezen over het al dan niet optreden van beperkingen in de inlaat van zoet water in de vorm van inlaatvensters. Bij een maximale concentratie onder 400 mg/l is zoet water inlaten permanent mogelijk, zonder restricties. In Tabel 21 zijn drie karakteristieke waarden van deze maximale concentratie opgenomen:

1. De mediane waarde: wat is gemiddeld genomen van toepassing?
2. De 95%-percentielwaarde: wat is in 95% van de situaties van toepassing?
3. De maximale waarde: het hoogste getijmaximum in de gehele periode 2000-2020

Tabel 21: Statistiek van de maximale chlorideconcentratie per getijperiode voor verschillende combinaties van rivierafvoer bij Lobith en getijgemiddelde zeewaterstand bij Hoek van Holland: de mediaan (boven), de 95%-percentielwaarde (midden) en de maximale waarde (onder)

Maximale concentratie (mg/l), mediaan											
h \ Q	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
750			708	621	714	918	1770	1752			
1000			177	210	205	266	682	1255	1806	1137	
1250		130	172	149	140	149	176	270	708		
1500		130	133	108	110	110	138	163	221		
1750		160	185	103	102	108	128	153	157	205	519
2000		160	163	99	94	103	126	134	122	205	
2250	165	165	135	95	101	118	139	132	109		
2500			97	117	94	111	106	114	89		

Maximale concentratie (mg/l), 95% waarde											
h \ Q	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
750			935	1070	1859	2842	3291	3097			
1000			318	740	547	819	1852	2865	3142	2160	
1250		130	180	228	243	399	560	1626	708		
1500		130	165	164	176	213	375	480	431		
1750		160	195	173	158	189	253	431	519	519	519
2000		170	188	189	169	177	196	187	160	205	
2250	165	165	143	209	187	211	194	184	184		
2500			189	189	166	173	158	162	145		

Maximale concentratie (mg/l), maximale waarde											
h \ Q	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
750			991	1540	2773	3291	3291	3097			
1000			542	1772	1946	2865	3142	3142	3142	2160	
1250		130	180	453	1260	1626	1626	1626	708		
1500		130	165	173	483	729	729	729	431		
1750		160	195	195	255	255	328	519	519	519	519
2000		170	195	228	230	280	280	519	519	205	
2250	165	165	188	213	218	227	211	203	184		
2500			189	194	214	203	173	162	154		

Bij extreem lage rivierafvoeren van 750 m³/s (dat is: onder 875 m³/s) is er gemiddeld genomen (de mediaan) altijd sprake van restricties in de inlaat van zoet water in de vorm van inlaatvensters. Dit geldt ook bij lage rivierafvoeren rond 1000 m³/s in combinatie met >0.5 m verhoogde zeewaterstanden. Vanaf 1250 m³/s bij Lobith kan er gemiddeld genomen zonder restricties zoet water worden ingelaten, tenzij de zeewaterstand sterk verhoogd is (1.0-1.5 m).

Vanaf 1250 m³/s is in 95% van de gevallen gedurende de gehele getijcyclus de zoutconcentratie onder 400 mg/l, behalve als de zeewaterstand >0.5 m verhoogd is.

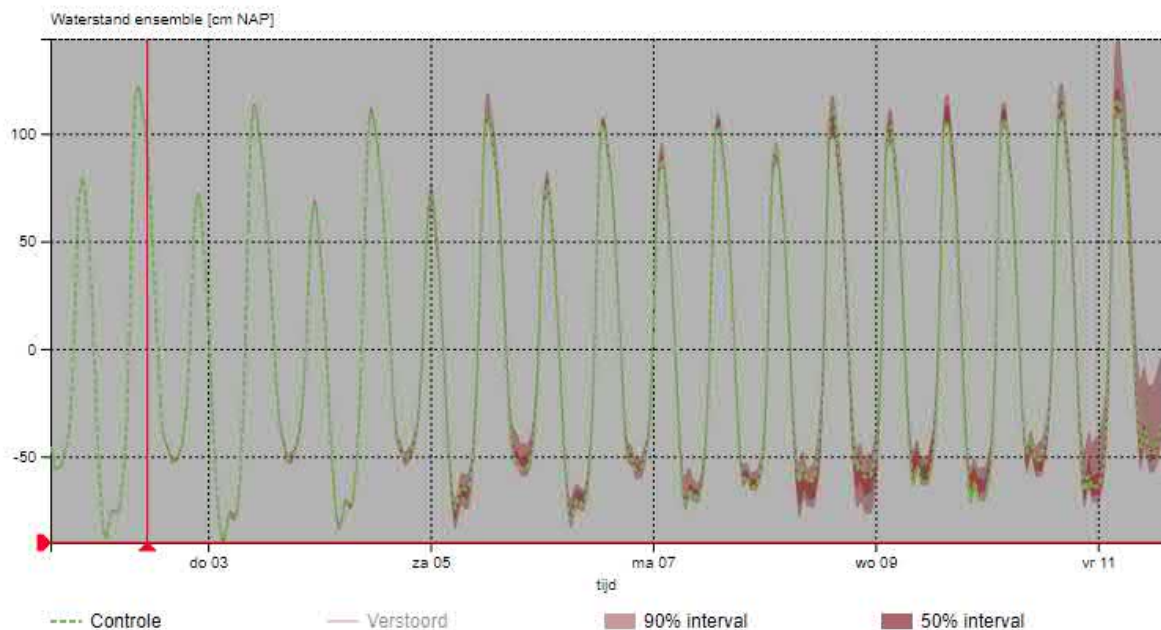
Boven 2250 m³/s bij Lobith is in 2000-2020 nooit (het maximum, dus in 100% van de gevallen) sprake geweest van restricties op de zoetwaterinname in de vorm van inlaatvensters, ongeacht de zeewaterstand. Boven 1750 m³/s is dit ook altijd het geval geweest, behalve in enkele situaties waarbij de zeewaterstand met meer dan 0.5 m was verhoogd.

6 Operationele inlaatstrategie

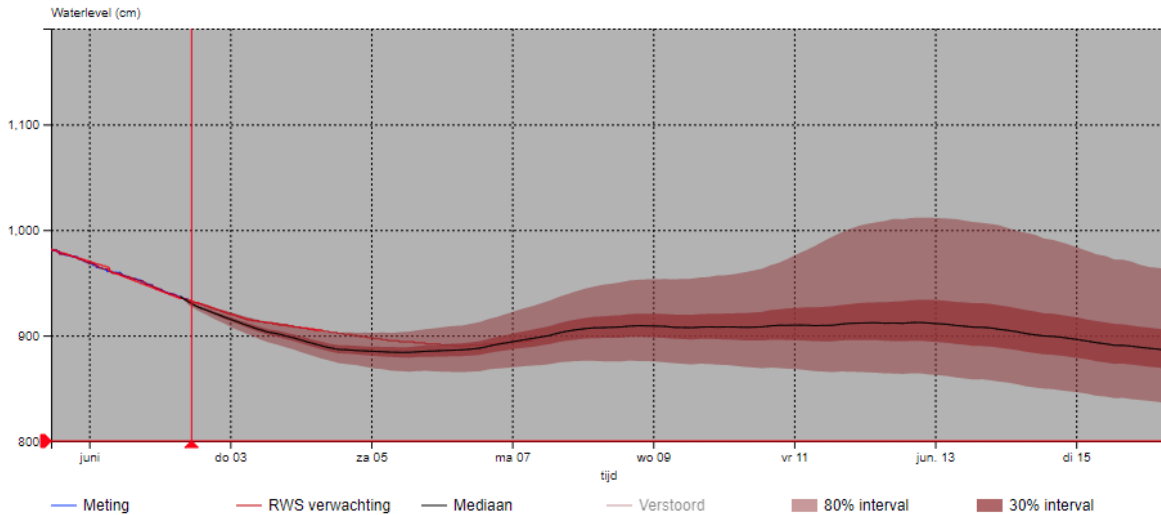
Dit hoofdstuk is een samenvatting van de inzichten uit alle vrij technische hoofdstukken. Daarnaast geeft dit hoofdstuk een advies voor het praktisch gebruik van de kennis en de rekenregels voor de zijhavens (§6.2), maar ook voor de Nieuwe Maas en de Hollandsche IJssel (§6.1). Tenslotte komen het gebruik en het nut van de gevonden relaties in de praktijk aan de orde (§6.3).

6.1 Voorspellen chlorideconcentratie Lekhaven

Voor het voorspellen van de chlorideconcentratie op de Nieuwe Maas bij Lekhaven zijn voorspellingen van de zeewaterstand bij Hoek van Holland en van de rivierafvoer bij Lobith nodig. Dit zijn beide gegevens waarvoor een operationele verwachting beschikbaar is bij het Hydro Meteo Centrum van Rijkswaterstaat voor de komende dagen. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van gemeten zeewaterstand en rivierafvoeren. Het gebruik van operationele verwachtingen van Hydro Meteo Centrum zal resulteren in een afname van de betrouwbaarheid van de voorspelling van de chlorideconcentratie bij Lekhaven. Deze onzekerheidsmarge in de zeewaterstand (zie Figuur 96 voor een voorbeeld) en rivierafvoer (Figuur 97) werkt via de chlorideconcentratie bij Lekhaven door in de zijhavens.



Figuur 96: Ensembleverwachting voor de waterstand bij Hoek van Holland in de komende 10 dagen, met een weergave van het 50% en 90% predictie-interval. Bron: <https://waterberichtgeving.rws.nl/water-en-weer/verwachtingen-water/lange-termijn-verwachtingen-waterstanden>



Figuur 97: Ensembleverwachting voor de rivierafvoer bij Lobith in de komende twee weken, met een weergave van het 30% en 80% predictie-interval. Bron: <https://waterberichtgeving.rws.nl/water-en-weer/verwachtingen-water/rivieren/ensemble>

De formule voor de Lekhaven modellering is te vinden in §5.2.1, formule (8). In deze formule wordt de concentratie van een getij geleden gebruikt samen met een verandering in concentratie voor de te berekenen tijdstap. De verandering kan positief en negatief zijn en worden bepaald door de afhankelijke variabele ΔQ_{rel} en GGdh. Lekhaven vooruit voorspellen kan met een flexibel aantal getijden. Als uitgangspunt is aangehouden om 10 getijden vooruit te voorspellen. In Tabel 22 is de $RMSE^2$ te zien, afhankelijk van het aantal getijden dat in één keer vooruit voorspeld wordt. Dit laat zien dat een kortere periode vooruit de voorspelling accurater is.

Tabel 22: RMSE afhankelijk van aantal getijden dat vooruit wordt voorspeld

Aantal achterelkaar vooruit voorspelde getijden	RMSE CL (mg/l) Lekhaven model
2	338
5	475
10	573
15	660

De volgende stappen moeten worden uitgevoerd om gebruik te maken van het statistische model voor locatie Lekhaven op de Nieuwe Maas:

1) Start chlorideconcentratie waarde Lekhaven, $cl_{Lekhaven, t-T}$

In formule (8) voor Lekhaven worden de gemeten chlorideconcentraties van het afgelopen getij gebruikt als startwaarde (getij 0). Het betreft dan gemiddelde concentratie over de drie bemeten dieptes (-2.5, -5.0 en -7.0 m+NAP). Van daaruit is alles bekend om met deze formule de aankomende 10 getijden vooruit te voorspellen, waarbij telkens de berekende concentratie in het ene getij wordt doorgegeven aan de berekening voor het daarop volgende getij.

² RMSE: Root Mean Square Error. Dit is de wortel van de Mean Square Error (MSE). De MSE is het gemiddelde van de kwadratische verschillen tussen voorspelling en waarneming.

2) Rivierafvoer Lobith bewerken

De data voor de rivierafvoer moet omgezet worden naar 10 minuten data. Om de variabele ΔQ_{rel} te berekenen is de $Q_{Lobith\ t-30h}$ en de $Q_{Lobith\ t-30h-T}$ nodig. De $Q_{Lobith\ t-30h}$ is de rivierafvoer bij Lobith vertraagd met 30 uur. Dit betekent dat de rivierafvoer gemeten bij Lobith 30 uur later invloed heeft ter hoogte van Lekhaven. De $Q_{Lobith\ t-30h-T}$ is nog een getijperiode daarvoor. Aangezien er met 10 minuten tijdstappen wordt gewerkt, is er voor de getijperiode T van de rivierafvoer 12 uur en 20 minuten aangehouden. De chlorideconcentratie bij Lekhaven wordt 10 getijden vooruit voorspeld. Dit betekent dat de rivierafvoer ook bekend moet zijn voor de aankomende 10 getijden. Vanwege de vertraging van 30 uur voor de rivierafvoer bij Lobith is de eerste 30 uur die gebruikt wordt een meting en de overige periode een voorspelling van Rijkswaterstaat. De $Q_{Lobith\ t-30h}$ en de $Q_{Lobith\ t-30h-T}$ kan vervolgens ingevuld worden in formule (5) van §5.1.3 om tot de benodigde variabele ΔQ_{rel} te komen.

3) Zeewaterstand Hoek van Holland bewerken

De zeewaterstand data bij Hoek van Holland betreft al 10 minuten data. Formule (7) van §5.1.4 geeft weer hoe de $GGdh$ berekend kan worden, gegeven het tijdsverloop van de zeewaterstand. Praktisch gezien wordt deze variabele berekend door het berekenen van waterstandsverschillen over een getij, en deze verschillen gewogen te sommeren over de afgelopen twee getijden. Vanwege de 10 minuten stappen wordt bij de waterstand de getijperiode T aangehouden op 12 uur en 30 minuten en de 2T (twee getijperiode terug) op 24 uur en 50 minuten. Dit is anders dan bij de rivierafvoer.

Het waterstandsverschil wordt dus gezien als het verschil in waterstand tussen een bepaald moment en een getijperiode voor dat moment:

$$dh_{HvH, t} = h_{HvH, t} - h_{HvH, t-T}$$

De waterstand van Hoek van Holland (h_{HvH}) heeft een vertraging van 120 minuten tot deze effect heeft bij Lekhaven. Hierdoor moet de h_{HvH} vertraagd worden met 120 minuten, wat leidt tot een aangepast waterstandsverschil:

$$dh_{HvH, t} = h_{HvH, t-120min} - h_{HvH, t-120min-T}$$

Zoals in §5.1.4 voor de berekening van de benodigde $GGdh$ is beschreven, wordt de som van de waterstandsverschillen over de afgelopen getijperiode 2 keer zoveel gewicht toegekend in de $GGdh$ als de som van de waterstandsverschillen van een getij geleden tot twee getijden geleden. Vanwege de 120 minuten vertraging is voor de benodigde zeewaterstand bij Hoek van Holland voor de $GGdh$ de eerste 120 minuten een meting en de overige periode van de 10 getijden vooruit een voorspelling van Rijkswaterstaat.

4) Debietsklasse en bijbehorende regressiecoëfficiënten bepalen

Verder moet er voor elke tijdstap bepaald worden in welke debietsklasse de rivierafvoer valt zodat de juiste regressiecoëfficiënten $r_{\Delta Q_{rel}}$ en r_{GGdh} gebruikt worden voor elke tijdstap, zie Tabel 16. De gekozen debietsklasse wordt afgerond in blokken van 250 m³/s. Deze debietsafhankelijke regressiecoëfficiënten moeten vervolgens vermenigvuldigd worden met de ΔQ_{rel} en de $GGdh$.

5) Berekenen voorspelde chlorideconcentratie voor het komende getij

Formule (8) kan nu voor het eerste getij vooruit ingevuld worden, resulterend in een voorspeld concentratieverloop voor het tweede getij.

6) Berekenen chlorideconcentraties in de daarop volgende getijden

De startwaarden voor de chlorideconcentraties van stap 1 zijn voor elk volgend getij telkens gelijk aan de bij stap 5 berekende chlorideconcentraties in het voorgaande getij. Stappen 2 t/m 5 kunnen

nu iteratief doorlopen worden, totdat een voorspelling voor het gewenste aantal getijden vooruit is verkregen.

Het concentratieverloop bij Lekhaven wordt in de volgende paragraaf gebruikt als invoer voor de berekening van chlorideconcentraties in de verschillende zijhavens van de Nieuwe Maas.

6.2 Voorspellen chlorideconcentratie zijhavens

Voor het voorspellen van de chlorideconcentratie in de zijhavens van de inlaten aan de Nieuwe Maas zijn de voorspelde chlorideconcentratie bij Lekhaven en (indien van toepassing) de verwachte gemaaalvoer met de bijbehorende chlorideconcentratie nodig. In Tabel 23 en Tabel 24 is het verschil in RMSE (Root Mean Squared Error in mg/l) te zien voor de zijhavenberekeningen wanneer de gemeten chlorideconcentratie of de gemodelleerde chlorideconcentratie bij Lekhaven wordt gebruikt. Het algemene beeld is dat het gebruik van de gemodelleerde Lekhaven een iets grotere fout introduceert. Echter is deze voor de meeste zijhavens beperkt. Voor de concentratieberekening van Spuihaven is het grootste verschil in fout te zien tussen de berekeningen met gemeten of gemodelleerde concentratie bij Lekhaven als invoer. Daarnaast is te zien dat hoe groter de voorspelhorizon, hoe groter de fout in zijhavenvoorspelling. In alle gevallen is de fout het kleinst wanneer er per twee getijden vooruit wordt voorspeld.

Tabel 23: RMSE (mg/l) voor de zijhavens met gemeten concentraties bij Lekhaven als invoer

Aantal achterelkaar vooruit voorspelde getijden	Pernis	Brielse- laan	Schilt- huis	Park- haven	Leuve- haven	Spui- haven
2	172	193	369	232	116	178
5	292	410	507	280	180	242
10	318	466	548	295	193	255
15	335	494	570	301	210	276

Tabel 24: RMSE (mg/l) voor de zijhavens met gemodelleerde concentraties bij Lekhaven als invoer

Aantal achterelkaar vooruit voorspelde getijden	Pernis	Brielse- laan	Schilt- huis	Park- haven	Leuve- haven	Spui- haven
2	152	200	373	226	140	272
5	275	419	522	297	254	501
10	341	489	580	340	284	576
15	378	518	613	373	313	646

Bovenstaande tabellen geven inzicht in de te verwachten fout voor het hele bereik aan chlorideconcentraties van de zijhavens. In dit project zijn voornamelijk de lagere concentraties rond de inlaatgrens van 400 mg/l van belang. Tabel 25 en Tabel 26 geven inzicht in respectievelijk de absolute en de relatieve RMSE (RMSE gedeeld door de bovengrens chlorideklasse) per chlorideconcentratie klasse van 250 mg/l. Dit geeft weer of de afwijking groot is ten opzichte van de waarden in de chlorideklasse. Bij Tabel 25 is te zien dat de absolute fout bij de lagere klassen (dus: rond de inlaatgrens) een stuk lager is dan de absolute fout bij de hogere chlorideconcentraties. Relatief is te zien dat de voorspelfout licht afneemt bij hogere chlorideconcentraties. Hierin speelt mee dat de chlorideconcentraties zijn afgeleid van EGV-metingen. Deze omrekening heeft een relatief

grote onnauwkeurigheid bij erg lage concentraties. Dit betekent dat de lage 'gemeten' chlorideconcentratie onder de 200 mg/l minder betrouwbaar zijn. De getoonde RMSE-waarden zijn redelijk groot, ook als dit in perspectief wordt gezet met de chlorideklassen, de relatieve RMSE. Het grillige verloop van de chlorideconcentratie zorgt al gauw voor een grote RMSE. De RMSE zal lager zijn wanneer het grillige verloop eruit wordt gefilterd door de voorspelling en de meting beide gladder te laten verlopen. Naast het grillige verloop en de structurele voorspelfout kan ook een kleine verschuiving van het getij voor relatief snel een grote RMSE zorgen. Het verloop van de chlorideconcentratie wordt over het algemeen goed voorspelt. Het advies is dan ook om voor het beoordelen van de absolute fout naar de visuele grafieken te kijken. Voor het beoordelen van kwantitatieve verschillen kunnen de RMSE waarden gebruikt worden.

Tabel 25: Absolute RMSE (mg/l) per zijhaven modellering opgedeeld in chlorideconcentratie klassen, 10 getijden vooruit

Chloride klasse (mg/l)	Pernis	Brielse-laan	Schilt-huis	Park-haven	Leuve-haven	Spui-haven
0-125	31	71	360	55	85	22
125-375	125	377	383	178	152	88
375-625	314	494	517	305	291	240
625-875	314	640	525	325	319	332
875-1125	307	769	451	338	351	469

Tabel 26: Relatieve RMSE (%) per zijhaven modellering opgedeeld in chlorideconcentratie klassen, 10 getijden vooruit. Relatieve RMSE is de RMSE per klasse gedeeld door de bovengrens van de chloride klasse.

Chloride klasse (mg/l)	Pernis	Brielse-laan	Schilt-huis	Park-haven	Leuve-haven	Spui-haven
0-125	25	57	288	44	68	17
125-375	33	100	102	47	40	24
375-625	50	79	83	49	47	38
625-875	36	73	60	37	36	38
875-1125	27	68	40	30	31	42

De formule voor de zijhavenberekening, formule (9), is in §5.3.1 te vinden. Hieronder is per deel van de zijhaven formule hoe dit gebruikt kan worden.

1. Boezemafvoer

Wanneer een boezemgemaal aanwezig is in de zijhaven moet een inschatting gemaakt worden van de boezemchlorideconcentratie (c_{lb}) voor de aankomende 10 getijden. Vaak kan de boezemconcentratie vrij constant worden verondersteld. Daarnaast moet ook een inschatting gemaakt worden van de aankomende gemaalafvoer (Q_b). Met de momenten van gemaalafvoer kan met het model ook gevarieerd worden om te zien wat een optimaal uitmaalmoment is om de chlorideconcentraties in de zijhaven maximaal en langdurig te verlagen.

2. Voorspelling chlorideconcentratie Lekhaven

De chlorideconcentratie voorspelling bij Lekhaven moet worden bepaald op basis van de stappen uit §6.1. Dit wordt gebruikt als variabele $Cl_{Lekhaven}$.

3. Startwaarde chlorideconcentratie zijhaven

In formule (9) wordt per tijdstap gerekend. Daarom is de laatst gemeten chlorideconcentratie van de zijhaven nodig als startpunt $t=0$ voor $Cl_{haven, t-1}$. Samen met de benodigde coëfficiënten per inlaat van Tabel 17 en de zojuist beschreven stappen kan de chlorideconcentratie in stappen van 10 minuten vooruit berekend worden tot 10 getijden vooruit (Lekhaven is tot 10 getijden vooruit). Het aantal getijden vooruit voorspellen is flexibel. Echter hoe meer getijden vooruit, hoe groter de voorspelfout zal worden, zoals te zien is in Tabel 24. Daarnaast is de beschikbare lengte en kwaliteit van de voorspelde zeewaterstand en rivierafvoer beperkend voor de tijdsduur waarover de concentratie bij Lekhaven berekend kan worden.

6.3 Beheerdersperspectief

Voor de beheerder is het van belang om te weten hoe de ontwikkelde formules en informatie gebruikt kunnen worden in de praktijk. Het gedrag van chlorideconcentratie is complex. Daarom kunnen inzichten over het te verwachten verloop en hoogte van chlorideconcentraties helpen bij het nemen van beslissingen over een inlaatstrategie in tijden van zoetwatervraag van het achterland. In de Rijn-Maasmonding werken invloedsfactoren vertraagd door op de chlorideconcentraties. Zeewaterstanden en rivierafvoeren (bij Lobith) hebben meerdere dagen later nog steeds invloed op chlorideconcentraties. Dit gegeven is meegenomen in de gebruikte parameters voor zeewaterstand en rivierafvoer.

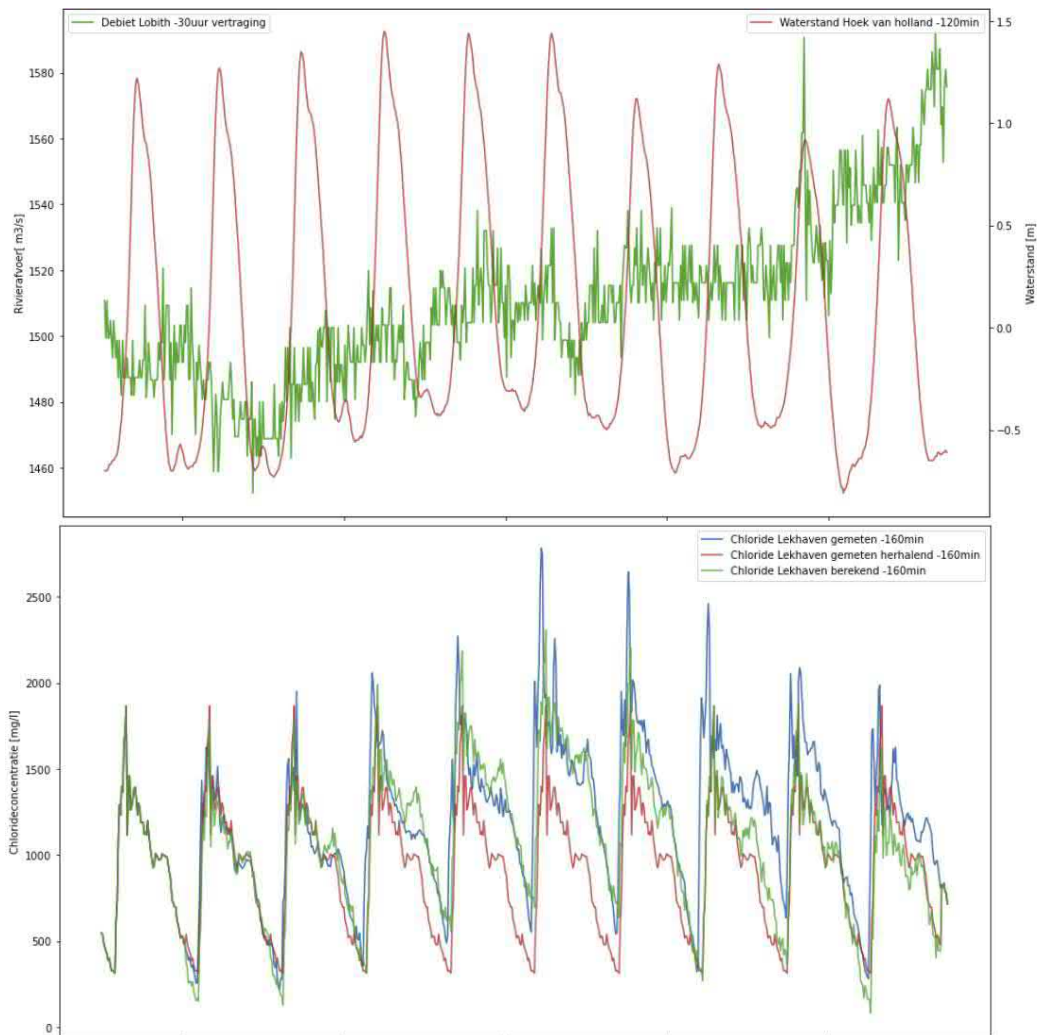
In de zijhavens kan de gemaalafvoer een grote invloed hebben op de chlorideconcentratie (in het geval van Schilthuis, Schiegemal en Parksluizen). De chlorideconcentratie bij meetpunt Lekhaven langs de Nieuwe Maas is gebruikt als representatief punt voor de situatie in de monding van zijhavens langs de Nieuwe Maas. Afhankelijk van de positie langs de Nieuwe Maas, de vorm en diepte van de zijhaven en de locatie van het meetinstrument werkt de concentratie bij Lekhaven sterker of zwakker door in de concentratie in de verschillende zijhavens (dit is de c_r in Tabel 17). Daarnaast werken de concentratie fluctuaties op de Nieuwe Maas gedempt door in de zijhavens, met minder hoge pieken en minder diepe dalen (dit is de c_d in Tabel 17).

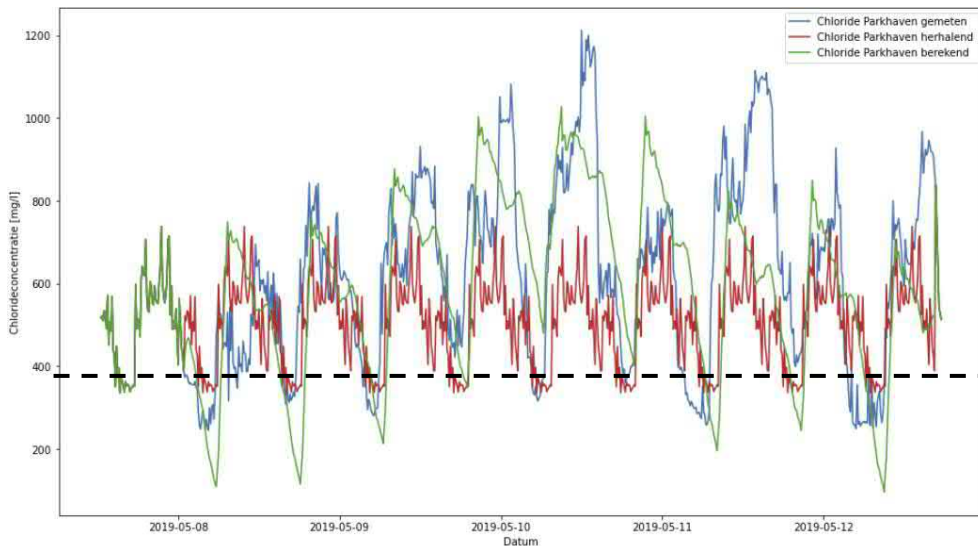
Voor de inlaten aan de Nieuwe Maas kan gebruik worden gemaakt van de voorspellingen voor bijvoorbeeld 10 getijden vooruit, zodat een beter beeld gevormd kan worden hoe de situatie bij de inlaten zich waarschijnlijk zal ontwikkelen. Na elk getij kan deze situatie opnieuw berekend worden, waardoor de voorspelling steeds geactualiseerd wordt.

In Figuur 98 is voor de tweede week van mei 2019 als voorbeeld een overzicht gegeven hoe een voorspelling eruit kan zien. De rivierafvoer stijgt licht van 1500 naar 1570 m³/s maar blijft in dezelfde orde van grootte (de bovenste figuur). De gemiddelde zeewaterstand (lopend getijgemiddelde) neemt eerst iets toe en daarna weer af (ook te zien in de bovenste figuur). Het effect van deze veranderingen is terug te zien in de chlorideconcentratie bij de Lekhaven aan de Nieuwe Maas (de middelste figuur). Deze figuur bevat zowel de gemeten waarden (in blauw) als de berekende voorspelling (in groen). Daarnaast is een lijn weergegeven die veronderstelt dat het concentratieverloop gelijk blijft aan het verloop uit het afgelopen getij (in rood). De voorspelling verbetert dus door informatie over zeewaterstand en rivierafvoer mee te nemen.

De voorspelde concentratie bij Lekhaven is vervolgens gebruikt om de concentratie bij de Parkhaven te berekenen (de onderste figuur). Ook deze figuur bevat metingen (in blauw), de voorspelling met het model (in groen) en de voorspelling die ervan uitgaat dat de concentraties gelijk blijven aan de

huidige situatie (in oranje). Het stijgen en dalen van de chlorideconcentratie is zowel bij meetlocatie Lekhaven als in de Parkhaven te zien. De voorspelling geeft aan dat rond 10 mei de chlorideconcentratie het hoogst is en vrijwel permanent boven de inlaatgrens van 400 mg/l. Even daarna geeft het model van de Parkhaven aan dat er weer inlaatvensters ontstaan. Dit geeft op deze manier extra informatie over momenten waarop er nog even gewacht kan worden met inlaten om zoeter water op een later moment in te nemen in plaats van gelijk wanneer het binnenwaterpeil verlaagd is. Zoals in de figuur voor de Parkhaven voorspelling te zien is, is het geen perfecte voorspelling. Wel geeft dit meer houvast en aanknopingspunten wat er ongeveer verwacht kan worden aan inlaatvensters. Hierdoor zou deze voorspelling het expert-judgement van de beheerder kunnen ondersteunen.





Figuur 98: Casestudie Parkhaven 10 getijden vooruit, Rivierafvoer Lobith en zeewaterstand (boven), Chlorideconcentraties Lekhaven (midden), Chlorideconcentraties Parkhaven (onder)

Voor het meetpunt Lekhaven is in bijlage A.3 een statistische analyse beschreven waar kentallen te vinden zijn voor bepaalde afvoer en getijopzet combinaties. Deze analyse heeft geleid tot onderstaande tabellen (Tabel 27) waarin drie type momenten te vinden zijn: permanente inname mogelijk (<400 mg/l), inlaatvensters en geen inname (>400 mg/l) voor de mediane situatie en de 95% percentiel-waarde situatie. Dit is op basis van de minimale en maximale gemeten chlorideconcentratie voor elk getij.

Tabel 27: Vertaling van de chlorideconcentraties statistiek Lekhaven naar inlaatvensters: de mediaan (boven) en de pessimistische waarde welke in 95% van de gevallen is voorgekomen (onder).

Situatie t.p.v. Lekhaven, mediane situatie											
h \ Q	-1	-0.75	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5
750											
1000											
1250											
1500											
1750											
2000											
2250											
2500											
2750											
3000											
3250											
3500											
3750											
4000											
4250											
4500											
4750											
5000											
5250											
5500											

Situatie t.p.v. Lekhaven, 95% van de gevallen											
h \ Q	-1	-0.75	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5
750											
1000											
1250											
1500											
1750											
2000											
2250											
2500											
2750											
3000											
3250											
3500											
3750											
4000											
4250											
4500											
4750											
5000											
5250											
5500											

Deze tabellen kunnen gebruikt worden om een beter inzicht te krijgen bij de situatie waar inlaatvensters aanwezig zijn of juist niet. Wanneer er inlaatvensters aanwezig zijn, betekent dit dat er minimaal een chlorideconcentratie waarde binnen een getij onder de grens van 400 mg/l is geweest. De data is beschikbaar in tijdstappen van 10 minuten.

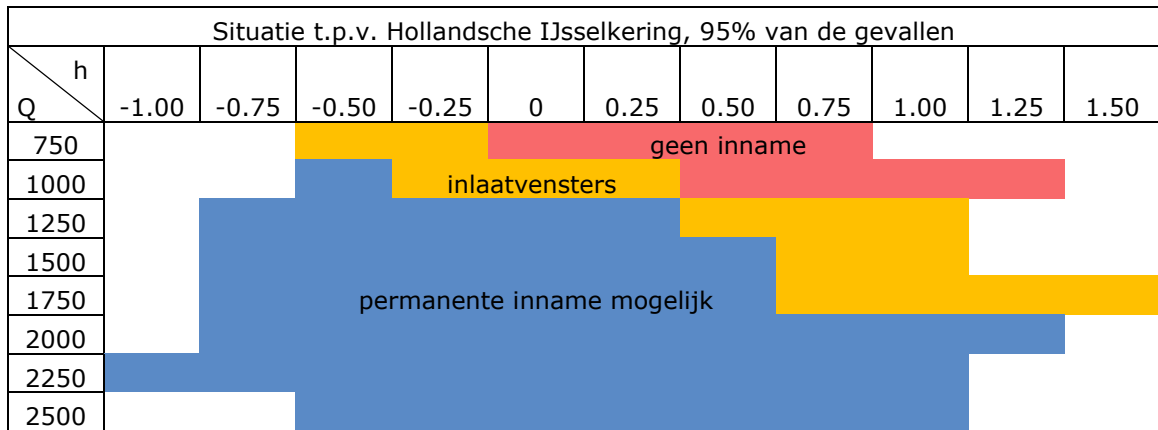
Een regressiemodel opzetten voor de Hollandsche IJssel is lastig gebleken vanwege de langdurige periodes van verzilting wanneer deze eenmaal verzilt is geraakt. Wel geven de tabellen van §5.4.2 goede kengetallen en handvatten om voorbereid te zijn op verziltingsgebeurtenissen op basis van bepaalde verwachte rivierafvoeren en zeewaterstandsverhogingen.

De statistische analyse van §5.4.2 heeft geleid tot onderstaande tabellen (Tabel 28) waarin drie type momenten te vinden zijn: permanente inname mogelijk (<400 mg/l), inlaatvensters en geen inname (>400 mg/l) voor de gemiddelde situatie en de 95% situatie. Dit is op basis van de minimale en maximale chlorideconcentratie voor elk getij bepaald.

Tabel 28: Vertaling van de chlorideconcentraties statistiek Hollandsche IJsselkering naar inlaatvensters: de mediaan (boven) en de pessimistische waarde welke in 95% van de gevallen is voorgekomen (onder)

Situatie t.p.v. Hollandsche IJsselkering, mediane situatie											
h \ Q	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
750											
1000											
1250											
1500											
1750											
2000											
2250											
2500											

Situatie t.p.v. Hollandsche IJsselkering, 95% van de gevallen											
h \ Q	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
750											
1000											
1250											
1500											
1750											
2000											
2250											
2500											



7 Toekomstbestendigheid

In dit rapport is ingegaan op het bepalen van sturingsregels voor de zeven inlaten gebaseerd op historische data van maximaal de afgelopen 4 tot 5 jaar. De verwachting is dat vanwege klimaatverandering, veranderingen zullen ontstaan die effect gaan hebben op het inlaten van zoetwater in de Rijn-Maasmonding. Veranderingen zoals zeespiegelstijging, langere periodes van droogte en extremere neerslag zijn denkbaar.

Zeespiegelstijging heeft invloed op de beschouwde inlaatvensters, echter zal dit in mindere mate van invloed zijn op de gevonden relaties en sturingsregels. De invloed van de zeewaterstand zal toenemen. In het model zal dit tot uitdrukking komen in de afvoerafhankelijke regressiecoëfficiënten van de zeewaterstand. De zeewaterstand zal namelijk ook bij hogere rivierafvoeren meer invloed gaat uitoefenen. Chlorideconcentraties bij Lekhaven zullen schommelen rond een hogere gemiddelde waarde wanneer de zeespiegel zal stijgen. Dit zal resulteren in minder (lange) inlaatvensters.

De gemiddelde middenstand van de getijden zal met zeespiegelstijging hoger komen te liggen dan in de huidige situatie. De tabellen met kwantitatieve kengetallen van §5.4.2 voor de Hollandsche IJssel zullen nog steeds gebruikt kunnen worden. Door de verhoging van de middenstand ontstaat er een verschuiving tussen het voorkomen van combinaties voor afvoer en zeewaterstand naar de rechterkant van deze tabellen. Dit betekent dat er vaker langdurige verzilting zal optreden bij het deel van de Hollandsche IJssel waarin het getij invloed heeft. Dit deel zal ook verder opschuiven in bovenstroomse richting, van Krimpen aan den IJssel naar Gouda.

Drogere periodes daarentegen zullen resulteren in een lagere rivierafvoer. Voor de Nieuwe Maas gaat dit gepaard met hogere chlorideconcentraties en kleinere inlaatvensters. Dit is terug te zien in de afvoerafhankelijke regressiecoëfficiënten voor de modellering van chlorideconcentraties bij Lekhaven. Bij lagere afvoeren is de reactie van de chlorideconcentratie op een verandering in de afvoer en zeewaterstand groter. De Nieuwe Maas zal dan vaker gevoelig worden voor sterke verzilting.

Bij de Hollandsche IJssel zal er vaker een hogere chlorideconcentratie voor de monding van de Hollandsche IJssel liggen waardoor deze sneller verzilt zal raken. De tabellen van §5.4.2 zullen nog steeds bruikbaar zijn, maar de gebeurtenissen aan de bovenzijde van de tabellen (lagere rivierafvoeren) zullen vaker en langduriger voorkomen.

Extremere neerslag met korte en hevige buien gaan gepaard met korte verhoogde afvoerperiodes. Relatief korte maar hevige regenbuien kunnen ervoor zorgen dat binnendijks meer zoetwater geloosd moet worden om het binnenland te beschermen. Dit zoetwater kan dan niet volledig gebufferd worden, terwijl het mogelijk niet lange tijd daarna weer nodig is in perioden van droogte. De piekafvoer vanuit de boezems zou gebruikt kunnen worden om de zijhavens door te spoelen en de concentratie daar omlaag te brengen.

De verwachte veranderingen die gepaard gaan met klimaatverandering zorgen ervoor dat inzicht in mogelijke inlaatvensters van groter belang wordt om optimaal gebruik te maken van de inlaatvensters.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Voor zes inlaten aan de Nieuwe Maas, waarbij de chlorideconcentratie sterk schommelt en afhankelijk is van getij en rivierafvoer, zijn statistische modellen ontwikkeld die een voorspelling geven van de chlorideconcentraties gedurende de komende ± 10 getijden. Dit instrument is een hulpmiddel voor beheerders om beter te kunnen anticiperen op het groter of kleiner worden van de periodes om geschikt water in te laten (inlaatvensters). Het door getij beïnvloede deel van de Hollandsche IJssel is complex en meer gebeurtenis afhankelijk. Voor de inlaat in dit deel van de Hollandsche IJssel is het niet gelukt een goed werkend statistisch model te maken. Wel is het gelukt om voor dit deel van de Hollandsche IJssel kentallen te bepalen op basis van historische gegevens. De conclusies voor de zes inlaten in zijhavens van de Nieuwe Maas worden in §8.1.1 behandeld. De conclusies op basis van de kengetallen voor de inlaat Middelwatering langs de Hollandsche IJssel komen in §8.1.2 aan de orde.

8.1.1 Conclusie inlaten aan de Nieuwe Maas

Het model voor de zijhavens kan goed gebruikt worden als inschatting of de inlaatvensters beter of minder goed zullen gaan worden over een paar getijden. Bij de casestudies voor de verschillende inlaten kwam naar voren dat bij chlorideconcentraties onder ongeveer 500 mg/l de berekeningen voor de zijhavens soms afwijkingen gingen vertonen, maar dat het verloop kwalitatief meestal wel goed overeenkwam. Hierbij is het van belang mee te nemen dat een paar getijden vooruit voorspellen nauwkeuriger is dan 5 tot 10 getijden vooruit. Voorspelfouten stapelen op, omdat de berekende chlorideconcentratie telkens wordt 'doorgegeven' van het vorige naar het volgende getij.

De chlorideconcentratie in zijhavens kan vrij goed berekend worden met een indirecte methode. De door een statistisch model voorspelde concentratie op de Nieuwe Maas bij meetlocatie Lekhaven, met de zeewaterstand en rivierafvoer als variabelen in het model is hiervoor nodig. Het gebruik van de voorspelde concentratie bij Lekhaven als forcering voor een model dat de concentratiefluctuaties in de verschillende zijhavens voorspelt leidt tot goede resultaten. Deze indirecte methode leidt tot betere resultaten dan het rechtstreeks statistisch modelleren van concentraties in zijhavens op basis van zeewaterstanden en rivierafvoeren, vanwege de trage, gedempte reactie van de zijhavens op veranderingen in de Nieuwe Maas.

De benodigde invoer voor de berekening voor de zijhavens bestaat uit de voorspelde concentraties op de Nieuwe Maas bij meetlocatie Lekhaven en een inschatting van (indien aanwezig) de gemaalafvoer met de bijbehorende zoutconcentratie. De nauwkeurigheid van de voorspelde chlorideconcentratie op de Nieuwe Maas bij Lekhaven bepaalt voornamelijk de kwaliteit van de berekeningen voor de zijhavens.

Voor het voorspellen van de chlorideconcentraties bij Lekhaven wordt gebruik gemaakt van een verschilmodel. Dat houdt in dat de chlorideconcentraties in het voorgaande getij als basis worden genomen. Veranderingen in concentratie in volgende getijden zijn afhankelijk van veranderingen in rivierafvoer en/of veranderingen in zeewaterstand ten opzichte van het voorgaande getij. Het statistische model werkt goed met de volgende eigenschappen:

- De invloed van de rivierafvoer beschreven met de variabele ΔQ_{rel} : de verandering van de rivierafvoer over een getijperiode gedeeld door de rivierafvoer zelf, met een fasevertraging van 30 uur tussen Lobith en Lekhaven.
- De invloed van de zeewaterstand beschreven door de getijgemiddelde waterstandsverandering GGdh. Deze variabele wordt bepaald door het berekenen van waterstandsverschillen over een getij, en deze verschillen gewogen te sommeren over de afgelopen twee getijden. Deze variabele gaf betere resultaten dan de momentane waterstand, het momentane verhang of het getijgemiddelde verhang.
- Afvoerafhankelijke regressiecoëfficiënten voor bovenstaande twee variabelen beschrijven de chlorideconcentratie bij Lekhaven beter dan een enkel regressiemodel voor het hele bereik aan afvoeren. De invloed van variaties in zeewaterstand en rivierafvoer is namelijk veel groter bij lagere dan bij hogere rivierafvoeren bij Lobith.

De benodigde concentraties bij Lekhaven zijn in de meeste gevallen goed te modelleren met het ontwikkelde statistische model met afvoerafhankelijke regressiecoëfficiënten. Een aantal keer is een afwijking van de voorspelling ondervonden die ontstond doordat een mechanisme optrad dat niet alleen aan de hand van de gebruikte variabelen voor zeewaterstand en rivierafvoer verklaard kon worden.

Afwijkingen in het modelleren van locatie Lekhaven zijn de voornaamste oorzaak van afwijkingen van concentraties in de zijkhavenmodellering. Als de concentraties bij Lekhaven perfect bekend zijn, is de berekening voor de zijkhavens relatief nauwkeurig. Een aspect wat in de praktijk nog zal meespelen is dat de afvoer van boezemwater (indien aanwezig) nog onbekend is. Wel kan de gemaalafvoer mogelijk gebruikt worden om de zijkhaven op de juiste momenten zoeter te maken.

De RMSE van de voorspelling lijkt vrij hoog. Het grillige verloop, de structurele voorspelfout maar ook een kleine verschuiving van het getij kan voor relatief snel een grote RMSE zorgen. Het verloop van de chlorideconcentratie wordt over het algemeen goed voorspelt.

8.1.2 Conclusie inlaat Middelwatering aan de Hollandsche IJssel

Het getij beïnvloedt deel van de Hollandsche IJssel is minder geschikt om statistisch te modelleren. Dit komt voornamelijk doordat de Hollandsche IJssel gevoelig is voor verziltingsgebeurtenissen, die vervolgens gedurende langere tijd (dagen tot weken) invloed blijven hebben. Een statistische analyse op de meetreeksen was geschikter om uit te voeren voor dit deel van de Hollandsche IJssel. Uit deze analyse is empirische kennis beschikbaar gekomen, waarmee kan worden ingeschat onder welke omstandigheden (rivierafvoer en getijgemiddelde waterstand) er sprake is van permanent zoet water (<400 mg/l), inlaatvensters of permanent verzilt water (>400 mg/l). Hierbij geeft het onderscheid tussen het gemiddelde gedrag, het gedrag in 95% van de gevallen in de meetreeks en het maximum, dus 100% van de gevallen in de meetreeks (2000-2020) bruikbare informatie voor beheerders.

In Tabel 28 kan via de kleuren worden afgelezen bij welke combinatie van rivierafvoer en getijgemiddelde waterstand er sprake is van permanent zoet water (<400mg/l, blauw), inlaatvensters (oranje) of permanent verzilt water (>400 mg/l, rood). Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de gemiddelde situatie en een extreme situatie (95%-waarde).

Verder kunnen de volgende regels uit de statistische analyse worden geconcludeerd.

Momenten dat er altijd ingelaten kan worden:

- Bij rivierafvoeren boven 2250 m³/s bij Lobith kan er in de gehele periode van 2000-2020 ingenomen worden zonder restricties.
- Boven 1750 m³/s is dit ook altijd het geval geweest, behalve in enkele situaties waarbij de zeewaterstand met meer dan 0.5 m was verhoogd.

Momenten waarbij in 95% van de gevallen ingelaten kan worden:

- Boven de 2000 m³/s is dit in 95% van de gevallen het geval ongeacht de zeewaterstand.
- Boven de 1250 m³/s is in 95% van de gevallen gedurende de gehele getijcyclus de zoutconcentratie onder 400 mg/l, behalve als de zeewaterstand >0.5 m verhoogd is.

Momenten dat er in de mediane situatie van 2000-2018 ingelaten kan worden:

- Mediaan genomen is er bij rivierafvoeren onder de 875 m³/s altijd sprake van restricties in inlaatmomenten.
- Vanaf 1250 m³/s bij Lobith kan er mediaan genomen zonder restricties zoet water worden ingelaten, tenzij de zeewaterstand sterk verhoogd is (>1.0 m).

8.2 Aanbevelingen

In deze paragraaf zijn de aanbevelingen voor het gebruik van het ontwikkelde model, de opgedane kennis en voor eventueel verder onderzoek/verbeteringen beschreven.

De bruikbaarheid van de ontwikkelde modellen

De zijkhavenmodellen zijn niet in staat om het exacte verloop van de chlorideconcentraties te voorspellen. De ontwikkelingen van de inlaatvensters 10 getijden vooruit geeft over het algemeen echter een goede indicatie van de gemeten chlorideconcentraties. Dit betekent dat de zijkhavenberekeningen kunnen worden gebruikt om het expert judgement van beheerders te ondersteunen: gaan de inlaatvensters beter of slechter worden in de komende dagen? Het is aan te bevelen om de beheerders eerst enkele casestudies voor te leggen, zodat zij in kunnen schatten of deze informatie voor hen van toegevoegde waarde is. Als dat het geval is, kan het ontwikkelde model in een operationele context (bijvoorbeeld via de informatieschermen van Slim Watermanagement) worden geïmplementeerd.

De voorspelfout van de zijkhavenmodellen is het kleinst voor een paar getijden vooruit. Hierdoor is het aan te raden om bij het gebruik van de zijkhavenberekening na elk getij te updaten zodat er weer een nieuwe voorspelling voor de komende 10 getijden ontstaat. Op deze manier is de korte termijn voorspelling steeds gebaseerd op de meest recente waarden.

Onderzoek naar het concentratieverloop bij locatie Lekhaven

De chlorideconcentratie bij locatie Lekhaven kon niet altijd beschreven worden door de variabelen gebaseerd op zeewaterstand en rivierafvoer. Meer onderzoek naar de onderliggende mechanismen kan waardevol zijn om de "tussenstap" voorspelling, de chlorideconcentratie bij Lekhaven, te verbeteren. Rond Lekhaven is sprake van een complexe fluctuatie van de chlorideconcentratie, met een zaagtandverloop en veel pieken en dalen. Nader onderzoek is nodig om dit verloop te duiden en met meer zekerheid te kunnen stellen of Lekhaven als representatief kan worden gezien voor de concentratie in de monding van alle beschouwde zijkhavens.

De ontwikkelde modellen voor de zijhavens aan de Nieuwe Maas zijn eventueel te verbeteren door voor Lekhaven niet gebruik te maken van het ontwikkelde statistische model maar van de zoutverwachting vanuit het 1D SOBEK-model van Rijkswaterstaat. Een vergelijkende studie tussen deze twee bronnen voor de concentratie bij Lekhaven is aan te bevelen. Een keuze tussen een statistisch model óf een SOBEK model is aan te bevelen boven een combinatie van modellen, waarbij de SOBEK-resultaten worden geïmplementeerd in het statistische model. De SOBEK-resultaten zijn immers nauw verweven met de andere parameters in het statistische model (rivierafvoer en zeewaterstand), waardoor er ongewenste afhankelijkheden tussen de modelparameters ontstaan.

De bepaalde chlorideconcentraties bij Lekhaven zouden daarnaast nog vergeleken kunnen worden met de resultaten van de GGV³ vuistregel die RWS hanteert.

Meetmethoden voor de zoutconcentratie

Er is gebruik gemaakt van door RWS omgezette chlorideconcentratie reeksen (vanuit EC-metingen) voor de RWS-metpunten. Voor de waterbeheerders is gebruik gemaakt van de EC naar CL formule welke door HHSK gebruikt wordt. Deze formule is temperatuur-onafhankelijk. De afwijkingen tussen deze twee omvormingen in kaart brengen kan waardevol zijn. Van de gehanteerde EC naar CL formule is bekend dat deze minder goed werkt bij lagere saliniteit.

Voor het Lekhaven model is nu gebruik gemaakt van een gemiddelde waarde over de drie dieptemetingen bij Lekhaven. Aangezien de zijhavens vrij ondiep liggen in vergelijking met het diepste meetpunt bij Lekhaven zou het gebruik van het ondiepste meetpunt of de twee bovenste meetpunten bij Lekhaven voor andere resultaten kunnen zorgen. Of dit voor verbeteringen zou kunnen worden onderzocht in een vervolgstudie.

Doorwerking van voorspelfouten

Wat verder ook interessant is om na te gaan is hoe de fouten in de te gebruiken waterstanden bij Hoek van Holland en rivierafvoeren bij Lobith doorwerken in de voorspelfout van Lekhaven en de zijhavens. In dit onderzoek is gewerkt met achteraf gemeten waterstanden en rivierafvoer bij respectievelijk Hoek van Holland en Lobith. Zeker voor 5-10 getijden vooruit ontstaat een onzekerheid op deze variabelen.

Strategisch spoelen

Er zijn mogelijk kansen om via gericht uitmalen de zijhavens op strategische momenten een zoete impuls te geven, waarna verzilting gedurende langere tijd niet minder aan de orde is. Zo is mogelijk te voorkomen dat eerst zout water moet worden ingenomen, voordat zoet water vanaf de Nieuwe Maas de zijhaven binnen stroomt. Een verkenning naar dit handelingsperspectief is aan te bevelen. Dit geldt niet voor Pernis en Leuvehaven aangezien deze geen gemaal hebben en ook niet voor Brielselaan aangezien de invloed van het gemaal hier minimaal is.

³ GGV: Getij Gemiddelde Verhang, zie paragraaf 5.1.4.

9 Literatuurlijst

Deltares (2015a)

Systeemanalyse van de Rijn-Maasmonding voor verzilting. Kranenburg, Wouter. 2015

Deltares (2015b)

Effectbepaling verdieping Nieuwe Waterweg op KWA. Boogaard van den, Henk. 2015

Deltares (2018a)

Zoutindringing in de Rijn Maasmonding
(http://publications.deltares.nl/11200589_001_0010.pdf). Huismans, Ymke. 2018

Deltares (2018b)

Data-analyse verzilting Hollandsche IJssel en Lek droogteperiode 2018. Wijk van der, Remi. 2018

Hydrologic (2015a)

Inventarisatie Slim Watermanagement Rijn-Maasmonding. December 2015

Hydrologic (2015b)

Verzilting door verdieping Nieuwe Waterweg en Botlek. December 2015

Hydrologic (2015c)

Zoutintrusie Parksluizen. Januari 2015

Hydrologic (2013)

Notitie 'Verkenning zoetwaterbuffer Hollandsche IJssel'. P557, November 2013

Svasek Hydraulics (2015)

Effectbepaling verdieping Nieuwe Waterweg op verzilting in benedenrivierengebied. Leeuwen van, Bas. November 2015

Rijkswaterstaat (2004)

Trendanalyse verzilting Benedenrivierengebied 1978-2002, Oktober 2004

Rijkswaterstaat (2018)

Vuistregel (achterwaartse) verzilting Rijn-Maasmonding, Oktober 2018

Website Schieland en de Krimpenerwaard (2020)

<https://www.schielandendekrimpenerwaard.nl/actueel/nieuws-2020/waterinlaat-leuvekolk-klaar-voor-gebruik>. November 2020.

Website spuihaven (2021)

[https://nl.wikipedia.org/wiki/Spuihaven_\(Schiedam\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Spuihaven_(Schiedam)) geraadpleegd op: 25-02-2021

Website Parksluizen (2021)

<https://sites.google.com/site/brugsluisrivier/bruggensluizen/delfshavenseschie/parksluizen>
geraadpleegd op: 26-02-2021

Website Boerengatbrug (2021)

<https://www.rotterdam.nl/locaties/boerengatbrug/> geraadpleegd op: 26-02-2021

Website Leuvehaven (2021)

<https://www.rotterdam.nl/locaties/nieuwe-leuvebrug/> geraadpleegd op: 01-03-2021

Website Madroelhaven (2021)

<https://www.wsv-sluis1.nl/Vaarwegen.pdf> geraadpleegd op: 03-03-2021

Website Maashaven (2021)

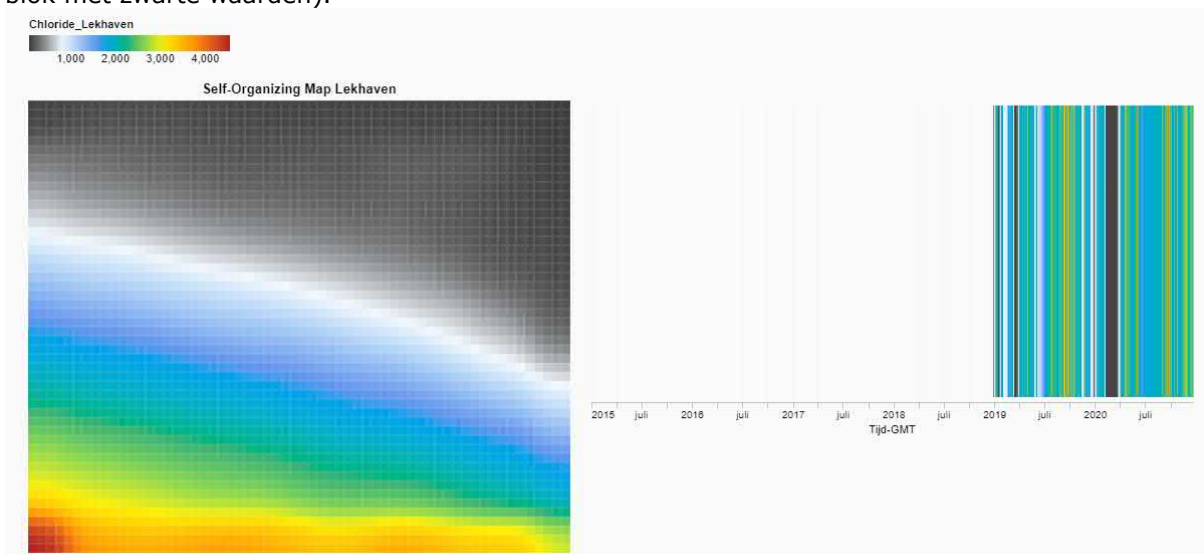
<https://www.portofrotterdam.com/nl/onze-haven/havenontwikkeling/maaskade-vernieuwing-500-meter-kade> geraadpleegd op: 02-03-2021

A Bijlage

A.1 Self-Organizing-Maps

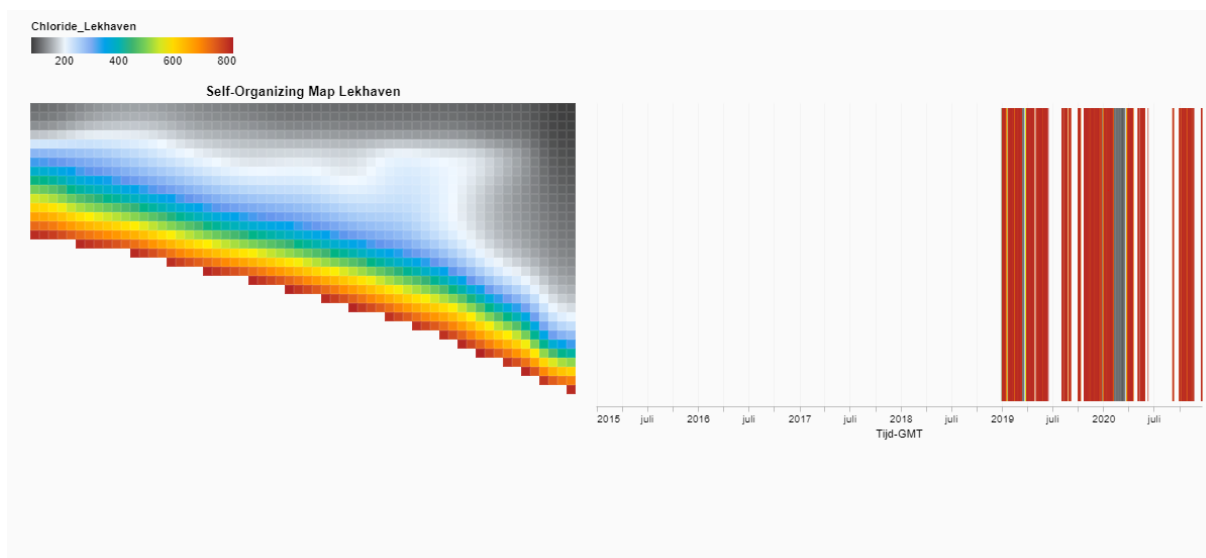
Dit hoofdstuk geeft inzicht in het gedrag van de chlorideconcentratie ten opzichte van beschrijvende variabelen via een analyse met Self-Organizing Maps (SOM). Naast de tijdreeksanalyse met visuele grafieken is een SOM-analyse uitgevoerd om verbanden te verkennen die niet nog niet bekend waren of voor de hand lagen. Dit kan vooral in complexe systemen tot nieuwe inzichten leiden. De SOM-analyse is een techniek waarbij data om wordt gezet tot een vorm waarbij clusters van data kunnen worden ontdekt. Datakolommen (zoals in dit geval chlorideconcentratie, waterstand en rivierafvoer) worden naast elkaar gezet, waarbij het algoritme overeenkomstige blokken probeert te zoeken. Een voorbeeld hiervan is bijvoorbeeld een cluster dat ontstaat van momenten met een lage chlorideconcentratie waarbij tegelijkertijd hoge afvoeren zijn gemeten. Als zulke momenten regelmatig voorkomen, wordt dit als een cluster gevisualiseerd in de SOM.

In Figuur 99 is in het grote vierkant een verdeling van chlorideconcentraties in de Nieuwe Maas bij meetlocatie Lekhaven te zien, waarbij het verloop van zwart tot rood de hoogte van de chlorideconcentratie representeert. Dezelfde kleuren zijn terug te zien in de tijdlijn aan de rechterkant. Zo is er begin 2020 een lange periode met lage chlorideconcentraties te zien (breed blok met zwarte waarden).

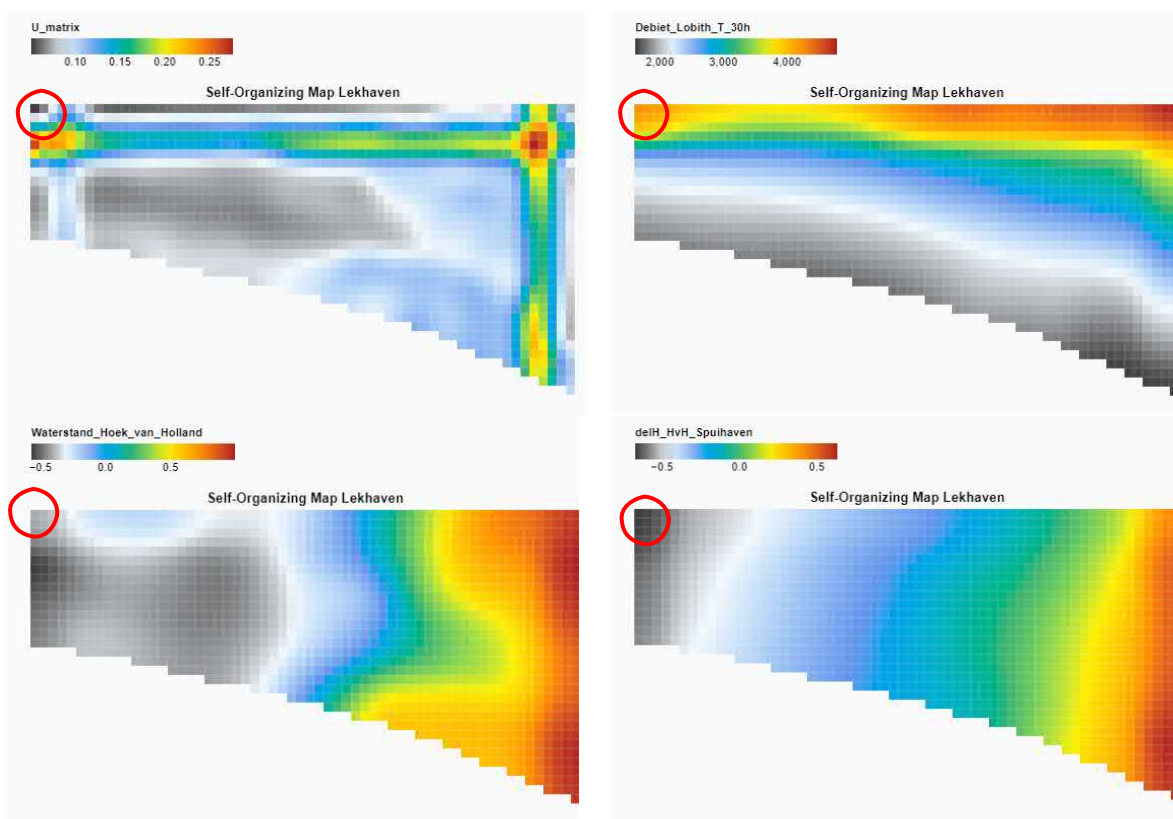


Figuur 99 Clustervorming in een SOM-analyse

Wanneer er bij Lekhaven wordt gefilterd op chlorideconcentraties tot 800 mg/l, blijft het deel over van Figuur 100. Op deze manier kan een interessegebied nader geanalyseerd worden. Vervolgens kan er in plaats van naar de concentratie naar de zogeheten U-matrix gekeken worden, waar clusters zich bevinden op het vierkante raster waar we al eerder naar keken. Linksboven in het raster, in rood omcirkeld in Figuur 101, is in de U-matrix een cluster te vinden, (lage waarden clusters). Een groep lage U-waarden betekent dat verschillende momenten eenzelfde gedrag in variabelen laat zien, wat als cluster wordt gezien. Dit zijn altijd lage waarden, de overige figuren eromheen laten de variabele waarden zien bij dit cluster. In dit specifieke cluster is de chlorideconcentratie bij Lekhaven laag, het debiet bij Lobith hoog, de waterstand bij Hoek van Holland en het verhang tussen Hoek van Holland en Spuihaven laag.



Figuur 100 Clustervorming in een SOM-analyse, gefilterd tot 800 mg/l cl



Figuur 101 Waarden variabele voor gevonden cluster (in het rood in de U-matrix) met de SOM-analyse

De SOM-analyse heeft geen verrassende inzichten geleverd voor de Lekhaven. Lekhaven reageert zoals een zijhaven, waardoor de verwachting is dat dit voor de overige zijhavens van de inlaten tot hetzelfde resultaat leidt. Dit is de reden dat dit spoor niet verder onderzocht is voor de andere zijhavens. De inzichten die naar voren kwamen waren redelijk voor de hand liggend: rivierafvoer en zeewaterstand (eventueel indirect, in de vorm van het verhang) zijn de bepalende parameters voor de zoutconcentratie. Enerzijds geeft dit vertrouwen in de uitkomsten van de SOM. Anderzijds heeft de SOM-analyse daarom niet geleid tot concrete aandachtspunten voor de statistische analyse (hoofdstuk 5).

A.2 Casestudie inlaten

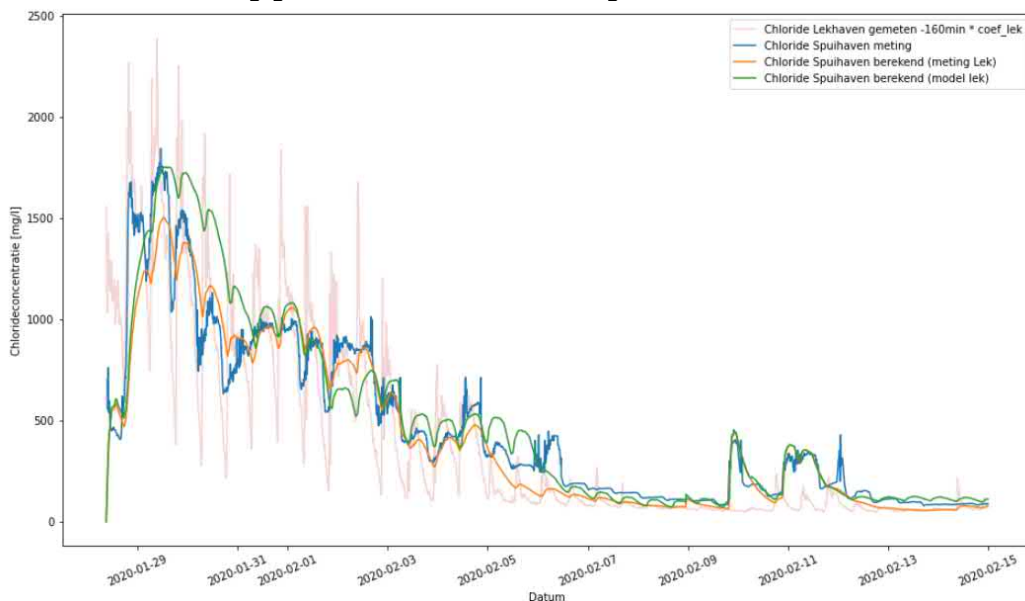
Hieronder zullen per inlaat een aantal casestudies getoond worden op verschillende momenten. Op deze manier wordt de werking van de zijhavenberekening inzichtelijk gemaakt. De zijhavenberekening gaat niet op elk moment bij alle inlaten goed, dit zal voor de verschillende momenten te zien zijn in de voorbeelden. De startmomenten in de chlorideconcentratie figuren zijn de momenten waar de metingen en berekeningen voor een getij periode precies op elkaar liggen.

A.2.1 Casestudies Spuihaven

De werking van het inrekenen van de Spuihaven is hieronder inzichtelijk gemaakt doormiddel van casestudies. Het inrekenen van de zijhavens is visueel weergegeven met de meting van de zijhaven en twee soorten berekende resultaten voor de zijhaven. De twee soorten berekende resultaten voor de zijhaven verschillen in wat er voor de invoervariabele Lekhaven is gebruikt. Namelijk de gemeten concentratie en de gemodelleerde concentratie (afvoerafhankelijk Lekhavenmodel) bij Lekhaven. Op deze manier wordt de gemodelleerde fout van Lekhaven inzichtelijk wanneer hiermee wordt doorgerekend in de zijhavens.

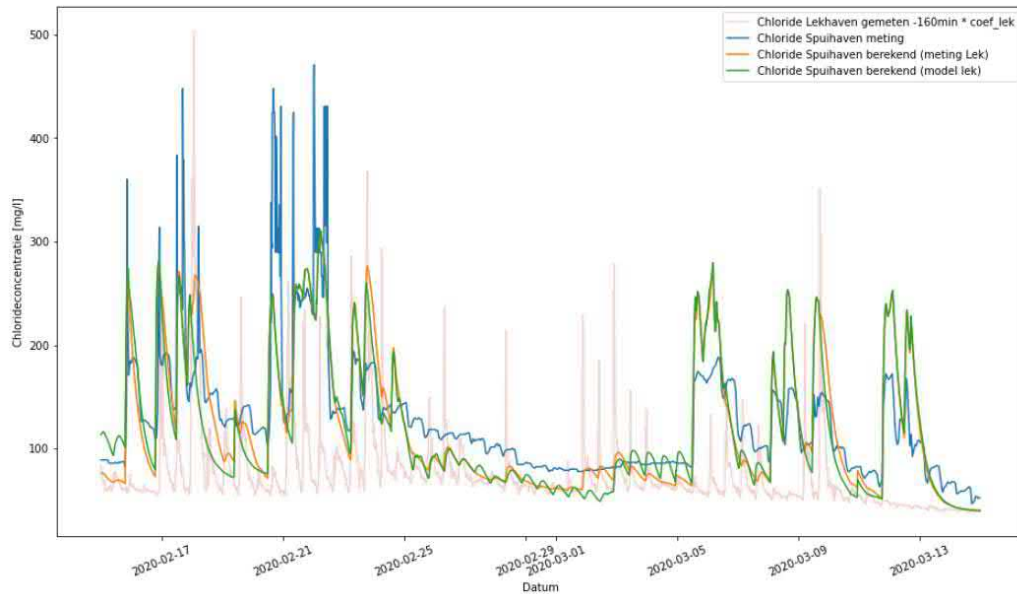
Februari-maart 2020

Begin februari 2020 is de chlorideconcentratie in de spuihaven initieel boven de inlaatgrens van 400 mg/l en daalt deze tot onder de grens. Rond 30 januari geeft de Spuihaven berekening met $cl_{Lekhaven, model}$ een overschatting waar de Spuihaven berekening met $cl_{Lekhaven, gemeten}$ beter overeenkomt met de meting van de Spuihaven. Bij de lagere chlorideconcentraties liggen beide berekeningen dicht bij elkaar en komt dit erg goed overeen met de metingen.



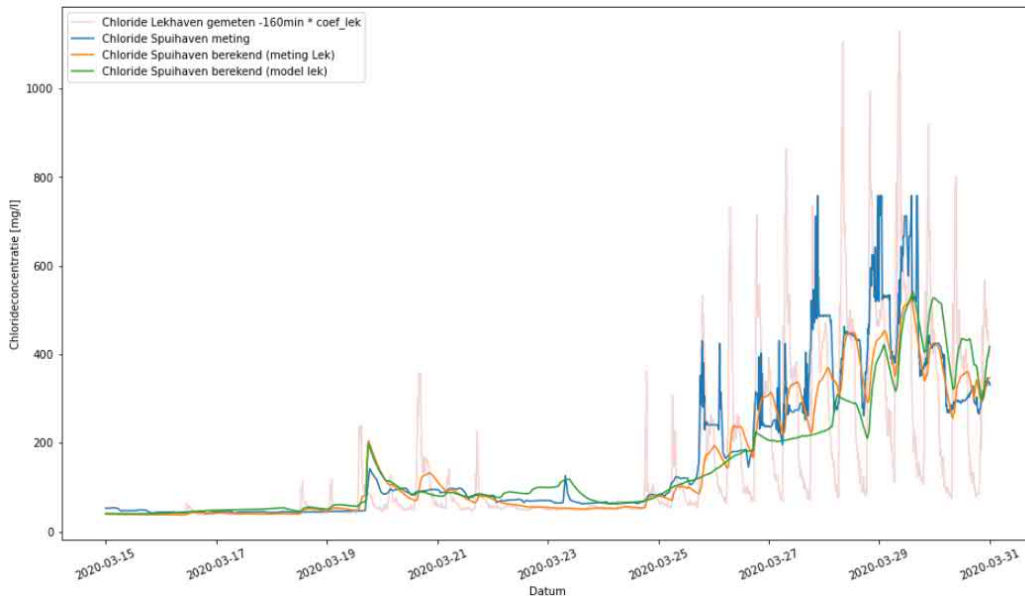
Figuur 102 Chlorideconcentratie Spuihaven, 19 januari t/m 14 februari 2020

Van half februari tot half maart 2020 ligt de chlorideconcentratie voornamelijk onder de inlaatgrens. Het berekenen van de Spuihaven geeft in deze periode hier vrij goede resultaten. De minima worden lichtelijk onderschat bij de berekende zijhaven chlorideconcentraties. De berekende concentraties zijn minder goed om de pieken tussen 16 en 22 februari goed te berekenen. Vanaf 5 tot 13 maart worden de pieken juist overschat. De berekende concentraties geven hiermee wel een goede indruk van wat de chlorideconcentratie gaat doen in deze periode, 10 getijden vooruit.



Figuur 103 Chlorideconcentratie Spuihaven, 15 februari t/m 14 maart 2020

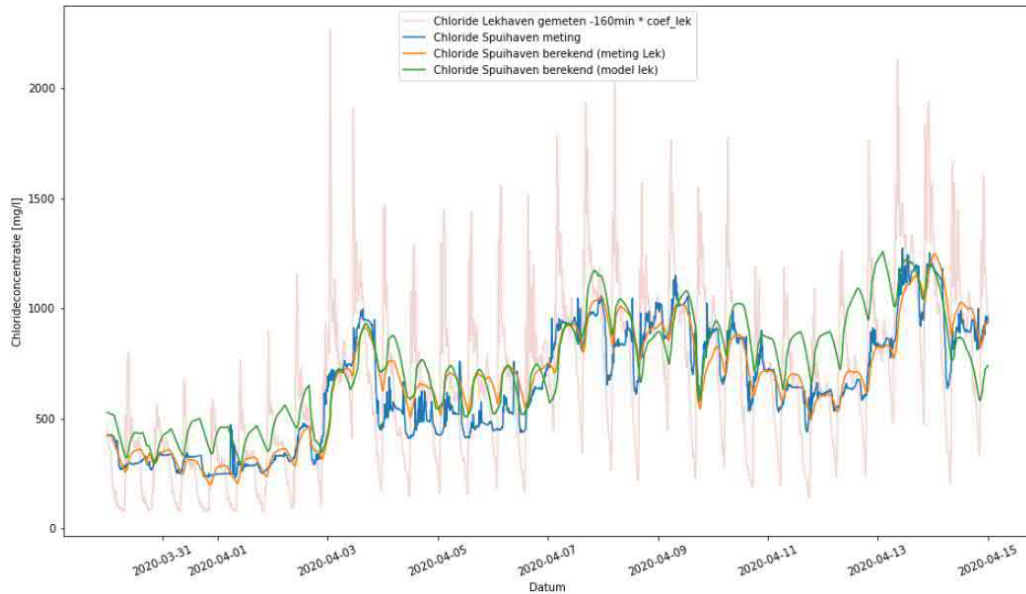
De tweede helft van maart is nog steeds een periode met lage chlorideconcentraties welke oplopen tot in de pieken boven inlaatgrens. Van 15 t/m 25 maart gaat de Spuihaven berekening erg goed in het lage chloride bereik. Bij de stijging rond 24 maart stijgt de berekende Spuihaven concentratie afgevlakt waarbij de pieken missen. Hierdoor missen er een aantal momenten dat de gemeten concentratie boven de 400 mg/l komt.



Figuur 104 Chlorideconcentratie Spuihaven, 15 maart t/m 31 maart 2020

April 2020

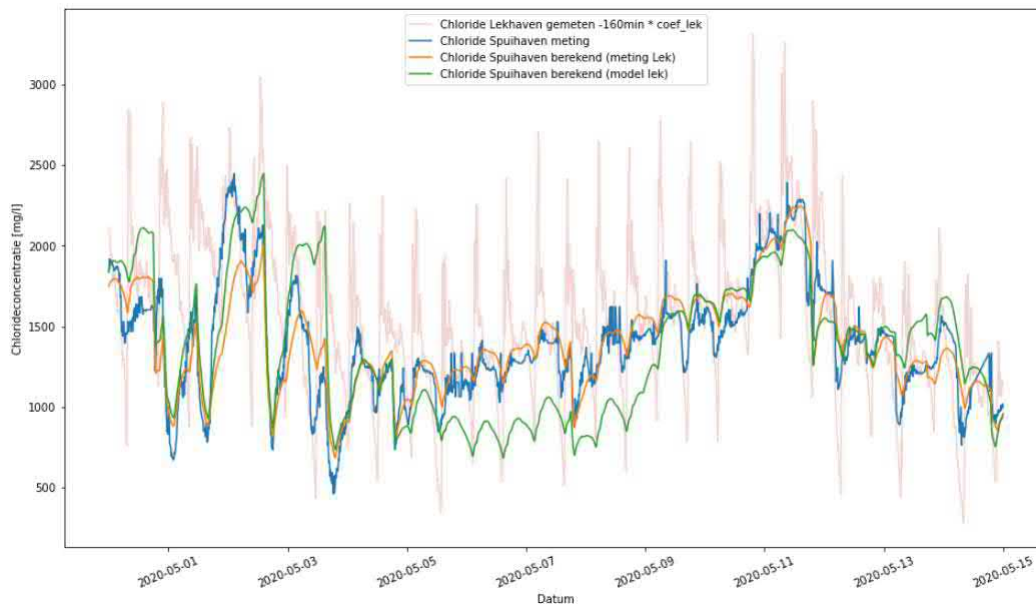
De eerste helft van april 2020 is een periode waar de chlorideconcentratie in de zijhaven even net onder de 400 mg/l grens ligt en vervolgens iets boven de 500 mg/l schommelt. In de casestudie van Figuur 105 is te zien dat de berekening Spuihaven voor deze periode met $cl_{Lekhaven, gemeten}$ erg goed gaat. De berekening Spuihaven met $cl_{Lekhaven, model}$ volgt hetzelfde patroon maar geeft een lichte overschatting over het grootste deel van deze periode.



Figuur 105 Chlorideconcentratie Spuihaven, 30 maart t/m 14 april 2020

Mei 2020

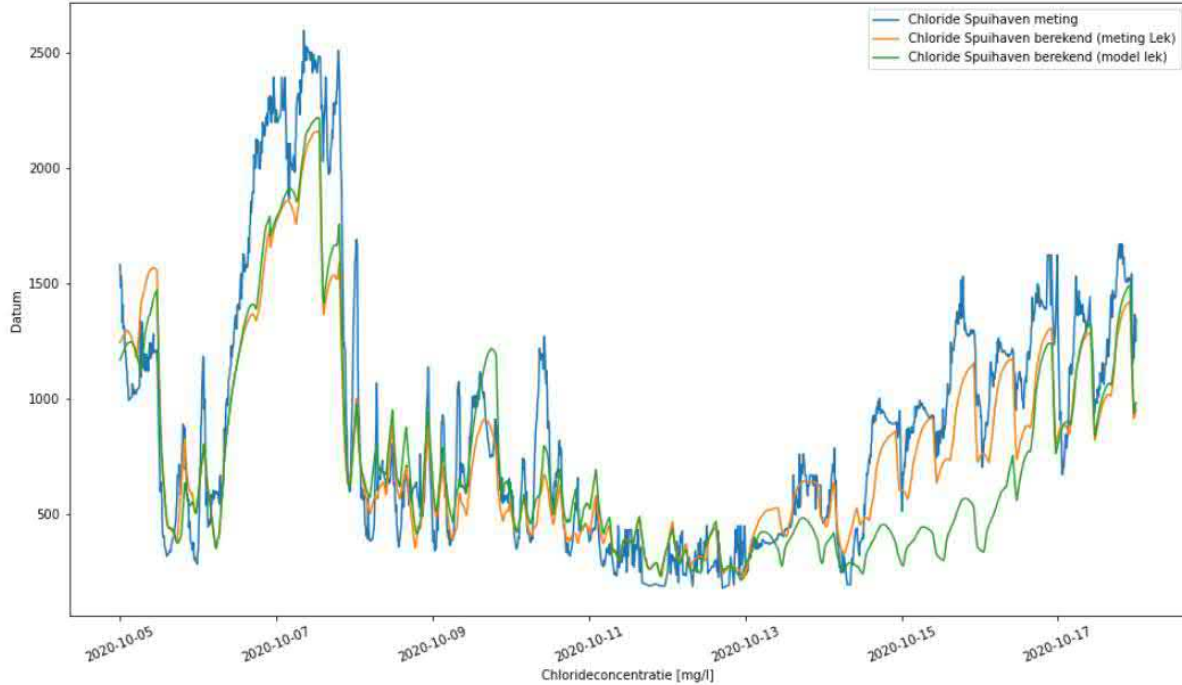
De eerste helft van mei 2020 is een periode waar de chlorideconcentratie in de zijhaven rond de 1000 a 2000 mg/l schommelt. Vooral rond 5 t/m 9 mei wijkt de berekende Spuihaven met $Cl_{Lekhaven, model}$ af. De berekening van de spuihaven geeft wel het globale verloop goed weer. Deze casestudie is op het moment dat de chlorideconcentraties zich boven de inlaatgrens bevinden.



Figuur 106 Chlorideconcentratie Spuihaven, 30 april t/m 14 mei 2020

Oktober 2020

In de eerste helft van oktober wordt de Spuihaven vrij goed berekend. Van 13 t/m 16 oktober echter is een flinke onderschatting voor de berekening Spuihaven met $cl_{Lekhaven, model}$ te zien. Dit is een afwijking die ontstaat bij de modellering van de chlorideconcentratie Lekhaven, gezien de oranje lijn vrij goed de meting beschrijft.



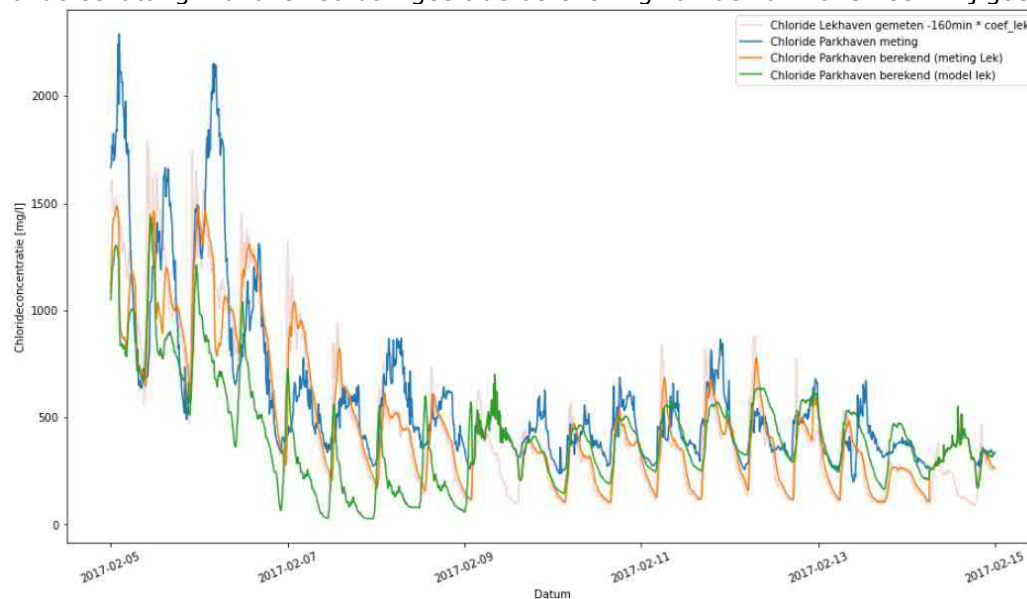
Figuur 107 Chlorideconcentratie Spuihaven, 04 oktober t/m 16 oktober 2020

A.2.2 Casestudies Parksluizen

De werking van het inrekenen van de Parksluizen is hieronder inzichtelijk gemaakt doormiddel van casestudies. Het inrekenen van de zijhavens is visueel weergegeven met de meting van de zijhaven en twee soorten berekende resultaten voor de zijhaven. De twee soorten berekende resultaten voor de zijhaven verschillen in wat er voor de invoervariabele Lekhaven is gebruikt. Namelijk de gemeten concentratie en de gemodelleerde concentratie (afvoerafhankelijk Lekhavenmodel) bij Lekhaven. Op deze manier wordt de gemodelleerde fout van Lekhaven inzichtelijk wanneer hiermee wordt doorgerekend in de zijhavens.

Februari 2017

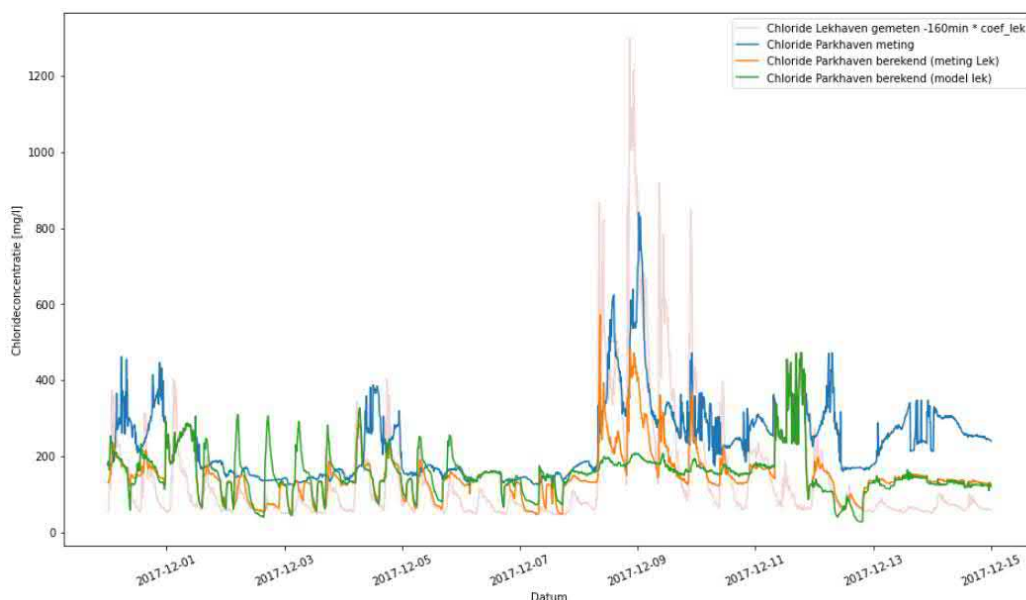
Begin februari heeft een periode met hogere chlorideconcentraties in de zijhaven maar ook redelijke lage. Bij het hogere bereik geeft het berekende Parkhaven model met $cl_{Lekhaven, model}$ een constante onderschatting. Vanaf 9 februari geeft de berekening van de Parkhaven een vrij goed beeld.



Figuur 108 Chlorideconcentratie Parkhaven, 2 februari t/m 14 februari 2017

December 2017

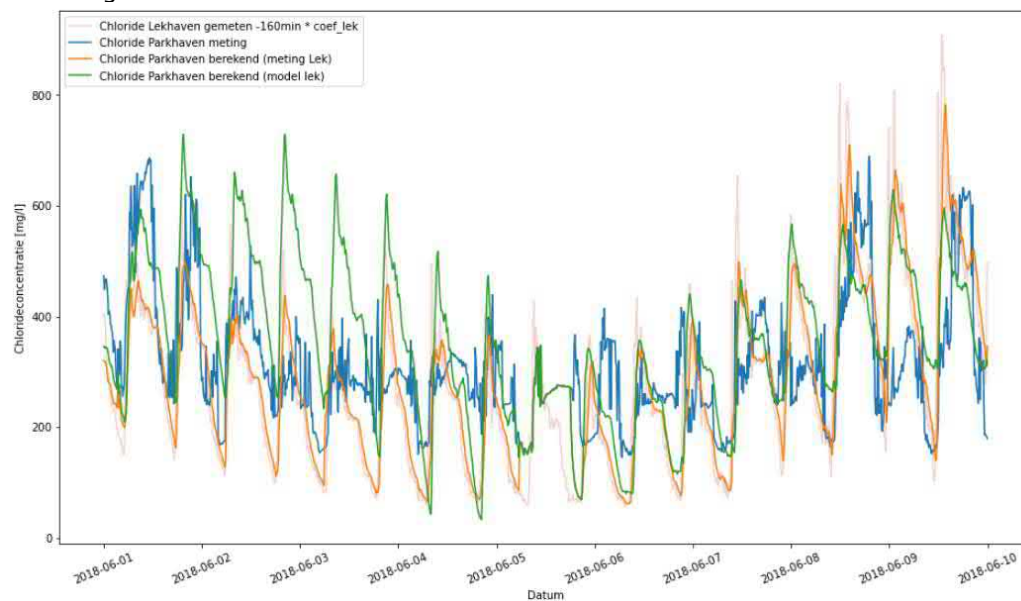
Eind 2017 is een periode met lage chlorideconcentratie in de Parkhaven. De piek rond 9 december wordt niet goed meegenomen bij de berekende Parkhaven, dit komt door een fout in de gemodelleerde Lakhaven concentratie die gebruikt wordt. De rest van deze periode schommelt de berekende waarde rond de gemeten waarde.



Figuur 109 Chlorideconcentratie Parkhaven, 30 november t/m 14 december 2017

juni 2018

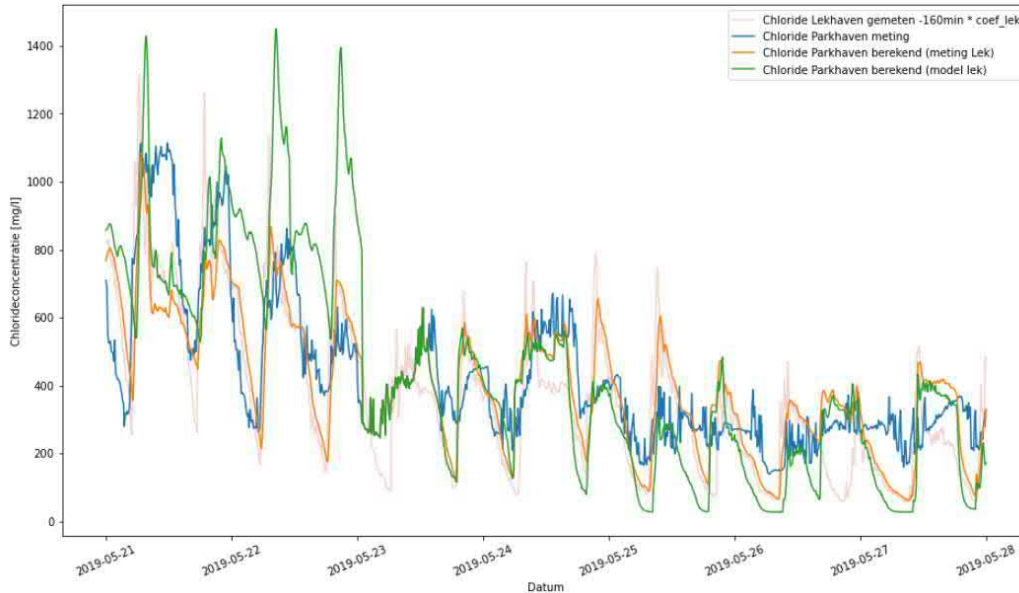
Begin juni 2018 is een periode waarbij de chlorideconcentratie in de Parkhaven rond de 400 mg/l schommelt. De berekende Parkhaven concentraties dalen te langzaam van 2 tot 5 juni en geven hiermee een overschatting. Hierdoor lijkt het inlaatvenster erg klein terwijl deze gemeten meer aanwezig is.



Figuur 110 Chlorideconcentratie Parkhaven, 1 juni t/m 10 juni 2018

Mei 2019

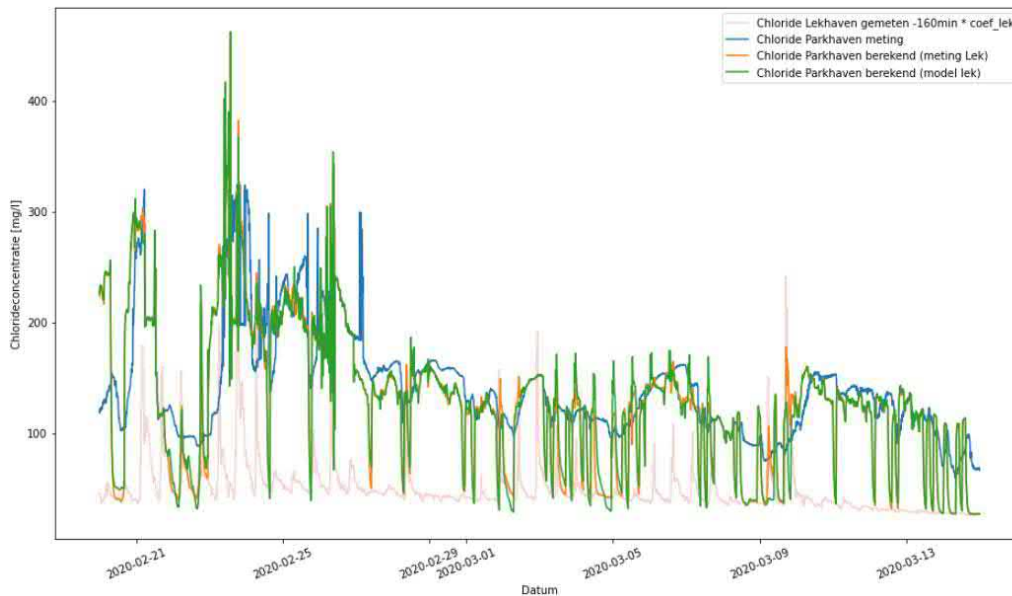
Rond 22 en 23 mei geeft de berekende Parkhaven een grote overschatting. De berekende Parkhaven concentratie met $cl_{\text{Lekhaven, meting}}$ komt wel goed overeen met de metingen wat wijst op een modelleringsfout van Lekhaven die doorwerkt naar de Parkhaven. De periode daarna komt wel redelijk goed overeen.



Figuur 111 Chlorideconcentratie Parkhaven, 21 mei t/m 27 mei 2019

Februari-Maart 2020

Eind februari, begin maart zijn de concentraties vrij laag in de Parkhaven. Hierbij is te zien bij deze lage concentraties de invloed van de boezemafvoer voor plotselinge dalingen zorgen. Het algemene beeld wordt vrij goed berekend in de Parkhaven.



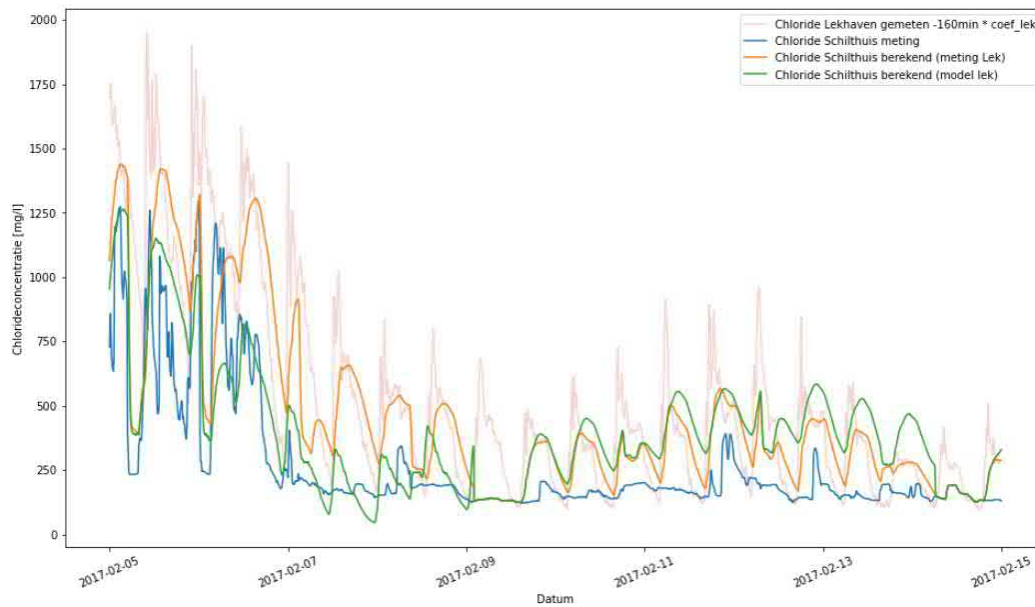
Figuur 112 Chlorideconcentratie Parkhaven, 20 februari t/m 13 februari 2020

A.2.3 Casestudies Schilthuis

De werking van het inrekenen van de zijhaven het Boerengat (inlaat Schilthuis) is hieronder inzichtelijk gemaakt doormiddel van casestudies. Het inrekenen van de zijhavens is visueel weergegeven met de meting van de zijhaven en twee soorten berekende resultaten voor de zijhaven. De twee soorten berekende resultaten voor de zijhaven verschillen in wat er voor de invoervariabele Lekhaven is gebruikt. Namelijk de gemeten concentratie en de gemodelleerde concentratie (afvoerafhankelijk Lekhavenmodel) bij Lekhaven. Op deze manier wordt de gemodelleerde fout van Lekhaven inzichtelijk wanneer hiermee wordt doorgerekend in de zijhavens.

Februari 2017

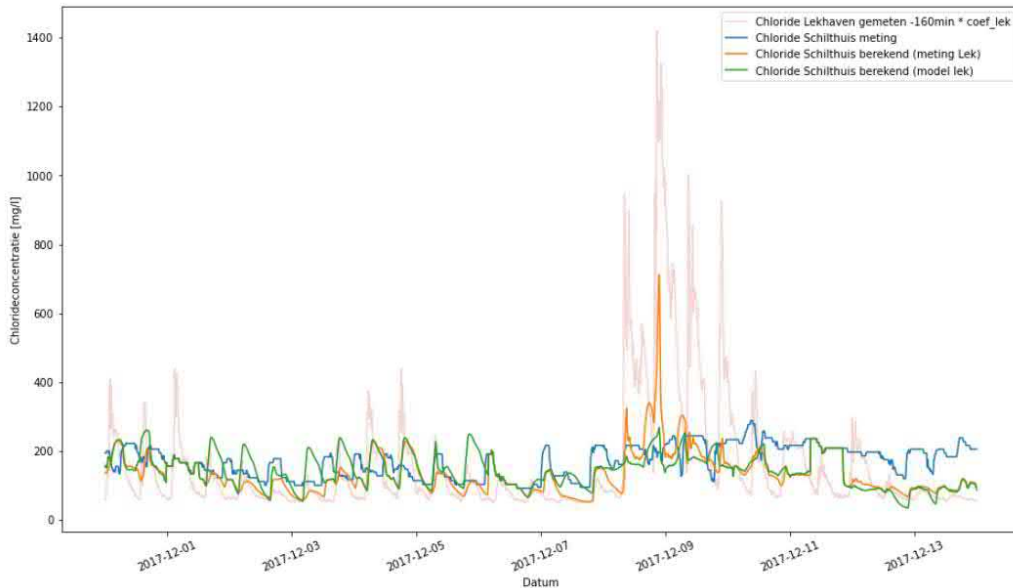
Begin februari 2017 is een periode met initieel hoge chlorideconcentraties gevolgd door lage chlorideconcentraties. Het bereik met hogere chlorideconcentraties is waar de zijhavenberekening met gemodelleerde Lekhaven concentraties vrij goed gaan. De lagere concentraties vanaf 9 februari worden redelijk overschat door de berekende concentraties.



Figuur 113 Chlorideconcentratie Schilthuis, 2 februari t/m 14 februari 2017

December 2017

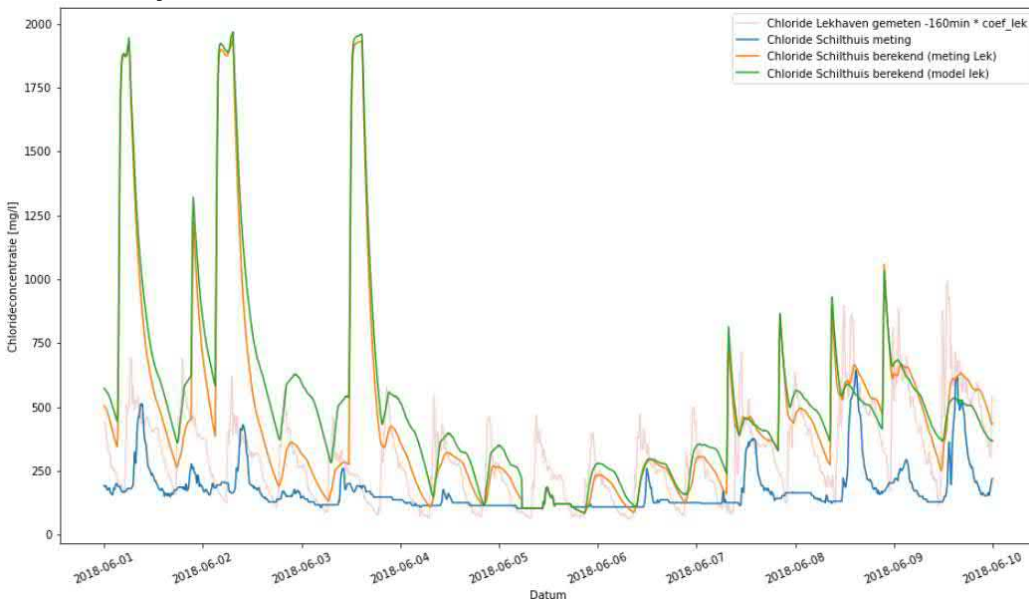
De berekende concentraties bij inlaat schilthuis worden ook begin december van 2017 vrij goed berekend. Richting 10 december worden de berekende waarden lichtelijk onderschat, maar blijven vrij dichtbij de gemeten waarden.



Figuur 114 Chlorideconcentratie Schilthuis, 30 november t/m 14 december 2017

juni 2018

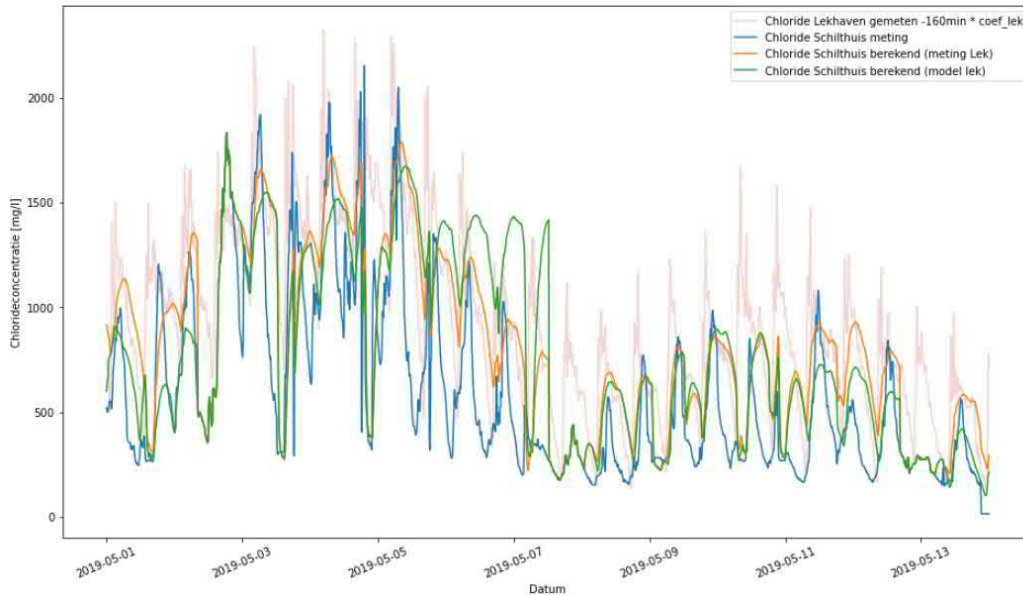
Begin juni 2018 zijn de berekende zijkanten chlorideconcentraties flink overschat. Bij nader onderzoek laat de binnendijks boezemconcentratie extreem hoge en niet variërende waarden zien rond de 2100 mg/l, welke als onbetrouwbaar worden gezien. Dit in combinatie met grote afvoerpieken van 1 t/m 4 juni veroorzaakt de verhoogde concentraties die worden berekend. Van 7 t/m 10 juni is hetzelfde aan de hand alleen met minder grote gemaalafvoeren. Deze fout in boezemmeting loopt van 10 mei 2018 t/m 27 juni 2018.



Figuur 115 Chlorideconcentratie Schilthuis, 1 juni t/m 10 juni 2018

Mei 2019

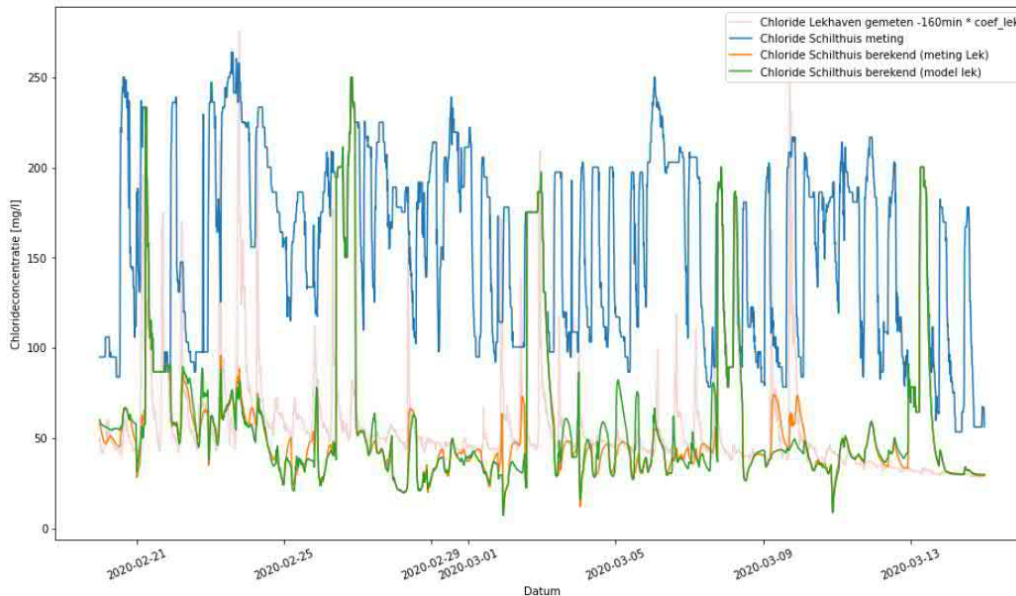
Begin mei is de concentratie eerst vrij hoog, welke vanaf 7 mei rond de 500 mg/l schommelen. Het algemene beeld van de berekende Schilthuis concentratie is goed. Van 5 tot 7 mei daalt de berekende Schilthuis concentratie te langzaam.



Figuur 116 Chlorideconcentratie Schilthuis, 1 mei t/m 14 mei 2019

Februari-Maart 2020

Eind februari, begin maart is een periode met erg lage chlorideconcentraties bij inlaat Schilthuis. De berekende waarden bij Schilthuis worden flink onderschat in deze periode. Echter is dit minder van belang gezien het hier flink onder de inlaatgrens blijft.



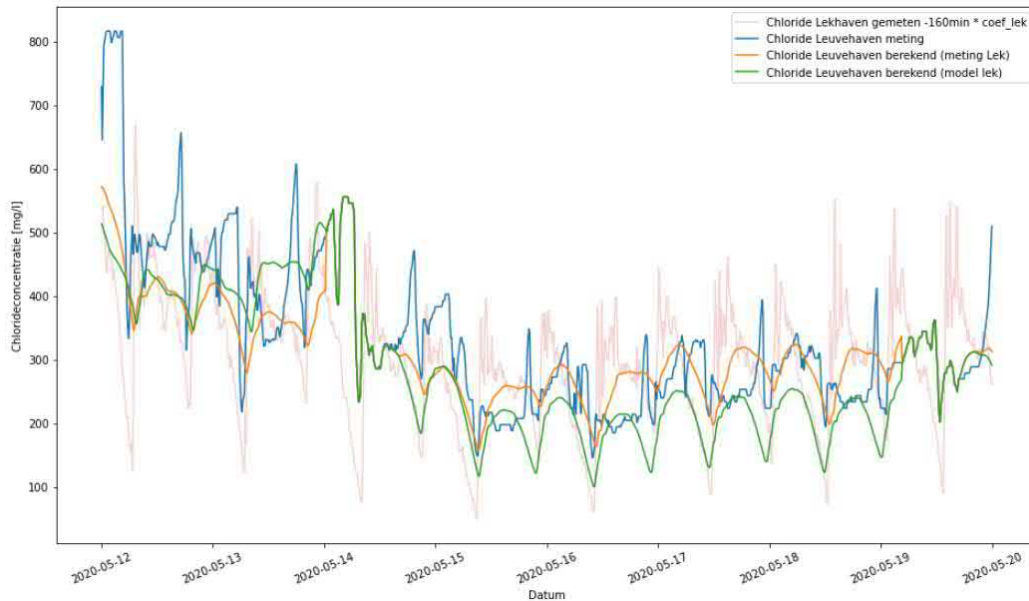
Figuur 117 Chlorideconcentratie Schilthuis, 20 februari t/m 13 februari 2020

A.2.4 Casestudies Leuehaven

De werking van het inrekenen van de Leuehaven is hieronder inzichtelijk gemaakt doormiddel van casestudies. Het inrekenen van de zijhavens is visueel weergegeven met de meting van de zijhaven en twee soorten berekende resultaten voor de zijhaven. De twee soorten berekende resultaten voor de zijhaven verschillen in wat er voor de invoervariabele Lekhaven is gebruikt. Namelijk de gemeten concentratie en de gemodelleerde concentratie (afvoerafhankelijk Lekhavenmodel) bij Lekhaven. Op deze manier wordt de gemodelleerde fout van Lekhaven inzichtelijk wanneer hiermee wordt doorgerekend in de zijhavens.

Mei 2020

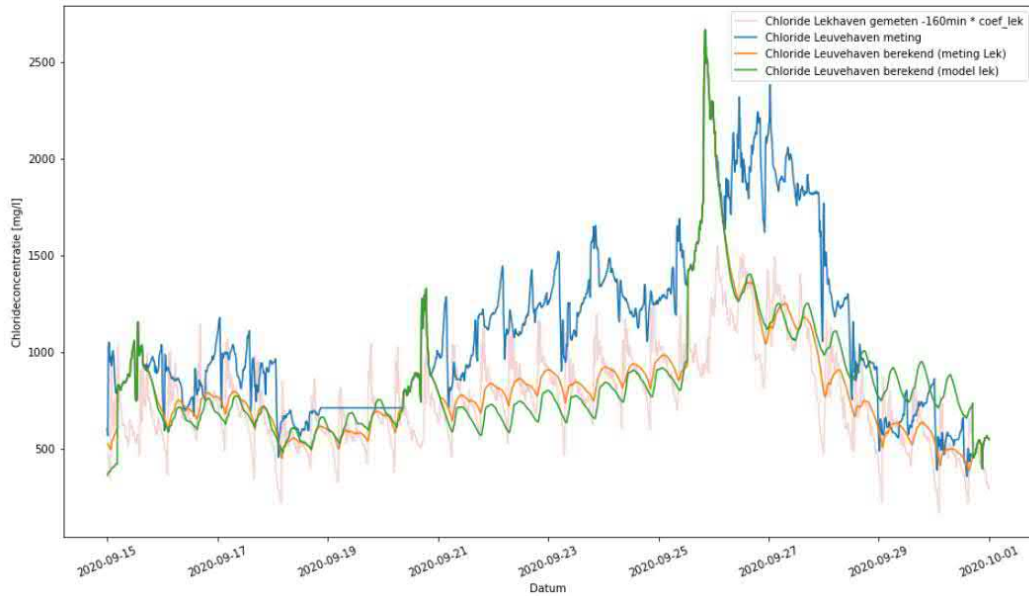
Midden mei 2020 ligt de berekende chlorideconcentratie rond de gemeten waarden. Over het algemeen berekent het model met de $cl_{Lekhaven, model}$ een wat lagere concentratie in deze periode.



Figuur 118 Chlorideconcentratie Leuehaven, 11 mei t/m 19 mei 2020

September 2020

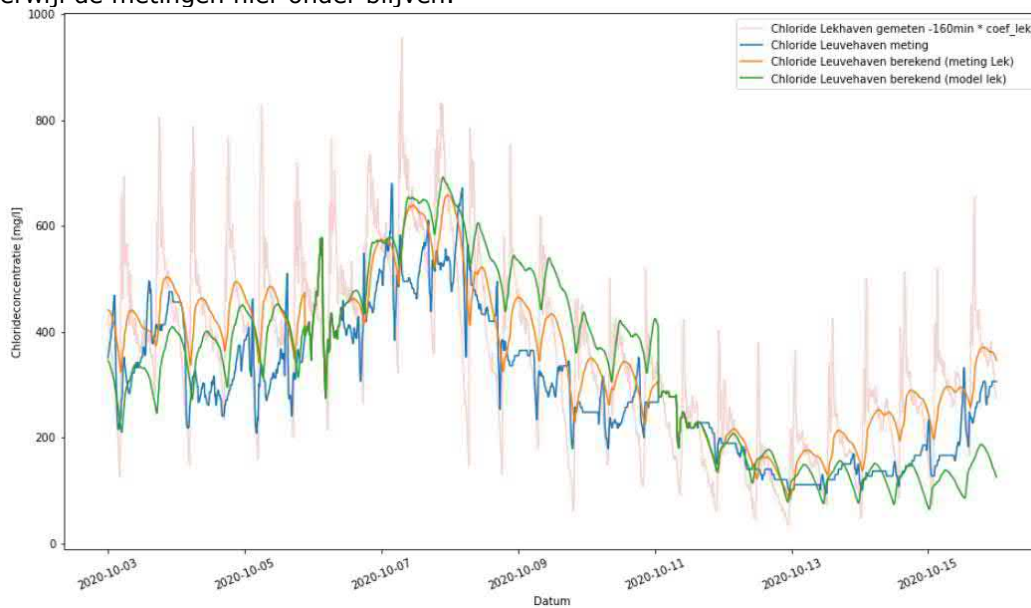
In de tweede helft van september is te zien dat de chlorideconcentratie flink achterblijft bij de berekende waarden. Dit is een moment waar de in mindering gebrachte invloed van Lekhaven door de coëfficiënt $coef_{Lekhaven}$ afwijkt. De correctie op de invloed van Lekhaven zorgt er op dit moment voor dat de concentratie onder de gemeten Leuehaven waarden komt. Dit lijkt vooral in het bereik van hogere chlorideconcentraties te zijn. Bij meer meetdate kan hier meer over gezegd worden.



Figuur 119 Chlorideconcentratie Leuehaven, 14 september t/m 30 september 2020

Oktober 2020

De berekende zijhaven chlorideconcentratie wordt vrij goed berekend voor de periode begin oktober 2020. Rond 9 oktober wordt een overschatting berekend waardoor deze boven de inlaatgrens komt terwijl de metingen hier onder blijven.



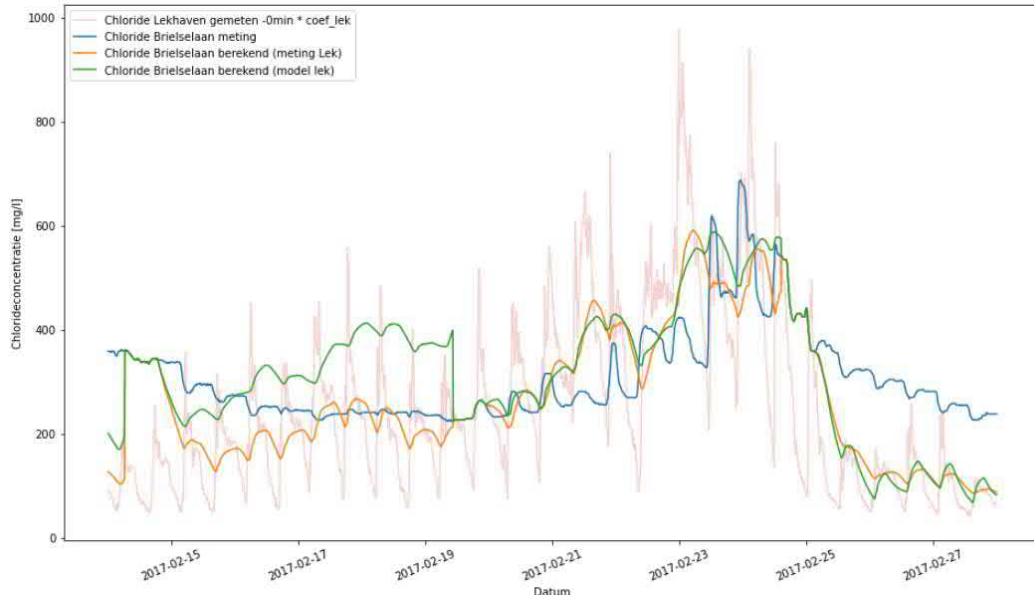
Figuur 120 Chlorideconcentratie Leuehaven, 04 oktober t/m 16 oktober 2020

A.2.5 Casestudies Brielselaan

De werking van het inrekenen van de Brielselaan is hieronder inzichtelijk gemaakt doormiddel van casestudies. Het inrekenen van de zijhavens is visueel weergegeven met de meting van de zijhaven en twee soorten berekende resultaten voor de zijhaven. De twee soorten berekende resultaten voor de zijhaven verschillen in wat er voor de invoervariabele Lekhaven is gebruikt. Namelijk de gemeten concentratie en de gemodelleerde concentratie (afvoerafhankelijk Lekhavenmodel) bij Lekhaven. Op deze manier wordt de gemodelleerde fout van Lekhaven inzichtelijk wanneer hiermee wordt doorgerekend in de zijhavens.

Februari 2017

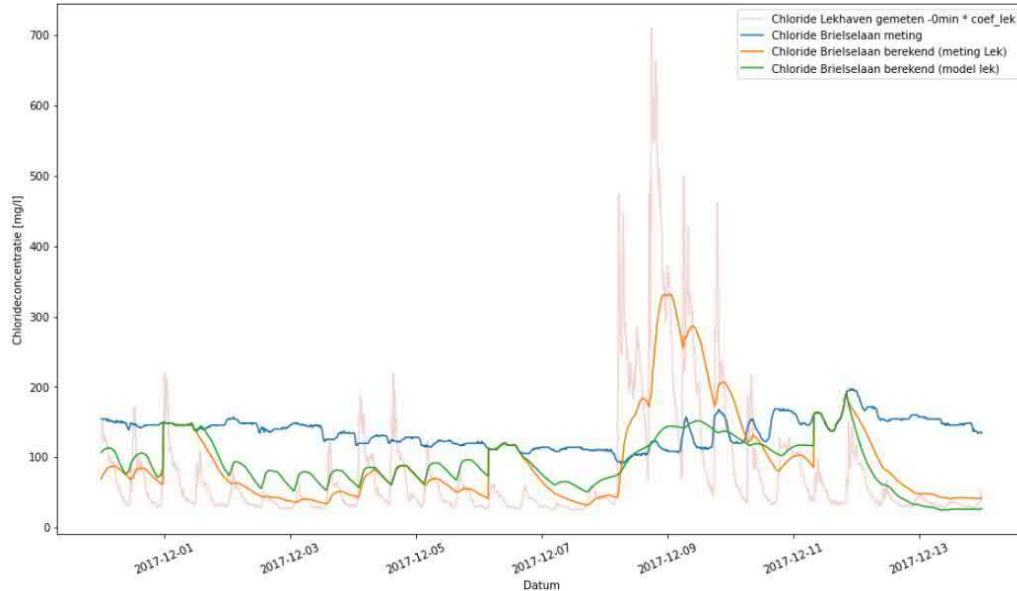
Bij de tweede helft van februari 2017 gaat de berekende Brielselaan waarde met $cl_{Lekhaven, model}$ minder goed, te zien als de groene lijn in Figuur 121. De invoer van de gemodelleerde Lekhaven concentratie zorgt hier voor een afwijking, gezien de oranje lijn (berekening met gemeten Lekhaven) een stuk beter gaat. Voor deze periode is te zien dat het systeem langzamer reageert dan de berekende waarden. Bij de stijging van richting de 400 mg/l komen de berekende waarden en de gemeten waarden een stuk beter overeen. Over het algemeen blijven de voorspelde inlaatvensters hetzelfde voor deze periode bij de gemeten en de berekende waarden.



Figuur 121 Chlorideconcentratie Brielselaan, 14 februari t/m 28 februari 2017

December 2017

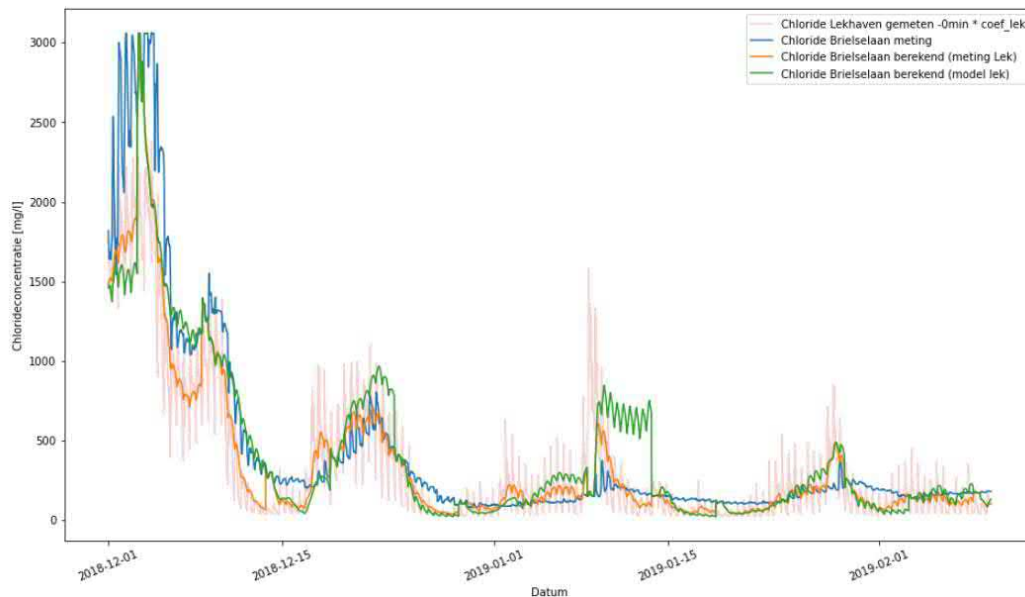
Het meetpunt bij de inlaat van de Brielselaan vertoont in december van 2017 erg constante waarden met weinig echte fluctuaties. Op basis van het berekende model fluctueert de waarden iets meer, waardoor er enige afwijking in voorspelde waarden te zien is. Ook hier is de chlorideconcentratie ver onder de inlaatgrens en heeft de afwijking geen invloed op de inlaatvensters.



Figuur 122 Chlorideconcentratie Brielselaan, 30 november t/m 14 december 2017

December 2018 – januari 2019

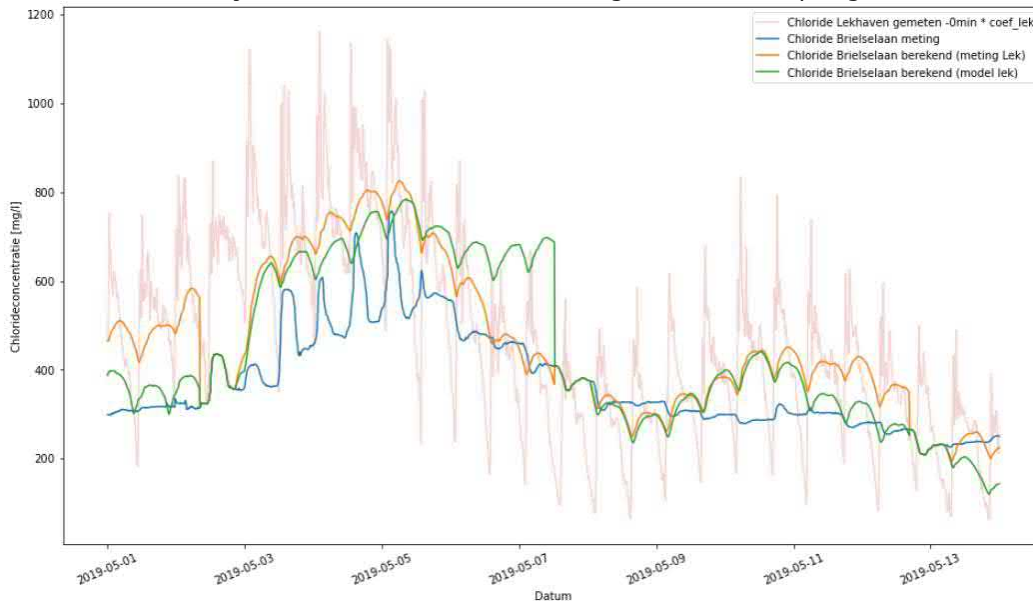
In Figuur 123 is te zien dat de fluctuatie in chlorideconcentratie bij de Lekhaven direct van invloed is op de concentratie bij de Brielselaan. Hierbij valt op dat de berekende modelwaarden goed mee fluctueren met dit verloop. Rond 13 december geeft de berekende modelwaarden met $cl_{Lekhaven, model}$ een onderschatting. Rond de inlaatgrens is de voorspelling vrij goed. Rond 13 januari is een model fout van de chlorideconcentratie te zien die doorwerkt in de berekening (groene lijn).



Figuur 123 Chlorideconcentratie Brielselaan, 1 december 2018 t/m 1 februari 2019

Mei 2019

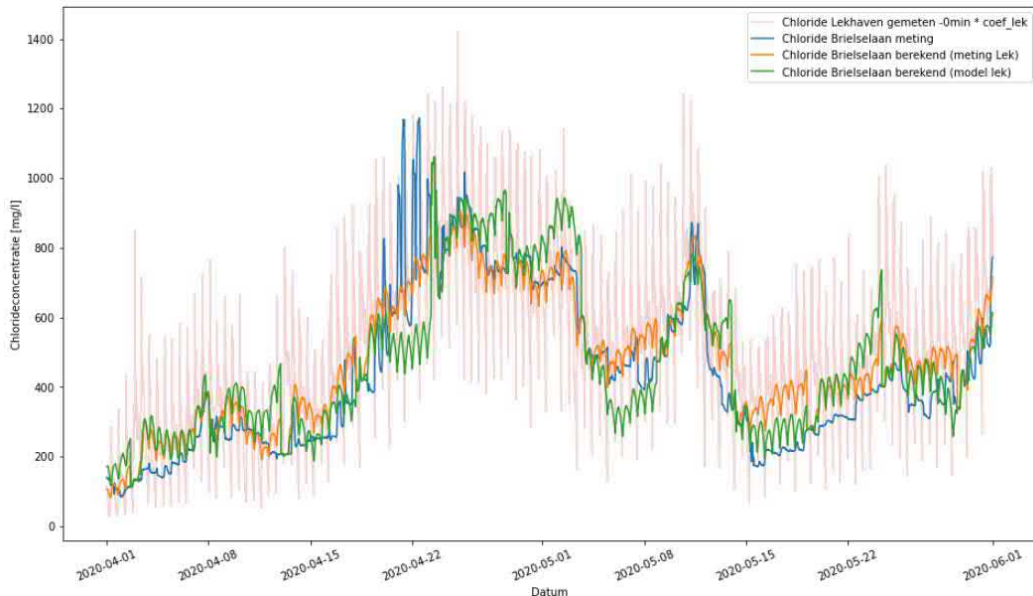
De gemeten chlorideconcentraties bij Brielselaan laten in mei 2019 een meer afgevlakt verloop zien dan bij Lekhaven. Pas boven ongeveer 300 mg/l chloride begint de concentratie sneller te fluctueren met de Lekhaven bij Brielselaan. Daaronder is het gemeten verloop erg vlak.



Figuur 124 Chlorideconcentratie Brielselaan, 1 mei t/m 13 mei 2019

April-mei 2020

Voor de maanden april en mei 2020 verloopt de fluctuatie van de berekening vrij goed met de gemeten waarden. Rond 16 april is grotere stijging te zien die niet terug komt in de berekende Brielselaan waarden. De absolute getallen komen niet precies overeen maar geven wel een goede indruk in het verloop en welke chlorideconcentraties verwacht kunnen worden.



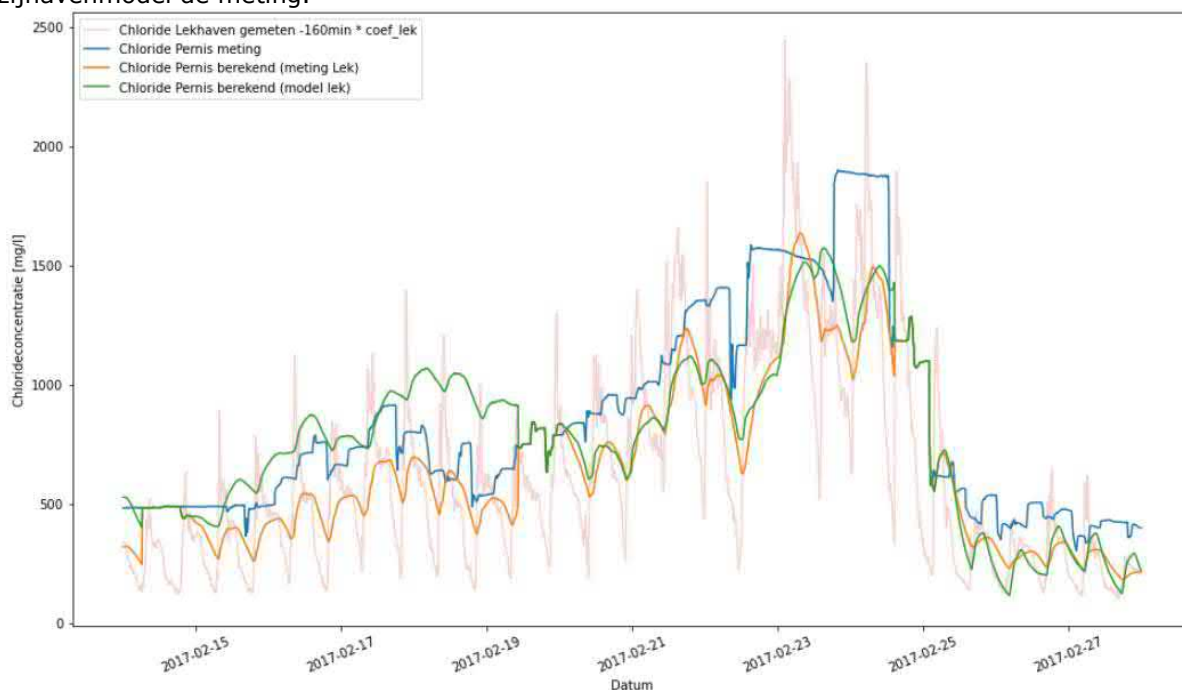
Figuur 125 Chlorideconcentratie Brielselaan, 1 april t/m 31 mei 2020

A.2.6 Casestudies Pernis

De werking van het inrekenen van de Pernis is hieronder inzichtelijk gemaakt doormiddel van casestudies. Het inrekenen van de zijhavens is visueel weergegeven met de meting van de zijhaven en twee soorten berekende resultaten voor de zijhaven. De twee soorten berekende resultaten voor de zijhaven verschillen in wat er voor de invoervariabele Lekhaven is gebruikt. Namelijk de gemeten concentratie en de gemodelleerde concentratie (afvoerafhankelijk Lekhavenmodel) bij Lekhaven. Op deze manier wordt de gemodelleerde fout van Lekhaven inzichtelijk wanneer hiermee wordt doorgerekend in de zijhavens. Pernis is onzekerder dan de andere inlaten in de zin dat hier alleen een binnendijkse meting beschikbaar is. Uit de metingen lijkt het wel dat er vrij regelmatig ingelaten wordt gezien het chloride verloop qua dynamiek vrij gelijk gaat met die van de Lekhaven. Dit is ook terug te herleiden gezien de binnendijkse vrij goed berekend kan worden met de Lekhaven concentratie als invoervariabele, wat in onderstaande voorbeelden inzichtelijk wordt gemaakt.

Februari 2017

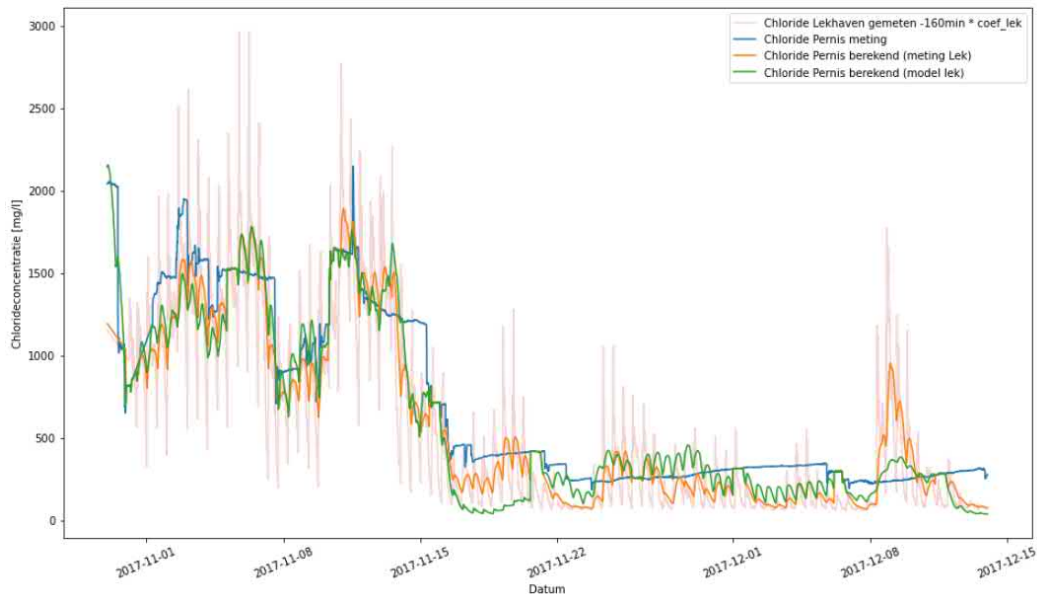
In de periode van de tweede helft februari 2017 ligt de concentratie rondom de inlaatgrens stijgend tot een stuk hierboven, wat vervolgens weer richting de inlaatgrens daalt. Deze dynamiek wordt vrij goed berekend door de zijhaven modellering. Rond 25 februari onderschat het berekende zijhavenmodel de meting.



Figuur 126 Chlorideconcentratie Pernis, 14 februari t/m 28 februari 2017

Oktober-december 2017

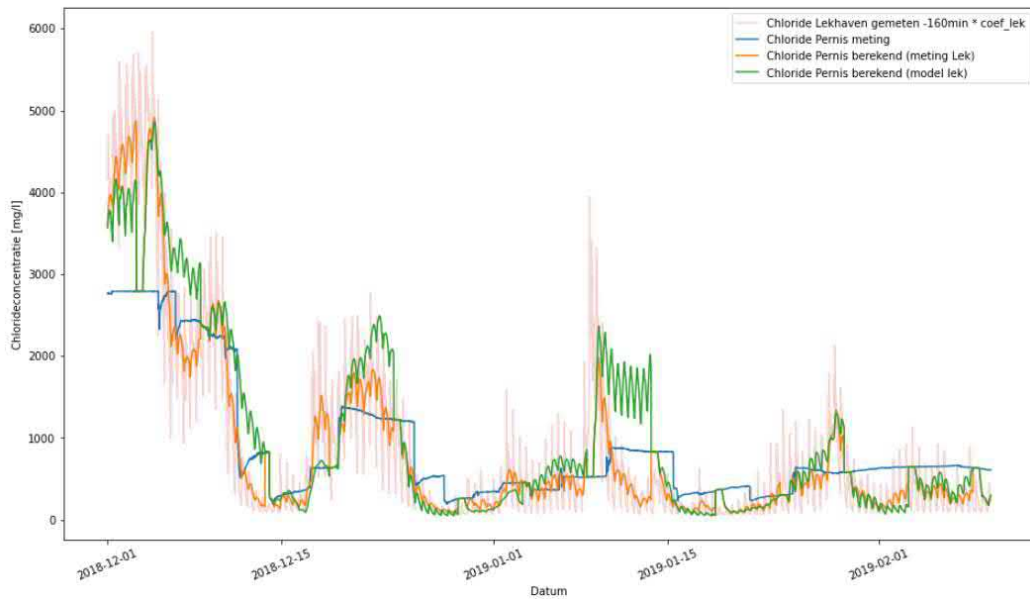
De binnendijkse chlorideconcentratie bij Pernis is in december 2017 lang constant. Dit is ook een periode waar er weinig water wordt ingelaten waardoor de concentratie nauwelijks fluctueert. Stijgingen bij Lekhaven zorgen bij de berekende zijhaven waarden voor een stijging bij Pernis welke niet in de meting terug te zien zijn. Dit komt waarschijnlijk doordat hier niet ingelaten wordt. De binnendijkse waterstandsmeting mist hier waardoor dit niet gecontroleerd kan worden. Eerder in november is er wel fluctuatie aanwezig met hogere chlorideconcentraties. Ook hier blijft de waarde een aantal keer langere tijd redelijk constant, naar verwachting zijn dit ook momenten waar niet ingelaten wordt. De dynamiek wordt vrij goed berekend door het zijhavenmodel.



Figuur 127 Chlorideconcentratie Pernis, 30 oktober t/m 14 december 2017

December 2018 – januari 2019

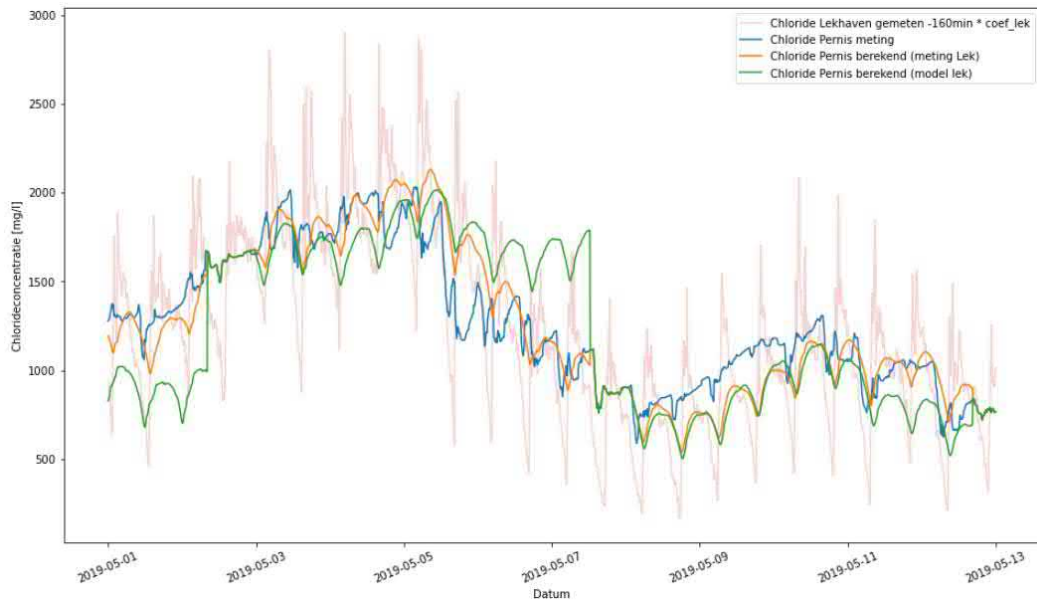
De berekende zijhaven chlorideconcentraties lopen vrij gelijk met de binnendijkse metingen wanneer hier een stijging of daling te zien is. Dit zijn naar alle waarschijnlijkheid dan ook momenten waarbij er water ingelaten wordt. Ook in december 2018 en januari 2019 zijn er afvlakkingen te zien in de metingen die waarschijnlijk worden komen doordat er niet wordt ingelaten. Vanaf 22 januari 2019 blijft de gemeten concentratie bij Pernis constant. De berekende waarden stijging in deze periode en schieten daarna onder de gemeten waarden. Dit laat zien dat als er ingelaten zou zijn de binnendijkse concentratie waarschijnlijk verlaagd had kunnen worden.



Figuur 128 Chlorideconcentratie Pernis, 1 december 2018 t/m 1 februari 2019

Mei 2019

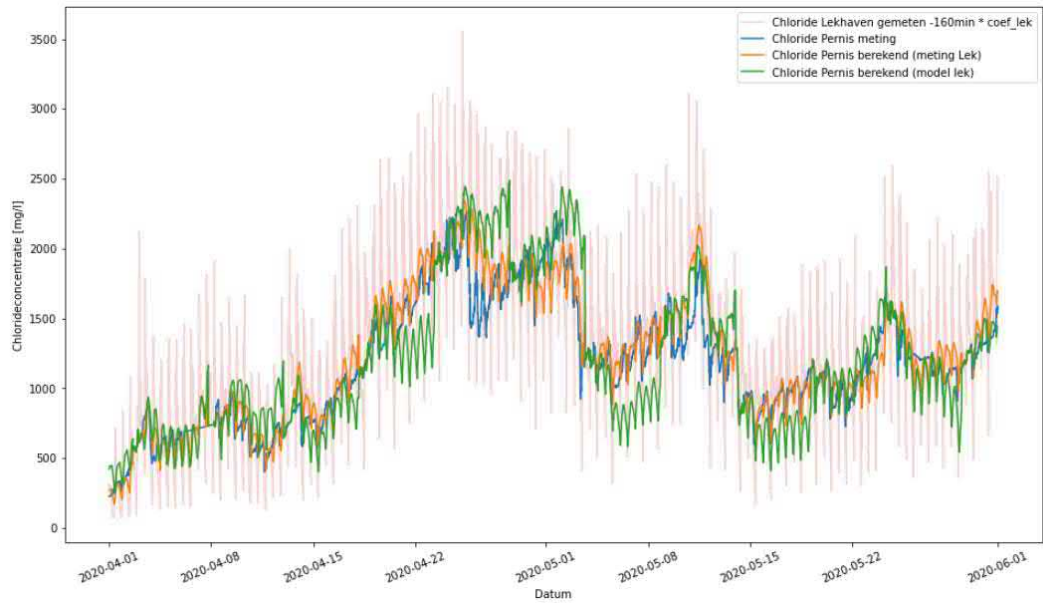
De zijhavenberekeningen benaderen de gemeten binnendijkse chlorideconcentratie vrij goed voor de eerste helft van mei 2019.



Figuur 129 Chlorideconcentratie Pernis, 1 mei t/m 13 mei 2019

April-mei 2020

De berekende zijhaven concentraties worden in april en mei 2020 aardig goed benaderd. De dynamiek zit er goed in, waarbij de invoer van de gemodelleerde Lekhavenconcentraties bij de zijhavenberekening een aantal keer voor afwijkingen zorgen (groene lijn).



Figuur 130 Chlorideconcentratie Pernis, 1 april t/m 31 mei 2020

A.3 Statistische tijdreeks analyse (Nieuwe Maas, Lekhaven)

De verzilting op de Nieuwe Maas is onderzocht op basis van de dieptegemiddelde concentraties in de meetreeks bij Lekhaven. De tijdreeks van 2016 tot en met 2020 is daarvoor geanalyseerd. Dat houdt in dat de gepresenteerde statistiek zowel de situatie voor als na de verdieping van de Nieuwe Waterweg omvat.

Eerst is de tijdreeks verdeeld in categorieën, afhankelijk van twee variabelen:

- Het debiet bij Lobith met een fasevertraging van 30 uur, afgerond op 250 m³/s
- De waterstand bij Hoek van Holland, gemiddeld over het afgelopen getij, met een fasevertraging van 120 minuten, afgerond op 0.25 m

Dit resulteert in de aantallen 10-minuten waarden per combinatie uit Tabel 18. Alleen rivierafvoeren bij Lobith tot 5500 m³/s zijn weergegeven, omdat voor hogere rivierafvoeren er nooit sprake is van verzilting (chlorideconcentratie boven 400 mg/l) op de Nieuwe Maas bij Lekhaven. Logischerwijs komen combinaties met een getijgemiddelde zeewaterstand rond 0 m+NAP het meeste voor en zijn sterk verhoogde en verlaagde zeewaterstanden veel zeldzamer.

Tabel 29: Aantal 10-minuten waarden in de tijdreeks met chlorideconcentraties bij Lekhaven per combinatie van rivierafvoer en zeewaterstand

Q \ h	-1	-0.75	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5
750			182	1317	3378	2765	871	139			
1000			64	1869	13997	8472	1728	849	285	58	
1250			109	3952	23460	18060	3911	522	95		
1500			36	1829	16480	11256	1912	952	44		
1750		10	142	2707	17076	10226	1786	229	275	81	26
2000		171	419	2882	17810	11112	2578	575	62	6	
2250	28	85	82	1576	8975	4639	1591	717	170		
2500			99	1883	5780	3327	578	238	93		
2750		40	259	1332	2508	2350	699	342	22		
3000			131	874	2074	1634	1000	191	32		
3250			120	395	1640	1731	617	222	1		
3500			63	453	1518	837	786	188			
3750				327	1253	1505	727	419	50	4	
4000				242	971	1148	605	356	72	27	
4250				217	1347	920	209	177	82		
4500			73	256	1591	1224	62		41	14	
4750				259	1162	673	26	18	53		
5000			47	269	850	602	201	15	47		
5250				139	254	313	203	157	4	45	
5500				58	178	260	227	17	7	46	

Per getijperiode zijn twee karakteristieke punten gedefinieerd in de tijdreeks van de chlorideconcentratie:

1. De minimale concentratie. Als het minimum onder de 400 mg/l komt, is het mogelijk om ergens in de getijperiode zoet water in te laten (gedurende een inlaatvenster of continu).
2. De maximale concentratie. Als het maximum onder de 400 mg/l blijft, is er geen sprake van inlaatvensters. Gedurende de gehele getijperiode kan dan zoet water worden ingelaten.

Tabel 30: Interpretatie van de grenswaarde van 400 mg/l voor de minimale en maximale concentratie

	Lager dan 400 mg/l	Hoger dan 400 mg/l
Minimale concentratie	In deze getijperiode kan kortere of langere tijd zoet water worden ingelaten	In deze getijperiode is zoet water inlaten continu onmogelijk
Maximale concentratie	In deze getijperiode is zoet water inlaten continu mogelijk	In deze getijperiode is het water kortere of langere tijd verzilt

Allereerst beschouwen we de statistiek van de minimale concentratie (het getijminimum). Daaruit is informatie af te lezen over het al dan niet aanwezig zijn van inlaatvensters. Bij een minimale concentratie boven 400 mg/l is er geen mogelijkheid om zoet water in te laten. In Tabel 20 zijn drie karakteristieke waarden van deze minimale concentratie opgenomen:

1. De mediane waarde: wat is gemiddeld genomen van toepassing?
2. De 95%-percentielwaarde: wat is in 95% van de situaties van toepassing?
3. De maximale waarde: het hoogste getijminimum in de gehele periode 2017-2020

Getallen boven 400 mg/l zijn weergegeven in rood, onder 400 mg/l in blauw.

Gemiddeld genomen (de mediaan) is zoet water inlaten mogelijk binnen de getijperiode (kortere of langere tijd) voor gemiddelde rivierafvoeren bij (2250 m³/s bij Lobith). Vanaf de 1500 m³/s en lager is er gemiddeld genomen weinig kans op een inlaatvenster op de Nieuwe Maas bij Lekhaven.

Vanaf 2250 m³/s bij Lobith is het in 95% van de getijden mogelijk om zoet water in te laten (kortere of langere tijd) wanneer de getijgemiddelde zeewaterstand <-0.5 m of >0.5 m is. Vanaf 2500 m³/s is in 95% van de getijden inlaten van zoet water mogelijk, ongeacht de zeewaterstand.

Boven 2750 m³/s bij Lobith is in 2016-2020 altijd (het maximum, dus in 100% van de gevallen) een inlaatvenster van kortere of langere duur opgetreden, ongeacht de zeewaterstand.

Tabel 31: Statistiek van de minimale chlorideconcentratie per getijperiode voor verschillende combinaties van rivierafvoer bij Lobith en getijgemiddelde zeewaterstand bij Hoek van Holland: de mediaan (boven), de 95%-percentielwaarde (midden) en de maximale waarde (onder)

Minimale concentratie (mg/l), mediaan											
h \ Q	-1	-0.75	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5
750			2078	2675	2790	2956	4240	4312			
1000			538	1298	1849	2129	2729	3282	3860	4673	
1250			381	487	953	1337	1468	1683	1586		
1500			318	400	514	834	929	1254	831		
1750		140	176	223	313	438	594	1030	1308	1156	1156
2000		97	133	138	150	190	191	291	566	1034	
2250	99	100	101	136	114	127	126	127	224		
2500			109	100	102	102	115	115	110		
2750		74	84	84	93	111	109	144	93		

Minimale concentratie (mg/l), 95% waarde											
h \ Q	-1	-0.75	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5
750			3095	3438	4609	4732	5140	5399			
1000			846	2292	2615	2966	3872	4585	4953	4820	
1250			496	1519	1992	2320	2477	2096	1651		
1500			318	1792	1943	2054	2263	2009	2078		
1750		167	252	620	1857	1930	2057	2078	2078	1297	1156
2000		140	189	423	1559	1581	944	962	1308	1297	
2250	100	100	314	1530	1378	1280	294	261	261		
2500			120	148	145	187	226	212	163		
2750		74	84	84	93	111	109	144	93		

Minimale concentratie (mg/l), maximale waarde											
h \ Q	-1	-0.75	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5
750			3095	3607	4631	5398	5435	5802			
1000			981	3064	3085	4025	4585	4995	4995	4820	
1250			496	2157	2608	3397	3213	2988	1658		
1500			318	1799	2253	2360	2859	2773	2078		
1750		172	318	1850	2324	2360	2360	2078	2300	1399	1156
2000		180	314	1122	1854	1830	1784	1876	1876	1297	
2250	100	100	314	1546	1558	1469	570	339	338		
2500			120	225	1360	1353	279	314	163		
2750		74	109	124	159	254	230	230	103		

Vervolgens beschouwen we de statistiek van de maximale concentratie (het getijmaximum). Daaruit is informatie af te lezen over het al dan niet optreden van beperkingen in de inlaat van zoet water in de vorm van inlaatvensters. Bij een maximale concentratie onder 400 mg/l is zoet water inlaten permanent mogelijk, zonder restricties. In Tabel 21 zijn drie karakteristieke waarden van deze maximale concentratie opgenomen:

1. De mediane waarde: wat is gemiddeld genomen van toepassing?
2. De 95%-percentielwaarde: wat is in 95% van de situaties van toepassing?
3. De maximale waarde: het hoogste getijmaximum in de gehele periode 2016-2020

Tabel 32: Statistiek van de maximale chlorideconcentratie per getijperiode voor verschillende combinaties van rivierafvoer bij Lobith en getijgemiddelde zeewaterstand bij Hoek van Holland: de mediaan (boven), de 95%-percentielwaarde (midden) en de maximale waarde (onder)

Maximale concentratie (mg/l), mediaan											
h \ Q	-1	-0.75	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5
750			5059	4768	5296	5203	6342	6446			
1000			2649	3581	3636	4028	4973	5828	6432	7368	
1250			2847	2548	2841	3153	3699	2990	1755		
1500			2273	2220	2251	2602	2971	3290	3136		
1750		1374	906	1656	1828	1981	2300	2842	3761	2842	5268
2000		130	722	1072	1191	1453	1658	1936	2388	2388	
2250	168	168	542	1320	980	910	928	824	2153		
2500			372	555	643	650	870	602	901		
2750		100	97	163	519	849	590	1460	184		
3000			73	145	515	764	381	833	182		
3250			282	143	351	624	527	523	182		
3500			176	170	266	390	389	240			
3750				123	128	245	240	358	433	108	
4000				95	84	112	223	290	471	108	
4250				85	94	208	231	215	215		
4500			87	85	90	162	110		274	274	
4750				61	83	86	102	102	261		
5000			61	62	101	95	102	148	214		
5250				78	85	146	88	57	299	299	
5500				113	81	79	79	58	88	299	

Maximale concentratie (mg/l), 95% waarde											
h \ Q	-1	-0.75	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5
750			5850	5989	7224	7473	7610	7948			
1000			2860	4944	4767	5526	6790	6858	7037	7368	
1250			2847	3801	4112	4653	5150	5614	3779		
1500			3152	2890	3356	4011	4105	4478	4613		
1750		1374	1374	2432	3123	4218	4618	4618	5268	5268	5268
2000		1374	1304	1789	2318	2733	3064	2585	3761	2728	
2250	168	251	1703	1587	1991	2069	2097	1670	2369		
2500			435	1127	1364	1635	2009	2108	1577		
2750		146	253	780	1321	1508	1710	1710	184		
3000			99	735	997	1567	2340	1571	184		
3250			282	873	1136	1372	1614	1154	182		
3500			282	481	836	886	982	947			
3750				447	431	586	443	666	433	108	
4000				160	286	586	732	630	630	108	
4250				147	298	359	732	267	251		
4500			87	138	351	453	349		274	274	
4750				138	239	143	102	102	274		
5000			61	239	184	317	317	317	218		
5250				239	158	307	439	93	299	299	
5500				159	113	439	93	93	88	299	

Maximale concentratie (mg/l), maximale waarde											
h \ Q	-1	-0.75	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5
750			5850	6202	7948	7948	7948	7948			
1000			4578	5970	6096	6586	7368	7368	7368	7368	
1250			2847	4460	5206	5748	5614	5614	3779		
1500			3152	4154	4285	4941	4740	4740	4613		
1750		1374	3152	3152	4157	4941	4891	4665	5268	5268	5268
2000		1374	1703	2641	4091	4653	4440	4538	4538	2842	
2250	168	324	1703	2409	2624	3114	3114	2097	2369		
2500			435	1569	2009	2009	2108	2108	1577		
2750		154	362	1127	1545	1786	1786	1710	184		
3000			99	997	1445	1745	2340	1571	184		
3250			282	975	1152	1614	1626	1154	182		
3500			282	684	967	1121	1121	982			
3750				447	684	881	586	666	433	108	
4000				253	334	881	732	687	630	108	
4250				147	671	671	732	471	251		
4500			87	138	671	453	349		274	274	
4750				138	334	173	102	102	274		
5000			61	239	317	317	317	317	265		
5250				239	158	307	439	93	299	299	
5500				239	160	439	439	93	88	299	

Bij rivierafvoeren van 1750 m³/s (dat is: onder 2000 m³/s) is er gemiddeld genomen (de mediaan) altijd sprake van restricties in de inlaat van zoet water in de vorm van inlaatvensters. Dit geldt ook bij rivierafvoeren rond 3250 m³/s in combinatie met >0.25 m verhoogde zeewaterstanden. Vanaf 3500 m³/s bij Lobith kan er gemiddeld genomen zonder restricties zoet water worden ingelaten, tenzij de zeewaterstand sterk verhoogd is (1.0 m).

Vanaf 4750 m³/s is in 95% van de gevallen gedurende de gehele getijcyclus de zoutconcentratie onder 400 mg/l, behalve als de zeewaterstand 0-0.5 m verhoogd is bij 5250 en 5500 m³/s.

Boven 5750 m³/s bij Lobith is in 2016-2020 nooit (het maximum, dus in 100% van de gevallen) sprake geweest van restricties op de zoetwaterinname in de vorm van inlaatvensters, ongeacht de zeewaterstand. Boven 4750 m³/s is dit ook altijd het geval geweest, behalve in enkele situaties waarbij de zeewaterstand met meer dan 0.25 m was verhoogd.



Hoofdkantoor

HKV lijn in water BV
Botter 11-29
8232 JN Lelystad

Nevenvestiging

Informaticalaan 8
2628 ZD Delft

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