Deltares

Enabling Delta Life

Data-analyse verzilting Hollandsche IJssel en Lek droogteperiode 2018



Deltares

Data-analyse verzilting Hollandsche IJssel en Lek droogteperiode 2018

Remi van der Wijk
Theo van der Kaaij
Wouter Kranenburg

© Deltares, 2019

Deltares

Titel
Data-analyse verzilting Hollandsche IJssel en Lek droogteperiode 2018

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, LELYSTAD	11203735-004	11203735-004-ZWS-0004	55

Trefwoorden
Rijn-Maasmonding, Hollandsche IJssel, Lek, maatregelen, verzilting, data-analyse

Samenvatting
In de zomer van 2018 was er sprake van langdurig zeer lage rivierafvoeren en (dreigende) verzilting van deze riviertakken. Om die reden heeft Rijkswaterstaat in 2018 maatregelen genomen om zoutindringing op de Hollandsche IJssel en Lek tegen te gaan. In deze studie zijn de verschillende gegevens van deze periode gevisualiseerd en is gekeken of de genomen maatregelen effectief zijn geweest in het verlagen van de chlorideconcentraties.

Voor de Hollandsche IJssel is voor de situatie in 2018 gebleken dat de zoutindringing in het bovenstroomse deel (vanaf 12-13 kilometer van de monding) gestabiliseerd werd en zelfs werd teruggedrongen met een doorspoeldebiet tussen de 2 en 5 m^3/s. Een debiet van meer dan 5 m^3/s lijkt geen additioneel effect te hebben op de zoutindringing. De instroomlocatie van het doorspoeldebiet (via Waaiersluis of Krimpenerwaardroute) leek daarvoor niet uit te maken. De bevindingen op grond van 2018 over de systeemwerking zijn in lijn met de bevindingen in eerdere systeemstudies (Kuijper, 2016). Voor andere condities is het aan te raden om gebruik te maken van real time ontsloten metingen om actief bij te sturen en de beheerstrategie aan te passen waar nodig.

De metingen op de Lek laten een positief effect zien van doorspoeling op het tegengaan van verzilting bij lagere chlorideconcentraties in de monding (<300 mg/l). Bij hogere chlorideconcentraties heeft de afvoer op de Lek geen invloed op de zoutindringing van het geanalyseerde deel van de Lek (tot Lekkerkerk, 5 kilometer van de monding). De verzilting in dit gebied wordt gedomineerd door advectieve processen en is slechts in mindere mate afhankelijk van de eigenlijke (beperkte) afvoer via de Lek zelf. Stroomopwaarts op de Lek zal het doorspoeldebiet (waarschijnlijk) een positieve invloed hebben, ook bij hoge concentraties in de monding. Dit was – gegeven de meetlocaties en mate van verzilting – niet te concluderen aan de hand van de metingen uit 2018.

In deze analyse is vooral gebruik gemaakt van de aaneengesloten meetreeksen van de vaste meetpunten. Deze metingen geven een beeld van de zoutverspreiding tijdens verschillende condities waarmee beter bepaald kan worden wat het effect is van de maatregelen. Op de Hollandsche IJssel was er een goede spreiding van de meetpunten. Op de Lek was er beperkte informatie beschikbaar stroomopwaarts van Lekkerkerk. De maatregelen zijn vooral bedoeld om in dat gebied effect te hebben en zo in ieder geval het innamepunt Krimpenerwaard niet te laten verzilten. Het is daarom aan te raden om bij dreigende verzilting (tijdelijk) vaste meetpunten toe te voegen meer stroomopwaarts op de Lek (Streefkerk, Bergambacht en Schoonhoven).

Deltares

Titel
Data-analyse verzilting Hollandsche IJssel en Lek droogteperiode 2018

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, LELYSTAD	11203735-004	11203735-004-ZWS-0004	55

Referenties
11203735-004-ZKS-0002_v2.0-Data-analyse verzilting Hollandsche IJssel en Lek

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
2.0	dec. 2019	Remi van der Wijk		Meinard Tiessen		Gerard Blom	

Status
definitief

Inhoud

1 Introductie **1**
1.1 Achtergrond en aanleiding 1
1.2 Probleemstelling 1
1.3 Doel 1
1.4 Aanpak 2
1.5 Leeswijzer 2

2 Data: herkomst, verwerking en bewerking **3**
2.1 Beschikbare data 3
2.1.1 Overzicht datasets en herkomst 3
2.1.2 Overzicht ruimtelijke dekking 4
2.1.3 Overzicht temporele dekking 4
2.2 Dataverwerking 7
2.2.1 Projectie op rivieras 7
2.2.2 Omzetting naar uniforme tijd-as (inclusief interpolaties) 7
2.2.3 Tekenafspraken 7
2.2.4 Overzicht uniformering data format 7
2.2.5 Archivering en ontsluiting via database 8
2.3 Databewerking 8
2.3.1 Waterstanden: onderscheid getij en windopzet 8
2.3.2 Van waterstanden naar debieten via kombergingsbenadering 8
2.3.3 Analysemethodes: ratio chlorideconcentraties 9

3 Hollandsche IJssel: Observaties **11**
3.1 Omgevingscondities 11
3.1.1 Rijnafvoer 11
3.1.2 Waterstand Hoek van Holland 12
3.1.3 Chlorideconcentraties monding 13
3.1.4 Debieten lozingen en onttrekkingen 15
3.1.5 Concentraties lozingen en onttrekkingen 16
3.2 Waterstanden op de Hollandsche IJssel 16
3.2.1 Waterstanden Gouda en Krimpen aan den IJssel 16
3.2.2 Uit waterstanden afgeleid getijgemiddeld kombergingsdebiet 16
3.3 Chlorideconcentraties 18
3.3.1 Concentratieverloop over de diepte: stratificatie 18
3.3.2 Consistentiecheck vaste en varende metingen 19
3.3.3 Variatie over het getij op de Hollandsche IJssel 20

4 Hollandsche IJssel: Analyse **23**
4.1 Verziltingsperiodes Hollandsche IJssel 23
4.1.1 Beschrijving onderscheiden periodes 23
4.1.2 Karakteristieke waardes per verziltingsperiode 27
4.2 Analyse effect doorspoeldebiet 28
4.2.1 Invloed doorspoeldebiet - visueel 28
4.2.2 Doorspoeldebiet en gradiënt 29
4.3 Systeemwerking 31
4.3.1 ‘Advectief’ versus ‘dispersief’ 31

4.4 Conclusies en aanbevelingen 32

5 Lek: Observaties en analyse 35
5.1 Omgevingscondities 35
5.1.1 Chlorideconcentraties monding 35
5.1.2 Debieten lozingen en onttrekkingen 36
5.2 Chlorideconcentraties op de Lek 37
5.3 Analyse: Relatief verschil zoutindringing 43
5.4 Conclusie en aanbevelingen 49

6 Discussie 51
6.1 Evaluatie aanpak 51
6.2 Implicatie van de resultaten 51

7 Conclusies en aanbevelingen 53
7.1 Conclusies 53
7.2 Aanbevelingen 54
7.2.1 Systeemkennis 54
7.2.2 Meetcampagnes 54
7.2.3 Vervolganalyse maatregelen 54

8 Referenties 55

Bijlage(n)

A Consistentiecheck varende en divermetingen A-1

B Minimale, mediane en maximale chlorideconcentratie op de Hollandsche IJssel voor elke verziltingsperiode B-1

C Scatterplots Hollandsche IJssel C-1

1 Introductie

1.1 Achtergrond en aanleiding

De Rijn-Maasmonding is het gebied rondom Rotterdam waar de Rijn en de Maas uitmonden in de Noordzee. De stroming en zoutindringing in dit gebied is afhankelijk van het getij, afvoer op de rivieren, wind(opzet) en sturing van de keringen en sluizen. Tijdens lage afvoeren dringt het zout verder landinwaarts tot op de riviertakken Hollandsche IJssel en Lek. Deze twee riviertakken zijn belangrijk voor de zoetwatervoorziening van de regio en van drinkwaterbedrijven.

In de afgelopen jaren is er veel aandacht voor verzilting in de Rijn-Maasmonding en zijn er verscheidene studies uitgevoerd om het systeem te beschrijven. Deze studies beschrijven niet alleen de grootschalige processen in de Rijn-Maasmonding als geheel (Huismans, 2016) maar ook de processen die specifiek van belang zijn op de riviertakken Hollandsche IJssel en Lek (Kuijper, 2015; Kuijper, 2017). Deze kennis is binnen het Deltaprogramma Zoetwater toegepast om modelresultaten te aggregeren (Huismans et al., 2018; Mens et al., 2018) en om maatregelen te bedenken tegen zoutindringing (Hydrologic, 2018a; Hydrologic, 2018b). Omdat zeer veel verschillende condities kunnen leiden tot verzilting en de gebruikte modellen een onzekerheidsmarge hebben, wordt het benodigde debiet met een bandbreedte weergegeven.

In de zomer van 2018 was er sprake van langdurig zeer lage rivierafvoeren en (dreigende) verzilting van deze riviertakken. Om die reden heeft Rijkswaterstaat in 2018 maatregelen genomen om zoutindringing op de Hollandsche IJssel en Lek tegen te gaan. Tijdens de inzet van de maatregelen zijn intensieve meetcampagnes uitgevoerd. De verwachting is dat op grond van de verkregen informatie aanvullende lessen geleerd kunnen worden over het systeem en over effectiviteit van de maatregelen . Een beter begrip van de effectiviteit van maatregelen leidt tot een efficiëntere inzet van water tijdens waterschaarste, waarmee de zoetwatervoorziening tijdens droge situaties verbeterd kan worden

1.2 Probleemstelling

Op grond van systeemkennis en expertinschattingen opgestelde Maatregelen tegen verzilting van de Hollandsche IJssel en Lek zijn nog niet getoetst aan de hand van daadwerkelijk voorgekomen condities. De inzet van de maatregelen tijdens de droogteperiode van 2018 biedt voor de eerste keer de mogelijkheid om deze maatregelen te toetsen, waarmee bestaande uitgangspunten en systeemkennis kunnen worden aangescherpt.

1.3 Doel

Het doel van de studie is om de gegevens uit 2018 inzichtelijk te presenteren en in samenhang te visualiseren om op basis daarvan de systeemkennis aan te scherpen en te bepalen of de ingezette maatregelen tegen zoutindringing op de Hollandsche IJssel en Lek effectief zijn geweest. De hoofdvraag van het onderzoek is "*Hoe effectief zijn de maatregelen in 2018 tegen zoutindringing op de Hollandsche IJssel en Lek geweest?*"
Verder zijn er enkele deelvragen voor dit onderzoek gedefinieerd:

- *Wat kunnen we leren van de metingen met betrekking tot onze systeemkennis?*
- *Hoe kunnen we de aangescherpte kennis gebruiken om de onzekerheidsbandbreedte te verkleinen voor de maatregelen?*
- *Welke lessen zijn er te trekken voor het beheer tijdens een verziltingsperiode in de toekomst?*

1.4 Aanpak

Het project is op te splitsen in 3 fases:

1. Data ontsluiting
2. Visuele analyse data
3. Beoordelen gedrag systeem onder invloed van forceringen en inzet maatregelen
    a. Aanvullen systeemkennis
    b. Bepalen invloed van maatregelen

1) De data ontsluiting bevat zowel het verzamelen als het converteren en filteren van de data. Tijdens de ontsluiting is in overleg met Rijkswaterstaat bepaald welke analyses er mogelijk zijn voor de verschillende gebieden.
2) In samenhang analyseren van verschillende data en aan de hand van tijdseries beschrijven hoe het systeem heeft gereageerd op de diverse eventsgebeurtenissen en genomen maatregelen. De focus ligt hierbij op de diver metingen (deze meten de chlorideconcentratie nabij de bodem) en lozingen, onttrekkingen en doorspoeldebieten. Door daarbij ook de vergelijking te maken met de varende metingen worden deze in context geplaatst en worden eventuele stratificatie en ruimtelijke patronen geïdentificeerd.
3) Welke effecten zien we in het systeem Hollandsche IJssel als gevolg van de inzet van maatregelen en veranderende condities? De kern van deze activiteit is onderzoeken of er enige clustering optreedt tussen oorzaak (doorspoeldebiet) en gevolgvariabele (chlorideconcentratie) per onderscheiden systeemconditie, en pogen deze relatie en daarmee de effectiviteit van genomen maatregelen verder te duiden en waar mogelijk te kwantificeren. De opgedane kennis wordt verder gebruikt om de systeemkennis aan te scherpen met het oog op operationeel beheer.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de methodiek van de analyse beschreven. In dat hoofdstuk wordt ook de herkomst en verspreiding van de data besproken. Daarna worden in hoofdstuk 3 en 4 de resultaten van de analyse op de Hollandsche IJssel besproken. Vervolgens is in hoofdstuk 5 de uitkomst van de analyse op de Lek beschreven. Hoofdstuk 6 bevat de discussiepunten naar aanleiding van de studie. In hoofdstuk 7 staan de conclusies en aanbevelingen.

2 Data: herkomst, verwerking en bewerking

2.1 Beschikbare data

2.1.1 Overzicht datasets en herkomst

In deze studie is gebruik gemaakt van informatie over drie parameters, te weten waterstanden, debieten en chlorideconcentraties (mg Cl/l). Voor de studie is meer data ingezameld dan uiteindelijk is gebruikt, in dit hoofdstuk worden alle beschikbare databronnen beschreven omdat die in een later onderzoek relevant kunnen zijn. De informatie over waterstanden is voornamelijk afkomstig uit het vaste meetnet van Rijkswaterstaat. De informatie over debieten kan worden onderverdeeld in informatie over afvoeren op de rivieren Rijn, Waal en Lek, informatie over lozingen en onttrekkingen op de Hollandsche IJssel en Lek, en informatie over debieten door de monding van Hollandsche IJssel en Lek. De eerste soort van informatie is ook afkomstig uit het vaste meetnet van RWS. De tweede soort is met name afkomstig van de waterschappen rondom de Hollandsche IJssel en Lek, en een gedeelte hiervan is beschikbaar via het informatiescherm Hollandsche IJssel. De derde soort is afkomstig van ADCP metingen varend dwars op de rivier door het Havenbedrijf Rotterdam. Informatie over chlorideconcentraties is afkomstig uit het vaste meetnet van Rijkswaterstaat, van tijdelijke meetpunten van Rijkswaterstaat in de Hollandsche IJssel en Lek (‘divermetingen’), van metingen van de waterschappen en drinkwaterbedrijven op gezette tijden en locaties, en van varende metingen door / in opdracht van Rijkswaterstaat op de Hollandsche IJssel en Lek op 27 dagen tijdens de droge periode in 2018. Bij die laatste metingen zijn op 2 dagen ook stroomsnelheden gemeten.

Hieronder is een overzicht te vinden van de data inclusief bron:

- Download via Rijkswaterstaat website:
    1) Waterstanden Rijn-Maasmonding;
    2) Debieten Lobith, Tiel en Hagestein;
    3) Chlorideconcentraties Brienenoordbrug en Kinderdijk;
    4) Achtergrondconcentratie rivierwater Lobith;

- Aangeleverd door Rijkswaterstaat:
    5) 7 divermetingen Hollandsche IJssel en Lek;
    6) Varende zoutprofielmetingen;
    7) Varende snelheidsprofielmetingen (2 dagen ADCP metingen tijdens varende zoutmetingen);
    8) Rivier-dwars-varende ADCP metingen Hollandsche IJssel en Lek (vanuit Havenbedrijf Rotterdam);

- Download via Slim Watermanagement informatiescherm Hollandsche IJssel;
    9) Waterstanden op de Hollandsche IJssel;
    10) Debieten van gemaal Gouda;
    11) Chlorideconcentraties op de Hollandsche IJssel

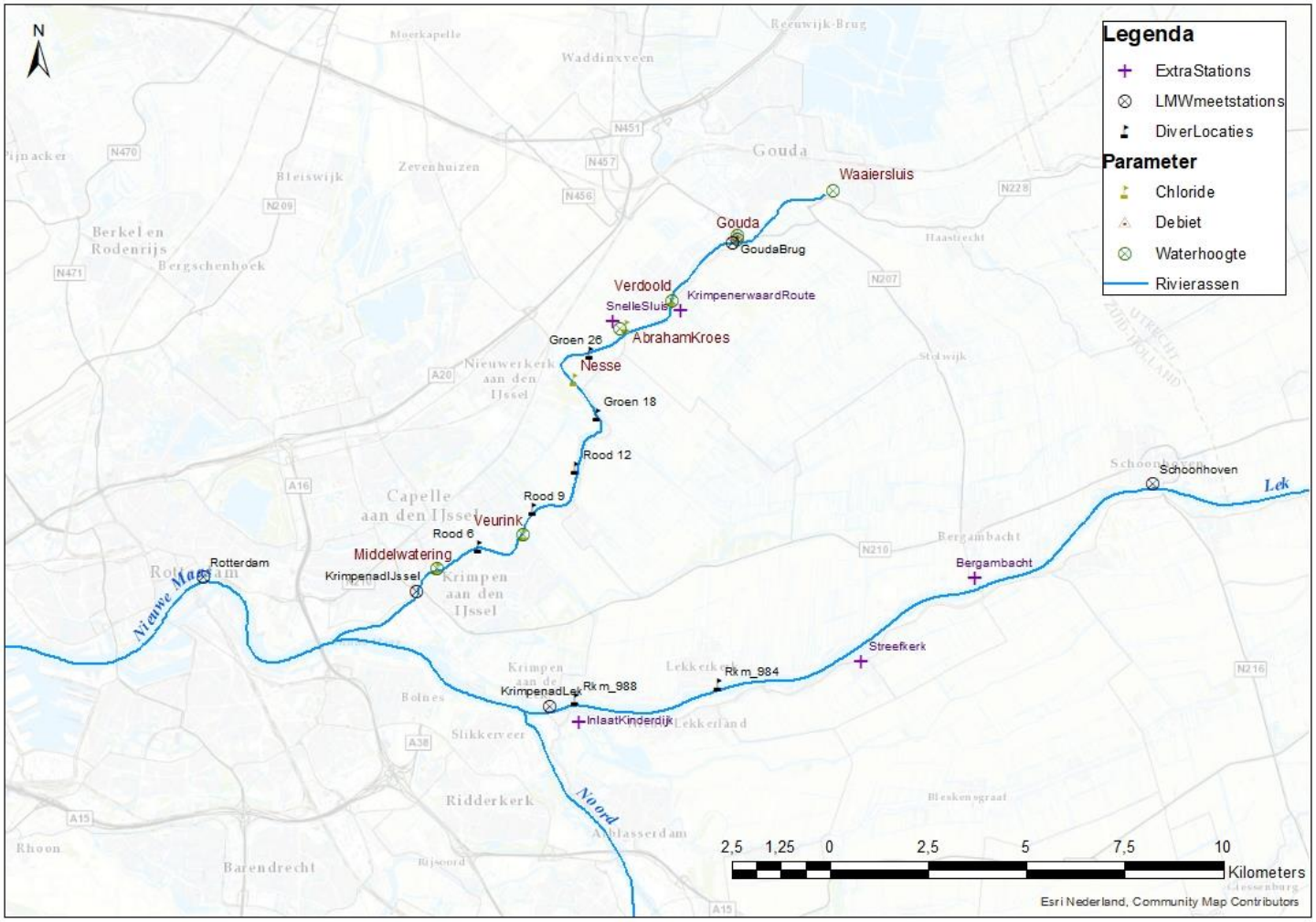
- Aanvullende gegevens vanuit de regio;
    12) Aanvullende lozingen en onttrekkingen Hollandsche IJssel en Lek;
    13) Laagfrequente zoutmetingen Bergambacht.

2.1.2 Overzicht ruimtelijke dekking

In Figuur 2.1 is de positie te vinden van de meetlocaties in de Rijn-Maasmonding. De meetlocaties zijn opgesplitst in subgroepen voor verschillende parameters. De varende metingen zijn in dit overzicht niet opgenomen omdat de temporele dekking niet vergelijkbaar is met de vaste meetpunten. Op de Hollandsche IJssel zijn er chlorideconcentratie metingen ongeveer om de 2 kilometer. Op de Lek zijn er drie meetpunten beschikbaar in de eerste vijf kilometer van de Lek. De metingen bij Bergambacht hebben een tweewekelijkse frequentie.

2.1.3 Overzicht temporele dekking

De vaste metingen zijn vanaf halverwege juli tot en met december beschikbaar. De varende metingen zijn tussen juli en begin oktober uitgevoerd. De meeste waterstand- en afvoermetingen zijn beschikbaar tot tenminste eind oktober. Op de Lek zijn voor dezelfde periode metingen beschikbaar.



Figuur 2.1 Overzichtskaart van de meetlocaties op de Hollandsche IJssel en Lek

2.2 Dataverwerking

2.2.1 Projectie op rivieras

Ten behoeve van de analyse is, gebruikmakend van een coördinatenstelsel met een lengteas over de lengte van de riviertakken, elke meetlocatie geprojecteerd op de rivieras. Hiervoor is gebruik gemaakt van de rivieras van de Hollandsche IJssel en Lek uit Baseline en is voor elke meetlocatie gezocht naar het meest nabije punt op de rivieras. Zodoende is voor elke meetlocatie de afstand bepaald ten opzichte van de monding.

2.2.2 Omzetting naar uniforme tijd-as (inclusief interpolaties)

De diverse tijdsreeksen hebben niet allemaal dezelfde tijdsbasis. Met name de informatie over lozingen en onttrekkingen heeft een lagere frequentie. Ten behoeve van de analyse zijn alle tijdsreeksen omgezet naar een tijdreeks met een uniforme tijdstap (10 minuten). Tijdreeksen met een andere tijdstap (bijvoorbeeld daggemiddelde waarden) zijn lineair geïnterpoleerd als er geen getijafhankelijkheid aanwezig is in de desbetreffende tijdreeks.

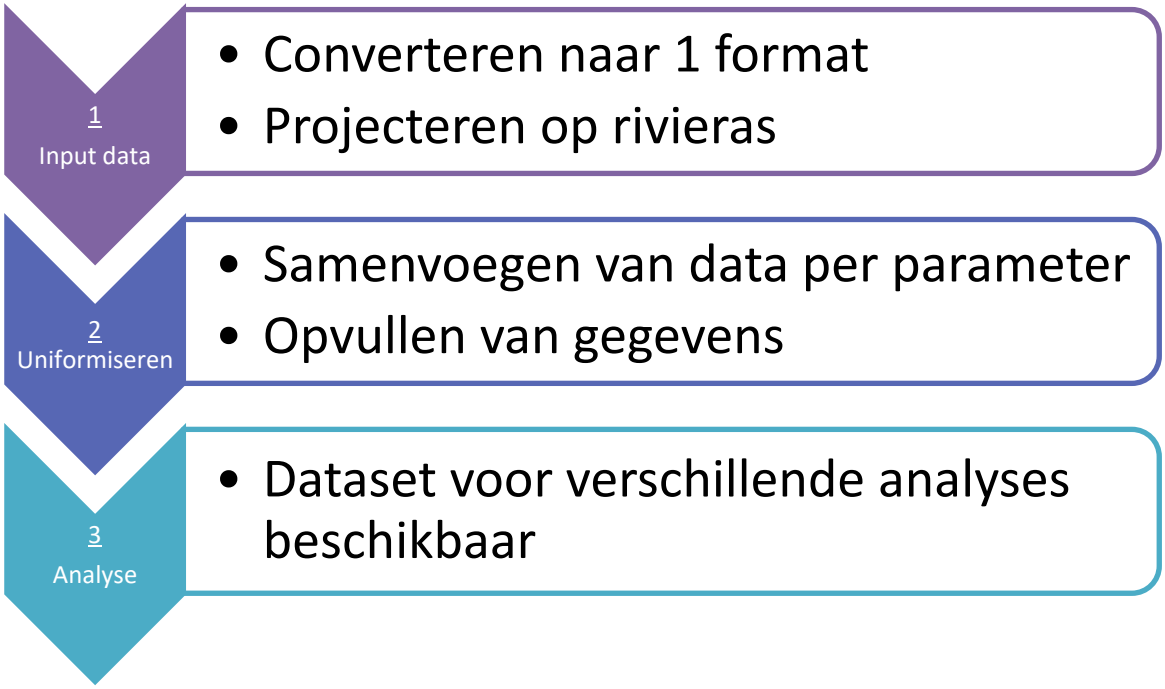
2.2.3 Tekenafspraken

Ten behoeve van de analyse zijn de debietreeksen zo omgezet dat onttrekkingen uit het systeem worden aangegeven met negatieve debieten en lozingen op het systeem met positieve debieten.

2.2.4 Overzicht uniformering data format

Bovenstaande stappen zijn samengevat in Figuur 2.2 en leveren tijdseriedata in een uniform formaat. Per parameter verkrijgen we hiermee een tabel met continue tijdreeksen per beschikbaar station, met een kolom de tijdreeks voor een station. In de metainfo staat per station de afstand in meters tot de monding. De data is in de stappen tot hier toe niet gefilterd, alleen geïnterpoleerd en waar nodig opgevuld.

Ten behoeve van de analyse zijn ook de varende zoutmetingen samengevoegd in een enkele tabel, waarbij elke kolom een verticaal profiel bevat. Bij elke profielmeting (en dus kolom) hoort een *x* en een *y* coördinaat. Verder is aan elke meting een enkel tijdstip toegekend (dat van de bovenste meting), en een kenmerk om aan te geven bij het hoeveelste rondje van de boot een meting hoort.



Figuur 2.2 Overzicht stappen verwerking van de data

2.2.5 Archivering en ontsluiting via database

De originele data en de geünificeerde versie worden gearchiveerd in waterinfo-extra[1]. Hierdoor kunnen vervolgstudies met dezelfde data worden uitgevoerd.

2.3 Databewerking

2.3.1 Waterstanden: onderscheid getij en windopzet

Waterstanden in de Rijn-Maasmonding variëren op verschillende tijdschalen. De getijslag varieert door de springtij en doodtij cyclus. Daarnaast kan op kleinere tijdschalen door wind de waterstand afwijken van de astronomische waterstand. Deze afwijking ten opzichte van de astronomische waterstand wordt in deze rapportage de opzet genoemd. De opzet zorgt ervoor dat zout verder kan binnendringen in de Rijn-Maasmonding. Door de waterstand te filteren over het getij blijft alleen de opzet over. Deze kan overigens ook negatief zijn met oostenwind.
Er is gebruikt gemaakt van verschillende filtermethoden, uiteindelijk gaf het Godin filter de beste resultaten en is deze gebruikt voor alle parameters.

2.3.2 Van waterstanden naar debieten via kombergingsbenadering

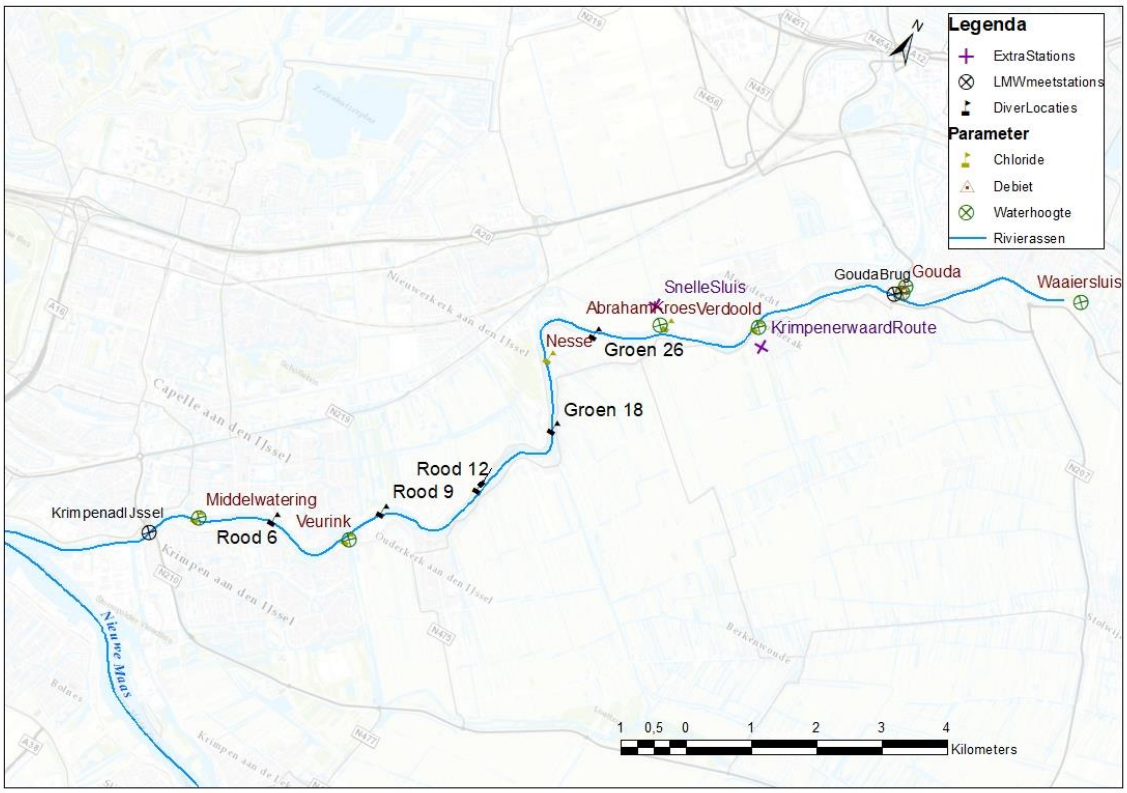
Door opzet op zee kan er tijdelijk water landinwaarts stromen. Over een getijperiode kan dit leiden tot een netto debiet stroomopwaarts. Dit debiet is te schatten met behulp van de kombergingsbenadering (Kuijper, 2015). Deze benadering stelt dat de verandering in de tijd van de waterstand vermenigvuldigd met het oppervlak en gedeeld door de tijdscomponent gelijk is aan het kombergingsdebiet. In deze studie zijn de lozingen en onttrekkingen gecombineerd met het kombergingsdebiet om de netto afvoer bij de monding van de riviertakken te bepalen.

[1] https://waterinfo-extra.rws.nl/

2.3.3 Analysemethodes: ratio chlorideconcentraties

De mate van zoutindringing is afhankelijk van meerdere parameters, dit maakt het bepalen van de effectiviteit van maatregelen complexer en vraagt een versimpeling van enkele principes.
De chlorideconcentratie stroomopwaarts is globaal afhankelijk van de chlorideconcentratie stroomafwaarts en specifiek van de getijgemiddelde concentratie in de monding van de riviertakken. Om de verschillende mechanismen en processen samen te vatten wordt de ratio bepaald tussen de concentratie in de monding en de chlorideconcentratie stroomopwaarts. Deze ratio zegt iets over de mate van zoutindringing, bij lage ratio's dringt het zout in beperkte mate stroomopwaarts en een hoge ratio geeft aan dat het zout ver oprukt op de riviertakken. Voor beide riviertakken is geprobeerd om de ratio te koppelen aan de omgevingscondities om de effectiviteit van de maatregel te bepalen.

3 Hollandsche IJssel: Observaties



Figuur 3.1 Overzichtskaart van de meetlocaties op de Hollandsche IJssel

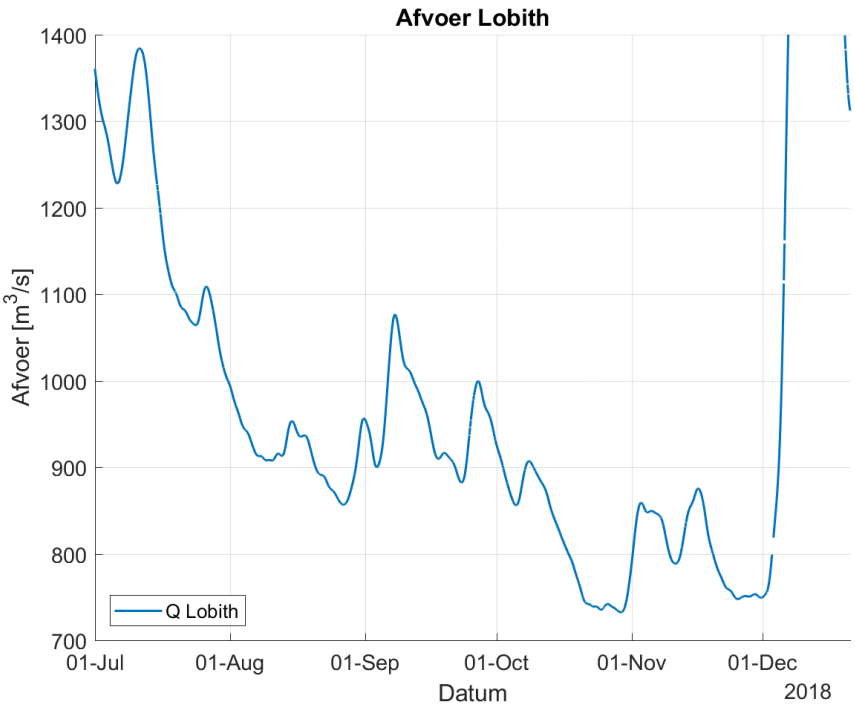
3.1 Omgevingscondities

Er zijn verschillende omgevingscondities die een effect hebben op de chlorideconcentraties in de Hollandsche IJssel. In deze paragraaf worden de verschillende omgevingscondities besproken.

3.1.1 Rijnafvoer

Vanaf augustus tot begin december is de afvoer lager dan 1020 m^3/s (Overeengekomen Lage Afvoer, OLA) tot begin december. Alleen in september stijgt de afvoer kort boven de 1020 m^3/s om daarna tot onder de 800 m^3/s te zakken. In begin december stijgt de afvoer vrij snel tot boven de 1020 m^3/s.

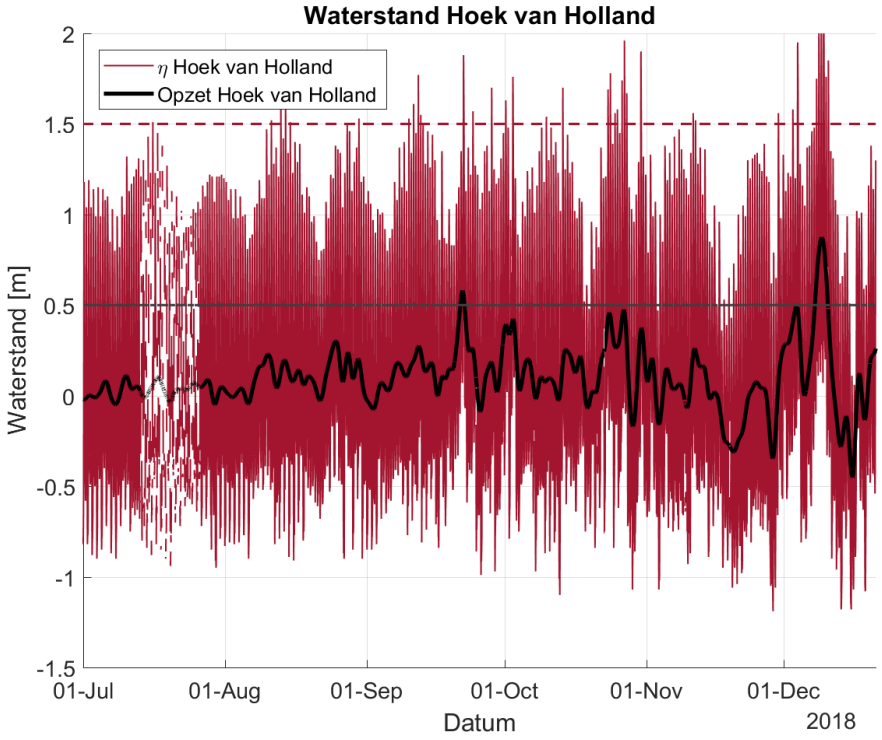
Dit betekent dat de uitspoeling van de rivier hoger is in juli, september en december. Oktober en november is de uitspoeling van de rivier het laagst en kan zout dus verder opdringen.



Figuur 3.2 Afvoer bij Lobith tussen 1 juli en 14 december 2018

3.1.2 Waterstand Hoek van Holland

Tot eind augustus zijn er geen grote verhogingen in de waterstand bij Hoek van Holland. Vanaf eind september is er met enige regelmaat een beperkte opzet zichtbaar. In december is de opzet significant hoger.

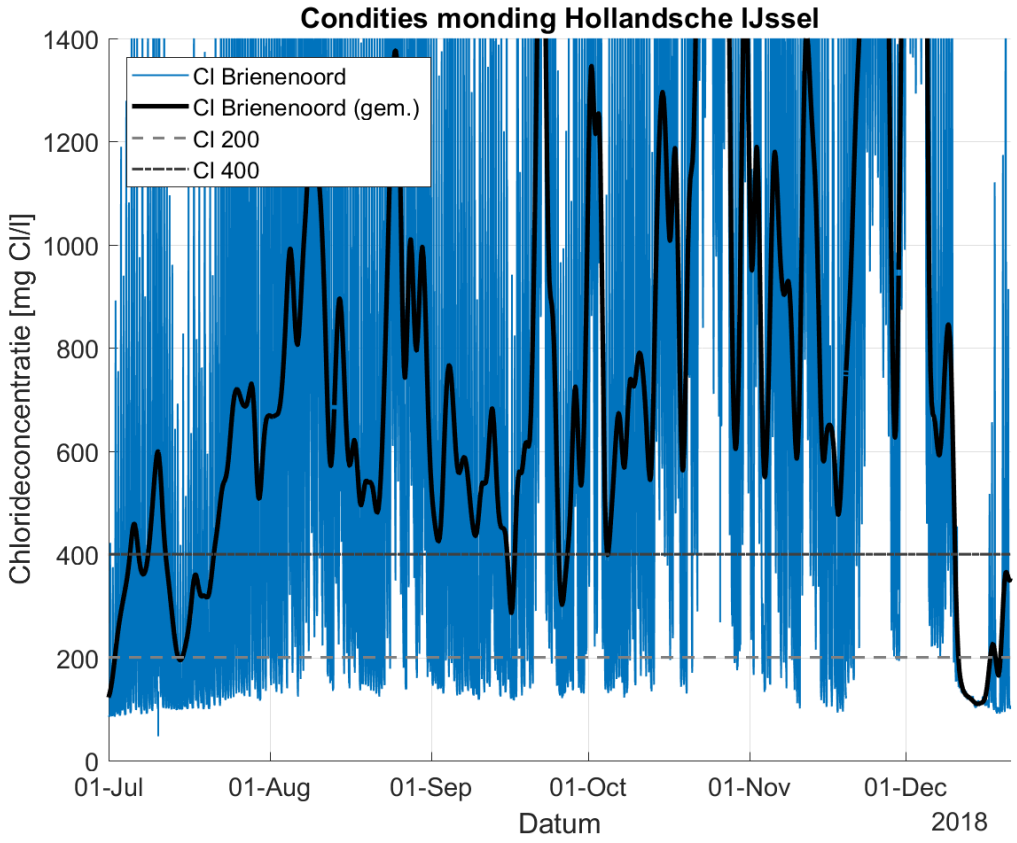


Figuur 3.3 Waterstand (η) bij Hoek van Holland inclusief een getijgemiddelde waterstand (godin-filter)

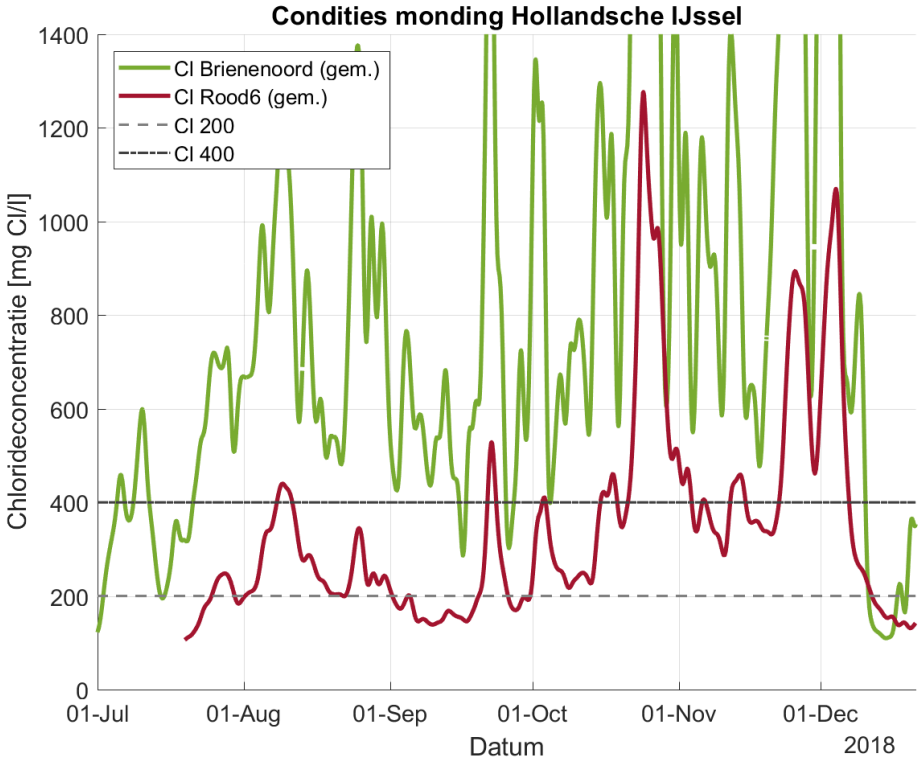
3.1.3 Chlorideconcentraties monding

In Figuur 3.4 is zichtbaar dat vanaf juli de chlorideconcentratie bij de Brienenoordbrug getijgemiddeld verhoogd is. Er is nog steeds een variatie zichtbaar als gevolg van veranderingen in rivierafvoer en waterstand bij Hoek van Holland, maar de getijgemiddelde waarde komt niet meer onder de achtergrondconcentratie. Gedurende het getij komt de chlorideconcentratie nog wel tot de achtergrondconcentratie. De achtergrondconcentratie is de chlorideconcentratie van het rivierwater bij Lobith en Eijsden en neemt toe bij lagere afvoeren. Voor de noordkant van de Rijn-Maasmonding (Lek en Hollandsche IJssel) is de chlorideconcentratie bij Lobith leidend en is de beschouwde periode maximaal 150 mg/l.

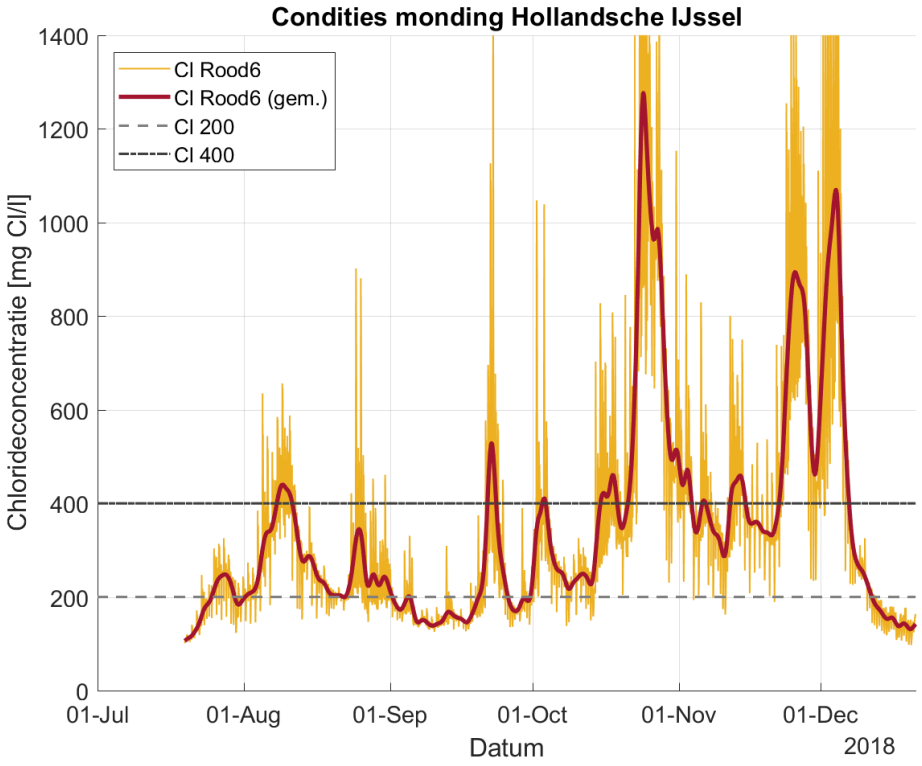
Op de Hollandsche IJssel zelf is er vanaf half oktober sprake van permanente verzilting (Figuur 3.5). Ook de niet-getijgemiddelde chlorideconcentratie komt vanaf dat moment niet meer in de buurt van de achtergrondconcentratie (Figuur 3.6). In augustus is de monding van de Hollandsche IJssel verzilt maar komen de chlorideconcentraties zelden boven de 400 mg Cl/l.



Figuur 3.4 Chlorideconcentraties (getijgemiddeld en instantaan) Brienenoordbrug (dieptegemiddeld) voor de gehele analyse periode



Figuur 3.5 Chlorideconcentraties (getijgemiddeld) Brienenoord en Rood6 (3 kilometer van de monding) voor de gehele analyse periode



Figuur 3.6 Chlorideconcentraties (getijgemiddeld en instantaan) Rood6 (3 kilometer van de monding) voor de gehele analyse periode

3.1.4 Debieten lozingen en onttrekkingen

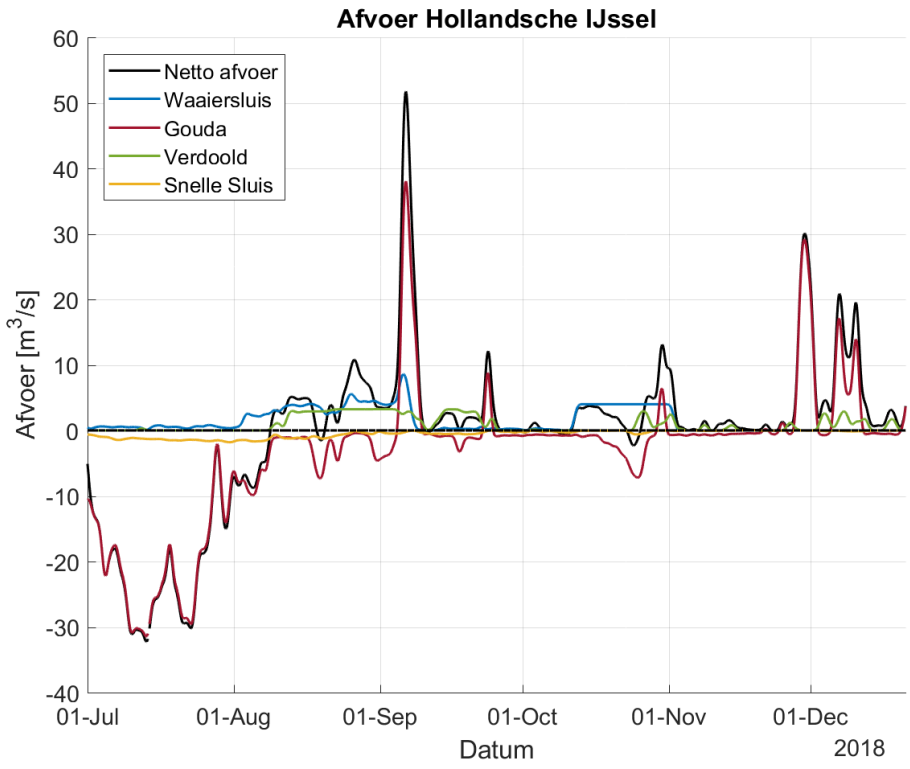
Er zijn op de Hollandsche IJssel enkele belangrijke gemalen met verschillende functies. De som van alle gemalen bij elkaar geeft de netto afvoer weer. Hier is ook het kombergingsdebiet bij opgenomen, maar dit is een zeer beperkte fractie ten opzichte van het totale debiet.

De Waaiersluis en gemaal Verdoold zijn in 2018 gebruikt om een surplus te realiseren op de Hollandsche IJssel. Het gemaal bij Gouda zorgt voor de grootste onttrekking op de Hollandsche IJssel hoewel er na een regenbui ook water wordt geloosd door het waterschap. Als laatste zijn er meerdere kleine gemalen en sluizen die water lozen en/of onttrekken op de Hollandsche IJssel op verschillende plekken. Dit betekent dat er kleine verschillen zijn in het debiet over de Hollandsche IJssel. Over het algemeen zijn de lozingen en onttrekkingen stroomopwaarts van Abraham Kroes (13 kilometer) het grootste deel van de som, de netto afvoer bij de monding is daarom meestal vergelijkbaar met de netto afvoer halverwege de Hollandsche IJssel.

Er zijn enkele perioden te onderscheiden in het doorspoeldebiet op de Hollandsche IJssel. Als eerste is er tot begin augustus sprake van netto onttrekking uit de Hollandsche IJssel door met name een hoge watervraag bij Gouda. Vanaf begin augustus wordt er geprobeerd om een klein surplus te realiseren door middel van een lozing bij Verdoold (~15 kilometer van de monding) en de Waaiersluis (KWA-route, 21 kilometer van de monding). Begin september is er een korte hoge piekafvoer bij Gouda. De rest van september is er sprake van een beperkt surplus tot uiteindelijk een netto afvoer van 0 m^3/s aan het begin van oktober. Halverwege oktober wordt er weer netto geloosd op de Hollandsche IJssel tot begin november. In de gehele maand november is het netto debiet min of meer 0 m^3/s. Pas in december beginnen de waterschappen met het lozen van water door regenbuien.

Er zijn drie verschillende instellingen van de maatregel te definiëren:

- Augustus tot begin september, combinatie van de Waaiersluis en Krimpenerwaardroute;
- Midden september, Krimpenerwaardroute;
- Midden tot eind oktober, vooral Waaiersluis aangevuld met Krimpenerwaardroute.



Figuur 3.7 Afvoer op de Hollandsche IJssel inclusief afvoeren van enkele gemalen en innamepunten, positief betekent een zeewaarts gericht debiet terwijl een negatief debiet een onttrekking uit de Hollandsche IJssel weergeeft

3.1.5 Concentraties lozingen en onttrekkingen

Het boezemwater van Schieland en Rijnland kan zout zijn door kwel van zeewater, met name Rijnland heeft last van zoute kwel en kan na een droge periode verzilt water lozen op het hoofdwatersysteem. Aangezien de lozingen bij Gouda een significant deel uitmaken van het debiet op de Hollandsche IJssel is te verwachten dat een grote lozing van Rijnland in deze periode leidt tot een (lokale) toename van chlorideconcentratie als de Hollandsche IJssel lagere chlorideconcentraties heeft.

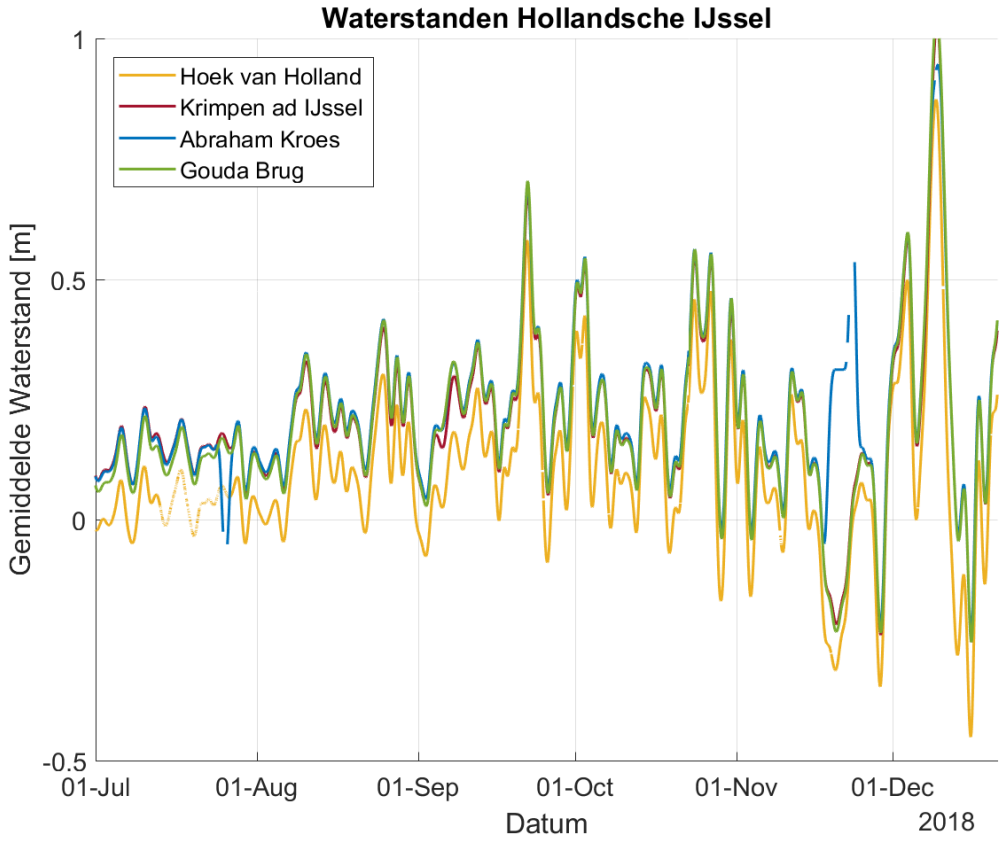
3.2 Waterstanden op de Hollandsche IJssel

3.2.1 Waterstanden Gouda en Krimpen aan den IJssel

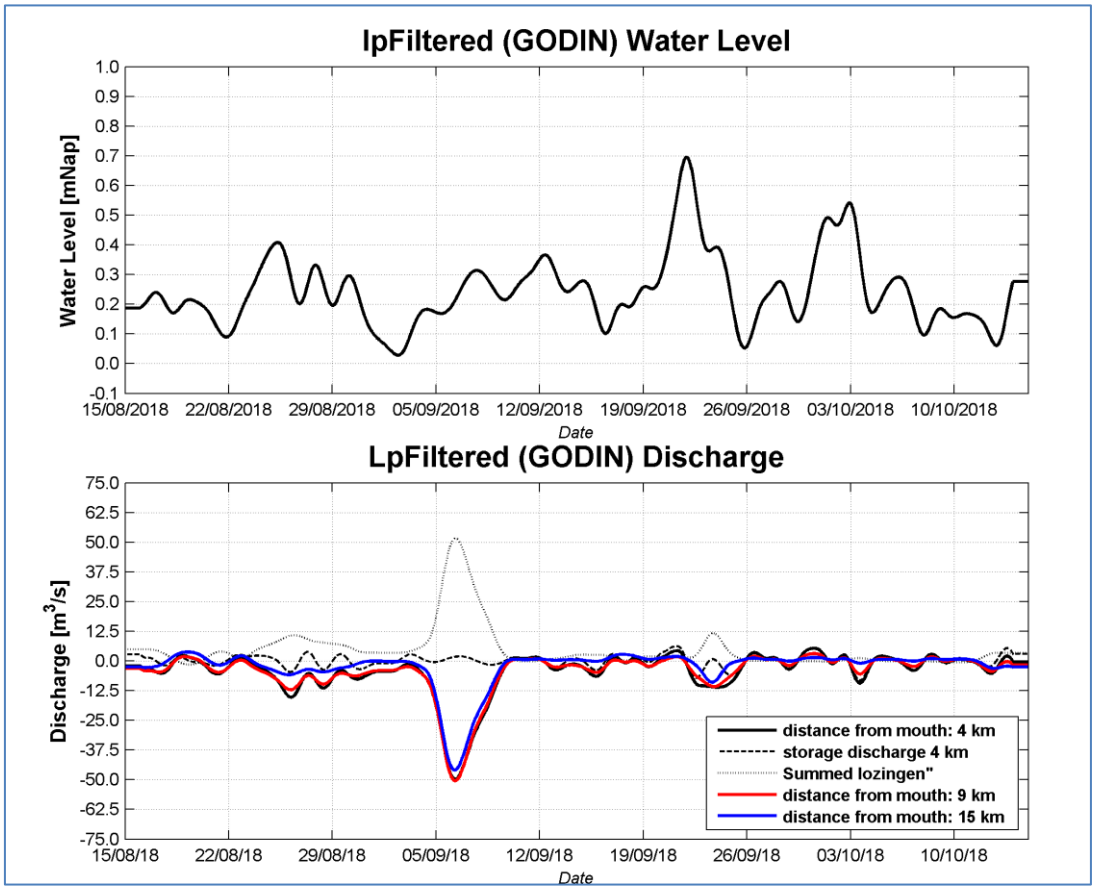
Op de Hollandsche IJssel zijn de patronen in getijgemiddelde waterstanden vergelijkbaar met die in de getijgemiddelde waterstand bij Hoek van Holland (Figuur 3.8). Dat betekent dat opzet bij Hoek van Holland ook leidt tot een waterstandsverhoging op de Hollandsche IJssel. De meting bij Abraham Kroes laat vreemde resultaten zien in november.

3.2.2 Uit waterstanden afgeleid getijgemiddeld kombergingsdebiet

Uit de waterstanden kan het kombergingsdebiet worden bepaald (Figuur 3.9). Hieruit blijkt dat de lozingen en onttrekkingen op de Hollandsche IJssel een veel groter aandeel hebben in de netto afvoer op de Hollandsche IJssel dan langzame waterstandsveranderingen



Figuur 3.8 Getijgemiddelde waterstanden op de Hollandsche IJssel



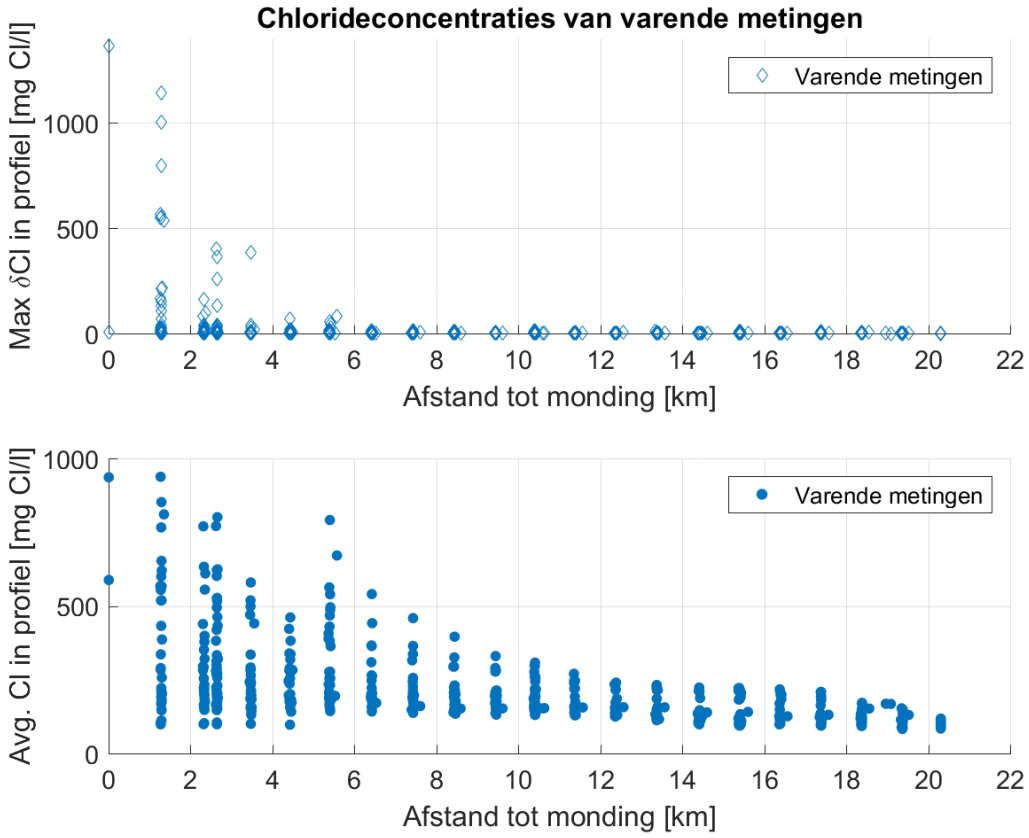
Figuur 3.9 Gefilterde waterstand en afvoer op de Hollandsche IJssel

3.3 Chlorideconcentraties

3.3.1 Concentratieverloop over de diepte: stratificatie

De maximale variatie in de chlorideconcentratie over de diepte geeft een indicatie van de stratificatie in de waterkolom (Figuur 3.10). Hieruit blijkt dat voor de voorgekomen condities in juli tot en met september stratificatie geen significante rol speelt vanaf 6 kilometer van de monding. Tussen de 3 en 6 kilometer van de monding is het effect van stratificatie vrij beperkt. In de eerste 3 kilometer van de Hollandsche IJssel speelt stratificatie in enkele gevallen wel een rol. Dit betekent dat met een vast meetpunt informatie verloren kan gaan in dit deel van de Hollandsche IJssel. Uit het onderste deel van het figuur is te concluderen dat er wel verzilting optreedt en deze conclusie in ieder geval toepasbaar is voor verzilte condities.

De varende metingen bieden geen informatie over de laterale variatie op de Hollandsche IJssel. De Hollandsche IJssel is vrij smal waardoor de verwachting is dat alleen lokaal sprake is van laterale variatie in chlorideconcentraties. Binnen deze studie wordt vooral gekeken naar de grootschalige processen en afhankelijkheden. Dit betekent dat de vaste metingen een representatief beeld zullen geven van de chlorideconcentratie op de Hollandsche IJssel.

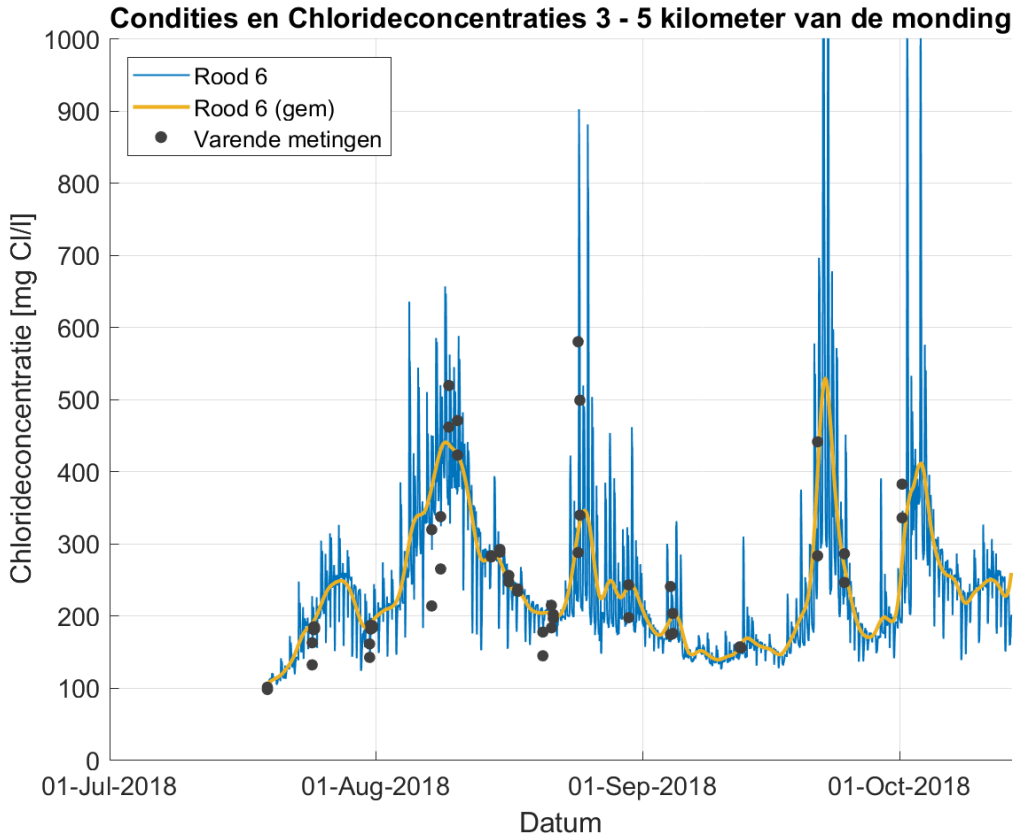


Figuur 3.10 Chlorideconcentraties van varende metingen in de Hollandsche IJssel met in de bovenste grafiek het maximale verschil over de waterkolom en dieptegemiddelde chlorideconcentraties in de onderste grafiek

3.3.2 Consistentiecheck vaste en varende metingen

In appendix A zijn de varende metingen vergeleken met de vaste metingen, in Figuur 3.11 is een van de trajecten te zien. Daartoe zijn de varende metingen opgesplitst op basis van de locatie en vervolgens samengevoegd (lumped). Over het algemeen zijn de metingen van de divers goed in lijn met de varende metingen. Kleine verschillen die worden waargenomen tussen de vaste en varende metingen kunnen worden veroorzaakt door verschillen in laterale en longitudinale afstand.

Er valt dus te concluderen dat de metingen van de divers als betrouwbaar zijn aan te merken. Gebruik makend van de goede ruimtelijke en temporele dekking van de vaste meetpunten zal de analyse hoofdzakelijk met behulp van de vaste meetpunten worden uitgevoerd.

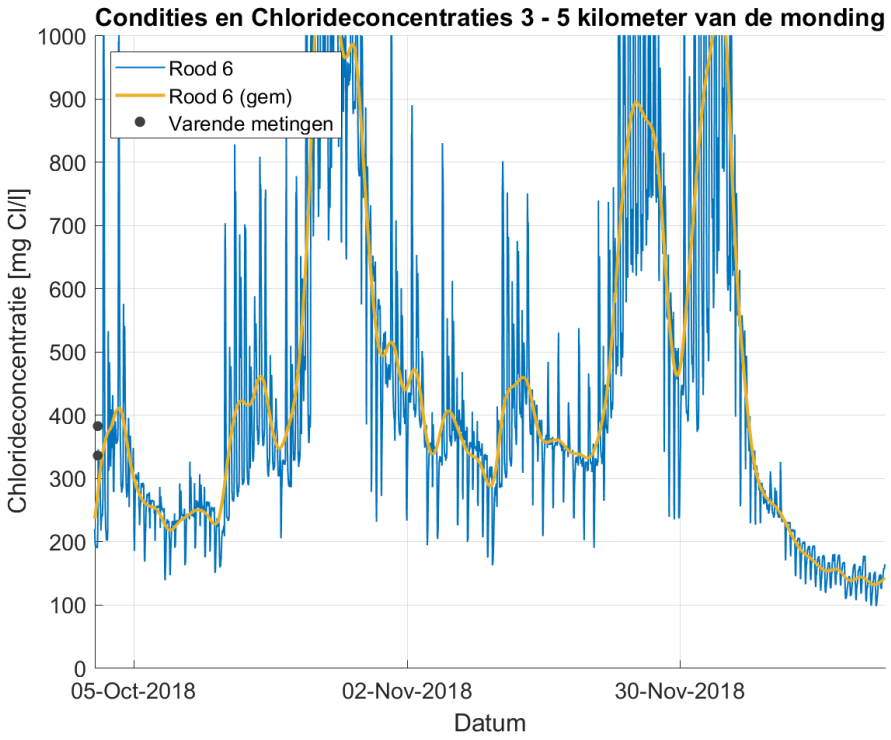


Figuur 3.11 Getijgemiddelde en instantane chlorideconcentraties op het eerste deel van de Hollandsche IJssel voor de eerste helft van de analyseperiode, rood6 bevindt zich op 4,6 kilometer van de monding

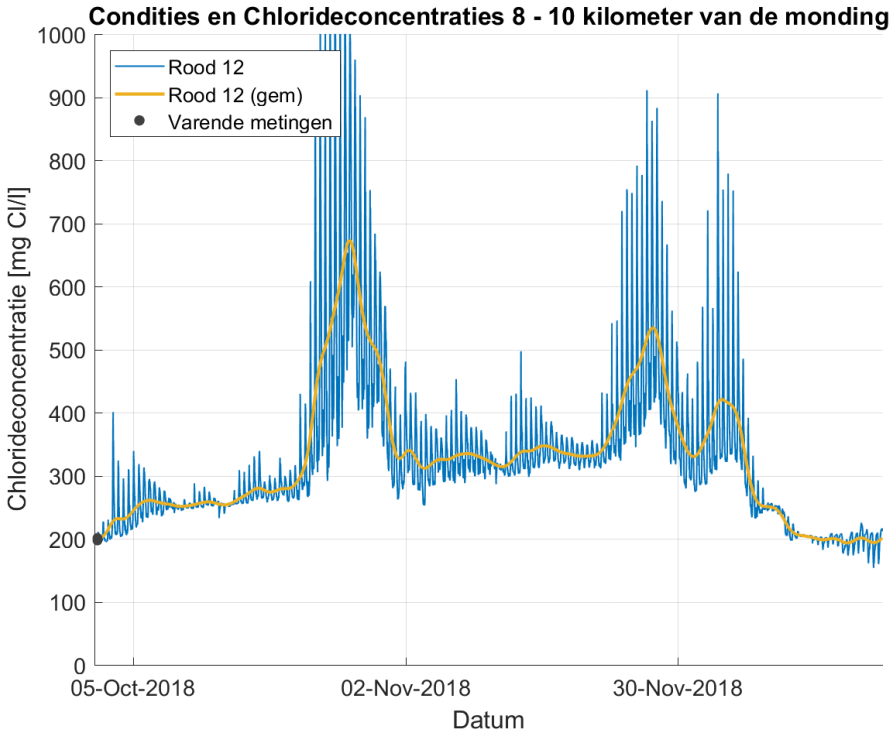
3.3.3 Variatie over het getij op de Hollandsche IJssel

In Figuur 3.12 tot en met Figuur 3.15 is de chlorideconcentratie voor verschillende delen van de Hollandsche IJssel gegeven. Hier is te zien dat verder stroomopwaarts op de Hollandsche IJssel de variatie over het getij afneemt. Stroomopwaarts van 12 kilometer van de monding is de variatie over het getij te verwaarlozen, variaties binnen het getij worden veroorzaakt door aanpassingen in de lozingen en onttrekkingen. Deze waarneming past het eerder in Kuiper (2016) naar voren gebrachte onderscheid tussen een door (getij)advectie gedomineerde chlorideconcentratie in het benedenstroomse deel en een door dispersieve processen gedomineerde concentratie bovenstrooms.

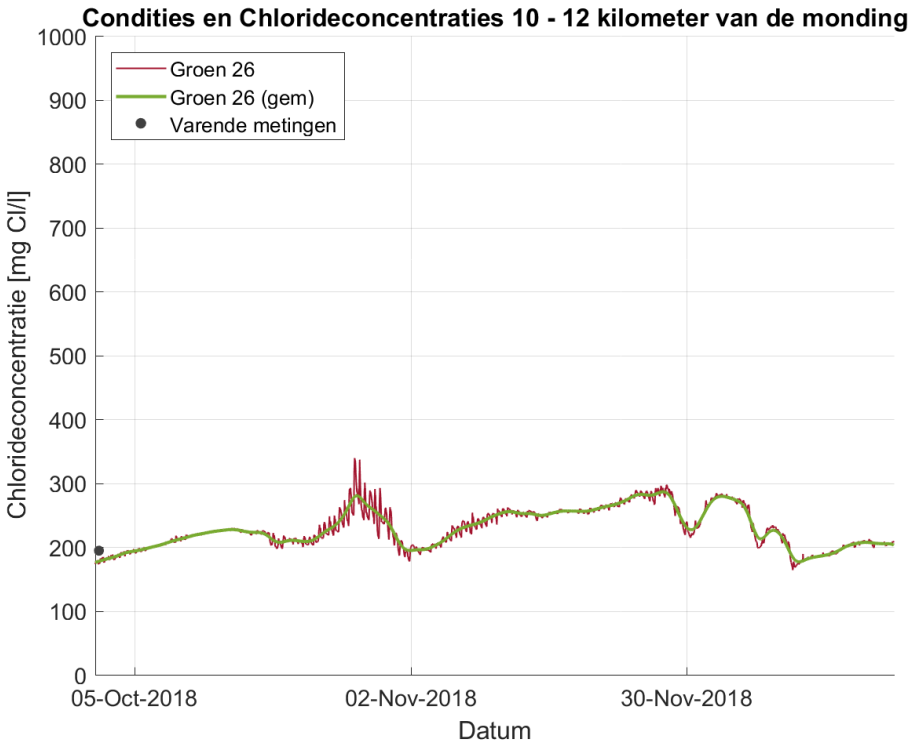
In het vervolg van de analyse wordt er gebruik gemaakt van de getijgemiddelde chlorideconcentratie. In het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel zal hierdoor weinig informatie verloren gaan. In het benedenstroomse deel moet er rekening gehouden worden met significant hogere en lagere chlorideconcentraties gedurende het getij ten opzichte van de getijgemiddelde chlorideconcentratie.



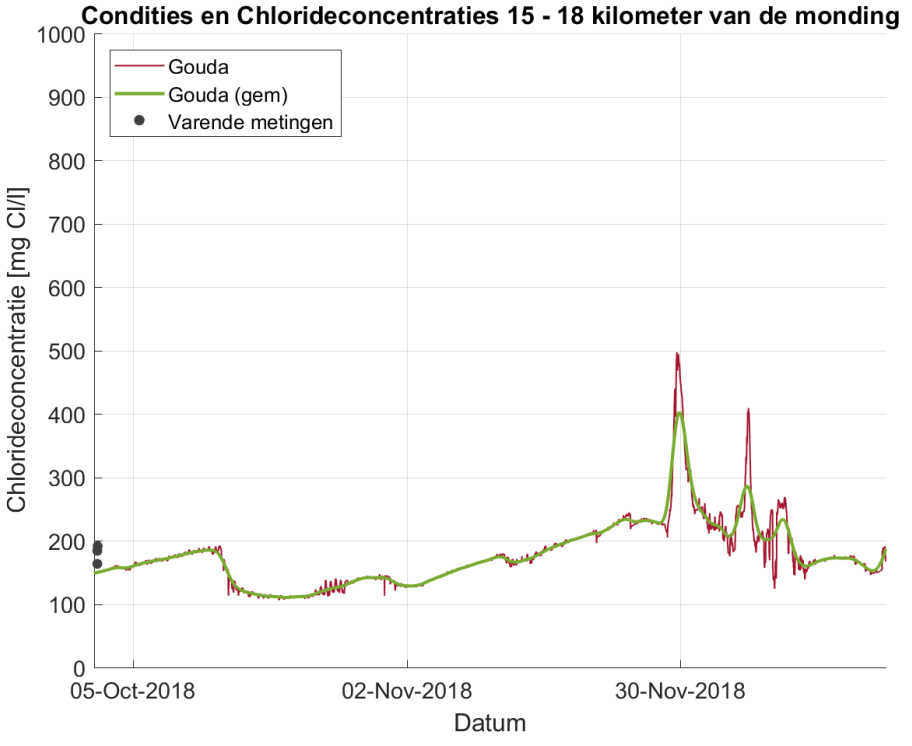
Figuur 3.12 Getijgemiddelde en instantane chlorideconcentraties op een deel van de Hollandsche IJssel voor de tweede helft van de analyseperiode, rood6 bevindt zich op 4,6 kilometer van de monding



Figuur 3.13 Getijgemiddelde en instantane chlorideconcentraties op een deel van de Hollandsche IJssel voor de tweede helft van de analyseperiode, rood12 bevindt zich op 8,5 kilometer van de monding



Figuur 3.14 Getijgemiddelde en instantane chlorideconcentraties op een deel van de Hollandsche IJssel voor de tweede helft van de analyseperiode, groen26 bevindt zich op 11,2 kilometer van de monding



Figuur 3.15 Getijgemiddelde en instantane chlorideconcentraties op een deel van de Hollandsche IJssel voor de tweede helft van de analyseperiode, Gouda bevindt zich op 17,6 kilometer van de monding

4 Hollandsche IJssel: Analyse

4.1 Verziltingsperiodes Hollandsche IJssel

4.1.1 Beschrijving onderscheiden periodes

In onderstaande opsomming worden de veranderingen in chlorideconcentratie gekoppeld aan veranderingen in de forceringen (Figuur 4.1 tot en met Figuur 4.3). Hierbij onderscheiden we een aantal “periodes”, waarbij elk periode verbonden wordt met een specifieke set aan omgevingscondities en zoutverspreiding.

I. Van 1 juli tot 5 augustus: er is sprake van een langzame toename in chlorideconcentratie over de hele Hollandsche IJssel. Op sommige momenten is er sprake van een negatieve zoutgradiënt. Deze patronen zijn hoogstwaarschijnlijk het gevolg van de hoge onttrekking uit de Hollandsche IJssel waardoor het zout oostwaarts wordt getrokken. In het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel kan zoet water worden aangevoerd via de Nieuwe Maas of Lek/Sliksloot.

II. Van 5 tot 17 augustus: het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel wordt iets zouter door een verhoging in de waterstand bij Hoek van Holland. Het zout dringt tot ongeveer 10 kilometer op. Tegelijkertijd wordt de onttrekking op de Hollandsche IJssel omgezet naar een netto lozing op de Hollandsche IJssel. In het meest bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel is vrijwel direct een afname in chlorideconcentratie zichtbaar. Enkele dagen later daalt ook de chlorideconcentratie halverwege de Hollandsche IJssel (14 kilometer).

III. Van 17 augustus tot 5 september: de chlorideconcentratie neemt af op de Hollandsche IJssel. Er zijn enkele kortdurende pieken bij de monding van de Hollandsche IJssel, maar deze zorgen voor een beperkte verhoging in de chlorideconcentratie stroomopwaarts. In het laatste deel van deze periode lijkt het zoutprofiel langs de Hollandsche IJssel zich te stabiliseren.

IV. Van 5 tot 18 september: de lozing bij Gouda leidt tot een lokale piek in chlorideconcentratie bovenstrooms op de Hollandsche IJssel (Figuur 4.2). Daaropvolgend neemt eerst de chlorideconcentratie af door het netto debiet op de Hollandsche IJssel om daarna weer iets toe te nemen.

V. Van 18 september tot 12 oktober: er zijn enkele kortdurende verhogingen in chlorideconcentratie bij de monding van de Hollandsche IJssel door verhogingen in de waterstand bij Hoek van Holland. Dit zout dringt langzaam binnen over de gehele lengte van de Hollandsche IJssel, samenvallend met een netto debiet van min of meer 0 m^3/s. Bij deze afvoer stijgt de chlorideconcentratie in 2 weken met 50 mg/l tot 160 mg/l in begin oktober, op 12 oktober is de chlorideconcentratie 180 mg/l.

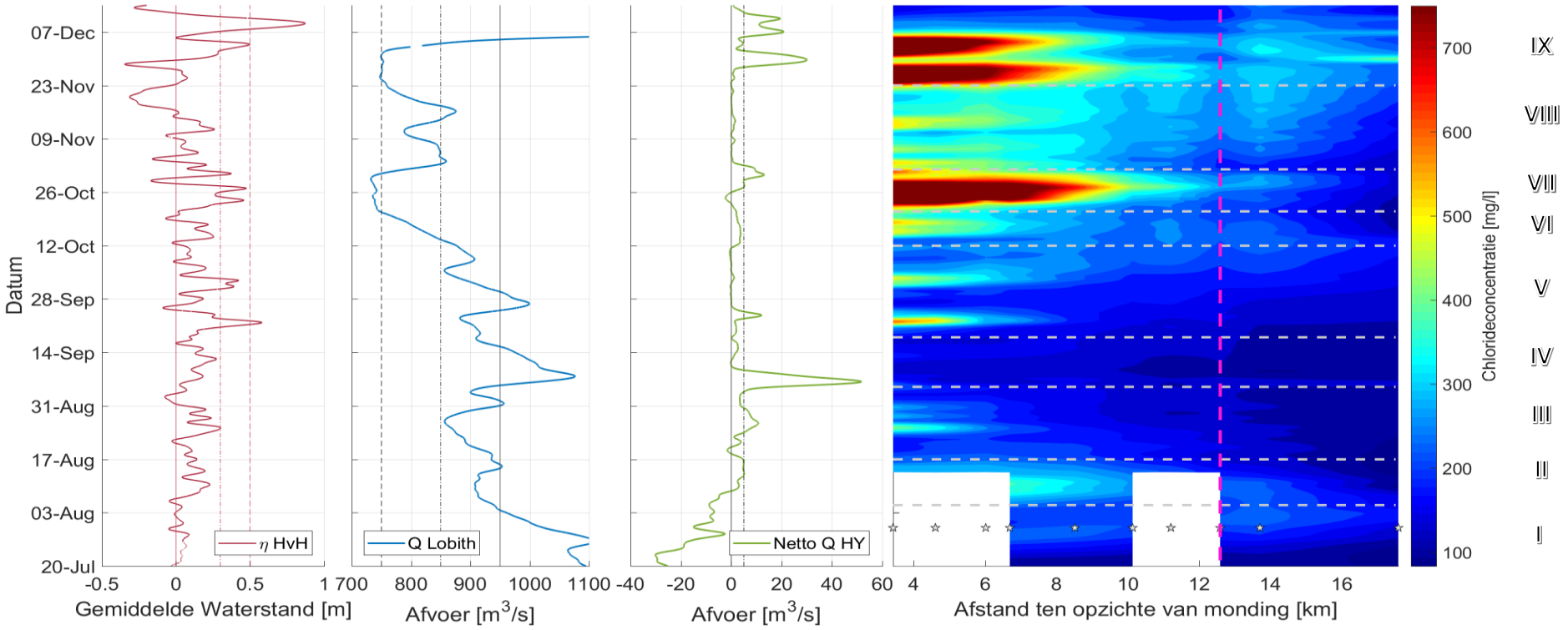
VI. Van 12 tot 21 oktober: de monding wordt zouter door een verhoogde waterstand terwijl tegelijkertijd het debiet op de Hollandsche IJssel wordt verhoogd. Als gevolg van de netto afvoer daalt binnen enkele dagen de chlorideconcentratie op het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel (vanaf 14 kilometer).

VII. Van 21 oktober tot 1 november: een sterke verhoging in waterstand bij Hoek van Holland in combinatie met de lage rivierafvoer zorgt voor een grote toename in chlorideconcentratie in de eerste 8 kilometer van de Hollandsche IJssel. Uiteindelijk dringt het zout binnen enkele dagen op tot 12-14 kilometer van de monding . Het meest bovenstroomse deel wordt iets zouter maar verandert minder sterk dan het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel. Rond 1 november zorgt een korte

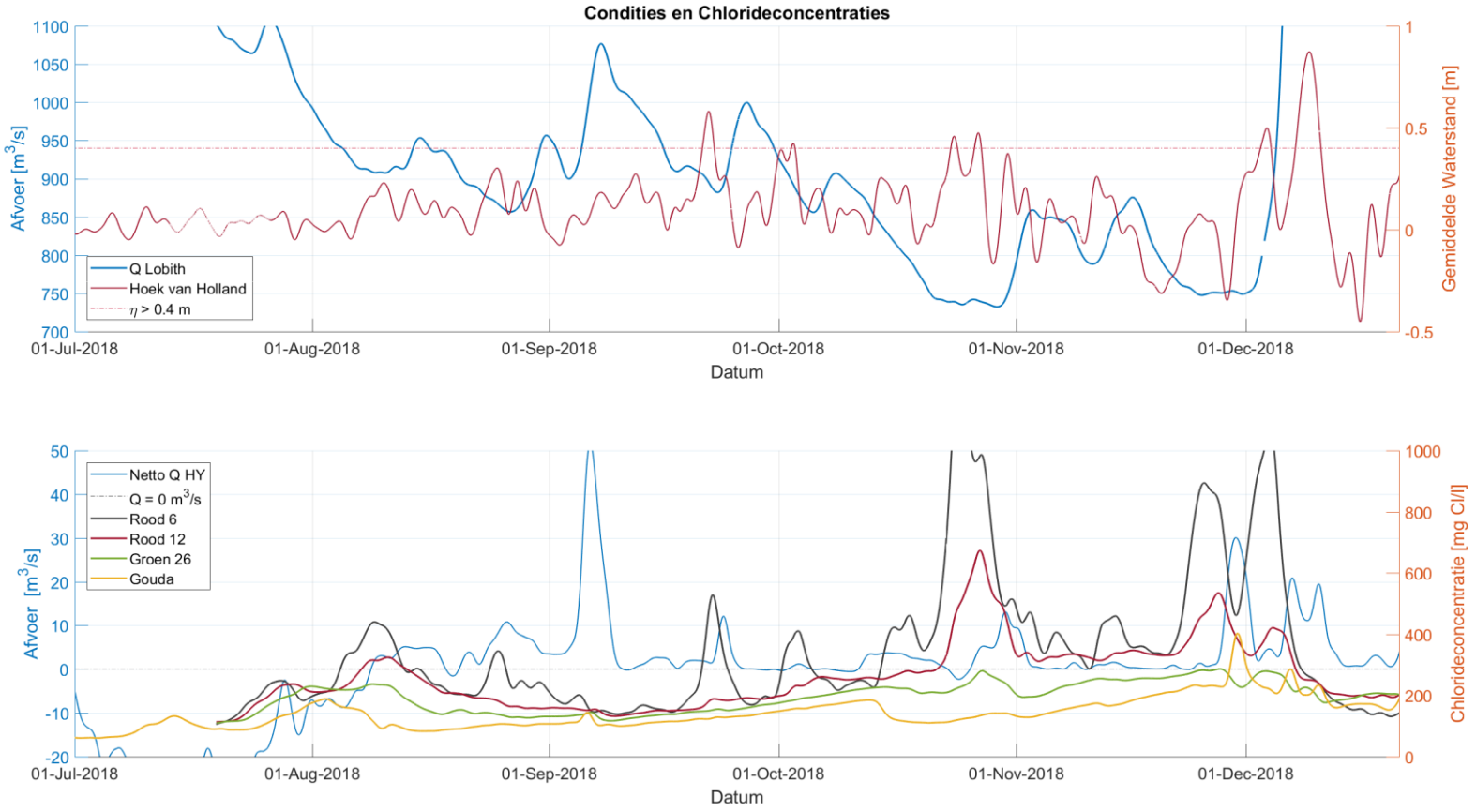
piek in afvoer op de Hollandsche IJssel voor een afname in chlorideconcentratie tussen 12 en 17 kilometer op de Hollandsche IJssel.

VIII. Van 1 tot 23 november: de chlorideconcentratie is tot 8 kilometer van de monding min of meer stabiel. De netto afvoer op de Hollandsche IJssel schommelt rond de 0 m^3/s. In het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel neemt de chlorideconcentratie langzaam toe.

IX. Van 23 november tot 14 december: er is een sterke toename in chlorideconcentratie bij de monding van de Hollandsche IJssel. Vrij snel daarna volgt er een grote netto lozing (regen) op de Hollandsche IJssel. Lokaal neemt de chlorideconcentratie bij Gouda sterk toe, maar op de rest van de Hollandsche IJssel neemt deze sterk af door de hogere rivierafvoer. Daarna ontstaan er op de Hollandsche IJssel gebieden die zouter zijn dan de monding van de Hollandsche IJssel.



Figuur 4.1 Getijgemiddelde chlorideconcentraties (uiterst rechts) met verschillende forceringen (getijgemiddelde waterstand [links], afvoer Lobith [midden] en afvoer Hollandsche IJssel [rechts]) opgedeeld in verschillende periodes (Romeinse cijfers rechts), de grens tussen advectief en dispersief gedomineerd transport is in roze aangegeven



Figuur 4.2 Condities en chlorideconcentraties tussen juli en oktober op de Hollandsche IJssel

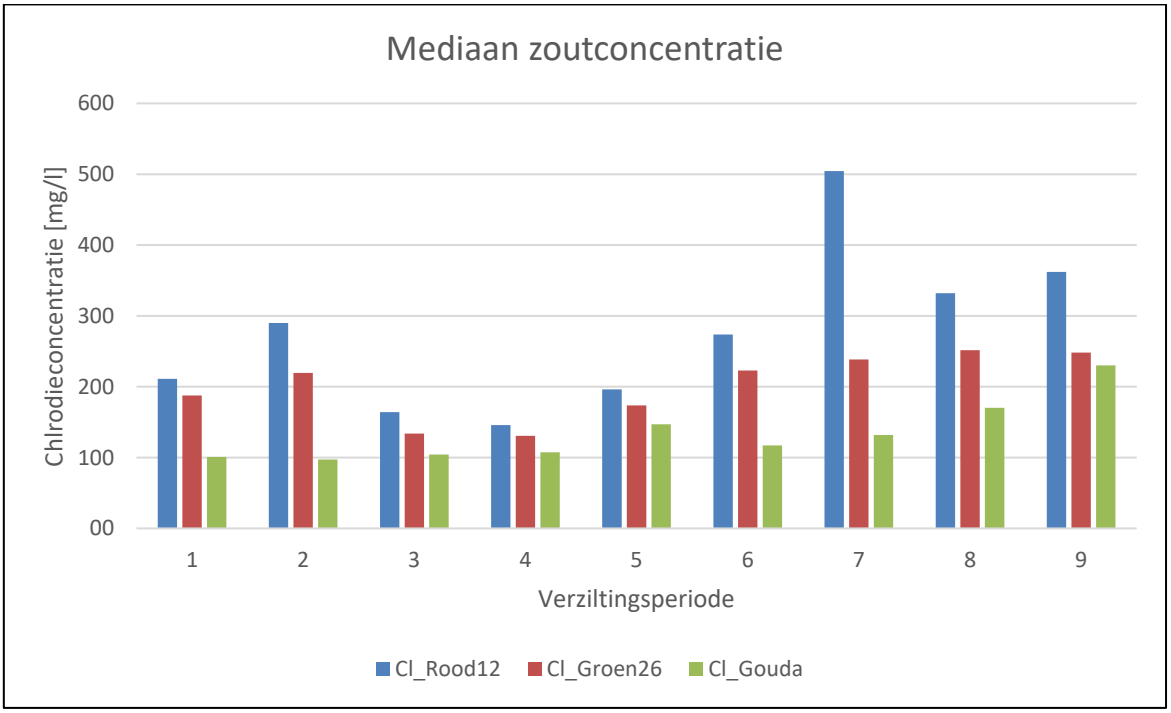
4.1.2 Karakteristieke waardes per verziltingsperiode

In onderstaande Tabel 4.1 zijn voor elke verziltingsperiode karakteristieke waardes bepaald. De chlorideconcentraties bij Rood12 (~monding), Groen26 (halverwege) en Gouda (stroomopwaarts) geven een globaal beeld van het verloop van de chlorideconcentratie langs de Hollandsche IJssel en daarmee de reactie van het systeem op het verschil in forcering of de inzet van de maatregel. Dit wordt ook getoond in Figuur 4.3.

In deze wijze van karakteriseren wordt dus de verandering over de tijd binnen een periode buiten beschouwing gelaten In bijlage B zijn de maximale, mediane en minimale getijgemiddelde chlorideconcentraties voor de gehele Hollandsche IJssel te vinden.

Tabel 4.1 Samenvatting condities voor de verschillende verziltingsperiodes, dikgedrukt de belangrijkste karakteristieken per periode

Periode	Begin	Qlobith	HvH_max	Q_HY	Cl_Rood12	Cl_Groen26	Cl_Gouda
1	1-7-2018	1113	0.11	**-19.6**	211.2	187.7	101.0
2	6-8-2018	915	0.23	**3.1**	290.0	219.4	97.3
3	28-8-2018	898	0.30	**3.9**	164.3	133.8	104.4
4	6-9-2018	999	0.27	2.2	145.9	130.8	**107.4**
5	19-9-2018	904	**0.58**	**0.1**	196.2	173.6	147.0
6	13-10-2018	806	0.26	**3.4**	273.7	**222.9**	**117.1**
7	22-10-2018	739	**0.48**	4.2	**504.4**	**238.6**	131.9
8	2-11-2018	837	0.26	**0.4**	332.0	**251.5**	**170.3**
9	24-11-2018	862	**0.87**	6.7	**362.1**	**248.1**	**230.1**



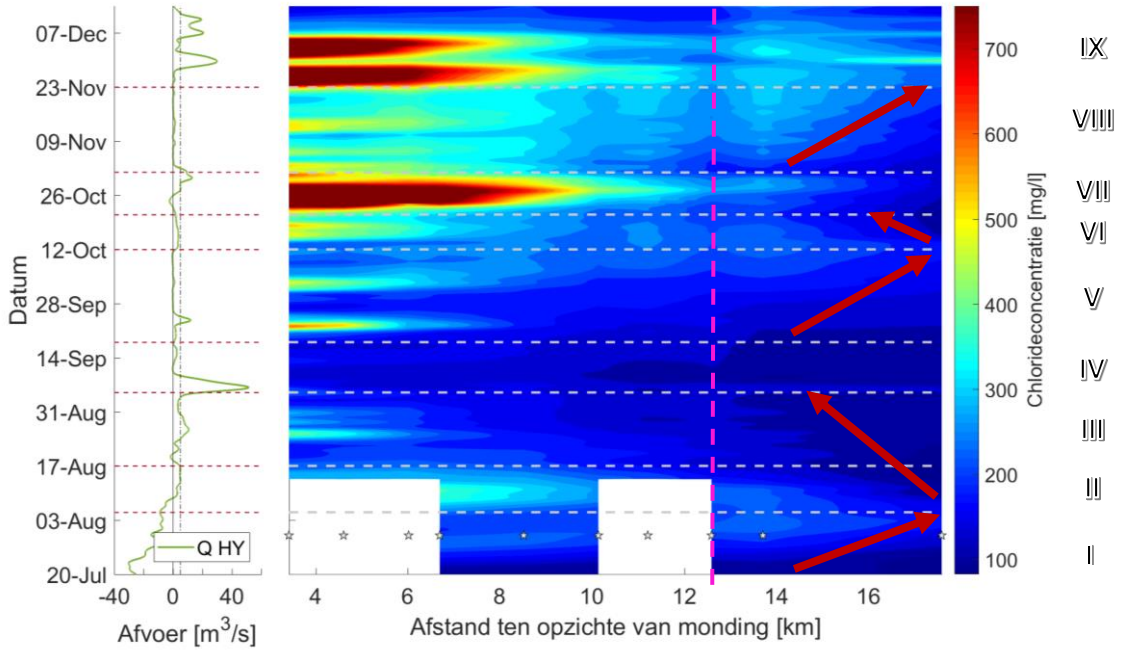
Figuur 4.3 Mediane chlorideconcentratie voor de verschillende verziltingsperiodes

4.2 Analyse effect doorspoeldebiet

4.2.1 Invloed doorspoeldebiet - visueel

In Figuur 4.4 is de chlorideconcentratie over de Hollandsche IJssel te zien met de verschillende afvoeren op de Hollandsche IJssel. Hier is voor het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel een duidelijk verband zichtbaar in de trend in chlorideconcentratie in combinatie met de netto afvoer. Zo stijgt de chlorideconcentratie bij periode I, V en VIII als de afvoer 0 of lager dan 0 m^3/s is. Tegelijkertijd daalt de chlorideconcentratie bij periode II, III en VI als er wordt geloosd op de Hollandsche IJssel. Bij grotere afvoeren op de Hollandsche IJssel, veroorzaakt door lozingen van Rijnland bij Gouda, stijgt de chlorideconcentratie lokaal bij Gouda door zout boezemwater (periode IV en IX).

Het duurt ongeveer twee weken voor zout vanaf halverwege de Hollandsche IJssel (8 kilometer vanaf de monding) Gouda bereikt als de netto afvoer ~0 m^3/s (zoals te zien is in periode V en VIII). Een lozing van meer dan 1 m^3/s op de Hollandsche IJssel heeft binnen 2 dagen invloed op de chlorideconcentratie bij Gouda en na een week op de chlorideconcentratie bij Abraham Kroes (zoals te zien is in periode II en VI). Afhankelijk van de chlorideconcentratie in de monding heeft het doorspoeldebiet effect tot ongeveer 10 – 14 kilometer van de monding. Er is niet te zeggen of een hoger doorspoeldebiet verder stroomafwaarts op de Hollandsche IJssel effect zou hebben.
Het is niet met zekerheid te zeggen of het doorspoeldebiet op een langere tijdschaal (periode VIII) of hogere chlorideconcentraties in de monding (periode VII) effectief zou zijn voor het tegenhouden van de zoutindringing in het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel. In de metingen van 2018 was er in ieder geval voor deze periodes geen sprake van een stationaire situatie waardoor de invloed van het doorspoeldebiet onder deze condities niet is te toetsen.



Figuur 4.4 Chlorideconcentratie en netto afvoer op de Hollandsche IJssel inclusief hulplijnen voor de verziltingsperiodes. De stippellijn in bij de afvoer geeft 5 m^3/s weer, de grens tussen advectief en dispersief gedomineerd transport is in roze aangegeven

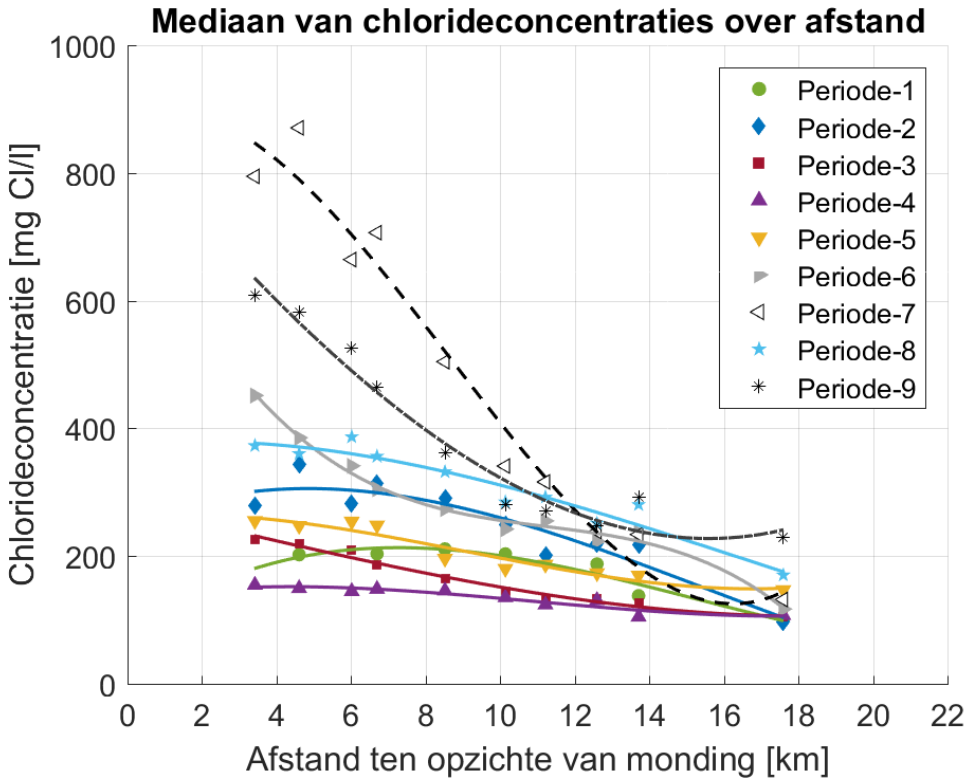
4.2.2 Doorspoeldebiet en gradiënt

In Figuur 4.5, Figuur 4.6 en Figuur 4.7 zijn de statistische kentallen van de chlorideconcentraties uitgezet ten opzichte van de locatie op de Hollandsche IJssel. Deze methode geeft de mogelijkheid om de effectiviteit van de maatregel te beoordelen op basis van de gradiënt van de chlorideconcentraties. Bij een hoger doorspoeldebiet is de verwachting dat de gradiënt in het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel toeneemt.

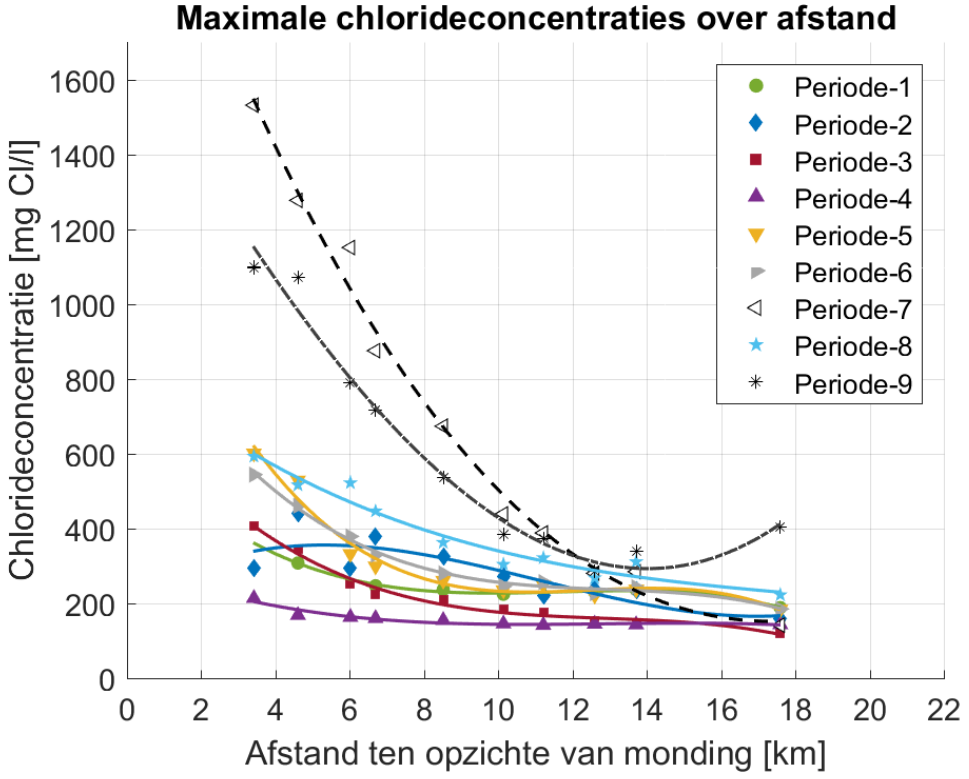
Uit onderstaande figuren is duidelijk dat periodes 1 en 5 een vlakkere gradiënt hebben in het bovenstroomse deel door het lagere doorspoeldebiet. Als dit wordt vergeleken met periode 2 en 6, waarbij er een doorspoeldebiet van 3 m^3/s wordt gehandhaafd, is er een steilere gradiënt zichtbaar, zeker in de laatste 3 kilometer. Een soortgelijke vergelijking kan gemaakt worden tussen periode 7 en 8, waarbij periode 7 een doorspoeldebiet van 4 m^3/s heeft en bij periode 8 de afvoer min of meer 0 m^3/s is. Tegelijkertijd is de vergelijking niet helemaal te trekken omdat het tijdseffect van de verzilting ongelijk is tussen deze twee periodes. Bij periode 8 heeft het zout langzaam kunnen optrekken voor een langere periode in het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel.

Tabel 4.2 Herhaling van de samenvatting condities voor de verschillende verziltingsperiodes, dikgedrukt de belangrijkste karakteristieken per periode (ten behoeve van de volgende figuren)

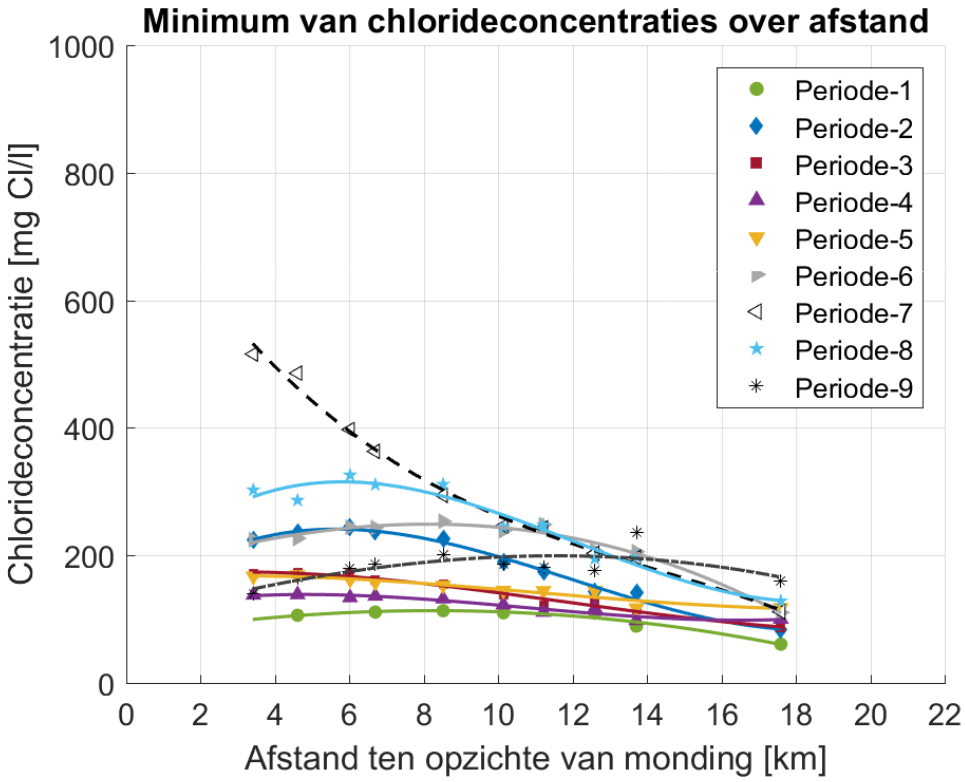
Periode	Begin	Qlobith	HvH_max	Q_HY	Cl_Rood12	Cl_Groen26	Cl_Gouda
1	1-7-2018	1113	0.11	**-19.6**	211.2	187.7	101.0
2	6-8-2018	915	0.23	**3.1**	290.0	219.4	97.3
3	28-8-2018	898	0.30	**3.9**	164.3	133.8	104.4
4	6-9-2018	999	0.27	2.2	145.9	130.8	**107.4**
5	19-9-2018	904	**0.58**	**0.1**	196.2	173.6	147.0
6	13-10-2018	806	0.26	**3.4**	273.7	**222.9**	**117.1**
7	22-10-2018	739	**0.48**	4.2	**504.4**	**238.6**	131.9
8	2-11-2018	837	0.26	**0.4**	332.0	**251.5**	**170.3**
9	24-11-2018	862	**0.87**	6.7	**362.1**	**248.1**	**230.1**



Figuur 4.5 Mediaan van de chlorideconcentraties voor de verschillende verziltingsperiodes uitgezet tegen de afstand ten opzichte van de monding



Figuur 4.6 Maximale chlorideconcentraties voor de verschillende verziltingsperiodes uitgezet tegen de afstand ten opzichte van de monding



Figuur 4.7 Minimale chlorideconcentraties voor de verschillende verziltingsperiodes uitgezet tegen de afstand ten opzichte van de monding

4.3 Systeemwerking

4.3.1 'Advectief' versus 'dispersief'

In het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel is er een grotere variatie over het getij te zien ten opzichte van het bovenstroomse deel (paragraaf 3.3.3.). Daaruit is te concluderen dat de zoutindringing op de Hollandsche IJssel zich anders gedraagt in het benedenstroomse deel ten opzichte van het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel. In het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel is de chlorideconcentratie vooral gerelateerd aan het (getijgemiddelde) waterstandsverschil. Dit getijgemiddelde waterstandsverschil hangt samen met de afvoer op de Waal (tegendruk) en opzet op zee. Het debiet op de Hollandsche IJssel heeft (logischerwijs) slechts beperkte invloed op de mate van zoutindringing. Het gedrag in het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel wordt binnen dit gebied advectief zouttransport genoemd.

In het bovenstroomse deel is de zoutindringing indirect afhankelijk van het waterstandsverschil en is de verandering in chlorideconcentratie een stuk langzamer. Dit komt doordat langzame mengingsprocessen op een kleinere schaal een belangrijke rol in dit deel van de Hollandsche IJssel spelen. De zoutindringing is hier afhankelijk van de chlorideconcentratie in het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel (en daarmee indirect van het getijgemiddelde waterstandsverschil) en de netto afvoer op de Hollandsche IJssel. In beperkte mate heeft de chlorideconcentratie van de lozingen en onttrekkingen invloed op de chlorideconcentratie van de Hollandsche IJssel. De verwachting is dat de zoutvracht van deze lozingen en onttrekkingen relatief beperkt is ten opzichte van de zoutvracht vanuit zee. De

dominante langzame mengings- en verspreidingsprocessen in het bovenstroomse deel worden dispersief genoemd en zijn te beïnvloeden met behulp van een doorspoeldebiet.

4.4 Conclusies en aanbevelingen

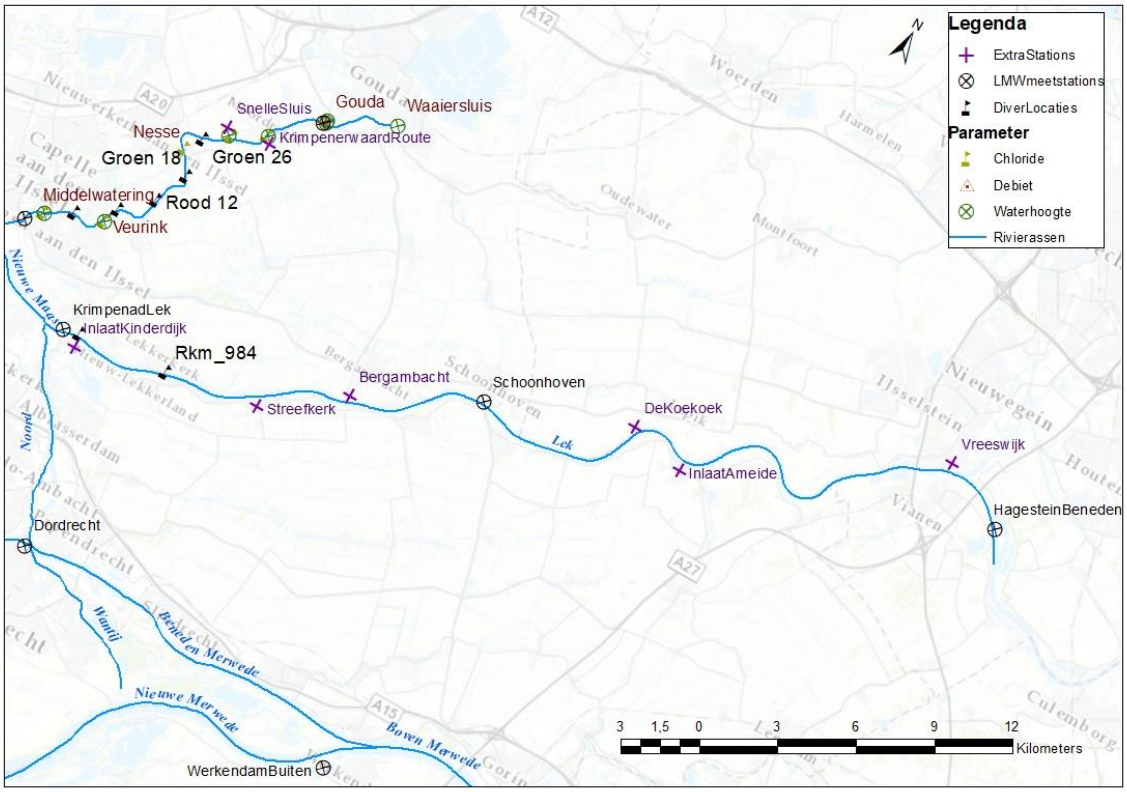
Uit de metingen van 2018 zijn er verschillende kwalitatieve conclusies te trekken met betrekking tot de systeemwerking en effectiviteit van het doorspoeldebiet voor het tegenhouden van de zoutindringing op de Hollandsche IJssel.

Chlorideconcentraties in het bovenstroomse deel zijn vooral afhankelijk van de concentratie in het benedenstroomse deel en het doorspoeldebiet. In mindere mate kan de chlorideconcentratie van de lozingen in dit deel leiden tot kortdurende veranderingen in de chlorideconcentratie. Een debiet tussen de 1 en 5 m^3/s is in 2018 voldoende gebleken om zoutindringing te stabiliseren (Figuur 4.4) en zelfs terug te dringen tot 12/13 kilometer van de monding. De reactietijd van de chlorideconcentratie bij Gouda is vrijwel instantaan op het verhogen van het doorspoeldebiet. In de rest van het bovenstroomse deel (tot 12/13 kilometer van de monding) duurt het ongeveer 1 week voor er significante verlaging in de chlorideconcentratie zichtbaar is. Bij een debiet lager dan 0 - 1 m^3/s zal het zout optrekken op het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel afhankelijk van de zoutconcentratie halverwege de Hollandsche IJssel. Het duurt bij de voorgekomen condities ongeveer 2 weken voor het zout is opgetrokken tot Gouda.
Er zijn geen grootschalige zichtbare verschillen tussen de inzet van de Krimpenerwaardroute (13 kilometer van de monding) of de KWA (20 kilometer van de monding). Eventuele verschillen in de reactie op de herkomst van het doorspoeldebiet zijn niet los te koppelen van veranderingen van omgevingsfactoren in 2018 en vragen een ander type analyse. Bij deze analyse zijn ook de achtergrondconcentraties van het lozingswater noodzakelijk om eventuele verschillen beter te kunnen duiden.
De getrokken conclusies zijn gebaseerd op de observaties van 2018 en bevestigen voor een groot deel de theorie achter de maatregelen en de in het verleden opgebouwde systeemkennis. Voor andere condities en tijdschalen is niet vast te stellen of de theorie ook omstandigheden geldig is. In theorie is het mogelijk om met een doorspoeldebiet het zoutfront constant te houden in het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel bij stationaire condities (Kuijper, 2015). Deze theorie kan bij een volgende verziltingsperiode getoetst worden met metingen waarbij er operationeel gestuurd kan worden als de data real-time wordt ontsloten.
Chlorideconcentraties in het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel zijn afhankelijk van een combinatie van de opzet op zee en de rivierafvoer (Waal). Het doorspoeldebiet heeft een beperkte invloed op het tegenhouden van de verzilting in het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel. Verzilting van het benedenstroomse deel gebeurt op een tijdschaal van enkele dagen nadat er sprake is van opzet op zee en/of langere periode van lage afvoer. Overigens is de maatregel niet opgezet om de chlorideconcentratie in dit deel van de Hollandsche IJssel te beïnvloeden.

Voor de Hollandsche IJssel worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Bij een volgende verziltingsperiode is het aan te raden om een vergelijkbare hoeveelheid divermetingen (als de metingen van Rijkswaterstaat en de waterschappen worden gecombineerd) te gebruiken op de Hollandsche IJssel. Een divermeting tussen Krimpen aan den IJssel en de monding van de Hollandsche IJssel zorgt voor een nog betere dekking en maakt het bepalen van chlorideconcentratie in de monding eenvoudiger. Voor een meer gedetailleerde analyse, bijvoorbeeld met behulp van zoutvrachten, zijn ook de chlorideconcentraties van de lozingen en onttrekkingen nodig.
- Tijdens een verziltingsperiode kan met een goed ruimtelijk dekkend real-time ontsloten meetnetwerk, zoals in 2018 het geval was, iteratief worden gewerkt met verschillende (op- of afbouwende) doorspoeldebieten. Als er een verschuiving van het zoutfront zichtbaar is kan het doorspoeldebiet worden bijgesteld afhankelijk van de gewenste positie. Hierbij moet er rekening worden gehouden met een reactietijd van tussen de enkele dagen en 2 weken. Een verandering in het doorspoeldebiet is bij stabiele condities waarschijnlijk pas zichtbaar na minimaal enkele dagen.
- De analyse uit dit rapport zou uitgebreid kunnen worden door dieper in te gaan op het tijdsaspect in de reactie van het systeem, en te zoeken naar een kwantitatief verband tussen de concentratie in de monding, debiet en concentratieverandering. Daarin zou nader ingegaan kunnen worden op de wiskundige beschrijvingen uit Kuijper (2015).

5 Lek: Observaties en analyse



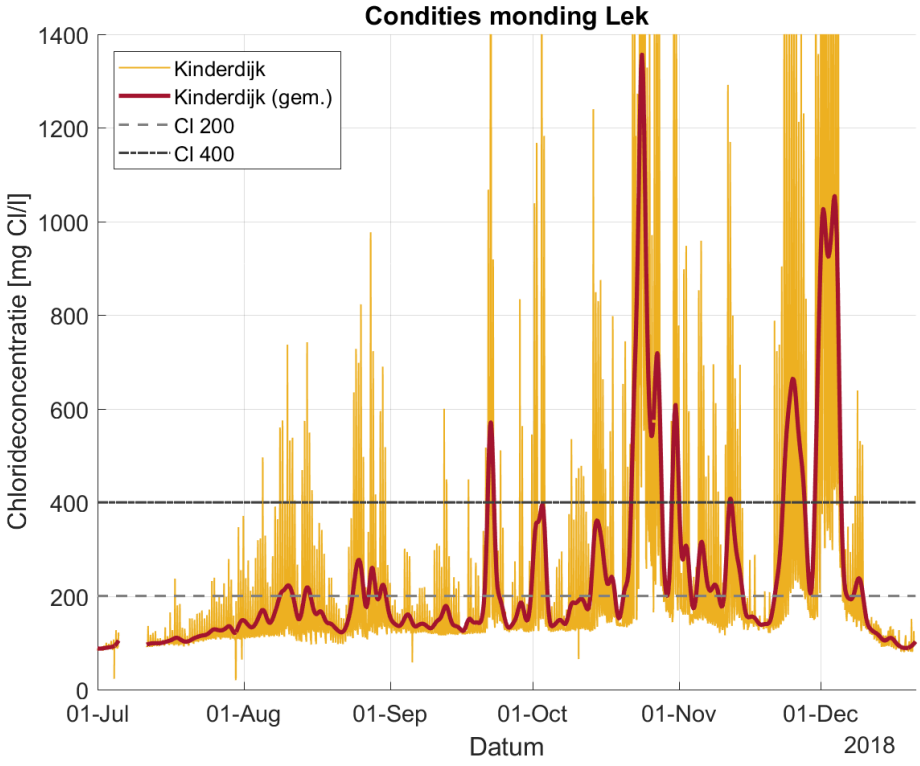
Figuur 5.1 Overzicht meetlocaties Lek

5.1 Omgevingscondities

Rijnafvoer en waterstand Hoek van Holland zijn reeds besproken In paragraaf 3.1.1 en paragraaf 3.1.2 Overige relevante omgevingscondities zijn de chlorideconcentratie in de monding van de Lek en de afvoer over de Lek.

5.1.1 Chlorideconcentraties monding

Figuur 5.2 toont de chlorideconcentratie bij Kinderdijk, nabij de monding van de Lek. De monding van de Lek verzilt later dan de monding van de Hollandsche IJssel . Dit verschil is ook zichtbaar in de getijgemiddelde concentratie die niet voor een lange tijd boven de 200 mg/L uitkomt. Ook bij de verziltingspieken, als gevolg van de verhoogde waterstand in combinatie met lagere afvoeren, zijn de concentraties tijdens eb nog rond de achtergrondconcentratie. In totaal zijn er 7 verziltingspieken zichtbaar tussen juli en december (Figuur 5.2).



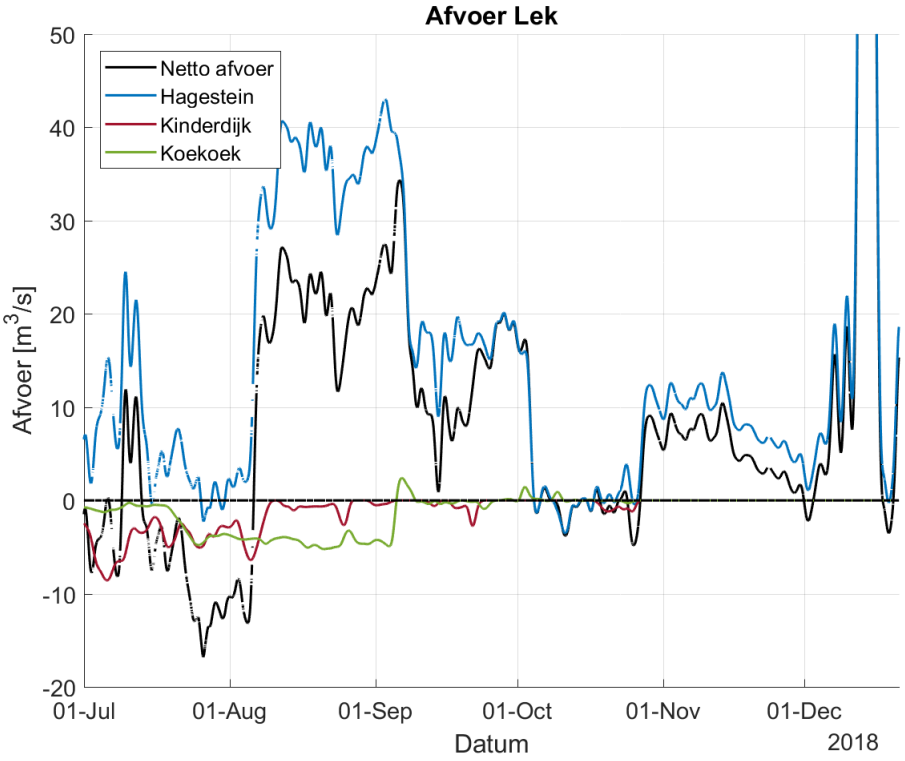
Figuur 5.2 Chlorideconcentraties (getijgemiddeld en instantaan) Kinderdijk (<1 kilometer van de monding) voor de gehele analyse periode

5.1.2 Debieten lozingen en onttrekkingen

De maatregel op de Lek is het sturen van water over Hagestein (Figuur 5.3) en is er op gericht om Bergambacht en de innamepunten stroomopwaarts van Bergambacht zoet te houden. De inzet van de maatregel wordt in deze rapportage uitgedrukt in de netto afvoer bij de monding van de Lek omdat deze afvoer, en niet de afvoer over Hagestein, maatgevend is voor de maatregel. Uiteraard levert de afvoer over Hagestein (Tuijnder, 2019) de grootste bijdrage aan de netto afvoer op de Lek. De lozingen en onttrekkingen zijn voor de Lek weergegeven in Figuur 5.3.

Er zijn vijf afvoerniveaus te identificeren:

1. Juli: -15 tot -10 m^3/s
2. Augustus tot eind september: 10 – 20 m^3/s
3. Oktober: 0 m^3/s
4. November: 10 m^3/s naar 0 m^3/s einde van de maand
5. December: Stijgende afvoer



Figuur 5.3 Afvoer op de Lek inclusief afvoeren/onttrekkingen van enkele gemalen en innamepunten, positief betekent een zeewaarts gericht debiet terwijl een negatief debiet een onttrekking uit de Lek weergeeft

5.2 Chlorideconcentraties op de Lek

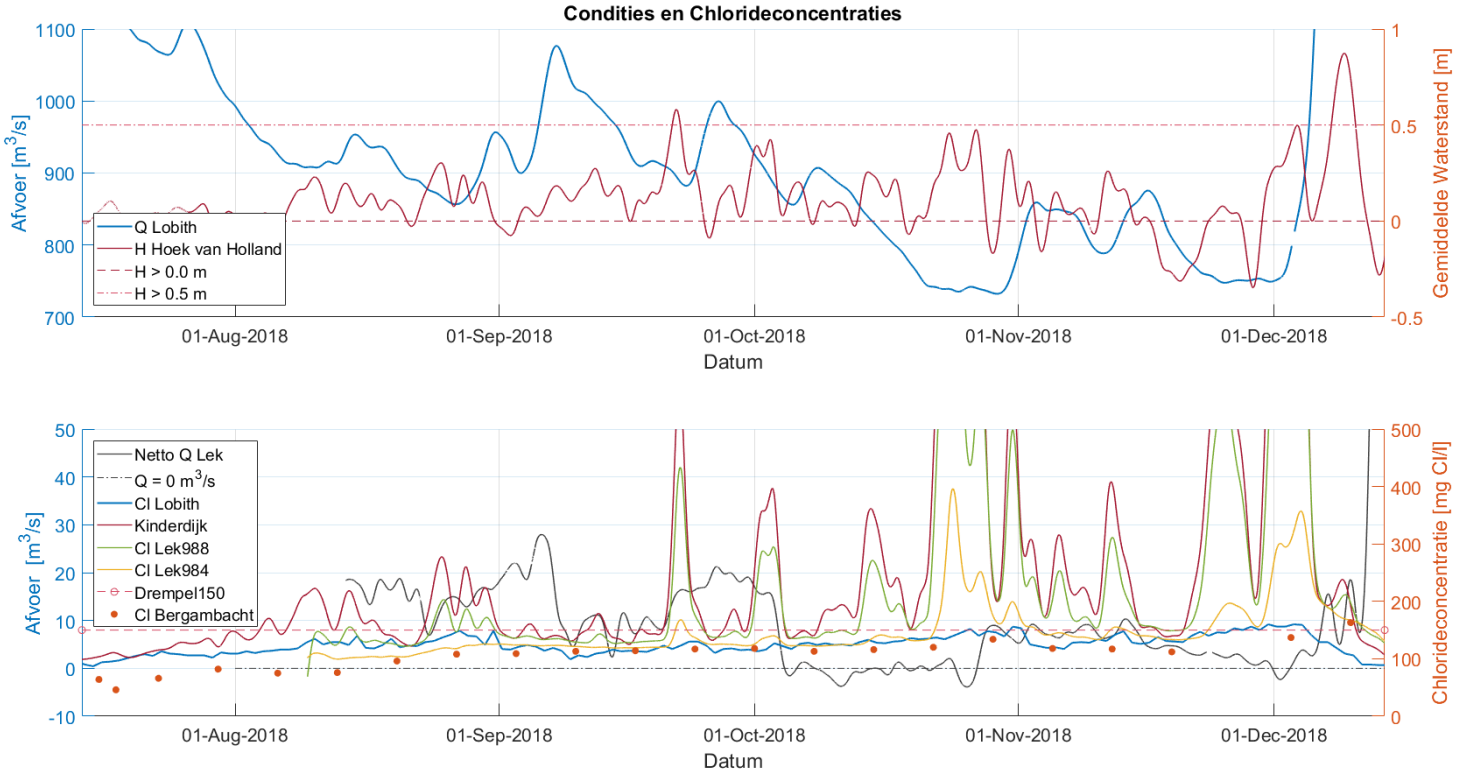
In Figuur 5.4 zijn de condities en chlorideconcentraties van de Lek samen gevisualiseerd. In de bovenste grafiek is in blauw de afvoer bij Lobith te zien. De rode lijn geeft de waterstand bij Hoek van Holland weer inclusief enkele grenswaarden. In het onderste deel van de figuur staat op de linkeras de netto afvoer bij de monding van de Lek. De zoutmetingen staan in volgorde van stroomafwaarts naar stroomopwaarts.

De zeven verziltingspieken zichtbaar tussen juli en december (Figuur 5.5) leiden in maar enkele gevallen in een verhoogde chlorideconcentratie bij de meest bovenstroomse diver meting. Bij periode V en VII is er een duidelijke verhoogde concentratie stroomopwaarts. Bij periode II, III, IV en VI is er een iets verhoogde concentratie 5 kilometer van de monding. De tweewekelijkse metingen van Dunea (oranje bollen) laten geen significante verhoging ten opzichte van de achtergrondconcentratie zien. Maar dit zou ook een gevolg kunnen zijn van het tijdstip van meten.

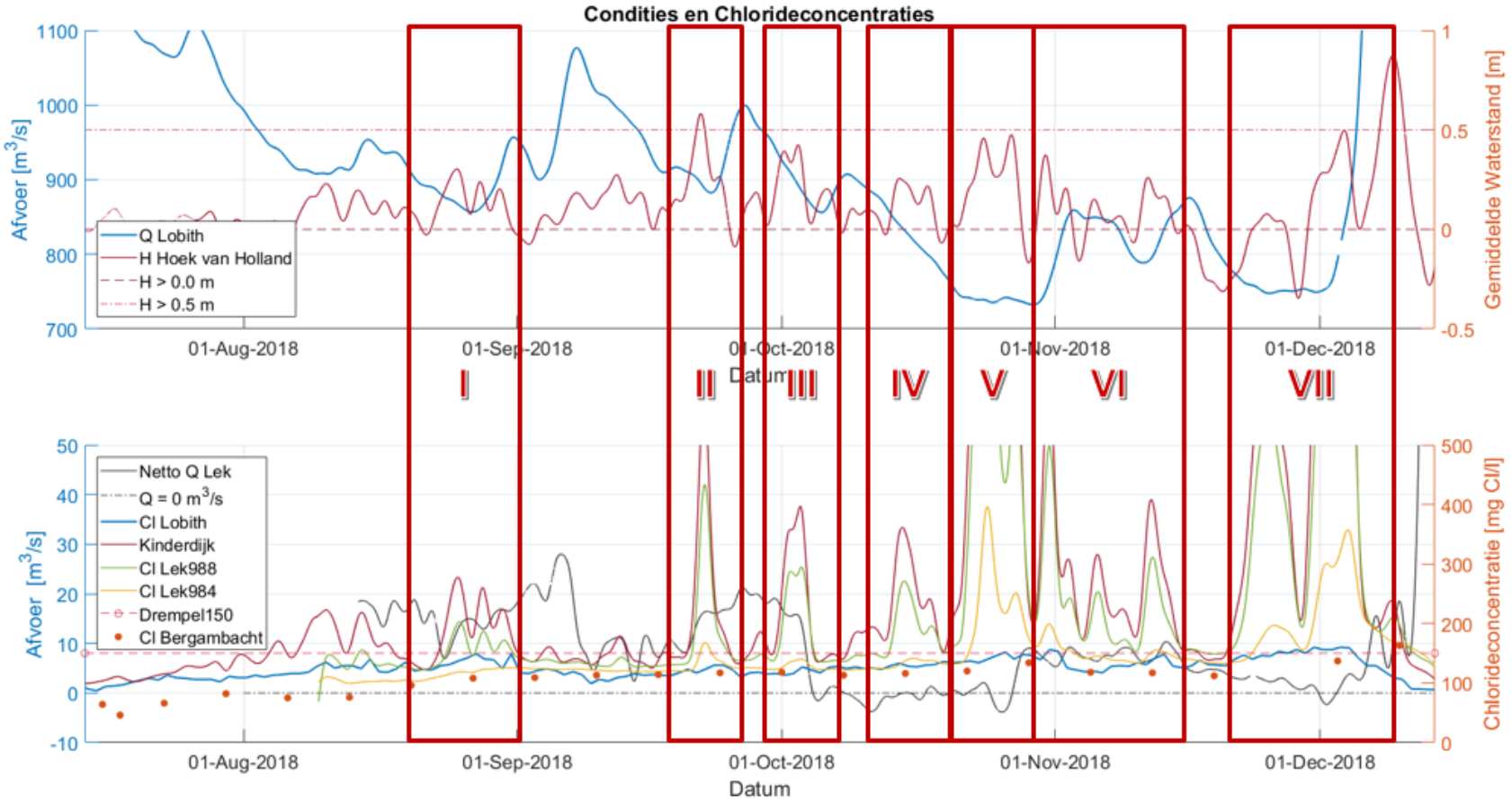
De verschillen in mate van zoutindringing zijn visueel moeilijk te koppelen aan de inzet van de maatregel: extra water doorlaten via Hagestein. De mate van zoutindringing is visueel te relateren aan hogere waterstanden op zee of op lagere afvoeren bij Lobith. Daarnaast kan het voorkomen dat bij vergelijkbare condities (II en III) de maatregel in eerste instantie niet is aangepast. Op basis van alleen deze visuele vergelijking van de tijdreeksen is niet met zekerheid te zeggen wat de effectiviteit van de maatregel is.

Bij het bestuderen van de gegevens is er in augustus een opvallend patroon zichtbaar in de chlorideconcentratie op de Lek (Figuur 5.6). Stroomopwaarts van de monding de Lek (Lek984) is de chlorideconcentratie lager (10-20 mg/L) dan de chlorideconcentratie van het rivierwater bij Lobith (achtergrondconcentratie). De 2-wekelijkse metingen van Dunea (Bergambacht) zijn vergelijkbaar met Lek984, er is dus geen reden om te twijfelen aan de juistheid van de metingen op de Lek.

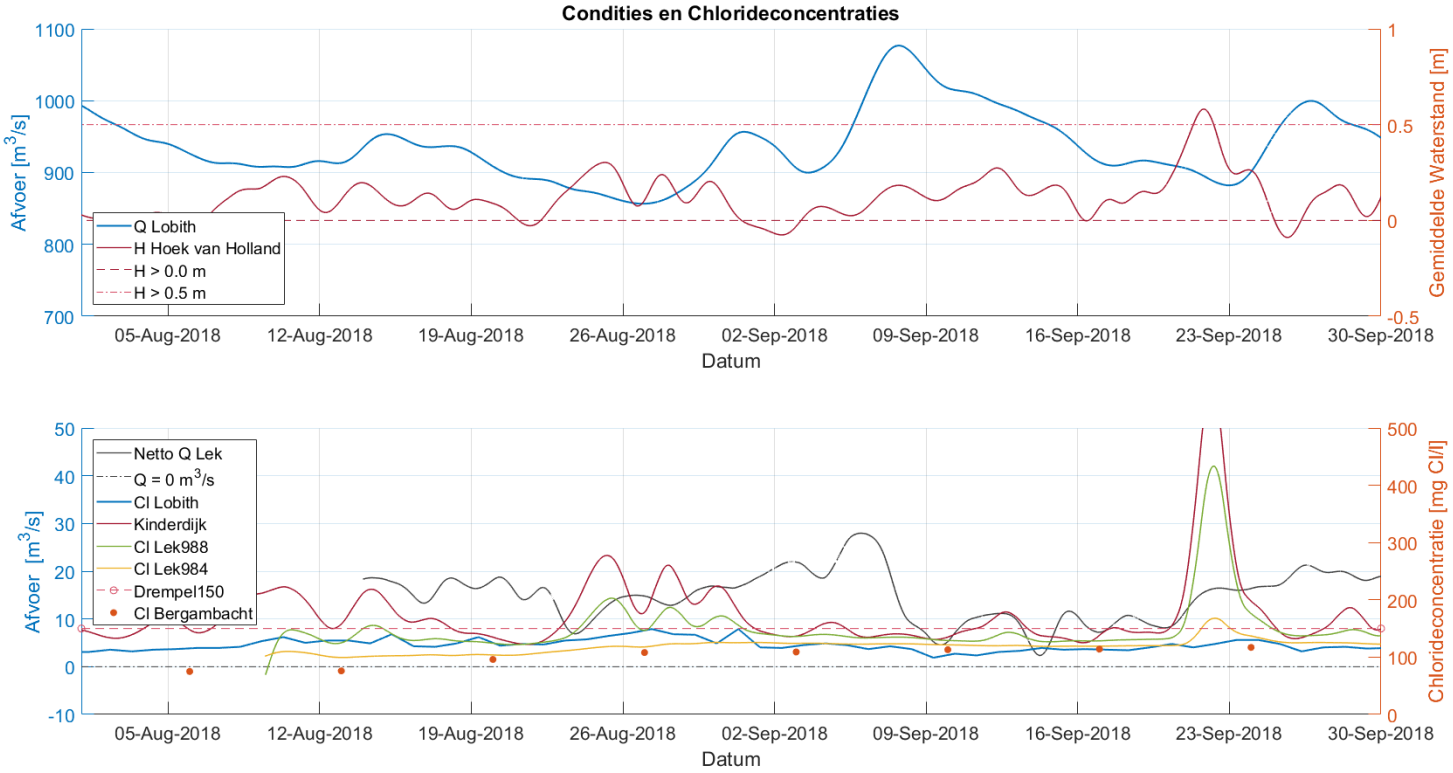
Daarnaast is de afwijking ten opzichte van de chlorideconcentratie bij Lobith vergelijkbaar met de bias die uit een steekproef volgde. Vanaf september is de chlorideconcentratie bij Lek984 vergelijkbaar met de achtergrondconcentratie als er geen verzilting vanuit zee plaatsvindt. Er is niet verder onderzocht waardoor de meetreeksen in de Lek tijdelijk lagere waarden aangeven dan gelijktijdig bij Lobith.



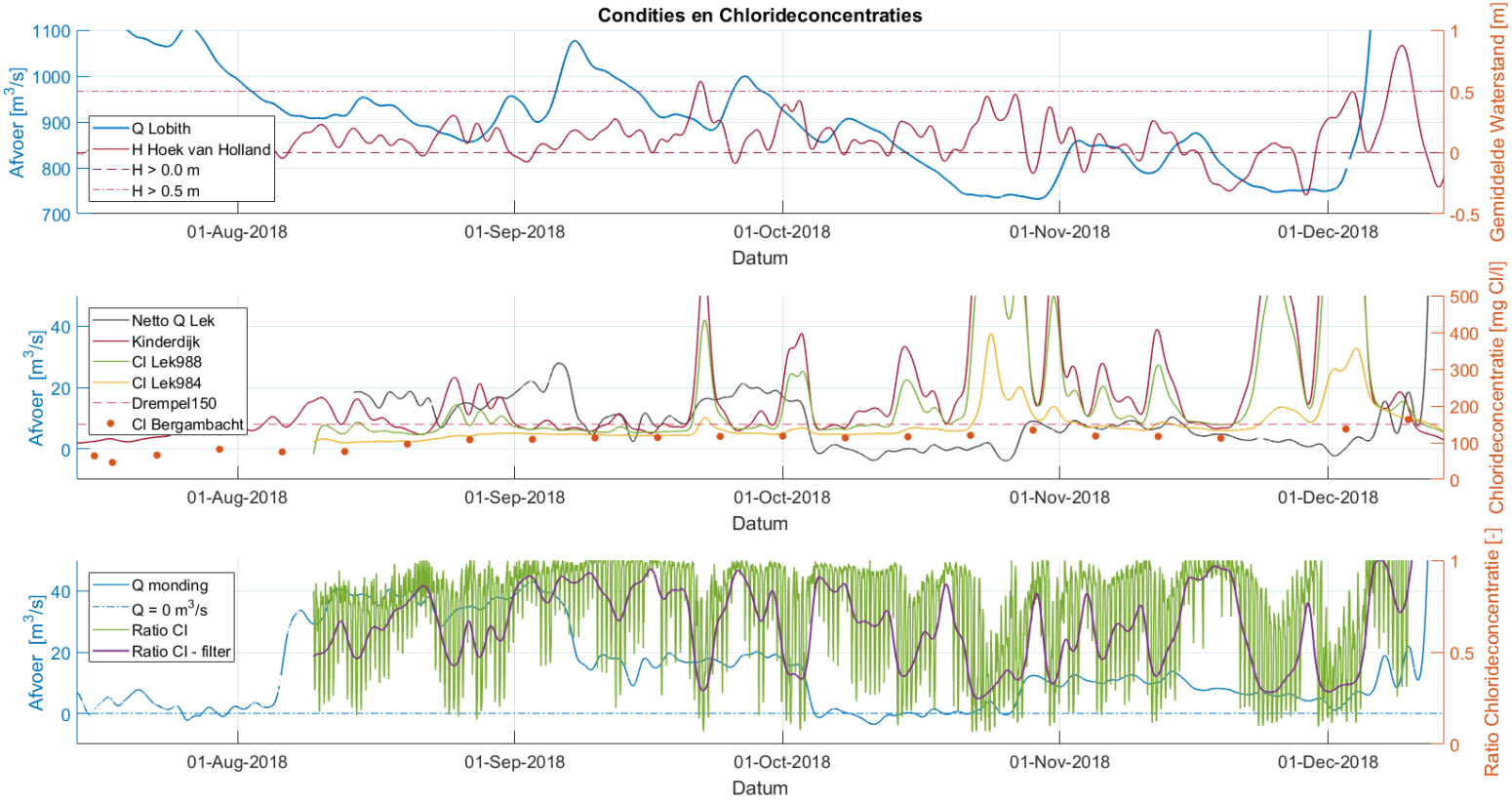
Figuur 5.4 Overzicht condities (boven) en chlorideconcentraties (onder) op de Lek inclusief netto afvoer bij de monding van de Lek



Figuur 5.5 Overzicht condities (boven) en chlorideconcentraties (onder) op de Lek inclusief netto afvoer bij de monding van de Lek met zeven verschillende verziltingspieken



Figuur 5.6 Overzicht condities (boven) en chlorideconcentraties (onder) op de Lek inclusief netto afvoer bij de monding van de Lek voor de maand augustus



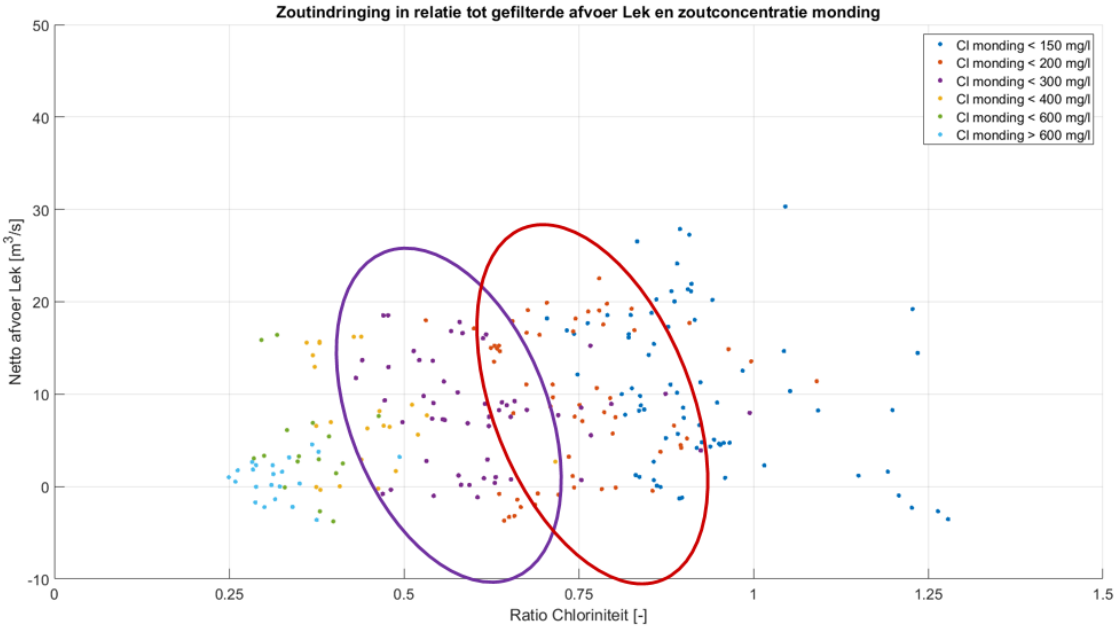
Figuur 5.7 Condities (boven), chlorideconcentraties (midden) en ratio zoutindringing (onder) op de Lek vanaf juli tot en met december 2018

5.3 Analyse: Relatief verschil zoutindringing

Om het effect van de maatregel nader in kaart te brengen, wordt hieronder geprobeerd de resultaten genormaliseerd weer te geven. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van de ratio van de chlorideconcentratie, gedefinieerd als de chlorideconcentratie bij Kinderdijk gedeeld door de chlorideconcentratie bij de meest bovenstroomse divermeting (Lek984, 5 kilometer vanaf de monding van de Lek (Figuur 5.1). De ratio van zoutindringing is onder andere afhankelijk van de chlorideconcentratie bij de monding van de Lek en de afvoer op de Lek. Door te kijken naar de ratio van de chlorideconcentratie onder vergelijkbare condities maar met een variabele inzet van de maatregel kan het effect worden geïsoleerd.

In Figuur 5.8 is de data gegroepeerd voor verschillende chlorideconcentraties in de monding van de Lek. Op de x-as is de ratio van de chlorideconcentratie te vinden, de y-as geeft de afvoer over Hagestein weer. Als eerste valt op dat met hogere chlorideconcentraties in de monding de ratio onafhankelijk van de afvoer afneemt. Met hogere chlorideconcentraties in de monding is er een grotere gradiënt te verwachten op de Lek zelf waardoor de ratio van de zoutindringing lager is.

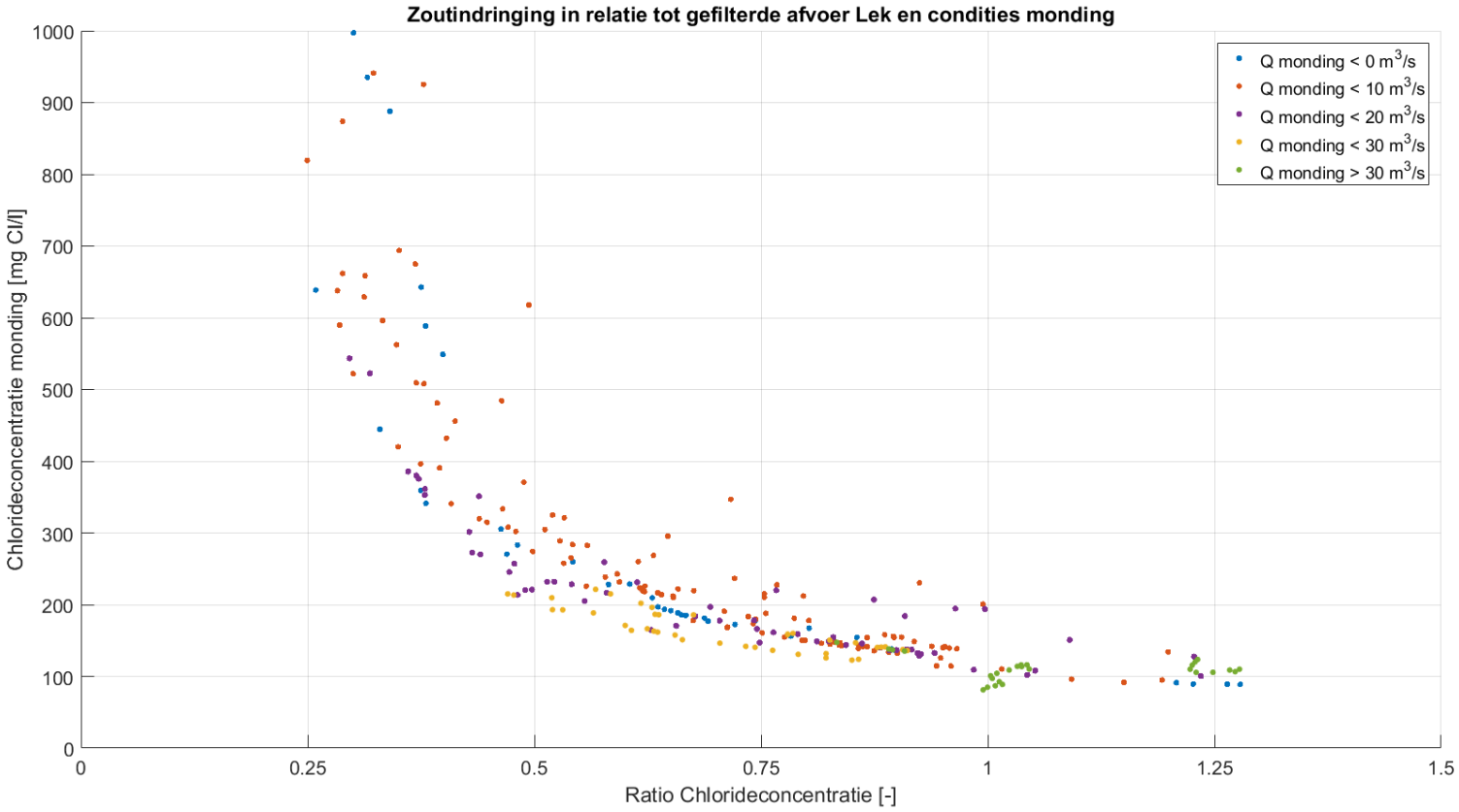
Binnen een dataset met een vergelijkbare chlorideconcentratie in de monding is er een trend zichtbaar ten opzichte van de netto afvoer op de Lek. Met een hogere afvoer op de Lek neemt de ratio chlorideconcentratie af. De variatie binnen een dataset is vrij hoog, dit kan het gevolg zijn van variaties in condities die niet te vatten zijn met alleen de chlorideconcentratie in de monding.



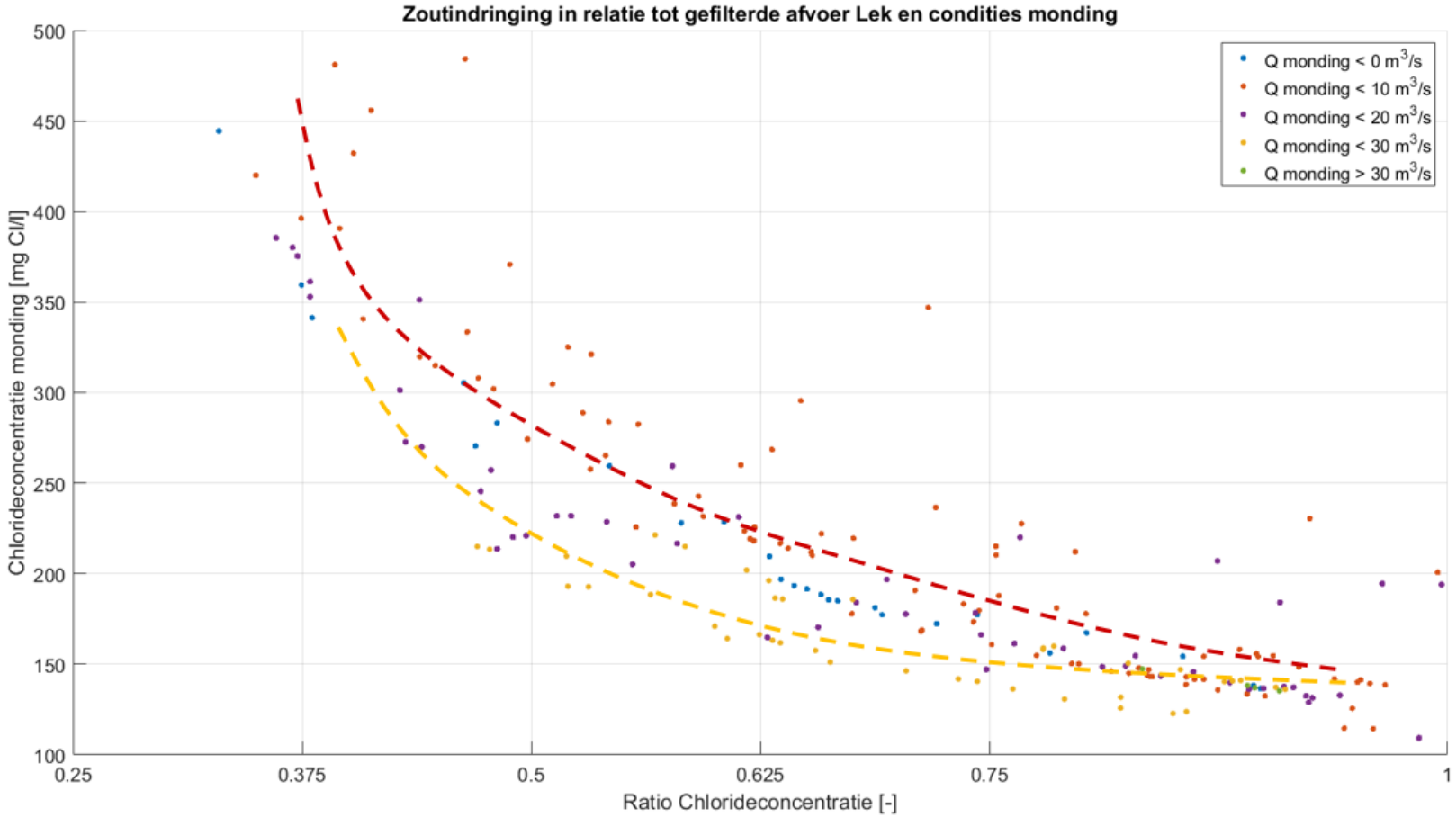
Figuur 5.8 Verhouding Cl Kinderdijk ten opzichte van Cl km984 in relatie tot verschillende afvoeren in de monding van de Lek (netto afvoer)

De relatie tussen de mate van zoutindringing en de afvoer op de Lek voor verschillende condities in de monding van de Lek wordt duidelijker als de data wordt gegroepeerd op basis van de inzet van de maatregel (Figuur 5.9). Op het oog is er een trendlijn te bepalen voor elke dataset (Figuur 5.10). Bij een vergelijkbare chlorideconcentratie in de monding van de Lek is het horizontale verschil tussen de trendlijnen te koppelen aan de effectiviteit van de maatregel (Figuur 5.10). In Figuur 5.11 is te zien dat bij lagere zoutconcentraties in de monding de afvoer op de Lek invloed heeft op de zoutconcentratie in dit deel van de Lek (rode lijnen). Bij hogere

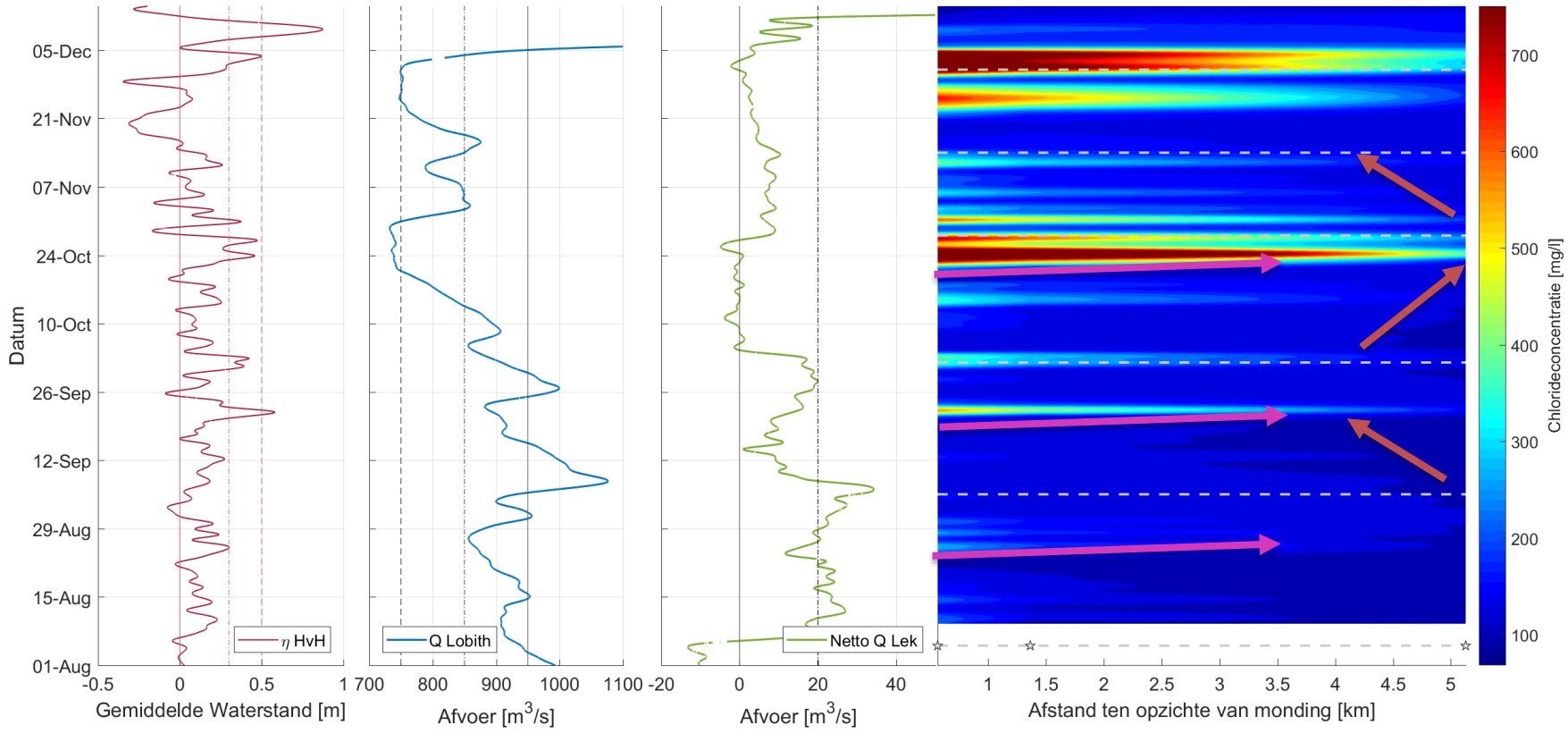
concentraties in de monding is de invloed van de afvoer op de Lek zelf van beperkte invloed (roze lijnen) op de chlorideconcentratie. Dit figuur bevestigt de eerdere waarnemingen op basis van de tijdreeksen en ratio zoutindringing.
Bij een getijgemiddelde chlorideconcentratie van 200 mg/L bij de monding wordt de ratio zoutindringing 0.55 in plaats van 0.70 als de afvoer in de monding met 10 m^3/s toeneemt vanaf 10 m^3/s. Dit resulteert in een chlorideconcentratie van 110 mg/L in plaats van 140 mg/L. De minimale chlorideconcentratie zal afhankelijk zijn van de achtergrondconcentratie bij Lobith. Bij hogere chlorideconcentraties in de monding zijn er minder datapunten beschikbaar om op een soortgelijke wijze de effectiviteit van de maatregel te bepalen.
Uit de data is te concluderen dat de inzet van de maatregel een gunstig effect heeft op de mate van zoutindringing op de Lek. Er is echter veel variatie zichtbaar binnen de data waardoor het bepalen van het exacte benodigde doorspoeldebiet moeilijk is. Het benodigde doorspoeldebiet is mede afhankelijk van de gewenste maximale chlorideconcentratie bij de innamepunten. Hier waren geen continue meetreeksen van beschikbaar voor het jaar 2018, er is daarom geen zekerheid te geven over de mate van zoutindringing bovenstrooms van de meest bovenstroomse divermeting. Een hogere afvoer op de Lek zal naar verwachting verder stroomopwaarts een groter effect hebben op de mate van zoutindringing ten opzichte van de zoutindringing in de monding van de Lek. De zoutindringing in de monding van de Lek wordt immers gedomineerd door hoge in- en uitgaande debieten (Hydrologic, 2018b) en minder door het netto debiet op de Lek. Bij hogere chlorideconcentraties heeft de afvoer op de Lek zelf dan ook een beperkte invloed op de zoutindringing. De metingen van 2018 bevinden zich vooral in het getij gedomineerde gebied, de maatregel zou een groter effect stroomopwaarts van de metingen kunnen hebben op de mate van zoutindringing.



Figuur 5.9 Ratio van de zoutindringing in relatie tot de chlorideconcentratie in de monding voor verschillende afvoeren in de monding (<10 m^3/s staat gelijk aan een bereik van 0 – 10 m^3/s)



Figuur 5.10 Ratio van de zoutindringing in relatie tot de chlorideconcentratie in de monding voor verschillende afvoeren in de monding (<10 m^3/s staat gelijk aan een bereik van 0 – 10 m^3/s) inclusief twee trendlijnen voor twee afvoerklassen



Figuur 5.11 Getijgemiddelde chlorideconcentraties (uiterst rechts) met verschillende forceringen (getijgemiddelde waterstand [links], afvoer Lobith [midden] en afvoer Lek [rechts]) opgedeeld in verschillende periodes op basis van de afvoer op de Lek

5.4 Conclusie en aanbevelingen

De effectiviteit van de inzet van de maatregel op de Lek, het genereren van een surplusdebiet door extra water af te laten via stuw Hagestein, is globaal getoetst met behulp van de metingen. Het verhogen van de afvoer op de Lek lijkt de zoutindringing te beperken bij lagere chlorideconcentraties in de monding. De mate van effectiviteit is daarbij afhankelijk van de chlorideconcentratie in de monding van de Lek. Bij hogere chlorideconcentraties (300-400 mg/l) in de monding heeft de afvoer op de Lek slechts een beperkte invloed op de zoutindringing in dit deel van de Lek. De chlorideconcentraties in de monding van de Lek zijn afhankelijk van een combinatie van de opzet en de afvoer op de Waal.
Als de monding permanent verzilt is, zullen de huidige meetlocaties in het invloedsgebied liggen van de heen weer gaande zoutbeweging. In dat geval zal de maatregel, net als in de Hollandsche IJssel, alleen bovenstrooms effectief zijn.

Er waren geen metingen beschikbaar om de effectiviteit van de maatregel te bepalen stroomopwaarts van Lekkerkerk. De verwachting is dat de maatregel een groter effect heeft op de zoutindringing stroomopwaarts van Lekkerkerk zodra de monding is verzilt, maar dat is niet te bevestigen op basis van de metingen van 2018. De locatie tot waar de maatregel effectief is in het beperken of stabiliseren van de zoutindringing is nog niet te bepalen op basis van de metingen van 2018. Bij lagere chlorideconcentraties in de monding lijkt dit punt stroomafwaarts van Lekkerkerk te liggen.

Voor de Lek worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Bij een volgende verziltingsperiode is het aan te raden om de ruimtelijke dekking van de vaste meetpunten te vergroten tot in ieder geval Bergambacht. Daarnaast zou het wenselijk zijn om, vergelijkbaar met de Hollandsche IJssel, een data portaal te hebben met de belangrijkste meetreeksen van de lozingen en onttrekkingen op de Lek.
- Vanuit de meetgegevens kunnen de momenten waarop permanente verzilting optreedt op de Lek worden geïdentificeerd. Deze kennis kan worden gebruikt om de bestaande vuistregels te toetsen en eventueel verder aan te scherpen.
- Met behulp van een model kan het effect van de maatregel worden geïsoleerd van de invloed van de variabiliteit in condities. De data van 2018 kan worden gebruikt om de modelresultaten te valideren om de onzekerheid van de modelresultaten te verkleinen.

6 Discussie

6.1 Evaluatie aanpak

In deze studie is geprobeerd om te bepalen hoe effectief de maatregelen (surplus van afvoer) tegen de zoutindringing op de Hollandsche IJssel en Lek waren in 2018. Hiervoor is er op basis van de metingen gekeken naar de reactie van het systeem op de inzet van de maatregelen. De veranderende condities op de Hollandsche IJssel en Lek zorgen er voor dat het niet altijd mogelijk is om het effect van de maatregel te isoleren van de variatie in het systeem. Dit kunnen zowel veranderingen in de instelling van de maatregel als een verandering in de forcering van het systeem (getij/rivierafvoer) zijn. Bij toekomstige verziltingssituatie is het daarom aan te raden om op basis van actuele meetgegevens de ontwikkelingen in chlorideconcentraties te monitoren en de maatregelen bij te sturen wanneer nodig.

De gebruikte meetreeksen voor de afvoeren van de Rijn-Maasmonding zijn op verschillende manieren afgeleid. Sommige van de meetreeksen hebben een grotere onzekerheid. Een deel van de onwaarschijnlijke waarden zijn door de regio en Rijkswaterstaat aangepast op basis van ervaring en gebiedskennis. Het gevolg van deze onzekerheid is dat de resulterende netto afvoer af kan wijken van de werkelijk opgetreden afvoer door de monding van de Hollandsche IJssel en Lek. Door deze afvoer te nemen als maat voor de inzet van de maatregel ontstaat er ook een onzekerheid in het kwantificeren van de maatregel. Voor de globale toets zal de impact hiervan relatief beperkt zijn, maar bij het precieze kwantificeren dient hier rekening mee gehouden te worden.

6.2 Implicatie van de resultaten

De conclusies bevestigen voor een groot deel de bestaande systeemkennis over de Hollandsche IJssel en Lek. Dit gaat dan met name over de rol van de diverse forceringen voor verzilting op beide riviertakken en de dominante processen in deze riviertakken. Een voorbeeld hiervan is het onderscheid tussen advectief en dispersief gedomineerde processen op de Hollandsche IJssel. Dit is in lijn met de conclusies uit eerdere rapportages (Kuijper, 2015; Hydrologic, 2018a).

De effectiviteit van de maatregel op de Hollandsche IJssel lijkt te worden bevestigd in dit onderzoek, al lijkt het benodigde debiet (iets) om de zoutindringing te stabiliseren boven de 1 m^3/s te liggen in plaats van 0 m^3/s. Een doorspoeldebiet van meer dan 5 m^3/s lijkt geen extra effect te hebben ten opzichte van een afvoer tussen de 1 en 5 m^3/s. Meetfouten in de afvoer kunnen er voor zorgen dat de kwantificering van de maatregel op basis van de verkeerde data wordt uitgevoerd.

De conclusies zijn toepasbaar voor de voorgekomen condities van 2018. Voor andere condities is er nog niet met zekerheid te zeggen wat de invloed zou zijn van de maatregel. Tegelijkertijd is er geen reden om te zeggen dat de theorie niet toepasbaar is voor deze condities. Voor toekomstige verziltingssituaties is het aan te raden om met behulp van real time ontsloten metingen de ontwikkeling in zoutconcentratie te monitoren en de maatregel bij te sturen waar nodig. Andere analyse methoden kunnen mogelijk ook leiden tot een aanscherping van de conclusies.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Hoe effectief zijn de maatregelen in 2018 tegen zoutindringing op de Hollandse IJssel en Lek geweest?

Het doorspoeldebiet tussen de 1 en 5 m^3/s is voor de condities in 2018 voldoende gebleken om de chlorideconcentratie in het bovenstroomse (vanaf 12/13 kilometer van de monding) deel van de Hollandsche IJssel te stabiliseren en zelfs te verlagen. Inzet van de maatregel heeft bijna instantaan effect bij Gouda en verlaagt na ongeveer 1 week de chlorideconcentratie in de rest van het bovenstroomse deel. Er is geen uitspraak te doen over het effect van de herkomst van het doorspoeldebiet (Waaiersluis tegenover Krimpenerwaardroute).

Op basis van de metingen op de Lek is te concluderen dat een hogere afvoer een positief effect heeft op het tegendringen van de zoutindringing. De invloed van de maatregel hangt onder andere af van de chlorideconcentratie in de monding van de Lek. Bij hogere chlorideconcentraties (>300-400 mg/l) heeft de maatregel geen merkbare invloed in het geanalyseerde deel van de Lek (tot Lekkerkerk, rkm 984) omdat de processen daar advectief gedomineerd zijn. De invloed van de maatregel stroomopwaarts van Lekkerkerk was in deze studie niet te bepalen omdat er geen metingen beschikbaar zijn. De verwachting is dat het verhogen van de afvoer op de Lek een groter effect heeft op het stabiliseren of tegenhouden van de zoutindringing stroomopwaarts, ook bij hogere zoutconcentraties in de monding.

Wat kunnen we leren van de metingen met betrekking tot onze systeemkennis?

Op basis van de metingen van 2018 wordt de theorie met betrekking tot de systeemwerking bevestigd waar mogelijk. Een deel van de theorie kon niet worden getoetst door de voorgekomen condities en instellingen van de maatregel.

Chlorideconcentraties in het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel zijn afhankelijk van een combinatie van de opzet op zee en de rivierafvoer via de Waal. Het doorspoeldebiet heeft een beperkte invloed op het tegenhouden van de verzilting in het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel. Verzilting van het benedenstroomse deel gebeurt op een tijdschaal van enkele dagen nadat er sprake is van opzet op zee en/of langere periode van lage afvoer. Chlorideconcentraties in het bovenstroomse deel zijn vooral afhankelijk van de concentratie in het benedenstroomse deel en het doorspoeldebiet.

Bij een netto debiet lager dan 1 m^3/s zal het zout optrekken op het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel. In de metingen duurt het ongeveer 2 weken voor het zout is opgetrokken vanaf halverwege de Hollandsche IJssel tot Gouda.

De verschillen tussen de achtergrondconcentratie bij Lobith en de chlorideconcentratie op de Lek en Hollandsche IJssel kunnen inzicht geven in de menging van het rivierwater bij lagere afvoeren. Daarnaast geven de metingen ook een beeld van de invloed van lozing van zout boezemwater op de Hollandsche IJssel.

Welke lessen zijn er te trekken voor het beheer tijdens een verziltingsperiode in de toekomst?

De maatregelen (1 – 5 m^3/s) op de Hollandsche IJssel tegen zoutindringing hebben een positief effect op het tegenhouden van de zoutindringing in het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel (vanaf 12-13 km van de monding). Een surplus op de Lek heeft bij lagere chlorideconcentraties (<300 mg/l) effect op de zoutindringing in de eerste 5 kilometer van de Lek. Bij hogere chlorideconcentraties zal het surplus alleen effect hebben bovenstrooms van het geanalyseerde deel van de Lek.

Het stabiliseren van de zoutindringing kan vragen om verschillende doorspoeldebieten afhankelijk van de condities. Een deel van de mogelijk condities was te toetsen met behulp van

de metingen uit 2018. Bij andere condities is het aan te raden om met behulp van real time ontsloten metingen actief bij te sturen om de Hollandsche IJssel en Lek zoet te houden voor de watergebruikers.
Als laatste zijn er enkele aanbevelingen te doen om de meetcampagne effectiever in te richten in het geval van een nieuwe verziltingsperiode, zie paragraaf 7.2.2.

7.2 Aanbevelingen

7.2.1 Systeemkennis

In deze studie is de nadruk gelegd op het bepalen van de effectiviteit van de maatregelen. In een vervolgstudie kan met behulp van de metingen het voorkomen van verzilting op de Lek en Hollandsche IJssel beter worden gekoppeld aan de condities. Als gevolg hiervan ontstaat er een beter begrip van welke condities leiden tot permanente verzilting van de Hollandsche IJssel en Lek.
Met behulp van de analyse van deze studie kunnen semi-stationaire periodes worden bepaald op de Hollandsche IJssel om dispersie coëfficiënten te bepalen. Dit geeft een verder inzicht in de systeemwerking en biedt een opstap naar het bepalen van de benodigde doorspoeldebieten voor verschillende condities.

7.2.2 Meetcampagnes

In deze analyse is vooral gebruik gemaakt van aaneengesloten meetreeksen van de vaste meetpunten. Deze metingen geven een beeld van de zoutverspreiding tijdens verschillende condities waarmee goed bepaald kan worden wat het effect is van de maatregelen. Op de Hollandsche IJssel was er een goede spreiding van de meetpunten waardoor er een uitgebreidere analyse kon worden uitgevoerd. Een divermeting tussen Krimpen aan den IJssel en de monding van de Hollandsche IJssel zorgt voor een nog betere dekking en maakt het bepalen van chlorideconcentratie in de monding eenvoudiger. Voor een meer gedetailleerde analyse, bijvoorbeeld met behulp van zoutvrachten, zijn ook de chlorideconcentraties van de lozingen en onttrekkingen nodig.
Op de Lek was er beperkte informatie beschikbaar stroomopwaarts van Lekkerkerk. De maatregelen dienen vooral in dit gebied effect te hebben om in ieder geval het innamepunt Krimpenerwaard niet te laten verzilten. Het is daarom aan te raden om bij dreigende verzilting meer vaste meetpunten toe te voegen op de Lek. Deze vaste meetpunten kunnen met een lagere frequentie worden aangevuld met varende metingen.
De afvoeren in de monding van de Lek en Hollandsche IJssel zijn in deze studie bepaald op basis van een combinatie van het kombergingsdebiet en de gegevens van de waterschappen. Er waren enkele afvoermetingen in de monding beschikbaar. Idealiter zijn er ook langdurige afvoermetingen beschikbaar voor de monding van beide riviertakken.

7.2.3 Vervolganalyse maatregelen

Voor het nader kwantificeren van de invloed van de maatregelen kan er gebruik gemaakt worden van een numeriek model. In een model kan het effect van de maatregel worden geïsoleerd. De modelresultaten kunnen gevalideerd worden met de beschikbare data wat de onzekerheidsmarge van de modelstudie verkleint. Naast het isoleren van de maatregel kan het verloop van de reactie in de tijd worden onderzocht en kunnen verschillende condities worden doorgerekend om ook voor andere situaties een beeld te hebben van de effectiviteit van de maatregelen.

8 Referenties

Godin, G. (1972). The analysis of tides. Liverpool: Liverpool University Press

Huismans, Y. (2016) Systeemanalyse Rijn-Maasmonding: Analyse Relaties Noord- En Zuidrand En Gevoeligheid Stuurknoppen. 1230077-001. Deelproject Systeemanalyse En Slim Watermanagement. Deltares rapport 1230077-001, 2016.

Huismans, Y., van der Wijk R., Fujisaki A., Sloff K. (2018) Zoutindringing in de Rijn-Maasmonding Knelpunten en effectiviteit stuurknoppen. Deltares rapport 11200589-001-ZWS-0010, 2018.

Hydrologic (2018a) Verkennende analyse zoetwaterbuffer Hollandsche IJssel. Hydrologic rapport P887, februari 2018

Hydrologic (2018b) Verziltingsonderzoek Lek - Onderzoek naar de inzet van Stuw Hagestein voor het bestrijden van verzilting op de Lek. Hydrologic rapport P954, juni 2018

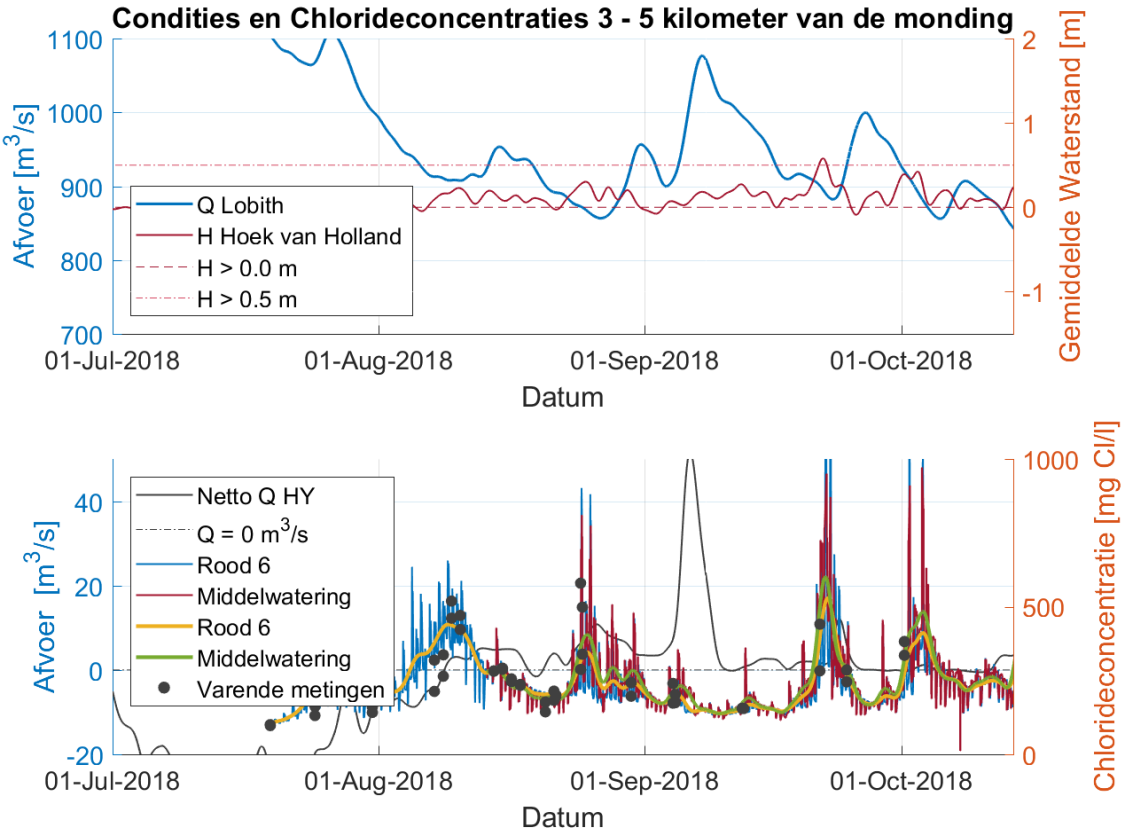
Kuijper, C. (2015). Analyse van de zoutmetingen in november 2015 langs de Hollandsche IJssel. Afleiding dispersiecoëfficiënt. Rapport 1230077-001. Deltares.

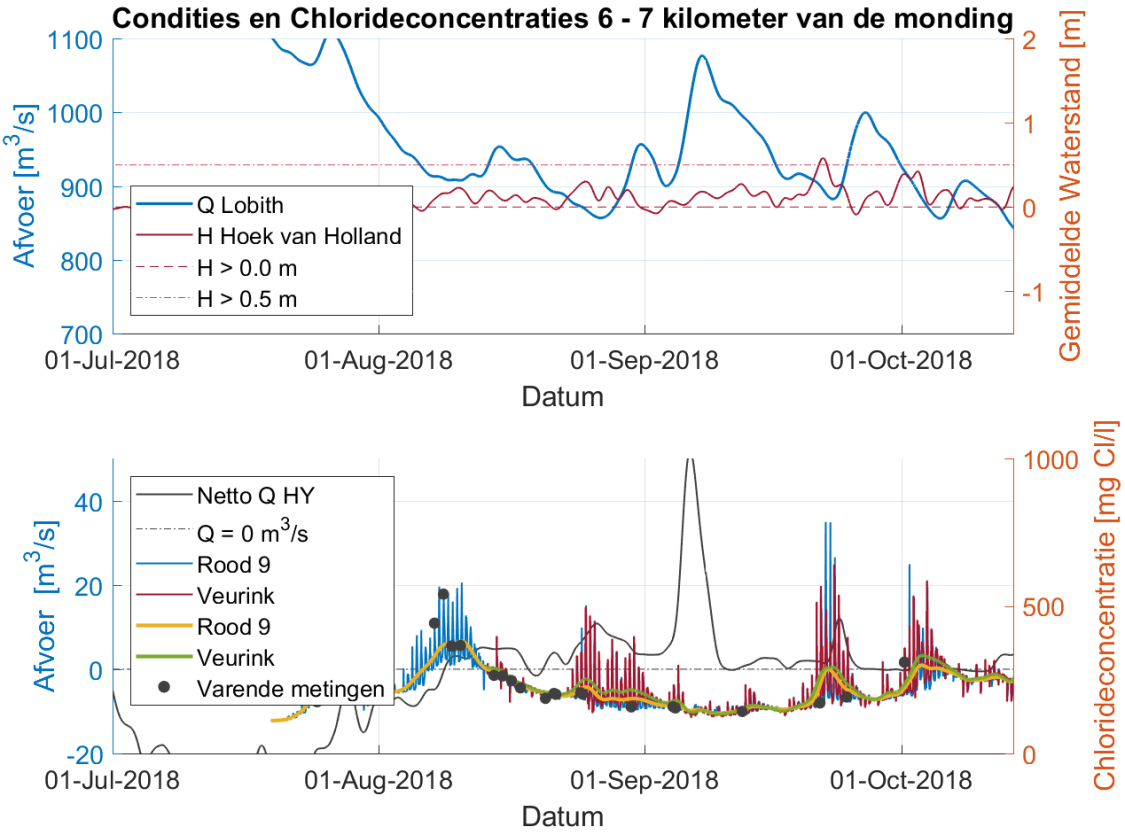
Kuijper, C. (2017). Analyse van zoutmetingen in de Lek, met schatting dispersie Coëfficiënt. Rapport. 112000589-001. Deltares.

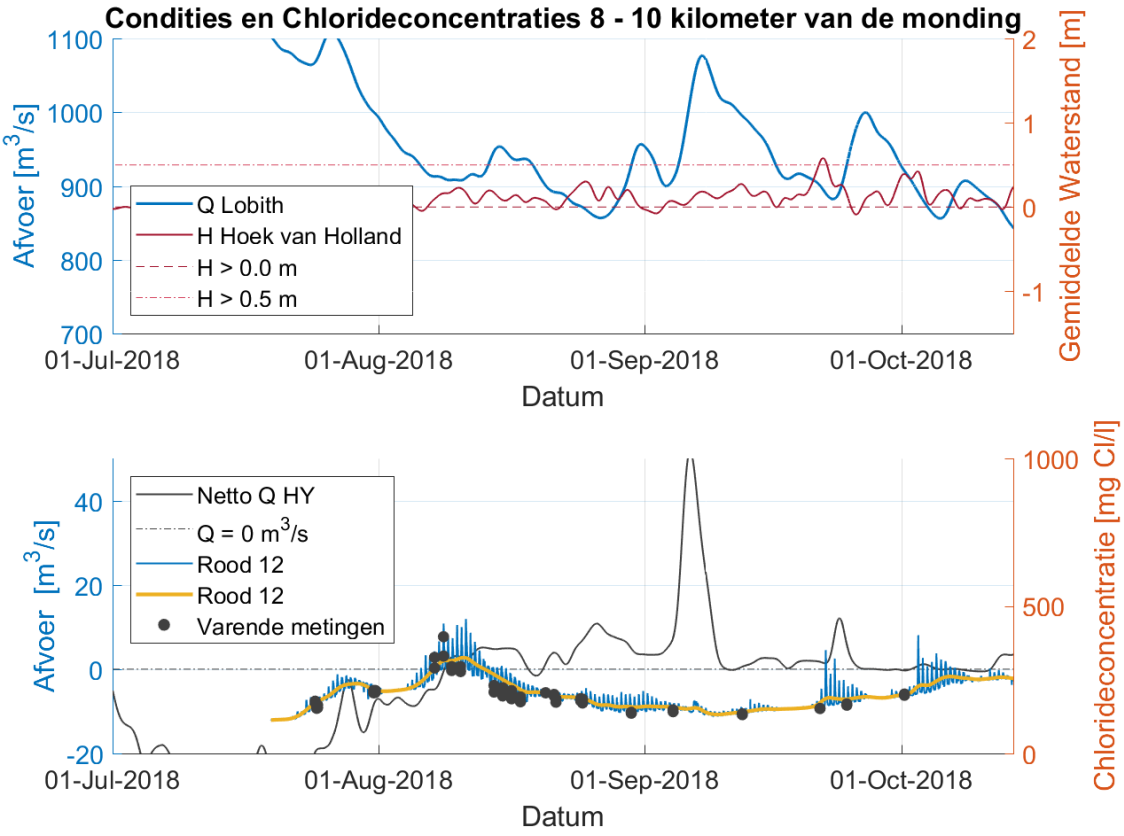
Mens, M., van der Wijk, R., Kramer, N., Hunink, J., de Jong, J., Becker, B., Gijsbers, P., ten Velden, C. (2018) Hotspotanalyses voor het Deltaprogramma Zoetwater – Inhoudelijke rapportage. Deltares rapport 11202240-004-ZWS-0001

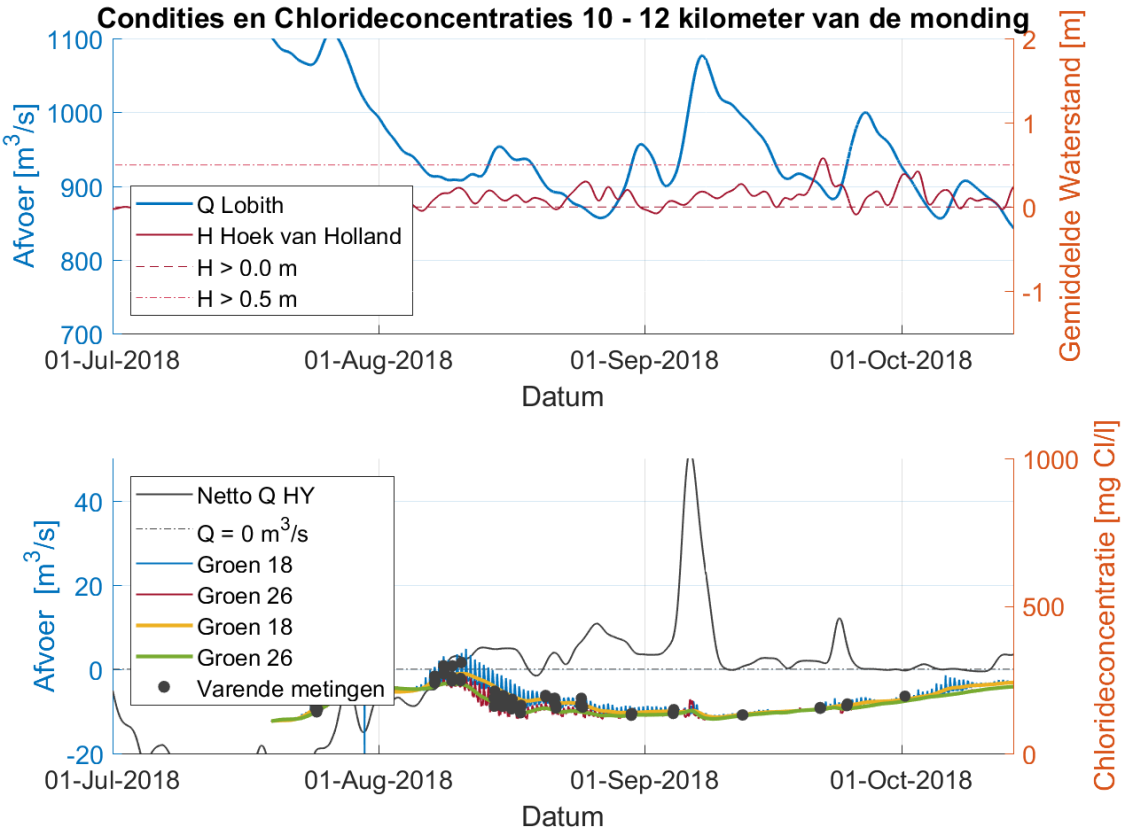
Tuijnder, A. (2019) Inzetbaarheid stuw Hagestein ter bestrijding van verzilting op de Lek. Arcadis rapport 083808337 0.1 – 4 februari 2019

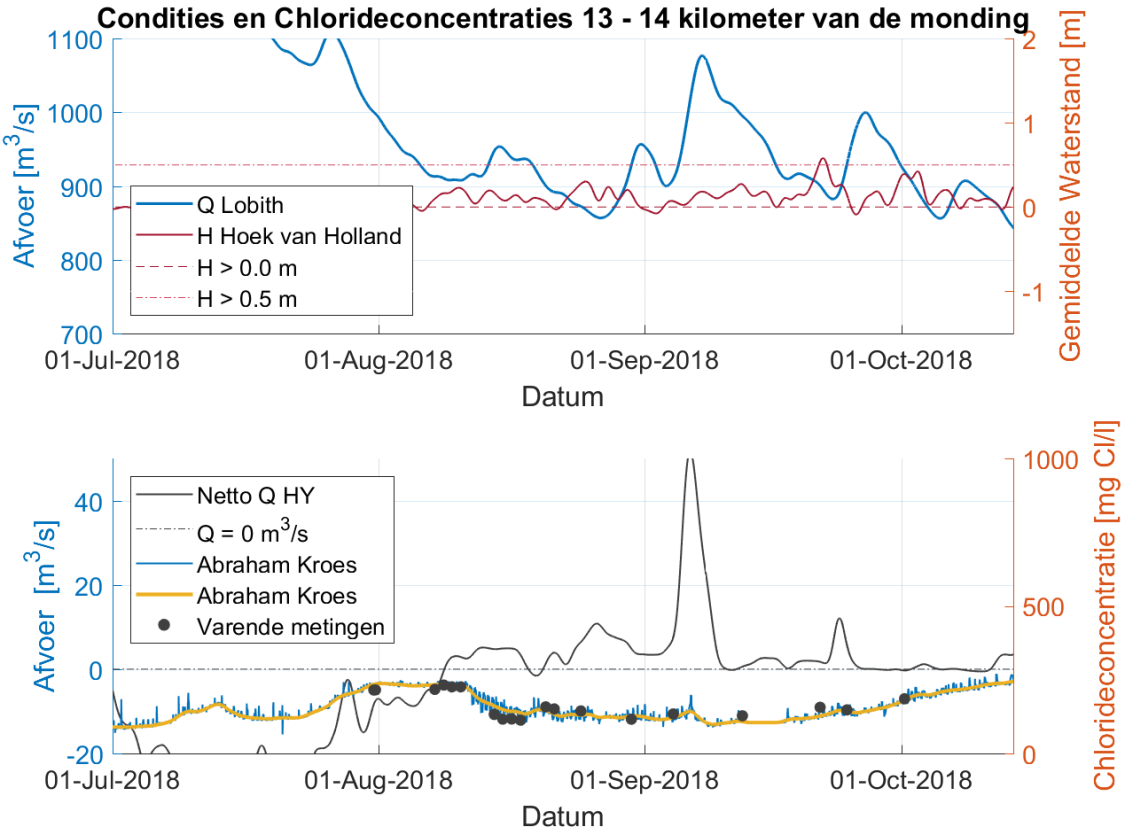
A Consistentiecheck varende en divermetingen

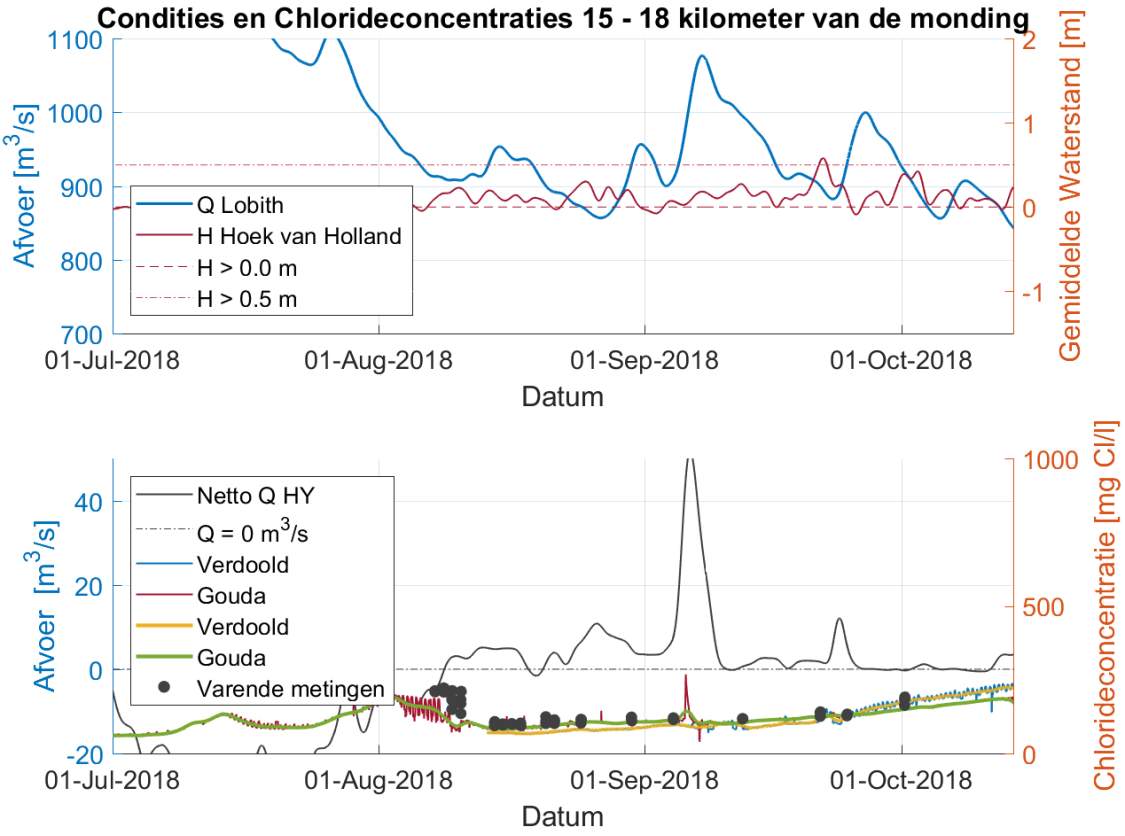



Condities en Chlorideconcentraties 6 - 7 kilometer van de monding
Afvoer [m3/s]
Gemiddelde Waterstand [m]
Q Lobith
H Hoek van Holland
H > 0.0 m
H > 0.5 m
01-Jul-2018
01-Aug-2018
01-Sep-2018
01-Oct-2018
Datum
Netto Q HY
Q = 0 m3/s
Rood 9
Veurink
Rood 9
Veurink
Varende metingen
Chlorideconcentratie [mg Cl/l]

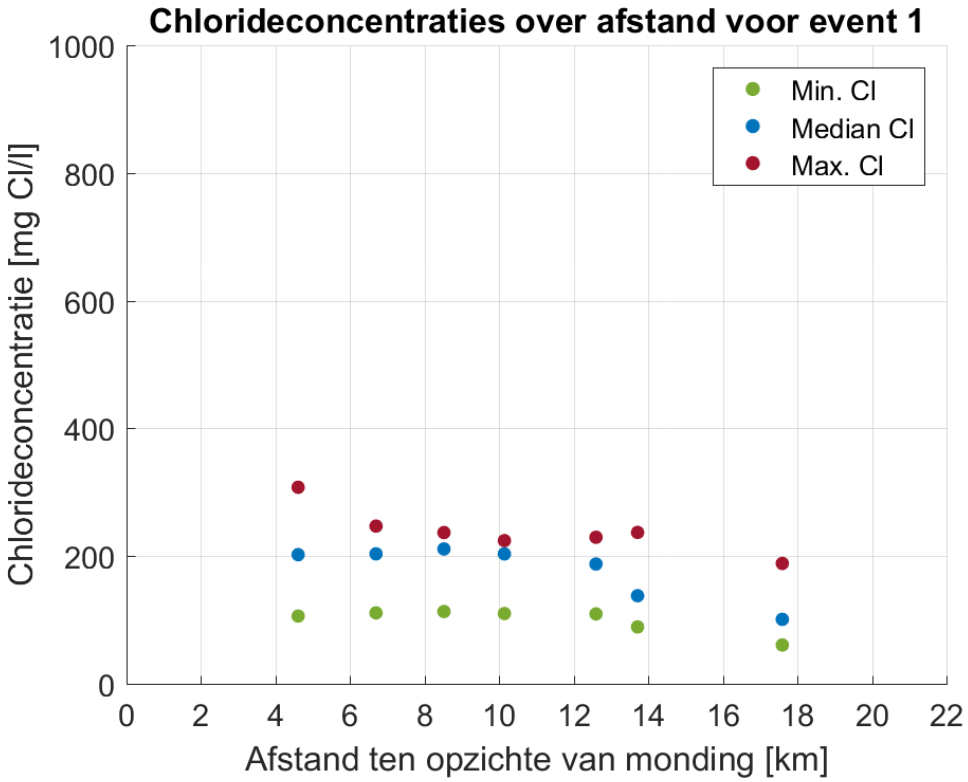

Condities en Chlorideconcentraties 8 - 10 kilometer van de monding
Afvoer [m3/s]
Gemiddelde Waterstand [m]
Q Lobith
H Hoek van Holland
H > 0.0 m
H > 0.5 m
01-Jul-2018
01-Aug-2018
01-Sep-2018
01-Oct-2018
Datum
Netto Q HY
Q = 0 m3/s
Rood 12
Rood 12
Varende metingen
Chlorideconcentratie [mg Cl/l]

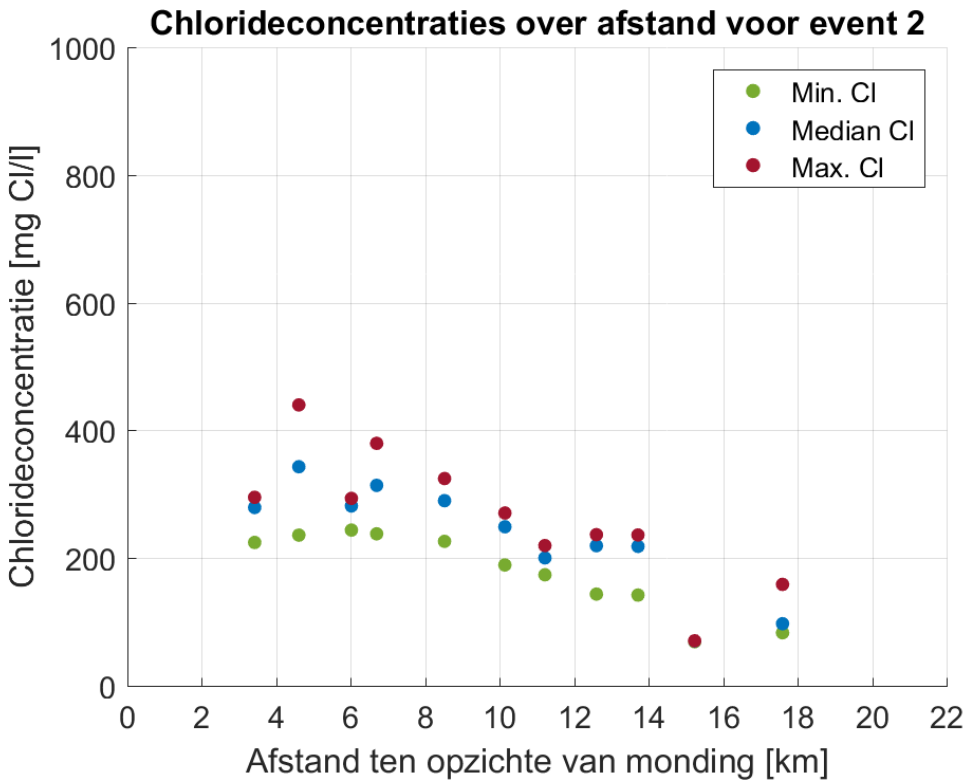

Condities en Chlorideconcentraties 10 - 12 kilometer van de monding
Afvoer [m3/s]
Gemiddelde Waterstand [m]
Q Lobith
H Hoek van Holland
H > 0.0 m
H > 0.5 m
01-Jul-2018
01-Aug-2018
01-Sep-2018
01-Oct-2018
Datum
Netto Q HY
Q = 0 m3/s
Groen 18
Groen 26
Groen 18
Groen 26
Varende metingen
Chlorideconcentratie [mg Cl/l]

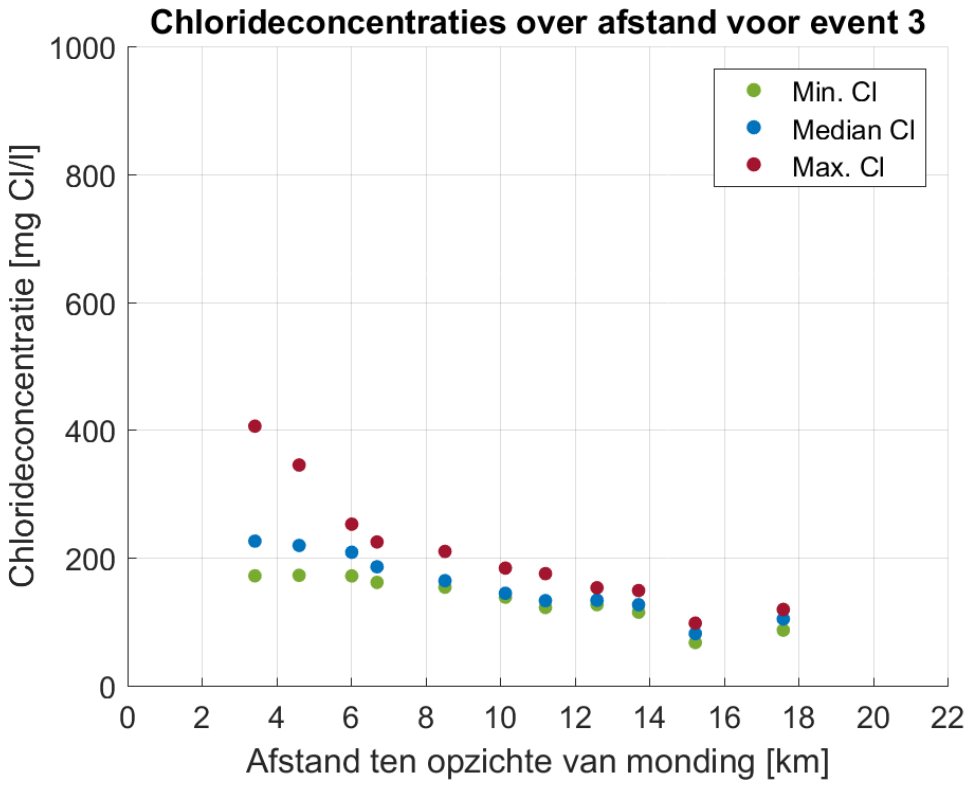

Condities en Chlorideconcentraties 13 - 14 kilometer van de monding
Afvoer [m3/s]
Gemiddelde Waterstand [m]
Q Lobith
H Hoek van Holland
H > 0.0 m
H > 0.5 m
01-Jul-2018
01-Aug-2018
01-Sep-2018
01-Oct-2018
Datum
Netto Q HY
Q = 0 m3/s
Abraham Kroes
Abraham Kroes
Varende metingen
Chlorideconcentratie [mg Cl/l]

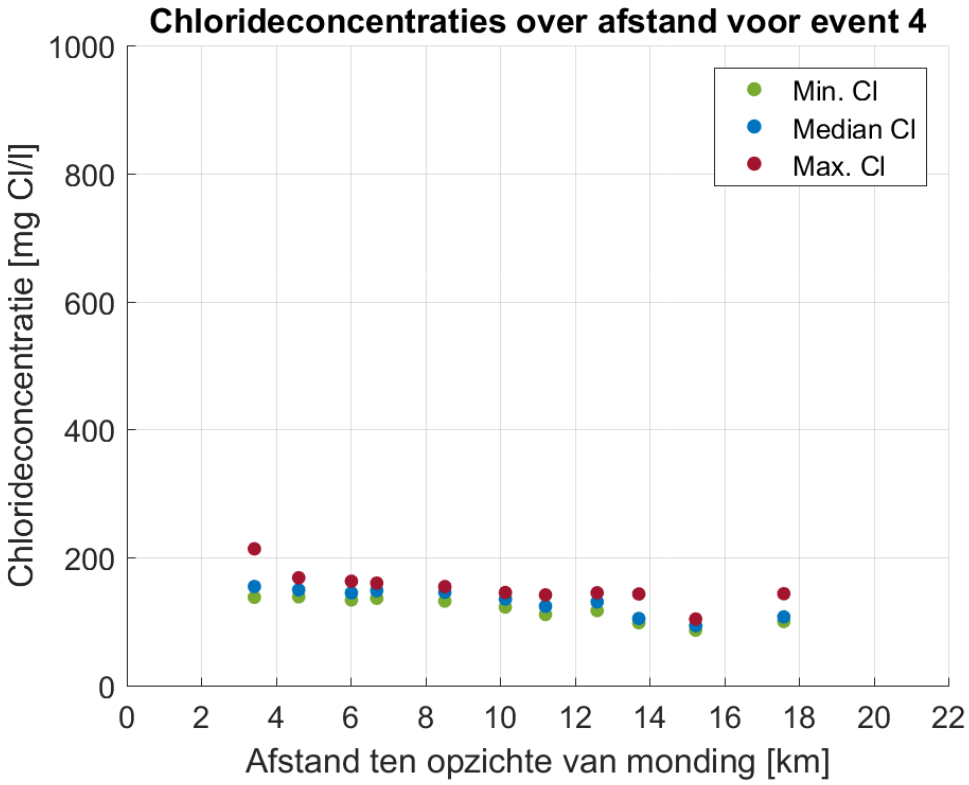

Condities en Chlorideconcentraties 15 - 18 kilometer van de monding
Afvoer [m3/s]
Gemiddelde Waterstand [m]
Q Lobith
H Hoek van Holland
H > 0.0 m
H > 0.5 m
01-Jul-2018
01-Aug-2018
01-Sep-2018
01-Oct-2018
Datum
Netto Q HY
Q = 0 m3/s
Verdoold
Gouda
Verdoold
Gouda
Varende metingen
Chlorideconcentratie [mg Cl/l]

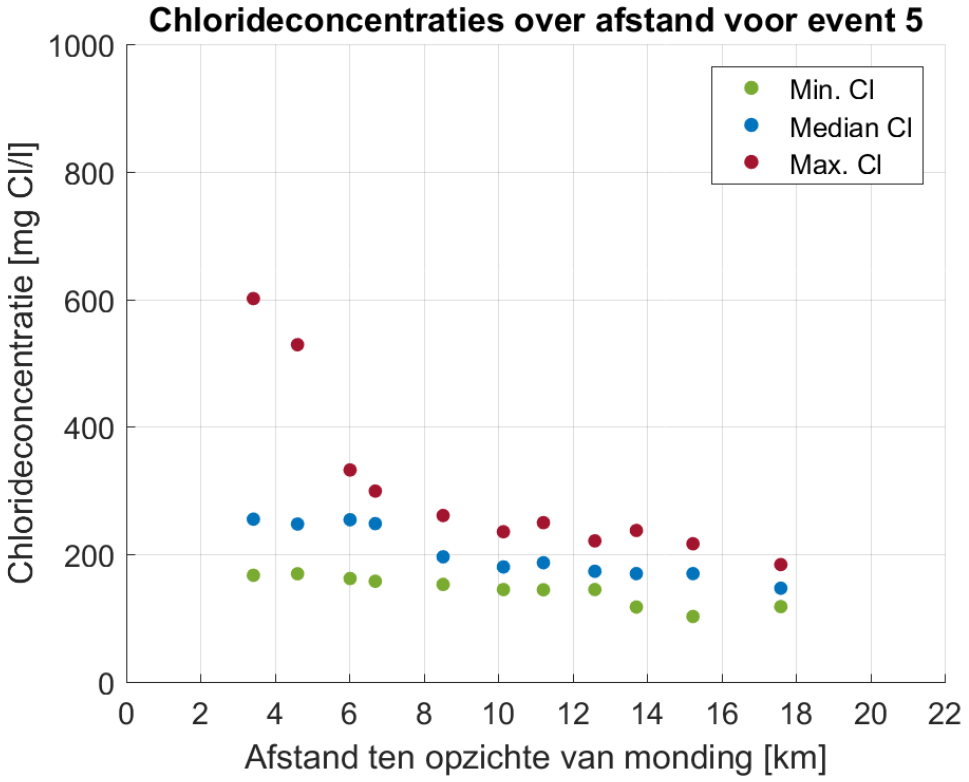
B Minimale, mediane en maximale chlorideconcentratie op de Hollandsche IJssel voor elke verziltingsperiode

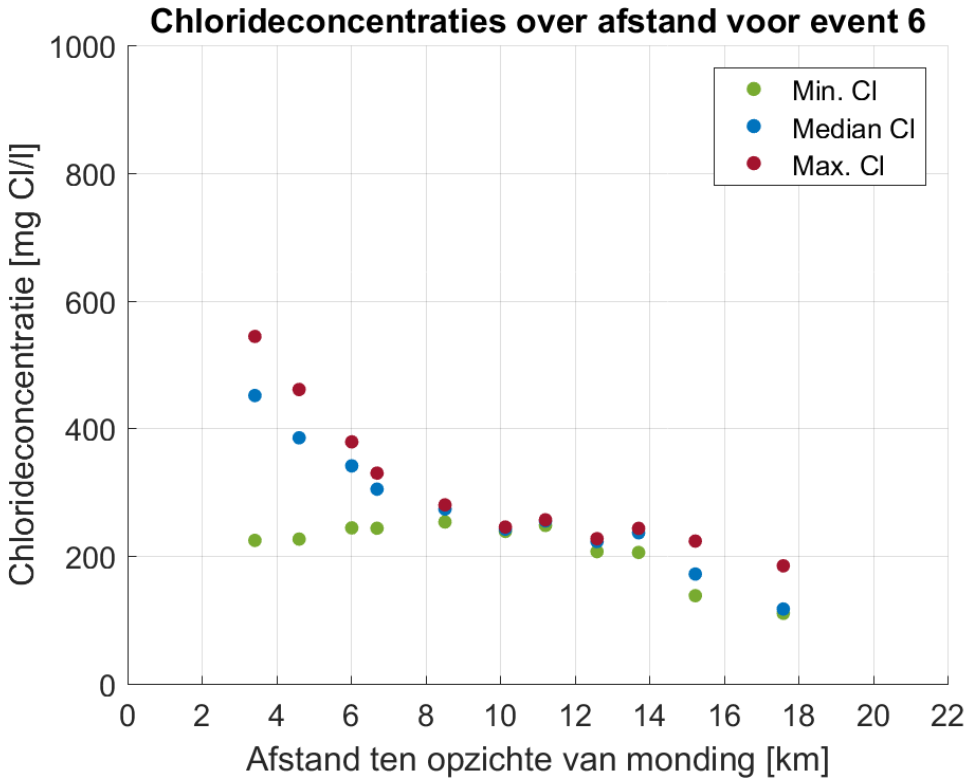


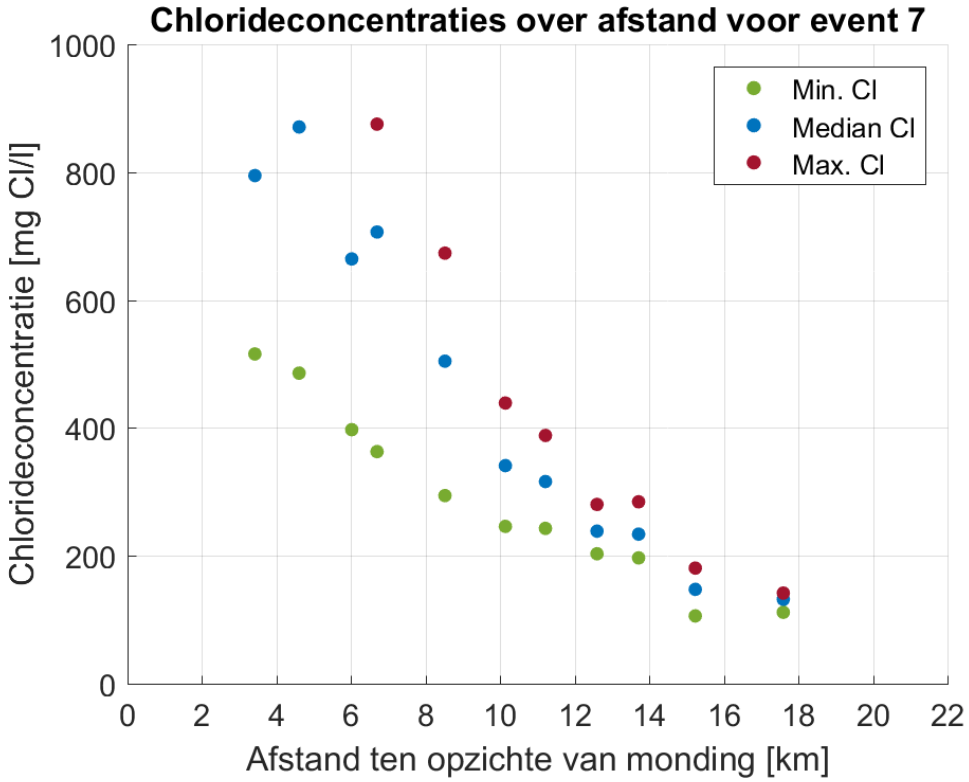

Chlorideconcentraties over afstand voor event 2
Min. Cl
Median Cl
Max. Cl
Chlorideconcentratie [mg Cl/l]
Afstand ten opzichte van monding [km]
0
200
400
600
800
1000
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22

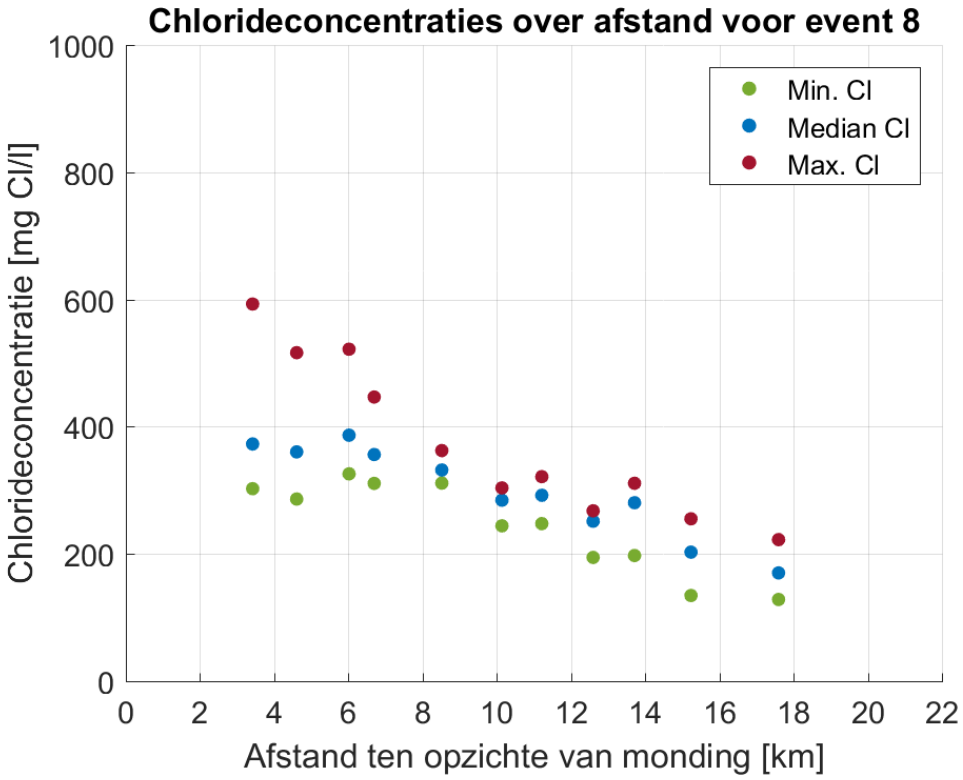

Chlorideconcentraties over afstand voor event 3
Min. Cl
Median Cl
Max. Cl
Chlorideconcentratie [mg Cl/l]
Afstand ten opzichte van monding [km]
0
200
400
600
800
1000
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22

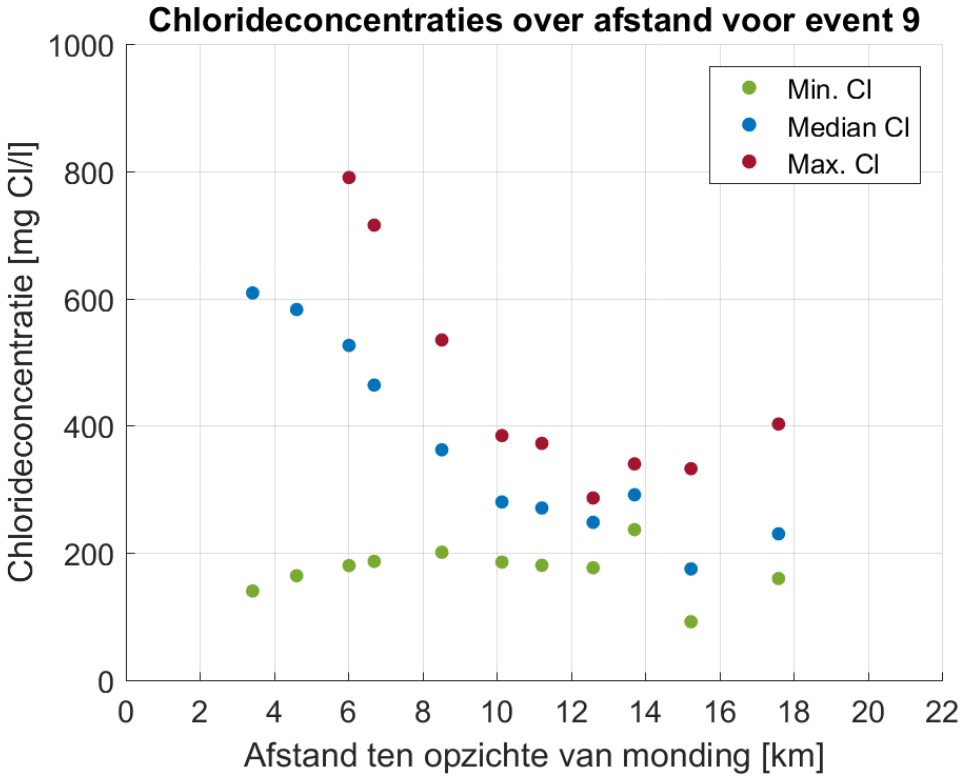

Chlorideconcentraties over afstand voor event 4
Min. Cl
Median Cl
Max. Cl
Chlorideconcentratie [mg Cl/l]
Afstand ten opzichte van monding [km]
0
200
400
600
800
1000
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22


Chlorideconcentraties over afstand voor event 5
Min. Cl
Median Cl
Max. Cl
Chlorideconcentratie [mg Cl/l]
Afstand ten opzichte van monding [km]
0
200
400
600
800
1000
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22


Chlorideconcentraties over afstand voor event 6
Min. Cl
Median Cl
Max. Cl
Chlorideconcentratie [mg Cl/l]
Afstand ten opzichte van monding [km]
0
200
400
600
800
1000
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22

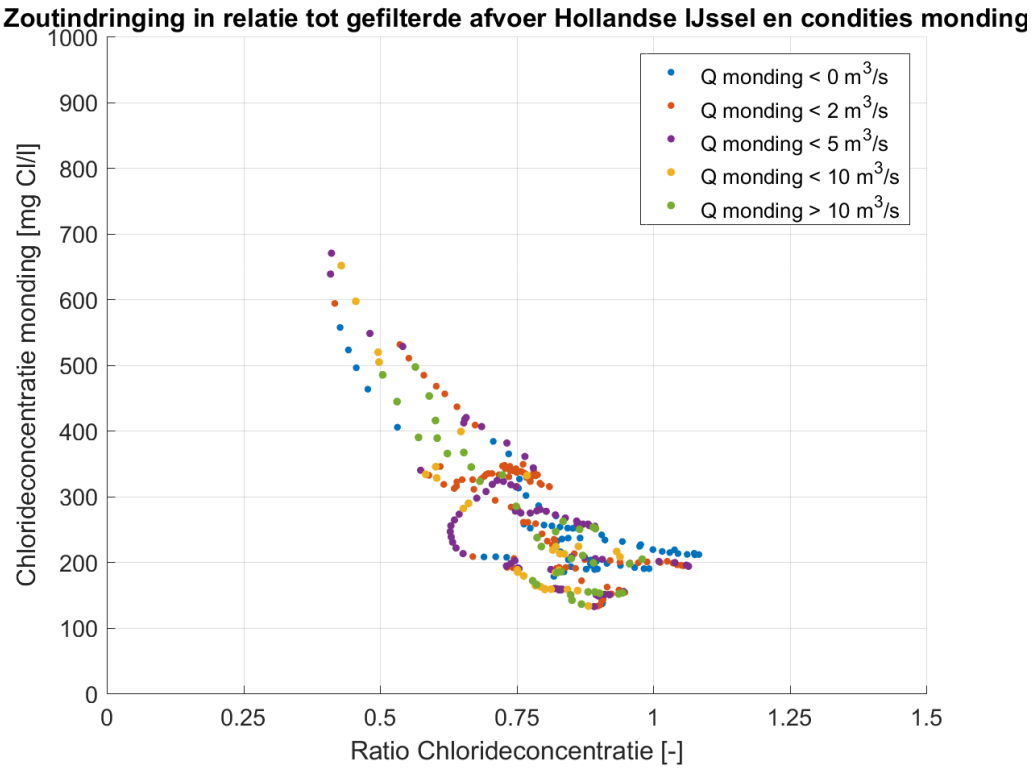

Chlorideconcentraties over afstand voor event 7
Min. Cl
Median Cl
Max. Cl
Chlorideconcentratie [mg Cl/l]
Afstand ten opzichte van monding [km]
0
200
400
600
800
1000
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22


Chlorideconcentraties over afstand voor event 8
Min. Cl
Median Cl
Max. Cl
Chlorideconcentratie [mg Cl/l]
Afstand ten opzichte van monding [km]
0
200
400
600
800
1000
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22

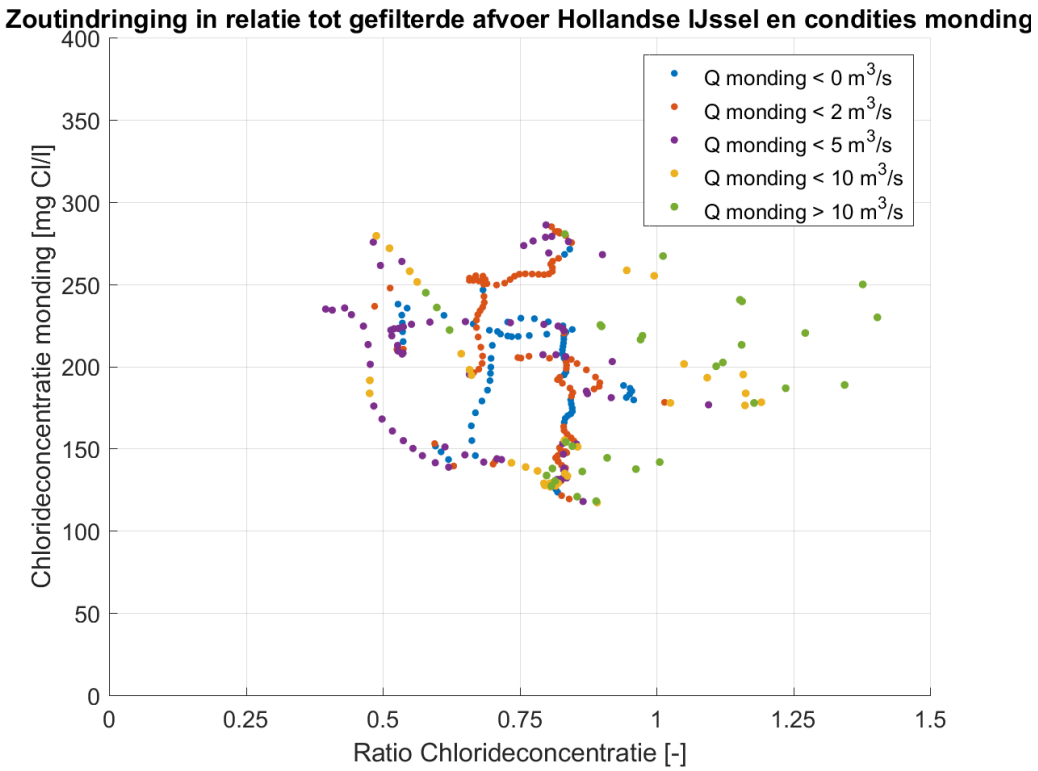

Chlorideconcentraties over afstand voor event 9
Min. Cl
Median Cl
Max. Cl
Chlorideconcentratie [mg Cl/l]
Afstand ten opzichte van monding [km]
0
200
400
600
800
1000
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22

C Scatterplots Hollandsche IJssel

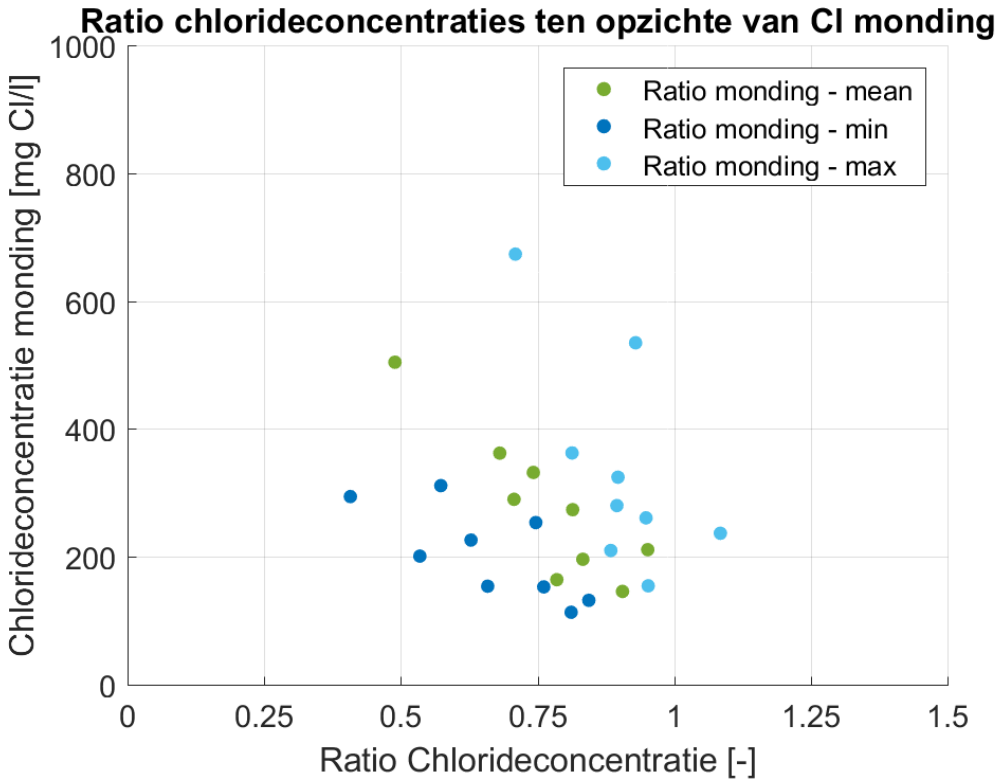
In Figuur 8.1 en Figuur 8.2 wordt de ratio van de zoutindringing weergegeven voor de verschillende doorspoeldebieten en chlorideconcentraties in de monding. Er is aangenomen dat het benedenstroomse deel (eerste 10 kilometer) van de Hollandsche IJssel zich anders gedraagt dan het bovenstroomse deel. Zoutindringing in het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel is een combinatie van advectief en dispersief gedreven zouttransport. Zout kan hier eenvoudiger worden meegenomen door het water met het getij wat leidt tot snelle stijgingen in chlorideconcentratie die niet perse zijn te beïnvloeden met een doorspoeldebiet. In het bovenstroomse deel spelen langzame dispersieve processen een grotere rol in het transporteren van het zout.
Deze aanname is ook zichtbaar in Figuur 8.1 waarbij er geen duidelijk verband zichtbaar is in de mate van zoutindringing en het doorspoeldebiet. Logischerwijs neemt de ratio zoutindringing af bij hogere chlorideconcentraties in de monding, maar er is geen duidelijk verschil in deze trend voor verschillende doorspoeldebieten. In het bovenstroomse deel (Figuur 8.2) is er wel een verband tussen het doorspoeldebiet en de ratio zoutindringing zichtbaar, gegeven voor de chlorideconcentratie halverwege de Hollandsche IJssel. Bij een afvoer van tussen de 2 en 5 m^3/s neemt de ratio zoutindringing met 0,2 tot 0,3 af voor vergelijkbare chlorideconcentraties in de monding met een doorspoeldebiet van 0 – 2 m^3/s. Bij hele hoge doorspoeldebieten gaat de ratio juist de andere kant op, maar dat is het gevolg van het lozen van zout boezemwater bij Gouda.



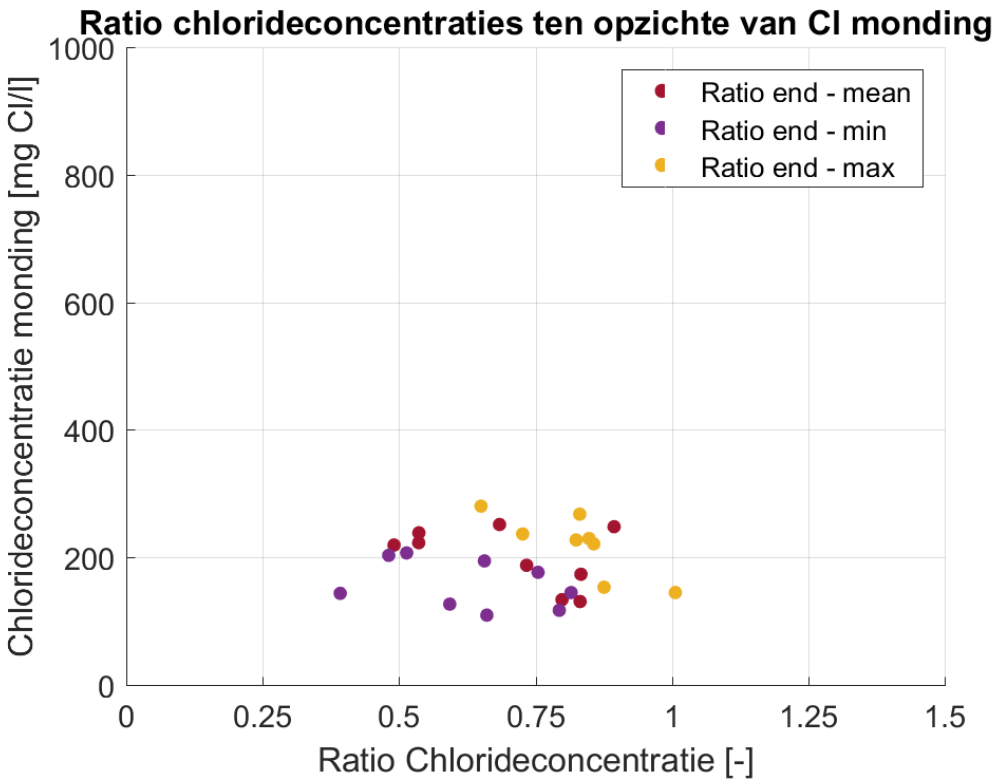
Figuur 8.1 Ratio van de zoutindringing in het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel in relatie tot de chlorideconcentratie in de monding voor verschillende afvoeren in de monding



Figuur 8.2 Ratio van de zoutindringing in het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel in relatie tot de chlorideconcentratie in de monding voor verschillende afvoeren in de monding



Figuur 8.3 Ratio van de zoutindringing in het benedenstroomse deel van de Hollandsche IJssel in relatie tot de chlorideconcentratie in de monding voor de verschillende verziltingsperiodes



Figuur 8.4 Ratio van de zoutindringing in het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel in relatie tot de chlorideconcentratie in de monding voor de verschillende verziltingsperiodes