Deltares

Enabling Delta Life

Analyse van de zoutmetingen in november 2015 langs de Hollandsche IJssel

Afleiding dispersiecoefficient

Deltares

Analyse van de zoutmetingen in november 2015 langs de Hollandsche IJssel

Afleiding dispersiecoefficient

Kees Kuijper

1230077-001

© Deltares, 2016, B

Deltares

Titel
Analyse van de zoutmetingen in november 2015 langs de Hollandsche IJssel

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS-WVL	1230077-001	1230077-001-ZWS-0005	50

Trefwoorden
verzilting, chlorideconcentratie, dispersiecoëfficiënt, Hollandsche IJssel, onttrekkingen, lozingen, metingen

Samenvatting
Bij Gouda wordt water vanuit de Hollandsche IJssel ingenomen ten behoeve van de land- en tuinbouw. Tijdens perioden met droogte is de zoetwatervraag groot maar kan tevens door de lage rivierafvoeren zout water vanuit zee de Hollandsche IJssel bereiken. Verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel hoeft geen consequenties te hebben voor het al dan niet kunnen onttrekken van water bij Gouda. Als pas na enige tijd tijdens de vloedperiode op de Nieuwe Maas het zout de Hollandsche IJssel bereikt, zal het zout enkele kilometers de Hollandsche IJssel optrekken. De volledige ebperiode in de Hollandsche IJssel is dan voldoende lang om het zout weer weg te spoelen naar de Nieuwe Maas. In het geval van permanente verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel kunnen dispersieve processen een netto zouttransport in de richting van Gouda tot gevolg hebben. De snelheid waarmee een zoutfront met een bepaalde concentratie zich voortplant is afhankelijk van de dispersiecoëfficiënt, de grootte van de concentratietoename in de mond en de duur van deze toename. Samen met de maximaal toelaatbare concentratie van het inname water bepaalt dit de grootte van het lozingsdebiet.

In november 2015 zijn tijdens een lage afvoersituatie met een Bovenrijnafvoer dalend van 1150 tot 880 m^3/s metingen in de Hollandsche IJssel uitgevoerd met als doel de verzilting van de Hollandsche IJssel vast te leggen en de dispersiecoëfficiënt te bepalen. Uit de analyse van de metingen volgt dat halverwege de Hollandsche IJssel de dispersiecoëfficiënt 10 tot 65 m^2/s bedraagt. Dispersie door snelheidsverschillen in het dwarsprofiel ('shear dispersion') dragen slechts weinig hieraan bij (f3-term in de Thatcher-Harleman vergelijking). Vermoed wordt dat de dispersie voor een deel het gevolg is van de (geringe) lozingen tijdens de metingen en dat verdere bijdragen afkomstig kunnen zijn van bochtstromingen, doodwaterzones etc. Bij het uitvoeren van scenarioberekeningen voor het aanbrengen en instandhouden van een zoetwaterbuffer in de Hollandsche IJssel bij Gouda moet ermee rekening worden gehouden dat de dispersiecoëfficiënt verandert bij wijziging van het netto lozingsdebiet. Nader onderzoek is nodig om het verloop van de dispersiecoëfficiënt langs de Hollandsche IJssel te bepalen en nieuwe metingen worden voorgesteld om de dispersiecoëfficiënt nauwkeuriger vast te stellen.

Referenties
KPP 2016 Verzilting (LT). Projectcode: WR02. RWS Landelijke Taken en BOA Zoetwater. Project: Systeemanalyse Rijn-Maasmonding

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	sept. 2016	Kees Kuijper		Rob Uittenbogaard		Frank Hoozemans	
2.0	dec. 2016	Kees Kuijper		Rob Uittenbogaard		Frank Hoozemans	
2.1	dec. 2016	Kees Kuijper		Rob Uittenbogaard		Frank Hoozemans	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding **1**
1.1 Achtergrond 1
1.2 Doel van de studie en onderzoeksvragen 1
1.3 Leeswijzer 2

2 Hollandsche IJssel **5**
2.1 Algemeen 5
2.2 Geometrie en bodemligging 6
2.3 Lozings- en onttrekkingspunten 8
2.4 Waterbeweging en verzilting 9

3 Dispersie **17**
3.1 Processen 17
3.2 Modellering: dispersievergelijking 19
3.3 Dispersie van een tracer 20
3.4 Samenvatting 24

4 Metingen **27**
4.1 Lozingen en onttrekkingen 28
4.2 Chlorideconcentraties 30
4.2.1 Vaste metingen 30
4.2.2 Varende metingen 32
4.3 Overige metingen en gegevens 33
4.4 Keuze meetdagen voor analyse 33

5 Analyse **35**
5.1 Beschrijving verzilting mond Hollandsche IJssel 35
5.2 Afleiding dispersiecoëfficiënt 36
5.3 Vergelijking met literatuur 40
5.4 Discussie 41

6 Samenvatting, onzekerheden en aanbevelingen **43**
6.1 Samenvatting 43
6.2 Onzekerheden 45
6.3 Aanbevelingen 46

7 Referenties **49**

Bijlage(n)

A F3-term in Thatcher-Harleman dispersievergelijking **A-1**
A.1 Relatie tussen Chézy- en Manning-ruwheid A-1
A.2 ‘Shear dispersion’ volgens Thatcher-Harleman A-1
A.3 Referenties A-2

B ’Shear dispersion’ onder getijcondities **B-1**

B.1 Fischer et al. (1979) B-1
B.1.1 Effect getijperiode op K B-1
B.1.2 Effect rivierbreedte op K B-4
B.2 Aanpassingen T_c en K_0 B-5
B.3 Toepassing Hollandsche IJssel B-6
B.4 Referenties B-7

C Dispersiecoëfficiënt K_0 voor rivieren C-1
C.1 Beknopte literatuurinventarisatie C-1
C.2 Referenties C-5

D Verziltingskarakteristieken mond Hollandsche IJssel D-1
D.1 Metingen 2 t/m 17 november 2015 D-1
D.2 Vergelijking met zoutmetingen op 10 september 2013 D-18

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De klimaatverandering (zeespiegelstijging, verandering rivierafvoeren) en de uitvoering van infrastructurele werken (nieuwe zeesluis IJmuiden, verdieping Nieuwe Waterweg, Kierprogramma Haringvlietsluizen, zout Volkerak-Zoommeer) leiden tot diverse beheer- en beleidsvragen voor de zoetwatervoorziening in West-Nederland. Deze vragen zijn vooral gericht op perioden met droogte wanneer de zoetwatervraag groot is en tegelijkertijd verzilting van innamepunten kan optreden. Het beheer dient in die situaties te zorgen voor een optimale zoetwatervoorziening en –verdeling. Om dit mogelijk te maken moet de beheerder beschikken over kennis van het systeem voor de beoordeling van voorgenomen ingrepen, meetinformatie voor het vastleggen van de toestand van het systeem tijdens verziltingsgebeurtenissen en gevalideerde modellen waarmee voorspellingen kunnen worden gedaan en mitigerende maatregelen kunnen worden doorgerekend.

In de Rijn-Maasmonding is een aantal belangrijke innamepunten van zoet rivierwater ten behoeve van de landbouw, de drinkwatervoorziening en de industrie (proceswater). Een belangrijke locatie is het boezemgemaal Gouda van het Hoogheemraadschap Rijnland (gemaal Pijnacker-Hordijk), waar water wordt ingenomen ten behoeve van de land- en tuinbouw. Verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel *kan* leiden tot verzilting bij Gouda maar dit hoeft niet altijd het geval te zijn, ook niet als er sprake is van een netto onttrekking van water aan de Hollandsche IJssel. Een belangrijk aspect hierbij is het moment dat tijdens het getij het zoute water, via de Nieuwe Maas, de Hollandsche IJssel bereikt. Een analyse van de wateruitwisseling tussen de Hollandsche IJssel en de Nieuwe Maas wordt gegeven in (Kuijper, 2015) op basis van uitgevoerde metingen in het verleden. In deze studie konden geen uitspraken worden gedaan over de zoutverdeling tussen de mond van de Hollandsche IJssel en Gouda omdat hiervoor metingen in onvoldoende mate beschikbaar waren en ook vanwege de te beperkte verzilting tijdens de metingen. Vragen als (i) onder welke condities treedt verzilting van Gouda op en (ii) hoe snel beweegt een zoutfront vanaf de mond in de richting van Gouda zijn daarom onderzoeksvragen die nog steeds moeten worden beantwoord. Antwoorden op deze vragen zijn nodig bij onderzoek naar de mogelijkheden van het creëren van een zoetwaterbuffer in de Hollandsche IJssel via de Kleinschalige Wateraanvoer (KWA en KWA+) als potentiële maatregel om de zoutindringing ter plaatse tegen te gaan. Bij onderzoek naar de verzilting van de Hollandsche IJssel, bijvoorbeeld als onderdeel van klimaatstudies, worden meerjarige simulaties uitgevoerd met eendimensionale procesmodellen, zoals SOBEK. Ook de effectiviteit van maatregelen kan met dit type modellen worden onderzocht mits de relevante processen correct door het model worden weergegeven. De grootte van de dispersiecoëfficiënt, en in het bijzonder de invloed hierop van grootheden als rivierafvoer, getij, geometrie en dichtheidsverschillen, moet dan bekend zijn. Het doel van de recent uitgevoerde metingen was om de grootte van de dispersiecoëfficiënt te bepalen voor de dan optredende condities; onderzoek naar de dispersie*formulering* verloopt in een flankerend onderzoek binnen KPP 2016 (Daniels, 2016).

1.2 Doel van de studie en onderzoeksvragen

In dit rapport worden recent uitgevoerde metingen (oktober-november 2015) in de Hollandsche IJssel tijdens een periode met een lage Bovenrijnafvoer (< 1150 m^3/s) geanalyseerd. Het doel van deze analyse is inzicht te verkrijgen in de processen die leiden tot

verzilting van de Hollandse IJssel vanaf de mond tot aan Gouda. De verkregen inzichten moeten bijdragen aan het onderbouwen van te onderzoeken mitigerende maatregen zoals de instelling van een zoetwaterbuffer in de Hollandsche IJssel.

De onderzoeksvragen zijn:

- Onder welke omstandigheden kan zout de Hollandsche IJssel optrekken en onder welke omstandigheden spoelt het weer uit?
  - » Hoe verloopt de wateruitwisseling tussen de Nieuwe Maas en de Hollandsche IJssel?
  - » Hoe zijn afvoer, getij, middenstandsveranderingen en onttrekkingen hierop van invloed?
- Hoe is bij zoutindringing in de Hollandsche IJssel de verhouding tussen de diverse zouttransportprocessen, en hoe verandert dit met veranderende omstandigheden (afvoer, getij en onttrekking)?
  - » Welke zijn de tijdschalen voor het advectieve en dispersieve transport?
- Wat zijn onder gegeven omstandigheden de noodzakelijke voorwaarden voor een zoetwaterbel op de Hollandse IJssel om stabiel te zijn?
  - » Hoe groot is het benodigde netto lozingsdebiet (= lozing – onttrekking)?
- Hoe beïnvloeden de voorgenomen maatregelen en ontwikkelingen de zoutindringing?

1.3 Leeswijzer

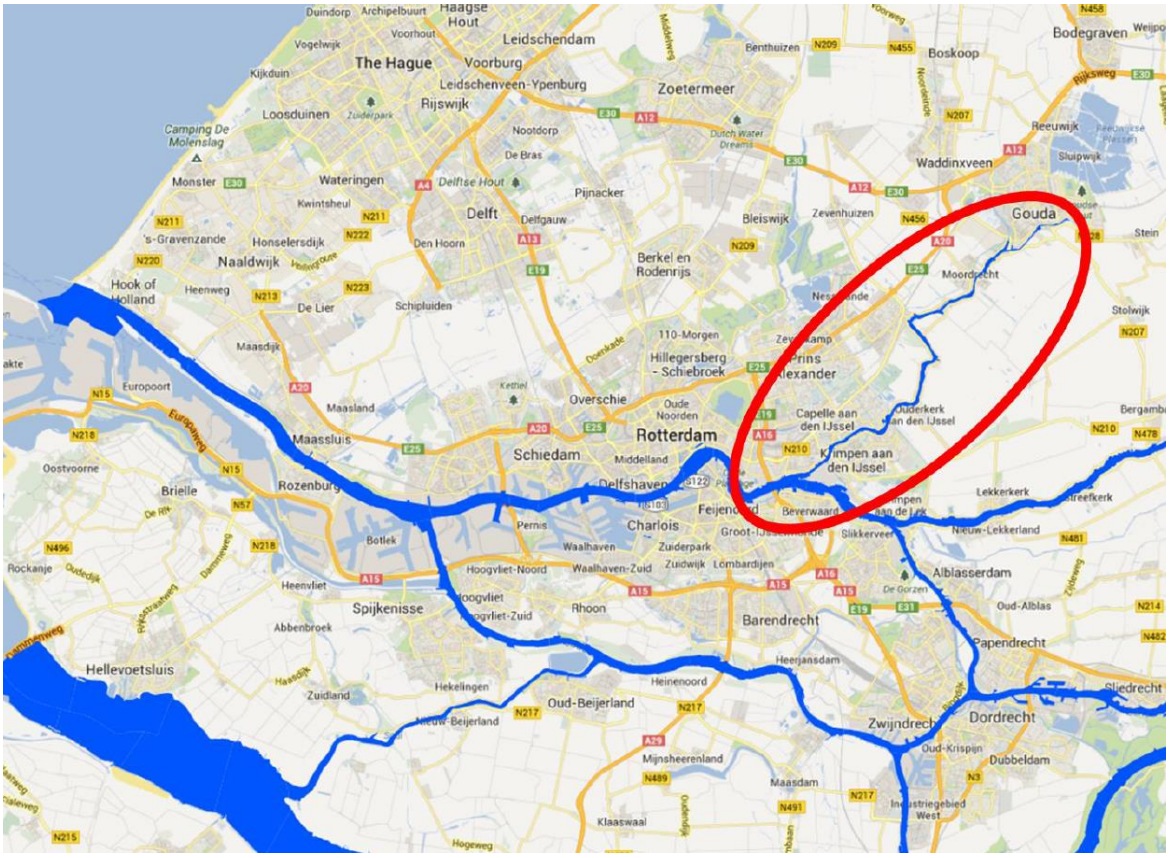
In Hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van de Hollandsche IJssel. Het betreft de dimensies van de rivier en de locaties van de lozings- en onttrekkingspunten. Ook wordt ingegaan op de verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel en hoe de uitwisseling van zout water met de Nieuwe Maas verloopt. Belangrijk is om onderscheid te maken tussen (i) het deel van de Hollandsche IJsel, waar de getijgemiddelde zoutconcentratie vooral wordt bepaald door het advectieve transport van zout over de lengte van de vloedweg vanaf de Nieuwe Maas, en (ii) het deel waar het dispersieve zouttransport de verandering van de getijgemiddelde zoutconcentratie bepaalt voor de situatie zonder lozingen en onttrekkingen. Daartoe wordt de vloedweg in de mond berekend. Verder worden de maximale eb- en vloedsnelheden bepaald en de gemiddelde (absolute) stroomsnelheid langs de Hollandsche IJssel. Deze waarden worden later gebruik bij de analyse van de metingen. Hoofdstuk 3 gaat in op dispersieve processen in het algemeen en hoe een aantal van deze processen wordt beschreven met de dispersieformulering volgens Thatcher-Harleman. Met een analytische beschrijving van het dispersieve transport na een concentratietoename op de rand wordt inzicht verkregen in de voortplantingssnelheid van een zoutfront en de orde-grootte van het benodigde lozingsdebiet om deze verzilting tegen te gaan. De uitgevoerde zoutmetingen in oktober en november 2015 worden beschreven in Hoofdstuk 4. Dit betreft zowel de “varende” als “vaste” metingen en de grootte van onttrekkingen aan en lozingen op de Hollandsche IJssel. De zoutconcentraties worden gepresenteerd in samenhang met de omgevings-condities. Op basis van een aantal criteria wordt van de totale meetperiode een deelperiode geselecteerd, die zal worden gebruikt bij de afleiding van de dispersiecoëfficiënt K in Hoofdstuk 5. Bij deze bepaling wordt een aantal veronderstellingen gedaan, wat leidt tot een onzekerheidsband voor K. De resultaten worden vervolgens vergeleken met bevindingen in de literatuur. De samenvatting, onzekerheden en aanbevelingen zijn vermeld in Hoofdstuk 6. In de bijlagen wordt nadere achtergrondinformatie verstrekt. Bijlage A gaat in op de constante voor de f3-term (‘shear dispersion’) in de Thatcher-Harleman dispersievergelijking. ‘Shear dispersion’ volgens de theorie van Fischer wordt beschreven in Bijlage B. Hierbij wordt de invloed van de oscillerende stroming op de dispersiecoëfficiënt behandeld en wordt dit toegepast op de Hollandsche IJssel. Bijlage C geeft de resultaten van een beknopte literatuurinventarisatie over de grootte van de dispersie-coëfficiënt voor rivieren met een in de

tijd constante stroming. In Bijlage D wordt de verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel in detail beschreven voor opeenvolgende dagen in de periode 2 t/m 17 november 2015. Een samenvatting van deze analyse wordt gegeven in Par. 5.1.

2 Hollandsche IJssel

2.1 Algemeen

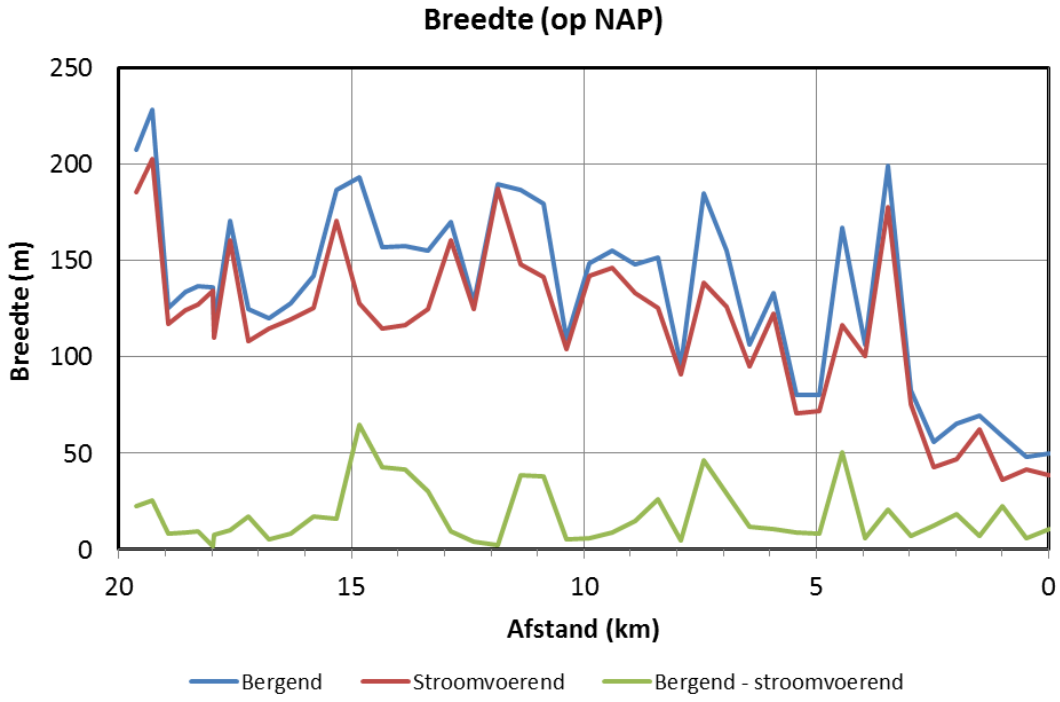
De Hollandsche IJssel is één van de riviertakken in de Rijn-Maasmonding, zie Figuur 2.1. De riviertak loopt over een lengte van 20 km vanaf Gouda tot Krimpen a/d IJssel, waar de Hollandsche IJssel samenvloeit met de Nieuwe Maas ter hoogte van km. 994, ongeveer 1 km opwaarts (oostelijk) van de van Brienenoordbrug. De begrenzing aan de bovenstroomse zijde bij Gouda wordt gevormd door de Julianasluis, het boezemgemaal Pijnacker Hordijk van het Hoogheemraadschap Rijnland (beiden km. 3) en de Waaijersluis (km. 0), in beheer bij het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden.


Gouda
Waddinxveen
Boskoop
Bodegraven
Zoetermeer
Leidschendam
The Hague
Voorburg
Rijswijk
Delft
Pijnacker
Berkel en Rodenrijs
Bleiswijk
Moordrecht
Stolwijk
Hillegersberg - Schiebroek
Rotterdam
Schiedam
Overschie
Maassluis
Vlaardingen
Capelle aan den IJssel
Krimpen aan den IJssel
Alblasserdam
Barendrecht
Papendrecht
Dordrecht
Zwijndrecht
Oud-Beijerland
Hellevoetsluis
Spijkenisse
Charlois
Feijenoord
Delfshaven
Rozenburg
Brielle
Hook of Holland
Naaldwijk
Wateringen
Loosduinen
Monster
Oostvoorne
Europoort
Maasland
Maasdijk
Schipluiden
De Lier
Den Hoorn
Nootdorp
De Bras
Delftse Hout
Pijnacker
Zevenhuizen
Lekkerkerk
Nieuw-Lekkerland
Oud-Alblas
Sliedrecht
Dubbeldam
Oud-Krispijn
Mijnsheerenland
Maasdam
Klaaswaal
Zuidland
Abbenbroek
Rhoon
Heinenoord
Heerjansdam
Hekelingen
Nieuw-Beijerland
Lombardijen
Zuidwijk
Zuiderpark
Waalhaven
Waalhaven-Zuid
Hoogvliet-Noord
Botlek
Pernis
Middelland
Oude Noorden
110-Morgen
Prins Alexander
Krimpen aan den IJssel
Capelle aan den IJssel
Ouderkerk aan den IJssel
Reeuwijk
Sluipwijk
Stein
Bergambacht
Streefkerk
Lekkerkerk
Slikkerveer
Beverwaard
Groot-IJsselmonde
Industriegebied West
Camping De Molenslag
Dutch Water Dreams
Duindorp
Archipelbuurt
Voorhout
Vogelwijk
Kijkduin
Leidschenveen-Ypenburg
Benthuizen
Kwintsheul
's-Gravenzande
Honselersdijk
Heenweg
Delfgauw
Berkel en Rodenrijs
Schipluiden
Overschie
Kethel
Oude Noorden
Middelland
Delfshaven
Feijenoord
Charlois
Pernis
Botlek
Heenvliet
Spijkenisse
Abbenbroek
Rhoon
Barendrecht
Ridderkerk
Alblasserdam
Papendrecht
Sliedrecht
Dordrecht
Zwijndrecht
Oud-Beijerland
Hekelingen
Heinenoord
Heerjansdam
Hellevoetsluis
Zuidland
Nieuw-Beijerland
Mijnsheerenland
Maasdam
Klaaswaal
Dubbeldam
Oud-Krispijn
Industriegebied West
Lekkerkerk
Nieuw-Lekkerland
Streefkerk
Bergambacht
Stein
Stolwijk
Moordrecht
Gouda
Waddinxveen
Reeuwijk
Sluipwijk
Boskoop
Bodegraven
Zoetermeer
Leidschendam
Voorburg
The Hague
Rijswijk
Loosduinen
Monster
Wateringen
Delft
Pijnacker
Bleiswijk
Zevenhuizen
Berkel en Rodenrijs
Naaldwijk
Hook of Holland
Heenweg
De Lier
Schipluiden
Den Hoorn
Nootdorp
De Bras
Delftse Hout
Kwintsheul
's-Gravenzande
Honselersdijk
Maasdijk
Maasland
Europoort
Maassluis
Vlaardingen
Schiedam
Rotterdam
Capelle aan den IJssel
Krimpen aan den IJssel
Alblasserdam
Barendrecht
Papendrecht
Dordrecht
Zwijndrecht
Oud-Beijerland
Hellevoetsluis
Spijkenisse
Rozenburg
Brielle
Oostvoorne
Rockanje
Botlek
Pernis
Charlois
Feijenoord
Delfshaven
Middelland
Oude Noorden
110-Morgen
Prins Alexander
Hillegersberg - Schiebroek
Overschie
Kethel
Oude Noorden
Capelle aan den IJssel
Ouderkerk aan den IJssel
Krimpen aan den IJssel
Lekkerkerk
Streefkerk
Nieuw-Lekkerland
Oud-Alblas
Sliedrecht
Dubbeldam
Oud-Krispijn
Mijnsheerenland
Maasdam
Klaaswaal
Industriegebied West
Zuidland
Abbenbroek
Rhoon
Heinenoord
Heerjansdam
Hekelingen
Nieuw-Beijerland
Lombardijen
Zuidwijk
Zuiderpark
Waalhaven
Waalhaven-Zuid
Hoogvliet-Noord
Heenvliet
Botlek
Pernis

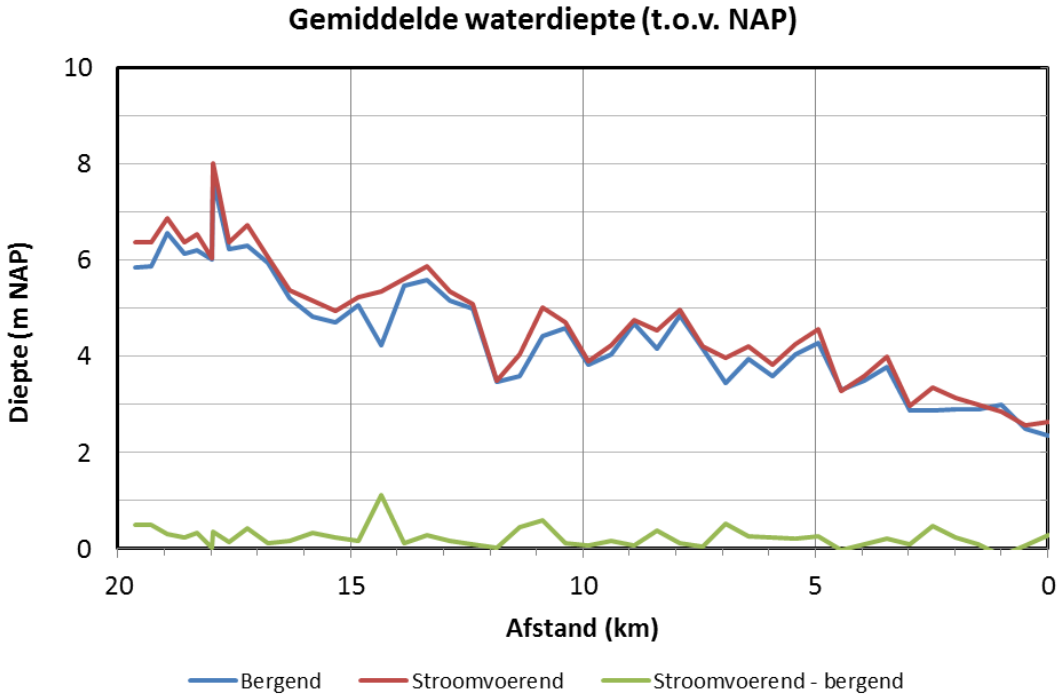
2.2 Geometrie en bodemligging

In Figuur 2.2, Figuur 2.3 en Figuur 2.4 worden de breedte en waterdiepte en het dwarsoppervlak langs de Hollandsche IJssel getoond. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen het stroomvoerend en het bergend profiel. De data zijn ontleend aan de SOBEK-schematisatie sobek-rmm-j15_5-v1 voor de Rijn-Maasmonding, welke dateert van 2015. De laatste lodingen voor het gehele gebied zijn gedaan in 2012/2013.

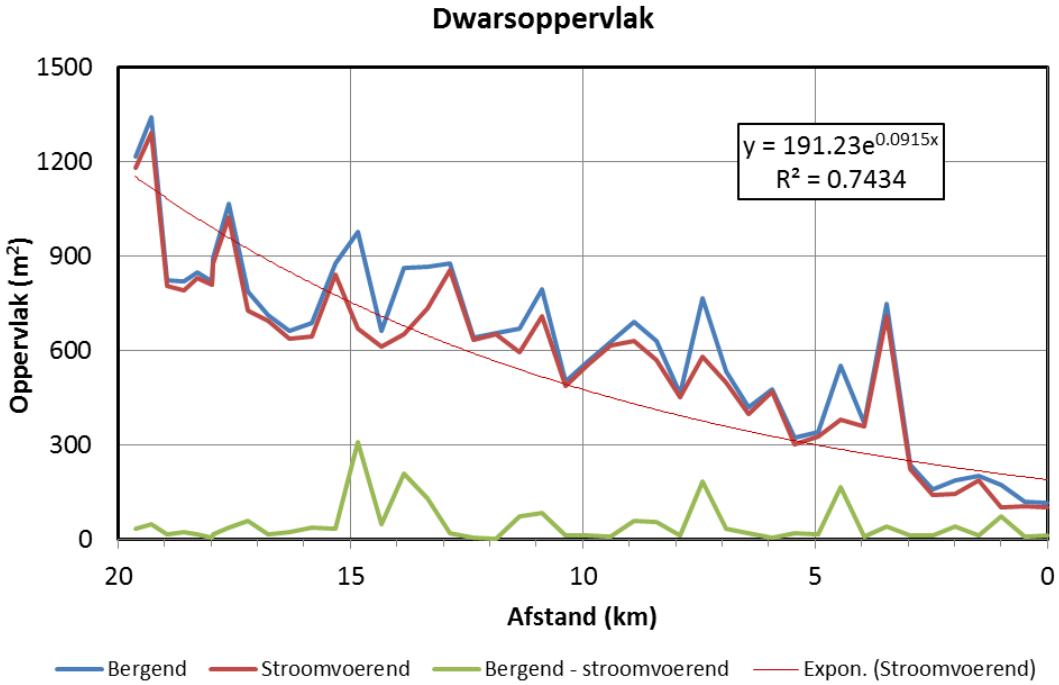
Uit de figuren volgt dat de breedte afneemt van 200 m in de mond tot 100 m bij de Julianasluis (km. 3) en 50 m bij de Waaiersluis (km. 0). De gemiddelde waterdiepte ten opzichte van NAP neemt geleidelijk af van 6,5 m in de mond tot 3 m bij de Julianasluis en 2,5 m bij de Waaiersluis. De resulterende afname van het dwarsoppervlak (factor 10) kan worden benaderd met een exponentieel verloop met een convergentielengte van 1/0,0915 ≈ 11 km.



Figuur 2.2 Bergende breedte (blauwe lijn), stroomvoerende breedte (rode lijn) en verschil (groene lijn) van de Hollandsche IJssel tussen de mond (km. 20) en Gouda Waaiersluis (km. 0).



Figuur 2.3 Gemiddelde waterdiepte bergend profiel (blauwe lijn), gemiddelde waterdiepte stroomvoerend profiel (rode lijn) en verschil (groene lijn) van de Hollandsche IJssel tussen de mond (km. 20) en Gouda Waaiersluis (km. 0).



Figuur 2.4 Dwarsoppervlak bergend profiel (blauwe lijn), dwarsoppervlak stroomvoerend profiel (rode lijn) en verschil (groene lijn) van de Hollandsche IJssel tussen de mond (km. 20) en Gouda Waaiersluis (km. 0). Het dwarsoppervlak van het stroomvoerend profiel is benaderd met een exponentiële relatie.

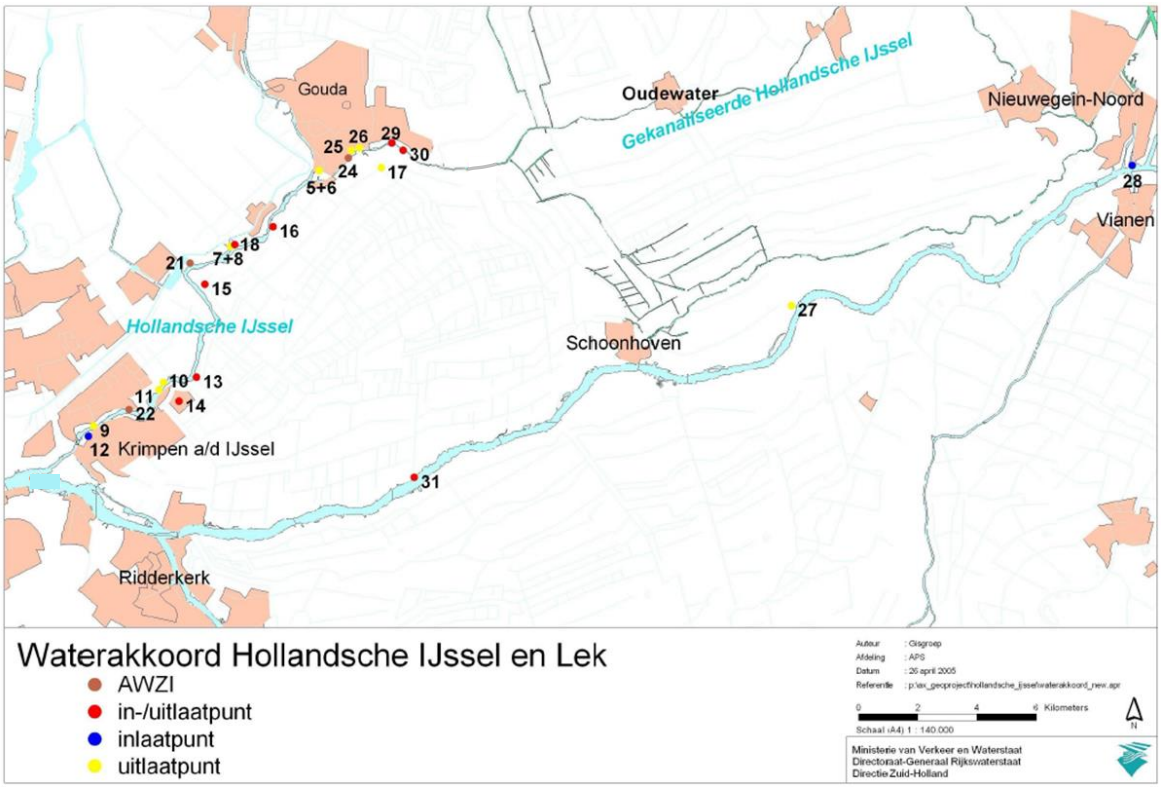
2.3 Lozings- en onttrekkingspunten

De lozings- en onttrekkingslocaties langs de Hollandsche IJssel en Lek zijn vermeld in Tabel 2.1 en weergegeven in Figuur 2.5. De analyse van de metingen zal worden uitgevoerd voor de periode waarvoor geldt dat de grootte van de lozingen en de onttrekkingen zo klein mogelijk is ('gesloten waterbalans'. De locaties waarvoor gegevens zijn toegeleverd gedurende deze periode, in totaal 15, zijn cursief vermeld.

Tabel 2.1 Lozings- en onttrekkingspunten langs de Hollandsche IJssel en Lek (Friocourt en Kuijper, 2015). De gegevens voor de vet gedrukte locaties zijn gebruikt voor de analyseperiode 9 t/m 13 november 2015.

Nummer op Figuur 2.5	**Beheerder**	**Naam**	**Type**	**Maximale capaciteit (m^3/min)**
5, 6	**HHS Rijnland**	**Gemaal mr. P.A. Pijnacker Hordijk**	**Uitlaat**	**2070**
			Inlaat	**2070**
7, 8	**HHS Schieland en de Krimpenerwaard**	**Gemaal Abraham Kroes**	**Uitlaat**	**850**
9	**HHS Schieland en de Krimpenerwaard**	**Gemaal Middelwatering**	**Uitlaat**	**90**
			Inlaat	**120**
10	**HHS Schieland en de Krimpenerwaard**	**Gemaal Hitland**	**Uitlaat**	**75**
11	**HHS Schieland en de Krimpenerwaard**	**Gemaal Oostgaarde**	**Uitlaat**	**50**
12	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Langeland en Kortland	Inlaat	-
13	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Krommer Geer en Zijde	In-/uitlaat	-
14	**HHS Schieland en de Krimpenerwaard**	**Gemaal Johannes Veurink**	**In-/uitlaat**	**300**
15	**HHS Schieland en de Krimpenerwaard**	**Gemaal De Nesse**	**Uitlaat**	**40**
			Inlaat	**5**
16	**HHS Schieland en de Krimpenerwaard**	**Gemaal Verdoold**	**Uitlaat**	**319**
			Inlaat	50
17	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Stolwijkersluis	Uitlaat	50
18	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Schutsluis Snelle Sluis	In-/uitlaat	100 à 200
21	**HHS Schieland en de Krimpenerwaard**	**AWZI Kortenoord**	**Uitlaat**	
22	**HHS Schieland en de Krimpenerwaard**	**AWZI Groenedijk**	**Uitlaat**	
	HH Rijnland	**AWZI Gouda**	**Uitlaat**	**?**
24	*?*	*?*	*?*	*?*
25	**HHS van Rijnland**	**Gemaal Mallegat**	**Uitlaat**	**80**
26	**HHS van Rijnland**	**Gemaal Hanepraai**	**Uitlaat**	**70**
	HHS van Rijnland	**Gemaal Kort Haarlem**	**Uitlaat**	
27	HHS De Stichtse Rijnlanden	Gemaal de Koekoek	In-/uitlaat	672
28	HHS De Stichtse	Inlaat Vreeswijk	Inlaat	120

Nummer op Figuur 2.5	Beheerder	Naam	Type	Maximale capaciteit (m^3/min)
	Rijnlanden			
29	**Rijkswaterstaat**	**Waaiersluis (sluis + Gemaal)**	**Uitlaat** **Inlaat**	**Max. 450**
30	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Beneden Haastrecht	In-/uitlaat	30
31	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Krimpenerwaard	In-/uitlaat	500
?	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Stormpolder A	Uitlaat	1,7
?	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Stormpolder B	Uitlaat	3,3



Figuur 2.5 Lozings- en onttrekkingspunten langs de Hollandsche IJssel en Lek (Friocourt en Kuijper, 2015)

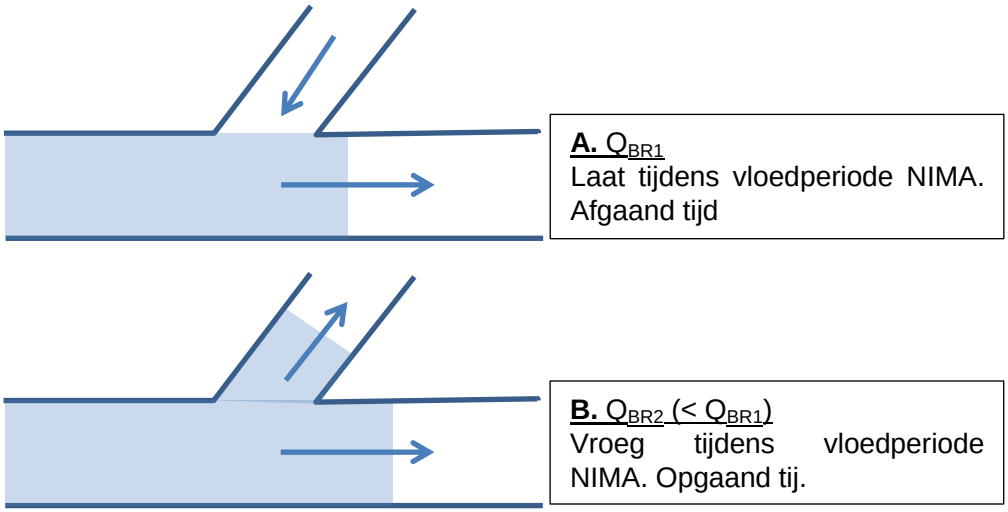
2.4 Waterbeweging en verzilting

De waterbeweging in de Nieuwe Maas wordt vooral gedomineerd door het getij. De gemiddelde getijslag bij Krimpen a/d IJssel bedraagt 1,51 m; bij springtij en doodtij is deze 1,61 m en 1,36 m (Slotgemiddelde 1998.0). Op- en afwaaiing bij Hoek van Holland tijdens storm resulteert in vulling en lediging van de Rijn-Maasmonding en is daarmee ook van invloed op waterstanden en stroomsnelheden. De Bovenrijnafvoer bepaalt in belangrijke mate de gemiddelde debieten (restafvoeren) op de riviertakken. Het water wordt aangevoerd via de Lek en de Waal en afgevoerd naar de Noordzee via de Nieuwe Waterweg, het Hartel- en Beerkanaal en de Haringvlietsluizen. Daarnaast wordt er water afgevoerd afkomstig van de

Maas maar deze afvoer is veel kleiner dan die van de Bovenrijn. De vele splitsingspunten zijn kenmerkend voor het gebied; het aangevoerde rivierwater wordt via de splitsingspunten verdeeld over de riviertakken. Deze verdeling wordt beïnvloed door het bedieningsprogramma van de Haringvlietsluizen. Bij Bovenrijnafvoeren lager dan 1100 m^3/s zijn de Haringvlietsluizen volgens het Lozings-programma Haringvlietsluizen '84 gesloten (behoudens de omloop- en visriolen). De restafvoeren over de riviertakken worden in geringe mate beïnvloed door restcirculaties als gevolg van het getij ('tidal pumping').

Voor de zoetwatervoorziening van zuidwest-Nederland speelt verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel een belangrijke rol. Zout water dat vanuit zee via de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas de monding van deze riviertak bereikt, *kan* resulteren in verhoogde chlorideconcentraties bij Gouda waardoor de inname van zoet water moet worden gestopt. Verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel doet zich voor bij Bovenrijnafvoeren lager dan ongeveer 1200 m^3/s maar bij een stormopzet op zee kan verzilting ook bij hogere afvoersituaties optreden. In hoeverre verzilting van de monding van de Hollandsche IJssel daadwerkelijk leidt tot verzilting bij Gouda hangt af van diverse factoren. De grootte van de onttrekking te Gouda is een belangrijke parameter maar ook als niet wordt onttrokken kan het zout uiteindelijk Gouda bereiken. Voor dit laatste zijn verschillende mechanismen verantwoordelijk zoals de tijdelijke berging van zout in doodwaterzones langs de oever van de Hollandsche IJssel en in zijtakken (Sliksloot), diepte- en dwarsvariaties van stroomsnelheid en chlorideconcentratie, faseverschillen tussen het tijdsverloop van de stroomsnelheid en chlorideconcentratie etc. In eendimensionale (profielgemiddelde) modellen wordt voor de beschrijving van deze driedimensionale processen doorgaans gebruik gemaakt van een dispersieformulering. De mate waarin de zoutverdeling voor verschillende omgevingscondities (rivierafvoer, getij, geometrie) met deze formulering kan worden voorspeld, bepaalt het succes van een 1D-benadering.

Uit een analyse van in het verleden uitgevoerde debiet- en zoutmetingen blijkt, dat in de monding van de Hollandsche IJssel sprake is van een faseverschil tussen het debiet in de Nieuwe Maas en het debiet in de Hollandsche IJssel (Kuijper, 2015). Het debiet in de Hollandsche IJssel volgt het waterstandsverloop: bij opkomend tij is er sprake van instroming en bij afgaand tij uitstroming. Dit kombergingsdebiet is het gevolg van de relatief korte Hollandsche IJssel (20 km) ten opzichte van de lengte van de getijgolf ter plaatse (~ 300 km). Als de Hollandsche IJssel direct na hoogwater begint uit te stromen (tijdens afgaand tij) is er nog een vloedstroming op de Nieuwe Maas, zie bovenste afbeelding in Figuur 2.6. Zout water vanuit zee dat na hoogwater de mond van de Hollandsche IJssel bereikt zal dan niet de Hollandsche IJssel kunnen intrekken.



*Figuur 2.6 Zoutindringing in de Hollandsche IJssel. **A**: Het zoute zeewater bereikt laat tijdens de vloedperiode in de Nieuwe Maas de Hollandsche IJssel ($Q_{BR,1}$). **B**: Het zoute zeewater bereikt vroeg tijdens de vloedperiode in de Nieuwe Maas de Hollandsche IJssel ($Q_{BR,2}$). Ontleend aan Kuijper (2015).*

Als zout water al vóór hoogwater de Hollandsche IJssel bereikt (tijdens opgaand tij), kan er wel verzilting van de Hollandsche IJssel optreden omdat er dan nog een (beperkte) instroming is, zie onderste afbeelding in Figuur 2.6. Na hoogwater wordt dit zoute water echter weer weggespoeld naar de Nieuwe Maas. Als het zoute water steeds eerder tijdens de vloedperiode op de Nieuwe Maas de Hollandsche IJssel bereikt zal het zoute water ook een steeds grotere afstand afleggen in de Hollandsche IJssel. De grootste afstand is dan gelijk aan de getijweg (= vloedweg) in de mond van de Hollandsche IJssel, welke in een eendimensionaal rekenmodel volgt uit de profielgemiddelde snelheid. In dat geval is er op het moment van laagwater al zout aanwezig in de Nieuwe Maas ter plaatse van de mond van de Hollandsche IJssel en is er sprake van permanente verzilting.

Het zout dat met de profielgemiddelde snelheid wordt getransporteerd, wordt aangeduid met advectief transport. Het verschil tussen het totale en het advectieve transport vormt dan het dispersieve transport. In een eendimensionaal stromingsmodel waarmee dynamisch wordt gerekend, d.w.z. tijdens de getijperiode worden waterstanden en stroomsnelheden berekend, kan het zout niet verder komen dan de getijweglengte in de mond van de Hollandsche IJssel als dispersieve transporten verwaarloosd worden. In Hydrologic (2013) wordt voor de ‘advectieve’ getijweglengte 6 km genoemd, zie Figuur 2.7.

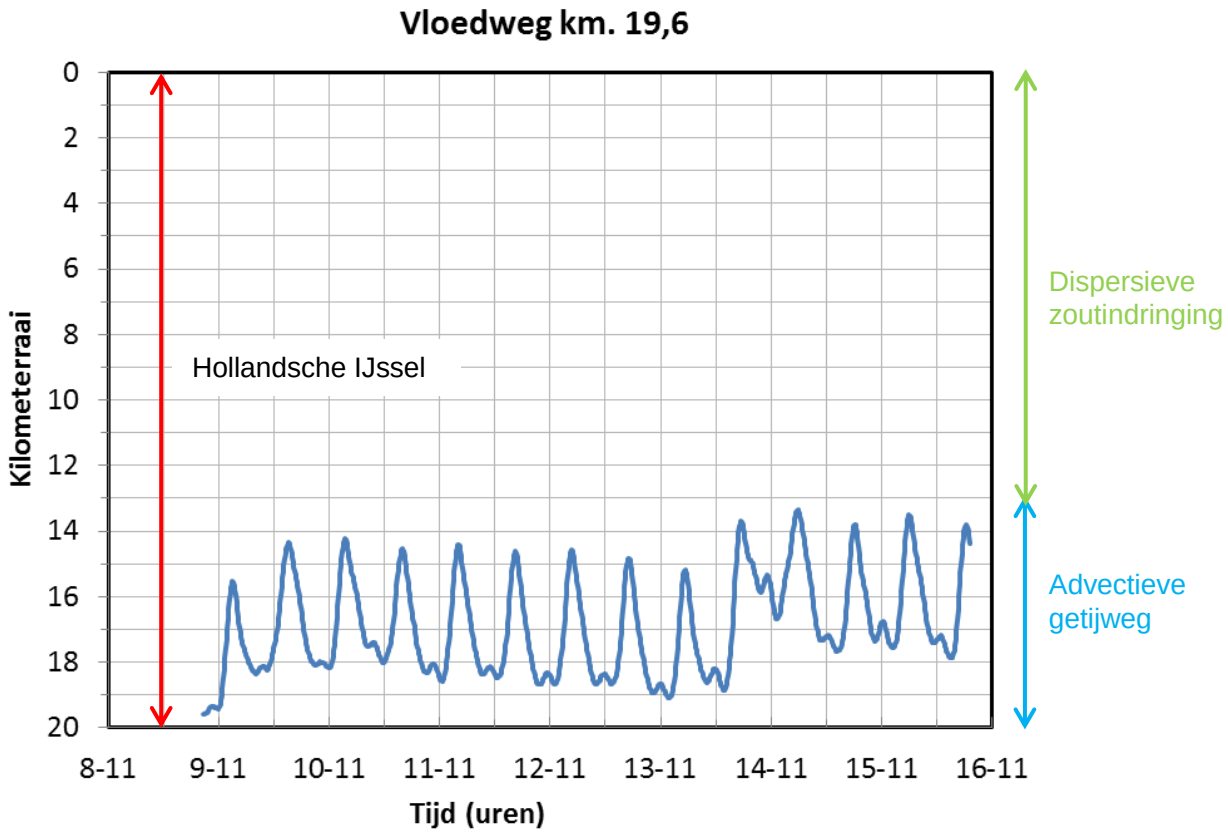
Figuur 2.7 Advectieve getijweg: maximale afstand waarover zout vanuit de Nieuwe Maas door advectie ten gevolge van de getijbeweging kan worden getransporteerd (Hydrologic, 2013). Opwaarts hiervan kan alleen zout voorkomen ten gevolge van dispersieve processen (indien er geen onttrekkingen zijn).

De getijweglengte is in het voorliggende rapport als volgt berekend[1]:

- Ter plaatse van de opeenvolgende SOBEK-vakken is het kombergingsdebiet berekend uit het gemiddelde van de waterstand in Gouda-brug en de waterstand in Krimpen a/d IJssel en het kombergend oppervlak opwaarts van elk SOBEK-vak.
- Vervolgens is uit het kombergingsdebiet en het stroomvoerend oppervlak in elk SOBEK-vak de stroomsnelheid bepaald.
- Aan het begin van de vloedperiode is een (virtueel) deeltje losgelaten en de positie en snelheid is bepaald op opeenvolgende tijdstippen. De snelheid van het deeltje volgt hierbij uit lineaire interpolatie van de omliggende stroomsnelheden ter plaatse van de SOBEK-vakken.

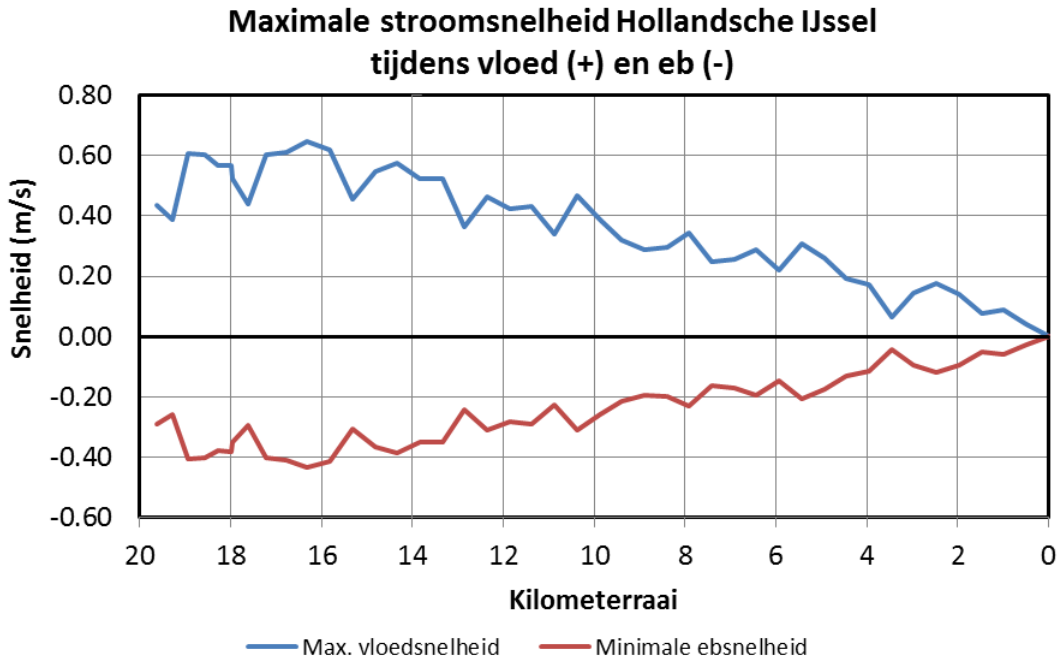
Het resultaat is voor de periode 9 t/m 15 november 2015 weergegeven in Figuur 2.8. Hieruit komt naar voren dat zout door advectief transport vanaf de mond tot ongeveer km. 13/14 kan worden getransporteerd. Middenstandsveranderingen en de springtij-doodtij variatie zijn hierop enigszins van invloed.

[1] *Er is geen SOBEK-simulatie uitgevoerd.*



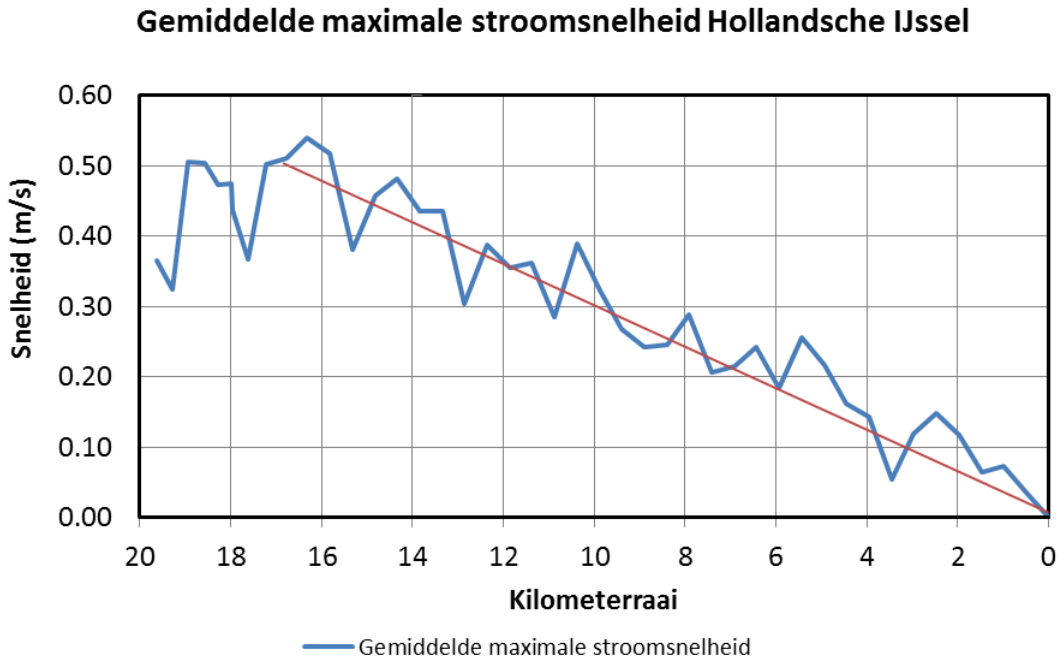
Figuur 2.8 Getijweglengte in de mond van de Hollandsche IJssel (km. 19,6). Langs de verticale as is de kilometerraai vermeld: Gouda (Waaiersluis) = km. 0; mond = km. 19,6.

In elke SOBEK-dwarsdoorsnede is uit het berekende snelheidsverloop de maximale vloed- en ebsnelheid bepaald. Dit is gedaan voor opeenvolgende perioden van 24 uur en 50 min tussen 9 november 2015 00:00 uur en 20 november 2015 09:00 uur (in totaal 11 deelperioden). Het gemiddelde van de 11 berekende waarden is weergegeven in Figuur 2.9. De maximale stroomsnelheden tijdens vloed zijn groter dan die tijdens eb. Dit wordt veroorzaakt door de kortere duur van de vloedperiode ten opzichte van de ebperiode (getijasymmetrie). De maximale vloedsnelheid neemt van de monding naar Gouda af van 0,6 m/s naar 0 m/s. De maximale ebsnelheid neemt af van 0,4 m/s in de monding tot 0 m/s bij Gouda.



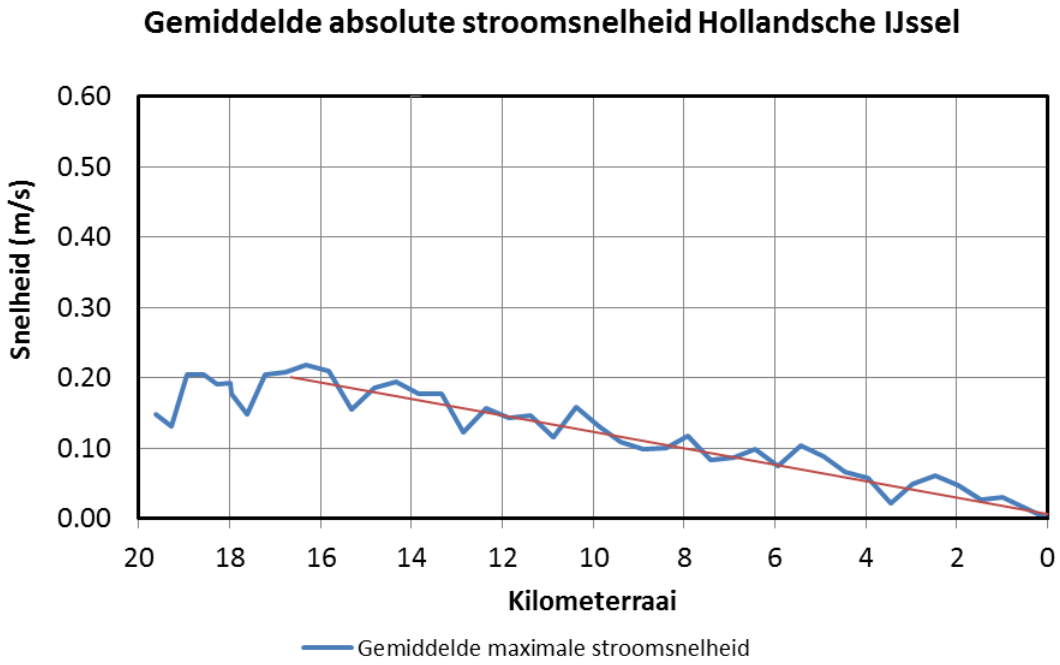
Figuur 2.9 Maximale vloed- en ebsnelheid in de Hollandsche IJssel tussen km. 20 en km. 0. Periode: 9 november 00:00 uur t/m 20 november 2015 09:00 uur.

In Figuur 2.10 is het gemiddelde van de maximale vloedsnelheid en de absolute waarde van de ebsnelheid weergegeven. De afname in landwaartse richting verloopt vanaf km. 17 vrijwel lineair.



Figuur 2.10 Gemiddelde maximale stroomsnelheid in de Hollandsche IJssel tussen km. 20 en km. 0. Periode: 9 november 00:00 uur t/m 20 november 2015 09:00 uur. De gemiddelde maximale stroomsnelheid is het gemiddelde van de maximale vloedsnelheid en de maximale (absolute) ebsnelheid.

Het gemiddelde van de absolute stroomsnelheid tijdens het getij is weergegeven in Figuur 2.11. De gemiddelde eb- en vloedsnelheid is 0,2 m/s in de mond en neemt lineair af in de richting van Gouda.



Figuur 2.11 Gemiddelde absolute stroomsnelheid in de Hollandsche IJssel tussen km. 20 en km. 0. Periode: 9 november 00:00 uur t/m 20 november 2015 09:00 uur. De gemiddelde absolute stroomsnelheid is het gemiddelde van de absolute waarden van de stroomsnelheden.

3 Dispersie

3.1 Processen

Het totale zouttransport in een doorsnede *x* van een rivier wordt verkregen door vermenigvuldiging van de lokale stroomsnelheid *u(y, z)* met de lokale zoutconcentratie *c(y, z)* en integratie over de gehele doorsnede. Hierin zijn *x*, *y* en *z* de horizontale, laterale en verticale coördinaten. In een eendimensionaal model wordt alleen gerekend met profielgemiddelde waarden voor *u* en *c* en moeten de deeltransporten die ontstaan ten gevolge van variaties van *u* en *c* in de dwarsdoorsnede, resp. *u'* en *c'*, op een bepaalde manier worden beschreven. Het is gebruikelijk het dispersieve transport T_{disp} afhankelijk te stellen van de gradiënt van de profielgemiddelde zoutconcentratie $\overline{c}$. In één dimensie geldt dan:

$$T_{disp} = -AK \frac{\partial \overline{c}}{\partial x} \tag{3.1}$$

waarin *A* het oppervlak van de dwarsdoorsnede en *K* de dispersiecoëfficiënt.

De grootte van *K* moet dan worden voorgeschreven om met het model berekeningen te kunnen uitvoeren.

In de natuur zijn er veel processen die resulteren in variaties van de snelheid *u* en de concentratie *c* over de diepte en breedte en het is niet altijd goed bekend hoe deze van invloed zijn op de dispersiecoëfficiënt *K*. Een stroming langs een vaste wand, zoals de stroming in een rivier, leidt tot snelheidsverschillen over de diepte. Evenzo kunnen snelheidsverschillen ontstaan over de breedte van de rivier. De dispersie die het gevolg is van snelheidsverschillen wordt aangeduid als 'shear dispersion'. Een ander bekend voorbeeld betreft de dispersie ten gevolge van dichtheidsstromingen. Er is een netto landwaarts gerichte stroming bij de bodem van relatief zout water en een netto zeewaarts gerichte stroming bij het oppervlak van relatief zoet water. Deze verticale gravitatiecirculatie leidt tot een groter netto landwaarts gericht transport naar gelang er sprake is van een sterkere gelaagdheid[2]. Verder kunnen bijdragen aan dispersie (Friocourt en Kuijper, 2015):

- dichtheidsverschillen in dwarsrichting, bijvoorbeeld tussen de rivier en dode zones;
- getijschering ('tidal straining') resulterend in een asymmetrie in verticale menging tijdens een getijperiode, zowel in langs- als dwarsrichting;
- de uitwisseling tussen haven en rivier of tussen riviertakken als gevolg van een verschil tussen hoogwater en stroomkentering op de rivier; idem rond laagwater ('tidal trapping');
- netto circulaties van de stroomsnelheid zoals opgewekt door bodemvariaties (eb- en vloedgeulen) of ten gevolge van rondstromingen rond 'eilanden' in een vertakt rivierenstelsel als de Rijn-Maasmonding ('tidal pumping');
- overige geometrische effecten (profielveranderingen en bochten);
- circulaties ten gevolge van wind.

[2] *Ook bij een volledig gemengde situatie ontstaat een verticale gravitatiecirculatie, omdat deze bepaald wordt door de longitudinale zoutgradiënt. De bijdrage aan het netto zouttransport is dan echter nul.*

De dispersiecoëfficiënt representeert dus een scala van fysische processen en het is van belang te weten hoe bepaalde ingrepen hierop van invloed kunnen zijn bij het uitvoeren van scenariostudies.

De dispersiecoëfficiënt voor 'shear dispersion' kan evenredig worden gesteld met de snelheidsverschillen in het dwarsprofiel (in verticale of laterale richting). Als de gemiddelde snelheid $\bar{u}$ is en de variatie daaromheen *u'* (bijv. aan het oppervlak is de stroomsnelheid groter dan bij de bodem; *u'* is dus geen turbulente fluctuatie) volgt:

$$K \sim \overline{u'^2} \tag{3.2}$$

waarbij de middeling over de diepte of de breedte wordt aangegeven met de horizontale streep. *K* is dus groot als de snelheidsvariatie *u'* in het profiel groot is.

De dispersiecoëfficiënt is ook evenredig met de tijd die nodig is om de opgeloste stof (het aanwezige zout) te mengen over de diepte of de breedte (T_c). Als deze mengtijd groot is, kan een vloeistofpakketje met een bepaalde concentratie een grote afstand afleggen (de mengweglengte) voordat het zijn eigenschappen, i.e. de concentratie, verliest aan de omgeving. De dispersiecoëfficiënt is in dat geval groot. *K* is dus ook evenredig met T_c:

$$K \sim T_c \tag{3.3}$$

Omdat de mengtijd kan worden geschreven als:

$$T_c = \frac{L^2}{\varepsilon} \tag{3.4}$$

met *L* een zekere lengteschaal en ε de turbulente mengingscoëfficiënt volgt:

$$K \sim \overline{u'^2} T_c \sim \overline{u'^2} \frac{L^2}{\varepsilon} \tag{3.5}$$

In het geval van een stroming met snelheidsverschillen in het verticale vlak is de lengteschaal *L* gelijk aan de waterdiepte en is ε de verticale diffusiecoëfficiënt. In de praktijk blijkt dat de snelheidsverschillen in breedterichting bepalend zijn voor de grootte van *K*. *L* is dan gelijk aan de halve breedte als het dwarsprofiel symmetrisch is of gelijk aan de totale breedte bij een asymmetrisch profiel (Fischer et al., 1979). In de literatuur zijn diverse empirische vergelijking beschikbaar die de dispersiecoëfficiënt *K* voorspellen voor rivieren (stationaire stroming) gebaseerd op de algemene vorm van vgl. (3.5), zie Bijlage C.

Voor een oscillerende stroming, bijvoorbeeld de getijdestroming, speelt de verhouding tussen de getijperiode *T* en de mengtijd T_c een rol voor de grootte van *K*. In Bijlage B wordt uiteengezet, dat de dispersiecoëfficiënt onder getijcondities kleiner is dan die voor stationaire stroming.

3.2 Modellering: dispersievergelijking

De dispersievergelijking van Thatcher-Harleman (1972) geeft de dispersiecoëfficiënt voor twee van de in Par. 3.1 beschreven processen: 'shear dispersion' (f_3-term, zie ook Bijlage A) en verticale gravitatiecirculatie (f_4-term):

$$K(x,t) = f_1 + f_3 \frac{\sqrt{g}}{C}\left|u(x,t)\right| d(x,t) + \mathrm{f}_4 \frac{u_0^*}{S_0^*} L^2 \left(\frac{\Delta\rho_0}{\rho} \frac{g d_0}{u_0^2} \frac{Q_f T}{P_T} \right)^{\frac{1}{4}} \left\langle \frac{S(x,t)}{S_0(x,t)} \frac{\partial S(x,t)}{\partial x} \right\rangle \quad (3.6)$$

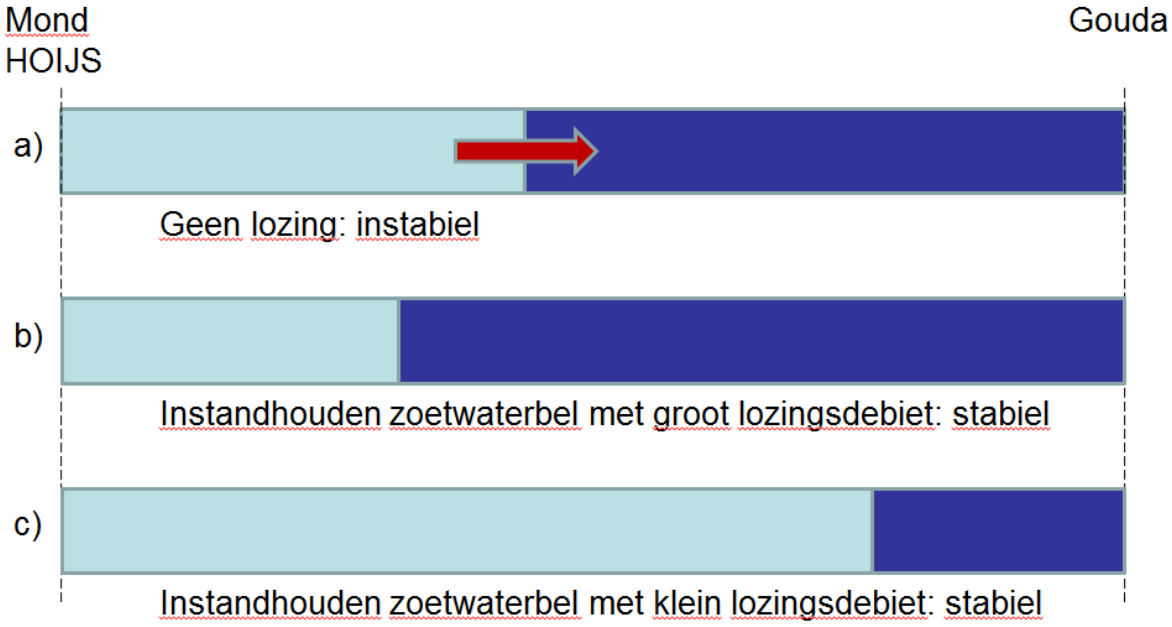
Hierin is *g* de gravitatieversnelling, *C* de Chézy-ruwheid, *u(x,t)* de profielgemiddelde stroomsnelheid in *x* op tijdstip *t*, *d(x,t)* de waterdiepte, u_0^* de karakteristieke stroomsnelheid in de mond, S_0^* de (constante) referentie saliniteit in de mond, *L* de estuariumlengte, $\Delta\rho$ het dichtheidsverschil tussen het zeewater en het rivierwater, ρ de dichtheid van het rivierwater, u_0 de maximale stroomsnelheid in de mond, Q_f de rivierafvoer, *T* de getijperiode, P_T het vloedvolume, *S(x,t)* de saliniteit, $S_0(x,t)$ de (tijdsafhankelijke) referentie saliniteit in de mond en f_3 en f_4 dimensieloze constanten. De haken < > hebben betrekking op een tijdsmiddeling over 2 getijperioden. De f_3-term wordt op elk tijdstip *t* berekend, terwijl de f_4-term een tijdsgemiddelde waarde betreft over 2 getijperioden.

Vergelijking (3.6) vormde onderdeel van SOBEK-RE en wordt momenteel ook in SOBEK-3 geïmplementeerd. De vergelijking is niet helemaal conform de oorspronkelijke vergelijking van Thatcher-Harleman. In een eerder model van Rijkswaterstaat (ZWENDL) is de term $\frac{S(x,t)}{S_0(x,t)}$ toegevoegd om een te grote zoutindringing te reduceren (Rijkswaterstaat, 1984). Verder geldt, dat slechts een tweetal processen met de vergelijking wordt beschreven. In SOBEK is het mogelijk om eventueel extra dispersie te specificeren met een constante (f_1-term).

Als verzilting van de Hollandsche IJssel optreedt kunnen voor het gebruik van vgl. (3.6) de volgende situaties worden onderscheiden:

1 *Situatie zonder lozingen en onttrekkingen*. In dit geval is er geen netto afvoer van water en de f_4-term is gelijk aan nul. *K* kan worden gespecificeerd via de f_1-term als deze bijvoorbeeld is bepaald uit metingen. Deze aanpak is niet voorspellend, omdat bij een ingreep *K* kan veranderen. *K* kan ook worden bepaald met de f_3-term maar dit betreft dan alleen 'shear dispersion'. Als f_3 bekend is ($f_3 \approx 60$, zie Bijlage A) kan *K* als functie van *x* worden bepaald, welke nadert tot nul achterin de Hollandsche IJssel. De f_3-term is dus voorspellend maar alleen voor 'shear dispersion'.
2 *Situatie met lozingen en onttrekkingen*. Als er een netto lozing van water plaatsvindt op de Hollandsche IJssel, bijvoorbeeld voor het in stand houden van een zoetwaterbel, zal de dispersie toenemen door de f_4-term. Er is dan feitelijk sprake van een estuarium met een rivierafvoer en een bijbehorende zoutgradiënt. Als het lozingsdebiet toeneemt zal de zoutindringing afnemen. Het effect van de grootte van het lozingsdebiet op *K* wordt beschreven met de f_4-term zodat in principe scenario's met een voorspellend karakter kunnen worden uitgevoerd.

Het voorgaande is schematisch weergegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Verzilting Hollandsche IJssel. a: geen lozing. Voortschrijdend zoutfront. b en c: stabiele zoutverdeling als gevolg van respectievelijk een groot en klein lozingsdebiet.

Tijdens de uitgevoerde zoutmetingen in november 2015 werd nagenoeg niet geloosd op en onttrokken aan de Hollandsche IJssel, zodat sprake was van situatie a in Figuur 3.1 (voortschrijdend zoutfront). In de volgende paragraaf zal ten behoeve van het systeeminzicht het tijdsafhankelijke gedrag van de zoutverdeling analytisch worden beschreven.

3.3 Dispersie van een tracer

Verondersteld wordt dat de tracer, in dit geval een mengsel van zoutionen, geen effect heeft op de waterbeweging, m.a.w. de aanwezigheid van zout heeft geen invloed op de dichtheid van het water. Als op het tijdstip $t = 0$ de zoutconcentratie gelijk aan nul is voor $x > 0$ en de zoutconcentratie op de rand plotseling wordt vergroot tot c_0 dan volgt voor de tijds- en plaatsafhankelijke zoutconcentratie $c(x,t)$ (Fischer et al., 1979):

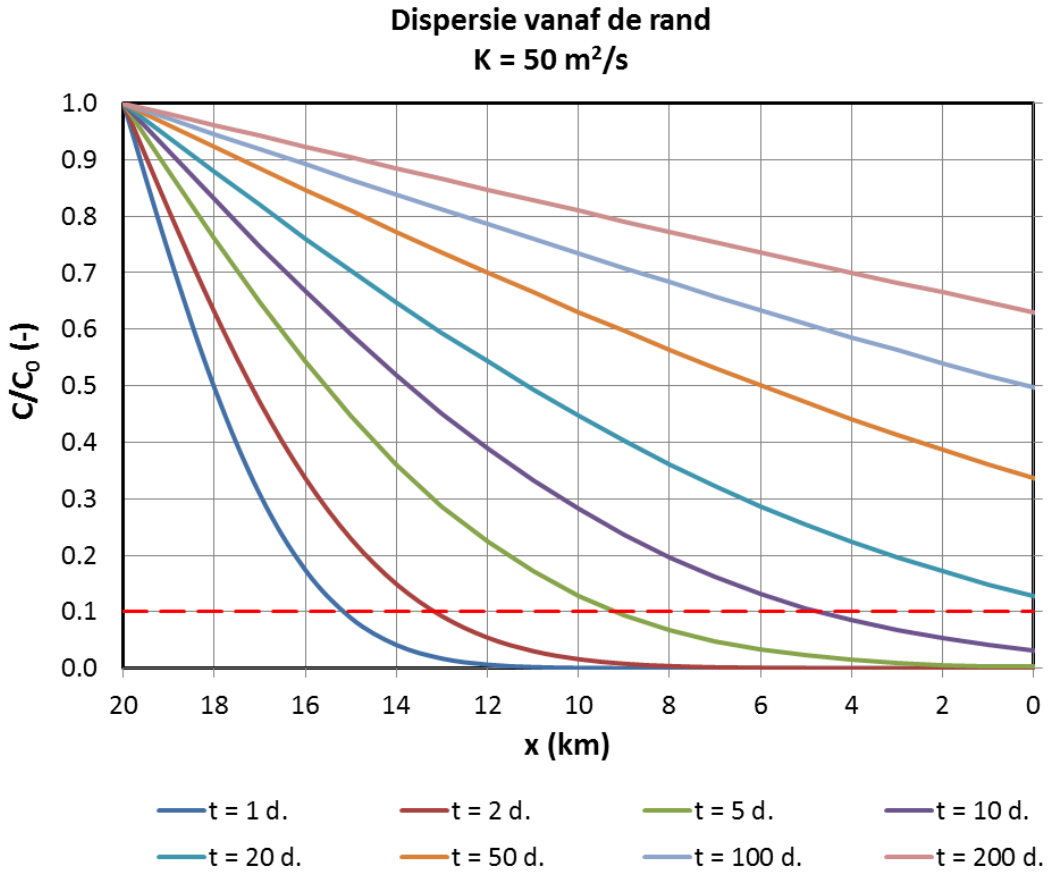
$$\frac{c}{c_0} = 1 - erf\left(\frac{x}{\sqrt{4Kt}}\right) \tag{3.7a}$$

Hierin is *erf* de 'error' functie gedefinieerd als:

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \tag{3.7b}$$

Hierbij is verder aangenomen dat het domein zich oneindig ver uitstrekt in de positieve x-richting (er is geen fysieke begrenzing). Verder wordt de dispersiecoëfficiënt constant verondersteld, d.i. onafhankelijk van de tijd t en de plaats x.

De concentratieverdeling langs een rivier met een lengte van 20 km (gelijk aan die voor de Hollandsche IJssel) is op verschillende tijdstippen weergegeven in Figuur 3.2 voor K = 50 m^2/s.



Figuur 3.2 Concentratieverdeling langs een riviertak met lengte 20 km op verschillende tijdstippen. Op t = 0 is de concentratie op de rand (x = 20 km) plotseling verhoogd tot c_0. De snijpunten van de rode lijn met de curves geven de positie van het front met $c_f/c0$ = 0,1 weer op verschillende tijdstippen. cf is de concentratie van het front; c_0 is de concentratie in de monding.

Uit de figuur kan de positie van een "front"[3] met bijvoorbeeld c_f/c_0 = 0,1 op de verschillende tijdstippen worden afgelezen (snijpunten van de rode lijn met de curves). Waargenomen kan worden dat de snelheid van het front afneemt in de tijd (de tijdstippen van de getoonde lijnen zijn niet equidistant). Ook blijkt dat een front met een grotere relatieve concentratie c_f/c_0 zich langzamer voortplant. De positie x van het front op tijdstip t volgt uit vgl. (3.7a):

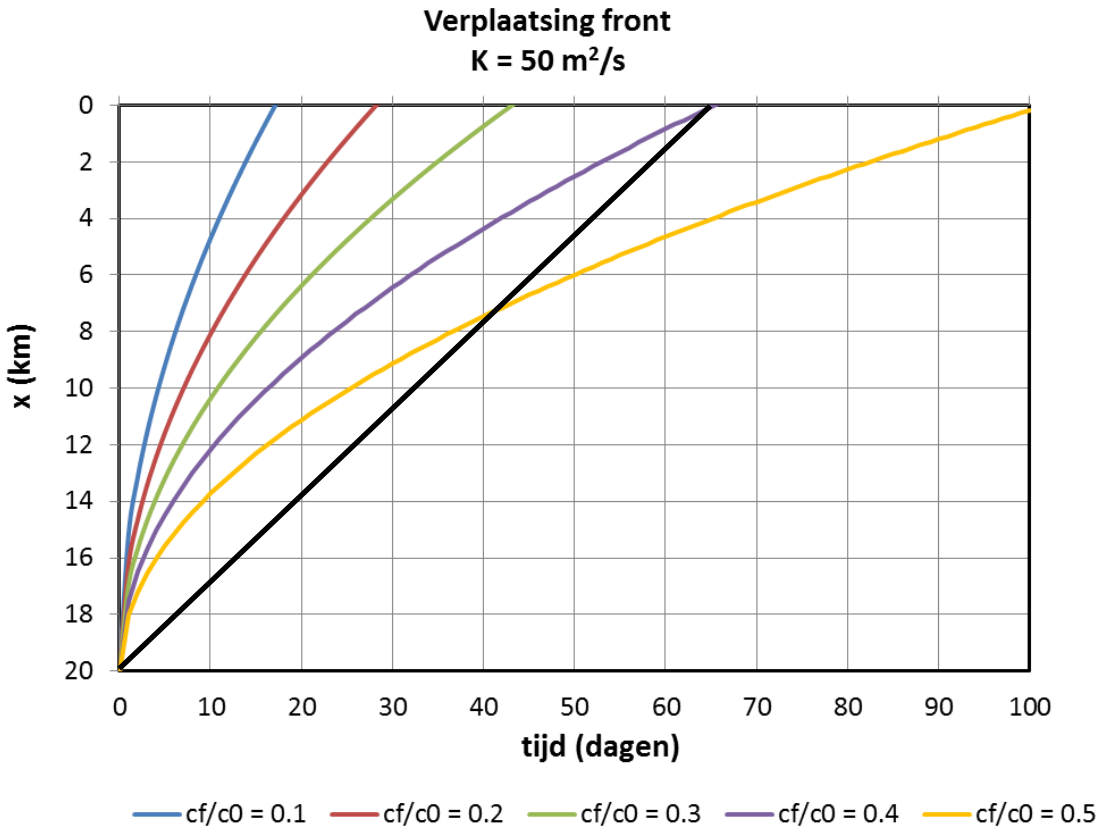
$$\frac{x}{\sqrt{4Kt}} = erfinv\left(1-\frac{c_f}{c_0}\right) = \alpha \qquad (3.8)$$

waarbij *erfinv* de inverse 'error' functie is. Het front met de gekozen concentratie c_f/c_0 bereikt locatie x op tijdstip t volgens:

[3] *Hier wordt de concentratie op een bepaalde plaats x met "front" aangeduid. In werkelijkheid is er geen plotselinge verandering van de concentratie maar varieert de concentratie geleidelijk in de ruimte, zie Figuur 3.2.*

$$x = 2\alpha\sqrt{Kt} \tag{3.9}$$

Vgl. (3.9) is weergegeven in Figuur 3.3 voor verschillende waarden van c_f/c_0.



Figuur 3.3 Verplaatsing van het zoutfront met concentratie c_f voor verschillende waarden van c_f/c_0. De helling van de zwarte lijn is de gemiddelde verplaatsingssnelheid tussen x = 20 km en x = 0 km voor c_f/c_0 = 0,4. c_f is de concentratie van het front; c0 is de concentratie in de monding.

Uit de figuur kan eveneens worden afgelezen dat het front met een lage relatieve concentratie sneller verplaatst dan een front met een hogere relatieve concentratie (zie ook Figuur 3.2). De tijdschaal voor het dispersieve transport varieert tussen 15 dagen (c_f/c_0 = 0,1) en 100 dagen (c_f/c_0 = 0,5) als voor de lengteschaal 20 km wordt aangehouden en K = 50 m^2/s. De tijdschaal voor dispersie hangt dus ook af van de relatieve concentratie van het front dat wordt gevolgd. Bij een lozing van 10 m^3/s is de tijdschaal voor het advectieve transport over een lengte van 20 km 15 dagen bij een gemiddelde waterdiepte van 4,5 m en een gemiddelde breedte van 135 m. Voor grotere lozingsdebieten is de tijdschaal evenredig kleiner.

De snelheid waarmee een front met relatieve concentratie c/c_0 verplaatst, volgt door met vgl. (3.9) de tijdsafgeleide te bepalen:

$$u_{front} = \frac{dx}{dt} = \frac{\alpha K}{\sqrt{Kt}} \tag{3.10a}$$

Met vgl. (3.9) kan vgl. (3.10a) ook worden geschreven als:

$$u_{front} = \frac{2\alpha^2 K}{x} \tag{3.10b}$$

Met $x = L$ volgt uit vgl. (3.10b) de snelheid van het front (u_{front}) met relatieve concentratie c_f/c_0 (gegeven door α) aan het eind van de riviertak. Door aan het eind van de riviertak een netto lozingsdebiet in te stellen ter grootte van $Q_{lozing} = Bhu_{front}$ met B de rivierbreedte en h de waterdiepte kan het front worden tegengehouden. Om een front met een lagere relatieve concentratie tegen te houden is een groter debiet nodig; voor fronten met een hogere relatieve concentratie juist een lager debiet. Deze benadering beschrijft dus niet een situatie met een zoutverdeling die in evenwicht is, want voor elk front moet een verschillend debiet worden ingesteld. De methode is wel inzichtelijk om de verplaatsing van een zoutfront ten gevolge van dispersie te vertalen in een debiet. De evenwichtssituatie ('steady state') kan echter eenvoudig worden gevonden met de transportvergelijking, waarbij geldt dat in elke doorsnede het advectief transport gelijk is aan het dispersief transport:

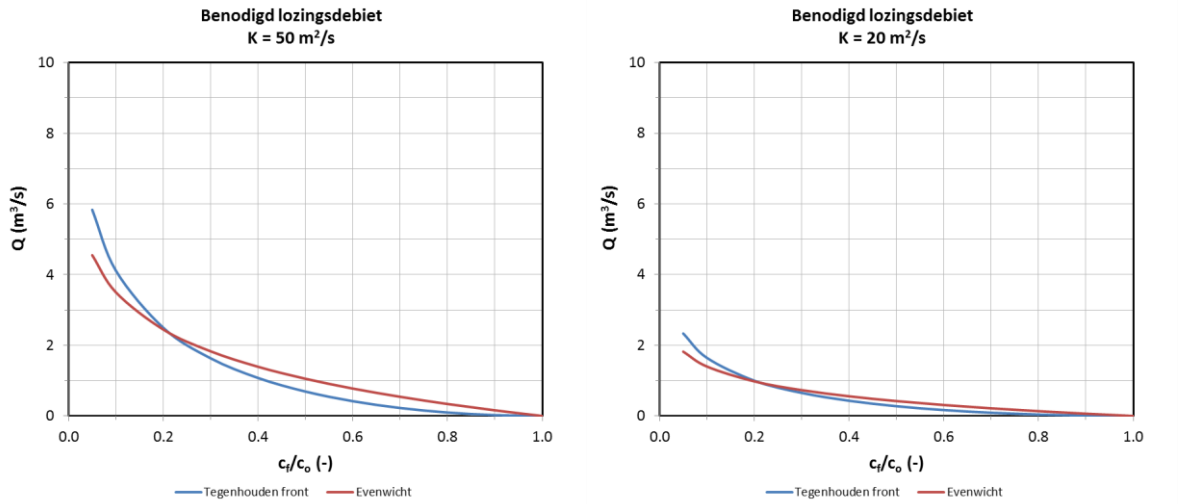
$$\bar{u}\,\bar{c} = -K\frac{d\bar{c}}{dx} \tag{3.11}$$

met $\bar{u}$ de profielgemiddelde snelheid en $\bar{c}$ de profielgemiddelde chlorideconcentratie. Als de dispersiecoëfficiënt K constant wordt verondersteld (onafhankelijk van de locatie x) volgt:

$$Q_{lozing} = \frac{BhK}{L}\ln\left(\frac{c_0}{c}\right) \tag{3.12}$$

In deze situatie reikt het front met relatieve concentratie c_f/c_0 tot $x = L$.

In Figuur 3.4 wordt de relatie tussen c_f/c_0 en het lozingsdebiet gegeven volgens beide benaderingen ('Tegenhouden front' en 'Evenwicht') en voor K = 50 en 20 m^2/s. Voor c/c_0 = 0,1 is het benodigde lozingsdebiet 4 m^3/s als K = 50 m^2/s. Voor K = 20 m^2/s is het benodigde lozingsdebiet een factor 2,5 kleiner (1,5 m^3/s). Dit geeft aan dat inzicht in de grootte van de dispersiecoëfficiënt nodig is om tot een betrouwbare schatting van het benodigde lozingsdebiet te komen.



Figuur 3.4 Benodigd lozingsdebiet om te voorkomen dat het front met relatieve concentratie c_f/c0 locatie x = L bereikt. L = 20 km, Breedte W = 135 m en waterdiepte d = 4,5 m. Links: K = 50 m²/s, rechts: K = 20 m²/s. c_f is de concentratie van het front; c0 is de concentratie in de monding.

In het algemeen zal bij de inname van water sprake zijn van een absolute norm, bijvoorbeeld de chlorideconcentratie in Gouda mag Δc toenemen of, omdat in deze analyse de achtergrondconcentratie nul is verondersteld, de concentratie mag slechts c_{norm} bedragen. Voor een grote c_0 is c_{norm}/c_0 klein en is dus een groter compenserend debiet nodig dan bij een kleine c_0. Dit is ook wat intuïtief wordt verwacht.

Bij het voorgaande is het effect van zout op de dichtheid van het water buiten beschouwing gebleven. Door een verschil in dichtheid tussen de mond (verzilt) en achterin de riviertak zal een dichtheidsstroming ontstaan. Als de zoutverticaal niet volledig gemengd is, resulteert dit in een netto zouttransport in opwaartse richting. De dispersiecoëfficiënt zal hierdoor groter worden. Verder zal bij het instellen van een lozingsdebiet de dispersiecoëfficiënt ook groter worden, waardoor het directe effect van de lozing (toename van het advectieve transport in de richting van de mond) voor een deel wordt tegengegaan. Het effect van het netto lozingsdebiet op *K* wordt beschreven door de f4-term in vgl. (3.6). Bij de uitvoering van scenario-berekeningen naar de effecten van het lozingsdebiet mag *K* dus niet onveranderlijk worden verondersteld.

Ten slotte kan worden verondersteld dat de dispersie als gevolg van een aantal processen, bijvoorbeeld ‘shear dispersion’, kleiner wordt in de richting van Gouda omdat de getijsnelheid in deze richting afneemt. Deze afname wordt voor ‘shear dispersion’ beschreven door de f3-term in vgl. (3.6); voor andere dispersiemechanismen is dit niet het geval omdat deze niet door vgl. (3.6) worden beschreven.

3.4 Samenvatting

1 De dispersieformulering van Thatcher-Harleman, zoals die ook in SOBEK is geïmplementeerd, beschrijft alleen de dispersie als gevolg van snelheidsverschillen in de dwarsdoorsnede (‘shear dispersion’) en de dispersie ten gevolge van verticale gravitatiecirculatie. De formulering kan worden gebruikt in *voorspellende* zin bij de uitvoering van scenario’s maar alleen voor de genoemde processen. Andere factoren die van invloed kunnen zijn op de dispersie, zoals ‘tidal straining’, oever-

onregelmatigheden, berging in kribvakken en dode takken (havens), bochten etc. worden niet door de formulering beschreven. Wel kan door 'expert judgement' of anders een dispersiecoëfficiënt worden geschat maar dan moet bij de uitvoering van scenario's de waarde in de nieuwe situatie worden opgegeven.

3 Ondanks de aannamen die zijn gedaan geeft de analytische benadering inzicht in de wijze waarop het zoutfont zich verplaatst. Het front met een lage relatieve concentratie c_f/c_0 verplaatst zich snel in vergelijking met het front met een grotere relatieve concentratie.

4 Bij een grotere randconcentratie c_0 is bij een gekozen c_f voor het zoutfront een groter compenserend debiet nodig.

5 De tijdschaal van het dispersieve transport voor een riviertak als de Hollandsche IJssel (lengte = 20 km) varieert tussen 15 en 100 dagen voor relatieve concentraties van het front van 0,1-0,5 en K = 50 m^2/s. De tijdschaal voor het advectieve transport is 15 dagen bij een lozing van 10 m^3/s.

6 De verplaatsingssnelheid van het zoutfront is evenredig met de dispersiecoëfficiënt K. De grootte van K moet dus bekend zijn om uitspraken te kunnen doen over de snelheid waarmee de Hollandsche IJssel ten gevolge van dispersief transport verzilt als de mond (permanent) verzilt.

7 Voor een uniforme dispersiecoëfficiënt K in de Hollandsche IJssel volgt dat het benodigde lozingsdebiet om te voorkomen dat het zoutfront Gouda bereikt orde 1 - 5 m^3/s bedraagt voor K = 20 – 50 m^2/s. Dit is een globale schatting omdat het effect van de lozing op de dichtheidsstromingen niet is meegenomen (de dispersie kan hierdoor toenemen). Ook de gehanteerde criteria spelen hierbij een rol, namelijk de grootte van c_f/c_0 van het front en de afstand waarover het zout de Hollandsche IJssel mag binnentrekken. Bij deze schatting is verondersteld dat de concentratie c_0 onveranderd blijft.

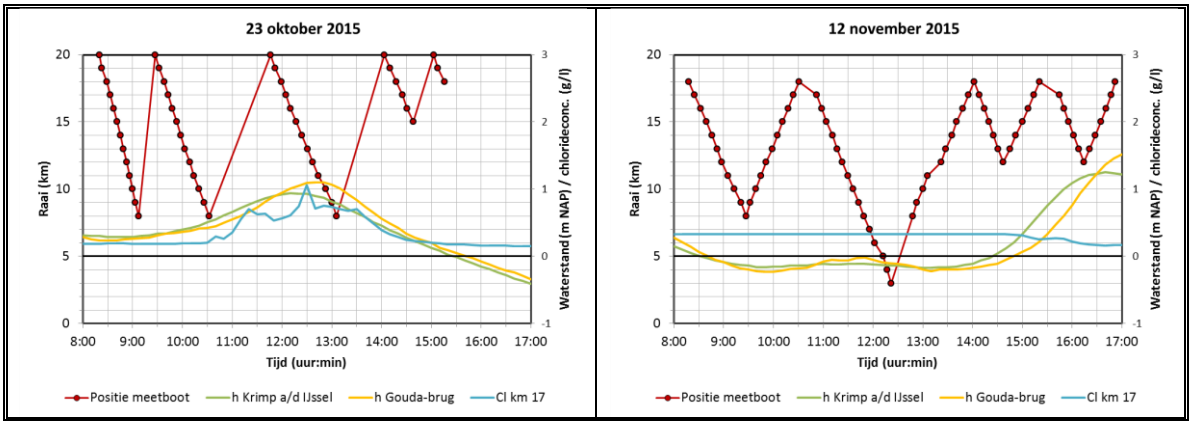
8 Bij het uitvoeren van scenarioberekeningen met variërende (netto) lozingsdebieten moet het effect van de debieten op de dispersiecoëfficiënt K worden meegenomen; K mag niet onveranderlijk worden verondersteld. Dit is in principe mogelijk met dispersievergelijking (3.6) aangezien deze het effect van een afvoer op de dispersie beschrijft (f_4-term).

9 De getijsnelheid langs de Hollandsche IJssel neemt af van de mond in de richting van Gouda. Hierdoor zal ook de 'shear dispersion' afnemen (f_3-term in vgl. (3.6)). Echter de dispersie ten gevolge van gravitatiecirculatie kan juist toenemen, omdat de getijsnelheid u_0 in de noemer van de f_4-term van vgl. (3.6) staat. In hoeverre dit tot een toename van de zoutflux in de richting van Gouda leidt hangt af van de gelaagdheid. Voor andere dispersieve processen is het minder duidelijk hoe deze van de getijsnelheid afhangen.

4 Metingen

Gedurende de periode oktober-november 2015 zijn op de Hollandsche IJssel zoutmetingen uitgevoerd in het kader van het '*Draaiboek metingen extra aanvoer via Waaiersluis*'. Het doel van de meetcampagne was om meetgegevens te verzamelen waarmee kan worden getoetst of extra aanvoer van water uit de Gekanaliseerde Hollandsche IJssel via de Waaiersluis een dreigende verzilting van het inlaatpunt boezemgemaal Gouda in de Hollandsche IJssel kan verminderen of volledig mitigeren (Aqua Vision, 2015). Door de waterschappen (Rijnland, Schieland & Krimpenerwaard en de Stichtse Rijnlanden) is de grootte van de lozingen en onttrekkingen langs de Hollandsche IJssel vastgelegd. Door Aqua Vision zijn geleidendheid en temperatuur gemeten in een aantal vaste meetpunten langs de Hollandsche IJssel (km. 17 t/m km. 8, elke kilometer). De meetsensoren bevonden zich ongeveer 1 meter boven de bodem. Daarnaast is gemeten vanaf een meetschip dat continu heen en weer voer tussen de mond van de Hollandsche IJssel en Gouda (of over kortere trajecten).

In figuur worden twee voorbeelden gegeven van de tijdstippen van de varende metingen en de positie van het meetschip (23 oktober en 12 november).



Figuur 4.1 Varende metingen: tijdstip van meting en positie langs de Hollandsche IJssel (rode symbolen) op 23 oktober 2015 en 12 november 2015. Ook de waterstand in Krimpen a/d IJssel en Gouda-brug en de chlorideconcentratie in km. 17 zijn vermeld.

De metingen van de sensors van Rijkswaterstaat in de vaste meetpunten (km. 12 t/m km. 8) bleken onbetrouwbaar en moesten na de meetcampagne gecorrigeerd worden aan de hand van de varende metingen. Dit geeft enige onzekerheid in de hierna beschreven analyse, omdat vooral de metingen opwaarts van km. 13 zijn gebruikt bij de afleiding van de dispersiecoëfficiënt.

Een overzicht van de metingen is opgenomen in Tabel 4.1. Voor verdere details wordt verwezen naar (Aqua Vision, 2015).

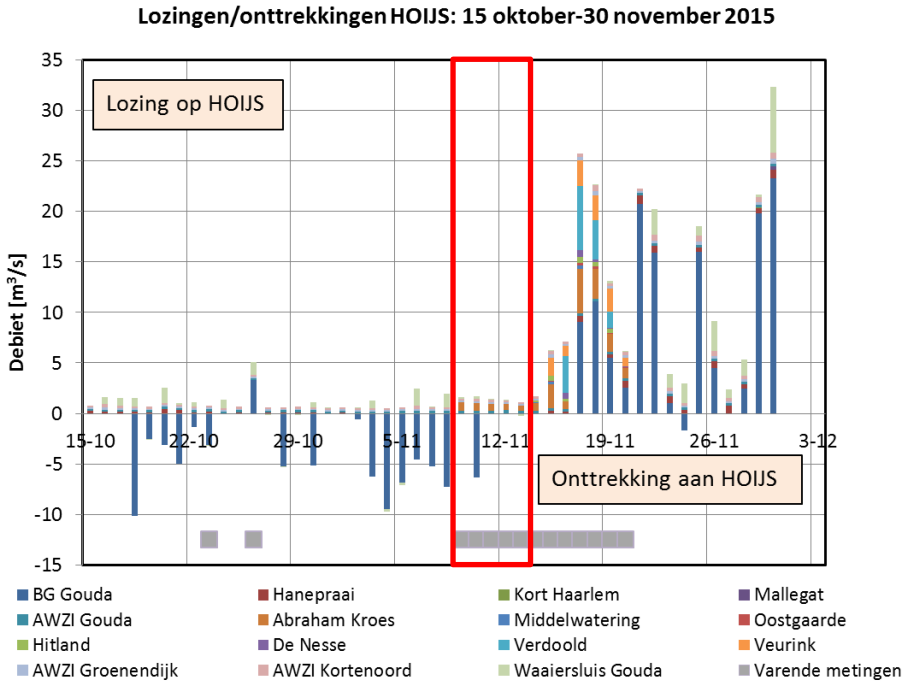
Tabel 4.1 Uitgevoerde metingen in de Hollandsche IJssel gedurende de periode 12 oktober t/m 30 november 2015.

Type	Periode	Traject	Type
Lozingen/onttrekkingen	15 okt. t/m 8 nov. en 21 t/m 30 nov. 2015 9 t/m 20 nov. 2015	8 locaties 15 locaties	volumes of debieten
Vaste metingen	12 okt. t/m 20 nov. 2015	km. 17 – km. 8: per km.	geleidendheid en temperatuur langs de oever en 1 m boven de bodem. Continu.
Varende metingen	23 en 26 okt. 2015 9 t/m 20 nov. 2015	km. 20 - km. 1 (of korter) per km.	geleidendheid en temperatuur in verticale profielen in midden van de rivier. Tussen 09:00 en 17:00 uur.

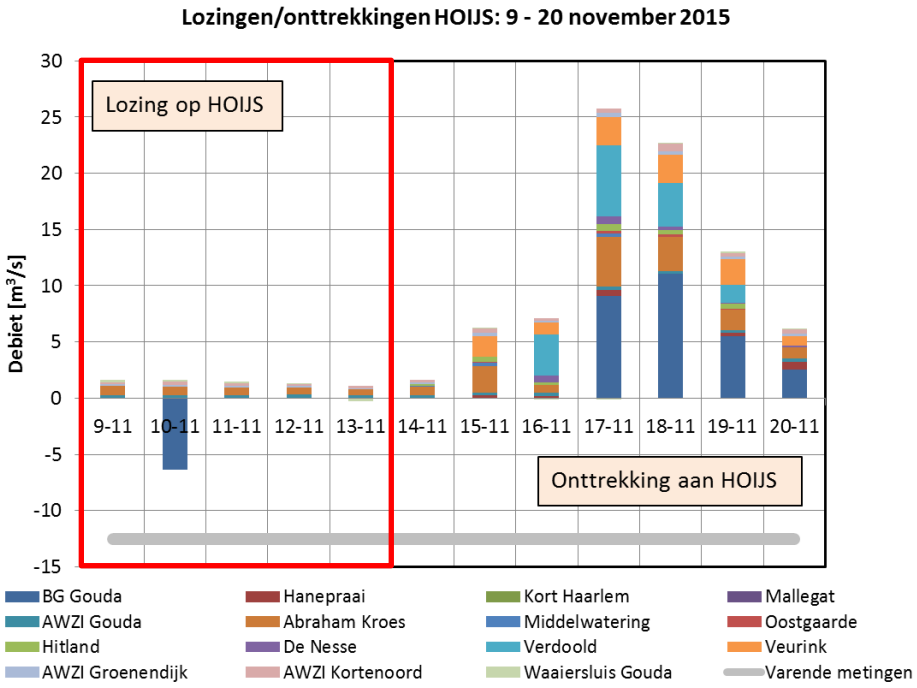
4.1 Lozingen en onttrekkingen

De grootte van de lozingen en onttrekkingen langs de Hollandsche IJssel voor de periode 15 oktober t/m 30 november 2015 is weergegeven in Figuur 4.2. In totaal betreft dit 15 locaties. Van de locaties Abraham Kroes, Middelwatering, Oostgaarde, Hitland, De Nesse, Verdoold en Veurink zijn alleen gegevens toegeleverd voor de periode 9 t/m 20 november 2015.

Vóór 15 november is er nauwelijks geloosd (< 2 m^3/s m.u.v. 26 oktober). In die periode is er wel regelmatig door het boezemgemaal Gouda tot 10 m^3/s onttrokken. Vanaf 15 november maakten de weersomstandigheden (hevige neerslag) het noodzakelijk om op diverse locaties te lozen op de Hollandsche IJssel. Van de periode met de varende metingen (9 t/m 20 november) resteert dus de periode 9 t/m 14 november voor een bepaling van de dispersiecoëfficiënt. Omdat op 14 november de varende metingen niet verder gingen dan tot km. 7 en er ook sprake was van een middenstandsopzet is deze dag evenmin gebruikt voor de analyse. De periode 9 t/m 13 november is in Figuur 4.2 rood omkaderd; Figuur 4.3 geeft meer in detail de lozingen en onttrekkingen weer (9 t/m 20 november).



Figuur 4.2 Lozingen op en onttrekkingen aan de Hollandsche IJssel. Periode: 15 oktober 2015 t/m 30 november 2015. De grijze balk geeft aan op welke meetdagen varend is gemeten in de Hollandsche IJssel. De gebruikte meetdagen voor de afleiding van de dispersiecoëfficiënt vallen binnen de rode rechthoek.

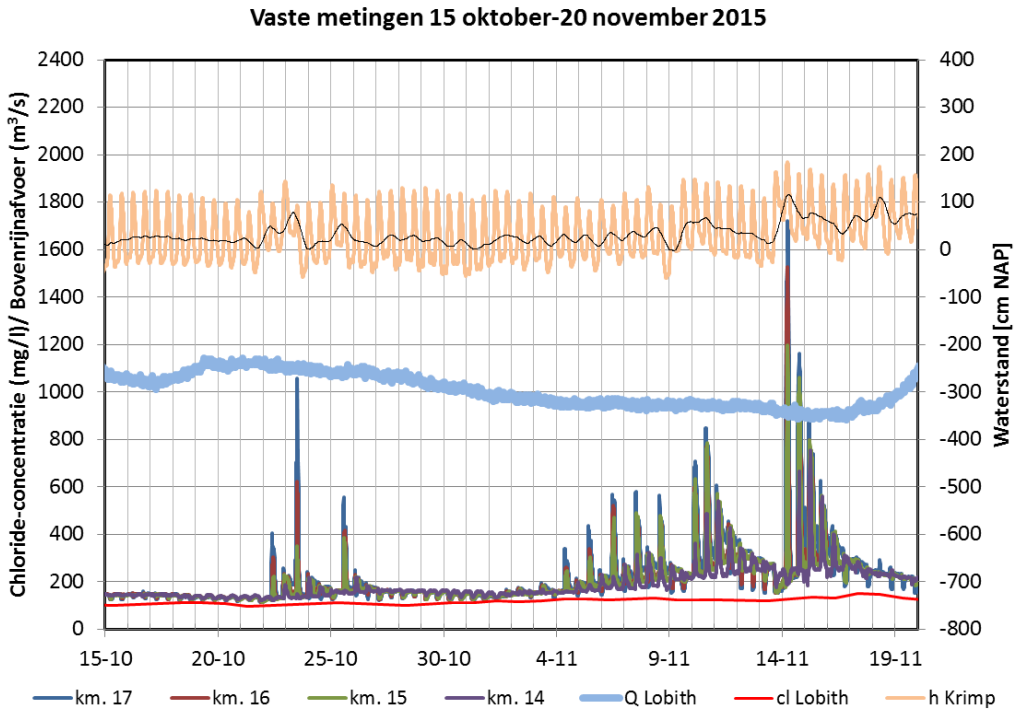


Figuur 4.3 Lozingen op en onttrekkingen aan de Hollandsche IJssel. Periode: 9 t/m 20 november 2015. De grijze balk geeft aan op welke meetdagen varend is gemeten in de Hollandsche IJssel. De gebruikte meetdagen voor de afleiding van de dispersiecoëfficiënt vallen binnen de rode rechthoek.

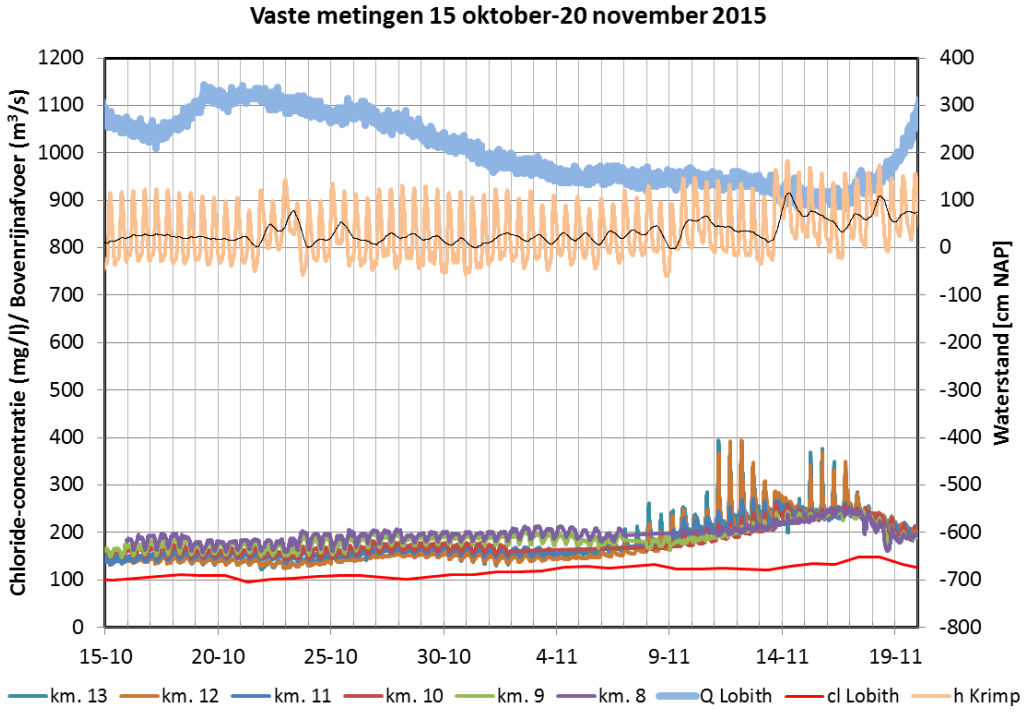
4.2 Chlorideconcentraties

4.2.1 Vaste metingen

De gemeten chlorideconcentraties in de vaste locaties gedurende de periode 15 oktober t/m 20 november 2015 zijn weergegeven in Figuur 4.4 (km. 17 t/m km. 14) en Figuur 4.5 (km. 13 t/m km. 8). In deze figuren zijn ook vermeld de Bovenrijnafvoer en de chlorideconcentratie bij Lobith en de waterstand bij Krimpen a/d IJssel. Vóór 4 november is er alleen sprake van verzilting van het afwaartse deel van de Hollandsche IJssel (tot km. 14) tussen 22 en 25 oktober. De pieken in de chlorideconcentratie (400-1000 mg/l) zijn het gevolg van middenstandsveranderingen; de Bovenrijnafvoer is 1100 m^3/s. Voorbij km. 14 is er geen toename van de chlorideconcentratie waarneembaar en de variatie van de zoutconcentratie is het gevolg van de eb- en vloedbeweging. De periode vóór 4 november is dus niet geschikt voor de afleiding van de dispersiecoëfficiënt. Vanaf 4 november treedt verzilting van de Hollandsche IJssel zeewaarts van km. 14 op; de Bovenrijnafvoer is dan gedaald tot ongeveer 950 m^3/s. Door een middenstandsverlaging neemt op 9 november de chlorideconcentratie af, weer gevolgd door een toename op 10 november als gevolg van een middenstandsverhoging en mogelijk ook door een onttrekking te Gouda op die dag (zie Figuur 4.3). Gedurende de dagen 11, 12 en 13 november neemt de chlorideconcentratie zeewaarts van km. 14 geleidelijk af. Op deze dagen wordt nauwelijks geloosd op de Hollandsche IJssel. Wel is er sprake van een geringe daling van de gemiddelde waterstand (0,5 m gedurende 3 dagen) wat kan hebben geleid tot een gemiddeld debiet naar de Nieuwe Maas van orde 5 m^3/s. Opwaarts van km. 14 wordt echter geen afname van de chlorideconcentraties waargenomen (Figuur 4.5) zodat het niet waarschijnlijk is dat de dalende waterstand verantwoordelijk is voor de afname van de chlorideconcentratie in de mond. Verondersteld wordt dat de uitwisseling van water met de Nieuwe Maas de afname van de zoutconcentratie in de mond veroorzaakt (uitstroming van relatief zout water en instroming van relatief zoet water). De middenstandsopzet op 14 november veroorzaakt een piek chlorideconcentratie van 1700 mg/l. De tweede piek op die dag is al lager (1200 mg/l) en tijdens de opvolgende 2-3 dagen (tot 17 november) neemt de chlorideconcentratie verder af. Dit is nog voordat wordt begonnen met lozingen van 20-25 m^3/s op 17 en 18 november. Verzilting opwaarts van km. 13 begint op 8 november.



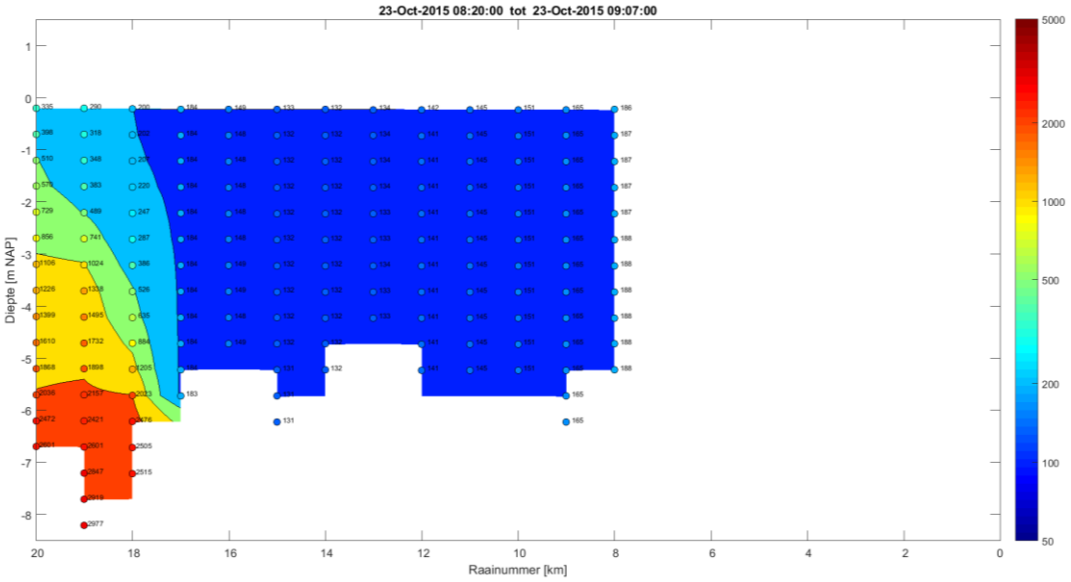
Figuur 4.4 Chlorideconcentraties in de vaste meetpunten km. 17 t/m km. 14. De Bovenrijnafvoer en chlorideconcentratie in Lobith en de waterstand in Krimpen a/d IJssel (met voortschrijdend gemiddelde) zijn eveneens weergegeven.



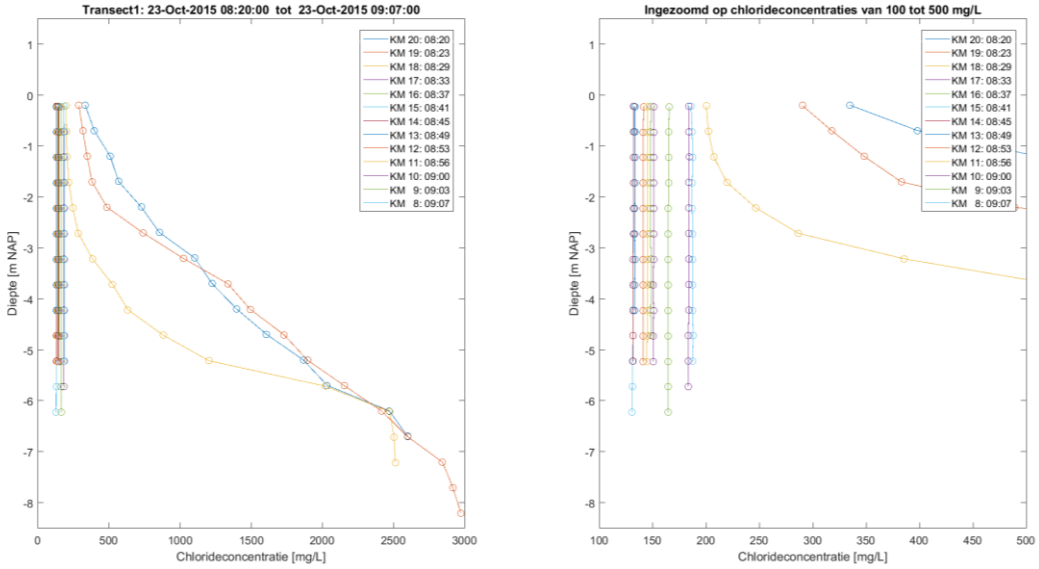
Figuur 4.5 Chlorideconcentraties in de vaste meetpunten km. 13 t/m km. 8. De Bovenrijnafvoer en chlorideconcentratie in Lobith en de waterstand in Krimpen a/d IJssel (met voortschrijdend gemiddelde) zijn eveneens weergegeven. De schaal voor de chlorideconcentratie verschilt van die in Figuur 4.4.

4.2.2 Varende metingen

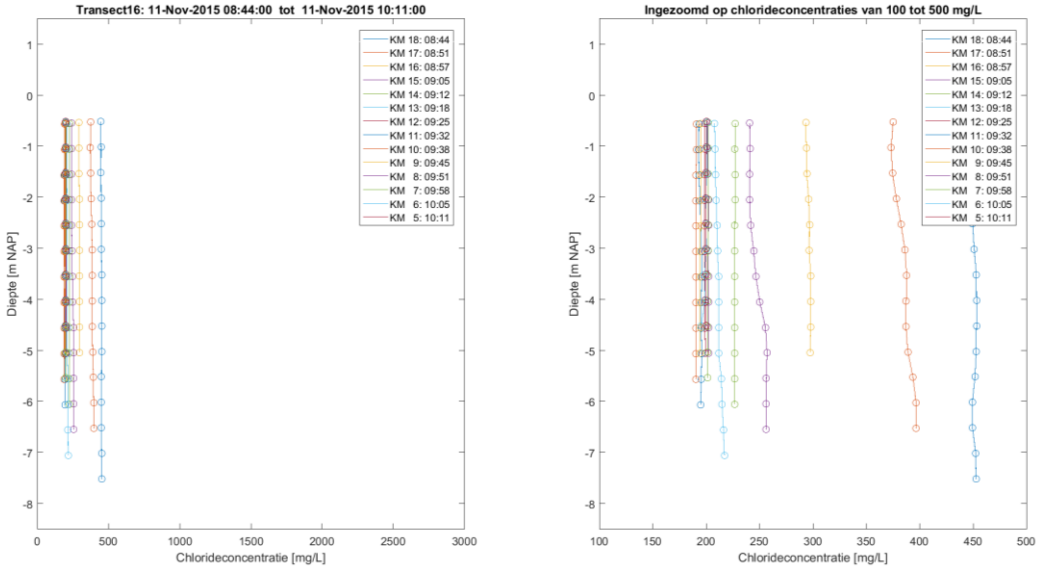
De varende metingen hebben een geringe temporele resolutie waar het chlorideconcentraties in een specifieke locatie betreft. Daarom lenen zij zich minder voor de kwantitatieve analyse in Hoofdstuk 5. Wel wordt met de metingen inzicht verkregen in de verticale en longitudinale verdeling van de concentraties. In Figuur 4.6 wordt deze verdeling getoond voor 23 oktober. De contourklassen zijn hier logaritmisch gekozen om voldoende resolutie te verkrijgen in het bereik met lage chlorideconcentraties. Op 23 oktober is de verticale zoutverdeling in de mond van de Hollandsche IJssel (km. 20 – km. 18: zeewaarts van de Stormvloedkering) sterk gelaagd met concentraties tot 3000 mg/l bij de bodem en 300 mg/l aan het oppervlak. Figuur 4.7 (linker venster) toont deze gelaagdheid. Vanaf km. 17 is de verticale zoutverdeling gemengd en de concentraties zijn kleiner dan 200 mg/l, zie rechter venster in Figuur 4.7. De sterke gelaagdheid en de hoge concentraties in de mond zijn mogelijk het gevolg van de middenstandsopzet op 23 oktober. Op 14 november (hier niet getoond) is de gelaagdheid en de chlorideconcentratie minder groot al is er op die dag niet gemeten in km. 20 en km. 19. De concentratieprofielen op 11 november 2015 in km. 18 en opwaarts hiervan zijn uniform.



Figuur 4.6 Longitudinale en verticale verdeling chlorideconcentratie. Periode: 23 oktober 2015 08:20 – 09:07. Contourklassen zijn logaritmisch.



Figuur 4.7 Verticale profielen van chlorideconcentratie in km. 20 - km. 8. Periode: 23 oktober 2015 08:20 – 09:07. Schaal horizontale as: 0-3000 mg/l (links) en 100-500 mg/l (rechts).



Figuur 4.8 Verticale profielen van chlorideconcentratie in km. 18 - km. 5. Periode: 11 november 2015 08:44 – 10:11. Schaal horizontale as: 0-3000 mg/l (links) en 100-500 mg/l (rechts).

4.3 Overige metingen en gegevens

Op de Hollandsche IJssel zijn met een ADCP ook stroomsnelheden gemeten. Deze zijn nog niet verwerkt en geanalyseerd. Ook zijn er in november 2015 door Havenbedrijf Rotterdam op de Lek en de Noord chlorideconcentraties gemeten.

4.4 Keuze meetdagen voor analyse

De periode 9 t/m 14 november 2015 is het meest geschikt voor de afleiding van de dispersiecoëfficiënt, omdat in die periode de grootte van de lozingen en onttrekkingen zeer

beperkt zijn geweest, zie Par. 4.1. Alleen op 10 november is er netto bijna 5 m^3/s water onttrokken aan de Hollandsche IJssel als totaal van een netto onttrekking door het boezemgemaal Gouda (6,4 m^3/s) en kleine lozingen elders (AWZI's Gouda, Groenendijk en Kortenoord, Abraham Kroes, en de Waaiersluis Gouda).

Opmerkingen bij de meetdagen tussen 9 en 20 november zijn vermeld in Tabel 4.2. Op 9 en 11 t/m 14 november waren de lozingen en onttrekkingen minimaal. In deze periode is op 10 t/m 13 november tot dichtbij Gouda varend gemeten. Op 9 en 10 november zijn er hiaten in de registraties van de vaste opnemers in km. 8. Op 9, 13 en 14 november waren er middenstandsvariaties. Dit heeft uiteindelijk geleid tot de keuze voor de meetdagen 9 t/m 13 november voor de afleiding van de dispersiecoëfficiënt. De minst verstoorde cq. meest geschikte meetdagen zijn 11 en 12 november.

Tabel 4.2 Opmerkingen bij de meetdagen. De groene cellen betreffen een positieve kwalificatie; de rode cellen een negatieve voor de afleiding van de dispersiecoëfficiënt.

	November 2015											
	9	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
Geen lozingen en onttrekkingen (totaal < 1m^3/s)												
Varende metingen tot km. 5 of verder	km 7	km 4	km 5	km 3	km 4	km 7	km 8	km 7	km 6	km 4	km 1	km 7
Hiaten vaste metingen	km 8	km 8					km 16	km 16	km 16	km 16	km 16	km 16
Onttrekking Gouda												
Lozingen diverse locaties												
Middenstands-opzet												
Gebruikte meetdagen voor analyse												
Minst verstoorde meetdagen												

De hiaten in de vaste metingen op 9 en 10 november in km. 8 zijn opgevuld met de varende metingen.

5 Analyse

5.1 Beschrijving verzilting mond Hollandsche IJssel

In Bijlage D wordt de verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel in detail beschreven. Dit wordt gedaan voor de periode 2 t/m 17 november 2015 aan de hand van gemeten chlorideconcentraties t.p.v. de van Brienenoordbrug (NAP-650 cm), Krimpen a/d IJssel (NAP-550 cm), km. 17 (1 m boven de bodem) en km. 12 (1 m boven de bodem). Gedurende deze periode is verzilting van de Hollandsche IJssel opgetreden als gevolg van de grote zoutindringing in de Nieuwe Maas bij lage Bovenrijnafvoeren en ten gevolg van middenstandsveranderingen (op- en afwaaiing). De resultaten worden in deze paragraaf samengevat.

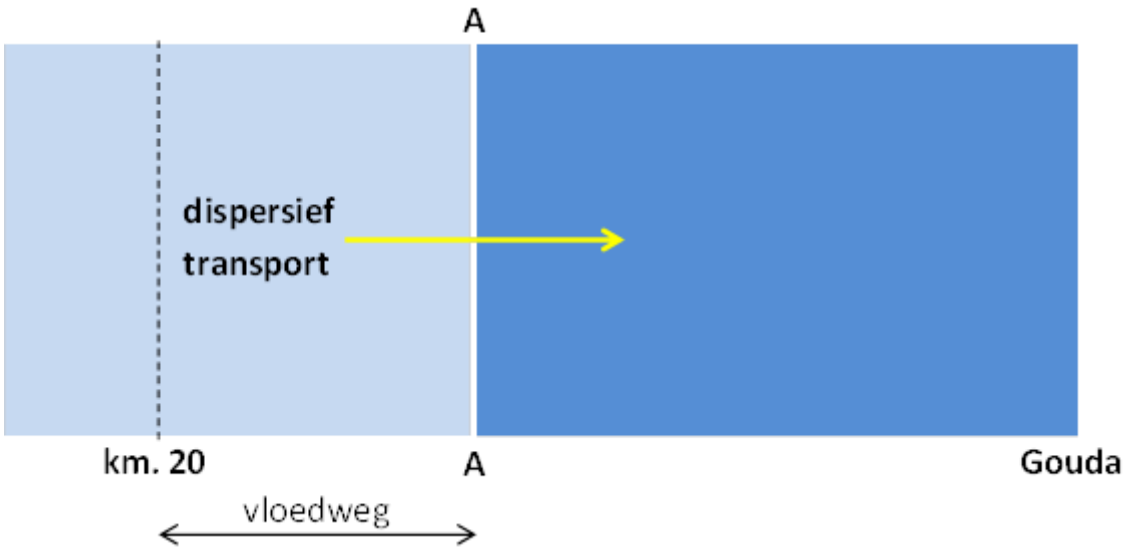
1 Direct na hoogwater begint de Hollandsche IJssel uit te stromen. In de Nieuwe Maas is er dan nog sprake van een vloedstroming. Als zout water in de Nieuwe Maas pas na hoogwater de Hollandsche IJssel bereikt treedt geen verzilting van de Hollandsche IJssel op.
2 Als direct na laagwater de Hollandsche IJssel begint in te stromen treedt vaak gedurende 1 uur een toename van de chlorideconcentratie op in Krimpen en even later in km. 17. Vermoed wordt dat de mond van de Hollandsche IJssel tijdens de (lange) periode met laagwater verzilt raakt. Dit is het geval als de Bovenrijnafvoer zo laag is dat er rond laagwater nog verzilt water in de Nieuwe Maas richting zee passeert (rond laagwater is er nog een ebstroming in de Nieuwe Maas).
3 De in punt 2 beschreven verziltingskarakteristiek treedt bij lage afvoeren niet elke getijperiode op. De grootte van de chlorideconcentratie, zoals gemeten bij de van Brienenoordbrug, lijkt hierbij bepalend. Als deze tijdens laag water laag cq. hoog is treedt geen cq. wel verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel op. De dagelijkse ongelijkheid lijkt hierbij een beïnvloedende factor.
4 De “zoutprop” die volgens punt 2 de Hollandsche IJsel is ingestroomd, wordt na hoogwater weer richting Nieuwe Maas getransporteerd.
5 Omdat begin november gedurende het getij zout water in de mond van de Hollandsche IJssel heen en weer beweegt en er regelmatig (niet elke getijperiode) een “injectie” van verzilt water vanaf de Nieuwe Maas plaatsvindt, nemen de chlorideconcentraties in de mond van de Hollandsche IJssel langzaam toe. Dit leidt na verloop van tijd tot een geringe toename van de chlorideconcentratie in km. 12. Dat is voorbij de vloedweg en dus het gevolg van dispersief transport van zout.
6 De toename van de chlorideconcentratie in de mond van de Hollandsche IJssel ten gevolge van een middenstandsopzet kunnen veel groter zijn dan de toename zoals hiervoor beschreven voor rustige condities. Als het zout op de Nieuwe Maas tijdens een middenstandsopzet pas na hoogwater de Hollandsche IJssel bereikt treedt geen verzilting van de Hollandsche IJssel op. De komledigingsstroom is in staat het zoute water tegen te houden, zie ook punt 1.
7 Wel kan tijdens de *volgende* getijperiode sterke verzilting van de Hollandsche IJssel optreden. Als tijdens opgaand tij de Nieuwe Maas nog verzilt is, zal direct na laagwater de komvullingsstroom zout water de Hollandsche IJssel doen instromen. Tijdens afgaand tij zal het zoute water weer in de richting van de Nieuwe Maas worden getransporteerd maar door dispersief transport kan een deel van het zout achterblijven.
8 Als zout water pas laat tijdens de vloedstroming in de Nieuwe Maas de Hollandsche IJssel instroomt (d.i. vóór hoogwater), wordt het zoute water tijdens afgaand tij de

Hollandsche IJssel weer uitgespoeld. Een tijdelijke toename van de chlorideconcentratie in de mond leidt dan niet tot verzilting van Gouda.

Samenvattend geldt dat verzilting van de Hollandsche IJssel tot Gouda kan optreden als sprake is van permanente verzilting. De chlorideconcentratie in de mond is dan gedurende de gehele getijperiode verhoogd ten opzichte van de achtergrond waarde. Als de mond tijdelijk verzilt (de chlorideconcentratie is dan gedurende een deel van de getijperiode gelijk aan de achtergrond waarde) dan houdt dit in dat gedurende afgaand tij eerder ingestroomd verzilt water weer wordt uitgespoeld.

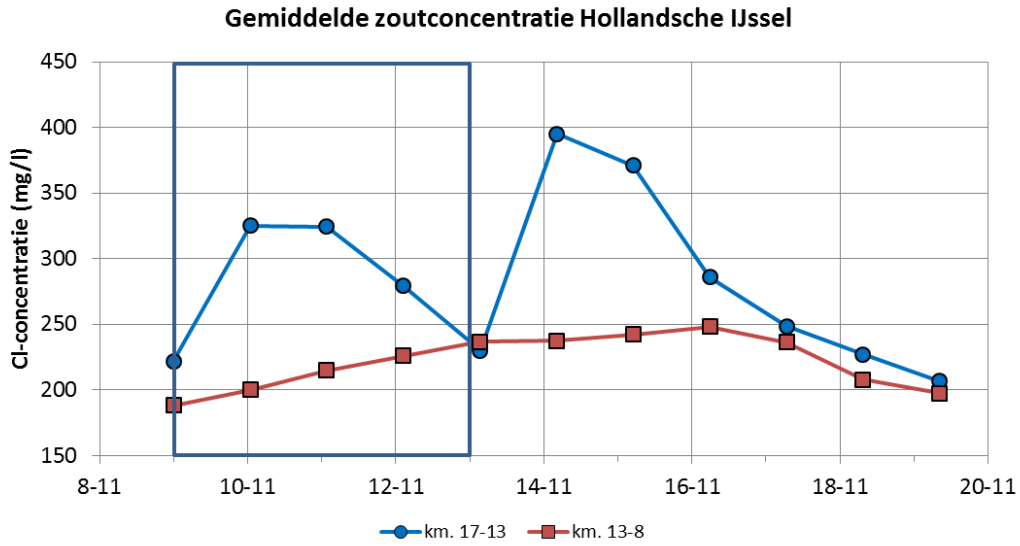
5.2 Afleiding dispersiecoëfficiënt

De dispersiecoëfficiënt wordt bepaald door een zoutbalans op te stellen voor het gebied voorbij de vloedweg in de mond, zie
Figuur 5.1. Zout afkomstig van de Nieuwe Maas kan ten gevolge van advectief transport niet verder komen dan de vloedweg. Dit betekent, dat de zoutconcentratie in het balansgebied voorbij de vloedweg alleen kan toenemen ten gevolge van dispersief transport door doorsnede A-A. In het gebied tussen km. 20 en doorsnede A-A wordt de chlorideconcentratie bepaald door de concentratie van het water dat bij opkomend tij vanuit de Nieuwe Maas de Hollandsche IJssel instroomt. Als de Bovenrijnafvoer daalt, neemt de chlorideconcentratie van het instromende water toe. Het gebied fungeert dus als randvoorwaarde voor het balansgebied.



Figuur 5.1 Principeschets zoutbalans voor afleiding van de dispersiecoëfficiënt K.

Figuur 5.2 laat de gemiddelde chlorideconcentratie voor de twee deelgebieden zien. Duidelijk is te zien dat het gebied tussen km. 17 en km. 13 sterk door de omgevingscondities wordt bepaald (Bovenrijnafvoer en middenstandsveranderingen). Voor het deelgebied tussen km. 13 en km. 8 is dit slechts indirect het geval en neemt de chlorideconcentratie geleidelijk toe als gevolg van dispersief transport vanuit het relatief zoute gebied tussen km. 17 en km. 13.



Figuur 5.2 Gemiddelde chlorideconcentratie per meetdag in de deelgebieden km. 17-13 en km. 13-8. De meetdagen die zijn gebruikt voor de zoutbalans zijn omlijnd.

De zoutbalans wordt opgesteld voor tijdsgemiddelde waarden van de chlorideconcentratie. Gekozen is voor een middelingsperiode van 2 getijden om het effect van de dagelijkse ongelijkheid weg te filteren. Ook wordt bij een langere middelingsperiode het effect van het niet volledig cyclisch zijn van het getij verminderd. Als er geen lozingen en onttrekkingen zijn en de opwaartse rand bij Gouda ligt waar het dispersief transport nul is, wordt de balansvergelijking:

$$A_{AA} K_{AA} \frac{d\tilde{c}_{AA}}{dx} = V \frac{d\tilde{c}_{gebied}}{dt} \qquad (5.1)$$

met A de oppervlakte van de dwarsdoorsnede in doorsnede AA, K de dispersiecoëfficiënt in doorsnede AA, $\tilde{c}_{AA}$ de chlorideconcentratie in doorsnede AA gemiddeld over 2 getijperioden (24 uur 50 min), $\tilde{c}_{gebied}$ de chlorideconcentratie gemiddeld over 2 getijperioden en vervolgens gemiddeld over de meetlocaties in het balansgebied, x de afstand langs de Hollandsche IJssel vanaf de mond (positief in de richting van Gouda), V het watervolume van het balansgebied en t de tijd.

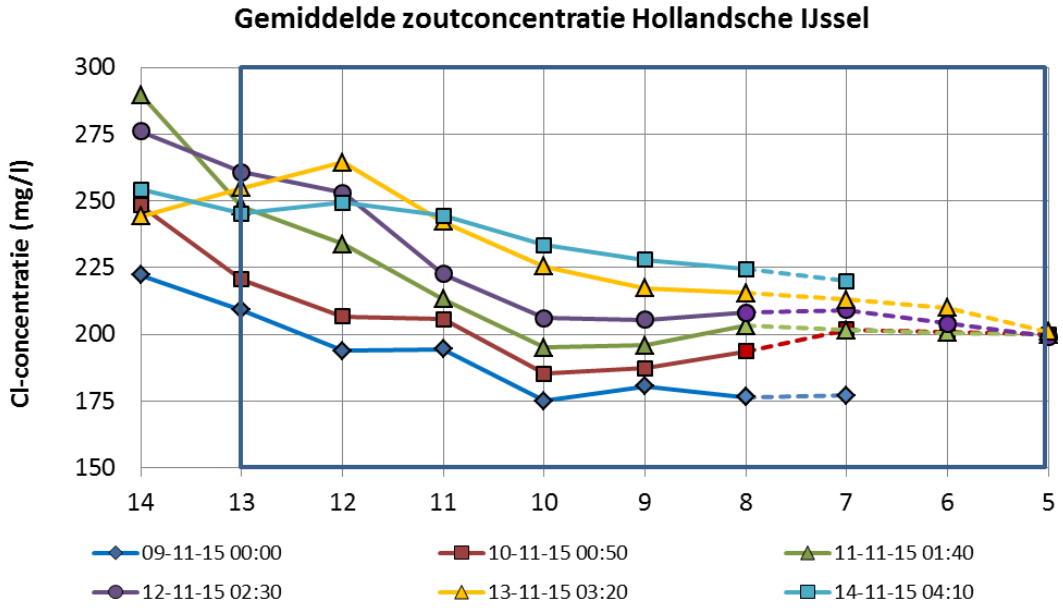
Voor de balansen zijn meerdere varianten beschouwd om het effect van onderliggende aannamen op de afgeleide dispersiecoëfficiënt vast te stellen:

- *Verschillende meetdagen.* De concentratieverandering van het balansgebied wordt steeds bepaald voor twee opeenvolgende meetdagen: 9/10, 10/11, 11/12 en 12/13 november. Op deze wijze wordt de invloed van de omgevingsomstandigheden vastgesteld. Middenstandsveranderingen kunnen een netto komvullingsdebiet tot gevolg hebben en dus tot een advectief zouttransport door de randen van het balansgebied leiden. Dit netto advectieve transport wordt niet meegenomen in de zoutbalans en leidt dus tot een onzekerheid in K.
- *Verschillende balansgebieden.* Met de vaste opnemers is gemeten t/m km. 8. De opwaartse rand van het balansgebied is dan niet gesloten: er is een dispersief transport en, indien geloosd of onttrokken wordt, ook advectief transport ter plaatse van de rand

(zie hierna). Als opwaartse rand van het balansgebied is gekozen voor km. 8 en km. 5. In het laatste geval zijn voor km. 7, 6 en 5 de chlorideconcentraties van de varende metingen gebruikt. Dit zijn slechts enkele metingen op een dag zodat in deze raaien de tijdsgemiddelde concentratie niet nauwkeurig kan worden bepaald. Ook de locatie van de afwaartse rand is gevarieerd (km. 13, 12 en 11).

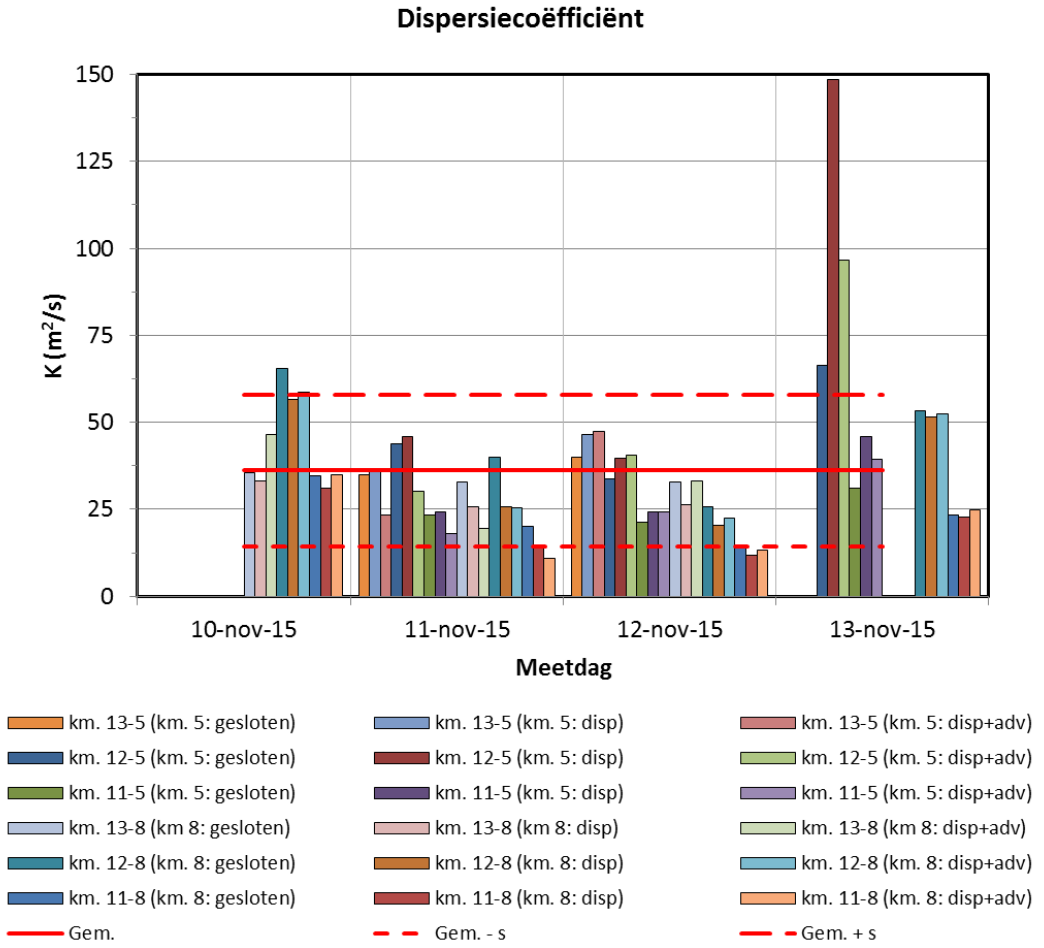
- *Verschillende randtransporten.* Er zijn verschillende typen transporten op de randen van het balansgebied gebruikt:
  - *a)* Op de benedenrand is er alleen een dispersief transport; de bovenrand van het balansgebied is gesloten verondersteld (geen transport). In dit geval hoeven geen aannamen te worden gedaan over het verloop van de dispersiecoëfficiënt langs de Hollandsche IJssel.
  - b) Op de bovenrand is er een dispersief transport waarbij de dispersiecoëfficiënt gelijk wordt verondersteld aan die op de benedenrand:de dispersiecoëfficiënt is onafhankelijk van de locatie langs de Hollandsche IJssel.
  - c) Op de beneden- en bovenrand is er een dispersief en een advectief transport. Het advectief transport is het gevolg van de lozingen op 9, 11, 12 en 13 november (1 m^3/s) en de netto onttrekking op 10 november (5 m^3/s). Voor het dispersief transport wordt verondersteld dat de dispersiecoëfficiënt lineair afneemt vanaf de benedenrand van het balansgebied tot 0 m^2/s bij de Waaiersluis (km. 0).

Als voorbeeld wordt in Figuur 5.3 het balansgebied km. 13 – km. 5 getoond met de tijdsgemiddelde chlorideconcentraties per km, zoals gemeten op de meetdagen 9 t/m 14 november 2015. De gemiddelde breedte en waterdiepte voor dit traject is resp. 141 m en 4,2 m. In de figuur is te zien dat op 9 november geen gegevens beschikbaar zijn in km. 6 en 5, zodat geen dispersiecoëfficiënt kan worden afgeleid. Op 13 november neemt de concentratie ter plaatse van de benedenrand af in zeewaartse richting wat tot onrealistisch waarden voor de dispersiecoëfficiënt leidt.



Figuur 5.3 Gemiddelde chlorideconcentratie voor het balansgebied km. 13 - km. 5 (blauwe rechthoek) op de meetdagen 9 t/m 14 november 2015. De gradiënt voor het dispersief transport in km. 13 is afgeleid uit de metingen in km. 14, 13 en 12; de gradiënt in km. 5 is afgeleid uit de metingen in km. 6 en 5. De gestippelde lijnen betreffen de chlorideconcentraties volgens de varende metingen.

De resultaten voor de dispersiecoëfficiënt, zoals afgeleid voor alle varianten, zijn weergegeven in Figuur 5.4.



Figuur 5.4 Berekende dispersiecoëfficiënten K voor de verschillende varianten. De getoonde waarden voor K op 10 november zijn bepaald met de metingen op 9 en 10 nov. etc.
gesloten: dispersief transport op zeewaartse rand; geen transport op landwaartse rand.
disp: dispersief transport op beide randen. K op beide randen hetzelfde verondersteld.
disp+adv: dispersief transport op beide randen. K lineair afnemend verondersteld tot Gouda. Advectief transport op beide randen t.g.v. lozingen/onttrekkingen.

De berekende dispersiecoëfficiënten variëren tussen 10 en 150 m^2/s met een gemiddelde van 36 m^2/s en een standaardafwijking van 22 m^2/s, zoals getoond in Figuur 5.4. Op 13 november zijn er twee uitschieters en ook andere varianten zijn buiten beschouwing gelaten, omdat deze tot onrealistische resultaten leidden (negatieve waarden voor *K*). Mogelijk is dit veroorzaakt door de middenstandsopzet op 13 november. Voor de meetdagen 10, 11 en 12 november varieert *K* tussen 10 en 65 m^2/s met een gemiddelde en standaardafwijking van 31 en 13 m^2/s.

5.3 Vergelijking met literatuur

In de literatuur zijn veel gegevens beschikbaar over de dispersiecoëfficiënt K_0 voor permanente rivierstroming. Ook zijn vergelijkingen afgeleid waarbij K_0 een functie is van de breedte-diepteverhouding van de rivier (W/h) en de verhouding tussen de profielgemiddelde stroomsnelheid en de schuifspanningssnelheid ($\bar{u}/u_*$), zie Bijlage C. Fischer et al. (1979) leiden af voor de dispersiecoëfficiënt voor een oscillerende stroming:

$$K = \gamma K_0 \tag{5.2a}$$

waarbij γ een functie is van de verhouding tussen de periode van de oscillerende stroming T en de mengingstijd in dwarsrichting T_c:

$$\gamma = f\left(\frac{T}{T_c}\right) \tag{5.2b}$$

Voor een getijstroming wordt afgeleid dat $\gamma < 1$, zie Bijlage B. Dit betekent, dat de dispersiecoëfficiënt K voor getijomstandigheden kleiner is dan de dispersiecoëfficiënt voor permanente rivierstroming K_0.

In Tabel 5.1 wordt K_0 getoond, zoals berekend met de voorspellers genoemd in Bijlage C. Hierbij zijn als karakteristieke waarden voor km. 13 gebruikt (zie Figuur 2.2, Figuur 2.3 en Figuur 2.11):

- breedte W = 150 m;
- waterdiepte h = 4,5 m
- gemiddelde stroomsnelheid $\bar{u}$ = 0,15 m/s;
- schuifspanningssnelheid u_* = 0,010 m/s (C = 45 m^{0,5}/s met $\bar{u}/u_* = C/\sqrt{g}$).

Tabel 5.1 K0 volgens dispersieformuleringen van Bijlage C met karakteristieke waarden halverwege de Hollandsche IJssel voor breedte, waterdiepte, gemiddelde stroomsnelheid en schuifspanningssnelheid.

Referentie	**K_0 (m^2/s)**
Liu (1977)	36
Iwasa & Aya (1991)	104
Koussis & Rodrigues (1998)	31
Fischer (1975)	119
Fischer (1979)	359
Seo & Cheong (1998)	110
Kashefipour & Falconer (2002)	105
Sahay & Dutta (2009)	76
Shahidi & Taghipour (2012)	54
Shahidi & Taghipour (2012)	46

Als de berekende K_0 volgens Fischer et al. (1979) buiten beschouwing wordt gelaten[4], volgt dat K_0 varieert tussen 30 en 120 m^2/s met als gemiddelde 76 m^2/s. De dispersiecoëfficiënt voor getijcondities zal volgens vgl. (5.2a) met $\gamma < 1$ dus kleiner zijn. In Bijlage B (Par. B.3) is K berekend met vgl. (5.2). Rekening houdend met de onzekerheid in de constante voor laterale menging volgen voor K waarden van 2-6 m^2/s.

Met de vergelijking van Thatcher-Harleman voor 'shear dispersion, zie Par. A.2, volgt K = 3 m^2/s. Hierbij zijn niet de momentane snelheid en waterdiepte gebruikt maar de getijgemiddelde waarden, resp. 0,15 m/s en 4,5 m.

5.4 Discussie

De 'shear dispersion' van maximaal orde 5 m^2/s volgens Fischer en Thatcher-Harleman verklaart maar een klein deel van de dispersiecoëfficiënt zoals bepaald uit de metingen, nl. 10-65 m^2/s. Dit kan het volgende betekenen:

- De vergelijkingen van Thatcher-Harleman en Fischer onderschatten de dispersie;
- De uit de metingen afgeleide waarden voor de dispersiecoëfficiënt geven een overschatting. In dat geval zou de ondergrens van het bereik voor K moeten worden aangehouden, nl. K = 10 m^2/s.
- Andere processen dragen bij aan dispersie. Dit kunnen zijn dispersie als gevolg van dichtheidsstromingen, dispersie door bochtstroming, onregelmatigheden langs de oever en bodem, dispersie door de aanwezigheid van kombergingsgebieden langs de rivier etc.

[4] *In Fischer (1975) worden andere keuzes gemaakt voor de lengteschaal waarover menging plaatsvindt (nl. 0,7W i.p.v. W) en de constante die afgeleid is van de vorm van het snelheids- en concentratieprofiel (0,07 i.p.v. 0,1), zie Par. B.2.*

Het is bekend dat andere dispersiemechanismen significant kunnen bijdragen aan de totale dispersie. Zo kan in principe de geringe lozing van 1 m^3/s tijdens de metingen geleid hebben tot een vergroting van de dispersiecoëfficiënt met 10-18 m^2/s, zie Par. B.3 voor een eerste globale schatting. Verder zijn er dispersieve processen die niet in een dispersieformulering als vgl. (3.6) zijn uitgedrukt, zoals de dispersie ten gevolge van bochten en doodwaterzones. Deze overige processen kunnen in een restterm worden ondergebracht, bijvoorbeeld de f1-term in vgl. (3.6).

6 Samenvatting, onzekerheden en aanbevelingen

6.1 Samenvatting

In dit rapport is achtereenvolgens ingegaan op: (i) de bepaling van de dispersiecoëfficiënt halverwege de Hollandsche IJssel op basis van uitgevoerde metingen in november 2015, (ii) een vertaalslag hiervan naar een lozingsdebiet als eerste grootte-orde schatting om de zoutindringing in de Hollandsche IJssel ten gevolge van dispersie te compenseren, (iii) de afzonderlijke bijdragen van dispersieve processen, (iv) het gebruik van voorspellende dispersieformuleringen en (v) tijdschalen van advectief en dispersief zouttransport

Afgeleide dispersiecoëfficiënt en grootte-orde compenserend debiet
Als op de Hollandsche IJssel sprake is van verzilting tot voorbij de vloedweg in de mond en er geen lozingen op en onttrekkingen aan de Hollandsche IJssel zijn, is de voortplanting van het zoutfront in de richting van Gouda het gevolg van dispersief transport. Dit transport kan worden tegengegaan door het instellen van een (netto) lozingsdebiet bij Gouda. De grootte van dit debiet wordt mede bepaald door de dispersiecoëfficiënt. Als deze coëfficiënt klein is, is het benodigde debiet voor de instandhouding van een stabiele situatie klein en vice versa.

⇒ Voor de Hollandsche IJssel is de dispersiecoëfficiënt afgeleid op basis van uitgevoerde metingen in november 2015. Een zoutbalans is opgesteld voor het gebied in de Hollandsche IJssel waar dispersieve transporten dominant zijn. Hierbij is nagegaan hoe gevoelig het resultaat is voor diverse aannamen. De dispersiecoëfficiënt halverwege de Hollandsche IJssel bedraagt 10 tot 65 m^2/s afhankelijk van de grootte van het balansgebied en het veronderstelde transport op de bovenrand van het gebied (gesloten rand, dispersief transport of dispersief én advectief transport).

⇒ Een eerste schatting voor de grootte van het benodigde (netto) lozingsdebiet om te voorkomen dat de chlorideconcentratie bij Gouda 10% bedraagt van de toename in de mond is 1 tot 5 m^3/s voor een karakteristieke dispersiecoëfficiënt van 20 tot 50 m^2/s. Hierbij is verondersteld dat de dispersiecoëfficiënt over de gehele lengte van de Hollandsche IJssel hetzelfde is.

⇒ Onzekerheden die samenhangen met genoemde waarden voor de dispersiecoëfficiënt en voor het compenserend debiet worden besproken in Par. 6.2.

Afzonderlijke bijdragen van dispersieve processen
In de literatuur zijn voor *stationaire condities* (rivieren zonder getij) diverse voorspellers voor de dispersiecoëfficiënt voorhanden. Als deze voorspellers worden gebruikt voor de Hollandsche IJssel volgen waarden van 30 tot 110 m^2/s, afhankelijk van de gekozen voorspeller.

⇒ Onder getijomstandigheden is de dispersiecoëfficiënt echter kleiner dan onder stationaire omstandigheden. Gebruikmakend van twee formuleringen in de literatuur (Thatcher-Harleman en Fischer) volgt dan voor de dispersiecoëfficiënt halverwege de Hollandsche IJssel een waarde van 2 tot 6 m^2/s. Deze waarde heeft alleen betrekking op de dispersie die het gevolg is van snelheidsverschillen (schering ofwel ‘shear’) in het dwarsprofiel.

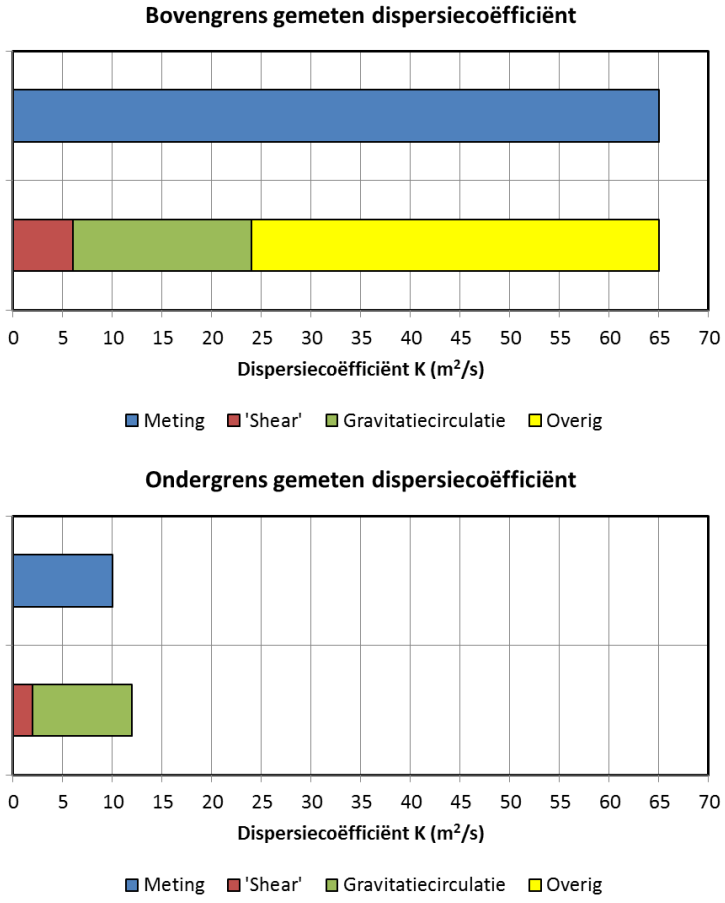
Bovenstaande betekent dat andere dispersieve processen het verschil veroorzaken tussen de gemeten dispersiecoëfficiënt (10 tot 65 m^2/s) en de ‘shear dispersion’ volgens Thatcher-Harleman en Fischer (2 tot 6 m^2/s). De (geringe) lozing van water tijdens de meetperiode,

bochtstroming en de aanwezigheid van doodwaterzones (berging langs de rivier) kunnen de oorzaak zijn van dit verschil.

⇒ De invloed van de verticale gravitatiecirculatie op de dispersiecoëfficiënt kan worden beschreven met gangbare formuleringen als vgl. (3.6), welke is gebaseerd op de Thatcher-Harleman vergelijking, en vgl. (B.17) volgens Kuijper en Van Rijn (2011). In het laatste geval wordt voor de dispersiecoëfficiënt een waarde afgeleid van 10 tot 18 m^2/s voor een lozingsdebiet van 1 m^3/s.

⇒ Voor het bepalen van de effecten van andere processen (doodwaterzones, bochtstroming) is nadere studie nodig.

De resultaten zoals hiervoor genoemd worden samengevat in Figuur 6.1:



Figuur 6.1 Dispersiecoëfficiënten K volgens metingen en voor deelprocessen.
Boven: bovengrens K volgens metingen
Onder: ondergrens K volgens metingen.

- In het bovenste venster wordt uitgegaan van de *bovengrens* van de dispersiecoëfficiënt volgens de metingen (= 65 m^2/s). De bovengrenzen voor de schattingen van de 'shear dispersion' en gravitatiedispersie zijn resp. 6 en 18 m^2/s. Overige processen zijn dan verantwoordelijk voor een dispersie van ongeveer 40 m^2/s.
- In het onderste venster van de figuur wordt uitgegaan van de *ondergrens* van de dispersiecoëfficiënt die bepaald is aan de hand van de metingen (= 10 m^2/s). De ondergrenzen voor de schattingen van de 'shear dispersion' en gravitatiedispersie zijn

resp. 2 en 10 m^2/s. Deze beide processen kunnen dus de gemeten dispersie in principe verklaren en er zijn geen overige processen die resulteren in een dispersief transport.

Gebruik voorspellende dispersieformuleringen
Als uitgegaan wordt van de ondergrens voor de dispersiecoëfficiënt volgend uit de metingen (10 m^2/s) dan kunnen de effecten van ingrepen (bijv. een verandering van het lozingsdebiet) dus in voorspellende zin worden meegenomen bij gebruik van een dispersieformulering zoals vgl. (3.6). Als uitgegaan wordt van de bovengrens voor de gemeten dispersiecoëfficiënt dan kan kennelijk slechts een deel van de gemeten dispersiecoëfficiënt met de dispersie-vergelijking worden voorspeld. In dat geval moet additionele dispersie worden voorgeschreven die het gevolg is van 'overige processen'. Voor de omstandigheden tijdens de metingen van november 2015 was deze extra dispersie 40 m^2/s maar niet bekend is hoe deze dispersie varieert met de omgevingscondities of als gevolg van ingrepen. Een gevoeligheidsonderzoek naar de effecten van veranderingen van de dispersiecoëfficiënt is bij het uitvoeren van scenarioberekeningen dan raadzaam.

Tijdschalen
De tijdschaal voor advectief transport in de Hollandsche IJssel wordt bepaald door de grootte van het onttrekkingsdebiet. Bij een debiet van 10 m^3/s is de tijdschaal voor het transport van zout vanaf de mond naar Gouda ongeveer 2 weken; bij grotere debieten is dit evenredig kleiner. De tijdschaal voor dispersief transport hangt af van de dispersiecoëfficiënt maar ook van de concentratie van het front dat wordt gevolgd t.o.v. de concentratie in de mond. Als deze concentratieverhouding klein is, loopt het zoutfront relatief snel en is de tijdschaal klein. Voor concentratieverhoudingen van 0,1 tot 0,5 en een karakteristieke dispersiecoëfficiënt van 50 m^2/s varieert deze tijdschaal tussen 15 en 100 dagen. Als de dispersiecoëfficiënt kleiner is, is de tijdschaal voor het dispersief transport proportioneel groter. Bij deze afschatting is verondersteld dat de dispersiecoëfficiënt constant is over de gehele lengte van de riviertak.

6.2 Onzekerheden

Met de afleiding van de dispersiecoëfficiënt op basis van de uitgevoerde metingen is een belangrijke stap gezet om te komen tot een meer betrouwbare modellering van de zoutindringing in de Hollandsche IJssel. Er is echter nog een aantal onzekerheden, waarmee rekening moet worden gehouden bij toepassing van de resultaten voor toekomstige studies, zoals de instandhouding van een zoetwaterbel bij Gouda:

- Omdat een aantal zoutopnemers tijdens de meetcampagne niet optimaal hebben gefunctioneerd moest een correctie van de metingen worden uitgevoerd. Verder is als onderdeel van de analyse een aantal aannamen gedaan, wat heeft geleid tot een range voor de dispersiecoëfficiënt.
- De dispersiecoëfficiënt geldt voor halverwege de Hollandsche IJssel en voor de omgevingscondities (mate van verzilting mond, getij, lozingsdebieten etc.), zoals die zijn opgetreden ten tijde van de metingen. Voor andere locaties en condities zijn de waarden niet bekend en moet de dispersiecoëfficiënt worden voorspeld met een dispersieformulering.
- De dispersieformuleringen die momenteel in gebruik zijn voor het geven van een dergelijke voorspelling hebben hun eigen onzekerheid (zie bv. Daniels, 2016).

Voor het verkleinen van de onzekerheden worden in Par. 6.3 aanbevelingen gedaan: (i) het afleiden van een plaats afhankelijke dispersiecoëfficiënt m.b.v. SOBEK-simulaties, (ii) gebruik van een geverifieerd 3D-model op basis van de uitgevoerde metingen en afleiding met dit model van een dispersiecoëfficiënt door gebruik te maken van een analyse-'tool' als de

zoutfluxontrafelaar, (iii) nader onderzoek naar een voorspellende dispersieformulering, (iv) een literatuurstudie en (v) het uitvoeren van nieuwe metingen.

Door de onzekerheden in de dispersiecoëfficiënt is het nog niet mogelijk nauwkeurige uitspraken te doen over het benodigde lozingsdebiet om de zoutindringing in de Hollandsche IJssel ten gevolge van dispersieve processen tijdens een verziltingssituatie te compenseren. De in dit rapport genoemde grootte van 1 tot 5 m^3/s betreft een vertaling van een veronderstelde dispersiecoëfficiënt van 20 tot 50 m^2/s naar een eenvoudiger te interpreteren grootheid als een debiet. De schatting van het lozingsdebiet is verkregen op basis van een analytische benadering, waarbij is aangenomen dat de dispersiecoëfficiënt langs de Hollandsche IJssel constant is en ook niet wordt beïnvloed door de grootte van het lozingsdebiet. De analyse geeft aan dat het resultaat van deze vertaling afhankelijk is van een aantal factoren, zoals de mate en duur van de verzilting in de mond en de toename van de chlorideconcentratie bij Gouda. Als de variatie van de dispersiecoëfficiënt langs de Hollandsche IJssel bekend is, bijvoorbeeld zoals verkregen door kalibratie van het model, kan het benodigde lozingsdebiet worden afgeleid op basis van modelsimulaties.

6.3 Aanbevelingen

1 Aanbevolen wordt om met SOBEK simulaties uit te voeren met verschillende waarden voor de dispersiecoëfficiënt en de resultaten te vergelijken met de metingen met de vaste opnemers. Op deze wijze kan de mate van overeenstemming tussen meting en berekening worden vastgesteld voor verschillende waarden van de dispersiecoëfficiënt, waarbij de coëfficiënt kan variëren langs de Hollandsche IJssel.
2 Een geautomatiseerde procedure voor het kalibreren van de dispersiecoëfficiënt aan de hand van de metingen is mogelijk met behulp van data-assimilatie (OpenDA). Aanbevolen wordt de mogelijkheden daartoe voor SOBEK-3 te onderzoeken.
3 Voor de Hollandsche IJssel is een 3D-model beschikbaar (Friocourt, 2015). Aanbevolen wordt een verificatie van het model uit te voeren met de zoutmetingen van november 2015 en met gebruikmaking van de lozingen en onttrekkingen in het gebied.
4 Met het gekalibreerde 3D-model en gebruik van de zoutfluxontrafelaar (Kranenburg en Groenenboom, 2016)[5] kan met modelsimulaties een dispersiecoëfficiënt worden afgeleid voor de Hollandsche IJssel.
5 Door Daniels (2016) is een generieke vorm van de dispersievergelijking opgesteld, waarmee verschillende beschikbare dispersieformuleringen in de literatuur kunnen worden getest. Voorgesteld wordt om deze tests uit te voeren voor de Hollandsche IJssel aan de hand van de beschikbare en nieuw uit te voeren metingen in de Hollandsche IJssel.
6 In de periode 1979 t/m 1982 is een uitgebreide studie uitgevoerd naar de toepasbaarheid van eendimensionale dispersiemodellering (Winterwerp, 1979, 1980a, 1980b, 1981, 1982a en 1982b). Voorgesteld wordt deze studie uit te breiden met inzichten die zijn verkregen gedurende de afgelopen decennia (bv. effecten van doodwaterzones en bochtstroming).
7 Het is het voornemen om tijdens volgende lage afvoersituaties opnieuw metingen uit te voeren in de Hollandsche IJssel. Het verdient dan aanbeveling om vaste opnemers te monteren over de gehele lengte van de Hollandsche IJssel (tot km. 0), zodat nauwkeuriger een massabalans voor zout kan worden opgesteld. Met de nieuwe metingen kan de onzekerheid worden verminderd die nu nog bestaat omdat de vaste

[5] *De zoutfluxontrafelaar is een 'tool' om vanuit resultaten van 3D modellen voor saliniteit in een estuarium zoutfluxcomponenten en equivalente dispersiecoëfficiënten te bepalen.*

opnemers in km. 12 t/m km 8 niet goed gefunctioneerd hebben tijdens de metingen van november 2015, waardoor zij moesten worden gecorrigeerd aan de hand van de varende metingen. Voor de horizontale resolutie van de meetraaien wordt aanbevolen een afstand van 1 km over de gehele lengte van de Hollandsche IJssel; voor het aantal opnemers in verticale richting wordt voorgesteld ten minste 2 maar bij voorkeur 5. Het verdient de voorkeur de CTD-opnemers meer in het midden van de rivier te plaatsen, bijvoorbeeld bevestigd aan een vaarboei of, indien dit niet is toegestaan, aan een nieuw te plaatsen boei ernaast. Een onderzoek naar de meest geschikte cq. nauwkeurige CTD-opnemers wordt eveneens voorgesteld.

8 ADCP-metingen samen met CTD-metingen worden voorgesteld in bochten van de Hollandsche IJssel met als doel de breedte- en diepteverdeling van stroomsnelheid en zoutconcentratie vast te stellen en hieruit de dispersiecoëfficiënt af te leiden.

9 Voor een nieuwe meetcampagne verdient het aanbeveling deze uit te voeren tijdens een lage afvoersituatie zonder middenstandsveranderingen. De kans hierop is het grootst in de zomer. Zonder de aanwezigheid van lozingen en onttrekkingen kan dan eerst het zoutfront worden gevolgd tot voorbij km. 8. Vervolgens wordt met een lozingsdebiet te Gouda het zoutfront teruggedrongen. Met een varende boot kan de positie van het front worden “bewaakt”. Aanbevolen wordt om de registraties van de vaste opnemers tijdens de metingen uit te lezen, zodat de beweging van het zoutfront goed kan worden bewaakt (ook na instelling van het lozingsdebiet). Bij het ter plaatse uitlezen kunnen dan tevens, indien nodig, de sensoren worden gecontroleerd op vervuiling en indien nodig opnieuw worden gekalibreerd.

7 Referenties

Aqua Vision, 2015. Zoutmetingen Hollandse IJssel oktober-november 2015. AV150182 definitief.

Daniels, J.A., 2016. Dispersion and dynamic one-dimensional modeling of salt intrusion in estuaries. Research proposal. 29 april 2016. Deltares, National University of Singapore and Delft University of Technology.

Eagleson, P.S., R.G. Dean, C.L. Bretschneider, F. Raichlen, D.R.F. Harleman, J.W. Johnson, A.T. Ippen, G.H. Keulegan and H.B. Simmons, 1966. Estuary and Coastline Hydrodynamics.McGraw-Hill.

Fischer, Hugo B., E. John List, Robert C.Y. Koh, Jörg Imberger and Norman H. Brooks, 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press.

Friocourt, Y.F., C. Kuijper, 2015. Verificatie 3D hydrodynamisch model Hollandsche IJssel voor verziltingsvraagstukken. Onderdeel KPP B&O Waterkwaliteitsmodelschematisaties 2014. 1209459. Deltares.

Harleman, Donald R.F. and M. Llewellyn Thatcher, 1974. Longitudinal dispersion and unsteady salinity intrusion in estuaries. La Houille Blanche. No. 1/2., pp. 25-33.

Hydrologic, 2013. Verkenning zoetwaterbuffer Hollandsche IJssel. P577.

Kranenburg, Wouter en Julien Groenenboom, 2016. Zoutfluxontrafelaar – nadere tests. Memo 1230069-000-ZKS-0032 d.d. 3 oktober 2016. Deltares.

Kuijper, Kees., 2015. Analyse debiet- en zoutmetingen Hollandsche IJssel. Rapport 1220106-003. Deltares.

Meijerink, J., 2015. Zoutmetingen Hollandsche IJssel oktober-november 2015. Rapport AV150182 definitief. Aqua Vision B.V.

Rijkswaterstaat, 1984. IJking chloridedeel ZWENDL Noordelijk Deltabekken. Stand van zaken september 1984. Notanummer 31.005.10. Direktie Waterhuishouding en Waterbeweging, Distrikt Zuidwest.

Thatcher, M. Llewellyn and Donald R.F Harleman, 1972. A mathematical model for the prediction of unsteady salinity intrusion in estuaries. Report No. MITSG 72-7. Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts.

Winterwerp, J.C., 1979. Toepasbaarheid één-dimensionaal diffusie-model. Deel 2: homogene, permanente stroming. M 896 – 41 - 2. Waterloopkundig Laboratorium.

Winterwerp, J.C., 1980a. Eén-dimensionale beschrijving van de zoutverdeling in de Rotterdamse Waterweg en Nieuwe Maas m.b.v. het dispersie-concept van Thatcher-Harleman. M896-42. Waterloopkundig Laboratorium.

Winterwerp, J.C., 1980b. Toepasbaarheid één-dimensionaal diffusie-model. Homogene, getijstroming in kanalen. M 896 – 41 deel III. Waterloopkundig Laboratorium.

Winterwerp, J.C., 1981. Toepasbaarheid eendimensionaal model. Inhomogene getijstroming. M 896 – 41 deel IV. Waterloopkundig Laboratorium.

Winterwerp, J.C., 1982a. Toepasbaarheid eendimensionaal model. Deel 5: invloed doodwaterzones op de dispersie. M 896 – 41 deel V. Waterloopkundig Laboratorium.

Winterwerp, J.C., 1982b. Toepasbaarheid eendimensionaal model. Een literatuurstudie. M 896 – 41 deel 1. Waterloopkundig Laboratorium.

A F3-term in Thatcher-Harleman dispersievergelijking

A.1 Relatie tussen Chézy- en Manning-ruwheid

In SI-eenheden geldt: $C = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n}$ (A.1a)

met *C* de Chézy-ruwheid ($m^{0.5}/s$), *R* de hydraulische straal (m) en *n* de Manning-coëfficiënt ($s/m^{1/3}$).

Als *C* en *R* worden uitgedrukt in de eenheden feet en s moet ook *n* worden uitgedrukt in deze eenheden. In dat geval geldt:

$$n\left[\frac{s}{(m)^{\frac{1}{3}}}\right] = n\left[\frac{s}{\left(\frac{1}{0,3048}\,ft\right)^{\frac{1}{3}}}\right] = n\left[\frac{s}{1,486\,ft^{\frac{1}{3}}}\right]$$

Dus: $C = 1,486\frac{R^{\frac{1}{6}}}{n}$ (A.1b)

met *C* de Chézy-ruwheid ($ft^{0.5}/s$), *R* de hydraulische straal (ft) en *n* de Manning-coëfficiënt ($s/ft^{1/3}$). Zie bijvoorbeeld Van Rijn (1990) en Eagleson et al. (1966).

A.2 'Shear dispersion' volgens Thatcher-Harleman

Thatcher en Harleman (1972) gaan uit van de vergelijking van Taylor voor turbulente pijpstroming:

$$K = 10,1\,au_* \quad \text{(A.2)}$$

met *K* de longitudinale dispersiecoëfficiënt (m^2/s), *a* de straal (m) en u_* de schuifspanningssnelheid (m/s).

Voor de hydraulische straal geldt: $R = \frac{\pi a^2}{2\pi a} = \frac{a}{2}$.

Vgl. (A.2) wordt: $K = 20,2\,Ru_*$ (A.3)

Deze vergelijking geldt ook voor een kanaalstroming met vrij wateroppervlak, waarbij *R* ongeveer de waterdiepte *h* is als de breedte *B* >> *h*.

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} \quad \text{(A.4)}$$

Substitutie van vgl. (A.4) in vgl. (A.3) geeft, zie ook Winterwerp (1980) en Harleman en Thatcher (1974):

$$K = 20,2\ R\bar{u}\,\frac{\sqrt{g}}{C}\ \text{(m}^2\text{/s)} \qquad \text{(A.5)}$$

In de eenheden feet en s en na substitutie van vgl. (A.1b) in vgl. (A.5) volgt:

$$K = 20,2\ R\bar{u}n\frac{\sqrt{g}}{1,486R^{\frac{1}{6}}} = 13,6\sqrt{g}R^{\frac{5}{6}}\bar{u}n$$

Voor *g* geldt: *g* = 32,9 ft/s^2, zodat voor K volgt:

$$K = 77R^{\frac{5}{6}}n\bar{u}\ \text{(ft}^2\text{/s)} \qquad \text{(A.6)}$$

Vgl. (A.6) is dus het equivalent van vgl. (A.5) maar dan in eenheden feet-s, waarbij de constante 77 bedraagt. Merk op dat de constante 77 niet dimensieloos is! Thatcher en Harleman rapporteren zelf dat de constante een factor 3 hoger kan zijn indien van toepassing op natuurlijke estuaria. In dat geval wordt de constante in vgl. (A.5) dus 60:

$$K = 60\ R(x,t)\bar{u}(x,t)\frac{\sqrt{g}}{C} \qquad \text{(A.7)}$$

Hierin zijn *R* en $\bar{u}$ momentaan, dus functies van *x* en *t*.

A.3 Referenties

Eagleson, P.S., R.G. Dean, C.L. Bretschneider, F. Raichlen, D.R.F. Harleman, J.W. Johnson, A.T. Ippen, G.H. Keulegan and H.B. Simmons, 1966. Estuary and Coastline Hydrodynamics.McGraw-Hill.

Harleman, Donald R.F. and M. Llewellyn Thatcher, 1974. Longitudinal dispersion and unsteady salinity intrusion in estuaries. La Houille Blanche. No. 1/2., pp. 25-33.

Thatcher, M. Llewellyn and Donald R.F Harleman, 1972. A mathematical model for the prediction of unsteady salinity intrusion in estuaries. Report No. MITSG 72-7. Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts.

Van Rijn, L.C., 1990. Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans. Aqua Publications, Amsterdam.

B ’Shear dispersion’ onder getijcondities

B.1 Fischer et al. (1979)

Stromingen met snelheidsgradiënten in een dwarsdoorsnede worden aangeduid als ‘shear flows’. De gradiënten kunnen het gevolg zijn van de aanwezigheid van een vaste bodem of wand of ontstaan als twee watermassa’s met verschillende stroomsnelheden samenvloeien. De snelheidsverschillen in de dwarsdoorsnede resulteren in een verspreiding van opgeloste stoffen in de richting van de stroming. Deze verspreiding wordt aangeduid als ‘shear flow dispersion’. Door Taylor (1953) is dit verschijnsel eerst bestudeerd voor laminaire pijpstroming en vervolgens uitgebreid voor turbulente pijpstroming (Taylor, 1954). In het eerste geval speelt de moleculaire diffusiecoëfficiënt D een rol en in het tweede geval de turbulente mengingscoëfficiënt ε (‘eddy diffusivity’). In tegenstelling tot D kan ε variëren over de doorsnede. Door (Elder, 1959) is de analyse uitgebreid voor stroming langs een helling met een vrij wateroppervlak.

De hiervoor beschreven gevallen betreffen stationaire stromingscondities. In Fischer et al. (1979) wordt de analyse uitgebreid voor niet-stationaire situaties, zoals een oscillerende stroming. Hierbij kunnen twee uiterste situaties worden beschouwd:

- $T' >> 1$. De oscillatieperiode T is veel groter dan de tijd T_c die nodig is voor de aanpassing van het concentratieprofiel aan het nieuwe snelheidsprofiel;
- $T' << 1$. De tijd T is veel kleiner dan T_c.

met,

$$T' = \frac{T}{T_c} \tag{B.1}$$

Hierbij is T_c gedefinieerd als:

$$T_c = \frac{L^2}{D} \tag{B.2}$$

waarbij L een lengteschaal (bijvoorbeeld de waterdiepte of de breedte) en D de moleculaire diffusiecoëfficiënt. In geval van turbulente stroming moet voor D de turbulente mengingscoëfficiënt (‘eddy diffusivity’ ε) worden genomen.

In het eerste geval is er voldoende tijd beschikbaar om het concentratieprofiel te laten aanpassen aan het stromingsprofiel in beide richtingen. De dispersiecoëfficiënt is in dat geval gelijk aan die voor stationaire stroming. In het tweede geval is er onvoldoende tijd beschikbaar voor aanpassing van het concentratieprofiel. De concentratie oscilleert rond het gemiddelde en de dispersiecoëfficiënt nadert tot nul (Fischer et al., 1979).

B.1.1 Effect getijperiode op K

Voor getijstroming is estuaria en getijdenrivieren leiden Fischer et al. (1979) de dispersiecoëfficiënt als functie van $T'=T/T_c$ af:

$$K = K_0 f(T') \tag{B.3}$$

met,

$$K_0 = I\overline{u'^2}T_c \tag{B.4}$$

Hierin is *I* een constante welke kan worden afgeleid uit het snelheidsprofiel[6]. Deze constante blijkt ongeveer de waarde 0,1 te hebben voor verschillende stromingssituaties (laminaire en turbulente pijpstroming, laminaire en turbulente stroming langs een helling etc.). Verder geldt volgens Fischer et al. (1979):

$$\overline{u'^2} \approx 0,2\overline{u}^2 \tag{B.5}$$

zodat volgt:

$$K_0 = 0,02\overline{u}^2 T_c \tag{B.6}$$

Voor de lengteschaal *L* wordt de breedte *W* van de rivier genomen zodat:

$$T_c = \frac{W^2}{\varepsilon_t} \tag{B.7}$$

Voor *f(T')* wordt afgeleid:

$$f(T') = \frac{240}{\pi^4} T'^2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[(2n-1)^{-2} \left\{ \left(\frac{\pi}{2}(2n-1)^2 T' \right)^2 + 1 \right\}^{-1} \right] \tag{B.8}[7]$$

Hierin is $\overline{u}$ de profielgemiddelde snelheid, *W* de breedte van de rivier en ε_t de turbulente mengingscoëfficiënt in dwarsrichting.

Het verloop van K/K_0 als functie van *T'* is weergegeven in Figuur B.1. Het laat het effect zien van de oscillatieperiode *T* op de dispersiecoëfficiënt *K*.

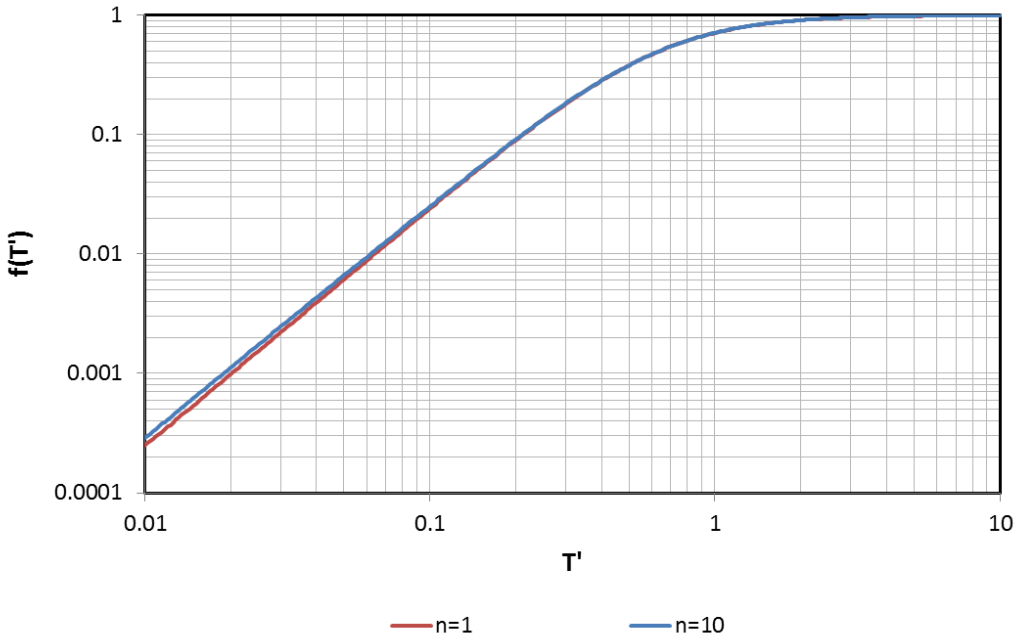
---

[6] *I is als volgt gedefinieerd (Fischer et al., 1979):* $I = -\int_0^1 u'' \int_0^{y'} \frac{1}{\varepsilon_t} \int_0^{y'} u'' dy' dy' dy'$ *met y'=y/h,* $u' = U - \overline{u}$ *en* $u'' = u'/\sqrt{u'^2}$ *. Hierin is U de snelheid en* $\overline{u}$ *de profielgemiddelde snelheid.*

[7] *Door Fischer et al. (1979) wordt als vergelijking gegeven:*

$$f(T') = \frac{240}{\pi^4} T'^2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[(2n-1)^{-2} \left\{ \left(\frac{\pi}{2}(2n-1)^2 T'^2 \right)^2 + 1 \right\}^{-1} \right]$$

, maar hiermee kunnen Figuur B.1 en Figuur B.2, zoals door hen gepresenteerd, niet worden gereproduceerd. Verondersteld is dat T'² in de term tussen ( ) moet worden vervangen door T'. In dat geval is het resultaat identiek aan hun grafische weergaven van f(T') en (1/T')f(T').



Figuur B.1 De afhankelijkheid van de dispersiecoëfficiënt van de oscillatieperiode. f(T') is de verhouding tussen K in een stroming met oscillatieperiode T en K in dezelfde stroming met T →∞. De rode en blauwe lijn zijn verkregen met resp. de sommatie met 1 en 10 termen.

Zoals eerder is beredeneerd, geldt voor grote waarden van *T* dat *K* nadert tot K_0 (*f(T')* → 1) en voor kleine waarden van *T* dat *K* nadert tot 0 (*f(T')* → 0). *Voor een oscillerende stroming is de dispersiecoëfficiënt dus altijd kleiner dan die voor een stationaire stroming.* Verder blijkt uit Figuur B.1 dat het voldoende is om slechts 1 term in de sommatie in vergelijking (B.8) (*n* = 1) mee te nemen. In dat geval wordt vgl. (B.8):

$$f(T') = \frac{\frac{960}{\pi^6} T'^2}{T'^2 + \frac{4}{\pi^2}} \approx \frac{T'^2}{T'^2 + 0,4} \quad (n=1) \tag{B.9}$$

De longitudinale dispersievergelijking wordt in dit geval:

$$K = K_0 f(T') = 0,02 \bar{u}^2 T_c \frac{T'^2}{T'^2 + 0,4} = 0,02 \bar{u}^2 T \frac{T'}{T'^2 + 0,4} \tag{B.10}$$

met,

$$T' = \frac{T}{T_c} = \frac{T}{\frac{W^2}{\varepsilon_t}} = \varepsilon_t \frac{T}{W^2} \tag{B.11}$$

Volgens Fischer et al. (1979) geldt voor ε_t:

$$\varepsilon_t = c_t h u_* \tag{B.12}$$

met c_t = 0,6 ±50%, h de waterdiepte en u_* de schuifspanningssnelheid. Voor u_* kan worden geschreven:

$$u_* = \frac{\sqrt{g}}{C}\bar{u}$$

Voor *T'* volgt dan:

$$T' = c_t h\bar{u}\frac{\sqrt{g}}{C}\frac{T}{W^2} \qquad \text{(B.13)}$$

Vergelijkingen (B.10) en (B.13) vormen samen de (vereenvoudigde) dispersievergelijking voor 'shear flow' onder getijcondities. De invoergrootheden voor deze dispersievergelijking zijn de:

- waterdiepte *h*;
- gravitatieversnelling *g*;
- ruwheid *C;*
- getijperiode *T*;
- rivierbreedte *W*;
- stroomsnelheid $\bar{u}$ tijdens het getij (tijdsgemiddelde van de absolute waarden).

De getijperiode *T* en de rivierbreedte *W* zijn aanvullende grootheden ten opzichte van de dispersievergelijking volgens Thatcher-Harleman (zie Par. A.2).

Bij het voorgaande is verondersteld dat de tijdschaal voor laterale menging veel groter is dan die voor verticale menging. In andere woorden: er wordt aangenomen dat verticale menging instantaan is in vergelijking met horizontale menging wat het geval is bij een grote breedte-diepte verhouding van het estuarium of de rivier. Verder worden dichtheidseffecten verwaarloosd.

B.1.2 Effect rivierbreedte op K

Uit vergelijkingen (B.3) en (B.6) volgt:

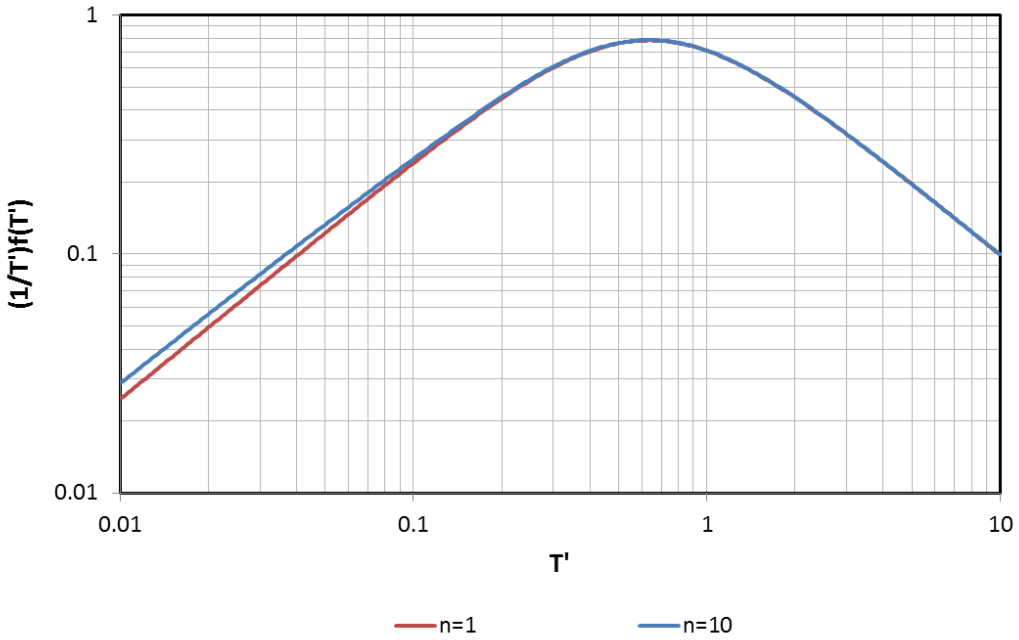
$$K = 0,02\bar{u}^2 T_c f(T') = 0,02\bar{u}^2 T\frac{1}{T'} f(T') = 0,02\bar{u}^2 T\, F\left(T'\right) \qquad \text{(B.14a)}$$

met,

$$F(T') = \frac{1}{T'} f(T') \qquad \text{(B.14b)}$$

F(T') is weergegeven in Figuur B.2. Met deze functie wordt het effect van de rivierbreedte *W* op de dispersiecoëfficiënt *K* weergegeven ($0,02\bar{u}^2 T$ in vgl. (B.14a) is onafhankelijk van *W*). Bij een grote breedte van het estuarium is T_c groot (*T'* klein); het concentratieprofiel past zich langzaam aan ten opzichte van de getijperiode en de dispersiecoëfficiënt is dientengevolge klein, omdat het concentratieprofiel "onvervormd" oscilleert tussen twee uiterste waarden. Als het estuarium smal is, verloopt de aanpassing van het concentratieprofiel snel ten opzichte van de getijperiode (T_c klein; *T'* groot) en de dispersiecoëfficiënt benadert die van een stationaire stroming (K_0) ofwel *f(T')* nadert tot 1. Tegelijkertijd neemt K_0 volgens vgl. (B.6) af, zodat het netto resultaat volgens vgl. (B.3) is een afname van *K* voor grote en toenemende

waarden van T'. Voor *T'* ≈ 1 wordt een maximum voor *F(T')* bereikt, d.w.z. als de tijdschaal voor dwarsmenging van dezelfde grootte is als de getijperiode.



Figuur B.2 De grootheid F(T') zoals gedefinieerd door vgl. (B.8) en vgl. (B.14b).

B.2 Aanpassingen T_c en K_0

In Par. B.1 is K_0 gegeven door vgl. (B.4) en vgl. (B.5) en I = 0,1. In Bijlage C zal blijken dat hiermee een K_0 wordt berekend die groot is in vergelijking met andere voorspellers voor K_0. Door Fischer (1975) (zie ook Fischer et al., 1979) wordt voor vgl. (B.4) uitgegaan van iets afwijkende definities voor I en T_c:

$$I = 0,07$$

$$T_c = \frac{(0,7W)^2}{\varepsilon_t} \qquad \text{(B.15)}$$

Voor de karakteristieke lengteschaal wordt dus uitgegaan van L = 0,7W als redelijke benadering voor een symmetrisch snelheidsprofiel (L = 0,5W) en een asymmetrisch profiel (L = W).

Met c_t = 0,6 (zie vgl. B.12) volgt dan volgens vgl. (B.4):

$$K_0 = 0,011\frac{\bar{u}^2 W^2}{hu_*} \qquad \text{(B.16)}$$

K_0 volgens vgl. (B.16) is een factor 3 kleiner dan K_0 volgens vgl. (B.6).

In vgl. (B.8) moet dan $T' = T/T_c$ worden gebruikt met T_c gedefinieerd volgens vgl. (B.15).

B.3 Toepassing Hollandsche IJssel

Voor de Hollandsche IJssel geldt ter plaatse van de bestudeerde balansgebieden:

- h = 4,2 m;
- W = 145 m
- $\bar{u}$ = 0,15 m/s (getijgemiddeld).

Verder is C = 45 m$^{0.5}$/s en T = 44700 s. Voor de constante c_t wordt 0,6 $\pm$ 0,3 gebruikt.

De longitudinale dispersiecoëfficiënt K wordt berekend volgens de methodes zoals beschreven in Par. B.1 en Par. B.2. De resultaten zijn vermeld in Tabel B.1.

Tabel B.1 K berekend voor halverwege de Hollandsche IJssel.

u_{gem}	B	h	c_t	ε_t	T_c	T'	f(T')	const.	K_0	K
(m/s)	(m)	(m)	(-)	(m^2/s)	(s)	(-)	(-)	(-)	(m^2/s)	(m^2/s)
Fischer et al. (1979). Methode Par. B.1										
0.15	145	4.2	0.3	0.013	1598278	0.028	0.0021	0.1	719	**1**
0.15	145	4.2	0.6	0.026	799139	0.056	0.0082	0.1	360	**3**
0.15	145	4.2	0.9	0.039	532759	0.084	0.0182	0.1	240	**4**
Fischer et al. (1979). Methode Par. B.2										
0.15	145	4.2	0.3	0.013	783156	0.057	0.0085	0.07	247	**2**
0.15	145	4.2	0.6	0.026	391578	0.114	0.0332	0.07	123	**4**
0.15	145	4.2	0.9	0.039	261052	0.171	0.0716	0.07	82	**6**
Thatcher-Harleman (op basis van gemiddelde u en h). Par. A.2.										
0.15		4.2								**3**

De berekende waarden voor K volgens de methode van Fischer et al. (1979) variëren tussen 1 en 6 m^2/s. Als voor de methode van Thatcher-Harleman uitgegaan wordt van de gemiddelde stroomsnelheid tijdens eb en vloed en de gemiddelde waterdiepte tijdens het getij volgt voor K een waarde die overeenstemt met K volgens Fischer et al..

De waarden zijn een orde lager dan wat voor de Hollandsche IJssel is afgeleid uit de metingen in 2015, nl. K = 10-65 m^2/s voor de balansperioden 10/11 en 11/12 november 2015. Mogelijke oorzaken van deze verschillen zijn:

- Vergroting van de dispersie in de Hollandsche IJssel ten gevolge van andere processen, zoals bochtstroming, onregelmatigheden langs de oever en de bodem, de aanwezigheid van kombergende gebieden langs de rivier etc.;
- Vergroting van de dispersie ten gevolge van het geringe lozingsdebiet tijdens de metingen (versterking gravitatiecirculatie).

De bijdrage van de gravitatiecirculatie aan de dispersie kan worden geschat met de dispersievergelijking van Kuijper en Van Rijn (2011). Deze vergelijking wordt gegeven door:

$$D_x = \alpha_c 60\sqrt{\pi}\left(\frac{v_\Delta}{\hat{u}_x}\right)\left(\frac{C}{\sqrt{g}}\right)\left(\frac{|u_{r,x}|}{\hat{u}_x}\right)^{0.5} \hat{u}_x h_x \frac{L_{e,x}}{L_{a_*}} \qquad \left(1 < \frac{L_{a_*}}{L_{e,x}} < 10\right) \tag{B.17a}$$

$$v_{\Delta,x} = \sqrt{\frac{\Delta\rho_x}{\rho} g h_x} \qquad \text{(B.17b)}$$

Hierin is D_x de dispersiecoëfficiënt ten gevolge van dichtheidseffecten, α_c een kalibratie-constante welke gelijk is aan $1 \pm 0{,}3$, $\hat{u}_x$ de maximale getijsnelheid, $u_{r,x}$ de afvoersnelheid (= Q_r/A_x), Q_r de rivierafvoer wat in dit geval gelijk is aan het netto lozingsdebiet, A_x het stroomvoerend oppervlak, L_e de getijweglengte welke gelijk is aan $\hat{u}_x T/\pi$, L_a de convergentielengte voor het stroomvoerend oppervlak, $\Delta\rho_x$ het dichtheidsverschil en ρ_r de dichtheid van zoet water ($\approx$ 1000 kg/m^3). Het subscript 'x' heeft hier betrekking op de zeewaartse rand van het balansgebied (d.i. km. 12/13).

De waarden voor de hiervoor genoemde grootheden zijn als volgt:

- Breedte W = 150 m.
- Waterdiepte h = 4,5 m.
- Ruwheid C = 45 m^{0,5}/s.
- Het verschil in chlorideconcentratie in raai 13/12 en verder opwaarts is ongeveer 50 mg/l. Dit is gelijk aan een dichtheidsverschil $\Delta\rho_x$ van ongeveer 0,07 kg/m^3.
- De maximale getijsnelheid $\hat{u}_x$ tijdens eb en vloed is gemiddeld 0,35 m/s.
- $Q_{lozing} \approx 1$ m^3/s.
- $u_{r,x} = Q_{lozing} / (Wh)$ = 1/(150*4,5) = 0,0016 m/s.
- L_a = 11 km.
- $L_{e,x} = \hat{u}_x T/\pi$ = 0,35*44700/π = 5,0 km.
- L_a/L_e = 2

Substitutie van bovengenoemde waarden in vgl. (B.17) geeft als eerste globale schatting K = 10–18 m^2/s. De geringe lozing van 1 m^3/s kan volgens vgl. (B.17) dus een invloed hebben gehad op de dispersie-coëfficiënt en het verklaart daarmee een deel van het verschil tussen de dispersiecoëfficiënt welke is bepaald aan de hand van de metingen (10-65 m^2/s) en de dispersiecoëfficiënt ten gevolge van 'shear flow', zoals voorspeld met de vergelijkingen van Thatcher-Harleman en Fischer et al. (2-6 m^2/s).

B.4 Referenties

Elder, J.W., 1959. The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. J. Fluid Mech. 5, 544-560.

Fischer, H.B., 1975. Discussion of "Simple method for predicting dispersion in streams" by R.S. McQuivey and T.N. Keefer. J. Environ. Eng. Div. Proc. Am. Soc. Civ. Eng. 101, 453-455.

Fischer, Hugo B., E. John List, Robert C.Y. Koh, Jörg Imberger and Norman H. Brooks, 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press.

Kuijper, C. and L.C. van Rijn, 2011. Analytical and numerical analysis of tides and salinities in estuaries; Part II: salinity distributions in prismatic and convergent tidal channels. Ocean Dynamics.

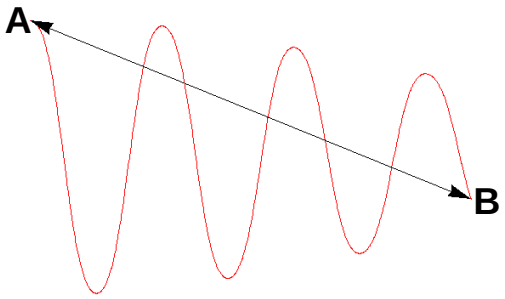
Taylor, G.I., 1953. Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube. Proc. R. Soc. London Ser. A 219, 186-203.

Taylor, G.I., 1954. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. Proc. R. Soc. London Ser. A 223, 446-468.

C Dispersiecoëfficiënt K_0 voor rivieren

C.1 Beknopte literatuurinventarisatie

In Bijlage B is de dispersiecoëfficiënt K voor estuaria en getijrivieren volgens Fischer et al. (1979) behandeld. Hierbij is K gerelateerd aan de dispersiecoëfficiënt K_0 voor rivieren met een stationaire stroming zoals gegeven door vgl. (B.3). In deze bijlage worden waarden van K_0 gepresenteerd ontleend aan Etemad-Shahidi en Taghipour (2012)[8]. Zij vermelden uit metingen afgeleide waarden voor K_0 en geven relaties tussen K_0 en geometrische en hydrodynamische grootheden. Deze relaties zijn deels ontleend aan de literatuur en deels door henzelf ontwikkeld. De gebruikte dataset bestaande uit in totaal 149 metingen is vermeld in Tabel C.2. De verschillende empirische vergelijkingen die een relatie geven tussen K_0 en de breedte W, waterdiepte h, stroomsnelheid u, schuifspanningssnelheid u_* en de 'sinuosity' σ (mate van meandering, bochtigheid) zijn vermeld in Tabel C.1. De vergelijkingen hebben met elkaar gemeen, dat de verhoudingen W/h en u/u_* een rol spelen. De tweede vergelijking van Etemad-Shahidi en Taghipour heeft ook als invoergrootheid de 'sinuosity' σ. Hoewel deze niet in het betreffende artikel wordt gedefinieerd, heeft deze vermoedelijk betrekking op de verhouding tussen de lengte van de rivier tussen twee locaties A en B en de hemelsbrede afstand AB, zie de schets hieronder.



Definitie 'sinuosity'

Voor de Hollandsche IJssel is de 'sinuosity' tussen de monding en het boezemgemaal Gouda 16,6/13,5 = 1,23.

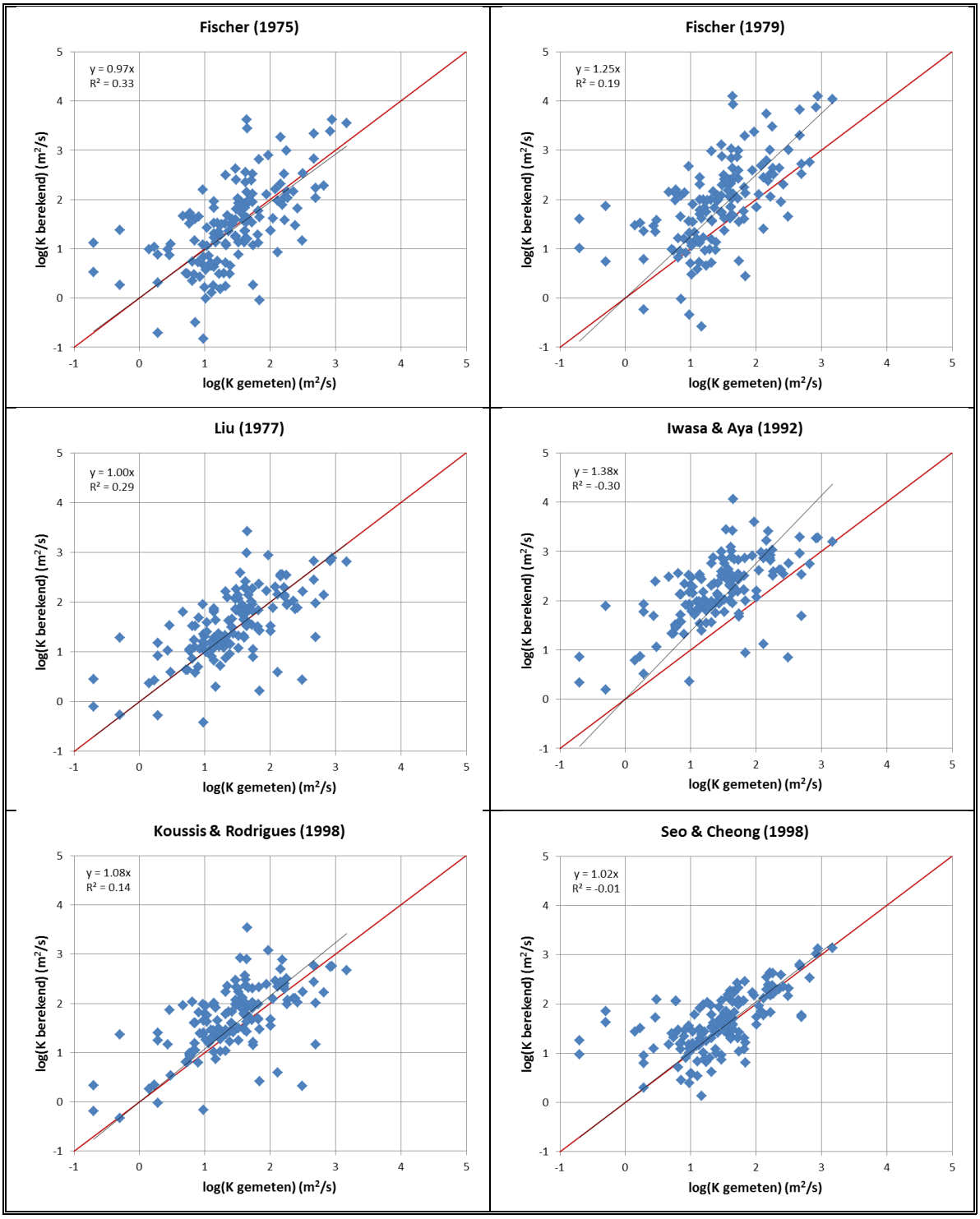
[8] *Er is geen uitgebreide literatuurinventarisatie uitgevoerd.*

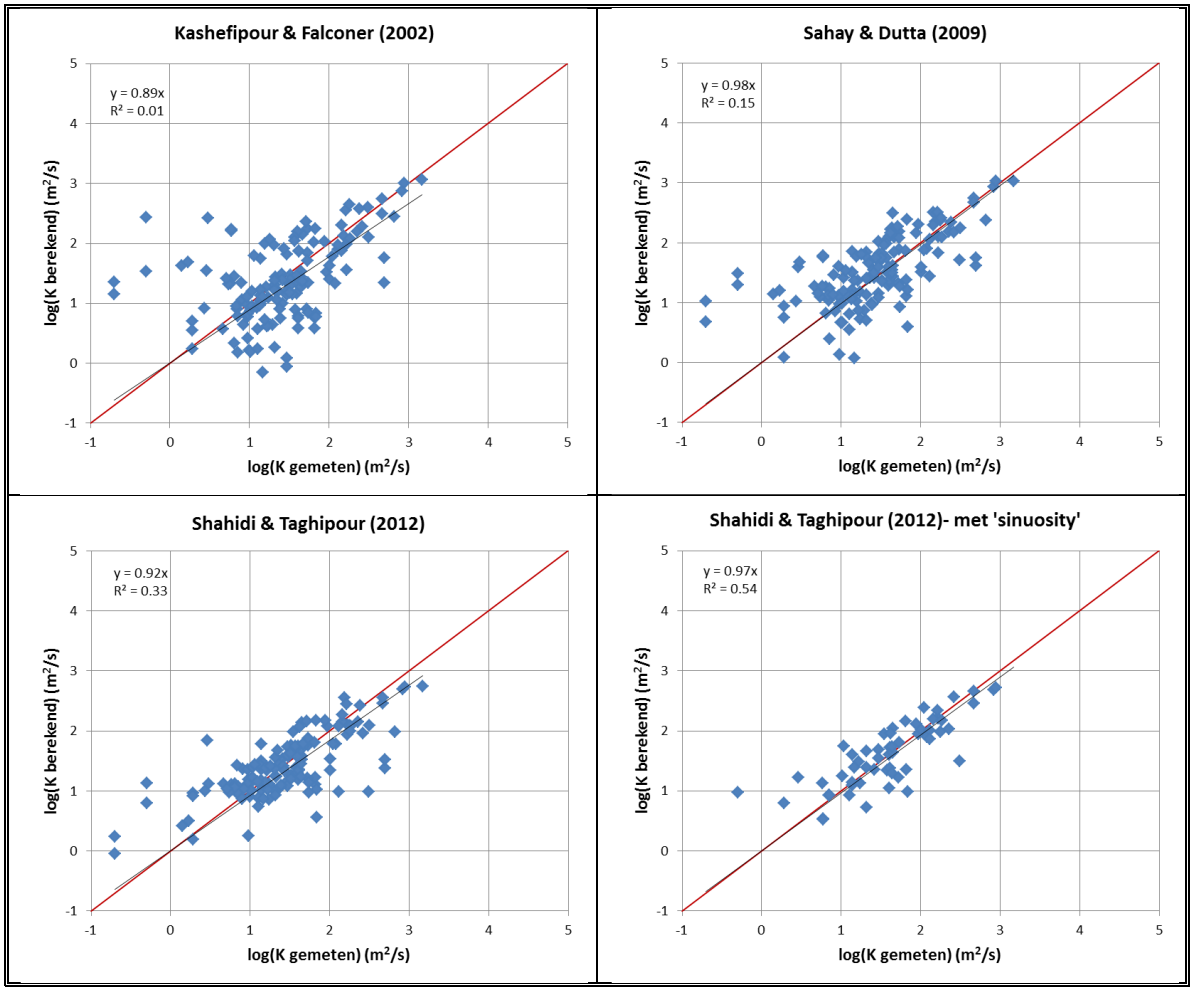
Tabel C.1 Dispersievergelijkingen voor K0 (Etemad-Shahidi en Taghipour, 2012).

Dispersievergelijking voor K_0	**Referentie**
$K_0 = 0,011\left(\frac{W^2}{h}\right)\left(\frac{u^2}{u_*}\right)$ [9]	Fischer (1975)
$\frac{K_0}{hu_*} = \beta\left(\frac{W}{h}\right)^2\left(\frac{u}{u_*}\right)^2$; $\beta = 0,18\left(\frac{u_*}{u}\right)^{1,5}$	Liu (1977)
$\frac{K_0}{hu_*} = 2\left(\frac{W}{h}\right)^2$	Iwasa and Aya (1991)
$\frac{K_0}{hu_*} = 0,6\left(\frac{W}{h}\right)^2$	Koussis and Rodrigues-Mirasol (1998)
$\frac{K_0}{hu_*} = 5,915\left(\frac{W}{h}\right)^{0,62}\left(\frac{u}{u_*}\right)^{1,428}$	Seo and Cheong (1998)
$K_0 = \left[7,428 + 1,775\left(\frac{W}{h}\right)^{0,62}\left(\frac{u_*}{u}\right)^{0,572}\right]hu\left(\frac{u}{u_*}\right)$ (W/h ≤ 50) $K_0 = 10.612hu\left(\frac{u}{u_*}\right)$ (W/h > 50)	Kashefipour and Falconer (2002)
$\frac{K_0}{hu_*} = 2\left(\frac{W}{h}\right)^{0,96}\left(\frac{u}{u_*}\right)^{1,25}$	Sahay and Dutta (2009)
$\frac{K_0}{hu_*} = 15,49\left(\frac{W}{h}\right)^{0,78}\left(\frac{u}{u_*}\right)^{0,11}$ (W/h ≤ 30,6) $\frac{K_0}{hu_*} = 14,12\left(\frac{W}{h}\right)^{0,61}\left(\frac{u}{u_*}\right)^{0,85}$ (W/h > 30,6)	Etemad-Shahidi and Taghipour (2012)
$\frac{K_0}{hu_*} = 2,75\left(\frac{W}{h}\right)^{0,78}\left(\frac{u}{u_*}\right)^{0,11}\sigma^{4,04}$ (W/h ≤ 30,6) $\frac{K_0}{hu_*} = 8,36\left(\frac{W}{h}\right)^{0,61}\left(\frac{u}{u_*}\right)^{0,85}\sigma^{1,70}$ (W/h > 30,6)	Etemad-Shahidi and Taghipour (2012)

In Figuur C.1 zijn de berekende waarden voor K_0 vergeleken met de gemeten waarden voor elk van de dispersievergelijkingen. De tweede vergelijking van Shahidi en Taghipour maakt ook gebruik van de parameter σ ('sinuosity') maar deze is afgeleid op basis van een kleinere dataset (zie Tabel C.2). Voor alle vergelijkingen is de spreiding groot. Hierin is ook de dispersievergelijking opgenomen volgens Fischer et al. (1979) (zie vgl. B.3). Deze is identiek aan die van Fischer (1975) maar met een constante van 0,033.

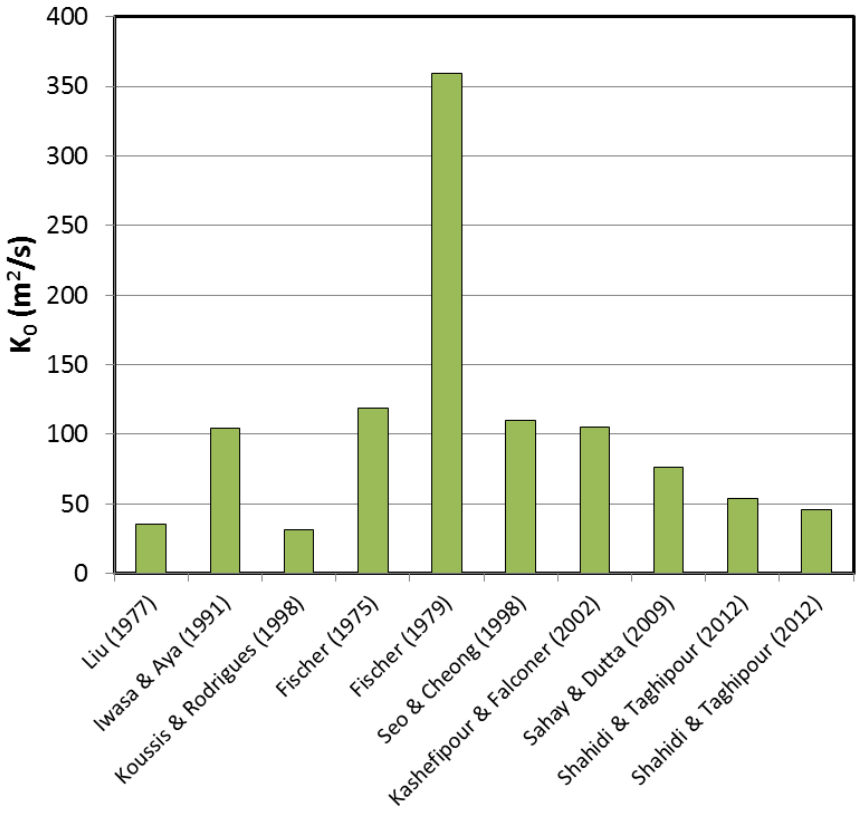
[9] *Deze vergelijking is conform de andere vergelijkingen ook te schrijven als:* $\frac{K_0}{hu_*} = 0,011\left(\frac{W}{h}\right)^2\left(\frac{u}{u_*}\right)^2$


Fischer (1975)
y = 0.97x
R² = 0.33
Fischer (1979)
y = 1.25x
R² = 0.19
Liu (1977)
y = 1.00x
R² = 0.29
Iwasa & Aya (1992)
y = 1.38x
R² = -0.30
Koussis & Rodrigues (1998)
y = 1.08x
R² = 0.14
Seo & Cheong (1998)
y = 1.02x
R² = -0.01
log(K berekend) (m²/s)
log(K gemeten) (m²/s)



Figuur C.1 Vergelijking berekende met gemeten dispersiecoëfficiënt voor rivieren (K_0). Langs de assen zijn de logaritmen van de waarden uitgezet.

Voor de Hollandsche IJssel, ter hoogte van km. 13/12, is de dispersiecoëfficiënt K_0 berekend met elk van de vergelijkingen, zie Figuur C.2. Deze dispersiecoëfficiënt kan worden beschouwd als een bovengrens, omdat volgens de analyse van Fischer et al. (1979) de dispersiecoëfficiënt K onder getijcondities kleiner is, zie Bijlage B. De invoergrootheden zijn: W = 150 m, h = 4,5 m, $\bar{u}$ = 0,15 m/s, u_* = 0,010 m/s (C=45 $m^{0.5}$/s) en σ = 1,23. Uit Figuur C.2 volgt dat de dispersiecoëfficiënt K_0 volgens Fischer (1979), 360 m^2/s, groot is in vergelijking met de andere voorspellers (30-120 m^2/s). De constante in de dispersievergelijking van Fischer (1975) is driemaal kleiner dan die in Fischer (1979), waardoor de berekende waarde voor K beter overeenstemt met die volgens de andere voorspellers. De dispersievergelijkingen van Shahidi & Taghipour (2012), die volgens Figuur C.1 het beste presteren, resulteren in een K_0 van 40-50 m^2/s. Zoals eerder is opgemerkt vormen deze waarden een bovengrens voor de Hollandsche IJssel omdat de dispersiecoëfficiënt onder getijomstandigheden kleiner is, zie Bijlage B.



Figuur C.2 Berekende dispersiecoëfficiënt K_0 voor de Hollandsche IJssel (km. 13/12) volgens diverse voorspellers.

C.2 Referenties

Etemad-Shahidi, A. and M. Taghipour, 2012. Predicting Longitudinal Dispersion Coefficient in Natural Streams using M5' Model Tree. J. Hydraulic Eng., 10.1061/(ASCE)HY. 1943-7900.0000550, 542-554.

Tabel C.2 Longitudinale dispersiecoëfficiënt en geometrische en hydrodynamische grootheden (Etemad-Shahidi en Taghipour, 2012). W – rivierbreedte, h – waterdiepte, u – stroomsnelheid, u_* - schuifspanningssnelheid, K – longitudinale dispersiecoëfficiënt en s – 'sinuosity' (mate van meandering).

No.	W	h	u	u*	K	s	W/h
	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m^2/s)	(-)	(-)
1	16	0.5	0.21	0.079	20		32
2	18	0.8	0.52	0.100	21		22
3	16	0.5	0.25	0.079	10		33
4	47	0.9	0.28	0.067	14		55
5	59	2.1	0.86	0.104	54		28
6	53	2.1	0.79	0.107	46		26
7	19	0.4	0.14	0.116	10		48
8	34	0.9	0.16	0.055	10		40
9	36	0.6	0.30	0.049	8		62
10	22	1.6	0.31	0.058	7		14
11	30	1.1	0.36	0.048	1	1.41	27
12	20	0.4	0.29	0.044	14	1.30	48
13	86	2.9	1.20	0.514	153		29
14	16	0.4	0.32	0.060	9		41
15	20	0.5	0.43	0.069	16		38
16	24	0.7	0.52	0.081	26		34
17	35	0.3	0.21	0.040	5		110
18	37	0.5	0.32	0.050	14		81
19	48	0.9	0.44	0.070	37		55
20	183	2.2	0.93	0.065	465	1.35	82
21	201	3.6	1.27	0.082	836	1.35	57
22	197	3.1	1.53	0.077	892	1.35	63
23	67	1.0	0.88	0.110	42		68
24	33	0.3	0.43	0.046	9		109
25	51	0.4	0.46	0.046	21		121
26	25	0.6	1.01	0.137	14	1.08	45
27	13	0.3	0.31	0.043	7	1.31	48
28	16	0.4	0.37	0.055	14	1.31	39
29	37	0.8	0.29	0.068	23		45
30	42	0.8	0.42	0.068	30		53
31	104	2.0	0.56	0.054	316		51
32	127	4.8	0.64	0.081	669		27
33	13	0.8	0.37	0.077	14		17
34	20	1.2	0.45	0.093	33		16
35	35	1.0	0.21	0.041	39		36
36	67	0.6	0.35	0.044	30		122
37	66	1.1	0.39	0.075	33		58

No.	W	h	u	u*	K	s	W/h
	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m^2/s)	(-)	(-)
38	203	1.4	0.39	0.065	93	1.13	150
39	11	0.5	0.21	0.075	18		21
40	23	0.7	0.52	0.101	102		34
41	25	0.5	0.41	0.081	26		56
42	13	0.3	0.42	0.057	18	1.40	43
43	24	1.0	0.59	0.098	102	2.25	25
44	12	0.7	0.43	0.085	21	2.25	18
45	21	0.5	0.52	0.069	26	1.26	44
46	49	0.6	0.26	0.050	38	1.28	89
47	93	0.7	0.16	0.050	41	1.28	131
48	51	0.7	0.62	0.040	30	1.28	79
49	98	1.2	0.32	0.058	120	1.61	85
50	50	1.0	0.32	0.075	30		53
51	34	0.6	0.16	0.041	67		58
52	41	0.4	0.23	0.040	67	1.61	99
53	42	0.7	0.23	0.064	41	2.25	61
54	50	0.4	0.15	0.081	29	2.25	121
55	43	1.1	0.63	0.081	53	1.31	38
56	43	0.7	0.22	0.064	41		63
57	64	0.5	0.10	0.056	29		138
58	59	0.8	0.68	0.072	53		78
59	76	2.0	0.74	0.138	89	1.27	39
60	92	2.4	0.52	0.094	167	1.57	38
61	100	2.5	0.30	0.105	167		40
62	32	0.5	0.24	0.038	52	1.38	64
63	15	0.3	0.25	0.062	2	1.09	47
64	12	0.4	0.22	0.087	2		29
65	14	0.9	1.29	0.553	3	1.08	16
66	16	0.2	0.39	0.053	7	1.13	80
67	18	0.5	0.32	0.024	6	1.41	39
68	26	0.9	0.34	0.067	40	1.41	28
69	37	0.9	0.40	0.067	40	1.41	40
70	16	0.2	0.36	0.040	69	1.31	79
71	6	0.5	0.25	0.058	69		12
72	33	1.4	0.20	0.030	55		24
73	37	2.1	0.10	0.040	55		18
74	21	0.5	0.54	0.027	501		43
75	46	0.5	0.41	0.043	501		87
76	15	0.6	0.27	0.080	10	1.75	25
77	41	1.0	0.07	0.090	10		40

No.	W	h	u	u*	K	s	W/h
	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m^2/s)	(-)	(-)
78	31	0.8	0.48	0.072	45	1.46	39
79	30	0.4	0.34	0.020	44	1.46	75
80	43	1.3	0.26	0.068	45		34
81	32	0.8	0.36	0.053	44		42
82	254	0.8	0.48	0.072	45	1.20	313
83	162	0.4	0.34	0.020	44	1.44	404
84	152	1.6	0.61	0.032	144	1.44	94
85	155	4.0	0.29	0.060	131	1.24	39
86	248	4.8	0.31	0.065	144		51
87	116	3.7	0.45	0.057	228	1.17	32
88	160	1.7	0.47	0.036	178	1.17	92
89	14	1.7	0.58	0.054	131	2.53	9
90	12	2.3	1.06	0.054	309	2.05	5
91	21	0.5	0.13	0.037	13	1.47	43
92	22	0.6	0.08	0.042	13		35
93	17	1.2	0.04	0.050	15		14
94	31	1.4	0.13	0.041	24		22
95	44	1.4	0.99	0.140	185	1.56	32
96	85	2.4	1.73	0.150	465	1.56	36
97	17	0.5	0.20	0.080	17	2.54	33
98	49	1.2	0.21	0.070	15	1.25	40
99	18	0.4	0.15	0.120	21	2.54	46
100	37	0.9	0.13	0.050	16		41
101	29	0.6	0.35	0.070	11	2.20	48
102	20	0.8	0.49	0.100	21	1.14	25
103	58	2.5	0.75	0.100	41		23
104	25	1.6	0.66	0.040	6	1.14	15
105	34	0.8	0.19	0.049	11		43
106	56	2.3	0.69	0.099	37		25
107	53	2.4	0.66	0.110	37		22
108	24	1.6	0.67	0.040	6	1.14	15
109	25	1.5	0.66	0.037	6		16
110	17	0.5	0.24	0.080	25		34
111	181	3.3	1.62	0.080	1487		55
112	26	0.9	0.34	0.070	33		29
113	37	0.9	0.40	0.070	40		41
114	64	0.8	0.67	0.270	35	1.30	80
115	59	1.1	0.88	0.120	42	1.18	54
116	69	2.2	1.55	0.170	163	1.18	31
117	34	2.5	0.82	0.180	65	1.89	14

No.	W	h	u	u*	K	s	W/h
	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m^2/s)	(-)	(-)
118	70	2.4	0.43	0.100	112	2.17	29
119	72	3.8	0.76	0.130	260	2.17	19
120	106	6.1	0.79	0.088	181		17
121	72	8.2	1.20	0.337	243		9
122	100	4.4	0.03	0.002	0		23
123	35	2.5	0.04	0.002	0		14
124	8	3.5	0.68	0.047	1		2
125	35	2.5	0.11	0.006	1		14
126	34	2.5	0.13	0.008	2		14
127	49	8.1	0.27	0.019	3		6
128	1	0.2	0.38	0.110	10		7
129	2	0.1	0.33	0.100	2		11
130	5	0.3	0.26	0.210	7		18
131	9	0.3	0.37	0.150	8		30
132	10	0.4	0.53	0.170	12		29
133	20	0.4	0.19	0.180	7		50
134	13	0.6	0.48	0.240	7		22
135	10	0.6	0.55	0.300	14		16
136	11	0.8	0.41	0.061	8		15
137	59	0.7	0.37	0.070	32		82
138	63	1.0	0.32	0.094	22		63
139	60	1.0	0.46	0.092	47		63
140	25	1.2	0.73	0.084	27		21
141	20	1.9	0.62	0.123	12		10
142	25	1.4	0.77	0.091	21		18
143	25	1.4	0.78	0.091	16		18
144	25	1.6	0.83	0.096	18		16
145	85	206.0	0.69	0.060	52		0
146	120	2.0	0.64	0.050	67		60
147	11	0.3	0.35	0.058	3		38
148	10	0.8	0.46	0.090	6		12
149	10	0.9	0.52	0.100	5		11

D Verziltingskarakteristieken mond Hollandsche IJssel

In deze bijlage wordt de verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel in detail geanalyseerd, zoals die is opgetreden in de eerste helft van november 2015. Vervolgens worden de resultaten vergeleken met de analyse die eerder is uitgevoerd voor 10 september 2013 in Kuijper (2015). De resultaten zijn samengevat in Par. 5.1.

D.1 Metingen 2 t/m 17 november 2015

De analyse voor november 2015 vindt plaats aan de hand van de volgende waarnemingen:

- Waterstand te Krimpen a/d IJssel;
- Bovenrijnafvoer te Lobith, zoals die 2 dagen eerder is opgetreden;
- Chlorideconcentratie:
  - te Lobith, zoals die 2 dagen eerder is opgetreden;
  - t.p.v. de van Brienenoordbrug (km. 995) op NAP-650 cm;
  - t.p.v. Krimpen a/d IJssel (km. 18, stormvloedkering) op NAP-550 cm;
  - in km. 17 aan de oever, 1 m boven de bodem.
  - in km. 12 aan de oever, 1 m boven de bodem.

De locaties van de chlorideconcentratiemetingen in de vier laatstgenoemde meetpunten zijn weergegeven in Figuur D.1.

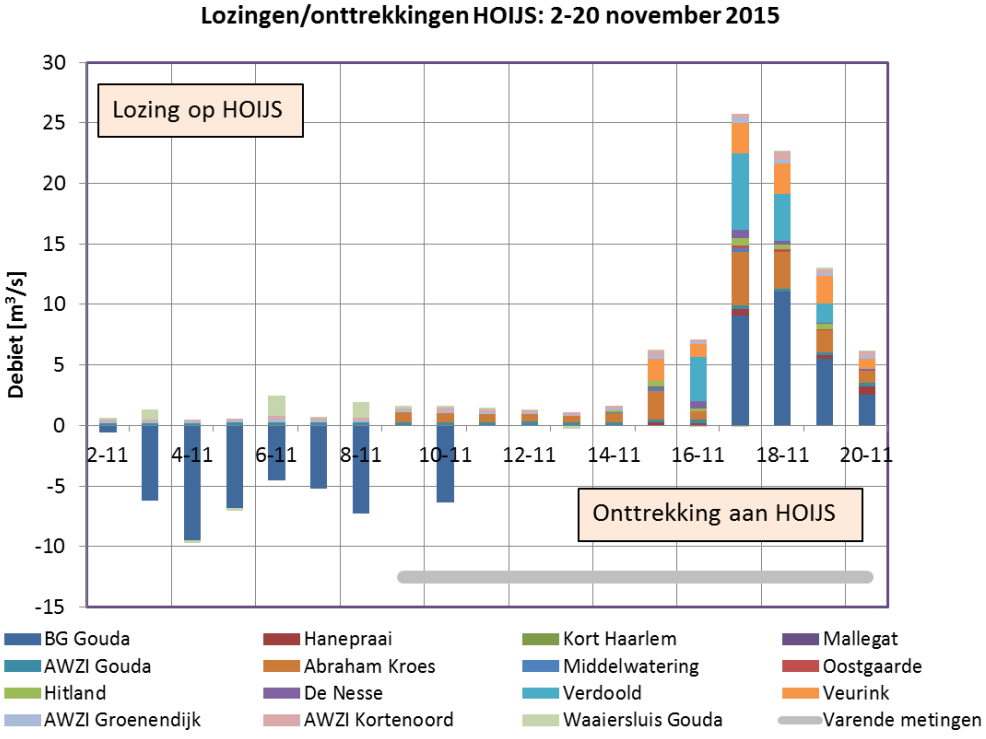
Figuur D.1 Locaties van de chlorideconcentratiemetingen nabij de mond van en in de Hollandsche IJssel. De foto toont het samenvloeiingspunt van de Hollandsche IJssel en de Nieuwe Maas. De afstand tussen de van Brienenoordbrug en het samenvloeiingspunt is 1,2 km; de afstand tussen de van Brienenoordbrug en Krimpen a/d IJssel (stormvloedkering) is 3 km.

De waterstand te Krimpen a/d IJssel wordt gebruikt om de richting van het kombergingsdebiet in de mond van de Hollandsche IJssel vast te stellen: tijdens opgaand tij (LW → HW) instromend en tijdens afgaand tij (HW → LW) uitstromend.

Gedurende de eerste helft van november neemt de Bovenrijnafvoer geleidelijk af van 1000 m^3/s naar 900 m^3/s.

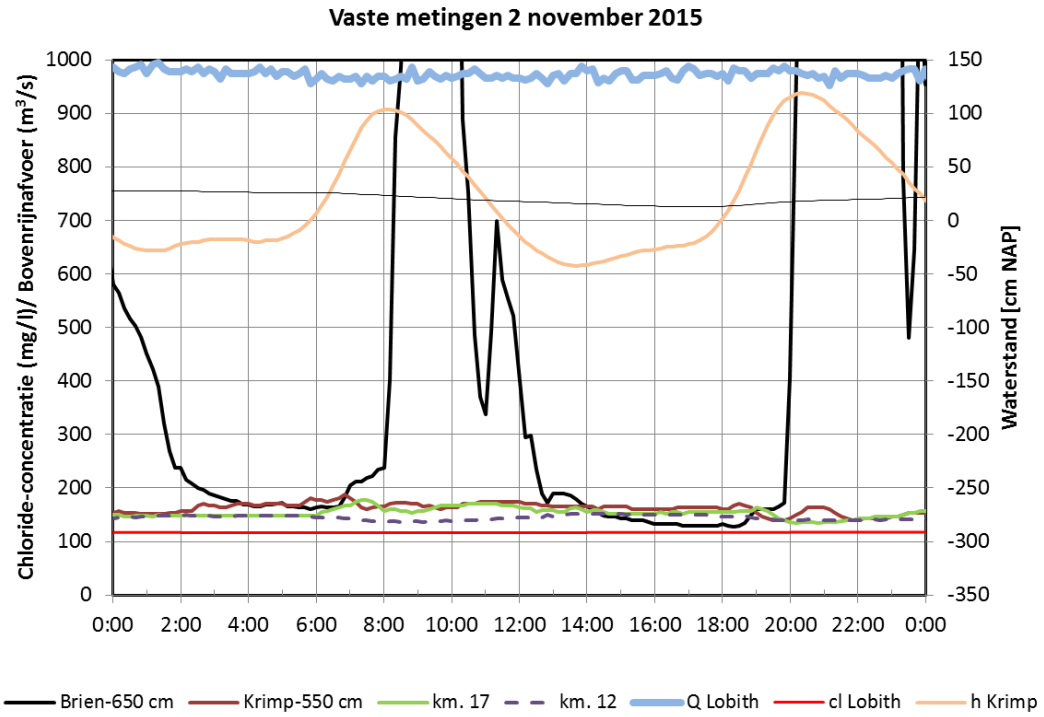
Tussen 2 en 8 november is geen noemenswaardige op- en afwaaiing opgetreden en is de gemiddelde waterstand constant. Op 8 november is er een middenstandsverlaging van ongeveer 0,5 m welke op 9 november wordt gevolgd door een middenstandsverhoging van 0,5 m. Op 13 en 14 november treedt een middenstands-verhoging op van 1 m met een geleidelijke daling tijdens de opvolgende dagen.

In Figuur D.2 zijn de lozingen en onttrekkingen langs de Hollandsche IJssel weergegeven. In de periode 3 t/m 8 november en op 10 november wordt er netto onttrokken. Vanaf 15 november wordt er netto geloosd. Op 2, 9 en 11 t/m 14 november zijn de netto onttrekkingen en lozingen zeer klein (totaal ~1 m^3/s).



Figuur D.2 Lozingen en onttrekkingen Hollandsche IJssel tijdens de periode 2 t/m 20 november.

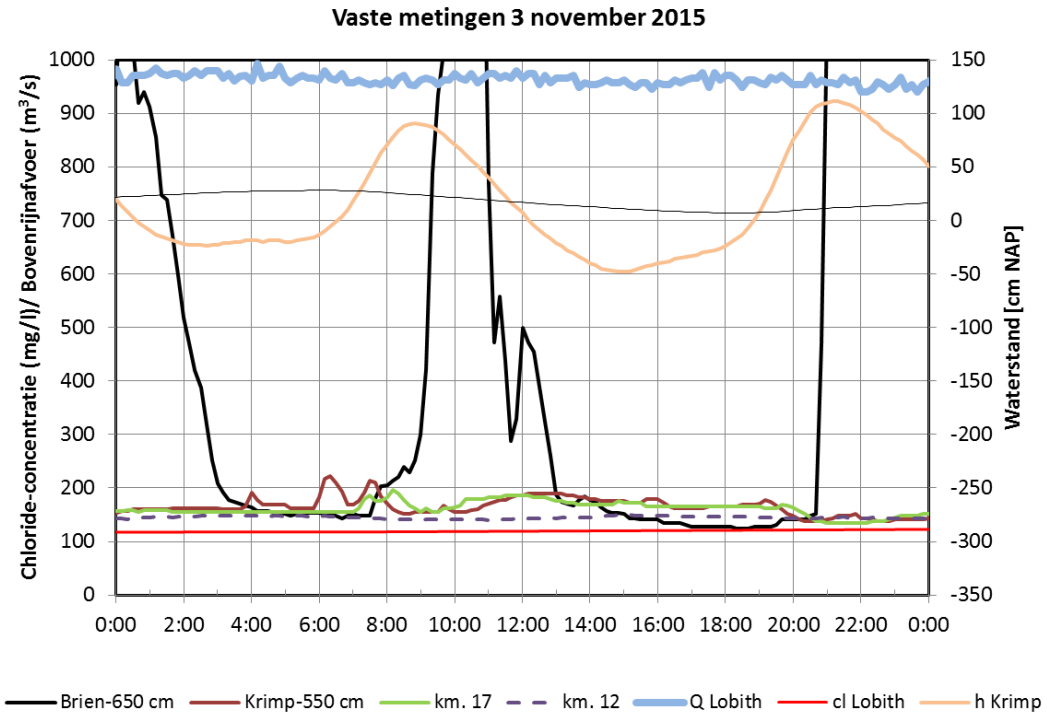
De analyse vindt plaats aan de hand van steeds dezelfde figuren voor opeenvolgende dagen tussen 2 en 16 november 2015, zie Figuur D.3 t/m Figuur D.18.



Figuur D.3 Metingen op 2 november 2015.

2 november:

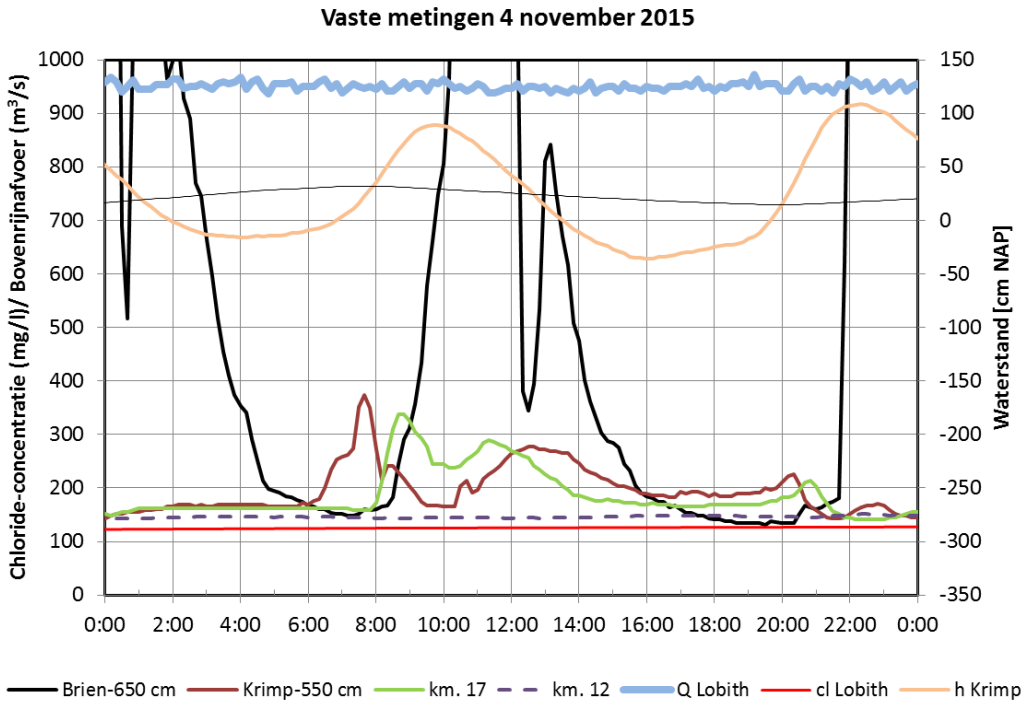
- Gedurende het laatste uur met instroming in de Hollandsche IJssel (7:00-8:00 uur) neemt de chorideconcentratie t.p.v. de van Brienenoordbrug gering toe. Dit leidt niet tot een toename van de chlorideconcentratie t.p.v. Krimpen. De zoutindringing reikt op dat moment tot ergens tussen beide locaties.
- Vanaf hoogwater neemt de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienenoordbrug sterk toe; er is dan nog een vloedstroming in de Nieuwe Maas. De chlorideconcentratie in Krimpen neemt niet toe. De Hollandsche IJssel stroomt na hoogwater uit en het komledigingsdebiet is groot genoeg om verzilting van de Hollandsche IJssel te voorkomen.
- Rond 18:30 uur is de minimale chlorideconcentratie in de Nieuwe Maas iets lager dan de minimale concentratie 1 getijperiode eerder (06:00 uur). Dit lijkt samen te hangen met de dagelijkse ongelijkheid: het voorafgaande *hoogwater* is relatief laag (dus minder zoutindringing) en het voorafgaande *laagwater* is relatief laag (dus meer zeewaarts transport).



Figuur D.4 Metingen op 3 november 2015.

3 november:

- Rond 06:00 uur treedt een geringe toename van de chlorideconcentratie op t.p.v. Krimpen a/d IJssel. Er vindt dan een geringe instroming van de Hollandsche IJssel plaats gelet op de toename van de waterstand. Een mogelijke verklaring is een eerder opgetreden toestroming van zout water tussen 2:00 en 4:00 uur van de Nieuwe Maas naar de mond van de Hollandsche IJssel. Gedurende deze periode is er nog verzilting t.p.v. de van Brienenoordbrug. In de Nieuwe Maas is er dan nog een ebstroming maar in de Hollandsche IJssel is de stroming nihil of er is een geringe toestroming vanaf de Nieuwe Maas door een toename van de waterstand, waardoor verzilt water zich kan verzamelen in de mond van de Hollandsche IJssel.
- Gedurende de eerste helft van de periode met instroming in de Hollandsche IJssel (6:00-8:00 uur) wordt het licht verzilte water meegenomen resulterend in eerst een toename van de chlorideconcentratie in Krimpen en een uur later in km. 17. De gemiddelde stroomsnelheid zou in die periode dan 1000/3600 ≈ 0,3 m/s geweest moeten zijn, wat realistisch lijkt.
- Tijdens afgaand tij neemt de chlorideconcentratie eerst in km. 17 iets toe en vervolgens in Krimpen. Het eerder ingestroomde verzilte water wordt dan weer naar de Nieuwe Maas getransporteerd.
- De toename van de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienenoordbrug rond 20:30 uur (iets voor hoogwater) leidt niet tot verzilting van de Hollandsche IJssel, omdat deze riviertak vanaf 21:00 uur begint uit te stromen.



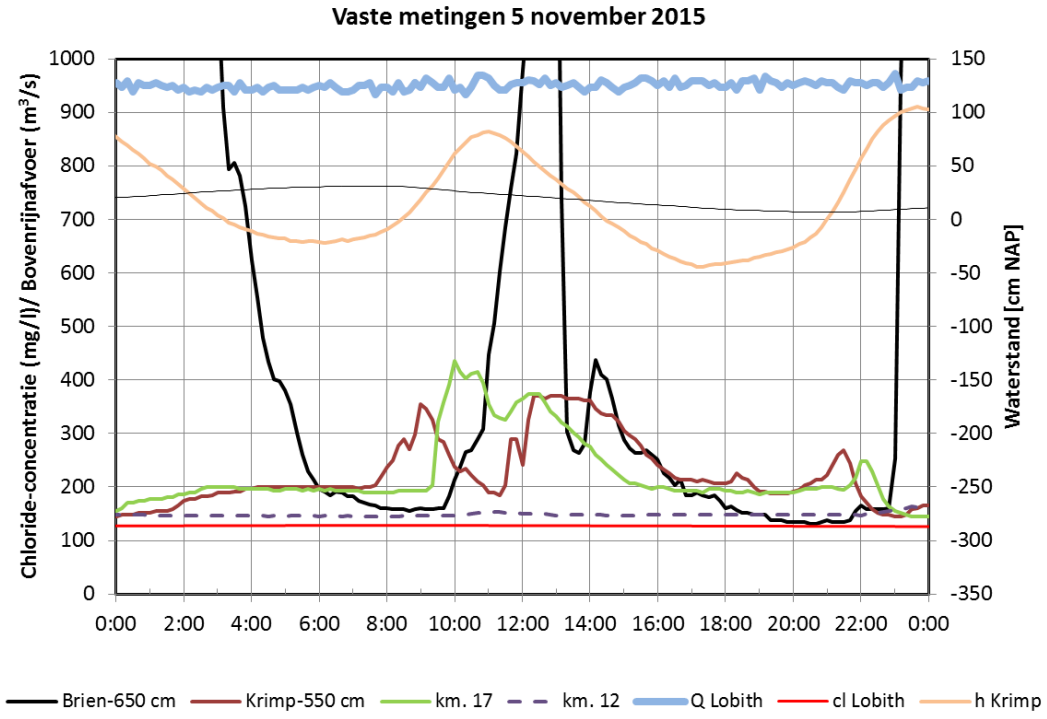
Figuur D.5 Metingen op 4 november 2015.

4 november:

- Op deze dag kunnen dezelfde karakteristieken worden waargenomen als op de voorafgaande dagen maar dan geprononceerder.
- Om 6:00 uur, aan het begin van de periode met vloedstroming op de Hollandsche IJssel, vindt een concentratietoename plaats in Krimpen gevolgd door een afname. De toename vindt al plaats als de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienenoordbrug laag is, zodat de Nieuwe Maas niet als zoutbron kan hebben gefungeerd.
- De toename en vervolgens afname van de concentratie duidt op een “zoutprop” die mogelijk afkomstig is van de mond van de Hollandsche IJssel, tussen de Nieuwe Maas en Krimpen. De afname is het resultaat van een toestroming van zoet water afkomstig van de Nieuwe Maas nadat de zoutprop is gepasseerd.
- Na enige tijd passeert deze “zoutprop” km. 17. Tijdens deze passage kentert de stroming in de Hollandsche IJssel, zodat de concentratie in km. 17 maar ten dele daalt.
- Na de kentering (tijdens hoogwater) passeert in km. 17 het eerder ingestroomde, verzilte water, wat eerst leidt tot een toename en vervolgens een verdere afname van de chlorideconcentratie. Dit passeren wordt ongeveer een uur later waargenomen in Krimpen.
- Omdat tijdens afgaand tij de stroomsnelheid gemiddeld kleiner is dan tijdens opgaand tij vindt de concentratieafname meer geleidelijk plaats dan de toename tijdens opgaand tij.
- Rond het tweede laagwater (16:00 uur) is de chlorideconcentratie in Krimpen iets hoger dan rond het eerste laagwater (4:00 uur). In km. 17 is dit niet het geval.
- Het is opvallend dat tijdens de instroming van de Hollandsche IJssel vanaf 16:00 uur (gering) en 18:00 uur (sterk) geen piekconcentratie waarneembaar is. Op het moment van het tweede laagwater (16:00 uur) is de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienenoordbrug laag in vergelijking met de concentratie tijdens het eerste laagwater (rond 04:00 uur). Dit is waarschijnlijk het gevolg van de dagelijkse ongelijkheid.

Verondersteld kan worden dat tijdens het tweede laagwater geen verzilt water van de Nieuwe Maas in de richting van de Hollandsche IJssel is gestroomd.

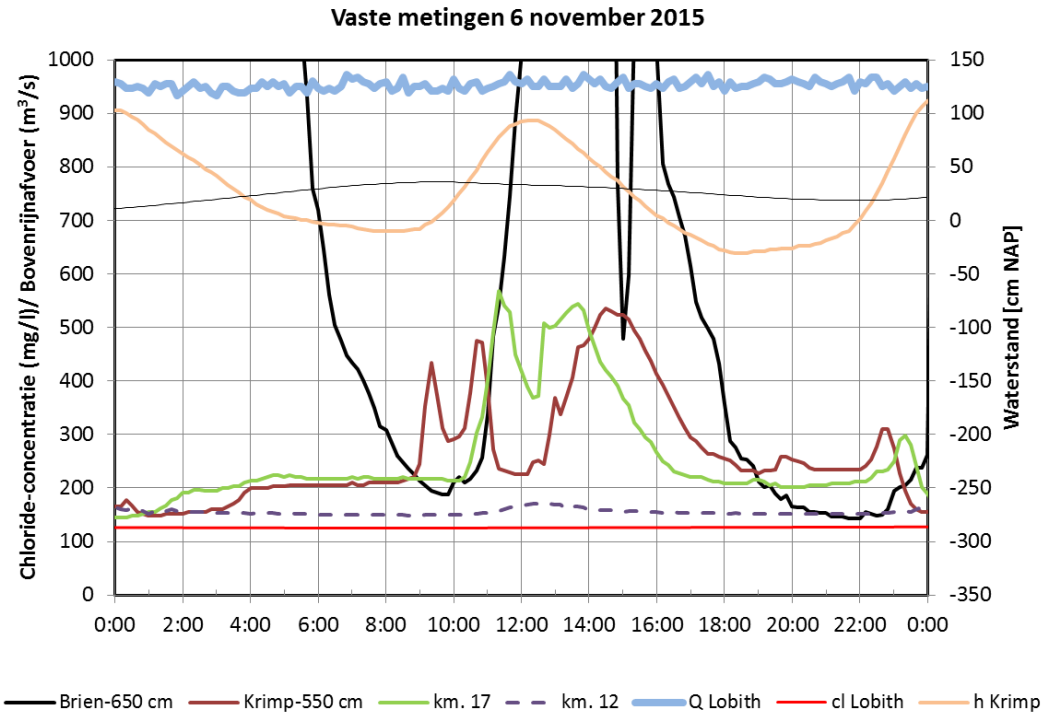
- De grotere verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel tijdens deze dag in vergelijking met de eerdere dagen is het gevolg van de afgenomen Bovenrijnafvoer.



Figuur D.6 Metingen op 5 november 2015.

5 november:

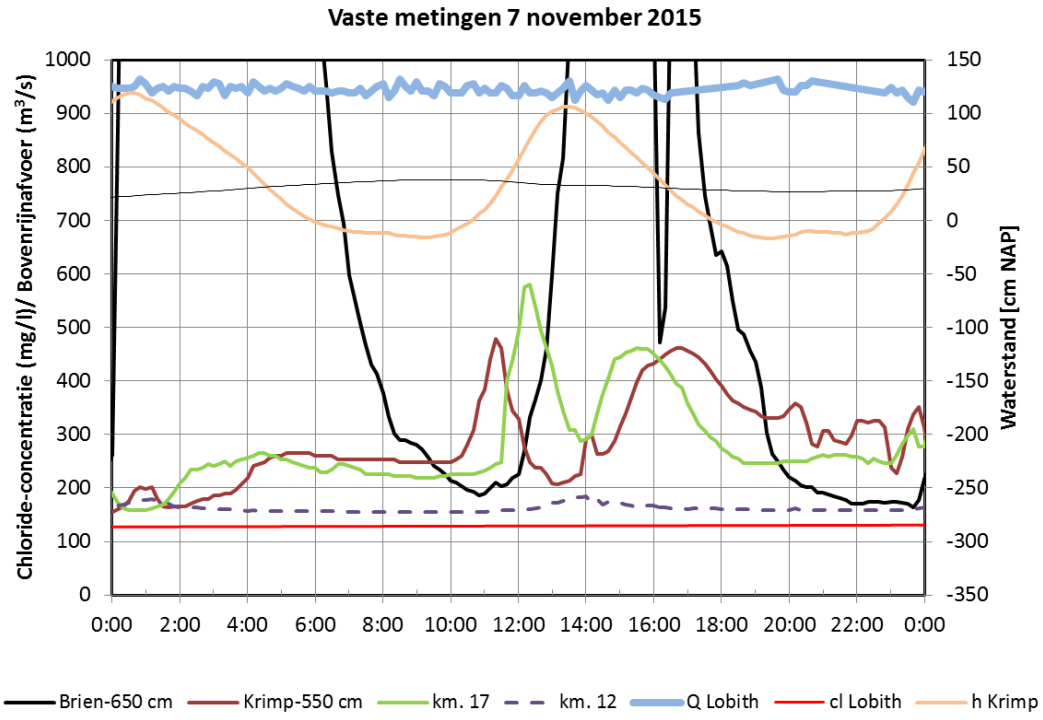
- De verziltingskarakteristieken zijn gelijk aan die op 4 november en eerdere dagen.
- Opvallend is dat de maximale chlorideconcentratie in km. 17 hoger is dan die in Krimpen.
- Na het tweede laagwater treedt slechts een kleine piekconcentratie in Krimpen en km. 17 op.
- De maximale verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel is op deze dag groter dan op 4 november.



Figuur D.7 Metingen op 6 november 2015.

6 november:

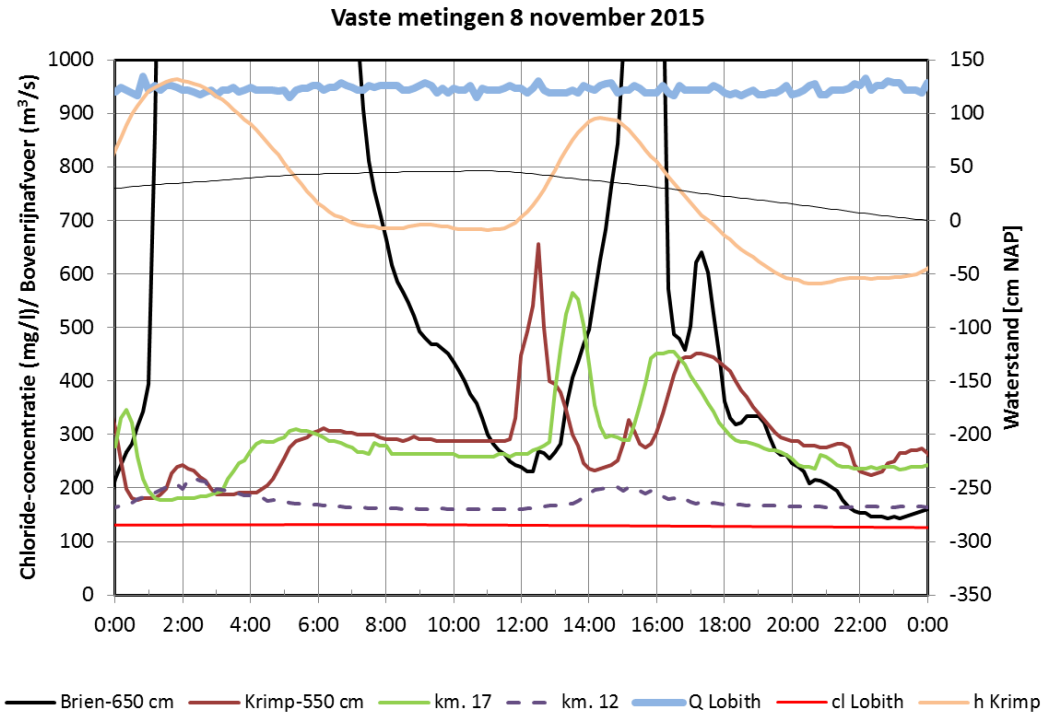
- Bij begin instroming van de Hollandsche IJssel neemt de chlorideconcentratie in Krimpen direct toe, zoals dat ook het geval is bij de voorafgaande dagen. Opvallend is nu dat tijdens instroming sprake is van 2 opeenvolgende pieken. Beide pieken zijn ook aanwezig in km. 17. Na hoogwaterkentering komt na enige tijd de “zoutprop” weer terug, eerst in km. 17 en daarna in Krimpen. De beide pieken zijn dan samengesmolten, vermoedelijk door menging.
- Rond het tweede laagwater (18:30 uur) is de chlorideconcentratie in Krimpen iets hoger dan rond het eerste laagwater (8:00 uur). In km. 17 is dit niet het geval.
- De concentratiepiek aan het begin van instroming rond 23:00 uur is lager dan de piek tijdens de vorige periode met instroming (na 9:00 uur). Ook hier is waarschijnlijk rond het tweede laagwater minder verzilt water van de Nieuwe Maas in de richting van de mond van de Hollandsche IJssel gestroomd dan rond het eerste laagwater.
- In km. 12 is er een lichte toename van de chlorideconcentratie.
- De maximale verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel (Krimpen en km. 17) is op deze dag groter dan op 5 november.



Figuur D.8 Metingen op 7 november 2015.

7 november:

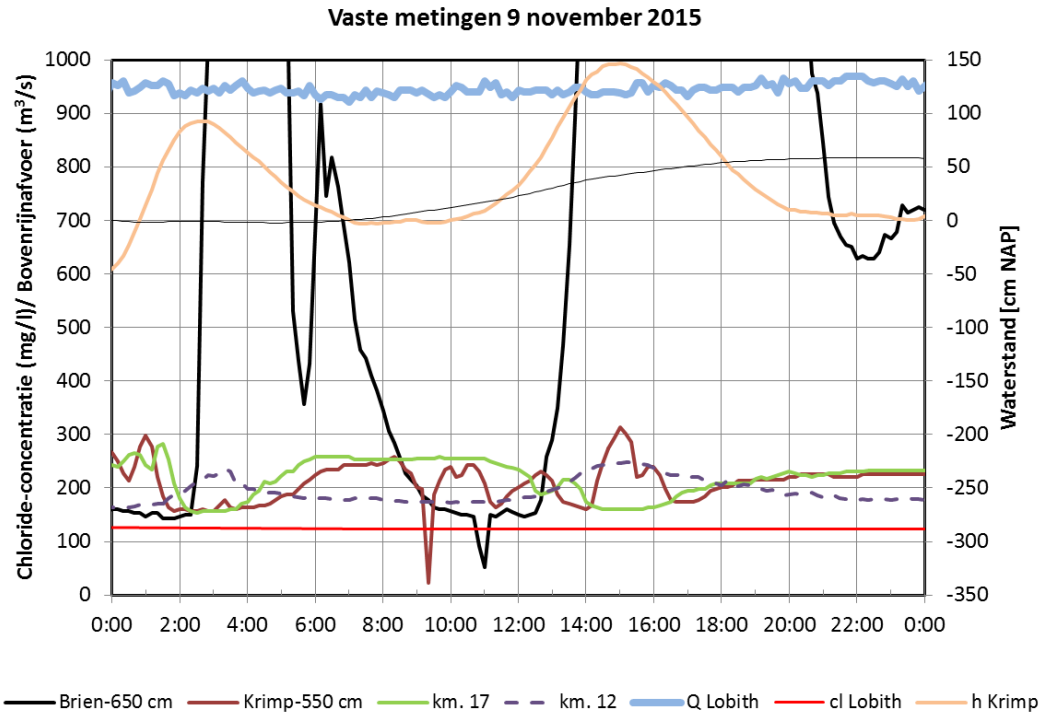
- De verziltingskarakteristieken zijn vergelijkbaar met die op de eerdere dagen. Er is nu weer sprake van 1 piek aan het begin van de periode met instroming (11:00 uur). De chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienenoordbrug is op dat moment laag, zodat de piek niet het gevolg is van toestroming van water vanaf de Nieuwe Maas.
- De chlorideconcentratie rond het tweede laagwater (20:00-22:00 uur) is weer toegenomen ten opzichte van het eerste laagwater van deze dag (09:00 uur), zowel in Krimpen als in km. 17.
- Aan het begin van instroming in de Hollandsche IJssel rond 23:00 uur treedt geen concentratiepiek op in Krimpen en in km. 17.
- De maximale concentratie in km. 12 is iets toegenomen ten opzichte van de voorafgaande dag.
- De maximale verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel (Krimpen en km. 17) is op deze dag vergelijkbaar met die op 6 november



Figuur D.9 Metingen op 8 november 2015.

8 november:

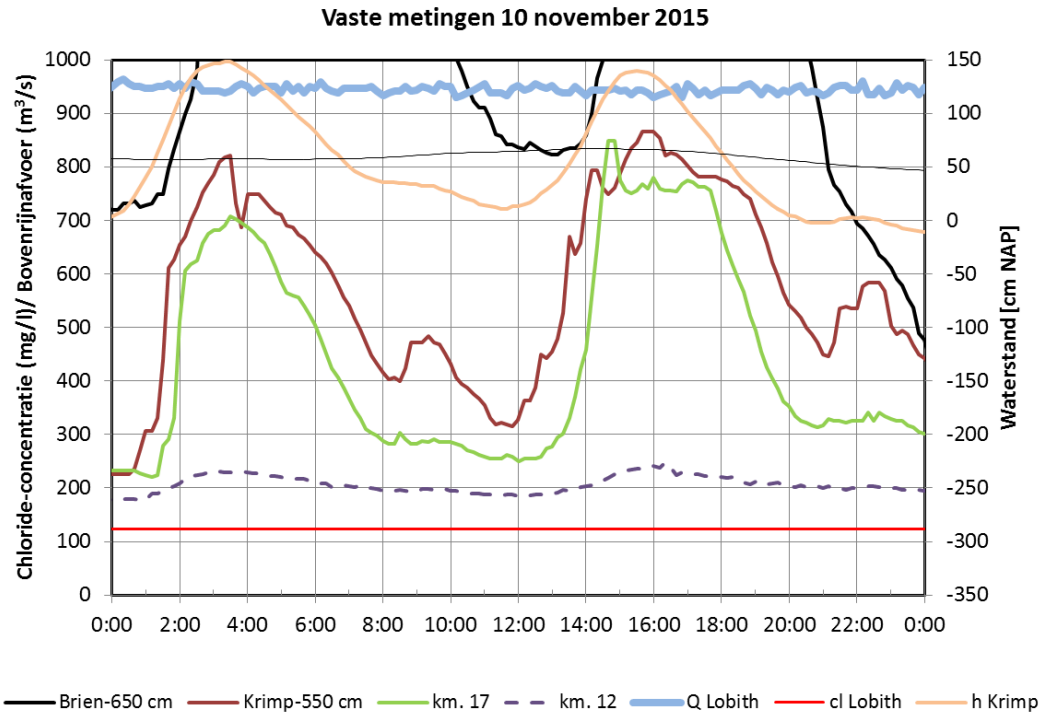
- Tijdens deze dag treedt een afwaaiing op wat zichtbaar is in een verlaagd laagwater.
- Aan het begin van de instroming van de Hollandsche IJssel, vanaf 12:00 uur, treedt weer een concentratiepiek op, eerst in Krimpen en 1 uur later in km. 17. Na hoogwater, tijdens uitstroming, komt de “zoutprop” weer langs, eerst in km. 17 en vervolgens in Krimpen. De chlorideconcentratie bij de van Brienenoordbrug rond het eerste laagwater (08:00 uur) was hoog, zodat verzilt water naar de Hollandsche IJssel is gestroomd.
- Aan het begin van instroming in de Hollandsche IJssel (na 24:00 uur op 9 november, zie Figuur D.10) treedt geen concentratiepiek op. De chlorideconcentratie bij de van Brienenoordbrug rond het tweede laagwater (21:00 uur) is laag en er is geen verzilt water naar de Hollandsche IJssel gestroomd.
- Tijdens het tweede laagwater (22:00 uur) is de chlorideconcentratie zowel in Krimpen als in km. 17 lager dan tijdens het eerste laagwater (rond 10:00 uur). Dit is mogelijk het gevolg van de extra uitstroming ten gevolge van de middenstandsverlaging.
- De maximale concentratie in km. 12 is groter dan tijdens 7 november.
- De maximale verzilting in de mond is vergelijkbaar met, of iets groter dan, de verzilting op 7 november.



Figuur D.10 Metingen op 9 november 2015.

9 november:

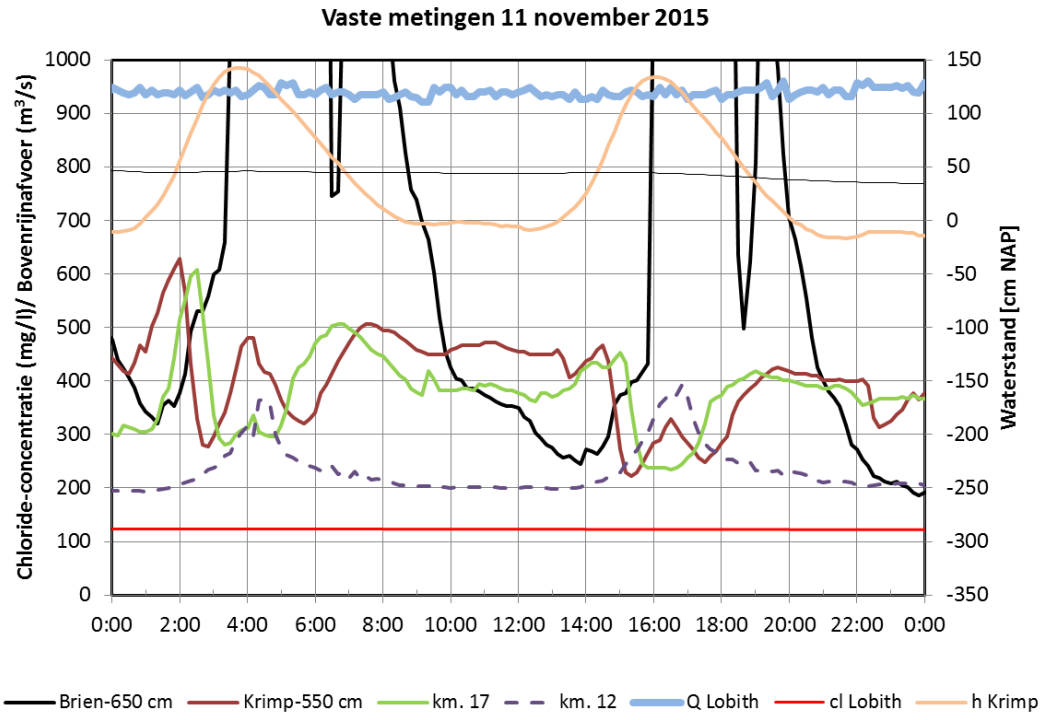
- Er zijn op deze dag geen duidelijke concentratiepieken aan het begin van instroming in de Hollandsche IJssel (na 10:00 uur). Op basis van de gemeten chlorideconcentratie bij de van Brienenoordbrug rond laagwater zou dit wel worden verwacht.
- Ondanks de sterke toename van de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienenoordbrug als gevolg van de middenstandsopzet (verhoogd hoogwater) is er vrijwel geen verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel. Door de uitstroming van de Hollandsche IJssel na hoogwater wordt de zoutindringing tegengegaan.
- Aan het eind van de dag blijft tijdens laagwater de Nieuwe Maas bij de van Brienenoordbrug nog sterk verzilt.



Figuur D.11 Metingen op 10 november 2015.

10 november:

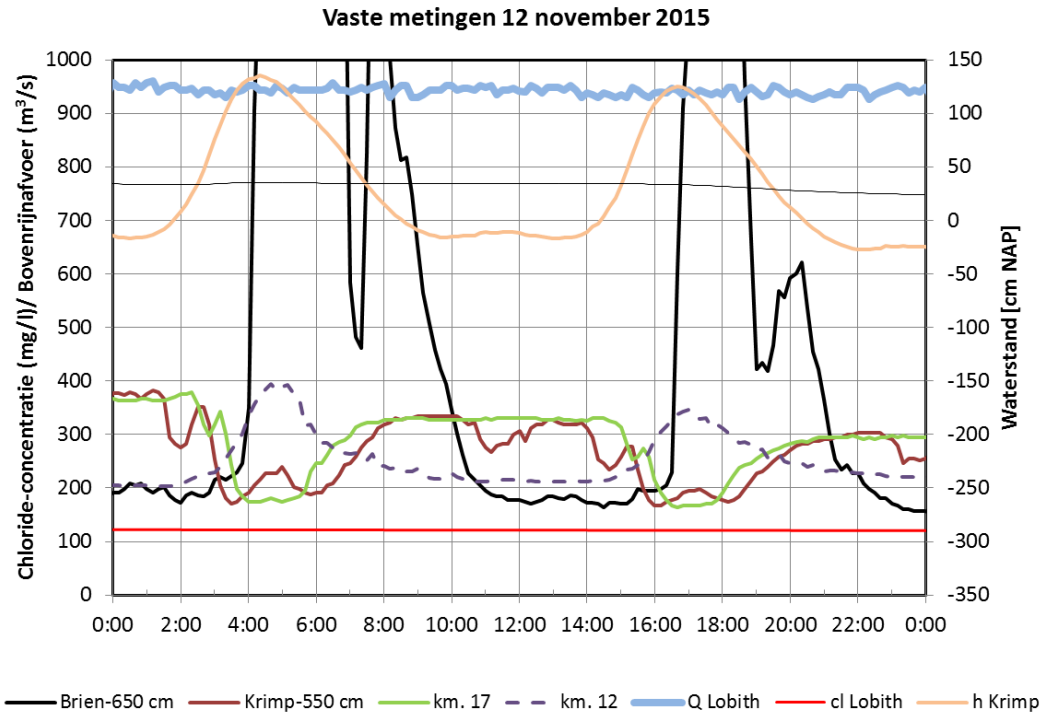
- De permanente verzilting van de Nieuwe Maas ter hoogte van de Hollandsche IJssel leidt tot een sterke verzilting van de Hollandsche IJssel bij Krimpen en km. 17. De verzilting begint wanneer de Hollandsche IJssel gaat instromen (vanaf 0:00 uur). Tijdens uitstroming daalt de chlorideconcentratie weer maar aan het eind van deze periode met uitstroming is de concentratie nog verhoogd: 300 mg/l op 12:00 uur bij Krimpen.
- Tijdens de volgende periode met instroming, na 12:00 uur, is er opnieuw verzilting in Krimpen en km. 17. Als de Hollandsche IJssel weer gaat uitstromen (vanaf 15:30 uur) dalen de concentraties, waarbij de concentraties in Krimpen en km. 17 aan het eind van deze periode iets hoger zijn dan aan het eind van de voorafgaande periode met uitstroming. De Hollandsche IJssel wordt in de mond dus geleidelijk zouter.
- In km. 12 wordt de chlorideconcentratie (nog) niet beïnvloed door de middenstandsopzet.



Figuur D.12 Metingen op 11 november 2015.

11 november:

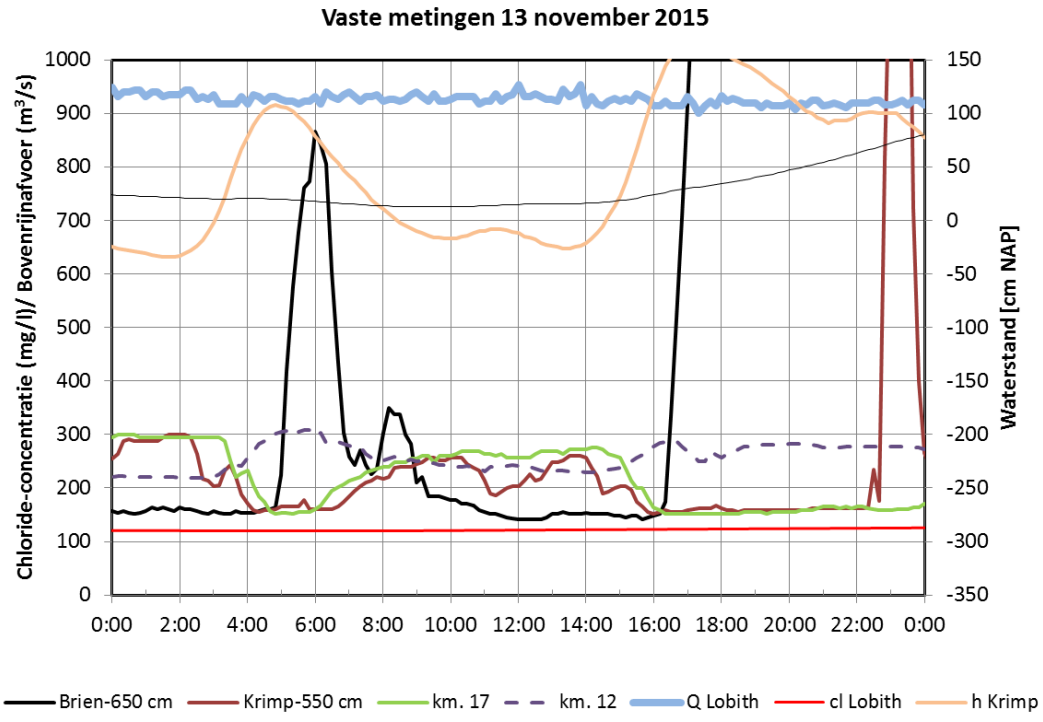
- Op deze dag is de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienenoordbrug lager dan op 10 november. Na het begin van instroming in de Hollandsche IJssel rond 01:00 uur treedt weer een concentratiepiek op in Krimpen en later in km. 17. Dit is niet het geval bij de 2^{e} instroomperiode vanaf 13:00 uur. Er treedt dan juist een verlaging van de chlorideconcentratie op, omdat op dat moment de concentratie in de Nieuwe Maas lager is dan in de Hollandsche IJssel.
- Aan het eind van de laatste uitstroomperiode op deze dag (20:00 uur) is de chlorideconcentratie lager dan aan het eind van de voorafgaande uitstroomperiode (8:00 uur). Deze afname komt door wegspoeling van verzilt water naar de Nieuwe Maas en vermoedelijk ook door dispersief transport in de richting van Gouda. De piek in km. 12 is dan het resultaat van dit dispersief transport.



Figuur D.13 Metingen op 12 november 2015.

12 november:

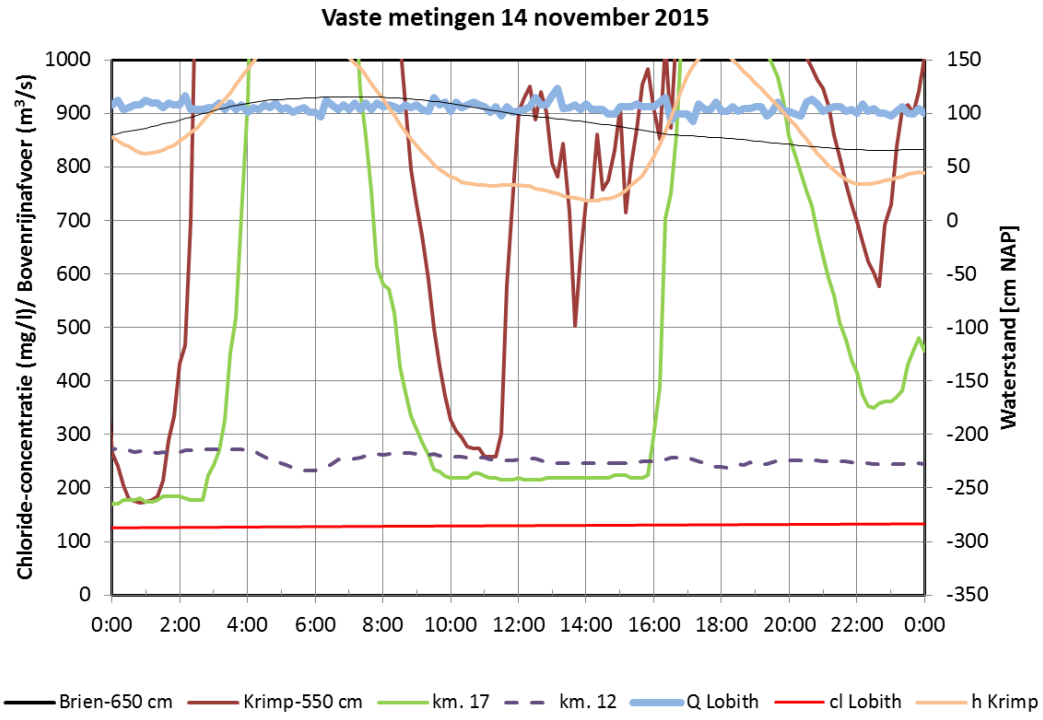
- Ook op deze dag neemt tijdens instroming van de Hollandsche IJssel (vanaf 01:00 uur) de chlorideconcentratie in Krimpen en km. 17 af, omdat de concentratie in de Nieuwe Maas lager is dan die in de Hollandsche IJssel.
- De chlorideconcentratie in de Hollandsche IJssel neemt geleidelijk af.
- In km. 12 is de verzilting vergelijkbaar met die op 11 november.



Figuur D.14 Metingen op 13 november 2015.

13 november:

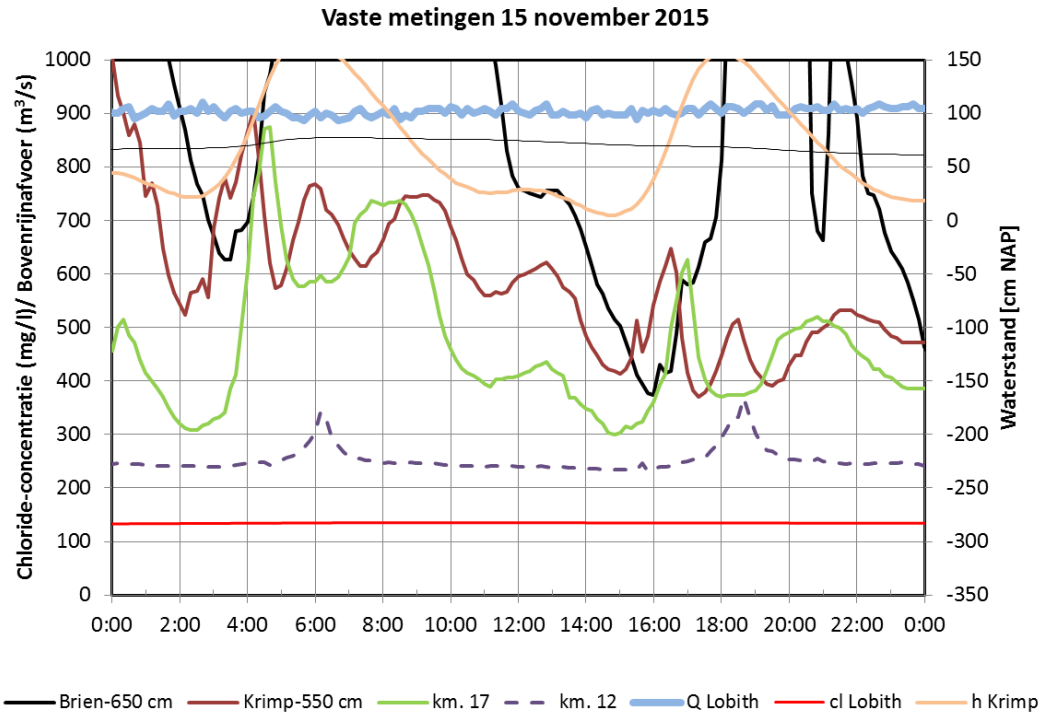
- Tijdens de eerste instroomperiode van de Hollandsche IJssel, vanaf 02:00 uur, neemt de chlorideconcentratie in Krimpen en km. 17 af omdat relatief zoet water vanuit de Nieuwe Maas toestroomt. Tijdens de tweede instroomperiode, vanaf 14:00 uur, is dit ook het geval.
- De maximale chlorideconcentratie in km. 12 neemt verder af terwijl de minimale concentratie iets toeneemt. Het chlorideverloop wordt dus in longitudinale richting meer “uitgesmeerd” (vlakker verloop).
- Aan het eind van deze dag vindt weer een (forse) middenstandsverhoging op resulterend in een grote toename van de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienenoordbrug. Omdat de Hollandsche IJssel op het moment van de verhoging uitstroomt (na 17:00 uur) wordt zoutindringing in de Hollandsche IJssel tegen gegaan, dit ondanks de hoge chlorideconcentratie in de Nieuwe Maas.



Figuur D.15 Metingen op 14 november 2015. De chlorideconcentratie bij de van Brienenoordbrug is groter dan de maximale waarde van de verticale as.

14 november:

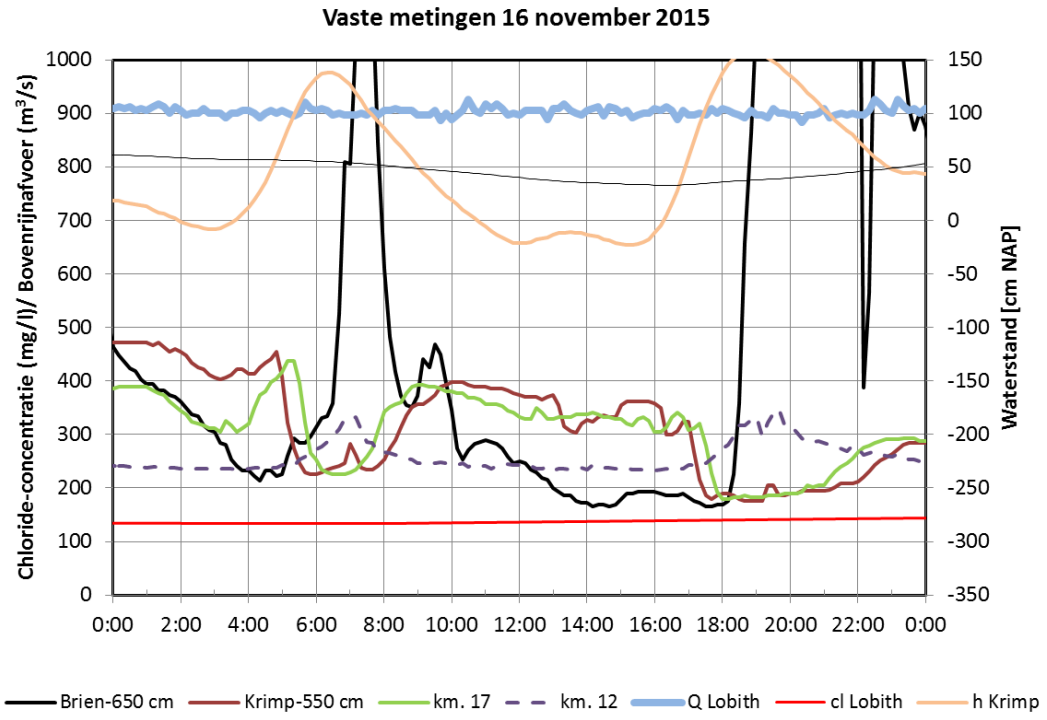
- Aan het begin van de eerste instroomperiode, vanaf 01:00 uur, is de Nieuwe Maas sterk verzilt (de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienenoordbrug valt buiten de schaal van de verticale as). Zodra de Hollandsche IJssel gaat instromen neemt de concentratie in Krimpen en, even later in km. 17, sterk toe.
- Tijdens uitstroming daalt de chlorideconcentratie weer, bijna tot de oorspronkelijke waarde van 150 mg/l. Aan het eind van deze dag, na de laatste uitstroomperiode, blijft de chlorideconcentratie in Krimpen en in km. 17 op een hoger niveau. De mond is dus permanent verzilt op deze dag.
- In km. 12 wordt de chlorideconcentratie niet beïnvloed door de verzilting van de mond.



Figuur D.16 Metingen op 15 november 2015.

15 november:

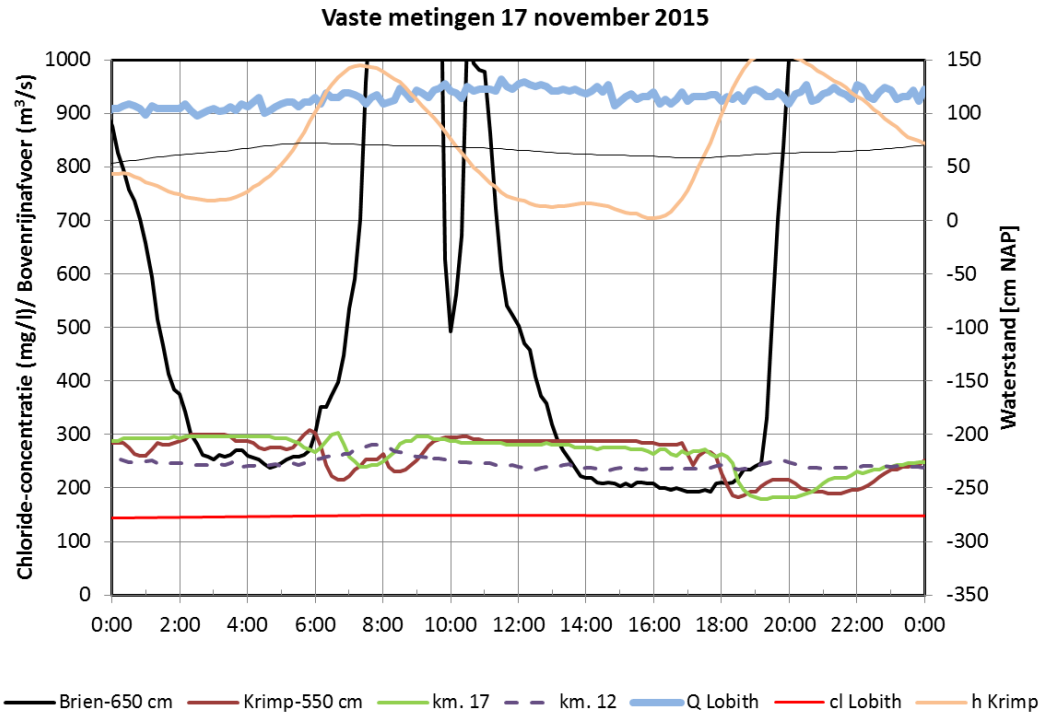
- Zowel in Krimpen als in km. 17 is sprake van permanente verzilting. Door dispersie kan een netto zouttransport plaatsvinden in de richting van Gouda.
- Het resultaat van het dispersieve transport is een toename van de chlorideconcentratie in km. 12.



Figuur D.17 Metingen op 16 november 2015.

16 november:

- Het chlorideverloop t.p.v. de van Brienenoordbrug keert weer terug naar lagere waarden. Tijdens instroming van de Hollandsche IJssel neemt de concentratie in Krimpen en km. 17 af, omdat verzilt water in de Hollandsche IJssel wordt verdrongen door relatief zoet water afkomstig van de Nieuwe Maas.
- De chlorideconcentratie in de mond van de Hollandsche IJssel neemt langzaam af. In km. 12 is dat nog niet het geval.



Figuur D.18 Metingen op 17 november 2015.

17 november:

- Op deze dag neemt de chlorideconcentratie in Krimpen en km. 17 verder af.
- Ook het concentratieverloop in km. 12 is verder afgevlakt.

D.2 Vergelijking met zoutmetingen op 10 september 2013

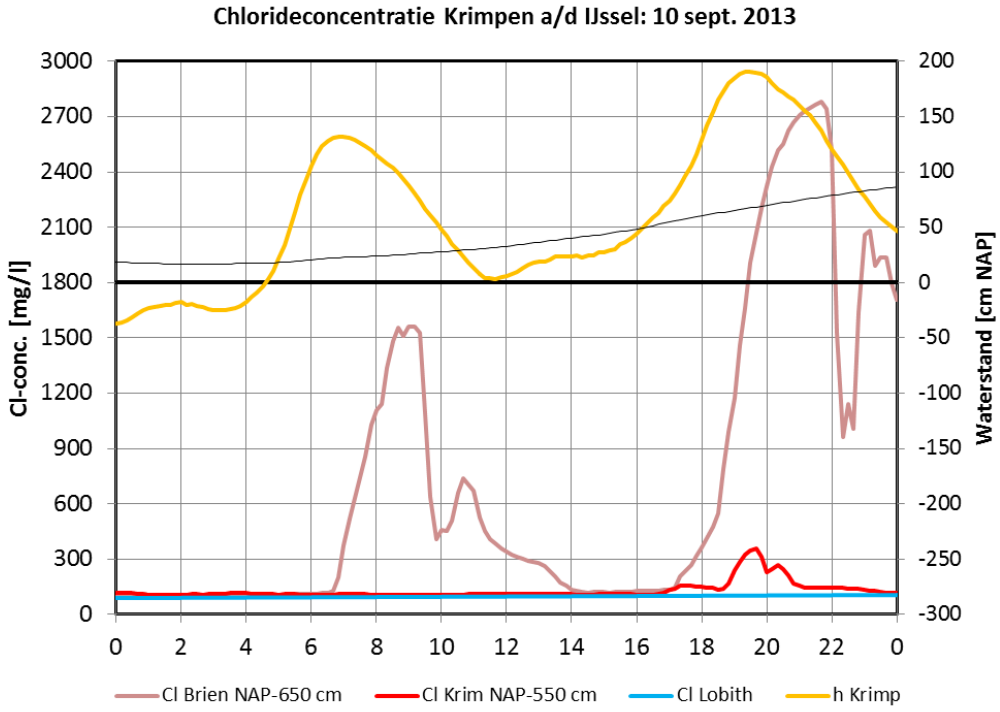
In Kuijper (2015) zijn zoutmetingen op 10 september 2013 geanalyseerd (Figuur 3.29 in Kuijper, 2015). Op deze dag zijn ook debietmetingen in de Hollandsche IJssel uitgevoerd. Figuur D.19 toont nogmaals de resultaten maar in plaats van het debiet wordt de waterstand te Krimpen a/d IJssel getoond, zoals dat ook is gedaan in de figuren in Par. D.1[10]. De Bovenrijnafvoer op 8 september 2013 was 1180 m^3/s. Op 10 september is een middenstandsverhoging opgetreden wat heeft geleid tot een geringe toename van de chlorideconcentratie bij Krimpen a/d IJssel. De toename is vlak voor hoogwater als er nog instroming optreedt in de mond van de Hollandsche IJssel. Omdat het zout pas laat tijdens deze periode met instroming Krimpen bereikt, wordt het tijdens afgaand tij weer de Hollandsche IJssel uitgespoeld. In dit geval verzilt de Hollandsche IJssel dus niet verder opwaarts. In overeenstemming met de resultaten voor 2-17 november 2015 volgt ook hier dat de sterke verhoging van de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienenoordbrug na het hoogwater van 19:30 uur niet merkbaar is bij Krimpen. Op dat moment stroomt de Hollandsche IJssel uit en wordt verzilting in deze riviertak tegengegaan.

Op 11 september, zie Figuur D.20, is aan het einde van de ebperiode in de Nieuwe Maas nog steeds sprake van verzilting bij de van Brienenoordbrug. Zodra de Hollandsche IJssel na laagwater begint in te stromen wordt een toename van de chlorideconcentratie bij Krimpen

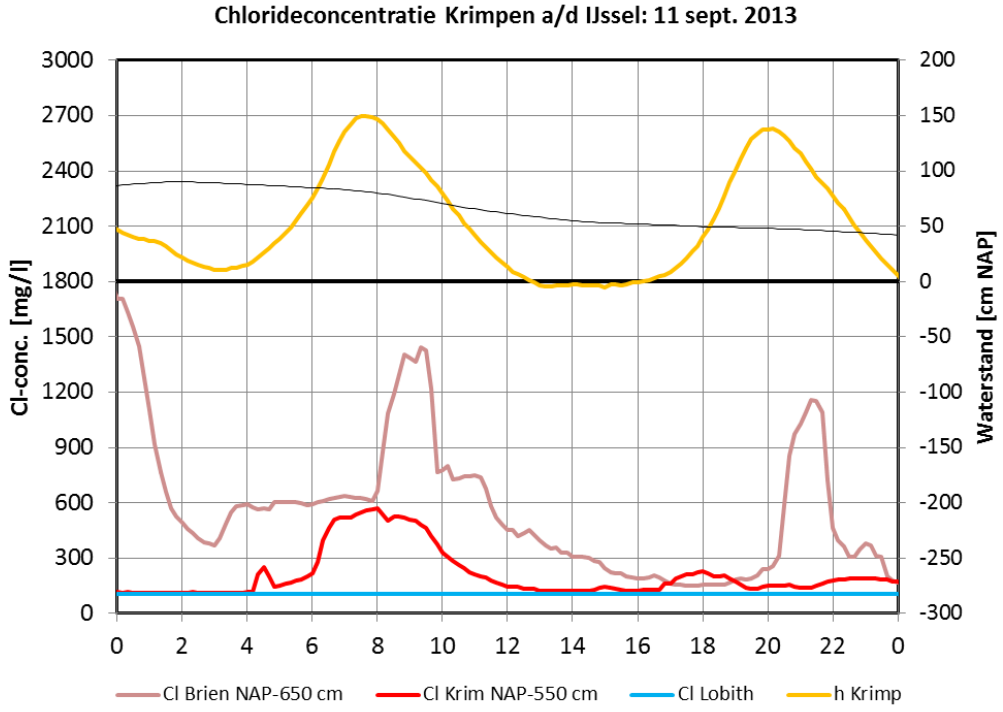
[10] *De maximale en minimale waarden van de assen voor de chlorideconcentratie en de waterstand verschillen van die in Figuur D.3 t/m Figuur D.18.*

waargenomen. Na hoogwater, als de Hollandsche IJssel gaat uitstromen, neemt de concentratie bij Krimpen weer af tot de achtergrond waarde; het zout wordt weer de Hollandsche IJssel t.p.v. Krimpen uitgespoeld, waarschijnlijk mede geholpen door de middenstandsverlaging die dan optreedt. Aan het begin van de volgende getijperiode, als de Hollandsche IJssel weer gaat instromen, is er nog een geringe toename van de chlorideconcentratie. Kennelijk bevindt zich nog licht verzilt water in de mond tussen Krimpen en de Nieuwe Maas.

Op 12 september treedt geen verzilting meer op bij Krimpen a/d IJssel.



Figuur D.19 Chlorideconcentratie bij de van Brienenoordbrug (NAP-650 cm) en bij Krimpen a/d IJssel (NAP-550 cm) en de waterstand te Krimpen a/d IJssel op 10 september 2013.



Figuur D.20 Chlorideconcentratie bij de van Brienenoordbrug (NAP-650 cm) en bij Krimpen a/d IJssel (NAP-550 cm) en de waterstand te Krimpen a/d IJssel op 11 september 2013.

Verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel bij Krimpen (in dit geval tot 600 mg Cl^-/l) hoeft dus niet te leiden tot een verzilting van Gouda zolang er geen sprake is van permanente verzilting. Verder blijkt dat als de middenstandsverhoging direct wordt gevolgd door een verlaging de tijdsduur met een verhoogde chlorideconcentratie in de mond van de Hollandsche IJssel kort is, d.w.z. het zoute water wordt de Hollandsche IJssel weer snel uitgespoeld. Verwacht mag worden dat bij een langdurige verzilting (langer dan een getijperiode) zout door dispersie de Hollandsche IJssel op kan trekken in de richting van Gouda. Deze situatie kan zich voordoen als de middenstand langdurig verhoogd blijft of als de Bovenrijnafvoer gedurende een lange tijd laag is.