

Analyse van zoutmetingen in de Lek

met schatting dispersiecoëfficiënt



Analyse van zoutmetingen in de Lek

met schatting dispersiecoefficient

Kees Kuijper

11200589-001

Titel

Analyse van zoutmetingen in de Lek

Opdrachtgever

RWS-WVL

Project

11200589-001

Kenmerk

11200589-001-ZWS-0003

Pagina's

68

Trefwoorden

Verzilting, zoutindringing, chlorideconcentratie, dispersie, Rijn-Maasmonding, Lek, Hollandsche IJssel, metingen

Samenvatting

Langs de Lek bevinden zich enkele belangrijke locaties voor de inname van zoet rivierwater ten behoeve van de landbouw, de drinkwatervoorziening en de industrie (proceswater) en voor peilhandhaving en doorspoeling. Klimaatverandering en ingrepen in de Rijn-Maasmonding kunnen van invloed zijn op de verzilting van de Lek vanuit zee. Om effecten van veranderingen in te kunnen schatten is kennis nodig van de processen die leiden tot verzilting van de Lek. Deze studie onderzoekt deze processen middels een analyse van stromings- en zoutmetingen en geeft een schatting van de dispersie op de Lek.

Uit de data-analyse blijkt, dat de Lek door de grotere lengte minder als kombergende tak fungeert dan de Hollandsche IJssel. Het faseverschil tussen het debiet in de Lek en de Nieuwe Maas t.p.v. het splitsingspunt is hierdoor kleiner dan het faseverschil tussen het debiet in de Hollandsche IJssel en de Nieuwe Maas. In het fictieve geval dat de Lek zich op gelijke afstand van zee zou bevinden als de Hollandsche IJssel geldt dan dat zout water gemakkelijker de Lek instroomt dan de Hollandsche IJssel. De Lek is daarom minder goed in staat om zoutindringing in deze tak tegen te gaan. In werkelijkheid bevindt de monding van de Lek zich op grotere afstand van zee dan de mond van de Hollandsche IJssel en daarom zal de Lek pas bij lagere Bovenrijnafvoeren of extreme windopzet verzilten dan de Hollandsche IJssel.

Verzilting van de *mond* van de Lek is vooral afhankelijk van de Bovenrijnafvoer en eventuele middenstandsveranderingen door wind en wordt nauwelijks beïnvloed door de afvoer van de Lek. De Lek-afvoer is wel van belang voor de zoutindringing *in* de Lek, omdat hierdoor het opwaartse dispersieve zouttransport wordt tegengegaan. Door dit dispersieve transport kan de zoutindringingslengte groter zijn dan de vloedweg in de monding, welke momenteel onder "gemiddelde" getijcondities reikt tot Lekkerkerk en tot Bergambacht of verder als er sprake is van storm met een middenstandsupzet. Verzilting van de mond tijdens storm is van tijdelijke aard (enkele dagen), omdat een netto instroming van de Lek gedurende één of enkele dagen wordt gevolgd door een netto uitstroming.

Voor de berekening van de zoutindringing in de Lek met een eendimensionaal model als Sobek moet de grootte van de dispersiecoëfficiënt bekend zijn. Deze coëfficiënt hangt af van de lokale geometrie en waterbeweging en ook van de zoutconcentratie en is daarmee plaatsafhankelijk. Voor de schatting van de dispersiecoëfficiënt is gebruik gemaakt van twee dispersieformuleringen uit de literatuur. Met deze formuleringen blijkt de dispersiecoëfficiënt halverwege de Hollandsche IJssel, welke eerder is bepaald uit metingen, te kunnen worden gereproduceerd. Toepassing van de formuleringen op de Lek, met gebruik van de lokale geometrie en hydrodynamica, resulteert in berekende dispersiecoëfficiënten van 25-125 m²/s in de monding en 25-80 m²/s bij Bergambacht. Hierbij zijn afvoeren van de Lek van 2 en 20 m³/s verondersteld in combinatie met chlorideconcentratieverhogingen in de mond van 50, 250 en 500 mg/l. Bij het uitvoeren van effectstudies met een eendimensionaal model als Sobek moeten de veranderingen van de dispersiecoëfficiënt worden meegenomen.

Referenties

KPP Verzilting 2017. Project Systemanalyse Rijn-Maasmonding

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	okt. 2017	Kees Kuijper	<i>b/a</i>	<i>Wouter Kranenburg</i>	<i>Frank Hoozemans</i>		

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doel van de studie	2
1.3 Leeswijzer	2
2 Lek	5
2.1 Algemeen	5
2.2 Geometrie	5
2.3 Waterbeweging	8
2.4 Lozings- en onttrekkingspunten	9
3 Analyse metingen	11
3.1 Debietmetingen 2011	11
3.2 Varende metingen november 2015: saliniteit	16
3.3 Varende metingen januari 2017: chlorideconcentratie	21
3.4 Overige metingen	29
3.4.1 Bergambacht 1988-2017	29
3.4.2 Lekkerkerk 2004-2009	30
4 Schatting dispersiecoëfficiënt	31
4.1 Aanvullende analyse Hollandsche IJssel: vergelijking gemeten en berekende dispersiecoëfficiënt	31
4.2 Schatting dispersiecoëfficiënt	35
4.2.1 Hollandsche IJssel	37
4.2.2 Lek	39
5 Samenvatting en discussie	43
5.1 Waterbeweging t.p.v. het splitsingspunt Nieuwe Maas-Lek-Noord	43
5.2 Zoutverdeling in de Lek	43
5.2.1 Metingen november 2015	43
5.2.2 Metingen januari 2017	43
5.3 Schatting dispersiecoëfficiënt voor de Lek	44
5.4 Implicaties voor modelstudies	44
6 Referenties	47
Bijlage(n)	
A 'Shear dispersion' onder getijcondities	A-1
A.1 Stationaire stroming (rivier)	A-1
A.2 Oscillerende stroming (getij)	A-2
A.2.1 Fischer et al. (1979)	A-2
A.2.2 Goslinga en Verboom (1979)	A-3
B Dispersie t.g.v. dichtheidsverschillen	B-1

C Resultaten berekeningen dispersiecoëfficiënt

C.1 'Shear' dispersie

C.2 Dispersie t.g.v. dichtheidsverschillen

C-1

C-1

C-4

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De klimaatverandering (zeespiegelstijging en 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 locaties voor de inname van zoet rivierwater ten behoeve van de landbouw, de drinkwatervoorziening en de industrie (proceswater). Daarnaast wordt water ingenomen voor peilhandhaving en doorspoeling van de regionale watersystemen. In eerdere studies is de aandacht uitgegaan naar de verzilting van de Hollandsche IJssel. Hierbij zijn metingen geanalyseerd om inzicht te verkrijgen in de waterbeweging en zoutverdeling in deze riviertak en om de dispersiecoëfficiënt te bepalen op basis van uitgevoerde metingen (Kuijper, 2015 en 2016). Kennis hierover is van belang om tijdens verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel, bij lage rivierafvoeren en/of storm, na te kunnen gaan of verzilting van Gouda zal optreden en op welke tijdschaal dit gebeurt. Verkregen inzichten kunnen vervolgens worden gebruikt bij de uitvoering van beheersmaatregelen zoals de Kleinschalige Wateraanvoer (KWA) in combinatie met het creëren van een zoetwaterbuffer in de Hollandsche IJssel. Bij de uitvoering van scenarioberekeningen met een eendimensionaal (profielgemiddeld) model als Sobek moet dan bekend zijn wat de grootte is van de dispersiecoëfficiënt. Deze coëfficiënt beschrijft de effecten van variaties van stroomsnelheid en zoutconcentratie over het dwarsprofiel op de zoutverdeling. Voorbeelden van zulke variaties zijn snelheidsverschillen ten gevolge van bodem- en wandwrijving (schering of ‘shear flow’ resulterend in ‘Taylor dispersion’) en stroming ten gevolge van dichtheidsverschillen in langs- en dwarsrichting. In de literatuur zijn formuleringen beschikbaar waarmee de dispersiecoëfficiënt met meer of minder succes kan worden voorspeld als functie van geometrische en hydrodynamische grootheden. Een recent overzicht kan worden gevonden in (Daniels, 2016).

Langs de Lek wordt water ingenomen ten behoeve van de Hoogheemraadschappen *De Stichtse Rijnlanden* (HDSR) en *Schieland en de Krimpenerwaard* (HHSK) en het Waterschap *Rivierenland* (WSRL). Daarnaast wordt water uit de Lek gebruikt voor de drinkwatervoorziening en voor de KWA als calamiteitenmaatregel (Hydrologic, 2015). Dit jaar (2017) wordt gestart met een onderzoek naar het handelingsperspectief voor de stuw bij Hagestein voor de korte en lange termijn om verzilting op de Lek tegen te gaan.

1.2 Doel van de studie

De voorliggende studie vormt onderdeel van het project *Systeemanalyse Rijn-Maasmonding*. Het project valt onder het KPP *Verziltning* dat door Deltares in opdracht van RWS-WVL wordt uitgevoerd. Het project *Systeemanalyse RMM* loopt van 2015-2017 en heeft als doel de kennis en inzichten op het onderwerp (externe) verziltning via oppervlaktewateren te vergroten en beter te begrijpen hoe de chlorideconcentraties in het systeem van de Rijn-Maasmonding tot stand komen. Het doel van de voorliggende studie is vast te stellen hoe verziltning van de Lek tot stand komt. Hierbij wordt eerst gekeken naar de uitwisseling van water ter plaatse van het splitsingspunt Nieuwe Maas-Lek-Noord als gevolg van de getijbeweging. Vervolgens worden de optredende dispersieve processen geanalyseerd, die zorgen voor een zouttransport in stroomopwaartse richting nadat verziltning van de monding van de Lek is opgetreden.

De studie is toeleverend aan de beantwoording van de volgende beheervragen:

- Inschatting van de benodigde minimale afvoer van de Lek om de zoutindringing beperkt te houden tot een zekere lengte;
- Bijdragen aan de bepaling van een vuistregel voor de potentiële verziltning van de Lek (welke meetlocaties zijn bepalend onder welke condities);
- Een schatting van de grootte van de dispersiecoëfficiënt voor de Lek om de voorspelkracht van 1D-modelsimulaties te onderbouwen en/of te verbeteren.

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van de Lek. De geometrische kenmerken (waterdiepte, breedte en doorstroomoppervlak) worden vermeld en benaderingen met exponentiële functies. Hierbij worden de kenmerken van de Lek vergeleken met die van de Hollandsche IJssel. De exponentiële functies worden in Hoofdstuk 4 gebruikt om de dispersiecoëfficiënt ten gevolge van dichtheidsverschillen te berekenen. De stroomsnelheden langs de Lek worden eveneens vergeleken met die langs de Hollandsche IJssel. Ten slotte wordt in Hoofdstuk 2 een overzicht gegeven van lozings- en onttrekkingspunten langs de Lek.

Hoofdstuk 3 geeft een analyse van metingen in de Lek. Dit betreffen (i) in mei 2011 uitgevoerde debietmetingen rondom het splitsingspunt Nieuwe Maas-Lek-Noord, (ii) in november 2015 uitgevoerde metingen met een varende meetschip door Havenbedrijf Rotterdam (gepresenteerd als saliniteiten) en (iii) in januari 2017 uitgevoerde metingen met een varende meetschip door AquaVision (gepresenteerd als chlorideconcentraties). Bij de analyse zijn betrokken de omgevingsfactoren als de Bovenrijnafvoer bij Lobith, de waterstand incl. stormopzet en de chlorideconcentratie bij Lobith en de metingen in de vaste locaties van het meetnet van RWS, zoals de waterstand in Krimpen a/d Lek en Hagestein-beneden en de chlorideconcentratie in Kinderdijk.

In Hoofdstuk 4 wordt de dispersiecoëfficiënt in de Lek geschat op basis van beschikbare formuleringen voor 'shear dispersion' en dispersie t.g.v. dichtheidsverschillen. Deze formuleringen worden eerst gebruikt voor de Hollandsche IJssel om na te gaan of zij de afgeleide dispersiecoëfficiënt op basis van uitgevoerde metingen in november 2015 kunnen reproduceren.

Samenvatting, conclusies en aanbevelingen zijn opgenomen in Hoofdstuk 5.

In Bijlage A wordt de theorie gepresenteerd over 'shear dispersion' voor stationaire en getijstroming. In Bijlage B wordt dit gedaan voor de dispersie ten gevolge van dichtheidsverschillen. Resultaten van de berekeningen zijn in detail opgenomen in Bijlage C.

2 Lek

2.1 Algemeen

De Lek is één van de riviertakken in de Rijn-Maasmonding en wordt gerekend tot de noordrand van het systeem, zie Figuur 2.1. De Lek is ter hoogte van km. 989 verbonden met de Nieuwe Maas en de Noord. De monding bevindt zich op een afstand van 40 km vanaf Hoek van Holland (km. 1029) en is gelegen 6 km opwaarts van de van Brienoordbrug (km. 995). De monding van de Lek ligt 5 km verder van zee dan de monding van de Hollandsche IJssel. De Lek wordt aan de bovenstroomse zijde begrensd door de stuw bij Hagestein (km. 948). De Lek is aldus 41 km lang en is daarmee twee keer langer dan de Hollandsche IJssel.



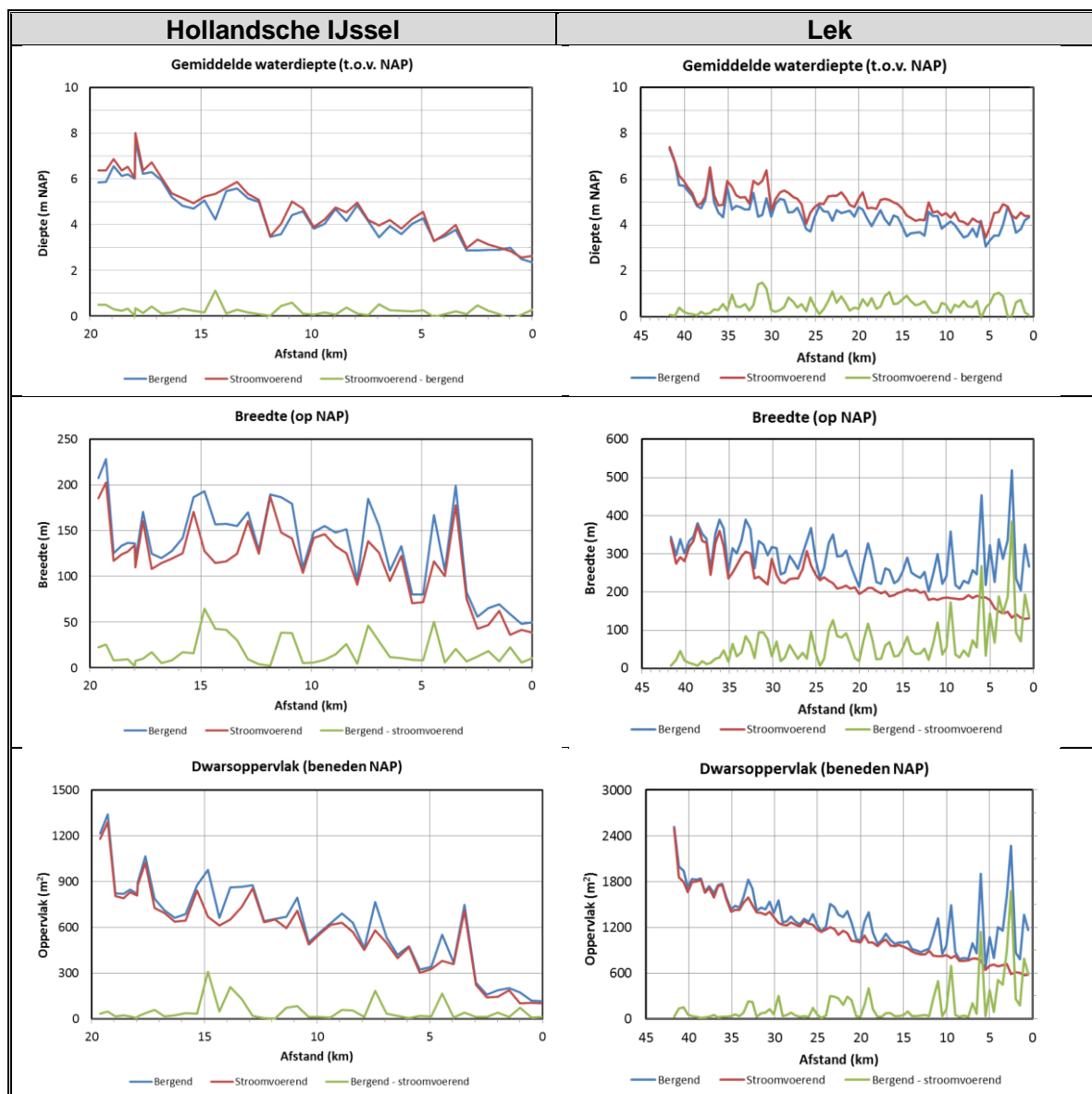
Figuur 2.1 Hoofdwatersysteem Rijn-Maasmonding en Waterschappen (Hydrologic, 2015).

2.2 Geometrie

De geometrische kenmerken van de Hollandsche IJssel en de Lek (waterdiepte, breedte en doorstroomoppervlak) zijn weergegeven in Figuur 2.2. De data zijn ontleend aan de SOBEK-schematisatie sobek-rmm-j15_5-v1 voor de Rijn-Maasmonding, welke dateert van 2015. Voor zover bekend zijn de laatste lodingen voor het gehele gebied gedaan in 2012/2013. De grootheden zijn bepaald ten opzichte van NAP als benadering van de gemiddelde waterstand.

De Lek is twee keer langer dan de Hollandsche IJssel (resp. 42 km en 20 km). De Lek is ook twee keer breder dan de Hollandsche IJssel tot het boezemgemaal bij Gouda. De waterdiepte

in de mond van beide riviertakken bedraagt 6 m t.o.v. NAP. In de Hollandsche IJssel neemt deze over een lengte van 20 km af tot NAP-2,5 m; in de Lek neemt de waterdiepte af tot NAP-4,5 m over een lengte van 42 km. De convergentie van de waterdiepte in de Hollandsche IJssel is dus groter.



Figuur 2.2 Geometrische kenmerken van Hollandsche IJssel (links) en Lek (rechts). Stroomvoerend en bergend profiel: waterdiepte t.o.v. NAP, breedte op NAP en doorstroomoppervlakte beneden NAP.

De verandering van de geometrie langs een riviertak is van invloed op de getijvoortplanting en de zoutindringing (resp. Van Rijn, 2011, en Kuijper en Van Rijn, 2011). Door wrijving neemt de getijamplitude af maar als de waterdiepte en de breedte afnemen (convergeren) kan de amplitude juist toenemen. Een toename van de getijamplitude kan ook het gevolg zijn van reflectie van de getijgolf tegen een begrenzing van het systeem zoals de stuw bij Hagestein. In deze studie wordt de plaatsafhankelijke dispersiecoëfficiënt berekend uitgaande van benaderingen van het verloop van de waterdiepte, de breedte en het doorstroomoppervlak met behulp van exponentiële relaties. De convergentielengte van het stroomvoerend oppervlak wordt als parameter gebruikt in de dispersievergelijking, die in

Hoofdstuk 4 wordt toegepast om de dispersiecoëfficiënt voor dichtheidsverschillen te schatten.

De exponentiële functies voor de waterdiepte, de breedte en het oppervlak van het stroomvoerend profiel zijn in Figuur 2.3 weergegeven, waarbij de convergentielengte voor bijvoorbeeld het oppervlak is gedefinieerd met:

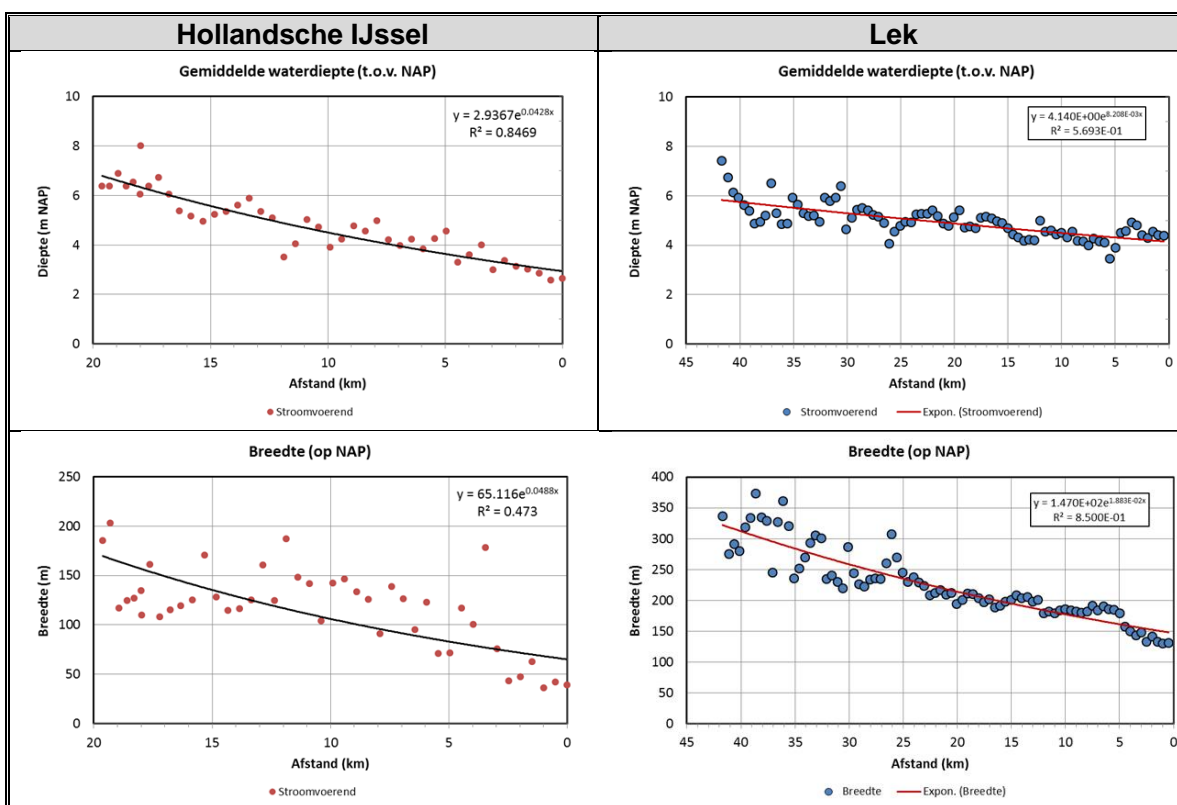
$$A(x) = A_0 \exp\left(-\frac{x}{L_a}\right) \quad (2.1)$$

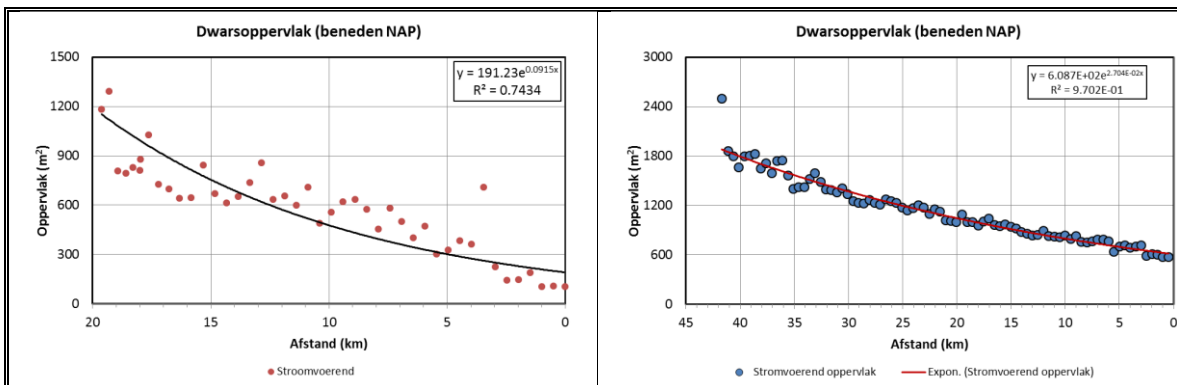
met $A(x)$ het stroomvoerend oppervlak (m^2) t.p.v. langskoördinaat x (m), A_0 het stroomvoerend oppervlak in de monding (m^2) en L_a de convergentielengte (m).

De convergentielengtes voor de waterdiepte, breedte en oppervlakte van de Hollandsche IJssel en Lek zijn vermeld in Tabel 2.1. Geconcludeerd wordt, dat de beide riviertakken niet prismatisch zijn.

Tabel 2.1 Convergentielengte voor de waterdiepte, breedte en oppervlakte van het stroomvoerend profiel in de Hollandsche IJssel en de Lek.

		Hollandsche IJssel	Lek
Convergentielengte waterdiepte	L_h	23 m	122 m
Convergentielengte breedte	L_b	20 m	53 m
Convergentielengte oppervlakte	L_a	11 m	37 m



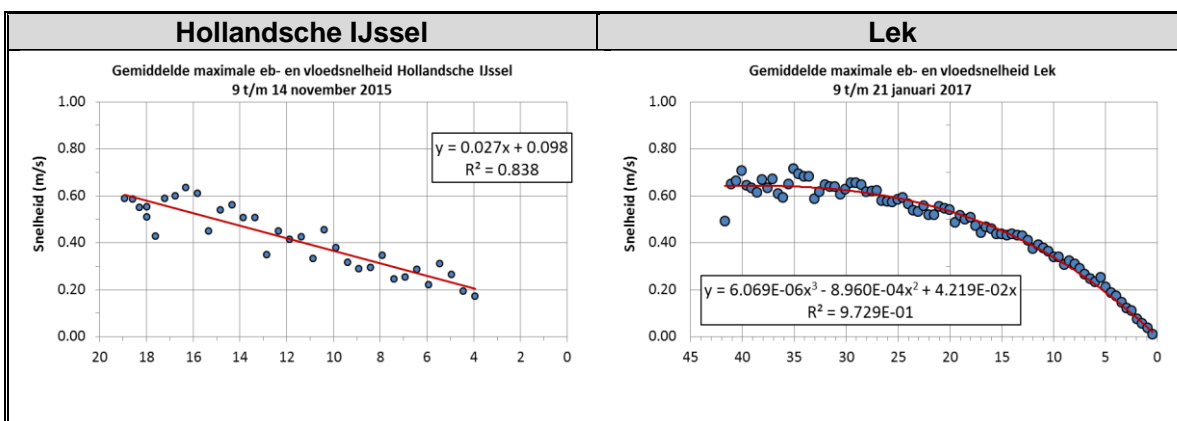


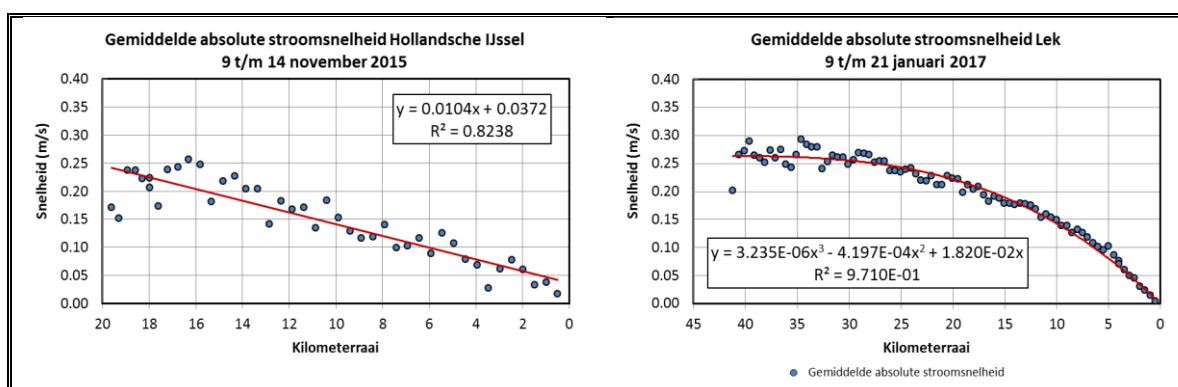
Figuur 2.3 Geometrische kenmerken van Hollandsche IJssel (links) en Lek (rechts). Stroomvoerend profiel: waterdiepte t.o.v. NAP, breedte op NAP en doorstroomoppervlakte beneden NAP en exponentiële fits.

2.3 Waterbeweging

De dispersiecoëfficiënt is afhankelijk van de waterbeweging, in het bijzonder de stroomsnelheid. Dit geldt zowel voor de ‘shear dispersie’ als de dispersie die het gevolg is van dichtheidsverschillen, zie resp. Bijlage A en Bijlage B. Verschillen in de waterbeweging in de Hollandsche IJssel en de Lek zullen dus ook resulteren in verschillen in de dispersiecoëfficiënt.

In Figuur 2.4 worden de gemiddelde maximale eb- en vloedstroomsnelheid en de gemiddelde absolute stroomsnelheid in de Hollandsche IJssel en de Lek getoond. De eerste is een maat voor de maximale stroomsnelheid (als gemiddelde van eb en vloed) en de tweede is een maat voor de gemiddelde stroomsnelheid ongeacht de stroomrichting. Tijdsreeksen van stroomsnelheden zijn verkregen middels een kombergingsbeschouwing (zie Par. 3.1), waarbij gebruik is gemaakt van de geometrie van de Lek volgens de Sobek-schematisatie sobek-rmm-j15_5-v1 en het gemiddelde van de momentane waterstanden in Krimpen a/d Lek en Hagestein-beneden. De gemiddelde maximale eb- en vloedstroomsnelheid is verkregen door voor opeenvolgende perioden van 24 h 50 min het gemiddelde van de maximale eb- en vloedstroomsnelheid te bepalen (absolute waarden) en vervolgens het gemiddelde te bepalen van de verkregen waarden gedurende de beschouwde perioden (voor de Hollandsche IJssel 9 t/m 14 november 2015 en voor de Lek 9 t/m 21 januari 2017). De gemiddelde absolute stroomsnelheid volgt door de gemiddelde waarde te bepalen van de absolute waarden van de stroomsnelheid voor de periode 9 t/m 14 november 2015 (Hollandsche IJssel) en 9 t/m 21 januari 2017 (Lek).





Figuur 2.4 Gemiddelde maximale absolute stroomsnelheid en gemiddelde absolute stroomsnelheid in de Hollandsche IJssel (links) en de Lek (rechts).

Voor beide riviertakken is de maximale stroomsnelheid in de monding 0,6-0,7 m/s; in de Lek iets groter dan in de Hollandsche IJssel (dit kan veroorzaakt worden door de verschillende getijcondities tijdens beide perioden). In de Lek blijft de maximale stroomsnelheid vrijwel constant over een afstand van 10-15 km vanaf de mond. In de Hollandsche IJssel neemt deze lineair af in de richting van Gouda (tot km 4).

De gemiddelde (absolute) stroomsnelheid in de mond is voor beide riviertakken vergelijkbaar: 0,25 m/s in de Hollandsche IJssel en 0,25-0,3 m/s in de Lek. Het snelheidsverloop langs de rivier is vergelijkbaar met dat van de gemiddelde maximale eb- en vloednelheid.

2.4 Lozings- en onttrekkingspunten

De lozings- en onttrekkingslocaties langs de Lek zijn vermeld in Tabel 2.2 en weergegeven in Figuur 2.5. De lozings- en onttrekkingspunten langs de Hollandsche IJssel zijn vermeld in Kuijper (2016). Vanuit de Lek wordt ook water ingenomen door de drinkwaterbedrijven Oasen en Dunea, zie Tabel 2.3.

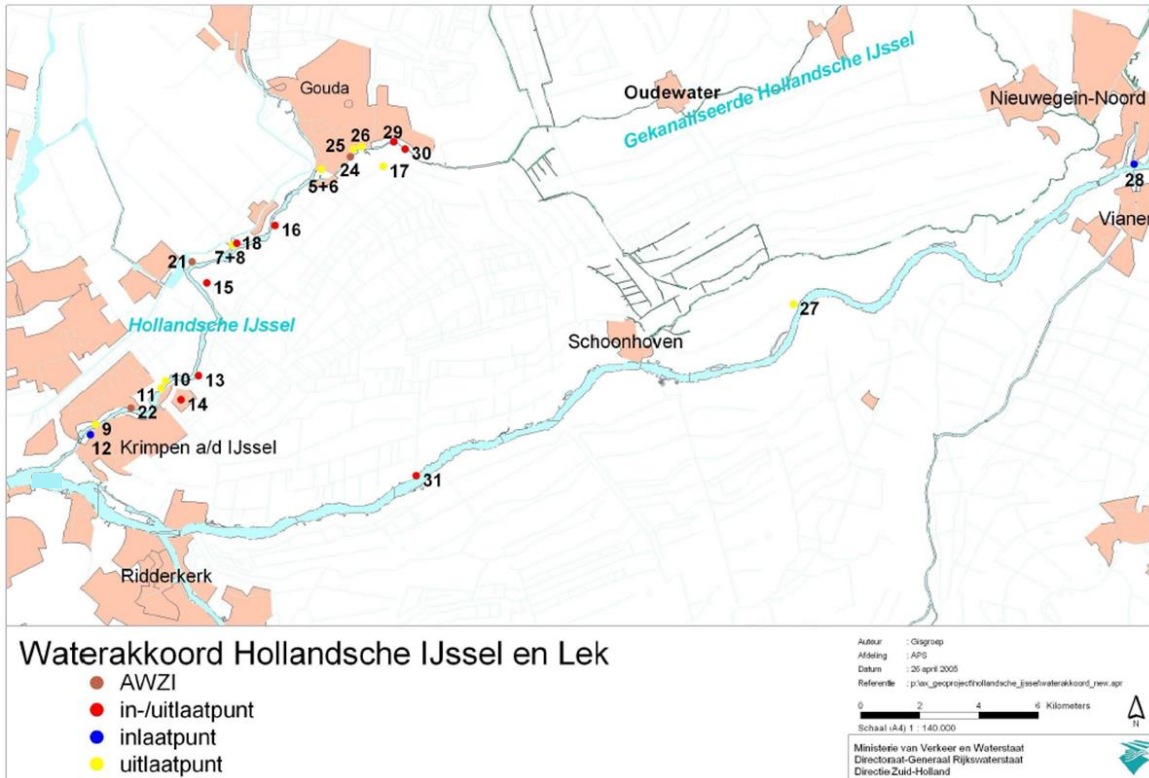
Tabel 2.2 Lozings- en onttrekkingspunten langs de Lek (Friocourt en Kuijper, 2015).

Nummer op Figuur 2.5	Beheerder	Naam	Type	Maximale capaciteit (m ³ /min)
27	HHS De Stichtse Rijnlanden	Gemaal de Koekoek	In-/uitlaat	672
28	HHS De Stichtse Rijnlanden	Inlaat Vreeswijk (Oude Sluis)	Inlaat	120
31	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Krimpenerwaard (Bergambacht)	In-/uitlaat	400 ¹⁾
-	Waterschap Rivierenland	Inlaat Alblasserwaard (Kinderdijk)		

¹⁾ <https://www.schielandendekrimpenerwaard.nl/over-ons/waterpeil/gemalen/gemaal-krimpenerwaard>

Tabel 2.3 Innamelocaties langs de Lek drinkwaterleidingbedrijven (Hydrologic, 2015).

Drinkwaterbedrijf	Locatie	Type	Opmerking
Oasen	Bergambacht	Oeverinfiltratie	
Oasen	Krimpen a/d Lek	Oeverinfiltratie	
Dunea	Bergambacht	Oppervlaktewater	Noodinlaat. In de toekomst mogelijk permanent.



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

3 Analyse metingen

Voor een (beter) begrip van hoe de verzilting van de Lek tot stand komt is het noodzakelijk om kennis te hebben van de wateruitwisseling ter plaatse van het splitsingspunt Nieuwe Maas-Lek-Noord, zoals dat vooral wordt bepaald door de getijbeweging. Daartoe worden eerst debietmetingen geanalyseerd, zoals die in mei 2011 in de Nieuwe Maas, Lek en Noord zijn uitgevoerd (Par. 3.1). Dit leidt tot inzicht in de relatie tussen de debieten en de waterstand en in hoeverre het debiet in de monding van de Lek kan worden benaderd met een eenvoudige kombergings-beschouwing. Daarnaast wordt gekeken naar faseverschillen tussen de debieten in de drie riviertakken, zoals dat ook voor het splitsingspunt Nieuwe Maas-Hollandsche IJssel is gedaan (Kuijper, 2016). Deze faseverschillen zijn van belang voor de zoutindringing in de Lek. Vervolgens worden metingen geanalyseerd die zijn uitgevoerd in november 2015 (Par. 3.2) en januari 2017 (Par. 3.3). De metingen geven inzicht in de horizontale en verticale zoutverdeling in de Lek als functie van de omgevingscondities tijdens de metingen (Bovenrijn- en Lekafvoer en waterstand incl. middenstandsveranderingen als gevolg van wind). Voor de omstandigheden van januari 2017 wordt de vloedweg van een zoutdeeltje berekend indien dit bij begin instroming aanwezig is in de monding van de Lek. Op deze wijze wordt nagegaan tot hoever zout in de Lek kan komen onder invloed van advectie (i.c. de profielgemiddelde stroomsnelheid). Elke van bovengenoemde paragrafen eindigt met een samenvatting van de belangrijkste bevindingen. In Par. 3.4 worden overige beschikbare metingen besproken.

3.1 Debietmetingen 2011

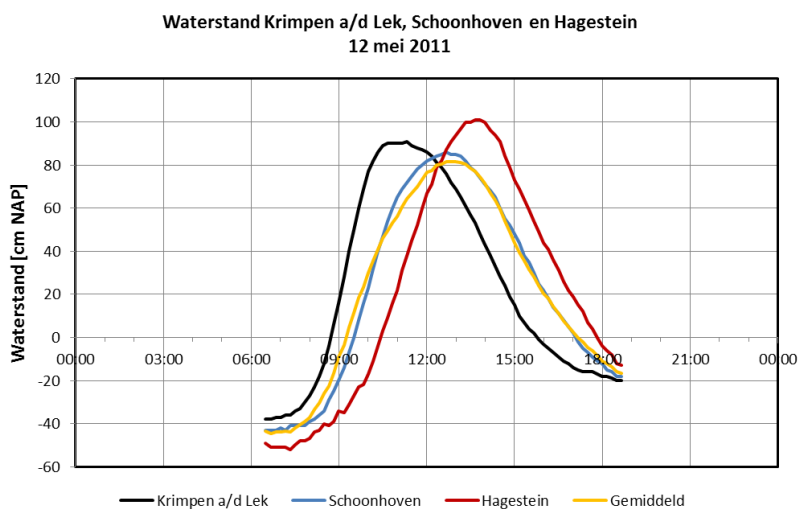
Op 12 mei 2011 zijn met een ADCP debieten gemeten ter plaatse van het splitsingspunt Nieuwe Maas-Lek-Noord, zie Figuur 3.1 voor de locaties van de meetraaien. Binnen het gebied omsloten door de drie raaien takt de Bakkerskil aan, welke in verbinding staat met de Nieuwe Maas en de Sliksloot stroomafwaarts.



Figuur 3.1 Debietmeetraaien in de Nieuwe Maas, Lek en Noord op 12 mei 2011.

De gemeten waterstanden op 12 mei 2011 in Krimpen a/d Lek, Schoonhoven en Hagesteinbeneden worden getoond in Figuur 3.2. De waterstand in de monding van de Lek loopt

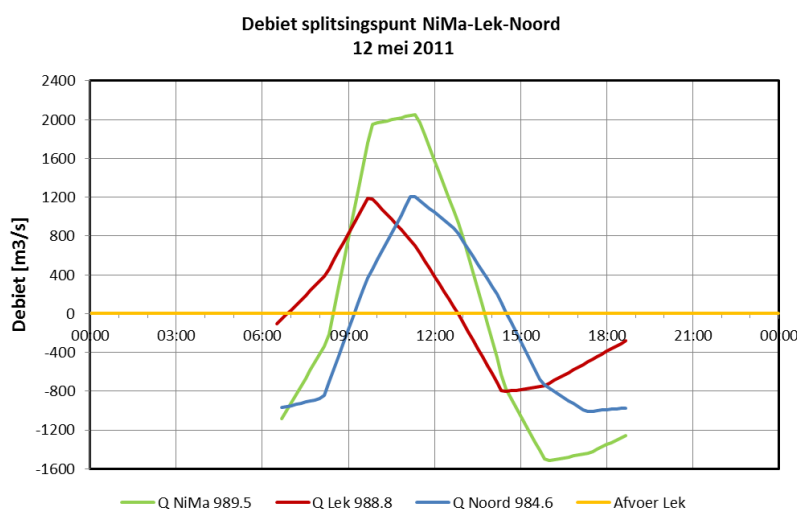
ongeveer 3 uur voor op de waterstand aan het eind van de Lek t.p.v. Hagestein. De Bovenrijnafvoer op 12 mei 2011 bedroeg $971 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2 dagen eerder $1006 \text{ m}^3/\text{s}$. De gemeten afvoer bij Hagestein was op 12 en 10 mei resp. 6 en $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij deze lage afvoeren is sprake van een hoger hoogwater en een lager laagwater in Hagestein t.o.v. Krimpen a/d Lek, resulterend in een grotere getijslag. De amplificatie van het getij langs de Lek wordt beïnvloed door de ruwheid, de reflectie van de getijgolf tegen de stuw bij Hagestein en de convergentie van de dwarsdoorsnede. In de figuur is tevens de gemiddelde waterstand van Krimpen a/d Lek en Hagestein-beneden weergegeven. Deze is vrijwel identiek aan de gemeten waterstand in Schoonhoven.



Figuur 3.2 Waterstand in Krimpen a/d Lek, Schoonhoven en Hagestein (beneden) op 12 mei 2011. Het gemiddelde van de waterstand in Krimpen a/d Lek en Hagestein-beneden is eveneens weergegeven.

De gemeten debieten in de 3 meetraaien zijn weergegeven in Figuur 3.3. De figuur laat zien dat hoogwaterstromkentering (i.e. de stromingsomkering van vloed naar ebb) in de monding van de Lek 1 uur eerder optreedt dan hoogwaterstromkentering in de Nieuwe Maas ter plaatse van het splitsingspunt (13:00 respectievelijk 14:00 uur). Dit betekent dat de Lek al begint met uitstromen op het moment dat er nog sprake is van een vloedstroming in de Nieuwe Maas. Op soortgelijke wijze als bij de Hollandse IJssel zorgt het faseverschil ervoor dat een zoutindringing in de Lek, aan het eind van de vloedperiode in de Nieuwe Maas, wordt tegengegaan. Het faseverschil van 1 uur is wel kleiner dan het faseverschil van 2 uur tussen het debiet in de mond van de Hollandse IJssel en het debiet in de Nieuwe Maas ter plaatse van de Hollandse IJssel, zie Figuur 3.6 in Kuijper (2015). Daarmee is de effectiviteit van dit mechanisme om zoutindringing in de Lek tegen te gaan kleiner dan in de Hollandse IJssel en is de Lek wat dat betreft “kwetsbaarder” bij gelijke mate van verzilting van de mondingen van beide riviertakken. Als ‘denkmodel’ kan hierbij gedacht worden aan de situatie, waarbij de Lek aan de Nieuwe Maas is verbonden ter hoogte van de Hollandse IJssel. Uiteraard geldt dat de Lek verder van zee ligt dan de Hollandse IJssel ($\approx 5 \text{ km}$) en dat verzilting van de Lek minder frequent en in mindere mate zal optreden dan verzilting van de Hollandse IJssel.

In Figuur 3.3 is ook de afvoer van de Lek bij Hagestein op 12 mei vermeld ($6 \text{ m}^3/\text{s}$). Deze afvoer is verwaarloosbaar ten opzichte van het maximale eb- en vloeddebiet in de mond van de Lek ($800\text{-}1200 \text{ m}^3/\text{s}$).



Figuur 3.3 Gemeten debieten met ADCP in meetraaien in de Nieuwe Maas (kmr. 989.5), Lek (kmr. 988.8) en Noord (984.6) op 12 mei 2011. Positieve debieten zijn in landwaartse richting.

Verder geldt dat de debietverdeling op het splitsingspunt Nieuwe Maas-Lek-Noord anders is dan de debietverdeling op het splitsingspunt Nieuwe-Maas-Hollandsche IJssel-Nieuwe Maas. Het maximale debiet in zowel de Lek als de Noord is ongeveer 60% van het maximale debiet in de Nieuwe Maas, terwijl de verschillen in de debieten in de Nieuwe Maas op- en afwaarts van de Hollandsche IJssel veel kleiner zijn.

De kentering van de vloedstroming in de Noord vindt nog een half uur later plaats dan die in de Nieuwe Maas, dat is dus 1,5 uur na die in de Lek.. Water uit de Lek stroomt dus eerst gedurende 1 uur de Noord in (er is dan ook vloedstroming in de Nieuwe Maas). Vervolgens is er nog gedurende een half uur een uitstroming vanuit de Lek naar de Nieuwe Maas én Noord. Dit betekent dat bij een verzilte Lek de Noord een “nalevering” van zout krijgt vanuit de Lek.

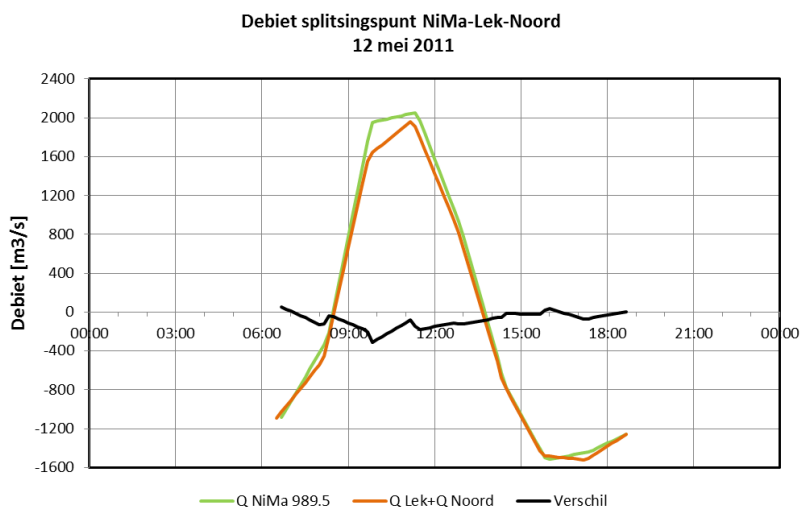
In Figuur 3.4 worden het gemeten debiet in de raai Nieuwe Maas 989.5 vergeleken met de som van de debieten in de kilometerraaien 984.6 in de Noord en 988.8 in de Lek. Er is een goede sluiting van de balans tussen de gemeten debieten behalve rond maximale vloedstroming. De gemiddelde debieten (restafvoeren) over perioden van 12 h, 12 h 10 min en 12 h 20 min zijn vermeld in

Tabel 3.1 (een negatieve waarde betekent een netto debiet zeewaarts). De positieve restafvoer in de Lek duidt op een netto vulling van deze riviertak gedurende de middelperiode. Figuur 3.2 laat zien dat de waterstand aan het eind van de periode inderdaad hoger is dan aan het begin.

Tabel 3.1 Restafvoeren t.p.v. het splitsingspunt Nieuwe Maas-Noord-Lek. Een negatieve restafvoer is zeewaarts.

Restafvoeren	Q NiMa 989.5	Q Noord 984.6	Q Lek 988.8	sluitfout
06:40-18:40 Gem. 1	-8	-115	25	82
06:40-18:50 Gem. 2	-25			
06:30-18:40 Gem. 3		-127	23	79
06:40-19:00 Gem. 4	-40	-138	17	80
Gem. tot.	-24	-126	22	80

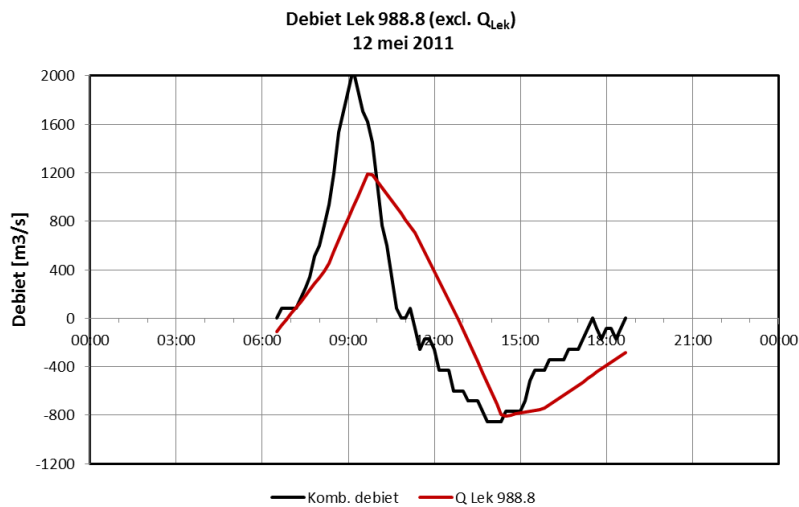
De restafvoer in een getijdesysteem is moeilijk nauwkeurig te meten. Voor de 3 verschillende middelingperiodes is de sluitfout $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit kan, ten minste voor een deel, worden verklaard door een restafvoer via de Bakkerskil in westelijke richting. Verder blijkt dat de afvoer van de Lek bij deze lage afvoersituatie ($5 \text{ m}^3/\text{s}$) twee orden kleiner is dan het maximale getijdebiet in de mond ($800\text{-}1200 \text{ m}^3/\text{s}$, zie Figuur 3.3). De stroomsnelheden in de mond van de Lek worden dus bij deze lage afvoersituatie bepaald door het getij en afvoeren van de Lek en veranderingen hierin zullen nauwelijks van invloed zijn op de wateruitwisseling t.p.v. het splitsingspunt.



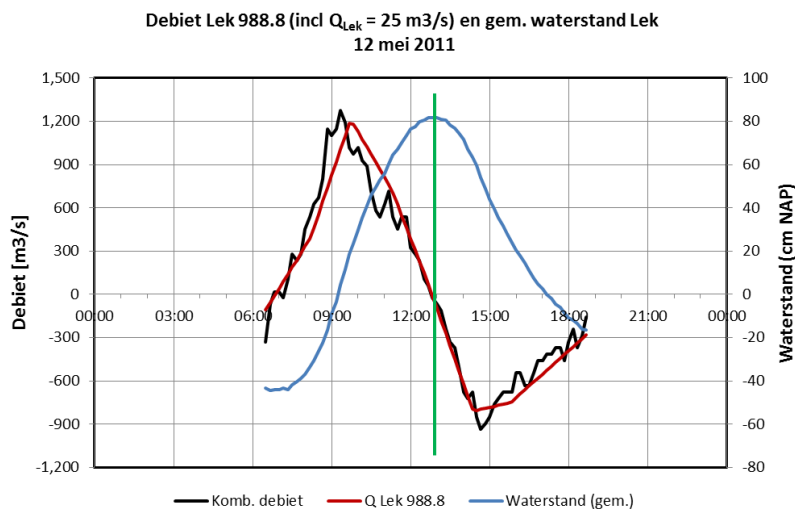
Figuur 3.4 Vergelijking debiet Nieuwe Maas (kvr 989.5) met som van de debieten in Noord (kvr 984.6) en Lek (kvr 988.8). Positieve debieten zijn in landwaartse richting.

In Figuur 3.5 wordt het gemeten debiet in de mond van de Lek (kvr 988.8) vergeleken met het kombergingsdebiet. Hierbij is het kombergingsdebiet berekend gebruik makend van de waterstand in Krimpen a/d Lek, de bergende breedte op NAP en de afstand tussen Kinderdijk (kvr 988.8) en Hagestein beneden (kvr 947.1). Voor de bergende breedte is als kalibratieparameter een gemiddelde waarde van 250 m gebruikt (de gemiddelde bergende breedte voor de Lek, welke volgt uit de schematisatie, bedraagt 291 m)¹. Uit de figuur blijkt dat de overeenstemming tussen meting en berekening niet goed is. Dit komt doordat de waterstand in Krimpen a/d Lek niet representatief is voor de Lek. Een betere overeenstemming wordt verkregen door het kombergingsdebiet te bepalen met de gemiddelde waterstand in Krimpen a/d Lek en Hagestein beneden, zie Figuur 3.6.

¹ De kalibratie met een kombergende breedte van 250 m hangt samen met de keuze om de gemiddelde waterstand van Krimpen a/d Lek en Hagestein-beneden te gebruiken. Bij een andere weging van beide waterstanden zou een andere waarde voor de bergende breedte worden gevonden.



Figuur 3.5 Gemeten debiet in de monding van de Lek (kvr. 988.8) op 12 mei 2011 en berekend kombergingsdebiet met gebruik van de waterstand in Krimpen a/d Lek. Positieve debieten zijn in landwaartse richting.



Figuur 3.6 Gemeten debiet in de monding van de Lek (kvr. 988.8) op 12 mei 2011 en berekend kombergingsdebiet met gebruik van de gemiddelde waterstand in Krimpen a/d Lek en Hagestein beneden. Positieve debieten zijn in landwaartse richting.

Uit Figuur 3.6 volgt, dat de gemeten hoogwaterstroomkentering optreedt op het moment van het hoogwater, zoals dat is bepaald als gemiddelde van de waterstanden in Krimpen a/d Lek en Hagestein. In Par. 3.2 zal blijken, dat op dat moment de zoutconcentratie in Kinderdijk maximaal is. In Hoofdstuk 4 wordt voor de schatting van de dispersiecoëfficiënt het debiet langs de Lek gebruikt zoals volgt uit een kombergingsbeschouwing. Een alternatief is om het debiet met een numeriek model als Sobek te berekenen.

Samenvatting

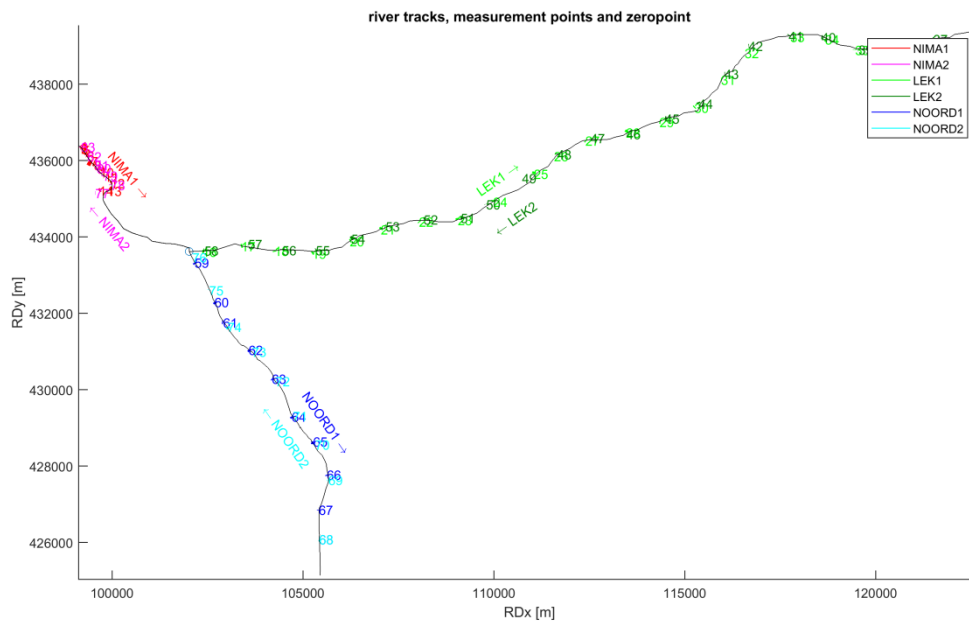
- Het getij in de Lek vertoont een lopend karakter met een hoogwater dat in Hagestein 3 uur later optreedt dan in Krimpen a/d Lek. In de Hollandsche IJssel is het verschil tussen de waterstanden achterin en voorin minder groot. Dit betekent dat voor de Lek een kombergingsbeschouwing op basis van alleen de waterstand te Krimpen a/d Lek

niet mogelijk is. Een goede benadering ('proxy') van de debieten in de mond van de Lek tijdens lage afvoersituaties wordt verkregen door het kombergingsdebiet te bepalen op basis van het gemiddelde van de waterstanden in Krimpen a/d Lek en Hagestein-beneden.

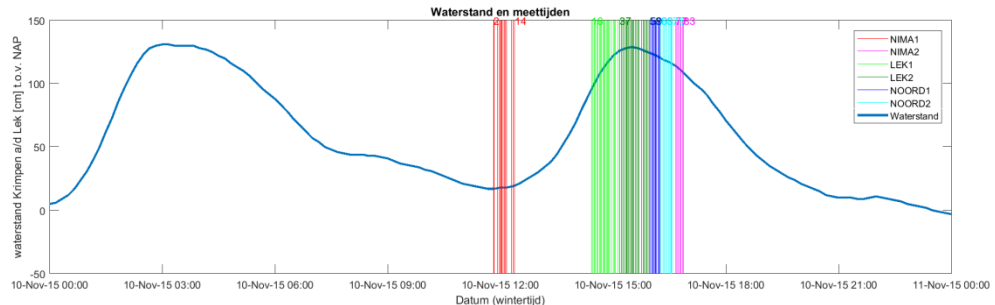
- Er is vermoedelijk rond hoogwater te Krimpen a/d Lek een netto debiet in de Bakkerskil in westelijke richting. Het getijgemiddeld debiet kan enkele 10-tallen m³/s bedragen.
- Het vloeddebiet in de Nieuwe Maas wordt gelijkmatig verdeeld over de Lek en de Noord. Tijdens eb dragen beide riviertakken ongeveer in gelijke maat bij aan het ebdebiet in de Nieuwe Maas. De Hollandsche IJssel heeft slechts een geringe invloed op het debiet in de Nieuwe Maas.
- De getijdebieten in de monding van de Lek zijn bij lage afvoersituaties twee orden groter dan de afvoer van de Lek. De verziltingssituatie **in de monding** van de Lek zal dus nauwelijks beïnvloed worden door de Lekafvoer maar het resultaat zijn van de verzilting in de Nieuwe Maas (als resultaat van de Bovenrijnafvoer en evt. een middenstands-verandering) en de getijdebieten.
- Ter plaatse van het splitsingspunt Nieuwe Maas-Lek-Noord kentert aan het eind van de vloedperiode de stroming in de Lek 1 uur eerder dan in de Nieuwe Maas. Zout dat aan het eind van de vloedperiode in de Nieuwe Maas de Lek bereikt wordt dan tegengehouden door water dat de Lek op dat moment uitstroomt. Dit is eenzelfde mechanisme als ter plaatse van het splitsingspunt Nieuwe Maas-Hollandsche IJssel maar het faseverschil is kleiner. De Lek is wat dit mechanisme betreft "kwetsbaarder" voor verzilting dan de Hollandsche IJssel. De verziltingsfrequentie van de mond van de Lek en de mate van verzilting zal echter kleiner zijn dan voor de Hollandsche IJssel, omdat de Lek 5 km verder van zee is verwijderd (aannemende dat zout zeewater niet via de Oude Maas en de Noord de Lek bereikt).
- De hoogwaterkentering in de mond van de Lek treedt 1,5 uur eerder op dan in de Noord. In het geval van een verzilte Lek treedt dus een nalevering zout op voor de Noord.
- Geconcludeerd wordt, dat de Lek als gevolg van de grotere lengte in mindere mate kan worden beschouwd als kombergende riviertak dan de Hollandsche IJssel.

3.2 Varende metingen november 2015: saliniteit

Op 10 november 2015 zijn door Havenbedrijf Rotterdam (HBR) gedurende een periode van 5 uur (van 10:47 tot 15:52 uur UTC d.w.z. 11:47 tot 16:52 uur wintertijd) met een varende schip saliniteitsmetingen uitgevoerd. Hierbij zijn, startend in de Sliksloot, trajecten gevaren op de Nieuwe Maas, de Lek en de Noord, zie Figuur 3.7. Op de Lek is tussen 14:25 uur en 15:10 uur (wintertijd) over een afstand van ongeveer 22 km in de richting van Hagestein gevaren. Tussen 15:10 uur en 15:58 uur is terugvarend naar de mond van de Lek gemeten. In Figuur 3.8 wordt getoond gedurende welke van fase van het getij de metingen op de drie riviertakken zijn uitgevoerd. In de Lek (groene kleur) is eerst gemeten vlak voor hoogwater tijdens opgaand tij (traject 1) en vervolgens rond en direct na hoogwater (traject 2).

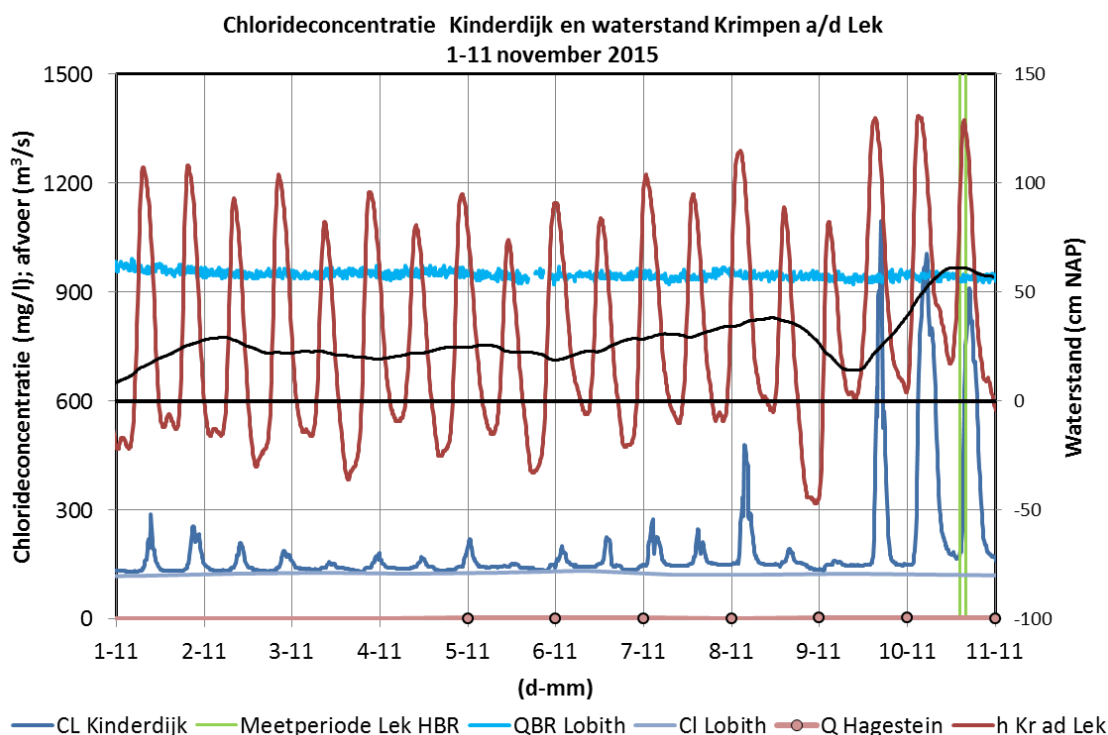


Figuur 3.7 Gevaren trajecten voor zoutmetingen door HBR op 10 november 2015. De kleuren van de trajecten komen overeen met de kleuren van de tijdstippen waarop is gemeten, zie Figuur 3.8.



Figuur 3.8 Tijdstippen van de metingen op 10 november 2015. De kleuren geven de gevaren trajecten weer, zie Figuur 3.7.

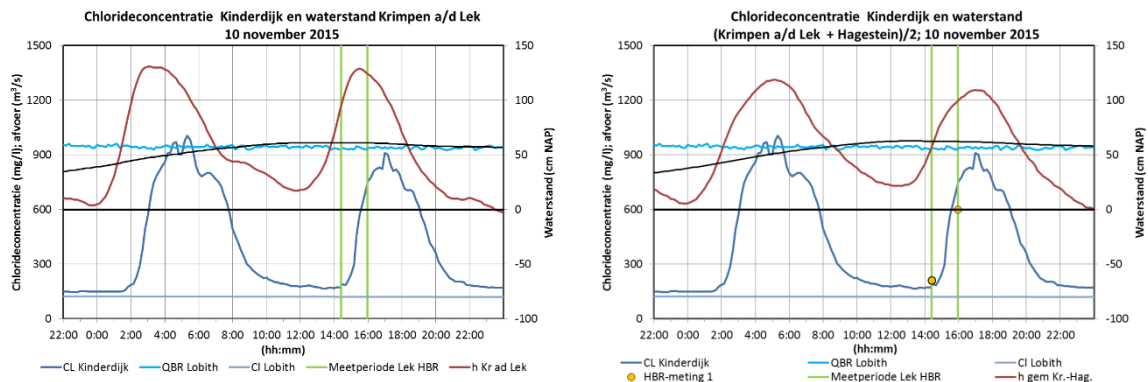
De omstandigheden tijdens de metingen worden getoond in Figuur 3.9. Van de waterstand te Krimpen a/d Lek (rode lijn) is het voortschrijdend gemiddelde over 24 h 50 min bepaald (zwarte lijn). Op 9 november 2015 is er een middenstandsopzet (zoals valt op te maken uit de stijgende gemiddelde waterstand, zwarte lijn), welke voortduurt tot 10 november. Dit is van invloed op de door de vaste opnemer gemeten chlorideconcentraties bij Kinderdijk, zichtbaar in de vorm van piekconcentraties tot 1000 mg/l (blauwe lijn). Gedurende de voorafgaande 8 dagen waren de concentraties meestal lager dan 300 mg/l. De Bovenrijnafvoer was tussen 1 en 11 november met 950 m³/s vrijwel constant (lichtblauwe lijn); de gemeten Lekafvoer bij Hagestein was minder dan 3 m³/s (paarse lijn met bolletjes). De meetperiode van 1,5 uur in de Lek (trajecten Lek1 en Lek2) is weergegeven met de twee groene verticale lijnen.



Figuur 3.9 Verloop van de waterstand te Krimpen a/d Lek, de Bovenrijnafvoer te Lobith, de chlorideconcentratie te Kinderdijk, de chlorideconcentratie bij Lobith en de afvoer bij Hagestein gedurende de periode 1-11 november 2015. De meetperiode in de Lek met varende schepen door HBR (10 november) is weergegeven met de 2 groene verticale lijnen. Het voortschrijdend gemiddelde van de waterstand over 24h 50 min is weergegeven met de zwarte lijn.

Tussen 2 en 6 november is er geen middenstandsverandering en bij de opgetreden Bovenrijnafvoer van $950 \text{ m}^3/\text{s}$ komt het zout net voorbij Kinderdijk. De langzaam oplopende middenstand op 6, 7 en 8 november ter grootte van 20 cm heeft een toename van de pieken van de chlorideconcentratie tot gevolg. Dit is in sterkere mate het geval tijdens de middenstandsverhoging op 9 en 10 november, wanneer de middenstand in 1 dag toeneemt met 45 cm. Het gevolg is dat maximale chlorideconcentraties oplopen tot 1000 mg/l . Na de middenstandsopzet volgt er een geleidelijke middenstandsverlaging gedurende 3 dagen, waarbij de chlorideconcentraties afnemen tot de achtergrondwaarde (niet in de figuur getoond). De verzilting in de mond van de Lek t.g.v. de middenstandverandering is dus van tijdelijke aard (4 dagen). Wel treedt op 9 t/m 11 november permanente verzilting op; de chlorideconcentratie is dan gedurende de gehele getijcyclus groter dan de achtergrondconcentratie en zout kan door dispersieve processen in de richting van Hagestein worden getransporteerd.

Figuur 3.10 toont een tijdsuitsnede van Figuur 3.9, namelijk de dag waarop met een varend schip in de Lek is gemeten. In de linker figuur wordt de waterstand in Krimpen a/d Lek getoond; in de rechter figuur het gemiddelde van de waterstand in Krimpen a/d Lek en Hagestein. In Par. 3.1 is gebleken dat in het laatste geval het hoogwater samenvalt met hoogwaterstroomkentering en volgens Figuur 3.10 (rechter venster) is de chlorideconcentratie dan maximaal. Verder blijkt, dat instroming in de Lek start om 00:00 uur bij opkomend tij maar dat pas 2 uur later in Kinderdijk een toename van de chlorideconcentratie wordt gemeten. Aan het begin van de vloedstroming bevindt het zoute water zich dus nog op enige afstand van Kinderdijk in de Nieuwe Maas.

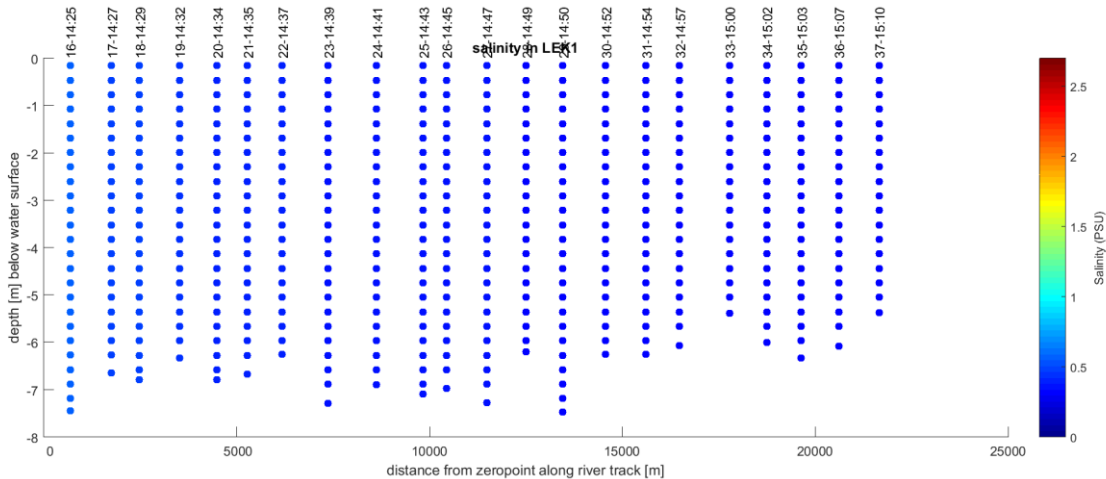


Figuur 3.10 Als Figuur 3.9 voor 10 november. Links: waterstand Krimpen a/d Lek (rood) en voortschrijdend gemiddelde waterstand Krimpen a/d Lek (zwart); rechts: gemiddelde waterstand Krimpen a/d Lek en Hagestein beneden (rood) en voortschrijdend gemiddelde waterstand van de gemiddelde waterstand van Krimpen a/d Lek en Hagestein beneden (zwart). Overige verlopen zijn hetzelfde. De meetperiode in de Lek met varende schepen (10 november) is weergegeven met de 2 groene verticale lijnen. In de rechter figuur is de chlorideconcentratie zoals varend gemeten, op het moment dat het schip ter hoogte van Kinderdijk is gearriveerd, weergegeven met bolletjes. De chlorideconcentratie is met behulp van de NDB-lijn afgeleid uit de gemeten geleidendheid en temperatuur.

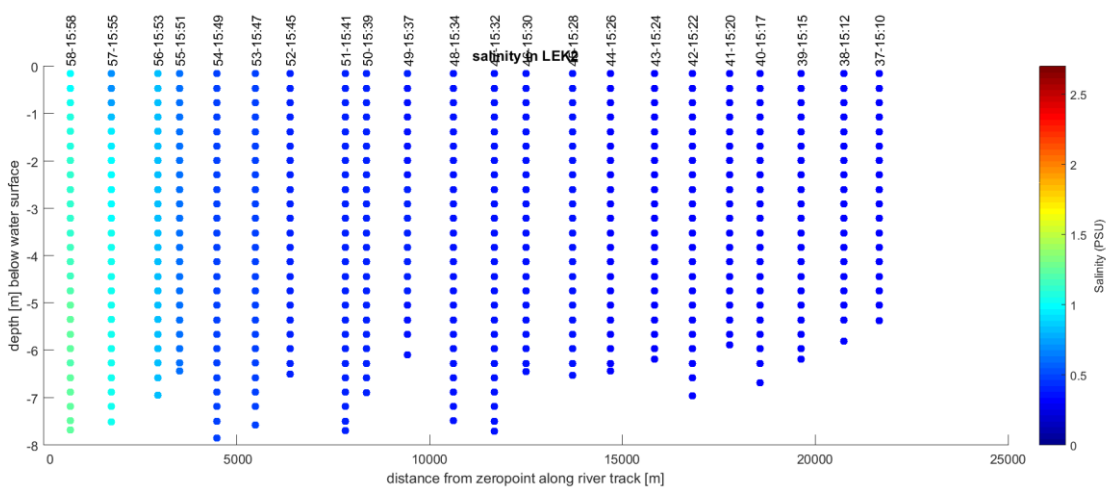
De resultaten van de uitgevoerde metingen (geleidendheid en temperatuur) zijn door HBR omgezet naar saliniteiten. Als globale vuistregel kan worden gehanteerd dat de chlorideconcentratie (kg/m^3) gelijk is aan 0,6 maal de saliniteit ($\text{PSU} \approx \text{kg/m}^3$).

In Figuur 3.11 en Figuur 3.12 wordt de verticale saliniteitsverdeling langs de Lek getoond tot een afstand van 22 km van de monding zoals gemeten tijdens traject 1 (in de richting van Hagestein). Bij het begin van de meting (14h 25 min) bevindt de meetboot zich in de mond van de Lek. In Figuur 3.10 (rechter paneel) is te zien dat de gemeten chlorideconcentratie in Kinderdijk op dat moment nog laag is (iets verhoogd t.o.v. de achtergrondconcentratie). De gemeten chlorideconcentratie met het meetschip (gele bolletje) stemt hiermee overeen. Tijdens de opvolgende periode van 1,5 uur neemt de chlorideconcentratie in Kinderdijk toe. In die periode vaart het meetschip in de richting van Hagestein (traject Lek1) en vervolgens weer terug (traject Lek2). In Figuur 3.11 is te zien, dat door het meetschip tijdens traject 1 geen zout wordt gemeten. Pas als weer teruggekeerd is in de monding, wordt over de laatste paar kilometer een verhoogde zoutconcentratie waargenomen (Figuur 3.12). Hierbij is soms sprake van enige gelaagdheid. Het zoutgehalte neemt dan nog steeds toe, zoals volgt uit de gemeten chlorideconcentratie in Kinderdijk (Figuur 3.10, rechter venster). Ondanks de lage Bovenrijnafvoer, de Lekafvoer die nihil is en de opgetreden middenstandsopzet blijft de verzilting van de Lek beperkt tot enkele kilometers vanaf de mond. Dit komt omdat de afstand waarover een sterke verzilting optreedt niet groter kan zijn dan de vloedweg vanaf de mond als bij het begin van de instroming van de Lek nog geen zout aanwezig is. Hierop wordt verder ingegaan in Par. 3.3, waar de vloedweg wordt berekend voor de condities van januari 2017.

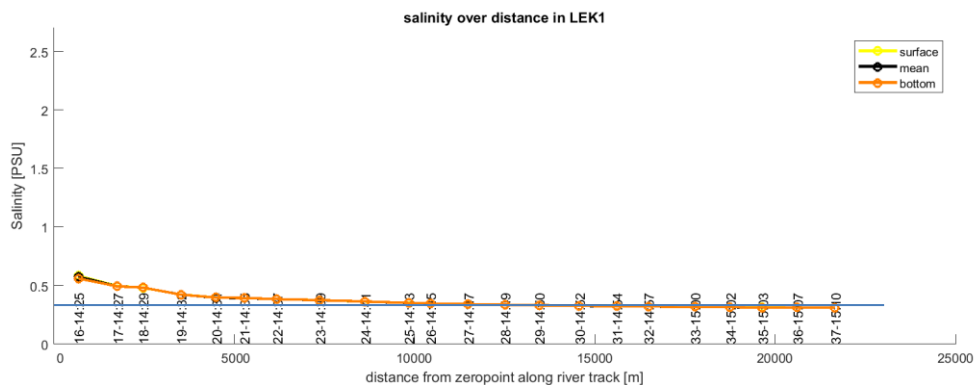
In Figuur 3.13 (traject Lek1) en Figuur 3.14 (traject Lek2) wordt de langsverdeling van de saliniteit aan het oppervlak en bij de bodem gegeven alsmede van de verticaalgemiddelde concentratie. Uit de figuren blijkt dat over een lengte van 10 tot 15 km vanaf de mond van de Lek sprake is van een verhoogde chlorideconcentratie. Verder komt duidelijk naar voren dat in de mond gelaagdheid optreedt, wat kan hebben bijgedragen aan het dispersief transport (er is immers een longitudinale dichtheidsgradiënt t.g.v. de aanwezigheid van zout in het water).



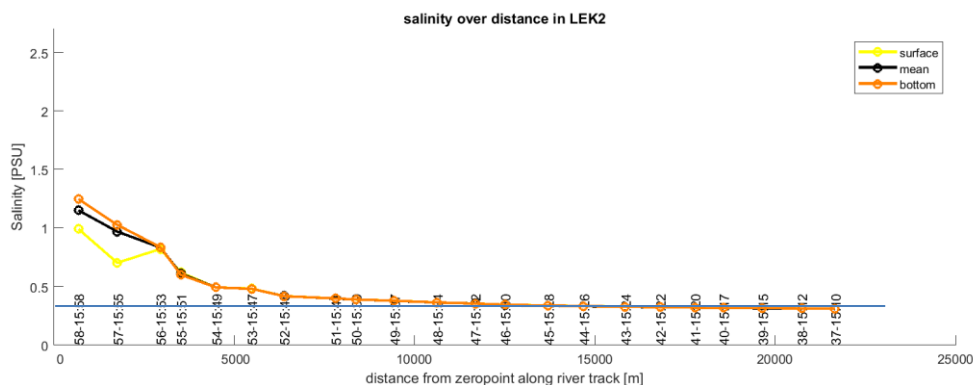
Figuur 3.11 Saliniteitsverdeling in verticale richting langs de Lek tijdens traject 1 in de richting van Hagestein (rechts). Het getal boven de verticaalmeting wordt gevormd door een oplopend getal en de tijdsaanduiding: 16-14:25 betekent verticaalmeting nr. 16 op tijdstip 14h 25 min (wintertijd).



Figuur 3.12 Saliniteitsverdeling in verticale richting langs de Lek tijdens traject 2 in de richting van Krimpen a/d Lek (links). Het getal boven de verticaalmeting wordt gevormd door een oplopend getal en de tijdsaanduiding: 58-15:58 betekent verticaalmeting nr. 58 op tijdstip 15h 58 min (wintertijd).



Figuur 3.13 Saliniteit aan het oppervlak (geel), verticaal-gemiddeld (zwart) en bij de bodem (oranje) gemeten tijdens traject 1. Voor betekenis van vermelde getallen zie Figuur 3.11.



Figuur 3.14 Saliniteit aan het oppervlak (geel), verticaal-gemiddeld (zwart) en bij de bodem (oranje) gemeten tijdens traject 2. Voor betekenis van vermelde getallen zie Figuur 3.12.

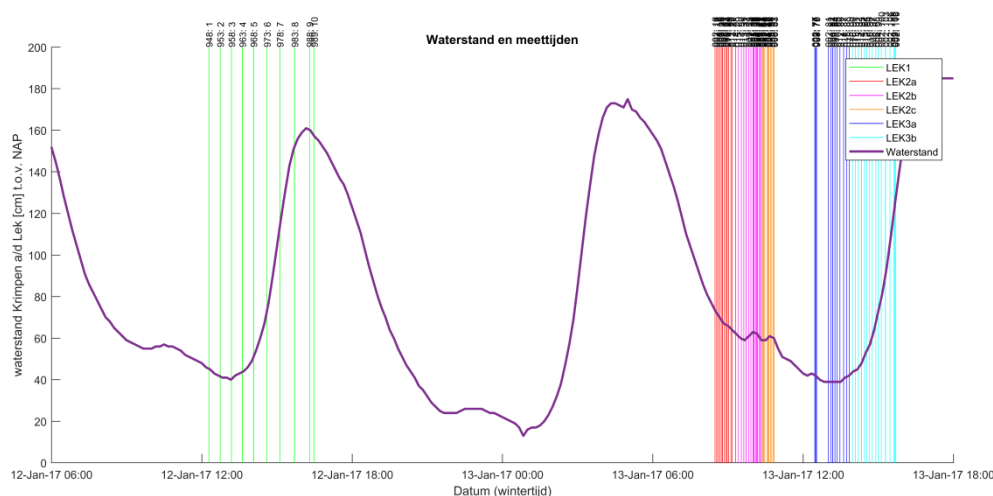
Samenvatting

- Bij een Bovenrijnafvoer van 950 m³/s en in afwezigheid van middenstandsveranderingen verzilt de monding van de Lek tot net voorbij Kinderdijk.
- Zodra er sprake is van middenstandsverhogingen vindt een grote toename plaats van de chlorideconcentraties, in dit geval tot 1000 mg/l. De verzilting is van tijdelijke aard (4 dagen), omdat de middenstandsverlaging volgend op de verhoging het zoute water weer de Lek doet uitstromen.
- Een toename van de chlorideconcentraties treedt vooral op over de lengte van de vloedweg in de Lek.

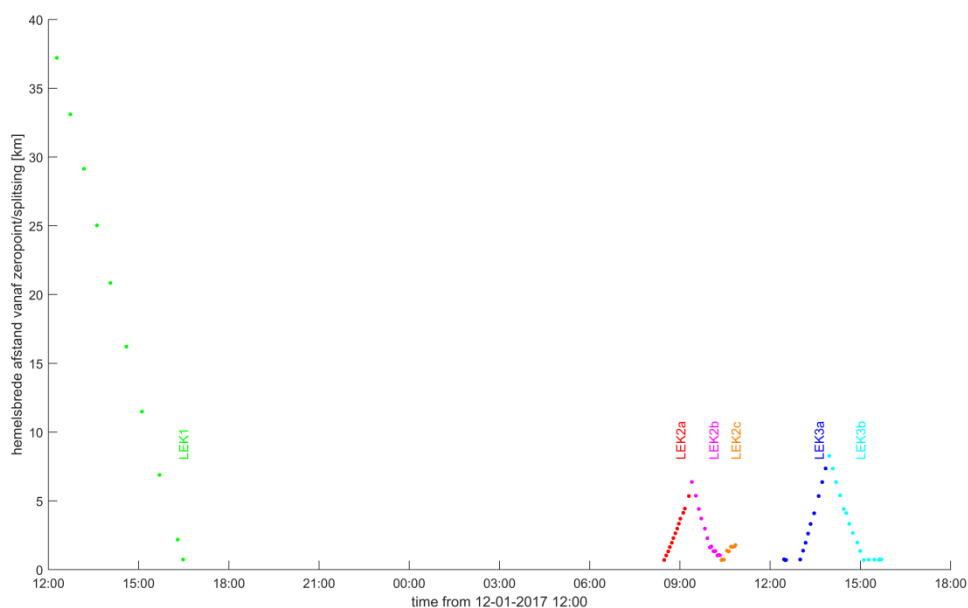
3.3 Varende metingen januari 2017: chlorideconcentratie

Op 12, 13 en 14 januari 2017 zijn zoutmetingen uitgevoerd in de Hollandsche IJssel en rondom de Stormpolder nabij Krimpen a/d IJssel, op 12 januari in de Lek (tot Hagestein) en in de Nieuwe Maas bij het splitsingspunt met de Lek en op 13 januari rondom het splitsingspunt Nieuwe Maas-Lek-Noord. Hierna worden alleen de metingen in de Lek geanalyseerd. De metingen met varende schepen zijn uitgevoerd door AquaVision in opdracht van Rijkswaterstaat.

De tijdstippen van de metingen op 12 en 13 januari zijn weergegeven in Figuur 3.15 en de positie van het meetschip in Figuur 3.16.



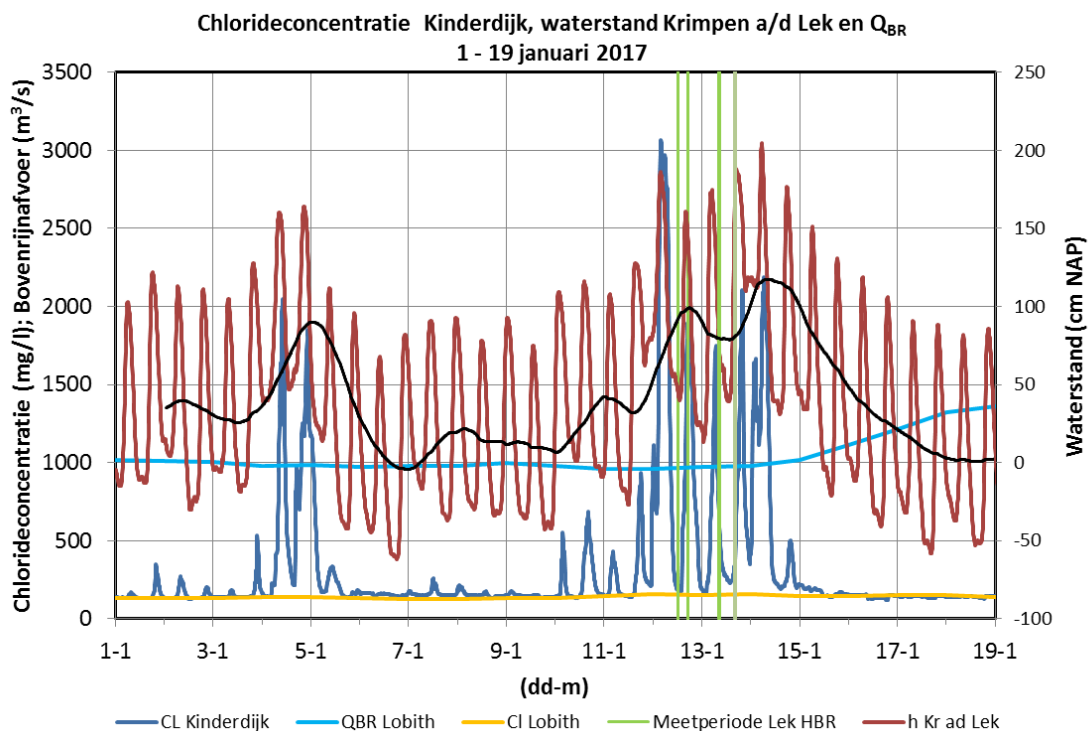
Figuur 3.15 Tijdstippen van de metingen op 12 en 13 januari 2017. De kleuren stemmen overeen met de trajecten in Figuur 3.16.



Figuur 3.16 Positie van het meetship op 12 en 13 januari 2017 (afstand vanaf de monding). De namen van de trajecten zijn bijgeschreven. De kleuren stemmen overeen met de tijdstippen in Figuur 3.15.

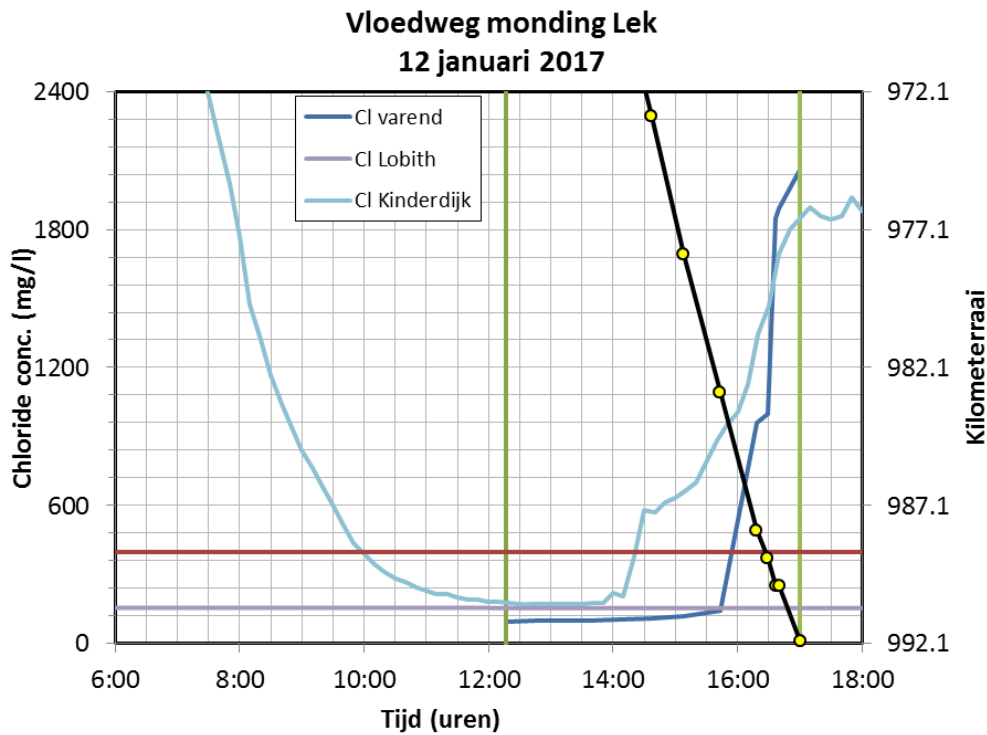
De omstandigheden tijdens en voorafgaand aan de metingen zijn weergegeven in Figuur 3.17. De Bovenrijnafvoer bij Lobith (2 dagen eerder) is 1000 m³/s. Pas na de metingen neemt deze toe tot 1360 m³/s. Op 5 januari is er een middenstandsopzet van 70 cm gedurende een periode van 1 dag, gevolgd door een verlaging. De opzet die begint op 10 januari en duurt t/m begin 14 januari bedraagt ruim 100 cm. De optredende chlorideconcentraties hebben piekwaarden van 2000-3000 mg/l. Zowel op 4 januari als op 13/14 januari daalt de chlorideconcentratie niet tot de achtergrondwaarde en is er dus sprake van permanente verzilting (d.w.z. de chlorideconcentratie is langer dan een getijperiode groter dan de achtergrondconcentratie). Er blijft dan aan het eind van de periode met ebstroming zout achter in de monding wat tot dispersief transport in de richting van Hagestein kan leiden. De middenstandsverlagingen op 5/6 januari en vooral 14 t/m 17 januari leiden ertoe dat het zout

in de Lek geheel wordt weggespoeld. De verziltingsduren ten gevolge van de 2 middenstandsveranderingen zijn resp. 1 en 5 dagen, waarbij er in het laatste geval tijdens het getij perioden van 1 tot enkele uren zijn dat geen verzilting optreedt. De Bovenrijnafvoer waarbij de mond van de Lek begint te verzilten is moeilijk vast te stellen door de vele middenstandsveranderingen. Op 8 en 9 januari wordt de zoutverdeling het minst hierdoor verstoord en reikt het zout net voorbij Kinderdijk bij een Bovenrijnafvoer van 1000 m³/s.

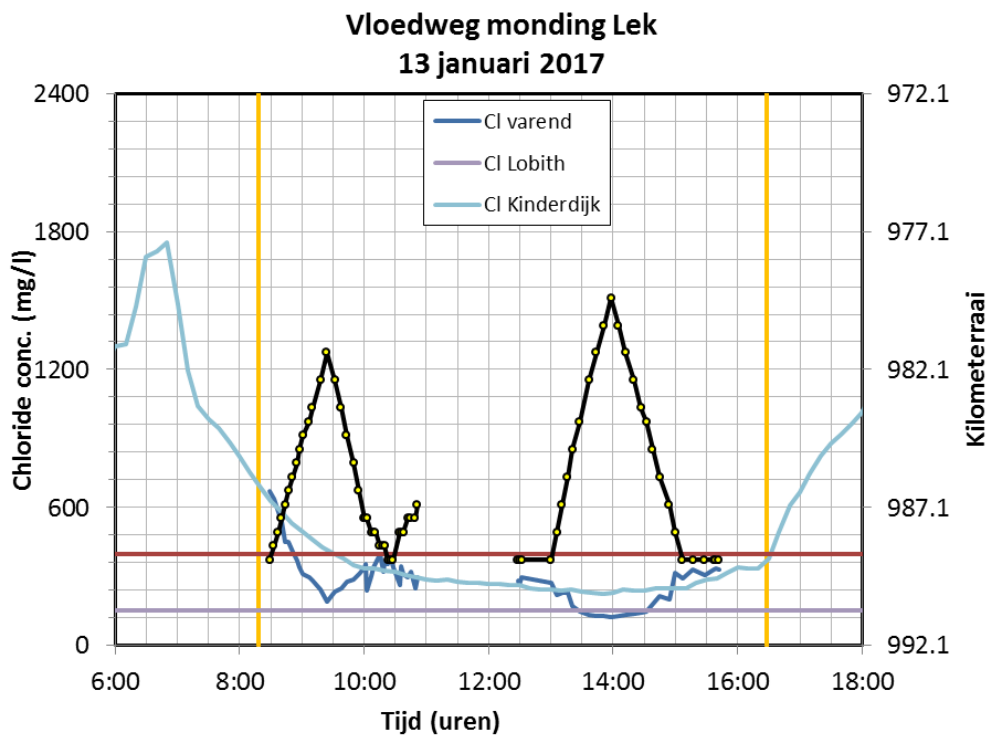


Figuur 3.17 Verloop van de waterstand te Krimpen a/d Lek, de Bovenrijnafvoer (zoals 2 dagen eerder gemeten bij Lobith), de chlorideconcentratie te Kinderdijk, de chlorideconcentratie bij Lobith. De meetperioden in de Lek met varende schepen door AquaVision (12 en 13 januari) zijn weergegeven met de 2x2 groene verticale lijnen. Het voortschrijdend gemiddelde van de waterstand over 24h 50 min is weergegeven met de zwarte lijn. Gegevens m.b.t. de afvoer van de Lek zijn nog niet beschikbaar.

In Figuur 3.18 wordt de gemeten chlorideconcentratie in de vaste meetlocatie Kinderdijk (NAP-5 m) en de gemeten chlorideconcentratie vanaf het meetschip op verschillende locaties in de Lek getoond. De figuur geeft ook de positie van het meetschip weer (rechter-as). Terwijl het meetschip in de richting van Kinderdijk vaart (in de figuur vanaf 14:30 uur, weergegeven met de zwarte lijn met gele bolletjes) neemt de chlorideconcentratie in Kinderdijk toe (lichtblauwe lijn). Even na 16:00 uur, als het meetschip zich in de buurt van Kinderdijk bevindt, wordt ook varend een verhoogde chlorideconcentratie gemeten (donkerblauwe lijn). Als het meetschip om 16:30 uur bij Kinderdijk (horizontale rode lijn) is gearriveerd zijn de chlorideconcentratie gemeten vanaf het schip en de concentratie gemeten met de vaste opnamer in Kinderdijk identiek. Het blijkt dat tijdens de lange vaartocht van Hagestein naar Krimpen a/d Lek slechts gedurende de laatste 4 km zout is gemeten. Ook op 13 januari is er gemeten op momenten dat de Lek nauwelijks verziltte in de mond, zie Figuur 3.19.

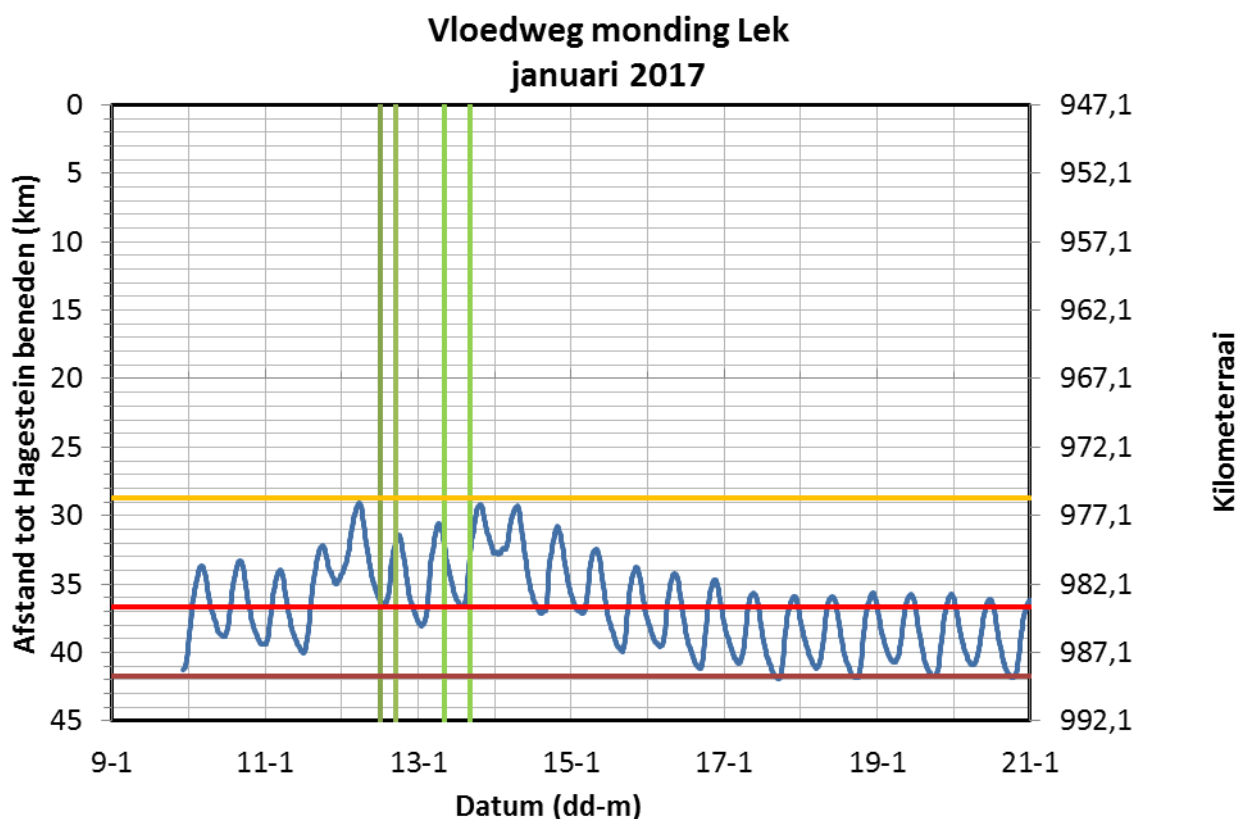


Figuur 3.18 Verloop van de chlorideconcentratie in Kinderdijk en chlorideconcentratie zoals gemeten met het varend schip op verschillende meetlocaties (linker-as) en de locatie van het meetschip (rechter-as). Meetdag 12 januari 2017.



Figuur 3.19 Verloop van de chlorideconcentratie in Kinderdijk en chlorideconcentratie zoals gemeten met het varend schip op verschillende meetlocaties (linker-as) en de locatie van het meetschip (rechter-as). Meetdag 13 januari 2017.

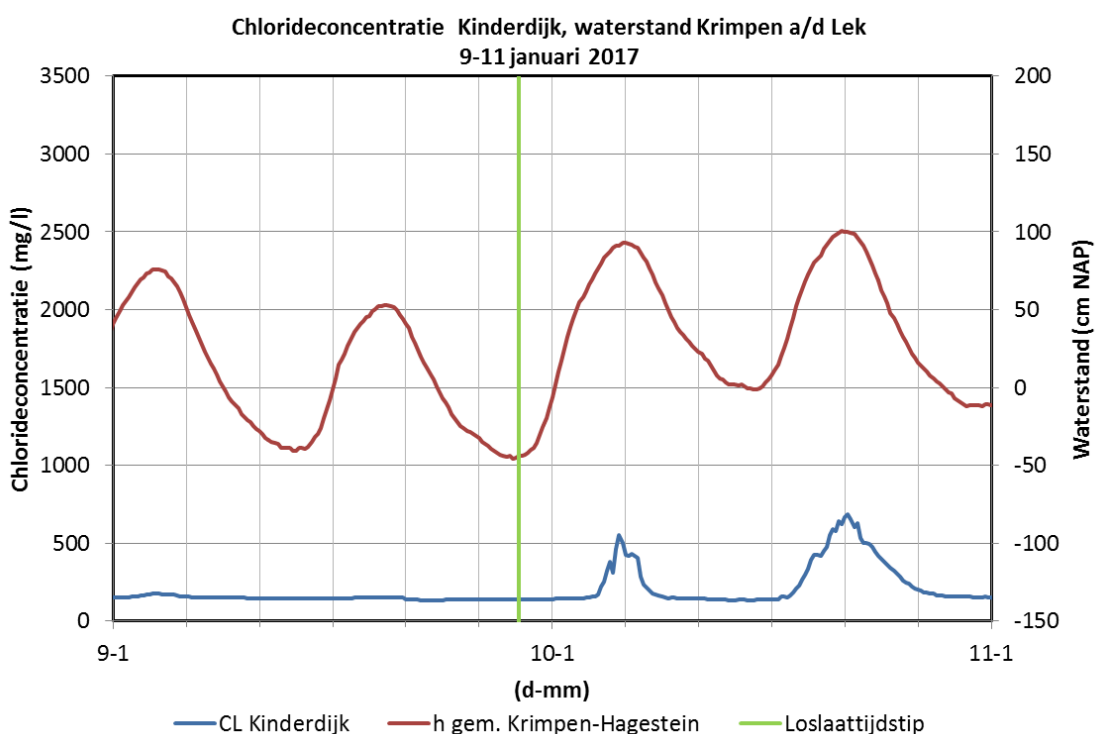
Om de grootte van de zoutindringing ten gevolge van alleen advectief transport na te gaan is de vloedweg berekend. Hierbij wordt ervan uitgegaan, dat op het moment van laagwaterstromkentering een "zoutdeeltje" aanwezig is in de mond van de Lek. Voor januari 2017 zijn de stroomsnelheden in opeenvolgende raaien langs de Lek bepaald met een kombergingsbeschouwing, waarbij gebruik is gemaakt van een Sobek-schematisatie, en het gemiddelde van de waterstand in Krimpen a/d Lek en Hagestein-beneden (zie Par. 2.3). De snelheid van het deeltje is bepaald door interpolatie tussen de snelheden in de genoemde raaien langs de Lek. Vervolgens is de afgelegde weg berekend gedurende een tijdstap van 10 min. Op de nieuwe locatie van het deeltje is weer de snelheid geïnterpoleerd etc. Het resultaat is weergegeven in Figuur 3.20. Hierbij is een zoutdeeltje losgelaten op 9 januari 2017 om 22:10, d.w.z. op het moment dat de Lek begint in te stromen. De horizontale paarse, rode en oranje lijnen geven resp. de locaties Kinderdijk, Lekkerkerk en Bergambacht weer.



Figuur 3.20 Positie van een "zoutdeeltje" dat op 9 januari 2017 22:10, aan het begin van instroming in de Lek, is losgelaten. De paarse, rode en oranje lijnen betreffen de locaties Kinderdijk, Lekkerkerk en Bergambacht. De 2x2 groene lijnen omsluiten de 2 meetdagen.

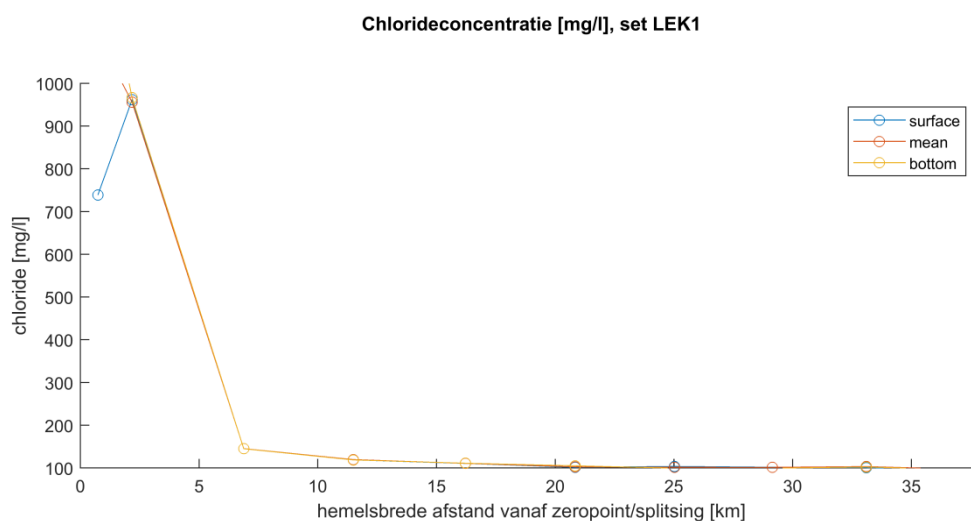
Vanaf 17 januari beweegt het deeltje tussen de mond en Lekkerkerk op en neer. De vloedweg is 6 km en het zoutdeeltje komt net voorbij Lekkerkerk. Het zout reikt uiteraard minder ver als bij het begin van instroming, op 9 januari om 22:10 uur, nog geen zout aanwezig is. De middenstandstoename, tussen 11 en 14 januari heeft tot gevolg, dat de vloedweg groter is en dat het zout (indien al aanwezig in de mond bij het begin van de instroming) tot Bergambacht komt. De figuur laat duidelijk zien, dat in dit geval door de opzet permanente verzilting optreedt gedurende ongeveer 7 dagen, immers het zout blijft aanwezig in de monding van de Lek. Door dispersief transport kan het zout in de richting van Hagestein worden getransporteerd. Merk op dat de vloedweg is berekend met een geschematiseerde waterbeweging. Voor verdere precisering kan eenzelfde berekening worden uitgevoerd met door Sobek berekende stroomsnelheden.

Bij de hiervoor uitgevoerde berekening is verondersteld, dat op 9 januari om 22:10 bij instroming zout aanwezig is in de Lek-monding. In werkelijkheid wordt pas 4 uur later een verhoging van de chlorideconcentratie gemeten, zie Figuur 3.21. Het zout zal dus minder ver komen ten gevolge van advectief transport dan is aangegeven in Figuur 3.20 met de vloedweg. Bij de volgende getijperiode op 10 januari is het verschil tussen de tijdstippen van instroming en toename van de chlorideconcentratie kleiner (2 uur) en bevindt het zout zich dus bij aanvang van de vloed dichtbij de monding van de Lek, dit als gevolg van de middenstandsopzet. De vloedweg in Figuur 3.20 vormt dus voor de beschouwde situatie de bovengrens tot waar het zout kan komen ten gevolge van alleen advectief transport.



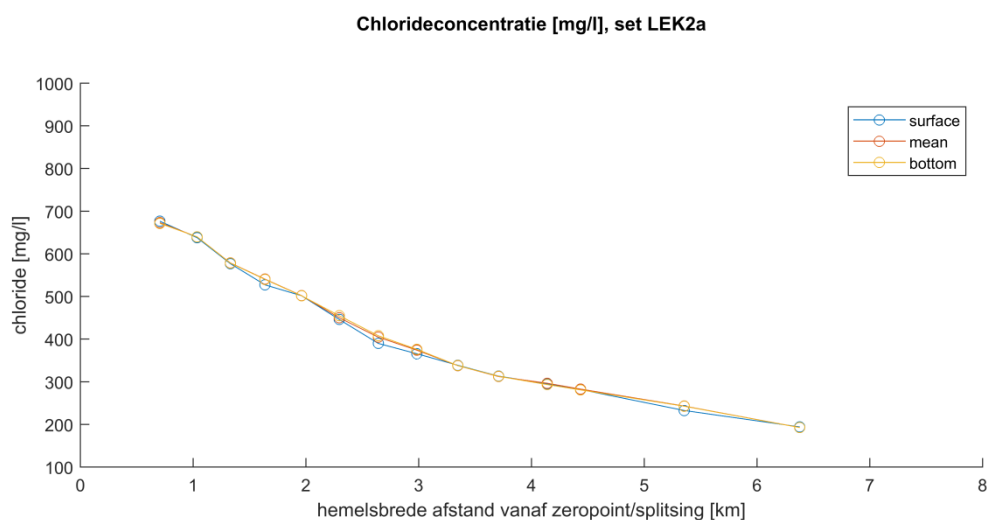
Figuur 3.21 Verloop van het gemiddelde van de waterstand in Krimpen a/d Lek en Hagestein-beneden en de chlorideconcentratie te Kinderdijk op 9 en 10 januari 2017.

In Figuur 3.22 t/m Figuur 3.25 worden de langsprofielen van de chlorideconcentratie getoond, zoals gemeten op 12 en 13 januari 2017. Op 12 januari is gevaren vanaf Hagestein tot de mond van de Lek. Zout water met chlorideconcentraties tot 1000 mg/l bevindt zich in de eerste 2 km van de Lek, zie Figuur 3.22. De monding is op dat moment aan het verzilten (toename van de chlorideconcentratie bij Kinderdijk). Eerder, op een afstand groter dan 7 km vanaf de mond, is met het varende meetschip nauwelijks een verhoging t.o.v. de achtergrondconcentratie gemeten.



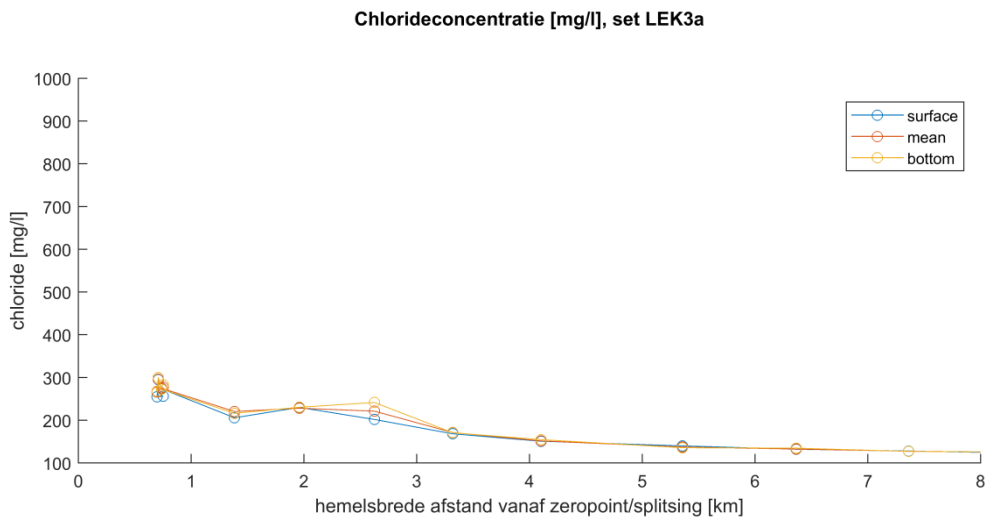
Figuur 3.22 *Chlorideconcentratie* aan het oppervlak (blauw), verticaal-gemiddeld (oranje) en bij de bodem (geel) gemeten tijdens traject 1 varend afwaarts (van rechts naar links in de figuur) op 12 september 2017.

Op 13 januari is de chlorideconcentratie ook verhoogd t.o.v. de achtergrondwaarde over de eerste 7 km vanaf de mond (en mogelijk verder) en er is vrijwel geen gelaagdheid, zie Figuur 3.23.

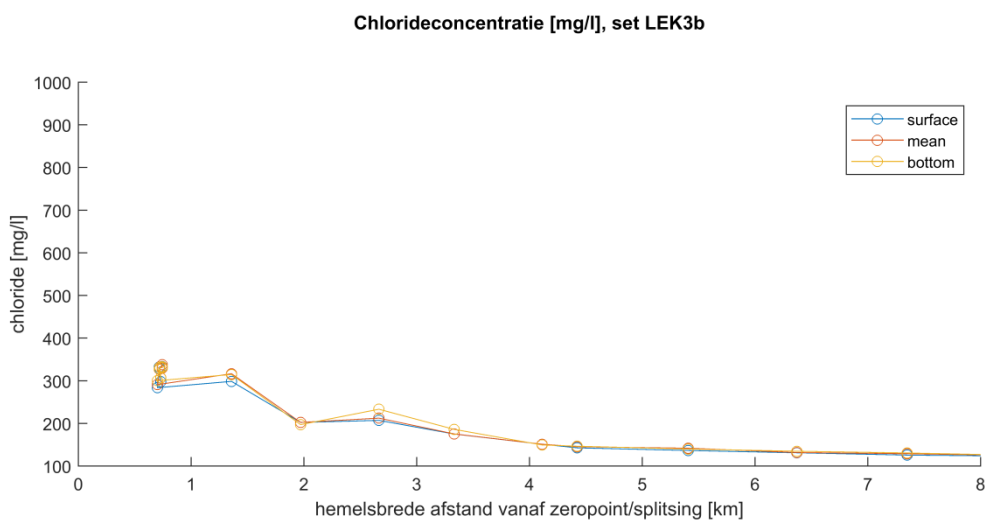


Figuur 3.23 *Chlorideconcentratie* aan het oppervlak (blauw), verticaal-gemiddeld (oranje) en bij de bodem (geel) gemeten tijdens traject 2a varend opwaarts (van links naar rechts in de figuur) op 13 januari 2017. De schaal van de horizontale as verschilt van die in Figuur 3.22.

Op 13 januari is een tweede keer gemeten, varend vanaf de mond in opwaartse richting. De chlorideconcentratie langs het gehele traject zijn dan gedaald, zie Figuur 3.24. Soms kan enige gelaagdheid worden waargenomen. Het beeld tijdens de direct opvolgende trajectmeting in de richting van Hagestein is ongeveer gelijk aan dat van de voorafgaande trajectmeting, zie Figuur 3.25



Figuur 3.24 Chlorideconcentratie aan het oppervlak (blauw), verticaal-gemiddeld (oranje) en bij de bodem (geel) gemeten tijdens traject 3a varend opwaarts (van links naar rechts in de figuur) op 13 januari 2017. De schaal van de horizontale as verschilt van die in Figuur 3.22.



Figuur 3.25 Chlorideconcentratie aan het oppervlak (blauw), verticaal-gemiddeld (oranje) en bij de bodem (geel) gemeten tijdens traject 3b varend afwaarts (van rechts naar links in de figuur) op 13 januari 2017. De schaal van de horizontale as verschilt van die in Figuur 3.22.

De varende metingen laten een relatief beperkte verzilting zien op enkele kilometers afstand van de mond van de Lek, ondanks de piekconcentraties tot 3000 mg/l die zijn opgetreden ter plaatse van Kinderdijk. Dit komt doordat er meestal is gemeten op momenten dat het zout zich heeft teruggetrokken uit de Lek (op 13 januari, zie Figuur 3.19) of doordat het meetschip pas is gearriveerd in de monding op het moment dat zout water de Lek binnendringt (12 januari, zie Figuur 3.18). Met het varende meten is het lastig een coherent beeld van de zoutverdeling te verkrijgen, omdat al varende de chlorideconcentraties veranderen.

Samenvatting

- De Bovenrijnafvoer waarbij verzilting van de Lek-monding begint op te treden is moeilijk vast te stellen door de vele middenstandsveranderingen. Een schatting op basis van de metingen is 1000 m³/s.
- De afstand waarover het zout, dat bij begin instroming aanwezig is in de monding van de Lek, kan verplaatsen door advectie ten gevolge van het getij in januari 2017

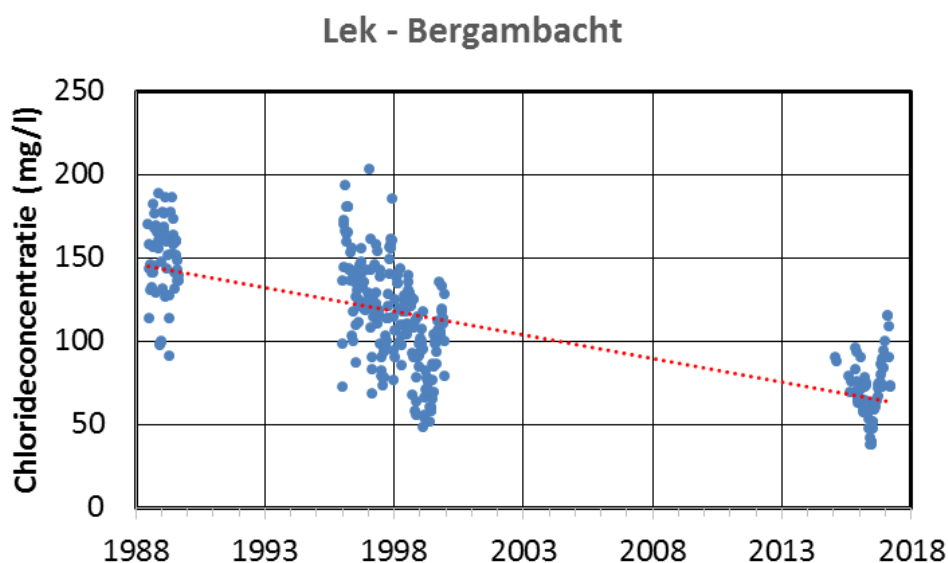
bedraagt 6 tot 7 km, d.w.z. tot net voorbij Lekkerkerk. Door de opgetreden middenstands-opzet verdubbelt deze afstand tot 13 km. Dit houdt in dat verzilt water afkomstig van de Nieuwe Maas binnen een getijperiode juist Bergambacht kan bereiken. Bij andere getijcondities en middenstands-veranderingen kan deze afstand groter of kleiner zijn. De afvoer van de Lek heeft hier weinig invloed op omdat deze bij lage afvoersituaties veel kleiner is dan de vloeddebieten in de monding, zie Par. 3.1.

- De metingen in de Lek op 12 en 13 januari zijn uitgevoerd gedurende de getijfase dat verzilting van de Lek beperkt was. Hierbij is een verhoogde chlorideconcentratie gemeten tot een afstand van 5 tot 10 km vanaf de monding al is een exacte grens moeilijk vast te stellen. Dit valt binnen de grens tot waar zout kan komen als gevolg van alleen advectief transport door getij en middenstandsopzet.

3.4 Overige metingen

3.4.1 Bergambacht 1988-2017

Door Dunea zijn bij het innamepunt bij Bergambacht en ter hoogte van het nabijgelegen veer Bergambacht-Streefkerk middels monsternames chlorideconcentraties gemeten. De metingen zijn uitgevoerd in de jaren 1988 en 1989, 1996 t/m 1999 en 2015 t/m heden. Het aantal metingen per kalenderjaar varieert tussen 14 en 52. De gemeten chlorideconcentraties worden getoond in Figuur 3.26.



Figuur 3.26 Gemeten chlorideconcentraties bij Bergambacht. Bron: Dunea.

De metingen over de periode van 30 jaar laten een dalende trend in de chlorideconcentraties zien. Dit is het gevolg van het stopzetten van de lozingen van de kalimijnen in de Elzas. De spreiding van de datapunten is vermoedelijk het gevolg van variaties in de Bovenrijnafvoer: bij hoge afvoeren is de concentratie relatief laag en bij lage afvoeren relatief hoog. Tijdens de recente jaren (2015-2017) variëren de chlorideconcentraties bij Bergambacht tussen 50 en 100 mg/l. Het is niet bekend of chlorideconcentraties alleen zijn gemeten als water aan de Lek wordt onttrokken. In die gevallen zijn de concentraties vermoedelijk laag en kan het dus zijn dat gebeurtenissen met hogere concentraties t.g.v. zoutindringing vanuit zee niet in de meetregistraties aanwezig zijn. Kentallen als maximale en minimale chlorideconcentratie en mediaan zijn vermeld in Tabel 3.2.

De relatie tussen de Bovenrijnafvoer bij Lobith en de chlorideconcentratie bij Lobith wordt gegeven door (Hydrologic, 2013):

$$c_{Lobith} = c_c + 1000 \frac{L_c}{Q_{Lobith}} \quad (3.1)$$

met c_c de achtergrondconcentratie (= 47 mg/l) en L_c de constante zoutvracht (= 60 kg/s).

Bij Bovenrijnafvoeren van 800, 1200, 2200 en 10.000 m³/s bedraagt de chlorideconcentratie van de Bovenrijn volgens vgl. (3.1) afgerond resp. 120, 100, 70 en 50 mg/l ofwel liggend binnen het bereik van de gemeten chlorideconcentraties gedurende de periode 2015 t/m maart 2017. De waargenomen variatie van de chlorideconcentratie is dus waarschijnlijk veroorzaakt door variaties in de Bovenrijnafvoer.

Tabel 3.2 Kentallen chlorideconcentratiemetingen bij Bergambacht.

Bron: Dunea.

jaar	aantal	chlorideconcentratie (mg/l)		
		min.	max.	mediaan
1988	26	97	188	151
1989	36	91	186	152
1996	51	72	193	140
1997	52	68	203	118
1998	52	55	143	116
1999	52	48	135	93
2015	14	63	95	75
2016	47	37	100	65
2017 ¹⁾	6	72	115	99

¹⁾ t/m 20 maart 2017.

3.4.2 Lekkerkerk 2004-2009

Gedurende de periode 2004 t/m 2009 zijn in het kader van de monitoring voor “de Kier” bij Lekkerkerk chlorideconcentraties gemeten met een vaste opnemer langs de oever op een diepte van NAP-3.47 m. Deze metingen konden binnen dit project niet meer worden geanalyseerd. Vragen die beantwoord zouden kunnen worden zijn: bij welke piekwaarden van de chlorideconcentratie bij Kinderdijk treedt verzilting op bij Lekkerkerk en wat is de invloed van omgevingsfactoren als Bovenrijn- en Lekafvoer en waterstand met middenstandsopzet hierop?

4 Schatting dispersiecoëfficiënt

In Kuijper (2016) is op grond van metingen een range bepaald voor de dispersiecoëfficiënt halverwege de Hollandsche IJssel. Vervolgens is nagegaan of de grootte van de dispersiecoëfficiënt K ook kon worden berekend met uit de literatuur beschikbare formuleringen voor dispersie die het gevolg zijn van laterale snelheidsverschillen ('shear dispersion') en horizontale dichtheidsverschillen. Dit bleek alleen het geval voor de ondergrens van K ($= 10 \text{ m}^2/\text{s}$); voor de bovengrens van K ($= 65 \text{ m}^2/\text{s}$) bleek slechts $25 \text{ m}^2/\text{s}$ te kunnen worden verklaard met 'shear dispersion' en dispersie ten gevolge van dichtheidsverschillen tezamen. Het grootste deel ($40 \text{ m}^2/\text{s}$) moest worden toegeschreven aan processen die niet zijn meegenomen in de formuleringen, zoals dispersie ten gevolge van doodwaterzones, bochtstroming etc.

Voor de Lek zijn geen metingen beschikbaar waarmee de dispersiecoëfficiënt kan worden bepaald op de wijze zoals dat voor de Hollandsche IJssel is gedaan. In het geval dat voor de Hollandsche IJssel de dispersiecoëfficiënt volgend uit de metingen zou kunnen worden gereproduceerd met dispersieformuleringen, dan zouden deze formuleringen ook gebruikt kunnen worden voor de Lek.

In dit hoofdstuk wordt daarom in Par. 4.1 allereerst de berekening van de dispersie in de Hollandsche IJssel verbeterd. Dit doen we door gebruik te maken van enigszins aangepaste invoerwaarden voor de geometrie, en door gebruik te maken van een dispersieformulering die meer processen meeneemt dan de eerder gebruikte formulering. Na vergelijking met de uit de metingen bepaalde dispersiecoëfficiënten, wordt in Par. 4.2 de dispersiecoëfficiënt in (de monding van) de Lek geschat.

4.1 Aanvullende analyse Hollandsche IJssel: vergelijking gemeten en berekende dispersiecoëfficiënt

In Kuijper (2016) is de dispersiecoëfficiënt in de Hollandsche IJssel afgeleid op basis van uitgevoerde metingen. Bij de afleiding is een zoutbalans opgesteld voor 4 opeenvolgende perioden van elk één dag (9 tot 10, 10 tot 11, 11 tot 12 en 12 tot 13 november 2015) en voor verschillende balansgebieden (km. 13 tot 5, 12 tot 5, 11 tot 5, 13 tot 8, 12 tot 8 en 11 tot 8). Verder zijn verschillende aannamen gedaan voor de transporten over de randen van het balansvak (gesloten, dispersief transport en/of advectioneel transport op de opwaartse rand). Dit heeft geresulteerd in een bereik van waarden voor de dispersiecoëfficiënt ter grootte van 10 tot $65 \text{ m}^2/\text{s}$. Opgemerkt wordt dat de dispersie coëfficiënt is bepaald halverwege de Hollandsche IJssel, voorbij de vloedweg vanaf de mond, oftewel in het deel van de Hollandsche IJssel waar dispersieve transporten dominant zijn ten opzichte van de advectioneel processen. Verwacht mag worden dat de dispersiecoëfficiënt afneemt in de richting van Gouda, omdat de getijsnelheden en de chlorideconcentratie afnemen. De dispersiecoëfficiënt is dus een ruimtelijk-variërende parameter.

Een ruimtelijk variërende dispersie-waarde zou kunnen worden vastgelegd in de 1D modelschematisatie van de Hollandsche IJssel (en ook voor de Lek). Echter, de voorkeur gaat uit naar een op fysische processen gebaseerde formulering waarin variatie in de dispersie als gevolg van 'shear dispersion' en dispersie als gevolg van dichtheidsverschillen (voornamelijk de 'f3' en 'f4' termen in de dispersie-formulering in SOBEK3), de ruimtelijke variabiliteit in de dispersie bepalen.

De voorspeller zoals gebruikt in (Kuijper, 2016), die gebaseerd is op de theorie volgens Fischer et al. (1979), veronderstelt dat kentering van de stroming in het gehele profiel gelijktijdig optreedt. In werkelijkheid kentert de stroming eerst bij de vaste begrenzing (oever of bodem) en daarna pas in het midden van de rivier en bij het wateroppervlak. Door dit faseverschil in de verticale en laterale snelheidsverdeling mee te beschouwen kan de dispersie toenemen. Goslinga en Verboom (1979) hebben voor deze situatie een analytisch uitdrukking afgeleid, zie Bijlage A.

In deze aanvullende analyse wordt gebruik gemaakt van de uitdrukking van Goslinga en Verboom (1979) en van iets aangepaste geometrische kenmerken (waterdiepte: 4,9 m i.p.v. 4,5 m, rivierbreedte: 125 m i.p.v. 145 m) en hydrodynamische grootheden (stroomsnelheid: 0,16 m/s i.p.v. 0,15 m/s) ten opzichte van wat in (Kuijper, 2016, Bijlage B) is gebruikt. Deze waarden zijn meer representatief voor de monding van de Hollandsche IJssel. De dispersiecoëfficiënt berekend met de methode van Fischer et al. (1979) wordt hierdoor iets groter.

De methode volgens Goslinga en Verboom maakt gebruik van de maximale stroomsnelheid in het profiel tijdens de getijperiode. Deze maximale stroomsnelheid treedt in het midden op, tussen de beide wanden die de stroming begrenzen (stroming tussen twee oneindig grote platen onder invloed van een oscillerende drukgradiënt). Onder natuurlijke omstandigheden zal de laterale snelheidsverdeling vooral worden gestuurd door bodemveranderingen in dwarsrichting en het is dan moeilijk om uitspraken te doen over de grootte van de maximale stroomsnelheid. In het vervolg zal worden uitgegaan van de profielgemiddelde snelheid en wordt nagegaan hoeveel de berekende dispersiecoëfficiënten veranderen als de stroomsnelheid met 10% wordt vergroot.

De volgende zes gevallen worden onderscheiden:

- **Geval 1a**, Fischer et al. (1979): lengteschaal voor menging bedraagt 0,7 maal de rivierbreedte (laterale snelheidsverschillen); invoer grootheden als in (Kuijper, 2016);
- **Geval 1b**, Fischer et al. (1979): lengteschaal voor menging bedraagt 0,7 maal de rivierbreedte (laterale snelheidsverschillen); aangepaste invoer t.o.v. Geval 1a;
- **Geval 2**, Goslinga en Verboom (1979): lengteschaal voor menging bedraagt 0,7 maal de rivierbreedte (laterale snelheidsverschillen);
- **Geval 3**, als geval 2: lengteschaal voor menging bedraagt 0,5 maal de rivierbreedte (laterale snelheidsverschillen);
- **Geval 4**, als geval 3 met een toename van de profielgemiddelde stroomsnelheid met 10%.
- **Geval 5**, Goslinga en Verboom (1979): lengteschaal voor menging is gelijk aan de waterdiepte (verticale snelheidsverschillen);

Per geval worden voor de constante c_y in de diffusievergelijking voor de laterale richting (zie vgl. (A.17a)) de waarden 0.3, 0.6 en 0.9 gebruikt (Fischer et al., 1979). Voor de constante c_z in de diffusievergelijking voor de verticale richting worden de waarden 0.05 en 0.1 toegepast (Fischer et al., 1979; Winterwerp, 1980).

De berekende dispersiecoëfficiënten voor de 17 onderscheiden situaties zijn vermeld in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Dispersiecoëfficiënt K berekend voor halverwege de Hollandsche IJssel (nabij km. 12) ten gevolge van 'shear' in een oscillerende stroming. Berekende resultaten zijn in rood weergegeven. Notaties: u_{gem} – getijgemiddelde waarde van de (absolute) profielgemiddelde stroomsnelheid; W – rivierbreedte; h – waterdiepte; c_y en c_z – constanten; ε_y en ε_z – getijgemiddelde en profielgemiddelde turbulente diffusiecoëfficiënten in laterale en verticale richting; T_y en T_z – tijd voor menging in laterale en verticale richting; $T' = T/T_y$ of T/T_z ; T – oscillatieperiode; $f(T')$ – vgl. (A.20), benaderd door vgl. (A.21); U_{max} – maximale stroomsnelheid in het profiel en tijdens de getijperiode; K_0 – getijgemiddelde dispersiecoëfficiënt als $T \gg T_y$ of $T \gg T_z$. Voor U_{max} is de maximale waarde van de profielgemiddelde stroomsnelheid tijdens het getij gebruikt. L is de lengteschaal voor volledige menging. Dezelfde waarden voor K_0 voor Geval 1b en Geval 3 is "toeval" en het resultaat van de keuze $U_{max}/u_{gem} = 0,40/0,16 = 2,5$.

u_{gem} (m/s)	W (m)	h (m)	c_y (-)	ε_y (m ² /s)	T_y (s)	T' (-)	$f(T')$ (-)	U_{max} (m/s)	K_0 (m ² /s)	K (m ² /s)
Geval 1a: Fischer et al. (1979): $L = 0.7 W$ (zie Kuijper, 2016)										
0.15	145	4.2	0.3	0.013	783156	0.057	0.0085		247	2
0.15	145	4.2	0.6	0.026	391578	0.114	0.0332		123	4
0.15	145	4.2	0.9	0.039	261052	0.171	0.0716		82	6
Geval 1b: Fischer et al. (1979): $L = 0.7 W$										
0.16	125	4.9	0.3	0.016	467689	0.096	0.0235		168	4
0.16	125	4.9	0.6	0.033	233844	0.191	0.0877		84	7
0.16	125	4.9	0.9	0.049	155896	0.287	0.1779		56	10
Geval 2: Goslinga en Verboom (1979) : $L = 0.7 W$										
0.16	125	4.9	0.3	0.016	467689	0.096	0.0394	0.4	329	13
0.16	125	4.9	0.6	0.033	233844	0.191	0.1105	0.4	165	18
0.16	125	4.9	0.9	0.049	155896	0.287	0.1921	0.4	110	21
Geval 3: Goslinga en Verboom (1979) : $L = 0.5 W$										
0.16	125	4.9	0.3	0.016	238617	0.187	0.1074	0.4	168	18
0.16	125	4.9	0.6	0.033	119308	0.375	0.2672	0.4	84	22
0.16	125	4.9	0.9	0.049	79539	0.562	0.4110	0.4	56	23
Geval 4: Goslinga en Verboom (1979) : $L = 0.5 W$; U_{max} 10% vergroot										
0.16	125	4.9	0.3	0.016	238617	0.187	0.1074	0.44	203	22
0.16	125	4.9	0.6	0.033	119308	0.375	0.2672	0.44	102	27
0.16	125	4.9	0.9	0.049	79539	0.562	0.4110	0.44	68	28
u_{gem} (m/s)	W (m)	h (m)	c_z (-)	ε_z (m ² /s)	T_z (s)	T' (-)	$f(T')$ (-)	U_{max} (m/s)	K_0 (m ² /s)	K (m ² /s)
Geval 5: Goslinga en Verboom (1979) : $L = h$										
0.16	125	4.9	0.05	0.003	8800	5.080	0.9594	0.4	6	6
0.16	125	4.9	0.1	0.005	4400	10.159	0.9862	0.4	3	3

Door de iets aangepaste waarden van de waterdiepte, rivierbreedte en gemiddelde stroomsnelheid (Geval 1b t.o.v. 1a) wordt de dispersiecoëfficiënt 2-4 m²/s groter. De

berekende dispersiecoëfficiënt K neemt verder toe van Geval 1b naar Geval 4. De methode volgens Goslinga en Verboom (Geval 2) leidt tot grotere waarden voor K ($\approx 10 \text{ m}^2/\text{s}$) dan met de methode van Fischer et al. (Geval 1b), omdat faseverschillen in het snelheidsprofiel worden meegenomen in de modelvergelijkingen. Als de lengteschaal voor volledige menging (L) toeneemt (een meer asymmetrisch profiel; vergelijk Geval 2 met Geval 3), neemt de mengtijd toe. Er is dan meer tijd nodig om volledig te mengen en in het extreme geval dat geen menging plaatsvindt (de mengtijd is dan oneindig groot) keren de deeltjes na een oscillatieperiode weer terug naar hun oorspronkelijke plaats; er is dan geen dispersie. Geval 3 ($L = 0,5 W$) resulteert daarom in een grotere dispersiecoëfficiënt dan Geval 2 ($L = 0,7 W$), omdat de mengtijd kleiner is. Een toename van de maximale stroomsnelheid, vergelijk Geval 4 met Geval 3, resulteert in een verdere toename van de dispersiecoëfficiënt, omdat de 'shear' (schering = snelheidsverschil) groter wordt. Ten slotte wordt opgemerkt dat de dispersie ten gevolge van verticale snelheidsverschillen substantieel kleiner is dan de dispersie ten gevolge van horizontale snelheidsverschillen (vergelijk Geval 5 met Geval 2 en 3). De mengtijd is voor Geval 5 veel kleiner door de kleine waterdiepte t.o.v. de rivierbreedte (hoewel de verticale diffusiecoëfficiënt ε_z kleiner is dan de horizontale coëfficiënt ε_y). Hierdoor neemt de dispersiecoëfficiënt af, immers bij extreme menging beweegt elk deeltje met de profielgemiddelde snelheid en is de dispersie zelfs nul².

Uit Tabel 4.1 volgt, dat het totaal van de dispersiecoëfficiënten voor de laterale en verticale richting volgens de methode Goslinga-Verboom varieert tussen 16 en 34 m^2/s . Gemiddeld is dit 25 m^2/s . Daarmee kan 'shear dispersion' tijdens getijomstandigheden dus voor een belangrijk deel de gemeten dispersiecoëfficiënten in het bereik van 10-65 m^2/s verklaren.

In Kuijper (2016) is ook een schatting gegeven van de bijdrage aan de dispersiecoëfficiënt ten gevolge van dichtheidsverschillen. Voor de achtergronden wordt verwezen naar Bijlage B. De dimensies van de rivier ter plaatse van het balansgebied zijn iets aangepast ten opzichte van de eerdere berekening en in overeenstemming gebracht met die in Tabel 4.1. De resultaten zijn vermeld in Tabel 4.2 met een kalibratiefactor $\alpha_c = 1$. De berekende dispersiecoëfficiënt voor deze situatie is 14 m^2/s . Volgens Kuijper en Van Rijn (2011) kan α_c variëren tussen 0.7 en 1.3, zodat voor de dispersiecoëfficiënt een globale schatting volgt ter grootte van 10-18 m^2/s . Deze lage waarden hangen vermoedelijk samen met de uniforme verticale concentratieverdeling, zoals gemeten in november 2015, waardoor het netto dispersief transport gering is.

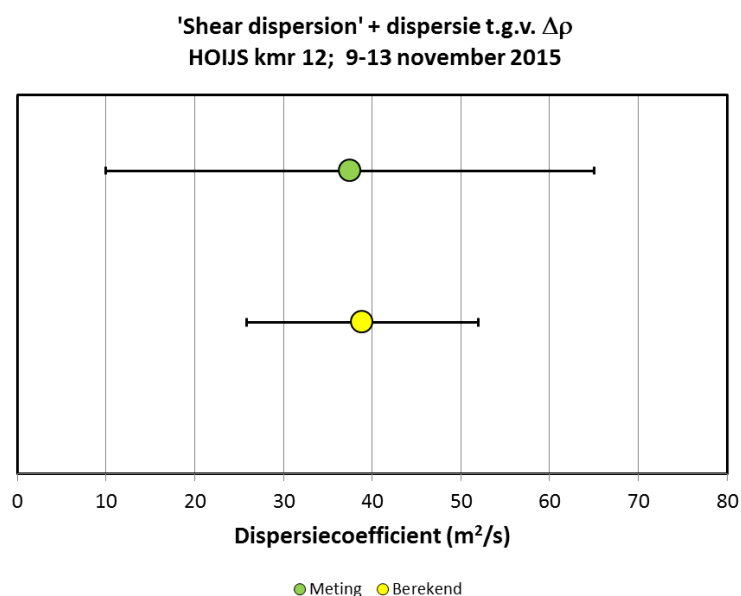
Tabel 4.2 Dispersiecoëfficiënt ten gevolge van dichtheidsverschillen. Kalibratiefactor $\alpha_c = 1$.

HOUS		Input:	Tussenuitvoer:
constante =		60 -	$\Delta\rho_x = 0.0667 \text{ kg/m}^3$
gravitatieversnelling	$g =$	9.81 m/s^2	$v_{\Delta,x} = 0.0566 \text{ m/s}$ (stroomsnelheid t.g.v. dichtheidsverschil)
calibratieconstante	$\alpha_c =$	1.0 -	$u_{r,x} = 0.0016 \text{ m/s}$ (rivierafvoersnelheid)
dichtheid zoet water	$\rho =$	1000 kg/m^3	$L_{e,x} = 5691 \text{ m}$ (getijweglengte)
getijperiode	$T =$	44700 s	
waterdiepte	$h_x =$	4.9 m	
stroomvoerende breedte	$B_x =$	125 m	
Chezy ruwheid	$C =$	45 $\text{m}^{0.5}/\text{s}$	
convergentielengte doorstroomoppervlak	$L_s =$	11000 m	
amplitude stroomsnelheid	$u^{\text{amp}}_x =$	0.4 m/s	
rivierafvoer	$Q_r =$	1 m^3/s	
chlorideconcentratie (t.o.v. achtergrond)	$c_x =$	0.05 kg/m^3	
			Berekende dispersiecoëfficiënt:
			$D_x = 14 \text{ m}^2/\text{s}$

De totale berekende dispersiecoëfficiënt ten gevolge van horizontale en verticale snelheidsvariëaties en door dichtheidsverschillen varieert tussen 26 en 52 m^2/s met een

² De invloed van een kleinere mengtijd op de dispersiecoëfficiënt K is tweërlei: enerzijds neemt $f(T)$ toe, zie Bijlage A, en anderzijds neemt K_0 af. Het 'overall' effect is een afname van K .

gemiddelde waarden van $39 \text{ m}^2/\text{s}$. Dit is weergegeven in Figuur 4.1 samen met de uit de metingen afgeleide dispersiecoëfficiënt: $10\text{-}65 \text{ m}^2/\text{s}$ en gemiddeld $38 \text{ m}^2/\text{s}$. De overeenkomst tussen gemeten en berekende waarden voor de dispersiecoëfficiënt is verrassend goed, zeker waar het de gemiddelde waarde betreft (38 vs. $39 \text{ m}^2/\text{s}$). Hier mogen geen 'harde' conclusies aan worden verbonden, want de onzekerheidsbanden rondom beide gemiddelde waarden zijn in beide gevallen relatief groot en een vergelijking tussen meting en berekening moet voor meerdere locaties en omstandigheden worden gedaan. Toch blijkt dat de dispersieformuleringen een groot deel van de variatie van de gemeten dispersiecoëfficiënt kunnen verklaren. Er wordt daarom verondersteld, dat de dispersievergelijkingen voor 'shear' en dichtheidsverschillen voldoende voorspellend zijn en dat zij kunnen worden gebruikt om tot een globale schatting van de dispersiecoëfficiënt voor de Lek te komen.



Figuur 4.1 Dispersiecoëfficiënt in de Hollandsche IJssel nabij km. 12 volgend uit metingen en berekend op basis van 'shear' en dichtheidsverschil.

4.2 Schatting dispersiecoëfficiënt

Uit de vergelijking tussen de gemeten en berekende dispersiecoëfficiënt ter plaatse van km. 12 in de Hollandsche IJssel (zie Par. 4.1) blijkt dat de gebruikte formuleringen voor dispersie t.g.v. 'shear' onder getijomstandigheden en t.g.v. dichtheidsverschillen gezamenlijk goed de gemeten dispersiecoëfficiënt kunnen reproduceren. Hoewel dit slechts een eenmalige vergelijking betreft, geeft de goede overeenstemming enig vertrouwen in de toepassing van de formuleringen voor andere locaties en andere omgevingscondities om tenminste de orde grootte van de coëfficiënt te kunnen schatten.

Locaties

In deze paragraaf wordt de dispersiecoëfficiënt berekend voor:

- twee locaties in de Hollandsche IJssel: t.p.v. de Stormvloedkering (kmr. 18) en Nieuwerkerk a/d IJssel (kmr. 8), zie Par. 4.2.1;
- twee locaties in de Lek: Kinderdijk in de mond (kmr. 989) en Bergambacht (13 km vanaf de mond); zie Par. 4.2.2.

Dispersiecoëfficiënt t.g.v. 'shear': invoer

Voor de constanten in de dispersievergelijkingen zijn dezelfde waarden gebruikt als bij de berekeningen in Par. 4.1:

- $c_y = 0.3$; 0.6 en 0.9 (coëfficiënten voor turbulente diffusie in dwarsrichting);
- $c_z = 0.05$ en 0.1 (coëfficiënten voor turbulente diffusie in verticale richting);
- $L = 0.7 W$ en $L = 0.5 W$ (lengte voor volledige menging in dwarsrichting);
- $L = h$ (lengte voor volledige menging in verticale richting);
- U_{max} 10% vergroot (t.o.v. U_{gem});

In totaal zijn dit 11 berekeningen voor elke locatie; samen bepalen zij de onnauwkeurighedsband voor de berekende dispersiecoëfficiënt. De band is hierbij het verschil tussen de minimale en maximale berekende waarde; voor het gemiddelde is gebruikt het gemiddelde van de minimale en maximale waarde.

Dispersiecoëfficiënt t.g.v. dichtheidsverschillen: invoer

De geselecteerde omstandigheden zijn (zie Tabel 4.3):

- een chlorideconcentratietoename t.o.v. de achtergrondwaarde ΔCl van 50, 250 en 500 mg/l, zowel in de mond van de Hollandsche IJssel (Stormvloedkering) als in de mond van de Lek (Kinderdijk);
- een afvoer (netto lozing) Q_r op de Hollandsche IJssel van 1 en 10 m³/s en een netto afvoer op de Lek van 2 en 20 m³/s.³

Tabel 4.3 *Conditie waarvoor de dispersiecoëfficiënt is berekend. Q_r is de afvoer cq. netto lozing; ΔCl is de chlorideconcentratietoename in de mond (t.o.v. de achtergrondconcentratie).*

	Hollandsche IJssel		Lek	
	Q_r (m ³ /s)	ΔCl (mg/l)	Q_r (m ³ /s)	ΔCl (mg/l)
Geval 1	1	50	2	50
Geval 2	1	250	2	250
Geval 3	1	500	2	500
Geval 4	10	50	20	50
Geval 5	10	250	20	250
Geval 6	10	500	20	500

De gekozen concentratieverhogingen zijn gebaseerd op een nog lopende analyse van de gemeten chlorideconcentraties ter plaatse van Kinderdijk (Van den Boogaard en Mens, 2017). Hierbij treden concentratieverhogingen van 50, 250 en 500 mg/l op (t.o.v. de achtergrondconcentratie) bij Bovenrijnafvoeren van ongeveer 1050, 875 en 800 m³/s. De concentratieverhogingen zijn zowel voor de mond van de Hollandsche IJssel (Stormvloedkering) als voor de mond van de Lek (Kinderdijk) toegepast.

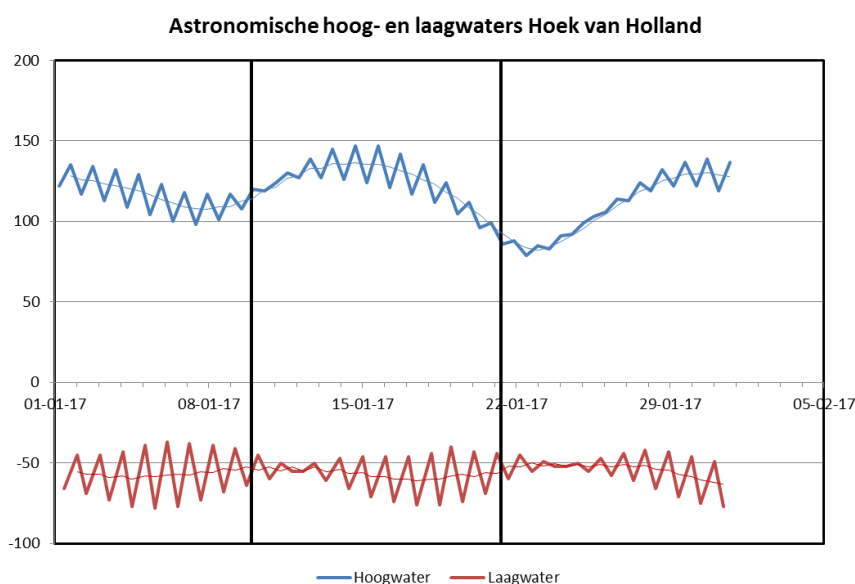
Voor de Hollandsche IJssel zijn afvoeren (netto lozingen) van 1 en 10 m³/s gekozen. Een afvoer binnen dit bereik is waarschijnlijk nodig voor de instandhouding van een zoetwaterbel bij Gouda (Hydrologic, 2013, en Kuijper, 2016).

Via de stuw bij Driel kan tot Bovenrijnafvoeren van 800-900 m³/s een afvoer naar de Nederrijn worden gerealiseerd van 25 m³/s (Hydrologic, 2013). In Van der Vat (2016) wordt genoemd dat in het verleden minimale afvoeren bij Hagestein zijn gemeten van enkele m³/s.

³ Sinds twee à drie jaar hanteert de beheerder een ander stuwbeheer bij de stuw van Hagestein waardoor minimaal 25 – 30 m³/s wordt ingelaten (Van der Vat, 2016)

Sinds enkele jaren geldt als beheer een minimale afvoer van 25-30 m³/s, al worden nog regelmatig afvoeren van minder dan 25 m³/s gemeten (Van der Vat, 2016). Voor de bepaling van de dispersiecoëfficiënt voor de Lek wordt uitgegaan van afvoeren van 2 en 20 m³/s.

De resultaten van de berekeningen worden besproken in Par. 4.2.1 voor de Hollandsche IJssel en in Par. 4.2.2 voor de Lek; zij zijn in tabelvorm vermeld in Bijlage C. Per locatie wordt de dispersiecoëfficiënt t.g.v. 'shear', t.g.v. dichtheidsverschillen en het totaal gegeven. Hierbij is de coëfficiënt t.g.v. 'shear' onder getijcondities voor de 6 gevallen hetzelfde, omdat deze niet afhangt van de rivierafvoer en de concentratieverhoging. Voor de berekening van deze dispersiecoëfficiënt is gebruik gemaakt van de *gemiddelde* getijcondities gedurende de periode 9-21 januari 2017 ofwel het gemiddelde van een bijna volledige springtij-doodtij cyclus, zie Figuur 4.2. Voor andere condities, bv. springtij of doortij, zullen de stroomsnelheden verschillend zijn en daarmee invloed hebben op de grootte van de dispersiecoëfficiënt. De grootte van dit effect is niet verder onderzocht.

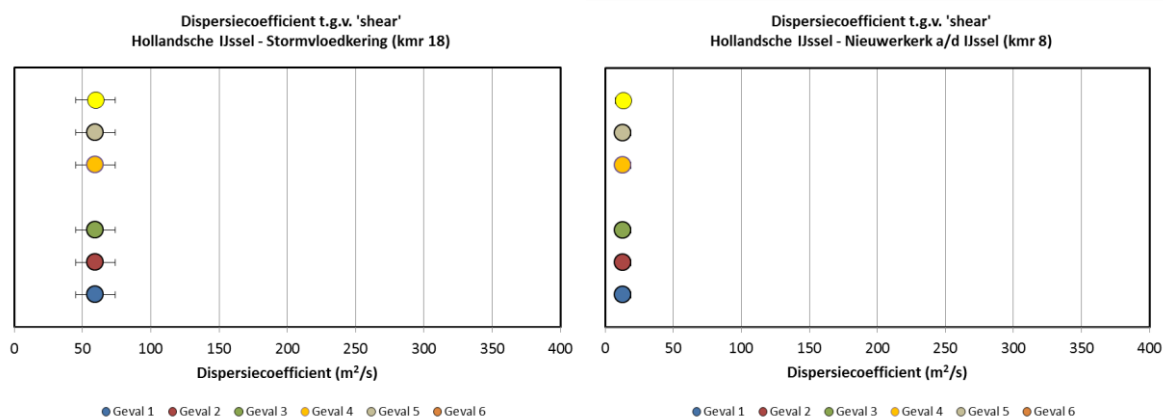


Figuur 4.2 Hoog- en laagwaters van het astronomische getij te Hoek van Holland tijdens januari 2017. De verticale zwarte lijnen begrenzen de periode waarvoor de gemiddelde en maximale getijsnelheid van opeenvolgende perioden van 24 h 50 min is bepaald voor het werkelijk opgetreden getij.

4.2.1 Hollandsche IJssel

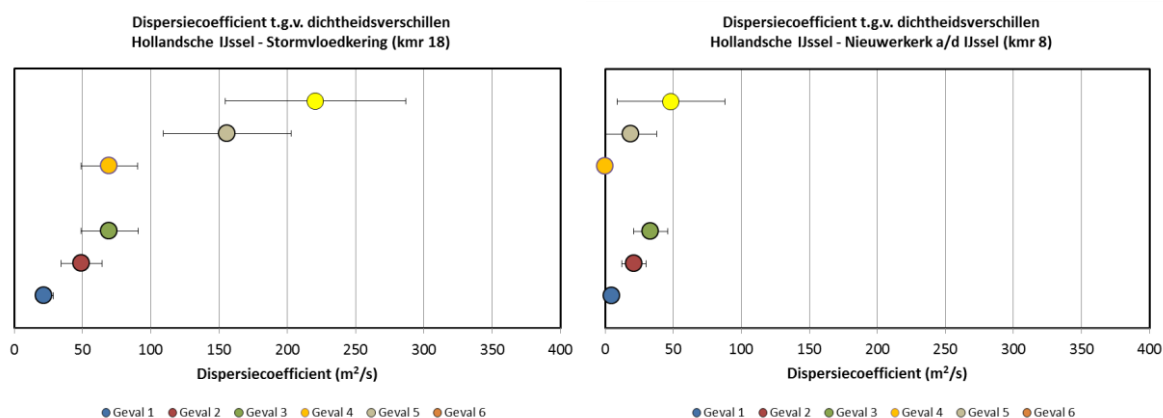
Ter plaatse van de Stormvloedkering in de Hollandsche IJssel wordt voor 'shear' een dispersiecoëfficiënt berekend van $60 \pm 15 \text{ m}^2/\text{s}^4$; bij Nieuwerkerk a/d IJssel, op 10 km afstand van de kering in de richting van Gouda, is deze $13 \pm 6 \text{ m}^2/\text{s}$ (zie Figuur 4.3). Deze afname volgt uit de afname van de getijsnelheden in de richting van Gouda. De onzekerheidsband is hier het resultaat van keuzes voor coëfficiënten en invoergoedheden in de formulerings. Uiteraard is er een onzekerheid in de gebruikte dispersieformulering voor 'shear' onder getijcondities volgens Goslinga en Verboom (1979), omdat de toepasbaarheid ervan voor slechts één situatie is geverifieerd.

⁴ Getallen zijn afgerond op veelvoud van 5 m²/s.



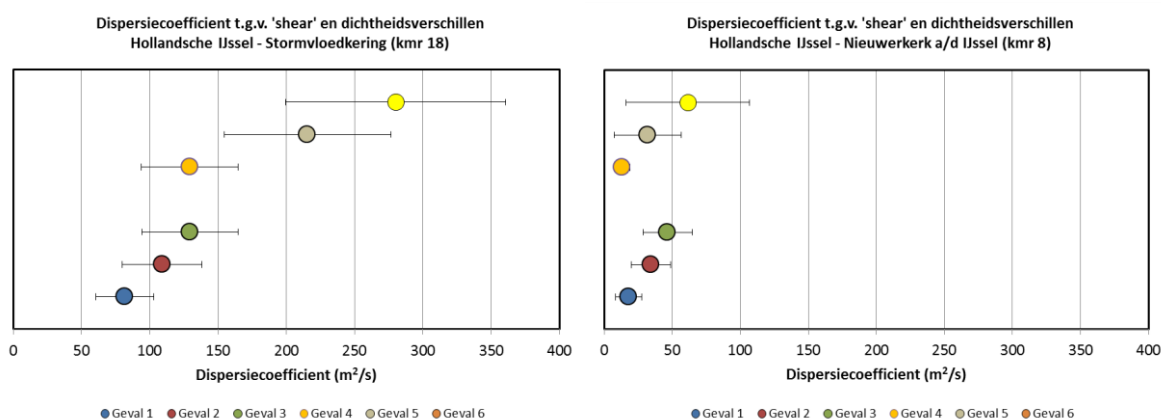
Figuur 4.3 Berekende dispersiecoëfficiënten t.g.v. 'shear' in de Hollandsche IJssel Stormvloedkering (links) en Nieuwerkerk a/d IJssel (rechts) voor de 6 onderscheiden gevallen.

De dispersiecoëfficiënt t.g.v. dichtheidsverschillen bij de Stormvloedkering laat een grotere variatie zien (zie Figuur 4.4). Deze variatie is vooral het gevolg van de verschillende omstandigheden. Bij een toenemende verzilting in de mond bij gelijkblijvende afvoer (gevallen 1, 2, 3 respectievelijk 4, 5, 6) neemt de berekende dispersiecoëfficiënt toe als gevolg van de grotere longitudinale dichtheidsgradiënt. Bij een grotere afvoer neemt de dispersiecoëfficiënt toe als gevolg van de sterkere gelaagdheid. Bij een lage afvoer van 1 m³/s en concentratieverhogingen van 50-500 mg/l varieert de dispersiecoëfficiënt tussen 15 en 90 m²/s als de onzekerheidsband mee wordt beschouwd. Bij een afvoer van 10 m³/s en concentratieverhogingen van 50-500 mg/l is deze variatie 50 tot 285 m²/s. Bij Nieuwerkerk a/d IJssel (Figuur 4.4, rechter plaatje) is de verzilting geringer en daardoor zijn de dispersiecoëfficiënten kleiner. Bij een lage afvoer van 1 m³/s en concentratieverhogingen van 50-500 mg/l is de dispersiecoëfficiënt (inclusief onzekerheidsband) kleiner dan 45 m²/s; bij een afvoer van 10 m³/s is deze kleiner dan 90 m²/s.



Figuur 4.4 Berekende dispersiecoëfficiënten t.g.v. dichtheidsverschillen in de Hollandsche IJssel Stormvloedkering (links) en Nieuwerkerk a/d IJssel (rechts) voor de 6 onderscheiden gevallen.

De totale dispersiecoëfficiënt bij concentratieverhogingen van 50-500 mg/l t.p.v. de Stormvloedkering is weergegeven in Figuur 4.5:

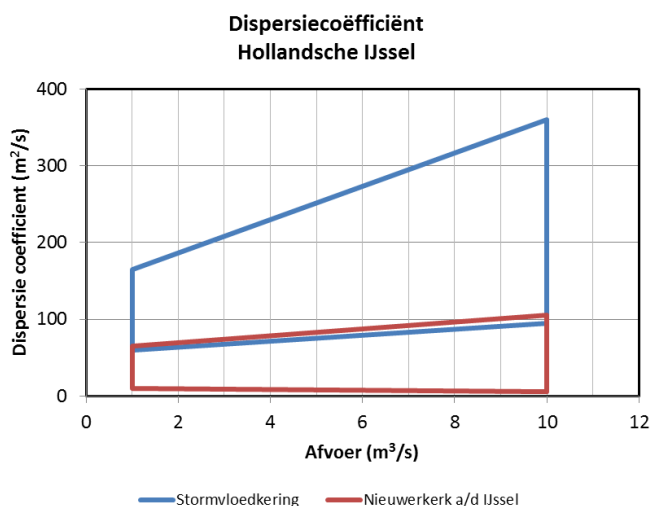


Figuur 4.5 Berekende dispersiecoëfficiënten t.g.v. dichtheidsverschillen en 'shear' in de Hollandsche IJssel Stormvloedkering (links) en Nieuwerkerk a/d IJssel (rechts) voor de 6 onderscheiden gevallen.

Samenvatting

Samengevat zijn de resultaten voor de totale dispersiecoëfficiënt (zie ook Figuur 4.6):

- Stormvloedkering:
 - Afvoer 1 m³/s: 60 - 165 m²/s;
 - Afvoer 10 m³/s: 95 - 360 m²/s;
- Nieuwerkerk a/d IJssel (kvr 8):
 - Afvoer 1 m³/s: 10 - 65 m²/s;
 - Afvoer 10 m³/s: 5 - 105 m²/s;



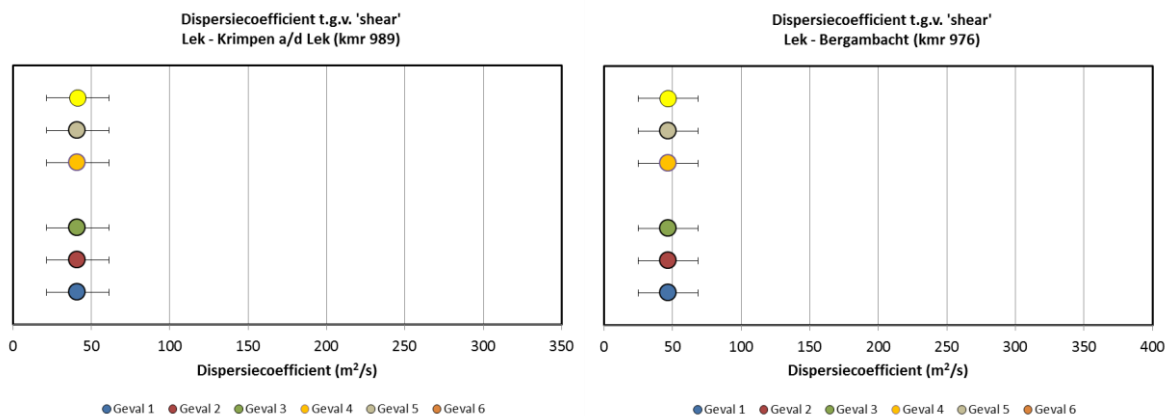
Figuur 4.6 Domein berekende totale dispersiecoëfficiënt in de Hollandsche IJssel bij de Stormvloedkering (kvr 18) en bij Nieuwerkerk a/d IJssel. Chlorideconcentratieverhogingen: 50-500 mg/l t.p.v. kvr 18. Afvoeren: 1 en 10 m³/s.

4.2.2 Lek

In de mond van de Lek, bij Krimpen a/d Lek en Kinderdijk, wordt voor 'shear' een dispersiecoëfficiënt berekend van 40 ± 20 m²/s⁵; bij Bergambacht, op 13 km afstand in de

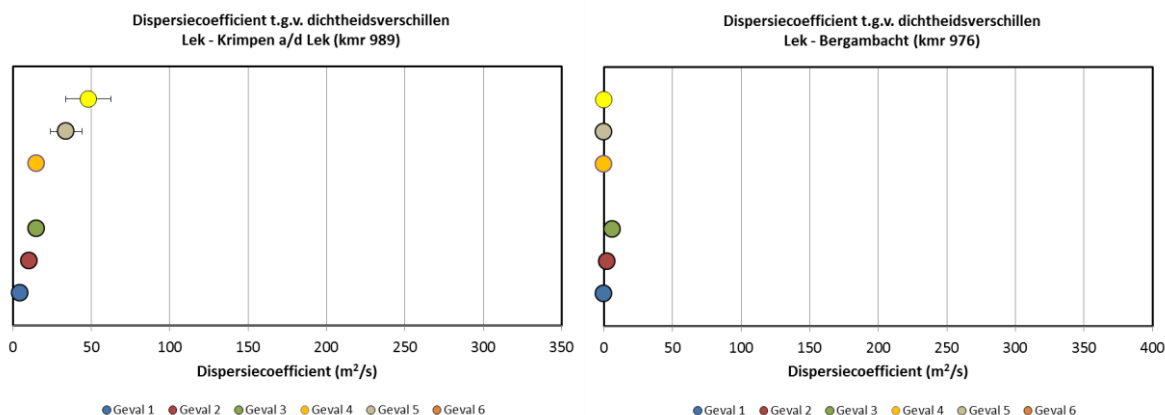
⁵ Getallen zijn afgerond op veelvoud van 5 m²/s.

richting van Hagestein, is dit $45 \pm 20 \text{ m}^2/\text{s}$ (Figuur 4.7). De dispersiecoëfficiënt langs dit traject is nagenoeg constant, omdat de getijsnelheid niet veel verandert.



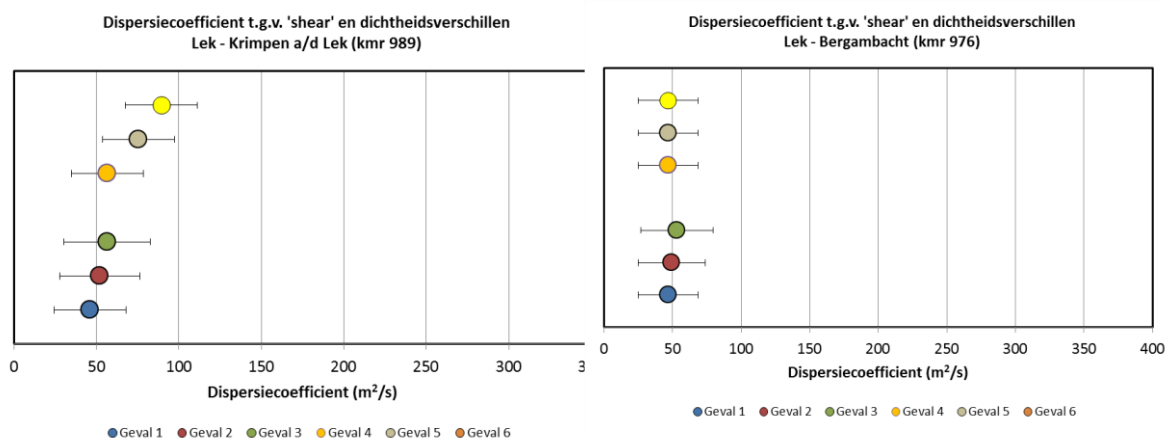
Figuur 4.7 Berekende dispersiecoëfficiënten t.g.v. 'shear' in de Lek Krimpen a/d Lek (links) en Bergambacht (rechts) voor de 6 onderscheiden gevallen.

De dispersiecoëfficiënt t.g.v. dichtheidsverschillen in de monding van de Lek is aanmerkelijk kleiner dan in de Hollandsche IJssel (Figuur 4.8). Dit is vooral het gevolg van de kleinere convergentielengte van het doorstroomoppervlak van de Hollandsche IJssel (11km) in vergelijking met de Lek (37 km). In de dispersievergelijking volgens Kuijper en Van Rijn is de dispersiecoëfficiënt namelijk omgekeerd evenredig met de convergentielengte, zie Bijlage B. Bij een lage afvoer van $1 \text{ m}^3/\text{s}$ en concentratieverhogingen van 50-500 mg/l varieert de dispersiecoëfficiënt tussen 5 en $20 \text{ m}^2/\text{s}$ als de onzekerheidsband mee wordt beschouwd. Bij een afvoer van $10 \text{ m}^3/\text{s}$ en concentratieverhogingen van 50-500 mg/l is deze variatie 10 tot 60 m^2 . Bij Bergambacht is de verzilting geringer en daardoor zijn de dispersiecoëfficiënten nog kleiner. Bij een lage afvoer van $1 \text{ m}^3/\text{s}$ en concentratieverhogingen van 50-500 mg/l is de dispersiecoëfficiënt kleiner dan $10 \text{ m}^2/\text{s}$; bij een afvoer van $10 \text{ m}^3/\text{s}$ is deze $0 \text{ m}^2/\text{s}$, omdat het zout bij deze afvoer Bergambacht niet bereikt.



Figuur 4.8 Berekende dispersiecoëfficiënten t.g.v. dichtheidsverschillen in de Lek Krimpen a/d Lek (links) en Bergambacht (rechts) voor de 6 onderscheiden gevallen.

Voor de totale dispersiecoëfficiënt volgt bij concentratieverhogingen van 50-500 mg/l in de monding van de Lek (Figuur 4.9):



Figuur 4.9 Berekende dispersiecoëfficiënten t.g.v. dichtheidsverschillen en 'shear' in de Lek Krimpen a/d Lek (links) en Bergambacht (rechts) voor de 6 onderscheiden gevallen.

Samenvatting

Samengevat zijn de resultaten voor de totale dispersiecoëfficiënt (zie ook Figuur 4.10)⁶

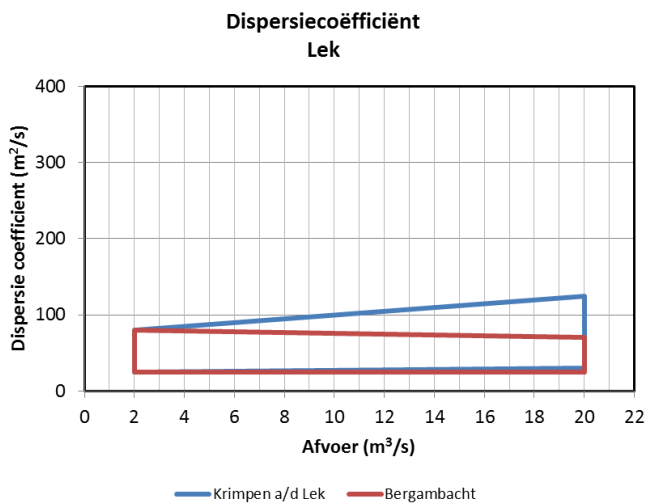
- Krimpen a/d Lek-Kinderdijk:
 - Afvoer 2 m³/s: 25 - 80 m²/s;
 - Afvoer 20 m³/s: 30 - 125 m²/s;
- Bergambacht:
 - Afvoer 2 m³/s: 25 - 80 m²/s;
 - Afvoer 20 m³/s: 25 - 70 m²/s;

In alle gevallen die hier worden onderzocht is bij Krimpen a/d Lek-Kinderdijk sprake van verzilting, en een toename van de afvoer leidt daardoor tot een toename van de dispersiecoëfficiënt, zoals direct volgt uit vgl. (B.10). In Bergambacht is bij een afvoer van 2 m³/s nog sprake van verzilting en is er dus een bijdrage aan de totale dispersiecoëfficiënt als gevolg van het dichtheidsverschil. Bij een afvoer van 20 m³/s reikt het zout niet tot Bergambacht en is er sprake van alleen dispersie door 'shear'. De bovengrens van de totale dispersiecoëfficiënt in Bergambacht is daardoor bij de hoge afvoer kleiner dan bij de lage afvoer.

⁶ Voor nog hogere afvoeren (zoals nu worden gehanteerd door de sluisbeheerder) kan de dispersiecoëfficiënt worden berekend met de formulering van Kuijper en Van Rijn. De dispersie t.g.v. 'shear' is niet afhankelijk van de afvoer aangezien de afvoer niet voorkomt in de gebruikte vergelijking van Goslinga en Verboom. Voor een verhoging van de chlorideconcentratie van 500 mg/l bij de monding van de Lek, kan de dispersie als gevolg van dichtheidsverschillen (ahv Kuijper en Van Rijn) worden geschat op:

- 11 m²/s voor een Lek-afvoer van 2 m³/s
- 34 m²/s voor een Lek-afvoer van 20 m³/s
- 53 m²/s voor een Lek-afvoer van 50 m³/s

Hierbij moet dan nog de dispersie t.g.v. 'shear' worden gevoegd. Als gebruik wordt gemaakt van de ingebouwde dispersieformuleringen in SOBEK zal het effect van de veranderende afvoer automatisch worden meegenomen.



Figuur 4.10 Domein berekende totale dispersiecoëfficiënt in de Lek bij Krimpen a/d Lek-Kinderdijk en bij Bergambacht. Chlorideconcentratieverhogingen: 50-500 mg/l t.p.v. kmr 18. Afvoeren: 1 en 10 m³/s.

5 Samenvatting en discussie

5.1 Waterbeweging t.p.v. het splitsingspunt Nieuwe Maas-Lek-Noord

- Het getij in de Lek vertoont een lopend karakter met een hoogwater dat in Hagestein 3 uur later optreedt dan in Krimpen a/d Lek. Een goede benadering ('proxy') van de debieten in de mond van de Lek tijdens lage afvoersituaties wordt verkregen door het kombergingsdebiet te bepalen op basis van het gemiddelde van de waterstanden in Krimpen a/d Lek en Hagestein-beneden.
- Het vloeddebiet in de Nieuwe Maas wordt gelijkmatig verdeeld over de Lek en de Noord. Tijdens eb dragen beide riviertakken ongeveer in gelijke maat bij aan het ebdebiet in de Nieuwe Maas.
- De getijdebieten in de monding van de Lek zijn bij lage afvoersituaties twee orden groter dan de afvoer van de Lek. De verziltingssituatie in de monding van de Lek zal dus nauwelijks beïnvloed worden door de Lekafvoer en het resultaat zijn van de verzilting in de Nieuwe Maas (als resultaat van de Bovenrijnafvoer en evt. een middenstandsverandering) en de getijdebieten.
- Ter plaatse van het splitsingspunt Nieuwe Maas-Lek-Noord kentert aan het eind van de vloedperiode de stroming in de Lek 1 uur eerder dan in de Nieuwe Maas. Zout dat aan het eind van de vloedperiode in de Nieuwe Maas de Lek bereikt wordt dan tegengehouden door water dat de Lek op dat moment uitstroomt. Dit is eenzelfde mechanisme als ter plaatse van het splitsingspunt Nieuwe Maas-Hollandsche IJssel maar het faseverschil is kleiner. De Lek is wat dit mechanisme betreft "kwetsbaarder" voor verzilting dan de Hollandsche IJssel. De verziltingsfrequentie van de mond van de Lek en de mate van verzilting zal echter kleiner zijn dan voor de Hollandsche IJssel, omdat de Lek 5 km verder van zee is verwijderd, aannemende dat zout zeewater niet via de Oude Maas en de Noord de Lek bereikt.
- Geconcludeerd wordt, dat de Lek als gevolg van de grotere lengte in mindere mate kan worden beschouwd als kombergende riviertak dan de Hollandsche IJssel.

5.2 Zoutverdeling in de Lek

5.2.1 Metingen november 2015

- Bij een Bovenrijnafvoer van 950 m³/s verzilt de monding van de Lek tot net voorbij Kinderdijk als er geen middenstandsveranderingen hebben plaatsgevonden.
- Middenstandsveranderingen leiden tot chlorideconcentraties van 1000 mg/l. De verzilting is van tijdelijke aard (4 dagen), omdat de middenstandsverlaging volgend op de verhoging het zoute water weer de Lek doet uitstromen.
- Een toename van de chlorideconcentraties treedt vooral op over de lengte van de vloedweg in de Lek (die zonder windopzet ca. 6 km bedraagt).

5.2.2 Metingen januari 2017

- De Bovenrijnafvoer waarbij verzilting van de Lek-monding begint op te treden is moeilijk vast te stellen door de vele middenstandsveranderingen. Een schatting op basis van de metingen is 1000 m³/s.
- De afstand waarover het zout, dat bij begin instroming aanwezig is in de monding van de Lek, kan verplaatsen door advectie ten gevolge van het getij in januari 2017 bedraagt 6 tot 7 km, d.w.z. net voorbij Lekkerkerk. Door de opgetreden middenstands-

opzet verdubbelt deze afstand tot 13 km. Dit houdt in dat verzilt water afkomstig van de Nieuwe Maas binnen een getijperiode juist Bergambacht kan bereiken. Bij andere getijcondities en middenstands-veranderingen kan deze afstand groter of kleiner zijn. De afvoer van de Lek heeft weinig invloed op initiële indringing van zout water, omdat deze bij lage afvoersituaties veel kleiner is dan de vloeddebieten in de monding, zie Par. 3.1. De afvoer van de Lek is wel bepalend voor het weer terugdringen van verzilting.

- De metingen in de Lek op 12 en 13 januari zijn uitgevoerd gedurende de getijfase dat verzilting van de Lek beperkt was. Hierbij is een verhoogde chlorideconcentratie gemeten tot een afstand van 5 tot 10 km vanaf de monding al is een exacte grens moeilijk vast te stellen. Dit valt binnen de grens tot waar zout kan komen als gevolg van alleen advectief transport door getij en middenstandsopzet.

5.3 Schatting dispersiecoëfficiënt voor de Lek

De dispersiecoëfficiënt is in deze studie verondersteld te zijn opgebouwd uit dispersie ten gevolge van 'shear' (snelheidsverschillen in het (voornamelijk) dwarsprofiel (laterale schering) tijdens getijstroming) en dispersie t.g.v. dichtheidsverschillen. De laatste is afhankelijk van de omgevingscondities (bv. afvoer) en de totale dispersiecoëfficiënt varieert dus met de grootte van de zoutindringing. In dit rapport is de totale dispersiecoëfficiënt halverwege de Hollandsche IJssel berekend met twee dispersieformuleringen, resp. voor 'shear' en dichtheidsverschillen, en vergeleken met metingen zoals uitgevoerd in november 2015. Na de gebleken goede overeenstemming tussen meting en berekening zijn de dispersievergelijkingen toegepast op de Lek, waarbij als invoer voor de formuleringen de geometrische en hydrodynamische kenmerken van de Lek zijn gebruikt.

De dispersiecoëfficiënt in de Lek is berekend voor zes verschillende gevallen: een afvoer van de Lek van 2 en 20 m³/s en een toename van de chlorideconcentratie in de mond van de Lek ter grootte van 50, 250 en 500 mg/l. Afhankelijk van de gekozen condities en met inachtneming van onzekerheden in de formuleringen varieert de dispersiecoëfficiënt bij Krimpen a/d Lek en Kinderdijk tussen 25 en 125 m²/s. Bij Bergambacht varieert de dispersiecoëfficiënt tussen 25 en 80 m²/s.

5.4 Implicaties voor modelstudies

De schatting voor de dispersiecoëfficiënt voor de Lek is via een "omweg" verkregen. Allereerst is voor de Hollandsche IJssel de totale dispersiecoëfficiënt, welke is berekend met dispersieformuleringen uit de literatuur, vergeleken met metingen. Zowel voor de berekende als de gemeten waarde zijn er onzekerheden als gevolg van keuzes voor de grootte van coëfficiënten in de formuleringen, schematisaties etc. Dit resulteert zowel voor de berekende als de gemeten waarde in een bereik, waarbinnen de dispersiecoëfficiënt kan liggen, en niet in een specifieke waarde. De uitgevoerde analyse in dit rapport laat zien, dat een goede overeenstemming wordt gevonden tussen berekening en meting voor wat betreft de dispersiecoëfficiënten incl. hun onzekerheden in de Hollandsche IJssel. De formulering voor 'shear' dispersie is hierbij gebaseerd op een in de literatuur beschikbare afleiding (Goslinga en Verboom, 1979), die rekening houdt met faseverschillen tussen de stroomsnelheden in het profiel. De formulering voor dispersie t.g.v. dichtheidsverschillen is meer empirisch maar er is wel uitgebreid vergeleken met metingen (Kuijper en Van Rijn, 2011). Om meer vertrouwen te krijgen in de gebruikte dispersieformuleringen zijn aanvullende metingen nodig.

De dispersie afschattingen op de Hollandsche IJssel zijn in dit rapport geverifieerd aan de hand van één set meetgegevens. Een bredere verificatie aan de hand van vergelijkbare meetcampagnes is gewenst (voor zowel voor de Hollandsche IJssel als de Lek). Voor de Lek zou idealiter een vergelijkbaar meetnet worden opgezet als is toegepast in november 2015 op

de Hollandsche IJssel. Er zou dan in het afwaartse deel van de Lek (ongeveer tot Bergambacht) een aantal vaste meetpunten moeten worden opgesteld, waar continue gedurende een verziltingsincident (of zelfs meerdere) wordt gemeten. Aan de hand van deze meetgegevens kan dan een zoutbalans worden opgesteld, welke als basis kan dienen voor het afschatten van de lokale dispersie-coëfficiënt. Wanneer metingen in de Lek worden uitgevoerd met vaste meetcellen zoals dat in de Hollandsche IJssel is gedaan, kan de uit de metingen afgeleide dispersiecoëfficiënt worden vergeleken met berekende waarden volgens de in dit rapport beschreven formuleringen. Daarnaast wordt het ook mogelijk om met behulp van OpenDA in SOBEK de dispersie coëfficiënt direct te kalibreren aan de hand van metingen. Een mogelijkheid zou kunnen zijn om deze methode alvast te toetsen aan de hand van de “Kier-metingen” nabij Lekkerkerk (zoals beschreven staan in paragraaf 3.4.2).

Een betrouwbare schatting van de dispersiecoëfficiënt in de Lek is nodig om de zoutverdeling *in* de Lek te kunnen beschrijven. Dit is een noodzakelijke maar niet een voldoende voorwaarde. De zoutverdeling in de Lek is immers ook afhankelijk van de chlorideconcentraties in de monding van de Lek en deze zijn weer het gevolg van de processen in het gebied van de Rijn-Maasmonding tussen de zee en de Lek (de Waterweg en de Nieuwe Maas). Als de zoutverdeling langs dit traject niet goed door een model wordt beschreven zal dit consequenties hebben voor de reproductiekwaliteit van de zoutverdeling in de Lek, ook als de dispersiecoëfficiënt in de Lek goed bekend is. De zoutverdeling *in de mond* van de Lek wordt hoofdzakelijk bepaald door de Bovenrijnafvoer en middenstandsveranderingen ten gevolge van een storm. De afvoer van de Lek zelf is van ondergeschikt belang voor wat betreft verzilting van de mond, omdat deze in tijden van lage afvoersituaties te verwaarlozen is ten opzichte van de getijddebieten in de mond van de Lek en de Bovenrijnafvoer.

In een eendimensionaal model als Sobek worden processen, die niet expliciet worden gemodelleerd en die in werkelijkheid resulteren in transporten van opgeloste stof, beschreven met een dispersiecoëfficiënt. Omdat deze processen afhankelijk zijn van de geometrie (bv. waterdiepte, breedte) en de omgevingscondities (bv. getij, rivierafvoer) zal de dispersiecoëfficiënt veranderen als ingrepen worden gedaan (verdieping, afvoerverandering) of als de omgevingscondities wijzigen (afvoer, grootte van de verzilting). Dit betekent dat een dispersieformulering nodig is om effecten van veranderingen in het watersysteem op de zoutverdeling te kunnen aangeven en het succes van de voorspellingen van ingrepen wordt in belangrijke mate bepaald door de betrouwbaarheid van de gebruikte dispersieformulering. De complexiteit van de driedimensionale processen die de zoutindringing in een estuarium bepalen is groot en nog niet volledig begrepen zodat er vooralsnog blijvende onzekerheid zal zijn m.b.t. het gebruik van dispersieformuleringen.

Recent is nagegaan hoe verschillende dispersieformuleringen, zoals beschikbaar in de literatuur, presteren (Daniels, 2016). Geconcludeerd is, dat er vragen zijn m.b.t. de betrouwbaarheid van de Thatcher-Harleman formulering, zoals momenteel beschikbaar in het Sobek-RE model voor de Rijn-Maasmonding (Sobek-NDB). Het betreft in genoemd onderzoek het deel van de formulering dat betrekking heeft op de dispersie ten gevolge van dichtheidsverschillen (de zogenaamde f_4 -term). In voorliggend rapport wordt gevonden dat de dispersie ten gevolge van ‘shear’ (de f_3 -term in Thatcher-Harleman), ook verbeterd kan worden. In het zeewaartse deel van het estuarium is deze term klein ten opzichte van de dispersie die wordt veroorzaakt door dichtheidsverschillen. De laatste wordt echter kleiner gaande in landwaartse richting en nabij de punt van de zouttong kan de dispersie t.g.v. ‘shear’ wel een rol van betekenis spelen.

Voor simulaties die met de huidige versie van Sobek-NDB voor de Rijn-Maasmonding zullen worden uitgevoerd (zoals het instellen van een surplusdebiet in de Hollandsche IJssel en het vergroten van de afvoer van de Lek), betekent het voorgaande dat het raadzaam is eerst na te gaan of de berekende dispersiecoëfficiënten volgens Thatcher-Harleman liggen in het bereik zoals in dit rapport is afgeleid voor de Hollandsche IJssel en de Lek. Hiervoor kan de referentiesimulatie (T0) worden gebruikt van de uit te voeren simulaties. Er zal dan rekening gehouden moeten worden met eventuele verschillen in de omgevingscondities tussen (i) de situaties die in dit rapport zijn geanalyseerd (de mate van verzilting in de mond van de Hollandsche IJssel en de Lek, de netto lozingen/afvoeren in beide riviertakken) en (ii) de te simuleren scenario's. Vervolgens kan het effect van een ingreep bepaald worden met een simulatie waarmee in het model de ingreep wordt aangebracht (T1) en tegelijkertijd de dispersiecoëfficiënt wordt aangepast. Deze verandering van de dispersiecoëfficiënt in de nieuwe situatie gebeurt idealiter met een dispersieformulering als onderdeel van de modelsimulatie. Bij gebruik van SOBEK-NDB verdient het aanbeveling de verschillen tussen de dispersiecoëfficiënten voor en na de ingreep, zoals berekend met Thatcher-Harleman, te vergelijken met de verschillen volgens de analytische methodes in dit rapport. Bij deze vergelijking moet er rekening mee worden gehouden dat het analytische model de zoutverdeling ten tijde van hoogwaterstroomkentering berekent (de zoutindringing is dan relatief groot), terwijl in Sobek uitgegaan wordt van een getijgemiddelde dispersiecoëfficiënt. Verwacht wordt, dat de dispersiecoëfficiënten volgens het analytische model daardoor groter zullen zijn dan die in Sobek.

De voorgaande discussie laat zien, dat er nog diverse vragen zijn over de grootte van de dispersiecoëfficiënt en de betrouwbaarheid ervan. Het is belangrijk om een ingreep te modelleren met een dispersieformulering, en niet met een constante waarde voor de dispersiecoëfficiënt, om het relatieve effect op de zoutverdeling (T1 t.o.v. T0) te kunnen aangeven. Met een betrouwbare dispersieformulering wordt tegelijkertijd de ruimtelijke variatie beschreven.

6 Referenties

Daniëls, J.A., 2016. Dispersion and dynamically one-dimensional modeling of salt transport in estuaries. Thesis report. Delft University of Technology, National University of Singapore and Deltares.

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.

Goslinga, J., G.K. Verboom, 1979. Mathematical techniques to determine longitudinal dispersion coefficients and concentration distributions. A review of the Taylor and the Aris method. Rapport R1092. Waterloopkundig Laboratorium.

Holley, E.R., D.R.F. Harleman, 1965. Dispersion of pollutants in estuary type flows. MIT, Department of Civil Engineering, Hydrodynamics Laboratory. Rep. No. 74.

Hydrologic, 2013. Waterverdelings- en verziltingsvraagstukken in het hoofdwatersysteem in West- en Midden Nederland. Eindrapport. P475.

HydroLogic, 2015. Verzilting door verdieping Nieuwe Waterweg en Botlek. Deelonderzoek MER. Eindrapport P716.

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

Kuijper, Kees, 2016. Analyse van de zoutmetingen in november 2015 langs de Hollandsche IJssel. Afleiding dispersiecoëfficiënt. Rapport 1230077-001. Deltares.

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.

Savenije, H. H.G., 2005. Salinity and Tides in Alluvial Estuaries. Elsevier, Amsterdam, 194 pp.

Taylor III, Robert Bruce, 1974. Dispersive mass transport in oscillatory and unidirectional flows. PhD. University of Florida.

Van den Boogaard en Mens, 2017. Voorlopige resultaten verziltingsrelatie Kinderdijk.

Van der Vat, Marnix, 2016. Naderonderzoek verzilting Lek. Memo. 1230077-004-ZWS-0002. Deltares.

Van Rijn, L.C., 2011. Analytical and numerical analysis of tides and salinities in estuaries; Part I: Tidal wave propagation in convergent estuaries.. Ocean Dynamics.

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

A 'Shear dispersion' onder getijcondities

A.1 Stationaire stroming (rivier)

'Shear dispersion' is het gevolg van snelheidsverschillen in het dwarsprofiel en menging, zodat voor de dispersiecoëfficiënt kan worden geschreven:

$$K \sim \overline{u'^2} T_c \quad (\text{A.1})$$

met K de dispersiecoëfficiënt (m^2/s), u' het snelheidsverschil met de profielgemiddelde snelheid (m/s) en T_c de tijd die nodig is om over een zekere lengteschaal L volledig te mengen (s). Voor de mengtijd geldt:

$$T_c = \frac{L^2}{\varepsilon} \quad (\text{A.2})$$

waarin ε de turbulente mengingscoëfficiënt ('eddy diffusivity') (m^2/s). Uit vgl. (A.1) en (A.2) volgt:

$$K \sim \overline{u'^2} \frac{L^2}{\varepsilon} \quad (\text{A.3})$$

In een stationaire 'shear flow' zonder menging (T_c is groot) zal een deeltje aan het oppervlak steeds verder verwijderd raken van een deeltje bij de bodem; de dispersie is dan groot. Indien de menging zeer groot is (T_c is klein), zullen beide deeltjes de gehele waterkolom bemonsteren en voortbewegen met de dieptegemiddelde snelheid \bar{u} ; de dispersiecoëfficiënt is dan klein en in de limiet zelfs nul. In de praktijk blijkt de snelheidsvariatie in breedterichting bepalend te zijn voor de grootte van de dispersiecoëfficiënt en niet de snelheidsvariatie in verticale richting (Fischer, 1979).

Experimenteel is gevonden (Fischer, 1979):

$$\overline{u'^2} \approx 0.2 \bar{u}^2 \quad (\text{A.4})$$

zodat voor vgl. (A.3) volgt:

$$K \sim \bar{u}^2 \frac{L^2}{\varepsilon} \quad (\text{A.5})$$

Voor de turbulente mengingscoëfficiënt ε in verticale of laterale richting geldt:

$$\varepsilon \sim hu_* \quad (\text{A.6})$$

met h de waterdiepte (m) en u_* de schuifspanningssnelheid (m/s).

Substitutie van vgl. (A.6) in (A.5) en gebruik van de rivierbreedte W als lengteschaal geeft:

$$K \sim \bar{u}^2 \frac{W^2}{hu_*} \quad (\text{A.7})$$

Vgl. (A.7) kan herschreven worden als:

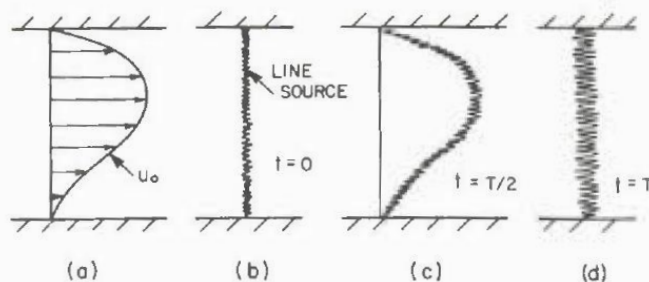
$$\frac{K}{hu_*} \sim \left(\frac{\bar{u}}{u_*}\right)^2 \left(\frac{W}{h}\right)^2 \quad (\text{A.8})$$

In de literatuur worden voor stationaire (rivier)stroming verschillende voorspellers voor K beschreven, die zijn gebaseerd op de algemene vorm van vgl. (A.8), soms met andere machten en extra termen. Een overzicht wordt gegeven in Bijlage C in (Kuijper, 2016).

A.2 Oscillerende stroming (getij)

In het geval van een oscillerende stroming (bv. getijstroming) blijkt de verhouding tussen de oscillatieperiode T en de mengtijd T_c een belangrijke rol te spelen. Als de verhouding $T' = \frac{T}{T_c}$

groot is, is er op elk tijdstip tijdens de getijperiode voldoende tijd beschikbaar om het concentratieprofiel te laten aanpassen aan de stromingscondities en dispersie treedt op alsof er sprake is van opeenvolgende momenten met stationaire stroming tijdens de getijcyclus. De gemiddelde stroomsnelheid tijdens de getijperiode is dan bepalend voor de grootte van de dispersiecoëfficiënt⁷. Voor een korte oscillatieperiode (kleine T) is er onvoldoende tijd beschikbaar voor aanpassing van het concentratieprofiel en tracerdeeltjes keren weer terug naar hun oorspronkelijke positie; in dat geval is de dispersiecoëfficiënt klein en deze kan theoretisch zelfs tot nul naderen, zie Figuur A.1.



The shear effect in oscillating flow for the case $T \ll T_c$. (a) A hypothetical velocity distribution $u = u_0 \sin(2\pi t/T)$. (b) A line source introduced at $t = 0$. (c) The distribution at $t = T/2$. (d) The distribution at $t = T$.

Figuur A.1 Shear dispersion in een oscillerende stroming (Fischer, 1979).

A.2.1 Fischer et al. (1979)

In Par. B.1 in (Kuijper, 2016) is dispersie onder homogene getijcondities beschreven volgens de theorie van Fischer et al (1979). Hierbij wordt uitgegaan van een lineair snelheidsprofiel, dat sinusvormig in de tijd varieert. Een beperking van deze methode is, dat de snelheden in het profiel in fase zijn: zij zijn tegelijk maximaal en ook tegelijk nul. In werkelijkheid zal

⁷ Hier wordt bedoeld het gemiddelde van de absolute waarde van de stroomsnelheid.

kentering van de stroming nabij het wateroppervlak volgen op kentering bij de bodem. Deze faseverschillen blijken een substantiële invloed te hebben op de dispersie (Par. A.2.2).

M.b.t. de toepassing van de vergelijking van Fischer et al. in (Kuijper, 2016) kan nog het volgende worden opgemerkt. Het effect van de getijperiode op de dispersiecoëfficiënt wordt beschreven met:

$$K = f(T')K_0 \quad (\text{A.12})$$

K_0 is hier de dispersiecoëfficiënt voor condities waarbij de getijperiode T zeer groot is. In dat geval verandert de stroming langzaam ('quasi-stationair') en op elk tijdstip t tijdens de getijperiode is er voldoende tijd voor de concentratieverdeling om zich aan te passen aan de momentane stromingscondities. De getijgemiddelde dispersiecoëfficiënt is dan in het door Fischer et al. beschouwde geval gelijk aan het gemiddelde van de waarden op de opeenvolgende tijdstippen tijdens de getijperiode. Dit blijkt de helft te zijn van de dispersiecoëfficiënt die geldt voor de stationaire situatie met eenzelfde snelheidsverschil ('schering') tussen oppervlak en bodem als tijdens maximale getijstroming (zie Fischer et al., 1979).

Voor het geval met laminaire stroming en een sinusvormig variërend lineair snelheidsprofiel leiden Fischer et al. af:

$$K_0 = \frac{U_{\max}^2 h^2}{240D} \quad (\text{A.13})$$

Als de moleculaire diffusiecoëfficiënt D wordt vervangen door de tijds- en profielgemiddelde turbulente diffusiecoëfficiënt in dwarsrichting $\bar{\varepsilon}_y$ en de waterdiepte h door $0,7W$, d.i. de lengteschaal voor volledige menging tussen $0,5W$ (symmetrisch profiel) en W (asymmetrisch profiel), volgt:

$$K_0 = \frac{U_{\max}^2 (0.7W)^2}{240\bar{\varepsilon}_y} \quad (\text{A.14})$$

Voor een lineair snelheidsprofiel geldt dat de gemiddelde snelheid \bar{u} gelijk is aan $U_{\max}/2$, zodat met $\bar{\varepsilon}_y = 0.6hu_*$ ten slotte wordt gevonden:

$$K_0 = \frac{(2\bar{u})^2 (0.7W)^2}{240 * 0.6hu_*} = 0.014 \frac{\bar{u}^2 W^2}{hu_*} \quad (\text{A.15})$$

Vgl. (A.15) komt overeen met vgl. (B.16) in (Kuijper, 2016), waar de constante 0.011 bedraagt. Het verschil komt door de keuze van $l = 0.07$, zoals voorgesteld door Fischer et al. en overgenomen in (Kuijper, 2016).

A.2.2 Goslinga en Verboom (1979)

In (Goslinga en Verboom, 1979) worden de hydrodynamische vergelijkingen opgelost, waardoor de faseverschillen tussen de snelheden meegenomen worden bij de bepaling van de dispersiecoëfficiënt. Eenzelfde methode is gevolgd door Taylor III (1974). In (Winterwerp, 1980) worden beide methoden besproken. Omdat de methode volgens Goslinga en Verboom vollediger is dan die van Fischer et al. wordt deze hieronder nader verder toegelicht.

Er wordt uitgegaan van een turbulente stroming tussen twee evenwijdige platen, welke is geforceerd door een periodiek variërende drukgradiënt. De stroming kan worden opgevat als (Winterwerp, 1980) “de stroming in een over de verticaal goed gemengd lateraal systeem, waarin de laterale snelheidsverdeling alleen door wandinvloeden wordt bepaald”. Dit betekent, dat de tijdschaal voor menging in de afgeleide vergelijking gebaseerd is op de breedte van de riviertak. Het resultaat voor de getijgemiddelde dispersiecoëfficiënt K is:

$$K_y = \frac{U_{\max}^2 T}{32\pi} \left[\frac{2\delta (\cos(2\delta) - \cosh(2\delta)) + \sinh(2\delta) - \sin(2\delta)}{2\delta (\cosh(\delta) - \cos(\delta))^2} \right] + \frac{U_{\max}^2 T}{32\pi} \left[\frac{2(\cos^2(\delta) + \sinh^2(\delta))(\sinh^2(\delta) \cosh^2(\delta) - \sin^2(\delta) \cos^2(\delta))}{(\cosh(\delta) - \cos(\delta))^2 (\sinh^2(\delta) \cosh^2(\delta) + \sin^2(\delta) \cos^2(\delta))} \right] \quad (\text{A.16a})^8$$

met:

$$\delta = \sqrt{\frac{\pi}{T'}} \quad (\text{A.16b})$$

$$T' = \frac{T}{T_y} \quad (\text{A.16c})$$

$$T_y = \frac{(W/2)^2}{\langle \varepsilon_y \rangle} \quad (\text{A.16d})$$

waarin K_y de dispersiecoëfficiënt ten gevolge van laterale snelheidsgradiënten, T de getijperiode (s), T_y de mengtijd in laterale richting (s), W de rivierbreedte (m), ε_y de laterale diffusiecoëfficiënt (m^2/s) en U_{\max} de maximale stroomsnelheid tijdens de getijperiode (m/s). Voor het beschouwde geval treedt deze maximale snelheid op halverwege tussen de platen.

De dispersiecoëfficiënt K_z ten gevolge van verticale snelheidsgradiënten kan eveneens worden bepaald met vgl. (A.16) maar dan met gebruik van de tijdschaal voor verticale menging:

$$T_z = \frac{h^2}{\langle \varepsilon_z \rangle} \quad (\text{A.16e})$$

waarin T_z de mengtijd in verticale richting (s), h de waterdiepte (m) en ε_z de verticale diffusiecoëfficiënt (m^2/s)

Voor de laterale en verticale diffusiecoëfficiënten geldt:

⁸ In Winterwerp (1980) wordt in de noemer van de 2e term abusievelijk geschreven $(\cos(\delta) - \cos(\delta))$ i.p.v. $(\cosh(\delta) - \cos(\delta))$

$$\langle \varepsilon_y \rangle = c_y h \langle u_* \rangle$$

en

$$\langle \varepsilon_z \rangle = c_z h \langle u_* \rangle$$

met

$$\frac{|\bar{u}|}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (\text{A.17b})$$

waarin \bar{u} de verticaal-gemiddelde snelheid (m/s), u_* de schuifspanningssnelheid (m/s), C de Chézy-ruwheid ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$) en g de gravitatieversnelling (m/s^2) en $\langle \dots \rangle$ betrekking heeft op middeling over de getijperiode.

Voor de constante c_y kan worden aangehouden 0,3 à 0,9 (Fischer et al., 1979) en voor de constante c_z 0,05 à 0,1 (Fischer et al., 1979, en Winterwerp, 1980).

Opgemerkt wordt dat in bovengenoemde vergelijkingen gebruik wordt gemaakt van zowel de getijgemiddelde waarde van de (absolute) profielgemiddelde snelheid $\langle |\bar{u}| \rangle$ als van de maximale snelheid U_{max} in het profiel tijdens de getijperiode.

Als de getijperiode T heel groot is, kan worden afgeleid (Goslinga en Verboom, 1979):

$$K_{y,0} = 4.4 \cdot 10^{-3} U_{max}^2 T_y \quad (\text{A.18})$$

Als vervolgens geschreven wordt:

$$K_y = f(T') K_{y,0} \quad (\text{A.19})$$

volgt voor $f(T')$:

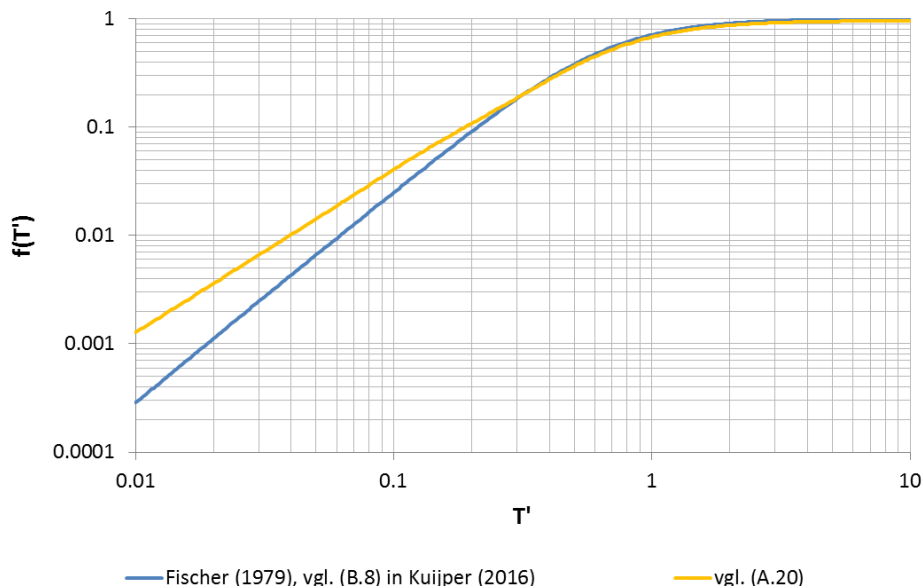
$$f(T') = \frac{K_y}{K_{y,0}} = \frac{T'}{32\pi \cdot 4.4 \cdot 10^{-3}} \left[\frac{2\delta (\cos(2\delta) - \cosh(2\delta)) + \sinh(2\delta) - \sin(2\delta)}{2\delta (\cosh(\delta) - \cos(\delta))^2} \right] +$$

$$+ \frac{T'}{32\pi \cdot 4.4 \cdot 10^{-3}} \left[\frac{2(\cos^2(\delta) + \sinh^2(\delta))(\sinh^2(\delta) \cosh^2(\delta) - \sin^2(\delta) \cos^2(\delta))}{(\cosh(\delta) - \cos(\delta))^2 (\sinh^2(\delta) \cosh^2(\delta) + \sin^2(\delta) \cos^2(\delta))} \right] \quad (\text{A.20})$$

Het effect van de getijperiode T op K_y wordt dus alleen weergegeven met de functie $f(T')$. Zoals opgemerkt door Winterwerp (1980) zal in werkelijkheid de laterale snelheidsverdeling vooral bepaald worden door de over de breedte variërende bodem. Vgl. (A.20) moet dus als schematisatie worden gezien van de werkelijkheid.

In Figuur A.2 wordt de methode vergeleken met die van Fischer et al. (1979). De verschillen zijn het gevolg van de faseverschillen van de snelheid in laterale richting, die door Goslinga en Verboom wel worden meegenomen. Deze laatste methode verdient dan ook de voorkeur boven de methode volgens Fischer et al. Bij een gegeven mengtijd T_c en U_{max} ($K_{y,0}$ blijft dan

onveranderd, zie vgl. (A.18)) leidt de methode volgens Goslinga en Verboom voor $T' < 0.3$ tot grotere waarden voor de dispersiecoëfficiënt K_y dan de methode volgens Fischer et al. Voor $T' > 0,3$ stemmen beide benaderingen overeen. De getijperiode is dan zo groot, dat faseverschillen geen rol meer spelen.

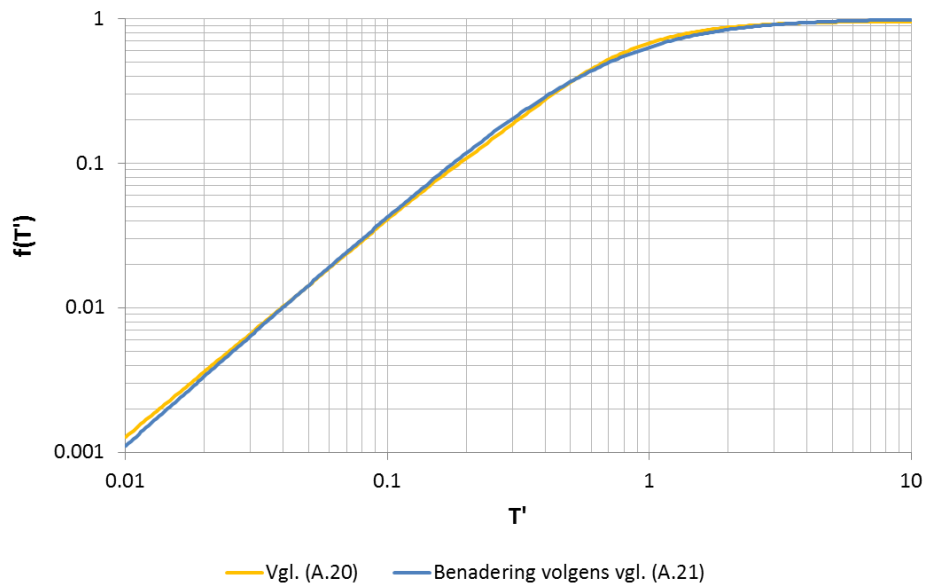


Figuur A.2 Effect van de oscillatieperiode T via $T' = T/T_y$ bij een gegeven T_y op de dispersiecoëfficiënt K_y . Blauwe lijn: Fischer et al. (1979). Oranje lijn: Goslinga en Verboom (1979). De verschillen tussen beide methoden zijn het gevolg van faseverschillen voor de laterale snelheidsverdeling, welke door Goslinga en Verboom wel worden meegenomen en door Fischer et al. niet.

De dispersievergelijking volgens vgl. (A.16a) verschilt van de (eenvoudiger) formulering volgens Holley en Harleman, welke als f3-term is opgenomen in de Thather-Harleman vergelijking in Sobek. Winterwerp (1980) merkt op, dat de vergelijking van Holley en Harleman “omdat zij door de keuze van hun stromingsparameters de wezenlijke karakteristieke eigenschappen van dispersie in oscillerende stroming negeren”. Ook is hun onderzoek verricht voor gevallen dat de laterale en verticale mengtijd (T_y en T_z) kleiner is dan de getijperiode T , zodat slechts een deel van de in de praktijk voorkomende gevallen is beschouwd. Daarnaast zijn stromingssituaties beschouwd waarbij de stroming niet kentert en altijd dezelfde richting heeft. Ten slotte wordt in Winterwerp (1980) opgemerkt, dat het onduidelijk is waarom in de praktijk de dispersiecoëfficiënt als tijdsafhankelijk wordt gebruikt in plaats van als getijgemiddeld.

Voor praktische toepassingen kan vgl. (A.20) worden benaderd door (zie Figuur A.3):

$$f(T') = \frac{(T')^{1.6}}{(T')^{1.6} + 0.57} \tag{A.21}.$$



Figuur A.3 Exacte oplossing voor $f(T')$ volgens vgl. (A.20) en benadering volgens vgl. (A.21).

Het effect van de mengtijd T_y op K_y verloopt zowel via $f(T')$ als $K_{y,0}$. Vgl. (A.19) kan met vgl. (A.18) worden geschreven als:

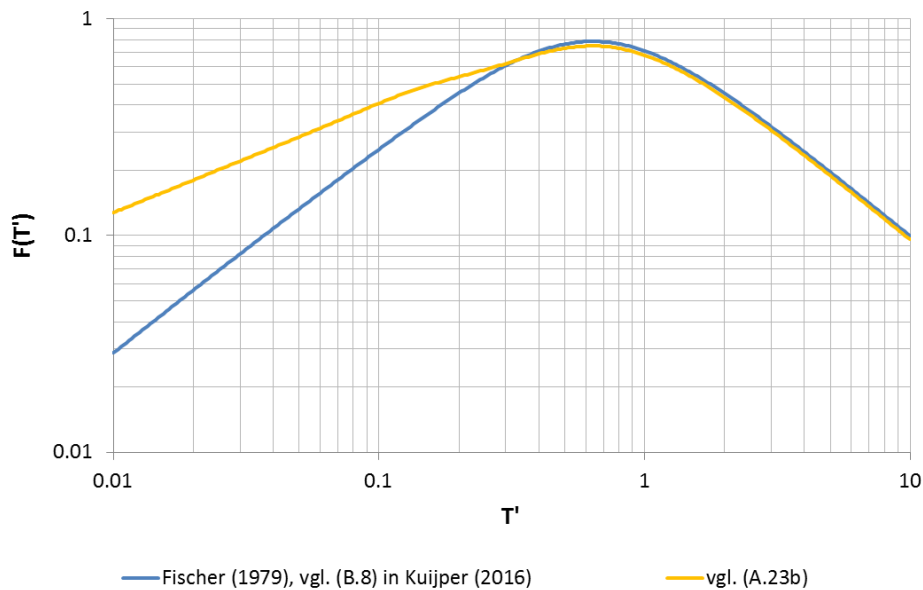
$$\begin{aligned}
 K_y &= f(T')K_{y,0} = 4.4 \cdot 10^{-3} U_{\max}^2 T_y f(T') = 4.4 \cdot 10^{-3} U_{\max}^2 T \frac{T_y}{T} f(T') \\
 &= 4.4 \cdot 10^{-3} U_{\max}^2 T \frac{1}{T'} f(T')
 \end{aligned} \tag{A.22}$$

$$K_y = 4.4 \cdot 10^{-3} U_{\max}^2 T F(T') \tag{A.23a}$$

met

$$F(T') = \frac{1}{T'} f(T') \tag{A.23b}$$

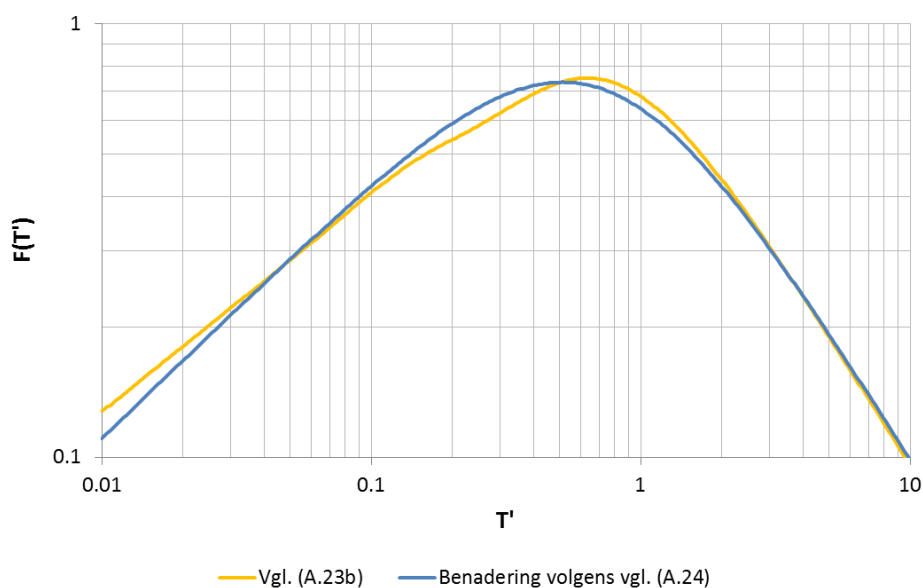
Als de rivierbreedte verandert en U_{\max} constant blijft, verandert T' en daarmee $F(T')$. De functie $F(T')$ is weergegeven in Figuur A.4 en vergeleken met het resultaat van Fischer et al. (1979).



Figuur A.4 Effect van de mengperiode T_y via $T' = T/T_y$ bij een gegeven getijperiode T op de dispersiecoëfficiënt K_y . Blauwe lijn: Fischer et al. (1979). Oranje lijn: Goslinga en Verboom (1979). De verschillen tussen beide methoden zijn het gevolg van faseverschillen voor de laterale snelheidsverdeling, welke door Goslinga en Verboom wel worden meegenomen en door Fischer et al. niet.

De functie $F(T')$ kan dan worden benaderd met, zie Figuur A.5:

$$F(T') = \frac{(T')^{0.6}}{(T')^{1.6} + 0.57} \quad (\text{A.24}).$$



Figuur A.5 Exacte oplossing voor $f(T')$ volgens vgl. (A.23b) en benadering volgens vgl. (A.24).

Figuur A.5 laat zien, dat de dispersiecoëfficiënt maximaal is voor $T' \approx 1$. Bij een gegeven getijperiode neemt de dispersiecoëfficiënt af als de breedte groter of kleiner wordt. De maximale dispersiecoëfficiënt K_y^{\max} onder getijcondities wordt met vgl. (A.23a) en $F(T') \approx 1$:

$$K_y^{\max} = 4.4 \cdot 10^{-3} U_{\max}^2 T \quad (\text{A.25})$$

Voor $U_{\max} = 0,5$ à 1 m/s volgt voor de *maximale* dispersiecoëfficiënt t.g.v. 'shear' onder getijcondities 50 à 200 m²/s. In een diep estuarium als de Waterweg is de dispersiecoëfficiënt t.g.v. dichtheidsverschillen in de monding veel groter en speelt 'shear dispersion' een ondergeschikte rol. Bij de punt van de zouttong is het dichtheidsverschil tussen het zoute water ter plaatse en het zoete rivierwater klein en dus ook de dispersie t.g.v. dichtheidsverschillen. 'Shear dispersion' speelt dan in relatieve zin een grotere rol en is dan mogelijk niet meer te verwaarlozen.

B Dispersie t.g.v. dichtheidsverschillen

Het model van Kuijper en Van Rijn (2011), zoals dat in Hoofdstuk 4 wordt gebruikt om de dispersiecoëfficiënt ten gevolge van longitudinale dichtheidsverschillen te bepalen, is gebaseerd op het oorspronkelijke model van Savenije (2005). Daarom wordt eerst beknopt het model van Savenije beschreven, vervolgens worden de aanpassingen in het model van Kuijper en Van Rijn aangegeven. Zoals uit het vervolg zal blijken is het grootste verschil tussen beide modellen de interpretatie die Kuijper en Van Rijn geven aan de dispersiecoëfficiënt in de mond, zoals afgeleid door Savenije op basis van metingen in een groot aantal estuaria.

Zowel Savenije als Kuijper en Van Rijn gaan uit van de transportvergelijking voor zout op het moment van hoogwaterstroomkentering (HWK):

$$Q_r S(x) = -A(x)D(x) \frac{dS(x)}{dx} \quad (\text{B.1})$$

Hierin is Q_r de rivierafvoer positief in zeewaartse richting (m^3/s), S de saliniteit (PSU), A het doorstroomoppervlak (m^2), D de dispersiecoëfficiënt (m^2/s) en x de lengtecoördinaat langs het estuarium positief in opwaartse richting (m). De onbekende variabelen in vgl. (B.1) zijn S en D en om deze te kunnen berekenen is een tweede vergelijking nodig. Savenije gebruikt de zogenaamde van der Burgh vergelijking, zoals afgeleid uit metingen in de Nieuwe Waterweg door van der Burgh:

$$\frac{dD(x)}{dx} = -Ku_r(x) = -K \frac{Q_r}{A(x)} \quad (\text{B.2})$$

met K de van der Burgh constante (-) en u_r de rivierafvoersnelheid ($= Q_r/A(x)$). Hierbij veronderstelt Savenije, dat A kan variëren langs het estuarium. Hij gebruikt hiervoor de volgende exponentiele relatie, eveneens gebaseerd op waarnemingen:

$$A(x) = A_0 e^{(-x/L_a)} \quad (\text{B.3})$$

waarin L_a de convergentielengte voor het doorstroomoppervlak (m).

Als oplossing voor $S(x)$ van de vergelijkingen (B.1) en (B.2) wordt gevonden:

$$\frac{S(x)}{S(0)} = \left[1 - K \frac{|Q_r| L_a}{A(0)D(0)} \left(e^{\frac{x}{L_a}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{K}} \quad (\text{B.4})$$

Uit vgl. (B.1) en (B.2) kan verder worden afgeleid dat de relatie tussen $S(x)$ en $D(x)$ wordt gegeven door:

$$\frac{D(x)}{D(0)} = \left(\frac{S(x)}{S(0)} \right)^K \quad (\text{B.5})$$

De zoutverdeling kan worden berekend als de dispersiecoëfficiënt in de monding (D_0) bekend is. Ook kan met vgl. (B.4) D_0 worden berekend door kalibratie van de vergelijking met metingen. Savenije (2005) heeft op deze wijze voor een groot aantal estuaria D_0 bepaald en vervolgens door middel van regressie de volgende voorspellende vergelijking voor D_0 afgeleid:

$$D(0) = 1400 N_R^{0.5}(0) \frac{L_e(0)}{L_a} \hat{u}(0) h(0) \quad (\text{B.6})$$

Hierin is $N_R(0)$ het estuariene Richardson getal (-), $L_e(0)$ de vloedweg (m), $\hat{u}(0)$ amplitude van de getijsnelheid (m/s) en $h(0)$ de waterdiepte (m).

Het estuariene Richardson getal is een maat voor de gelaagdheid en is gedefinieerd als:

$$N_R(0) = \frac{\pi(\rho(0) - \rho_r) g Q_r}{\rho_r B(0) \hat{u}^3(0)} \quad (\text{B.7})$$

met ρ_0 de dichtheid van het water in de monding (kg/m^3), ρ_r de dichtheid van het rivierwater (kg/m^3) en B_0 de breedte van het estuarium in de monding (m). Vgl. (B.6) kan niet worden gebruikt voor prismatische kanalen, omdat de convergentielengte L_a dan oneindig groot is en voor de dispersiecoëfficiënt zou volgen $D(0) = 0 \text{ m}^2/\text{s}$.

Kuijper en Van Rijn (2011) stellen dat als vgl. (B.6) geldt in de mond, deze ook moet gelden in elke locatie x , immers men is vrij in de keuze van de benedenrand van het estuarium. Omdat als benadering geldt:

$$\rho(x) - \rho_r \approx c_1 S(x) \quad (\text{B.8})$$

waarin $c_1 = 0.78$.

volgt voor elke locatie x :

$$N_R(x) = \frac{c_1 \pi g Q_r}{\rho_r B(x) \hat{u}^3(x)} S(x) \quad (\text{B.9})$$

Substitutie van vgl. (B.8) in vgl. (B.5), waarbij '0' is vervangen door 'x', geeft:

$$D(x) = 1400 \left(\frac{c_1 \pi g Q_r}{\rho_r B(x) \hat{u}^3(x)} \right)^{0.5} (S(x))^{0.5} \frac{L_e(x)}{L_a} \hat{u}(x) h(x) \quad (\text{B.10})$$

Als in vgl. (B.9) voor $B(x)$, $h(x)$, en $\hat{u}(x)$ exponentiële relaties worden gebruikt:

$$B(x) = B_0 e^{(-x/L_b)} \quad (\text{B.11})$$

$$h_x = h_0^{\gamma x}$$

$$\gamma = \frac{1}{L_b} - \frac{1}{L_a} \quad (\text{B.12})$$

$$\hat{u}_x = \hat{u}_0 e^{\delta_u x} \quad (\text{B.13})$$

en omdat voor een sinusvormig getij geldt:

$$L_e(x) = \frac{T\hat{u}(x)}{\pi} \quad (\text{B.14})$$

wordt met vgl. (B.10) een tweede relatie tussen $S(x)$ en $D(x)$ gevonden naast de transportvergelijking (B.1).

Kuijper en Van Rijn (2011) schrijven vgl. (B.10) in een iets andere vorm, waarbij ook de ruwheidsterm $\frac{C}{\sqrt{g}}$ is toegevoegd (waardoor de constante 1400 verandert) en maken ook onderscheid tussen convergente en prismatische estuaria. Voor details wordt verwezen naar de desbetreffende publicatie.

Een veralgemenisering van vgl. (B.10) is als volgt. De empirische vergelijking voor de dispersiecoëfficiënt wordt geschreven met een macht van K voor het estuariene Richardson getal N_R i.p.v. een macht van 0.5:

$$D(x) = 1400 N_R^K(x) \frac{L_e(x)}{L_a} \hat{u}(x) h(x) \quad (\text{B.15})$$

Voor de saliniteitsverdeling volgt dan:

$$\frac{S(x)}{S(0)} = \left[1 - K \frac{Q_r \zeta L_a}{A(0)D(0)} \left(e^{\frac{x}{\zeta L_a}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{K}} \quad \left(1 < \frac{L_a}{L_e(x)} < 10 \right) \quad (\text{B.16})$$

Vgl. (B.16) is vrijwel identiek aan vgl. (B.4) volgens Savenije. De extra parameter ζ is het gevolg van de lokale benadering en wordt gegeven door:

$$\zeta = \frac{1}{1 - \Phi L_a} \quad (\text{B.17})$$

met,

$$\Phi = (2 - 3K) \delta_u + (K + 1) \gamma + \frac{K}{L_a} \quad (\text{B.18})$$

In dit model wordt voor de relatie tussen $S(x)$ en $D(x)$ gevonden:

$$\frac{D(x)}{D(0)} = e^{\Phi x} \left(\frac{S(x)}{S(0)} \right)^K \quad (\text{B.19})$$

Een belangrijk verschil met het model van Savenije is, dat K hier de macht van het estuariene Richardson getal representeert. Savenije (2005) leidt voor K een complexe empirische voorspeller af, die een functie is van een groot aantal parameters, waaronder δ_u , L_a en L_b .

Uit het model van Kuijper en Van Rijn volgt:

$$\frac{dD(x)}{dx} = \Phi D(x) - K \frac{Q_r}{A_0} e^{\frac{x}{L_u}} \quad (\text{B.20})$$

Voor een prismatisch kanaal zonder demping van het getij geldt $\Phi = 0$. In dat geval volgt de van der Burgh vergelijking, welke als speciaal geval kan worden beschouwd van de meer algemene vergelijking (B.20):

$$\frac{dD(x)}{dx} = -K \frac{Q_r}{A_0} \quad (\text{B.21})$$

C Resultaten berekeningen dispersiecoëfficiënt

In deze bijlage zijn de resultaten van berekeningen voor de grootte van dispersiecoëfficiënt opgenomen. In Par. C.1 is dit voor 'shear' dispersie volgens de analyse van Goslinga en Verboom (1979) en in Par. C.2 voor dispersie t.g.v. dichtheidsverschillen volgens de analyse van Kuijper en Van Rijn (2011). De tabellen bevatten ook de gebruikte invoergrootheden als de profielgemiddelde stroomsnelheid (u_{gem}) en maximale stroomsnelheid in het profiel (u_{max}) tijdens het getij, de breedte (W) en de waterdiepte (h).

C.1 'Shear' dispersie

- Tabel C.1 voor de monding van de Hollandsche IJssel (km. 18: Stormvloedkering)
- Tabel C.2 voor km. 8 in de Hollandsche IJssel (Nieuwerkerk a/d IJssel);
- Tabel C.3 voor de monding van de Lek (Kinderdijk);
- Tabel C.4 voor 13 km van Kinderdijk (Bergambacht).

Tabel C.1 Dispersiecoëfficiënt K berekend voor de monding van de Hollandsche IJssel (km 18) ten gevolge van 'shear' in een oscillerende stroming. Berekende resultaten zijn in rood weergegeven. Notaties: zie Tabel 4.1. Berekende waarden volgens Goslinga en Verboom (1979).

u_{gem} (m/s)	W (m)	h (m)	c_y (-)	ε_y (m ² /s)	T_y (s)	T' (-)	$f(T')$ (-)	u_{max} (m/s)	K_0 (m ² /s)	K (m ² /s)
$L = 0.7 W$										
0.22	125	6.3	0.3	0.029	264551	0.169	0.0926	419	2350	39
0.22	125	6.3	0.6	0.058	132276	0.338	0.2362	210	1175	49
0.22	125	6.3	0.9	0.087	88184	0.507	0.3717	140	783	52
$L = 0.5 W$										
0.22	125	6.3	0.3	0.029	134975	0.331	0.2304	0.65	214	49
0.22	125	6.3	0.6	0.058	67488	0.662	0.4758	0.65	107	51
0.22	125	6.3	0.9	0.087	44992	0.994	0.6345	0.65	71	45
$L = 0.5 W; u_{max}$ 10% vergroot										
0.22	125	6.3	0.3	0.029	134975	0.331	0.2304	0.715	259	60
0.22	125	6.3	0.6	0.058	67488	0.662	0.4758	0.715	129	62
0.22	125	6.3	0.9	0.087	44992	0.994	0.6345	0.715	86	55
$L = h$										
u_{gem} (m/s)	W (m)	h (m)	c_z (-)	ε_z (m ² /s)	T_z (s)	T' (-)	$f(T')$ (-)	u_{max} (m/s)	K_0 (m ² /s)	K (m ² /s)
0.22	125	6.3	0.05	0.005	8229	5.432	0.9634	0.65	13	13
0.22	125	6.3	0.1	0.010	4114	10.865	0.9876	0.65	7	6

Tabel C.2 Dispersiecoëfficiënt K berekend voor de Hollandsche IJssel (km. 8) ten gevolge van 'shear' in een oscillerende stroming. Berekende resultaten zijn in rood weergegeven. Notaties: zie Tabel 4.1. Berekende waarden volgens Goslinga en Verboom (1979).

u_{gem} (m/s)	W (m)	h (m)	c_y (-)	ε_y (m ² /s)	T_y (s)	T' (-)	$f(T')$ (-)	U_{max} (m/s)	K_0 (m ² /s)	K (m ² /s)
$L = 0.7 W$										
0.12	125	4.1	0.3	0.010	745260	0.060	0.0191	0.3	295	6
0.12	125	4.1	0.6	0.021	372630	0.120	0.0557	0.3	148	8
0.12	125	4.1	0.9	0.031	248420	0.180	0.1014	0.3	98	10
$L = 0.5 W$										
0.12	125	4.1	0.3	0.010	380235	0.118	0.0540	0.3	151	8
0.12	125	4.1	0.6	0.021	190117	0.235	0.1475	0.3	75	11
0.12	125	4.1	0.9	0.031	126745	0.353	0.2487	0.3	50	12
$L = 0.5 W; U_{max}$ 10% vergroot										
0.12	125	4.1	0.3	0.010	380235	0.118	0.0540	0.33	182	10
0.12	125	4.1	0.6	0.021	190117	0.235	0.1475	0.33	91	13
0.12	125	4.1	0.9	0.031	126745	0.353	0.2487	0.33	61	15
$L = h$										
u_{gem} (m/s)	W (m)	h (m)	c_z (-)	ε_z (m ² /s)	T_z (s)	T' (-)	$f(T')$ (-)	U_{max} (m/s)	K_0 (m ² /s)	K (m ² /s)
0.12	125	4.1	0.05	0.002	9818	4.553	0.9520	0.3	4	4
0.12	125	4.1	0.1	0.003	4909	9.106	0.9836	0.3	2	2

Tabel C.3 Dispersiecoëfficiënt K berekend voor de monding van de Lek (Kinderdijk) ten gevolge van 'shear' in een oscillerende stroming. Berekende resultaten zijn in rood weergegeven. Notaties: zie Tabel 4.1. Berekende waarden volgens Goslinga en Verboom (1979).

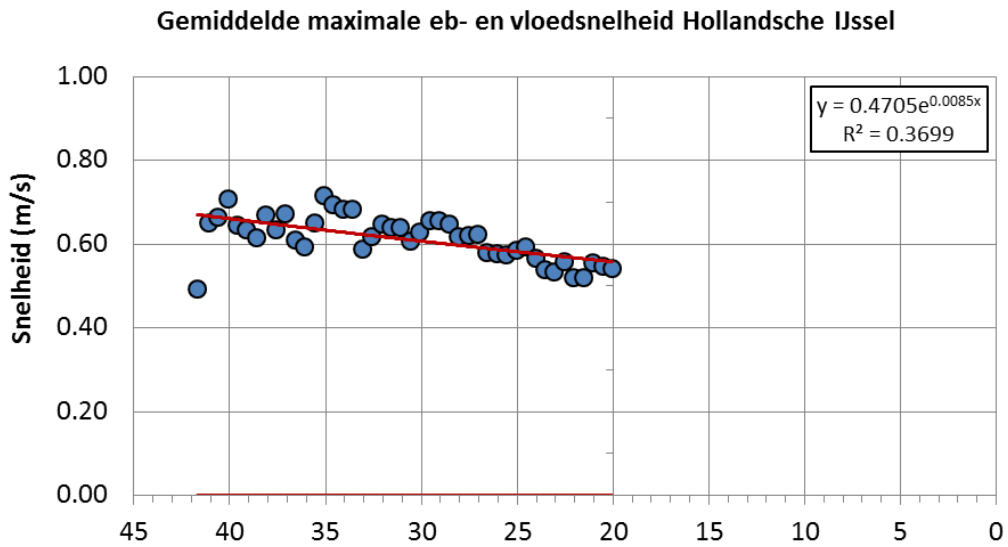
U_{gem} (m/s)	W (m)	h (m)	c_y (-)	ε_y (m ² /s)	T_y (s)	T' (-)	$f(T')$ (-)	U_{max} (m/s)	K_0 (m ² /s)	K (m ² /s)
$L = 0.7 W$										
0.26	320	5.8	0.3	0.035	1416442	0.032	0.0069	0.62	2396	17
0.26	320	5.8	0.6	0.071	708221	0.063	0.0207	0.62	1198	25
0.26	320	5.8	0.9	0.106	472147	0.095	0.0388	0.62	799	31
$L = 0.5 W$										
0.26	320	5.8	0.3	0.035	722675	0.062	0.0200	0.62	1222	24
0.26	320	5.8	0.6	0.071	361337	0.124	0.0583	0.62	611	36
0.26	320	5.8	0.9	0.106	240892	0.186	0.1059	0.62	407	43
$L = 0.5 W; U_{\text{max}} 10\% \text{ vergroot}$										
0.26	320	5.8	0.3	0.035	722675	0.062	0.0200	0.68	1470	29
0.26	320	5.8	0.6	0.071	361337	0.124	0.0583	0.68	735	43
0.26	320	5.8	0.9	0.106	240892	0.186	0.1059	0.68	490	52
U_{gem} (m/s)	W (m)	h (m)	c_z (-)	ε_z (m ² /s)	T_z (s)	T' (-)	$f(T')$ (-)	U_{max} (m/s)	K_0 (m ² /s)	K (m ² /s)
$L = h$										
0.26	320	5.8	0.05	0.006	5698	7.845	0.9793	0.62	10	9
0.26	320	5.8	0.1	0.012	2849	15.690	0.9931	0.62	5	5

Tabel C.4 Dispersiecoëfficiënt K berekend voor de Lek (Bergambacht) ten gevolge van 'shear' in een oscillerende stroming. Berekende resultaten zijn in rood weergegeven. Notaties: zie Tabel 4.1. Berekende waarden volgens Goslinga en Verboom (1979).

u_{gem} (m/s)	W (m)	h (m)	c_v (-)	ε_v (m ² /s)	T_v (s)	T' (-)	$f(T')$ (-)	U_{max} (m/s)	K_0 (m ² /s)	K (m ² /s)
$L = 0.7 W$										
0.25	250	5.3	0.3	0.031	983931	0.045	0.0123	0.62	1664	20
0.25	250	5.3	0.6	0.062	491965	0.091	0.0364	0.62	832	30
0.25	250	5.3	0.9	0.093	327977	0.136	0.0674	0.62	555	37
$L = 0.5 W$										
0.25	250	5.3	0.3	0.031	502005	0.089	0.0353	0.62	849	30
0.25	250	5.3	0.6	0.062	251003	0.178	0.0999	0.62	425	42
0.25	250	5.3	0.9	0.093	167335	0.267	0.1751	0.62	283	50
$L = 0.5 W; U_{max}$ 10% vergroot										
0.25	250	5.3	0.3	0.031	502005	0.089	0.0353	0.68	1021	36
0.25	250	5.3	0.6	0.062	251003	0.178	0.0999	0.68	511	51
0.25	250	5.3	0.9	0.093	167335	0.267	0.1751	0.68	340	60
u_{gem} (m/s)	W (m)	h (m)	c_z (-)	ε_z (m ² /s)	T_z (s)	T' (-)	$f(T')$ (-)	U_{max} (m/s)	K_0 (m ² /s)	K (m ² /s)
$L = h$										
0.25	250	5.3	0.05	0.005	5415	8.255	0.9809	0.62	9	9
0.25	250	5.3	0.1	0.010	2707	16.510	0.9936	0.62	5	5

C.2 Dispersie t.g.v. dichtheidsverschillen

Voorbeelden van de berekeningsresultaten met de dispersieformuleringen van Kuijper en Van Rijn (2011) zijn vermeld in Tabel C.5 voor de Hollandsche IJssel en Tabel C.6 voor de Lek. De resultaten zijn verkregen met een kalibratiecoëfficiënt van 0.7 en een chlorideconcentratieverhoging van 250 mg/l in de monding. Voor de Hollandsche IJssel is de afvoer 1 m³/s en voor de Lek 2 m³/s. De gebruikte convergentielengtes voor de breedte (L_b) en het doorstroomoppervlak (L_a) zijn vermeld in Tabel 2.1. De dempingsfactor voor de stroomsnelheid (δ_u) is ontleend aan het snelheidsverloop langs de Lek. Dit is gedaan met een exponentiele fit op de berekende stroomsnelheden voor het afwaartse deel van de Lek nabij de monding waar sprake is van zoutindringing, zie Figuur C.1. De dempingsfactor δ_u kan ook worden beschouwd als de inverse van de convergentielengte van de maximale stroomsnelheid.



Figuur C.1 Gemiddelde maximale eb- en vloed­snelheid in het afwaartse deel van de Lek met exponentiële benadering.