

Zoutverspreiding in het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal

Analyse van 100-punten-metingen



Zoutverspreiding in het Noordzeekanaal en Amsterdam- Rijnkanaal

Analyse van 100-punten-metingen

Frans Buschman
Meinard Tiessen

11200589-001

Titel

Zoutverspreiding in het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Roel Burgers (RWS-WVL)	11200589-001	11200589-001-ZWS-0004	48

Trefwoorden



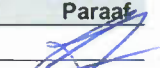
100-punten-metingen, chlorideprofielen, zoutindringing, afvoerbepaling, fluctuatie afvoer.

Samenvatting

Zout dringt vooral bij de sluizen van IJmuiden het Noordzeekanaal binnen. Dit zout verspreidt over het IJ en dringt op momenten het Amsterdam-Rijnkanaal binnen. Sinds het verwijderen van het sluseiland en de drempel bij Zeeburg zijn bij Diemen in het Amsterdam-Rijnkanaal hoge concentraties chloride gemeten. Het optreden van deze pieken kan niet goed worden verklaard. In deze studie zijn chlorideprofielen gemeten langs het Noordzeekanaal en de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal geanalyseerd. De verdeling van zout langs het kanaal en de verdeling over de diepte is bepaald. De chlorideconcentratie in de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal is gerelateerd aan de afvoer in het Amsterdam-Rijnkanaal gemiddeld over dagen tot maanden voorafgaand aan de 100-punten-meting. Het zout dringt niet verder binnen dan Weesp tijdens deze zes momenten. In de metingen van mei 2017 kwam zout het verst landinwaarts. De afvoer in de 5-10 dagen voorafgaand aan de 100-punten-metingen was het laagst in augustus 2015. Een mogelijke verklaring voor de hogere chlorideconcentratie in mei 2017 is dat meer chloride nabij de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal aanwezig was. Mogelijk was het zout dat was binnen gedrongen ongeveer 30 dagen voor de 100-punten-meting nog niet volledig weggespoeld naar zee. Een hypothese is gesteld dat de variatie in debiet in het watersysteem door het periodiek spuien van belang is voor menging en daarmee de zoutindringing in het Amsterdam-Rijnkanaal beperkt. Daarnaast is de afvoer bepaald uit metingen bij Wijk bij Duurstede vergeleken met de lokale waterstand om na te gaan of de fluctuaties in het debiet realistisch kunnen zijn. Gebleken is dat voor het merendeel van de tijd de fluctuaties in afvoer verklaard worden uit de waterstandsvariaties.

Referenties

KPP verzilting 2017

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	nov. 2017	Frans Buschman		Arnout Bijlsma		Johan Boon	
0.3	sept. 2017	Frans Buschman		Arnout Bijlsma		Johan Boon	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Kader	1
Deze studie is uitgevoerd in het kader van fase	1
1.2 Achtergrond	1
1.2.1 Zoutbalans	1
1.2.2 Ingrepen in het watersysteem	1
1.2.3 Mogelijke problemen door verzilting	2
1.3 Probleemstelling	3
1.4 Doelstelling	5
1.5 Gerelateerd werk	5
1.6 Leeswijzer	6
2 Ruimtelijke verdeling van chloride en relatie met debiet in het Amsterdam-Rijnkanaal	7
2.1 Dataverwerking	7
2.1.1 100-punten-metingen	7
2.1.2 Afvoer	8
2.2 Overeenkomsten en verschillen op hoofdlijnen tussen de 100-punten-metingen	9
2.2.1 Chlorideconcentraties	9
2.2.2 Verklaring overeenkomsten en verschillen	11
2.3 Chloride in de bovenlaag en de onderlaag	16
2.4 Tussentijdse conclusies	18
2.5 Representativiteit voor pieken van zoutindringing	18
2.6 Hypothese over zoutindringing in het Amsterdam-Rijnkanaal	19
3 Fluctuatie van de afvoer bij Wijk bij Duurstede	23
3.1 Inleiding	23
3.2 Stroomsnelheid en waterstand	23
3.3 Discussie	26
4 Conclusies en aanbevelingen	29
4.1 Conclusies	29
4.2 Aanbevelingen	29
5 Literatuurverwijzingen	31
Bijlage(n)	
A 100-punten-metingen	A-1

1 Inleiding

1.1 Kader

Deze studie is uitgevoerd in het kader van fase 3 (verdiepende fase) van het project Systeemanalyse Rijn-Maasmonding. Dit project is uitgevoerd door Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat (RWS-WVL) en valt onder het KPP Verzilting. Dit project wordt gefinancierd vanuit RWS landelijke taken en BOA Zoetwater. Het project is begonnen in 2015 en loopt tot eind 2017.

1.2 Achtergrond

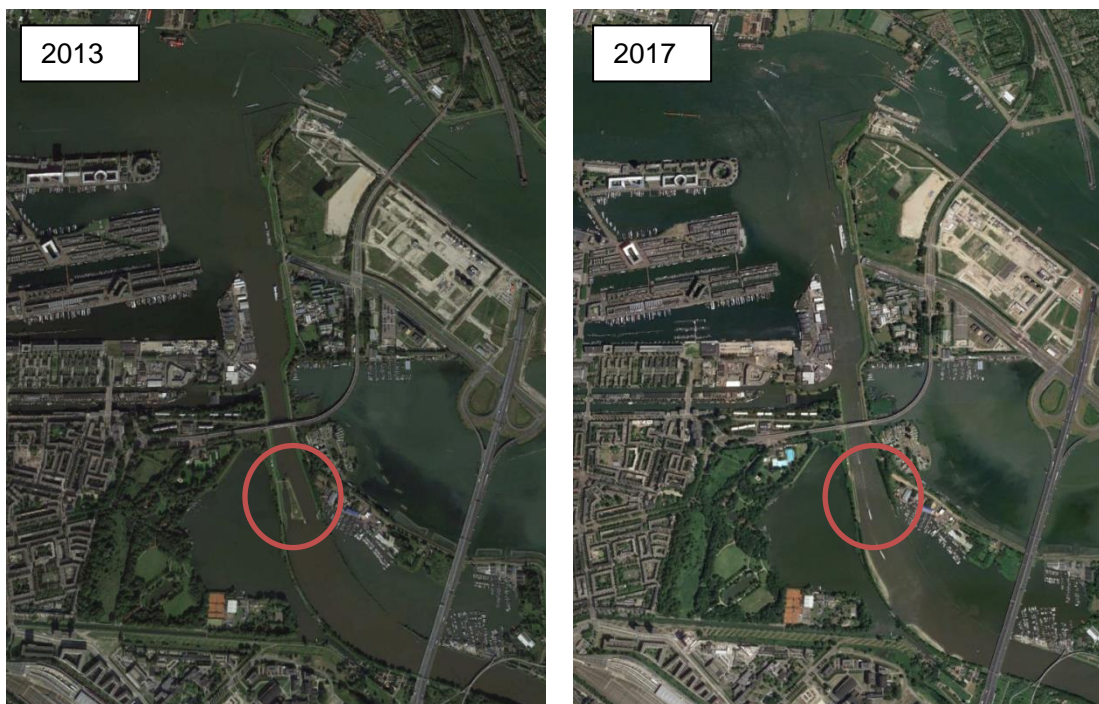
1.2.1 Zoutbalans

Zout wordt vooral aangevoerd naar het watersysteem door het zoutlek van de sluizen bij IJmuiden. Ook zijn er enkele polders, zoals polder Groot-Mijdrecht en de Horstermeerpolder, waar zout via kwelwater in het oppervlaktewater terecht komt. Dit oppervlaktewater wordt geloosd op het Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal. Omdat het watersysteem wordt doorgespoeld met zoetwater via honderden lozingen, wordt het watersysteem niet steeds zouter. Een speciale lozing is de waterinlaat vanuit de Lek bij Wijk bij Duurstede. Deze lozing kan worden gestuurd, afhankelijk van de waterbeschikbaarheid in de Neder-Rijn/Lek. Netto wordt bij IJmuiden over een jaar gemiddeld meer zout afgevoerd dan wordt aangevoerd via de sluizen van IJmuiden.

1.2.2 Ingrepen in het watersysteem

Net als bij andere havens op de grens van zout- en zoetwater is de geometrie van het watersysteem een belangrijke parameter voor de ontwikkeling van de zoutindringing over de jaren. Hoe dieper en breder, hoe meer zoutindringing verwacht kan worden. Daarnaast zijn de aanwezige versmallingen, verondiepingen en de invloed van havenbassins van invloed op de menging. In de periode vanaf de eerste 100-punten-meting (2003) tot 2017 hebben de volgende veranderingen in de geometrie van het systeem plaats gevonden:

- Er zijn aanpassingen geweest aan de slibputten in het Noordzeekanaal.
- Er vindt om de paar jaar onderhoudsbaggerwerk plaats in de havens van Amsterdam. Het Noordzeekanaal is voor het laatst in 2008 grootschalig gebaggerd.
- Het sluseiland en de drempel bij Zeeburg zijn verwijderd, wat in 2014 gereed was (Figuur 1.1).



Figuur 1.1 Verwijdering van het sluiseiland bij Zeeburg nabij de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal in het IJ.

Tot nu toe is het watersysteem Noordzeekanaal, IJ en Amsterdam-Rijnkanaal ten noorden van de Lek/Nederrijn vooral gestuurd op waterpeil. Sinds het weghalen van het sluiseiland en de drempel bij Zeeburg (afgerond in 2014), dringt meer zout het Amsterdam-Rijnkanaal binnen (Arcadis, 2016a). Met de nieuwe zeesluis bij IJmuiden (gereed in 2019) is de verwachting dat de zoutlast vanuit de sluisen met ongeveer 60% zal toenemen (Deltares, 2016). Als zoutbeperkende maatregel voor de zoutlast richting het Noordzeekanaal zal selectieve onttrekking worden toegepast (gereed in 2021). Wanneer blijkt dat met de selectieve onttrekking in de toekomst de extra zoutlast onvoldoende kan worden beperkt, kan in de Velserkom nog een zoutvang worden aangelegd om de effectiviteit van de selectieve onttrekking te vergroten. Vanwege deze toekomstige ingrepen in het watersysteem en de toegenomen zoutindringing in het Amsterdam-Rijnkanaal sinds eind 2014, wenst Rijkswaterstaat in de nabije toekomst op zowel zout als peil te gaan sturen.

1.2.3 Mogelijke problemen door verzilting

In Rijkswaterstaat WNN (2016) zijn een aantal gebieden beschreven die kwetsbaar zijn voor zout:

- Wanneer zout bij de schutsluis bij Spaarndam het binnengebied (met name het beheergebied van Rijnland) binnendringt, ontstaat schade bij de bollenteelt.
- Verder is ter hoogte van km 10 op het Amsterdam-Rijnkanaal een open verbinding met de Gein en Gaasp waardoor zoutwater de Amstelboezem kan binnendringen. Ook daar is kans op natuurschade en secundaire eutrofiëring (vrijkomen van voedingsstoffen als gevolg van verdringing door o.a. sulfaat).

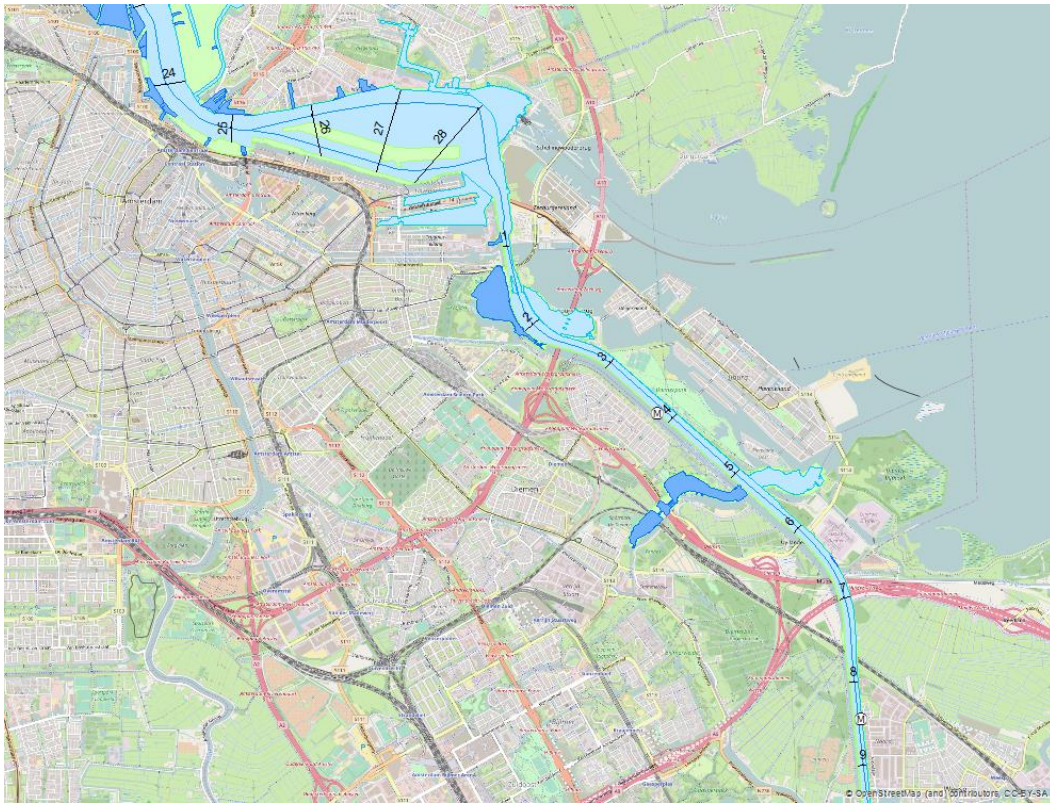
In een factsheet over de verzilting in het watersysteem (Deltares, 2015), opgesteld in het kader van fase 1 van het project Systeemanalyse Rijn-Maasmonding, zijn de normen en richtwaarden voor chlorideconcentraties in het Amsterdam-Rijnkanaal samengevat. Deze factsheet is onveranderd overgenomen als bijlage bij dit rapport (bijlage B). De belangrijkste normen en richtwaarden worden hier herhaald:

- In het Amsterdam-Rijnkanaal wordt bij Nieuwersluis (km 22) oppervlaktewater gewonnen voor de bereiding van drinkwater. Volgens de norm is de chlorideconcentratie maximaal 150 mg/l gemiddeld over het jaar. Als de chlorideconcentratie op deze locatie een waarde van 150 mg/l overschrijdt, wordt de productie van drinkwater gestaakt.
- Daarnaast is het ongewenst dat op punten waar het regionale watersysteem aansluit op het Amsterdam-Rijnkanaal chlorideconcentraties voorkomen die ongewenst zijn vanuit regionale watergebruiksfuncties. De KRW-richtwaarde is een chlorideconcentratie van 300 mg/l op het KRW-meetpunt Diemen gemiddeld over het zomerhalfjaar.

Niet alleen verzilting is een probleem voor de waterkwaliteit in het Noordzeekanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal. Het systeem wordt intensief gebruikt voor de inname en lozing van koelwater en emissies (lozing van opgeloste stoffen). Rijkswaterstaat geeft hiervoor vergunningen uit. Toetsing vindt plaats met modellen, waarin de waterbeweging een belangrijke rol speelt. Bovendien hebben, net als bij zout, variaties in de watertemperatuur door de koelwaterlozingen effect op de waterbeweging zodat een geïntegreerde beschouwing van zoutgehalte en temperatuur wenselijk en nodig is. Het grootste effect op de dichtheid en daarmee waterbeweging wordt veroorzaakt door zout. Onder andere vanwege deze reden, is dit rapport beperkt tot een analyse van chlorideconcentratie.

1.3 Probleemstelling

Recent zijn hoge piekwaarden van het chloridegehalte in het Amsterdam-Rijnkanaal bij Diemen (op Amsterdam-Rijnkanaal km 3,5, zie Figuur 1.2) waargenomen. Deze pieken kunnen niet goed verklaard worden. Zeker ook naar de toekomst toe, na de bouw van de grote nieuwe zeesluis bij IJmuiden en de selectieve onttrekking, is kennis over oorzaken voor zoutindringing op het Amsterdam-Rijnkanaal van groot belang voor het adequaat kunnen sturen op zout. Het begrijpen van de huidige situatie is een voorwaarde om de situatie met nieuwe zeesluis en selectieve onttrekking (en eventueel een zoutvang) te begrijpen. Bovenop de veranderingen in het systeem door ingrepen komen veranderingen door klimaatverandering, waardoor de watervraag in de polders die afwateren op het watersysteem zal toenemen en vaker de KWA wordt ingezet, waarbij tot 12 m³/s zoetwater uit het Amsterdam-Rijnkanaal wordt onttrokken ten behoeve van andere watersystemen (Hydrologic, 2016).



Figuur 1.2 De monding van het Amsterdam-Rijnkanaal in het IJ en Noordzeekanaal met meetpunten (M) bij Diemen en Weesp en de RWS kilometrerings op het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal aangegeven.

Voor begrip van het systeem zijn betrouwbare metingen van groot belang. Op drie locaties in het Amsterdam-Rijnkanaal wordt debiet bepaald. Bij alle stations komen negatieve afvoeren voor, waarbij de stroming gericht is naar de Lek/Nederrijn. Dit wordt deels geweten aan het optreden van translatiegolven, die vooral veroorzaakt worden door het starten en stoppen van het spuien bij IJmuiden (HKV, 2016). Voor met name de debietmeter bij Wijk bij Duurstede is het zeer de vraag of dit de oorzaak is. Omdat het debiet bij wijk bij Duurstede van belang is voor het doospoelen van het watersysteem, is het van belang dit debiet en variaties hierin precies te kennen. Voor de locaties Maarssen en Weesp is het de vraag of dat de enige oorzaak is.

Een belangrijke beheervraag is hoeveel debiet nodig is bij wat voor condities om het Amsterdam-Rijnkanaal zoet te houden. Op basis daarvan kan bepaald worden hoeveel water moet worden ingelaten bij de Prinses Irenesluizen bij Wijk bij Duurstede. Op basis van recente meetresultaten is door Rijkswaterstaat (Arjen Kikkert) een empirische relatie opgesteld dat met een debiet van $25 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Weesp gemiddeld over 5 dagen geen verhoogd zoutgehalte optreedt bij Diemen in het Amsterdam-Rijnkanaal. Deze studie levert inzicht op, waarmee deze beheervraag mogelijk beantwoord kan worden en de empirische relatie mogelijk onderbouwd kan worden. Deze studie is daarmee toeleverend aan deze beheervraag, maar is niet gericht op het beantwoorden van de beheervraag.

1.4 Doelstelling

De doelstelling van het project is de kennis en inzichten op het onderwerp (externe) verzilting via oppervlaktewateren te vergroten, en beter te begrijpen hoe de chlorideconcentraties in het systeem van de Rijn-Maasmond tot stand komen. Het watersysteem Amsterdam-Rijnkanaal, IJ en Noordzeekanaal is een aftakking van de Lek en kan daarmee worden gezien als onderdeel van de Rijn-Maasmonding, hoewel meestal alleen de aftakkingen benedenstrooms van de Nederrijn, Waal en Maas tot de Rijn-Maasmonding worden gerekend. Specifiek voor het watersysteem Amsterdam-Rijnkanaal, IJ en Noordzeekanaal is het doel om inzicht in verzilting en verspreiding van zout in zwak dynamische systemen als gevolg van sluiswerking en scheepvaart te vergroten.

De doelen van deze studie zijn:

- 1) De ontstaansgeschiedenis beschrijven van de zoutverspreiding in de verticaal en horizontaal langs het kanaal op momenten dat een 100-punten-meting is uitgevoerd.
 - a) Hiervoor worden 100-punten-metingen verwerkt en wordt een verklaring gezocht op basis van de afvoer in het Amsterdam-Rijnkanaal.
 - b) De nadruk ligt hierbij op zoutindringing van de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal, omdat zoutindringing hier ongewenst is en omdat zoutverspreiding in dit deel van het watersysteem nauwelijks wordt beïnvloed door lozingen op het IJ en Noordzeekanaal.
- 2) Nagaan of het mogelijk is dat het werkelijke debiet bij Wijk bij Duurstede zo fluctueert als aan de hand van metingen van stroomsnelheid en waterstand is bepaald.

1.5 Gerelateerd werk

Uitkomsten uit recente studies die relevant zijn voor de doelen van deze studie worden in deze sectie beschreven.

Naar aanleiding van de onverklaarbare pieken in chlorideconcentratie is een 3D modelstudie uitgevoerd (Arcadis, 2016a). In deze studie werd berekend dat zonder sluiseland en drempel de chlorideconcentratie ongeveer 300 mg/l hoger was voor het jaar 2014. In Arcadis (2016b) zijn vervolgens verschillende scenario's doorgerekend zonder sluiseland en drempel bij Zeeburg. Daaruit volgde dat voor de huidige situatie een debiet door het Amsterdam-Rijnkanaal van 9 m³/s voldoende is om te voldoen aan de norm bij Nieuwersluis bij een droge periode tot 6 weken en 23 m³/s bij een langdurige droogte voldoende is om te voldoen aan de KRW richtwaarden bij Nigtevecht, waar het Amsterdam-Rijnkanaal een verbinding heeft met de Vecht. Deze afvoer is vergelijkbaar met de afvoer van 25 m³/s gedurende 5 dagen die Rijkswaterstaat vond op basis van metingen na eind 2014.

HKV (2016) heeft de theorie van translatiegolven en het potentiële effect op zoutindringing beschreven. Een translatiegolf ontstaat wanneer debiet plotseling toe- of afneemt. Een plotselinge verandering in debiet treedt op bij het spuien en malen bij IJmuiden en bij het schutten bij sluisen. Bij het spuien ontstaat een translatiegolf wanneer de spuikokers worden geopend of juist gesloten. Gezien de relatief grote debieten en de duur van het spuien van enkele uren, wordt de variatie in debiet en waterstand vooral door deze translatiegolf van het spuien veroorzaakt. Omdat alleen gespuid kan worden bij laagwater op zee, varieert de waterstand tot maximaal 20 cm met een periode van ongeveer 12 uur. Door het kleiner wordende doorstroomoppervlak van IJmuiden naar het Amsterdam-Rijnkanaal, is de variatie door de translatiegolf wat groter in het Amsterdam-Rijnkanaal dan bij IJmuiden. Na elke intensieve spuiperiode vindt omkering van de stroomrichting in het gehele Amsterdam-Rijnkanaal plaats.

Uit Delft3D berekeningen met en zonder de translatiegolf door het openen en sluiten van de spuikokers volgt dat zout zonder translatiegolf meer langs de bodem verspreid. In de simulatie met translatiegolf is het front van de zouttong steiler (HKV, 2016).

Wanneer zout te ver oprukt in het Amsterdam-Rijnkanaal, is een beheersmaatregel dat het inlaatdebiet bij de Prinses Irenesluizen wordt verhoogd. Deze beheersmaatregel is bijvoorbeeld eind 2014, eind 2015, juni 2016 en in juli 2017 toegepast (med. Arjen Kikkert, oktober 2017). De inlaatcapaciteit van de Prinses Irenesluizen bij laagwater op de Lek is 20 m³/s met het huidige WaterInlaatSysteem zonder dat de scheepvaart gehinderd wordt. Een enkele keer moet overdag de Oude Sluis worden open gezet om meer water in te laten. Dit is gebeurd tijdens een proef of een extra inlaat van water negatieve gevolgen heeft voor de scheepvaart in 2017. De conclusie van de proef was dat er geen ongunstige signalen zijn gekomen van de scheepvaart (med. Thijs Schuhmacher, 18 juli 2017). Voorafgaand aan de proef in 2017 was de Oude sluis voor het laatst in 2003 overdag open gezet (Hydrologic, 2016). Met de toenemende watervraag zal overdag vaker de sluis opengezet moeten worden.

Tot slot worden in deze inleiding de fysische processen opgesomd die bepalend zijn de verspreiding van zout (Deltares, 2015, bijlage B):

- Moleculaire en turbulente diffusie; deze zorgen voor verspreiding zout van hoge naar lage concentratie
- Advectie; transporteert zout met de stroming mee (dit is het enige proces waardoor zout het watersysteem verlaat)
- Gravitatiecirculatie; deze dichtheidsstroming neemt toe wanneer de stratificatie toeneemt (voor zout en/of temperatuur), maar ook als de waterdiepte toeneemt.
- Menging door grenslaagturbulentie, scheepvaart en wind. Hierdoor neemt de stratificatie af.

Vanwege de lage absolute stroomsnelheden in het Noordzeekanaal-Amsterdam-Rijnkanaal is menging door grenslaagturbulentie minder sterk dan in estuaria. Hierdoor is de gravitatiecirculatie en daarmee het landinwaartse zouttransport langs de bodem in het relatief ondiepe Amsterdam-Rijnkanaal belangrijk ten opzichte van advectie.

1.6 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 gaat in op doel 1. Eerst wordt beschreven hoe de 100-punten-metingen en de afvoer uit metingen zijn verwerkt. Vervolgens worden de verschillen tussen de profielen van chlorideconcentraties beschreven en gekoppeld aan de afvoer (advectie van zout) in de voorafgaande periode. Tot slot wordt een hypothese beschreven over de rol van het pseudo-getij voor de menging en daarmee zoutindringing op het Amsterdam-Rijnkanaal.

Hoofdstuk 3 gaat in op doel 2. Stroomsnelheid (bepaald uit debietgegevens en de natte doorsnede) en waterstand gemeten dichtbij de Prinses Irenesluis worden vergeleken om te bepalen of de fluctuatie in de afvoer realistisch kan zijn.

Dit rapport sluit af met conclusies en aanbevelingen.

2 Ruimtelijke verdeling van chloride en relatie met debiet in het Amsterdam-Rijnkanaal

2.1 Dataverwerking

2.1.1 100-punten-metingen

Rijkswaterstaat heeft profielmetingen uitgevoerd op ongeveer 100 punten in het Noordzeekanaal, het IJ en soms tot bij Weesp (Amsterdam-Rijnkanaal km 7). Zes van deze metingen zijn aangeleverd door Rijkswaterstaat WNN. Iedere 100-punten-meting is gecompleteerd binnen een periode van hooguit 3 weken (Tabel 2.1). Op ieder van deze punten is vanaf een meetvaartuig een meetinstrument in het water gelaten. Het instrument werd neergelaten tot de bodem en weer omhoog getrokken. Op basis van deze metingen is op verschillende dieptes chlorideconcentratie en temperatuur bepaald. Iedere 1 tot 2 km is er op de as van het watersysteem een profielmeting uitgevoerd, waarmee de metingen een goed inzicht geven in de horizontale en verticale verdeling van chloride.

Tabel 2.1 De perioden waarin de 100-punten-metingen zijn gecompleteerd en de ruimtelijke dekking

Naam	Start periode	Einde periode	Duur (dagen)	Inclusief Amsterdam-Rijnkanaal km 3-7
'Apr2003'	23-Apr-2003		onbekend	Nee
'Feb2011'	18-Feb-2011	10-Mar-2011	20	Nee
'Aug2011'	16-Aug-2011	25-Aug-2011	9	Nee
'Jul2015'	27-Jul-2015	03-Aug-2015	7	Ja
'Aug2015'	10-Aug-2015	13-Aug-2015	3	Ja
'Jun2017'	29-May-2017	01-Jun-2017	3	Ja

De metingen zoals aangeleverd door Rijkswaterstaat West-Nederland-Noord aan Deltares waren op details gecorrigeerd. De gegevens van de neerwaartse beweging van het instrument zijn geïnterpoleerd met een interval van 0,1 m in de verticaal. Hoewel de chlorideconcentratie bij een neerwaartse beweging wordt onderschat door een lichte vertraging, is gebleken dat de chlorideconcentraties uit de neerwaartse beweging vergelijkbaar waren met die uit de opwaartse beweging. In het vervolg worden alleen metingen van de neergaande beweging van het instrument getoond.

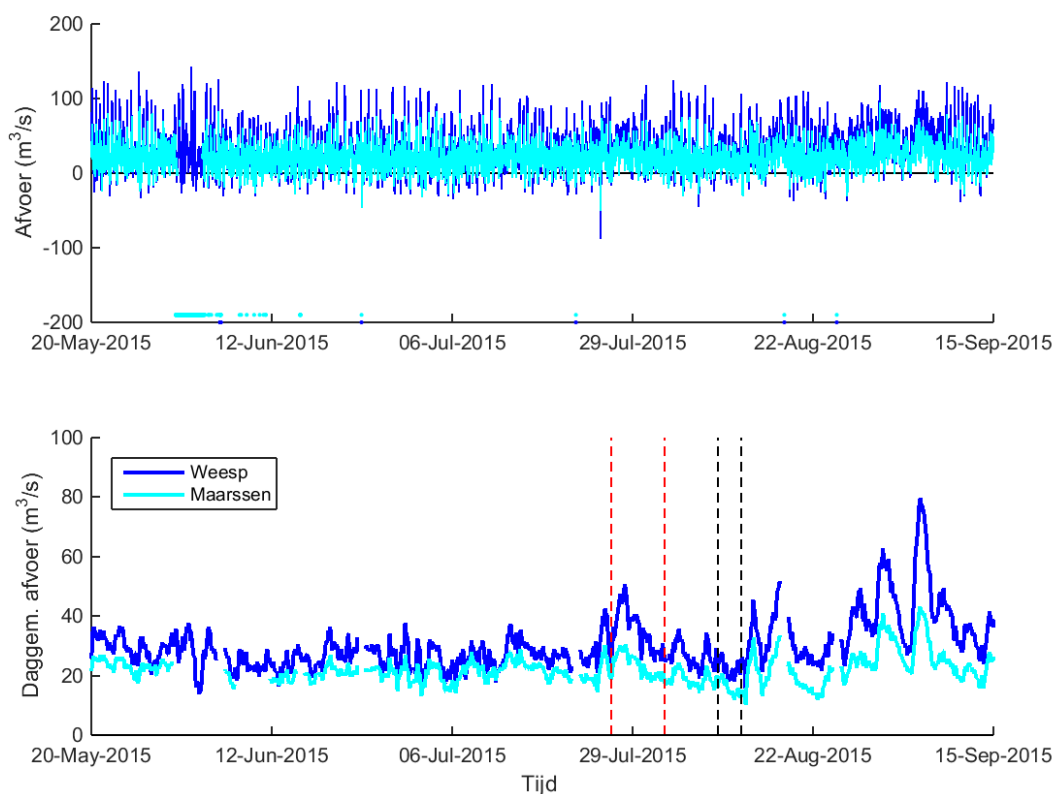
De verticaal geïnterpoleerde chloridegehalten zijn vervolgens gecombineerd voor de profielen genomen langs de as van het Noordzeekanaal, het IJ en de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal. Voor deze profielen is voor iedere 100-punten meting een figuur gemaakt door horizontaal te interpoleren, waarbij is verondersteld dat het chloridegehalte niet veranderde gedurende een 100-punten-meting. Hoewel tussen de eerste en laatste profielmeting soms meer dan week zat (Tabel 2.1), lijkt dit over het algemeen een redelijke veronderstelling voor dit zwak dynamische systeem. Voor de interpolatie zijn alleen de punten op de as gebruikt en niet de profielmetingen in havens of zijkanalen.

Voor de 100-punten-meting van 2003 waren de locaties van de punten niet beschikbaar. De naamgeving van de bestanden per locatie voor de verschillende 100-punten-metingen was niet consistent. Voor de meting van augustus 2015 was een lijst met volledige namen, x en y locaties beschikbaar. Deze lijst is gebruikt bij de verwerking van de gegevens en de naamgeving van profiellocaties.

Bij de verwerking van de profielmetingen viel op dat voor sommige 100 punten-metingen de datum onjuist leek. In de metingen was een datum vermeld, welke maanden van andere datums van dezelfde 100-punten-meting aflag. Als voorbeeld is de datum 8 maart 2015 in de metingen vervangen door 3 augustus 2015, kort na andere metingen eind juli 2015 in die 100-punten meetreeks. Eén profielmeting is weggelaten, omdat deze vergeleken met omliggende punten onrealistisch hoog is. Het gaat om de profielmeting bij km 6 in het Amsterdam-Rijnkanaal in augustus 2015.

2.1.2 Afvoer

Afvoeren op 10-minuten interval bepaald uit metingen bij Weesp, Maarsse en Wijk bij Duurstede in het Amsterdam-Rijnkanaal zijn verwerkt tot daggemiddelde waarden. Afvoeren met waarde $-999,99 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn aangemerkt als hiaten, zoals aangegeven door de servicedesk data van Rijkswaterstaat. Daarnaast zijn waarden groter dan 998 en kleiner dan $-500 \text{ m}^3/\text{s}$ ook aangemerkt als hiaten, omdat deze onrealistisch zijn. Bij Weesp en Wijk bij Duurstede zijn hierdoor een beperkt aantal (11) 10-minuten afvoeren extra als hiaat aangemerkt. De hiaten zijn aangemerkt door de stippen rond $-200 \text{ m}^3/\text{s}$ in het voorbeeld in Figuur 2.1 voor Maarsse en voor Weesp. Hiaten zijn vervolgens opgevuld door interpolatie, mits de aangesloten periode niet groter is dan een uur.



Figuur 2.1 Voorbeeld van verwerking van afvoer bij Weesp en Maarsse tot daggemiddelde afvoer. De twee perioden van de 100-puntenmetingen in 2015 zijn aangegeven in rood en zwart.

In het watersysteem varieert de afvoer gedurende de dag. Tijdens laagwater op zee kan worden gespuid en is de stroomrichting over het algemeen naar IJmuiden gericht. Na het stoppen van het spuien kan de stroming omkeren en zelfs in het Amsterdam-Rijnkanaal naar de Prinses Irenesluizen gericht zijn. Dit pseudo-getij levert een variatie op in de afvoer. Om deze reden zijn de afvoeren gemiddeld over twee getijperioden (24,8 uur). Deze middeling is uitgevoerd voor ieder tijdstip door de afvoeren van 12,4 uur voor tot 12,4 na het tijdstip te middelen (Figuur 2.1). Dit wordt in het vervolg de daggemiddelde afvoer genoemd.

Omdat het chloridegehalte in de monding van Amsterdam-Rijnkanaal afhangt van de afvoer bij Weesp in de voorgaande periode, is de afvoer bepaald vanaf de gemiddelde tijd van de 100-punten-meting tot 5, 10, 20, 30, 50 en 90 dagen ervoor. Door de hiaten zouden veel van deze gemiddelde debieten niet bepaald kunnen worden. Om deze reden is getolereerd dat 10% van de periode mag bestaan uit hiaatwaarden. Aangenomen is dat er geen extreem hoge of lage waarden voorkwamen in die maximaal 10 % van de tijd, zodat het gemiddelde toch een redelijk beeld geeft. Met deze tolerantie kon slechts voor een enkele periode vooraf aan een 100-punten-meting geen waarde voor de gemiddelde afvoer worden bepaald.

Opvallend bij de gevonden afvoeren gemiddeld over de periode voorafgaand aan de 100-punten-metingen van 2011 is dat Arcadis (2014), in een vergelijkbare analyse, gemiddelde debieten hebben bepaald (Arcadis (2014), tabel 2-9) die niet overeenkomen met debieten die voor deze studie zijn gebaseerd op de gegevens van de servicedesk:

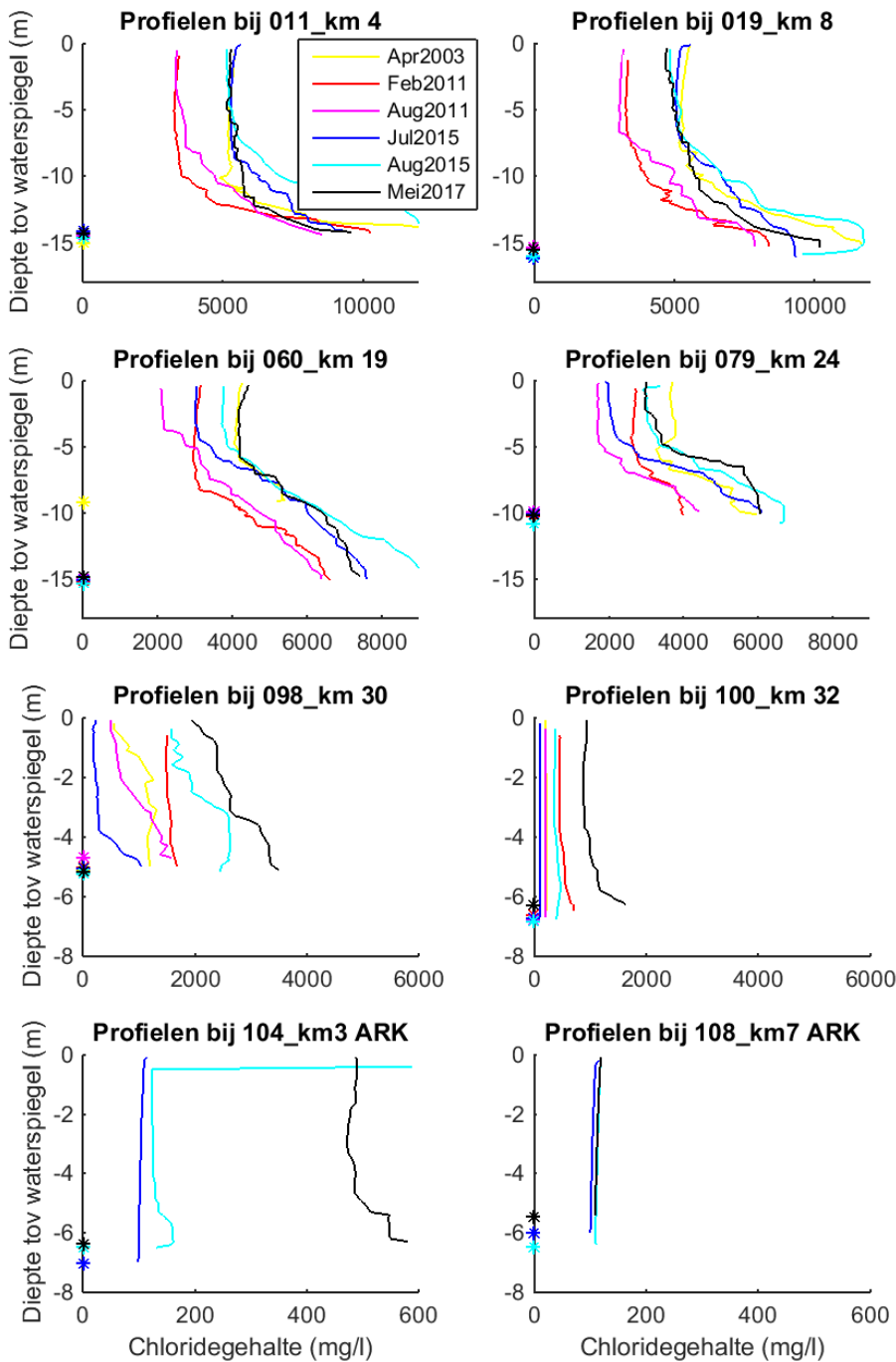
- In feb/maart 2011 geven zij getallen voor de afvoer bij Weesp, terwijl dan in de aangeleverde data langere perioden van hiaten (-999,99) voorkomen.
- In september vinden zij ook relatief hoge afvoeren, maar voor Weesp in de 28 dagen vooraf aan de meting komen wij op 40 m³/s (12% van de periode negerend vanwege ontbrekende gegevens) en zij op 84 m³/s. Dit verschil is fors. Een verschil is dat Arcadis de gegevens uit DONAR kregen via Rijkswaterstaat WNN en voor deze studie gegevens door de servicedesk zijn aangeleverd. Op basis van het rapport van Arcadis (2014) kon het verschil niet worden verklaard. Het is niet onderzocht of de tijdseries van de servicedesk en uit DONAR hetzelfde zijn.

2.2 Overeenkomsten en verschillen op hoofdlijnen tussen de 100-punten-metingen

2.2.1 Chlorideconcentraties

De geïnterpoleerde chloridegehalten vanaf het Binnenspuikanaal, langs de as van het Noordzeekanaal tot in de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal zijn voor ieder van de 100-punten-metingen weergegeven in bijlage A. In de onderste paar meter neemt de chlorideconcentratie af tot km 20, tot waar de diepte ongeveer 15 m NAP is. Een onregelmatigheid is te zien in de profielmeting bij km 10 in April 2003 (bijlage A), waar het water bij de bodem redelijk zoet is. Dit lijkt onrealistisch. Toch is deze profielmeting niet verwijderd, omdat de lage concentratie zowel in de neergaande als in de opgaande beweging van het instrument is gemeten en er zoetwaterlozingen zijn in dit gebied (mond. comm. Arjen Kikkert, 2017). Mogelijk kunnen deze zoetwaterlozingen kortstondig een verlaagde concentratie in de onderlaag veroorzaken. De verlaging is niet te zien in omliggende profielmetingen.

Vanaf km 20 tot km 28 neemt de bodemhoogte en daarmee ook het chloridegehalte af in de onderste laag. In de laag hierboven nabij het oppervlak neemt het chloridegehalte relatief snel af door de instroom van het zoete water vanuit het Amsterdam-Rijnkanaal. In de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal (Noordzeekanaal km 32 en Amsterdam-Rijnkanaal km 1-7) is het water over het algemeen zoet of hoogstens licht brak. De dichtheid is hoogstens 3 kg/m^3 groter dan de dichtheid van zoet water.



Figuur 2.2 Profielen van chloridegehalte (mg/l) op 8 locaties voor de zes 100-punten-metingen. * geeft de diepte tijdens de profielmeting aan.

De contourfiguren in bijlage A geven een ruimtelijk beeld langs het kanaal. Om de zoutprofielen goed te kunnen vergelijken zijn op 8 punten de chlorideprofielen weergegeven in Figuur 2.2. De onderste panelen tonen dat de profielen bij Amsterdam-Rijnkanaal km 7 over de gehele waterkolom zoet (rond 150 mg/l) waren, terwijl bij Amsterdam-Rijnkanaal km 3 alleen bij de meting van mei 2017 de chlorideconcentratie hoger was. Bij deze 100-punten-meting was de chlorideconcentratie ook bij km 30 en km 32 het hoogst. In het diepere gedeelte van het Noordzeekanaal (bovenste 4 panelen van Figuur 2.2) was het chloridegehalte op sommige diepten tijdens andere 100-punten-metingen groter dan in Mei 2017.

Voor de 100-punten-metingen in 2011 valt het op dat de chlorideconcentraties lager zijn in het Noordzeekanaal dan op de andere 4 momenten. Aan de hand van de spui-, maal- en schutgegevens bij IJmuiden kan worden nagegaan wat de oorzaak hiervoor is.

In 2015 zijn twee 100-punten-metingen uitgevoerd binnen twee weken. Het is opvallend dat bij de meting in augustus duidelijk hogere chlorideconcentraties zijn waargenomen, ook in het Noordzeekanaal. Hoewel het een zwak-dynamisch systeem is, zijn er toch aanzienlijke verschillen opgetreden binnen deze korte periode. Dit aanzienlijke verschil geeft aan dat de aanname dat binnen de periode van een profielmeting (Tabel 2.1) de chlorideconcentratie niet veel verandert niet altijd geldig is. Voor toekomstige metingen is het aan te bevelen dat een 100-punten meting binnen 3 dagen wordt gecompleteerd om de variatie binnen de periode te beperken.

De 100-punten-metingen van 2003 is ook weergegeven in bijlage A. Omdat 2003 gemiddeld een droog jaar was, werd de mogelijkheid open gelaten dat deze 100-punten-meting hogere chlorideconcentraties zou laten zien. Dat is niet het geval. Blijkbaar is de meting uitgevoerd na een periode met hogere afvoeren. De datum van de 100-punten-meting was niet aangegeven in de gegevens. Bij navraag heeft Arjen Kikkert aangegeven dat de datum waarschijnlijk 23 april was (Tabel 2.1). Bij de selectie van 100-punten-metingen die binnen dit onderzoek geanalyseerd konden worden, is deze meting vanwege de onzekerheid in het meetmoment en de veranderende omstandigheden tussen 2003 en heden (primair de aanpassingen aan de geometrie bij Zeeburg) niet meegenomen.

2.2.2 Verklaring overeenkomsten en verschillen

Verklaringen voor verschillen tussen de 100-punten-metingen kunnen worden gezocht in variaties in de geometrie van de kanalen, in variaties in lozingen en onttrekkingen, variaties in de hoeveelheid chloride die via sluizen en kwel in dieper liggende polders in de kanalen is gekomen en variaties in het debiet door het Amsterdam-Rijnkanaal. In dit onderzoek is met name gekeken in hoeverre het debiet door het Amsterdam-Rijnkanaal van invloed is op de zoutindringing in het Noordzeekanaal-Amsterdam-Rijnkanaal.

Geometrie

Wat betreft geometrie is voor het Amsterdam-Rijnkanaal een grote verandering dat het sluseiland en de drempel bij Zeeburg zijn weggehaald in een periode tot en met 2014. Echter, alleen bij de 100-punten-metingen na deze verandering zijn ook metingen uitgevoerd tot en met Amsterdam-Rijnkanaal km 7, dus kunnen verschillen door verwijdering van het sluseiland op verzilting van het Amsterdam-Rijnkanaal niet op basis van deze metingen beschreven worden.

Lozingen en onttrekkingen

Bij de gemeten chlorideconcentraties is het goed om te bedenken dat binnen een dag aanzienlijke variaties kunnen optreden. Onder andere door de translatiegolven veroorzaakt door het starten en stoppen van het spuien maakt het uit wanneer op een dag of wanneer in de periode van de 100-punten-meting (Tabel 2.1) het chloridegehalte is gemeten.

Hoewel de daggemiddelde stroomsnelheden relatief klein zijn (0,1-0,2 m/s in het Amsterdam-Rijnkanaal), kan binnen enkele dagen het chloridegehalte behoorlijk verschillen. In de twee 100-punten-metingen van 2015 met een week ertussen is het chloridegehalte op enkele locaties 2000 mg/l lager tijdens de meting van Aug2015. Dit geeft aan dat ondanks het zwak-dynamische karakter ook binnen de periode van een 100-punten-meting behoorlijke verschillen kunnen optreden. Een verklaring hiervoor kan worden gevonden in het debiet op het Amsterdam-Rijnkanaal.

Debiet Amsterdam-Rijnkanaal

Voor deze studie zijn de gemeten chlorideconcentraties gerelateerd aan de afvoer in het Amsterdam-Rijnkanaal. De afvoer tijdens en voorafgaand aan de 100-punten-metingen van 2011, 2015 en 2017 is gegeven in

Tabel 2.2 en Tabel 2.3. De daggemiddelde afvoer tijdens de vijf 100-punten-metingen na 2010 is getoond in Figuur 2.3. De laagste afvoer bij Weesp en Maarsse treedt op gedurende de 100-punten-meting van Aug2015. Ook 5 en 10 dagen voorafgaand aan deze meting was de afvoer lager dan bij andere 100-punten-metingen. Op basis van deze lage afvoer kan de aanzienlijke verhoging in chlorideconcentratie van Aug2015 ten opzichte van een ruime week eerder (Jul2015) kwalitatief worden verklaard. Vanwege de relatief lage daggemiddelde afvoer, werd het zout weinig teruggedrongen en gemengd in de verticaal en kon het chloride relatief ver het Amsterdam-Rijnkanaal indringen.

De reden dat chloride in Jun2017 verder het Amsterdam-Rijnkanaal binnen drong dan tijdens Aug2015 is waarschijnlijk de historie. In jul2015 is de oostkant van het Noordzeekanaal en het IJ waarschijnlijk zoeter dan andere momenten, terwijl de afvoer 20-30 dagen voor de meting van mei2017 al laag was (

Tabel 2.2), waardoor zout verder de kanalen in heeft kunnen trekken.

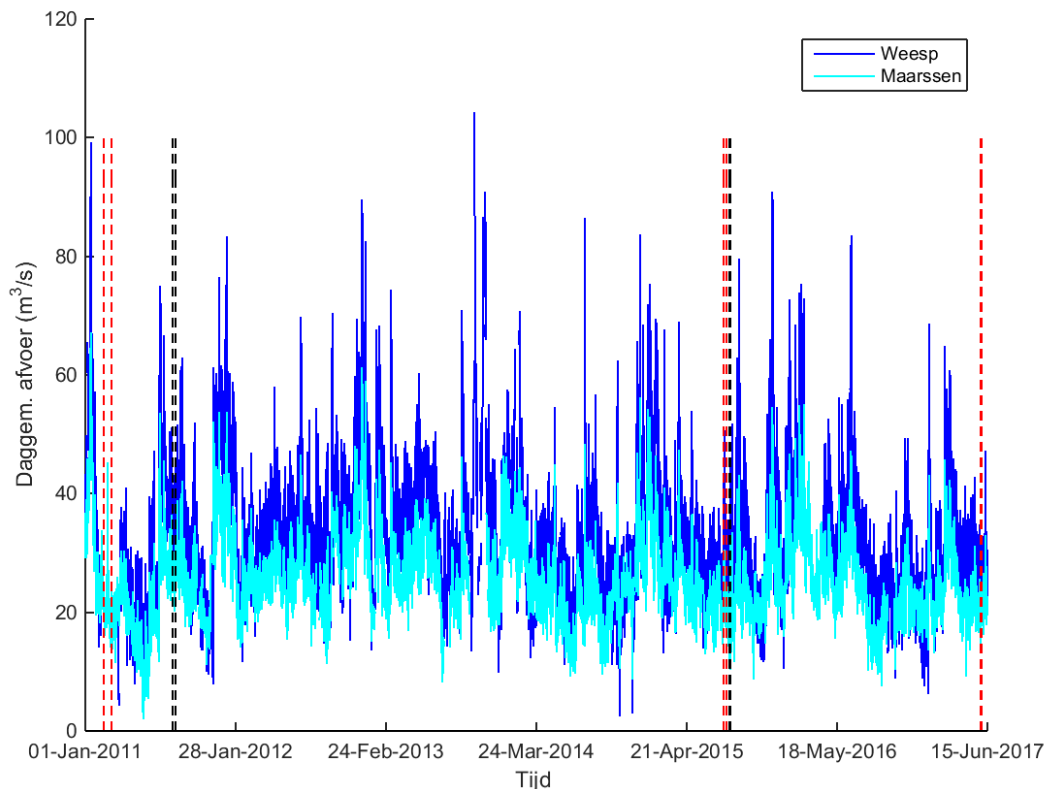
Tijdens de overige drie 100-punten-metingen is de afvoer ongeveer gemiddeld of net onder het gemiddelde. De afvoer gemiddeld over de 100-punten periode ligt dichtbij de afvoer gemiddeld over de periode 2010 tot juni 2017 (getoond in Figuur 2.3), welke bij Weesp 34 m³/s en bij Maarssen 26 m³/s is. De wat lagere afvoer tijdens en voorafgaande aan de 100-punten-metingen van Februari 2011 bij Maarssen in vergelijking met Augustus 2011 (Tabel 2.3) is blijkbaar slechts aanleiding voor een lichte verhoging van de zoutconcentraties (Figuur 2.2). Dit kan er op wijzen dat de afvoer onder een drempelwaarde is gekomen, waarbij chloride het IJ en het Amsterdam-Rijnkanaal binnendringt. Bij augustus 2015 en mei 2017 lijkt deze drempelwaarde wel overschreden.

Tabel 2.2 Afvoer bij Weesp (m^3/s) gemiddeld over de perioden waarin 100-punten-metingen zijn uitgevoerd en gemiddeld over voorafgaande perioden. De laagste afvoeren zijn blauw gemarkeerd.

	18-Feb -- 10-mar 2011	16-aug-- 25-aug 2011	27-Jul -- 3-aug 2015	10-aug -- 13-aug 2015	29-may -- 01-jun 2017
Gemiddeld over meetperiode		34.6	35.2	22.3	24.8
5 d vooraf		35.3	38.7	24.7	26.2
10 d vooraf		37	32.3	26.2	26.7
20 d vooraf		37.2	29.8	29.9	28.2
30 d vooraf			28.2	29.2	28.9
50 d vooraf		38.1	27.4	27.9	28.8
90 d vooraf		30.3	28.1	27.7	32.5

Tabel 2.3 Afvoer bij Maarssen (m^3/s) gemiddeld over de perioden waarin 100-punten-metingen zijn uitgevoerd en gemiddeld over voorafgaande perioden

	18-Feb -- 10-mar 2011	16-aug-- 25-aug 2011	27-Jul -- 3-aug 2015	10-aug -- 13-aug 2015	29-may -- 01-jun 2017
Gemiddeld over meetperiode	22	26	23.6	15.8	20.1
5 d vooraf	22.9	26.9	26	17.9	20.6
10 d vooraf	21.2	27.5	22.6	18.8	20.5
20 d vooraf	22.6	27	22.5	20.8	21.6
30 d vooraf	23.1	29	21.8	21.3	21.5
50 d vooraf	30.9	27.4	21.3	21.1	20.9
90 d vooraf	31.5	21.7	21.8	21.2	23.9



Figuur 2.3 Afvoer gemiddeld over 24,8 uur bij Weesp en bij Maarssen, met de perioden van 5 100-puntenmetingen aangegeven in zwart en rood. Vooral bij Weesp ontbreken gegevens tijdens enkele perioden.

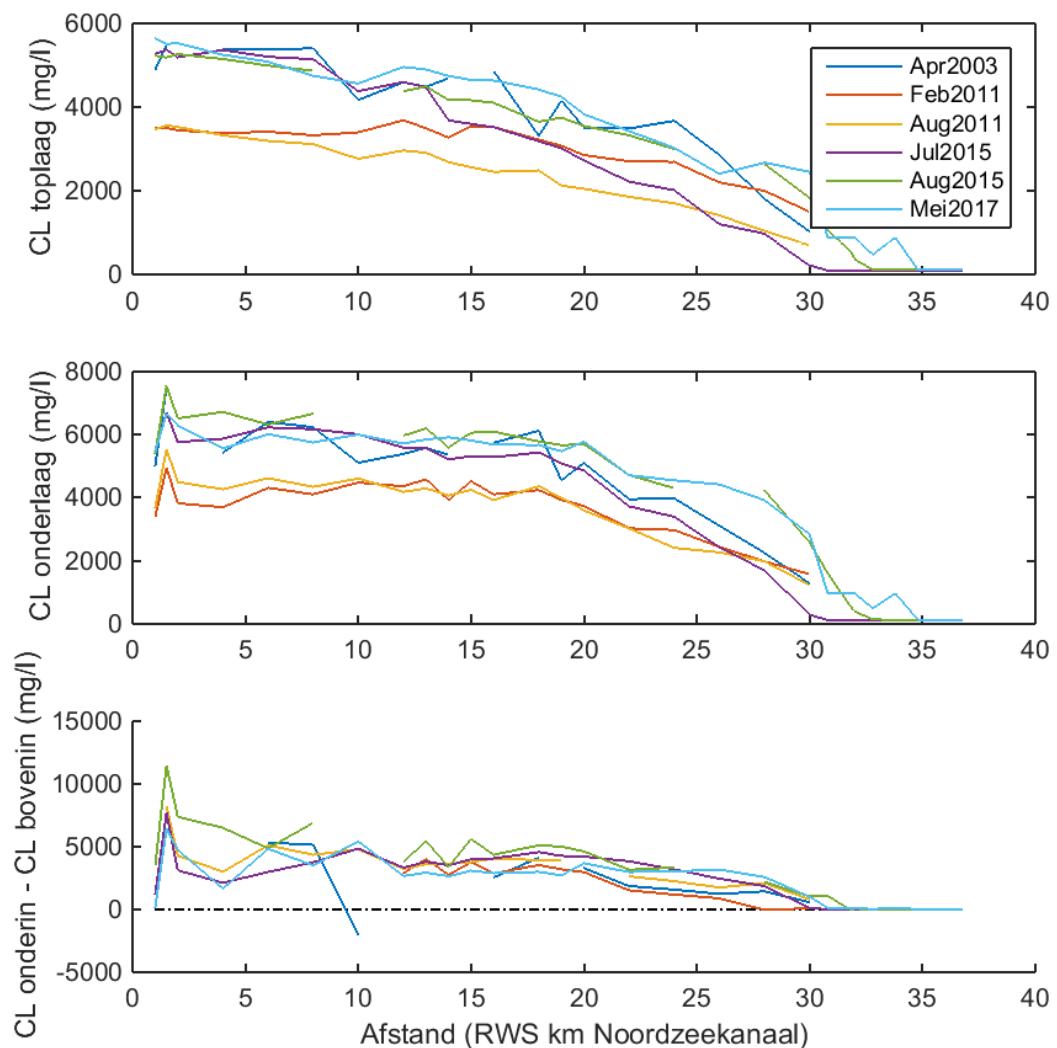
2.3 Chloride in de bovenlaag en de onderlaag

Het Noordzeekanaal bestaat uit een zoute onderlaag en een zoetere bovenlaag. In de zoete bovenlaag wordt het meeste zoete water van het Amsterdam-Rijnkanaal afgevoerd naar IJmuiden, aangezien menging met het zoutere water beperkt is vanwege de relatief lage stroomsnelheden. De chlorideconcentratie is in deze twee lagen gemiddeld om een beeld te krijgen van de verdeling van chloride langs het kanaal.

Voor het middelen van chloridewaarden in de bovenlaag is de laag tussen -0,5 tot -3,0 m vanaf het wateroppervlak gekozen, zodat enkele onrealistische uitschieters in de bovenste 0,5 m van het profiel niet werden meegenomen. De grens van -3,0 m is gekozen, omdat hierboven de chlorideconcentratie nauwelijks verandert met de diepte en niet wordt beïnvloed door zoutverspreiding langs de bodem (zie bijvoorbeeld Figuur 5.5 bij km 28 van het Noordzeekanaal).

De onderlaag is per profiel gedefinieerd tussen -3,0 m tot de hoogte van de bodem bepaald op basis van de 100-punten-meting van februari 2011 plus 1,5 m (tussen -14 m en -5 m). Dit betekent dat de onderlaag op locaties met grote waterdiepte bestaat uit een groter deel van de waterkolom (Noordzeekanaal) in vergelijking met de onderlaag in het Amsterdam-Rijnkanaal. Het weglaten van gemeten chlorideconcentraties onder de bodemligging van februari 2011 plus 1,5 m was nodig, omdat tijdens sommige profielen de diepte kleiner was dan in februari 2011. In bijlage A is voor ieder profiel met een * de diepte aangegeven tot waar is gemeten. Bijvoorbeeld verschilt de diepte tot enkele meters bij Noordzeekanaal km 20 of Noordzeekanaal km 22. Deze verschillen in diepte kunnen worden verklaard door een

verandering in bodemhoogte of doordat een profielmeting net op een andere locatie is uitgevoerd dan bij andere 100-punten-metingen. Door te middelen over de aangegeven onderlaag wordt het effect van de verschillen in diepte tussen 100-punten-metingen beperkt.



Figuur 2.4 Chlorideconcentratie gemiddeld over de bovenlaag (-0,5 tot -3,0 m), over de onderlaag (-3,0 tot 1,5 m boven de bodem) en het verschil daartussen voor de zes 100-punten-metingen

De chlorideconcentratie in de bovenlaag en onderlaag neemt geleidelijk af van IJmuiden naar de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal (bovenste en middelste plot van Figuur 2.4). Vanaf Noordzeekanaal km 20 tot in de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal is de chlorideconcentratie in beide lagen relatief hoog. Het verschil tussen de beide lagen is een maat voor de stratificatie (onderste plot van Figuur 2.4). Dit verschil is voor Aug2015 het grootst in het Noordzeekanaal tot Noordzeekanaal km 20.

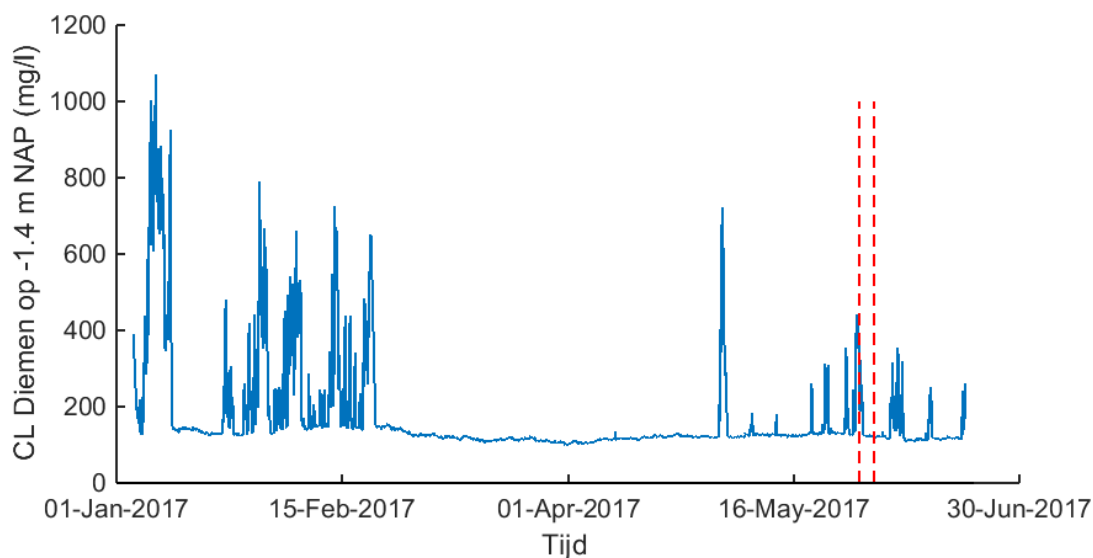
Zoals geobserveerd op basis van de contourfiguren in bijlage A, toont Figuur 2.4 dat vanaf Noordzeekanaal km 20 tot km 28 de gradiënt in de lengterichting langs het kanaal het grootst is in zowel de boven- als onderlaag. In dit gebied met afnemende diepte vanuit IJmuiden gezien, mengt het zoete water uit het Amsterdam-Rijnkanaal met het zoutere water. Voor zoutindringing naar het Amsterdam-Rijnkanaal is het van belang of het zout in dit gebied omhoog kan kruipen tot aan de diepte van de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal (ongeveer 6 m), zodat het langs de bodem (vooral door de gravitatiecirculatie) verder het Amsterdam-Rijnkanaal in kan worden getransporteerd.

2.4 Tussentijdse conclusies

- 1 De variatie langs het kanaal in chloridegehalten tussen de 100-punten-metingen is niet groot. De monding van het Amsterdam-Rijnkanaal is bij alle 100-punten-metingen vrij zoet.
- 2 Door de geringe verschillen is de relatie met afvoer in het Amsterdam-Rijnkanaal beperkt aantoonbaar, ook doordat het systeemgedrag complex is.
- 3 Bij de laatste twee 100-puntenmetingen is het chloridegehalte bij de monding in het Amsterdam-Rijnkanaal hoger. Een verklaring hiervoor is dat de afvoer licht lager is in de 5-10 dagen voorafgaand aan deze metingen.

2.5 Representativiteit voor pieken van zoutindringing

De zes 100-punten-metingen zijn uitgevoerd op momenten dat de zoutindringing in het Amsterdam-Rijnkanaal beperkt was. Tijdens de 100-punten-meting van juni 2017 was de zoutindringing op het Amsterdam-Rijnkanaal het grootst. De tijdserie in 2017 van chlorideconcentraties bij Diemen (Figuur 2.5) toont dat deze 100-punten van 2017 gemeten is tijdens een relatief kleine piek in chlorideconcentratie. In januari en februari en op 1 mei kwamen duidelijk grotere pieken voor in de chlorideconcentratie op -1,4 m NAP. Dit geeft aan dat de 100-punten-metingen minder geschikt zijn om te leren over de werking van het systeem op momenten met grote indringing van chloride in het Amsterdam-Rijnkanaal.



Figuur 2.5 Chlorideconcentratie bij Diemen (bovenin de waterkolom) met in rood de periode wanneer de 100-punten-meting van 2017 is uitgevoerd.

2.6 Hypothese over zoutindringing in het Amsterdam-Rijnkanaal

Aan de hand van de geanalyseerde 100-punten-metingen is relatie van zoutindringing met afvoer in het Amsterdam-Rijnkanaal beperkt aangetoond. Wel is de analyse aanleiding geweest voor het opstellen van een hypothese over menging in het systeem. De aanleiding is dat stroomsnelheid in het Amsterdam-Rijnkanaal is bepaald uit de debieten en de plaatselijke natte doorsnede in het Amsterdam-Rijnkanaal. Op basis van de variatie in stroomsnelheid door het pseudo-getij en op basis van theorie en systeeminzicht, is een hypothese opgesteld voor dit systeem.

Zout dringt het Amsterdam-Rijnkanaal binnen door de gravitatiecirculatie en door moleculaire en turbulente diffusie. Door advectie met de netto stroming wordt de gehele waterkolom gemiddeld naar zee getransporteerd. Door de gravitatiecirculatie verspreidt zout water zich echter langs de bodem landinwaarts en stroomt zoetwater hoger in de waterkolom zeewaarts, waardoor de stratificatie wordt versterkt. Door menging in de verticaal wordt de stratificatie verminderd. Het Noordzeekanaal-Amsterdam-Rijnkanaal is zwak dynamisch: door de lage stroomsnelheden is er weinig menging en is de verversingstijd van het water in de orde van maanden. Dit verzoeten van het systeem gaat langzamer dan verzilten (Karelse en van Gils, 1991).

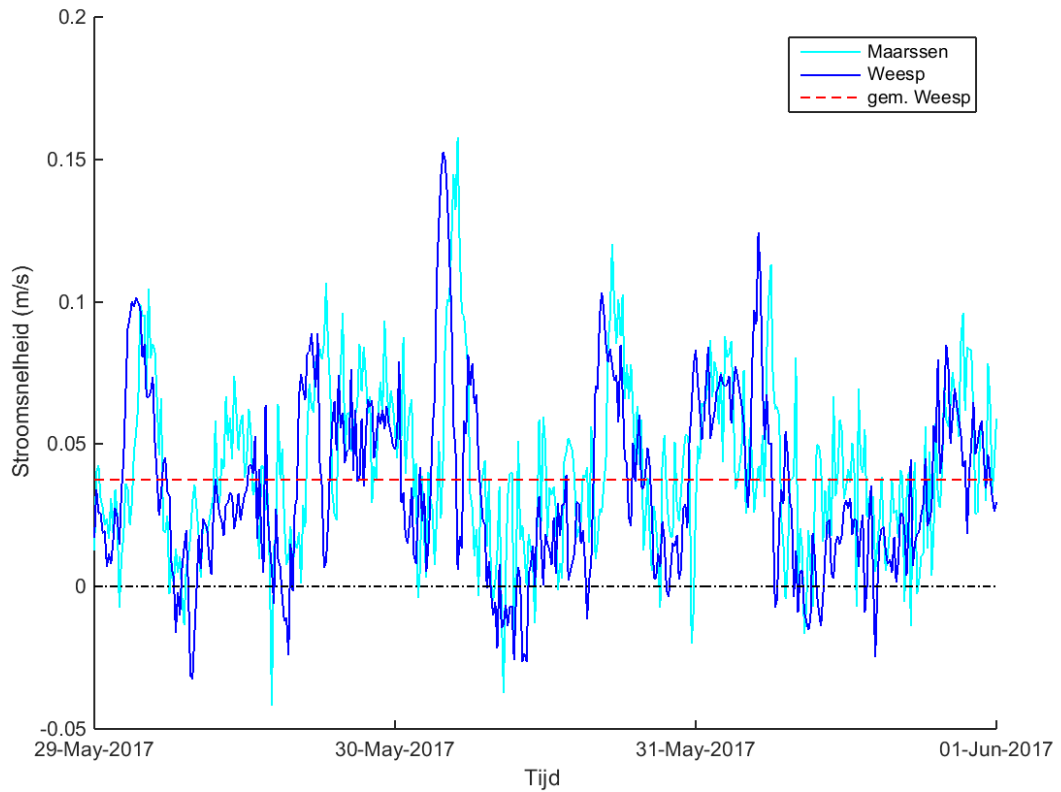
De kanalen blijven zoet of brak doordat zoet water met de stroming door het Amsterdam-Rijnkanaal naar IJmuiden wordt verplaatst. Advectie is dus waarschijnlijk het belangrijkste. Naast de gemiddelde stroming naar IJmuiden, zijn er fluctuaties in het hele systeem. Na een periode van intensief spuien tijdens laagwater op zee, keert de stroming in de kanalen vaak om (HKV, 2016). Voor estuaria wordt met het estuariumgetal bepaald of het gestratificeerd is of juist goed gemengd. In het estuariumgetal is de menging door getij (destratificierend) gerepresenteerd door het kwadraat van de vloednelheid. Bij een grote vloednelheid is de menging groot. Naar analogie met estuaria, is een hypothese opgesteld voor het kanalsysteem met pseudo-getij. De hypothese is dat extra menging optreedt die evenredig is met het kwadraat van de variatie van de stroomsnelheid, waardoor de gravitatiecirculatie wordt beperkt en daarmee ook zoutindringing langs de bodem.

De hypothese wordt ondersteund door de genoemde bevinding in HKV (2016) dat bij simulaties zonder translatiegolven (fluctuaties in waterstand en debiet) chloride verder langs de bodem in het Amsterdam-Rijnkanaal binnendringt.

De hypothese dat de fluctuatie in de stroming door translatiegolven een beperkende rol speelt voor zoutindringing kan getoetst worden door een meting. Er zijn verschillende mogelijkheden voor deze meting, welke samen met Rijkswaterstaat praktisch uitgewerkt kunnen worden in een draaiboek voor metingen. In het draaiboek staat beschreven hoe en bij welke condities op welke locaties wordt gemeten.

Ook kan een model worden ingezet om de relevante processen voor menging te bepalen. Met een model kan bijvoorbeeld worden bepaald hoe groot de rol is van het optreden van kentering en daarmee tijdelijk een verhoogde schering in het snelheidsprofiel ten opzichte het verhogen van de turbulentieproductie. Ook kan de invloed van faseverschillen in de verticaal bepaald worden.

De hier gestelde hypothese kan indien onderbouwd bijdragen aan een inschatting van de forceringen van zoutindringing. Daarnaast kan deze hypothese helpen bij het afschatten van het benodigde doorspoeldebiet, welke nu (door RWS empirisch uit metingen afgeleid voor de drempelwaarde) wordt geschat op 25 m³/s voor vijf achtereenvolgende dagen. Als de hypothese waar is, betekent dit dat variaties in afvoer gedurende een dag de mate van zoutindringing verminderen. Dit wordt toegelicht in Figuur 2.6 voor drie dagen. De stroomsnelheden bij Maarssen en bij Weesp variëren ongeveer tussen -0,04 en 0,16 m/s. Zonder fluctuaties in het debiet zou de stroomsnelheid gemiddeld over deze drie dagen 0,04 m/s zijn (rode lijn in Figuur 2.6). De fluctuaties hebben een amplitude gemiddeld over deze periode van ongeveer 0,07 m/s. De extra grenslaagmenging ten opzichte van de rode lijn, zou evenredig zijn met 0,07 in het kwadraat. Voor andere perioden is de amplitude en dus ook de extra menging van vergelijkbare grootte.



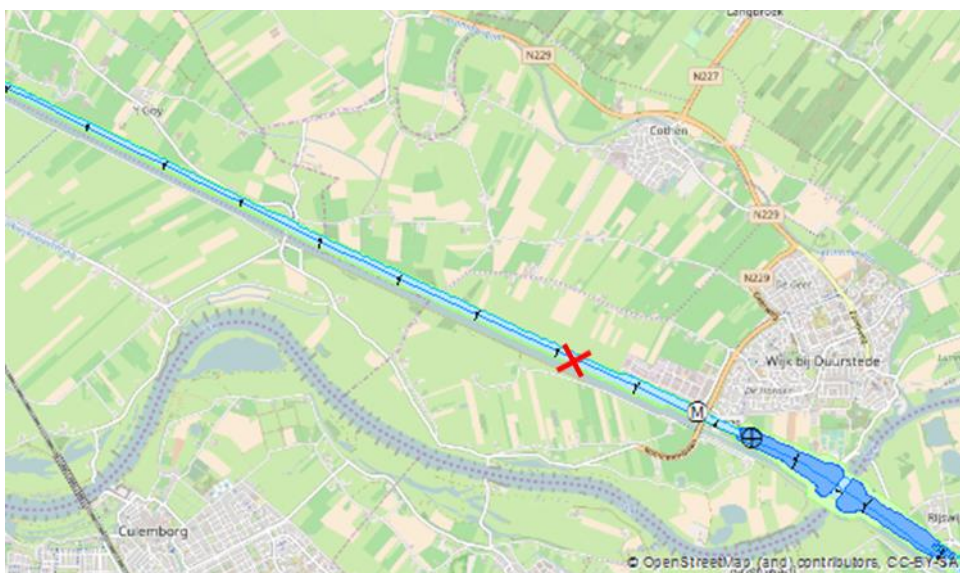
Figuur 2.6 Stroomsnelheid (debiet gedeeld door de natte doorsnede) gedurende de 100-punten periode van Mei2017. De rode lijn geeft het gemiddelde bij Weesp weer voor deze periode.

Indien de hypothese correct wordt bevonden, kan het gelijkmatiger sluiten van de spuikokers (aanbevolen in HKV, 2016) gevolgen hebben voor de zoutindringing. De verwachting is dat hierdoor de translatiegolven kleiner worden. Een bijkomend effect hiervan zou kunnen zijn dat menging in het Amsterdam-Rijnkanaal afneemt en dat daardoor zout verder het Amsterdam-Rijnkanaal kan binnendringen.

3 Fluctuatie van de afvoer bij Wijk bij Duurstede

3.1 Inleiding

Aanleiding voor dit hoofdstuk is dat de afvoer van belang is voor het doorspoelen van het kanaal tegen zoutindringing. Om deze reden is het van belang te weten wat de werkelijke afvoer is bij Wijk bij Duurstede en of de afvoer werkelijk zo fluctueert als op basis van metingen wordt bepaald. Deze afvoer wordt bepaald op basis van een stroomsnelheidsmeting met een akoestische debietmeter (ADM) ter hoogte van km 57. De waterstand die beschikbaar is binnen het Landelijk Meetnet wordt vlakbij de Prinses Irenesluizen bepaald (Figuur 3.1).



Figuur 3.1 Het Amsterdam-Rijnkanaal bij Wijk bij Duurstede ten noorden van Lek. Het debietmeetpunt bij Wijk bij Duurstede (rode kruis) ligt op Amsterdam-Rijnkanaal km 57 en het waterstandmeetpunt ligt 1,7 km richting Neder-Rijn vlakbij de Prinses Irenesluizen (omcirkelde M).

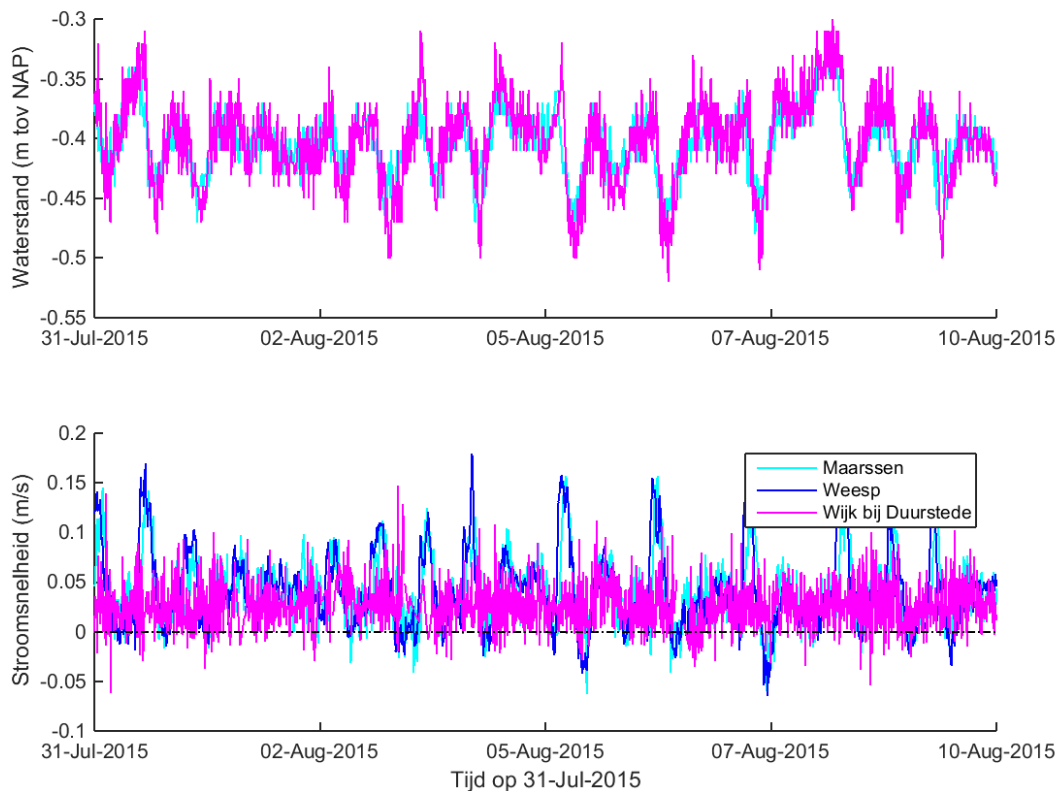
Het debiet bij Wijk bij Duurstede is gemiddeld over meerdere jaren $18 \text{ m}^3/\text{s}$ (voor 2010-2015 bepaald voor deze studie en voor 2000-2016 door Hydrologic (2016)). Ongeveer $10 \text{ m}^3/\text{s}$ komt in het Amsterdam-Rijnkanaal via het WaterInlaatSysteem en ongeveer $8 \text{ m}^3/\text{s}$ via het schutten (Hydrologic, 2016). De waterstand in de Lek is hoger dan in het Amsterdam-Rijnkanaal, waardoor onder vrij verval water kan worden ingelaten. Ook vanuit de Prinses Irenesluis wordt water geschut naar het Amsterdam-Rijnkanaal.

3.2 Stroomsnelheid en waterstand

Op basis van het debiet bij Wijk bij Duurstede is de stroomsnelheid gemiddeld over de dwarsdoorsnede bepaald door te delen door de natte doorsnede. De natte doorsnede is bepaald op basis van het dwarsprofiel dat voor het SOBEK model is bepaald. Om te kunnen beoordelen of de debieten realistisch kunnen zijn, is de variatie in stroomsnelheid vergeleken met de variatie in waterstand.

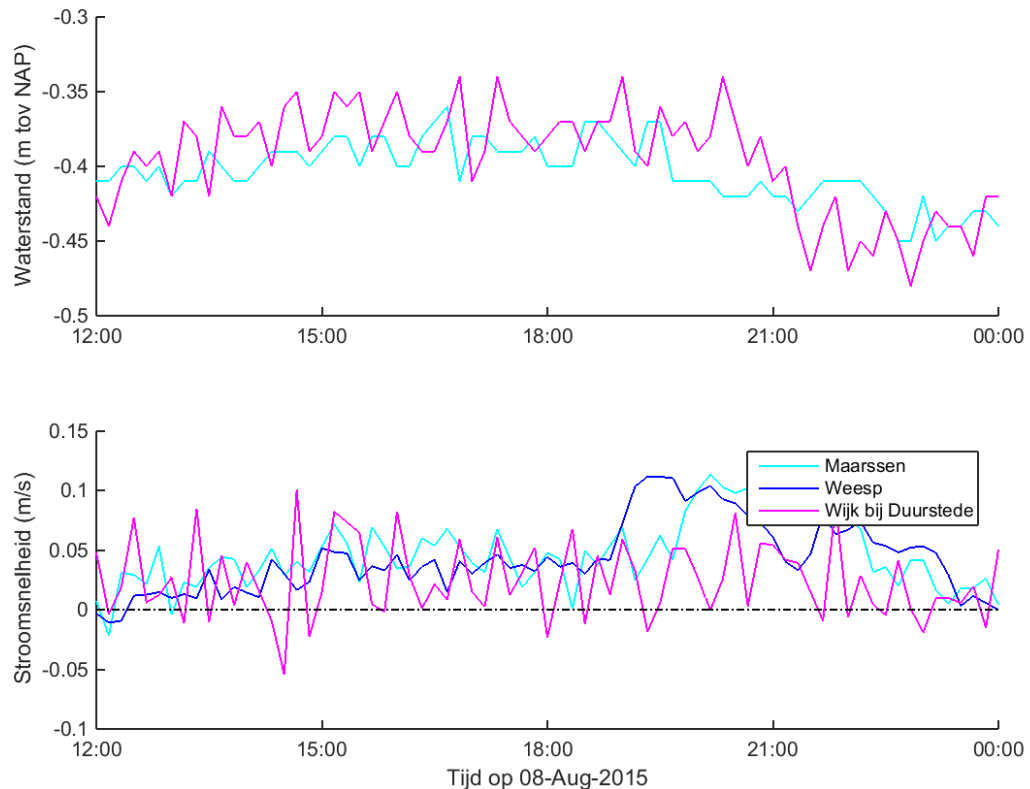
Voor 10 dagen rond de 100-punten perioden van juli en augustus 2015 toont Figuur 3.2 waterstand en stroomsnelheid bij Wijk bij Duurstede. Ter vergelijking worden ook de waterstand bij Maarssen en bij Weesp getoond.

Net als bij Maarssen varieert de waterstand bij Wijk bij Duurstede met het pseudo-getij, wat waarschijnlijk wordt veroorzaakt door het spuien tijdens laagwater op zee. In tegenstelling tot de waterstand bij Wijk bij Duurstede, is in de stroomsnelheid geen variatie met een periode van 12,5 uur waar te nemen. Op deze locatie aan het eind van het kanaalpand ligt de stroomsnelheid meestal tussen -0,05 en 0,2 m/s en is gemiddeld over 2015 0,03 m/s.



Figuur 3.2 Waterstand en dwarsdoorsnede gemiddelde stroomsnelheid gedurende 10 dagen vanaf 30 juli 2015

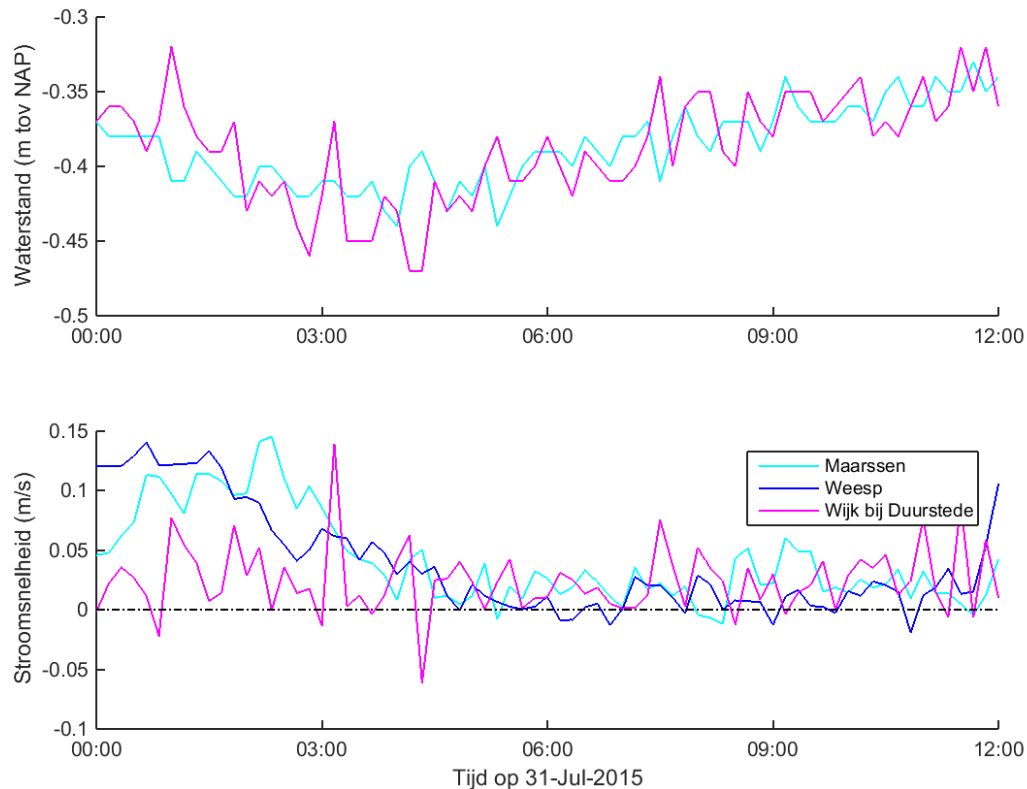
Om de vraag te beantwoorden of de fluctuatie van de afvoeren op basis van de ADM bij Wijk bij Duurstede realistisch kunnen zijn, worden voor twee voorbeeldperioden waterstand en stroomsnelheid getoond. Figuur 3.3 toont 12 uur van de periode weergegeven in Figuur 3.2, waarin de tijdstap van 10 minuten van de beide metingen zichtbaar is. Een variatie in zowel waterstand als stroomsnelheid met een periode van minder dan een uur is waar te nemen. Om de periode preciezer te kunnen bepalen zijn hoogfrequentere metingen nodig. De minima in de stroomsnelheid (in enkele gevallen negatief) vallen samen of direct na de minima in de waterstand. Daarnaast valt het op dat de schommeling in stroomsnelheid met een periode van minder dan een uur groter is dan in Maarssen en in Weesp.



Figuur 3.3 Waterstand en dwarsdoorsnede gemiddelde stroomsnelheid gedurende 12 uur op 8 augustus 2015

De negatieve stroomsnelheden kunnen deels verklaard worden door een stijging van de waterstand in het kanaalpand van 1,7 km tussen de ADM en de sluisen (Figuur 3.1). Net na 14:00 op 8 augustus 2015 zijn er twee 10-minuten waarden van de stroomsnelheid negatief. Gemiddeld is de stroomsnelheid $-0,04$ m/s, wat een toename van het volume ten zuiden van de ADM op zou leveren van 25.000 m³. Dit volume gedeeld door de 1700 m lengte en de 126 m breedte van het kanaal levert een gemiddelde waterstandsstijging van 12 cm. De gemeten waterstandsstijging is slechts 5 cm, dus kan door deze eenvoudige massabehoud controle de negatieve afvoer slechts deels worden verklaard. De overige negatieve stroomsnelheden in Figuur 3.3 kunnen wel volledig worden verklaard door een toename in waterstand op dat moment of de tijdstap daarop volgend.

Een andere voorbeeldperiode is getoond in Figuur 3.4 met een behoorlijke negatieve afvoer net na 4:00. Volgens de eenvoudige massabehoud methode zou de waterstand op basis van de negatieve afvoer in deze enkele tijdstap 10 cm stijgen, hoewel volgens de meting bij de sluis de stijging slechts 6 cm is. Voor deze negatieve afvoer kan dus de negatieve stroomsnelheid niet volledig worden verklaard, aannemend dat het niet om een meetfout gaat. Net als voor het voorbeeld van 8 augustus 2015 kunnen de overige negatieve afvoeren op 31 juli 2015 volledig worden verklaard uit een stijging van de waterstand.



Figuur 3.4 Waterstand en dwarsdoorsnede gemiddelde stroomsnelheid gedurende 12 uur op 31 juli 2015

Deze twee voorbeelden zijn geselecteerd, omdat een voor deze locatie relatief aanzienlijke negatieve stroomsnelheid voorkomt in deze perioden van 12 uur. In 2015 zijn er slechts 16 10-minuten waarden van de stroomsnelheid bij Wijk bij Duurstede kleiner is dan $-0,06$ m/s (ongeveer -40 m³/s, waarbij volgens de simpele massabehoud methode de waterstand bij de Prinses Irenesluis 10 cm stijgt). De negatieve afvoeren op 8 augustus zijn de enige in 2015, waarbij twee opeenvolgende afvoeren negatief zijn. Zowel de negatieve als de piekafvoer per uur treden dus hoogstens 20 minuten op en meestal slechts 10 minuten.

3.3 Discussie

Uit de metingen met een meetinterval van 10 minuten valt af te leiden dat de afvoer bij Wijk bij Duurstede varieert met een periode van minder dan een uur. Om deze periode preciezer te bepalen zijn hoogfrequentere metingen nodig. Door de variatie komt het vrijwel iedere dag voor dat de afvoer kortdurend negatief is. De stroomsnelheid ligt meestal tussen $-0,05$ en $0,2$ m/s, terwijl de waterstand meestal 1-7 cm varieert binnen een periode van minder dan een uur. Het lijkt erop dat deze schommeling met een periode van minder dan een uur wordt veroorzaakt door het legen van de kolk(en) van de Prinses Irenesluizen bij Wijk bij Duurstede. Bij een verhang van 5 m over de Prinses Irenesluizen, berekende WL Delft (1972) dat variaties in waterstand van 0,3 tot 0,5 m bij Wijk bij Duurstede zouden optreden als gevolg van een translatiegolf. De kleinere variatie in waterstand met een periode van minder dan een uur op andere waterstandsstations, laat zien dat de translatiegolven van de Prinses Irenesluizen daar grotendeels zijn uitgedempt.

Gemiddeld over 2015 is de stroomsnelheid bij Wijk bij Duurstede $0,03$ m/s.

Bij deze lage stroomsnelheden is de relatieve onnauwkeurigheid van de afvoer groter dan bij afvoermetingen bij grotere stroomsnelheid, zoals in de rivier. De onnauwkeurigheid van het debiet bepaald met een ADM ligt over het algemeen tussen 5 en 10% (ISO, 2004). Bij lage stroomsnelheden is deze relatieve fout normaalgesproken groter, doordat een deel van de onnauwkeurigheid wordt veroorzaakt door een systematische absolute fout. Voorbeelden die tot een systematische fout leiden zijn fouten in de meetopstelling (inmeten sensoren) of verwerking tot debiet (bijvoorbeeld de vermenigvuldiging met de gekalibreerde k-factor). Bij stroomsnelheden die gemiddeld rond 0,03 m/s liggen, is de kans op foutief ingeschatte hoge of lage debieten groter.

Bij uitzondering is de afvoer lager dan $-40 \text{ m}^3/\text{s}$. Een dergelijke negatieve afvoer gedurende een meetinterval van 10 minuten kwam in 2015 16 keer voor. Dergelijke lage afvoeren konden maar deels worden verklaard uit de gemeten waterstandsvariatie. Mogelijk zijn deze uitschieters veroorzaakt door een meetfout. Een meetfout die bij uitzondering voorkomt zou bijvoorbeeld kunnen worden veroorzaakt door een rij van diepliggende binnenvaartschepen, welke gedurende (een deel van) het 10 minuten durende meetinterval passeert en daarmee de stroomsnelheid op de meethoogte van de ADM beïnvloed. Gezien de korte duur van optreden en de simpele methode die is gebruikt om te vergelijken met waterstand, zouden de afvoeren lager dan $-40 \text{ m}^3/\text{s}$ realistisch kunnen zijn.

Voor het merendeel van de tijd kunnen de fluctuaties in afvoer verklaard worden uit de waterstandsvariaties. Daarmee lijken de gemeten afvoeren realistisch op mogelijk een enkele uitzondering na.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

(1) Het doel van de analyse van de 100-punten-metingen was om inzicht te verkrijgen over zoutverspreiding in de verticaal en in de langsrichting van de kanalen op basis van 100-punten-metingen. Voor de condities tijdens en in de periode voorafgaand aan deze 100-punten-metingen is inzicht verkregen in de zoutverdeling. De chlorideconcentratie in de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal is gerelateerd aan de afvoer in het Amsterdam-Rijnkanaal gemiddeld over dagen tot maanden voorafgaand aan de 100-punten-meting.

Profielen van de chlorideconcentratie langs de as van het Noordzeekanaal op zes momenten over een periode van 14 jaar laten de verspreiding zien van zout dat bij IJmuiden het Noordzeekanaal binnen komt. In de onderste laag neemt de concentratie snel af landinwaarts van Noordzeekanaal km 20, waar de bodemhoogte begint toe te nemen van -15 naar ongeveer -6 m NAP. Deze zoutere onderlaag wordt gemengd met het zoetere water van het Amsterdam-Rijnkanaal. Het zout dringt niet verder binnen dan Weesp tijdens deze zes momenten. In de metingen van mei 2017 kwam zout het verst landinwaarts. De afvoer in de 5-10 dagen voorafgaand aan de 100-punten-metingen was het laagst in augustus 2015. Een mogelijke verklaring voor de hogere chlorideconcentratie in mei 2017 is dat meer chloride nabij de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal aanwezig was. Mogelijk was het zout dat was binnen gedrongen ongeveer 30 dagen voor de 100-punten-meting nog niet volledig weggespoeld naar zee.

Op basis van de metingen bij Diemen van chlorideconcentratie is duidelijk dat geen van de zes metingen is uitgevoerd tijdens een periode met sterke zoutindringing in het Amsterdam-Rijnkanaal. Een hypothese is opgesteld dat het kwadraat van de variatie van de stroomsnelheid door het periodiek spuien van belang is voor menging en daarmee voor hoe ver het zout kan indringen. Hoe groter het kwadraat van de stroomsnelheid, hoe minder ver het zout kan binnen dringen.

(2) Het doel van de analyses van het debiet in het Amsterdam-Rijnkanaal bij Wijk bij Duurstede was om na te gaan of de fluctuaties in debiet die worden bepaald uit metingen realistisch kunnen zijn. Gebleken is dat voor het merendeel van de tijd de fluctuaties in afvoer verklaard worden uit de waterstandsvariaties, waarmee ze realistisch kunnen zijn.

De afvoer en waterstand bij Wijk bij Duurstede fluctueren met een periode van minder dan een uur. Door deze fluctuatie komt het vrijwel iedere dag voor dat de afvoer kortdurend negatief is. De afvoerfluctuatie kan meestal worden verklaard als gevolg van toenemende waterstanden stroomopwaarts van het snelheidsmeetpunt. Alleen bij enkele uitzonderingen in afvoer lager dan $-40 \text{ m}^3/\text{s}$ (stroomsnelheid is dan $-0,06 \text{ m/s}$) is mogelijk sprake van een meetfout.

4.2 Aanbevelingen

Enkele aanbevelingen worden gedaan met als doel om het systeem beter te leren begrijpen:

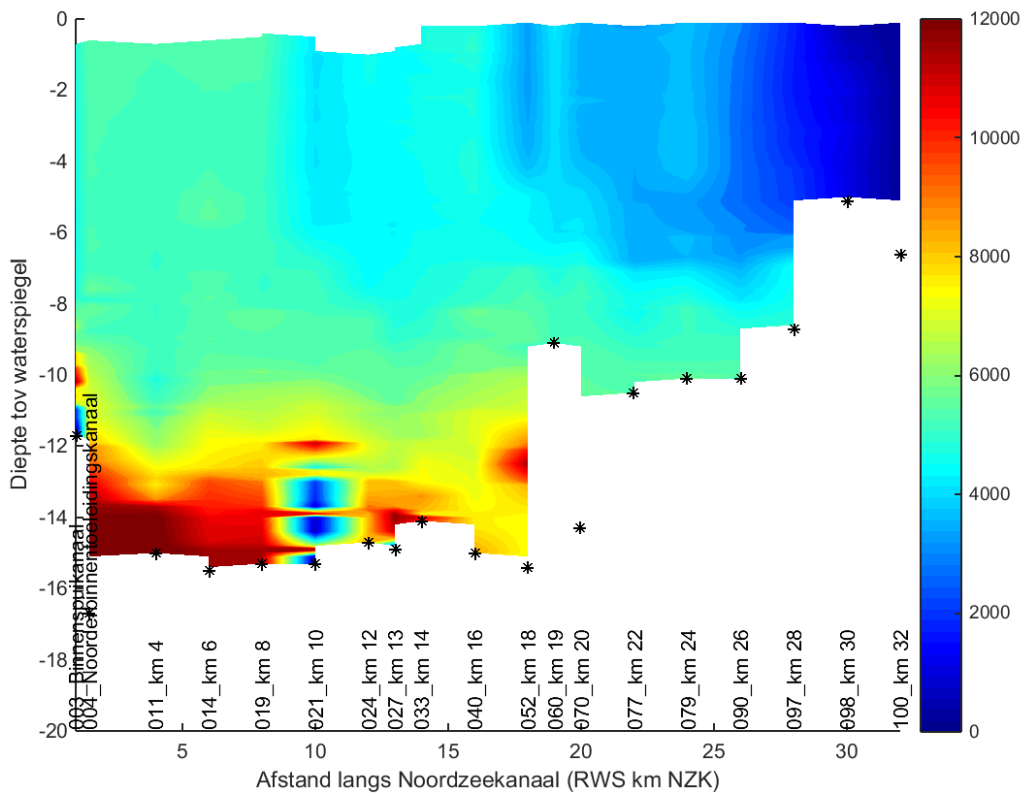
- 1) Vul de analyse van langsprofielen aan met een analyse van de gemeten watertemperaturen en van de resulterende dichtheden. Hoewel dichtheidsstroming vooral wordt bepaald door verschillen in chlorideconcentratie, heeft ook de watertemperatuur invloed hierop.

- 2) Verbind de 100-punten-metingen (eventueel per gemeten profiel) aan de tijdreeksen op de vaste punten. Hierdoor ontstaat inzicht hoe fluctuaties van chlorideconcentratie en temperatuur binnen een dag het beeld van de langsprofielen kunnen beïnvloeden. Bovendien geeft dit inzicht in de seizoensvariatie en of op een moment van de profielmeting de trend is dat het zoeter wordt of juist zouter.
- 3) In elk geval voor de interpretatie van profielen meer westelijk in het Noordzeekanaal is het relevant om ook de afvoer en het zoutgehalte bij IJmuiden en bij de grotere gemalen zoals Spaarndam en Halfweg te betrekken bij de analyse.
- 4) De sturing van het systeem (aan welke knoppen wordt wanneer gedraaid) is van groot belang voor de zoutindringing. De reactiesnelheid van het sturen en de effectiviteit van het sturen nader onderzoeken geeft mogelijk betere sturingsregels.
- 5) 100-punten-metingen tijdens momenten met een hogere zoutindringing zijn van groot belang voor het begrip van het systeem op die momenten. Wanneer het tijdens een piek op korte termijn niet meer mogelijk is om met een RWS vaarttuig de metingen uit te voeren, kan mogelijk de meting mogelijk met een klein vaarttuig door een student worden uitgevoerd. Aanbeveling is een draaiboek op te stellen wie bij wat voor (te verwachten) condities welke metingen uitvoert op welke delen van het kanaal. In dit draaiboek kunnen ook de metingen beschreven worden die nodig zijn om de hypothese te toetsen.
- 6) Een 100-punten-meting wordt bij voorkeur binnen 3 dagen afgerond, zodat condities vergelijkbaar zijn.
 - a) Voor de verwerking is het handig wanneer de meetbestanden een vaste naam per locatie hebben. In dat geval hoeven namen van bestanden per profiel niet handmatig te worden aangepast.
 - b) Bij elke meting ook de meetposities en tijden rapporteren, zodat deze bij verwerking van de meting gecontroleerd kunnen worden.
- 7) Menging wordt veroorzaakt door de scheepvaart.
 - a) Om deze reden is het nuttig om de scheepvaartontwikkeling (ladingstroom en type schepen) in kaart brengen. Mogelijk kunnen hierdoor verschillen tussen jaren met 100-punten-metingen verklaard worden. Als voorbeeld is de Amsterdam Container Terminal in de Amerikahaven in 2012 definitief gestopt.
 - b) Vooral in het Amsterdam-Rijnkanaal waar de kielspeling voor grote geladen schepen kleiner is dan een halve waterdiepte kan de menging aanzienlijk zijn. Hoewel dit niet eenvoudig te meten is, zou de mogelijkheid kunnen worden onderzocht om door middel van een meetcampagne de invloed van scheepvaart op stratificatie beter te kwantificeren.

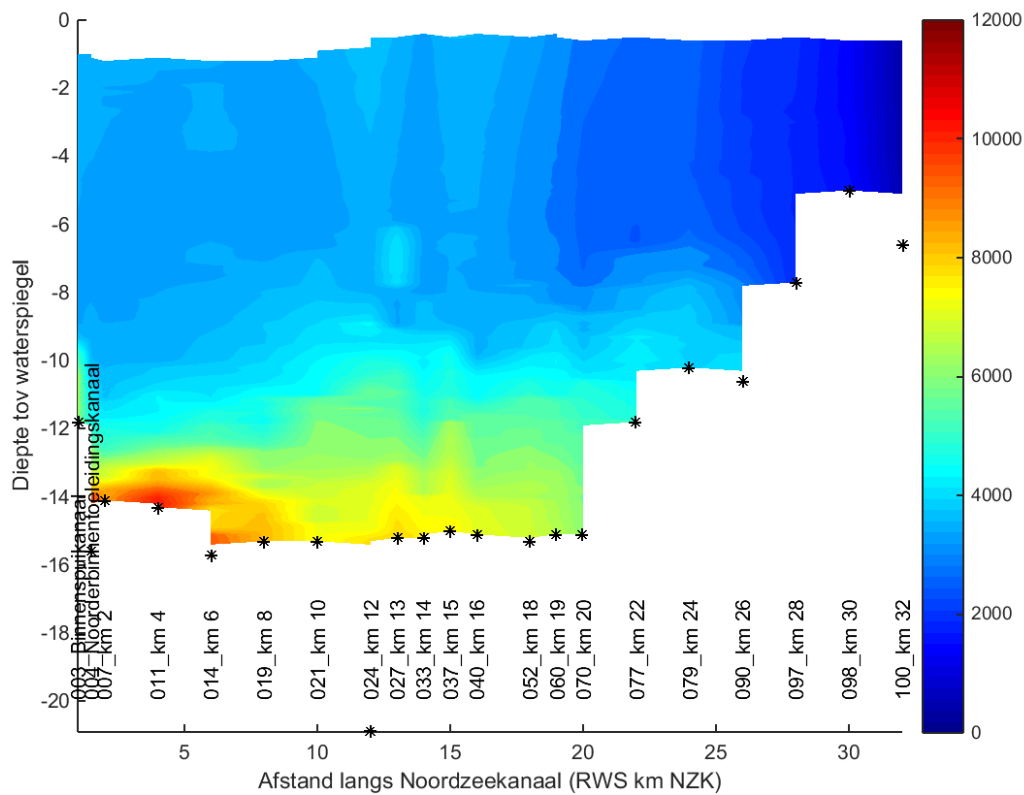
5 Literatuurverwijzingen

- ❖ Arcadis, Zoutindringing sluizen IJmuiden, effect nieuwe sluis op Noordzeekanaal, Rapport C03041.002769.001, 2011.
- ❖ Arcadis, Verfijning onderzoek chloride indringing Noordzeekanaal (ZTIJ), rapport A3026R1r3, 28 februari 2014.
- ❖ Arcadis (2016a), Noordzeekanaal - Amsterdam-Rijnkanaal: Aanvullende studie naar de effecten van het verwijderen van sluiseland en drempel op de zoutindringing op het Amsterdam-Rijnkanaal, 12 maart 2016.
- ❖ Arcadis (2016b), debiet verzilting Amsterdam-Rijnkanaal: Benodigd debiet om verzilting vanuit Noordzeekanaal tegen te gaan, een 3D modelstudie, 29 november 2016
- ❖ Deltares (2016), Bijlsma, A.C. en O.W. Weiler. Zoutindringing IJmuiden - Fase 3: Verdere uitwerking mogelijke bronmaatregelen. Deltares, eindrapport 1220309-000-HYE-0045, oktober 2016. In opdracht van Rijkswaterstaat.
- ❖ Deltares (2015), Kranenburg, W., M. Mens, F.A. Buschman, C. Wesselius, Y. Huismans, J. ter Maat en F. Diermanse, Systeemanalyse van de Rijn-Maasmonding voor verzilting: Factsheets proceskennis, systeemkennis, modelinstrumentarium en statistiek, Referentie 1220107-002-HYE-0003-v1.
- ❖ Haskoning, Waterbalans Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal 2001-2003, rapport 9R0452, oktober 2005.
- ❖ HKV (2015), Benodigde doorvoercapaciteit van de Irenesluizen: Inventarisatie van de kennisleemtes, PR3104.10, augustus 2015.
- ❖ HKV (2016), stagerapport Jenny Pronker, Zoutindringing door translatiegolven in Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal, PR 3300.10
- ❖ Hydrologic, Studie toename debiet Amsterdam-Rijnkanaal, P576, oktober 2013.
- ❖ Hydrologic (2016), Compilatie rapport bypass Irenesluizen, kenmerk P834, oktober 2016
- ❖ ISO 6416, Hydrometry — Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method, 2004.
- ❖ Karelse en van Gils (1991), Noordzeekanaal, Amsterdam-Rijnkanaal : waterbeweging en zouthuishouding. Voorstudie t.b.v. modellering, i.o.v. Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland. - Nota ANW 91.11 (T0827.pdf). Deltares.
- ❖ Rijkswaterstaat WNN (2016), Arjen Kikkert, Monitoring effecten waterkwaliteit door uitbreiding Zeetoegang IJmuiden, Tweede concept (27-5-2016), RWS ongeclassificeerd
- ❖ Rijkswaterstaat WVL, Niek van der Sleen, zoetwateraanvoermogelijkheden naar het Amsterdam-Rijnkanaal, februari 2016
- ❖ Rijkswaterstaat Noord-Holland, Het Noordzeekanaal in cijfers anno 2004: Een kwantitatieve beschrijving van de historie en huidige eigenschappen van het kanaal, zijkanalen, havens en kunstwerken, Rapport ANW-04.04, 2004.
- ❖ WL Delft (1972) Translatiegolven nabij het inlaatkanaal ten gevolge van schutkolkledingen bij Wijk bij Duurstede: verslag wiskundig onderzoek, Kenmerk W113_I.

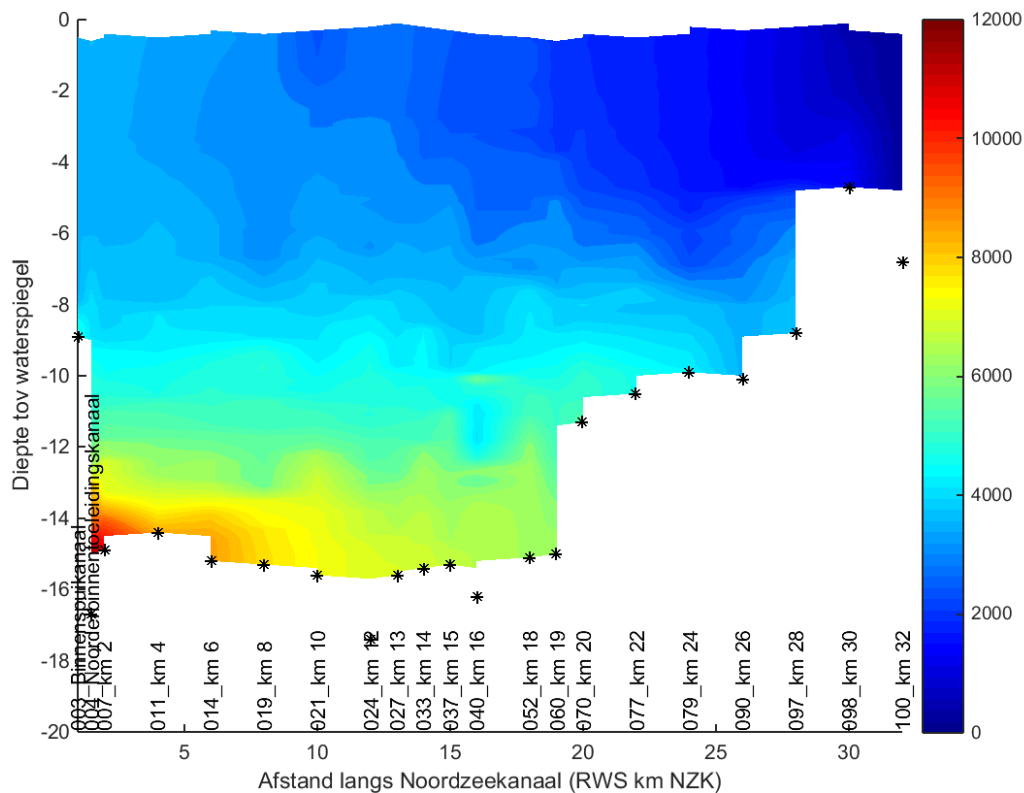
A 100-punten-metingen



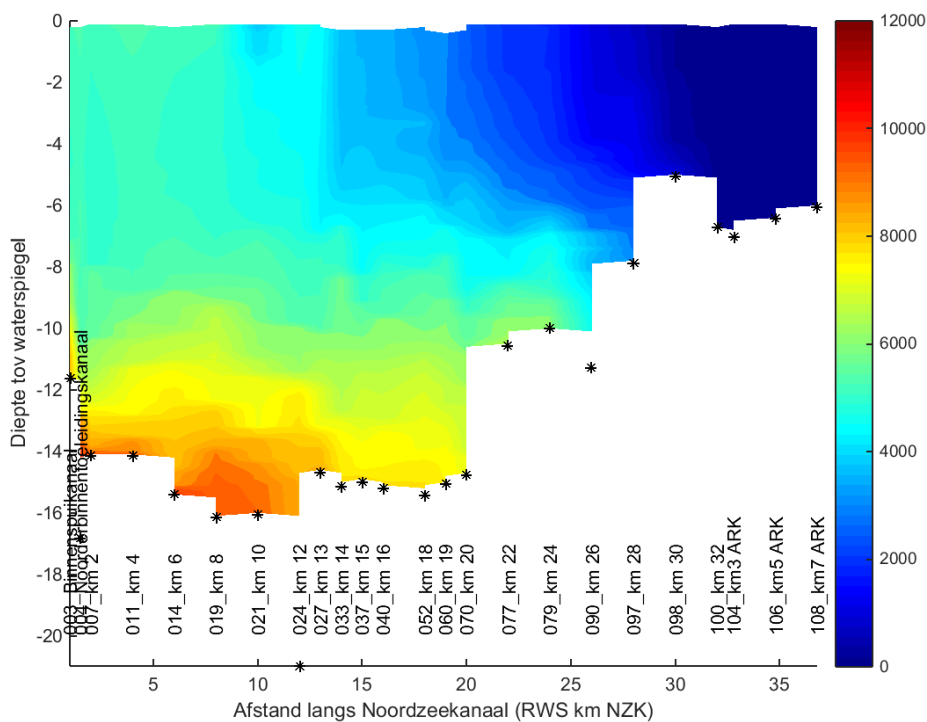
Figuur 5.1 Chloridegehalte (mg/l) langs het Noordzeekanaal in april 2003. Een * geeft de diepte aan voor een profielmeting.



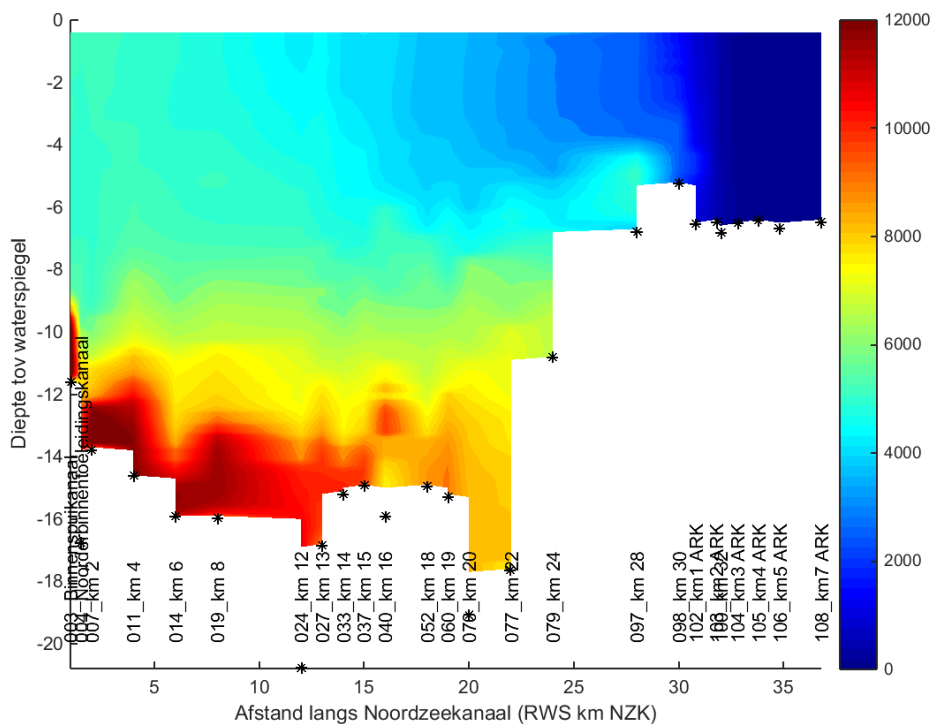
Figuur 5.2 Chloridegehalte (mg/l) langs het Noordzeekanaal in februari en maart 2011



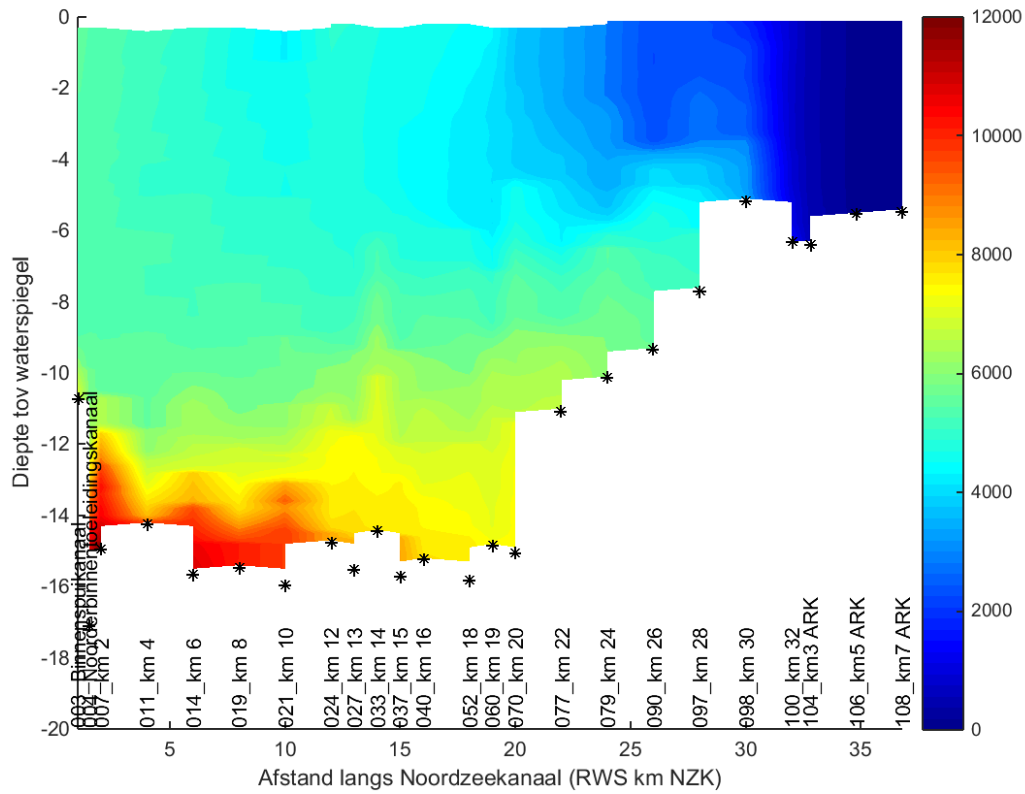
Figuur 5.3 Chloridegehalte (mg/l) langs het Noordzeekanaal in september 2011



Figuur 5.4 Chloridegehalte (mg/l) langs het Noordzeekanaal en in monding van het Amsterdam-Rijnkanaal in juli 2015



Figuur 5.5 Chloridegehalte (mg/l) langs het Noordzeekanaal en in monding van het Amsterdam-Rijnkanaal in augustus 2015



Figuur 5.6 Chloridegehalte (mg/l) langs het Noordzeekanaal en in monding van het Amsterdam-Rijnkanaal in juni 2017

B Factsheet van systeemanalyse Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal voor verzilting (overgenomen uit Deltares (2015) en niet geactualiseerd)

B.1.1 Inleiding

Deze factsheet beschrijft de zoutindringing in open water vanuit de sluizen bij IJmuiden. Het zoute water dringt het Noordzeekanaal binnen en kan onder bijzondere condities leiden tot een verhoogd zoutgehalte in het noordelijke deel van het Amsterdam Rijnkanaal. Deze factsheet beschrijft de wateren die in open verbinding staan met water aan de landzijde van de sluizen bij IJmuiden. Dit watersysteem omvat het Noordzeekanaal en het gedeelte van het Amsterdam Rijnkanaal ten noorden van de Nederrijn-Lek, en wordt in deze bijlage het NZK/ARK watersysteem genoemd.

De doelen van het waterbeheer van het NZK/ARK watersysteem zijn (Rijkswaterstaat Noord-Holland, 2004):

- Afvoeren van overtollig water.
- Het zoveel mogelijk handhaven van het streefpeil van -0,4 m t.o.v. NAP met een bandbreedte tussen -0,55 en -0,3 m t.o.v. NAP.
- Doorspoelen van het Markermeer.
- Handhaven van een minimum debiet van 10 m³/s op het Amsterdam Rijnkanaal (noordwaarts gericht) ter voorkoming van zoutindringing. Enkele richtlijnen voor de zoutconcentratie zijn:
 - De KRW-richtwaarde op het Amsterdam Rijnkanaal is 300 mg/l gemiddeld over het zomerhalfjaar.
 - Bij het drinkwaterinnamepunt Nieuwersluis is de norm 150 mg/l gemiddeld over het jaar.
 - Er is geen enkele richtlijn of norm die een momentaan maximum stelt.

Het Amsterdam Rijnkanaal ten zuiden van de Nederrijn-Lek wordt niet beschouwd in deze factsheet, omdat het wordt afgegrensd door sluizen. Om dezelfde reden worden de Vecht, de Nederrijn en de Lek ook niet tot het beschouwde watersysteem gerekend. Het Buiten-IJ en Markermeer worden ook niet tot het beschouwde watersysteem gerekend, hoewel onder sommige condities water met een verhoogd zoutgehalte bij Schellingwoude op deze meren terecht kan komen.

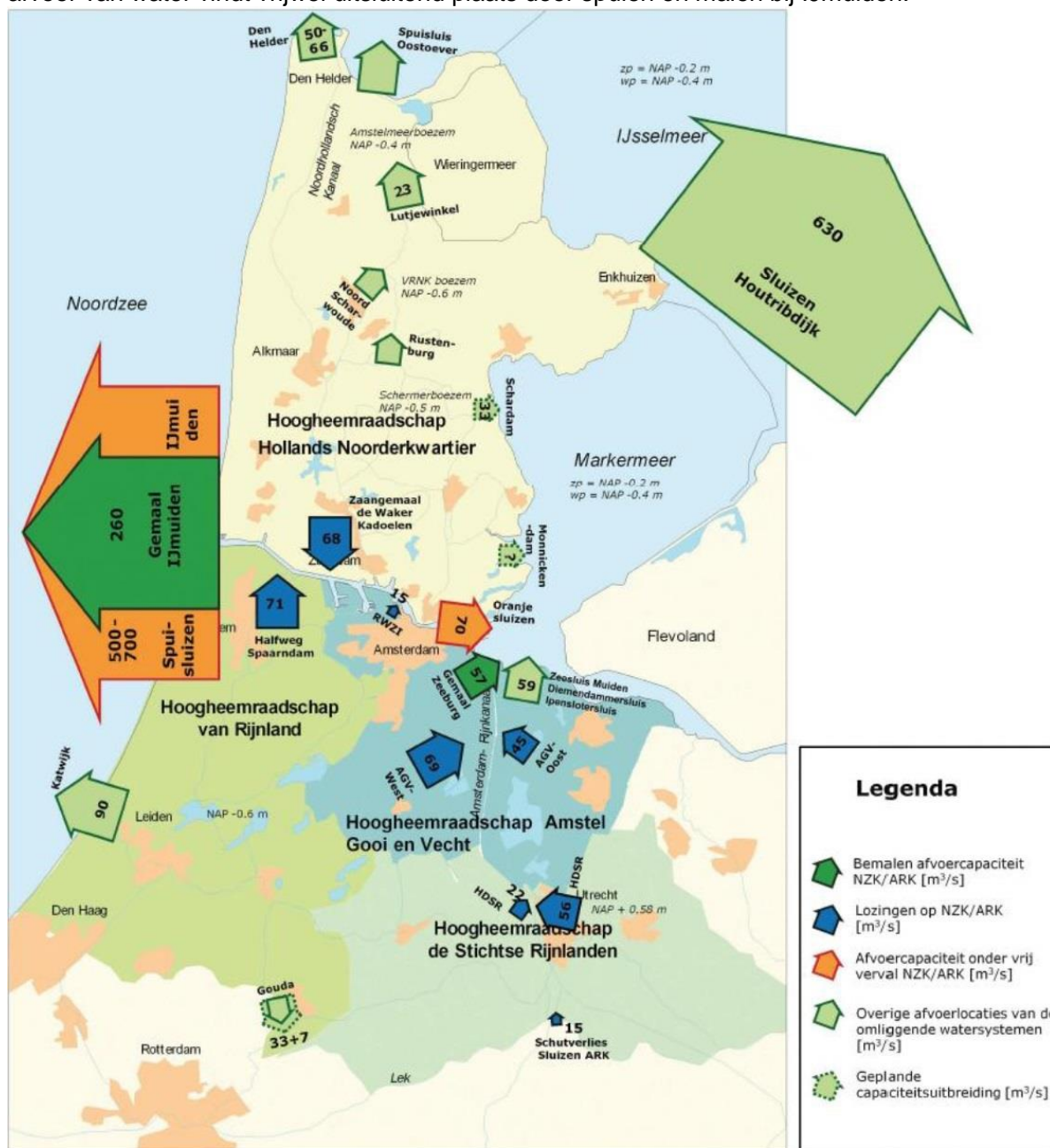
B.1.2 Gebiedsbeschrijving

Het NZK/ARK watersysteem is langgerekt. Het bestaat uit het Noordzeekanaal van 28 km, wat is verbonden bij het IJ met het 60 km lange Amsterdam Rijnkanaal. Het Noordzeekanaal is 170-270 m breed over grote gedeeltes en is breder bij het sluiscomplex van IJmuiden, bij het IJ en bij verschillende grotere havens gelegen aan de westkant van Amsterdam. Het Amsterdam Rijnkanaal is 100-120 m breed en 6 m diep. Sinds 2014 is de vernauwing in de aan de noordkant van het Amsterdam Rijnkanaal bij Zeeburg weggehaald (km 1,5 op het Amsterdam Rijnkanaal). De diepte in de eerste 22 km van het Noordzeekanaal vanaf IJmuiden is ongeveer 15 m en vervolgens voor 5 km 11 m.

Dit watersysteem NZK/ARK kan worden gezien als een grote bak water omringd door sluizen. Er zijn geen open verbindingen met rivieren of de zee. In het ARK wordt oppervlaktewater gewonnen waar drinkwater van gemaakt wordt en wordt bij droogte water ingelaten voor de

regionale watersystemen (o.a. voor de landbouw). Dit zijn redenen dat de aanvoer van zoet water voldoende groot moet zijn.

Op verschillende locaties wordt water aangevoerd naar het NZK/ARK watersysteem. In totaal grenzen meer dan 100 gemalen, molens, sluisen en lozingen van rioolwaterzuiveringen aan het NZK/ARK watersysteem (Haskoning, 2005). De belangrijkste aanvoerlocaties worden getoond in Figuur B.1. De grootste aanvoer van zoetwater vindt plaats aan de zuidkant van het watersysteem in het Amsterdam Rijnkanaal bij de Irenesluizen (bij Wijk bij Duurstede). De afvoer van water vindt vrijwel uitsluitend plaats door spuien en malen bij IJmuiden.



Figuur B.1 Overzicht van de bemalen afvoercapaciteit, aanvoer door lozingen en afvoer onder vrij verval voor de belangrijkste kunstwerken van het NZK/ARK watersysteem; Pijlen geven niet altijd de actuele afvoercapaciteit weer. Ook worden afvoerlocaties van omliggende watersystemen getoond (Bron: RWS-WNN).

Het oppervlak van het NZK/ARK watersysteem is ongeveer 39 km² en de inhoud 320 miljoen m³ (Rijkswaterstaat Noord-Holland, 2004). Jaargemiddelde aanvoer van water ligt in het bereik 80-100 m³/s (Haskoning, 2005; Arcadis, 2014). Dit volume en een dergelijke aanvoer van water betekent dat het gehele NZK/ARK watersysteem in ongeveer 40 dagen verversd kan worden. Naar verwachting is deze verversingstijd langer voor het zoute water wat binnendringt bij IJmuiden en korter voor het zoetere water afkomstig uit het ARK. Het zoetere water blijft grotendeels in de bovenlaag, waaruit wordt gespuid bij IJmuiden.

De laatste jaren zijn er enkele veranderingen geweest in het NZK/ARK watersysteem. Een belangrijke is het weghalen van het sluseiland bij Zeeburg en de drempel bij dit sluseiland, welke zijn voltooid in 2014. Deze ingreep bij het begin van het Amsterdam Rijnkanaal biedt voordelen voor de scheepvaart, maar heeft een verhoging van zoutgehalten in het Amsterdam Rijnkanaal tot gevolg (HKV, 2015). Voor deze factsheet wordt de huidige situatie beschreven, wat betekent zonder sluseiland en drempel.

B.1.3 Systeemgedrag

B.1.3.1 Forceringen

Getij en wind

Getij is afwezig in het NZK/ARK watersysteem. Getij beïnvloedt wel de hoeveelheid water die kan worden afgevoerd bij IJmuiden, doordat bij hoogwater of zee niet gespuid kan worden. Ook is het waterstandsverschil in de sluizen bij IJmuiden groter bij hoogwater op zee, waardoor het water in de sluiscolk zouter is. Dit water wisselt uit met zoeter water uit het Noordzeekanaal en zorgt dus voor een grotere zoutlast.

Wind kan zorgen voor een windgedreven stroming. Deze stroming zal net als een verhanggedreven stroming ook een verticale component hebben, waardoor de waterkolom wordt gemengd. In dit langgerekte en rechte watersysteem kan de wind voor een aanzienlijke opzet zorgen.

Menging door scheepvaart

Scheepvaart is intensief in het NZK/ARK watersysteem en zorgt voor menging van de waterkolom. Een schip verplaatst water door de voortstuwing (schroefstraal) en door het verplaatsen van het schip. Beide veroorzaken verticale stromingen, waarmee water uit diepere lagen met mogelijk een hoger zoutgehalte uitwisselt met water van nabij het wateroppervlak. Karelse en Van Gils (1991) hebben schattingen gemaakt van de energie die schepen leveren voor de menging. Voor dit watersysteem vinden zij dat de menging door schepen een orde groter is dan door wind of stroming.

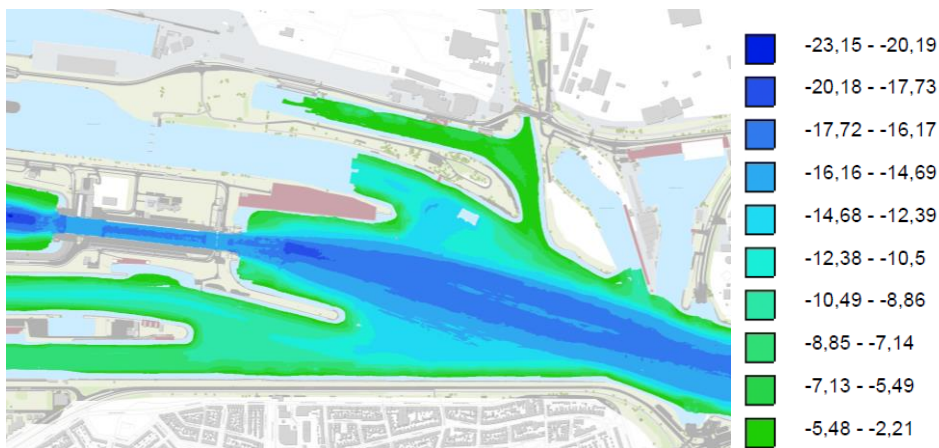
Verdamping en neerslag

Verdamping en neerslag binnen het NZK/ARK watersysteem hebben een klein direct effect op de hoeveelheid water in het NZK/ARK watersysteem, aangezien het oppervlakte beperkt is. Neerslag en verdamping die optreden buiten het NZK/ARK watersysteem hebben indirect een groter effect op de waterkwantiteit en -kwaliteit doordat bij aanhoudende regen de gemalen uit het omringende polderlandschap water gaan lozen op het NZK/ARK watersysteem.

Lozingen, onttrekkingen en uitwisseling bij sluisen

De water- en zoutbeweging in het NZK/ARK watersysteem wordt voor een groot deel bepaald door meer dan 100 lozingen, onttrekkingen en uitwisselingen bij sluisen. Het is bekend dat de waterbalans van het systeem niet klopt. Volgens de balans stroomt er meer water uit het systeem dan erin komt. Door deze 'sluitfout' van 15-20% bestaat er een flinke onzekerheid rond alle getallen van aan- en afvoer.

Onder normale omstandigheden wordt er vrijwel uitsluitend geloosd op het NZK/ARK watersysteem en is er dus sprake van aanvoer naar het watersysteem. Vooral in de zomer na een periode met weinig neerslag is het nodig om water in te laten naar de polders en is er dus sprake van afvoer uit het NZK/ARK watersysteem. De omstandigheden wanneer water wordt afgevoerd zijn tijdens normale en ernstigere droogte, tijdens regionale waterschaarste of wanneer Kleinschalige Wateraanvoer (KWA) in werking treedt. Over de typische duur van de afvoer van water uit het NZK/ARK watersysteem onder deze omstandigheden is weinig bekend (HKV, 2015).



Figuur B.2 Bodemligging binnen-voorhaven (m t.o.v. NAP) bij de sluisen van IJmuiden met de vaargeul naar de Noordersluis duidelijk zichtbaar.

Bij de sluisen van IJmuiden vindt uitwisseling van water plaats in de 4 schutsluisen, wordt er gespuid met behulp van een spuisluis en wordt er gemaald. De uitwisseling van water is het grootst in de Noordersluis, omdat de afmetingen het grootst zijn (Tabel B.1). Het spuien vindt plaats in de spuisluis op een hoogte van ongeveer -5 m t.o.v. NAP. Het maximale spuidebiet is 500-700 m³/s (Figuur B.5). Om zoutindringing via de spuisluizen te voorkomen, wordt er alleen gespuid wanneer de waterstand 8-12 cm hoger is dan in de buitenhaven. Onder normale omstandigheden kan slechts ongeveer 3 uur per getijperiode worden gespuid. Het malen vindt juist plaats wanneer de waterstand in het kanaal lager is dan het waterpeil in de buitenhaven. Alleen in deze periode mogen de pompen worden gebruikt. De as van de zes spuiokers met een diameter van 3,94 m bevindt zich op -4,5 m t.o.v. NAP (Arcadis, 2011). Het maximale maaldebiet is 260 m³/s.

Tabel B.1 Kenmerken verschillende sluiskolken bij IJmuiden (inclusief de geplande sluis die de Noordersluis moet gaan vervangen).

Sluiskolk	Lengte (m)	Breedte (m)	Diepte (m +NAP)
Noordersluis (nieuw)	400 (550)	50 (70)	15 (18)
Middensluis	225	25	10
Zuidersluis	111	18	8
Kleine sluis	70	12	5

Rond 2019 zal een nieuwe sluis worden gebouwd die de Noordersluis bij IJmuiden vervangt (Tabel B.1). Door de grotere diepte en het grotere volume zal er meer water worden uitgewisseld tussen de sluiskolk en het Noordzeekanaal. De sluisuitbreiding zal de forcering van het NZK/ARK watersysteem veranderen, welke nog zal afhangen van de hoeveelheid schuttingen per dag en de lengte dat de sluisdeuren open staan. Wanneer er geen maatregelen worden genomen, zal de zoutindringing toenemen.

Om dit te voorkomen, worden mogelijk mitigerende maatregelen genomen. Voor de mitigerende maatregelen wordt gedacht aan selectieve onttrekkingen, waarmee water van nabij de bodem wordt onttrokken zodat het zoutgehalte van het gespuide water zo hoog mogelijk is (Bijlsma en Weiler, 2015). Andere zoutbeperkende maatregelen zijn het plaatsen van een bellenscherm en het plaatsen van een drempel, waarmee het binnendringende zoute water bij de bodem wordt tegengehouden. In deze systeembeschrijving wordt in het vervolg alleen de huidige situatie beschreven.

Het sluizencomplex bij Schellingwoude bestaat uit drie kleinere sluisen bedoeld voor kleine beroepsvaart en pleziervaart (Oranjesluisen), een grote sluis voor de binnenvaart (Prins Willem-Alexander sluis), twee voormalige maalgangen die ooit deel uitmaakten van het stoomgemaal en twee vispassages. Er wordt water ingelaten via een inlaatsluis, via maalgangen, via het schutten en via vispassages. De in 1995 toegevoegde Prins Willem-Alexandersluis heeft een kolk van 24 bij 200 meter.

Het waterbeheer in de zomer is er op gericht om te voorkomen dat te veel verzilt water van het IJ naar het Buiten-IJ en Markermeer stroomt. In de zomer heeft het Markermeer de functie van zoetwaterbron voor de landbouw. De waterstand is dan ongeveer -0,2 m t.o.v. NAP, waardoor er onder natuurlijk verval water ingelaten kan worden vanuit het Buiten-IJ. In de winter is het streefpeil van het Buiten-IJ en Markermeer hetzelfde als voor het NZK/ARK watersysteem, waardoor inlaten vanaf het Buiten-IJ wordt bemoeilijkt. In deze periode komen er zoutpulsen uit het Noordeekanaal in het Markermeer, welke in het voorjaar bij het opzetten van het Markermeerpeil weer worden weg gespoeld.

De prinses Beatrixsluisen bestaan uit twee sluiskolken. Beide kolken hebben een lengte van 225 m en een breedte van 18 m. Er wordt water ingelaten via een waterinlaatsysteem en via het schutten. De capaciteit exclusief schutten is 14 m³/s (Haskoning, 2005).

De prinses Irenesluisen bestaan uit een oostelijke kolk met een lengte van 260 m en een breedte van 24 m, en een westelijke kolk met een lengte van 350 m en een breedte van 18 m. Bij ieder van deze sluiskolken kan het inlaten van 10 m³/s worden gecombineerd met het schutten van de scheepvaart, waarmee in totaal 20 m³/s kan worden ingelaten zonder stremmingen voor de scheepvaart te veroorzaken. Vanwege het grote verval tussen de Lek en het Amsterdam Rijnkanaal ter hoogte van de sluisen, wordt een belangrijk deel van deze inlaat gerealiseerd door het schutten (HKV, 2015).

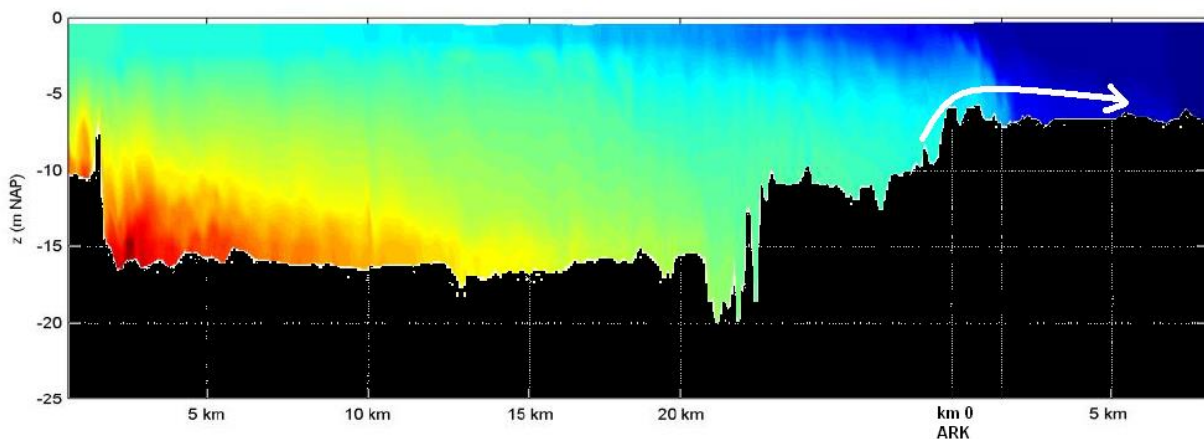
Door een sluis voor de scheepvaart te sluiten is het fysiek mogelijk om met de huidige sluisen 50-55 m³/s in te laten (Hydrologic, 2013). Momenteel wordt alternatieven onderzocht zodat meer water ingelaten kan worden en hinder voor de scheepvaart beperkt blijft.

B.1.3.2 Waterverdeling

Laag en hoog debiet in Amsterdam Rijnkanaal

In het langgerekte en aaneengesloten NZK/ARK watersysteem bepalen voornamelijk de lozing en onttrekkingen het gedrag. De lozingen en onttrekkingen worden bepaald door het gevolgde waterbeheer. Vooral in zomerperioden met een laag debiet op het Amsterdam Rijnkanaal worden keuzen gemaakt over de verdeling van zoetwater, zoals hoeveel water wordt ingelaten op het ARK/NZK watersysteem bij de Irenesluizen en hoeveel onttrokken mag worden door waterschappen.

Onder normale omstandigheden is zoetwaterafvoer door het Amsterdam Rijnkanaal substantieel (hoger dan het jaargemiddelde van 37,5 m³/s). Onder deze omstandigheden is er normaliter geen sprake van zoutindringing in het Amsterdam Rijnkanaal: het zoutgehalte in het Amsterdam Rijnkanaal is laag (Figuur B.3). Een verklaring hiervoor is dat de stuwdruk van het debiet voldoende groot is om zoutindringing te voorkomen. De stuwdruk is evenredig met het kwadraat van de stroomsnelheid. Omdat de stroomsnelheid bij Zeeburg is gehalveerd doordat de breedte is toegenomen door het verwijderen van het sluisseiland in 2014, is de stuwdruk met 75% afgenomen. Aangezien de stuwdruk op deze locatie eerder maximaal was, kan het verwijderen van het sluisseiland een substantieel effect gehad hebben op de zoutindringing in het Amsterdam Rijnkanaal (HKV, 2015).



Figuur B.3 Zoutindringing vanuit het Noordzeekanaal naar het Amsterdam-Rijnkanaal en de verondieping ter hoogte van km 0 bij Amsterdam. Zeeburg ligt bij km 1,5. Rood is een hoog zoutgehalte en donkerblauw is een zoutgehalte van 0 psu.

Bij een aanhoudend laag debiet op het Amsterdam Rijnkanaal kan zout het Amsterdam Rijnkanaal binnen dringen. Om dit te voorkomen is in het waterakkoord opgenomen dat een minimum daggemiddeld debiet bij Weesp van $10 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt gehandhaafd. Dit debiet blijkt ruim onvoldoende om de zoutindringing te voorkomen, tenzij het als minimaal gemiddelde over een langere periode wordt gehanteerd. In de praktijk is een weekgemiddeld debiet zo laag als $10 \text{ m}^3/\text{s}$ niet voorgekomen in 2006-2013, zelfs niet in perioden met lage Rijnafvoer (Hydrologic, 2013). Wanneer zout te ver oprukt, is een beheersmaatregel dat het inlaatdebiet bij de Irenesluizen wordt verhoogd. Deze beheersmaatregel is bijvoorbeeld eind 2014, eind 2015 en juni 2016 toegepast.

Dagelijkse variatie

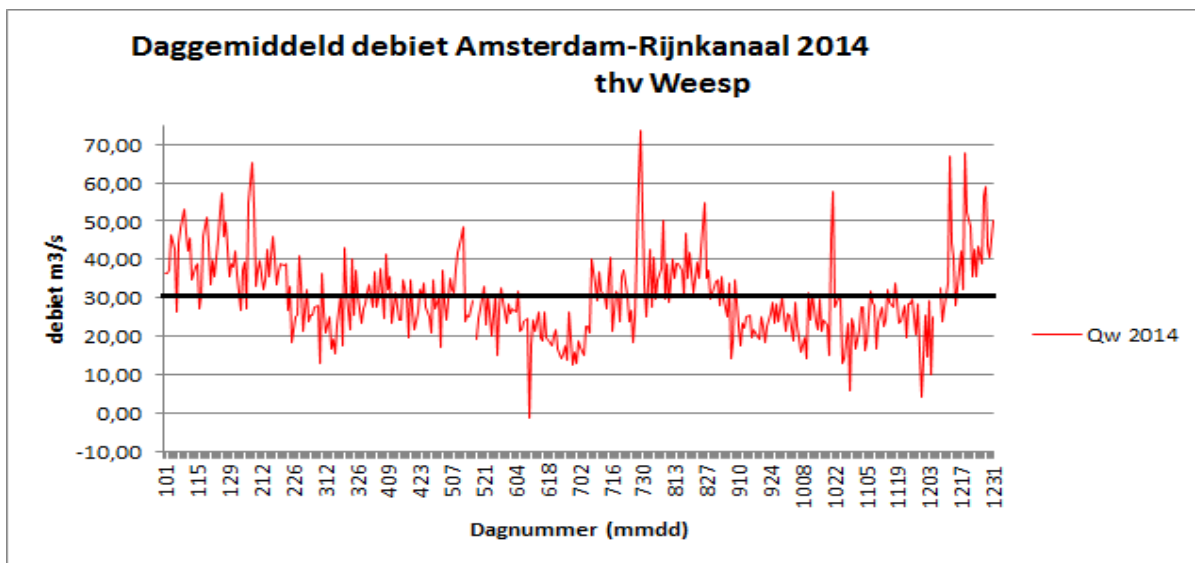
Binnen een dag kunnen er schommelingen in waterstand en stromingsrichting optreden in het NZK/ARK watersysteem, vooral door de variatie tussen wel en niet spuien. Typisch daalt de waterstand in de spuiperiode van enkele uren met 10 cm (Karelse en van Gils, 1991). Ook het aan en uit schakelen van de gemalen en het openen van de kolkdeuren waarna zoet en zout water uitwisselt leveren schokken op in het systeem. Deze schokken kunnen zich verplaatsen in het NZK/ARK watersysteem en zijn zichtbaar in de waterbeweging, waardoor waterstand, stroomsnelheid en stroomrichting in korte tijd kunnen veranderen.

Het debiet kan lokaal variëren van 0 tot $500 \text{ m}^3/\text{s}$, nadat er een aantal uur niet is gespuid. De variatie in debiet werkt door tot in het ARK, waar de stroomrichting soms kan omdraaien richting Nederrijn-Lek. Gezien de relatief grote dwarsdoorsnede zijn de dieptegemiddelde stroomsnelheden veroorzaakt door het spuien klein (rond $0,1 \text{ m/s}$). Dichtbij grote lozingen en onttrekkingen kan de stroomsnelheid lokaal een stuk hoger zijn.

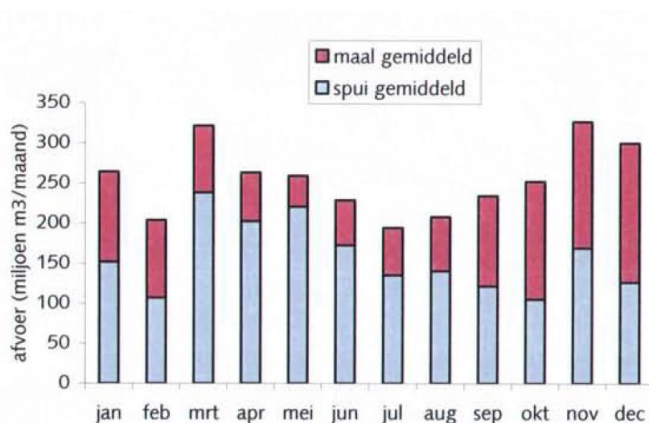
Maandelijks variatie

Het daggemiddeld debiet in het Amsterdam Rijnkanaal varieert behoorlijk. Figuur B.4 toont het verloop van het daggemiddeld debiet in 2014 (Rijkswaterstaat, 2015). Het debiet varieert tussen -1 en $75 \text{ m}^3/\text{s}$ en onderschrijft slechts een enkele dag de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ uit het waterakkoord. In mei tot en met juli is het debiet lager dan het jaargemiddelde debiet van $30 \text{ m}^3/\text{s}$, terwijl in januari, februari en december het debiet gemiddeld hoger ligt. In december wordt dit verklaard door een beheersmaatregel om het zout in het Amsterdam Rijnkanaal terug te dringen. Met een jaargemiddeld debiet van $30,4 \text{ m}^3/\text{s}$ was het debiet in 2014 lager dan het tienjarig gemiddelde van $37,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Maandelijks varieert het gedrag met onder andere de variatie van de neerslagoverschotten, welke via het NZK/ARK watersysteem worden afgevoerd naar zee. De maandelijks variatie van het spuien en malen bij IJmuiden worden getoond in Figuur B.5. Uit deze figuur blijkt dat het meeste water wordt geloosd door spuien en dat er in de zomer minder wordt gespuid en gemaal.



Figuur B.4 Debiet in het Amsterdam Rijnkanaal ter hoogte van Weesp van 1 januari tot en met 31 december 2014; De zwarte lijn geeft het jaargemiddelde debiet aan voor 2014.

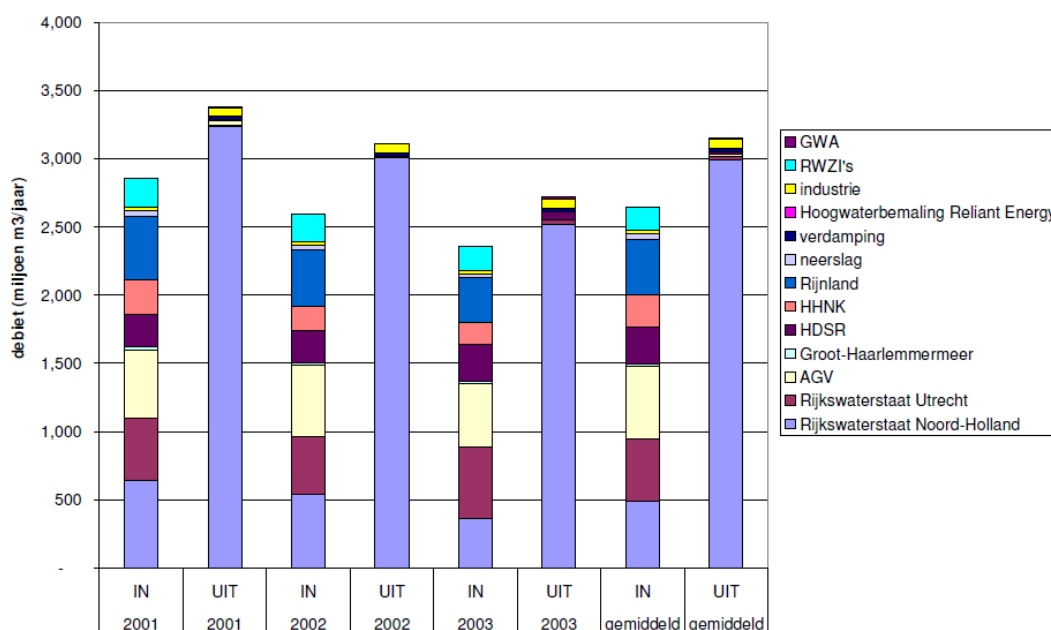


Figuur B.5 Afvoer per maand door malen en spuien bij IJmuiden, gemiddeld over de jaren 1998-2000 (Haskoning, 2005).

Jaarlijkse variatie

Jaarlijks is er ook variatie in afvoer. Figuur B.6 toont de bijdragen aan debiet voor de jaren 2001-2003 voor de toenmalige beheersgebieden. In 2003 is de gemaalcapaciteit vergroot van 160 naar 260 m³/s. Om deze reden en omdat het beheer is veranderd, is ook de meest recente waterbalans van 2012 opgenomen (Tabel B.2). Sinds 2013 is er geen waterbalans meer opgesteld.

Zoals eerder gesteld, verlaat vrijwel al het water het NZK/ARK watersysteem bij IJmuiden (spui- en maaldebiet). De inlaten zijn bij elkaar opgeteld voor ieder beheergebied. De rioolwaterzuiveringen, verdamping en neerslag zijn in de figuur en tabel weergegeven als een post over het hele NZK/ARK watersysteem. Alleen de bijdrage van de rioolwaterzuiveringen is wezenlijk. De belangrijkste inlaten per gebied staan genoemd in het bijschrift bij de figuur.



Figuur B.6 Verdeling in- en uitdebiet op jaarbasis in miljoen m³/jaar; GWA= Gemeentelijke Waterleiding Amsterdam, RWZI's= Rioolwaterzuiveringen, Rijnland (grootste lozingen: gemaal Halfweg en Spaarndam), HHNK = Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (grootste lozingen: Zaangemaal en Kadoelen), HDSR= hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden en Groot-Haarlemmermeer (grootste lozing: spuisluis Oog in Al), AGV= Amstel, Gooi en Vecht (grootste lozing: Zeeburg), Rijkswaterstaat Utrecht (grootste inlaten: Irenesluis en Beatrixsluis) en Rijkswaterstaat Noord-Holland (grootste debieten: spuien en malen bij IJmuiden en de inlaatsluis bij Schellingwoude). Bron: Haskoning, 2005.

Tabel B.2 Waterbalans posten in en uit het NZK/ARK watersysteem voor 2012 (Grontmij, 2013)

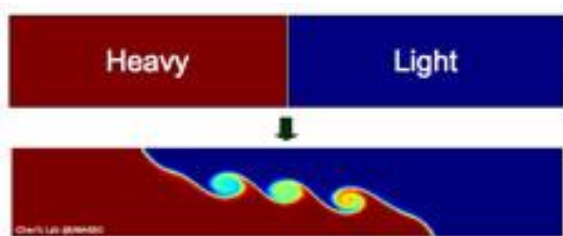
	In	Uit
AGV	307,3	-7,1
HDSR	418,1	-25,6
HHNK	269,7	-4,9
Industrie	0,5	0,0
Neerslag	37,0	0,0
RWS-MN	671,2	0,0
RWS-WNN	308,6	-2.943,0
RWZI	193,3	0,0
Verdamping	0,0	-28,3
Berging	125,0	-120,8
Totaal	2.793,5	3.132,3

Ook laten Figuur B.6 en Tabel B.2 zien dat er een sluitfout zit in de waterbalans. Er wordt gemiddeld 15-20 % (12% in 2012) meer water uitgelaten bij IJmuiden dan er het NZK/ARK watersysteem in komt. Deze sluitfout wordt nog altijd waargenomen en is nog niet volledig verklaard. Het vermoeden bestaat dat deze sluitfout wordt veroorzaakt doordat een te hoog spui- en maaldebit wordt verondersteld op basis van de langjarige waterstandsmetingen rond IJmuiden. Er wordt hier gekozen om het debiet uit het NZK/ARK watersysteem met 15-20 % te verlagen om te waterbalans sluitend te krijgen.

Met deze verlaging bedraagt het totale debiet uit gemiddeld over 2001-2003 85 m³/s. Voor recentere jaren is dit debiet waarschijnlijk lager.

B.1.3.3 Zoutindringing Algemeen

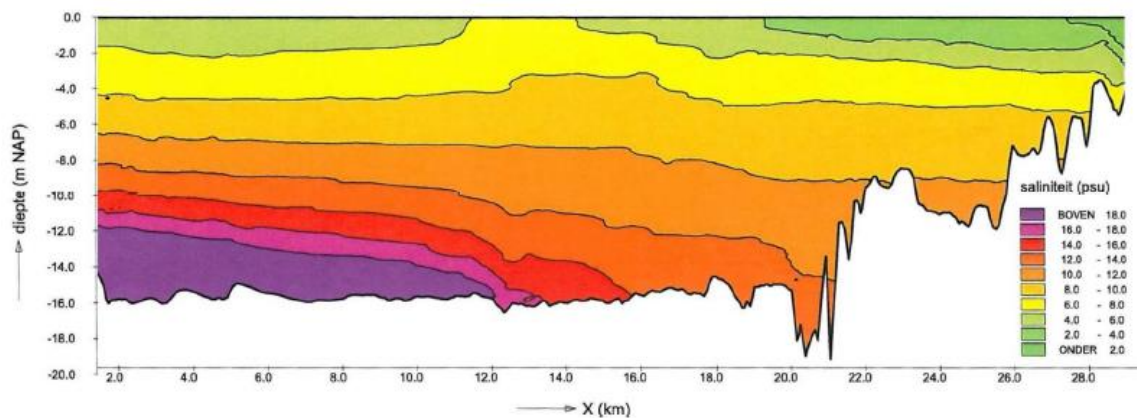
Elke keer dat aan de zeezijde van de sluisen bij IJmuiden de sluisdeuren worden geopend, stroomt het zwaardere zeewater uit de buitenhaven naar de sluiscolk in de onderlaag en stroomt het lichtere brakke water aan de bovenkant naar zee (Figuur B.7). Bij opening van de sluisdeuren aan de binnenzijde stroomt het zwaardere zeewater langs de kanaalbodem richting Amsterdam, waarbij het wordt vervangen door zoeter water uit de bovenlaag. Door het regelmatig schutten (Noordersluis ongeveer 10 keer per dag) ontstaat er een constante stroom zout water bij de kanaalbodem landinwaarts.



Figuur B.7 Zout water links van de sluisdeur (boven) stroomt de sluiscolk binnen na opening van de sluisdeur (onder)

Het zout dat binnenkomt dringt het NZK/ARK watersysteem verder binnen als gevolg van diffusie (streven naar gelijke zoutconcentratie) en gravitationele circulatie (water met hoog zoutgehalte stroomt in de onderste laag landinwaarts en zoeter water stroomt in de bovenste laag zeewaarts). Door menging wordt zout naar hogere lagen getransporteerd. Door de netto stroming zeewaarts wordt zout afgevoerd. Wanneer zout wat binnenkomt op 10-15 m diepte het systeem verlaat bij het spuien op een diepte van 5 m moet het zijn gemengd met zoeter water dat wordt aangevoerd.

In vergelijking met de Rijn- en Maasmonding rond Rotterdam is de menging van de waterkolom door stroming klein, vooral door de afwezigheid van getij in het NZK/ARK watersysteem. Scheepvaart zorgt voor meer menging dan stroming en wind (Karelse en Van Gils, 1991). Het resultaat van de balans tussen menging en de gravitationele circulatie en diffusie is een gelaagd systeem. In diepere delen van het Noordzeekanaal kan de saliniteit bij het oppervlak en bij de bodem 15 psu verschillen. Figuur B.8 geeft een voorbeeld van het zoutgehalte in het Noordzeekanaal op een moment na een periode met een laag debiet op het Amsterdam Rijnkanaal. De grootste zoutgehalten zijn te vinden op dieptes van meer dan 8 m. Het zoutgehalte in het Amsterdam Rijnkanaal kan oplopen tot 4-8 psu.



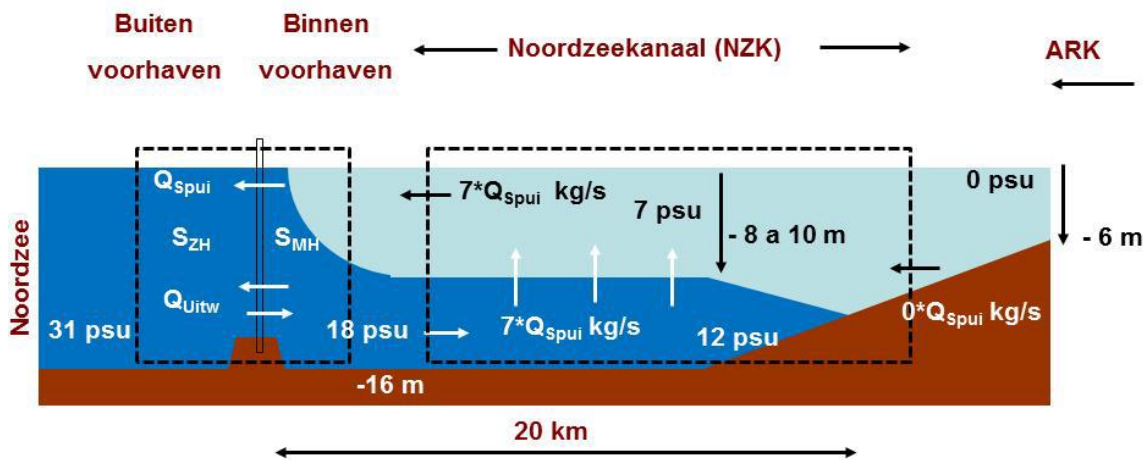
Figuur B.8 Voorbeeld van saliniteit (psu) in februari 2011 langs de as van het Noordzeekanaal; Het Noordzeekanaal gaat over in het Amsterdam Rijnkanaal bij km 28.

Vanwege de lage stroomsnelheden kan het NZK/ARK watersysteem getypeerd worden als zwak dynamisch. Dat wil zeggen dat het lang (orde maanden) duurt voordat het systeem is aangepast op een nieuwe situatie. De voorgeschiedenis bepaalt dus voor een groot deel de zoutgehalten in het NZK/ARK watersysteem. Ondanks de dagelijkse variaties van waterstand en debiet en de pulsen van zout die bij een schutting het systeem binnen komen, verandert het zoutgehalte slechts langzaam. Om deze reden begint zoutindringing pas na een periode van enkele weken tot maanden met een laag doorspoeldebiet op het ARK een probleem te worden. Alleen na een dergelijke periode heeft het zoutfront de monding van het ARK bereikt.

Zouttransporten

Sinds het sluiseland en de drempel bij Zeeburg zijn weg gehaald, geeft het vaste meetpunt bij Diemen (km 3,8 op een hoogte van -1,4 m t.o.v. NAP) vaker hoge zoutgehalten aan. Vanaf eind 2014 zijn hoge pieken van 500 mg/l chloride (0,9 psu) gemeten en een uitschieter van 1700 mg/l chloride (3,1 psu) in december 2014 (Rijkswaterstaat, 2015). Daarna zijn hogere waarden gemeten (Arjen Kikkert). Deze pieken worden grotendeels veroorzaakt door het verkleinen van het doorstroomoppervlak op deze locatie.

Het zout in het NZK/ARK watersysteem komt vrijwel geheel binnen bij het sluisencomplex van IJmuiden. Om te begrijpen hoe onder verschillende omstandigheden zout binnenkomt en hoe de concentraties verschillen, hebben Weiler en Uittenbogaard (2014) een conceptueel model opgesteld, zie Figuur B.9.



Figuur B.9 Conceptueel model van de zoutvrachten naar en uit het Noordzeekanaal

Dit conceptuele model bevat de volgende uitgangspunten, van rechts naar links:

- Het debiet dat het Noordzeekanaal in stroomt wordt gelijk gesteld aan het debiet dat (jaargemiddeld) het kanaal verlaat via de spuisluizen en gemalen, namelijk $91 \text{ m}^3/\text{s}$ (dit aangenomen debiet is groter dan hierboven genoemd, wat de onzekerheid van dit getal door de sluitfout van de waterbalans weergeeft);
- Dit instromende water heeft een aangenomen zoutgehalte van 0 psu;
- Over de lengte van het Noordzeekanaal vindt transport plaats van zout uit de onderlaag naar de bovenlaag als gevolg van (o.a.) menging door scheepvaart;
- Het zoutgehalte in de binnenvoorhaven, ter plaatse van het sluiscomplex, is ca. 7 psu in de bovenlaag en ca. 18 psu in de onderlaag (dit laatste getal is voor de berekening straks van minder groot belang)
- Over het sluiscomplex zijn twee soorten debieten:
 - Het spui- en maaldebiet van $91 \text{ m}^3/\text{s}$ jaargemiddeld;
 - Het uitwisselingsdebiet door de schutkolken; hiermee wordt wel zout getransporteerd naar het Noordzeekanaal, maar netto geen water;
- In de buitenvoorhaven, net buiten de sluisen, bedraagt het zoutgehalte 27 psu;
- Het zoutgehalte op de Noordzee er hoogte van IJmuiden bedraagt 31 psu.

In dit model wordt het schutdebiet verwaarloosd. Dit debiet, het gevolg van de nivelleerstromingen tussen de kolken en de voorhavens, bedraagt netto circa $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ vanuit de buiten- naar de binnenvorhavens en dit is klein ten opzichte van het jaargemiddelde debiet van $91 \text{ m}^3/\text{s}$. Ook is het schutvolume (de schutshijf) slechts ongeveer 3% van het uitwisselingsvolume (Arcadis, 2014). De invloed op zouttransport van het schutdebiet is klein ten opzichte van de debieten die wel zijn opgenomen in het conceptueel model.

Vooral de uitwisselingsdebieten in de sluiskolken zijn dus verantwoordelijk voor het zouttransport van zee naar het Noordzeekanaal. Met de aangenomen zoutgehalten, volumes van de schutsluizen en het aantal schuttingen per dag kunnen de uitwisselingsdebieten en de zoutvolumes worden bepaald, zie Tabel B.3.

Tabel B.3 Karakteristieken van de sluiskolken bij IJmuiden en geschatte zoutlek op basis van het beschreven conceptuele model, inclusief de geplande nieuwe Noordersluis

	Volume (1000 m ³)	Zout per schutting (ton)	Schuttingen per dag (-)	Uitwisselingsdebiet (m ³ /s)	Zoutlek (kg/s)
Noordersluis	300	5651	10,4	34,0	680
Middensluis	56	1174	12,4	8,4	168
Zuidersluis	16	367	18,4	3,9	78
Kleine sluis	5	116	10,7	0,7	14

Zoutbalans

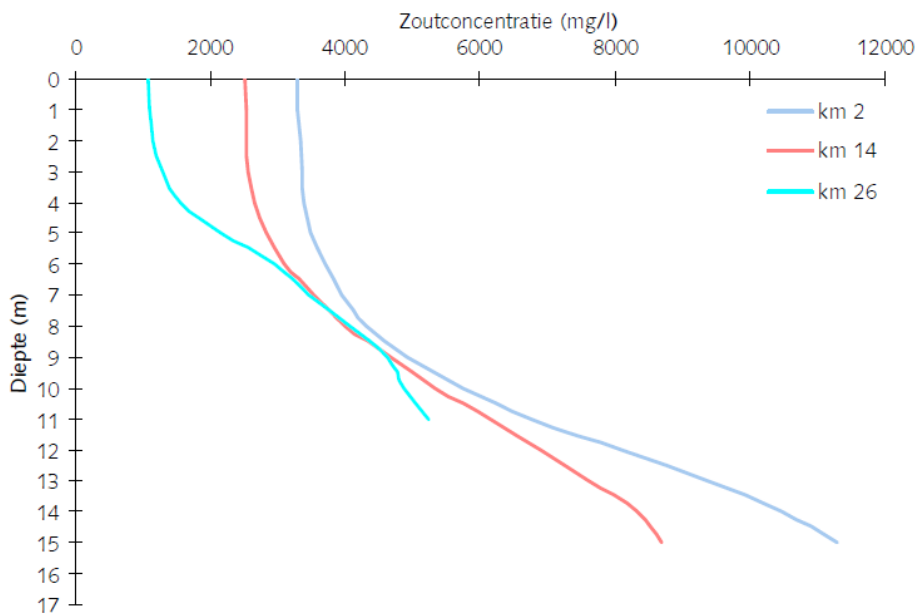
In de huidige situatie wordt er kennelijk volgens de aannamen in het conceptuele model door de verschillende sluisen samen een hoeveelheid zout van 940 kg/s getransporteerd van buiten naar binnen. Het Noordzeekanaal wordt niet jaarlijks zouter, dus nemen we aan dat eenzelfde hoeveelheid zout jaargemiddeld wordt afgevoerd naar zee. Met het jaargemiddelde spui- en maaldebiet van 91 m³/s wordt, voor de evenwichtssituatie, ditzelfde zout weer afgevoerd, waaruit dan een gemiddeld zoutgehalte van het gespuid en gemaalde water volgt van 10,2 psu.

De verzamelde gegevens en relaties maken het ook mogelijk te bekijken wat er gebeurt als er een dag niet gespuid wordt, bijvoorbeeld omdat er een tekort is aan zoetwater. Met een zoutlek van 940 kg/s zou het Noordzeekanaal als geheel (250m breed, 16 m diep, 20 km lang) per dag ongeveer 1 psu zouter worden. Als we het zout toevoegen aan de onderlaag van het Noordzeekanaal (8m dik, 250m breed, 20 km lang) en we de zoutgehalten in de beide lagen gelijk houden (18 psu in de onderlaag en 7 psu in de bovenlaag) zou de onderlaag per dag ongeveer 1,5 m dikker worden. Dit maakt duidelijk dat het in de huidige situatie noodzakelijk is om dagelijks te spuien en uit te malen om het zoutgehalte te beheersen. Het maakt ook duidelijk dat de werkelijke zoutgehalten sterk kunnen variëren afhankelijk van de voorgeschiedenis in de voorgaande dagen, zoals door het aantal schuttingen per dag en de tijd dat er gespuid werd.

Zeespiegelstijging van 0,85 m geeft volgens berekeningen een 8% hogere zoutlek dan in de huidige situatie (Weiler en Uittenbogaard, 2014).

Variatie langs de as van het NZK/ARK watersysteem

In Figuur B.10 worden zoutprofielen drie locaties in het Noordzeekanaal vergeleken. Op km 2 is de zoutconcentratie het hoogst. Door menging met zoet water is het zoutgehalte bij km 14 1 g/l kleiner geworden. In het IJ (km 26) is het zoutgehalte in de bovenste 3 m gedaald naar 1 g/l, waaronder het zoutgehalte toeneemt tot vergelijkbare waarden op 7 m diepte als bij de zeewaarts gelegen locaties. In het Amsterdam Rijnkanaal is een vaste meter opgesteld bij het voormalige sluiseland Zeeburg, welke maximaal 1 g/l zout aangeeft in 2013 (Arcadis, 2014). Bij de vaartocht in augustus 2011 is na een lange periode met laag debiet in het Amsterdam Rijnkanaal een zoutprofiel gemeten van 1,5 g/l bij het oppervlak tot 3,5 g/l bij de bodem. Dit geeft aan dat er ook op het relatief ondiepe Amsterdam Rijnkanaal gelaagdheid kan optreden. De gemeten piek van 3,1 psu bij meetstation Diemen in 2014 zal dus betekenen dat het zoutgehalte bij de bodem nog hoger is.



Figuur B.10 Zoutprofielen gemiddeld over meerdere vaartochten tussen juni 1999 en juni 2001 op drie afstanden vanaf de sluizen van IJmuiden in het Noordzeekanaal (Rijkswaterstaat Noord-Holland, 2004)

Jaarlijkse variatie

In de bovenstaande analyse is geen onderscheid gemaakt tussen dagelijkse, maandelijkse of jaarlijkse variatie. Gezien het zwak dynamische karakter verandert het zoutgehalte pas aanzienlijk wanneer de aanvoer van zoet water enkele weken tot maanden laag of juist hoog is.

Karelse en Van Gils (1991) vergeleken jaren met veel aanvoer (nat; 1980) en met weinig zoetwater aanvoer (droog; 1967). Uit deze vergelijking volgt dat het zoutgehalte aan het oppervlak in het Noordzeekanaal lager is in het natte jaar. Misschien tegen de verwachting in, is het zoutgehalte bij de bodem het hoogst in het natte jaar. Blijkbaar wordt de gravitationele circulatie versterkt bij hogere zoetwateraanvoeren in het Noordzeekanaal. Waarschijnlijk betekent de hogere zoutconcentratie bij de bodem in het natte jaar niet dat er meer zoutindringing in het Amsterdam Rijnkanaal heeft plaats gevonden. Door de meer dan 2 keer kleinere diepte van het ARK en de relatief grote doorspoeldebieten in het natte jaar, en de daarmee samenhangende menging, is het onwaarschijnlijk dat het zout voorbij de monding van het ARK is gekomen in het natte jaar.

Lopende ontwikkelingen en onderzoeken

- Vervanging van de Noordersluis bij IJmuiden door een grotere sluis inclusief zoutbeperkende maatregelen (2019)
- Bypass bij de Irenesluis