

**Systeemanalyse Rijn-Maasmonding:  
analyse relaties noord- en zuidrand  
en gevoeligheid stuurknoppen.**

Deelproject Systeemanalyse en Slim Watermanagement





**Systeemanalyse Rijn-Maasmonding:  
analyse relaties noord- en zuidrand en  
gevoeligheid stuurknoppen.**

Deelproject Systeemanalyse en Slim Watermanagement

Ymkje Huismans

1230077-001  
1230080-007



## Titel

Systeemanalyse Rijn-Maasmonding: analyse relaties noord- en zuidrand en gevoeligheid stuurknoppen.

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Neeltje Kielen (WVL), Herman Haas (WVL)	1230077-001	1230077-001-ZWS-0010	73

## Trefwoorden

Rijn-Maasmonding, zoutindringing, Haringvlietsluizen, Systeemwerking, Achterwaartse verzilting, Volkeraksluizen, stuw bij Hagestein, Slim Watermanagement, verzilting monding Hollandsche IJssel.

## Samenvatting

De Rijn-Maasmonding (RMM) is het gebied waar Rijn en Maas uitmonden in zee en is gelegen in het dichtstbevolkte en meest intensief gebruikte deel van Nederland. Beschikbaarheid van zoetwater is daarom van groot belang voor diverse doeleinden. Voor het tegengaan van verzilting nu en in de toekomst is een gedegen systeembegrip nodig en kennis van het effect van de stuurknoppen in het systeem.

Hoewel verziltingsprocessen langs de noord- en zuidrand van de RMM vaak apart van elkaar beschouwd worden, zijn deze in werkelijkheid vaak sterk gekoppeld. In dit onderzoek worden deze noord-zuidrelaties in kaart gebracht en toegepast. Op hoofdlijnen heeft dit tot de volgende resultaten geleid:

1. De algemene systeemwerking ten aanzien van de noord-zuidrelaties is in kaart gebracht.
2. De huidige vuistregel voor het voorspellen van achterwaartse verzilting uit het Handboek Waterwacht (gebaseerd op de HL-parameter en de Bovenrijnafvoer) is gevalideerd. Op basis van deze validatie en de in dit project verkregen systeemkennis is een nieuwe vuistregel afgeleid, welke gebaseerd is op de gemiddelde waterstandsverschillen tussen de noord- en de zuidrand over twee getijden. Deze vuistregel geeft aanzienlijk betere voorspellingen.
3. Het effect van de Haringvlietsluizen op de waterbeweging en zoutverspreiding is in kaart gebracht aan de hand van de systeemkennis en bestaande berekeningen. Hierbij is zowel de eb- als de vloedopening geëvalueerd. Hieruit volgt dat een grotere ebopening zorgt voor hogere zoutconcentraties aan de noordrand, grotere kans op achterwaartse verzilting en minder zout aan de zuidrand. Een grotere vloedopening zorgt voor het omgekeerde effect. De bestudeerde relaties zijn daarbij niet-lineair. Bij het verder openen van zowel de eb- als de vloedopening kunnen de niet-lineaire relaties soms voor onverwachte effecten zorgen. Tot slot is het effect van het toekomstige beheer ("de Kier") op de achterwaartse verzilting geëvalueerd.
4. De werking van de andere stuurknoppen in het systeem (Volkeraksluizen en de stuw bij Hagestein) voor het tegengaan van verzilting van de monding Hollandsche IJssel is geanalyseerd met behulp van numerieke 1D berekeningen. Hieruit volgt dat het stopzetten van de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer (via Volkeraksluizen) tot grotere afname zorgt van de chlorideconcentraties langs de noordrand dan het in gelijke mate vergroten van de afvoer door de Lek (via de stuw bij Hagestein) ten koste van de afvoer van de Waal. Bij het stopzetten van de onttrekking duurt het echter meerdere dagen voor het effect merkbaar wordt. Bij het vergroten van de afvoer over de Lek is het effect al na 1 à 2 dagen merkbaar.
5. Op basis van bovenstaande bevindingen is het handelingsperspectief aangescherpt. Hierin staat beschreven wanneer welke stuurknop kan worden ingezet.

## Referenties

KPP Slim Watermanagement, KPP Systeemanalyse Rijn-Maasmonding

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	nov. 2016	Ymkje Huismans		Theo van der Kaaij Kees Kuijper		Gerard Blom	

## Status

definitief



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>1</b>
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doel	2
1.3	Organisatie	2
1.4	Leeswijzer	3
<b>2</b>	<b>Noord-Zuidrelaties</b>	<b>5</b>
2.1	Achtergrond	5
2.2	Verzilting noordrand	5
2.3	Verzilting zuidrand	5
2.3.1	Achterwaartse verzilting	5
2.3.2	Zoutopslag in geulen en nalevering	8
2.3.3	Verzilting zuidrand via Haringvlietsluizen (toekomst)	8
<b>3</b>	<b>Achterwaartse verzilting</b>	<b>9</b>
3.1	Achtergrond	9
3.2	Verziltingstypologieën verzilting zuidrand	9
3.3	Historische gebeurtenissen van achterwaartse verzilting	10
3.4	Vuistregel handboek waterwacht	11
3.5	Verkennde analyse nieuwe vuistregel optreden Achterwaartse verzilting	12
3.5.1	Theorie	12
3.5.2	Methode	13
3.5.3	Resultaat	13
3.6	Discussie, conclusies en aanbevelingen	14
3.6.1	Conclusie	14
3.6.2	Discussie	15
3.6.3	Aanbevelingen	16
<b>4</b>	<b>Stuurknop Haringvlietsluizen</b>	<b>17</b>
4.1	Achtergrond	17
4.2	Methode	18
4.3	Systeemwerking Haringvlietsluizen	20
4.3.1	Grotere ebopening	20
4.3.2	Grotere vloedopening	20
4.3.3	Grotere eb-vloed opening	22
4.3.4	Van LPH'84 naar de Kier	25
4.4	Haringvlietsluizen als stuurknop	27
<b>5</b>	<b>Stuurknoppen Volkeraksluizen en stuw bij Hagestein</b>	<b>31</b>
5.1	Achtergrond	31
5.2	Methode	32
5.3	Effect stopzetten onttrekking naar Volkerak-Zoommeer	33
5.3.1	Effect op restdebieten	33
5.3.2	Effect op zout	35
5.4	Effect afvoervertrekking Waal naar Lek	38
5.4.1	Effect op restdebieten	38
5.4.2	Effect op zout	40

5.5	Discussie	41
5.6	Synthese en toepasbaarheid van de resultaten	43
5.7	Aanbevelingen	45
<b>6</b>	<b>Handelingsperspectief</b>	<b>47</b>
6.1	Overzicht	47
6.2	Verziltling monding Hollandsche IJssel	48
6.3	Tegengaan achterwaartse verziltling	50
6.4	Ontziltling Haringvliet	51
<b>7</b>	<b>Conclusies en Aanbevelingen</b>	<b>53</b>
7.1	Systeembeschouwing	53
7.2	Vuistregel achterwaartse verziltling	53
7.3	Stuurknop Haringvlietsluizen	54
7.4	Stuurknoppen Volkeraksluizen en stuw bij Hagestein	55
7.5	Redeneerlijn/ Handelingsperspectief	55
7.6	Aanbevelingen op een rij:	55
<b>8</b>	<b>Referenties</b>	<b>57</b>
 <b>Bijlage(n)</b>		
<b>A</b>	<b>Tabellen achterwaartse verziltling en uitgebreide vuistregel</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Matlab code voor nieuwe vuistregel achterwaartse verziltling</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Details validatie vuistregels</b>	<b>C-1</b>
<b>D</b>	<b>Model</b>	<b>D-1</b>

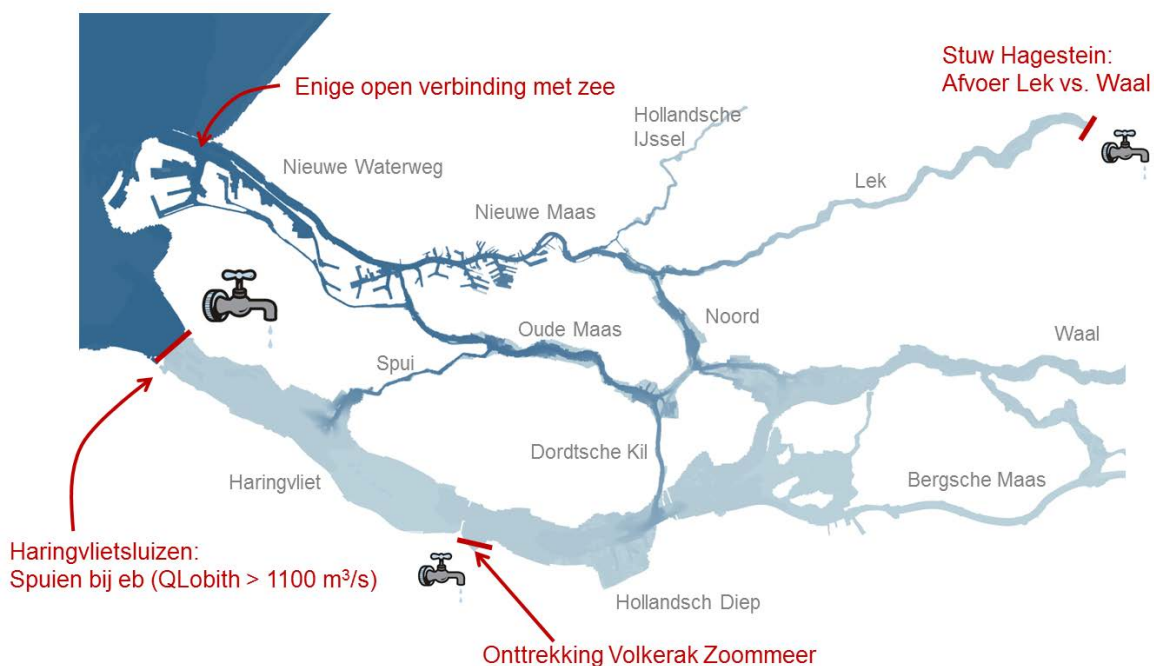


# 1 Introductie

## 1.1 Achtergrond

De Rijn-Maasmonding is het gebied waar Rijn en Maas uitmonden in zee en is gelegen in het dichtst bevolkte en meest intensief gebruikte deel van Nederland, zie Figuur 1.1. Beschikbaarheid van zoetwater is van groot belang voor drinkwater, landbouw, industrie en de waterhuishouding in de polders. Sinds de aanleg van de Haringvlietsluizen in 1970 heeft het gebied slechts één open verbinding met zee, de Nieuwe Waterweg. Zout komt daardoor via de noordrand het gebied binnen en bereikt slechts bij uitzonderlijke omstandigheden de zuidrand.

De verwachting is dat in de toekomst de zoutindringing onder invloed van diverse processen en ingrepen zal toenemen of veranderen. Voorbeelden zijn de zeespiegelstijging en extremere (lage) rivierafvoeren (Klijn et al. 2012), de verdieping Nieuwe Waterweg (Hydrologic 2015b; van Leeuwen 2015; van den Boogaard 2015), het gedeeltelijk openen van de Haringvlietsluizen bij vloed (Rijkswaterstaat 1998; de Goederen et al. 2006) en de doorgaande rivierbodemerisatie (Huismans 2013).



*Figuur 1.1* Overzichtskartaal Rijn-Maasmonding, met de verschillende riviertakken in grijs en enkele belangrijke locaties in rood. Hierbij vallen de Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel Lek en Noord onder de noordrand en de overige takken onder de zuidrand.

*In blauwshakeringen de zoutconcentratie (hoe donkerder hoe zouter) uit een 3D modelberekening van het najaar 2011, waarbij zout via de noordrand de zuidrand kon bereiken, zogenaamde achterwaartse verzilting.*

## 1.2 Doel

Voor het tegengaan van externe verzilting<sup>1</sup> nu en in de toekomst is een gedegen systeembegrip nodig en kennis van het effect van de stuurknoppen in het systeem. Omdat de waterbeweging en zoutindringing langs de noord- en zuidrand van de Rijn-Maasmonding sterk gekoppeld zijn, is een gedegen begrip van deze relatie hierin essentieel. Doel van deze studie is daarmee tweeledig:

### Inzichten in de Noord-Zuidrelaties:

Doel van dit onderdeel is om op basis van bestaande literatuur en aanvullende analyses deze ingewikkelde relaties beter in de vingers te krijgen en op eenvoudige manier te presenteren.

Voorbeelden van deze noord-zuidrelaties zijn:

- Achterwaartse verzilting: hierbij bereikt zout de zuidrand via de noordrand, vaak tijdens een periode van windopzet.
- Verzilting noordrand: hiervoor is het netto zeewaartse debiet op de Nieuwe Waterweg/ Nieuwe Maas zeer bepalend, welke mede wordt beïnvloedt door de grootte van de opening van de Haringvlietsluizen.

### Werking van de stuurknoppen van het hoofdwatersysteem:

Het doel van dit onderdeel is om op basis van de systeemkennis over de noord-zuidrelaties en aanvullende berekeningen inzicht te krijgen in de werking van de drie stuurknoppen van het hoofdwatersysteem ten aanzien van verzilting: de Haringvlietsluizen ("hoofdkraan van Nederland"), de stuw bij Hagestein en de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer.

## 1.3 Organisatie

In dit project zijn de resultaten van deelprojecten gecombineerd, omdat deze een sterke relatie met elkaar hebben:

### Systeemanalyse Rijn-Maasmonding, deelproject Noord-Zuidrelaties

Binnen dit onderdeel zijn de volgende vragen onderzocht:

1. Onder welke omstandigheden (zeewaterstand, windopzet, rivierafvoer) treedt achterwaartse verzilting op?
2. Hoe beïnvloedt de opening van de Haringvlietsluizen de waterstanden en debietverdeling in de Rijn-Maasmonding en daarmee de zoutverspreiding onder verschillende omstandigheden?
3. Hoe kunnen voorwaartse verzilting op de noordrand en achterwaartse verzilting op de zuidrand beïnvloed worden door het stuurprogramma van de Haringvlietsluizen?

Dit is gedaan op basis van literatuurstudie, data-analyse en aanvullende analyses van bestaande berekeningen. Belangrijk aspect van dit onderdeel was het inzichtelijk maken van de complexe relaties. Bijbehorende Powerpoint hiervoor is apart opgeleverd aan RWS.

<sup>1</sup> Onder verzilting verstaan we de situatie waarbij de chlorideconcentraties dusdanig hoog worden dat deze een belemmering vormen voor het gebruik (zoals voor drinkwater, de landbouw, en de waterhuishouding in de polders). In de diverse waterakkoorden zijn de verziltingscriteria per gebied gekwantificeerd.

**Slim Watermanagement (SWM), deelproject Rijn-Maasmonding**

Binnen dit onderdeel is op basis van 1D-berekeningen en literatuurstudie het effect van de twee kleinere stuurknoppen van het hoofwatersysteem op de verzilting langs de noordrand onderzocht. De volgende twee stuurknoppen zijn hierbij aan bod gekomen:

- Volkeraksluizen
- Stuw bij Hagestein voor regulatie debietverdeling Lek versus Waal.

Daarnaast is deelgenomen aan twee workshops van Slim Watermanagement, waarin Waterschappen, Rijkswaterstaat en drinkwaterbedrijven gezamenlijk tot een optimaal beheer van het gebied proberen te komen.

In de leeswijzer wordt aangeduid wat onder welk project valt.

**1.4 Leeswijzer**

<i>Hoofdstuk</i>	<i>Omschrijving</i>
1 Introductie	Omschrijving achtergrond, doel en organisatie van het project
2 Noord-Zuidrelaties	Definitie en inzicht in algemene werking noord-zuidrelaties <i>Methode: Literatuurstudie en aanvullende analyses</i>
3 Achterwaartse Verzilting	Analyse van opgetreden situaties van achterwaartse verzilting en verbeteren vuistregel voor de voorspelling <i>Methode: Literatuurstudie en data-analyse</i>
4 Stuurknop Haringvlietsluizen	Systematische analyse van hoe de vloed- en ebopening de waterbeweging en zoutverspreiding in het gebied sturen <i>Methode: Literatuurstudie en analyse bestaande berekeningen</i>
5 Stuurknoppen Volkeraksluizen en stuw bij Hagestein	Analyse van de werking van de Volkeraksluizen (doorspoeling Volkerak-Zoommeer met water uit het Hollandsch Diep) en de stuw bij Hagestein (afvoervertrekking Waal naar Lek) voor het tegengaan van verzilting aan de noordrand. <i>Methode: numerieke 1D berekeningen met SOBEK</i>
6 Redeneerlijn	Aanscherping redeneerlijn: welke stuurknop kan wanneer worden ingezet. <i>Methode: op basis van hoofdstukken 4 en 5</i>
7 Conclusies en aanbevelingen	

**Kleuren:**

- onderdeel van SWM & Systeemanalyse
- onderdeel van Systeemanalyse
- onderdeel van SWM



## 2 Noord-Zuidrelaties

### 2.1 Achtergrond

Onder noord-zuidrelaties verstaan we het volgende:

*“Hoe de zoutconcentraties aan de zuidrand beïnvloed worden door condities aan de noordrand en vice versa”*

Voor kennis van verzilting in het systeem en de werking van de stuurknoppen is een gedegen begrip van de relatie tussen de noord- en de zuidrand essentieel. In dit hoofdstuk geven we op basis van literatuur en een systeembeschouwing inzicht in de algemene werking van de noord-zuidrelaties.

### 2.2 Verzilting noordrand

Zout vanuit zee komt het systeem binnen via de noordrand. Hoever het zout kan indringen wordt bepaald door de condities op zee en op de rivier. Aan de zee kant zorgen windopzet en hogere zoutconcentraties voor een grotere indringingslengte. Het effect van het getij is tweeledig. Enerzijds neemt met een grotere getijbeweging de afstand waarover zout kan bewegen toe en daarmee de maximale indringingslengte, anderzijds vindt er meer menging plaats waardoor de gemiddelde indringingslengte afneemt. Aan de rivierkant zorgt het rivierdebiet voor tegendruk. Bij lage rivierafvoeren kan zout dus verder indringen. Ook zijn bij lage rivierafvoeren de zoutconcentraties op de rivier verhoogd, waardoor de achtergrondconcentraties hoger zijn. Relaties hiervoor worden gegeven in Kranenburg (2015), zie ook Bijlage D.

Verzilting van de noordrand (Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel en Lek) treedt met name op wanneer de rivierafvoer laag is, er stormopzet is of er sprake is van een combinatie van beide. Meer details hierover zijn te vinden in (K. Kuijper 2015; K. Kuijper 2016; Mens 2016).

De zuidrand beïnvloedt verzilting aan de noordrand met name via de stuurknoppen in het systeem. Het spuidebiet door de Haringvlietsluizen en de onttrekking richting Volkerak-Zoommeer beïnvloeden het restdebiet dat het systeem via de noordrand verlaat en daarmee de tegendruk die het systeem kan bieden aan het zout vanuit zee. Hierover volgt meer in Hoofdstuk 4 en 5.

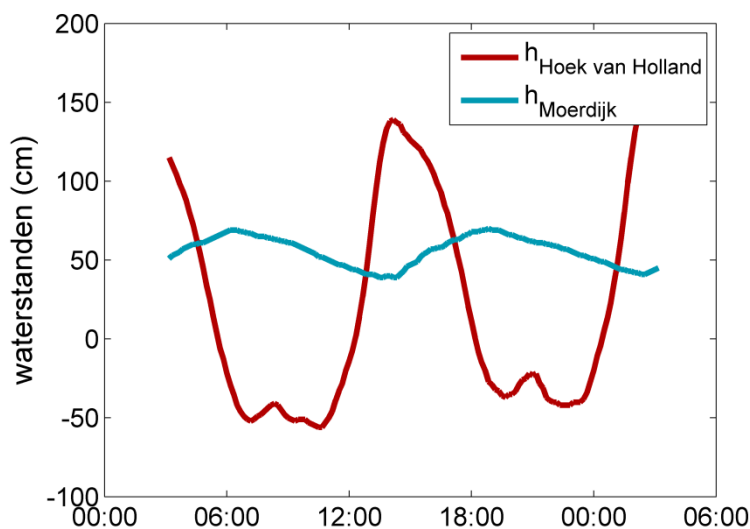
### 2.3 Verzilting zuidrand

Voor de verzilting aan de zuidrand (Haringvliet, Hollandsch Diep, Spui en Dordtsche Kil) maken we onderscheid in drie processen die hieronder per proces behandeld worden.

#### 2.3.1 Achterwaartse verzilting

Door sluiting van de Haringvlietsluizen is de zuidrand overwegend zoet. Zout vanuit zee dringt alleen binnen via lekverliezen van de Haringvlietsluizen en de naastgelegen scheepvaartsluis van Stellingdam of in extreme condities via de noordrand. Dit laatste noemen we achterwaartse verzilting. Waar aan de noordrand het rivierdebiet en stormopzet maatgevend zijn voor het optreden van verzilting zijn het bij achterwaartse verzilting de waterstandsverschillen tussen de noord- en de zuidrand, welke sinds de sluiting van de Haringvlietsluizen sterk veranderd zijn. Voor sluiting van de Haringvlietsluizen waren de

waterstanden aan de noord- en de zuidrand vergelijkbaar, omdat beide in directe verbinding stonden met zee. Sinds de sluiting vult en ledigt de zuidrand zich via de noordrand. Als resultaat hiervan is het getij op de zuidrand gering (getijslag van typisch 30 cm) en zijn de waterstanden nagenoeg uit fase met de noordrand, zie Figuur 2.1.

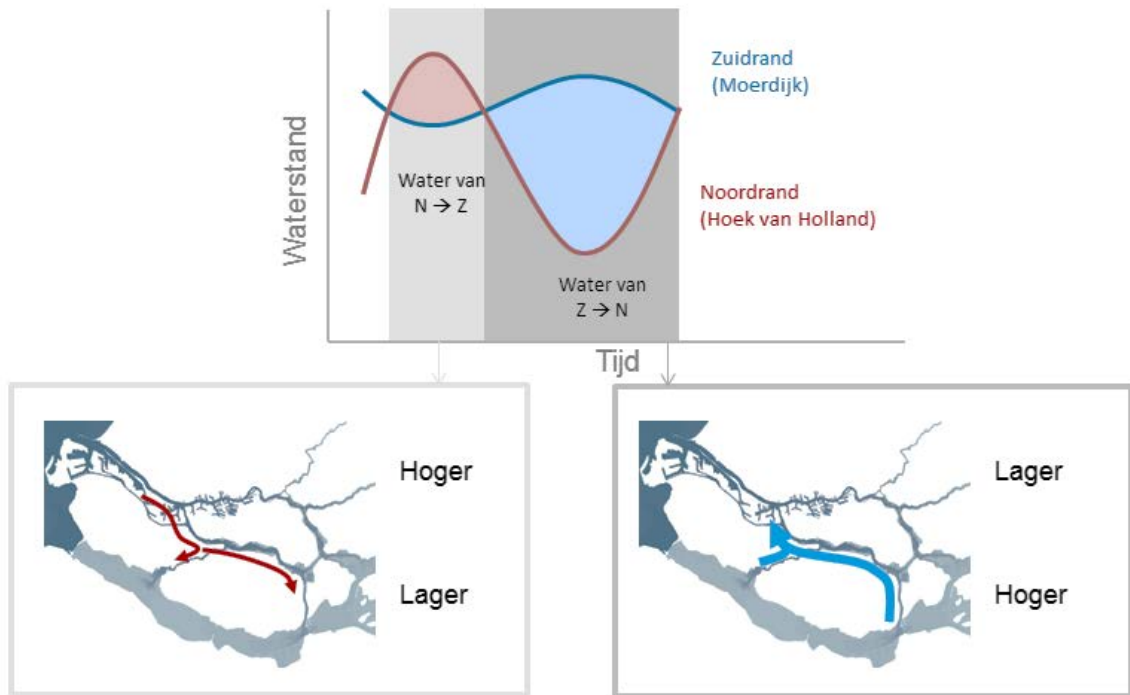


Figuur 2.1 Typische waterstanden aan de noord- en de zuidrand (voorbeeld van 2-3 juli 2004, data uit Waterbase).

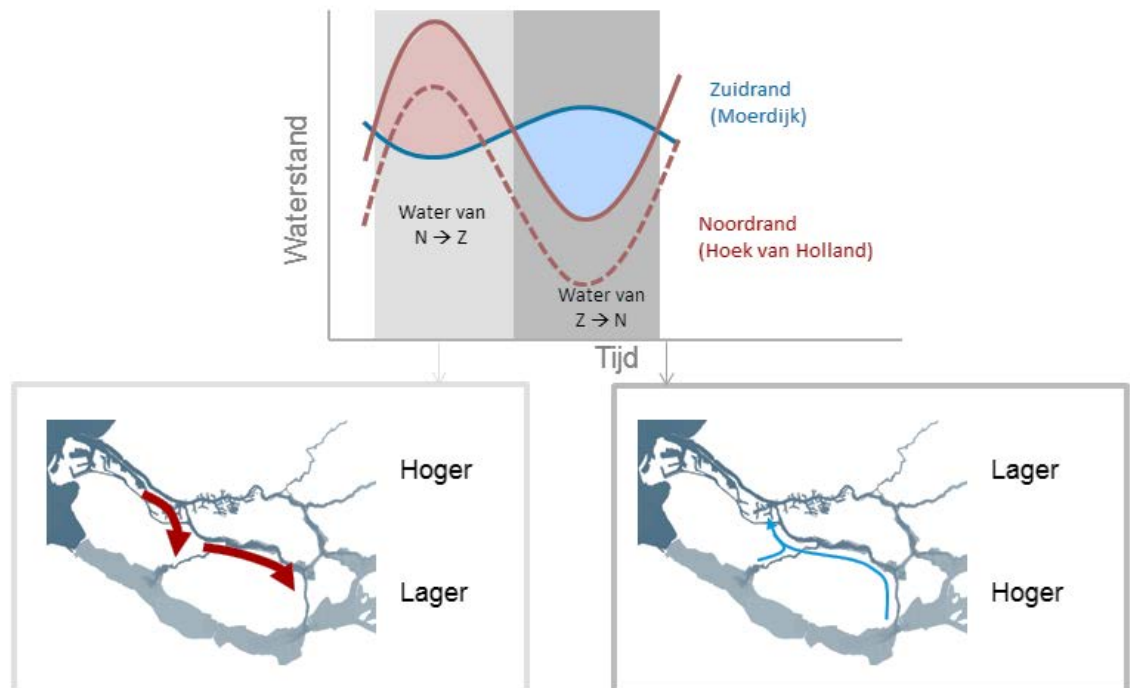
In Figuur 2.2 is geïllustreerd welk effect dit heeft op de waterbeweging en daarmee de zoutbeweging tussen de noord- en de zuidrand. Tijdens de eerste fase van het getij, wanneer de waterstand aan de noordrand hoger ligt dan de zuidrand, stromen water en zout van noord naar zuid. Tijdens de tweede fase van het getij daalt de waterstand van de noordrand onder de waterstand van de zuidrand en bewegen water en zout terug van de zuidrand naar noordrand. Omdat onder normale condities de eerste fase korter duurt en kleinere waterstandverschillen heeft dan de tweede, stroomt water netto naar het noorden en kan zout maar in beperkte mate indringen richting het zuiden. Tijdens extreme condities, bijvoorbeeld bij windopzet, stijgen de waterstanden aan de noordrand ten opzichte van de zuidrand, dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.3. Als resultaat hiervan is de periode waarin water van noord naar zuid stroomt langer geworden en zijn de waterstandverschillen vergroot. Zout zal dus verder het gebied in dringen en kan mogelijk de zuidrand bereiken. De periode waarin water weer terugstroomt van zuid naar noord is verkort en bovendien zijn de waterstandverschillen verkleind ten opzichte van de normale situatie. Zout stroomt dus minder verder terug naar de noordrand. Dit zijn de typische condities waaronder achterwaartse verzilting op kan treden: zout kan gedurende de eerste fase van het getij de zuidrand bereiken en stroomt gedurende de tweede fase van het getij in mindere mate terug. In extreme gevallen kan het zelfs voorkomen dat de waterstanden bij Moerdijk altijd lager liggen dan die van Hoek van Holland. In dat geval stroomt zout zelfs helemaal niet terug (van Spijk 2006).

Tot slot speelt de buffercapaciteit van het Haringvliet en Hollandsch Diep een rol bij het optreden van achterwaartse verzilting. Bij windopzet aan de noordrand zal er een groot verschil in waterstanden tussen de noord- en de zuidrand optreden. Omdat het Hollandsch Diep en Haringvliet groot zijn, reageren de waterstanden hier met een vertraging. Het duurt dus even voordat ook hier de waterstanden zullen toenemen door de windopzet aan de

noordrand. In een volgend getij met dezelfde opzet is het waterstandsverschil daarom kleiner en de "verziltingskracht" daarmee ook.



Figuur 2.2 Waterbeweging tussen noord en zuid onder normale condities



Figuur 2.3 Waterbeweging tussen noord en zuid onder extreme condities, zoals bijvoorbeeld peilopzet ten gevolge van wind

## 2.3.2 Zoutopslag in geulen en nalevering

Als zout eenmaal de zuidrand heeft bereikt kan zout terecht komen in de diepe geulen, afhankelijk van de condities zal de ontzilting op verschillende wijze plaatsvinden:

- De rivierafvoeren zijn hoog genoeg, zodat er gespuid wordt door de Haringvlietsluizen. Zo kan de zuidrand via de sluisen ontzilten. Afhankelijk van de mate van gelaagdheid van het systeem en de stroomsnelheden, zal zout nog enige tijd achterblijven in de geulen of snel uitspoelen.
- De rivierafvoeren zijn zodanig laag dat er niet gespuid wordt. Zout zakt uit in de diepe geulen en kan daar, afhankelijk van de windcondities/ mate van stratificatie, lang in achterblijven. Bij elk getij zal een klein beetje zout vrijkomen en via het Spui weer terug naar de noordrand stromen, dit noemen we nalevering.

Details over zoutopslag in diepe geulen worden nader bestudeerd in deelproject "Functioneren voormalige getijgeulen m.b.t. zoutretentie" van de systeemanalyse (Tiessen 2016).

## 2.3.3 Verzilting zuidrand via Haringvlietsluizen (toekomst)

In 2018 zullen de sluisen gedeeltelijk open gaan bij vloed ("Kierbesluit"). Het Haringvliet zal dan ook deels verzilten. Afgesproken is dat zout hierbij niet verder komt dan de denkbeeldige lijn Spui-Middelharnis. Meer hierover volgt in Hoofdstuk 4.



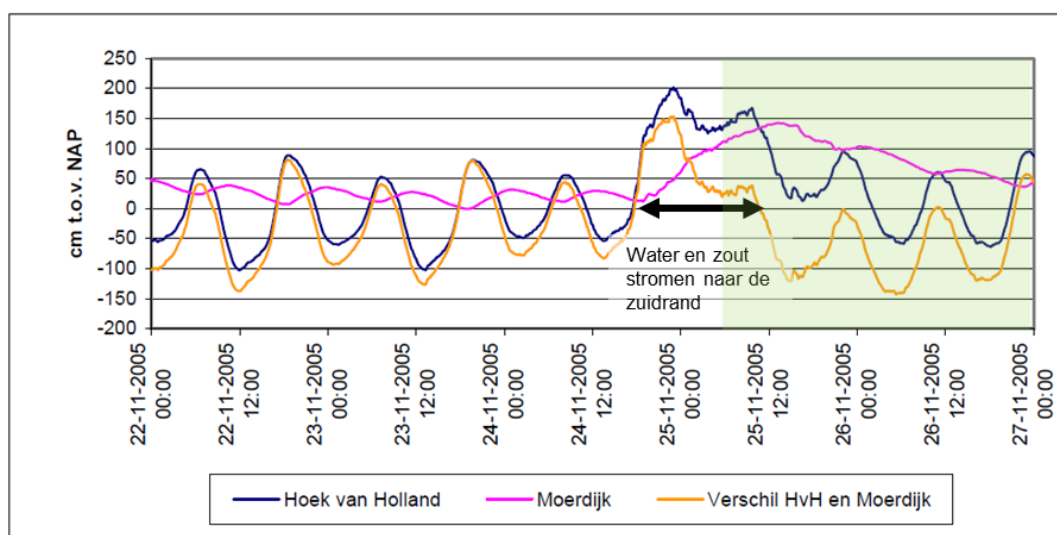
### 3 Achterwaartse verzilting

#### 3.1 Achtergrond

In extreme gevallen kunnen bij achterwaartse verzilting het Hollandsch Diep en Haringvliet maandenlang verzilt blijven. Een voorbeeld hiervan is de achterwaartse verzilting van november 2005. In Figuur 3.1 is te zien dat de waterstanden bij Hoek van Holland bij vloed veel hoger lagen dan die in Moerdijk, zodat zout ver kon indringen. Tijdens eb bleven de waterstanden bij Hoek van Holland hoger, waardoor zout niet kon worden teruggedrongen en achterbleef in het Haringvliet. Door de langdurige lage rivierafvoeren was het moeilijk om extra te spuien via de Haringvlietsluizen en was de aanvoer van het verse rivierwater relatief zout, tot boven de 150 mg Cl/l. Zodoende bleef de zuidrand maandenlang verzilt, met als gevolg een langdurige innamestop bij enkele zoetwaterinnamepunten (van Spijk 2006).

Hoewel een achterwaartse verzilting van deze mate tot nog toe maar 1 keer is voorgekomen, kan een minder ernstige achterwaartse verzilting ook tot problemen of beperkingen leiden voor de zoetwaterinname, zoals de achterwaartse verzilting tijdens de Sint Nicolaasstorm in 2013 (De Vries 2014). Daarnaast wordt verwacht dat het optreden van achterwaartse verzilting vaker zal voorkomen, door zeespiegelstijging, frequentere stormen, lagere rivierafvoeren en de rivierbodemosie in de Oude Maas en het Spui, welke conform huidige trend in 2050 enkele meters lager zullen liggen in 2050 (Huisman 2013; Becker 2015).

Om de achterwaartse verzilting beter te begrijpen en te voorspellen is in dit hoofdstuk gekeken naar de opgetreden situaties van achterwaartse verzilting en geanalyseerd hoe goed de huidige vuistregel voor het optreden van achterwaartse verzilting werkt. Tot slot wordt op basis van de systeemkennis een eerste aanzet gegeven voor het opstellen van een nieuwe vuistregel.



Figuur 3.1 Opgetreden waterstandsverloop Hoek van Holland en Moerdijk 22 t/m 26 november 2005. Groene vlak geeft periode van achterwaartse verzilting weer. Bron: Van Spijk (2006)

#### 3.2 Verziltingstypologieën verzilting zuidrand

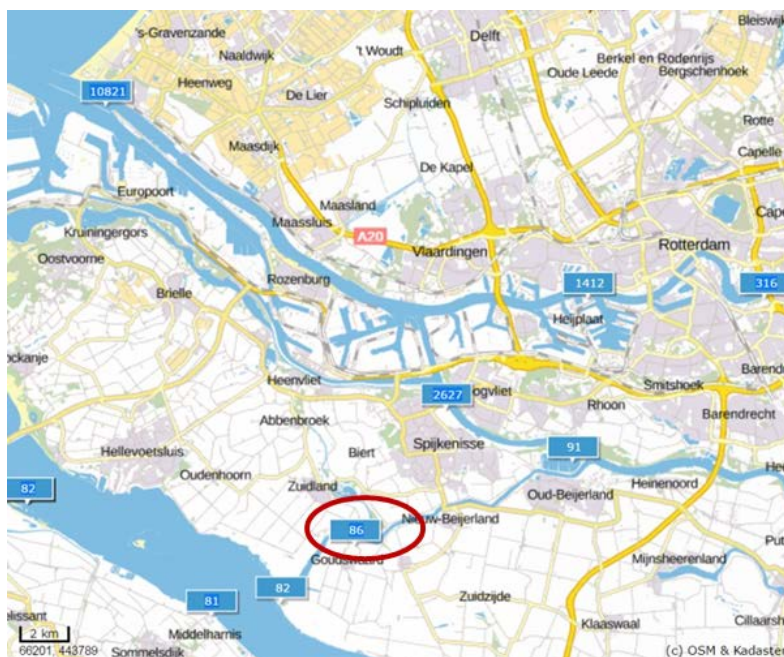
In eerdere studies zijn op basis van empirie de volgende verschijningsvormen van achterwaartse verzilting geduid (De Vries 2014):

1. Kortdurende maar extreme verzilting (enkele uren tot enkele getijperioden, tot  $>> 500$  mg Cl/l). Deze 'achterwaartse' verzilting wordt veroorzaakt doordat de getijgolf (of preciezer: het getijdebiet) via Nieuwe Waterweg en Oude Maas ook doordringt tot in het Spui en zelfs tot in het Haringvliet. Deze verzilting ('type 1') komt vrijwel uitsluitend voor in najaar en winter door de combinatie van lage rivierafvoer en hoge zeewaterstand door windopzet.
2. Langdurige en forse verzilting (weken - maanden, 200-500 mg Cl/l). Deze verzilting wordt veroorzaakt doordat als na-ijleffect van type 1 verzilting een hoeveelheid zout water achterblijft in de bodemwaterlaag van het Haringvliet, die in de weken - maanden daarna via het Spui weer wordt afgevoerd. En een klein beetje zeewater geeft al een forse verzilting. Voor bijvoorbeeld een verhoging met 150-200 mg Cl/l boven het achtergrondniveau van de rivier is bijmenging van slechts 1% zeewater nodig. Ook deze verzilting ('type 2') komt vrijwel uitsluitend voor in najaar en winter, en wordt altijd voorafgegaan door extreme achterwaartse verzilting.
3. Zeer langdurige maar geringe verzilting ( $>> 1$  maand, 150-200 mg Cl/l). Deze verzilting wordt veroorzaakt doordat bij langdurig lage rivierafvoeren gaandeweg de chloriniteit van het rivierwater steeds verder oploopt. Ook dit derde type verzilting zal vooral in najaar en winter gaan optreden.

In dit onderzoek richten we ons op type 1 en 2.

### 3.3 Historische gebeurtenissen van achterwaartse verzilting

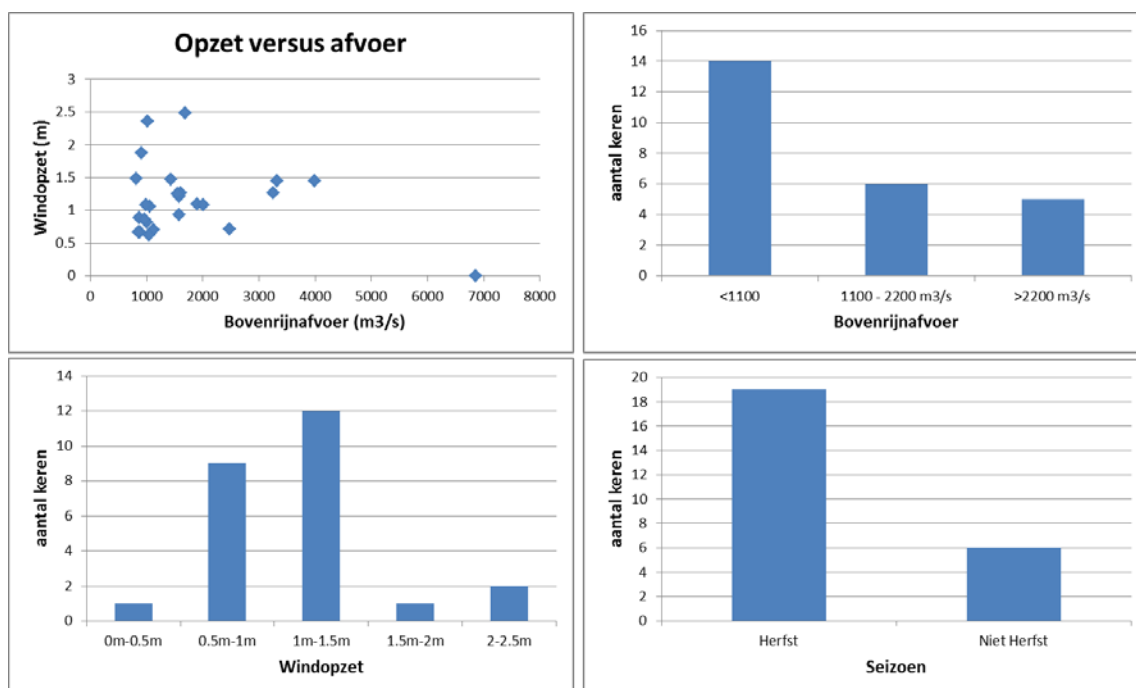
Uit een overzicht van Rijkswaterstaat (van Spijk 2006), blijkt dat in de periode 1990-2005 achterwaartse verzilting 25 keer is opgetreden, zie tabellen in Bijlage A<sup>2</sup>. Als definitie is hierbij gehanteerd dat de chlorideconcentratie bij Bernisse meer dan 500 mg Cl/l bedraagt. De locatie van het meetpunt Bernisse is weergegeven in Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Huidige zoutmeetlocaties van Rijkswaterstaat. De locaties Bernisse is met rood gemarkeerd. Bron: <https://www.rijkswaterstaat.nl/kaarten/zoutgehalte.aspx>

<sup>2</sup> NB. uit latere analyse binnen een ander project blijkt dat deze tabel mogelijk niet compleet is (Mens 2016).

In Figuur 3.3 worden enkele statistieken gegeven ten aanzien van het optreden van de achterwaartse verzilting. Deze zijn afgeleid van de waarden uit de tabellen van Rijkswaterstaat (Bijlage A). Hieruit blijkt dat achterwaartse verzilting vaker voorkomt bij lage rivierafvoer, maar dat dit geen voorwaarde is. Ook bij bovengemiddelde Bovenrijnafvoeren (>2200 m<sup>3</sup>/s) kan achterwaartse verzilting optreden. Windopzet lijkt wel degelijk een voorwaarde, slechts in 1 geval treedt achterwaartse verzilting op bij 0 m windopzet, in alle overige gevallen is de windopzet minimaal 0.5 m. Omdat windopzet een belangrijke rol speelt blijkt bovendien dat achterwaartse verzilting met name in de herfst (september – december) optreedt.



Figuur 3.3 Enkele statistieken ten aanzien van de condities waarbij achterwaartse verzilting voor is gekomen in de periode 1990-2005.

### 3.4 Vuistregel handboek waterwacht

In het handboek waterwacht is de volgende vuistregel opgenomen<sup>3</sup>:

**Vuistregel optreden achterwaartse verzilting:**

*HL (Hoog water Hoek van Holland - Laag water Moerdijk) > 1 m*

&

$Q_{\text{Bovenrijn}} (\text{Afvoer bij Lobith}) < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$

*[Handboek Waterwacht]*

<sup>3</sup> Er is een uitgebreidere vuistregel beschikbaar (zie Bijlage A) welke bestaat uit een viertal voorwaarden. Omdat er geen logische “en” of “of” clausules bij horen, is deze vuistregel lastig te valideren of toe te passen.

Hierbij zijn de HL-parameter en de rivierafvoer de belangrijkste indicatoren. De theorie hierachter is dat de HL-parameter (het verschil tussen bijna gelijktijdig optredende hoge waterstand bij Hoek van Holland (H) en lage waterstand bij Moerdijk (L)) bepalend is voor hoe ver water en zout van noord naar zuid kan stromen, zie ook §2.3.1 en dat de rivierafvoer bepalend is voor hoe ver zout vanuit zee kan indringen.

Bij toepassing van de huidige vuistregel op de opgetreden situaties van achterwaartse verzilting tussen 1990 en 2005, zoals gerapporteerd in de tabel in Bijlage A, kan gesteld worden dan in 15 van de 25 gevallen achterwaartse verzilting niet wordt voorspeld, omdat:

- $Q_{\text{Bovenrijn}} > 1100 \text{ m}^3/\text{s}$  (14x),
- $HL < 1 \text{ m}$  (1x).

De beperkte voorspelling met de vuistregel kan gerelateerd worden aan de volgende aspecten:

1. waterstandsverschillen gedurende het hele getij bepalen hoe ver zout kan indringen en weer teruggedrongen kan worden, zie systeembeschrijving in §2.3.1. De waterstandsverschillen gedurende het hele getij zijn daarom maatgevend. Omdat de HL-parameter en rivierafvoeren slechts twee componenten zijn in het bepalen van deze waterstandsverschillen (ook het spuidebiet van de Haringvlietsluizen, de afvoer over de Maas en wind dragen bij), is voorspelling op basis van deze twee niet toereikend.
2. de mate waarin het systeem is “opgeladen”, met andere woorden hoever zout al is binnengedrongen voor aanvang van een extreme situatie.

### 3.5 Verkennende analyse nieuwe vuistregel optreden Achterwaartse verzilting

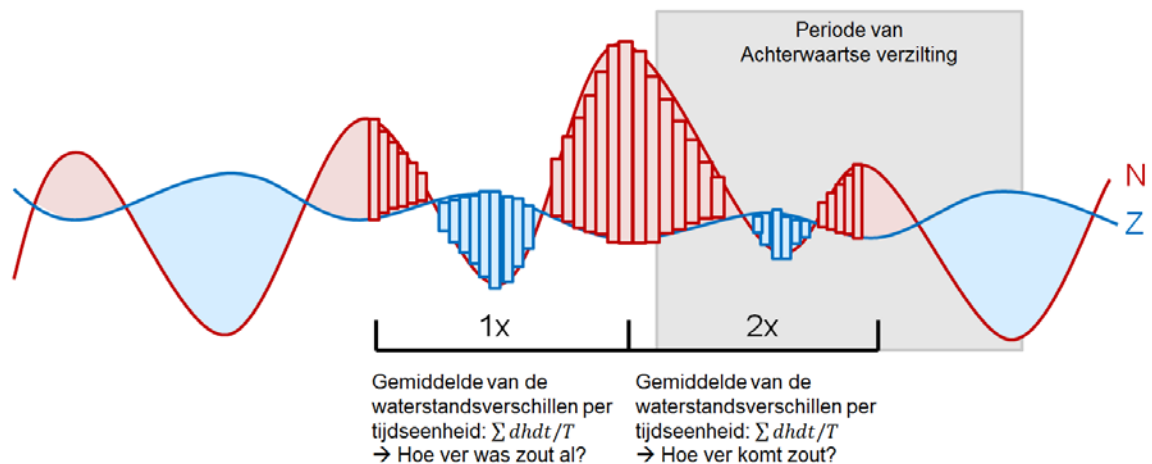
Op basis van de overwegingen uit §3.4 wordt in deze paragraaf een nieuwe parameter afgeleid en getest. Het gaat hierbij om een korte verkenning, met als doel om te bepalen of dit een kansrijke methode is. De parameter is dus nog niet getoetst op robuustheid en ook zijn bepaalde keuzes ingegeven door praktische aspecten van de implementatie, zoals de beschikbaarheid van informatie.

#### 3.5.1 Theorie

Theoretisch zijn voor het optreden van achterwaartse verzilting de volgende twee parameters maatgevend:

- Aanvangssituatie: hoever is het zout al?
- Waterstandsverschillen gedurende het hele getij (zie Figuur 2.3): hoe ver kan zout indringen tijdens vloed en hoever wordt het weer teruggebracht tijdens eb?

Door niet alleen de waterstandsverschillen van de huidige getijcyclus te nemen, maar ook die van de voorgaande cyclus, worden beide parameters ondervangen, zoals geïllustreerd in Figuur 3.4. De waterstandsverschillen van het voorgaande getij zijn een maat voor hoe ver zout gedurende het getij ervoor heeft kunnen komen en weer is teruggedrongen, dat wil zeggen de mate van oplading/ historie, de waterstandsverschillen van het huidige getij bepalen of zout daadwerkelijk Bernisse kan bereiken.



Figuur 3.4 Schematische weergave van waterstandsverschillen gedurende meerdere getijden en condities voor achterwaartse verzilting. Met de som van de waterstandsverschillen bedoelen we de integraal van de waterstandsverschillen, dat wil zeggen alle waterstandsverschillen maal de duur en gedeeld door de totale periode

### 3.5.2 Methode

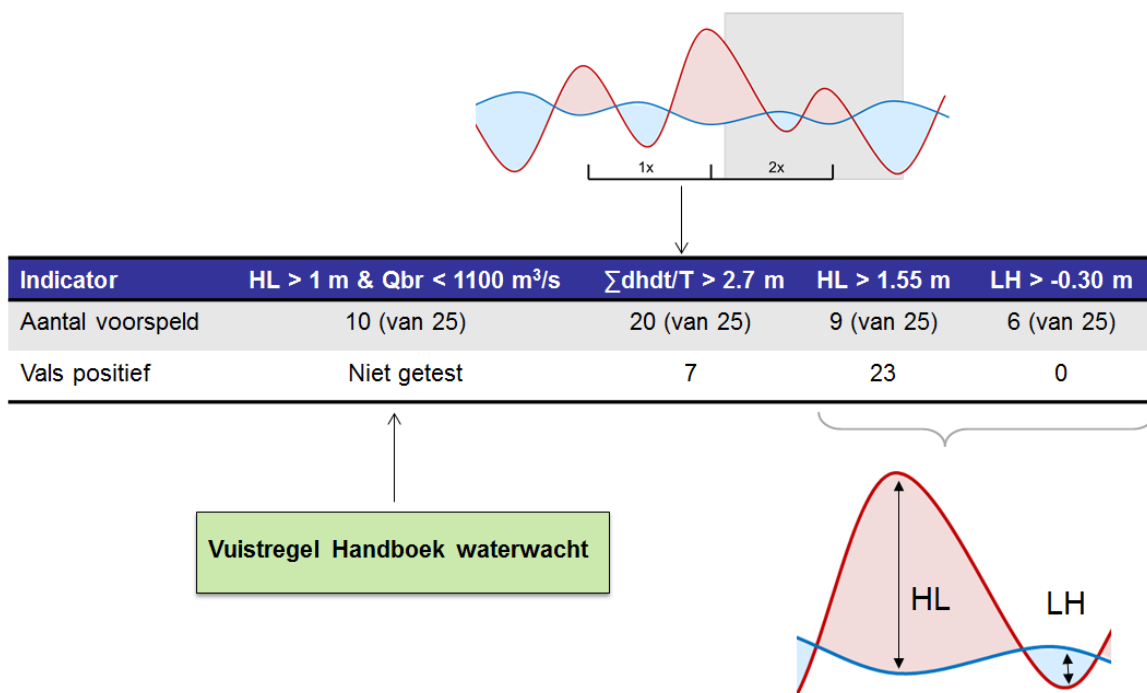
Voor het testen van de bovenstaande theorie is gebruik gemaakt van de waterstanden uit Waterbase voor Hoek van Holland en Moerdijk. Voor de situaties van achterwaartse verzilting is uitgegaan van de tabel uit Bijlage A, welke de situaties tussen 1990-2005 beschrijft. Vanwege het verkennende karakter van deze analyse is daarbij alleen gekeken of achterwaartse verzilting optrad en geen vergelijking gemaakt met de chlorideconcentraties. De beste verhouding tussen het gemiddelde van de waterstandsverschillen van de voorgaande getijcyclus (historie) en van de betreffende getijcyclus is verkregen op basis van uitproberen en kwam neer op 1x de voorgaande periode en 2x de huidige periode en voor een waarde van meer dan 2.7 m.

Op basis van de theorie zou het logisch zijn om als beginpunt het moment te kiezen waarop de waterstand aan de noordrand lager wordt dan de zuidrand, dan begint de volledige periode met eerst terugstroom naar de noordrand en daarna instroom naar de zuidrand. Omdat de waterstand bij Hoek van Holland niet altijd lager wordt dan de waterstand bij Moerdijk is dit punt niet altijd te vinden. Dit geldt met name voor situaties waarin achterwaartse verzilting optreedt, zie ook Figuur 3.1. Daarom is uitgegaan van het maximum bij Hoek van Holland, welke een veel eenduidigere definitie heeft, zie Figuur 3.4.

Voor overige details van de implementatie wordt naar de Matlab-code verwezen, welke in Bijlage B is toegevoegd.

### 3.5.3 Resultaat

Het resultaat is weergegeven in Figuur 3.4 en meer details worden gegeven in Bijlage C. Hieruit blijkt dat de nieuwe vuistregel, verkort aangeduid met  $\sum dhdt/T > 2.7 m$ , aanmerkelijk betere resultaten geeft dan de huidige vuistregel, 20 van de 25 situaties wordt correct voorspeld en er zijn slechts 7 vals positieven. Het lijkt er echter op dat zich in 2003 twee situaties van achterwaartse verzilting hebben voorgedaan die niet voorkwamen in de tabel uit Bijlage A. Indien dit klopt dan is het aantal correct voorspelde situaties 22 van de 27 en zijn er slechts 5 vals positieven.



Figuur 3.5 Resultaat nieuwe vuistregel, details achter de tabel worden gegeven in Bijlage C

Om een gevoel te krijgen voor de bruikbaarheid van de HL- en de LH-parameters zijn deze ook geëvalueerd. Omdat HL > 1 m, zeer veel vals positieve resultaten geeft is er een strengere norm gehanteerd. Met een norm van HL > 1.55 m worden slechts 9 van de 25 gebeurtenissen van achterwaartse verzilting voorspeld, terwijl het aantal vals positieven (23) hoog is. Met een norm van LH > -0.3 m treden er geen vals positieven op, maar worden slechts 6 gebeurtenissen van achterwaartse verzilting voorspeld. Met een lagere norm treden er wel vals positieven op. Uit bovenstaande kan geconcludeerd worden dat alleen HL of LH geen goede normen zijn en dat een HL > 1 m geregeld voorkomt. Of combinaties van HL en LH wel een goede maat kunnen zijn, eventueel gecombineerd met afvoeren, viel buiten deze korte verkennende analyse.

### 3.6 Discussie, conclusies en aanbevelingen

#### 3.6.1 Conclusie

Op basis van de verkennende analyse blijkt dat voor het optreden van achterwaartse verzilting niet de combinatie van de rivierafvoer en de windopzet niet het meest bepalend is, maar gemiddelde waterstandverschillen gedurende meerdere getijperioden. De huidige vuistregel uit het handboek waterwacht heeft daarom een beperkte voorspelkracht. De nieuwe vuistregel die gebaseerd is op de gemiddelde waterstandverschillen gedurende twee getijperiodes lijkt kansrijk: de meeste gebeurtenissen worden voorspeld en het aantal vals positieven blijft beperkt. Omdat voorspellingen van waterstanden met enkele dagen vooruit redelijk betrouwbaar zijn, is de methode ook toe te passen in de praktijk. Men zou de vuistregelen hierbij op kunnen nemen in de operationele modellen, waarbij op basis van de voorspelde waterstanden ook de waarde voor de nieuwe vuistregel kan worden bepaald. Indien deze boven de 2.7 m komt kan er een waarschuwing worden afgegeven.

Tot slot kunnen de eerder gedefinieerde verziltingstypologieën (zie §3.2) worden aangescherpt met de in dit onderdeel verkregen systeemkennis ten aanzien van de condities waarbij achterwaartse verzilting optreedt.

### 3.6.2 Discussie

Vanwege het verkennende karakter zijn de volgende punten niet of beperkt getest:

- Keuze van de periode: van welk moment tot welk bepaal je het gemiddelde van de waterstanden in de tijd, van piek naar piek, van kentering naar kentering?
- Keuze voor lengte en “gewicht” voorgaande periode: deze is nu 1 getijcyclus met een gewicht van 1 ten opzichte van een gewicht van 2 voor de huidige periode. Er is niet uitgebreid onderzocht of dit de optimale verhouding is en de juiste lengte. Mogelijk zijn voor de mate van oplading meerdere voorgaande getijcycli beter, omdat de mate van oplading over een langere tijd wordt bepaald.  
Dit zou onderzocht kunnen worden door de voorspelparameter te vergelijken met de gemeten chlorideconcentraties bij de Beerenplaat, Bernisse en Inloop Spui (zie ook volgende punt). Mogelijk dat hieruit blijkt dat de chlorideconcentraties bij Beerenplaat (enkele getijden voor aanvang van achterwaartse verzilting) een betere maat zijn voor de mate van oplading dan de waterstandsverschillen.
- Er is geen vergelijking gemaakt met de chlorideconcentraties, maar alleen gevalideerd op de perioden waarin volgens de tabel in Bijlage A achterwaartse verzilting optrad. Vergelijking met werkelijke chlorideconcentraties is nuttig, omdat gekeken kan worden naar de mate van correlatie tussen chlorideconcentratie en de waarde van de voorspelparameter. Bovendien zijn er aanwijzingen dat de tabel niet compleet is en daarmee een vertekend beeld geeft van het aantal opgetreden situaties van achterwaartse verzilting en daarmee het aantal positieven en vals positieven van de verschillende voorspelparameters.
- Voor de definitie van achterwaartse verzilting is uitgegaan van het optreden van chlorideconcentratie van meer dan 500 mg Cl/l bij Bernisse, conform eerder onderzoek (van Spijk 2006). Achterwaartse verzilting vormt pas een probleem als de concentraties langere tijd boven een bepaalde norm blijven bij Bernisse of als de zoutconcentraties in het Haringvliet te hoog worden.
- De voorspelparameter is nu gebaseerd op één limiet. Om het aantal vals positieven te beperken worden hierdoor sommige gebeurtenissen van achterwaartse verzilting gemist. Dit kan ondervangen worden door uit te gaan van meerdere limieten; bijvoorbeeld “verhoogde kans op achterwaartse verzilting” (limiet waarbij wel vals positieven optreden) en “zeer grote kans op achterwaartse verzilting” (limiet waarbij geen/nauwelijks vals positieven optreden).

Hoewel het op basis van de systeembeschouwing het meest logisch is om uit te gaan van de waterstandsverschillen gedurende meerdere getijperiodes, volgt hieronder een beschouwing van mogelijke alternatieven:

- Hoewel de waterstandverschillen eenvoudig te berekenen zijn, is een vuistregel idealiter gebaseerd op criteria waarvoor geen of slechts zeer beperkte berekening hoeft te worden uitgevoerd. Hierbij kan gedacht worden aan een combinatie tussen HL en LH voor meerdere getijden (combineren van HL en LH voor maar een getij levert geen bruikbare parameter op zoals blijkt uit huidige verkenning).
- Een combinatie van de Bovenrijnafvoer (zekere correlatie waterstanden aan de zuidrand), de windopzet (correlatie waterstanden aan de noordrand) en zoutconcentratie (historie) kan mogelijk ook tot een bruikbare parameter kan leiden. Daarbij zal bij een lage Bovenrijnafvoer weinig windopzet nodig zijn om zout ver het gebied in te laten dringen en bij een hoge Bovenrijnafvoer een hoge windopzet nodig zijn. Idem voor de relatie met de zoutconcentratie: is het gebied al “opgeladen” dan zijn minder lage debieten en minder hoge windopzet nodig om zout het hoekje om te laten gaan. Zo’n parameter zou dus uit een verhouding tussen deze drie eenheden bestaan. Deze optie is niet onderzocht, omdat deze complexer is dan uitgaan van

enkel de waterstandsverschillen en de waterstand aan de zuidrand niet alleen door de Bovenrijnafvoer wordt bepaald.

- In plaats van een vuistregel zou een voorspelling ook gebaseerd kunnen worden op berekeningen met het (operationele) SOBEM model. Uiteraard dient hiervoor eerst onderzocht te worden hoe goed SOBEM historische gebeurtenissen van achterwaartse verzilting weergeeft en hoeveel vals positieven er voorkomen.

### 3.6.3 Aanbevelingen

- Gebeurtenissen van achterwaartse verzilting aanvullen tot en met 2015 en nagaan of de tabel compleet is voor de periode 1990 tot en met 2005.
- Optimaliseren voorspelparameter op basis van de punten uit de discussie, gevolgd door een validatie op basis van een correlatie met de chlorideconcentraties.
- Aanscherping definitie van achterwaartse verzilting voor een nauwere aansluiting met de praktijk.
- Inbouwen vuistregel in het operationele model van de Rijn-Maasmonding. Op basis van de in het model voorspelde waterstanden kan de waarde voor de voorspelparameter worden berekend en kan bij dreigende verzilting door het model een waarschuwing worden gegeven.



## 4 Stuurknop Haringvlietsluizen

### 4.1 Achtergrond

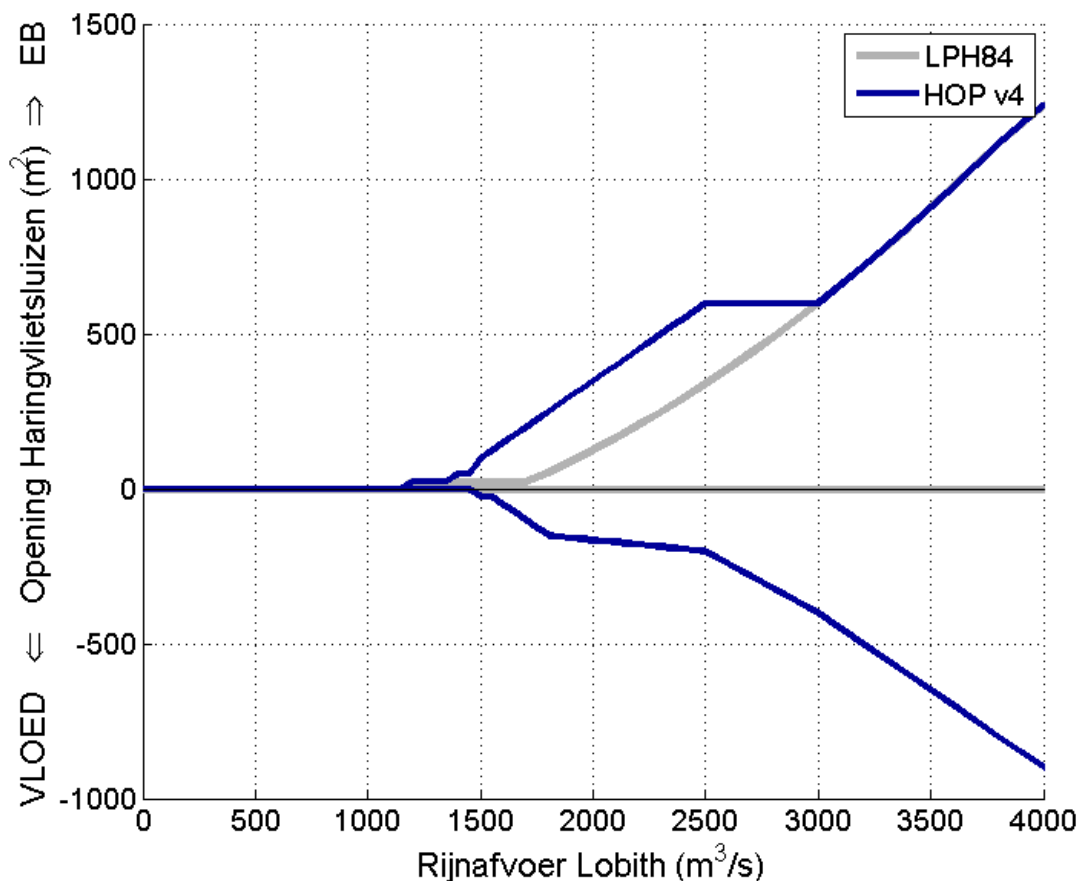
Door aanleg van de Haringvlietsluizen als onderdeel van de Deltawerken (zie Figuur 4.1), staat het Haringvliet niet langer in open verbinding met zee en is de zuidrand van de Rijn-Maasmonding zoet geworden. Zout bereikt de zuidrand alleen via de noordrand of via lekverliezen door de sluizen. Bij een Bovenrijnafvoer boven de 1100 m<sup>3</sup>/s worden tijdens eb de sluizen in beperkte mate opengezet (25 m<sup>2</sup>). Vanaf 1700 m<sup>3</sup>/s gaan de sluizen verder open waarbij de grootte van de opening gekoppeld is aan de afvoer. Dit operationeel beheer is vast gelegd in het LPH'84, het LozingsProgramma Haringvlietsluizen 1984, zie Figuur 4.2. De Haringvlietsluizen kunnen als grote regelstuurknop van de Rijn-Maasmonding worden beschouwd, omdat ze de waterstanden en debietverdeling reguleert. Afhankelijk van de opening kan dit over honderden kuubs per seconde gaan.

Om de visintrek te bevorderen zullen in 2018 de sluizen “op een kier gaan”. Dit houdt in dat bij vloed de sluizen in beperkte mate zullen openen. Hierbij is afgesproken dat de zuidrand voorbij de denkbeeldige lijn Spui Middelharnis niet mag verzilten, dat wil zeggen dat zoetwaterinnamepunten geen hinder mogen ondervinden van het nieuwe programma. Daarnaast is afgesproken dat de haven van Moerdijk bereikbaar blijft wat inhoudt dat de waterstanden op het Haringvliet zoveel mogelijk boven NAP dienen te blijven. Omdat berekeningen ten aanzien van zoutconcentraties op de zuidrand beperkte betrouwbaarheid hebben, is besloten het kieren via het “Lerend Implementeren” principe in te voeren. Dit houdt in dat de gedurende vijf jaar de opening van de Haringvlietsluizen stap voor stap vergroot zal worden en de zoutconcentraties gemonitord zullen worden. Het huidige LPH'84 en het kandidaat kierprogramma zijn weergegeven in Figuur 4.2.

Doel van dit hoofdstuk is om systeeminzicht te verkrijgen over het effect van de opening op de verschillende verziltingsprocessen, zowel voor de huidige als de toekomstige situatie. Deze kennis levert toe aan een handelingsperspectief voor verziltingsscenario's in de huidige situatie en aan het proces van het “Lerend Implementeren” in de toekomst.



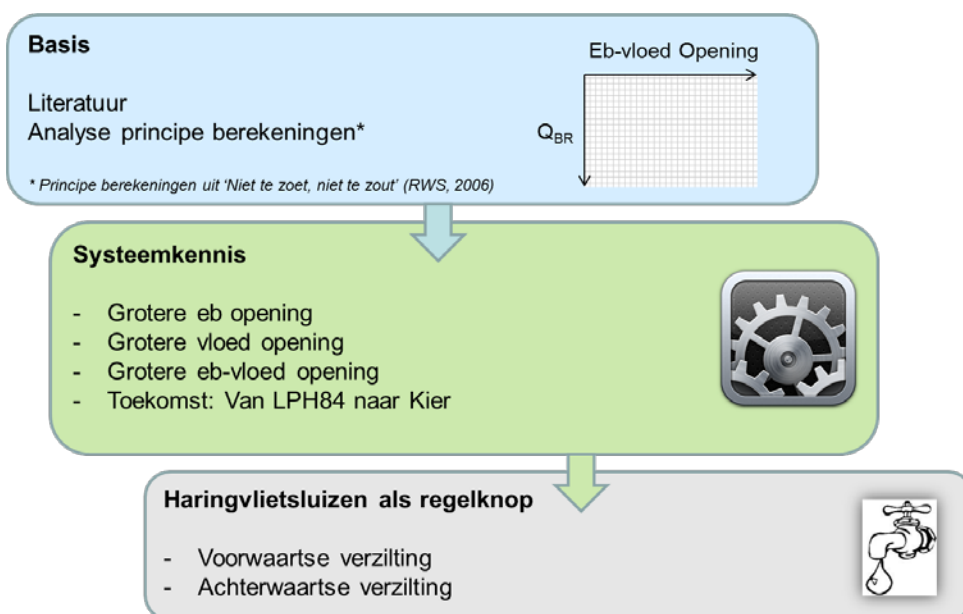
Figuur 4.1 Haringvlietsluizen in aanbouw: overzichtsfoto van de bouwput na inundatie. In november 1958 is met de aanleg begonnen en in 1971 was de aanleg voltooid. Foto uit archief van Rijkswaterstaat: <http://www.deltawerken.com/De-sluizen/202.html>



Figuur 4.2 Huidig stuurprogramma Haringvlietsluizen (LPH'84) en kandidaat kierprogramma (HOPv4)

## 4.2 Methode

De in dit hoofdstuk gehanteerde methode is visueel weergegeven in Figuur 4.3. Op basis van literatuur en een nadere analyse van de principe berekeningen (zie kader) is systematisch het effect van een grotere eb-opening, vloed-opening, en gecombineerde eb-vloed opening op de waterbeweging en verzilting onderzocht. Ook wordt een doorkijk gegeven naar de toekomst ("de Kier"). Vanwege de beperkte betrouwbaarheid van de berekende zoutverspreiding aan de zuidrand wordt in de analyse voornamelijk de hydrodynamica beschouwd en vindt een vertaling naar zout in kwalitatieve zin plaats op basis van kennis over zoutverspreidingsprocessen in de Rijn-Maasmond. Tot slot wordt op basis van de verkregen systeemkennis kwalitatieve uitspraken gedaan over de Haringvlietsluizen als stuurknop.



Figuur 4.3 Visuele weergave methode onderdeel "stuurknop Haringvlietsluizen". Nadere toelichting wordt gegeven in de hoofdstekst

### Principe-berekeningen

Voor het afleiden van het kandidaat kierbesluit zijn vele berekeningen uitgevoerd met het SOBEK-RE NDB model, waarbij systematisch de rivierafvoer en de opening van de Haringvlietsluizen zijn gevarieerd (de Goederen et al. 2006). Een overzicht van de uitgevoerde berekeningen wordt gegeven in Tabel 4.1. Voor de analyse van het effect van een grotere vloedopening zijn in dit onderzoek de blauw- en groen-gearceerde berekeningen gebruikt, voor het effect van een grotere eb-opening is variant d1 gebruikt.

Tabel 4.1 Overzicht principe berekeningen voor het afleiden van het kandidaat-kierprogramma [Bron: Rapport "Niet te zoet, niet te zout"]

	<b>Qbr (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Eb/Vloed opening (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Aantal sommen</b>
Variant d1	1000 – 3500	0/0, 100/100, 200/200, 300/300,	105
Variant d1x	3500 m <sup>3</sup> /s – 9500 m <sup>3</sup> /s	400/400, 500/500, 600/600	132
Variant d2	1000 m <sup>3</sup> /s – 3500 m <sup>3</sup> /s	0/0, 120/80, 240/160, 360/240, 480/320, 600/400, 720/480	105
Variant d5	1000 m <sup>3</sup> /s – 3500 m <sup>3</sup> /s	0/0, 150/50, 300/100, 450/150, 600/200, 750/250, 900/300	105
Variant d5a	1000 m <sup>3</sup> /s – 3500 m <sup>3</sup> /s	0/0, 150/25, 300/25, 450/150, 600/200, 750/250, 900/300	105
Variant d5b	1000 m <sup>3</sup> /s – 3500 m <sup>3</sup> /s	0/0, 75/12.5, 150/25, 225/25, 300/25, 375/87.5, 450/150	105

Nb. In de berekeningen is de betrouwbaarheid van de zoutverspreiding langs de zuidrand zeer beperkt omdat:

- het model langs de zuidrand niet is afgeregeld voor zout. Op basis van 3D berekeningen had men het idee dat de zoutindringing voorspeld met het 1D model te groot was.
- de sommen stationair zijn (vaste afvoer, vaste opening), terwijl de verspreiding van zout sterk afhangt van de historie.

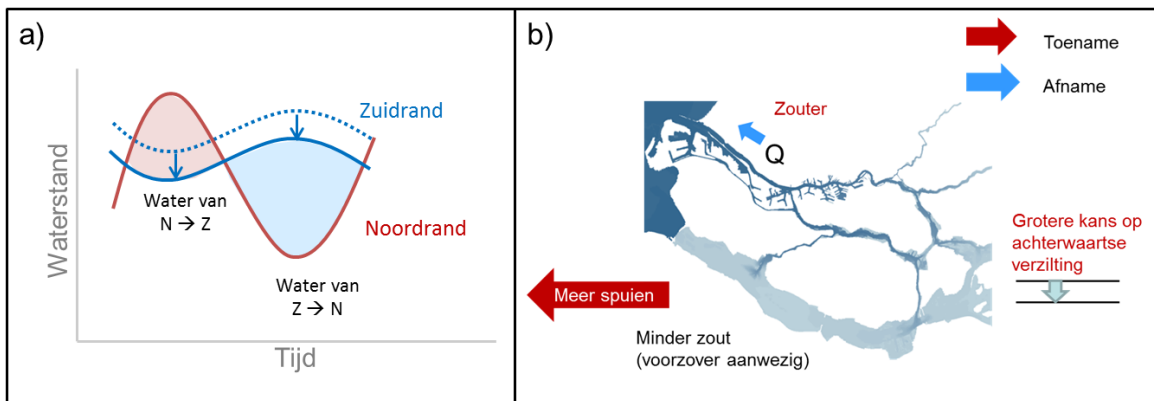
4.3 **Systeemwerking Haringvlietsluizen**

Hieronder worden de effecten van een grotere ebopening, vloedopening en gecombineerde eb-vloedopening stap voor stap besproken. Omdat de waterstandsverschillen leidend zijn voor de waterbeweging en zoutverspreiding in het gebied, wordt steeds eerst het effect op de waterstanden besproken en daarna een doorvertaling gemaakt naar de restdebieten en zout.

4.3.1 Grotere ebopening

Bij een grotere ebopening (en gelijkblijvende vloedopening) daalt de waterstand op het Haringvliet (Figuur 4.4a) en verlaat meer water het gebied via de zuidrand en minder via de noordrand (Figuur 4.4b). Indien er zout aanwezig is aan de zuidrand (ten gevolge van achterwaartse verzilting of in de toekomst door het “kieren”), daalt hier de zoutconcentratie. Hoe sterk deze daling is niet alleen afhankelijk van de grootte van de toename in debiet via de sluisen, maar ook van de verdeling van zout in het Haringvliet. Indien het zout zich voornamelijk in de diepe geulen bevindt en het systeem een hoge mate van gelaagdheid heeft, is de daling van de concentraties geringer dan bij een gemengd systeem. Naar verwachting kan het in bijzondere situaties zelfs zijn dat een toename in afvoeren geen verzoeting oplevert.

Omdat de afvoer via de noordrand afneemt nemen de zoutconcentraties daar juist toe. Om het effect op achterwaartse verzilting in te schatten kijken we naar de verandering in waterstandsverschillen. Door de grotere ebopening dalen de waterstanden aan de zuidrand. Tijdens vloed aan de noordrand zal nu meer water naar het zuiden stromen en tijdens eb zal minder water terugstromen naar de noordrand, zie Figuur 4.4a. Hierdoor zal de kans op achterwaartse verzilting toenemen.

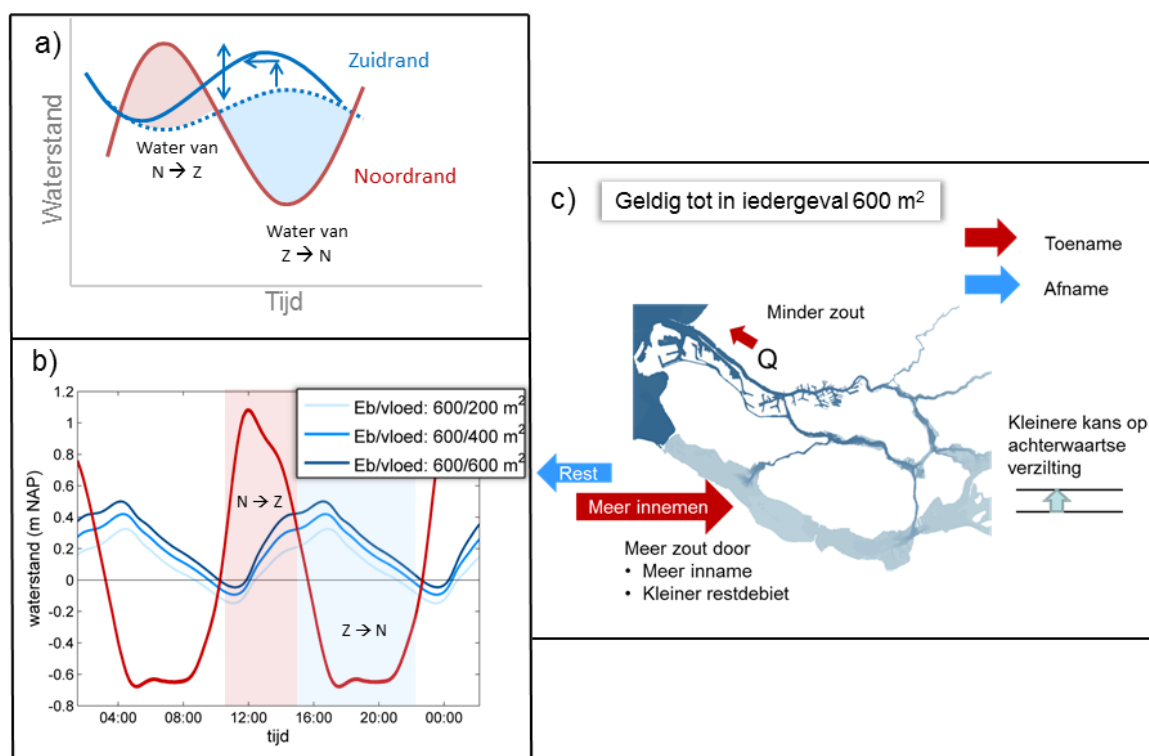


Figuur 4.4 Schematische weergave van het effect van een grotere ebopening op a) de waterstanden en daarmee b) de waterbeweging en zoutverspreiding in de Rijn-Maasmond. NB. Omdat er geen berekeningen beschikbaar waren zijn de effecten op de waterstanden alleen schematisch weergegeven en niet verder gekwantificeerd

4.3.2 Grotere vloedopening

De effecten van een grotere vloedopening (en gelijkblijvende ebopening) zijn geïllustreerd in Figuur 4.5. Wanneer de vloedopening wordt vergroot, zal de invloed van getij groter worden. Dit vertaalt zich op de zuidrand in een vergroting van de getijslag en het verschuiven van de fase, dat wil zeggen het tijdsverschil tussen hoogwater bij Hoek van Holland en hoogwater bij Moerdijk. Door de inname van water tijdens vloed neemt ook de middenstand (gemiddelde waterstand) toe. Getallen zijn weergegeven in Tabel 4.2. Zoutconcentraties aan de zuidrand zullen toenemen doordat minder water het systeem via de zuidrand verlaat en doordat tijdens

vloed zoutwater wordt ingenomen. Omdat op de noordrand het restdebiet toeneemt, zullen daar juist de zoutconcentraties afnemen. In Figuur 4.5a is te zien dat de waterstandsverschillen tijdens vloed zullen afnemen, wat betekent dat minder water naar de zuidrand zal stromen. Omgekeerd zullen de waterstandsverschillen tijdens eb toenemen, wat betekent dat meer water terug zal stromen naar het noorden. Beide effecten zijn gunstig voor het tegengaan van achterwaartse verzilting, maar zorgen voor een verhoging van de chlorideconcentraties aan de zuidrand via inname via de sluizen.



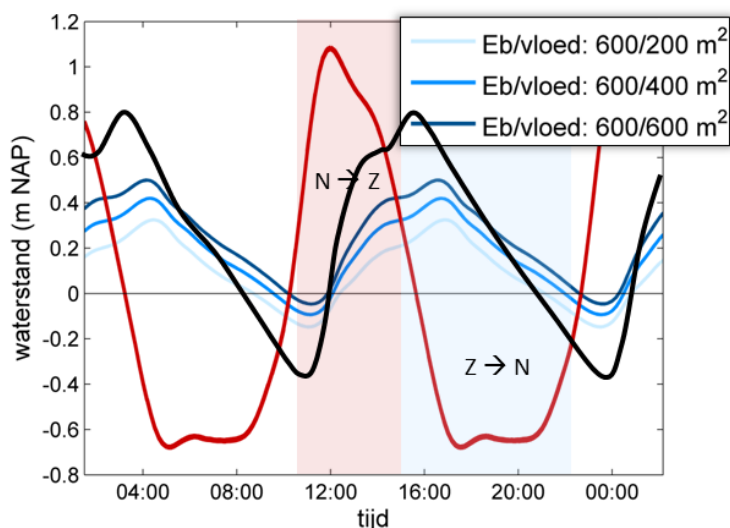
Figuur 4.5 Weergave van het effect van een grotere vloed-opening op de waterstanden conceptueel (a) en volgens het model (b) en daarmee de waterbeweging en zoutverspreiding in de Rijn-Maasmondung (c).

Tabel 4.2 Kwantificatie effecten grotere vloed-opening op waterstanden, fase en restdebieten. Keuze voor bestudeerde openingen vloeit voort uit beschikbaarheid van de berekeningen, zoals aangegeven in het kader op pagina 17

$Q_{BR} = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$	$25 \text{ m}^2 \rightarrow 300 \text{ m}^2$	$200 \text{ m}^2 \rightarrow 600 \text{ m}^2$
Middenstand	+11 cm	+15 cm
Getijslag	+4 cm	+7 cm
Fase (gebaseerd op minima)	+10 min	+5 min
Fase (gebaseerd op maxima)	-10 min	-15 min
Restdebiet NWW	+267 m <sup>3</sup> /s	+331 m <sup>3</sup> /s
Restdebiet Haringvliet	-316 m <sup>3</sup> /s	-399 m <sup>3</sup> /s

Bovenstaande effecten gelden overigens alleen voor het bestudeerde bereik van openingen tot 600 m<sup>2</sup>. Bij een nog grotere vloedopening zal de getijamplitude nog verder toenemen en de fase verder verschuiven. Het mogelijke effect is geïllustreerd in Figuur 4.6. Waar tijdens

vloed (rood gearceerde deel) de som van de waterstandverschillen afnam bij het vergroten van de opening van 200 naar 600 m<sup>2</sup> (minder water en minder zout van noord- naar zuid), neemt deze mogelijk niet langer af bij een nog grotere opening<sup>4</sup>. De kans op achterwaartse verzilting neemt daarmee niet langer af. Ook de afname van verzilting aan de noordrand zal niet doorzetten, omdat de restdebieten langs de noordrand niet langer toe zullen nemen bij grotere opening. Het zijn immers de waterstandverschillen die bepalen hoeveel water van noord naar zuid stroomt en vice versa, en hoeveel water dus het gebied via de noord- of zuidrand verlaat. Bovenstaande toont aan dat men voorzichtig moet zijn met het extrapoleren van effecten. Omdat volgens het huidige kandidaat kierprogramma de opening pas bij hele hoge rivierafvoer groter zal worden dan 600 m<sup>2</sup> (zie Figuur 4.2), lijkt met dit soort niet-lineariteiten geen rekening te hoeven worden gehouden in de nabije toekomst.



Figuur 4.6 Effect grotere vloed-opening op de waterstanden. In zwart een mogelijke extrapolatie van het effect van een nog grotere vloed-opening op de waterstanden aan de zuidrand. NB. het gaat hierbij niet om het kierbesluit, maar om de werking van de vloedopening in het algemeen.

#### 4.3.3 Grotere eb-vloed opening

Indien de eb- en vloedopening beide verder opengaan, zullen de effecten een combinatie worden van de in paragraaf 4.3.1 en 4.3.2 behandelde effecten<sup>5</sup>:

- Zuidrand: Lagere middenstand en grotere kans op achterwaartse verzilting door grotere ebopening, hogere middenstand en kleinere kans op achterwaartse verzilting door grotere vloedopening.
- Zuidrand: Hoger restdebiet en minder zout bij grotere ebopening, lager restdebiet en meer zout bij grotere vloedopening.
- Noordrand: Lager restdebiet en meer zout bij grotere ebopening, hoger restdebiet en minder zout bij grotere vloedopening.

<sup>4</sup> Het hangt af van hoe de amplitude en fase veranderen wat het effect zal zijn op de waterstandsverschillen en daarmee de waterbeweging en zoutverspreiding.

<sup>5</sup> In het bestudeerde bereik tot 600 m<sup>2</sup>. Bij grotere openingen, kunnen verschuiving in fase en verandering in amplitude voor niet-lineariteiten zorgen, zoals besproken in §4.3.3.

De effecten van een grotere eb- en vloedopening zijn geïllustreerd in Figuur 4.7 en Tabel 4.3. Bij grotere eb-vloedopening zal de middenstand dalen, de getijslag toenemen en de fase verschuiven. De effecten op getijslag en fase zijn het gevolg van de grotere vloedopening. De middenstands daling wordt veroorzaakt door het gecombineerde effect van de grotere vloedopening (verhoging middenstand) en ebopening (verlaging middenstand), waarbij de tweede sterker is. Omdat de middenstand netto daalt nemen de restdebieten door de Haringvlietsluizen toe en door de Nieuwe Waterweg af. Dit gedrag is niet lineair: hoe groter de opening, hoe kleiner de verandering in restdebieten, zie Figuur 4.8.

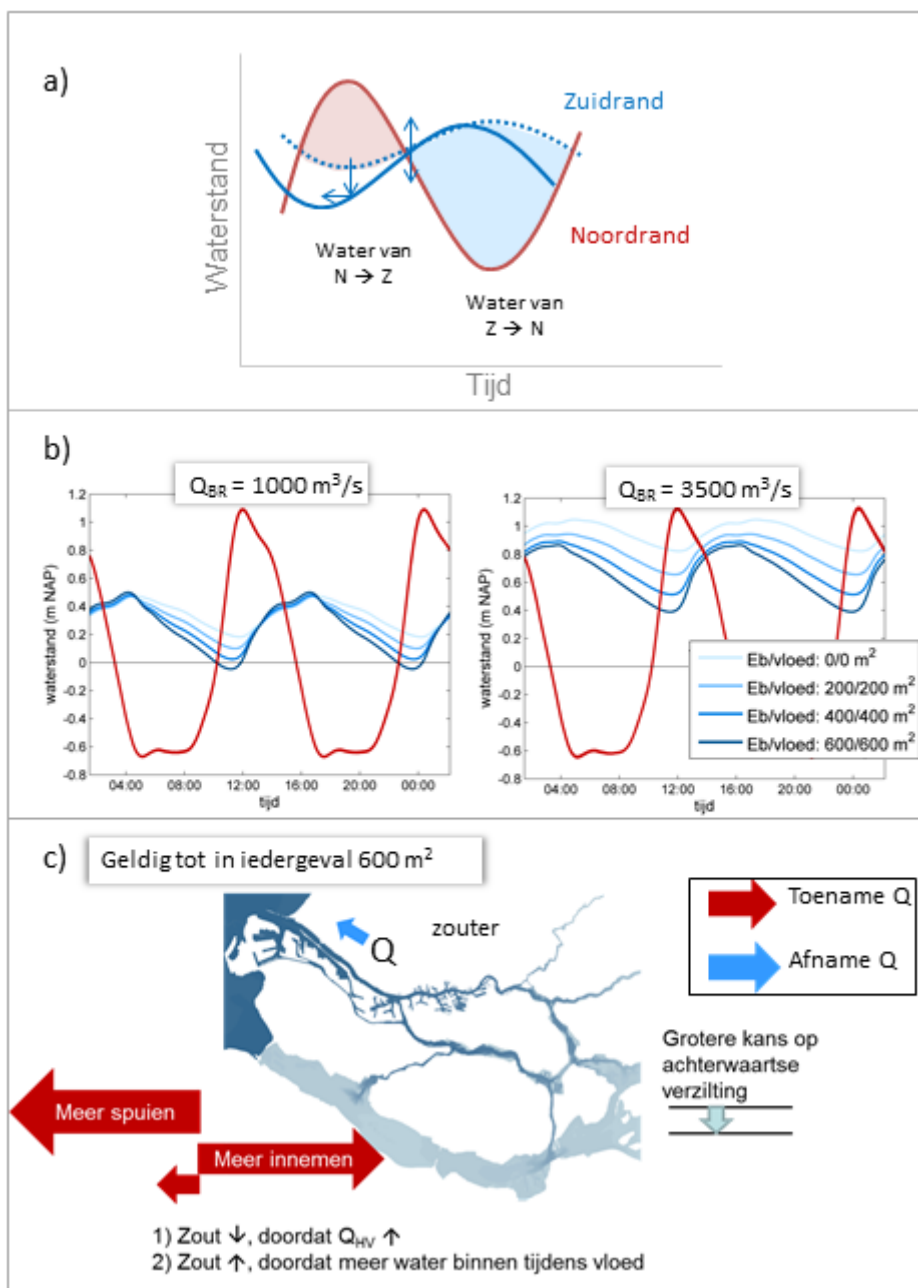
Voor zout heeft dit de volgende consequenties. Aan de noordrand zullen de zoutconcentraties toenemen doordat minder water het systeem via de noordrand verlaat, waarbij hier ook geldt dat hoe groter de opening, hoe kleiner de toename. Omdat de middenstand zal dalen, is de verwachting dat achterwaartse verzilting toe zal nemen. Tot slot spelen voor de zoutindringing aan de zuidrand via de Haringvlietsluizen twee effecten een rol:

- 1 toename zoutconcentraties doordat meer zoutwater wordt ingenomen tijdens vloed,
- 2 afname zoutconcentraties doordat de afvoer door de Haringvlietsluizen toeneemt en meer zout wordt uitgespoeld.

Hierdoor kan het gebeuren dat de zoutconcentraties afnemen in plaats van toenemen bij een grotere eb-vloedopening. Dit is waargenomen in de principe berekeningen, zoals uitgebreid besproken en geanalyseerd in het rapport "Niet te zoet, niet te zout" (de Goederen et al. 2006). Het effect van een grotere opening op de zoutconcentraties is geïllustreerd in Figuur 4.9. Hierin is te zien dat aanvankelijk de zoutconcentraties toenemen doordat het Haringvliet zoet was en er door de vloedopening zout kan binnendringen. De grotere restdebieten zijn hierbij niet sterk genoeg om het zout buiten te houden. Bij grotere opening nemen de zoutconcentraties af, omdat het effect van de toename in restdebiet op de zoutconcentraties grotere is dan de hoeveelheid zout die extra wordt ingenomen tijdens vloed. Omdat bij nog grotere opening de restdebieten steeds minder sterk toenemen (Figuur 4.8), zal het effect van de inname van zout tijdens vloed sterker zijn en zullen de zoutconcentraties weer toenemen. Hoewel het theoretisch gezien aannemelijk is dat een dergelijk effect op kan treden, is het vanwege de zeer beperkte betrouwbaarheid van de berekende zoutconcentraties aan de zuidrand niet mogelijk om te concluderen of dit effect in de praktijk daadwerkelijk zal optreden en bij welke grootte van de eb- en vloedopeningen dit zou gebeuren.

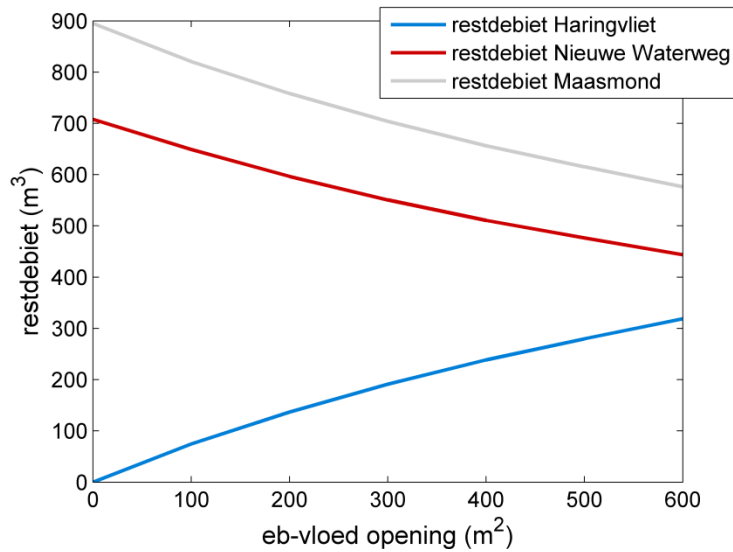
Tabel 4.3 Kwantificatie effecten grotere eb- en vloed-opening (0-600 m<sup>2</sup>) op waterstanden, fase en restdebieten

<b>EV-opening: 0 → 600 m<sup>2</sup></b>	<b>Q<sub>BR</sub> = 1000 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Q<sub>BR</sub> = 3500 m<sup>3</sup>/s</b>
Middenstand HV	-10 cm	-30 cm
Getijslag HV	+25 cm	+25 cm
Fase HV (gebaseerd op minima)	-40 min	-40 min
Fase HV (gebaseerd op maxima)	-25 min	-70 min
Restdebiet NWW	-264 m <sup>3</sup> /s	-912 m <sup>3</sup> /s
Restdebiet Haringvliet	+319 m <sup>3</sup> /s	+1015 m <sup>3</sup> /s

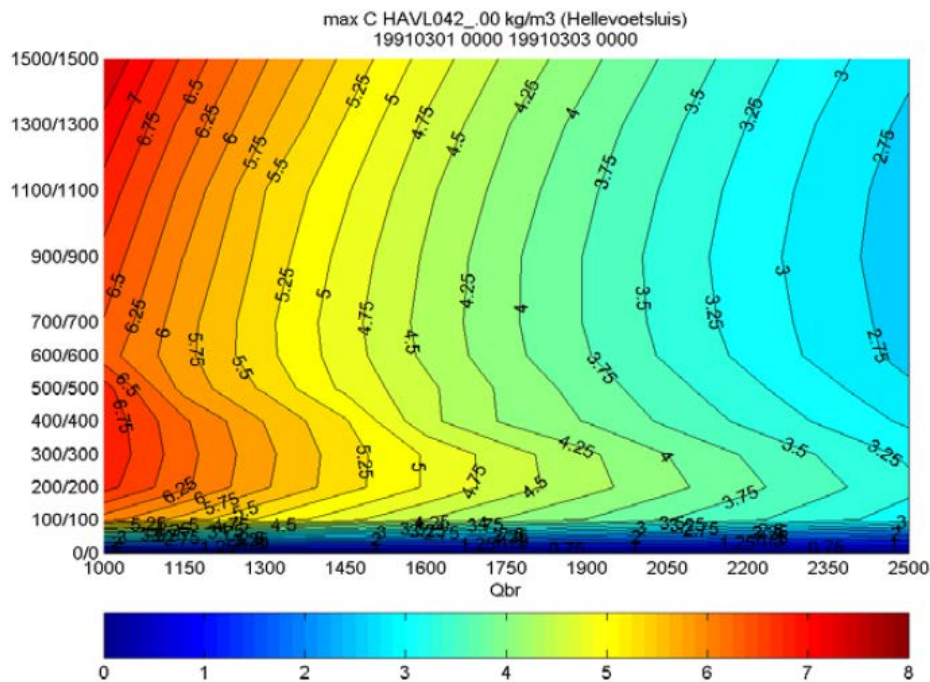


Figuur 4.7 Weergave van het effect van een grotere vloed-opening op de waterstanden conceptueel (a) en volgens het model (b) en daarmee de waterbeweging en zoutverspreiding in de Rijn-Maasmonding (c).





Figuur 4.8 Effect grotere eb-vloed opening op de restdebieten



Figuur 4.9 Zoutconcentraties als functie van de eb-vloedopening en rivierafvoer

#### 4.3.4 Van LPH'84 naar de Kier

In 2018 gaan de sluisen “op een kier”. Dit houdt in dat bij vloed de sluisen in beperkte mate zullen openen en ook de ebopening verder open zal gaan. Het doel van de “kier” is het bevorderen van de visintrek. Het kandidaat stuurprogramma is weergegeven in Figuur 4.2 en zal worden ingevoerd volgens het “Lerend Implementeren” principe.

Hoewel de effecten op de chlorideconcentraties en de waterstanden zijn berekend (de Goederen et al. 2006), illustreren we in deze paragraaf hoe met de systeemkennis een eerste schatting kan worden gemaakt. Hierbij gaan we uit van het kandidaat stuurprogramma zonder zoetspoelen<sup>6</sup> en maken we onderscheid tussen de volgende drie situaties:

1. Bovenrijnafvoeren tussen de 1350 m<sup>3</sup>/s en de 2500 m<sup>3</sup>/s, waarbij de toename in ebopening gemiddeld iets groter is dan de toename in vloedopening (in vergelijking met het huidige LPH'84).
2. Bovenrijnafvoeren tussen de 2500 m<sup>3</sup>/s en de 3000 m<sup>3</sup>/s, waarbij de toename in vloedopening groter is
3. Bovenrijnafvoeren boven de 3000 m<sup>3</sup>/s, waarbij alleen de vloedopening vergroot.

Onder de 1350 m<sup>3</sup>/s zijn LPH'84 en het kandidaat stuurprogramma identiek.

#### 1. Bovenrijnafvoeren tussen de 1350 m<sup>3</sup>/s - 2500 m<sup>3</sup>/s

Deze situatie is vergelijkbaar met het in gelijke mate vergroten van de eb- en vloedopening (§4.3.3), met als verschil dat de ebopening iets meer wordt vergroot (§4.3.1). Aan de noordrand zorgt het in gelijke mate vergroten van de eb-vloedopening voor een lager restdebit en dus een toename van de gemiddelde zoutconcentraties. Als hierbij de ebopening in sterkere mate opengaat verwachten we dat dit effect nog iets versterkt wordt. Dit ten gunste van de zuidrand, welke in de huidige situatie doorgaans zoet is, maar door de vloedopening gedeeltelijk zout zal worden. Door de ebopening ook te vergroten, zal de zoutconcentratie minder sterk toenemen. Dit zal nodig zijn om de verzilting aan de zuidrand binnen de toegestane marges te houden. Tot slot zorgt een grotere eb-vloedopening voor een afname van de gemiddelde waterstanden bij Moerdijk, waardoor de kans op achterwaartse verzilting zal toenemen. Als hierbij de ebopening in sterkere mate opengaat verwachten we dat dit effect nog iets versterkt wordt.

Samengevat zullen de verzilting aan de zuidrand en noordrand dus toenemen, de kans op achterwaartse verzilting toenemen en voor de scheepvaart de waterstanden bij Moerdijk gemiddeld dalen en sterkere fluctuaties vertonen (meer getijwerking).

#### 2. Bovenrijnafvoeren tussen de 2500 m<sup>3</sup>/s - 3000 m<sup>3</sup>/s

Deze situatie is een combinatie van het in gelijke mate vergroten van de eb- en vloedopening (§4.3.3) en het vergroten van alleen de vloedopening (§4.3.2). Omdat deze tegengestelde effecten hebben is op basis van alleen de kennis van het systeemgedrag niet goed te voorspellen welke effect de doorslag zal geven. Hier zijn berekeningen voor nodig.

#### 3. Bovenrijnafvoeren boven de 3000 m<sup>3</sup>/s

Deze situatie is gelijk aan het vergroten van alleen de vloedopening (§4.3.2). Dit betekent toename verzilting Haringvliet, afname aan de noordrand en afname kans op achterwaartse verzilting. Voor de scheepvaart zullen bij Moerdijk de gemiddelde waterstanden toenemen, maar zal ook de getijwerking toenemen, dus sterkere variaties in waterstand.

---

<sup>6</sup> Zoetspoelen is een essentieel onderdeel van het kandidaat kierprogramma. Wanneer de Bovenrijnafvoer daalt en naar verwachting langere tijd onder de 1500 m<sup>3</sup>/s zal blijven wordt er extra gespuid op het Haringvliet om deze zoet te spoelen. Hoewel hiermee de chlorideconcentraties aan de noordrand zullen verhogen, is het belangrijk de zuidrand zoet te krijgen alvorens de sluisen voor langere tijd dichtgaan. Indien bij dichte sluisen het Haringvliet nog zout is kan het zout door diverse mengingsprocessen zich op oncontroleerbare wijze door het Haringvliet en Spui gaan verspreiden.

### Verwachte totale effect

Omdat verzilting van de noordrand voornamelijk voorkomt bij lage rivierafvoer zal situatie 1 hiervoor maatgevend zijn, dit betekend een (beperkte) toename van de verzilting, welke door zoetspoelen nog wat versterkt zal worden. Dit wordt bevestigd door de berekeningen van Rijkswaterstaat (de Goederen et al. 2006), die voor de noordrand een lichte toename in chlorideconcentraties laten zien. Voorbeelden zijn de Noodinlaat Kralingen, met een overschrijding van het achtergrondgehalte met meer dan 25 mg Cl/l gedurende meer dan 8 uur in de periode van 1988-1990 van in totaal 2229 uur (LPH'84) versus 2418 uur (kandidaat stuurprogramma) en Gouda, met een overschrijding van het achtergrondgehalte met meer dan 25 mg Cl/l gedurende meer dan 48 uur in de periode van 1988-1990 van in totaal 3695 uur (LPH'84) versus 3898 uur (kandidaat stuurprogramma), 4357 uur (kandidaat stuurprogramma met zoetspoelen)<sup>7</sup>.

Waterstanden onder de 0 m NAP zullen ook voornamelijk voorkomen bij lage rivierafvoeren (situatie 1). Op basis van de systeemwerking verwachten we een afname van de gemiddelde waterstanden bij lage rivierafvoeren en daarmee een toename van de onderschrijding van 0 m NAP bij Moerdijk, welke door het zoetspoelen (extra open met eb) nog wat versterkt zullen worden<sup>8</sup>. Ook dit wordt bevestigd door de berekeningen. Totale duur waterstanden onder 0 m NAP 274 uur (LPH'84) versus 321 uur (kandidaat stuurprogramma), 377 uur (kandidaat stuurprogramma met zoetspoelen).

Aan de zuidrand verwachten we een toename van de chlorideconcentraties door het binnenkomen van zeewater via de sluizen tijdens vloed. Voor achterwaartse verzilting verwachten we voor afvoeren tussen de 1350 m<sup>3</sup>/s en de 2500 m<sup>3</sup>/s een toename (zoetspoelen zal dit versterken) en voor afvoeren boven de 3000 m<sup>3</sup>/s een afname van de ten opzichte van het huidige spuiregime. Omdat zoutconcentraties nabij de zuidrand in het SOBEK-RE model niet voldoende betrouwbaar zijn en niet zijn uitgesplitst naar voorwaartse verzilting door de Haringvlietsluizen en achterwaartse verzilting via de noordrand kan hier geen vergelijking voor worden gemaakt met de kwalitatieve analyse.

#### **4.4 Haringvlietsluizen als stuurknop**

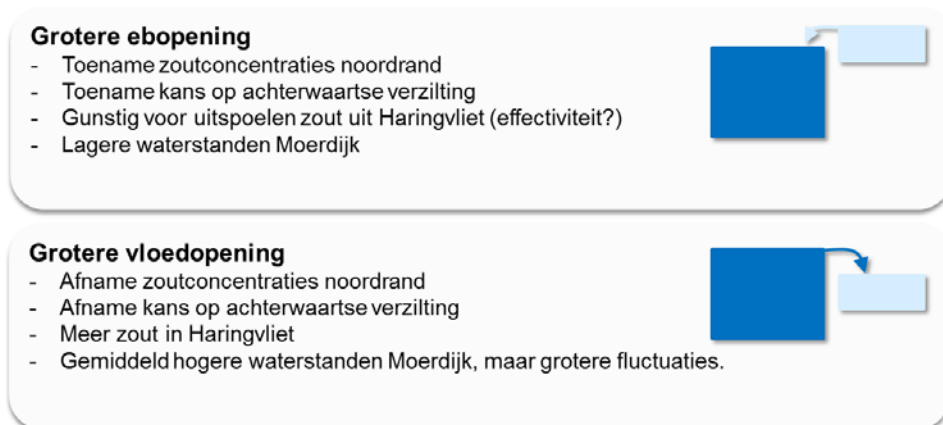
De Haringvlietsluizen kunnen beschouwd worden als de grote stuurknop van de Rijn-Maasmonding. Hiermee kunnen de waterbeweging en zoutconcentraties beïnvloed worden en daarmee de bereikbaarheid van de haven van Moerdijk en de zoetwaterbeschikbaarheid voor drinkwaterbedrijven, landbouw, industrie en de waterhuishouding in de polders.

De Haringvlietsluizen reguleren primair de waterstanden in de Rijn-Maasmonding. Bij een grotere opening kunnen de middenstand, getijslag en fase veranderen. Die tezamen bepalen de waterstandsverschillen tussen de noord- en de zuidrand en daarmee de debietverdeling en zoutverspreiding. In de voorgaande paragrafen zijn deze effecten bestudeerd, welke in één figuur worden samengevat in Figuur 4.10.

<sup>7</sup> Deze getallen zijn gebaseerd op SOBEK berekeningen. Door de inherente onzekerheid in 1D modellering van zout zijn de resultaten alleen in kwalitatieve zin betrouwbaar.

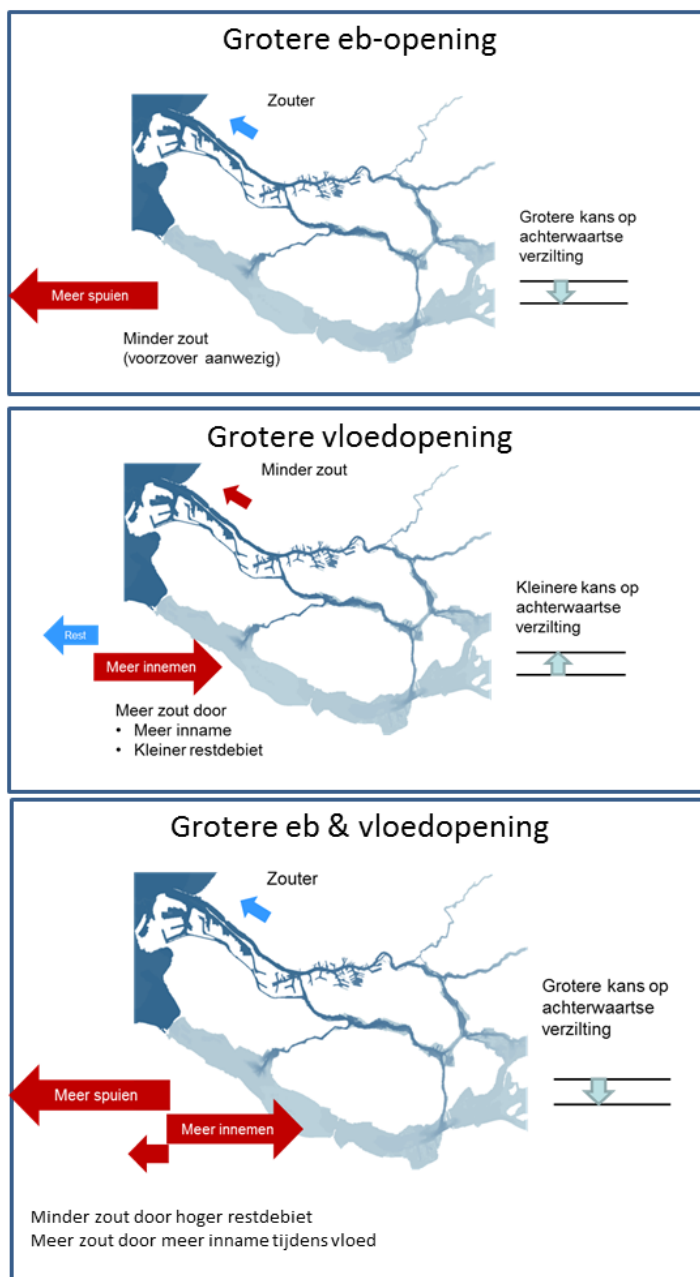
<sup>8</sup> NB. Ten gevolge van zeespiegelstijging zullen de gemiddelde waterstanden hoger worden, waardoor in de toekomst de waterstand minder vaak onder 0 m NAP zal komen.

Op basis hiervan kan de werking van de stuurknop als volgt worden samengevat:



Bovenstaande is geldig voor het vergroten van de opening tot 600 m<sup>2</sup>. Omdat effecten niet lineair zijn<sup>9</sup>, valt niet op voorhand te zeggen of ze ook gelden voor nog grotere openingen. Omdat de eb- en vloedopening meest tegengestelde effecten hebben, hangt het af van de verhouding wat de netto effecten zijn. Bij de implementatie van het kierbesluit, kan hier dan ook mee gevarieerd worden.

<sup>9</sup> Voorbeeld: het vergroten van de opening van 0 naar 200 m<sup>2</sup> heeft dus niet hetzelfde effect op restdebieten en verzilting als het vergroten van de opening van 200 naar 400 m<sup>2</sup>.



Figuur 4.10 Schematische weergave van het effect van een grotere ebopening (bovenste figuur), grotere vloedopening (middelste figuur) en grotere eb- en vloedopening (onderste figuur) op de hydrodynamica en zoutverspreiding. Een en ander is onderzocht en geldig tot een opening van maximaal 600 m<sup>2</sup>. Door niet-lineairiteiten kan gedrag bij grotere openingen afwijken



## 5 Stuurknoppen Volkeraksluizen en stuw bij Hagestein

### 5.1 Achtergrond

In geval van dreigende verzilting zijn er in de Rijn-Maasmonding een aantal stuurknoppen beschikbaar om de debietverdeling te beïnvloeden en daarmee de zoutconcentraties te verlagen, zie Figuur 1.1. De werking van de grootste stuurknop, de Haringvlietsluizen, is in het vorige hoofdstuk besproken. In dit hoofdstuk gaan we in op de werking van de twee kleinere stuurknoppen van het hoofdwatersysteem, de Volkeraksluizen en de stuw bij Hagestein. Het Volkerak-Zoommeer is een belangrijke zoetwatervoorziening voor landbouwgebieden en de waterhuishouding in de regio. Volgens het waterakkoord mag de chlorideconcentratie in het groeiseizoen (15 maart - 15 september) niet boven de 450 mg Cl/l komen (Rijkswaterstaat Zee en Delta et al. 2016). Om dit te bewerkstelligen wordt het Volkerak-Zoommeer doorgespoeld met water uit het Hollandsch Diep via de Volkeraksluizen. Wanneer doorspoeling wordt beperkt bij verzilting van de noordrand zal bij gesloten Haringvlietsluizen (QBR < 1100 m<sup>3</sup>/s) meer water het systeem via de Maasmond verlaten. Met de grotere restdebieten wordt de tegendruk aan het zout vanuit zee vergroot, waardoor de chlorideconcentraties lager zullen worden. Vanuit deze gedachte is het beperken van de doorspoeling naar het Volkerak-Zoommeer opgenomen als één van de maatregelen om verzilting langs de noordrand tegen te gaan (Hydrologic 2015a).

De tweede stuurknop, de stuw bij Hagestein, reguleert de afvoer over de Lek. Bovenstreams van de stuw bij Hagestein staan de Waal en de Lek met elkaar in verbinding via het Amsterdam-Rijnkanaal. Bij normale omstandigheden (> 1300 m<sup>3</sup>/s Rijnafvoer Lobith) zijn de Prins Bernhardsluizen in het Betuwepand bij Tiel gesloten en is de waterstand in stuwpannd Hagestein 3m + NAP. Als de waterstand op de Waal bij Tiel beneden de 3 m + NAP daalt, staan de Prins Bernhardsluizen open en staat het stuwpannd Hagestein in open verbinding met de Waal. Als onder deze omstandigheden meer afvoer is over de stuw Hagestein dan aanvoer over de stuw Amerongen, zal het verschil aangevuld worden via het Betuwepand uit de Waal (Van der Vat 2016). Er komt dus evenveel water de Rijn-Maasmonding binnen, maar met een andere verdeling over de Lek en de Waal. Dit noemen we een "afvoervertrekking". Bij dreigende verzilting aan de noordrand kan via de stuw bij Hagestein meer water over de Lek worden gestuurd, waardoor ook de afvoer over de Nieuwe Maas zal toenemen met het idee dat de chlorideconcentraties aan de noordrand zullen afnemen. In de redeneerlijn van 2015 (Hydrologic 2015a) is ook deze als maatregel opgenomen om verzilting langs de noordrand tegen te gaan.

De effectiviteit van beide maatregelen is tot op heden niet onderzocht. In dit project onderzoeken we de systeemwerking van beide stuurknoppen, middels numerieke berekeningen met het 1D SOBEK-RE NDB\_1\_1\_0 model (Kraaijeveld 2003). Hierbij wordt gekeken naar hoe de stuurknoppen de debietverdeling in het systeem veranderen, welke effect dit heeft op de chlorideconcentraties aan de noordrand en welke tijdschalen hiermee gepaard gaan.

## 5.2 Methode

Om de systeemwerking van beide stuurknoppen te onderzoeken zijn 1D berekeningen uitgevoerd met het SOBEK-RE model van het Noordelijke Deltabekken (d.w.z. de Rijn-Maasmonding). Om de veranderingen in afvoerverdeling en zoutconcentraties goed te kunnen volgen is daarbij gekozen voor een vaste rivierafvoer en een cyclisch getij (dus geen spring-doodtij variaties). De effectiviteit van de stuurknoppen is onderzocht voor de situatie van dreigende verzilting van de monding van de Hollandsche IJssel. Hierbij is de definitie uit het waterakkoord gebruikt (Rijkswaterstaat Zuid-Holland 2005):

*Verzilting: een verhoging van het chloridegehalte in de Hollandsche IJssel nabij de Stormvloedkering door zee-invoed, zoals die verhoging blijkt uit de routinematige bemonstering door het Rijk, dan wel uit specifieke bemonstering, en welke verhoging (minimaal 50 mg chloride/l) vergeleken wordt met het chloridegehalte van de Rijn te Lobith, met een faseverschil van twee dagen.*

*[Waterakkoord Hollandsche IJssel]*

Volgens de SOBEK-berekeningen treedt dit op bij een Bovenrijnafvoer van 980 m<sup>3</sup>/s, wanneer het chloridegehalte van de Rijn rond de 125 mg Cl/l ligt. De grens voor verzilting is dan rond de 175 mg Cl/l. Voor deze condities zijn de volgende situaties doorgerekend:

1. Referentie situatie (T0): Onttrekking van 50 m<sup>3</sup>/s naar het Volkerak-Zoommeer en geen afvoer over de Lek.
2. Stopzetten onttrekking Volkerak-Zoommeer (T1): Na ruim voldoende inspeeltijd (3 maanden) wordt de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer teruggebracht van 50 m<sup>3</sup>/s naar 0 m<sup>3</sup>/s. De afvoerverdeling over de Lek en Waal blijft identiek aan de T0-berekening.
3. Afvoervertrekking van de Waal naar de Lek (T2): Na ruim voldoende inspeeltijd (3 maanden) wordt er 50 m<sup>3</sup>/s over de Lek geleid en het Waaldebiet met 50 m<sup>3</sup>/s verminderd. Net als in de T0-berekening wordt er 50 m<sup>3</sup>/s onttrokken voor het Volkerak-Zoommeer.

De keuze voor een variatie van 50 m<sup>3</sup>/s is afgestemd met Rijkswaterstaat en gebaseerd op de volgende argumenten:

- Capaciteit Volkeraksluizen is 50 m<sup>3</sup>/s, dit is dus potentieel de orde grootte van de onttrekking.
- In de praktijk zal de onttrekking vaak lager liggen, maar omdat systeeminzicht het doel is van deze berekeningen, is besloten om niet met kleinere afvoeren te werken, zodat de effecten voldoende groot zijn om goed te kunnen evalueren.
- Het is niet bekend welke afvoervertrekking van de Waal naar de Lek realistisch haalbaar is, maar om beide stuurknoppen goed met elkaar te kunnen vergelijken gaan we ook voor de afvoervertrekking uit van 50 m<sup>3</sup>/s.

Meer details over het model en de gekozen randvoorwaarden zijn te vinden Bijlage D.



### 5.3 Effect stopzetten onttrekking naar Volkerak-Zoommeer

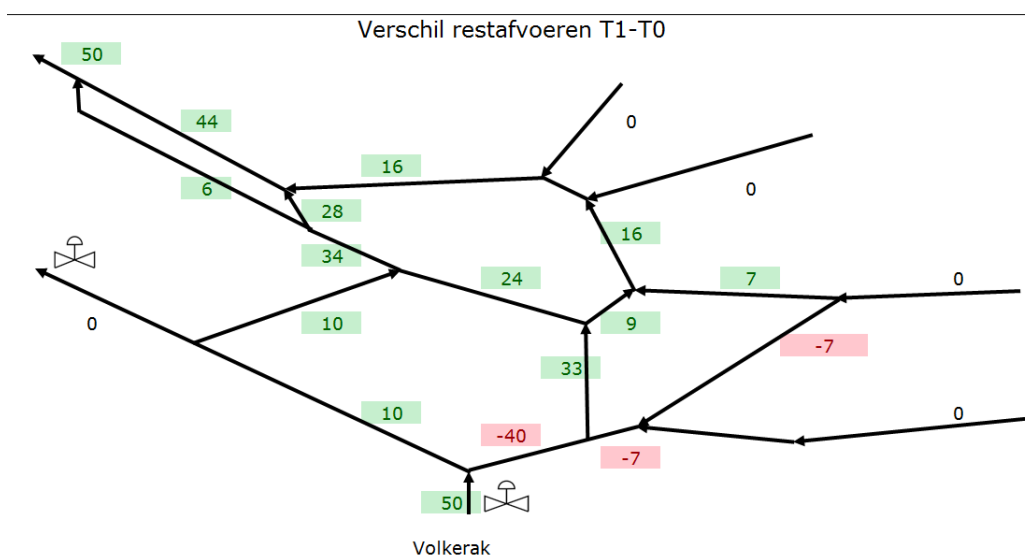
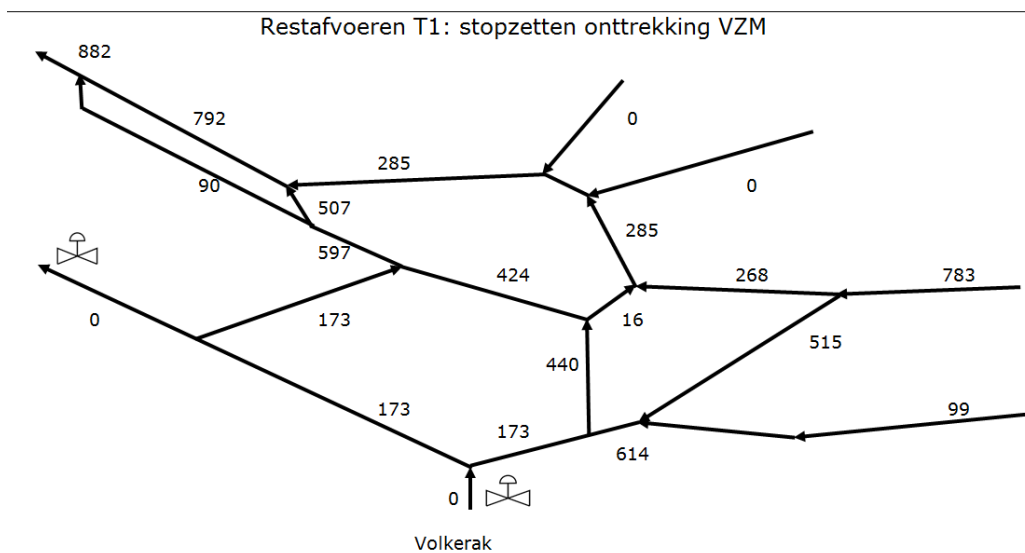
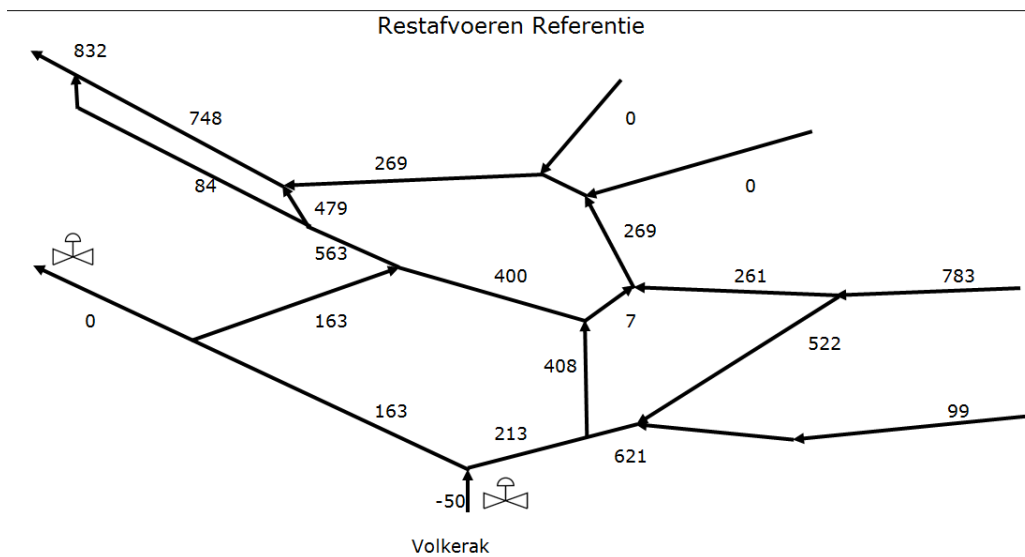
#### 5.3.1 Effect op restdebieten

In Figuur 5.1 zien we de restdebieten in het systeem voor de referentiesituatie en de situatie zonder onttrekking naar het Volkerak-Zoommeer. Ook zijn de verschillen gepresenteerd. Van de 50 m<sup>3</sup>/s die extra beschikbaar komt stroomt 10 m<sup>3</sup>/s via het Spui naar de noordrand en 33 m<sup>3</sup>/s via de Dordtsche Kil naar de Noordrand. De ontbrekende 7 m<sup>3</sup>/s is Waalwater dat door de hogere waterstanden op het Hollandsch Diep/ Haringvliet nu via de Beneden Merwede de Rijn-Maasmonding binnenstroomt in plaats van via de Nieuwe Merwede. Dit alles resulteert in een toename van restdebieten op de Oude Maas (zeewaarts van het Spui) van 28-34 m<sup>3</sup>/s en op de Nieuwe Maas van 16 m<sup>3</sup>/s, dus van de 50 m<sup>3</sup>/s stroomt een-derde via de Nieuwe Maas en twee-derde via de Oude Maas. Deze verhouding is gelijk aan in de jaren 80 bepaalde verhouding (C. Kuijper 1985), voor situaties met een Bovenrijnafvoer van 800 m<sup>3</sup>/s en 1100 m<sup>3</sup>/s.

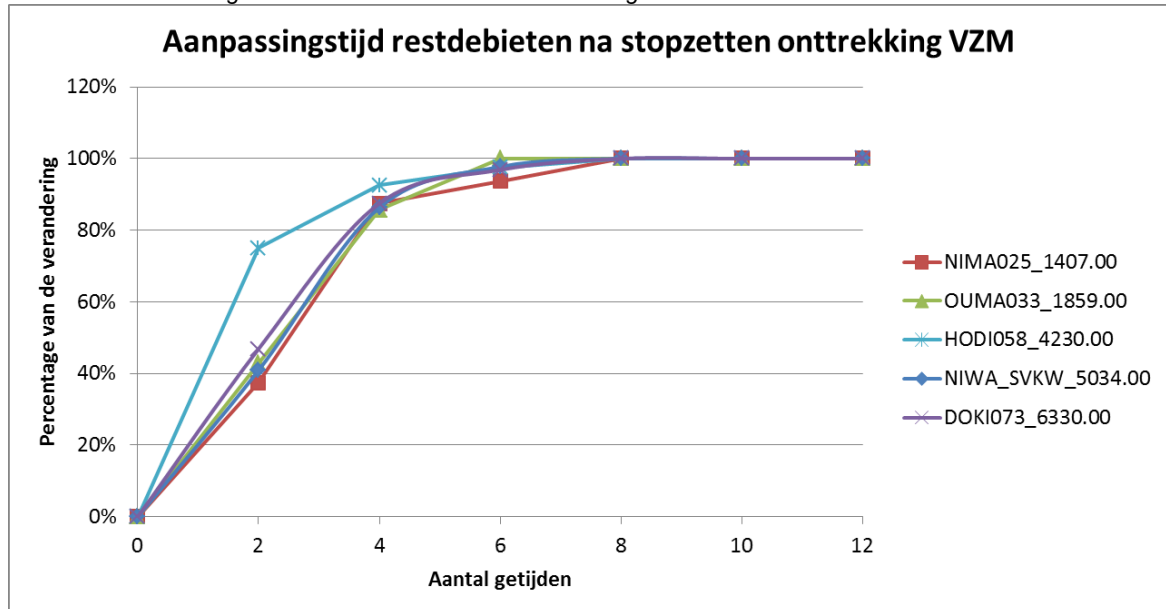
Tot slot neemt de afvoer in de Maasmond toe met dezelfde 50 m<sup>3</sup>/s die aan de zuidrand minder onttrokken wordt, omdat de Haringvlietsluizen gesloten zijn.

Het duurt echter even voordat de nieuwe restdebieten zich hebben ingesteld. In Figuur 5.2 zijn de aanpassingstijden van de restdebieten geïllustreerd, middels het weergeven van het percentage van de verandering in de tijd. Als op een tak de afvoer met uiteindelijk 30 m<sup>3</sup>/s toeneemt, is dit de 100% van de verandering. Wanneer de toename na 3 getijdeperiodes bijvoorbeeld 10 m<sup>3</sup>/s is, dan is dit 33% van de verandering.

Uit de aanpassingstijden valt op te maken dat het debiet op het Hollandsch Diep (ten oosten van de Volkeraksluizen) na 2 getijperioden op 75% zit van het nieuwe debiet. Voor de Dordtsche Kil is na 2 getijperioden slechts 50% van de nieuwe debietwaarde bereikt, op de Nieuwe Waterweg 41% en op de Nieuwe Maas 38%. Deze vertraging wordt onder andere gerelateerd aan de grote buffercapaciteit van het Haringvliet en Hollandsch Diep. Door hun grootte duurt het even voordat na een debietverandering de waterstanden zijn aangepast (Winterwerp 1982, pg. 13-14) en daarmee ook de debietverandering door gaat werken in de andere takken. Ook speelt de afstand tussen de zuid- en de noordrand mee, van de Volkeraksluizen naar de monding Hollandsche IJssel, via Hollandsch Diep - Dordtsche Kil - Noord, is ongeveer 45 km.



Figuur 5.1 Bovenste figuur: Restafvoeren voor de referentiesituatie. Middelste figuur: Restafvoeren bij stopzetting onttrekking naar Volkerak-Zoommeer. Onderste figuur: verschil in restafvoeren



Figuur 5.2 Percentage van de verandering in restdebieten na stopzetten onttrekking naar VZM, voor de Nieuwe Waterweg (NIWA\_SVKW\_5034.00), Nieuwe Maas (NIMA025\_1407.00), Spui (SPU084\_6279.00) en Hollandsch Diep oostelijk van de Volkerak Sluizen (HODI058\_4230.00). De punten geven de uitkomsten weer van de berekening. Vanwege de tijdstap in de berekening (10 min), konden de restdebieten alleen per twee getijperioden worden berekend (duur 1 getijperiode is 12 uur en 25 min). Voor het oog zijn daarom lijnen tussen de punten aangebracht

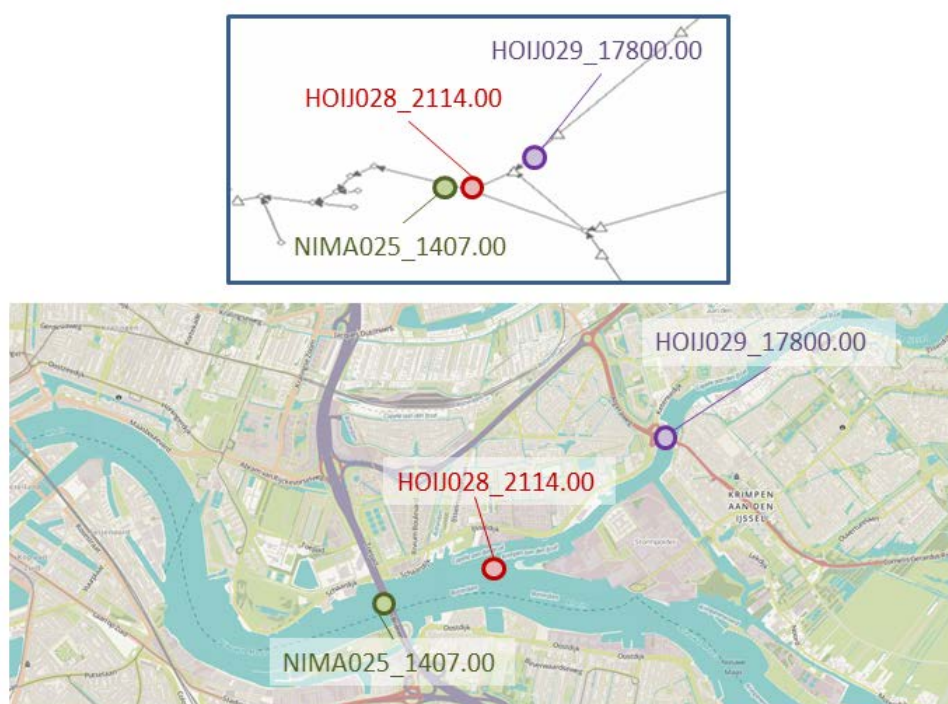
### 5.3.2 Effect op zout

Doordat er  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  extra door de Maasmond naar buiten stroomt, zal er minder zout de Rijn-Maasmonding binnenstromen en dus ook de zoutconcentratie in de Hollandsche IJssel afnemen. Omdat daarnaast de afvoer over de Nieuwe Maas met  $16 \text{ m}^3/\text{s}$  toeneemt, zal deze extra tegendruk helpen om de zoutconcentraties op de Nieuwe Maas, en daarmee de Hollandsche IJssel, te verlagen. Dit zien we terug in de chloridedata. Hierbij zijn de chlorideconcentraties aan de noordrand geëvalueerd op drie locaties nabij de Hollandsche IJssel (zie Figuur 5.3) en op één locatie in de Nieuwe Waterweg. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 5.4 en Tabel 5.1. Hieruit blijkt dat de maximumchlorideconcentratie in de Hollandsche IJssel nabij de stormvloedkering met 13% daalt ( $22 \text{ mg Cl/l}$ ) daalt, in de monding van de Hollandsche IJssel en op de Nieuwe Maas bij de van Brienoordbrug met zo'n 20% daalt en op de Nieuwe Waterweg met 3%.

Omdat zoutconcentraties met een vertraging reageren op veranderingen in de hydrodynamica, zien we dat het geruime tijd duurt voordat de chlorideconcentraties een nieuw evenwicht bereiken en dat deze periode langer is dan voor de hydrodynamica. Waar voor de restdebieten op de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg na ongeveer 3 getijden meer dan 50% van de verandering is bereikt, duurt dit voor zout 4 tot 8 getijden. Hierbij is de aanpassingstijd op de Hollandsche IJssel nabij de stormvloedkering het langst, pas na 8 getijden is meer dan 50% van de verandering bereikt (dat wil zeggen dat de daling na 8 getijden voor het eerst meer is dan  $11 \text{ mg Cl/l}$  op een totale daling van  $22 \text{ mg Cl/l}$ ) en pas na 21 getijden is meer dan 90% van de verandering bereikt. Dat de aanpassingstijden nabij de stormvloedkering in de Hollandsche IJssel langer zijn dan op de Nieuwe Maas en in de monding van de Hollandsche IJssel komt doordat veranderingen in debiet en

zoutconcentratie primair op de Nieuwe Maas plaatsvinden en pas later doorwerken naar de zijtak Hollandsche IJssel.

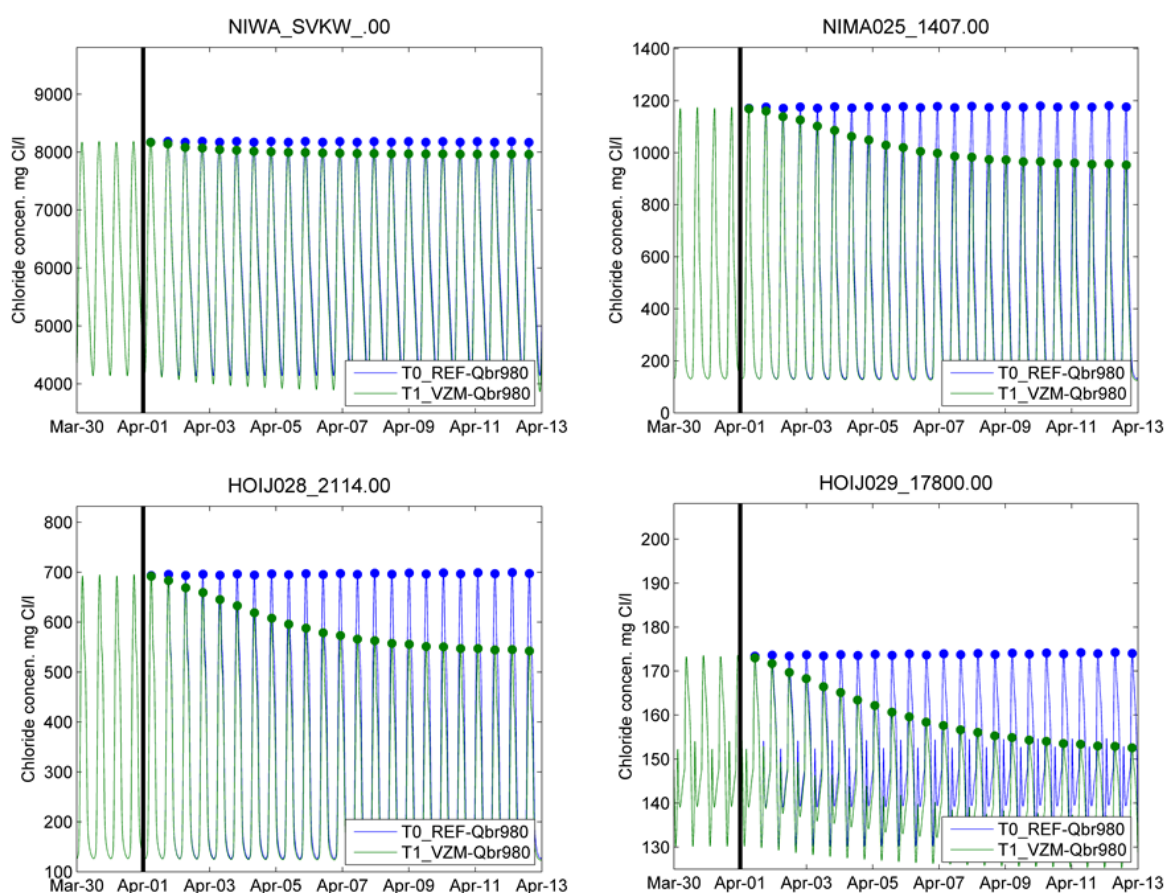
Op de Nieuwe Waterweg zijn de aanpassingstijden aanzienlijk korter dan op de Nieuwe Maas en de Hollandsche IJssel; binnen 4 getijden wordt meer dan 50% van de verandering bereikt, dit is één getijperiode langer dan de 50% aanpassingstijd van het restdebiet aldaar. De trage responstijd nabij de Hollandsche IJssel komt doordat de zoutconcentratie op de Nieuwe Maas door twee effecten wordt beïnvloed: 1) het hogere restdebiet op de Nieuwe Maas, waardoor de oprukkende zouttong meer tegendruk ondervindt en 2) het hogere restdebiet op de Nieuwe Waterweg, waardoor minder zout de Rijn-Maasmonding binnen zal komen. Dit laatste effect duurt langer voordat deze helemaal doorwerkt tot nabij de Hollandsche IJssel. De kombegende werking van de vele havens langs de Nieuwe Maas heeft hier waarschijnlijk een grote invloed op (Winterwerp 1982). Hiermee kunnen de langere aanpassingstijden goed worden verklaard. Of de berekende tijden daarbij kloppen met de werkelijkheid is echter niet met zekerheid te stellen, maar de orde grootte lijkt realistisch. Op de onzekerheden wordt nader ingegaan in §5.5.



Figuur 5.3 Indicatie locatie uitvoerlocaties. Bovenste figuur: locaties in de SOBEK schematisatie. Onderste figuur: geografische locaties. Kaart: Openstreetmaps ©. HOIJ029\_17800.00 is hierbij de Hollandsche IJssel ter hoogte van de stormvloedkering, HOIJ028\_2114.00 de monding van de Hollandsche IJssel en NIMA025\_1407.00 de Nieuwe Maas ter hoogte van de van Briene noordbrug

Tabel 5.1 Overzicht maximum chlorideconcentraties en ontwikkeling in de tijd. Per locatie staat aangegeven wat de chlorideconcentraties zijn voor de situatie met en zonder onttrekking naar het Volkerak-Zoommeer. In de laatste drie kolommen staat na hoeveel getijden een zeker percentage van de verandering is overschreden. NB. Zoutconcentraties zijn bepaald met een 1D model. Dit kent onzekerheden, zie discussie in §5.5. Resultaten moeten daarom in kwalitatieve zin beschouwd worden.

Locatie	Chlorideconcentraties (mg Cl/l)		Verschillen		Percentage van de verandering, na x getijden		
	referentie	maatregel	Abs.	Rel.	>50%	>90%	>95%
NIWA_SVKW_00	8173	7961	-212	3%	4	12	25
NIMA025_1407.00	1171	940	-231	20%	8	17	30
HOIJ028_2114.00	693	534	-159	23%	8	17	30
HOIJ029_17800.00	173	151	-22	13%	8	21	40



Figuur 5.4 Ontwikkeling zoutconcentraties voor de referentie situatie (T0) en voor wanneer de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer wordt stopgezet:  $50 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow 0 \text{ m}^3/\text{s}$  (T1). De schaal van de verticale as is verschillend voor de 4 figuren

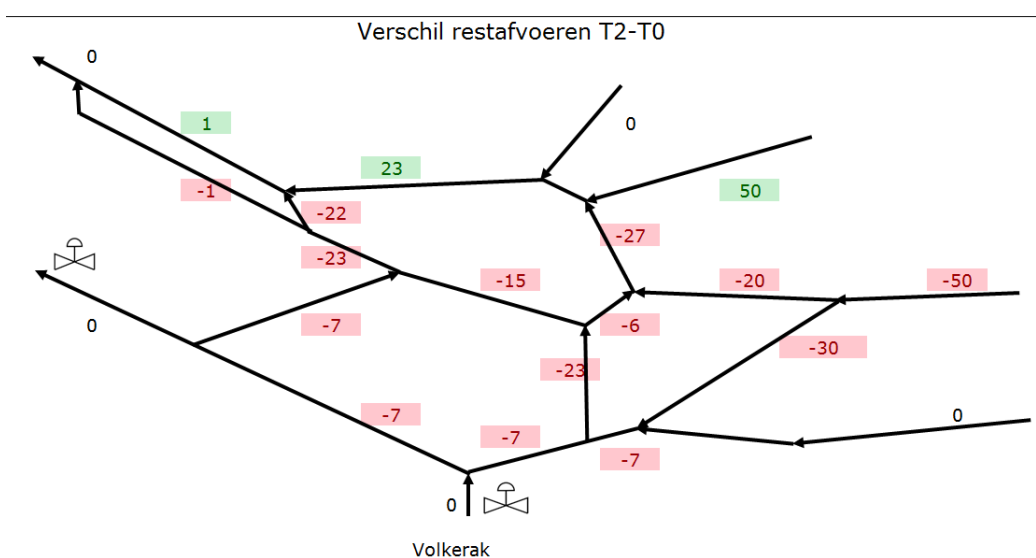
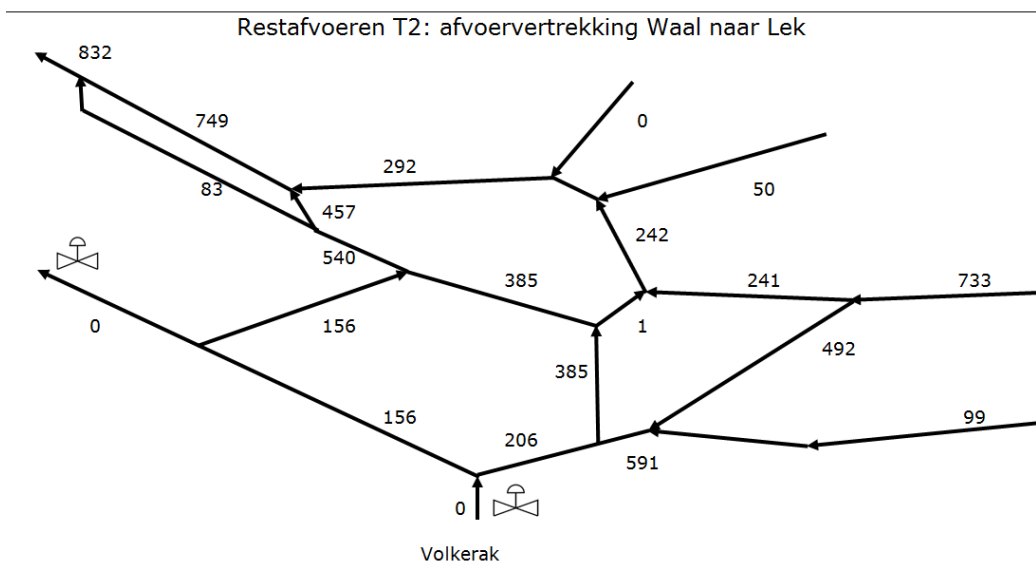
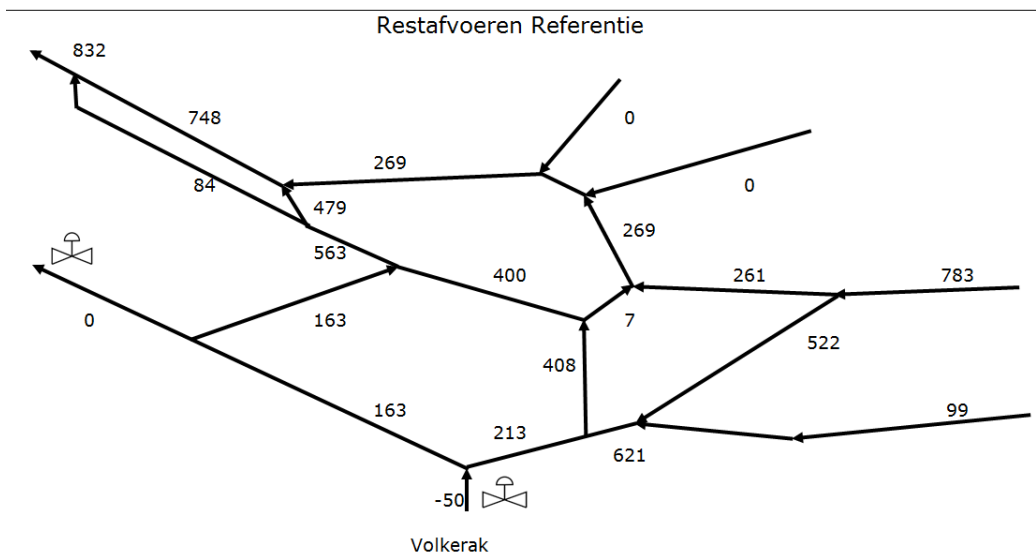
## 5.4 Effect afvoervertrekking Waal naar Lek

### 5.4.1 Effect op restdebieten

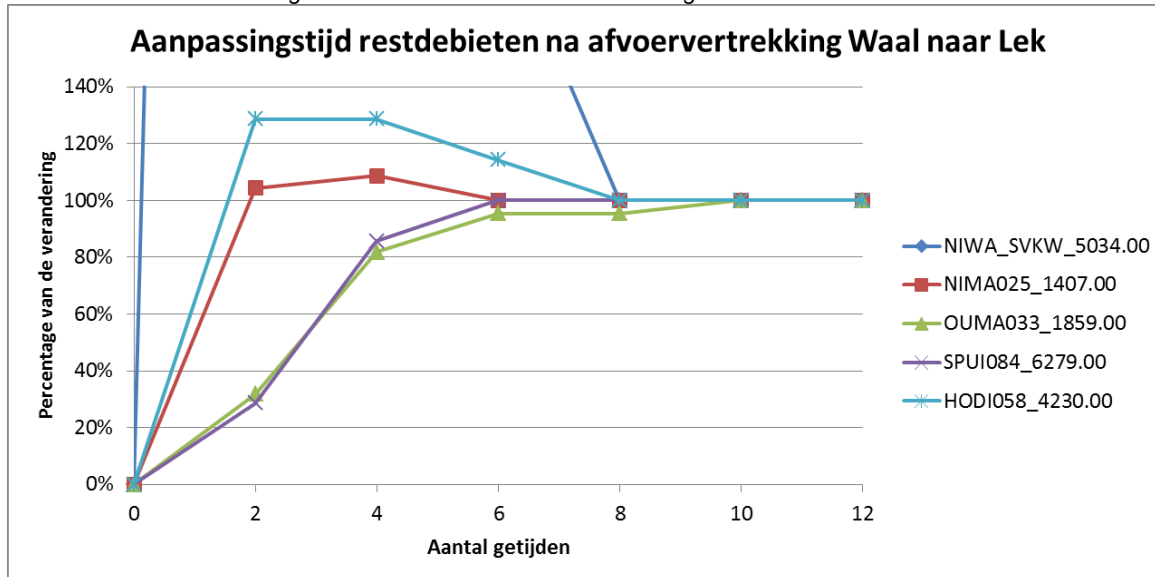
In Figuur 5.5 zien we de restdebieten in het systeem voor de referentiesituatie en de situatie waarbij er  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  extra via de Lek binnenkomt en  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  minder over de Waal. Deze afvoervertrekking zorgt ervoor dat de restdebieten voor bijna alle takken zullen afnemen, met uitzondering van de Lek en Nieuwe Maas aan de noordrand. De toename van  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  op de Lek resulteert hierbij in een toename van  $23 \text{ m}^3/\text{s}$  op de Nieuwe Maas. De overige  $27 \text{ m}^3/\text{s}$  stroomt richting het zuiden, waar het de afname in restdebieten ten gevolge van de reductie van  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  op de Waal gedeeltelijk compenseert.

In Figuur 5.6 zijn de aanpassingstijden geïllustreerd. Ook hier zien we dat het 10 getijperioden duurt voordat het systeem weer volledig in evenwicht is. Net als voor het T1-scenario geldt ook hier dat er in de hele Rijn-Maasmonding een nieuw evenwicht moet worden bereikt en dat dit vele getijperioden kan duren door de grote afstanden en de buffercapaciteit van het Haringvliet en Hollandsch Diep. Aan de noordrand en op het oostelijke deel van het Hollandsch Diep zien we daarbij dat de verandering eerst doorschiet.

Op het Oostelijke deel van het Hollandsch Diep gaat het hier om kleine veranderingen waarbij eerst de afvoer afnemen van  $213 \text{ m}^3/\text{s}$  naar  $204 \text{ m}^3/\text{s}$  en na een tijdje weer toenemen tot  $206 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dit komt doordat de afname in afvoer op de Waal snel doorwerkt op dit stuk en pas enige tijd later doorwerkt in de rest van de Rijn-Maasmonding. Op de noordrand zien we ook dat de waarde eerst doorschiet. Omdat het op de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg om een toename gaat, betekent dit dat de toename eerst heel sterk is en daarna weer afzwakt. Op de Nieuwe Maas is na 4 getijden de afvoer met  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  toegenomen van  $269 \text{ m}^3/\text{s}$  naar  $294 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dit neemt uiteindelijk af naar  $292 \text{ m}^3/\text{s}$ , waardoor de netto toename  $23 \text{ m}^3/\text{s}$  is. De golf extra water die via de Nieuwe Maas komt, zorgt in eerste instantie voor een toename op de Nieuwe Waterweg met  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ . Daarna neemt het restdebiet weer af, zodat de netto toename slechts  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  (verwaarloosbaar op het totale debiet). Percentueel zorgt dit voor een enorm doorschietend effect (1600%).



Figuur 5.5 Bovenste figuur: Restafvoeren voor de referentiesituatie. Middelste figuur: Restafvoeren bij afvoervertrekking van de Waal naar de Lek. Onderste figuur: verschil in restafvoeren.



Figuur 5.6 Percentage van de verandering in restdebieten na stopzetten onttrekking naar VZM, voor de Nieuwe Waterweg (NIWA\_SVKW\_5034.00), Nieuwe Maas (NIMA025\_1407.00), Spui (SPUI084\_6279.00) en Hollandsch Diep, oostelijk van de Volkerak Sluizen (HODI058\_4230.00). De punten geven de uitkomsten weer van de berekening. Vanwege de tijdstap in de berekening (10 min), konden de restdebieten alleen per twee getijperioden worden berekend (duur 1 getijperiode is 12 uur en 25 min). Voor het oog zijn daarom lijnen tussen de punten aangebracht

#### 5.4.2 Effect op zout

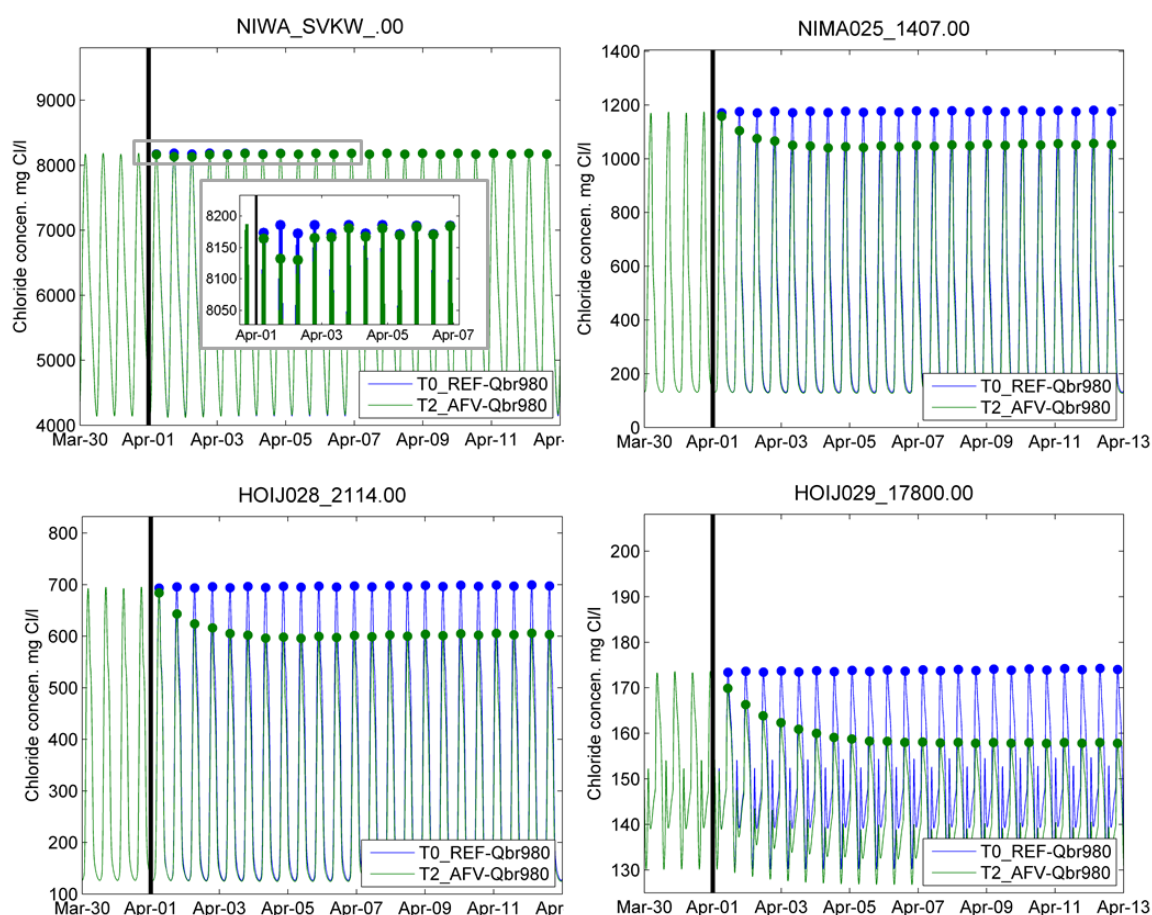
In Tabel 5.2 en Figuur 5.7 zijn de effecten op de zoutconcentraties op verschillende locaties nabij de noordrand weergegeven. Omdat bij een afvoervertrekking evenveel water het gebied via de Maasmond verlaat als in de referentiesituatie, blijven de zoutconcentraties op de Nieuwe Waterweg nagenoeg gelijk (toename van minder dan 1%). Doordat in eerste instantie de afvoergolf op de Lek, via de Nieuwe Maas tot een tijdelijke toename zorgt in de restdebieten op de Nieuwe Waterweg, neemt in eerste instantie de zoutconcentratie licht af. Dit is te zien in Figuur 5.7.

Doordat de afvoer over de Nieuwe Maas toeneemt met 23 m<sup>3</sup>/s, nemen de zoutconcentraties rond de monding van de Hollandsche IJssel af met ongeveer 10%. Binnen 2 à 3 getijperioden is meer dan 50% van de verandering bereikt. Deze snelle respons is te danken aan het doorschieten van de afvoeren op de Nieuwe Maas, waardoor de toename in afvoeren op de Nieuwe Maas na 2 getijden al 24 m<sup>3</sup>/s is. Van de drie locaties nabij de monding van de Hollandsche IJssel, duurt het wederom het langst bij de stormvloedkering in de Hollandsche IJssel (HOIJ029\_17800.00) voordat de nieuwe concentraties zijn ingesteld. Dit vanwege het feit dat de veranderingen primair doorwerken op de Nieuwe Maas en de Hollandsche IJssel hiervan een zijtak is.



Tabel 5.2 Overzicht maximum chlorideconcentraties en ontwikkeling in de tijd. Per locatie staat aangegeven wat de chlorideconcentraties zijn voor de situatie zonder en met afvoervertrekking. In de laatste drie kolommen staat na hoeveel getijden een zeker percentage van de verandering is overschreden. NB. Zoutconcentraties zijn bepaald met een 1D model. Dit kent onzekerheden, zie discussie in §5.5. Resultaten moeten daarom in kwalitatieve zin beschouwd worden.

Locatie	Chlorideconcentraties (mg Cl/l)		Verschillen		Percentage van de verandering, na x getijden		
	referentie	maatregel	Abs.	Rel.	>50%	>90%	>95%
NIWA_SVKW_00	8173	8175	2	0%	17	25	33
NIMA025_1407.00	1171	1048	-123	-10%	2	5	6
HOIJ028_2114.00	693	600	-93	-13%	2	5	6
HOIJ029_17800.00	173	157	-16	-9%	3	8	22



Figuur 5.7 Ontwikkeling zoutconcentraties voor de referentie situatie (T0) en voor wanneer de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer wordt stopgezet:  $50 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow 0 \text{ m}^3/\text{s}$  (T2)

## 5.5 Discussie

Uit de SOBEK-berekeningen volgt dat het verminderen van de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer met  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  een groter effect heeft op de zoutconcentraties nabij de monding van de Hollandsche IJssel (~20%) en nabij de stormvloedkering in de Hollandsche IJssel (~13%), dan de afvoervertrekking van  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  van de Waal naar de Maas, reductie nabij de monding van de Hollandsche IJssel en nabij de stormvloedkering met ~10%.

Bij het verminderen van de onttrekking zorgen twee effecten voor een daling in de chlorideconcentraties: 1) door de toename in restdebiet door de Maasmond komt minder zout het gebied binnen, 2) door de toename in restdebiet op de Nieuwe Maas is er bovenstrooms meer tegendruk. Bij de afvoervertrekking verlaat evenveel water het systeem via de Maasmond en blijven de chlorideconcentraties op de Nieuwe Waterweg gelijk. De afname in concentraties nabij en in de Hollandsche IJssel zijn alleen te danken aan de toename in restdebieten op de Nieuwe Maas.

Er zit echter een groot verschil in de tijdschalen van de verandering. Bij het stopzetten van de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer duurt het 8 getijperioden voordat 50% van de verandering in maximale zoutconcentraties is bereikt, terwijl dit voor de afvoervertrekking al in 2-3 getijperioden het geval is. Dit verschil kan toegeschreven worden aan de volgende effecten:

- Doordat de onttrekking zich nabij de zuidrand bevindt, duurt het meerdere getijperioden voordat de afvoerverdeling aan de noordrand zich heeft aangepast. Dit komt enerzijds door de grote buffercapaciteit van het Haringvliet/Hollandsch Diep, anderzijds door de afstand tussen de Volkerak-sluizen en de monding van de Hollandsche IJssel. Omdat de zoutconcentraties weer met enige vertraging reageren op de hydrodynamica, duurt dit dus nog langer. Extra vertragende component hierbij is dat de concentraties nabij en in de Hollandsche IJssel door twee effecten worden verlaagd 1) hogere restdebiet Nieuwe Maas, dus meer tegendruk en 2) minder zout vanuit zee door het hogere restdebiet op de Nieuwe Waterweg. Dit laatste effect duurt langer voordat deze doorwerkt tot bij de monding van de Hollandsche IJssel.
- Bij een afvoervertrekking naar de Lek nemen de afvoeren aan de noordrand snel toe, waarbij ze bovendien eerst doorschieten. Dit is gunstig voor een snelle afname van de zoutconcentraties.

Hoewel we de responstijd in het systeem met betrekking tot de hydrodynamica en zout goed kunnen verklaren, dient hier wel een kanttekening te worden gemaakt. Met betrekking tot de hydrodynamica zijn de modelresultaten ten aanzien van de aanpassingstijden betrouwbaar. Voor zout is dit in mindere mate het geval. In 1D worden alle 3D-zoutverspreidingsprocessen gemodelleerd met behulp van een dispersieformulering. Het advectieve gedrag (met de "hoofdstroom" mee) zal goed gaan. Dit is een belangrijke deel van aanpassing in zoutconcentraties bij veranderende debieten. Maar het dispersieve deel zal ook een grote rol spelen. Of SOBEK dit goed representeert is niet met zekerheid te stellen. Exacte aanpassingstijden en zoutconcentraties zijn dus onzeker, maar in *kwantitatieve* zin zijn de hierboven genoemd resultaten en conclusies correct.

Tot slot zijn de berekeningen uitgevoerd voor geschematiseerde condities, waarbij voor de afvoerverdeling bij een bepaalde Bovenrijnafvoer de stuwtafel is gebruikt voor de afvoeren over de Lek en de Waal en de 50% relatie voor de afvoeren over de Maas. Met name de laatste kunnen sterk variëren bij eenzelfde Bovenrijnafvoer, omdat de Rijn en de Maas niet uit hetzelfde gebied water ontvangen en daarmee de lage (en hoge) afvoeren vaak niet samenvallen. In de praktijk zal dus elke situatie anders zijn.

## 5.6 Synthese en toepasbaarheid van de resultaten

Samengevat kan dus gesteld worden dat bij de beschouwde condities het verminderen van de onttrekking naar het Volkerak-Zoomer met 50 m<sup>3</sup>/s effectiever is voor het reduceren van de chlorideconcentraties dan de afvoervertrekking van 50 m<sup>3</sup>/s van de Waal naar de Lek. Bij het stopzetten van de onttrekking duurt het echter vele malen langer voordat de nieuwe concentraties bereikt zijn. Welke maatregel effectiever is, hangt dus af van de situatie (zie ook de redeneerlijn in Hoofdstuk 6).

Wanneer het urgent is en de chlorideconcentraties binnen enkele dagen moeten dalen, dan is de afvoervertrekking effectiever. Als bijeffect zullen de afvoeren over de Oude Maas echter afnemen, wat het verziltingsrisico voor het midden en zuidelijke deel van de Rijn-Maasmonding zal doen toenemen. Deze maatregel kan dus alleen worden ingezet als er geen sprake is van een dreigende verzilting van de zuidrand.

De volgende stap is nu om op basis van de verkennende berekeningen een *eerste schatting* te maken van de effectiviteit en de praktische toepasbaarheid. Dit is samen met de (regionale) beheerders en drinkwaterbedrijven gedaan in de workshop van 21 november 2016. Hierbij zijn de volgende discussiepunten aan bod gekomen:

### Is de afname voldoende en voldoende snel?

*Vraag:* Als we ervan uitgaan dat de voorspelde effecten op de chlorideconcentraties de juiste orde hebben, dan nemen bij het verminderen van de onttrekking met 50 m<sup>3</sup>/s of een afvoervertrekking van 50 m<sup>3</sup>/s de chlorideconcentraties nabij de stormvloedkering met orde grootte 5-15 mg Cl/l af, waarbij in het meest gunstige geval 5 mg Cl/l reductie wordt behaald in 1 dag. De vraag is of dit voldoende is en hoe snel de afnames in chlorideconcentraties moeten doorwerken om toepasbaar te zijn.

### *Belangrijkste uitkomsten discussie:*

- Voorspelling van de hydrodynamica gaat tot 10 dagen vooruit. Op basis hiervan kan worden geschat of er risico is op dreigende verzilting, zij het met de nodige onzekerheid. Anticiperen is daarom zeker haalbaar (orde meerdere dagen tot een week), mits de sturing van de sluizen en de stuw op korte termijn kan worden gerealiseerd.
- Afname van 5 – 15 mg/l is een zeer beperkt effect. In de meeste gevallen zal dit de verzilting niet voorkomen en hooguit de periode ietwat verkorten. Slechts in enkele gevallen kan het net het beetje zijn dat ervoor zorgt dat de monding van de Hollandsche IJssel niet verzilt. Dit is gunstig, want als de chlorideconcentraties in de monding ook verhoogd raken tijdens eb, kan door het dispersieve karakter van de zoutverspreiding op de Hollandsche IJssel het zout richting Gouda trekken (Kuijper 2015). Hoe vaak deze situatie voorkomt is niet bekend. Door meerdere jaren door te rekenen met en zonder maatregelen, kan een beter schatting worden gemaakt van de effectiviteit van de twee knoppen.

### Is 50 m<sup>3</sup>/s haalbaar<sup>10</sup>?

*Vraag:* De maximale capaciteit van de Volkeraksluizen is 75 m<sup>3</sup>/s, maar deze wordt lang niet altijd ingezet. Daarbij is recent afgesproken om vanaf 2016 het Volkerak-Zoommeer zo veel mogelijk gedurende de winter door te spoelen, wanneer er in de regel voldoende water beschikbaar is. Dit is een goede keuze, gezien het feit dat het effect van de onttrekking pas na dagen doorwerkt op de noordrand en daarom het stopzetten een weinig effectieve maatregel zal zijn wanneer op korte termijn verzilting dreigt. Omdat er bij winterdoorspoeling in de zomer niet of in beperkte mate onttrokken wordt is gedurende deze droge periode standaard de afvoer over de Nieuwe Waterweg Nieuwe Maas hoger, wat gunstig is voor het tegengaan van verzilting. Gevolg is wel dat het niet vaak zal voorkomen dat bij een gebeurtenis van dreigende verzilting de onttrekking teruggebracht kan worden met 50 m<sup>3</sup>/s, zoals in de berekening is gedaan. Ook is niet bekend hoe haalbaar het is om 50 m<sup>3</sup>/s over de Lek te laten gaan ten koste van de Waal.

#### *Belangrijkste uitkomsten discussie:*

- De maximale capaciteit van de Volkeraksluizen betreft 3 kokers van elke 25 m<sup>3</sup>/s, dus 75 m<sup>3</sup>/s. Ook buiten de winterperiode zullen er meestal nog 1 of 2 kokers worden ingezet. Met hoeveel de doorspoeling kan worden beperkt hangt af van de waterstand en waterkwaliteit op het Volkerak-Zoommeer, maar kan nooit teruggebracht worden naar 0 m<sup>3</sup>/s. De door de beheerder geschatte maximale beperking is ongeveer de helft van het onttrokken debiet, maar dit kan per situatie verschillen.
- Momenteel lopen er diverse onderzoeken naar het vergroten van de afvoer over de Lek: of via de Prins Bernhard sluizen in het Betuwepand (meer water over de Lek ten koste van de Waal) of via de stuw bij Driel (meer water over de Lek ten koste van de IJssel). Ten aanzien van de eerste optie wordt momenteel onderzocht wat de effecten zijn van 25, 50, 75 en 100 m<sup>3</sup>/s door het Betuwepand: kan het erdoorheen en wat zijn de effecten voor de scheepvaart? Indien er extra water door het Betuwepand wordt gestuurd zal hiervan naar schatting de helft worden gebruikt voor IJsselmeer. Het overige kan gebruikt worden voor de Lek.

#### Overige punten

- Het is mogelijk interessant om beide knoppen (beperking onttrekking en afvoervertrekking) te combineren.
- Het vergroten van de afvoer over de Lek is naar verwachting een zeer effectieve maatregel voor het tegengaan van verzilting van de Lek.
- Indien de stuurknoppen ingezet gaan worden is het nodig om de neveneffecten goed te kwantificeren.
- Voor Slim Water Management dienen uiteindelijk alle puzzelstukjes bij elkaar te worden gebracht en niet elke maatregel apart te worden beschouwd.

---

<sup>10</sup> Zoals eerder benoemd in dit hoofdstuk is in deze studie gekozen voor 50 m<sup>3</sup>/s voor beide maatregelen om ze a) goed met elkaar te kunnen vergelijken, b) de effecten duidelijk te kunnen onderscheiden. Bij kleinere afvoeren worden sommige effecten wellicht te klein om te evalueren.

Op basis van deze discussie kan gesteld worden dat de effectiviteit van beide stuurknoppen voor het tegengaan van verzilting naar verwachting gering is, maar dat de tijdschalen van dagen tot een week hierin waarschijnlijk geen belemmering hoeven te vormen. Of beide stuurknoppen kunnen bijdragen om in periodes van droogte net wat extra ruimte te creëren kan onderzocht worden door met een 1D model meerdere jaren door te rekenen en het aantal dagen overschrijding van de chloridenorm voor de situatie met en zonder maatregelen met elkaar te vergelijken. Het kwantificeren van het gecombineerde effect van het beperken van de onttrekking en het vergroten van de afvoer over de Lek is hierbij interessant. Keuzes voor de grootte van de afvoervertrekking en de grootte van de beperking van de onttrekking naar het Volkerak-Zoommeer moeten hierbij worden afgestemd met lopende onderzoeken en de beheerders. Vanwege de grote onzekerheid van voorspelling van de chlorideconcentraties met een 1D model is het goed om met een 3D model te verifiëren of het 1D model realistische schattingen geeft van zoutconcentraties en de tijdschalen.

## 5.7 Aanbevelingen

Uit bovenstaande komen de volgende aanbevelingen:

- Betrouwbaarheid 1D model bepalen door een 3D berekening uit te voeren en de berekende tijdschalen en effecten op de chlorideconcentraties met elkaar te vergelijken.
- Kwantificeren effectiviteit van de maatregelen, door meerdere jaren door te rekenen met een 1D model en het aantal dagen overschrijding van de chloridenorm met en zonder maatregelen met elkaar te vergelijken. Op basis van lopende studies en afstemming met de beheerders kunnen hierbij realistische waarden worden bepaald voor de afvoervertrekking van de Waal naar de Lek en de beperking van de onttrekking naar het Volkerak-Zoommeer.



## 6 Handelingsperspectief

### 6.1 Overzicht

In onderstaand schema is voor de stuurknoppen Haringvlietsluizen (A), Volkeraksluizen (B) en stuw bij Hagestein (C) schematisch weergegeven wanneer deze ingezet kunnen worden. Nadere toelichting en detaillering bij het schema volgen in §6.2 - 6.4.

#### Verziltning monding Hollandsche IJssel

##### Creëren juiste uitgangssituatie

B – Winterdoorspoeling

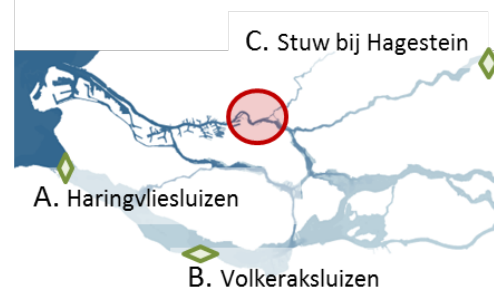
##### Bij verwachte verziltning over 1 à 2 weken:

A – Beperking restafvoeren met minimaal enkele tientallen m<sup>3</sup>/s (indien mogelijk).

B – Beperking van doorspoeling met minimaal enkele tientallen m<sup>3</sup>/s (indien mogelijk).

##### Bij acuut dreigende verziltning (1 à 2 dagen)

C – Verhogen afvoer over de Lek met minimaal enkele tientallen m<sup>3</sup>/s (indien mogelijk).



#### Tegengaan achterwaartse verziltning

Risico inschatten met behulp van nieuwe vuistregel.

##### Creëren juiste uitgangssituatie

B – Doorspoelen buiten stormseizoen

##### Bij verwachte achterwaartse verziltning

A – Minder spuien (indien mogelijk)

B – Beperken doorspoeling (indien mogelijk)

C – Verhogen afvoer over de Waal (indien mogelijk)



#### Ontziltning Haringvliet

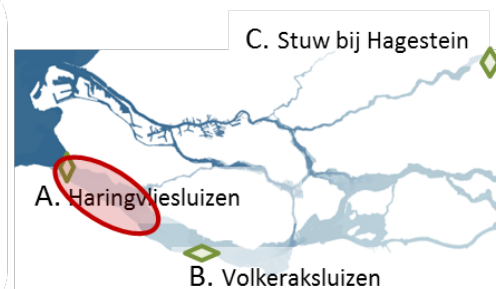
(na achterwaartse verziltning of bij voorwaartse verziltning zuidrand tgv Kier)

##### Creëren juiste uitgangssituatie

A – zoetspoelen (toekomst).

##### Na verziltning

A – zo mogelijk meer spuien, minder innemen met vloed.



## 6.2 Verzilting monding Hollandsche IJssel

### Stuurknop Haringvlietsluizen:

Vermindering van het restdebiet door de Haringvlietsluizen leidt naar verwachting tot het zelfde effect aan de noordrand als het verminderen van de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer. Beide stuurknoppen zitten namelijk aan de zuidrand en kunnen ervoor zorgen dat er meer water via de noordrand naar zee stroomt. Volgens de geïdealiseerde SOBEK-berekeningen leidt een vermindering van het restdebiet door de Haringvlietsluizen met enkele tientallen m<sup>3</sup>/s tot een afname van de chlorideconcentraties van 5-15% nabij de monding Hollandsche IJssel, bij een situatie van dreigende verzilting<sup>11</sup>. Dit effect is pas na orde een week merkbaar. De verlaging van de chlorideconcentraties op de Nieuwe Waterweg is al binnen enkele dagen merkbaar. Deze maatregel is daarom alleen effectief als deze dagen voor aanvang van de verzilting kan worden ingezet om de chlorideconcentraties op de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas zo laag mogelijk te houden en daarmee de uitgangssituatie verbeteren. Vermindering van het restdebiet door de sluzen kan verkregen worden door óf minder te spuien óf meer in te nemen tijdens vloed (toekomstige situatie met "de Kier"):

### Minder spuien

Praktisch: In huidige situatie is dit alleen mogelijk voor Bovenrijnafvoeren groter dan 1100 m<sup>3</sup>/s als de Haringvlietsluizen in bedrijf zijn. Tussen 1100 en 1700 m<sup>3</sup>/s beperkte ebopening, met spuidebieten van enkele tientallen m<sup>3</sup>/s.

Bijeffecten: Ongunstig voor het eventueel zoetspoelen van het Haringvliet. Gunstig voor het tegengaan van achterwaartse verzilting (effectiviteit onbekend). Hogere waterstanden voor de scheepvaart naar Moerdijk (effectiviteit onbekend).

Inzetten: Bij voorziene verzilting die pas na 1 à 2 weken zal optreden en als Haringvliet niet hoeft te worden zoetgespoeld.

Kennishiaten: Effectiviteit minder spuien voor aanvang van een periode van verzilting is niet onderzocht. Effect op waterstanden niet gekwantificeerd.

### Meer innemen met vloed (toekomst)

Praktisch: Toekomstige operationeel beheer ligt nog niet vast (§4.1).

Bijeffecten: Toename verzilting zuidrand via Haringvlietsluizen. Gemiddeld hogere waterstanden voor de scheepvaart naar Moerdijk, maar wel sterkere variaties in waterstand.

Inzetten: Bij voorziene verzilting die pas na 1 à 2 weken zal optreden en als geen langdurige lage rivierafvoer wordt verwacht en de toename in zoutconcentraties aan de zuidrand geen belemmering vormen voor de innamepunten.

Kennishiaten: Geen van bovengenoemde effecten is gekwantificeerd.

### Stuurknop Volkeraksluizen:

Bij verzilting monding Hollandsche IJssel<sup>11</sup> leidt een afname van de VZM-onttrekking met enkele tientallen m<sup>3</sup>/s naar schatting tot een afname van de chlorideconcentraties van 5-15% nabij de monding Hollandsche IJssel. Effect pas na orde een week merkbaar. Door het Volkerak-Zoommeer zoveel mogelijk tijdens de winter door te spoelen, hoeft er minder onttrokken te worden tijdens de zomerperiode wanneer er in de regel vaker een watertekort optreedt.

<sup>11</sup> Conform definitie in het waterakkoord Hollandsche IJssel en Lek, zie §5.2



**Mogelijke stuurmogelijkheden:****Winterdoorspoeling**

- Praktisch:** Alleen effectief als hiermee in droge periodes de inname met minimaal enkele tientallen  $m^3/s$  minder is ten opzichte van de situatie zonder winterdoorspoeling.
- Bijeffecten:** Hogere kans achterwaartse verzilting tijdens winterdoorspoeling, lagere kans tijdens overige periode. NB. Achterwaartse verzilting komt met name voor tijdens de herfst/ winterperiode.  
Iets lagere waterstanden bij Moerdijk tijdens winterdoorspoeling, gemiddeld hogere waterstanden in de overige periode.
- Inzetten:** In de winter, als er geen lage rivierafvoeren zijn en geen stormopzet, voor het creëren van een goede uitgangssituatie.
- Kennishiaten:** Verdere kwantificatie effectiviteit voor tegengaan verzilting noordrand. Neveneffecten niet gekwantificeerd. Niet bekend hoeveel vermindering in onttrekking gerealiseerd kan worden.

**Beperken onttrekking voor doorspoelen Volkerak-Zoommeer:**

- Praktisch:** Alleen effectief als de onttrekking met tientallen  $m^3/s$  beperkt kan worden (bijvoorbeeld tijdens de winter) en effect pas na orde grootte een week merkbaar hoeft te zijn.
- Bijeffecten:** Gunstig voor het tegengaan van achterwaartse verzilting.  
Iets hogere waterstanden bij Moerdijk.
- Inzetten:** Bij voorziene verzilting die pas na 1 à 2 weken zal optreden en wanneer de onttrekking met minimaal enkele tientallen  $m^3/s$  verminderd kan worden.
- Kennishiaten:** Verdere kwantificatie effectiviteit voor tegengaan verzilting noordrand. Neveneffecten niet gekwantificeerd. Niet bekend hoeveel vermindering in onttrekking gerealiseerd kan worden.

**Stuurknop stuw bij Hagestein:**

Bij verzilting monding Hollandsche IJssel<sup>11</sup> leidt verhoging van de afvoer via de Lek (ten koste van de Waal) met enkele tientallen  $m^3/s$  naar schatting tot een afname van de chlorideconcentraties van 5-10% nabij de monding Hollandsche IJssel. Effect al na 1 à 2 dagen merkbaar.

- Praktisch:** Kan ingezet worden om op korte termijn de chlorideconcentraties te verlagen. Niet bekend hoeveel afvoervertrekking er gerealiseerd kan worden.
- Bijeffecten:** Verhoging chlorideconcentraties zuidrand en kans op achterwaartse verzilting. Lagere waterstanden op de Waal en aan de zuidrand.
- Inzetten:** Indien de verzilting al binnen enkele dagen zal optreden en wanneer de afvoer over de Lek met minimaal enkele tientallen  $m^3/s$  kan worden verhoogd en er geen achterwaartse verzilting dreigt.
- Kennishiaten:** Verdere kwantificatie effectiviteit voor tegengaan verzilting noordrand. Neveneffecten niet gekwantificeerd. Niet bekend hoeveel afvoervertrekking er gerealiseerd kan worden.

### 6.3 Tegengaan achterwaartse verzilting

#### Voorspelling

Op basis van de nieuwe vuistregel (§3.5) inschatten of er sprake is van een dreigende achterwaartse verzilting. Indien dit het geval is overwegen om één van de onderstaande stuurknoppen in te zetten.

#### Stuurknop Haringvlietsluizen:

Achterwaartse verzilting kan tegen worden gegaan door de gemiddelde waterstanden aan de zuidrand te verhogen ten opzichte van de noordrand (§2.3.1), dit kan door of minder water te spuien of meer water in te nemen tijdens vloed. Omdat de laatste optie leidt tot verzilting Haringvliet via de Haringvlietsluizen, is deze niet effectief. Dus blijft minder spuien over:

#### Minder spuien

Praktisch: Alleen mogelijk als de Haringvlietsluizen in bedrijf zijn ( $Q_{BR} \geq 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Tussen 1100 en 1700  $\text{m}^3/\text{s}$  beperkte ebopening, met spuidebieten van enkele tientallen  $\text{m}^3/\text{s}$ . NB. Achterwaartse verzilting treedt geregeld op voor rivierafvoeren boven de 1700  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Bijeffecten: Ongunstig voor het eventueel zoetspoelen van het Haringvliet. Gunstig voor tegengaan verzilting noordrand.

Inzetten: Bij dreigende achterwaartse verzilting als het Haringvliet zoet is.

#### Stuurknop Volkeraksluizen:

Door minder te onttrekken worden de afvoeren door o.a. de Oude Maas en Nieuwe Waterweg verhoogd, waardoor minder zout kan binnendringen en over de Oude Maas richting de zuidrand kan stromen. Dit kan helpen in het verlagen van de kans op achterwaartse verzilting. Omdat achterwaartse verzilting met name optreedt bij windopzet kan worden overwogen om zoveel mogelijk buiten het stormseizoen (herfst) door te spoelen:

#### Doorspoeling na stormseizoen:

Praktisch: Effectiviteit en tijdschalen nog niet onderzocht.

Bijeffecten: Gunstig voor het creëren van een goede uitgangssituatie voor verzilting noordrand (zie §6.2) tijdens periodes van lage rivierafvoer (m.n. de zomer). Gedurende de doorspoeling iets lagere waterstanden bij Moerdijk.

Inzetten: Na de herfst als er in de regel minder stormen zijn voor het creëren van een goede uitgangssituatie.

Kennishiaten: Effectiviteit en bijeffecten niet gekwantificeerd. Niet bekend hoeveel vermindering in onttrekking gerealiseerd kan worden.

#### Beperken onttrekking voor doorspoelen Volkerak-Zoommeer:

Praktisch: Effectiviteit en tijdschalen nog niet onderzocht.

Bijeffecten: Gunstig voor het tegengaan van verzilting monding Hollandsche IJssel, mits geruime tijd voorzien. Iets hogere waterstanden bij Moerdijk.

Inzetten: Bij voorziene achterwaartse verzilting.

Kennishiaten: Effectiviteit en bijeffecten niet gekwantificeerd. Niet bekend hoeveel vermindering in onttrekking gerealiseerd kan worden.

Stuurknop Hagestein:

Door de stuw verder dicht te zetten zal meer water via de Waal stromen. Hierdoor zullen de waterstanden aan de zuidrand hoger worden en de afvoeren door de Oude Maas, Spui en Dordtsche Kil toenemen. Dit is gunstig voor het tegengaan van achterwaartse verzilting.

Praktisch: Alleen mogelijk als de stuw niet al dichtstaat. Effectiviteit en tijdschalen nog niet onderzocht.

Bijeffecten: Verhoging chlorideconcentraties noordrand.  
Hogere waterstanden op de Waal en aan de zuidrand, lagere waterstanden Lek en noordrand.

Inzetten: Bij voorziene achterwaartse verzilting.

Kennishiaten: Effectiviteit en bijeffecten niet gekwantificeerd. Niet bekend hoeveel afvoervertrekking in de praktijk gerealiseerd kan worden.

#### 6.4 Ontzilting Haringvliet

Indien na achterwaartse verzilting of in de toekomst met de vloedopening<sup>12</sup> de zuidrand verzilt is geraakt dient deze ontzilt te worden. Hiervoor kunnen alleen de Haringvlietsluizen worden ingezet. Door meer te spuien en minder in te nemen tijdens vloed (toekomst) kunnen de chlorideconcentraties verlaagd worden. Effectiviteit niet onderzocht. Bijeffecten zijn: toename chlorideconcentraties noordrand en verlaging waterstanden bij Moerdijk.

---

<sup>12</sup> Ook met zoetspoelen kan er zout achterblijven in het Haringvliet.



## 7 Conclusies en Aanbevelingen

Voor de verschillende verziltingsprocessen in de Rijn-Maasmonding is het van belang het systeem als geheel te beschouwen, omdat de noord- en zuidrand elkaar sterk beïnvloeden, zowel via natuurlijke processen als via de stuurknoppen.

In dit rapport is eerst een systeembeschouwing opgesteld, waarna vervolgens in meer detail is gekeken naar het proces van achterwaartse verzilting en de werking van de verschillende stuurknoppen. Op basis hiervan kan het volgende worden geconcludeerd:

### 7.1 Systeembeschouwing

Op basis van de systeembeschouwing zijn de volgende zaken geconcludeerd ten aanzien van verzilting in de Rijn-Maasmonding en de noord-zuidrelaties.

- De noordrand verzilt onder invloed van windopzet en lage rivierafvoer. De zuidrand beïnvloedt de verzilting langs de noordrand met name via de stuurknoppen in het systeem: de Haringvlietsluizen en de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer. Deze bepalen het restdebit op de noordrand en daarmee de hoeveelheid zout die via de noordrand het systeem kan binnen dringen.
- Aan de zuidrand kunnen drie verziltingstypen worden onderscheiden:
  - o Achterwaartse verzilting, waarbij zout via de noordrand de zuidrand bereikt. Hiervoor zijn de waterstandsverschillen tussen de noord- en zuidrand bepalend. Deze bepalen hoever zout tijdens vloed aan de noordrand het gebied kan indringen richting het zuiden en hoever zout tijdens eb weer kan terugstromen naar het noorden.
  - o Nalevering: Als zout eenmaal de zuidrand heeft bereikt kan het worden opgeslagen in de diepe geulen in het Haringvliet. Hier kan het blijven tot er bij eb gespuid wordt door de Haringvlietsluizen en de snelheden hoog genoeg zijn. Indien er niet gespuid wordt, zal zout achterblijven en onder invloed van getij en wind de geulen verlaten en via het Spui terug naar de noordrand stromen.
  - o Voorwaartse verzilting: in de toekomst, als de sluisen ook bij vloed zullen openen kan zout weer direct vanuit zee het Haringvliet op komen. De hoeveelheid zal bepaald worden door de mate van opening.

### 7.2 Vuistregel achterwaartse verzilting

Onder extreme omstandigheden kan zout via de noordrand de zuidrand bereiken, dit noemen we achterwaartse verzilting. Dit kan tot hinderlijke situaties leiden voor de inname van zoetwater. Voor het optreden van achterwaartse verzilting is daarom een vuistregel opgenomen in het "Handboek Waterwacht". Deze is gebaseerd op het optreden van een lage rivierafvoer ( $Q_{br} < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en een  $HL > 1 \text{ m}$  ( $HL$  = het verschil tussen bijna gelijktijdig optredende hoge waterstand bij Hoek van Holland (H) en lage waterstand bij Moerdijk (L)). In dit onderzoek is deze vuistregel gevalideerd. Hieruit blijkt dat deze in 15 van de 25 gevallen de achterwaartse verzilting niet voorspelt. Uit een theoretische beschouwing volgt dat de volgende twee aspecten waarschijnlijk maatgevend zijn: waterstandsverschillen gedurende het hele getij en de mate van verzilting voorafgaand aan een gebeurtenis van achterwaartse verzilting. Op basis van deze twee processen is een nieuwe vuistregel opgesteld, welke is gebaseerd op de som van de waterstandsverschillen gedurende het hele voorgaande getij (mate van oplading) en huidige getij (mate van indringing gedurende de gebeurtenis zelf). De

nieuwe vuistregel voorspelt in 20 van de 25 gevallen de achterwaartse verzilting en geeft slechts 7 vals-positieven.

Omdat het om een verkennend onderzoek ging is de nieuwe vuistregel nog niet geoptimaliseerd en alleen gekeken of de situatie van achterwaartse verzilting optreedt en geen vergelijking gemaakt met de werkelijke chlorideconcentraties. Dit laatste is om twee redenen relevant. Ten eerste zijn er aanwijzingen dat niet alle situaties van achterwaartse verzilting zijn opgenomen in de tabel van Rijkswaterstaat (Bijlage A), waardoor er een vertekend beeld ontstaat van hoe de voorspelparameters presteren. Mogelijk presteren ze zelfs beter dan in de huidige analyse gesteld. Ten tweede kan de voorspelparameter makkelijker worden geoptimaliseerd door de overeenkomst te zoeken in de chlorideconcentratie en de grootte van de parameter.

Tot slot lijkt de mate van oplading van het systeem erg belangrijk. Over de tijdschalen die hiermee gepaard gaan is weinig bekend. Op basis van data-analyse, mogelijk aangevuld met numeriek modelonderzoek, zouden deze tijdschalen nader onderzocht kunnen worden.

### 7.3 Stuurknop Haringvlietsluizen

De Haringvlietsluizen kunnen beschouwd worden als de “grote kraan van Nederland”. Hiermee kunnen de waterbeweging en zoutconcentraties in de Rijn-Maasmonding beïnvloed worden en daarmee de bereikbaarheid van de haven van Moerdijk en de zoetwaterbeschikbaarheid voor drinkwaterbedrijven, landbouw, industrie en de bemaling van de polders.

De Haringvlietsluizen reguleren primair de waterstanden in de Rijn-Maasmonding. Bij een grotere opening kunnen de middenstand, getijslag en fase veranderen. Die tezamen bepalen de waterstandsverschillen tussen de noord- en de zuidrand en daarmee de debietverdeling en zoutverspreiding. De werking van de stuurknop kan als volgt worden samengevat:

Een grotere ebopening leidt tot een verlaging van de middenstand en grotere restdebieten op de zuidrand en kleinere restdebieten op de noordrand. Hierdoor is er een:

- toename van de zoutconcentraties op de noordrand.
- toename van de kans op achterwaartse verzilting.
- afname van zout op het Haringvliet (voor zover aanwezig).
- afname van de waterstanden Moerdijk (ongunstig voor scheepvaart).

Een grotere vloedopening leidt tot een verhoging van de middenstand, een toename van de getijslag en een verandering van de fase van het getij. Hierdoor is er een

- afname van de zoutconcentraties op de noordrand.
- afname van de kans op achterwaartse verzilting.
- toename van zout in het Haringvliet.
- toename van de gemiddelde waterstanden bij Moerdijk, maar grotere fluctuaties.

Bovenstaande is geldig voor het vergroten van de opening tot 600 m<sup>2</sup>. Omdat effecten niet lineair zijn, valt niet op voorhand te zeggen of ze ook gelden voor nog grotere openingen.

Omdat de eb- en vloedopening meest tegengestelde effecten hebben, hangt het af van de verhouding wat de netto effecten zijn. Bij de implementatie van het kierbesluit, kan hier dan ook mee gevarieerd worden. Het gedrag van zout aan de zuidrand is hierbij moeilijk te voorspellen.

Tot slot verwachten we op basis van de systeemkennis ten aanzien van de stuurknop Haringvlietsluizen en de kennis van achterwaartse verzilting dat de kans op achterwaartse verzilting met de Kier gelijk zal blijven voor lage Bovenrijnafvoeren, zal toenemen voor gemiddelde Bovenrijnafvoeren, en zal afnemen voor hoge Bovenrijnafvoeren.

#### 7.4 Stuurknoppen Volkeraksluizen en stuw bij Hagestein

De Volkeraksluizen en de stuw bij Hagestein kunnen beschouwd worden als de kleinere stuurknoppen van het hoofdwatersysteem. Via de Volkeraksluizen wordt water aan het Hollandsch Diep onttrokken ten behoeve van de doorspoeling van het Volkerak-Zoommeer. Met de stuw bij Hagestein kan de afvoerverdeling over de Lek en de Waal bepaald worden binnen zekere grenzen. De vraag is in hoeverre deze stuurknoppen effectief kunnen worden ingezet voor het tegengaan van verzilting aan de noordrand. Als eerste stap hierin is in dit project de systeemwerking van beide stuurknoppen onderzocht en vergeleken. Dit is gedaan middels numerieke 1D berekeningen voor vaste afvoer en cyclisch getij en voor een situatie van dreigende verzilting van de monding van de Hollandsche IJssel.

Uit de SOBEK-berekeningen volgt dat het verminderen van de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer met 50 m<sup>3</sup>/s een groter effect heeft op de zoutconcentraties nabij de stormvloedkering in de Hollandsche IJssel (~-13%), dan de afvoervertrekking van 50 m<sup>3</sup>/s van de Waal naar de Lek (~-10%). Bij het verminderen van de onttrekking duurt het echter vele malen langer voordat de nieuwe concentraties bereikt zijn. Deze verschillen in chlorideconcentraties en tijdschalen kunnen goed verklaard worden. Welke maatregel effectiever is, hangt dus af van de situatie: wanneer verzilting pas op lange termijn wordt verwacht (~10 dagen) is het verminderen van de onttrekking een effectievere maatregel, maar wanneer het urgent is en de chlorideconcentraties binnen enkele dagen moeten dalen, dan is de afvoervertrekking effectiever.

Op basis van de workshop met de beheerders is een discussie gevoerd ten aanzien van de praktische toepasbaarheid van beide knoppen. Hieruit is geconcludeerd dat de effectiviteit van beide stuurknoppen voor het tegengaan van verzilting naar verwachting gering is, maar dat tijdschalen van dagen tot een week hierin geen belemmering hoeven te vormen. Of beide stuurknoppen kunnen bijdragen om in periodes van droogte net wat extra ruimte te creëren is moeilijk vast te stellen op basis van huidige berekeningen. Hiertoe zouden meerdere jaren kunnen worden doorgerekend waarin verzilting is opgetreden. Tot slot is het vanwege de grote onzekerheid van voorspelling van de chlorideconcentraties met een 1D model aan te bevelen om met een 3D model te verifiëren of het 1D model realistische schattingen geeft voor de zoutconcentraties en de tijdschalen.

#### 7.5 Redeneerlijn/ Handlingsperspectief

Op basis van de verkregen kennis en inzichten is de bestaande redeneerlijn (Hydrologic 2015a) verder aangescherpt voor de stuurknoppen Harinvlietsluizen, Volkeraksluizen en de stuw bij Hagestein.

#### 7.6 Aanbevelingen op een rij:

Hieronder worden per categorie de aanbevelingen gegeven. Het verbeteren en implementeren van de vuistregel voor achterwaartse verzilting, het verbeteren van het 3D modelinstrumentarium en het nader kwantificeren van de effectiviteit van de stuurknoppen zijn hierbij vanuit ons oogpunt de belangrijkste aanbevelingen.

##### Vergroten van de systeemkennis

- Onderzoeken tijdschaaleffecten verzilting/ mate van oplading, op basis van data-analyse (voorbeeld lage rivierafvoer die weinig varieert en gesloten Haringvlietsluizen), mogelijk aangevuld met analytische en numerieke modelstudies - *Hoofdstuk 3*.
- Effect rivierbodemerrosie Oude Maas/ Spui op toename achterwaartse verzilting onderzoeken - *Hoofdstuk 3*
- Niet lineair gedrag zoutindringing langs de zuidrand bij grotere eb- en vloedopening onderzoeken met een 3D model – *Hoofdstuk 4*.

- Effectiviteit van spuien voor ontzilten Haringvliet nader onderzoeken op basis van data-analyse – *Hoofdstuk 4*.

## Verbeteren modelinstrumentarium

- Verbeteren van het huidige 3D instrumentarium, zodat de relevante detailprocessen, zoals de zoutverspreiding Haringvliet en tijdschaaleffecten beter bestudeerd kunnen worden – *Hoofdstuk 4 en 5*.

## Verbeteren vuistregel (achterwaartse) verzilting

- Gebeurtenissen van achterwaartse verzilting aanvullen tot en met 2015 en nagaan of de tabel compleet is voor de periode 1990 tot en met 2005 - *Hoofdstuk 3*.
- Optimalisatie voorspelparameter achterwaartse verzilting (of het onderzoeken van een alternatief, zoals voorspelling met het 1D SOBEM model) en herdefinitie achterwaartse verzilting voor de aansluiting bij de beheerpraktijk (wanneer vormt achterwaartse verzilting een probleem?) - *Hoofdstuk 3*.
- Opstellen vuistregel voor verzilting noordrand.

## Verbetering stuurmogelijkheden voor het tegengaan van verzilting

- Inbouwen nieuwe vuistregel voor achterwaartse verzilting in het operationeel model. – *Hoofdstuk 3*
- Effectiviteit van de stuurknoppen Haringvlietsluizen, Volkeraksluizen en Hagestein voor het tegengaan van verzilting noordrand en achterwaartse verzilting verder kwantificeren middels 3D berekeningen en aanvullende 1D of 3D berekeningen van werkelijk opgetreden situaties – *Hoofdstuk 5 en 6*.

## Ontsluiten kennis voor de beheerders

- Ontsluiten kennis via een Wiki. Deze kan als basis dienen om informatie uit volgende projecten hieraan toe te voegen. Dit biedt bovendien de mogelijkheid voor beheerders om kennis met betrekking tot het beheer aan te vullen.
- Ontsluiten kennis van de stuurknoppen en de vuistregel voor achterwaartse verzilting via een "Serious Game". Een situatie van dreigende verzilting kan worden nagespeeld, waarbij spelers met behulp van de verschillende stuurknoppen kunnen proberen de verzilting zo veel mogelijk tegen te gaan. In verband met de onzekerheid van 1D modellen ten aanzien van de voorspelling van zout, zal dit spel een zeer grove benadering zijn van de werkelijkheid. Functie van dit spel is daarom gericht op het bij brengen van de *stroomwerking* en de interactie tussen de beheerders na te spelen.



## 8 Referenties

- Becker, Anke. 2015. "Sediment in (Be)weging, Deel 2 (Periode 2000-2012)." 1208925-0-NaN-23. Advies Beheer Rivierbodembodem RMM. Deltares.
- Boogaard, Henk van den. 2015. "Effectbepaling Verdieping Nieuwe Waterweg Op KWA." 1220833-000. Deltares.
- De Vries, Ies. 2014. "Toetsing Robuustheid Brielse Meer Voor Zoetwatervoorziening - Fase 2: Definitieve Toetsing." 1209018-000. Deltares.
- Goederen, Sacha de, Aad Bavelaar, Pieter Jacobs, Marloes Kraaijenveld, Jeroen Ligtenberg, and Ton Visser. 2006. "Niet Te Zoet, Niet Te Zout. HOP2008, Een Nieuw Bedieningsprogramma Voor de Haringvlietsluizen." RIZA-werkdocument 2006.045X.
- Huismans, Ymkje. 2013. "Effect van Bodemdaling in Het Rijn-Maasmondinggebied Op de Zoutindringing." 1207770-001. Deltares.
- Hydrologic. 2015a. "Inventarisatie Slim Watermanagement Rijn-Maasmonding." P720.
- . 2015b. "Verzilting Door Verdieping Nieuwe Waterweg En Botlek." Eindrapport P716. Deelonderzoek MER Havenbedrijf Rotterdam.
- Klijn, Frans, Emiel Van Velzen, Judith Ter Maat, and Joachim Hunink. 2012. "Zoetwatervoorziening in Nederland - Aangescherpte Landelijke Knelpuntenanalyse 21e Eeuw." 1205970-000. Deltares.
- Kraaijenveld, M. 2003. "Een SOBEK-Model van Het Noordel Ijk Deltabekken; Kalibratie En Verificatie Zoutbeweging Noordrand." RIZA werkdocument 2003.047X. RIZA.
- Kranenburg, Wouter, Marjolein Mens, Frans Buschman, Carine Wesselius, Ymkje Huismans, Judith Ter Maat, and Ferdinand Diermanse. 2015. "Systeemanalyse van de Rijn-Maasmonding Voor Verzilting (Factsheets Proceskennis, Systeemkennis, Modelinstrumentarium En Statistiek)." 1220107-002. Deltares.
- Kuijper, C. 1985. "Waterloopkundig Systeemonderzoek Noordelijke Deltabekken - Lozingen/onttrekkingen En Afvoervertrekkingen Deel 1; Variaties Restafvoeren." M2030-1. Waterloopkundig Laboratorium.
- Kuijper, Kees. 2015. "Analyse Debiet- En Zoutmetingen Hollandsche IJssel." 1220106-003. Deltares.
- . 2016. "Analyse van de Zoutmetingen in November 2015 Langs de Hollandsche IJssel - Afleiding Dispersiecoefficient." 1230077-001. Systeemanalyse Rijn-Maasmonding. Deltares.
- Leeuwen, Bas van. 2015. "Effectbepaling Verdieping Nieuwe Waterweg Op Verzilting in Benedenrivierengebied - Op Basis van TRIWAQ Simulaties OSR Model." 1712. Svasek.
- Mens, Marjolein. 2016. "Karakterisering van Deelgebieden in de Rijn-Maasmonding Naar Type Verziltingsproces." Memo 1230077-001. Systeemanalyse Rijn-Maasmonding. Deltares.
- Rijkswaterstaat. 1998. "MER Beheer Haringvlietsluizen. De Sluizen Op Een Kier."
- . 2013. "Kenmerkende Waarden, Getijgebied 2011.0." RWS Centrale Informatievoorziening.
- Rijkswaterstaat Zee en Delta, Waterschap Brabantse Delta, Waterschap Hollandse Delta, Waterschap Scheldestromen, Rijkswaterstaat West-Nederland Zuid, Rijkswaterstaat Zuid Nederland, and Rijkswaterstaat Zee en Delta. 2016. "Waterakkoord Volkerak-Zoommeer." [http://www.scheldestromen.nl/het\\_waterschap/projecten/projecten\\_water/waterakkoord](http://www.scheldestromen.nl/het_waterschap/projecten/projecten_water/waterakkoord).
- Rijkswaterstaat Zuid-Holland. 2005. "Waterakkoord Hollandsche IJssel En Lek."
- Spijk, A. van. 2006. "Evaluatie Verzilting En Ontzilting van Het Haringvliet Na de Storm van 24/25 November 2005." Definitief AP/2006/03. Rijkswaterstaat Zuid-Holland.
- Tiessen, Meinard. 2016. "Zoutverspreiding in Het Haringvliet - Hypothese Vorming." Memo 1230077-001. Deltares.
- Van der Vat, Marnix. 2016. "Nader Onderzoek Verzilting Lek." Memo 1230077-4-NaN-2. Deltares.

- Vuik, Vincent, Eddy Collard, Marc Rotsaert, and Joana Vieira Da Silva. 2011. "WAQUA-Productieberekeningen Benedenrivierengebied Voor WTI-2011: Rapportage Fase 1." PR1876.30. HKV en Svasek Hydraulics.
- Winterwerp, H. 1982. "Probleemanalyse van de Tijdschaaleffecten in Het Noordelijk Deltabekken." M896-49. Waterloopkundig Laboratorium.

## A Tabellen achterwaartse verzilting en uitgebreide vuistregel

Tabel met overzicht van het optreden van chlorideconcentraties > 500 mg/l bij Bernisse in de periode 1990 – 2005.

Bron: rapport “evaluatie verzilting Haringvliet 2005” (van Spijk 2006).

Onderaan deze tabellen volgt een uitgebreide vuistregel voor het optreden van achterwaartse verzilting zoals opgesteld door A. van Spijk.

Datum	Afvoer Rijn (m <sup>3</sup> /s)	Waterstand (m .o.v. NAP)			Chlorideconcentratie (mg Cl <sup>-</sup> /l)			
		Hoek v. Holland		Moerdijk	HL	Bernisse	Wieldrecht <sup>1)</sup>	Alblasserdam <sup>1)</sup>
		opgetreden	opzet					
26/02/90	3987	+2,49	+1,12	+0,61	1,88	730	104	140
max.	3488	+2,84	+1,45	+1,21	1,63	4.883	124	175
02/03/90	3049	+2,29	+1,05	+0,87	1,42	747		
19/09/90	1014	+1,91	+0,77	+0,38	1,53	768		1.178
max.		+2,36	+1,04	+0,72	1,64	5.887	1.421	2.044
21/09/90	978	+2,20	+0,95	+0,91	1,29	2.049		
12/12/90	1686	+2,49	+1,63	+0,73	1,76	10.924	996	
13/12/90	1639	+1,95	+0,89	+1,50	0,45	11.314	2.216	
14/12/90	1622	+0,82	-0,25	+0,16	0,66	309	450	
22/09/91	823	+1,48	+0,42	+0,19	1,29	1.177	264	1.303
23/09/91	821	+1,40	+0,10	+0,34	1,06	362	265	935
02/10/91	1005	+1,60	+0,82	+0,85	0,75	220	252	570
max.	1005	+0,79	-0,20	+0,79	0,00	3.596	409	1.095
04/10/91	1043	+1,54	+0,51	+0,18	1,36	237	258	790
17/10/91	1091	+1,44	+0,67	+0,81	0,63	5.608	1.630	1.163
18/10/91	1060	+1,68	+1,06	+1,11	0,57	2.909	1.375	985
		+1,33	+0,41	+1,10	0,23	4.600	1.522	991
02/11/91	931	+1,34	+0,14	+0,23	1,11	806	242	330
max.	884	+1,81	+0,55	+0,41	1,40	880	264	2.030
05/11/91	899	+1,94	+0,67	+0,62	1,32	578	282	1.692
18/12/91	897	+1,88	+0,89	+0,66	1,22	5.698	2.687	2.149
19/12/91	876	+0,97	-0,21	+0,74	0,23	1.131	806	1.045
03/02/92	1119	+1,86	+0,70	+0,33	1,53	1.014	226	975
15/10/92	909	+1,78	+0,46	+0,32	1,46		227	585
max.	909	+1,87	+0,52	+0,50	1,37		248	701
16/10/92	899	+1,60	+0,33	+0,58	1,02		232	368

Datum	Afvoer Rijn (m <sup>3</sup> /s)	Waterstand (m .o.v. NAP)			Chlorideconcentratie (mg Cl <sup>-</sup> /l)			
		Hoek v. Holland opgetreden	Moerdijk opzet	HL	Bernisse	Wieldrecht <sup>1)</sup>	Alblasserdam <sup>1)</sup>	
21/02/93	1438	+2,54	+1,47	+0,72	1,82	stijgend	stijgend	1.155
		+2,49	+1,25	+1,48	1,01	7.808	2.298	1.253
14/11/93	1625	+2,65	+1,21	+0,54	2,11	5.570	154	
15/11/93	1583	+2,45	+1,05	+1,33	1,12	7.640	1.523	325
		+1,54	+0,04	+1,08	0,46	369	201	226
28/01/94	3148	+2,88	+1,45	+1,64	1,24	717	93	166
29/01/94	3316	+1,66	+0,44	+0,87	0,79	357	87	164
14/03/94	2478	+1,92	+0,71	+0,83	1,09	1.000	112	192
29/10/96	2004	+2,53	+1,09	+0,99	1,54	3.410	792	333
30/10/96	1901	+1,62	+0,32	+0,98	0,64	343	155	116
02/10/97	1046	+1,96	+0,62	+0,38	1,58	580	174	1.164
		+1,65	+0,41	+0,65	1,00	536	188	741
25/10/98	2064	+2,33	+1,08	+1,10	1,23	1.794	132	166
26/10/98	2005	+1,79	+0,60	+1,19	0,60	367	136	138
03/11/98	6849	+1,47	0,00	-0,01	1,48	3.103	71	79
05/02/99	3257	+2,38	+1,26	+1,06	1,32	1.478	130	131
		+2,15	+0,92	+1,28	0,87	717	131	134
06/11/99	1607	+2,42	+1,26	+0,74	1,68	4.631	1.755	600
07/11/99	1644	+2,05	+0,70	+1,19	0,86	3.335	862	399
01/12/99	1574	+1,77	+0,93	+0,70	1,07	1.653	168	644
04/12/99	1552	+2,42	+1,25	+0,72	1,70	1.044	163	484
23/09/03	851	+1,68	+0,67	+0,30	1,38	2.234	161	3.019
07/10/03	980	+1,97	+0,78	+0,53	1,44	2.534	2.367	259
08/10/03	991	+2,09	+0,79	+1,09	1,00	3.799	1.938	687
09/10/03	969	+2,21	+0,86	+0,71	1,50	209	1.058	215
10/10/03	1049	+1,61	+0,40	+0,60	1,01	179	176	154

Datum	Afvoer Rijn (m <sup>3</sup> /s)	Waterstand (m .o.v. NAP)			Chlorideconcentratie (mg Cl <sup>-</sup> /l)			
		Hoek v. Holland	Moerdijk	HL	Bernisse	Inloop Spui <sup>2)</sup> (NAP -1m/-5m)	Middelharnis <sup>2)</sup> (NAP -2m/-8/-15m)	
		opgetreden	opzet					
24/11/05	1003	+2,02	+1,08	+0,12	1,90	134	135/134	
25/11/05	996	+1,68	+0,98	+1,29	0,29	9.793	8.237/8.968	1.258/1.578/1.671
16/12/05	1299	+2,47	+1,16	+0,68	1,79	351	371/369	327/351/372
17/12/05	138	+2,21	+0,78	+1,07	1,14	327	dalend	
18/12/05	1226	+1,37	+0,04	+0,70	0,67	313	265/264	349/359/362

## Opmerkingen:

- 1) deze stations zijn in 2004 ontmanteld in het kader van bezuinigingen en heroverweging regionaal zoutmeetnet
- 2) deze stations zijn sinds 2004 operationeel in het kader van de invoering van de Kier (ander beheer Haringvlietstuiven)

### Uitgebreide vuistregel optreden achterwaartse verzilting

Verhoogde verziltingsrisico's in de Rijn-Maasmonding indien:

- Hoogwater Hoek van Holland > 1.50 m NAP
- Qbr < 1500 m<sup>3</sup>/s
- HL > 90 à 100 cm
- Hoogwater Hoek van Holland meer dan 30 cm hoger dan voorgaande hoogwater
- 

Uiteraard rekening houdende met interactie tussen afvoer en getij.

[Ary van Spijk]



## B Matlab code voor nieuwe vuistregel achterwaartse verzilting

Matlab code voor valideren nieuwe vuistregel achterwaartse verzilting.

---

```
close all
clear all
clc

%%
path = 'p:\1230077-verzilting\Systeemanalyse RMM\Onderdeel2_Noord-
Zuidrelaties\Analyse Achterwaartse Verzilting\01_Data';
file = '\WaterstandenMoerdijkHvH2003.xls';

x = 0;
dhlim = 2.7;

% tijden van achterwaartse verzilting
%
% NB. de tweede datum is de datum waarop de verzilting voorbij is, de
% eerste en tweede datum geven dus het tijdvenster aan waarbinnen
% verzilting is opgetreden.

% tav = {'26-feb-90', '3-mar-90', '19-sep-90', '22-sep-90', '12-dec-90',
'15-dec-90'};
% tav = {'22-sep-91', '24-sep-91', '02-oct-91', '05-oct-91', '17-oct-
91', '19-oct-91', '02-nov-91', '06-nov-91', '18-dec-91', '20-dec-91'};
% tav = {'03-feb-92', '04-feb-92', '15-oct-92', '17-oct-92'};
% tav = {'21-feb-93', '22-feb-93', '14-nov-93', '16-nov-93'};
% tav = {'28-jan-94', '30-jan-94', '14-mar-94', '15-mar-94'};
% tav = {};
% tav = {'29-oct-96', '31-oct-96'};
% tav = {'02-oct-97', '03-oct-97'};
% tav = {'25-oct-98', '27-oct-98', '03-nov-98', '04-nov-98'};
% tav = {'05-feb-99', '06-feb-99', '06-nov-99', '08-11-99', '01-dec-99',
'02-dec-99', '04-dec-99', '05-dec-99'};
% tav = {};
% tav = {};
tav = {'23-sep-03', '24-sep-03', '07-oct-03', '11-oct-03'};
% tav = {};
% tav = {'24-nov-05', '26-nov-05', '16-dec-05', '19-dec-05'};

% tijdformat
timefmt = 'yyyy/mm/dd';

%% read files
H = xlsread([path file], 'HvH');
M = xlsread([path file], 'Moerdijk');
```

```
%% tijdconversie excel naar matlab
diff = 693960; % conversion excel date to matlab date
tH = H(:,1)+H(:,2)+diff;
tM = M(:,1)+M(:,2)+diff;

% controle of tijden van Hoek van Holland identiek zijn aan Moerdijk
figure(1)
plot(tH-tM)
title('controle of tijdseries HvH en Moerdijk identiek zijn')
legend('tH-tM')

%% figuren van waterstanden en waterstandverschillen

% plot waterstanden Moerdijk en Hoek van Holland
figure(2)
subplot(2,1,1)
plot(tH, H(:,4))
hold all
plot(tM, M(:,4))
datetick('x', 'dd mmm yy', 'keepticks')
title('waterstanden (cm)')
legend('h_{Hoek van Holland}', 'h_{Moerdijk}')
for j = 1:length(tav)
    t = datenum(tav{j}, 'dd-mmm-yy');
    line([t, t], ylim, 'Color', 'k')
end
line([tH(1), tH(end)], [0, 0], 'Color', 'k')
datetick('x', timefmt, 'keepticks')

% plot verschilwaterstanden Moerdijk en Hoek van Holland
dh = H(:,4) - M(:,4);
subplot(2,1,2)
plot(tH, dh)
line([tH(1), tH(end)], [100, 100], 'color', 'k')
datetick('x', 'dd mmm yy', 'keepticks')
title(['waterstandsverschillen (cm) --> gemiddelde dh = '
num2str(mean(dh)) ' cm'])
legend('h_{Hoek van Holland} - h_{Moerdijk}')

% verdeling van waterstandverschillen
figure(3)
hist(dh, 50);
xlabel('waterstandverschil h_{Hoek van Holland} - h_{Moerdijk} in cm')
ylabel('aantal keren van voorkomen')
title('verdeling van waterstandsverschillen Hoek van Holland -
Moerdijk')
```

```
%% bepalen van het cumulatieve waterstandverschil - gemiddelde
waterstandsverschil

dhcum = 0;
for j = 1:length(dh)
    if j == 1
```



```

        dhcum(j) = dh(j)-mean(dh);
    else
        dhcum(j) = dhcum(j-1) + dh(j)-mean(dh);
    end
end

%
figure(4)
plot(tH, dhcum)
t32 = datenum('14-dec-90','dd-mmm-yy');
for j = 1:length(tav)
    t = datenum(tav{j},'dd-mmm-yy');
    line([t, t], ylim, 'Color', 'k')
end
xlabel('tijd')
ylabel('waterstandverschil SOM(h_{Hoek van Holland}(i) -
h_{Moerdijk}(i)-dh_{gemiddeld}) in cm')
title('cumulatieve waterstandsverschillen Hoek van Holland - Moerdijk,
min het gemiddelde waterstandsverschil')

%% bepaal HL, LH en de cumulatieve dh per getijperiode

% define number of tidal periods in one year
% 365 days = 525600 minutes
% 12 hours and 25 minutes = 745 minutes
% 525600/745 = 705.5 tidal periods

TPpy = 704;
ind = 1;
TP = 74;
w = 40;

for j = 1:TPpy
    % define start
    [maxH(j), imax] = max(H(ind:ind+TP,4));
    imaxc = ind+imax-1;
    tmaxH(j) = tH(imaxc);

    % vind bijbehorende laag water bij Moerdijk (max 3 uur verschoven
van
    % hoogwater Hoek van Holland)
    if imaxc-w < 0
        inm = 1;
    else
        inm = imaxc-w;
    end
    [minM(j), iminM] = min(M(inm:imaxc+w,4));
    iminMc = inm+iminM-1;

    % als de minimum waarde aan de rand gevonden is, behoort deze
    % waarschijnlijk niet tot het minimum en is er sprake van een
    % afwijkende vorm (bijvoorbeeld geen minimum omdat de waterstand
blijft

```

```

% stijgen. In dit geval wordt de waterstand genomen op het momen van
% HvH Hoogwater
if iminM == 1 || iminM == length(M(inm:imaxc+w,4))
    minM(j) = M(imaxc,4);
    iminMc = imaxc;
end

tminM(j) = tM(iminMc);

% vind laagwater HvH volgend op vorig hoogwater (maximaal 9 uur
% verschoven van het hoogwater van HvH)
[minH(j), imin] = min(H(imaxc:imaxc+54,4));
iminc = imaxc+imin-1;
[maxM(j), imaxM] = max(M(iminc-w:iminc+w,4));
tminH(j) = tH(iminc);
imaxMc = iminc-w+imaxM-1;

% als de maximum waarde aan de rand gevonden is, behoort deze
% waarschijnlijk niet tot het maximum, zie toelichting voor minimum
% hierboven
if imaxM == 1 || imaxM == length(M(iminc-w:iminc+w,4))
    maxM(j) = M(iminc,4);
    imaxMc = iminc;
end
tmaxM(j) = tM(imaxMc);

timeTP(j) = tH(imaxc);

% imaxc = maximum waterstand HvH
% als je wilt beginnen bij waar waterstand HvH > waterstand
Moerdijk, dan x = -17 (3 uur).
% als je wilt beginnen bij waar waterstand HvH < waterstand
Moerdijk, dan x = +17 (3 uur).
if (imaxc + x) < 0
    dhTP(j) = sum(dh(1:TP))*10/(74*10);
else
    dhTP(j) = sum(dh(imaxc+x:imaxc+TP+x))*10/(74*10);
end

% dhTP(j) = sum(dh(imaxc+x:imaxc+TP+x));
% sum(dh(j-1)dt+2dh(j)dt)/dT, with dt and dT in minutes
if j == 1
    dhTP2(j) = dhTP(j);
else
    dhTP2(j) = (dhTP(j-1)+2*dhTP(j))/3;
end

ind = imaxc+40;
end

HL = maxH-minM;
LH = minH-maxM;

figure(6)
plot(tmaxH, maxH, '*')

```

```

hold all
plot(tminM, minM, 'r*')
plot(tH, H(:,4))
hold all
plot(tM, M(:,4))
for j = 1:length(tav)
    t = datenum(tav{j}, 'dd-mmm-yy');
    line([t, t], ylim, 'Color', 'k')
end
line([tH(1), tH(end)], [0, 0], 'Color', 'k')
datetick('x', timefmt, 'kepticks')
xlabel('tijd')
ylabel('waterstand in cm')
legend('maximale waterstanen HvH', 'minimale waterstanden Moerdijk')
title('maximale waterstanen HvH en minimale waterstanden Moerdijk')

figure(7)
plot(tminH, minH, '*')
hold all
plot(tmaxM, maxM, 'r*')
for j = 1:length(tav)
    t = datenum(tav{j}, 'dd-mmm-yy');
    line([t, t], ylim, 'Color', 'k')
end
line([tH(1), tH(end)], [0, 0], 'Color', 'k')
datetick('x', timefmt, 'kepticks')
xlabel('tijd')
ylabel('waterstand in cm')
legend('minimale waterstanden HvH', 'maximale waterstanden Moerdijk')
title('minimale waterstanden HvH en maximale waterstanden Moerdijk')

figure(8)
plot(tmaxH, HL, '*')
hold all
plot(tminH, LH, 'r*')
for j = 1:length(tav)
    t = datenum(tav{j}, 'dd-mmm-yy');
    line([t, t], ylim, 'Color', 'k')
end
line([tH(1), tH(end)], [155, 155], 'Color', 'k')
line([tH(1), tH(end)], [-30, -30], 'Color', 'k')
datetick('x', timefmt, 'kepticks')
xlabel('tijd')
ylabel('LH en HL in cm')
legend('HL', 'LH')
title('LH en HL parameters')

figure(9)
plot(timeTP, dhTP)
hold all
plot(timeTP, dhTP2, 'LineWidth', 3)
plot(timeTP, moving(dhTP,2), '--', 'LineWidth', 2)
for j = 1:length(tav)
    t = datenum(tav{j}, 'dd-mmm-yy');
    line([t, t], ylim, 'Color', 'k')
end
line([tH(1), tH(end)], [dhlim, dhlim], 'Color', 'k')

```

```
datetick('x', timefmt, 'keepticks')
xlabel('tijd')
ylabel('cumulatieve waterstandsverschillen per getijperiode in cm')
legend('cumulatieve waterstandsverschillen per getijperiode', '2*cumdh
TP(j) + cumdh TP(j-1)', 'lopend gemiddelde (2) cum
waterstandsverschillen')
title('cumulatieve waterstandsverschillen per getijperiode')

%% print events where HL > 155 cm

iHL = find(HL>155);
for j = 1:length(iHL)
    disp(['Hmax = ' num2str(maxH(iHL(j))) ' cm NAP, at '
datestr(tmaxH(iHL(j))))])
    disp(['Mmin = ' num2str(minM(iHL(j))) ' cm NAP, at '
datestr(tminM(iHL(j))))])
    fprintf(['HL = ' num2str(HL(iHL(j))) ' cm \n\n'])
end

ix = find(dhTP2>200);
for j = 1:length(ix)
    disp(['dhTP2 = ' num2str(dhTP2(ix(j))) ' cm at '
datestr(timeTP(ix(j))))])
    disp(['Hmax = ' num2str(maxH(ix(j))) ' cm NAP, at '
datestr(tmaxH(ix(j))))])
    disp(['Mmin = ' num2str(minM(ix(j))) ' cm NAP, at '
datestr(tminM(ix(j))))])
    disp(['Hmin = ' num2str(minH(ix(j))) ' cm NAP, at '
datestr(tminH(ix(j))))])
    disp(['Mmax = ' num2str(maxM(ix(j))) ' cm NAP, at '
datestr(tmaxM(ix(j))))])
    fprintf(['\n'])
end
```

## C Details validatie vuistregels

Hieronder volgen printscreens van de Excel tabel die gebruikt is voor de evaluatie van de criteria. Hierbij staat 1990 – 1 voor de eerste periode in 1990 waarin achterwaartse verzilting optrad volgens de tabel in Bijlage A.

		TP(j-1)+2*TP(j), lim + 2.7 m	HL > + 155	LH > - 30	Opm
1990	1	1	1	0	
	2	1	1	0	
	3	1	1	1	
<b>false positives</b>		<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	
1991	1	1	0	0	
	2	1	0	0	
	3	0	0	1	
	4	1	0	0	
	5	1	0	1	
<b>false positives</b>		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	
1992	1	1	0	0	
	2	1	0	0	
<b>false positives</b>		<b>0</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	
1993	1	1	1	1	
	2	1	1	0	
<b>false positives</b>		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	
1994	1	0	1	0	
	2	1	1	0	
<b>false positives</b>		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	
1995	geen achterwaartse verzilting				
<b>false positives</b>		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	
1996	1	1	0	0	
<b>false positives</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	
1997	1	1	1	0	
<b>false positives</b>		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	
1998	1	1	0	0	
	2	0	1	0	
<b>false positives</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	
1999	1	1	0	0	
	2	1	0	0	
	3	0	0	1	
	4	0	0	0	
<b>false positives</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	

2000 geen achterwaartse verzilting				
<b>false positives</b>		<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
2001 geen achterwaartse verzilting				
<b>false positives</b>		<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>
2002 geen achterwaartse verzilting				
<b>false positives</b>		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
2003	1	1	0	0
	2	1	0	0
<b>false positives</b>		<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b> 2x wel achterwaartse verzilting?
2004 geen achterwaartse verzilting				
<b>false positives</b>		<b>1</b>	<b>5</b>	<b>0</b>
2005	1	1	1	1
	2	0	1	0 geen achterwaartse verzilting
<b>false positives</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>
number correct		20	10	6
number wrong		6	16	20
number false positiv		7	22	0
		26		
correctie 2005				
number correct		20	9	6
number wrong		5	16	20
number false positiv		7	23	0
correctie 2003?				
number correct		22	10	6
number wrong		5	17	22
number false positiv		5	22	0

## D Model

Voor het berekenen van de werking van de stuurknoppen Haringvlietsluizen en stuw bij Hagestein is het SOBEK-RE NDB 1\_1\_0 gebruikt (Kraaijenveld 2003). Hierbij is uitgegaan van de variant die wordt gebruikt voor het doorrekenen van de jaarsommen.

In de principe berekeningen is uitgegaan van stationaire condities (dat wil zeggen een vaste rivierafvoer en een cyclisch getij), waarbij de monding Hollandsche IJssel (bijna) verzilt. Hierbij is de definitie uit het waterakkoord gebruikt (Rijkswaterstaat Zuid-Holland 2005).

*Verziltig: een verhoging van het chloridegehalte in de Hollandsche IJssel nabij de Stormvloedkering door zee-Invloed, zoals die verhoging blijkt uit de routinematige bemonstering door het Rijk, dan wel uit specifieke bemonstering, en welke verhoging (minimaal 50 mg chloride/l) vergeleken wordt met het chloridegehalte van de Rijn te Lobith, met een faseverschil van twee dagen.*

*[Waterakkoord Hollandsche IJssel]*

In de SOBEK-berekeningen treedt dit op bij een Bovenrijnafvoer van 980 m<sup>3</sup>/s, wanneer het chloridegehalte van de Rijn rond de 125 mg Cl/l ligt. De grens voor verziltig is dan rond de 175 mg Cl/l. Voor de Hollandsche IJssel nabij de stormvloedkering is hierbij de SOBEK-RE locatie "HOIJ029\_17800.00" gebruikt.

In het model moeten de volgende rivierrandvoorwaarden worden gekozen: afvoer en chlorideconcentratie bij Tiel (Waal), Hagestein (Lek), Lith (Maas) en Gouda (Hollandsche IJssel). Voor de afvoerverdeling over de Rijntakken bij een bepaalde Bovenrijnafvoer is gebruik gemaakt van de stuw tabel 2016 van Dienst Oost Nederland, zie onderaan in deze bijlage. Bij een Bovenrijnafvoer van 980 m<sup>3</sup>/s is dit 798 m<sup>3</sup>/s over de Waal en 22 m<sup>3</sup>/s over de Lek<sup>13</sup>. Omdat in het model de randvoorwaarde op de Waal bij Tiel ligt, moet de hoeveelheid water die naar het Amsterdam Rijn-kanaal vloeit hier nog vanaf. Conform eerdere studies [REFS] gaan we hierbij uit van ~15 m<sup>3</sup>/s. Voor de Lek ligt de modelrandvoorwaarde bij Hagestein. Er is momenteel discussie gaande over hoeveel water er bij lage rivierafvoer daadwerkelijk wordt doorgelaten (Van der Vat 2016). Volgens de beheerder is het beheer van de stuw de afgelopen jaren aangepast om een minimale afvoer van 25-30 m<sup>3</sup>/s te handhaven. Dit blijkt echter niet eenduidig uit een eerste inventarisatie van de meetreeksen uit 2014 en 2015.. Ook is niet bekend hoeveel water er benedenstreams van de stuw precies wordt onttrokken tijdens lage rivierafvoer. Omdat de orde groottes vermoedelijk gelijk zijn, gaan we in deze studie uit van 0 m<sup>3</sup>/s over de Lek. Voor het bepalen van de afvoer over de Maas bij Lith, wordt gebruik gemaakt van de 50% relatie (Vuik et al. 2011), waarmee we uitkomen op 99 m<sup>3</sup>/s. Tot slot is de afvoer over de Hollandsche IJssel op 0 m<sup>3</sup>/s gesteld, omdat bij lage rivierafvoer weinig tot geen water over de Hollandsche IJssel stroomt en onttrekkingen beperkt worden.

Omdat we een geïdealiseerde situatie bestuderen (stationaire sommen) en in de praktijk de afvoeren over de Waal, Lek en Maas bij een Bovenrijnafvoer van 980 m<sup>3</sup>/s altijd een beetje

<sup>13</sup> 980 m<sup>3</sup>/s komt niet voor in de stuw tabel. Om de afvoerverdeling bij deze afvoer te bepalen is gebruik gemaakt van lineaire extrapolatie.

anders zullen zijn, zijn de exacte waarden voor de afvoeren op de randen niet zo belangrijk, zolang ze maar realistisch zijn.

Voor het bepalen van de chlorideconcentraties van het rivierwater is gebruik gemaakt van de volgende regressierelaties (Kranenburg et al. 2015):

$$C_{\text{Maas}}(t) = 31,9 + 1000 \times 1,726 / Q_{\text{Lith}}(t)$$

En

$$C_{\text{Rijn}}(t) = 46.9 + 1000 \times 75,532 / Q_{\text{Lobith}}(t)$$

Waarbij de chlorideconcentraties C in [mg Cl/l] wordt uitgedrukt en de afvoer Q in [m<sup>3</sup>/s].

Voor de zeerand is uitgegaan van het slotgemiddeld getij van 2011 (Rijkswaterstaat 2013), zoals ontvangen van Sacha de Goederen<sup>14</sup>. Dit is een cyclisch getij, zonder springtij doodtij variaties. Omdat dit slotgemiddeld getij een duur had van 12 uur en 26 minuten, is conform overleg met Sacha de Goederen hier één tijdstap uit verwijderd, zodat de duur weer overeenkomt met de eigenlijke duur van 12 uur en 25 minuten. Voor de zoutconcentraties in de Maasmond en HA-10 zijn respectievelijk 31 en 34 kg/m<sup>3</sup>. Dit zijn de instellingen, zoals ook gebruikt in de Goederen (2006). Voor de "Thatcher Harleman timelag" is 1.5 uur gebruikt.

---

<sup>14</sup> Het slotgemiddeld getij 2011 is ook opgevraagd bij de datadienst van RWS, deze moest echter nog bewerkt worden. Het slotgemiddeld getij 2011 is ook beschikbaar binnen WBI. Deze is voor het Haringvliet echter afgeleid van modelresultaten en wijkt daardoor af van de in (Rijkswaterstaat 2013) gerapporteerde minimale en maximale waterstanden.



Stuwprogramma Nederrijn-Lek (Stuwen Driel, Amerongen en Hagestein): Uitgebreide tabel Maart 2016

Lobht [m+ NAP]	IJsselkop [m+ NAP]	Waterstanden				Afvoeren					
		Hagestein Boven [m+ NAP]	Amerongen Boven [m+ NAP]	Driel-boven [m+ NAP]	Boverrijn (m <sup>2</sup> /s)	Waal (m <sup>2</sup> /s)	Pannerdens Kanaal (m <sup>2</sup> /s)	Nederrijn (m <sup>2</sup> /s)	IJssel (m <sup>2</sup> /s)		
12,00	10,54	2,01	4,76	8,82	4190	2812	1378	792	586		
11,90	10,45	1,96	4,68	8,75	4091	2746	1345	771	574		
11,80	10,37	1,91	4,61	8,67	3995	2680	1315	753	563		
11,70	10,28	1,86	4,53	8,60	3903	2621	1282	732	550		
11,60	10,20	1,81	4,46	8,52	3811	2558	1253	714	539		
11,50	10,11	1,77	4,38	8,45	3719	2498	1221	694	527		
11,40	10,03										
11,30	9,94	2,70	5,50	8,38	3630	2441	1190	675	515		
11,20	9,85	2,70	5,50	8,23	3550	2387	1160	655	505		
11,10	9,77	2,70	5,50	8,16	3465	2337	1128	635	490		
11,00	9,68	2,70	5,55	8,08	3390	2286	1100	620	480		
10,90	9,59	2,70	5,55	8,01	3310	2241	1070	600	470		
10,80	9,50	2,70	5,60	7,94	3235	2194	1040	585	455		
10,70	9,42	2,75	5,60	7,87	3160	2148	1010	565	445		
10,60	9,33	2,75	5,65	7,79	3090	2104	985	550	435		
10,50	9,24	2,80	5,70	7,72	2945	2058	960	535	425		
10,40	9,15	2,80	5,75	7,65	2870	2013	930	515	415		
10,30	9,06	2,85	5,75	7,57	2800	1971	900	500	400		
10,20	8,98	2,85	5,80	7,53	2730	1926	875	485	390		
10,10	8,89	2,90	5,80	7,51	2665	1881	850	470	380		
10,00	8,80	2,90	5,85	7,50	2600	1840	825	455	370		
9,90	8,75	2,95	5,85	7,55	2535	1795	800	440	360		
9,80	8,65	2,95	5,90	7,60	2465	1748	785	425	350		
9,70	8,60	2,95	5,90	7,65	2400	1710	755	415	340		
9,60	8,50	3,00	5,90	7,75	2335	1667	730	395	335		
9,50	8,45	3,00	5,95	7,80	2270	1626	695	370	325		
9,40	8,40	3,00	5,95	7,90	2205	1584	660	340	320		
9,30	8,35	3,00	5,95	7,95	2140	1546	625	310	315		
9,20	8,30	3,00	5,95	8,05	2075	1507	590	280	310		
9,10	8,30	3,00	6,00	8,15	2015	1470	545	240	305		
9,00	8,30	3,00	6,00	8,20	1945	1437	505	200	305		
8,90	8,30	3,00	6,00	8,25	1885	1402	465	160	305		
8,80	8,30	3,00	6,00	8,30	1825	1367	425	120	305		
8,70	8,20	3,00	6,00	8,20	1770	1330	385	80	305		
8,60	8,10	3,00	6,00	8,10	1715	1295	345	40	305		
8,50	8,01	3,00	6,00	8,01	1660	1264	305	3	295		
8,40	7,91	3,00	6,00	7,91	1605	1221	265	3	285		
8,30	7,81	3,00	6,00	7,81	1550	1181	227	34	263		
8,20	7,71	3,00	6,00	7,71	1495	1140	184	32	251		
8,10	7,61	3,00	6,00	7,61	1440	1101	141	31	240		
8,00	7,51	3,00	6,00	7,51	1385	1064	104	30	230		
7,90	7,42	3,00	6,00	7,42	1330	1029	69	29	220		
7,80	7,32	3,00	6,00	7,32	1275	993	240	28	211		
7,70	7,22	2,92	6,00	7,22	1220	961	229	27	202		
7,60	7,13	2,81	6,00	7,13	1165	928	219	26	192		
7,50	7,04	2,71	6,00	7,04	1110	894	209	25	184		
7,40	6,94	2,61	6,00	6,94	1055	861	200	24	176		
7,30	6,85	2,50	6,00	6,85	1000	829	191	23	167		
7,20	6,76	2,40	6,00	6,76	945	797	182	22	160		
7,10	6,67	2,30	6,00	6,67	890	765	173	21	152		
7,00	6,58	2,19	6,00	6,58	835	734	165	20	144		
6,90	6,49	2,09	6,00	6,49	780	703	156	19	137		
6,80	6,41	1,99	6,00	6,41	725	672	148	18	130		
6,70	6,32	1,89	6,00	6,32	670	642	141	17	123		
					612	612	133	16	116		

vollig gestuwd

start van stuwen (Driel)

start van stuwen (Amerongen & Hagestein)