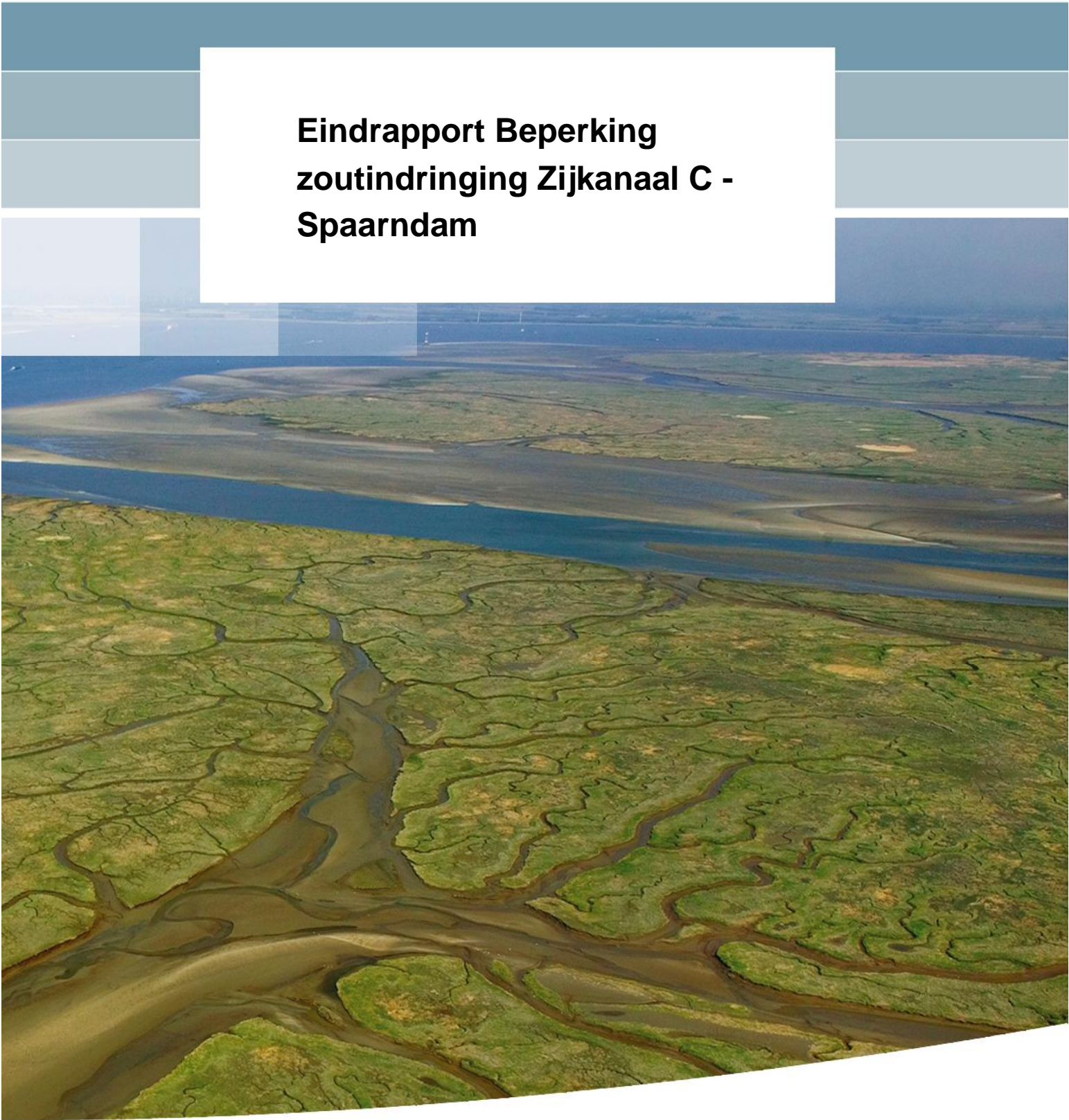


**Eindrapport Beperking  
zoutindringing Zijkanaal C -  
Sparndam**





# **Eindrapport Beperking zoutindringing Zijkanaal C - Sparndam**

Geert Prinsen  
Rob Uittenbogaard

1209873-000



**Titel**

Eindrapport Beperking zoutindringing Zijkanaal C - Spaarndam

**Opdrachtgever**

Rijkswaterstaat West-  
Nederland Noord  
Hoofdkantoor

**Project**

1209873-000

**Kenmerk**

1209873-000-ZWS-0003

**Pagina's**

58

**Trefwoorden**

Zoutindringing, sluis, Spaarndam, Rijnland

**Samenvatting**

Rijkswaterstaat, de provincie Noord-Holland, de gemeente Amsterdam en het Havenbedrijf Amsterdam werken aan de realisatie van een grotere nieuwe Zeesluis bij IJmuiden. De nieuwe Zeesluis zal groter en dieper zijn dan de huidige Noordersluis. Door de nieuwe sluis zal het zoutgehalte op het Noordzeekanaal toenemen. Op basis van eerdere studies en 3D-modellering wordt de toename van de chlorideconcentratie op het gehele Noordzeekanaal en over de gehele diepte geschat op orde 1,5 g Cl/l.

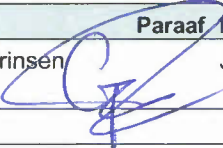

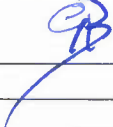
Het Hoogheemraadschap Rijnland voert water af bij Spaarndam via Zijkanaal C naar het Noordzeekanaal. Ook in Zijkanaal C stijgt de chlorideconcentratie. De zoutindringing via de sluis Spaarndam naar het boezemwater van Rijnland zal toenemen, waardoor extra zoutschade in de Bollenstreek kan ontstaan.

Op basis van beschikbare rapporten, gegevens en expert judgement worden in dit rapport de toename van de zoutindringing bij Spaarndam als gevolg van de Nieuwe Zeesluis IJmuiden en de daaruit voortvloeiende zoutschade geschat. Er is een lijst van mogelijke mitigerende maatregelen bij de sluis Spaarndam opgesteld met een indicatieve kostenschätzung. De conclusie is dat er verschillende maatregelen mogelijk zijn waarmee – mogelijk in combinatie - de toename in zoutindringing (deels) kan worden tegengegaan. Kansrijke maatregelen lijken continue doorspoeling in plaats van de huidige pulserende doorspoeling, optimalisatie van het sluisbeheer, en bij hoog oplopende chloridegehalten in Zijkanaal C ook een bellenscherm bij de sluis Spaarndam of een zoutkerende deur in Zijkanaal C.

**Referenties**

Offerte: 1209873-000-ZWS-0001 d.d. 9 april 2014

Opdracht: zaaknummer 31093281 d.d.29 april 2014

| Versie | Datum     | Auteur        | Paraaf  | Review          | Paraaf   | Goedkeuring | Paraaf  |
|--------|-----------|---------------|---|-----------------|--|-------------|---|
|        | Aug. 2014 | Geert Prinsen |  | Judith ter Maat |  | Gerard Blom |  |

**Status**

definitief



## Inhoud

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inleiding</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Probleemstelling en aanpak</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1      | Probleemstelling en aanpak  | 3         |
| 2.2      | Toename chloride op Noordzeekanaal door de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden | 4         |
| 2.3      | Beschikbare gegevens van Rijnland   | 12        |
| <b>3</b> | <b>Schatting toename zoutlast bij Grote Sluis Spaarndam</b>               | <b>15</b> |
| 3.1      | Grote Sluis Spaarndam   | 15        |
| 3.2      | Wat is zoutlek?   | 19        |
| 3.3      | Schatting van de toename van het zoutlek bij de sluis Spaarndam           | 22        |
| <b>4</b> | <b>Impact toename zoutlast bij sluis Spaarndam in Rijnland</b>            | <b>27</b> |
| 4.1      | Methode   | 27        |
| 4.2      | Resultaten  | 27        |
| 4.2.1    | Verspreiding in Rijnland  | 27        |
| 4.2.2    | Zoutschade landbouw   | 30        |
| 4.2.3    | Zoutschade natuur   | 33        |
| <b>5</b> | <b>Mogelijke maatregelen</b>  | <b>35</b> |
| 5.1      | Inleiding   | 35        |
| 5.2      | Mogelijke maatregelen geanalyseerd met het zoutlekmodel                   | 35        |
| 5.2.1    | Mogelijke maatregelen   | 35        |
| 5.2.2    | Analyses van maatregelen met het dynamisch zoutlekmodel                   | 38        |
| 5.2.3    | Optimalisatie kolkgebruik, deuropentijd en aantal schuttingen             | 40        |
| 5.3      | Overzicht mogelijke maatregelen onderzocht met het verspreidingsmodel     | 41        |
| 5.3.1    | Continu doorspoelen   | 41        |
| 5.3.2    | Extra doorspoelen – KWA+  | 43        |
| 5.4      | Overzicht overige mogelijke maatregelen                                   | 44        |
| 5.4.1    | Inleiding   | 44        |
| 5.4.2    | Zijkanaal C   | 44        |
| 5.4.3    | Zoutvang achter de sluis Spaarndam  | 45        |
| 5.4.4    | Bellenscherm en/of waterscherm in Rijnland                                | 46        |
| 5.4.5    | Operationeel beheer - monitoring  | 46        |
| 5.5      | Overzicht mogelijke maatregelen en indicatieve kosten                     | 47        |
| 5.5.1    | Inleiding   | 47        |
| 5.5.2    | Kosten zoutkerende deur in Zijkanaal C                                    | 49        |
| 5.5.3    | Kosten operationele maatregelen sluis                                     | 49        |
| 5.5.4    | Kosten verhogen sluisdrempel  | 50        |
| 5.5.5    | Kosten zoutvang   | 50        |
| 5.5.6    | Kosten kleine pomp  | 50        |
| 5.5.7    | Kosten uitbreiding KWA  | 50        |
| 5.5.8    | Kosten bellenscherm   | 51        |
| 5.5.9    | Kosten operationeel beheer  | 51        |
| 5.5.10   | Overzicht en discussie  | 51        |
| <b>6</b> | <b>Conclusies en aanbevelingen</b>  | <b>55</b> |

## 7 Referenties

57



## 1 Inleiding

Rijkswaterstaat, de provincie Noord-Holland, de gemeente Amsterdam en het Havenbedrijf Amsterdam werken gezamenlijk aan de bouw van een Grote Nieuwe Zeesluis in IJmuiden. Deze Grote Nieuwe Zeesluis zal dienen als vervanging van de huidige Noordersluis en zal aanzienlijk groter en dieper zijn dan de huidige sluis. Door de aanleg van een Grote Nieuwe Zeesluis zal het zoutgehalte op het Noordzeekanaal toenemen. Dat leidt op het Noordzeekanaal niet direct tot grote waterkwaliteitsproblemen, maar de toename van het zoutgehalte heeft wel degelijk gevolgen voor de uitwisselingspunten met de regionale waterbeheerders en het achterliggende gebied van de regionale waterbeheerders.

Zijkanaal C is het afwateringskanaal waarmee het Hoogheemraadschap van Rijnland via de sluis en gemaal Spaarndam water afvoert naar het Noordzeekanaal. Door verhoging van de zoutconcentraties in het Noordzeekanaal zal de zoutindringing via de sluis Spaarndam naar het beheergebied van Rijnland toenemen, waardoor de zoutschade in de landbouw (o.a. bollengebied) kan toenemen.

Rijkswaterstaat heeft Deltares opdracht gegeven om op basis van beschikbare gegevens en expert judgement inzicht te geven in de mogelijke toename van de zoutproblematiek in het gebied van Rijnland als gevolg van de aanleg van de Grote Nieuwe Zeesluis bij IJmuiden. Het gaat om inzicht in de toename van de zoutlast bij de sluis Spaarndam, de verspreiding van het zout in Rijnland, de mogelijke toename in (landbouw)schade als gevolg van de toegenomen zoutconcentraties, een overzicht van mogelijke mitigerende maatregelen, en voor de meest kansrijke maatregelen een indicatieve inschatting van kosten en effectiviteit.

Dit eindrapport bevat de resultaten van de studie. Hoofdstuk 2 beschrijft in meer detail de probleemstelling, de aanpak en beschikbare gegevens. Hoofdstuk 3 gaat in op wat de toename van het chloridegehalte op het Noordzeekanaal en Zijkanaal C betekent aan extra zoutlast via de sluis Spaarndam voor de boezem van Rijnland. Hoofdstuk 4 beschrijft de verspreiding van deze extra zoutlast in Rijnland en geeft een inschatting van de toename in zoutschade. Hoofdstuk 5 gaat in op mogelijke mitigerende maatregelen en indicatieve kosten. Hoofdstuk 6 geeft de samenvattingen en conclusies.



## 2 Probleemstelling en aanpak

### 2.1 Probleemstelling en aanpak

Rijkswaterstaat, de provincie Noord-Holland, de gemeente Amsterdam en het Havenbedrijf Amsterdam werken samen aan de bouw van een Grote Nieuwe Zeesluis in IJmuiden. Volgens scheepvaartprognoses zullen de zeeschepen in omvang toenemen en zal de huidige Noordersluis in de toekomst te klein zijn. Bovendien is de diepte van de huidige Noordersluis onvoldoende om een groot schip bij laag water binnen te kunnen laten. De Grote Nieuwe Zeesluis zal daarom zowel langer, breder en dieper zijn dan de huidige Noordersluis. De huidige Noordersluis heeft afmetingen 400 x 50 x 15 m (lengte\*breedte\*diepte), terwijl de binnenmaten van de nieuwe sluis naar verwachting circa 570 x 70 x 17 m groot zal zijn.

Het grotere volume per schutting zal een significant effect hebben op de hoeveelheid zout water die met het schutten het Noordzeekanaal binnenstroomt (Weiler e.a., 2014). Als geen maatregelen worden genomen om de zoutlast te beperken, zal hierdoor het zoutgehalte op het Noordzeekanaal aanzienlijk toenemen. Een toename van het zoutgehalte op het Noordzeekanaal leidt niet tot grote waterkwaliteit problemen in het kanaal zelf. Echter, op de uitwisselpunten met de beheergebieden van andere waterbeheerders kan wél overlast ontstaan.

In een ander kader wordt al onderzocht welke maatregelen in IJmuiden genomen zouden kunnen worden om de toename in het zoutgehalte te beperken. Deze maatregelen zijn complex en soms conflicterend met de wensen van de verschillende functies die in het sluisencomplex zijn verenigd. Daarom wordt nu ook onderzocht welke mitigerende maatregelen mogelijk zijn op uitwisselingspunten waar overlast zou kunnen ontstaan.

Het eerste uitwisselingspunt dat direct beïnvloed wordt is de sluis Spaarndam (zie Figuur 2.1). Rijkswaterstaat heeft daarom aan Deltares opdracht gegeven de zoutindringing in Rijnland via het uitwisselingspunt Zijkanaal C – Spaarndam nader te onderzoeken en inzicht te geven in de mogelijke zoutproblematiek in het beheergebied van Hoogheemraadschap Rijnland als gevolg van de aanleg van de Grote Nieuwe Zeesluis bij IJmuiden. Het gaat hierbij om inzicht in de toenemende zoutlast (kwantitatief en ruimtelijk) die vanuit het Noordzeekanaal via Zijkanaal C en de sluis Spaarndam Rijnland binnendringt, inzicht in de gevolgschade in euro's, en mogelijke mitigerende maatregelen. Gezien de gewenste korte doorlooptijd van het project gaat het om een analyse op basis van beschikbare gegevens en expert judgement. Omdat alle partijen gebaat zijn bij een duurzame oplossing voor het gehele gebied is een aanvullend doel om een overzicht te geven van mogelijke lange termijn maatregelen ter mitigatie van de zoutindringing. In dit overzicht worden verschillende maatregelen benoemd met bijbehorende kansen, voorziene effecten, kosten en mogelijke uitvoeringstermijnen.



Figuur 2.1 Noordzeekanaal met sluis IJmuiden, sluis Spaarndam en achterliggend gebied Rijnland

De studie richt zich op het verschil in zoutindringing tussen de situatie met de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden met 125 miljoen ton per jaar vervoerde vracht (125 MTA) en de situatie waarbij de huidige Noordersluis maximaal benut wordt (95 MTA). Het verschil in zoutindringing tussen de huidige situatie (75 MTA) en maximale benutting (95 MTA) van de huidige Noordersluis blijkt overigens zeer gering, zoals in de volgende paragraaf wordt toegelicht. Maar het gaat in deze studie dus om de extra zoutindringing en de gevolgen van die zoutindringing die aan het vervangen van de huidige Noordersluis door de Grote Nieuwe Zeesluis toegerekend kunnen worden.

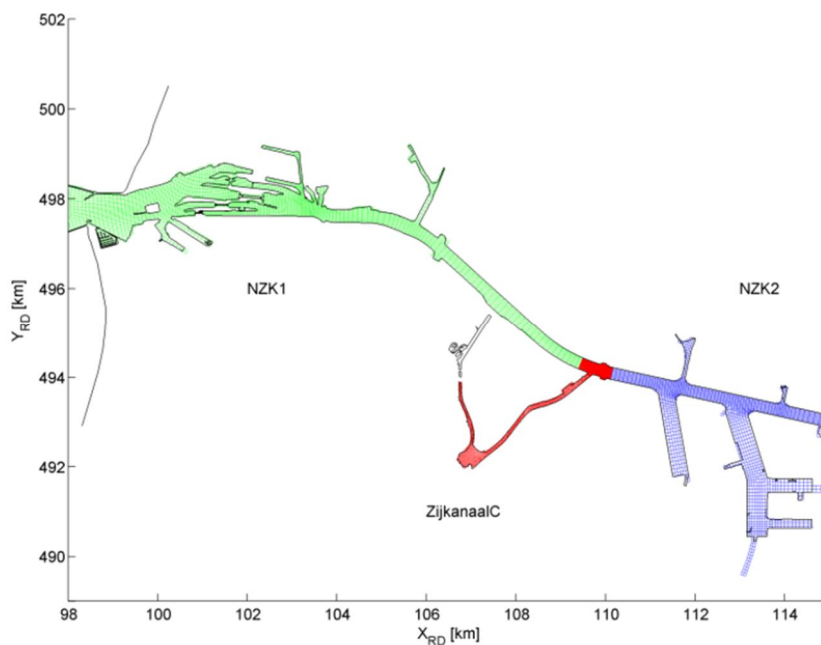
## 2.2 Toename chloride op Noordzeekanaal door de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden

Zoals in de vorige paragraaf uiteengezet is de huidige studie gericht op het in kaart brengen van de toename van zoutindringing bij de sluis Spaarndam als gevolg van de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden, en het in kaart brengen van mogelijke mitigerende maatregelen.

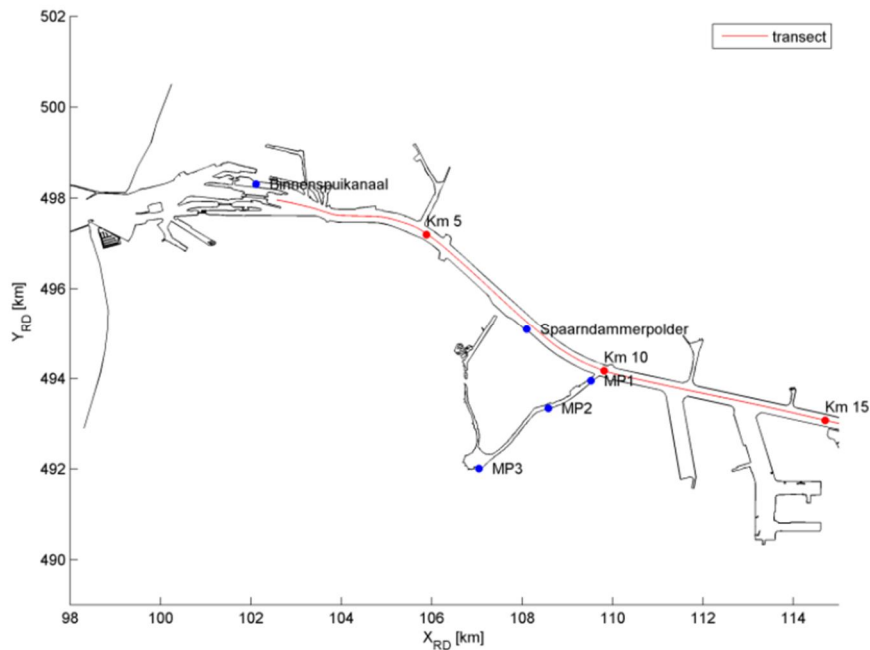
De effecten van de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden op chlorideconcentraties zijn berekend met een gedetailleerd Delft-3D model. Alkyon heeft eerder het model voor Noordzeekanaal (NZK) en Amsterdam-Rijnkanaal (ARK) opgezet (Alkyon 2003, 2006). Arcadis heeft onderzoek gedaan naar het effect van de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden op chlorideconcentraties in het Noordzeekanaal (Arcadis, 2011) en het effect van het verwijderen van sluseiland Zeeburg op de chlorideconcentraties in het Amsterdam-Rijnkanaal (Arcadis, 2012). De meest recente studie voor het effect van de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden is gerapporteerd in februari 2014 (Arcadis, 2014).

De resultaten van de meest recente Arcadis studie worden hieronder beknopt weergegeven.

Met het 3D model zijn sommen gemaakt voor verschillende scenario's voor de Zeesluis IJmuiden met afmetingen 500\*70\*18. De nu voorziene afmetingen van de Grote Nieuwe Zeesluis zijn 570\*70\*17, dus ruim 10% langer maar iets minder diep. Er is gerekend met verschillende afvoerscenario's over het Amsterdam-Rijnkanaal en voor verschillende perioden. Het model is recent nog eens gevalideerd met data van 2013. Verder zijn voor de scenario's data van het matig droge jaar 2003 als hydrologisch uitgangspunt gekozen. De sommen voor een langjarig gemiddelde situatie zijn gebaseerd op data van 2007-2011. Dit geldt voor de randvoorwaarden op het Amsterdam-Rijnkanaal en bij de Oranjesluizen, en voor laterale debieten naar het ARK-NZK systeem vanuit de beheergebieden van Rijnland, Waternet en Hollands Noorderkwartier.

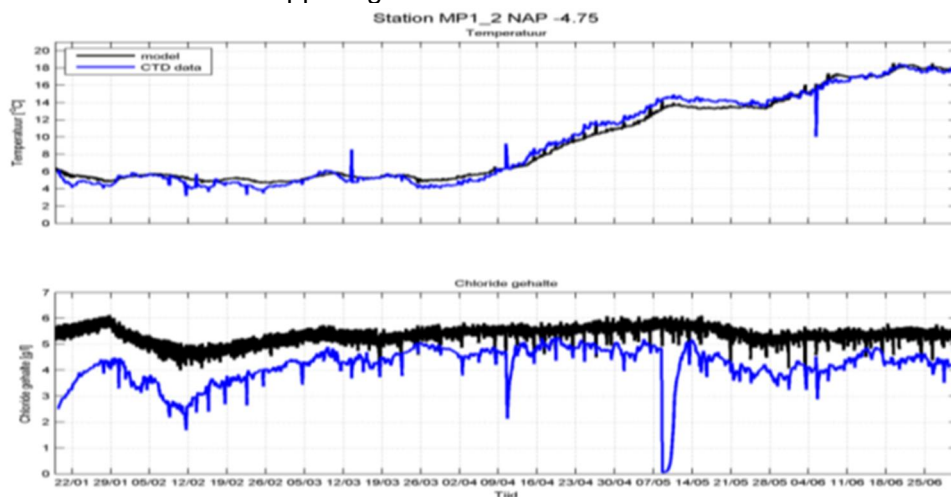


Figuur 2.2 Westelijk deel van het NZK 3D model (Arcadis, 2014) met 3 verschillende rekendomeinen



Figuur 2.3 Kilometrages van het westelijk deel van NZK model en meetpunten voor Zijkanaal C (Arcadis, 2014)

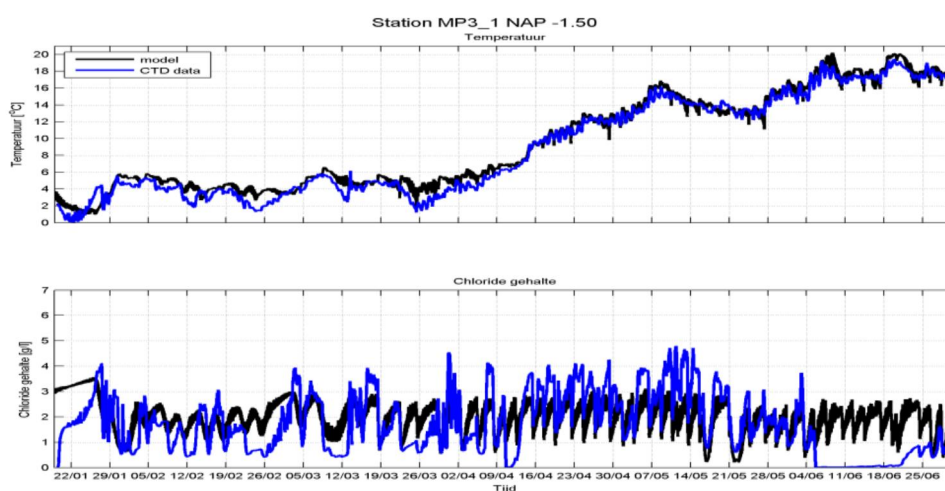
Figuur 2.2 en Figuur 2.3 tonen de Delft\_3D schematisatie voor het westelijk deel van het Noordzeekanaal, inclusief Zijkanaal C, en de meetpunten MP1, MP2 en MP3 in Zijkanaal C. Het meetpunt MP3 is vlak voor de sluis Spaarndam. Het Delft\_3D model is gevalideerd voor diverse meetpunten. Enkele resultaten van meetpunten op Zijkanaal C worden hier overgenomen uit de Arcadis rapportage.



Figuur 2.4 Temperatuur en chloride op Zijkanaal C, MP1, berekend (zwart) en gemeten (blauw), januari-juni 2013, op diepte -4,75 m NAP (Arcadis, 2014)

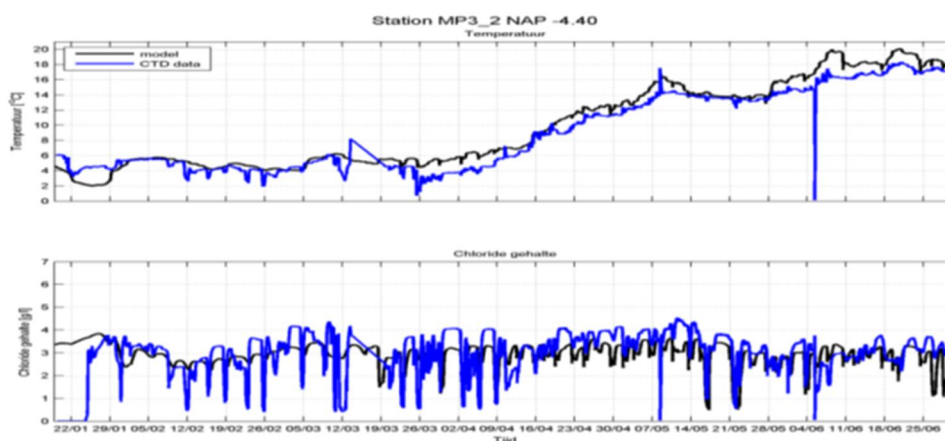


De resultaten van meetpunt MP1 in Zijkanaal C, vlak bij het Noordzeekanaal, op een diepte van -4,75 m NAP laten zien dat het model iets minder dynamiek heeft dan de metingen, en dat de chlorideconcentratie systematisch iets te hoog is (orde 1 g/l, zie Figuur 2.4). In sterkere mate geldt dat voor het meetpunt Spaarndammerpolder op het NZK. Voor het meetpunt MP1 vlak bij het oppervlak worden de figuren van Arcadis niet herhaald. Voor dit punt geldt dat de modelresultaten dichter bij de metingen zitten (geen grote systematische afwijkingen), maar dat de metingen dynamischer zijn en lagere chlorideconcentraties laten zien in natte perioden (door zoetwaterlozingen van Rijnland bij Spaarndam).



Figuur 2.5 Temperatuur en chloride op Zijkanaal C, MP3, berekend (zwart) en gemeten (blauw), januari-juni 2013, op diepte -1,50 m NAP (metingen Chloride vanaf 4 juni uitgevallen) (Arcadis, 2014)

Bij meetpunt MP3 in Zijkanaal C vlak bij de sluis Spaarndam wordt op een hoogte van -1.50 m NAP en -4.40 m NAP gemeten. Het model reproduceert de metingen van temperatuur en chloride op -1,50 m NAP vrij goed (zie Figuur 2.5). Er is geen systematische afwijking in berekende chloridegehalten. De dynamiek in het model is wel geringer dan in de metingen.



Figuur 2.6 Temperatuur en chloride op Zijkanaal C, MP3, berekend (zwart) en gemeten (blauw), januari-juni 2013, op diepte -4,40 m NAP (Arcadis, 2014)

Op een diepte van -4,40 m NAP bij meetpunt MP3 reproduceert het model de metingen goed (zie Figuur 2.6). De conclusie is dat het model de metingen redelijk reproduceert.

Met het Delft3D-model heeft Arcadis vervolgens scenario-berekeningen gemaakt voor verschillende varianten van de zeesluis IJmuiden en voor verschillende varianten van afvoeren vanaf het Amsterdam-Rijnkanaal.

De volgende scenario's zijn gebruikt voor de zeesluis IJmuiden:

- A. Huidige zeesluis, huidig gebruik 75 miljoen ton per jaar (75 MTA)
- B. Huidige zeesluis, maximaal gebruik 95 MTA
- C. Grote Nieuwe Zeesluis, gebruik 125 MTA

De volgende scenario's zijn gebruikt voor de afvoer via het Amsterdam-Rijnkanaal:

1. Huidig
2. Situatie 2003, 10 m<sup>3</sup>/s via ARK
3. Lange som (3 maanden) met gemiddelde debieten
4. Som met het debiet op het ARK dat 10% van de tijd overschreden wordt (22 m<sup>3</sup>/s)
5. Som met het debiet op het ARK dat 2% van de tijd overschreden wordt (16 m<sup>3</sup>/s)

Voor de combinaties van scenario's zijn simulaties gemaakt waarin 2 weken is doorgerekend. De resultaten van deze berekeningen voor meetpunt MP3 op Zijkanaal C zijn samengevat in tabel 5.3 van het Arcadis rapport. Deze tabel wordt hieronder herhaald als Tabel 2.1.

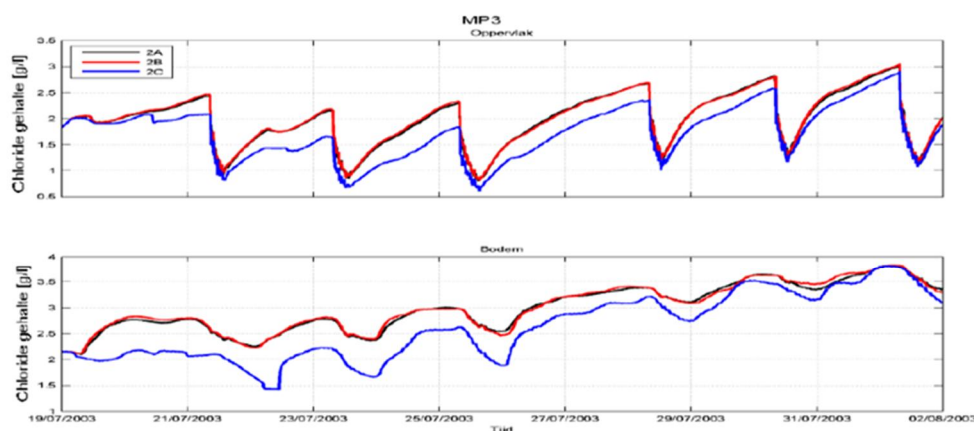
Opvallend is dat in de korte simulaties voor perioden van 2 weken de chlorideconcentraties in Zijkanaal C van de sommen met de Grote Nieuwe Zeesluis (scenario C) niet altijd hoger uitkomen, terwijl dat wel de verwachting is. Ook het feit dat scenario B (95 MTA) na 1 of 2 weken lager uitkomt dan scenario A (75 MTA) oogt niet logisch, al is het verschil relatief klein. De simulaties beginnen met dezelfde initiële condities op Zijkanaal C, zoals uit het tijdsverloop van de berekeningsresultaten voor MP3 blijkt. Echter, de berekening met de Grote Nieuwe Zeesluis (scenario C) duikt in het begin snel onder de resultaten voor de met de huidige Zeesluis huidig gebruik en maximum gebruik (scenario A en B), en haalt die achterstand dan langzaam in. De tabel laat zien dat na 1 of 2 weken simuleren met een lage afvoer op het ARK, de chlorideconcentraties bij Zijkanaal C uiteenlopen van 2,1 g Cl/l tot 3,6 g Cl/l.



Tabel 2.1 Overzicht resultaten chloride Zijkanaal C voor diverse scenario's (Arcadis 2014, tabel 5-3)

| Scenario                   | Bereik (km) |         | Chloride gehalte te Nieuwersluis ARK ~ km 22 = NZK-ARK ~ km 48,5 (g/l) |         | Chloridegehalte te Zijkanaal C MP3 aftakking bij NZK ~ km 10 (g/l) |         |
|----------------------------|-------------|---------|--|---------|--|---------|
|                            | 1 week      | 2 weken | 1 week   | 2 weken | 1 week   | 2 weken |
| 1A (~35 m <sup>3</sup> /s) | 35,01       | 39,08   | 0,17   | 0,17    | 2,45   | 3,00    |
| 2A (10 m <sup>3</sup> /s)  | 44,37       | 52,11   | 0,17   | 0,84    | 2,78   | 3,59    |
| 2B (10 m <sup>3</sup> /s)  | 45,91       | 56,18   | 0,17   | 1,15    | 2,74   | 3,55    |
| 2C (10 m <sup>3</sup> /s)  | 42,30       | 49,29   | 0,17   | 0,51    | 2,24   | 3,45    |
| 4A (22 m <sup>3</sup> /s)  | 39,88       | 43,47   | 0,17   | 0,17    | 2,10   | 3,40    |
| 4B (22 m <sup>3</sup> /s)  | 40,44       | 45,30   | 0,17   | 0,17    | 2,10   | 3,25    |
| 4C (22 m <sup>3</sup> /s)  | 38,49       | 42,82   | 0,17   | 0,17    | 2,10   | 3,25    |
| 5A (16 m <sup>3</sup> /s)  | 42,19       | 48,00   | 0,17   | 0,17    | 2,42   | 3,49    |
| 5B (16 m <sup>3</sup> /s)  | 43,25       | 55,87   | 0,17   | 0,69    | 2,69   | 3,46    |
| 5C (16 m <sup>3</sup> /s)  | 40,65       | 46,04   | 0,17   | 0,17    | 2,21   | 3,35    |

Tabel 5-3: Bereik chloride t.o.v. nulpunt traject, chloridegehalte op de bodem bij locatie Nieuwersluis en Zijkanaal C (MP3). De waarden van Zijkanaal C zijn gemiddelde waarden i.v.m. variatie door lozingen. Het bereik op t=0 (~3 maanden 2003) is voor alle scenario's 31 km. Voor de ligging van de punten wordt verwezen naar figuur 3-4 tot en met 3-6.



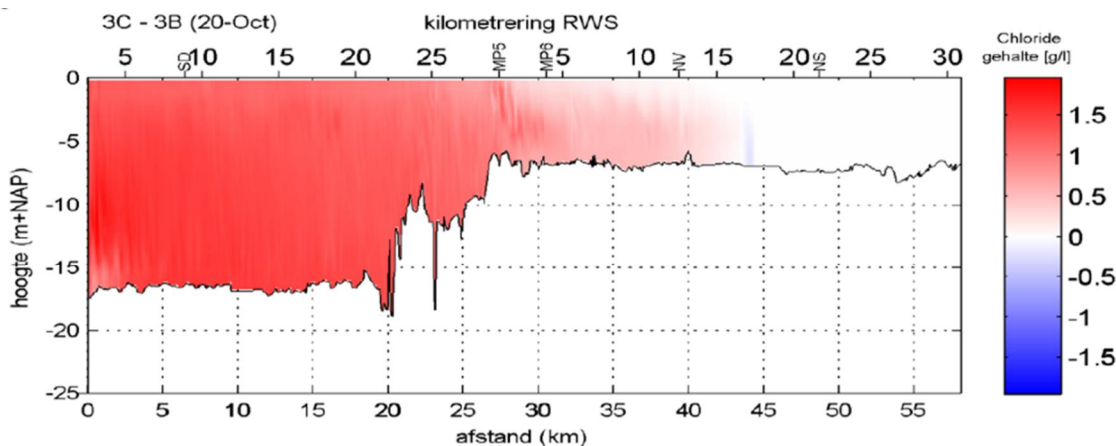
Figuur 5-45: Vergelijking tijdseries chloridegehalten in Zijkanaal C (MP3) scenario 2 (10 m<sup>3</sup>/s), voor toestanden A, B en C.

Figuur 2.7 Vergelijking van chloridegehalten bij MP3 voor scenario 2A (zwart), 2B (rood) en 2C (blauw). (Arcadis, 2014)

Figuur 2.7 laat de chlorideconcentraties in Zijkanaal C na 2 weken droge periode en lage afvoer op het ARK oplopen tot ongeveer 3,6 g Cl/l. Ook in de metingen blijkt dat deze waarde gehaald wordt (zie Figuur 2.6).

Er zijn ook langere simulaties gemaakt door Arcadis. Deze sommen hebben een simulatieperiode van 3 maanden en een gemiddeld debiet op het ARK van 24,5 m<sup>3</sup>/s. Bij controle van de tijdreeks van chloridegehalte blijkt dat na die rekenperiode het model wel stationair is geworden, terwijl dat bij de sommen van 2 weken nog duidelijk niet het geval is (zie Figuur 2.7).

Uit deze lange sommen blijkt dat de chlorideconcentraties in scenario C (Nieuwe Zeesluis IJmuiden, 125 MTA) in vergelijking met de huidige zeesluis (75 MTA huidig gebruik of 95 MTA maximaal gebruik) duidelijk toenemen. De toename in chloridegehalte is over de gehele diepte, voor het gehele Noordzeekanaal, en varieert van 1,5 g Cl/l tot 1,8 g Cl/l.

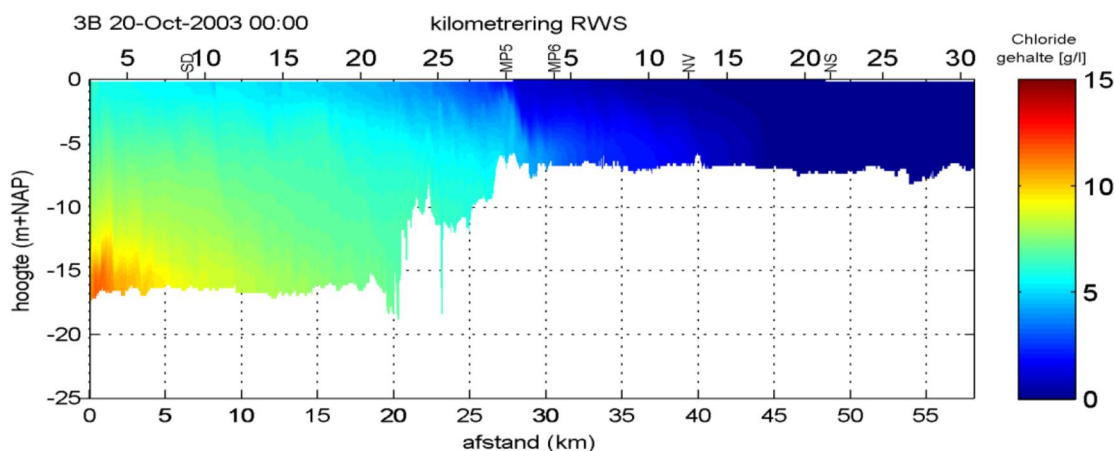


Figuur 5-55: Verschil chloridegehalte verdeling na 3 maanden tussen scenario C en scenario B

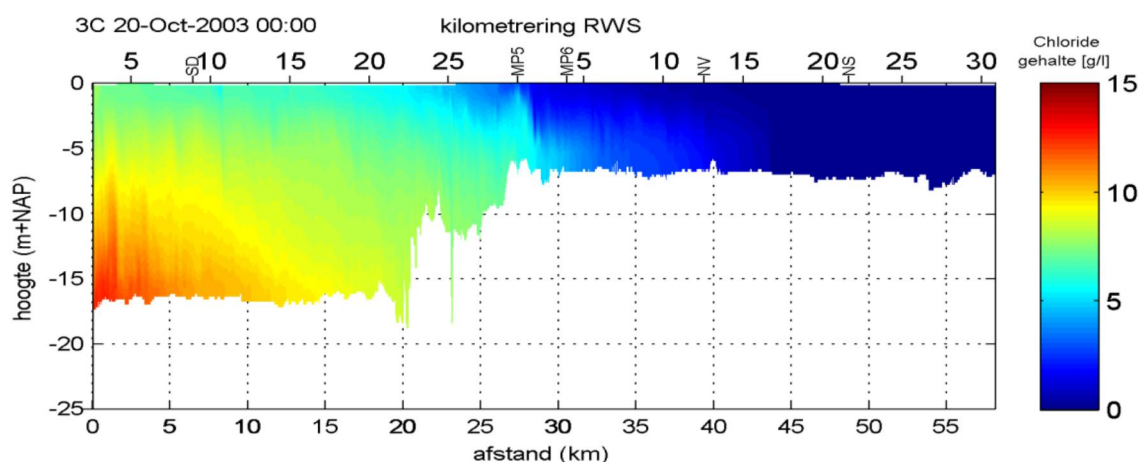
Figuur 2.8 Toename in chloridegehalte op het NZK en ARK over de diepte, 3 maanden som, scenario C – B (Arcadis 2014)

Zijkanaal C takt af bij kilometer 10 van het NZK model, en de toename is daar vrijwel uniform: over de gehele diepte neemt het chloridegehalte met orde 1,5 g Cl/l toe.

Op basis hiervan is in de nu voorliggende studie ook voor Zijkanaal C uitgegaan van een toename van 1,5 g Cl/l als verschil tussen maximaal gebruik van de huidige Zeesluis (95 MTA) en de Grote Nieuwe Zeesluis (125 MTA). Het chloridegehalte neemt weliswaar over de gehele diepte met ongeveer 1,5 g Cl/l toe, maar de chlorideconcentratie in het NZK varieert wel met de diepte. Dat wordt duidelijk uit de volgende 2 figuren voor scenario B (95 MTA) en scenario C (125 MTA).



Figuur 2.9 Chloride verdeling over de diepte, scenario B maximaal gebruik huidige sluis (95 MTA), langjarig gemiddeld debiet (Arcadis 2014)



Figuur 2.10 Chloride verdeling over de diepte, scenario C, nieuwe Zeesluis (125 MTA), langjarig gemiddeld debiet (Arcadis 2014)

Tot slot kunnen nog een paar aanvullende opmerkingen bij deze resultaten geplaatst worden.

- Allereerst is bij de studie van Arcadis de diepte van de sluis 18 m genomen. Het laatste ontwerp is met een iets geringere diepte van 17 m. Dat verschil is klein. Echter, de lengte van de sluis in het laatste ontwerp is echter meer dan 50 m langer dan waar Arcadis mee heeft gerekend. De zoutindringing bij dit laatste ontwerp is ongunstiger, want er is een groter uitwisselingsvolume NZK – Noordzee per schutting. Aannemende dat de schuttijd zo lang is dat de hele kolk wordt gevuld met Noordzeewater, wordt het zoutlek bij IJmuiden met bijna 10% onderschat.
- Belemmeringen in het schutbedrijf bij de Zeesluis IJmuiden zijn er niet of slechts zeer beperkt. In de Arcadis berekeningen wordt daarom uitgegaan van een 24/7 volcontinu schutbedrijf (24 uur per dag, 7 dagen per week).
- Op 17 februari 2014 is bij een bespreking van RWS, Rijnland en Deltares gesteld dat de zoutlast door de nieuwe sluis IJmuiden in de Arcadis studie nog onderschat wordt omdat met een vrij lage saliniteit aan de zeezijde van sluis IJmuiden is gerekend (20 i.p.v. 27 psu). Daartegenover staat dat het model bij Spaarndammerpolder op het Noordzeekanaal (zie Figuur 2.3) aan het oppervlak een goede chlorideconcentratie geeft in vergelijking met de metingen, en bij een diepte van -6,4 m NAP de gemeten chlorideconcentratie langdurig fors overschat, en dat bij de meetpunten MP1 en MP2 in Zijkanaal C en MP3 vlak voor de sluis Spaarndam het verschil tussen model en meting veel kleiner is en het model de metingen vrij goed reproduceert. Dus de mogelijk te lage aanname van de saliniteit in de zoute voorhavens leidt niet tot onderschatting van het zoutlek.
- Zoals ook al in het Arcadis rapport wordt vermeld zijn de onzekerheden over de waterbalans van het ARK-NZK systeem vrij groot. De onzekerheden zijn niet alleen groot bij het ARK en daarmee in open verbinding staande regionale watersysteem, maar juist ook voor de sluis en het gemaal IJmuiden. Deze onzekerheidsmarge werkt door in deze studie.
- In het 3D model is een chloridegehalte van 170 mg Cl/l als randvoorwaarde op het ARK bij Maarssen gebruikt (zie pag. 44 van het Arcadis rapport 2014). Dat is te hoog, want al boven de drinkwaternorm van 150 mg Cl/l die bij Nieuwersluis gehaald zou moeten worden. De chlorideconcentraties van het Rijnwater bij lage afvoeren zijn op basis van de 2011 metingen tussen de 100 en de 150 mg/l voor Rijnafvoeren bij Lobith tussen de 1500 en 750 m<sup>3</sup>/s. Voor de conclusies met betrekking tot Zijkanaal C en voor de conclusies hoever de zoutindringing vanuit het NZK op het ARK komt zal dat echter niet veel verschil maken.

- Er is gegeven de lange rekentijden van de 3D modellen gekozen voor simulaties op basis van de situatie 2003 (een matig droog jaar) met wat variatie in afvoeren op het ARK voor vrij korte perioden (2 weken tot 3 maanden). Bij de keuze voor de statistische waarden van het debiet dat 2% of 10% van de tijd onderschreden wordt (resp. 16 en 22 m<sup>3</sup>/s) op basis van metingen bij Weesp voor de periode 1-1-2006 tot en met 31-12-2012 moet worden opgemerkt dat het ARK een zwaar gestuurd systeem is, vooral bij lage afvoeren, en dat hier dus statistiek bedreven wordt op een vrij korte tijdreeks die vooral bepaald wordt door het beheer (dat niet optimaal hoeft te zijn).
- De combinatie van initialisatie met 3 maanden uit het droge jaar 2003, en dan een aantal weken een afvoer van 10, 16 of 22, of 3 maanden een afvoer van 24,5 m<sup>3</sup>/s is zeer conservatief.
- De sommen voor een korte periode van 2 weken zijn eigenlijk te kort om conclusies te kunnen trekken over lange termijn toename van chlorideconcentraties. Het NZK-ARK systeem is een zwak dynamisch systeem waarbij de initiële toestand lang doorwerkt. Uit langere sommen van 3 maanden blijkt dat het systeem dan wel ingespeeld is.

Samenvattend: de modelaannames in de Arcadis studie zijn dus in het algemeen conservatief (uitgezonderd de afmeting van de sluis, waarvoor nu een grotere variant wordt voorgesteld), maar wel voor alle sommen gebruikt. Belangrijk voor deze studie is het verschil tussen de sommen met maximaal gebruik van de huidige Zeesluis (95 MTA) en de Grote Nieuwe Zeesluis (125 MTA). Uit die sommen volgt dat het chloridegehalte vrij uniform op het NZK toeneemt met orde 1,5 g Cl/l. Daarmee is in deze studie verder gewerkt.

### 2.3 Beschikbare gegevens van Rijnland

Rijnland heeft meetgegevens van debieten en chloridegehalten nabij de boezemgemalen beschikbaar gesteld. Dit betreft de locaties Spaarndam, Halfweg, Gouda, en Katwijk. Voor Spaarndam gaat het zowel om de chloridegegevens in Zijkanaal C (dus buiten het beheergebied van Rijnland) als metingen in het Spaarne in het beheergebied van Rijnland. Verder zijn chloridegegevens bij Bodegraven, Nieuwe Wetering, Heemstede, Lisse en Sloten beschikbaar.

De chloride gehalten in het boezemwater van Rijnland verschillen per locatie afhankelijk van de nabijheid van zout-zoetsluizen (bv. Spaarndam) en lozingspunten van diepe polders met veel zoute kwel (polder Noordplas, Tempelpolder, Haarlemmermeer). Typische concentraties in het midden van het boezemsysteem bij Nieuwe Wetering variëren van 100 tot 200 mg/l. De chloride metingen in Zijkanaal C geven een gemiddelde chlorideconcentratie van 1500 mg/l, met uitschieters van 200 mg/l bij extreem natte perioden in Rijnland tot 4500 mg/l in droge situaties. Aan de binnenzijde van de sluis Spaarndam is de gemiddelde chlorideconcentratie 300 mg/l. De laagste gemeten chlorideconcentratie sinds het jaar 2000 is ongeveer 100 mg/l en de hoogste waarde orde 1000 mg/l. In de Bollenstreek bij Lisse is de hoogste gemeten chlorideconcentratie 500 mg/l; de gemiddelde chlorideconcentratie is orde 100 mg/l.

De zoutbelasting door zoutlek bij de sluis Spaarndam is niet de enige zoutbelasting voor het boezemsysteem van Rijnland. De Haarlemmermeer en enkele andere diepe polders (polder Noordplas, Tempelpolder) hebben vrij veel zoute kwel en dat zorgt voor een interne verzilting. Bij Lijnden wordt overtollig water uit de Haarlemmermeer geloosd. Typische chlorideconcentraties bij Lijnden zijn orde 500 mg/l. De afvoer van water geloosd vanuit de Haarlemmermeer vindt vooral plaats via het boezemgemaal Halfweg (en in mindere mate via Spaarndam), om te voorkomen dat dit water met relatief hoge chlorideconcentraties zich ook richting de Bollenstreek kan verspreiden.





### 3 Schatting toename zoutlast bij Grote Sluis Spaarndam

#### 3.1 Grote Sluis Spaarndam



Figuur 3.1 Locatie Grote Sluis Spaarndam met aan de noordzijde Zijkanaal C en aan de zuidzijde het Spaarne en Mooie Nel (boezemwater Rijnland), en het gemeaal Spaarndam (overgenomen uit Vrijburcht, 1992)





Figuur 3.2 Google Earth beeld van de situatie bij Sluis en gemaal Spaarndam

De Grote Sluis te Spaarndam en de daarnaast gelegen kleine Kolksluis verbinden het brakke Zijkanaal C van het Noordzeekanaal met het zoete binnenwater (Mooie Nel, Spaarne) van Hoogheemraadschap Rijnland (zie Figuur 3.1 en Figuur 3.2). Het zoutlek door de Grote Sluis naar het binnenwater bleek eerder al dusdanig kritisch dat in de periode 2009-2011 de Grote Sluis is aangepast.

De kolkbreedte is destijds van 24 m naar 17,43 m versmald, en de oorspronkelijk 80 m lange kolk is opgedeeld in twee kolken. De Grote Kolk is 104,5 m lang met 1681 m<sup>2</sup> wateroppervlak en de Kleine Kolk is 38,2 m lang met 624 m<sup>2</sup> wateroppervlak. In het vervolg wordt het totaal van Grote en Kleine Kolk aangeduid als de Volledige Kolk. Deze Volledige Kolk is dan 142,7 m lang met 2305 m<sup>2</sup> wateroppervlak. De deuren hebben drempels op -4,30 m NAP, bij een kolkbodem op gemiddeld -5,0 m NAP. Aan de uiteinden van de Volledige Kolk zijn 12,06 m brede puntdeuren, maar de Kleine Kolk wordt van de Grote Kolk gescheiden door de roldeur met een breedte van 17,43 m.

Bij het schutten met de Kleine Kolk staan de puntdeuren naar het Zijkanaal C altijd open, en wordt de 17,43 m brede roldeur gebruikt voor het afsluiten van de Kleine Kolk van Zijkanaal C. Omgekeerd staan bij schutten met de Grote Kolk de puntdeuren naar het Spaarne altijd open, maar sluit de roldeur de Grote Kolk af van het Spaarne. Alleen bij gebruik van de Volledige Kolk worden de 12,06 m brede puntdeuren gebruikt. In deze situatie staan de meest noordelijke puntdeuren altijd open, deze worden alleen bij een te hoge waterstand in Zijkanaal C als vloeddeuren gebruikt.

In Figuur 3.3 is ook de ophaalbrug getekend (blauw met maat 8,635 m), die de hoofdstraat van Spaarndam stremt telkens wanneer één van de kolken wordt gebruikt.





In 2011 zijn tijdelijk twee pompen bij de ophaalbrug geplaatst, kennelijk voor het creëren van een spoeldebiet. Aan de oostzijde van de Kleine Kolk is er ruim open water verbonden met het Spaarne. Daar zou een pomp geplaatst kunnen worden voor het creëren van een spoeldebiet door de kolken om het zoutlek te beperken. Hierop wordt later in dit rapport teruggekomen.

### **Kenmerkende condities**

Typische waterstanden bij sluis Spaarndam zijn -0,41 m NAP in Zijkanaal C en -0,61 m NAP in het Spaarne aan de zoete Rijnland zijde (zie o.a. Grontmij, 2007, tabel 2-2). Er is dus gemiddeld 0,20 m verschil in waterstand tussen de verzilte en de zoete zijde. In onze analyse is ook dit typische waterstandsverschil gehanteerd. Hierdoor zal bij elke schutting naar de zoete zijde een verzilte schuttschijf van 0,20 m naar de zoete zijde worden geloosd.

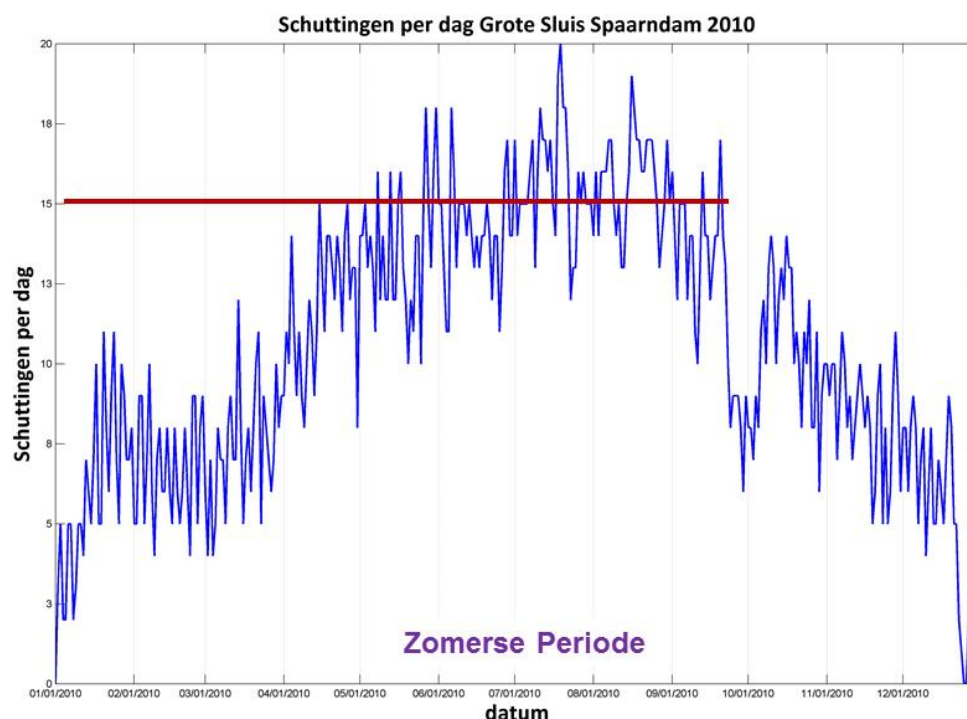
Volgende ver van de directe invloed van de Grote Sluis hanteren we volgens (Grontmij, 2007, Tabel 2-1) aan de zoete zijde een gemiddelde chlorideconcentratie van 366 mg Cl/l (hoewel deze tot 800 mg Cl/l kan oplopen).

Het in de zoutlekberekeningen gebruikte chloridegehalte in Zijkanaal C is afkomstig uit de Arcadis-rapportage, Tabel 5.3 op pag. 71 (Arcadis, 2014). Deze tabel is hiervoor al herhaald als Tabel 2.1. In deze tabel blijken de chloridegehalten in Zijkanaal C voor de diverse scenario's te variëren tussen 2,1 en 3,6 g Cl/l.

Uit de langere simulaties van Arcadis blijkt ook een toename van orde 1,5 g Cl/l als verschil tussen de situatie met maximaal gebruik van de huidige zeesluis (95 MTA) versus gebruik van de Grote Nieuwe Zeesluis (125 MTA).

Als verschil tussen de huidige situatie bij maximaal gebruik van de Noordersluis en de nieuwe situatie met de Grote Nieuwe Zeesluis wordt in dit rapport dus ook gerekend met een toename van 1,5 g Cl/l. Deze toename wordt toegepast voor een in de huidige situatie normale chlorideconcentratie van 2,1 g Cl/l en een nu uitzonderlijk verzilte situatie van 4,0 g Cl/l in Zijkanaal C. Bij een toename van 1,5 g Cl/l gaat het dan in de toekomst mogelijk om concentraties van respectievelijk 3,6 en 5,5 g Cl/l.

Het onderzoek wordt gericht op het zoutlek in de zomerse periode. Immers, in de zomer is enerzijds het aanbod aan zoetwater minder en anderzijds het aanbod van recreatievaart groter (in de zomer zijn er dus de meeste schuttingen per dag). Op basis van metingen in 2010, die zijn weergegeven in Figuur 3.4, is een gemiddelde van 15 schuttingen per dag gebruikt, met uitschieters van 25 schuttingen per dag.

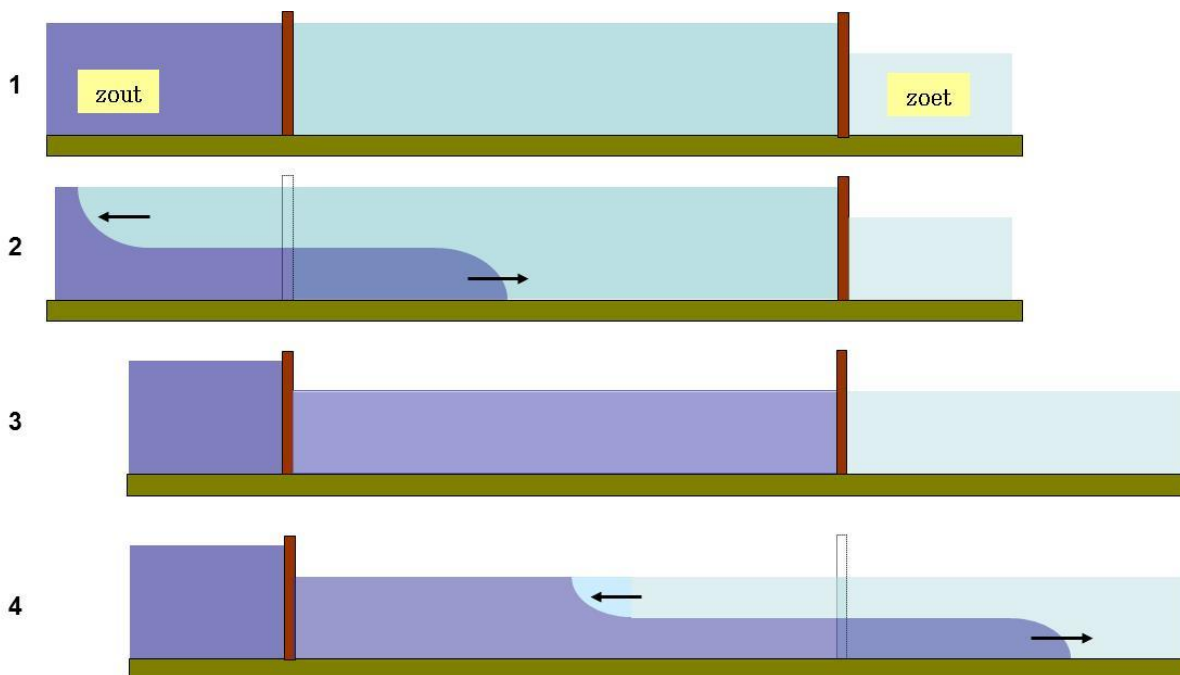


Figuur 3.4 Referentie schutfrequentie van de Grote Sluis Spaarndam, metingen 2010

### 3.2 Wat is zoutlek?

Het zoutlek van schutsluizen kan worden onderscheiden in een zoutlek door nivellering en een zoutlek door zout-zoet dichtheidsstroming. Met nivellering wordt bedoeld dat door het peilverschil tussen Noordzeekanaal en de boezem van Rijnland (20 cm) bij elke schutting de schuttschijf, bestaande uit brak water vanuit Zijkanaal C, de boezem van Rijnland binnen komt. In eerdere studies (Vrijburcht 1992, Grontmij 2006) is aangetoond dat voor de toenmalige afmetingen van de Grote Sluis te Spaarndam (dus voor de aanpassingen in 2011) het zoutlek door nivellering veel kleiner is dan het zoutlek door de zout-zoet uitwisseling; het zoutlek door nivellering is orde 5 à 10% van het zoutlek door uitwisseling. De schuttschijf van 0,20 meter is namelijk gering ten opzichte van een diepte van 3,70 meter. In diezelfde studies is ook geconcludeerd dat de invloed van de waterverplaatsing van schepen relatief klein is ten opzichte van het volume van de kolk (minder dan 5%).

Kortom, het zoutlek door zout-zoet uitwisseling is veel belangrijker dan het zoutlek door nivellering. Het zoutlek door zout-zoet uitwisseling wordt aangedreven door het verschil in dichtheid tussen zoet en zout water. Dit proces wordt toegelicht aan de hand van Figuur 3.5, overgenomen uit (Uittenbogaard en Cornelisse, 2010).



*Figuur 3.5 Schutting naar zoute zijde gevolgd door schutting naar zoete zijde; Zijkanaal C peil > Rijnland peil  
 Stadium 1: de sluisdeuren aan beide kanten zijn dicht, het waterpeil in de kolk is gelijk aan dat van de zoute zijde.  
 Stadium 2: uitwisseling van zout water met zoeter kolkwater terwijl de sluisdeuren aan de zoute zijde open staan;  
 de zouttong dringt naar binnen. Als de deur aan de zoute zijde lang genoeg open staat zal de zouttong  
 reflecteren tegen de gesloten sluisdeur aan de zoete zijde en ook het bovenste deel van de kolk verzilten.  
 Stadium 3: de sluisdeuren aan beide kanten zijn dicht, het waterpeil in de kolk is verlaagd na nivellering en is gelijk  
 aan dat van de zoete zijde.  
 Stadium 4: uitwisseling van brak kolkwater met zoet water*

Bij gelijke temperatuur is zouter water zwaarder dan zoeter water en bij gelijke waterstanden bezit zout water daardoor meer potentiële energie dan zoet water. Deze potentiële energie wordt in beweging (kinetische energie) omgezet (Figuur 3.5) waarbij steeds meer zout water in beweging komt en deelneemt aan de zouttong terwijl de zouttong zoeter water verdringt. Bij deze zout-zoet uitwisseling treedt er netto géén verplaatsing van watervolume ( $m^3$ ) op, maar wél van zoutmassa (kg zout).

De zoutmassa die per schutting naar het Spaarne wordt getransporteerd wordt het zoutlek per schutting genoemd. De dagelijkse zoutlek is het gemiddelde over een aantal schuttingen per dag. Deze dagelijkse zoutlek, vaak uitgedrukt in kg zout of chloride (ionen) daggemiddeld per seconde, is een maatstaf voor de verzilting van het Spaarne. Hierbij speelt dus ook het scheepsaanbod (vertaald in het aantal schuttingen per dag) een belangrijke rol.

We gaan nu in op de processen die het zoutlek per schutting door zout-zoet dichtheidsstromingen veroorzaken.

De dikte van de zouttong is ruwweg de helft van de effectieve waterdiepte ter plaatse van de sluisdeuren (stadium 2 in Figuur 3.5). De effectieve waterdiepte is gelijk aan de diepte van de drempel bij de sluisdeuren vermeerderd met ca. 20% van de drempelhoogte boven de bodem. Met andere woorden, een drempel verlaagt de effectieve waterdiepte voor zoutuitwisseling met 80% van zijn fysieke hoogte boven de bodem. Een drempel is dan ook een middel om het zoutlek te beperken.

Anderzijds, een nadeel van een drempel is dat bij een hogere drempel een schip harder moet stuwen om bij invaren of uitvaren water de kolk uit of in te persen. Bij een hogere drempel neemt de kans op schade toe. Uiteraard wordt door een hogere drempel ook de doorvaardiepte beperkt, maar een instelbare drempeldiepte is eventueel mogelijk.

De voortplanting van de zouttong verloopt aanvankelijk energiebehoudend, maar zeker na reflectie op het gesloten kolkeinde en tijdens het terugstromen naar de geopende sluisdeuren (zie Figuur 3.5) verloopt de voortplanting met veel energieverlies. De voortplanting van de zouttong (of zijn spiegelbeeld de zoettong, stadium 4 in dezelfde figuur) is in de praktijk goed waarneembaar aan de hand van de verplaatsing van drijvend materiaal, schuim e.d. aan het wateroppervlak van de kolk. Door het genoemde energieverlies blijkt uiteindelijk dat ca. 80% van de kolk te zijn verwisseld met het water van de respectievelijke voorhaven. De resterende 20% van de oorspronkelijke kolk inhoud wordt heel traag verwisseld bij deuropentijden die groter zijn dan de reistijd van de zouttong heen en terug door de kolk. Dat restant wordt in het zoutlekmodel buiten beschouwing gelaten, immers dergelijk lange deuropentijden worden niet verwacht.

Het verschil in zoutgehalte in de zouttong en daarbuiten bepaalt in evenredigheid hoeveel kg zout aan de uitwisseling deelneemt. Verder is het zoutlek evenredig met de breedte ter plaatse van de geopende sluisdeuren: bij gelijke overige omstandigheden wordt door de bredere roldeur in de Grote Sluis te Spaarndam meer zout uitgewisseld dan door de smallere puntdeuren. Het kan dus voordelig zijn om de Volledige Kolk met de smallere puntdeuren te gebruiken, en niet de Kleine of de Grote Kolk.

Behalve de zoutmassa (product van volume en zoutgehalte) in de zouttong is ook de voortplantingssnelheid van zouttong van belang. Deze voortplantingssnelheid is evenredig met de wortel uit het product van de effectieve waterdiepte en van het initiële dichtheidsverschil tussen kolk en voorhaven. Een viermaal groter dichtheidsverschil geeft dus een tweemaal hogere voortplantingssnelheid van de zouttong. Dat betekent dat het zoutlek (evenredig met het product van dichtheidsverschil en voortplantingssnelheid) dan met een factor acht is toegenomen. Een en ander onder de voorwaarde dat nog niet de gehele kolk is uitgewisseld, want meer dan het kolkvolume uitwisselen is immers onmogelijk.

Hier ligt de kern van het in dit rapport besproken probleem: door het verhogen van het zoutgehalte in Zijkanaal C kan, onder gelijk blijvende overige omstandigheden, het zoutlek van de Grote Sluis in Spaarndam zelfs méér dan evenredig met de verzilting van Zijkanaal C toenemen. Hierna twee eenvoudige rekenvoorbeelden.

Vergelijk de huidige situatie met 0,36 g Cl/l in het Spaarne en 2,1 g Cl/l in Zijkanaal C met een verhoging met 1,5 g Cl/l in Zijkanaal C door de extra zoutlek van de Grote Nieuwe Zeesluis bij IJmuiden. Op basis van de voorgaande rekenregels volgt de volgende verhouding tussen toekomstige en huidige zoutlek van de Grote Sluis in Spaarndam:

$$\left( \frac{1,5 + 2,1 - 0,36}{2,1 - 0,36} \right)^{1,5} = 2,5 \quad (3.1)$$

In het geval dat de kolk volledig zou worden uitgewisseld zodat de voortplantingssnelheid van de zouttong geen rol meer speelt, dan bedraagt de verhouding tussen toekomstige en huidige zoutlek nog steeds:

$$\frac{1,5 + 2,1 - 0,36}{2,1 - 0,36} = 1,9 \quad (3.2)$$

Er is dus sprake van tenminste 90% toename in zoutlek bij verhoging van het chlorideconcentratie in het Zijkanaal C met 1,5 g Cl/l vanaf de chlorideconcentratie van 2,1 g Cl/l.

### 3.3 Schatting van de toename van het zoutlek bij de sluis Spaarndam

Voor een beter onderbouwd antwoord op de vraag hoeveel het zoutlek bij de sluis Spaarndam toeneemt als gevolg van de Grote Nieuwe Zeesluis is het noodzakelijk om nauwkeuriger het gehele schutproces te modelleren en de uitwisseling per Kleine, Grote of Volledige Kolk met hun verschillende breedten van sluisdeuren (puntdeuren of roldeur) en met verschillende zoutgehalten in Zijkanaal C te berekenen. Hetzelfde geldt voor de keuzen tussen mogelijke maatregelen als drempels, luchtbellenschermen, spoeldebiet, optimalisatie deuropentijd, aantal schuttingen en optimalisatie gebruik van de sluiskolken.

Om deze opties kwantitatief door te rekenen is gebruik gemaakt van het dynamisch zoutlekmodel. Met eerder in de praktijk getoetste reken- en kennisregels voor zout-zoet uitwisseling en de invloed van drempel en luchtbellenschermen en spoeldebiet daarop, berekent dit model in de tijd voortschrijdend het zoutlek. Ook de tussenresultaten van het model bieden inzicht in de effecten van de mogelijke maatregelen. Het dynamisch zoutlekmodel bevat zowel het proces van nivellering als de zout-zoet uitwisseling. Belangrijke parameters voor het zoutlekmodel zijn het peilverschil, het verschil in chlorideconcentraties aan weerszijden van de sluis (het dichtheidsverschil), de afmetingen van de sluis, en de sluisoperatie (typische deuropentijd). In het model wordt de invloed van de waterverplaatsing van de scheepvaart op het zoutlek op grond van genoemde analyses en nauwkeurige metingen in de Stevinluis verwaarloosd (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010).

Deze paragraaf presenteert de schatting van het zoutlek zoals berekend met het dynamisch zoutlekmodel. Er is uitgegaan van de geometrische gegevens samengevat in Tabel 3.1 en van de overige geschatte geometrische en operationele omstandigheden in Tabel 3.2.

In termen van wateroppervlak is de Volledige Kolk ca. 3,7 keer groter dan de Kleine Kolk en de Grote Kolk ca. 2,7 maal groter dan de Kleine Kolk. Niet alle getallen in Tabel 3.2 zijn even belangrijk voor het zoutlek. Sommige zijn geschat om de realiteit van het maximale aantal schuttingen per dag en invloed op zoutlek te schatten. Zo is een omschakeltijd van 5 minuten gehanteerd tussen het sluiten van sluisdeuren aan de ene zijde en het openen aan de andere zijde, dit in verband met o.a. het betalen van sluisgeld, afmeren e.d. Ook de tijd nodig om de sluisdeuren te openen of te sluiten is geschat (60 seconden). Gedurende deze tijd is zeker geen scheepvaart mogelijk maar treedt er wel enige zoutlek op. De effectieve deuropentijd is de tijd dat de sluisdeuren volledig geopend zijn en scheepvaart mogelijk is.

Tabel 3.1 Overzicht gehanteerde afmetingen voor berekening zoutlek Grote Sluis Spaarndam

|                | Diepte<br>[m NAP] | Breedte<br>[m] | Lengte<br>[m] | Oppervlak<br>[m <sup>2</sup> ] |
|----------------|-------------------|----------------|---------------|--------------------------------|
| Kleine Kolk    | -5,0              | 17,43          | 38,2          | 624                            |
| Grote Kolk     | -5,0              | 17,43          | 104,5         | 1681                           |
| Volledige Kolk | -5,0              | 17,43          | 142,7         | 2305                           |
|                |                   |                |               |                                |
| Puntdeuren     | -4,3              | 12,06          |               |                                |
| Roldeur        | -4,3              | 17,43          |               |                                |

Tabel 3.2 Overzicht overige instellingen voor berekening zoutlek Grote Sluis Spaarndam

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| Spaarne (huidig)                               | gem. 0,366 g Cl/l                    |
| Spaarne (toekomst)                             | gem. 0,366 g Cl/l                    |
| Spaarne peil                                   | -0,61 m NAP                          |
|  |                                      |
| Zijkanaal C (huidig)                           | gem. 2,1 ; max. 4,0 g Cl/l           |
| Zijkanaal C (toekomst)                         | gem. 3,6 ; max. 5,5 g Cl/l           |
| NZK-Zijkanaal C peil                           | gem. -0,41 m NAP                     |
|  |                                      |
| Schutfrequentie                                | gem. 15/dag; max. 25/dag             |
| Dagindeling schutten                           | 80 % in 06:00 – 20:00 uur            |
| Deuropentijd                                   | 20 min. (15/dag); 12,5 min. (25/dag) |
| Verval openen deuren                           | 0,05 m                               |
| Openen rinketschuiven (maatregel doorspoeling) | 30 sec.                              |
| Openen sluisdeuren                             | 60 sec.                              |
| Omschakeltijd                                  | 300 sec.                             |
| Oppervlak rinketschuiven                       | 2 m <sup>2</sup>                     |

Vermoedelijk zal de sluismeester de sluisdeuren openen zodra tijdens nivelleren het verhang over de sluisdeuren onder 5 cm komt, dat wil zeggen hij wacht niet totdat de kolk volkomen is genivelleerd.

De effectieve deuropentijd is zeer belangrijk. In overeenstemming met de eerdere ontwerpstudie (Grontmij, 2007) is uitgegaan van de ons inziens vrij lange deuropentijd van 20 minuten bij 15 schuttingen per dag, conform Figuur 3.4 voor de drukke zomerse periode. De totale dagelijkse effectieve deuropentijd bedraagt dan 5 uur, waarvan 80% optreedt in het dagdeel van 06:00 tot 20:00 uur en de rest 's nachts. Bij de mogelijke maatregelen die in hoofdstuk 5 worden besproken wordt nader op het effect van kortere deuropentijden ingegaan.

Volgens het dynamisch zoutlekmodel toont Tabel 3.3 het zoutlek van elk van de drie kolken van de Grote Sluis te Spaarndam voor de huidige gemiddelde situatie (2,1 g Cl/l) en de huidige uitzonderlijk verzilde situatie (4 g Cl/l) en door de verwachte 1,5 g Cl/l extra verzilting.

Afhankelijk van de beschikbaarheid van de roldeur en andere overwegingen kan met het zoutlek per kolk het totale zoutlek worden bepaald uit een zekere weging van het gebruik van de kolken. Eerder is door Grontmij (Grontmij, 2007) een verhouding voorgesteld met 23% gebruik van de Kleine Kolk en 77% gebruik van de Grote Kolk. Bij deze verhouding en een huidige typische chlorideconcentratie van 2,1 g Cl/l betekent een toename van 1,5 g Cl/l in Zijkanaal C een toename in zoutlek van 1,3 kg Cl/s. Bij een chlorideconcentratie van 4,0 g Cl/l in Zijkanaal C betekent een toename van 1,5 g Cl/l in de concentratie in Zijkanaal C een toename in zoutlek van 1,9 kg Cl/s.

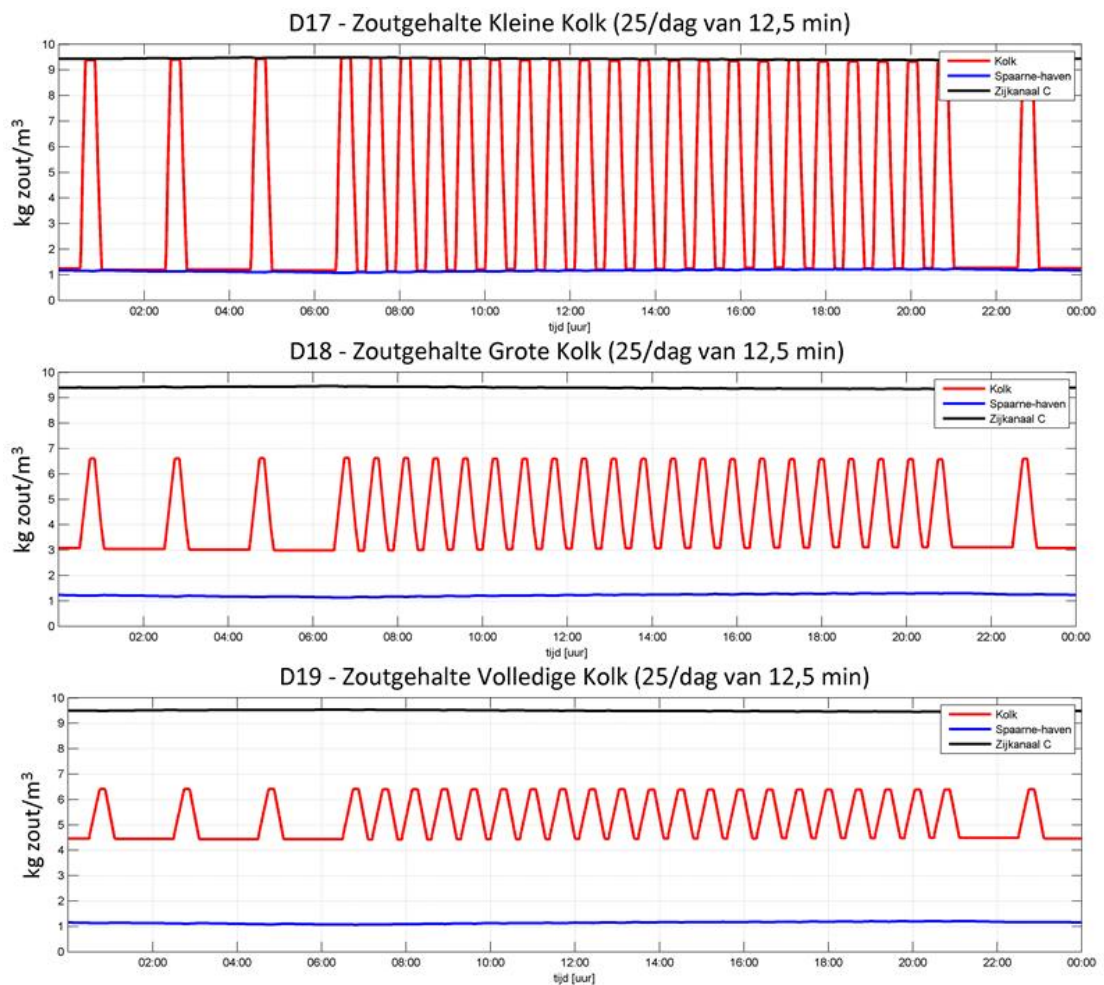
Tabel 3.3 Zoutlek voor de verschillende kolken en concentraties Zijkanaal C, bij 15 schuttingen/dag met 20 minuten deuropentijd

| Zijkanaal C<br>g Cl/l | Kleine Kolk<br>kg Cl/s | Grote Kolk<br>kg Cl/s | Volledige Kolk<br>kg Cl/s |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 2,1                   | 0,72 (Z01)             | 0,83 (Z02)            | 0,67 (Z03)                |
| 3,6                   | 1,4 (Z04)              | 2,3 (Z05)             | 1,8 (Z06)                 |
|                       |                        |                       |                           |
| 4,0                   | 1,6 (A01)              | 2,8 (A02)             | 2,2 (A03)                 |
| 5,5                   | 2,3 (Z07)              | 5,1 (Z08)             | 3,7 (Z09)                 |

Figuur 3.6 toont het verloop van de chloridegehalten in de Kleine Kolk, Grote Kolk en Volledige Kolk bij een chloridegehalte van 5,5 g Cl/l in Zijkanaal C (ruim 9,5 kg zout/m<sup>3</sup>). Het weergegeven resultaat per kolk in Figuur 3.6 laat zien dat het zoutgehalte in de Volledige Kolk minder fluctueert dan het zoutgehalte in de (kleinere) Grote Kolk en veel minder dan de (veel kleinere) Kleine Kolk. Het zoutgehalte in de Volledige Kolk fluctueert rond het gemiddelde van het zoutgehalte in het Zijkanaal C en het zoutgehalte van het Spaarne, terwijl bij gebruik van de Kleine Kolk het zoutgehalte in die kolk fluctueert tussen die twee uiterste waarden.

Tenslotte toont Figuur 3.6 dat 4 uur effectieve deuropentijd tussen 06:00 en 20:00 uur de Grote Sluis te Spaarndam de maximale capaciteit dicht nadert.





Figuur 3.6 Variaties in zoutgehalte in de kolken (rood) van de Grote Sluis Spaarndam, bij chlorideconcentratie 5,5 g Cl/l in Zijkanaal C. De Totale dagelijkse effectieve deuropentijd is 5 uur, waarvan 4 uur tussen 06:00 en 20:00 uur



## 4 Impact toename zoutlast bij sluis Spaarndam in Rijnland

### 4.1 Methode

Voor de impact van de toename van de zoutlast bij de sluis Spaarndam in het beheergebied van het Hoogheemraadschap van Rijnland zijn twee aspecten van belang. Dat is ten eerste de vraag hoever de extra zoutlast zich kan verspreiden in Rijnland (hoe ver komt het?), en ten tweede welke schade wordt veroorzaakt door de toename in chlorideconcentraties.

Voor het maken van een schatting van de verspreiding van de extra zoutlast in het beheergebied van Rijnland is gebruik gemaakt van een Sobek model van de boezem van Rijnland (Reitsma, 2009). Er is gebruik gemaakt van het Sobek-CF model dat in 2011 is opgenomen in het Landelijk Sobek model. Het Sobek-CF model van Rijnland is gedraaid voor het droge jaar 2003. Als postprocessing op de Sobek-CF berekening is een tracer berekening met Sobek-WQ gemaakt om een indruk te krijgen van de verspreiding van de extra puntlozing bij Spaarndam bij de waterbeweging van 2003.

Voor het schatten van het effect van de toegenomen chlorideconcentraties in de boezem van Rijnland is gebruik gemaakt van de kennis en ervaring van het Eureka-project. In dat project is het effect van diverse beheeropties en chlorideconcentraties op zoutschade in de landbouw en natuur in Rijnland onderzocht.

### 4.2 Resultaten

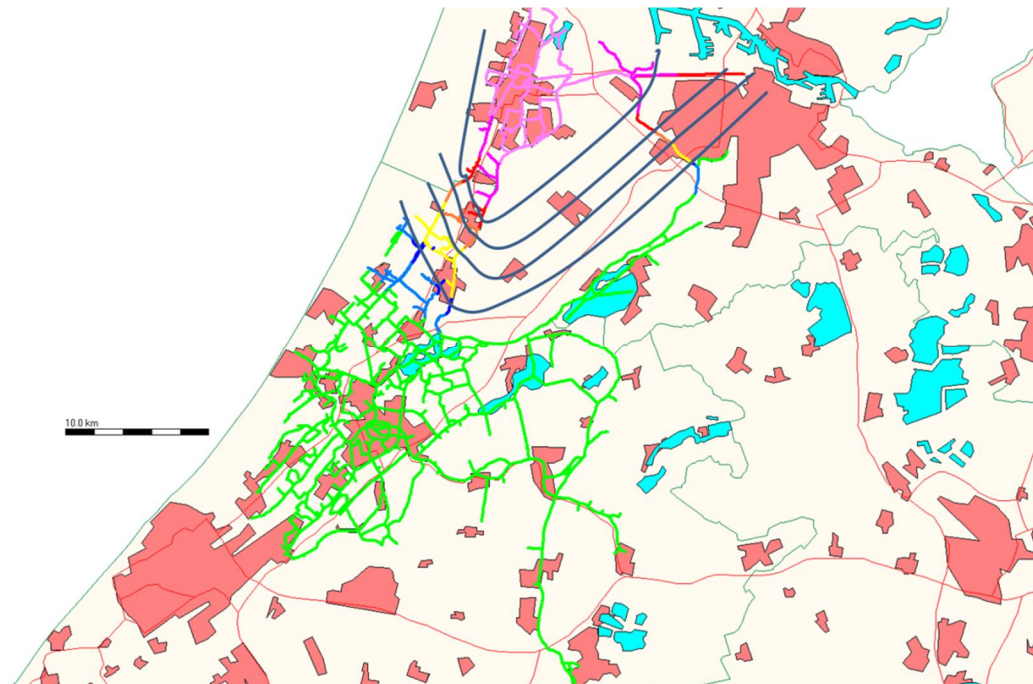
#### 4.2.1 Verspreiding in Rijnland

Met Sobek-WQ berekeningen is de verspreiding van de extra zoutlast bij de sluis Spaarndam onderzocht. Bij een toename van de chlorideconcentraties in Zijkanaal C van 2,1 naar 3,6 g Cl/l neemt op basis van Tabel 3.3 de zoutlast toe (bij een verdeling van 23% Kleine Kolk, 77% Grote Kolk volgens Grontmij, 2007) van 0,8 tot 2,1 kg Cl/s, dus met 1,3 kg Cl/s. Bij een toename van chlorideconcentraties in Zijkanaal C van 4,0 naar 5,5 g Cl/l volgt uit dezelfde tabel met dezelfde aanname een toename in zoutlast van ruim 1,9 kg/s.

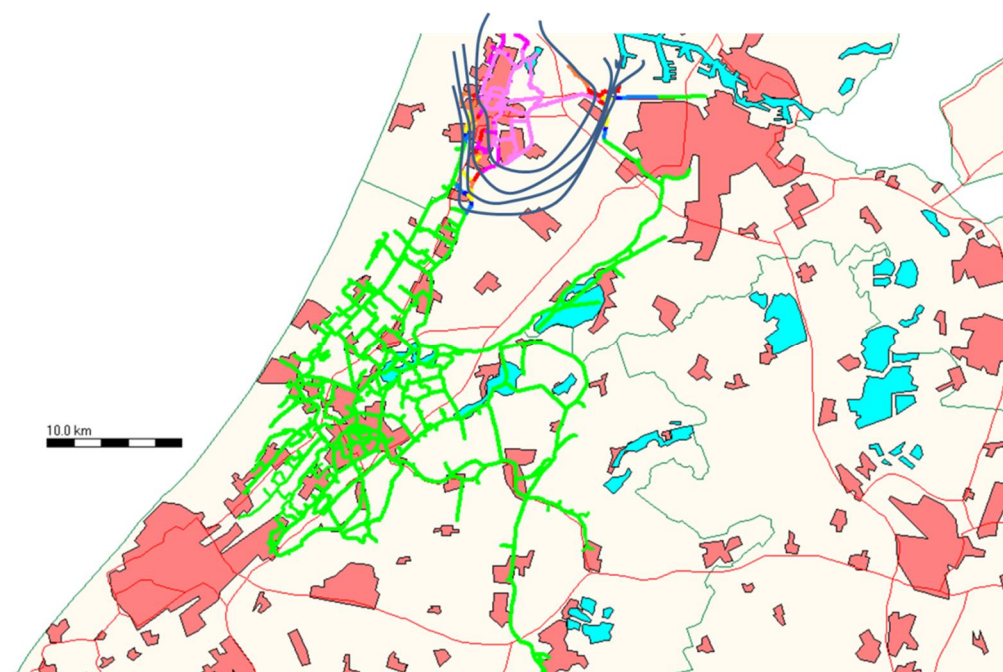
Met Sobek\_WQ zijn berekeningen gemaakt voor het droge jaar 2003 met een constante extra zoutlast van 2 kg/s. Deze waarde is iets hoger dan de hierboven berekende waarden, maar is gekozen omdat dit overeenkomt met een intensiever gebruik van de sluis Spaarndam in het drogere zomerhalfjaar.

De extra zoutlast is gemodelleerd als tracer. De sommen zijn gemaakt met een lage dispersie ( $0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ ) en ook met een hoge dispersie ( $5 \text{ m}^2/\text{s}$ ). Door de modellering met Sobek-WQ wordt uitgegaan van een homogene verdeling over de verticaal. Voor het boezemsysteem van Rijnland met een typische diepte van 4 meter is die aanname aanvaardbaar. De volgende figuren geven een beeld van het verspreidingsgebied en de lokale toename in chlorideconcentraties. De toename is weergegeven met kleuren. Ook zijn isolijnen van gelijke maximale toename weergegeven. De isolijnen zijn voor toenames van respectievelijk 200, 100, 50 en 10 mg Cl/l weergegeven. Hierbij is de meest noordelijke isolijn (het dichtst bij Spaarndam) de lijn met maximale toename 200 mg/l, en de meest zuidelijke de lijn met maximale toename van 100 mg/l.

| Kleur      | Betekenis (toename chloridegehalte) |
|------------|-------------------------------------|
| Rose/Paars | >500 mg/l                           |
| Paars      | 200-500 mg/l                        |
| Rood       | 100-200 mg/l                        |
| Oranje     | 50-100 mg/l                         |
| Geel       | 10-50 mg/l                          |
| Blauw      | 1-10 mg/l                           |
| Groen      | < 1 mg/l                            |



Figuur 4.1 Maximale toename chloridegehalte door extra zoutlek Spaarndam 2 kg/s, dispersie 5 m<sup>2</sup>/s, met isolijnen (in grijs) voor toenames van 200, 100, 50 en 10 mg/l

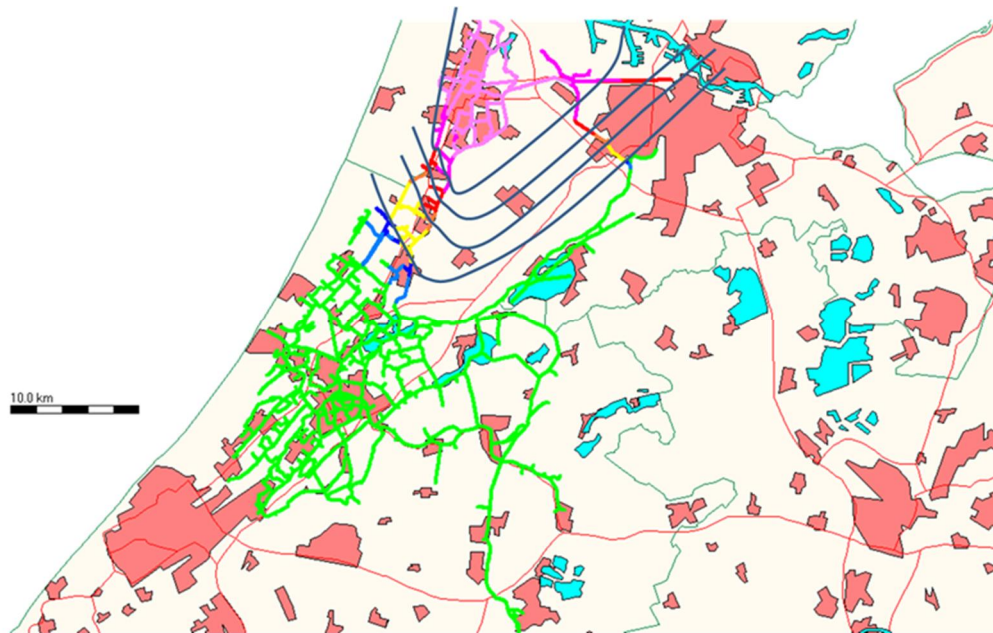


Figuur 4.2 Maximale toename chloridegehalte door extra zoutlek Spaarndam 2 kg/s, dispersie 0.2 m<sup>2</sup>/s, met isolijnen (in grijs) voor toenames van resp. 200, 100, 50 en 10 mg/l

Bij een lage aanname voor dispersie lijkt het effect van het zoutlek mee te vallen en nauwelijks de Bollenstreek tussen Haarlem en Leiden te bereiken (zie Figuur 4.2), maar bij de aanname van een hogere dispersie coëfficiënt lijkt vrijwel de hele Bollenstreek last te hebben (zie Figuur 4.1) met een flinke toename in het noordelijk deel van 100-200 mg/l, en een naar het zuiden toe steeds kleiner wordende toename van het chloridegehalte.

Indicatieve berekeningen van Rijnland (J.J. Reitsma, 2014) met dispersiewaarden van 0.2 en 2 m<sup>2</sup>/s leiden onder vergelijkbare aannamen en modellering tot dezelfde conclusie. Door de extra zoutlek bij sluis Spaarndam (als gevolg van de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden) gaat de chlorideconcentratie in de noordelijke Bollenstreek oplopen met orde 100 mg Cl/l.

In de modellering treedt behalve de opgegeven fysische dispersie ook numerieke dispersie op. Numerieke dispersie is de extra verspreiding die optreedt door de numerieke oplossing van het transportproces. De numerieke dispersie is afhankelijk van het rekenschema, de grootte van rekentijdstap, de grootte van het waterkwaliteitssegment, en de optredende stroomsnelheden. De numerieke dispersie wordt groter bij grotere tijdstappen, grotere rekensegmenten en grotere stroomsnelheden. Daarom is ook onderzocht wat de resultaten zijn bij een kleinere segmentgrootte, kleinere rekentijdstap of ander rekenschema. Het blijkt dat de verschillen in de maximale toename klein zijn. Dat komt omdat de gekozen rekenschema's de meest nauwkeurig beschikbare rekenschema's zijn, en omdat de typische stroomsnelheden die optreden in de perioden van maximale toename van de zoutindringing klein zijn. Onderstaande Figuur 4.3 laat de resultaten zien van de maximale toename van de chlorideconcentraties onder dezelfde aannames als Figuur 4.1, maar dan met een rekengrid van 50 m in plaats van 250 m. De verschillen tussen Figuur 4.3 en Figuur 4.1 blijken minimaal.



Figuur 4.3 Maximale toename chloridegehalte door extra zoutlek Spaarndam 2 kg/s, dispersie 5 m<sup>2</sup>/s, met isolijnen (in grijs) voor toenames van 200, 100, 50 en 10 mg/l, fijner grid (50 m i.p.v. 250 m)

De gebruikte hydrologie is uiteraard ook van invloed op de resultaten. De analyses zijn nu uitgevoerd met hydrologie van 2003. De analyses van Rijnland zijn uitgevoerd met een combinatie van de hydrologie van 2011 en 2003. 2003 is een droog jaar, maar niet extreem droog (1:10 jaar). In extreem droge jaren als 1976 (ongeveer een 1:100 jaar) zal de toename van de chlorideconcentraties nog groter zijn, en de impact op zoutschades ook. Op de zoutschade wordt in de volgende paragrafen nader ingegaan.

#### 4.2.2 Zoutschade landbouw

Stuyt e.a. (2012) hebben voor het Hoogheemraadschap van Rijnland een analyse instrument genaamd €ureyeopener ontwikkeld. €ureyeopener combineert relaties tussen:

- het volume inlaatwater (met bijbehorend chloridegehalte) en het resulterend chloridegehalte van diverse polderwateren in Rijnland;
- de chlorideconcentratie van polderwater en de zoutschade aan landbouwgewassen, waarbij de schade wordt gerelateerd aan concentratie polderwater via een zoutschade drempel (mg Cl/l) en een zoutschadegevoeligheid (% opbrengstdaling per 100 mg Cl/l concentratiestijging); en
- de chlorideconcentratie van polderwater en zoutschade natuur.

Met dit instrument zijn destijds analyses uitgevoerd naar de zoetwateraanvoer en zoutschade in het beheergebied van Rijnland. De resultaten van deze analyses worden hieronder samengevat. Voor een matig droog jaar met herhalingstijd 1:10 jaar is onderzocht wat de impact van diverse maatregelen is op de zoutschade voor landbouw en natuur in Rijnland. Voor het 1:10 droog jaar is net als in het Deltaprogramma Zoetwater het hydrologisch jaar 1989 genomen. Ook het recentere matig droge jaar 2003 heeft een vergelijkbare herhalingstijd.

Uit de €ureyeopener analyses van Stuyt e.a. blijkt dat in de huidige situatie al zoutschade optreedt. In het 1:10 droog jaar 1989 bedraagt deze zoutschade in de landbouw volgens €ureyeopener ongeveer 25 miljoen euro. De droogteschade in de landbouw in Rijnland in een 10% droog jaar als 1989 bedraagt volgens berekeningen met NHI en Agricom ongeveer 10 miljoen euro (Ter Maat e.a., 2014).



Hierin zit mogelijk een overlap met de zoutschade, omdat in NHI bij externe verzilting in perioden van lage Rijnaafvoer de inlaat Gouda gesloten wordt, en alleen de KWA aanvoer met duidelijk lagere capaciteit beschikbaar is. In het W+ klimaatscenario (deltascenario Warm en Stoom) neemt de landbouwschade toe, in een extreem droog jaar (1976) zonder aanvullende maatregelen zou de schade oplopen tot 65 miljoen euro.

Stuyt e.a. hebben met behulp van €ureyeopener een aantal maatregelen geanalyseerd, waaronder de gevoeligheid voor de chlorideconcentratie van het inlaatwater. Bij deze analyses is onderscheid gemaakt naar verschillende regio's in Rijnland, zoals het gebied bij Boskoop, Aalsmeer, de Bollenstreek, de Haarlemmermeer, het duingebied, de Nieuwkoopse Plassen, de Noordplas- en Tempelpolder (polders met zoute kwel), zuidelijke veenpolders en overige polders. Bij een verhoging van het toelaatbare chloridegehalte voor alle aanvoer met 100 mg/l ten opzichte van de referentiesituatie loopt de zoutschade van 25 miljoen euro op tot ongeveer 30 miljoen euro. Bij inlaten bij Gouda tot een chloridegehalte van 300 mg/l (in plaats van 200 mg/l zoals in €ureyeopener referentieberekening) loopt de zoutschade op tot 36.6 miljoen euro. Een strengere criterium van 150 mg/l bij Gouda laat de zoutschade afnemen tot 21,4 miljoen euro.

Uit de €ureyeopener analyses blijkt dat Boskoop het meest gevoelig is voor de chlorideconcentraties, maar ook dat de Bollenstreek relatief gevoelig is voor toe- of afname van de chlorideconcentraties van het ingelaten water. Bij een verandering van chlorideconcentraties van ingelaten water blijkt dat de Bollenstreek verantwoordelijk is voor 10 tot 20% van de verandering in zoutschade in Rijnland.

Tabel 4.1 Zoutschade landbouw in Rijnland volgens €ureyeopener, tabel 8

| €ureyeopener scenario   | Chloride gehalte inlaat Gouda (mg /l) | Totale zoutschade Rijnland (miljoen Euro) | Zout schade Bollenstreek (miljoen euro) | Zout schade Haarlemmermeer (miljoen euro) |
|---|---------------------------------------|---|---|---|
| Referentiesituatie (1:10 droog jaar 1989)                             | 200                                   | 25,0                                      | 4,740                                   | 1,528                                     |
| Zoutgehalte inlaat alle gebieden +100 mg/l                            | 200                                   | 30,2                                      | 5,541                                   | 1,716                                     |
| Zoutgehalte inlaat alle gebieden +300 mg/l, inlaat Gouda tot 500 mg/l | 500                                   | 59,1                                      | 8,875                                   | 1,929                                     |
| Gouda 300 mg/l  | 300                                   | 36,6                                      | 6,613                                   | 1,528                                     |
| Gouda 150 mg/l  | 150                                   | 21,4                                      | 3,561                                   | 1,528                                     |

Uit de tracer berekening met Sobek blijkt dat een toename van het zoutlek bij de sluis Spaarndam gevolgen heeft voor de chloride concentraties in het boezemwater van de noordwesthoek van Rijnland. De in €ureyeopener onderscheiden relevante regio's zijn het duingebied, de Bollenstreek en de Haarlemmermeer. Het duingebied heeft verwaarloosbare zoutschade in alle €ureyeopener scenario's. In de Haarlemmermeer is het effect van een toename van chlorideconcentraties in het boezemwater op de zoutschade veel geringer dan in de Bollenstreek, omdat de Haarlemmermeer als diepe polder relatief veel zoute kwel heeft. De extra zoutindringing bij de sluis Spaarndam heeft dus vooral impact op de zoutschade landbouw in de Bollenstreek. De extra zoutschade door inlaat van water met hogere chlorideconcentraties bedraagt volgens Tabel 4.1 dan orde enkele miljoenen euro's.

Bij een workshop op 26 maart 2014 is door Jan van Bakel (de Bakelse Stroom) en Joost Delsman (Deltares), een indicatieve schatting gemaakt van de droogteschade door de extra zoutindringing bij Spaarndam. Beiden waren ook betrokken bij €ureyeopener. De tijdens de workshop gemaakte schatting bevestigt de hierboven aangegeven indicatie van enkele miljoenen euro's schade in een 1:10 droog jaar.

Voor de volledigheid wordt deze schatting hieronder toegelicht, met de opmerking dat het om indicatieve berekeningen gaat die slechts de orde van grootte aangeven. Er is uitgegaan van een areaal van 3500 ha in de Bollenstreek en de volgende relatie tussen chloride gehalte van het ingelaten water (in mg Cl/l) en schade in miljoenen euro's:

Tabel 4.2 Aangenomen relatie chloridegehalte en zoutschade landbouw in de Bollenstreek, workshop 26 maart

| Chloride gehalte | Zout schade Bollenstreek (miljoen euro) |
|------------------|---|
| 150              | 0,8                                     |
| 200              | 1,7                                     |
| 300              | 3,6                                     |
| 400              | 5,4                                     |
| 500              | 7,3                                     |
| 1750             | 23,0                                    |

Bij een maximaal gebruik van de huidige sluis is een concentratieverloop van 150 mg Cl/l in de zuidkant van de Bollenstreek tot 300 mg/l aan de noordkant van de Bollenstreek geschat voor een 1:10 droog jaar. Bij een evenredige verdeling van schade over de 3 laagste categorieën uit bovenstaande tabel levert dat een schatting van de zoutschade in een 1:10 droog jaar op van  $1/3 * (0,8+1,7+3,6) = 2,0$  miljoen euro.

Stel dat door de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden de chlorideconcentratie aan de noordkant van de Bollenstreek toeneemt tot 500 mg/l, en de concentratie aan de zuidzijde van de Bollenstreek gelijk blijft op 150 mg/l, dan wordt de schatting van de zoutschade:  $1/5 * (0,8+1,7+3,6+5,4+7,3) = 3,8$  miljoen euro.

Dat betekent dat de toename van de zoutschade die toegeschreven kan worden aan de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden geschat wordt op ongeveer 2 miljoen euro in een 1:10 droog jaar. Deze schatting is in lijn met de schatting van enkele miljoenen euro die op basis van de €ureyeopener rapportage is afgeleid.

Verder zal de schade in een extreem droog jaar fors hoger oplopen. Belangrijk is in hoeverre de doorspoeling van Rijnlands boezem in droge en extreem droge omstandigheden gehandhaafd kan worden. Als het doorspoeldebiet niet gehandhaafd kan worden zal het extra zout dat bij Spaarndam naar binnen lekt zich verder richting de Bollenstreek kunnen verspreiden, en zal er een grote zoutschade optreden. Als het chloridegehalte in de hele bollenstreek tot 500 mg/l op zou lopen, wordt volgens bovenstaande tabel de schade geschat op ruim 7 miljoen euro. Dat is ruim 5 miljoen euro meer dan in de huidige situatie in een 1:10 droog jaar. Een en ander hangt overigens ook af van de timing in het groeiseizoen. Een andere overweging is nog de keuze tussen niet beregenen (droogteschade) en beregenen met verzilt water (zoutschade). In het €ureyeopener rapport wordt gesteld dat beregenen met verzilt water altijd de voorkeur verdient boven niet beregenen.



#### 4.2.3 Zoutschade natuur

In €ureyeopener is ook een beknopt overzicht opgenomen van Natura 2000 gebieden in Rijnland en zoutnormering in de Kaderrichtlijn Water (KRW). Voor de gevoeligheid voor zoutindringing via het oppervlaktewater in Natura 2000 gebieden is vooral de aquatische natuur en de oevernatuur van belang. Uit vergelijking van figuur 13 van het €ureyeopener rapport (Stuyt e.a., 2012) en de Sobek berekeningen zoals weergegeven in Figuur 4.1 en Figuur 4.2 blijkt dat het voor zoutindringing bij Spaarndam gevoelige gebied geen zoutgevoelige aquatische natuur en oevernatuur bevat. Dus een toename van het zoutlek bij Spaarndam zal voor aquatische en oevernatuur in Natura 2000 gebieden niet of nauwelijks van invloed zijn.

Voor de KRW is voor diverse oppervlaktewateren een maatlat aangegeven voor de ecologische toestand afhankelijk van het chloridegehalte. Voor de bollenstreek en het duingebied geldt dat de ecologische toestand als 'goed' tot 'zeer goed' wordt beoordeeld als het chloride gehalte in Rijnlands boezemwater  $\leq 150$  mg/l is. Bij chloridegehalten tussen 150 en 200 mg/l is de beoordeling 'matig', en bij chloridegehalten boven de 200 mg/l is de beoordeling 'ontoereikend', boven de 300 mg/l is de beoordeling 'slecht'. Deze beoordelingen zijn echter niet vertaald in euro's.

Extra zoutindringing bij Spaarndam leidt volgens de Sobek tracer berekeningen (zie paragraaf 4.2.1) tot een toename van het chloridegehalte in Haarlem en een deel van de Bollenstreek. Ondanks alle onzekerheden in de randvoorwaarden en modelaannamen (grootte van het zoutlek, gebruikte dispersie) is duidelijk dat dit leidt tot een groter areaal open water met KRW-beoordeling 'matig', 'ontoereikend' of 'slecht'.



## 5 Mogelijke maatregelen

### 5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden mogelijke maatregelen geanalyseerd. De mogelijke maatregelen om de zoutindringing direct bij de bron, dat wil zeggen bij de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden, te beperken worden al in een ander kader onderzocht (Weiler e.a., 2014) en deze maatregelen worden hier niet herhaald. De overige categorieën vallen wel binnen de scope van deze studie. Het type maatregelen bij de sluis Spaarndam in Rijnland is vergelijkbaar met het type maatregelen dat eerder onderzocht is voor een studie rond de Parksluizen en het Hoogheemraadschap van Delfland (Weiler e.a., 2012).

Hierna wordt allereerst met het dynamisch zoutlekmodel onderzocht welke maatregelen het zoutlek bij de sluis Spaarndam kunnen beperken. Met Sobek is geanalyseerd of een gewijzigd doorspoelbeheer de verspreiding van het zout in de boezem van Rijnland kan beperken. Verder wordt een aantal maatregelen besproken die niet nader met nieuwe modelberekeningen zijn onderzocht. Vervolgens wordt voor de kansrijke maatregelen een kostenschatting gegeven en worden verschillende opties vergeleken.

### 5.2 Mogelijke maatregelen geanalyseerd met het zoutlekmodel

#### 5.2.1 Mogelijke maatregelen

Van oudsher (Abraham e.a., 1973) is bekend dat **luchtbellenschermen** ter plaatse van geopende sluisdeuren de zout-zoet uitwisseling aanmerkelijk kunnen beperken. In Nederland zijn luchtbellenschermen toegepast op diverse schutsluizen die zeewater van binnenwater scheiden, dus in situaties met grote verschillen in zoutgehalte. Oude bezwaren zoals vervuiling, onderhoud, hinder recreatievaart en energieverbruik zijn door recente innovaties (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010) weliswaar verminderd maar blijven zorgpunten. Als extra aandachtspunt is in recente jaren het hinderen van vismigratie toegevoegd. In de Stevinsluis bij Den Oever (Waddenzee-IJsselmeer) bleken beter ontworpen luchtbellenschermen minimaal 75% van de oorspronkelijke zout-zoet uitwisseling tegen te gaan. Daarbij bleek de recreatievaart, mits goed geïnformeerd en geïnstrueerd, nauwelijks hinder te ondervinden.

Bij de veel geringere verschillen in zoutgehalte rond de Grote Sluis te Spaarndam kunnen dergelijke rendementen van bellenschermen niet worden gegarandeerd. Daarom wordt in deze studie uitgegaan van 50% reductie in zout-zoet uitwisseling bij toepassing van bellenschermen bij geopende sluisdeuren. Deze aanname verdient nader onderzoek als de optie bellenscherm aantrekkelijk blijkt. Gegeven de ervaringen bij de Stevinsluis wordt verwacht dat de veel geringere luchtdebieten en circulatiestromingen bij de sluis Spaarndam de recreatievaart niet zullen hinderen.

Zoals aangegeven in paragraaf 3.2 beperkt een **drempel** de effectieve waterdiepte en dus de dikte van de zouttong. Een drempel is dus een mogelijke zoutlekbeperkende maatregel. De huidige sluisdrempels liggen op -4,30 m NAP. Bij een peil van -0,60 m NAP is er dus ruimte voor schepen met maximale diepgang tot 3,70 meter verminderd met een veiligheidsmarge van enkele decimeters. Veel schepen hebben een veel kleinere diepgang, zelfs voor de scheepvaart over de Waal naar Duitsland geldt dat minder dan 10% van de schepen een diepgang van meer dan 3 meter heeft (data 2011).

Volgens informatie over het vaarwegennetwerk van de Data-ICT Dienst van Rijkswaterstaat (2011) is op de vaarroute Noordzeekanaal – Spaarne – Kager Plassen (route 202) op km 3,6 een vaardiepte bij de sluis van 3,40 m beschikbaar. Pas bij km 8,2 reduceert de vaardiepte tot 2,70 m. Bij een boezempeil van -0,60 m NAP en vaardiepte 3,40 m lijkt er dus weinig ruimte voor verhoging van de drempel (nu op -4,30 m NAP), ook al is het op dit moment niet duidelijk welk deel van scheepvaart bij de sluis ook echt de vaardiepte van 3,40 m nodig heeft.

Door een hogere sluisdrempel wordt, bij gelijkblijvend gebruik van de sluis, de zoutindringing verminderd. Eventueel kan een flexibele uitvoering overwogen worden, met een beweegbare klep die kan worden neergelaten voor incidenteel diep stekende schepen. Met het zoutlekmodel is het effect onderzocht van een 1 meter hogere drempel (dus met drempelhoogte op -3,30 m NAP en met maximale diepgang tot 2,70 meter).

Een andere mogelijkheid in perioden met voldoende aanbod van zoetwater is een (zoetwater) **spoeldebiet** door de kolk. Een pomp brengt water uit het Spaarne, bij voorkeur onderin de Kleine Kolk, waar het mengt tot brak water dat via voor 20% geopende rinketschuiven (in roldeur of puntdeuren) naar Zijkanaal C stuwt. Het spoeldebiet veroorzaakt een omgekeerde zoutlek naar Zijkanaal C: het verzoet de kolk en vermindert daardoor het zoutlek naar het Spaarne. Het spoeldebiet vervangt een deel of het geheel van de meer pulserende zoetwaterlozing via het gemaal Spaarndam (zie Figuur 3.1) op Zijkanaal C. Gegeven de huidige gemiddelde gewenste doorspoeling van 1,5 m<sup>3</sup>/s bij Spaarndam (totaal 3,1 m<sup>3</sup>/s bij Halfweg en Spaarndam samen) is een constant spoeldebiet van 0,5 m<sup>3</sup>/s of maximaal 1,5 m<sup>3</sup>/s onderzocht. Een dergelijk doorspoeldebiet zal geen merkbare stroomsnelheid in de kolk veroorzaken. Ook hinder tijdens invaren, uitvaren, afmeren, en openen of sluiten van de sluisdeuren is niet te verwachten. In de Stevinsluis zijn deze gunstige ervaringen opgedaan door tijdens laagwater de rinketschuiven in de sluisdeuren aan beide kolkeinden geheel of ten dele te openen, voor details zie (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010).

Het uitwisselingsproces en dus het zoutlek kan worden onderbroken door tijdig de sluisdeuren te sluiten; de tijd dat de sluisdeuren geopend zijn wordt **deuropentijd** genoemd. In eerdere studie (Grontmij 2007) werd gerekend met 20 minuten deuropentijd, maar veel kortere deuropentijden van ca. 5 minuten blijken in de praktijk gehanteerd te worden, ook met een tiental recreatieschepen in de kolk. Bij voldoende lange deuropentijd reflecteert de zouttong tegen de andere deur en loopt weer terug zodat uiteindelijk ongeveer 80% van het water in de kolk is uitgewisseld. De looptijd van de zouttong heen en terug door de kolk is voor de Grote Kolk ongeveer 20 minuten, dus het beperken van de deuropentijd is hier in principe een effectief middel om het zoutlek te verminderen.

Een secundair maar toch belangrijk effect van voldoende korte deuropentijden op het zoutlek is het volgende. In een situatie uitgaande van een zoete kolk na schutten naar het Spaarne geldt dat bij tijdig sluiten van de sluisdeuren naar Zijkanaal C het uitwisselingsproces wordt afgebroken. Het gemiddelde zoutgehalte van de kolk is dan lager dan in het geval dat de 80% verwisseling met water uit Zijkanaal C bereikt wordt (bij voldoende lange deuropentijd). Als er vervolgens naar het Spaarne wordt gesluisd, dan is de kolk dus minder zout. Daardoor verloopt ook de uitwisseling trager, dus de zouttong transporteert zowel minder zout en ook minder snel naar het Spaarne. En als vervolgens ook de sluis naar het Spaarne voldoende kort verloopt “verzoet” de kolk minder. Vervolgens zal de inname van zout bij de volgende sluis naar Zijkanaal C ook minder snel verlopen, etc. Zodoende schommelt het gemiddelde zoutgehalte van de kolk dan beperkt rond het gemiddelde van het zoutgehalte in Zijkanaal C en het zoutgehalte in het Spaarne.

Deze verlaging van het gemiddelde zoutgehalte van de kolk door kortere deuropentijden vormt het secundaire effect van kortere deuropentijden op de beperking van het zoutlek.

Of het zoutgehalte van de kolk beperkt rond zijn gemiddelde varieert wordt ook bepaald door de kolk lengte. Immers bij dezelfde deuropentijd kan de Kleine Kolk (38 m lang) wel tot 80% zijn uitgewisseld maar de Volledige Kolk (143 m lang) nog (lang) niet. Dan zal de Volledige Kolk zoeter zijn dan de 80% uitgewisselde Kleine Kolk en daardoor bij dezelfde deuropentijd minder zout naar het Spaarne lekken. Dat blijkt ook uit de resultaten gepresenteerd in Figuur 3.6. Een **optimalisatie van het kolkgebruik**, en een bewuste keus tussen Kleine Kolk, Grote Kolk en Volledige Kolk kan het zoutlek beperken maar de kolkvulling (aantal schepen per kolk) zal deze keus beperken.

Op basis van deze redenering is een niet eerder genoemde mogelijke maatregel in Zijkanaal C geïdentificeerd, namelijk de optie van een **zoutkerende deur** in Zijkanaal C. Deze deuren openen alleen voor scheepvaart, en hoeven geen waterstandsverschillen te keren. De uitvoering van deze mogelijke maatregel staat nog open. Gedacht wordt aan zoutkerende deuren of beweegbare drempels die overstroomd kunnen worden door peilvariaties in het Noordzeekanaal (door het spui- en maalregime bij IJmuiden). De afstand tussen deze zoutkerende deuren en de Grote Sluis te Spaarndam kan willekeurig groot gekozen. De deuren worden bij voorkeur geplaatst op locaties waar enerzijds jachthavens niet gehinderd worden en anderzijds een lokale vernauwing en verondieping toelaatbaar zijn (maximaal tot drempeldiepte en deurbreedte gelijk aan die van de Grote Sluis te Spaarndam).

Door de zoutkerende deur wordt als het ware een extra lange kolk aan de Grote Sluis toegevoegd, maar zonder een nieuwe sluis te bouwen. Met de zoutkerende deur kan het zoutgehalte in het afgeschermd deel van Zijkanaal C tot circa 2/3 van het zoutgehalte in het Noordzeekanaal worden beperkt. De verhoging van 2,1 g Cl/l met 1,5 g Cl/l tot 3,6 g Cl/l voor de sluisdeuren van Grote sluis te Spaardam wordt dan beperkt tot 2,4 g Cl/l. In principe is er wel hinder voor de scheepvaart, bijvoorbeeld vanwege éénrichtingsverkeer door de zoutkerende deur. Maar om eerder genoemde redenen mogen de deuropentijden van de zoutkerende deuren langer zijn dan in de Grote Sluis. Bovendien hoeft de zoutkerende deur niet continu gebruikt te worden, maar vooral in de drogere zomerperioden.

Het voorgaande biedt overwegingen voor het operationele beheer van de Grote Sluis te Spaarndam om de dagelijkse zoutlek naar het Spaarne te beperken. Uitgaande van een zeker scheepsaanbod per dag en een zekere invaartijd en uitvaartijd per schip, en de aanname dat de sluismeester de sluisdeuren niet langer dan nodig open houdt, dan geldt dat de totale dagelijkse deuropentijd redelijk vast ligt door het gegeven scheepsaanbod per dag. Per definitie is de dagelijkse zoutlek de som van het zoutlek over alle schuttingen per dag (de schutfrequentie) naar het Spaarne. Het product van schutfrequentie én een zekere deuropentijd (per schutting) geeft de totale dagelijkse deuropentijd.

Bij het operationeel beheer van de sluis draait het om vragen als: Wat kan de sluismeester het beste doen om de dagelijkse zoutlek te beperken: de Kleine Kolk, de Grote Kolk of zelfs de Volledige Kolk maximaal met schepen vullen? En wat is qua zoutlekbeperving effectiever: meer schepen per schutting en een evenredig langere deuropentijd per schutting hanteren, resulterend in een lagere schutfrequentie, of het omgekeerde: minder schepen per schutting, met dito kortere deuropentijd per schutting maar dan met hogere schutfrequentie? En wat kan met welke kolk? En wat betekent het e.e.a. qua overlast voor de bewoners van Spaarndam (verkeersstremming door de geopende ophaalbrug over de Grote Sluis)?

### 5.2.2 Analyses van maatregelen met het dynamisch zoutlekmodel

Voor het antwoord op de hierboven genoemde vragen in termen van zoutlek zijn berekeningen gemaakt met het dynamisch zoutlekmodel dat eerder toegelicht is in hoofdstuk 3. De resultaten van deze berekeningen worden in deze paragraaf nader toegelicht. Opgemerkt wordt dat deze resultaten een indruk geven, maar dat er na bestudering van de resultaten allerlei combinaties van maatregelen zijn te verzinnen die mogelijk de voorkeur genieten op basis van weging van criteria als vismigratie, energiegebruik, zoetwatergebruik, hinder scheepvaart, verkeershinder in Spaarndam, duurzaamheid, robuustheid etc. Voor dergelijke veelal bestuurlijke overwegingen biedt dit rapport wel de keuzerichtingen, maar nog niet het optimum.

Er is uitgegaan van gegevens zoals eerder toegelicht in hoofdstuk 3 en samengevat in Tabel 3.1 en Tabel 3.2. Tabel 5.1 geeft de voorstellen voor de individuele zoutlekbeperkende maatregelen die hiervoor besproken zijn.

Tabel 5.1 Onderzochte zoutlekbeperkende maatregelen voor de Grote Sluis Spaarndam

|   |   |                              |
|---|---|------------------------------|
| 1 | Spoeldebiet door kolk(en)               | 0,5 en 1,5 m <sup>3</sup> /s |
| 2 | Drempels bij alle sluisdeuren           | 1 m boven kolkvloer          |
| 3 | Luchtbellenpluimen bij alle sluisdeuren | 50% doorlaatfractie          |
| 4 | Zoutkerende deur in Zijkanaal C         | ± 12 m breed ; ± 4,3 m diep  |

Een toelichting op de modellering van doorgerekende maatregelen:

- Voor de doorspoeling is gerekend met debieten van 0,5 resp. 1,5 m<sup>3</sup>/s. Dat zijn waarden die kleiner zijn dan de huidige gehanteerde gemiddelde doorspoeling (3,1 m<sup>3</sup>/s bij Halfweg en Spaarndam samen)
- De keuze voor een extra drempelhoogte van 1 m is redelijk arbitrair en geeft een minimale waterschijf van 2,7 m boven de drempel aan de zijde van het Spaarne. Als de maatregel effectief blijkt moet nog nader onderzocht worden of het ook realiseerbaar is gezien de scheepvaart.
- Voor het bellenscherm is een effectiviteit van 50% verondersteld.
- Voor de zoutkerende deur in Zijkanaal C zijn afmetingen verondersteld die vergelijkbaar zijn met de puntdeuren van de Grote Sluis te Spaarndam, met vergelijkbare of wat langere deuropentijden en hetzelfde aantal schuttingen per dag. Dan bedraagt de chlorideconcentratie van het deel van Zijkanaal C voor de Grote Sluis 2/3 van de concentratie in het Noordzeekanaal (NZK) en 1/3 van de concentratie in het Spaarne, bij de Grote Sluis.

Uiteraard zijn met de middelen uit talrijke combinaties te maken waarbij twee of zelfs alle zoutlekbeperkende middelen gelijktijdig ingezet kunnen worden. Hierop wordt in paragraaf 5.5.10 teruggekomen.

In de volgende berekeningen is uitgegaan van 15 schuttingen per dag met 20 minuten effectieve deuropentijd per schutting, in overeenstemming met de uitgangspunten van eerdere studies. Van deze deuropentijd is 80% (4 uur) tussen 06:00 en 20:00 uur.

Tabel 5.2 en Tabel 5.3 tonen in blauwe tekst welke van de individuele zoutlekbeperkende maatregelen de verhoogde chlorideconcentraties in het Noordzeekanaal en Zijkanaal C kunnen compenseren. In rode tekst is het zoutlek voor de referentiesituatie (huidig) toegevoegd.

Tabel 5.2 *Individuele zoutlekbeperkende middelen als compensatie van 1,5 g Cl/l verhoging in Zijkanaal C en uitgaande van gemiddelde chlorideconcentratie van 2,1 g Cl/l. In blauw de zoutlekbeperkende maatregel die de extra verzilting tenminste compenseert*

| 15 schuttingen/dag<br>20 min deuropentijd | Zijkanaal C<br>g Cl/l | Kleine Kolk<br>kg Cl/s | Grote Kolk<br>kg Cl/s | Volledige Kolk<br>kg Cl/s |
|---|-----------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|
| <b>Huidig</b>                             | <b>2,1</b>            | <b>0,72</b>            | <b>0,83</b>           | <b>0,67</b>               |
| Spoeldebiet 0,5 m <sup>3</sup> /s         | 3,6                   | 0,89 (Z21)             | 1,7 (Z22)             | 1,3 (Z23)                 |
| <b>Spoeldebiet 1,5 m<sup>3</sup>/s</b>    | <b>3,6</b>            | <b>0,094 (Z34)</b>     | <b>0,9 (Z35)</b>      | <b>0,49 (Z36)</b>         |
| Drempel 1 m                               | 3,6                   | 1,2 (Z44)              | 1,6 (Z45)             | 1,3 (Z46)                 |
| Luchtbellenscherm 50%                     | 3,6                   | 1,3 (Z64)              | 1,0 (Z65)             | 0,88 (Z66)                |
| Zoutkerende deur Zijkanaal C              | 3,6 (2,5)             | 0,92 (Z54)             | 1,2 (Z55)             | 0,93 (Z56)                |

Tabel 5.3 *Individuele zoutlekbeperkende middelen als compensatie van 1,5 g Cl/l verhoging in Zijkanaal C uitgaand van de uitzonderlijk hoge chlorideconcentratie van 4 g Cl/l. In blauw de zoutlekbeperkende maatregel die de extra verzilting tenminste compenseert*

| 15 schuttingen/dag<br>20 min deuropentijd | Zijkanaal C<br>g Cl/l | Kleine Kolk<br>kg Cl/s | Grote Kolk<br>kg Cl/s | Volledige Kolk<br>kg Cl/s |
|---|-----------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|
| <b>Huidig</b>                             | <b>4,0</b>            | <b>1,6</b>             | <b>2,8</b>            | <b>2,2</b>                |
| Spoeldebiet 0,5 m <sup>3</sup> /s         | 5,5                   | 1,6 (Z27)              | 4,2 (Z28)             | 2,9 (Z29)                 |
| <b>Spoeldebiet 1,5 m<sup>3</sup>/s</b>    | <b>5,5</b>            | <b>0,5 (Z37)</b>       | <b>2,8 (Z38)</b>      | <b>1,9 (Z39)</b>          |
| Drempel 1 m                               | 5,5                   | 1,9 (Z47)              | 3,5 (Z48)             | 2,7 (Z49)                 |
| <b>Luchtbellenscherm 50%</b>              | <b>5,5</b>            | <b>2,3 (Z67)</b>       | <b>2,2 (Z68)</b>      | <b>1,7 (Z69)</b>          |
| <b>Zoutkerende deur Zijkanaal C</b>       | <b>5,5 (3,8)</b>      | <b>1,5 (Z57)</b>       | <b>2,5 (Z58)</b>      | <b>1,9 (Z59)</b>          |

Opmerkelijk is dat er bij gekozen maatregelen meer opties zijn die de 1,5 g Cl/l toename in geval van extreem hoge chlorideconcentraties (bij 4+1,5=5,5 g Cl/l) kunnen compenseren dan bij gemiddelde chlorideconcentraties (2,1+1,5=3,6 g Cl/l). Zonder combinatie met andere maatregelen is een spoeldebiet van 1,5 m<sup>3</sup>/s het enige zoutlekbeperkende middel dat bij gemiddelde chlorideconcentratie van 2,1 g Cl/l de verhoging met 1,5 g Cl/l tot 3,6 g Cl/l kan compenseren.

Wanneer de uitzonderlijke chlorideconcentratie van 4 g Cl/l samenvalt met perioden waarin geen zoetwater gespuid kan worden (bv. omdat er onvoldoende zoet water beschikbaar is, door inlaatbeperkingen bij Gouda), dan zijn er volgens Tabel 5.3 twee alternatieven. Dat zijn respectievelijk een bellenscherm (met veronderstelde reductie van zoutlek van 50%) en een zoutkerende deur in Zijkanaal C. Bij gemiddelde chlorideconcentraties op Zijkanaal C zijn deze maatregelen minder effectief, maar in extreme situaties blijken ze relatief effectiever te zijn volgens het zoutlekmiddel.

Uit de berekeningen met het dynamisch zoutlekmiddel blijkt dus dat een drempelverhoging van 1 m minder effectief is dan een continue doorspoeling, bellenscherm of zoutkerende deur in Zijkanaal C. En een 1 m hogere drempel lijkt gezien de CEMT classificatie en de aangegeven bijbehorende vaardiepten optimistisch. Als een verhoogde drempel toch in beeld blijft als mogelijke maatregel zal in ieder geval nader onderzocht moeten worden welke diepgang bij de sluis Spaarndam vereist is voor de beroepsvaart.

De maatregelen kunnen afzonderlijk of gezamenlijk worden ingezet, in combinatie met optimale protocollen voor inzet van kolken, deuropentijd en aantal schuttingen.



### 5.2.3 Optimalisatie kolkgebruik, deuropentijd en aantal schuttingen

Daarnaast is nog een korte analyse gedaan voor optimalisatie van kolkgebruik en gevoeligheid voor deuropentijd en aantal schuttingen. Uit de resultaten van de berekeningen voor de huidige situatie weergegeven in hoofdstuk 3 (zie Tabel 3.3) blijkt dat het voor het zoutlek altijd gunstig de Volledige Kolk in plaats van de Grote Kolk te gebruiken. De oorzaken zijn de bredere roldeur en de kortere lengte van de Grote Kolk in vergelijking met de Volledige Kolk. Zoals geïllustreerd in Figuur 3.6 varieert het zoutgehalte in een kolk met grotere kolk lengte en kolkvolume minder dan in een kleinere kolk, bij gelijkblijvende overige omstandigheden. Door deze geringere variaties is het zoutlek geringer door de lagere zoutconcentratie en de tragere uitwisseling.

Tabel 5.4 toont het zoutlek van de drie kolken bij verschillende verdelingen van de dagelijkse totale effectieve deuropentijd van 5 uur over schutfrequentie en deuropentijd per schutting. Het blijkt dat het kleinste zoutlek bij een typische chlorideconcentratie van 2,1 g Cl/l op Zijkanaal C optreedt bij de optie met het geringste aantal schuttingen per dag en dus met de langste effectieve deuropentijd per schutting (15 schuttingen van 20 minuten). Bij hoge chlorideconcentraties van 4,0 g Cl/l op Zijkanaal C is dat voor de Kleine Kolk nog steeds zo, maar voor de Grote en Volledige Kolk is 30 keer schutten met deuropentijden van 10 minuten dan aantrekkelijker. Bij kortere effectieve deuropentijden wordt de tijd voor en het zoutlek tijdens het openen en sluiten van de sluisdeuren (gemiddeld 1,5 per kolkeinde) wel belangrijk.

Een lage schutfrequentie vereist een goede kolkvulling om hetzelfde aanbod aan schepen te schutten. De lagere schutfrequentie of wachten op maximale kolkvulling levert langere wachttijden voor de scheepvaart maar omgekeerd minder hinder van een open ophaalbrug in het dorp Spaarndam.

Tabel 5.4 Het daggemiddelde zoutlek per kolk, dezelfde dagelijkse effectieve deuropentijd van uur maar verdeeld over meer schuttingen (S/dag) met kortere deuropentijd (T minuten per schutting)

| S * T   | Zijkanaal C<br>g Cl/l | Kleine Kolk<br>kg Cl/s | Grote Kolk<br>kg Cl/s | Volledige Kolk<br>kg Cl/s |
|---------|-----------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 15 * 20 | 2,1                   | 0,72 (Z01)             | 0,83 (Z02)            | 0,67 (Z03)                |
| 30 * 10 | 2,1                   | 0,94 (B01)             | 0,83 (B02)            | 0,78 (B03)                |
| 60 * 5  | 2,1                   | 0,89 (C01)             | 1,0 (C02)             | 1,1 (C03)                 |
|         |                       |                        |                       |                           |
| 15 * 20 | 4,0                   | 1,6 (A01)              | 2,8 (A02)             | 2,2 (A03)                 |
| 30 * 10 | 4,0                   | 3,0 (B11)              | 2,5 (B12)             | 2,1 (B13)                 |
| 60 * 5  | 4,0                   | 2,8 (C11)              | 2,7 (C12)             | 2,6 (C13)                 |

De deuropentijd is een belangrijke parameter. Immers, door het dichtheidsverschil tussen zijkanaal C en Rijnland loopt er een zouttong met een snelheid van iets meer van 15 cm/s naar binnen. Gegeven de afmetingen van de Grote Kolk duurt het dan ongeveer 20 minuten voor de golf weer terug is en de Kolk vrijwel volledig met verzilt water is gevuld. Halveren van de deuropentijd van de grote Kolk levert volgens het dynamisch zoutlekmodel een reductie op in zoutlast via de Grote Kolk van orde 40%. Bij een vast aantal schuttingen per dag is een kortere deuropentijd dus zinvol om het zoutlek te reduceren.

Voor de beroepsscheepvaart lijkt het verkorten van de nu aangenomen schuttijd van 20 minuten realiseerbaar (mogelijk is die schuttijd in de praktijk vaak al korter) omdat de schippers ervaren zijn.

Maar voor de plezierscheepvaart en de kleine Kolk is de deuropentijd naar verwachting niet of nauwelijks te reduceren. Bovendien zou het effect van verkorting van de deuropentijd voor de Kleine Kolk ook minder zijn door het geringere kolkvolume, waardoor de kleine Kolk al sneller volledig gevuld is met zout.

Behalve het verkorten van de deuropentijd kan ook het al of niet open laten staan van de deuren tussen het uitvaren van schepen de ene kant op en het binnenvaren van schepen de andere kant op ervoor zorgen dat meer of minder zout in de schutkolk binnenkomt. De efficiëntie van deze maatregel hangt af van de deuropentijd in relatie tot de afmetingen van de sluiskolk. Immers als het volume van de sluiskolk toch al vrijwel geheel zout is geworden doet extra deuropentijd er niet meer toe.

Verder zijn maatregelen om het aantal schuttingen te beperken mogelijk. Bij minder schuttingen komt er minder zout water de boezem van Rijnland binnen. Hierbij kan gedacht worden aan het zoveel mogelijk voorkomen van leeg terug schutten, vaker meerdere schepen tegelijk schutten en dergelijke. Eventueel kan in tijden van droogte een tijdelijke stremming worden overwogen.

Een optimalisatie van deuropentijd, schutfrequentie en gebruik van de diverse kolken is zeker mogelijk. De berekeningen met het zoutlekmodel laten zien dat gebruik van de Volledige Kolk voordeliger kan zijn dan gebruik van de Grote Kolk (zie Tabel 3.3). Dat komt omdat bij de typische deuropentijd van 20 minuten de Grote Kolk wel vrijwel volledig uitwisselt, maar de Volledige Kolk nog niet. Verder blijkt dat bij dezelfde totale deuropentijd per dag, dat minder schutten met langere deuropentijd per schutting vaak het kleinste zoutlek oplevert, al hangt dit wel af van de chlorideconcentratie op Zijkanaal C en dus van de dichtheidsverschillen (zie Tabel 5.4).

Voor operationele maatregelen bij de sluis geldt dat de kosten voor de waterbeheerder gering zijn, maar dat het opereren van de sluis meer aandacht vraagt. Kortere deuropentijd of meer schepen per schutting vraagt meer communicatie van de sluismeester en aandacht van de schippers.

Het boezempeil in Rijnland wordt goed beheerst en is vrij constant -0,61 m NAP. Het peil op het Noordzeekanaal varieert (er is een pseudogetij), maar is typisch 20 cm hoger op -0,41 m NAP. Schutten op momenten dat het peilverschil gering is zorgt voor een kleinere zoutlast door nivellering, maar zal in de praktijk lastig te realiseren zijn. Een peilverlaging op het Noordzeekanaal zal nog lastiger zijn, omdat dit direct doorwerkt in de peilen in de grachten van Amsterdam, de grondwaterstanden en als mogelijk effect heeft dat de houten palen funderingen gaan rotten. Bovendien is de zoutuitwisseling door nivellering toch al veel kleiner dan de uitwisseling door zout-zoet verwisseling.

### **5.3 Overzicht mogelijke maatregelen onderzocht met het verspreidingsmodel**

#### **5.3.1 Continu doorspoelen**

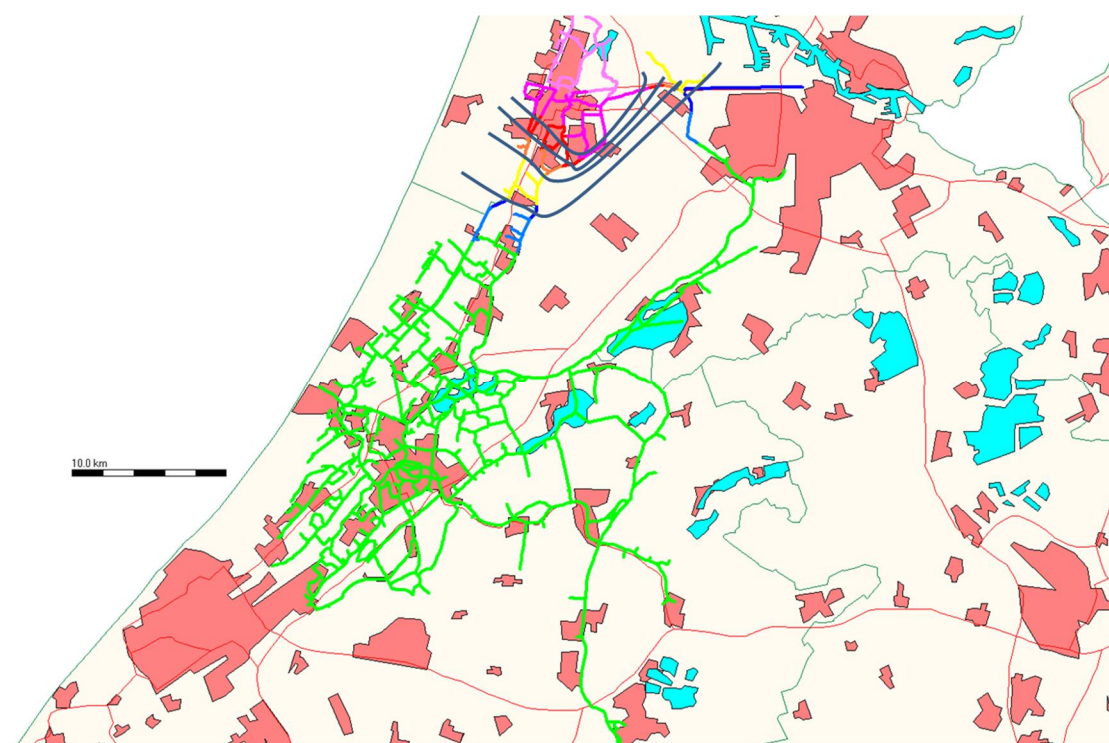
Bij de sluis Spaarndam komt er bij elke schutting zout water uit Zijkanaal C het boezemsysteem van Rijnland binnen. Ook de netto waterstroming per schutting is naar binnen, omdat het peil op Zijkanaal C en Noordzeekanaal hoger is dan het boezempeil in Rijnland. In ieder geval moet de netto naar binnen gerichte waterstroom weer naar buiten worden afgevoerd door te pompen.

In de huidige situatie worden de boezemgemalen bij Katwijk, Halfweg en Spaarndam en eventueel Gouda ingezet om het peil op de boezem te controleren.

In zomerperioden vindt wateraanvoer plaats via Gouda (mits het water op de Hollandsche IJssel niet te zout is geworden) of de KWA, en wordt water uit Rijnlands boezem afgevoerd via Halfweg, Spaarndam en Katwijk. Bij Halfweg en Spaarndam is een gewenst gemiddeld debiet van  $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Echter, door de grote pompcapaciteiten bij Halfweg en Spaarndam (totale capaciteit  $33+32=65 \text{ m}^3/\text{s}$ ) wordt deze doorspoeling gerealiseerd door de gemalen slechts ongeveer 8 uur per week aan te zetten ( $8 \cdot 65 / 7 / 24 = 3,1$ ).

Door deze pulserende doorspoeling krijgt het zout dat bij elke schutting naar binnen komt de mogelijkheid om zich te verspreiden. Een meer continu verloop van de doorspoeling zou de verspreiding sterk kunnen verminderen, en daarmee de impact van een groter zoutlek bij de sluis Spaarndam op de Bollenstreek kunnen voorkomen. Een andere manier van doorspoelen kan echter ook effect hebben op de interne verspreiding in Rijnlands boezem van relatief zout Haarlemmermeerwater dat bij Lijnden geloosd wordt. In de huidige situatie gaat dat Haarlemmermeerwater vooral via Halfweg het systeem uit. Indien alleen bij Spaarndam een continu klein debiet verpompt wordt, zou geloosd Haarlemmermeerwater mogelijk meer richting Spaarndam en Bollenstreek getrokken worden, en dat laatste is niet de bedoeling. Dit aspect vereist nader onderzoek.

Met het Sobek model van Rijnland is een som gemaakt waarbij, in plaats van het huidige doorspoelregime met af en toe een grote puls, gebruik is gemaakt van een continue doorspoeling bij Spaarndam. Er wordt dus niet extra doorgespoeld, maar alleen anders verdeeld in tijd. In de som is alleen voor Spaarndam een continue doorspoeling van  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  gebruikt; Halfweg is ongewijzigd gelaten. Een gevolg hiervan is ook dat er relatief meer water bij Spaarndam naar het Noordzeekanaal geloosd wordt, en bij Halfweg relatief minder, bij een totale hoeveelheid die wel vrijwel identiek is. De resultaten van de berekening worden weergegeven in Figuur 5.1. Het blijkt dat continue doorspoeling in plaats van af en toe een grote puls een duidelijk verschil maakt: de maximale toename van de chlorideconcentratie in Figuur 5.1 is duidelijk lager dan de maximale toename van de chlorideconcentratie in de vergelijkbare Figuur 4.1.

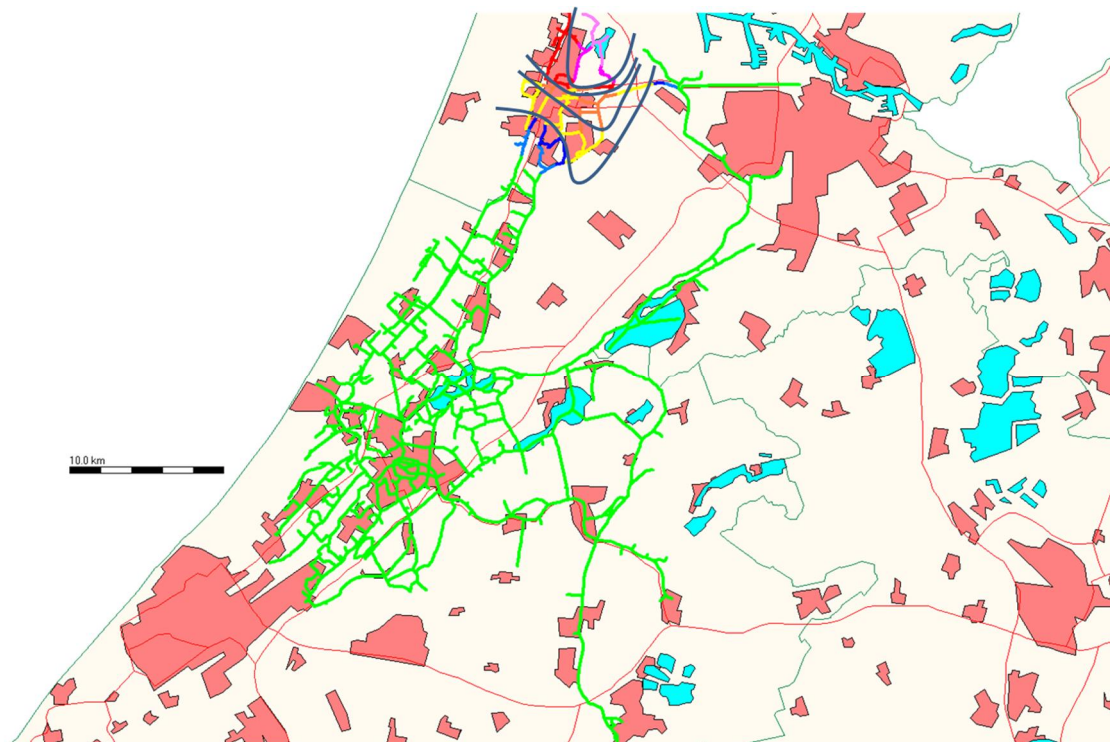


Figuur 5.1 Maximale toename chloridegehalte met extra zoutlek Spaarndam 2 kg/s, dispersie 5 m<sup>2</sup>/s, continue zomerdoorspoeling in plaats van sterk pulserende doorspoeling, met isolijnen voor toenames van 200, 100, 50 en 10 mg/l

### 5.3.2 Extra doorspoelen – KWA+

Behalve een andere verdeling in de tijd van de doorspoeling (meer continu in plaats van met grote pulsen) is een andere verdeling van de doorspoeling over de verschillende lozingslocaties van Rijnland, of extra doorspoeling een mogelijkheid. Bij een andere ruimtelijke verdeling van de doorspoeling moet uiteraard ook onderzocht worden wat de effecten elders in het boezemsysteem zijn. Een andere mogelijkheid is extra doorspoelen.

Voor extra doorspoeling is extra zoet water nodig, en dat moet dan via Gouda aangevoerd worden (mits de Rijnafvoer niet te laag is en Gouda niet verzilt is), of via de KWA. In het Deltaprogramma Zoet Water (DPZW) zijn diverse uitbreidingsopties van de KWA onderzocht. De huidige capaciteit en KWA-afspraken in het waterakkoord garanderen een aanvoer bij Bodegraven naar Rijnland van 7 m<sup>3</sup>/s, waarvan volgens het waterakkoord tot 3 m<sup>3</sup>/s kan worden doorgevoerd naar Delfland en Schieland. Met kleine aanpassingen zonder grote investeringen zou de huidige KWA uit te breiden zijn naar 10 m<sup>3</sup>/s. Verdere uitbreiding naar een KWA+ met capaciteit van 15 m<sup>3</sup>/s bij Bodegraven of naar 24 m<sup>3</sup>/s vereist wel grotere investeringen (bredere kanalen, extra pompen, aanpassingen bij de Irenesluis op ARK, etc.). Om het effect van extra doorspoeling te onderzoeken is een Sobek som gemaakt waarbij in de zomer 1 m<sup>3</sup>/s extra wordt aangevoerd via Gouda of KWA, en waarbij Spaarndam met continu 2 m<sup>3</sup>/s wordt doorgespoeld (dus 1 m<sup>3</sup>/s extra ten opzichte van de som met continue doorspoeling zoals beschreven in de vorige paragraaf). De resultaten worden weergegeven in Figuur 5.2. In vergelijking met Figuur 5.1 wordt de zoutindringing nog iets verder gereduceerd en teruggedrongen.



Figuur 5.2 Maximale toename chloridegehalte met extra zoutlek Spaarndam 2 kg/s, dispersie 5 m<sup>2</sup>/s, continue doorspoeling Spaarndam 2m<sup>3</sup>/s, extra aanvoer 1 m<sup>3</sup>/s, met isolijnen voor toenames van 200, 100, 50 en 10 mg/l.

De conclusie is dus dat continu doorspoelen qua verspreiding van zout richting de Bollenstreek duidelijk een verbetering is ten opzichte van af en toe met een flinke puls doorspoelen. Ook blijkt dat extra doorspoeling zoals verwacht de zoutverspreiding extra tegengaat. Maar de vraag is uiteraard of die extra hoeveelheid doorspoelwater in kritische droge perioden ook altijd beschikbaar is. De beleidsvoorkeur gaat uit naar opties waarbij geen extra zoet water nodig is.

## 5.4 Overzicht overige mogelijke maatregelen

### 5.4.1 Inleiding

Naast de met het zoutlekmodel en met Sobek onderzochte maatregelen zijn er nog een aantal andere opties genoemd die niet nader met modelberekeningen zijn onderzocht. Het gaat hierbij om de volgende opties:

- Drempel of geleidelijk oplopende bodem in Zijkanaal C;
- Zoutvang achter de sluis Spaarndam;
- Bellenscherm en/of waterscherm in Rijnland (dus niet op de sluis Spaarndam);
- Operationeel beheer.

### 5.4.2 Zijkanaal C

Om in Zijkanaal C de zoutindringing te beperken is het mogelijk om één of meerdere drempels te overwegen. Weliswaar neemt de chlorideconcentratie in het Noordzeekanaal over de gehele verticaal toe met ruim 1,5 g Cl/l, maar er is nog steeds een gelaagdheid: de hoogste chlorideconcentraties worden nabij de bodem berekend. Nu is de bodem van het Noordzeekanaal orde -18,0 m NAP, en in Zijkanaal C vlak voor de sluis Spaarndam is het bodemniveau -6,0 m NAP. Om te voorkomen dat relatief zout water uit de diepere delen van het Noordzeekanaal ook binnendringt in zijkanaal C, zijn 1 of meerdere drempels een optie.

Een andere mogelijkheid is niet gebruik te maken van een of meerdere drempels, maar van een langzaam oplopende bodem tot de drempelhoogte -4,30 m NAP van de sluis.

Het aanleggen en onderhouden van drempels is een intensieve klus. De ervaring in de Nieuwe Waterweg leert dat het handhaven van de trapjeslijn lastig is. Zijkanaal C is weliswaar een andere orde grootte dan de Nieuwe Waterweg en de haven van Rotterdam, maar de verwachting is toch dat een of meer extra drempels in zijkanaal C relatief kostbaar zijn, en relatief weinig effect hebben. De toename van het chloride gehalte is tamelijk uniform over de verticaal, en in de huidige situatie loopt de bodem al op van -18 m NAP in het Noordzeekanaal tot -6,0 m in Zijkanaal C vlak voor de sluis Spaarndam. Er is dus al een flinke toename in bodemhoogte. Een extra drempel ergens in Zijkanaal C tot dezelfde hoogte van -6,0 m zal weinig effect sorteren.

De sluis Spaarndam heeft sluisdrempels op -4,30 m NAP. Een drempel ergens in Zijkanaal C met dezelfde hoogte zou dus voor scheepvaart geen extra belemmering opleveren, aangezien er de enige reden om Zijkanaal C binnen te varen de doorgang naar Rijnland is. Maar de vraag is hoe effectief een dergelijke extra drempel is.

Verondiepen van de bodem in Zijkanaal C vlak voor de sluis Spaarndam is ook een lastige klus. De scheepsschroeven zorgen bij het in- en uitvaren van de sluis richting Zijkanaal C voor opwervelingen. Een zachte verondieping is dan relatief snel aangetast, terwijl een harde verondieping met stenen of grout flink duurder is. Tenslotte is het de vraag of een verondieping op Zijkanaal C van -6,0 m naar -4,30 m NAP gegeven de huidige sluisdrempel van -4,30 m NAP veel effect heeft op de zoutindringing via de sluis.

Een extra drempel of verondieping of Zijkanaal C wordt dus niet kansrijk geacht, maar er is nog een andere, mogelijk wel kansrijke optie: een zoutkerende deur in Zijkanaal C. Zoals in hoofdstuk 5.2.2 door berekeningen met het dynamisch zoutlekmodel is aangetoond, is een zoutkerende deur bij hoge chlorideconcentraties op Zijkanaal C een effectieve maatregel. Door een extra deur ontstaat in feite een extra compartiment, met een chlorideconcentratie die tendeert naar een waarde tussen de chlorideconcentraties in NZK-Zijkanaal C en de chlorideconcentraties bij de sluis Spaarndam en Rijnland. Naar verwachting is deze maatregel realiseerbaar en effectiever dan drempels of andere bodemaanpassingen op Zijkanaal C.

#### 5.4.3 Zoutvang achter de sluis Spaarndam

Een zoutvang is een verdiept gedeelte van de voorhaven aan de zoete kant, bedoeld om de uit de kolk stromende zouttong in op te vangen. Door de grotere dichtheid zal de zouttong de neiging hebben in deze diepere put te blijven liggen. Door middel van een spuiwerker (pijp), met pompen of onder vrij verval moet er wordt er regelmatig zoutwater uit de zoutvang teruggevoerd worden naar de zoute zijde. Een dergelijke voorziening is aangebracht bij de Westsluis van Terneuzen. De effectiviteit van de zoutvang is groter naarmate er een sterkere gelaagdheid is.

De effectiviteit van een zoutvang aan de binnenzijde van de sluis Spaarndam is onderzocht door Jongeling e.a. (2006). Er zijn destijds een aantal verkennende Delft-3D berekeningen gemaakt met verschillende dieptes. In de meeste berekeningen is een zoutvang gemodelleerd van 5 m diepte ten opzichte van de huidige bodem, en met een volume van twee keer de kolkinhoud (in 2006: kolkvolume 9500 m<sup>3</sup>, dus zoutvang volume 19000 m<sup>3</sup>). De berekeningen laten zien dat vrij veel menging optreedt bij instroming van het brakke water in de zoutvang, en dat overslag plaats vindt. Verder wekken overvarende schepen interne golven op, en veroorzaken schroeven van manoeuvrerende schepen extra menging.

Jongeling schat de effectiviteit van de zoutvang op maximaal 50%, doordat vrij veel menging optreedt en doordat het dichtheidsverschil relatief klein is. Belangrijke te optimaliseren parameters zijn de diepte van de vang, en ook de helling van het bovenstroomse talud.

Omdat het peil in Zijkanaal C hoger is dan het peil in Rijnland zal de zoutvang via een pijp met pompen gelegegd moeten worden. Er zijn grenzen aan de inzetbare pompcapaciteit en stroomsnelheden. Uitgaande van leegpompen van 1 kolkvolume van 9500 m<sup>3</sup> uit de zoutvang in 1 uur, komen Jongeling e.a. op een gewenste capaciteit van 2,6 m<sup>3</sup>/s. Dit komt bij drukke zomerdagen neer op ongeveer het huidige gemiddelde doorspoeldebiet van 1,5 m<sup>3</sup>/s. Het verschil met de huidige praktijk is echter dat er veel regelmatig, uit de zoutvang, en met een veel kleiner debiet gepompt wordt, in plaats van af en toe een groot doorspoeldebiet.

In 2011 is de sluis aangepast (Kleine Kolk en Grote Kolk) en versmald, dus het kolkvolume per schutting is lager. Daarmee wordt de gewenste pompcapaciteit annex doorspoeldebiet ook kleiner. Tenslotte is het ontwerp van de aanzuigmond een belangrijk aandachtspunt bij het afpompen van water uit de zoutvang.

#### 5.4.4 Bellenscherm en/of waterscherm in Rijnland

Een bellenscherm zorgt door een reeks van luchtballen voor een circulatiepatroon in het water, waardoor zout water uit de diepe delen wordt gemengd met zoeter water aan het oppervlak, en er effectief minder zout water naar binnen gaat. De opstijgende luchtballen van een bellenscherm nemen vanaf de bodem ongeveer 10-100 maal hun eigen volume aan omgevingswater mee. Hierdoor ontstaat een circulatiepatroon aan beide zijden van de bellenscherm. Door deze circulatiepatronen gaat de zoutindringing een stuk langzamer, omdat de concentratieverschillen kleiner zijn. Toepassing van een bellenscherm bij een sluis geeft bij gelijke deuropentijd een lagere zoutindringing van in een situatie zonder bellenscherm.

Een bellenscherm kan ook gebruikt worden op grotere afstand van de sluis om te voorkomen dat stratificatie zou kunnen ontstaan waarbij een zouttong richting de Bollenstreek trekt. Op een geschikte locatie in een smal kanaal kan een bellenscherm voor verticale menging zorgen en verdere zoutindringing voorkomen. Voorwaarde is wel dat er een netto debiet van Rijnland richting Zijkanaal C is, waardoor er chloride wordt afgevoerd. Anders heeft opmenging achter de sluis (in het beheergebied van Rijnland) niet zoveel zin.

Een waterscherm is een bellenscherm waarbij bovendien nog een (zoet)waterscherm achter de bellenscherm is aangebracht. Hierdoor wordt de doorlaatfractie zout water nog verder gereduceerd. Bellenschermen werken vooral goed bij grote dichtheidsverschillen, zoals op de Nieuwe Waterweg, en bij de overgang van een zout Volkerak-Zoommeer naar een zoet Hollandsch Diep. In het brakke Zijkanaal C is de chlorideconcentratie in vergelijking met zout zeewater van 19 g Cl/l toch relatief laag, namelijk in de huidige situatie orde 2 a 3,5 g Cl/l tot na aanleg van de Grote Nieuwe Zeesluis orde 4,0 a 5,5 g Cl/l. In dergelijke situaties is een bellenscherm minder effectief, terwijl de zowel de aanlegkosten als kosten van opereren relatief hoog kunnen zijn. Uit berekeningen met het zoutlekmodel blijkt inderdaad dat een bellenscherm bij de sluis bij hogere chlorideconcentraties op Zijkanaal C (dus grotere dichtheidsverschillen) effectiever is om het zoutlek te beperken.

#### 5.4.5 Operationeel beheer - monitoring

Extra zoutindringing bij de sluis Spaarndam is niet te voorkomen als ten gevolge van de aanleg van de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden de zoutconcentraties in Noordzeekanaal en Zijkanaal C toenemen.



Door maatregelen bij IJmuiden en/of bij de sluis Spaarndam kan de toename van het zoutlek bij Spaarndam mogelijk beperkt worden. Voor Rijnland is het zaak vooral om te voorkomen dat de extra zoutindringing de gevoelige Bollenstreek bereikt. Er is wel een zekere buffer in het boezemsysteem van Rijnland. Op dit moment zijn er regelmatig chloride metingen bij Spaarndam, Heemstede en Lisse waarmee de mate van zoutindringing gemonitord kan worden. Hierdoor is het mogelijk om snel operationeel bij te sturen (doorspoelen en/of sluisoperatie) als de chlorideconcentraties beginnen op te lopen, en zo de verspreiding van chloride onder controle te houden. Het meetpunt in Heemstede is net ten noorden van de Bollenstreek, en als de chlorideconcentraties hier oplopen zou snel bijgestuurd moeten worden. In droge perioden is dit al min of meer de praktijk in Rijnland, maar wellicht is verdere optimalisatie mogelijk. Bijvoorbeeld extra metingen van het chloridegehalte op Zijkanaal C in combinatie met voorkeuren in schutprotocollen bij verschillende chloridegehalten (welke kolk te gebruiken, welke deuropentijden en aantal schuttingen per dag) levert nuttige informatie voor de sluisbeheerder. De basisgedachte is dat het beter is om problemen te voorkomen door tijdig maatregelen te nemen, dan pas maatregelen te gaan nemen (zoals doorspoelen) als het water in de Bollenstreek al kampt met duidelijk verhoogde chlorideconcentraties. In feite betekent dit operationeel beheer vooral zorgen voor goede monitoring om op de juiste momenten andere maatregelen goed in te kunnen zetten.

## 5.5 Overzicht mogelijke maatregelen en indicatieve kosten

### 5.5.1 Inleiding

De mitigerende maatregelen om de extra zoutindringing bij de sluis Spaarndam als gevolg van het vergroten van de zeesluis IJmuiden te beperken kunnen worden onderverdeeld in verschillende categorieën, te weten:

- Maatregelen bij de sluis IJmuiden;
- Maatregelen in Zijkanaal C;
- Maatregelen om en nabij de sluis Spaarndam; en
- Maatregelen in het beheergebied van Rijnland.

De mogelijke maatregelen om de zoutindringing direct bij de bron, dat wil zeggen bij de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden, te beperken worden al in een ander kader onderzocht (Weiler e.a., 2014) en deze maatregelen worden hier niet herhaald. De overige categorieën vallen wel binnen de scope van deze studie. Het type maatregelen bij de sluis Spaarndam en in Rijnland is vergelijkbaar met het type maatregelen dat eerder onderzocht is voor een studie rond de Parksluizen en het Hoogheemraadschap van Delfland (Weiler e.a., 2012).

Op basis van de in de vorige paragrafen beschreven maatregelen en analyses zijn de volgende kansrijke maatregelen geïdentificeerd, zoals genoemd in de volgende tabel.

Tabel 5.5 Overzicht kansrijke maatregelen

| Maatregellocatie           | Maatregel   |
|----------------------------|---|
| Zijkanaal C                | Zoutkerende deur in Zijkanaal C, die in feite een extra kolk vormt voor de sluis Spaarndam                        |
| Sluis Spaarndam            | Optimalisatie deuropentijd, schutfrequentie en optimalisatie gebruik van de diverse kolken                        |
| Sluis Spaarndam            | Hogere sluisdrempel (eventueel flexibel), indien mogelijk   |
| Sluis Spaarndam            | Zoutvang aan de Rijnlandse zijde van de sluis, in combinatie met kleine pomp om de zoutvang te legen.             |
| Sluis Spaarndam / Rijnland | Kleine continue doorspoeling van Spaarndam richting Zijkanaal C in plaats van af en toe een groot doorspoeldebiet |
| Sluis Spaarndam/ Rijnland  | Een bellenscherm, bij voorkeur in de sluiscolk, eventueel iets verder in het Rijnlandse boezemsysteem             |
| Rijnland                   | Extra doorspoeling (KWA+ versnellen)  |
| Rijnland                   | Operationeel beheer – op basis van monitoring beter actief kunnen bijsturen                                       |

De volgende paragrafen geven een eerste indicatieve kostenschatting. Hierbij is gebruik gemaakt van enkele typische kentallen en van de methode die ook bij de economische analyses voor het Deltaprogramma Zoet Water (DPZW) is gebruikt. Bij de kostenschattingen wordt onderscheid gemaakt in de directe investeringskosten om een voorziening te realiseren, de levensduur van de voorziening en de jaarlijkse beheer- en onderhoudskosten. Voor een gegeven looptijd kan dan de netto contante waarde van de kosten (en baten) worden berekend. Verder wordt het effect van rente en risico vertaald in een discontovoet waarmee een equivalente jaarlijkse annuïteit wordt berekend. De vastgestelde discontovoet die ook door DPZW is gebruikt is 5.5%. Een en ander is gebaseerd op de OEI-leidraad (Overzicht Effecten Infrastructuur, 2000) en de leidraad MKBA (Maatschappelijke Kosten-Baten Analyses, CPB/PBL, 2013) en is in de rapportage van de economische analyses van DPZW toegelicht (Stratelligence, 2014). De onderstaande toelichting van de berekeningen van NCW en EEA is overgenomen uit de Stratelligence rapportage.

Naast de nominale kosten worden in de KEA en KBA de contante waarden in kaart gebracht. De totale effecten over de hele planperiode worden hierdoor vergelijkbaar.

Om de waarde van toekomstige kosten in euro's te bepalen, worden deze teruggerekend. De stroom van eenmalige en jaarlijkse kosten wordt in de tijd geplaatst en vervolgens verdisconteerd naar het basisjaar, zodat de contante waarde ontstaat.

$$NCW = \sum_{t=0}^N \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t}$$

De netto contante waarde:

Hierin is  $C_t$  de kosten in jaar  $t$  vanaf de start van de planperiode,  $r$  de rente of discontovoet die wordt gebruikt om bedragen in de toekomst naar het heden om te rekenen en  $N$  is de looptijd van het project. De discontovoet bestaat uit twee delen: de reële risicovrije discontovoet en de risico-opslag. De reële risicovrije discontovoet is vastgesteld op 2,5% en de standaard risico-opslag, die voor de macro-economische risico's corrigeert, op 3%. Samen vormen zij de discontovoet van 5,5%, zoals vastgesteld door het kabinet.

Figuur 5.3 Berekening van de netto contante waarde (uit Stratelligence, 2014)

De equivalente jaarlijkse annuïteit wordt gebruikt om een netto contante waarde te vertalen in een serie van gelijke kasstromen over de looptijd of levensduur van een investering.

$$EAA = \frac{r * (NCW)}{1 - (1 + r)^{-n}}$$

Waarbij r de discontovoet is per periode, n het aantal perioden (levensduur), NCW de netto contante waarde van de kasstromen over de levensduur.

Figuur 5.4 Berekening van de equivalente jaarlijkse annuïteit (uit Stratelligence, 2014)

### 5.5.2 Kosten zoutkerende deur in Zijkanaal C

Een zoutkerende deur in Zijkanaal C zou minstens zo breed en hoog moeten zijn als de puntdeuren bij de sluis Spaarndam (ruim 12 meter breed, orde 4 meter hoog). Een mogelijke locatie is nabij de kruising van Zijkanaal C met de A9 (zie Figuur 5.5). Dat betekent dat er een lokale vernauwing gemaakt kan worden - het Zijkanaal C is ter plekke ongeveer 80 m breed - waarin een deur geplaatst moet worden.

Voor de sluis Empel (Zuid-Willemsvaart) zijn in 2013 grote sluisdeuren van 13 bij 13 meter geplaatst die ook een waterkerende functie hebben. Drie van deze deuren kosten samen orde 2 miljoen euro. Voor 1 kleinere zoutkerende deur in Zijkanaal C, zonder waterkerende functie, maar rekening houdend met extra grondaanvoer en -verzet om de vernauwing te realiseren, worden daarom de investeringskosten op ongeveer 1,5 miljoen euro geschat.



Figuur 5.5 Mogelijke locatie voor zoutkerende deur in Zijkanaal C (Google Earth)

### 5.5.3 Kosten operationele maatregelen sluis

De kosten van operationele maatregelen bij de sluis zoals beperken van de deuropentijd, minder vaak leeg schutten, meer schepen tegelijk en andere schutbeperkingen om minder zout binnen te laten dringen zijn gering. Er zijn geen investeringen in harde infrastructuur nodig. Kortere deuropentijden en schutbeperkingen stellen wel eisen aan de communicatie van sluismeester en kunnen enige hinder voor de scheepvaart opleveren.

#### 5.5.4 Kosten verhogen sluisdrempel

De kosten van verhogen van de sluisdrempel zullen lager zijn dan de kosten van een bellenscherm of de kosten van de KWA+, en zullen ook lager zijn dan de kosten van de recente aanpassingen bij de sluis in 2011. De investeringskosten voor de renovatie in 2011 bedroegen orde 16 miljoen euro voor verlenging, versmalling, verondieping en opdeling van de sluis in 2 kolken). De kosten voor alleen een hogere (flexibele) drempel worden daarom geschat op 1 miljoen, met een jaarlijks B&O van < 0,1 miljoen euro. De jaarlijkse annuïteit voor alleen verhoging van sluisdrempels komt daarmee op orde 0,2 miljoen euro.

#### 5.5.5 Kosten zoutvang

De kosten van een zoutvang zijn geschat door kosten van grondverzet 5 à 10 euro per m<sup>3</sup>, kosten van afvoeren 5 à 50 euro per m<sup>3</sup> (afhankelijk van grondkwaliteit en afstand van afvoeren). Bij een zoutvang van 20000 m<sup>3</sup> en een factor 2 voor de kosten van voorbereiding, ontwerp, engineering etc. wordt de investering geschat op orde 2 miljoen euro. Bij een B&O van 10% (1 keer per 10 jaar opnieuw uitbaggeren, 0,2 miljoen euro/jaar) wordt de jaarlijkse annuïteit geschat op orde 0,3 miljoen euro.

#### 5.5.6 Kosten kleine pomp

De investeringskosten voor een kleine pomp (1 m<sup>3</sup>/s) worden geschat op orde 1 à 2 miljoen euro. De pomp zal gebruikt worden voor een continue kleine doorspoeling. De pomp zou bij voorkeur dit debiet direct door de sluiscolk moeten pompen (en eventueel door water uit een zoutvang te pompen). Bij B&O kosten 5% (exclusief energiekosten van de pomp) is jaarlijks B&O < 0,1 miljoen euro. Daarmee komt de jaarlijkse annuïteit op orde 0,2 miljoen euro. Dat is een orde kleiner dan de kosten van de KWA+. Ter vergelijking een kostenschatting uit de economische analyses voor het Deltaprogramma Zoetwater (Stratelligence, 2014): voor een grote, incidenteel gebruikte pomp van 15 m<sup>3</sup>/s op het MaasWaalkanaal wordt de jaarlijkse annuïteit geschat op 1,8 miljoen euro bij een investering van 23,5 miljoen euro en jaarlijks B&O van 0,3 miljoen euro (inclusief energiekosten).

Een kleine pomp met kleine continue doorspoeling in plaats van de incidenteel grote pulsen doorspoeling, betekent dat er nog steeds vergelijkbare hoeveelheden water worden uitgeslagen, met vergelijkbare (energie) pompkosten, alleen verdeeld over de huidige grote pompen en een nieuwe pomp met kleine pompcapaciteit. Als er extra water wordt ingelaten via Gouda of KWA(+) om via doorspoeling de zoutindringing tegen te gaan, dan neemt het uitgeslagen volume water toe en ook de (energie) pompkosten nemen toe.

#### 5.5.7 Kosten uitbreiding KWA

In het concept rapport economische analyses voor het deelprogramma Zoetwater (Stratelligence, 2014) wordt voor de KWA+ met capaciteit 15 m<sup>3</sup>/s een totaal investeringsbedrag genoemd van 45 miljoen euro, inclusief aanpassingen van de Irenesluis (Tabel 10 in het Stratelligence rapport) en jaarlijks B&O van 0,4 miljoen euro. De jaarlijkse annuïteit bedraagt dan 3,1 miljoen euro voor afschrijvingen, B&O, inclusief rente en risico-opslag (discontovoet).

In de economische analyses voor het Deltaprogramma Zoet Water zijn de baten van de KWA+ vergeleken met de baten van het alternatief zilter water inlaten. Dat is namelijk de huidige praktijk: als de chlorideconcentratie bij Gouda boven de norm is en de KWA levert onvoldoende water, dan zal Rijnland voor peilbeheer alsnog verzilt water bij Gouda inlaten.

De baten van de KWA zijn dus niet alleen vermeden landbouw droogteschade, maar ook verminderde zoutschade (niet meegenomen in de analyses DPZW), verminderde natuurschade, en vermeden schade drinkwaterindustrie. Door deze aanpak wordt de KWA+ aantrekkelijker dan wanneer alleen gekeken wordt naar de jaarlijkse kosten en de verminderde droogteschade in de landbouw.

De KWA+ zou versneld kunnen worden aangelegd met het oog op eventuele extra doorspoeling bij de sluis Spaarndam als manier om te voorkomen dat de verhoogde chlorideconcentraties in Zijkanaal C als gevolg van de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden doordringen tot de Bollenstreek. De vraag is welke kosten van de versnelde aanleg toegerekend moeten worden aan de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden. Immers, versnelde aanleg van de KWA+ zal niet alleen compenserend effect hebben voor de extra zoutindringing bij Spaarndam en Bollenstreek (=gevolg van de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden), maar zal ook op andere locaties in Rijnland de droogte- en zoutschade reduceren.

Uit de verkennende Sobek sommen blijkt dat een andere manier van doorspoelen (kleine continue doorspoeling in plaats van pulsen) al een verbetering oplevert (qua verspreiding van chloride) die geen extra water kost. Verder blijkt dat verhoging van de doorspoeling met 1 m<sup>3</sup>/s de verspreiding van zout bij Spaarndam verder in de boezem van Rijnland afremt (zie paragraaf 5.3.2.) Voor een dergelijke kleine toename in doorspoeldebiet hoeft niet direct de volledige KWA+ van 15 m<sup>3</sup>/s aangelegd te worden.

#### 5.5.8 Kosten bellenscherm

Voor de bellenpluim in de Nieuwe Waterweg heeft Stratelligence de kosten voor een grote bellenpluim en een kleine bellenpluim geschat. Hierbij is als range voor de investeringsbedragen aangegeven 8,5 tot 17 miljoen euro voor de kleine bellenpluim, en 25 tot 50 miljoen euro voor de grote bellenpluim. Jaarlijks B&O wordt geschat van 0,4 à 0,9 miljoen euro (kleine bellenpluim) en 1,3 à 2,7 miljoen euro (grote bellenpluim). De bovengrens voor de jaarlijkse annuïteit van de grote bellenpluim is geschat op 6,2 miljoen euro, en voor de qua effect 4 keer kleinere bellenpluim is de schatting 2,1 miljoen euro. De kosten schalen dus niet lineair.

Een eventueel bellenscherm in een kanaal in Rijnland is een orde kleiner dan een bellenpluim op de Nieuwe Waterweg. De investering zal dus lager zijn. Een eventueel bellenscherm in Rijnland zal echter frequenter worden ingezet, naar schatting in 50% van de zomers (inzet van het bellenscherm zal niet nodig zijn in natte zomers als Rijnland al veel water afvoert). De operationele kosten zijn dus in verhouding tot de investering hoger. De investering wordt geschat op 2 miljoen euro, jaarlijks B&O op 0,4 miljoen euro. De jaarlijkse annuïteit wordt daarmee geschat op orde grootte 0,5 miljoen euro.

#### 5.5.9 Kosten operationeel beheer

Optimaliseren van het doorspoelbeheer en sluisbeheer op basis van gemeten chlorideconcentraties vereist bij gebruik van de huidige meetpunten Spaarndam, Heemstede en Lisse geen grote investeringen. Eventuele extra meetpunten (elders in Rijnlands boezem of in Zijkanaal C) vereisen geringe investeringen.

#### 5.5.10 Overzicht en discussie

De volgende tabel geeft een overzicht van de mogelijk kansrijke maatregelen en de geschatte effectiviteit (++ = groot effect, + = positief effect, 0=geen effect, - = negatief effect) en een indicatie van de investeringskosten, jaarlijkse B&O kosten en de jaarlijks equivalente annuïteit.

Op basis van deze getallen kunnen de kosten van maatregelen worden afgezet tegen de vermeden schade. Dat is de zoutschade in de Bollenstreek die kan worden toegeschreven aan de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden. De zoutschade in de landbouw in een 1:10 droog jaar is ongeveer 2 miljoen euro (zie paragraaf 4.2.2). In een extreem droog jaar kan dat hoger oplopen tot orde 7 miljoen (zie paragraaf 4.2.2). Zoutschade in de natuur door verminderde ecologische geschiktheid voor KRW-doelen is niet in geld uitgedrukt (zie paragraaf 4.2.3).

Tabel 5.6 Overzicht kansrijke maatregelen en indicatieve kosten

| Locatie maatregel          | Maatregel   | Effect maatregel (op zout) | Impact op schepen | Investing (M euro) | Levens-Duur (jaren) | Jaarlijks B&O (M euro) | Equivalente jaarlijkse annuïteit (incl. B&O) |
|----------------------------|---|----------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|------------------------|--|
| Zijkanaal C                | Kerende deur  | ++                         | -                 | 1,5                | 50                  | 0,1                    | 0,2  |
| Sluis Spaarndam            | Optimalisatie deuropentijd, schutfrequentie, keuze gebruik kolk | ++                         | 0/-               |                    |                     | Gering                 | Gering                                       |
| Sluis Spaarndam            | Hogere sluisdrempel (eventueel flexibel)                        | +                          | --                | 1,0                | 50                  | 0,1                    | 0,2  |
| Sluis Spaarndam            | Zoutvang  | +                          | 0                 | 2,0                | 50                  | 0,2                    | 0,3  |
| Sluis Spaarndam / Rijnland | Kleine pomp voor continue doorspoeling en/of lediging zoutvang  | ++                         | 0                 | 1,5                | 50                  | <0,1                   | 0,2  |
| Sluis Spaarndam / Rijnland | Bellenscherm  | ++                         | -                 | 2,0                | 30                  | 0,4                    | 0,5  |
| Rijnland                   | KWA+ versnellen, extra doorspoeling                             | +                          | 0                 | 45                 | 50-75               | 0,4                    | 3,1 *  |
| Rijnland                   | operationeel beheer   | ++                         | 0                 |                    |                     |                        | Gering                                       |

Voor de KWA+ is nu het grootste getal aan jaarlijkse annuïteit vermeld in de tabel, maar zoals al in paragraaf 5.5.7 is aangegeven, is het niet redelijk om de volledige jaarlijkse kosten van de KWA+ toe te schrijven aan de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden. Er zijn immers ook andere baten dan de door de maatregel vermeden extra zoutschade.

De zoutkerende deur in Zijkanaal C creëert in feite een extra kolk voor de sluis Spaarndam, met een lagere chlorideconcentratie dan zonder de zoutkerende deur het geval zou zijn.

De maatregelen met betrekking tot de sluisoperatie zijn vooral gericht op vermindering van het zoutlek. Dit betreft de maatregelen optimalisatie kolkgebruik, deuropentijd en aantal schuttingen. Een kortere deuropentijd van de Grote Kolk of Volledige Kolk lijkt gezien de ervaring van de beroepsschippers zonder veel overlast realiseerbaar. Bij dezelfde totale dagelijkse deuropentijd treedt het kleinste zoutlek op als er zo weinig mogelijk geschut wordt (minder schuttingen en langere deuropentijden). Minder schutten door of minder lege schuttingen of meer schepen te combineren kunnen voor wat oponthoud zorgen. Goede communicatie tussen sluismeester en de schippers is vereist.

Voor de maatregel hogere sluisdrempel moet eerst nader bekeken worden of dat qua diepgang van de schepen mogelijk is, want een 1 m hogere drempel lijkt gezien de CEMT classificatie en de aangegeven bijbehorende vaardiepten optimistisch. Uit de berekeningen met het dynamisch zoutlekmodel in paragraaf 5.2.2 blijkt bovendien dat een drempelverhoging van 1 m minder effectief is dan een continue doorspoeling, bellenscherm of zoutkerende deur in Zijkanaal C. Als een verhoogde drempel in beeld blijft als mogelijke maatregel zal in ieder geval nader onderzocht moeten worden welke diepgang bij de sluis Spaarndam vereist is voor de beroepsvaart.

De maatregel zoutvang in combinatie met een kleine pomp vermindert niet het zoutlek, maar probeert het zout vlak achter de sluis op te vangen en weer af te voeren via een pomp. De scheepvaart zal hier geen last van hebben.

Een andere optie is om een pomp niet te koppelen aan een zoutvang, maar direct op de sluis met doorspoeling te werken. De maatregel 'continue doorspoeling', in plaats van de huidige praktijk met grote pulsen, verdeelt in principe alleen het doorspoeldebiet anders in de tijd, maar vraagt geen extra zoetwater. Uit de verkennende berekeningen blijkt dat een debiet dat overeenkomt met het huidige doorspoeldebiet, maar dan als continu debiet, duidelijk een positief effect heeft op de verspreiding van het zout richting de Bollenstreek (het zout dringt bij continue doorspoeling minder ver door). Het doorspoeldebiet moet in ieder geval het nivelleringsdebiet van de sluis wegpompen, en idealiter iets meer. Een andere mogelijkheid is nog het idee de doorspoeling van Rijnlands boezemsysteem anders te verdelen over Spaarndam, Halfweg en Katwijk. Dat is nu nog niet nader onderzocht; randvoorwaarde is wel dat het brakke kwelwater dat uit de Haarlemmermeer op Rijnlands boezem wordt geloosd niet richting Bollenstreek kan trekken.

De maatregel met extra doorspoeling via de KWA+ werkt in principe ook blijkt uit de verkennende Sobek som; nadeel is dat dit in ieder geval zorgt voor een additionele zoetwatervraag, en dat is juist in perioden van droogte mogelijk beperkend. De huidige beleidslijn is er op gericht om de zoetwatervraag niet te laten toenemen, dus eerst andere opties te onderzoeken.

Een bellenscherm op de sluis kan het zoutlek bij de sluis reduceren. Uit de berekeningen met het dynamisch zoutlekmodel blijkt dat met een veronderstelde effectiviteit van 50% (duidelijk lager dan bij elders bekende bellenschermen, omdat de dichtheidsverschillen bij Spaarndam kleiner zijn dan bij de elders bekende bellenschermen) een bellenscherm wel degelijk effectief is, vooral bij grote dichtheidsverschillen tussen Zijkanaal C en Rijnland.

Een bellenscherm op de sluis is effectiever dan een bellenscherm iets verder in Rijnlands boezemsysteem. Een bellenscherm verderop in het systeem met als bedoeling om eventuele gelaagdheid te voorkomen door op te mengen is alleen zinvol als er bij een netto debiet van Rijnland via Spaarndam richting Noordzeekanaal is en het opgemengde water naar buiten wordt afgevoerd.

Uiteraard zijn ook allerlei combinaties van maatregelen mogelijk. Gedacht kan worden aan combinaties van continue doorspoeling, optimalisering van het sluisbeheer (deuropentijd, keuze kolkgebruik en aantal schuttingen per dag), bellenscherm en een zoutkerende deur in Zijkanaal C. In het kader van deze verkennende studie is dat echter niet nader onderzocht, omdat het doel vooral was om de mogelijke kansrijke maatregelen in kaart te brengen, inclusief een kostenindicatie. De kostenindicatie is ook een eerste inschatting op basis van eerdere studies en kentallen.



Ook zijn in deze studie geen maatregelen bij de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden onderzocht, dat gebeurt in andere kaders. Momenteel is het voornemen om bij IJmuiden al maatregelen te realiseren, waardoor de toename van chlorideconcentraties op het Noordzeekanaal en Zijkanaal C beperkt worden. Indien in het vervolg blijkt dat maatregelen bij de bron (de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden) onvoldoende soelaas bieden om de verhoging van chlorideconcentraties in Zijkanaal C te beperken, dan zullen de in deze studie geïdentificeerde maatregelen nader moeten worden uitgewerkt. De maatregelen of combinaties van maatregelen moeten dan worden afgewogen op basis van kosten en criteria zoals hinder voor de scheepvaart, verkeershinder in Spaarndam, vismigratie, energiegebruik, zoetwatergebruik, duurzaamheid en robuustheid.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

Uit eerder uitgevoerde studies blijkt dat door de aanleg van de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden de chlorideconcentraties op het Noordzeekanaal met orde 1,5 g Cl/l toenemen in vergelijking met de situatie van maximaal gebruik van de huidige Noordersluis. Deze toename van chlorideconcentraties geldt over de gehele diepte en over vrijwel het gehele Noordzeekanaal.

Ook bij Zijkanaal C zullen de chlorideconcentraties met 1,5 g Cl/l stijgen. Hierdoor zal bij de sluis Spaarndam de zoutindringing vanuit Zijkanaal C naar de boezem van Rijnland toenemen. Om dit te kwantificeren zijn berekeningen gemaakt met een zoutlekmodel dat het proces van zoutindringing bij schutsluizen beschrijft. Uit de berekeningen blijkt dat met de huidige operatie van de sluis Spaarndam, uitgaande van chlorideconcentraties van 2,1 g Cl/l de zoutindringing met 1,3 kg Cl/s zal toenemen (op jaarbasis orde 40 miljoen kilo chloride). In de huidige situatie worden in Zijkanaal C in droge perioden waarden tot 4,0 g Cl/l gemeten; een verhoging met 1,5 g Cl/l betekent dan een toename in zoutlek van 1,9 kg/s. Hierbij is uitgegaan van een verhouding van 23:77 in het gebruik tussen de Kleine Kolk en de Grote Kolk van de sluis Spaarndam.

Er is seizoensvariatie in het schutbedrijf bij Spaarndam: door de extra pleziervaart in de zomer zijn er 's zomers duidelijk meer schuttingen dan in de winter. Dat betekent dat de zoutindringing in de zomer hoger zal zijn dan in de winter. De droge zomerperiode is het meest kritisch voor wat betreft de gevolgen. Met een indicatieve Sobek tracer berekening voor een droog jaar is nagegaan wat de verspreiding van een zoutlek van 2 kg Cl/s zou zijn. Afhankelijk van de modelaanname blijkt dat het chloride dat bij Spaarndam naar binnen komt in meer of mindere mate ook het noordelijk deel van de Bollenstreek met de zoutgevoelige gewassen bereikt. De zoutschade veroorzaakt door de extra zoutindringing bij Spaarndam wordt geschat op orde 2 miljoen euro in een droog jaar als 2003 op basis van kennis uit het €ureyeopener project.

Mogelijk mitigerende maatregelen bij de bron, dat is de Zeesluis IJmuiden, worden elders onderzocht. In deze studie is een aantal mogelijke maatregelen nabij sluis Spaarndam, in Zijkanaal C of in Rijnland opgesomd. Hieronder volgt een samenvatting van de effectieve maatregelen.

Een effectieve maatregel met geringe kosten is aanpassen van de sluisoperatie. Het lijkt mogelijk om de deuropentijd van de Grote Kolk te beperken. Deze kolk wordt voor beroepsscheepvaart gebruikt, en de aangenomen deuropentijd van orde 20 minuten is net lang genoeg voor de zoet-zout uitwisselingsstroming om vrijwel de hele kolk te vullen met het brakke water uit Zijkanaal C, terwijl bij kleinere deuropentijden dat niet het geval is. Ook minder leeg schutten en combineren van meer schepen in een schutting is een effectieve methode om het zoutlek bij de sluis te reduceren. Ook een optimale keuze tussen gebruik van de verschillende kolken, afhankelijk van de dichtheidsverschillen tussen Zijkanaal C en het Spaarne, kan het zoutlek beperken.

Hogere drempels in Zijkanaal C of (goedkoper!) bij de sluis zouden ook effectief kunnen zijn, maar hebben een extra risico. Op basis van de verdeling van de diepgang van de schepen die door de sluis varen moet blijken wat mogelijk is qua drempelhoogte. Gedacht kan worden aan een klep die bij schepen met grote diepgang gestreken kan worden, maar voor de meeste schepen geen belemmering oplevert. Een beter alternatief dan een drempel in Zijkanaal C is een extra set zoutkerende deuren in Zijkanaal C.

Deze deuren kunnen in perioden van hoge chloridegehalten op het Noordzeekanaal gebruikt worden om het oplopen van het chloridegehalte in Zijkanaal C te vertragen, ten koste van enig extra oponthoud voor de scheepvaart.

Een klein continu doorspoeldebiet van orde 1 à 1.5 m<sup>3</sup>/s, eventueel in combinatie met een zoutvang aan Rijnlands zijde van de sluis, is een andere manier om het binnendringende zout sneller af te voeren en verdere verspreiding te voorkomen. Deze methode vraagt geen extra water in vergelijking met de huidige doorspoeling (gemiddeld 3,1 m<sup>3</sup>/s bij Halfweg en Spaarndam samen, met typisch pulsgewijs). In de huidige doorspoelpraktijk wordt incidenteel een groot debiet gespuid, en dat is volgens berekeningen met Sobek minder effectief om de verspreiding van het zout te beperken.

Een andere optie is om de extra zoutindringing met extra doorspoeling te compenseren, bijvoorbeeld door de KWA+ implementatie te versnellen. Uit een indicatieve berekening blijkt dat een extra doorspoeldebiet (continu doorspoelen met 1+1=2 m<sup>3</sup>/s) de verspreiding van de extra zoutlast richting Bollenstreek inderdaad beperkt. Nadeel van deze optie is dat het de zoetwatervraag van Rijnland vergroot, juist in de zomerperiode als de watervraag het grootst is. In alle gevallen is het raadzaam om het operationeel beheer af te stemmen op actuele metingen van chlorideconcentraties, zodat voorkomen wordt dat chloride te ver de Bollenstreek indringt.

Een bellenscherm is vooral effectief bij grote zoet-zout dichtheidsverschillen en is niet eerder toegepast bij relatief kleine dichtheidsverschillen zoals die bij Spaarndam tussen Zijkanaal C en de boezem van Rijnland. Echter, ook bij een ingeschat bellenscherm rendement van 50% blijkt dat een bellenscherm nog effectief kan zijn, vooral bij optredende hoge chlorideconcentraties in Zijkanaal C.

Uit de berekeningen met het dynamisch zoutlekmodel blijkt, uitgaande van huidige typische concentraties op Zijkanaal C van 2,1 g Cl/l, dat continue doorspoeling van 1,5 m<sup>3</sup>/s de meest effectieve maatregel is om de extra zoutlek bij de sluis Spaarndam tegen te gaan. Bij hogere chlorideconcentraties op Zijkanaal C zijn ook een bellenscherm op de sluis en een zoutkerende deur in Zijkanaal C effectief. Ook andere maatregelen hebben enig effect, maar het zoutlek neemt dan nog wel toe in vergelijking met de huidige situatie. Het optimaliseren van het sluisbeheer (deuropentijd, keuze kolkgebruik en aantal schuttingen) verdient nadere uitwerking. Die optimalisering van het sluisbeheer is echter niet beperkt tot de situatie voor na realisatie van de Grote Nieuwe Zeesluis, maar kan in de huidige situatie mogelijk ook al verbeteringen geven.

Uit de eerste indicatieve kostenschattingen blijkt dat de jaarlijkse kosten (annuïteit inclusief discontovoet voor rente/risico opslag) van vrijwel alle mogelijke maatregelen duidelijk lager zijn dan de vermeden zoutschade in de landbouw in een 1:10 droog jaar. Alleen voor de KWA+ zijn de jaarlijkse kosten van dezelfde orde grootte als de vermeden zoutschade in een droog jaar, maar de KWA+ heeft ook andere baten en niet alle KWA+ kosten moeten aan de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden worden toegerekend.

Indien mogelijke maatregelen bij de Grote Nieuwe Zeesluis IJmuiden onvoldoende blijken te zijn om de toename in chlorideconcentraties in Zijkanaal C te beperken, zullen de in deze studie geïdentificeerde maatregelen en combinaties van maatregelen nader onderzocht en uitgewerkt moeten worden. Dan kunnen kostenschattingen worden gedetailleerd en de kosten worden afgewogen tegen de vermeden zoutschade en andere criteria als scheepvaarthinder, verkeershinder, vismigratie, energiegebruik, zoetwatergebruik, duurzaamheid en robuustheid.

## 7 Referenties

G. Abraham, P. v.d. Burgh en P. de Vos (1973). Pneumatic barriers to reduce salt intrusion through locks. Rijkswaterstaat communications 1973, nr. 17.

Alkyon (2003). Calibratie en validatie model Noordzeekanaal fase 1&2. Rapport A1215, 2003.

Alkyon (2006). Kalibratie en 3D-simulaties Noordzeekanaal model met temperatuur en saliniteit, resultaten simulaties. Rapport A1564, 2006.

Arcadis (2011). Zoutindringing sluizen IJmuiden, effect nieuwe sluis op Noordzeekanaal. Rapport A2769, 2011.

Arcadis (2012). Effecten sluiseland Zeeburg op zoutdoordringing Amsterdam-Rijn Kanaal. Rapport A2875R1r2, 2012.

Arcadis (2014). Verfijning onderzoek chloride-indringing Noordzeekanaal (ZTIJ). Rapport 077064747:0.6, C03041.003026.0100

Grontmij (2006). Renovatie Grote Sluis te Spaarndam, Keuzenotitie: zout - zoetscheiding, rekening houdend met de aanleg van een nieuwe sluis te IJmuiden. Memo project 182177, 2006.

Grontmij (2007). Renovatie Grote Sluis te Spaarndam, invloed van voorgestelde sluisvarianten op het zoutbezwaar. Rapport project 182177, 2007.

T.H.G. Jongeling en W. Ottevanger (2006). Zoutvang Grote Sluis Spaarndam, rapport bureaustudie. WL-Delft Hydraulics rapport Q4256, 2006.

J. Ter Maat, M. Haasnoot, J. Hunink, M. van der Vat e.a. (2014). Effecten van maatregelen voor de zoetwatervoorziening in Nederland in de 21e eeuw, Deltaprogramma - Deelprogramma Zoetwater - Fase 4, Deltares rapport 1209141-001, 2014.

J.J. Reitsma (2009), Rapport Rijnlandmodel schematisatie, versie juni 2009.

J.J. Reitsma (2014). Effect toename zoutbelasting via sluis Spaarndam op boezem Rijnland, memo 21 mei 2014.

Rijkswaterstaat Data-ICT Dienst (2011). Vaarwegen in Nederland, editie december 2011.

J. van Rooden (2012). Zoutindringing sluis Spaarndam, Intern memo 12.11395 Rijnland, 2012.

Stratelligence (2014). Economische analyse Zoetwater t.b.v. de voorkeursstrategie van het Deltaprogramma Zoetwater. Concept 95% versie. Stratelligence, april 2014.

L.C.P.M. Stuyt, P.J.T. van Bakel, J. Delsman, H.T.L. Massop, R.A.L. Kselik, M.P.C.P. Paulissen, G.H.P. Oude Essink, M. Hoogvliet en P.N.M. Schipper (2013). Zoetwatervoorziening in het Hoogheemraadschap van Rijnland – onderzoek met hulp van eureyeopener 1.0. Alterra rapport 2439, 2013.

R.E. Uittenbogaard, J.M. Cornelisse (2010). Beschrijving en resultaten praktijkproef Stevinsluis. Deltares rapport 1201226-005-ZKS-00007, 2010.

A. Vrijburcht (1992). Beperking zoutindringing van de schutsluis te Spaarndam. WL-Delft Hydraulics rapport Q1490, 1992.

O.M. Weiler, J.M. Cornelisse (2012). Zoutlek scheepvaartsluizen Delfland, Inventarisatie en evaluatie van mogelijke maatregelen. Deltares rapport 1205395, 2012.

O.M. Weiler, R. Uittenbogaard (2014). Beperking zoutindringing bij aanleg nieuwe sluis IJmuiden, Fase 1: eerste verkenning. Deltares Rapport 1209034, 2014.