



# Verkenning maritieme toegankelijkheid Kanaal Gent-Terneuzen

Aanvullend oppervlaktewateronderzoek

22 juli 2010  
Eindrapport  
9V4098.A0



HASKONING BELGIUM NV/SA  
KUST & RIVIEREN

Hanswijkdries 80

B-2800 Mechelen

+32 (0)15 405656 Telefoon

+32 (0)15 405657 Fax


info@haskoning.be E-mail

www.royalhaskoning.com Internet


Documenttitel Verkenning maritieme toegankelijkheid  
Kanaal Gent-Terneuzen  
Aanvullend oppervlaktewateronderzoek  
Verkorte documenttitel Oppervlaktewateronderzoek  
Status Eindrapport  
Datum 22 juli 2010  
Projectnaam Aanvullend oppervlaktewateronderzoek  
Projectnummer 9V4098.A0  
Referentie 9V4098.A0/R0009/411700/ABRON/Nijm

Auteur(s) Thomas Vijverberg, Inge Folmer, Tom Carron,  
Harmen Talstra, Bram Blik

Collegiale toets Peter van de Kreeke

Datum/paraaf 22 juli 2010 

Vrijgegeven door Peter van de Kreeke

Datum/paraaf 22 juli 2010 

## INHOUDSOPGAVE

	Blz.
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b> <span style="float: right;"><b>1</b></span>
1.1	Achtergrond <span style="float: right;">1</span>
1.2	Vraagstelling <span style="float: right;">2</span>
1.3	Aanpak van de studie <span style="float: right;">3</span>
1.4	Leeswijzer <span style="float: right;">3</span>
<b>2</b>	<b>BESCHOUWING HUIDIGE SITUATIE</b> <span style="float: right;"><b>4</b></span>
2.1	Korte weergave gegevens <span style="float: right;">4</span>
2.2	Zoutindringing <span style="float: right;">5</span>
2.3	Effecten verzilting <span style="float: right;">8</span>
2.3.1	Primaire effecten <span style="float: right;">8</span>
2.3.2	Secundaire effecten <span style="float: right;">9</span>
2.4	Reeds toegepaste maatregelen en effecten <span style="float: right;">9</span>
2.5	Doelstellingen Kaderrichtlijn Water <span style="float: right;">10</span>
2.6	Conclusies <span style="float: right;">10</span>
<b>3</b>	<b>PARAMETERONDERZOEK</b> <span style="float: right;"><b>11</b></span>
3.1	Algemeen / inleiding <span style="float: right;">11</span>
3.2	Interactie buitenwater – kanaal via sluis <span style="float: right;">11</span>
3.2.1	Inleiding <span style="float: right;">11</span>
3.2.2	Achtergronden van FINEL3D <span style="float: right;">12</span>
3.2.3	Context simulaties; scenario's en sluisalternatieven <span style="float: right;">13</span>
3.2.4	Modelopzet, overzicht invoer en randvoorwaarden <span style="float: right;">14</span>
3.2.5	Resultaten; elementaire zoutlast op kanaal als functie van de tijd <span style="float: right;">18</span>
3.2.6	Samengestelde zoutlast op kanaal als functie van de tijd <span style="float: right;">26</span>
3.2.7	Conclusie <span style="float: right;">29</span>
3.3	Interactie scheepvaart – gelaagd zoet/zoutsysteem <span style="float: right;">30</span>
3.3.1	Inleiding <span style="float: right;">30</span>
3.3.2	Achtergrond model; schematisatie en beperkingen <span style="float: right;">30</span>
3.3.3	Opzet simulaties, overzicht invoer en randvoorwaarden <span style="float: right;">32</span>
3.3.4	Resultaten; zoutconcentratie op uitstroomrand als functie van de hoogte <span style="float: right;">33</span>
3.3.5	Interpretatie en conclusies <span style="float: right;">37</span>
3.4	Zoutindringing op het kanaal <span style="float: right;">38</span>
3.4.1	Modelopzet SOBEK model <span style="float: right;">39</span>
3.4.2	Calibratie <span style="float: right;">44</span>
3.4.3	Berekeningen projectalternatieven <span style="float: right;">46</span>
3.4.4	Conclusies <span style="float: right;">50</span>
3.5	Effect van zeespiegelstijging <span style="float: right;">51</span>
3.6	Effect op de omgeving en compenserende maatregelen <span style="float: right;">53</span>
<b>4</b>	<b>MAATREGELEN TER BEPERKING ZOUTBEZWAAR EN ZOUTINDRINGING</b> <span style="float: right;"><b>57</b></span>
4.1.1	Inleiding <span style="float: right;">57</span>
4.1.2	Luchtbellenschermen <span style="float: right;">58</span>
4.1.3	Zoutvang <span style="float: right;">60</span>
4.1.4	Omloopriolen in combinatie met zoutvang <span style="float: right;">61</span>
4.1.5	Zoet-zout scheiding met bufferbekkens <span style="float: right;">61</span>

4.1.6	Uitwisseling binnen de sluiscolk (Zoet-zout scheiding zonder bufferbekkens)	62
4.1.7	Verstelbare zoutdrempel bij de binnendeur	66
4.1.8	Afzuigen zouttong bij binnendeur	67
4.1.9	Aanvullende beheersmaatregelen	68
4.1.10	Groter debiet op Kanaal Gent - Terneuzen	68
4.1.11	Kosten	69
4.1.12	Samenvatting effectiviteit maatregelen	72
<b>5</b>	<b>MODELTOOL</b>	<b>74</b>
5.1	Opzet model	74
5.2	Algemene (benaderende) formule zoutlast naar het kanaal	74
5.3	Omrekenen zoutlast naar chloride verloop op het kanaal afhankelijk van bovendebiet	77
5.4	Beperkingen en gevoeligheden in het gebruik van het model	79
5.5	Korte gebruikshandleiding gebruik Excel model	81
<b>6</b>	<b>BEREKENING ZOUTINDRINGING VOOR ALTERNATIEVEN EN SCENARIO'S</b>	<b>83</b>
6.1	Inleiding	83
6.2	Resultaten	84
<b>7</b>	<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	<b>86</b>
7.1	Effecten	86
7.2	Modeltool	89
7.3	Maatregelen	89
7.4	Aanbevelingen	91
	<b>REFERENTIES</b>	<b>92</b>

## **BIJLAGEN**

1. Sluisalternatieven
2. Tabel scheepvaart aantallen ProSIM

## 1 INLEIDING

### 1.1 Achtergrond

Als uitwerking van het Derde Memorandum van Overeenstemming met betrekking tot de onderlinge samenwerking tussen Vlaanderen en Nederland ten aanzien van de ontwikkeling van het Schelde-estuarium is de projectgroep “Kanaalzone Gent-Terneuzen 2008” (KGT2008) opgericht. De opdracht voor deze projectgroep luidt: “Verken de problematiek van de maritieme toegankelijkheid van de Kanaalzone Gent-Terneuzen, in het licht van de logistieke potentie van deze Kanaalzone en de mogelijke oplossingsvarianten, zodat voorwaarden geschapen kunnen worden voor de wenselijke en noodzakelijke economische ontwikkeling van de Kanaalzone Gent-Terneuzen in het algemeen, en de havengebonden cluster van activiteiten in het bijzonder.”

De Vlaams-Nederlandse projectgroep KGT2008 heeft deze verkenning uitgevoerd. Na een probleemanalyse werden breed uiteenlopende oplossingsrichtingen verkend op basis van een:

- kosten-batenanalyse;
- een milieutoets;
- diverse deelonderzoeken die input hebben geleverd aan de kosten-batenanalyse en de milieutoets;
- een onderzoek naar de meerwaardeopties en de financierings- en bekostigingsmogelijkheden van de diverse projectalternatieven.

Vervolgens is besloten een planstudiebesluit te nemen, wanneer overeenstemming is bereikt over de Vlaams-Nederlandse kostenverdeling voor realisatie. In afwachting van dit besluit heeft de Vlaams-Nederlandse Schelde Commissie (VNSC) de opdracht aan KGT vernieuwd teneinde de in de verkenning uitgevoerde onderzoeken te optimaliseren, zover hiermee geen wettelijk onherroepelijke activiteiten worden uitgevoerd. Hiertoe is een ‘no regret’ onderzoeksprogramma samengesteld waarin de uitgevoerde onderzoeken uit de periode 2006-2008 worden aangevuld en gedetailleerd. Dit onderzoeksprogramma richt zich op een range van 3 sluisalternatieven (appendix 1), allen gelegen binnen het huidige sluisencomplex:

- de combisluis (diepe binnenvaartsluis, die ook geschikt is voor zeevaart);
- de kleine zeesluis;
- grote zeesluis.

Het no regret onderzoeksprogramma is onderverdeeld in 3 thema’s: milieu, ruimte en veiligheid, economie en financiën. Binnen het thema milieu is een aanvullend oppervlaktewateronderzoek gedefinieerd, waarin de belangrijkste kennisleemten dienen te worden gevuld. De aanleiding voor dit onderzoek is als volgt kort samen te vatten:

- in het oppervlaktewateronderzoek dat is uitgevoerd in het kader van de milieutoets is zowel de hoogwaterproblematiek als de laagwaterproblematiek beschouwd. Voor de kans op verdroging is gesteld dat deze gering is, mede vanwege de garanties die het verdrag van 1985 biedt. De vraag is aan de orde of deze veronderstelling correct is. De kans op verdroging en daarmee samenhangende tekort aan zoetwatertoevoer heeft ook weer invloed op de verzilting van het kanaal;

- de verzilting als gevolg van het gebruik van de sluizen is onderzocht, echter niet precies voor de voorliggende projectalternatieven. Er ontbreken modelleringdata voor andere sluisalternatieven en voor verschillende verkeersintensiteiten (scheepvaartverkeer);  
Bovendien is de ontwikkeling van de verzilting van het kanaalwater in het nulalternatief (autonome ontwikkeling) een onbekende factor (de verzilting gaat mogelijk veranderen als gevolg van klimaatverandering). De autonome veranderingen spelen ook een rol bij de projectalternatieven;
- in relatie tot de verziltingeffecten op het kanaal zijn de effecten voor 2 natura 2000 gebieden (Westerschelde/ Canisvlietse Kreek) een van de meest onderscheidende milieueffecten voor de besluitvorming;
- in relatie tot de verzilting (de verandering daarvan) spelen landbouwkundige functies en functie van het kanaal als leverancier van industriewater een rol.

## 1.2 Vraagstelling

De hoofdvraag van de voorliggende studie is: modelleer de hoeveelheden waterafvoer in de volgende scenario's:

- wateroverschot (hoog water);
- droogte (laag water),

en vul deze modellering aan met een beschouwing over de gevolgen van de verschillende economische scenario's (Global Economy 2040 (GE\_40), Strong Europe 2040 (SE\_40 en Regional community (RC\_40)) op de

- uitwisseling van zoet en zout water;
- de doordringing van de zouttong in het kanaal.

Dit zal worden uitgewerkt voor de volgende project alternatieven die zijn bepaald voor de aanpassing/ verbetering van het sluiscomplex te Terneuzen (voor ontwerp, zie appendix 1):

- het nulalternatief (NUL);
- grote zeesluis (GZN);
- combisluis (CBS);
- kleine zeesluis (KZN).

1. Deze hoofdvraag kan worden opgesplitst in de volgende deelvragen:  
Beschrijving parameters (waterafvoer, verdroging, verzilting). Hierbij dient rekening te worden gehouden met:
  - effecten van klimaatverandering;
  - de gelaagdheid in het kanaal en de invloed van een andere verkeerssamenstelling die geschut wordt (grotere schepen, die de mate van menging veranderen);
  - het feit dat de ligging van de varianten (de bouw van een nieuwe of aangepaste sluis binnen het huidige sluiscomplex) nog niet bekend is;
2. maatregelen om ongewenste effecten tegen te gaan met een indicatie van de kosten;
3. een keuze voor een optimale oplossing vanuit het aspect oppervlaktewater;
4. leveren van een model om op een simpele wijze voor andere varianten binnen de geschetste bandbreedte voor verschillende economische scenario's uitspraken te doen over het aspect oppervlaktewater.

### 1.3 Aanpak van de studie

Royal Haskoning en Svašek hebben het oppervlaktewateronderzoek uitgevoerd in een gefaseerde aanpak:

- fase 1: startoverleg plan van aanpak en uitwerken startnota;
- fase 2: inventarisatie van relevante gegevens, om het parameteronderzoek te starten en analyse van bestaande kennis en middelen (inclusief bestaande modellen 2002);
- fase 3: parameteronderzoek, waarin voor verschillende alternatieven en afvoersituaties met een 3 dimensionaal model (FINEL model) het uitwisselingsproces bij de sluisen is onderzocht en met een eendimensionaal model (SOBEK model) de zoutindringing op het kanaal is bepaald;
- fase 4: onderzoek maatregelen en globale kosten;
- fase 5: uitwerken en oplevering modeltool; dit is een excel rekenblad, waarin de belangrijkste parameters, die de zoutindringing bepalen kunnen worden ingevoerd en waarmee de zoutindringing voor een stationair afvoerdebiet kan worden doorgerekend.

Het parameteronderzoek en de ontwikkeling van de modeltool (fase 2 tot en met 5), is uitgevoerd met de transport gegevens uit de verkenning van 2008 (Resultaten PROSIM kanaalsimulaties, aangeleverd als MS Excel bestand). Uit het parameteronderzoek zijn relaties afgeleid tussen de sluisafmetingen, hoeveelheid schuttingen, bovenafvoer enerzijds en de zoutindringing anderzijds.

Voor het opstellen van conclusies ten aanzien van de te verwachten zoutindringing voor de 3 sluisalternatieven en de verschillende economische scenario's zijn de in februari 2010 beschikbare scheepstransportgegevens gebruikt. Het doorrekenen van de zoutindringing voor de verschillende combinaties van sluisalternatieven en economische scenario's is uitgevoerd met de modeltool, die hiervoor is ontwikkeld.

Deze rapportage is een eindrapportage van de gehele studie.

### 1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is de huidige situatie beschreven en kort geanalyseerd. Begrip en inzicht in de huidige situatie, waar via de sluischuttingen in het huidige complex ook zoutindringing optreedt, is van belang voor de analyse van de parameters, die in hoofdstuk 3 aan de orde komt. In hoofdstuk 4 komen de maatregelen tegen zoutindringing aan de orde, waarna in hoofdstuk 5 het vereenvoudigde rekenmodel wordt beschreven. In hoofdstuk 6 zijn voor het jaar 2040 de alternatieven bij de beschouwde economische scenario's doorgerekend. In hoofdstuk 7 wordt in een slotbeschouwing conclusies getrokken uit de studie resultaten en wordt een analyse gepresenteerd welke vanuit het oogpunt van oppervlaktewater als optimale oplossing kan worden beschouwd.

## 2 BESCHOUWING HUIDIGE SITUATIE

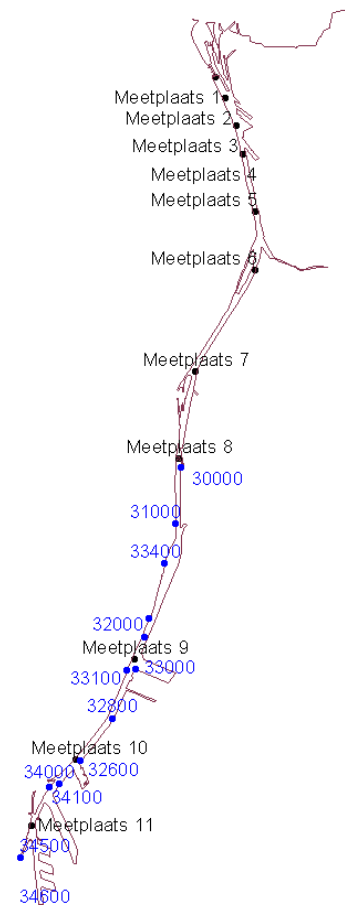
De problematiek van verzilting van het kanaal is een fenomeen dat reeds jarenlang aan de gang is. Ten gevolge van instroom van zout water uit de Westerschelde verhoogt de chlorideconcentratie in het kanaal nabij de sluis. Door allerlei processen (dichtheidsstroming, dispersie en advectie) verspreiden die chlorides zich stroomopwaarts het kanaal in de richting van de haven van Gent. Allerlei parameters hebben een invloed op deze verspreiding. (zie hiervoor ook de toelichting in paragraaf 2.2).

### 2.1 Korte weergave gegevens

Vele jaren is deze problematiek van verzilting bekend. Er worden dan ook sinds lange tijd metingen uitgevoerd naar de verspreiding van chlorides in het kanaal. Deze metingen gebeuren op een aantal vaste plaatsen zowel vlak bij de sluis als verspreid in de loop van het kanaal. Daarnaast worden geregeld ook metingen uitgevoerd op verschillende dieptes en plaatsen op het kanaal met een boot. Deze metingen geven telkens een beeld van de chlorideindringing in het kanaal op dat ogenblik. Verder worden door de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) op geregelde tijdstippen waterkwaliteitsmetingen uitgevoerd op verschillende meetpunten op het kanaal.

De ligging van de verschillende meetpunten is in bijgaande figuur weergegeven. De punten met naam Meetplaats 1 tot en met 11 zijn de meetpunten die reeds lang opgemeten worden. Daarnaast zijn de meetpunten van VMM aan Vlaamse zijde toegevoegd. Zij zijn herkenbaar aan het nummer tussen 30000 en 35000. Van de metingen van VMM zijn data beschikbaar gaande van 1989 tot 2009. De meetreeksen zijn echter niet voor alle punten met dezelfde regelmaat genomen en alle reeksen hebben verschillende leemtes.

Om een goed beeld te krijgen van de verschillende processen die een invloed hebben op de chloridegehalten worden in de volgende paragrafen de metingen op verschillende manieren gepresenteerd en besproken.



**Figuur 2.1: Overzicht kanaal met meetpunten**

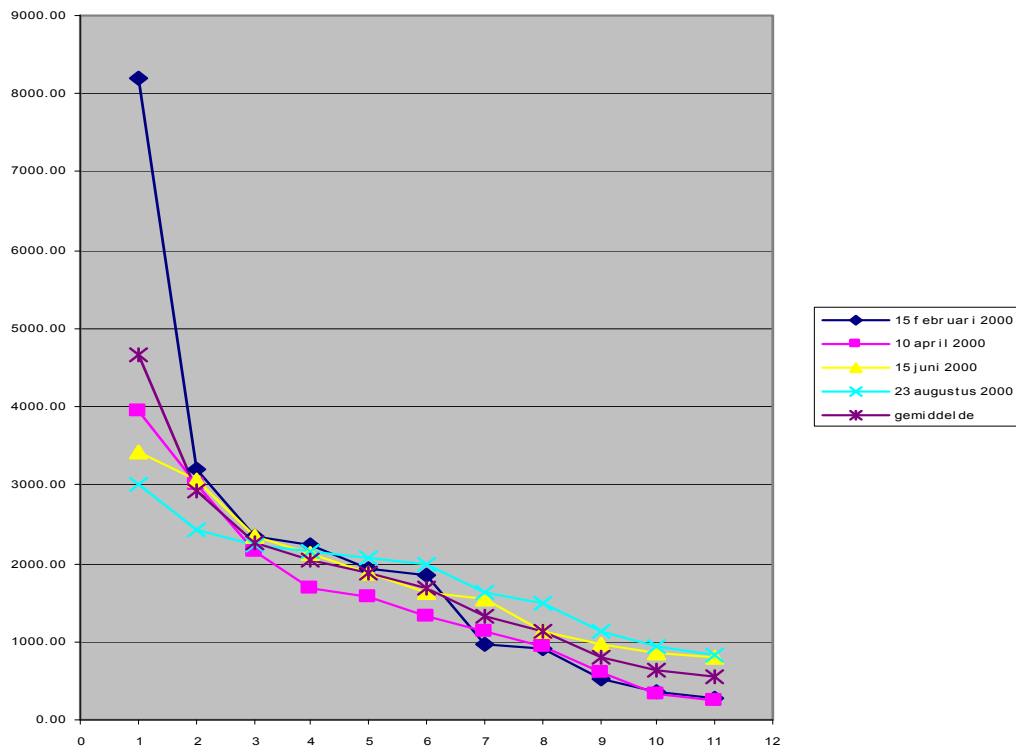


## 2.2 Zoutindringing

De zoutindringing wordt in de eerste plaats bepaald door de hoeveelheid zout dat via het sluisencomplex uitgewisseld wordt met het kanaal. Daarnaast zal het zout zich verder verspreiden in het kanaal. In het verdere vervolg van de bespreking zal vooral gebruik gemaakt worden van chlorideconcentraties. Zout uit zeewater bevat echter ook andere stoffen zoals sulfaten. Deze zullen evenzeer uitgewisseld en verspreid worden doordat ze in opgeloste vorm in het water voorkomen.

### Afstand

Een eerste analyse geeft een beeld van de zoutindringing in functie van de afstand tot de sluis. Hiervoor zijn de verschillende meetpunten (Chlorideconcentratie in mg/liter) uitgezet op een grafiek (figuur 2.2). Deze metingen zijn in 2000 uitgevoerd op verschillende tijdstippen in het jaar.

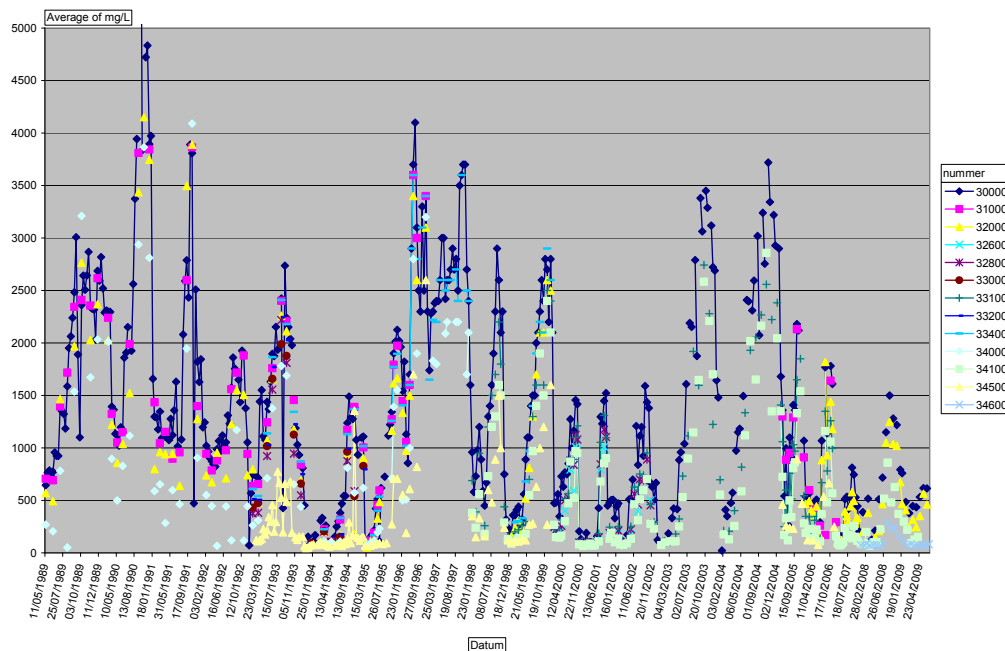


**Figuur 2.2: Chloridenconcentraties (mg/l, y-as) als functie van de meetpunten op het kanaal (meetplaats 1 t/m 11, zie fig 2.1) voor verschillende momenten in de tijd**

De grafiek toont een sterke variatie ter hoogte van de sluis zelf. Hier zullen invloeden ten gevolge van schuttingen een belangrijke impact hebben. De concentratie in februari is dusdanig hoog dat er bijvoorbeeld net geschut kan zijn, waardoor de meting niet representatief is voor de evenwichtssituatie van dat moment. Verder is er een duidelijke trend merkbaar in functie van de positie op het kanaal. De zoutindringing gebeurt stroomopwaarts terwijl er een continue toevoer is van zoet water uit Gent.

### Tijdsvariatie

Tegelijk wordt uit de voorgaande grafiek duidelijk dat er een variatie in functie van de tijd is. Bij de meetpunten dicht bij de sluis betekent dit een relatief groot verschil ten opzichte van de absolute concentraties. Deze variatie wordt nog duidelijker als we een langere tijdreeks bestuderen voor een aantal meetpunten. Onderstaande grafiek (figuur 2.3) geeft een beeld van een aantal meetpunten van 1989 tot 2009. De meetreeksen zijn niet volledig voor alle periodes van die tijdreeks, maar geven wel een goed algemeen beeld. De meetpunten zijn de Vlaamse meetpunten en hebben dus geen rechtstreekse invloed van het schutten zelf. Met andere woorden de waarden zijn evenwichtswaarden voor die periode.

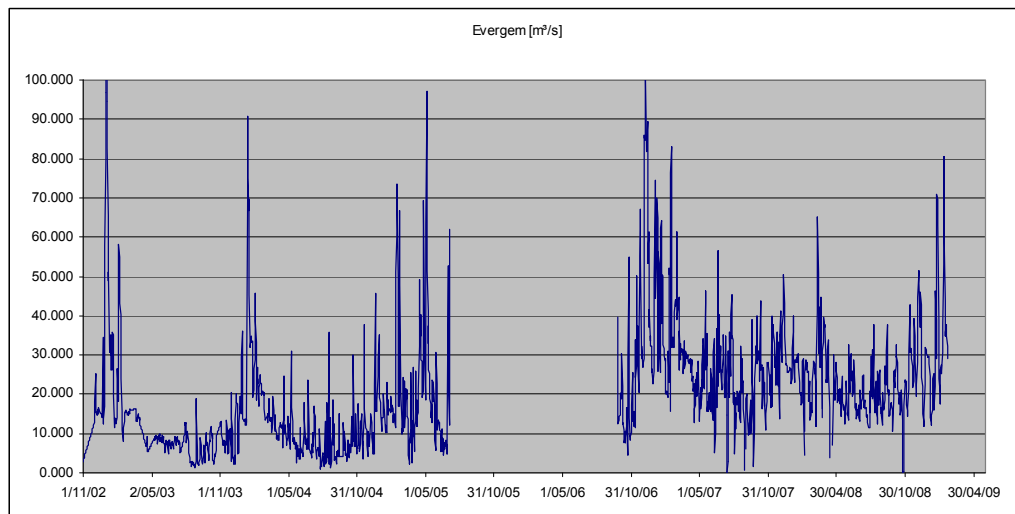


**Figuur 2.3: Chloridenconcentraties (mg/l, y-as) als functie van de tijd voor verschillende meetpunten**

Deze grafiek geeft aan dat de variatie in functie van de tijd van een veel grotere orde is dan de spatiële variatie uit de vorige grafiek. Een eerste vaststelling is dat de variatie sterk seizoensgebonden is. De chlorideconcentraties nemen in de winterperiodes bijna stelselmatig af tot waarden die in de maanden februari, maart een minimum behalen van veelal minder dan 100 mg/liter. Tijdens de zomermaanden is er een sterke toename van de chloridegehalten tot een concentratie die vele ordegrottes groter is. De maximale waarden worden typisch vastgesteld in het najaar (augustus tot oktober).

Een belangrijke vaststelling is dat de jaarlijkse maxima niet elk jaar even hoog liggen. Verschillen zijn zeer groot tussen bijvoorbeeld de laatste jaren 2007 tot 2009 en 2003 en 2004.

Deze verschillen kunnen worden gerelateerd aan de gemeten afvoerdebieten. De onderstaande grafiek (figuur 2.4) geeft een beeld van de afvoerdebieten ter hoogte van de stuw in Evergem (Gent) voor die bewuste periode (2002-2009). Naast de soms hoge pieken valt het op dat het basisdebiet tijdens de jaren 2003 en 2004 tijdens de zomermaanden terugvalt tot waarden onder de 10 m<sup>3</sup>/s. De gewenste afvoer van 13 m<sup>3</sup>/s gemiddeld over 2 maanden (traktaat) wordt dan ook niet gehaald. Na de onderbreking in de metingen wordt nog een variatie opgemerkt in de basisafvoer tussen zomer en winter, maar het basisdebiet tijdens de zomermaanden blijft ruim boven de 10 en veelal boven de 15 m<sup>3</sup>/s. Tijdens deze jaren wordt aan het traktaat dan ook ruim voldaan.



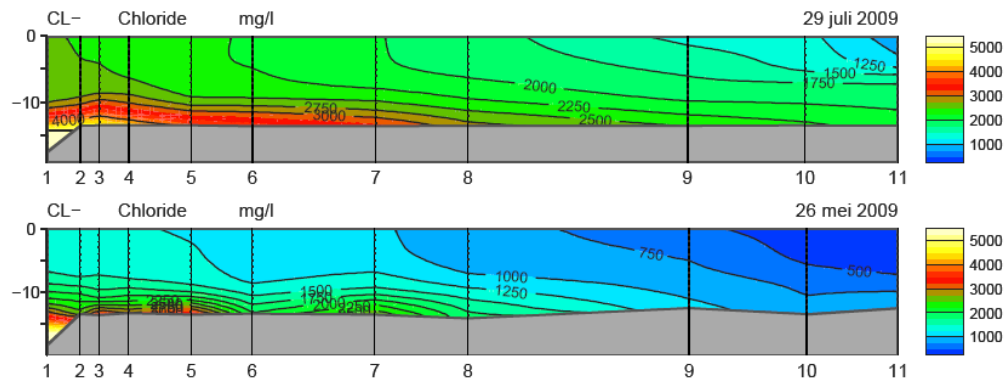
**Figuur 2.4: Debiet (in m<sup>3</sup>/s) bij Evergem van 2002 tot 2008**

Uit de vergelijking van beide grafieken kan vastgesteld worden dat de hoeveelheid afvoer vanuit Gent sturend is voor de chlorideconcentraties in het kanaal. De variatie in de afvoerdebieten wordt in eerste instantie gestuurd door de beschikbaarheid van water vanuit Gent. Het jaar 2003 is bijvoorbeeld gekend als een droog jaar met een zeer warme zomer. De laatste jaren waren weliswaar warm maar qua neerslag gematigd te noemen. Daarnaast is er ook een beleidsmatige sturing die een impact heeft. De laatste jaren wordt actief gewerkt om zoveel mogelijk water naar het kanaal Gent-Terneuzen te sturen terwijl er ook andere kanalen gevoed moeten worden. Door het voldoende aanbod en de prioritering is het resultaat een lagere concentratie.

Een volgende vaststelling is dat ondanks de extreem hoge concentraties die bijvoorbeeld in 2003 zijn gemeten, de concentratie in de daaropvolgende winter- en voorjaarsperiode terug sterk gezakt is. Deze vaststelling is in het verleden tevens gemaakt bij de oppervlaktewaterstudie van het kanaal (Becewa, 1983) in evoluties die daar gepresenteerd zijn is te zien dat op enkele maanden tijd de hoge concentraties volledig verdwenen kunnen zijn.

### Densiteitstroming

Dat densiteitstroming in de verspreiding een belangrijke rol kunnen spelen is een gekend fenomeen. In de metingen is dit tevens merkbaar bij de 2d-metingen die 2-maandelijks gebeuren. Onderstaand beeld (figuur 2.5) geeft die evolutie van mei en juli weer.



**Figuur 2.5: Voorbeeld van zoutindringing door dichtheidsverschil in juli/ mei**

Aan het begin van de drogere periode zal de concentratie eerst aan de bodem van het kanaal stijgen en pas later zal ook de concentratie aan het oppervlak volgen.

## 2.3 Effecten verzilting

De effecten van verzilting kunnen opgesplitst worden in primaire effecten door het water in het kanaal zelf en secundaire effecten via het grondwater.

### 2.3.1 Primaire effecten

#### Flora en fauna

In het kanaalwater is er een potentieel effect op de fauna en flora in het water. Door de artificiële vorm en functie (kunstmatig waterlichaam intensief gebruikt door scheepvaart) is de flora sowieso zeer beperkt. De grotere diepte, de steile oevers en de scheepvaart maken het kanaal niet geschikt voor standplaats voor planten. In de huidige situatie is er, vermoedelijk door de huidige waterkwaliteit, een zeer beperkt visbestand. Over het kanaal zelf is weinig gekend. Het visbestand dat in zijlopen (moervaart) of aan de stroomopwaartse zijde te Gent wordt vastgesteld is weinig divers en hoofdzakelijk sterk bestand tegen verontreiniging. Bijkomende verzilting zal dan ook vermoedelijk weinig impact hebben op de aquatische ecologie in het kanaal zelf.

#### Infrastructuur

Qua infrastructuur kan onderscheid gemaakt worden tussen elementen die in het kanaal aanwezig zijn en de lokale infrastructuur van bedrijven die kanaalwater gebruiken. Zowel beton- als staalconstructies kunnen een versnelde veroudering ondervinden ten gevolge van verhoogde chlorideconcentraties (en sulfaatconcentraties). Hierbij wordt gedacht aan zowel de constructies die deel uitmaken van de kademuuren als constructies die bedrijven zelf in het water aangebracht hebben.

In Vlaanderen wordt op verschillende plaatsen water uit het kanaal opgepompt. De belangrijkste hoeveelheden dienen als koelwater. Voor installaties wordt verzilting beschouwd als een verhoogde kans op corrosie. De meeste bedrijven hebben echter reeds maatregelen getroffen aangezien ze in de huidige situatie reeds geregeld geconfronteerd worden met hogere concentraties. Het water wordt slechts weinig tot niet meer gebruikt als proceswater.

De meeste schepen die van het kanaal gebruik maken zijn schepen die ook op de Westerschelde varen. Deze schepen zijn dan ook voorzien om in zilt of zout water te varen.

### 2.3.2 Secundaire effecten

Het kanaal staat via de bodem in contact met het grondwater. De aanwezige slibbodem zorgt voor een weerstand in dit proces. Het peil in het kanaal is constant over de volledige lengte. Het grondwaterpeil is echter variabel en neemt af in noordelijke richting. Hierdoor werkt het kanaal drainerend in het zuidelijke deel en infiltrerend in het noordelijke deel. Uit eerder onderzoek blijkt de grens tussen infiltratie en drainage ongeveer gelijk te lopen met de grens tussen België en Nederland. Hierdoor ontstaat er een verzilting van het grondwater aan Nederlandse zijde.

Verzilting van het kanaalwater kan hierdoor ook een verzilting van het grondwater induceren. Deze verzilting kan op zich een effect hebben afhankelijk van het landgebruik van de beïnvloede zone. Het grootste deel van de zone die onder invloed staat van het infiltrerende kanaalwater is in gebruik als landbouwgebied. Verzilting kan bij een ondiepe grondwaterstand leiden tot droogtestress bij de teelten. Hierdoor kan oogsterving optreden of dienen er extra maatregelen genomen te worden om dit tegen te gaan. Mogelijke maatregelen zijn beregening, toevoegen van additieven of alternatieve teelten.

In het invloedsgebied zijn ook enkele ecologische groene zones gelegen. De belangrijkste zone is het beschermd natuurgebied Canisvlietse Kreek. Verzilting kan hier tevens een effect hebben. De gevoeligheid van de vegetaties voor verzilting is echter variabel. Sommige vegetaties zijn bestand tegen licht brak water (zoals riet of oeverzegge) terwijl andere beschermde soorten zoals dottergrasland of glanshaver een grotere gevoeligheid vertonen. Onrechtstreeks kan ook de plas binnen het gebied Canisvlietse Kreek worden beïnvloed doordat deze door kwelwater wordt gevoed. In de beheersdoelstellingen van de Canisvlietse Kreek is gemeld dat men een licht brak karakter wenst te behouden.

## 2.4 Reeds toegepaste maatregelen en effecten

Aan de verschillende sluizen zijn nu reeds verschillende maatregelen toegepast om de zoutindringing tegen te gaan. Deze maatregelen bestaan uit bellenschermen (opbouw van een barrière met luchtballen om dichtheidsstromingen tegen te gaan of te vertragen). Verder is er aan de kanaalzijde een zoutvang aanwezig waar het zwaardere zoute water instroomt. De westsluis is uitgerust met spuirollen die langs de onderzijde verbonden zijn met zowel de sluis, de zoutvang als de Westerschelde. Op deze manier kan het zwaardere zoute water dat in de zoutvang opgevangen wordt teruggepompt worden naar de sluiskom of de Westerschelde.

De maatregelen en de effecten op de uitwisseling worden in hoofdstuk 3 en 4 uitgebreid besproken.

## 2.5 Doelstellingen Kaderrichtlijn Water

Doelstellingen vanuit de Kaderrichtlijn Water (KRW) zijn:

- GET Goede Ecologische Toestand, waarbij het chloridengehalte 300 mg/l is;
- GEP Goed Ecologische Potentieel, waarbij het chloridengehalte tussen 300 en 3.000 mg/l ligt.

Uit metingen blijkt dat het gemiddelde bij Sas van gent (meetplaats 7) over 2006-2008 is 724 mg/l dus voldoet aan de GET/GEP. Tussen Sas van Gent en Terneuzen zijn de chloridengehalten hoger. Er wordt waarschijnlijk dus niet over het gehele kanaaltraject voldaan aan de KRW-doelstellingen.

**Tabel 2.1: Overzicht huidige situatie en referentiewaarden M30 wateren aan de algemeen fysisch-chemische kwaliteitselementen**

Parameter	Eenheid	GET	GEP	Matig	Ontoereikend	Slecht	Huidig (2006 t/m 2008) Sas van Gent
Temperatuur	(° Celsius)	25	25	27,5	30	>30	22,7
Zuurstof	(%)	60-120	60-120	50-60 / 120-130	40-50 / 130-140	<40 / >140	60,2
Chloride	(mg/l)	300	300-3000	>3000 / 200-300	100-200	<100	724
pH		6,0-9,0	6,0-9,0	9,0-9,5 / <6,0	9,5-10,0	>10,0	7,74
Doorzicht	m	0,9	0,9	0,6	0,45	<0,45	1,13
P	(mg/l)	0,11	0,11	0,22	0,33	>0,33	0,59
N	(mg/l)	1,8	1,8	2,9	4,1	>4,1	7,05

### Legenda KRW-oordeel:

	voldoet aan GET/GEP
	voldoet niet aan GET/GEP; kwaliteitsoordeel matig
	voldoet niet aan GET/GEP; kwaliteitsoordeel ontoereikend
	voldoet niet aan GET/GEP; kwaliteitsoordeel slecht
n.u.	Vanwege ontbrekende gegevens of methodiek niet uitvoerbaar

## 2.6 Conclusies

De huidige chloridenconcentratie is afhankelijk van de locatie in het kanaal. De concentraties nemen af in de richting van Gent (stroomopwaarts). Verder is er een sterke variatie in de tijd. De seizoensvariatie is gerelateerd aan het afvoerdebiet. Tijdens de zomerperiode zal de chloridenconcentratie toenemen. Indien er een hoger basisdebiet gegarandeerd wordt, blijft de concentratie beperkter.

Verder blijkt het systeem een grote dynamiek te vertonen. Indien er tijdens de wintermaanden een groter debiet wordt afgevoerd, zorgt dit voor een zuivering van het kanaalwater. Dit effect verspreidt zich in enkele maanden tijd tot in Terneuzen.

### 3 PARAMETERONDERZOEK

#### 3.1 Algemeen / inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het parameteronderzoek weergegeven, dat er in feite op neerkomt dat het totale beeld van zoutindringing opnieuw wordt geëvalueerd en doorgerekend voor veranderde randvoorwaarden. De belangrijkste wijzigingen van randvoorwaarden ten opzichte van de reeds eerder uitgevoerde studie (Haskoning, 2002) zijn:

- zeespiegelrijzingsscenario's; het mogelijke effect van zeespiegelrijzing kwalitatief beoordeelt (paragraaf 3.5);
- veranderde aan- en afvoerdebieten vanuit het achterland (door bepaalde ontwikkelingen en door klimaatveranderingen);
- nieuwe sluisalternatieven (grote zeesluis, kleinere zeesluis of een binnenvaartsluis);
- andere (verwachte) vlootsamenstelling (grotere schepen, waardoor het mengproces mogelijk verandert en mogelijk meer schepen, die worden beschermd).

De nieuwe sluisalternatieven zijn gebaseerd op de uitwerking die voor de KBA is uitgevoerd. Hierin zijn voor de nieuw te realiseren sluisen de hoofdafmetingen en locaties bepaald (zie appendix 1). Voor de transportgegevens is geput uit de resultaten van de reeds uitgevoerde KBA, zoals aangegeven in de gegevensinventarisatie (Royal Haskoning, 2009). Dit betekent dat ook alleen voor deze alternatieven en economische scenario's een doorrekening is uitgevoerd.

Op basis van de resultaten en met behulp van de modeltool kunnen conclusies worden getrokken voor andere alternatieven (andere sluisafmetingen) en economische scenario's (die bijvoorbeeld meer schuttings opleveren).

#### 3.2 Interactie buitenwater – kanaal via sluis

##### 3.2.1 Inleiding

Ten behoeve van het ontwikkelen en kalibreren van de operationele tool worden eendimensionale modelberekeningen uitgevoerd van de gehele kanaalzone Gent-Terneuzen. Met behulp van het hydrostatische 1D-netwerkmodel SOBEK wordt onderzocht hoe de zoutlast op het kanaal ten gevolge van het schutten van schepen bij Terneuzen doorwerkt in de rest van de kanaalzone. De zeewaartse rand van dit SOBEK-model wordt voorzien van randvoorwaarden, die volgen uit gedetailleerde niet-hydrostatische simulaties van het sluisencomplex en de wijze waarop het sluisencomplex wordt gebruikt. De niet-hydrostatische berekeningen (inclusief dichtheidseffecten) zijn uitgevoerd met behulp van het simulatiepakket FINEL3D.

Voor alle bestaande sluisenheden en toekomstige sluisalternatieven bij Terneuzen zijn met FINEL3D elementaire simulaties gemaakt van de uitwisseling van zoet en zout water gedurende de schutting van schepen. Bij alle sluisgeometrieën is daarbij de buitenwaterstand op de Westerschelde gevarieerd.

Verder is voor de berekeningen van de Westsluis (de grootste bestaande sluisseenheid) het effect van een reeks maatregelen tegen verzilting bepaald door deze maatregelen mee te nemen in de simulaties. Met behulp van de uit de simulaties resulterende zoutlasten is tenslotte een zeewaartse randvoorwaarde voor het SOBEK-model samengesteld.

In deze paragraaf worden de opzet van de FINEL3D-berekeningen en de resultaten daarvan beschreven.

### 3.2.2 Achtergronden van FINEL3D

FINEL3D is een pakket op basis van de Finite Element Method (FEM), dat binnen Svašek Hydraulics is ontstaan en momenteel vanuit de TU-Delft wordt doorontwikkeld door oud-werknemer dr.ir. R.J. Labeur. Het model simuleert in twee of drie dimensies de volledige onsamendrukbare Navier-Stokesvergelijkingen, en bevat daarnaast vele opties voor het simuleren van dichtheidsstromingen, verspreiding van zout en warmte, turbulentie en het transport van sediment en andere meegevoerde stoffen. In de onderhavige berekeningen is gebruik gemaakt van de zouttransportmodule en het simuleren van dichtheidseffecten (onder aanname van de Boussinesq-hypothese). Hiermee kan voor relatief kleine fluctuaties in zoutgehalte (typisch voor oppervlaktewaterstromingen) de uitwisseling van zoet en zout water tussen het kanaal en het sluisencomplex worden onderzocht.

In dit project is gebruik gemaakt van de meest recente versie van FINEL3D (oktober 2009). FINEL3D maakt gebruik van een rekenrooster van driehoek- of tetraëderwormige elementen en een impliciete tijdsintegratie. De hoofdvariabelen van het model (piëzometrisch niveau, driedimensionale stroomsnelheden, zoutconcentratie en dichtheid) zijn gedefinieerd op de knooppunten van het rekenrooster.

Een belangrijke beperking van het model is momenteel het feit dat FINEL3D nog niet kan draaien op een parallel rekencluster, hetgeen beperkingen oplegt aan de grootte van het rekenrooster en de resolutie. Om de doorlooptijd van de berekeningen niet uit de hand te laten lopen, maar niettemin wel de vereiste resolutie voor gedetailleerde zoet-zoutstromingen te behalen, zijn de sluis simulaties in dit project uitgevoerd in het verticale vlak. Er is dus sprake van een 2DV-model (niet-hydrostatisch). Voor de beschouwde sluisgeometrieën is deze vereenvoudiging gerechtvaardigd en leidt tot inzichtelijke resultaten.

Een gemiddelde berekening in dit project maakt gebruik van een rekenrooster van ongeveer 120.000 driehoekselementen en 60.000 knooppunten. In horizontale en verticale richting is de resolutie gelijk gekozen, met een gemiddelde roosterwijdte van ongeveer 0,7 m. De berekeningen hadden gemiddeld een doorlooptijd van ongeveer 5 uur, gedurende welke tijd een modeltijdsduur van 50 minuten werd gesimuleerd.

Alle achtergrondinformatie over FINEL3D is te vinden in het proefschrift van R.J. Labeur (Labeur, 2009).



### 3.2.3 Context simulaties; scenario's en sluisalternatieven

De uitgevoerde simulaties hebben betrekking op een elementaire gebeurtenis in de cyclus van een schutsluis voor zeeschepen, namelijk: het binnendringen van een zoutwater-uitwisselingsstroom in een zoetwater-kanaalpand, nadat de binnensluisdeur van de sluis is geopend. Dit proces is gesimuleerd voor alle bestaande sluisen en geprojecteerde sluisalternatieven. De totale voorraad zout water in de sluiskolk, het dichtheidsverschil, de geometrie van de sluis en de eventuele aanwezigheid van mitigerende maatregelen (zoals omloopriolen of bellenschermen) bepalen de grootte van de zoutlast die op het kanaal terecht komt, alsmede het tempo waarin dit proces plaatsvindt.

In het geval van het Kanaal Gent-Terneuzen doet zich de bijzondere omstandigheid voor dat het binnenwater bijna altijd hoger staat dan het buitenwater. Het kanaalpeil ligt gemiddeld op 2,13 m boven NAP, terwijl het getij op de Westerschelde grosso modo varieert tussen NAP -2 en +2 m. Deze situatie maakt het mogelijk om vanuit het kanaal enige tegendruk te bieden aan de binnenkomen zoutlast. Bovendien wordt het waterpeil in de sluiskolk bij elke schutcyclus genivelleerd tot kanaalpeil gebruikmakend van zoet kanaalwater. Bij schutting in zeewaartse richting gaat dit zoete water "verloren". Bij opening van de (zeewaartse) buitensluisdeur vertoont de sluiskolk de neiging om zich tot op zeeniveau volledig te vullen met zout water (zie ook Royal Haskoning, 2002). De vraag hoeveel zout uiteindelijk in het kanaal terechtkomt, wordt dus vooral bepaald door de uitwisselingsstroming bij opening van de binnendeur naar het kanaal. De FINEL3D-simulaties zijn geconcentreerd op dit proces.

Op dit moment bestaat het sluisencomplex bij Terneuzen uit drie eenheden: de Oostsluis, de Middensluis en de Westsluis. Voor elk van de drie bestaande sluisseenheden bij Terneuzen is een apart modelgebied met rekenrooster gedefinieerd, gebaseerd op een 2DV-schematisatie van de huidige sluisgeometrieën. Deze gegevens zijn ontleend aan Royal Haskoning (2002). Op dezelfde wijze is een rekendomein gedefinieerd voor twee geprojecteerde sluisalternatieven, die in de plaats zouden kunnen komen van de huidige Middensluis: de Nieuwe Grote Zeesluis (GZN) en de Combisluis (CBS). De voorlopige afmetingen van deze nieuwe sluisen ten behoeve van de 3D-simulaties zijn ontleend aan globale informatie van Royal Haskoning (2009) en Arcadis (2007). Tabel 3.1 bevat een aantal kentallen die bepalend zijn voor de geometrie van de vijf besproken sluisseenheden.

**Tabel 3.1: Afmetingen van de drie bestaande en de twee geplande sluisseenheden**

Grootheid	Oostsluis	Middensluis	Westsluis	GZN	CBS
Lengte sluiskolk	260 m	140 m	290 m	427 m	380 m
Breedte sluiskolk	24 m	24,5 m	40 m	58 m	28 m
Bodemligging sluiskolk (t.o.v. NAP)	-7,00 m	-7,50 m	-12,82 m	-17,50 m	-11,30 m
Bodemligging kanaal (t.o.v. NAP)	-2,62 m	-6,65 m	-11,37 m	-11,37 m	-11,37 m
Waterstand kanaal (t.o.v. NAP)	+2,13 m	+2,13 m	+2,13 m	+2,13 m	+2,13 m

Deze sluisenheden kunnen met elkaar worden gecombineerd in diverse economische scenario's, die bepalend zijn voor de hoeveelheid geschutte schepen en daarmee voor de totale jaarlijkse zoutlast op het kanaal. Met het FINEL3D model zijn de volgende drie combinaties van projectalternatieven en economische scenario's beschouwd: NUL\_GE40, GZN\_GE40 en CBS\_GE40 (zie tabel 3.2 voor een toelichting).

**Tabel 3.2: Gebruik schutsluizen in de verschillende economische scenario's**

Alternatief/ scenario (afkorting)	NUL_GE40	GZN_GE40	CBS_GE40
Economisch scenario/ jaar	Global Economy 2040	Global Economy 2040	Global Economy 2040
Projectalternatief	Nulalternatief	Grote Zeesluis Nieuw	Diepe Binnensluis
<b>Sluizen in gebruik</b>			
Oostsluis	Ja	Ja	Ja
Aantal schuttingen (zuidwaarts) per jaar	6453	6386	6235
Middensluis	Ja	Nee	Nee
Aantal schuttingen (zuidwaarts) per jaar	3245		
Westsluis	Ja	Ja	Ja
Aantal schuttingen (zuidwaarts) per jaar	3843	4306	4056
GZN	Nee	Ja	Nee
Aantal schuttingen (zuidwaarts) per jaar		3063	
CBS	Nee	Nee	Ja
Aantal schuttingen (zuidwaarts) per jaar			3968

In het nulalternatief worden dus de drie bestaande sluizen gehandhaafd. In de overige twee alternatieven wordt de Middensluis vervangen door hetzij de Nieuwe Grote Zeesluis, hetzij de Combisluis. Het aantal schuttingen van schepen van de Westerschelde naar het kanaal (zuidwaarts) is gegeven per projectalternatief/ economisch scenario voor ieder sluisstype. De totale hoeveelheid schutcyclus is mede bepalend voor de jaarlijkse zoutlast.

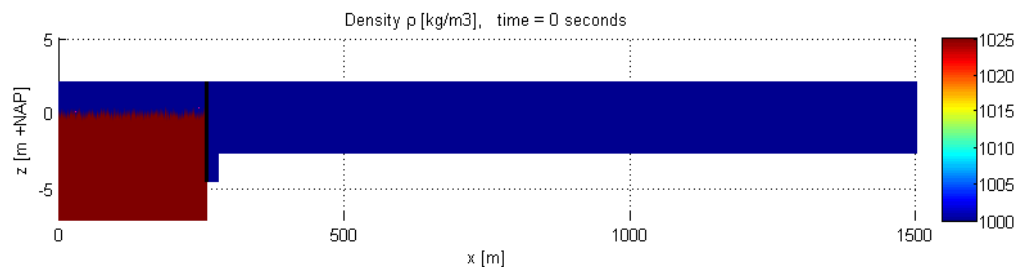
### 3.2.4 Modelopzet, overzicht invoer en randvoorwaarden

Voor alle vijf sluisstypes zijn drie basisberekeningen gemaakt, die het binnendringen van zout in het kanaal simuleren voor drie verschillende buitenwaterstanden, zonder aanvullende mitigerende maatregelen tegen zoutindringing. Daarnaast is voor de Westsluis, de grootste huidige sluis, een reeks variaties gesimuleerd die de zoutlast berekenen als functie van de geometrie, het dichtheidsverschil en eventuele reducerende maatregelen. In alle simulaties is er van uitgegaan dat de sluiscolk alleen gevuld is met water, er is geen rekening gehouden met de vulling van de sluiscolk met schepen, waardoor in feite minder watervolume uitwisselt met het kanaal.

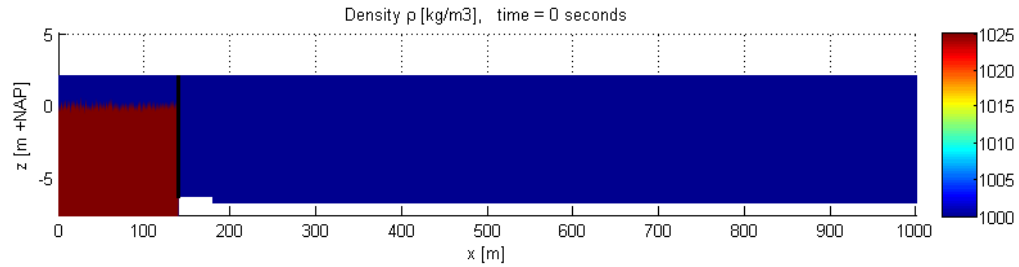
Tabel 3.3 geeft een overzicht van de 37 uitgevoerde berekeningen in FINEL3D, verdeeld over 11 series. Een beeld van de sluisgeometrieën in het verticale vlak (lokaal assenstelsel) wordt gegeven in Figuur 3.1a t/m 3.1h.

**Tabel 3.3: Overzicht uitgevoerde sluissimulaties in FINEL3D**

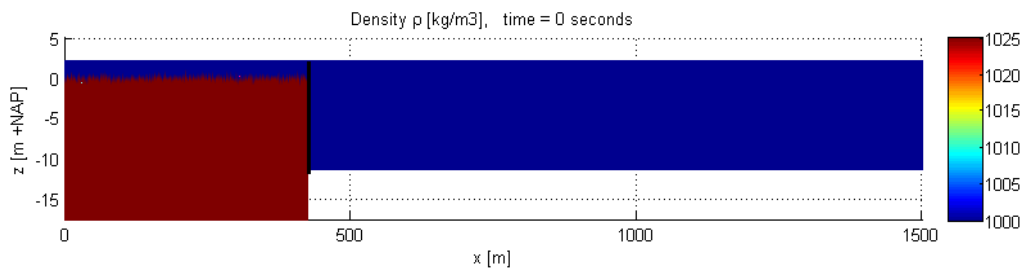
Serie no.	Simulatie no.	Omschrijving
1	1 t/m 3	Oostsluis, basissimulaties. Ontwikkeling zoutlast op het kanaal voor drie buitenwaterstanden: (1) NAP -2 m, (2) NAP, (3) NAP +2 m
2	4 t/m 6	Middensluis, basissimulaties. Ontwikkeling zoutlast op het kanaal voor drie buitenwaterstanden: (4) NAP -2 m, (5) NAP, (6) NAP +2 m
3	7 t/m 9	GZN (in ontwerp), basissimulaties. Ontwikkeling zoutlast voor drie buitenwaterstanden: (7) NAP -2 m, (8) NAP, (9) NAP +2 m
4	10 t/m 12	CBS (in ontwerp), basissimulaties. Ontwikkeling zoutlast voor drie buitenwaterstanden: (10) NAP -2 m, (11) NAP, (12) NAP +2 m
5	13 t/m 15	Westsluis, basissimulaties. Zoutvang aan kanaalzijde sluis. Ontwikkeling zoutlast voor drie buitenwaterstanden: (13) NAP -2 m, (14) NAP, (15) NAP +2 m
6	16 t/m 18	Westsluis, variatie #1: géén zoutvang aan kanaalzijde sluis. Ontwikkeling zoutlast voor drie buitenwaterstanden: (16) NAP -2 m, (17) NAP, (18) NAP +2 m
7	19 t/m 23	Westsluis, variatie #2: geen zoutvang aan kanaalzijde. Variabele zoutwaterdichtheid: 1025 kg/m <sup>3</sup> (19), resp. 1020, 1015, 1010 en 1005 kg/m <sup>3</sup> (20 t/m 23). Alleen bij buitenwaterstand gelijk aan NAP
8	24 t/m 28	Westsluis, variatie #3: geen zoutvang aan kanaalzijde. Variabele zoutwaterdichtheid: 1025 kg/m <sup>3</sup> (24), resp. 1020, 1015, 1010 en 1005 kg/m <sup>3</sup> (25 t/m 28). Alleen bij NAP. Ingrep: waterjet (Q = 2 m <sup>2</sup> /s)
9	29 t/m 31	Westsluis, variatie #4: wel zoutvang aan kanaalzijde. Omloopriool van variabele diameter: 1 m (29), 2 m (30), 4 m (31). Alleen bij NAP
10	32 t/m 33	Westsluis, variatie #5: geen zoutvang. Omloopriool met diameter 1 m, met nauwe aanstroomopening (32) of met trechtersvormige aanstroomopening (33). Alleen bij NAP
11	34 t/m 37	Westsluis, variatie #6: geen zoutvang. Omloopriool met diameter 1 m met nauwe aanstroomopening. Variatie sterkte waterjet: Q = 2 m <sup>2</sup> /s (34), resp. 1, 0,5 en 0,25 m <sup>2</sup> /s (35 t/m 37). Alleen bij NAP



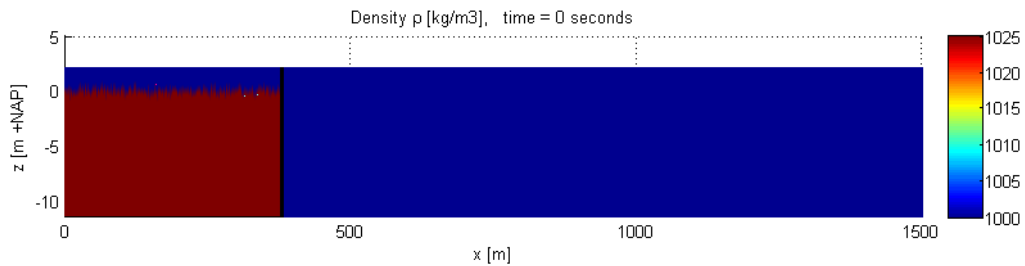
**Figuur 3.1a: Oostsluis, geometrie en initiële dichtheid (rood = zout, blauw = zoet)  
Toegepast bij Serie 1**



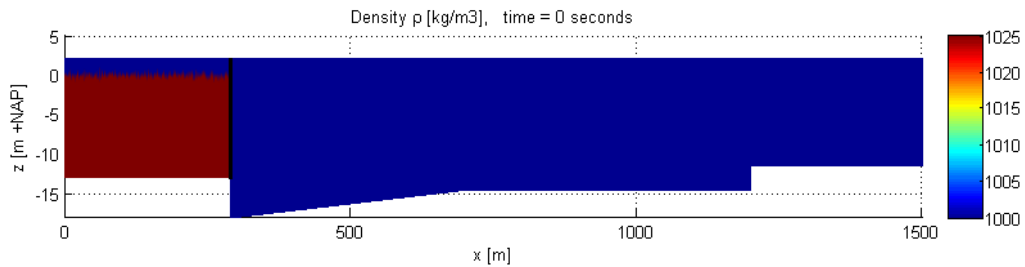
**Figuur 3.1b: Midden, geometrie en initiële dichtheid (rood = zout, blauw = zoet)**  
Toegepast bij Serie 2



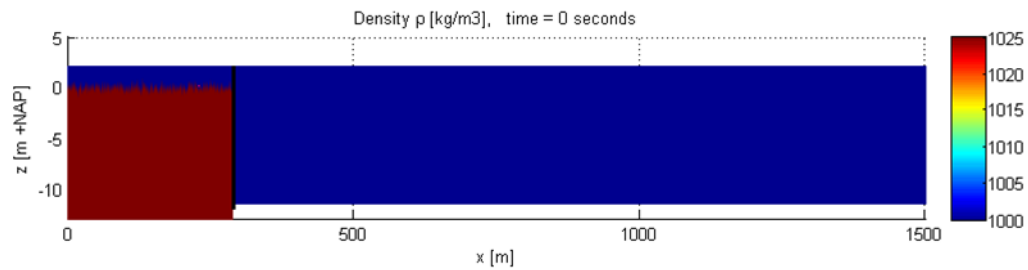
**Figuur 3.1c: GZN, geometrie en initiële dichtheid (rood = zout, blauw = zoet)**  
Toegepast bij Serie 3. Gedeelte 0 tot 400 = sluiscolk, 400 en verder = kanaal



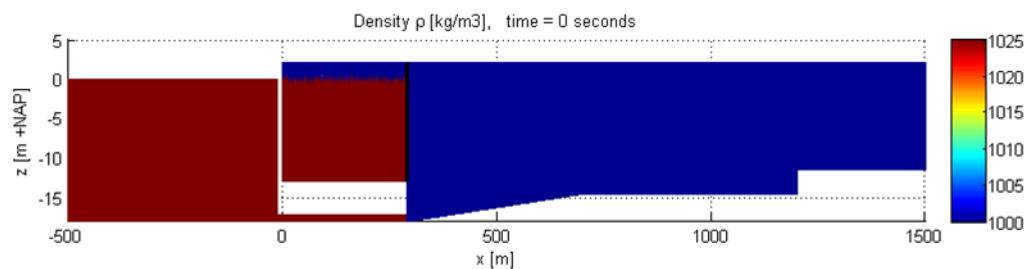
**Figuur 3.1d: CBS, geometrie en initiële dichtheid (rood = zout, blauw = zoet)**  
Toegepast bij Serie 4. Gedeelte 0 tot 300 = sluiscolk, 300 en verder = kanaal



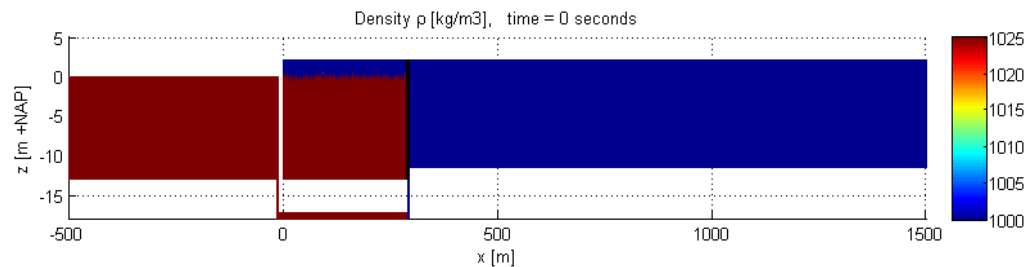
**Figuur 3.1e: Westsluis, geometrie en initiële dichtheid (rood = zout, blauw = zoet)**  
Toegepast bij Serie 5. Gedeelte 0 tot 300 = sluiscolk, 300 en verder = kanaal



**Figuur 3.1f: Westsluis, geometrie en initiële dichtheid (rood = zout, blauw = zoet)**  
Toegepast bij Serie 6, 7 en 8. Gedeelte 0 tot 300 = sluiscolk, 300 en verder = kanaal



**Figuur 3.1g: Westsluis, geometrie en initiële dichtheid (rood = zout, blauw = zoet)**  
Toegepast bij Serie 9. Gedeelte -500 tot 0 = Westerschelde zijde, 0 tot 300 = sluiscolk, 300 en verder = kanaal



**Figuur 3.1h: Westsluis, geometrie en initiële dichtheid (rood = zout, blauw = zoet)**  
Toegepast bij Serie 10 en 11. Gedeelte -500 tot 0 = Westerschelde zijde, 0 tot 300 = sluiscolk, 300 en verder = kanaal

Ieder rekenrooster heeft een lengte van 1500 meter, behalve het rooster van de Middensluis dat een lengte van 1000 meter heeft. De figuren 1a t/m 1h tonen de initiële waterdichtheid op  $t = 0$ . Aan de figuurassen is te zien dat de verticale schaal overdreven is ten opzichte van de horizontale. Verder opvallende zaken zijn de drempel in de Middensluis (Figuur 3.1b), de zoutvang in de Wegsluis (Figuur 3.1e) en de omloopriolen in Figuur 3.1g en 3.1h.

Iedere sluiskolk (linkerkant figuur) is gevuld met zout water (rood) tot op het niveau van de buitenwaterstand. Vervolgens is het sluiskolkniveau genivelleerd tot op kanaalniveau met behulp van zoet water (blauw) uit het kanaal (stroming via horizontale omloopriolen). Hierbij wordt aangenomen dat dit zoete nivelleringswater (nog) niet gemengd is met de zoute onderlaag.

Op het tijdstip  $t = 0$  wordt de binnensluisdeur (zwarte verticale streep tussen sluiskolk en kanaalpand) geopend, waarna onder invloed van het dichtheidsverschil een uitwisselingsstroming op gang komt.

In alle berekeningen wordt aan het bovenstroomse eind van het kanaalpand (rechts) de waterstand NAP +2,13 m vastgelegd. Langs de bovenrand van het model gelden de standaardrandvoorwaarden voor vrij beweegbare oppervlakken (inclusief de beweegbaarheid van het rekengrid). Langs de bodem en de zijwanden van de sluiskolk gelden de standaardrandvoorwaarden voor een gesloten wand in de stroming, inclusief het effect van wandwrijving t.g.v. de hydraulische ruwheid. In de gevallen met omloopriool (Figuur 3.1g en 3.1h) is tevens een stuk buitenwater (Westerschelde) meegenomen. In deze gevallen is de waterstand op de open zeerand (links) eveneens vastgelegd, inclusief een randvoorwaarde voor de zoutconcentratie (gedurende instroom).

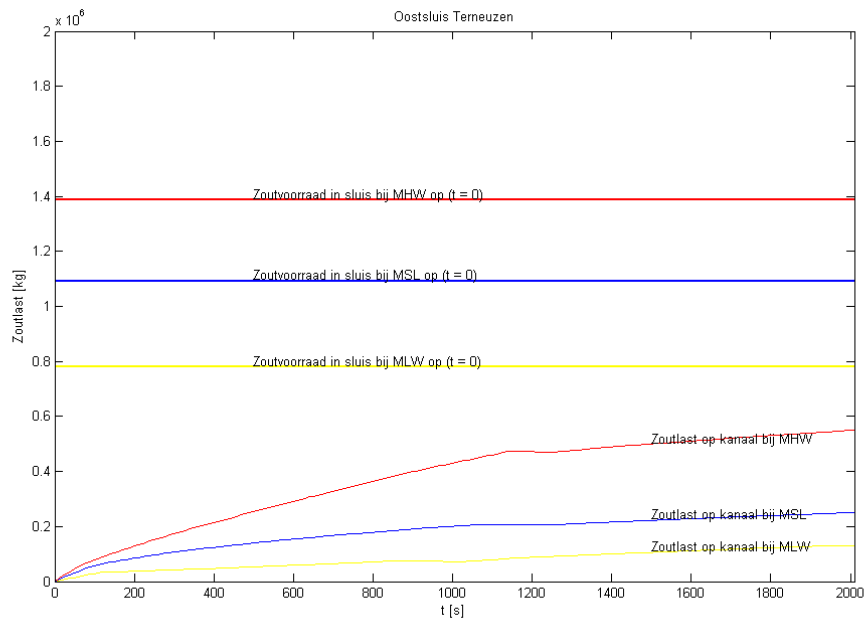
In Tabel 3.4 staat nog een aantal relevante modelparameters weergegeven, die voor alle 37 simulaties gelijk zijn.

**Tabel 3.4: Enige modelparameters**

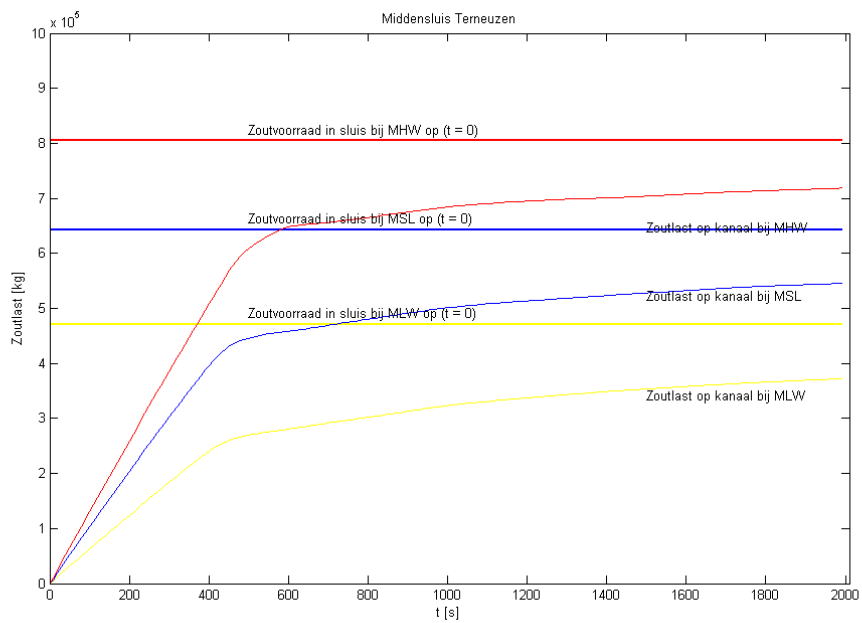
Symbool	Omschrijving en eenheid	Waarde
$\theta$	Impliciteitsfactor [-]	1.0 (Euler-Impliciet)
$\Delta t$	Tijdstap [s]	1.0
$T_s$	Simulatieuur [s]	3000.0
$\nu_{eddy}$	Turbulentie(eddy)viscositeit [ $m^2/s$ ]	0.005
$k_{Nik}$	Hydraulische Nikuradse-ruwheid [m]	0.02
$\sigma$	Prandtl-Schmidtgetal [-] (= verhouding zout-diffusiviteit en eddyviscositeit)	1.0
$Q_{jet}$	Intensiteit waterjet (diverse simulaties) per eenheid van breedte [ $m^2/s$ ]	2.0 (simulatie no. 24 t/m 28 en 34), 1.0 (35), 0.5 (36), 0.25 (37)
$U_{jet}$	Impuls waterjet (diverse simulaties) [m/s]	2.0 (simulatie no. 24 t/m 28 en 34 t/m 37)

### 3.2.5 Resultaten; elementaire zoutlast op kanaal als functie van de tijd

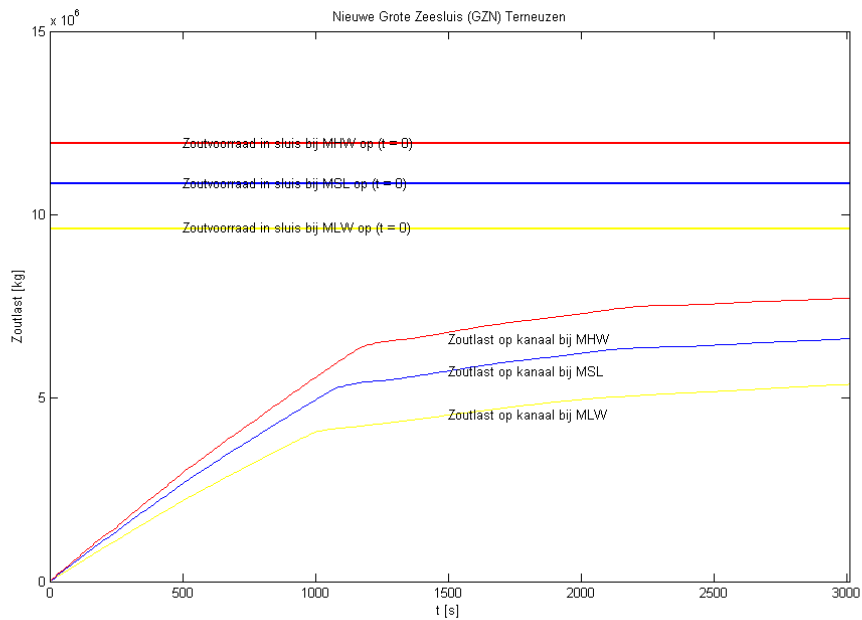
In deze paragraaf worden de resultaten van de 37 gedefinieerde simulaties per serie besproken. Hierbij ligt de nadruk op de totale hoeveelheid zout (in kg) als functie van de tijd die zich in het kanaalpand rechts van de binnensluisdeur bevindt. Deze hoeveelheid is afhankelijk van de snelheid waarmee de sluisinhoud wordt uitgewisseld en tevens van de sluisgeometrie. De aanwezigheid van een drempel of bodemverhoging op de grens tussen sluiskolk en kanaal leidt er in een aantal gevallen toe dat een gedeelte van het zout (de onderlaag) altijd in de sluiskolk achterblijft. De figuren 3.2a t/m 3.2k tonen voor alle simulaties, geordend per serie, het tijdsverloop van de zoutlast (in kg) op het kanaal. Ter vergelijking is per simulatie ook de totale initiële zoutvoorraad in de sluiskolk aangegeven (eveneens in kg).



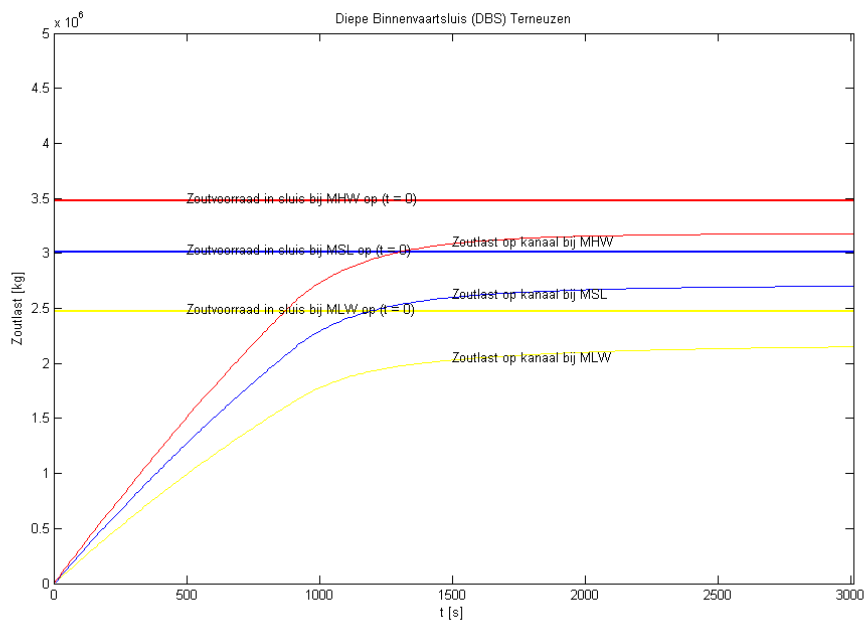
**Figuur 3.2a: Serie 1, simulaties 1-3. Resultaten Oostsluis (basis) bij 3 buitenwaterstanden**



**Figuur 3.2b: Serie 2, simulaties 4-6. Resultaten Middensluis (basis) bij 3 buitenwaterstanden**

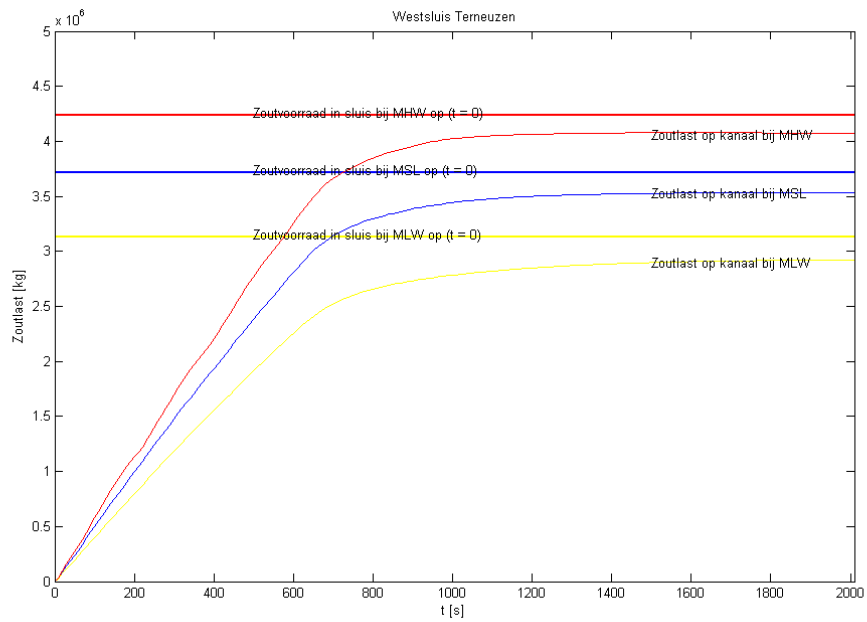


**Figuur 3.2c: Serie 3, simulaties 7-9. Resultaten GZN (basis) bij 3 buitenwaterstanden**

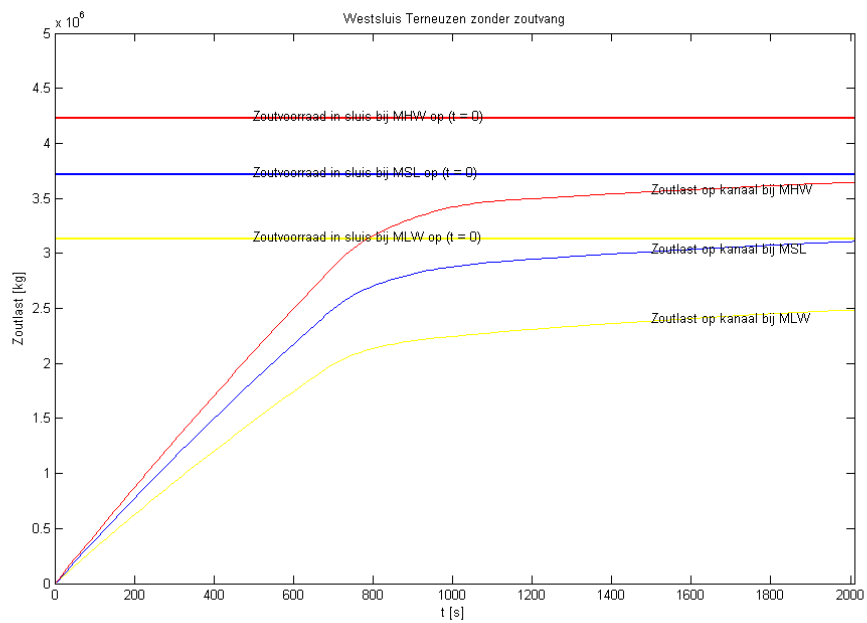


**Figuur 3.2d: Serie 4, simulaties 10-12. Resultaten CBS (basis) bij 3 buitenwaterstanden**

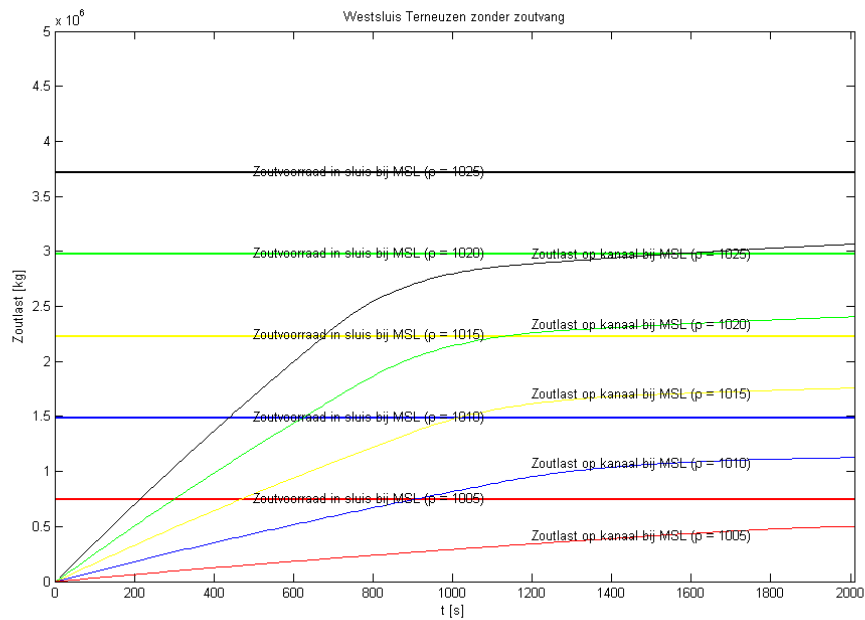




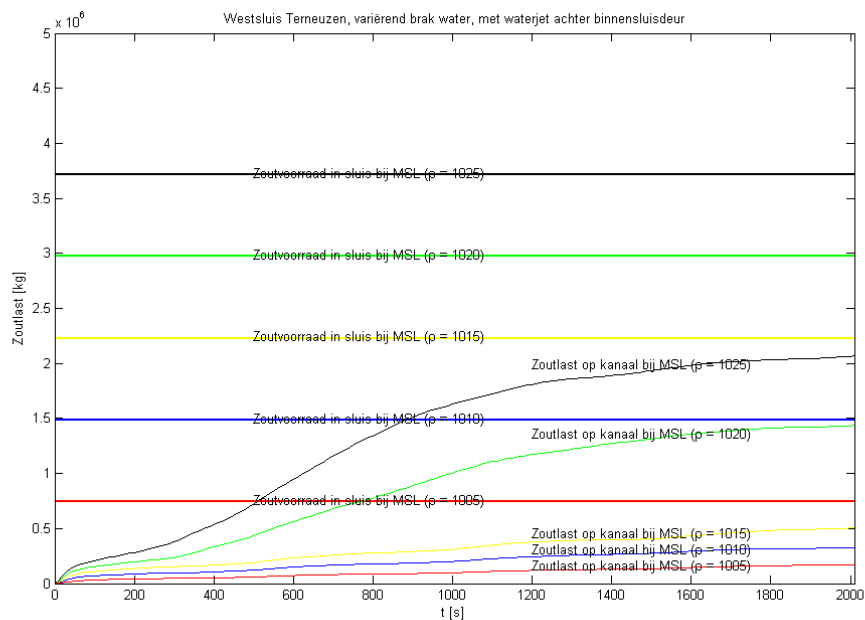
**Figuur 3.2e: Serie 5, simulaties 13-15. Resultaten Westsluis (basis) bij 3 buitenwaterstanden**



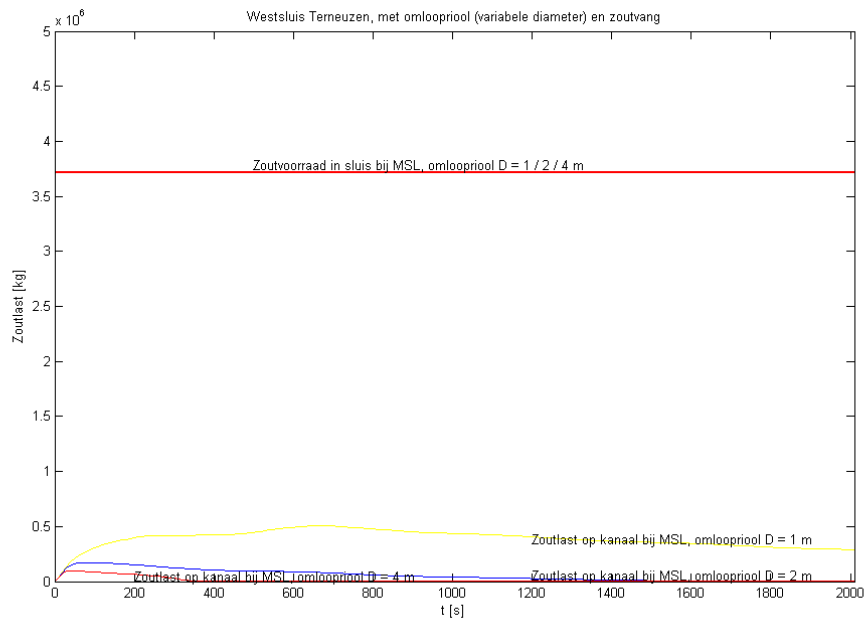
**Figuur 3.2f: Serie, simulaties 16-18. Resultaten Westsluis (zonder zoutvang) bij 3 buitenwaterstanden**



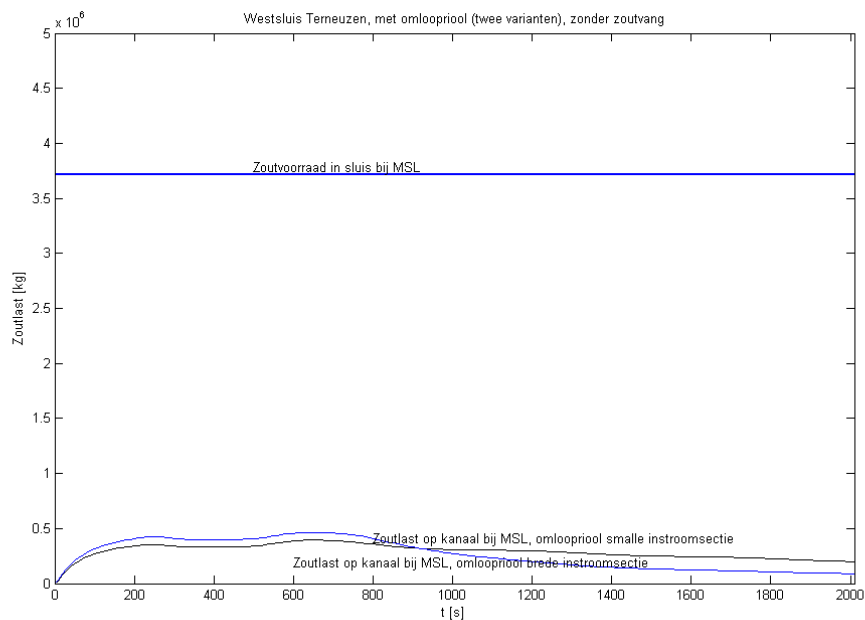
**Figuur 3.2g: Serie 7, simulaties 19-23. Resultaten Westsluis (zonder zoutvang, variabele dichtheid) bij buitenwaterstand op NAP**



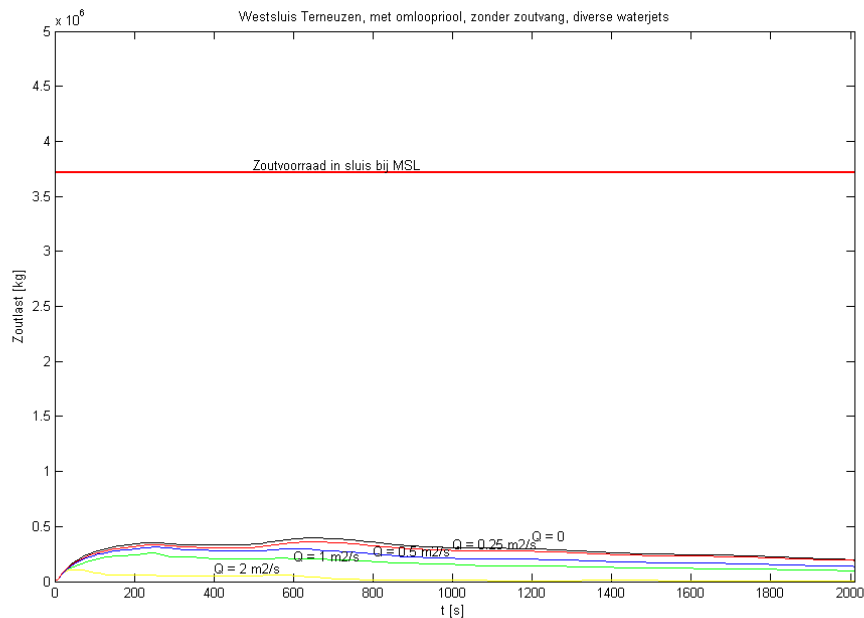
**Figuur 3.2h: Serie 8, simulaties 24-28. Resultaten Westsluis (zonder zoutvang, variabele dichtheid, met waterjet) bij buitenwaterstand op NAP**



**Figuur 3.2i: Serie 9, simulaties 29-31. Resultaten Westsluis (met zoutvang, met omloopriool) bij buitenwaterstand op NAP**



**Figuur 3.2j: Serie 10, simulaties 32-33. Resultaten Westsluis (zonder zoutvang, met omloopriool) bij buitenwaterstand op NAP**



**Figuur 3.2k: Serie 11, simulaties 34-37 (plus no. 32 ter vergelijking). Resultaten Westsluis (zonder zoutvang, met omloopriool, waterjet met variabele sterkte) bij buitenwaterstand op NAP**

De figuren 3.2a t/m 3.2e (series 1 t/m 5) tonen voor drie buitenwaterstanden (NAP -2, 0 of +2 m) de basistoestand voor elk van de vijf beschouwde sluisen, in het geval dat er geen enkele reducerende maatregel aanwezig is.

In alle gevallen is te zien dat de uitwisseling van zout initieel nagenoeg lineair verloopt (een rechte lijn door de oorsprong) en grofweg evenredig is met de totale voorraad zout in de sluis, die op zijn beurt weer lineair afhankelijk is met de buitenwaterstand. Verder valt op dat in drie gevallen (Westsluis, Middensluis en CBS) de zoutlast op het kanaal na verloop van tijd nadert tot de limiet van de totale zoutvoorraad die in de sluis aanwezig was. Dit duidt erop dat, evenals het geval is aan de zeezijde, ook aan de kanaalzijde van de sluis de sluisinhoud *in zijn geheel* uitwisselt met het kanaal. In twee gevallen echter (Oostsluis en GZN) blijft er in de eindlimiet een fors verschil bestaan tussen de zoutvoorraad in de sluis en de zoutlast op het kanaal. Dit verschil is eenvoudig verklaarbaar uit het feit dat in deze sluisgeometrieën een fors hoogteverschil aanwezig is tussen sluisbodem en kanaalbodem. Weliswaar is in de Middensluis eveneens een lage drempel aanwezig, maar de horizontale impuls van de zoutuitwisseling is hier dusdanig groot dat de zouttong gewoon over die drempel heen “springt”.

Figuur 3.2f laat de Westsluis nogmaals zien, ditmaal met gedempte zoutvang (en dus een ondieper kanaalpand). In vergelijking met Figuur 3.2e (serie 5) is het opvallend dat in serie 6 de initiële uitwisselingssnelheid van het zout ongeveer 20% lager is, terwijl in de eindlimiet een circa 10% lagere zoutlast op het kanaal wordt bereikt. Dit is toe te schrijven aan de afwezigheid van het versnellende effect van de kuil die een zoutvang in feite is.

Doordat het water in serie 5 een grote horizontale impuls meekrijgt zodra het in de zoutvang valt, wordt de sluiskolk qua zout veel grondiger leeggetrokken dan in serie 6. De verschillen tussen de series 5 en 6 zijn anderzijds niet heel significant voor de praktijk; de reductie van de zoutlast beslaat slechts 10%. Serie 6 toont wel aan dat de aanwezigheid van een zoutvang *op zichzelf* geen enkel nut heeft. Slechts in combinatie met een andere maatregel dit het opgehoopte zout weer verwijdert (zoals een omloopriool) krijgt de aanleg van een zoutvang zin.

Uit Figuur 3.2g (serie 7) kan worden opgemaakt dat de snelheid van uitwisseling en ook de uiteindelijke totale zoutlast evenredig kunnen worden verondersteld met het dichtheidsverschil tussen buitenwater/sluiskolk enerzijds en het binnenwater anderzijds. Deze afhankelijkheid wordt hier aangetoond voor de Westsluis, maar mag geldig worden verondersteld voor alle sluisgeometrieën.

De gevallen in serie 7 worden herhaald in serie 8 (Figuur 3.2h), maar dan inclusief de aanwezigheid van een krachtige waterjet ( $Q = 2 \text{ m}^2/\text{s}$  p.e.v. breedte) op het grensvlak tussen de sluiskolk en het kanaalpand. Het idee om hier een waterjet als maatregel toe te passen beoogt om met name onderin de waterkolom een verticale stroming tot stand te brengen die een barrière opwerpt tegen de dichtheidsstroom. Een luchtbellenscherm, zoals tevens veelvuldig wordt toegepast, realiseert deze verticale stroming vooral bovenin de waterkolom, terwijl met name onderin de waterkolom het zouttransport plaatsvindt. In Figuur 2h is te zien dat de effectiviteit van een waterjet afhangt van het dichtheidsverschil tussen zoet en zout water (in verhouding tot de kracht van de waterjet). Bij lage dichtheidsverschillen is de barrièrewerking optimaal en is de uitwisseling zeer laag. Bij hogere dichtheidsverschillen stort het waterjet-front in elkaar en stroomt een groot deel van het zoute water uit de sluis ongehinderd het kanaal in, zij het sterk opgemengd door de turbulentie ten gevolge van de waterjet. Resumerend kan worden gezegd dat een waterjet meestal slechts vertragend werkt op de uitwisseling, maar niet structureel de zoutlast vermindert, tenzij de omstandigheden zeer gunstig zijn. Pas in combinatie met een omloopriool kan een waterjet effectief de zoutlast op het kanaal helpen reduceren.

In de series 9 en 10 (Figuren 3.2i en 3.2j) is te effectiviteit af te lezen van de aanwezigheid van een omloopriool, dat wordt opengezet gelijktijdig met de binnensluisdeur. Dankzij de binnenwaterstand die meestal hoger staat dan de buitenwaterstand, is het mogelijk om effectief zout water te spuien. Bij de huidige Westsluis gebeurt dit momenteel ook al.

De doorstroomcapaciteit c.q. afmetingen van het omloopriool zullen in de praktijk afgestemd moeten zijn op de totale hoeveelheid zout water per tijdseenheid die verwerkt moet worden. Deze hoeveelheid wordt bepaald door het initieel lineaire tempo waarmee de sluiskolk zout water afstaat. Verder zijn het drukverval tussen binnen- en buitenwater en de hydraulische ruwheid van het omloopriool van belang. Met een eenvoudige uitdrukking zoals de formule van Chézy is vervolgens een optimale omloopriooldiameter af te leiden. In het onderhavige 2DV-geval is een rioldiameter van ongeveer 1 m optimaal. Tevens zijn simulaties gemaakt van omloopriolen met een diameter van 2 resp. 4 m (simulaties no. 30-31), maar deze trekken veel meer water per tijdseenheid aan dan noodzakelijk. Hierdoor wordt ook onnodig veel zoet water op het buitenwater geloosd.

Verder is geëxperimenteerd met vorm van de aanstroomopening aan de kanaalzijde (simulaties no. 32-33) en de aanwezigheid of afwezigheid van de zoutvang (serie 9 versus serie 10). Op grond van Figuren 3.2i en 3.2j kan worden geconcludeerd dat de aanwezigheid van de zoutvang niet veel verschillen oplevert in zoutlast, zolang althans het omloopriool qua afmeting goed is afgestemd op de sluisinhoud. Het is mogelijk om zout water effectief te spuien zonder tussenkomst van een zoutvang. Echter bij een tijdelijk gebrek aan zoet spuiwater, waardoor het omloopriool niet altijd kan worden opgezet, kan de aanwezigheid van een zoutvang uitkomst bieden voor de tijdelijke opslag van zout water.

In Figuur 3.2k (serie 11, simulaties 34-37) is tenslotte het omloopriool uit serie 10 gecombineerd met de waterjet uit serie 8, waarbij de intensiteit van de waterjet is gevarieerd ( $Q = 2, 1, 0.5$  of  $0.25 \text{ m}^2/\text{s}$  per eenheid van breedte). Ter vergelijking is ook het geval met  $Q = 0$  getoond (identiek aan simulatie no. 32).

Te zien is dat in alle gevallen de totale zoutlast op het kanaal zeer klein blijft. Dit is eerst en vooral toe te schrijven aan de aanwezigheid van het omloopriool. De waterjet vervult slechts een kleine bijrol. Zonder waterjet loopt normaliter een kleine hoeveelheid zout niet het omloopriool maar het kanaal in. Met een waterjet wordt deze relatief kleine zoutlast afgevangen. Niet verbazingwekkend is dat dit vooral het geval is bij een sterke waterjet; hoe zwakker de jet, hoe hoger de zoutlast (zie Figuur 3.2k). Wel is goed te zien dat in alle gevallen de zoutuitwisseling met name in de eerste paar minuten plaatsvindt. Na een zeer korte tijd is de hoeveelheid zout op het kanaal dus al constant.

De diverse ingrepen en reducerende maatregelen, die hier alleen zijn uitgewerkt voor de Westsluis, zijn eveneens toepasbaar op de overige vier sluis geometrieën. Het voert in dit verband echter te ver om deze simulaties voor alle sluizen uit te voeren.

### 3.2.6 Samengestelde zoutlast op kanaal als functie van de tijd

Het resultaat van bovenstaande simulaties bestaat uit elementaire zoutlasten als functie van de tijd, afhankelijk van de tijdsduur dat de binnensluisdeur open staat. Teneinde werkbare invoergegevens voor het 1D-SOBEK-model te creëren moeten deze elementaire zoutlasten onder een aantal aannames met elkaar worden gecombineerd en geaggregeerd tot een zoutbronterm, die aan de benedenstroomse rand van het SOBEK-model kan worden opgelegd.

Hierbij is het noodzakelijk om op te merken dat de 3D-output van de FINEL-sluissimulaties niet geheel compatibel zijn met de gevraagde 1D-randvoorwaarde, omdat de processen in het 1D-kanaal en in de 3D-sluis in feite real-time van elkaar afhankelijk zijn. Het is eigenlijk te kort door de bocht om de gebeurtenissen in de 3D-sluis als oorzaak te beschouwen en de gebeurtenissen in het 1D-kanaal als gevolg. Echter, door zorgvuldige calibratie van het SOBEK-model kunnen beide modellen niettemin toch goed op elkaar worden afgestemd. Ten behoeve van het SOBEK-model zijn tijdseries beschikbaar van het zoutgehalte op het buitenwater en het zoutgehalte op het kanaal. De elementaire zoutlasten uit de vorige paragraaf zijn dusdanig te aggregeren dat er een zoutbron per tijdseenheid ontstaat, die rechtvenredig is met het verschil in zoutgehalte tussen binnen- en buitenwater.

Hierdoor is het mogelijk om voor de duur van de gehele SOBEK-simulatie één tijdserie te maken voor de zoutbron. Indien vervolgens het SOBEK-model einduitkomsten qua kanaalzoutgehalte geeft die afdoende in overeenstemming zijn met de oorspronkelijke tijdserie, kan het SOBEK-model als goed gecalibreerd worden beschouwd.

Het idee is nu om per tijdseenheid de totale influx van zout ter plaatse van het sluizencomplex bij Terneuzen te berekenen als functie van het zoutgehalte binnen en buiten. Hierbij wordt uitgegaan van de volgende aannames:

1. aangezien dichtheidsstromen bij toepassing van de Boussinesq-aanname alleen afhankelijk zijn van dichtheidsverschillen en niet van absolute dichtheden, en in de meest gangbare *equations of state* voor zeewater de dichtheid nagenoeg lineair afhangt van het zoutgehalte (zie Van Rijn, 1993) mag de actuele waterdichtheid als een maat voor het zoutgehalte worden beschouwd;
2. voor iedere sluis afzonderlijk (West, Midden, Oost, GZN, CBS) geldt dat gedurende een jaar dagelijks evenveel schepen worden geschut; het aantal schuttingen per jaar mag dus worden gedeeld door 365,25;
3. de inflow van "nieuw" zout van buiten naar binnen is rechtevenredig met het verschil in zoutgehalte (dichtheid) tussen binnen en buiten. Deze beide zoutgehalten worden bekend verondersteld op grond van de beschikbare tijdseries;
4. de dieptegemiddelde zoutgehalten binnen en buiten veranderen zodanig traag dat ze gedurende een korte tijd (ordegrote 1 dag) constant mogen worden verondersteld;
5. alle sloopsschuttingen vinden (gemiddeld genomen over 1 dag) plaats bij Mean Sea Level, i.e. een buitenwaterstand gelijk aan NAP. Aangezien er praktisch een lineair verband bestaat tussen de buitenwaterstand en de inkomende zoutlast per schutting, is de fout die hiermee gemaakt wordt slechts klein. (Let wel: dit verband is weliswaar lineair, doch niet rechtevenredig! Het is van de vorm  $y = ax + b$ , maar  $b$  is niet nul).

Uit de FINEL3D-berekeningen in de series 1 t/m 5 is voor iedere sluisvariant bekend hoe groot de binnenkomende zoutlast op het kanaal is bij 1 schutting en een binnen-buiten-dichtheidsverschil van  $25 \text{ kg/m}^3$ . Deze zoutlast treedt alleen op bij schuttingen in zuidwaartse richting; bij schuttingen in noordwaartse richting komt er immers geen zeezout in het kanaal bij, er gaat dan alleen zoet/brak water naar buiten. Deze zoutlast kan per sluis lineair geschaald worden naar rato van het werkelijk optredende dichtheidsverschil tussen binnen en buiten. Vervolgens kan deze zoutlast worden vermenigvuldigd met het aantal sloopsschuttingen per sluis per dag, *waarbij aangenomen wordt dat iedere binnensluisdeur bij iedere schutting gedurende 20 minuten open staat*. Deze schatting wordt als pessimistisch beschouwd. Dit leidt tot een uitwisselingspercentage van ordegrootte 80% per schutting-event. Dit alles leidt tot een binnenkomende zoutlast per sluis per etmaal. (Delen door 86400 seconden per dag geeft een tijdsgemiddelde zoutlast per sluis per seconde.) Nu kan gesommeerd worden over alle sluisen. Dit kan gedaan worden voor elk van de drie combinaties van projectalternatieven en economische scenario's die eerder zijn beschreven: NUL\_GE40, GZN\_GE40 en CBS\_GE40. Dit leidt tot een *totale binnenkomende zoutlast op het kanaal per seconde*, gegeven het actuele dichtheidsverschil tussen binnen- en buitenwater.

Bij deze exercitie moet worden bedacht dat de binnenkomende zoutlast in werkelijkheid allerminst een continu binnenstromende bron vormt. Immers, het zout komt binnen in plotselinge zoutgolven, die diep het kanaal kunnen binnendringen en dan weer teruglopen onder invloed van het bovenstroomse spuidebiet. En dit alles heeft ook weer invloed op de zoutuitwisseling bij de volgende schutting. Hieruit blijkt wel dat de modelmatige “harde knip” tussen 3D-sluiskolk en 1D-kanaal eigenlijk niet fysisch correct is. Eigenlijk zouden de 3D- en 1D- modellen tegelijkertijd moeten runnen en na iedere tijdstap “online” gegevens moeten uitwisselen over het zoutgehalte op het kanaal, teneinde de instantane dynamiek van de zoutlast goed te krijgen. Het gebruik van SOBEK vereist echter een a priori gedefinieerde tijdserie voor de zoutbron, en met deze beperking dient rekening te worden gehouden.

**Tabel 3.5a: Berekening zoutbron per seconde per eenheid van dichtheidsverschil voor alternatief/ scenario NUL\_GE40**

NUL_GE40	Westsluis	Middensluis	Oostsluis	Totaal
Elementaire zoutlast per schut-cyclus (na 20 minuten)	3496300	513500	204900	
Elementaire zoutlast per eenheid van dichtheidsverschil	139852	20540	8196	
Aantal schuttingen op jaarbasis	3843	3245	6453	
Aantal schuttingen per dag	10,52	8,88	17,67	
Zoutlast per dag p.e.v. dichtheidsverschil	1471461	182484	144801	
Gemiddelde zoutlast per seconde p.e.v. dichtheidsverschil	17,03	2,11	1,68	$S_{\text{sluis}} = 20,82$

**Tabel 3.5b: Berekening zoutbron per seconde per eenheid van dichtheidsverschil voor projectalternatief/ scenario GZN\_GE40**

GZN_GE40	Westsluis	GZN	Oostsluis	Totaal
Elementaire zoutlast per schut-cyclus (na 20 minuten)	3496300	5448800	204900	
Elementaire zoutlast per eenheid van dichtheidsverschil	139852	217952	8196	
Aantal schuttingen op jaarbasis	4306	3063	6386	
Aantal schuttingen per dag	11,79	8,39	17,48	
Zoutlast per dag p.e.v. dichtheidsverschil	1648741	1827753	143298	
Gemiddelde zoutlast per seconde p.e.v. dichtheidsverschil	19,08	21,15	1,66	$S_{\text{sluis}} = 41,89$



**Tabel 3.5c: Berekening zoutbron per seconde per eenheid van dichtheidsverschil voor projectalternatief /scenario CBS\_GE40**

CBS_GE40	Westsluis	CBS	Oostsluis	Totaal
Elementaire zoutlast per schut-cyclus (na 20 minuten)	3496300	2479500	204900	
Elementaire zoutlast per eenheid van dichtheidsverschil	139852	99180	8196	
Aantal schuttingen op jaarbasis	4056	3968	6235	
Aantal schuttingen per dag	11,10	10,86	17,07	
Zoutlast per dag p.e.v. dichtheidsverschil	1553107	1077470	139909	
Gemiddelde zoutlast per seconde p.e.v. dichtheidsverschil	17,97	12,47	1,62	$S_{sluis}$ = 32,06

In de tabellen 3.5a t/m 3.5c is de totale binnenkomende zoutlast op het kanaal per seconde per eenheid van dichtheidsverschil uitgewerkt voor de drie standaardscenario's. De waarden van de elementaire zoutlast per schutting zijn hierbij afgelezen uit de figuren 3.2a t/m 3.2e, voor een buitenwaterstand gelijk aan NAP en tijdstip  $t = 20$  minuten. De resulterende tijdsgemiddelde zoutlasten  $S_{sluis}$  moeten worden vermenigvuldigd met het actuele dichtheidsverschil om de instantane zoutbron  $S_{bron}$  te krijgen:

$$S_{bron} = S_{sluis} \{ \rho_{zee}(t) - \rho_{kanaal}(t) \} \quad (3-1)$$

De eenheid van  $S_{bron}$  is kg/sec; de eenheid van  $S_{sluis}$  is kg/sec/(kg/m<sup>3</sup>), oftewel m<sup>3</sup>/sec.

### 3.2.7 Conclusie

Met de berekening van de samengestelde zoutlast per tijdseenheid, zoals weergegeven in de tabellen 5a t/m 5c, is de FINEL3D-exercitie ten behoeve van het 1D-SOBK-model van het Kanaal Gent-Terneuzen voltooid. Het is eenvoudig om de drie uitgewerkte projectalternatieven (allen voor het economisch scenario GE2040) aan te vullen met alternatieven, bijvoorbeeld door het kiezen van andere combinaties van sluisstypes of door het meenemen van één of meerdere gesimuleerde maatregelen ter reductie van het zoutbezwaar.

Verder kan op basis van de uitgevoerde elementaire sluis simulaties worden gesteld dat met name de toepassing van een omloopriool een zeer effectieve maatregel is om "op maat" het optredende zoutbezwaar terug te spuien naar het buitenwater. In combinatie met eventueel een waterjet op de grens tussen kanaal en sluis kolk (aan de kanaalzijde van de monding van het omloopriool) is dit een maatregel die ook geschikt en toepasbaar is voor andere sluisstypen dan de Westsluis alleen. De effectiviteit van een zoutvang is niet heel overtuigend aangetoond.

### 3.3 Interactie scheepvaart – gelaagd zoet/zoutsysteem

#### 3.3.1 Inleiding

Naast de zoutindringing op het kanaal als gevolg van sluisschuttingen in relatie tot de sluisconfiguratie en de hoeveelheid scheepvaartverkeer is het gewenst om een modelmatige indruk te krijgen van de wijze waarop het binnengedrongen zout in een gelaagd kanaal wordt opgemengd onder invloed van varende schepen.

Teneinde de globale verspreiding van zeezout in het Kanaal Gent-Terneuzen in kaart te brengen, is een ééndimensionaal SOBEK-model van de gehele kanaalzone opgezet. De zeewaartse randvoorwaarde voor dit model is bepaald met behulp van 3D-simulaties van het sluisencomplex. Deze randvoorwaarde heeft de vorm van een zout-puntbron. Het 1D-SOBEK-model kan slechts omgaan met zoutconcentraties en dichtheden die uniform zijn over het dwarsprofiel van het kanaal. In werkelijkheid echter is het proces van zoutindringing nabij het sluisencomplex bij Terneuzen sterk driedimensionaal van karakter. Daarom kent het kanaal een zoet-zoutgelaagdheid, met name in de buurt van het sluisencomplex. Het vermoeden bestaat nu dat de vele dagelijkse scheepsbewegingen in het kanaal significant bijdragen aan het opmengen van zout over de gehele waterdiepte, en daarmee aan de nivellering van dichtheidsverschillen en het reduceren van de mate van gelaagdheid. Indien dit inderdaad zo is, wordt de SOBEK-schematisatie (zoutconcentratie uniform over het dwarsprofiel) realistischer en daarmee beter te rechtvaardigen.

Teneinde het effect van varende schepen op de gelaagdheid van het kanaal te onderzoeken is een achttal driedimensionale simulaties uitgevoerd, met behulp van het simulatiepakket FINEL3D.

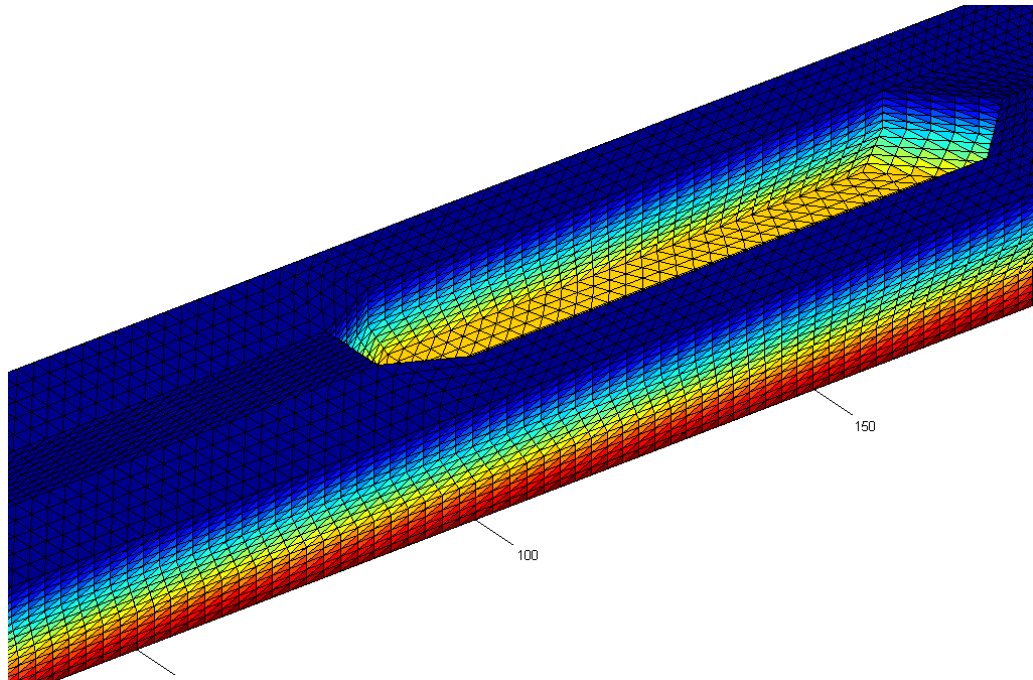
In vier van deze simulaties wordt de stroming rondom een varend schip berekend, terwijl de hoogteligging van het grensvlak tussen zoet en zout water wordt gevarieerd. In de overige vier simulaties wordt, ter referentie, de stroming in het kanaal zonder schip gesimuleerd voor dezelfde liggingen van het grensvlak.

Op deze manier kan worden geschat welk gedeelte van de opmenging het gevolg is van turbulente en artificiële diffusie, en welk gedeelte daadwerkelijk voor rekening van het varende schip komt. Het schatten van de verhouding van deze verschillende bronnen van opmenging is een belangrijke moeilijkheid bij de betreffende simulaties. In deze paragraaf zijn de opzet van de FINEL3D-berekeningen en de resultaten daarvan beschreven.

#### 3.3.2 Achtergrond model; schematisatie en beperkingen

Voor de uitgevoerde berekeningen is een tweetal rekenroosters gedefinieerd, één met schip en één zonder schip. Deze roosters bestaan elk uit circa 195.000 tetraëdervormige elementen. Voor de huidige toepassing van FINEL3D is circa 200.000 elementen een praktische bovengrens qua rekentijd. Omdat de doorlooptijd van de simulaties niet uit de hand mag lopen legt het feit, dat er nog slechts op één processor kan worden gerekend, een belangrijke beperking op aan de grootte van het rekenrooster en daarmee aan de resolutie.

Aangezien het onderhavige probleem intrinsiek 3D van karakter is, en daarmee een minimumeis wordt gesteld aan de vorm en afmeting van het rekenrooster, moet worden vastgesteld dat de resolutie van het rooster, met name in de stroomrichting, lager uitvalt dan gewenst. In dwarsrichting en over de waterdiepte is de karakteristieke roosterafstand ca. 1 m; in de stroomrichting is deze afstand ca. 4 m, hetgeen eigenlijk teveel is. Dit gebrek aan resolutie leidt ertoe dat de artificiële diffusie niet te laag gekozen mag worden.



**Figuur 3.3: Ligging schip in rekenrooster: boeg rechts, achtersteven links, lengte 100 m. De stroming (van 3 m/s) is eveneens van rechts naar links. De kleuren hebben in deze afbeelding geen kwantitatieve betekenis en dienen alleen om het contrast te vergroten**

Beide roosters hebben een lengte van 250 m, een breedte van 40 m en een waterdiepte van 15 m. In het rooster mét schip is in de lengterichting van het rooster een fictief schip uitgespaard met een lengte van 100 m, een breedte van 20 m, een diepgang van 10 m en een globaal (enigszins hoekig) afgeronde boeg en achtersteven. Deze afmetingen zijn zo gekozen omwille van de modellering, om het rooster niet te groot te maken en voldoende resolutie te houden. Kijkend naar de in de praktijk voorkomende scheepsafmetingen komt deze afmetingen overeen met een nogal diepliggend binnenvaartschip. In werkelijkheid zal een binnenvaartschip minder diep liggen en zal een zeeschip grotere horizontale afmetingen hebben. De roosters zijn gebouwd met behulp van de 3D-roostergenerator SEPRAN met behulp van “brick”-volume-elementen. Voor de boeg van het schip bevindt zich nog 50 m rooster, achter de achtersteven bevindt zich een roosterlengte van 100 m. Figuur 3.3 geeft een indruk hoe het schip in het rekenrooster is ingepast.

Omdat het niet mogelijk is om het schip dwars door het rooster heen te laten varen, is in de berekeningen uitgegaan van een stilliggend schip, waaromheen het water achterwaarts stroomt. Hierbij is een vaar- c.q. stroomsnelheid aangenomen van 6 knopen, oftewel 3 m/s. In de referentieberekeningen zonder schip wordt deze zelfde stroomsnelheid gehanteerd, teneinde in alle berekeningen dezelfde mate van turbulente en artificiële diffusie te krijgen.

Nu doet zich het probleem voor dat het simulatiegeval met schip eigenlijk vergeleken wordt met een snelstromend kanaal, terwijl de werkelijke referentiesituatie natuurlijk een bak met stilstaand water zou moeten zijn. Dit laatste geval is echter helemaal niet zinvol om te simuleren, aangezien alle rekenresultaten dan triviaal zouden worden: alle stroomsnelheden nul, geen opmenging van zout, en een stilstaande waterspiegel.

De vraag rijst dus of het geval-met-schip (a) moet worden vergeleken met een snelstromend kanaal (b) of met een stilstaande bak (c). Voor en tegen allebei is iets te zeggen.

Een praktische oplossing, die hier wordt toegepast, is het vergelijken van het geval-met-schip met beide situaties. Het verschil in zout-opmenging tussen geval (a) en (b) kan dan worden gezien als een ondergrens voor de daadwerkelijk optredende opmenging, terwijl het verschil tussen (a) en (c) als een theoretische bovengrens kan worden beschouwd. De feitelijke opmenging van zout in de gegeven geometrie zal zich bevinden tussen deze twee uitersten. Voor de gevallen (c) is berekening onnodig.

### 3.3.3 Opzet simulaties, overzicht invoer en randvoorwaarden

De acht berekeningen hadden een doorlooptijd variëren van 12 tot 16 uur, gedurende welke tijd een modeltijdsduur van 3 uur (10.800 seconden) werd gesimuleerd. Voor beide rekenroosters zijn vier simulaties gemaakt, waarbij de ligging het initiële grensvlak tussen zout en zoet water (op  $t = 0$ ) is gevarieerd: van  $z = 0$  m (volledig zoete waterkolom) tot resp.  $z = 2,5$  m,  $z = 5,0$  m of  $z = 7,5$  m. Tabel 3.6 geeft een overzicht van de 8 uitgevoerde berekeningen, verdeeld over 2 series.

**Tabel 3.6: Overzicht uitgevoerde simulaties in FINEL3D**

Serie no.	Simulatie no.	Omschrijving
1	1	Schip in kanaal, zout water tot op $z = 0$ m (volledig zoete waterkolom)
	2	Schip in kanaal, zout water tot op $z = 2,5$ m (tot halverwege bodemligging schip)
	3	Schip in kanaal, zout water tot op $z = 5,0$ m (gelijk met bodem schip)
	4	Schip in kanaal, zout water tot op $z = 7,5$ m (tot halverwege de waterkolom)
2	5	Leeg kanaal, zout water tot op $z = 0$ m (volledig zoete waterkolom)
	6	Leeg kanaal, zout water tot op $z = 2,5$ m (tot halverwege bodemligging schip)
	7	Leeg kanaal, zout water tot op $z = 5,0$ m (gelijk met bodem schip)
	8	Leeg kanaal, zout water tot op $z = 7,5$ m (tot halverwege de waterkolom)

Bodem en zijewers van het kanaal, alsmede de scheepshuid, zijn uitgerust met de normale randvoorwaarden voor gesloten randen (impermeabiliteit en wandwrijving t.g.v. hydraulische ruwheid). Het wateroppervlak kan vrij bewegen, tengevolge waarvan alle naburige roosterzellen ook meebewegen en kunnen worden opgerekt of ingedrukt. Aan de instroomrand van het kanaal (50 m voor de scheepsboeg) is een uniforme stroomsnelheid  $u_{in}$  [m/s] opgelegd; aan de uitstroomrand (100 m achter de achtersteven) is de waterstand  $h_{uit}$  [m] vastgelegd.

Aan de bovenstroomse zijde is bovendien de initiële verdeling van de zoutconcentratie vastgelegd. In Tabel 3.7 staat een aantal relevante modelparameters weergegeven, die voor alle 8 simulaties gelijk zijn. Merk op dat de eddyviscositeit ( $v_{\text{eddy}}$ ) relatief groot is! De hier gestelde waarde van  $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$  is noodzakelijk om de simulaties stabiel te houden bij de onderhavige grove resolutie. Een globale roosterverfijning zou ruimte geven aan een navenant kleinere artificiële diffusie.

**Tabel 3.7: Enige modelparameters**

Symbol	Omschrijving en eenheid	Waarde
$\theta$	Impliciteitsfactor [-]	1.0 (Euler-Impliciet)
$\Delta t$	Tijdstap [s]	1.0
$T_s$	Simulatieduur [s]	10800.0
$v_{\text{eddy}}$	Turbulentie(eddy)viscositeit [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	0.1
$k_{\text{Nik}}$	Hydraulische Nikuradse-ruwheid [m]	0.02
$\sigma$	Prandtl-Schmidtgetal [-] (= verhouding zout-diffusiviteit en eddyviscositeit)	1.0
$u_{\text{in}}$	Snelheid omstroming scheepshuis [m/s]	3.0
$h_{\text{uit}}$	Piëzometrisch niveau uitstroomrand [m]	15.0

### 3.3.4 Resultaten; zoutconcentratie op uitstroomrand als functie van de hoogte

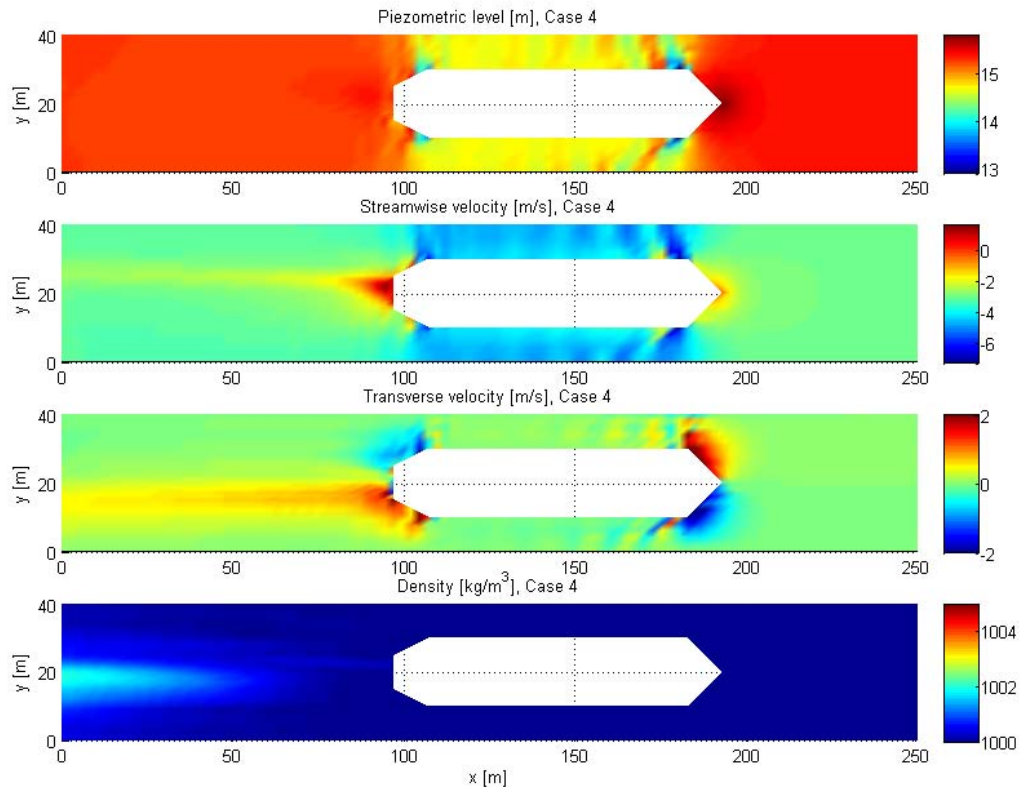
De menging tussen de zoet- en zoutwaterlaag komt in iedere simulatie op gang door drie processen:

- ten eerste zal zich over de verticaal in ieder dwarsprofiel een snelheidsprofiel instellen, waarna het snelheidsverschil tussen de zoet- en zoutwaterlaag verticale schuifspanningen en daarmee gepaard gaande turbulente menging teweeg zal brengen;
- ten tweede is er sprake van directe zoutdiffusie tengevolge van de relatief hoge eddyviscositeit. Deze beide verschijnselen doen zich voor in alle simulaties;
- ten derde geldt, voor de simulaties mét schip, dat er in het kielzog van het schip een loslatingzone ontstaat met daarin optredende grootschalige wervels, die zich uitstrekken over de gehele waterdiepte. Deze wervels hebben eveneens menging en diffusie van zout tot gevolg. Het initiële dichtheidsverschil tussen zoet en zout water is in alle simulaties gesteld op  $10 \text{ kg}/\text{m}^3$  (referentie zoet water =  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ). Dit verschil wordt geleidelijk ruimtelijk genivelleerd.

Een belangrijk fysiek verschil tussen de eerste typen menging en het derde type is het volgende. Turbulente en artificiële diffusieprocessen zijn in wezen gradiënttype transporten, die afhangen van de lokale ruimtelijke variatie in zoutgehalte. De menging tengevolge van het varende schip is echter puur een functie van het instantane snelheidsveld vol grootschalige wervels in het zog van het schip. In wezen betreft dit transport door advectie. Dit verklaart waarom het derde type menging optreedt over bijna de hele waterdiepte, daar waar de eerste twee processen zich vooral afspelen rond het langzaam diffunderende grensvlak tussen zoet en zout water.

De reistijd van een waterdeeltje door het snelstromende kanaal bedraagt circa 90 seconden. De oplossing van het snelheidsveld convergeert daarom snel naar een evenwichtstoestand, nadat de heen- en weer gereflecteerde “inspeelgolf” is uitgedempt.

Na een inspeelperiode van circa 20-30 minuten blijkt dat er zich in alle gevallen een stationair evenwicht heeft ingesteld, in die zin dat gemiddeld over elk dwarsprofiel de verdeling van de snelheid en de zoutconcentratie constant is geworden. In werkelijkheid is er sprake van een min of meer Reynolds-gemiddelde stationaire toestand, waaromheen zich aanzienlijke turbulente fluctuaties voordoen. In het onderhavige geval werkt de hoge eddyviscositeit echter nogal dempend op de details van de stroming.



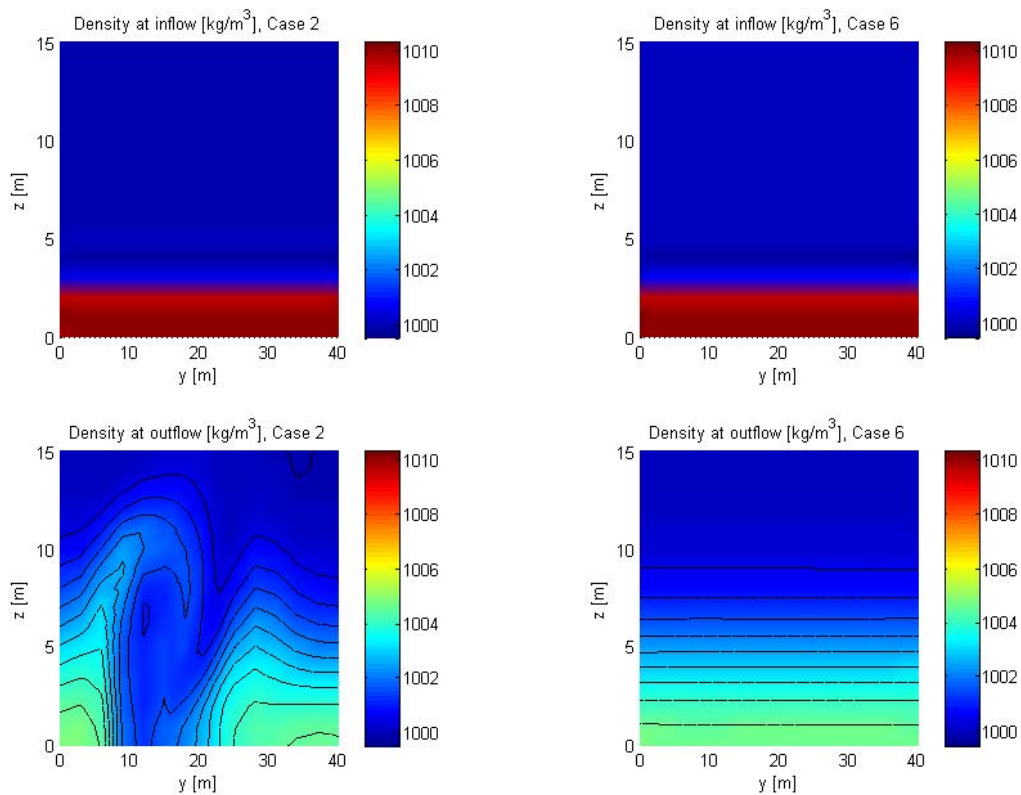
**Figuur 3.4: Resultaten op t = 3 uur seconden voor Simulatie no. 4, aan het vrije oppervlak (momentopname). Van boven naar beneden: piëzometrisch niveau, stroomsnelheid in langsrichting (t.o.v. het schip), stroomsnelheid in dwarsrichting, waterdichtheid**

De figuren 3.4 en 3.5 laten enige representatieve momentopnamen zien van de uitgevoerde simulaties. Figuur 3.4 toont de hydrodynamica en de verspreiding van zout na 3 uur voor geval 4 (aan het wateroppervlak). Goed zichtbaar zijn de retourstroming langs het schip en de bijbehorende waterspiegeldaling, gepaard gaande met secundaire korte golven. Verder is aan het wateroppervlak de toename van het zoutgehalte slechts zichtbaar na ongeveer 100 meter. Het leeuwendeel van de zoet-zout-opmenging vindt plaats op iets grotere diepte.

De gemiddelde streamwise stroomsnelheid is negatief, dat wil zeggen van rechts naar links, en de transverse velocity-componenten bij boeg en hek kloppen daar precies mee. De asymmetrie in transverse velocity (bij de boeg en hekgolf) wordt veroorzaakt doordat het een momentopname betreft, waarin dus ook enige grootschalige turbulente werveling in dwarsrichting aan het oppervlak te zien is.



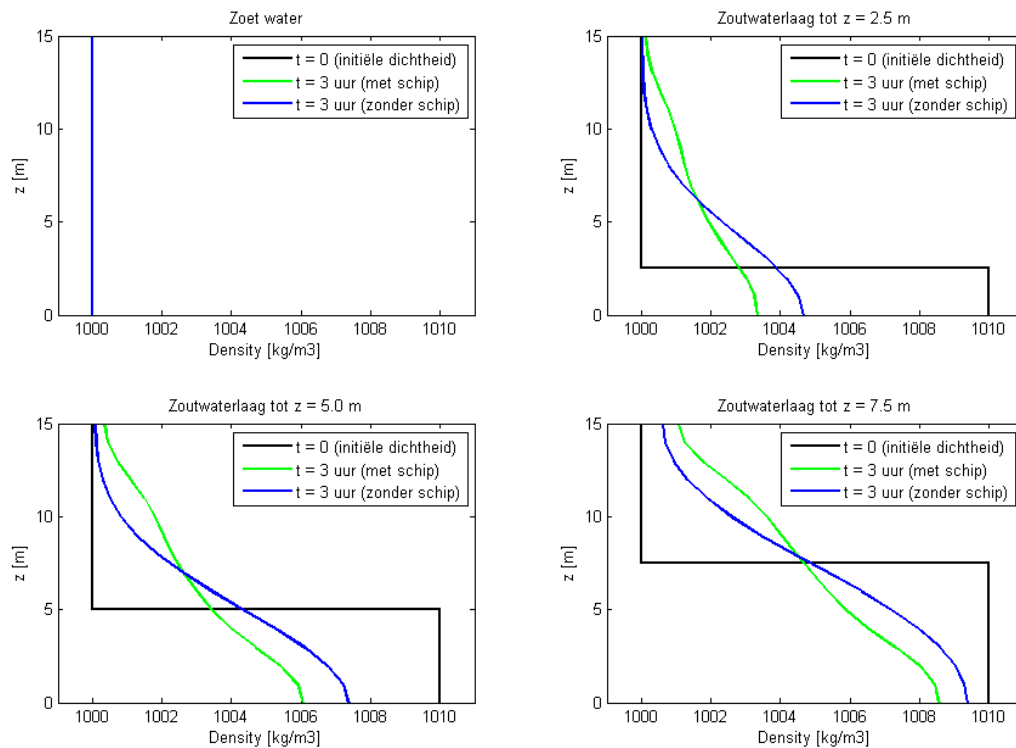
Desalniettemin is in Figuur 3.5 te zien dat de opmenging ten gevolge van het schip plaatsvindt over vrijwel de gehele waterkolom. De menging ten gevolge van lokale turbulentie en artificiële diffusie vindt daarentegen vooral plaats rondom het zoet-zout-grensvlak. Te zien is hier het dwarsprofiel van het kanaal, op 100 m achter de achtersteven van het schip. Het initieel sterk gelaagde systeem wordt ten gevolge van de turbulente en artificiële diffusie (plaatje rechtsonder) uniform opgemengd over de gehele kanaalbreedte. De menging ten gevolge van het varende schip (plaatje linksonder), daarentegen, is lokaler van aard en afhankelijk van de instantane aanwezigheid van grootschalige losgelaten wervels.



**Figuur 3.5: Bepaling invloed varend schip door vergelijking van Simulaties no. 2 en 6 (zoet-zoutgrensvlak op  $z = 2,5$  m). Resultaten op  $t = 0$  (boven) en  $t = 3$  uur seconden (onder) aan de uitstroomband, 100 m achter de achtersteven van het schip (momentopname). Links no. 2 (met schip), rechts no. 6 (zonder schip). De opmenging van zout over de waterdiepte t.g.v. grootschalige turbulentie in het zog van het varende schip is goed zichtbaar**

De menging t.g.v. het varende schip die zichtbaar is in Figuur 3.5 (linksonder) kan dus lokaal significant zijn; wanneer wordt gemiddeld over de breedte van het kanaal, is de mate van menging relatief kleiner vergeleken met de overige diffusieprocessen. Omdat we geïnteresseerd zijn in dwarsprofielgemiddelde grootheden ten behoeve van het 1D-SOBEK-model, is het nuttig om de mate van menging gemiddeld over het dwarsprofiel te beschouwen. Dit gebeurt in Figuur 3.6.

Hiertoe is in het “far field”, 100 m achter het schip (op de uitstroomrand van het model), de breedtegemiddelde dichtheid (die een maat vormt voor de breedtegemiddelde zoutconcentratie) uitgezet als functie van de verticale coördinaat in de situatie zonder schip (blauwe lijnen) en met schip (groene lijnen). De zo ontstane dichtheidsprofielen kunnen worden vergeleken met het initiële dichtheidsprofiel (zwarte lijnen). Dit initiële profiel kan tevens worden beschouwd als de eindoplossing in een kanaal met stilstaand water (i.e. geval (c) in paragraaf 3.3.2). Op deze wijze kan de mate van menging tengevolge van het varende schip versus menging door turbulentie en artificiële diffusie in beeld worden gebracht.



**Figuur 3.6: Breedtegemiddelde dichtheid in het kanaal op t = 0 en t = 3 uur, voor de simulaties no. 1 t/m 4 (met schip) en no. 5 t/m 8 (zonder schip)**

**Tabel 3.8: Totale hoeveelheden zout in dwarsprofiel 100 m achter schip; totale massa per strekkende meter, resp. massa onder en boven het initiële zoet-zoutgrensvlak**

Simulatie no.	$S_{\text{totaal}}$ [kg/m]	$S_{\text{onder}}$ [kg/m]	$S_{\text{boven}}$ [kg/m]
1	0	0	0
2	992	338	651
3	1780	1127	650
4	2964	2122	843
5	0	0	0
6	992	441	554
7	1780	1337	448
8	2964	2341	623



Ter ondersteuning van Figuur 3.6 staan in Tabel 3.8 per simulatie de totale hoeveelheden zout  $S_{\text{totaal}}$  (in kg/m) weergegeven, die aanwezig zijn in het beschouwde dwarsprofiel 100 m achter het schip. Hierbij wordt een uitsplitsing gemaakt in de hoeveelheid zout onder en boven het oorspronkelijke zoet-zout-grensvlak ( $S_{\text{onder}}$  respectievelijk  $S_{\text{boven}}$ ). De laatste grootheid vormt een maat voor de uitwisseling die door het grensvlak heeft plaatsgevonden. Immers, de hele zoutmassa die zich ter plaatse van het uitstroom-dwarsprofiel boven het oorspronkelijke grensvlak bevindt, is ergens onderweg tussen instroom- en uitstroomprofiel door dat grensvlak heen bewogen.

De eenheid kg/m ontstaat door de dichtheid [eenheid kg/m<sup>3</sup>] van het zoute water (minus de referentiedichtheid van zoet water) te integreren over het dwarsprofiel A [eenheid m<sup>2</sup>]:

$$S = \int_A (\rho(y, z) - \rho_0) dy dz \quad (3-2)$$

Deze grootheid geeft dus een geïntegreerde zoutmassa per strekkende meter weer.

### 3.3.5 Interpretatie en conclusies

De in paragraaf 3.3.4 getoonde resultaten, met name Figuur 3.6 en Tabel 3.8, geven aan dat de mate van opmenging van zout over de waterdiepte tengevolge van één varend schip aanzienlijk is. Wanneer in aanmerking wordt genomen dat bij het sluizencomplex in het Kanaal Gent-Terneuzen per dag tientallen schuttingen en scheepsbewegingen in beide richtingen plaatsvinden, en dat zout niet de eigenschap heeft dat het uit zichzelf ontmengt wanneer het eenmaal is opgemengd, kan worden aangenomen dat de totale zoutlast op het kanaal effectief wordt opgemengd door het totaal aan scheepvaart.

Hierbij is de simulatie no. 4 met name representatief in het “near field” dichtbij het sluizencomplex, aangezien de uitwisselingsstroming die hier plaatsvindt tijdens een schutcyclus vaak een zoet-zoutgrensvlak halverwege de waterkolom kent. De simulaties no. 2 en 3 zijn representatiever voor het “far field” verderop in het kanaal, aangezien de zoute grenslaag hier meestal dunner tot veel dunner is dan in de nabijheid van een sluis.

Uit Figuur 3.6 en Tabel 3.8 valt af te lezen dat, gemiddeld over de breedte, de mate van menging ten gevolge van de scheepvaart slechts weinig groter is dan de menging ten gevolge van normale artificiële en turbulente diffusie. (het verschil tussen de groene en blauwe lijnen in Figuur 4). De gemiddelde extra massa opgemengd zout ten gevolge van de scheepvaart is gemiddeld slechts ongeveer één derde deel groter dan het diffusieaandeel. Het betreft hier echter een geschatte ondergrens voor de daadwerkelijk optredende opmenging. De theoretische bovengrens wordt gegeven door het verschil tussen de groene en zwarte lijnen in Figuur 3.6.

Het verschil tussen deze bovengrens en de zwarte nullijn is aanzienlijk. Indien wordt verondersteld dat de groene en zwarte lijnen onderling direct mogen worden vergeleken, dan kan worden geconcludeerd dat de menging ten gevolge van scheepsbewegingen zeer effectief is. Ook wanneer wordt uitgegaan van de conservatievere ondergrens, zal het grote aantal scheepsbewegingen op korte termijn toch een grote mate van menging tot gevolg hebben.

Temeer daar moet worden bedacht dat menging ten gevolge van scheepvaart over de hele diepte plaatsvindt en menging ten gevolge van turbulentie en artificiële diffusie alleen plaatsvindt in de nabijheid van het grensvlak.

De daadwerkelijk optredende menging zal zich ergens tussen de twee genoemde uitersten bevinden. Deze werkelijke menging kan niet rechtstreeks worden berekend, omdat hiervoor 1) een veel grotere gridresolutie noodzakelijk is en 2) een numerieke oplossing moet worden gevonden voor de vloeiende beweging van een grid rondom een varend schip. Dit laatste is allerminst triviaal, en voor ons doel een veel te bewerkelijke operatie.

Voor praktische doeleinden kan worden gesteld dat de mate van uitwisseling ten gevolge van scheepvaart kan worden beschreven met een globale diffusie- of dispersiecoëfficiënt. Vanwege het gebrek aan resolutie is deze dispersiecoëfficiënt niet echt goed te bepalen, maar globaal zal deze van dezelfde ordegrootte moeten zijn als de bij de onderhavige simulaties toegepaste turbulentieviscositeit, namelijk van de ordegrootte  $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ . Het verdient aanbeveling om, zodra mogelijk en indien gewenst, de uitgevoerde simulaties te herhalen met een aanzienlijke hogere resolutie, zodat de karakteristieke roosterafstand van het rekengrid beneden de 1 m komt te liggen. Met name voor de resolutie in de lengterichting van het schip is dit essentieel t.o.v. de huidige situatie.

In het kader van het huidige onderzoek is het afdoende om vast te stellen dat scheepvaart een effectieve menging van zout en zoet water in het Kanaal Gent-Terneuzen tot gevolg heeft, met name in de nabijheid van het sluzencomplex. De totale cumulatieve opmenging kan dermate groot worden verondersteld, dat een uniforme (dwarsprofielgemiddelde) schematisatie van zoutgehalte en dichtheid in het 1D-SOBEK-model gerechtvaardigd is.

### 3.4 Zoutindringing op het kanaal

De zoutindringing op het kanaal is met een 1D SOBEK model doorgerekend. Dit SOBEK model is in zekere mate gebaseerd zijn op het eerdere DUFLOW model dat in de studie van 2002 is gemaakt (Royal Haskoning, 2002). De zoutlasten vanuit het sluzencomplex zijn berekend met het FINEL model (paragraaf 3.2). Deze zoutlasten zijn als benedenstroomse randvoorwaarde op het model gelegd. Door middel van advectie en dispersie heeft het model de zoutlasten doorvertaald op het kanaal. Het werkelijke proces van zoutindringing op het kanaal is een complex 3D proces, waarbij advectie, diffusie en dichtheidsstroming een rol spelen. Idealiter zou voor de zoutindringing op het kanaal dus ook een 3D model worden gebruikt, zoals het FINEL model bij de sluzen. Echter een dergelijk model zal lange rekentijden met zich meebrengen, omdat het gebied groot is en de rekenresolutie fijn moet zijn. Voor de snelle doorvertaling is daarom gekozen voor een 1D SOBEK model. Dit is in zekere zin verantwoord, omdat de processen zich op een langere tijdschaal afspelen dan bij de zoutuitwisseling bij het sluzen complex (orde weken op het kanaal, orde minuten bij de sluis). Bovendien zullen de horizontale gradiënten op het kanaal in zoutgehalte lager zijn dan bij de sluzen het geval is en is, zoals opgemerkt in paragraaf 3.3, de menging door de scheepvaart dusdanig groot dat een 1D model is te rechtvaardigen. In paragraaf 3.4.1. zal allereerst de modelopzet en calibratie worden behandeld. In paragraaf 3.4.2. zijn de resultaten van de berekeningen voor verschillende projectalternatieven weergegeven.

### 3.4.1 Modelopzet SOBEK model

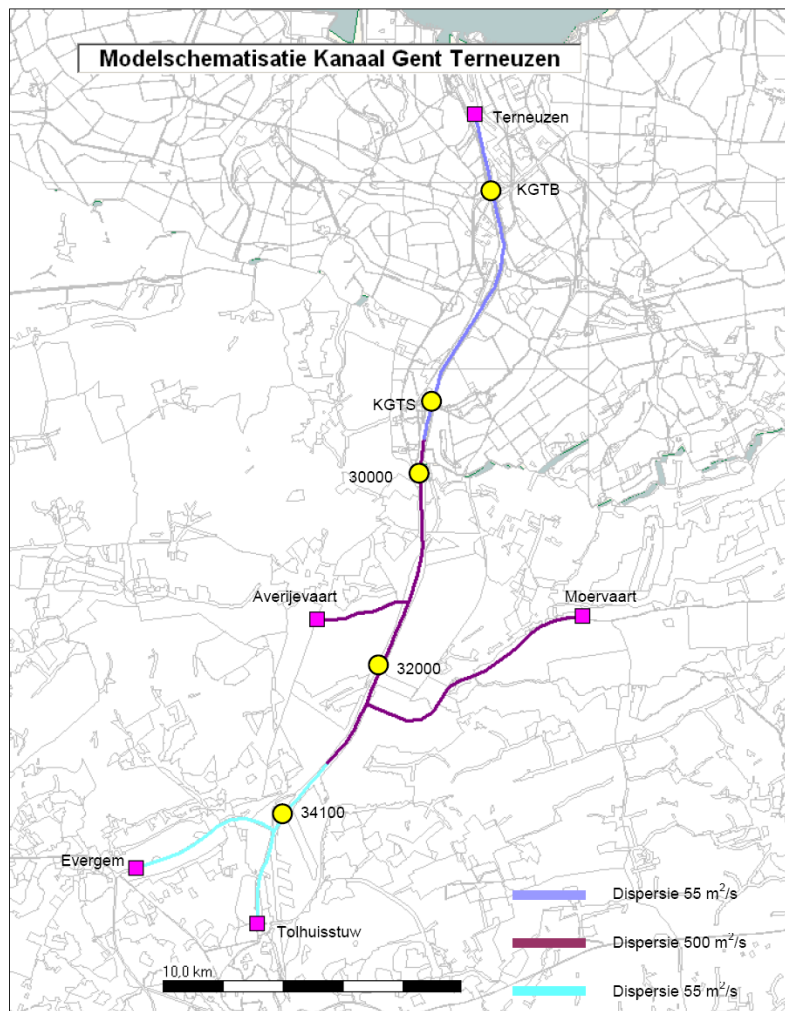
#### Schematisatie van het model

Het SOBEK model is een 1D model, waarin het kanaal is geschematiseerd als een netwerk van verschillende takken, zoals weergegeven in figuur 3.7.

De noordelijke grens van het model ligt ter hoogte van het begin van de zoutvang bij Terneuzen. De zuidelijke grens ligt bij Evergem en de tolhuisstuw. De Moervaart en de Averijevaart zijn ook opgenomen in het netwerk.

Aan de verschillende takken van het netwerk zijn dwarsprofielen van het kanaal toegekend. Deze profielen zijn bepaald op basis van beschikbare bodemgegevens van het kanaal, zoals opgenomen in het eerdere *Deelrapport Gegevensinventarisatie* (Royal Haskoning, 2009).

Op het kanaal liggen een aantal meetpunten, weergegeven als gele bolletjes in figuur 3.7. Deze meetpunten zijn gebruikt voor de modelopzet en calibratie.



**Figuur 3.7: Schematisatie van het SOBEK model. Roze vierkanten geven de modelranden aan, gele bolletjes de meetpunten**

## Modelinstellingen

De instellingen van het model zijn in tabel 3.9 overzichtelijk weergegeven.

Tabel 3.9: Modelinstellingen SOBEK model

Onderdeel	Gebruikte modelinstelling
Instellingen en schematisatie CF	
- rekentijdstap	1 uur
- initiële waterstand	13.5 m waterdiepte
- dwarsprofielen	<p>- Nederland (gegevens Rijkswaterstaat): waterbreedte 110m tot 240m bodemhoogte -11,37m+NAP bodembreedte 62m tot 166m talud 1:1½ tot 1:3 waterdiepte 13,5 m</p> <p>- België (kaart Havendienst van Gent): waterbreedte 110m tot 210m bodemhoogte -11,37m+NAP bodembreedte 42m tot 92m talud 1:2½ waterdiepte 13,5 m</p> <p>- Moervaart (bathymetrie gegevens): waterbreedte 64m bodemhoogte -4,5m+NAP bodembreedte 20m talud 1: 3 waterdiepte 7m</p> <p>- Averijevaart (inschatting profiel op basis van opmeten waterbreedte in Google Earth): waterbreedte 14m bodemhoogte -1,5m+NAP bodembreedte 10m talud ½ :1 waterdiepte 4m</p>
- hydraulische weerstand	Chezy 45 m <sup>1/2</sup> /s

Onderdeel	Gebruikte modelinstelling
<b>Instellingen en schematisatie WQ</b>	
- rekentijdstap	1 uur
- rekenperiode	2 juni 2008 – 31 december 2008
- grootte rekencellen	waterkwaliteit segmenten ca. 300 m lang
- initiële waterkwaliteit	Chloride gehalte = 700 mg/l
<b>Onderdeel</b>	
<b>Gebruikte modelinstelling</b>	
- numeriek schema	Fully implicit iterative methode
- dispersie	Niet mogelijk over open randvoorwaarden Ruimtelijk geschematiseerd tijdens de modelcalibratie (zie figuur in de hoofdtekst): Noordelijk deel dispersie 55 m <sup>2</sup> /s Midden deel dispersie 500 m <sup>2</sup> /s Zuidelijk deel dispersie 55 m <sup>2</sup> /s
<b>Hydraulische randvoorwaarden</b>	
- afvoer Evergem	Meetgegevens stuw Evergem van juni 2008 t/m december 2008
- afvoer Tolhuisstuw	Geen afvoer (0 m <sup>3</sup> /s)
- afvoer Averijevaart	Geen metingen bekend. In model 2002 was een reeks aangemaakt o.b.v. extrapolatie van metingen in de Moervaart. Aangezien het gemiddelde debiet van ca. 1 m <sup>3</sup> /s klein is t.o.v. afvoer vanaf Evergem is aangenomen 1m <sup>3</sup> /s.
- afvoer Moervaart	Meetgegevens Moervaart van juni 2008 t/m december 2008
- waterstand Terneuzen	Meetgegevens waterstand meetpunt KGTB (gegevens Rijkswaterstaat) van juni 2008 t/m december 2008
<b>Waterkwaliteit randvoorwaarden</b>	
- Evergem	Chloride gehalte = 100 mg/l. Dit is het gemiddelde chloride gehalte van meetpunt 34600
- Tolhuisstuw	Chloride gehalte = 100 mg/l. Dit is het gemiddelde chloride gehalte van meetpunt 34600
- Averijevaart	Chloride gehalte = 0 mg/l. Aanname is dat er alleen zoet water vanuit de Averijevaart wordt geloosd.
- Moervaart	Chloride gehalte = 0 mg/l. Aanname is dat er alleen zoet water vanuit de Moervaart wordt geloosd.
- Terneuzen	Op dit punt is uitstroom van water met zout mogelijk. De zout uitstroom wordt berekend door model.
- Sluis Terneuzen	Randvoorwaarde is een droge stof vracht (dry waste load) in gram/seconde. De hoeveelheid chloride is berekend met FINEL 3D in een gedetailleerde sluis modellering.

### Aannames en uitgangspunten

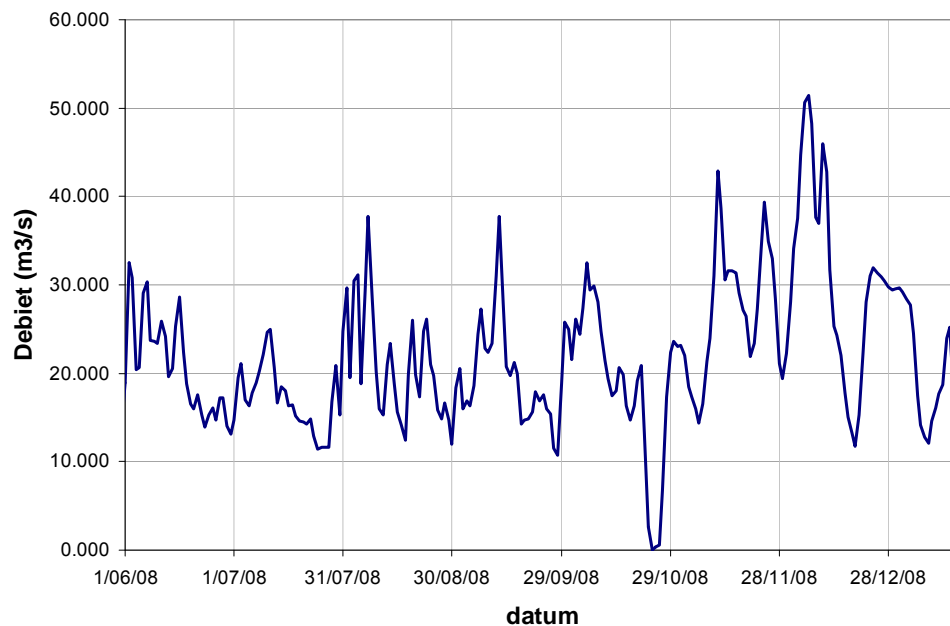
De volgende aannames en uitgangspunten zijn voor het model gehanteerd:

- het aantal schuttingen in het jaar 2005 is ook gebruikt voor de calibratie van het model voor 2008. Er wordt aangenomen dat deze aantallen schuttingen gelijk zijn;
- het aantal schuttingen per jaar wordt evenredig verdeeld per dag;
- wind invloed is verwaarloosd in het model;
- directe neerslag op het kanaal is niet meegenomen in de berekening;
- het SOBEK model kan niet rekenen met dichtheidseffecten ten gevolge van de zoutconcentratie. Hierdoor wordt de berekende zoutindringing op het kanaal volledig bepaald door advection en dispersie;
- de vergroting schutdebiet door realisatie van projectalternatieven (grotere sluisen) wordt niet meegenomen in de randvoorwaarde van het model. Dit heeft weinig invloed doordat dit waarschijnlijk in spuidebiet kan worden opgevangen en dat het totale uitgaande debiet hetzelfde blijft. In het model zijn het schutdebiet en spuidebiet niet gescheiden.

### Randvoorwaarden

In tabel 3.9 is weergegeven welke randvoorwaarden zijn gebruikt voor het model. In de figuren hieronder zijn de tijdreeksen weergegeven.

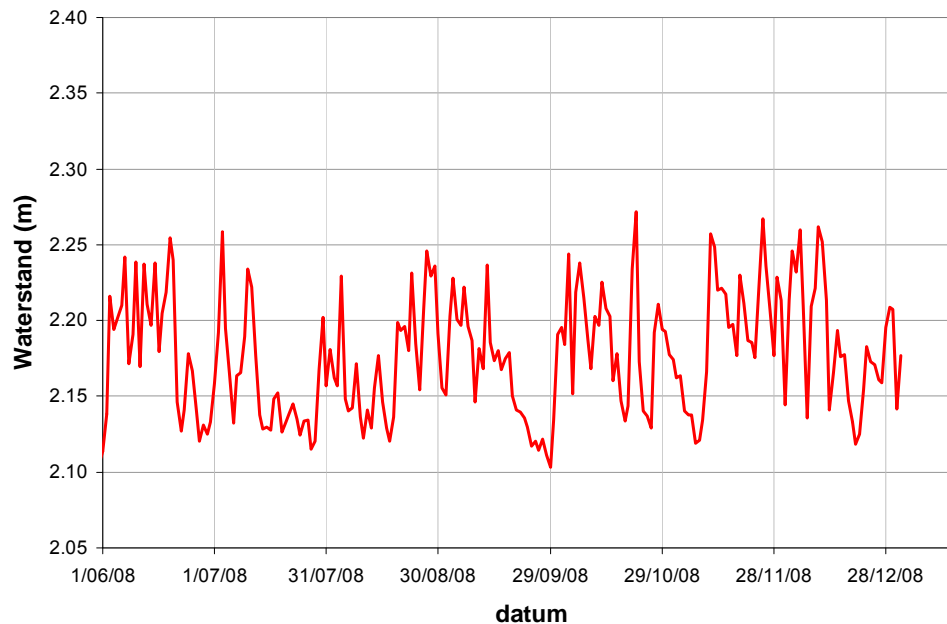
Het debiet bij Evergem is weergegeven in figuur 3.8. Opvallend in deze gemeten tijdreeks is dat eind oktober een aantal dagen het debiet erg laag is, vrijwel  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  terwijl in de dagen daarvoor en daarna het debiet circa  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  is. Dit lage debiet heeft veel effect op de modelresultaten van de zoutindringing, zoals later in de rapportage zal blijken. In de metingen van de zoutgehalten is dit niet terug te zien. Om deze reden lijkt het dat de debietmetingen op deze dagen niet juist zijn.



**Figuur 3.8: Gemeten debiet bij Evergem voor de simulatieperiode. Dit debiet is opgelegd op de bovenstroomse rand**

De waterstand bij de sluisen van Terneuzen is weergegeven in figuur 3.9.

Deze waterstanden zijn overgenomen uit metingen van Rijkswaterstaat van meetpunt KGTB (zie rapportage Gegevensinventarisatie).



**Figuur 3.9: Waterstand bij de sluisen bij Terneuzen voor de simulatieperiode. Deze waterstand is opgelegd op de benedenstroomse rand**

De berekening van de benedenstroomse zoutlast voor de randvoorwaarde is uitgelegd in paragraaf 3.2. Hierin is opgemerkt dat de zoutlast  $S$  (kg/s) is opgegeven per eenheid van dichtheidsverschil. Het dichtheidsverschil tussen het kanaal en de Westerschelde is voor de simulatieperiode bepaald op basis van de metingen van Rijkswaterstaat. Hierin is het meetpunt KGTB als representatief gekozen voor het gedeelte van het kanaal nabij de sluisen. Voor de zoutgehalte van de Westerschelde ter plaatse van de sluisen is geen meetpunt beschikbaar, daarom is een combinatie gemaakt tussen de meetpunten OVHA en HFPL. De chlorideconcentratie is gemiddeld volgens de volgende middeling (overgenomen uit de studie uit 2002),

$$Cl_{sluisen} = \frac{3Cl_{OVHA} + Cl_{HFPL}}{4} \quad (3-3)$$

De chlorideconcentraties zijn omgerekend naar waterdichtheid met behulp van volgende formule (Van Rijn, 1993)

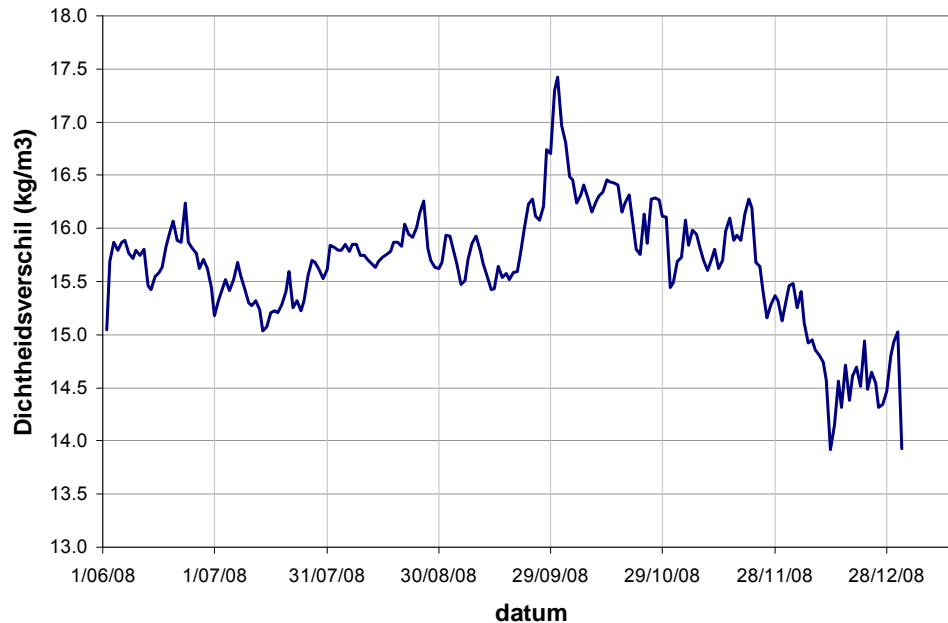
$$\rho = 1000 + 1.455Cl - 0.0065(T - 4 + 0.4Cl)^2 \quad (3-4)$$

Met,

$T$  = watertemperatuur (10 graden gekozen)

$Cl$  = chlorideconcentratie [mg/l]

Het dichtheidsverschil tussen het kanaal en de Westerschelde in de tijd is weergegeven in figuur 3.10.



**Figuur 3.10: Dichtheidsverschil tussen kanaal en Westerschelde zoals gebruikt in de bepaling van de zoutlast**

De zoutlast (kg/s) is vervolgens berekend door dit dichtheidsverschil te vermenigvuldigen met de  $S_{\text{sluis}}$  waarde. Deze waarde verschilt per alternatief/ economisch scenario, waardoor per alternatief / economisch scenario de zoutlast verschilt. De S waarden zijn overgenomen uit tabel 3.5. Deze zoutlast is als een droge stof lozing op het kanaal in het model verwerkt, nabij de benedenstroomse rand.

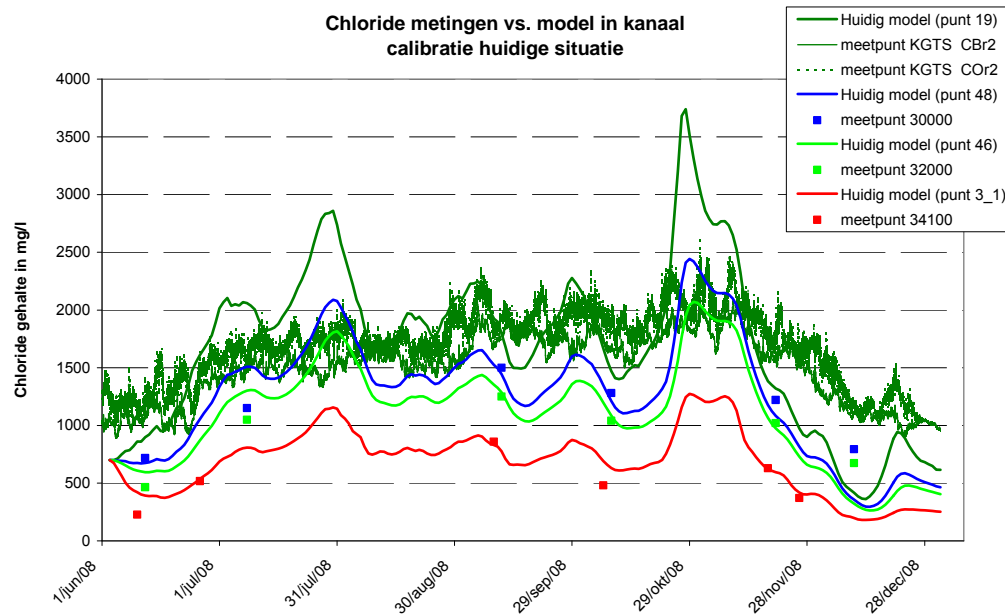
### 3.4.2 Calibratie

De calibratie van het model is uitgevoerd op basis van chloride (zout) metingen op het kanaal op vier punten (figuur 3.11). Als calibratieparameter is de dispersie coëfficiënt gebruikt. Een grotere dispersie coëfficiënt geeft een grotere zoutindringing op het kanaal. Omdat het SOBEK model niet kan rekenen met dichtheidseffecten moet de zoutindringing volledig worden bepaald door dispersie. De advectie (stroming) is namelijk naar het noorden gericht. Hierdoor bleek het niet mogelijk om de zoutindringing in het model goed te simuleren zonder een hoge dispersie coëfficiënt te gebruiken. Uiteindelijk is een ruimtelijk variërende coëfficiënt gebruikt voor drie delen in het kanaal (zie ook figuur 3.7):

- noordelijke deel: dispersie  $55 \text{ m}^2/\text{s}$ ;
- midden deel: dispersie  $500 \text{ m}^2/\text{s}$ ;
- zuidelijk deel: dispersie  $55 \text{ m}^2/\text{s}$ .



De uiteindelijke resultaten van de calibratie zijn weergegeven in figuur 3.7. In dit figuur is te zien dat de modelresultaten goed overeenkomen met de meetresultaten. Het verschil in het begin van de simulatie wordt veroorzaakt door inspeleffecten. Het grote verschil rond eind oktober 2008 wordt veroorzaakt door het lage bovenstroomse debiet dat is gemeten, zoals eerder is opgemerkt. Waarschijnlijk is dit een meetfout. In de modelresultaten is duidelijk te zien dat de berekende zoutindringing behoorlijk toeneemt als het debiet wegvalt.



**Figuur 3.11: Uiteindelijke resultaten van de modelcalibratie. Modelresultaten en meetdata voor 4 verschillende locaties langs het kanaal**

Het model is gecalibreerd voor het gedeelte van het kanaal ten zuiden van km 22 (gemeten vanaf Gent). Het gedeelte van het model binnen 7 km vanaf de sluisen bij Terneuzen is onbetrouwbaar; in dit gedeelte zijn de zoutconcentraties onrealistisch hoog. Dit heeft te maken met de manier van koppeling tussen het FINEL model en het SOBEK, zoals eerder beschreven.

Het feit dat er alleen een zoutmassa berekend wordt zonder dat er water meekomt heeft te maken met beperkingen in het formuleren van randvoorwaarden in Sobek. Vanuit FINEL3D zou je per schutting wel een inkomend resp. uitgaand watervolume kunnen berekenen, waarbij het binnenkomende water zout is het uitgaande water zoet. Deze wisselwerking (koppeling FINEL – SOBEK) is echter niet op natuurlijke wijze aan het 1D-Sobek-model te koppelen. Hierdoor wordt een kleine prijs betaald voor het gebruik van twee verschillende modellen.

Indirect is de water uitwisseling echter wel meegenomen, omdat er in het SOBEK model gebruik wordt gemaakt van gemeten waarden van zowel het debiet als de waterstand op het kanaal. Er vindt dus wel wateruitwisseling plaats op de rand bij de sluisen, precies zoveel als nodig is om het kanaalpeil naar de gemeten stand te brengen. Deze uitwisseling bestaat uit het spuidebiet en schutdebiet samen.

Ten aanzien van de zoutbelasting en de zoutindringing wordt nog opgemerkt, dat in de kalibratie ook impliciet de vullingsgraad door schepen van de sluiskolken is meegenomen. Door te kalibreren op een huidige situatie is impliciet ook de huidige vullingsgraad meegenomen, waardoor ook is meegenomen, dat door vulling van de sluiskolk door schepen er minder water en dus minder zout meekomt dan bij een niet met schepen gevulde kolk. In onderstaand kader wordt dit nader toegelicht.

Nadere toelichting op **effect dat het volume geschut water minder is bij een grotere vulling van de schutkolk door schepen** en hoe dit is meegenomen in de zoutindringingsberekeningen. Met andere woorden, is verdisconteerd, dat als een schutkolk minder gevuld is (ondiepe schepen, geen schepen) er meer zout water mee komt dan bij een meer gevulde schutkolk.

Dit effect zit **impliciet** in de berekeningen. De analyse met finel 3D (paragraaf 3.2) heeft opgeleverd dat de sluiskolk bij een bepaalde openingstijd ongeveer 80% van de volledige zoutinhoud van de kolk aan zoutlast oplevert. Er is gerekend met een lege kolk (dat wil zeggen zonder schepen). Dit levert vervolgens een bepaalde zoutlast op, die als randvoorwaarde in de zoutindringingsberekening is ingevoerd. Deze berekening is geïjkt met gemeten gegevens over het jaar 2008: de huidige schut- en spui volumina over het jaar, de afvoergegevens op het kanaal en de gemeten zoutconcentraties. Uit de ijking volgt een bepaalde dispersiecoëfficiënt. In de ijking zit dus ergens het effect, dat minder zout wordt uitgewisseld bij sluiskolken die vol met schepen liggen en meer zout als de kolken leeg zijn. Tevens is in deze ijking in feite ook de werkelijke schuttijd meegenomen.

De effecten zijn niet **expliciet** doorgerekend voor de zoutbelasting, maar zitten impliciet in de ijking en de bepaling van de dispersiecoëfficiënt (die dus eigenlijk een wordt misbruikt als een vuilnisbakterm).

Voor de doorrekening van de scenario's is de dispersiecoëfficiënt in het zoutindringingsmodel gelijk gehouden en is evenredig met het aantal schuttingen de zoutbelasting opgevoerd. Hier is dus eigenlijk de huidige verhouding volle / lege kolken en de huidige verhouding kleine / grote schepen in relatie tot de sluiskolkgrootte voor de 3 **huidige sluizen** aangehouden. Als in een toekomstig scenario anders met de vulling van de sluizen wordt omgegaan, levert dit een verschuiving op van de zoutindringing. Hoeveel deze verschuiving is, kan pas worden bepaald als meer in detail naar het verloop van het schutproces wordt gekeken over het jaar en de vulling met scheepsoorten van de kolken. Deze detailanalyse zal dan moeten worden gebaseerd op de simulatieresultaten van Prosim, die immers met een discreet computersimulatiemodel ieder schip als object volgt.

Door het model in meer dan 3 delen op te splitsen en elke deel een andere dispersie coëfficiënt mee te geven zou dit verbeterd kunnen worden. Echter neemt hierdoor het aantal variabelen ook toe. In het grootste gedeelte van het kanaal wordt de chloride concentratie goed voorspeld. Bovendien zijn de onderzoeksvragen prima te beantwoorden met dit model. Daarom is ervoor gekozen om op deze wijze verder te gaan met het model.

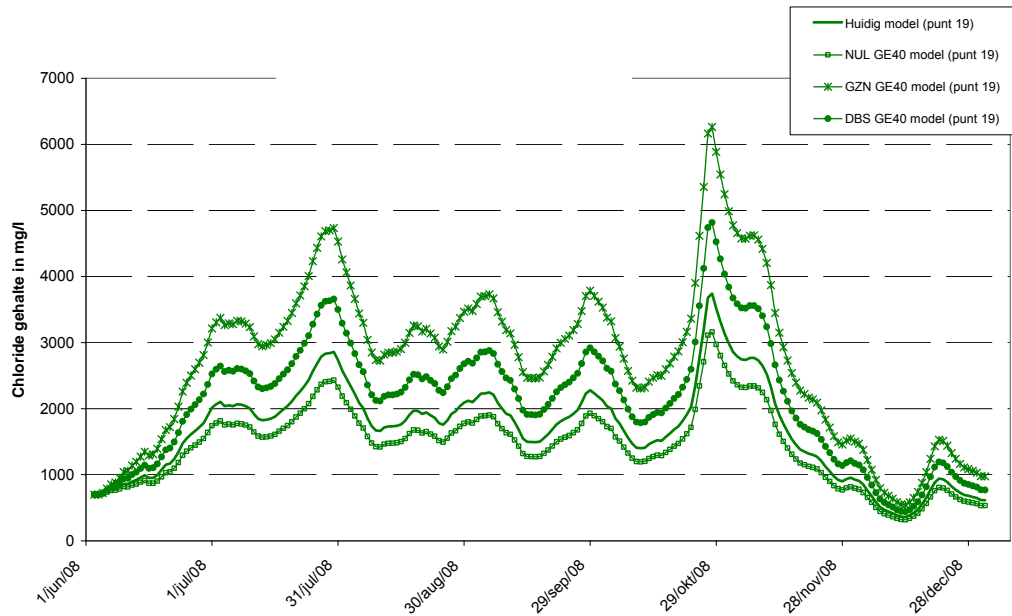
### 3.4.3 Berekeningen projectalternatieven

Met het gecalibreerde model zijn vervolgens drie projectalternatieven (allen voor het economisch scenario Global Economy 2040) doorgerekend:

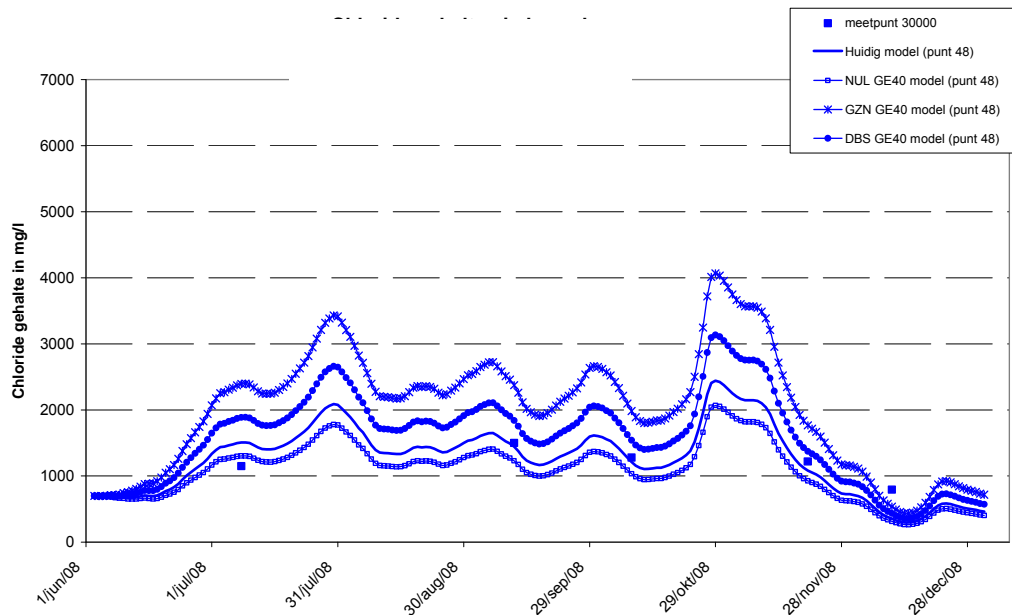
- NUL\_GE40; het nulalternatief voor het economisch scenario Global Economy voor het jaar 2040;
- GZN\_GE40; het alternatief grote zeesluis nieuw binnen het complex voor het economisch scenario Global economy voor het jaar 2040;
- CBS\_GE40. het alternatief Combisluis voor het economisch scenario Global Economy voor het jaar 2040.

Ten opzichte van de huidige situatie verandert het aantal schuttingen en de gebruik van de sluizen. Dit resulteert uiteindelijk voor elk projectalternatief in een aparte zoutlast  $S$  (kg/s). Voor elk berekend alternatief is deze zoutlast  $S$  op eenzelfde manier in het model gebracht als beschreven in de calibratie. De simulatieperiode van het model is gelijk gehouden als in de calibratie.

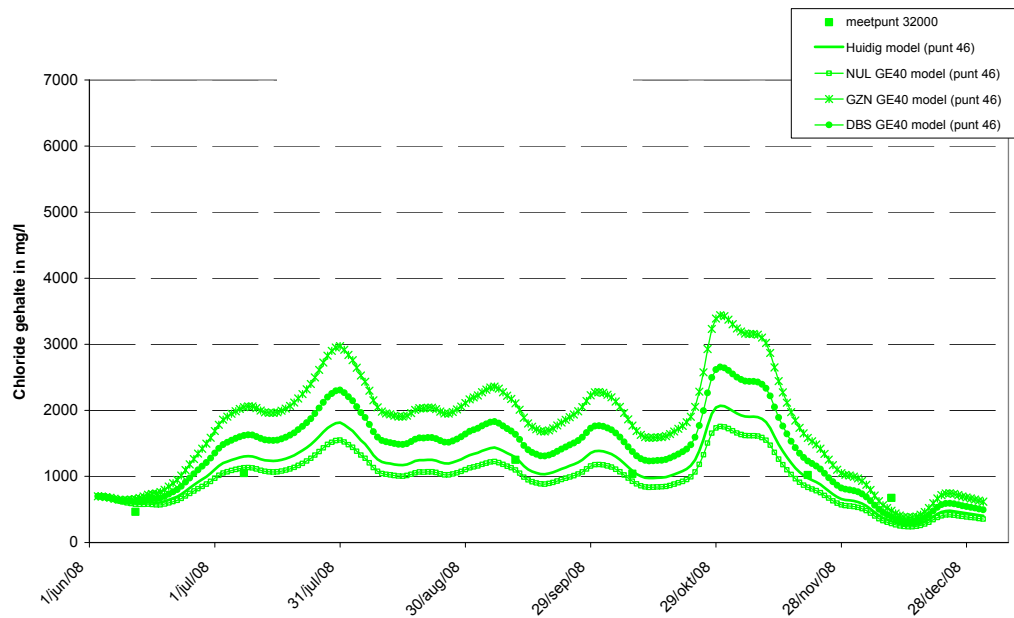
In de figuren 3.12 t/m 3.15 zijn de berekende chlorideconcentraties weergegeven voor de drie alternatieven en de huidige situatie voor de vier meetpunten.



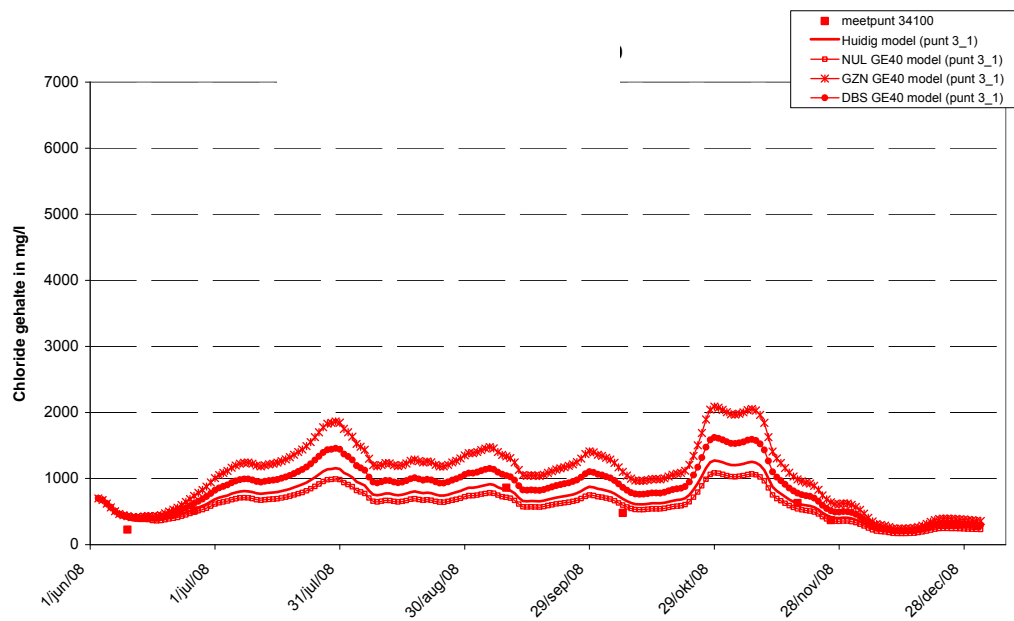
**Figuur 3.12: Resultaten (chloride concentraties) berekeningen alternatieven voor het meetpunt KGTS**



**Figuur 3.13: Resultaten (chloride concentraties) berekeningen alternatieven voor het meetpunt 30000**



**Figuur 3.14: Resultaten (chloride concentraties) berekeningen alternatieven voor het meetpunt 32000**



**Figuur 3.15: Resultaten (chloride concentraties) berekeningen alternatieven voor het meetpunt 34100**

In de resultaten is duidelijk te zien dat hoe hoger de extra zoutlast hoe hoger de chloride concentratie op de kanaal.

Uit de grafieken blijkt dat in de periode van augustus tot november (bovendebiet variërend tussen 10 en 30 m<sup>3</sup>/s) de verhouding tussen de chloride concentratie van de huidige situatie en de alternatieven min of meer constant is in de tijd.

In tabel 3.10 is voor de drie alternatieven de gemiddelde factor bepaald tussen de chloride concentratie in die periode en de concentratie in de huidige situatie. Ook is de factor weergegeven van de bron van de zoutlast  $S_{\text{scenario}}/S_{\text{huidig}}$ .

In de tabel vallen de volgende punten op:

- de factoren bij de meetpunten op het kanaal komen aardig in de buurt van de factor bij de bron, hoewel de factoren op het kanaal allemaal dichterbij de 1 liggen;
- hoe verder weg van de bron, hoe dichterbij de 1 ligt. De factoren van meetpunt 34100 liggen allemaal dichterbij de 1 dan bij KGTS.

Hieruit kan worden opgemaakt dat de invloed van de extra zoutlozing afneemt naar de bovenstroomse zijde van het kanaal. Verder blijkt dat bij het NUL\_GE40 alternatief de zoutlast afneemt op het kanaal. Dit wordt veroorzaakt door het afnemen van het aantal schuttingen bij een toenemend aantal schepen. Het aantal schuttingen is minder, omdat het sluiscomplex efficiënter wordt gebruikt (minder lege schuttingen, zie ook appendix 2).

**Tabel 3.10: Factoren van de verhouding van de gemiddelde zoutconcentratie voor de drie alternatieven ten opzichte van de huidige situatie en het NUL alternatief**

Locatie op het kanaal	Factor t.o.v. huidige situatie		
	NUL_GE40	GZN_GE40	CBS_GE40
$S_{\text{alternatief}}/S_{\text{huidig}}$	0,84	1,69	1,30
KGTS	0,850	1,655	1,278
30000	0,852	1,645	1,275
32000	0,855	1,635	1,27
34100	0,862	1,60	1,255
Locatie op het kanaal	Factor t.o.v. het NUL alternatief		
		GZN_GE40	CBS_GE40
$S_{\text{alternatief}}/S_{\text{huidig}}$	-	2,01	1,54
KGTS	-	1,94	1,50
30000	-	1,92	1,49
32000	-	1,91	1,48
34100	-	1,85	1,46

De factoren zijn in zeker zin afhankelijk van het bovendebiet uit Evergem. Bij een lager debiet lijkt de factor hoger te worden. Hierin zit echter wel een vertraging. Een lager debiet zorgt een aantal dagen later voor een hogere factor. Echter is de range van de debieten waarmee het model is doorgerekend niet groot genoeg om hier verdere conclusies aan te verbinden.

In de bovenstaande getallen is er geen rekening gehouden met een kanaalverdieping bij het alternatief van de grote zeesluis. Indien wel rekening wordt gehouden met de kanaalverdieping, dan zijn de percentages hoger (tabel 3.11).

Doordat het kanaal wordt verdiept, maar het debiet gelijk blijft wordt de gemiddelde stroomsnelheid minder en kan het zout makkelijker het kanaal indringen. De toename veroorzaakt door de verdieping is in de orde van 60 – 75 % dichter bij de sluis tot 100 % aan het einde van het kanaal nabij Gent.

Tabel 3.11: Factoren inclusief verdieping kanaal bij GZN\_GE40

Locatie op het kanaal	GZN_GE40 factor t.o.v. de huidige situatie	Verskil met factor zonder kanaalverdieping t.o.v. de huidige situatie
KGTS	2,28	2,38-1,66=0,62
30000	2,36	2,36-1,65=0,71
32000	2,41	2,41-1,64=0,77
34100	2,59	2,59-1,60=0,99
Locatie op het kanaal	GZN_GE40 factor t.o.v. het NUL alternatief	Verskil met factor zonder kanaalverdieping t.o.v. het nulalternatief
KGTS	2,69	2,69-1,94=0,75
30000	2,77	2,77-1,92=0,85
32000	2,82	2,82-1,91=0,91
34100	3,00	3,00-1,85=1,15

#### 3.4.4 Conclusies

Uit de berekeningen van de scenario's kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- het Nulalternatief bij een Global Economy-scenario voor het jaar 2040 (afgekort GE2040) geeft een vermindering van de chloride concentratie van ongeveer 15 % ten opzichte van de huidige situatie;
- het alternatief Grote Zeesluis geeft bij het GE2040 scenario een verhoging van de chloride concentratie op het kanaal van ongeveer 60 – 65 % ten opzichte van de huidige situatie en 85 – 95 % ten opzichte van het NUL alternatief. Dit is exclusief verdieping van het kanaal. Met verdieping komt hier 60 tot 100 % bij, afhankelijk van de locatie op het kanaal;
- het alternatief Diepe Binnensluis bij het GE2040 scenario geeft een verhoging van de chloride concentratie op het kanaal van ongeveer 25 - 28 % ten opzichte van de huidige situatie en 45 – 50 % ten opzichte van het NUL alternatief.

Deze percentages gelden voor een bovendebiet van ongeveer 10 en 30 m<sup>3</sup>/s. In deze range lijkt de verhouding in chloride concentratie tussen projectalternatief en huidige situatie ongeveer gelijk aan de verhouding tussen de zoutlast S aan de bron. Dit heeft als voordeel dat voor andere situaties (andere sluisvarianten, maatregelen tegen zoutindringing, etc.) alleen een schatting hoeft worden gemaakt van de bronzoutlast. De doorvertaling kan plaatsvinden op basis van deze verhouding. Uit de resultaten blijkt wel dat variatie in de tijd van de absolute zoutconcentratie vooral gedomineerd is door de bovenafvoer. Op het moment dat de bovenafvoer een aantal dagen erg laag is (paar m<sup>3</sup>/s, bijvoorbeeld eind oktober 2008) kan de zoutconcentratie snel oplopen tot waarden die 2x zo hoog zijn als bij een normale afvoer. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat het model niet gecalibreerd is voor extreme situaties, omdat deze niet in de simulatieperioden voorkwamen. Hierdoor zijn de modelresultaten enigszins onzeker.

Op basis van deze rekenresultaten kan de relatie worden gelegd tussen het aantal schuttingen met een bepaalde sluis en de zoutindringing op het kanaal. Deze relatie tezamen met het bovendebiet vormen de input om voor verschillende alternatieven en scenario's de zoutindringing te kunnen doorrekenen. Deze relaties zijn nader uitgewerkt en bepaald voor het maken van een modeltool om op eenvoudige wijze de mate van zoutindringing te berekenen (zie hoofdstuk 5).

### 3.5 Effect van zeespiegelstijging

De in paragraaf 3.2 en 3.4 uitgevoerde analyses gaat impliciet uit van de vooronderstelling dat de natuurlijke omstandigheden gelijk blijven, anders dan de normale variaties met korte tijdschalen, zoals seizoensafhankelijke bovenafvoer en dagelijkse waterstandsvariaties op de Westerschelde. In werkelijkheid zijn deze condities ook op langere termijn voortdurend aan veranderingen onderhevig. Er is sprake van een voortgaande relatieve zeespiegelstijging (in de Lage Landen ook mede ten gevolge van bodemdaling) en een sterker wordende variatie in waterafvoer ten gevolge van toenemende neerslagextremen.

Alhoewel wereldwijd de "klimaatscepsis" wijdverbreid is en de soliditeit van de gangbare resultaten van klimaatonderzoek in toenemende mate ter discussie staat, is het verstandig om ten aanzien van mogelijke gevolgen van klimaatveranderingen door toedoen van de mens een no-regretbeleid te voeren.

Dit geldt in versterkte mate voor Nederland en Vlaanderen, die door hun laaggelegen ligging kwetsbaar zijn voor veranderingen in het klimaat. Deze veranderingen betreffen gelukkig over het algemeen langjarige trends, zodat de tijdschalen waarop significante veranderingen optreden meestal groter zijn dan de levensduur van civieltechnische constructies zoals het sluizencomplex bij Terneuzen. Dit maakt het mogelijk om tijdig anticiperende maatregelen te nemen.

De twee effecten waarmee rekening moet worden gehouden zijn: versterkte zeespiegelstijging en toenemende variatie in de bovenafvoer van het Kanaal Gent-Terneuzen. (Het zij opgemerkt dat de zeespiegelstijging als gevolg van het wereldwijd smelten van landijs tevens tot gevolg heeft dat het zeewater grosso modo minder zout zal worden. Deze desalinisatie is echter zeer gering en het effect ervan zal volstrekt verwaarloosbaar zijn in estuaria als de Westerschelde, waar de natuurlijke dagelijkse variaties in zoutgehalte uit zichzelf al aanzienlijk zijn.) In de afgelopen eeuwen hebben de Lage Landen te maken gehad met een gemiddelde zeespiegelstijging van 15 tot 20 cm per eeuw en een natuurlijke bodemdaling van ongeveer 5 cm per eeuw. Het betreft hier een relatieve daling van de aardkorst sinds de laatste ijstijd. Daarbij moeten nog eventuele lokale bodemdaling door inklinking (t.g.v. ontwatering, zoutwinning en gaswinning) worden gerekend. Hier bovenop komt de bijdrage van de zeespiegelrijzing als gevolg van klimaatverandering. De schattingen over de grootte hiervan lopen sterk uiteen. Het rapport van de Deltacommissie 2008, op basis waarvan de Nederlandse regering haar beleid bepaalt, gaat uit van een mogelijke relatieve zeespiegelstijging van 65 tot maximaal 130 centimeter tot het jaar 2100.



Deze stijging heeft ook gevolgen voor de Kanaalzone Gent-Terneuzen. Langs de Westerschelde zal de hoeveelheid zout kwelwater onder de zeedijken door toenemen, hetgeen verzilting van het achterland in de hand werkt. Daarnaast veranderen de omstandigheden van het schutproces in de sluisen bij Terneuzen. Bij gelijkblijvende binnenwaterstand op het kanaal (2,13 m boven NAP) zal het niveauverschil met het buitenwater afnemen. Op lange termijn zal op de top van hoogwater de Westerschelde hoger staan dan het kanaal. Bij ongewijzigd schutbeleid zal dit leiden tot hogere zoutlasten op het kanaal. Derhalve dreigt ook langs deze weg verzilting van het achterland. Een gunstig bijeffect van het verkleinen van het niveauverschil is een lichte afname van de benodigde hoeveelheid zoet nivelleringswater uit het kanaal.

Per tien centimeter zeespiegelstijging gaat het hier bijvoorbeeld al om een bespaard volume van 1160 m<sup>3</sup> per schutcyclus voor de Westsluis. Dit effect is echter niet alleen positief. Een kleinere hoeveelheid nivelleringswater betekent immers ook een lagere tegendruk vanuit het kanaal op de zoutlast in de sluiskolk, en een grotere laagdikte van de zoutvoorraad. Teneinde het zoutbezwaar op het kanaal zo klein mogelijk te houden, is het van belang dat er via de omloopriolen kan worden gespuid bij een zo groot mogelijk niveauverschil met het buitenwater. Dit vereist omloopriolen van voldoende capaciteit.

Tevens zal op lange termijn overwogen moeten worden of het schutten van schepen rondom hoogwater nog verantwoord is, of dat men deze scheepsbewegingen uitstelt tot een moment dat de buitenwaterstand voldoende lager staat dan het kanaal. Op lange termijn kan eveneens worden bekeken of het wenselijk is om het gemiddelde kanaalpeil te verhogen. Het ligt voor de hand om de opzet van het kanaalpeil dan gelijke tred te laten houden met de zeespiegelstijging. Dit is alleen een kwalitatief antwoord. Een preciezer antwoord zou een uitgebreidere studie vergen. Vanuit het kanaal zal dan tevens enige tegendruk optreden tegen de zoute kwel in de nabije omgeving.

Over toenemende variatie in de bovenafvoer van het Kanaal Gent-Terneuzen als gevolg van klimaatverandering zijn geen harde cijfers beschikbaar. In het algemeen wordt door klimatologen een trend verwacht in de richting van drogere zomers en nattere winters in Noordwest-Europa. Deze trend is in de afgelopen decennia reeds enigszins zichtbaar geworden. Het is eventueel mogelijk om de afvoervariatie in het kanaal van de afgelopen jaren (zeer voorzichtig) door te extrapoleren, teneinde een schatting te verkrijgen van de variatie in de nabije toekomst. In de huidige scenario's voor het beheer van het kanaal en de ontwikkeling van de zoutlast wordt reeds rekening gehouden met seizoensvariaties in de kanaalafvoer. Deze variatie vertaalt zich momenteel doorgaans in een seizoensvariatie van de zoutlast op het kanaal. Voor de toekomst verdient het aanbeveling om af te wegen of met deze seizoensvariatie kan worden volstaan, of dat het noodzakelijk is om op het kanaal meer buffercapaciteit voor zoet water te creëren. De meest voor de hand liggende locatie van deze buffercapaciteit is het kanaal zelf. Er kan overwogen worden om het kanaalpeil in de winter structureel hoger te zetten dan in de zomer, en zo de beschikbare zoetwatervoorraad optimaal te gebruiken. Dit pakt niet alleen gunstig uit voor de hoeveelheid zoet water waarmee het sluisencomplex kan worden doorgespoeld, maar ook voor het niveauverschil tussen binnen- en buitenwater. Voor deze maatregel is uiteraard verhoging van de waterkeringen langs het kanaal noodzakelijk.



Aangezien zeespiegelstijging (gelukkig) een zeer langjarige trend is, valt niet goed te voorzien wanneer de bovengenoemde maatregelen noodzakelijk c.q. urgent zullen worden. Het is geboden om de kanaalzone wel tijdig, maar niet veel te vroeg aan te passen op klimaateffecten die op dit moment nog niet te overzien zijn. Een zeer voor de hand liggende maatregel voor het huidige moment is het feit dat het sluizencomplex in Terneuzen moet voldoen aan alle eisen die aan zeeweringen worden gesteld, overeenkomstig de huidige inzichten van de Deltacommissie. Het is echter verstandig om niet te ver vooruit te lopen met overige maatregelen voor de lange termijn. In een later stadium kan beter en effectiever worden overwogen welke maatregelen tegen verzilting van het kanaal als gevolg van zeespiegelstijging geboden zijn. Dan is ook mogelijk om tijdig over te gaan tot het opzetten van het kanaalpeil en/of het wijzigen van schutscenario's in het sluizencomplex.

### 3.6 Effect op de omgeving en compenserende maatregelen

Voor de effecten op de omgeving wordt uitgegaan van de wijzigingen van de chlorideconcentraties in het kanaalwater. Uit voorgaande paragrafen kan uitgegaan worden van de procentuele wijzigingen voor de drie alternatieven.

Voor het NUL-alternatief betekent dit dat de zoutlast verlaagt tot 85 procent van de huidige zoutlast. Hierdoor zullen de effecten ten gevolge van de verzilting zich minder uiten. Dit kan als een positief gevolg beschouwd worden.

Voor de twee alternatieven GZN en CBS is er wel een verhoging van het zoutgehalte te verwachten van respectievelijk 60 à 65% en 25 à 28%, behorende bij het economisch scenario GE2040. Hierdoor zullen ook de effecten voor de receptoren van het water verhogen. Bij de gebruikers van het kanaalwater zijn dit de bedrijven die het water oppompen. Daarnaast zijn er ook de constructies die in rechtstreeks contact staan met het kanaal zelf.

De schepen die op het kanaal varen worden verondersteld voldoende aangepast te zijn op zilte omstandigheden. Voor de constructies aan kades en in het kanaal zelf kan er een invloed zijn op zowel betonconstructies als stalen elementen. Betonnen elementen kunnen een versnelde veroudering vertonen onder invloed van chloriden maar tevens door sulfaten die eveneens in zeewater aanwezig zijn. Calcium kan hierdoor verhoogd oplossen. Momenteel komen reeds geregeld verhoogde concentraties voor in het kanaal zodat vermoedelijk de meeste betonnen constructies reeds een aangepaste samenstelling hebben zodat de verwachte effecten beperkt blijven. Voor staalconstructies betekenen chlorides verhoogde corrosie. De invloed van chlorides op de corrosiesnelheid is echter lager dan deze van stromingssnelheid en temperatuur. Dit fenomeen gecombineerd met de kennis dat bij de constructie van stalen elementen in het kanaal vermoedelijk geleid zal hebben tot preventieve maatregelen, wordt ook hier weinig effect verwacht.

Bij de gebruikers van kanaalwater kan onderscheid gemaakt worden tussen: koelwater en proceswater. Bij het proceswater zij meestal de eisen relatief hoog waardoor vele bedrijven reeds gebruik maken van grond- of leidingwater. Waar de kwaliteitseisen minder belangrijk zijn, is het mogelijk dat een verhoging van 60 % gedurende bepaalde periodes te veel is waardoor er tijdelijk moet overgeschakeld worden naar leidingwater.

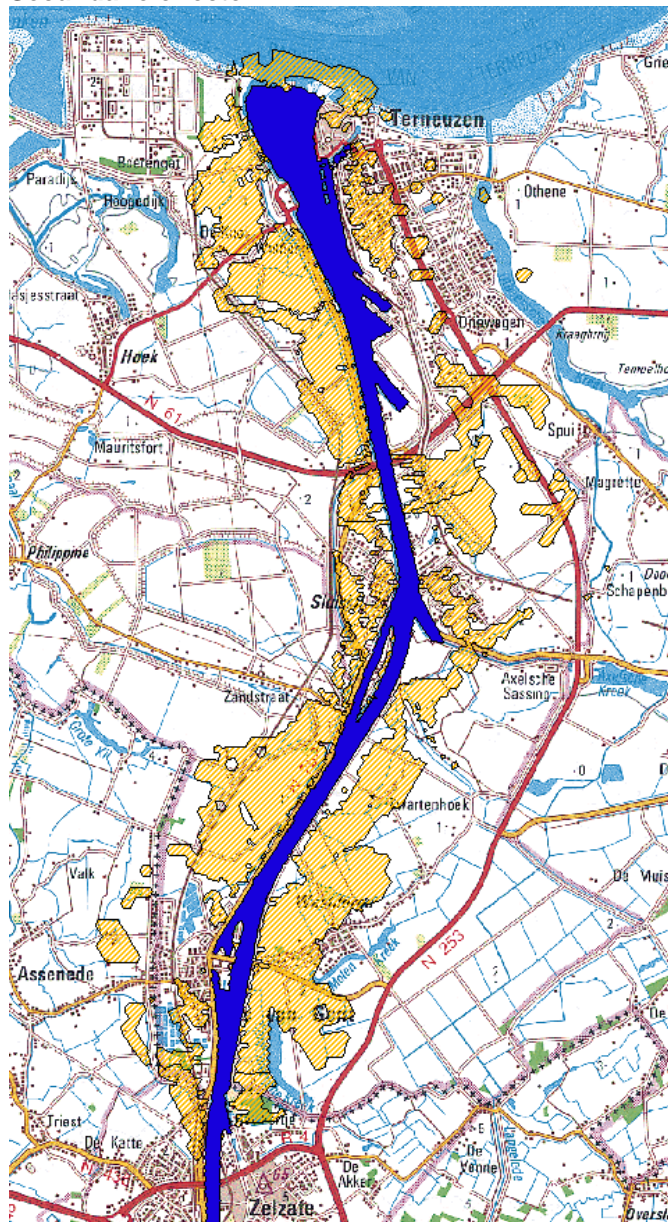
Er dient wel opgemerkt te worden dat de verhoging minder groot is dan de natuurlijke fluctuatie die nu jaarlijks optreedt ten gevolge van seizoenale verschillen en bijgaande verschillende afvoerdebieten. Er is momenteel geen duidelijk overzicht van de gebruikers van kanaalwater en de bestaande maatregelen die reeds genomen worden (vb ontzilting door osmose of dergelijke). Indien een beeld is van de hoeveelheden water die door een verhoging niet meer gunstig beschouwd kunnen worden, kan een inschatting gemaakt worden van de hoeveelheid water dat dient te worden afgenomen van drinkwatermaatschappijen of opgepompt moet worden uit de ondergrond. Op basis van deze debieten kan een inschatting gemaakt worden van de kostprijs van dit effect. Aan Nederlandse zijde wordt geen kanaalwater gebruikt.

Het gebruik van koelwater kan voor problemen zorgen indien leidingen en onderdelen die in contact komen met het kanaalwater niet aangepast zijn. Veel leidingen zijn reeds in roestvrij staal (kwaliteit 304 of 316) of koper.

Ook koperlegeringen of titanium behoren tot de mogelijkheden. Vooral voor de grote gebruikers van koelwater zoals de elektriciteitscentrale is het omschakelen naar leidingwater quasi onmogelijk.

Aangepaste materialen zijn dan ook noodzakelijk. Om een goede inschatting te kunnen maken van de kostprijs die gepaard gaat met een noodzakelijke vervanging van materialen ten gevolge van de verwachte verzilting zou een uitgebreide inventaris moeten gebeuren van de verschillende installaties. Gezien de huidige fluctuaties in de chloridenconcentraties door seizoenale variaties is de kans reëel dat reeds heel wat installaties in aangepaste materialen zijn uitgevoerd.

### Secundaire effecten



**Figuur 3.17** beïnvloedingsgebied grondwater

Voor de secundaire effecten wordt gekeken naar de wijziging van de concentratie in het grondwater. Ter hoogte van het noordelijke deel van het kanaal is het kanaalpeil hoger gelegen dan het grondwaterpeil en ontstaat er een infiltratie van verzilt kanaalwater naar het grondwater. De concentratie van chlorides in het grondwater kan hierdoor toenemen. De zone die beïnvloed wordt door de infiltratie bevindt zich aan Nederlandse zijde in een strook van ongeveer 1 km van het kanaal. Deze zone is bepaald met behulp van het regionale grondwatermodel, dat is ontwikkeld en toegepast in de verziltingsstudie Kanaal Gent-Terneuzen (Royal Haskoning en Envico, 2002). In deze zone kan door een verhoogde concentratie chlorides een effect optreden op de opbrengst van landbouwgewassen.

Qua grootteorde kan verwacht worden dat een verhoging van 60 à 65 % bij alternatief GZN een oogstderving van 3 à 5 % impliceert (op basis van berekeningen en gewassen zoals uitgevoerd in de verziltingsstudie in 2002). De oppervlakte landbouwgebied, die te maken krijgt met derving van de opbrengst, bedraagt circa 1900 hectare. Op basis van een opbrengst van € 3000,-- per hectare (getal 2002) bedraagt de derving orde € 300.000,--.

Ter hoogte van de zuidelijke zone (vooral gelegen in België) is het grondwater hoger dan het peil van het kanaal. Hierdoor heeft het kanaal een drainerende werking en is er geen verzilting van het grondwater. Er zijn dan ook geen secundaire effecten in deze zone.

Voor de effecten op natuur wordt gestreefd naar het bewaren van het licht brak karakter van de Canisvlietse Kreek (een natura 2000 gebied met een oppervlak van 41 hectare). Concreet betekent dit een beperking van de chloridenconcentratie tot ongeveer 1000 mg/l. Door de verhoging van de concentraties in het kanaal ter hoogte van het natuurgebied, is het mogelijk dat dit niet bewaard blijft. Milderende maatregelen zijn mogelijks noodzakelijk. Een opstuwen van het oppervlaktewaterpeil binnen de Canisvlietse Kreek met ongeveer 50 cm zou de kwelvoeding uit het kanaal met ruim 20% kunnen reduceren. Indien er tegelijk ook aan de oppervlaktewatertoevoer gewerkt wordt, door meer slotjes in de Canisvlietse Kreek te laten afwateren, kan de uiteindelijke chlorideconcentratietoename beperkt worden. De investeringskosten die hiermee zijn gemoeid bedragen orde € 200.000,-- exclusief BTW.

Een andere oplossing zou kunnen zijn om een gedeelte van het kanaal af te dekken met folie (over ongeveer 1,5 km) en zo de (zoute) kwel te beperken. De investeringskosten bedragen orde 8 M€.

Indien niet kan voldaan worden aan het bewaren van de huidige situatie kan worden gekozen voor natuurcompensatie. Dit betekent de aankoop en inrichting van een alternatief stuk grond. De hiermee gemoeide investering is globaal geschat op 8 M€.

## 4 MAATREGELEN TER BEPERKING ZOUTBEZWAAR EN ZOUTINDRINGING

### 4.1.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een aanzet gegeven voor de ontwikkeling van mogelijkheden om in de zeesluizen van Terneuzen (nieuw, misschien voor een deel ook toepasbaar in de bestaande sluizen) te komen tot een zo efficiënt mogelijke methode van scheiding van zout Westerscheldewater en zoet kanaalwater. Efficiënt betekent in dit geval de combinatie van een minimum verlies aan zoet water en een maximum tegengaan van zoutindringing op het kanaal.

Een aantal concepten wordt op een rij gezet, en een doordenking van de (on)mogelijkheden in de Terneuzense situatie wordt gegeven. Waar mogelijk worden deze mogelijkheden onderbouwd met de modelresultaten van de FINEL berekeningen.

#### **Benodigd zoet water debiet**

Om de zout indringing te beperken is een hoeveelheid zoet water debiet nodig vanuit het kanaal. Voor dit debiet is een eerste inschatting gemaakt op basis van de volgens aannames:

- de kolk wisselt voor 75 % uit bij elke schutting. Bovendien wordt een aftrekpost van 10% toegepast voor het scheepstonnage (een schip neemt kolkvolume in beslag; dit volume wordt dus niet uitgewisseld);
- een economisch groeiscenario 'Global economie' is van toepassing; de prognoses gelden voor 2040;
- de scheepsaantallen (schuttingen en aantal schepen) zijn van de ProSim 2008 studie afkomstig. Deze tabel is opgenomen in appendix 2. Dit zijn niet de meest recente scheepsaantallen, omdat deze aantallen pas over enkele weken beschikbaar komen.

Op basis van het aantal schuttingen is berekend welk kolkvolume per jaar wordt uitgewisseld. Voor de verschillende alternatieven zijn de volgende benodigde zoetwaterdebieten berekend (zie ook appendix 2):

- nulalternatief: 20 m<sup>3</sup>/s;
- alternatief grote zeesluis: 45 m<sup>3</sup>/s;
- alternatief Combisluis: 31 m<sup>3</sup>/s.

Deze debieten zijn groter dan hetgeen in het tractaat is voorzien, dit was namelijk 13 m<sup>3</sup>/s.

Als er niet wordt gerekend met zoet/zout uitwisseling, maar alleen met het nivelleringswater dan wordt er op basis van [aantal schuttingen x kolkoppervlak x waterschijf van 2,2m] een volume aan water verloren dat (na aftrek van 10% t.g.v. aanwezigheid schepen) overeenkomt met:

- nulalternatief: 6 m<sup>3</sup>/s;
- alternatief grote zeesluis: 10,5 m<sup>3</sup>/s;
- alternatief Combisluis: 8 m<sup>3</sup>/s.

Als de bovenafvoer lager is dan bovengenoemde debieten dan zakt het kanaalpeil, tenzij er extra water wordt toegelaten aan het kanaal of water terugwint bij het nivelleren.



De huidige aanvoer van zoet water van het kanaal is beperkt: het debiet varieert van minder dan 10 m<sup>3</sup>/s in droge tijden tot maximaal 160 m<sup>3</sup>/s in natte perioden. In droge tijden zal de hoeveelheid zoet water dus problemen kunnen geven. Daarom is de volgende algemene conclusie te trekken voor de oplossingen om de zoutindringing te voorkomen:

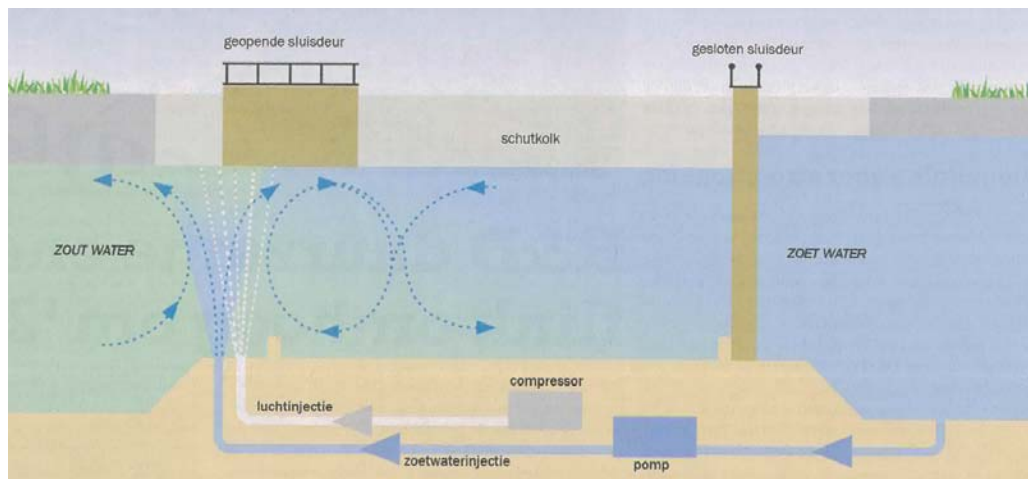
*Er moet gezocht worden naar maatregelen die een minimum menging geven van zoet en zout water en zo weinig mogelijk zoet water verspillen.*

Tevens moet bij de maatregelen rekening worden gehouden dat de spuicapaciteit blijft bestaan in de wintermaanden, indien de middensluis verdwijnt. Voor de volledigheid worden in het vervolg van de notitie meerdere mogelijke maatregelen besproken. Aan het einde van deze notitie zullen deze maatregelen worden gerangschikt naar effectiviteit.

#### 4.1.2 Luchtbellenschermen

Luchtbellenschermen zijn o.a. toegepast in de bestaande Westsluis van Terneuzen, in de Volkeraksluizen en bij de sluisen in de Afsluitdijk.

De werking van deze schermen (figuur 4.1) berust op de ontwikkeling van verticale neren als gevolg van de opstijgende luchtbellens. Door deze neren wordt het ontstaan van een dichtheidsgedreven stroming door de zoet/zout verschillen afgeremd. Tegelijk zorgen de verticale neren voor menging van het zoete en zoute water.



**Figuur 4.1: Uitwisselingsstroom met luchtbellenscherm met waterjet, schematisch weergegeven (Technisch Weekblad, december 2009)**

Zoals blijkt uit de modelresultaten van de FINEL berekeningen (serie 8, figuur 3.2h) kan worden gesteld dat een luchtbellenscherm alleen vertragend werkt op het uitwisselingsproces van zoet en zout water. Bij relatief kortdurende schuttingen (sluisdeur zo kort mogelijk openhouden) kan zo een deel van het zoute water in de sluis gehouden worden, waardoor de effectieve zoutlast op het kanaal minder is dan de totale kolkinhoud maal het zoutgehalte. Bij het lang openstaan van de deuren neemt het effect dus af.

Bovendien geldt dat de opmenging van zoet en zout water niet gunstig is in combinatie met systemen die bedoeld zijn om het zoute water op te vangen.

De reductie van de zoutindringing door het bellenscherm is afhankelijk van de looptijd van de interne golf van het uitwisselen,

$$T_i = \frac{4L_k}{\sqrt{\varepsilon g(h_{bi} - z_k)}} \quad (4-1)$$

Als voorbeeld (indicatieberekening) wordt hier de grote zeesluis genomen. Dan zijn de parameters:

$L_k$  = lengte van de kolk, ongeveer 450 m;

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ;

$\varepsilon$  = het relatief dichtheidsverschil, bijvoorbeeld 0,02  $((1020-1000)/1000)$ . Uitgaan van 100% zoet water in het kanaal ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) is echter wel conservatief;

$h_{bi}$  = waterstand binnen kolk, 0 m NAP;

$z_k$  = drempel hoogte -17.18 m NAP.

De interne periode van de golf is dan ongeveer 1.000 sec (ongeveer 17 minuten) uitgaande van  $1000 \text{ kg/m}^3$  op het kanaal. Bij  $1005 \text{ kg/m}^3$  is dit 19 minuten.

Om de netto relatieve massa van de chloride ionen in de voorhaven met 50% te doen afnemen in bijvoorbeeld 17 minuten dient er een luchtdebiet van  $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$  per strekkende meter te worden toegepast over de breedte van de sluis (58 m).

Dit geeft een totaal debiet van  $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$  lucht. Om deze reductie na  $2 \times 17 \text{ min}$  (35 min) ook nog te hebben, moet het totale luchtdebiet  $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$  zijn (berekeningen overgenomen uit Verkeer en Waterstaat, 2000).

Omdat in het geval van KGT het minimaliseren van de verspilling van zoet water de belangrijkste opgave is, voldoen luchtbellenschermen in combinatie met omloopriolen minder goed bij een toepassing aan de kanaalzijde van de sluizen. In dat geval wordt namelijk relatief veel zoet water door de werking van het luchtbellenscherm gemengd met zout water en vervolgens geloosd.

Aan de zeezijde van de sluizen, dus tussen de opening naar de Westerschelde en de sluisolk, kan een bellenscherm effectiever zijn, de menging door het bellenscherm is daar minder erg. Tevens zorgt het bellenscherm voor een vermindering van de zoutindringing in de kolk zelf, dus dit is altijd goed.

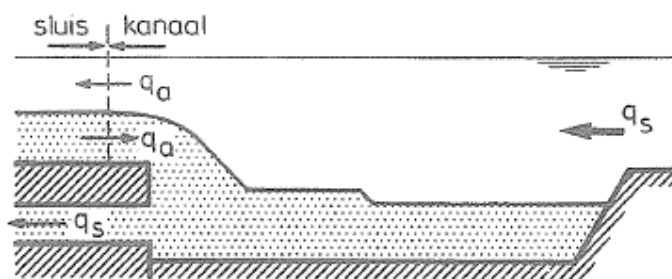
Wellicht dat de bellenschermen ook in combinatie kunnen worden toegepast met waterjets (figuur 4.1). Een bellenscherm heeft enige afstand nodig om zich te ontwikkelen in het water, om effectief te zijn. Bij toepassing in combinatie met waterjets kan het scherm ook effectief zijn net boven de bodem. Waterjets voor deze toepassing zijn echter nog nooit eerder gebruikt. Deltares gaat binnenkort een test opzetten bij de sluizen in Den Oever naar de effectiviteit van de jets.

#### 4.1.3 Zoutvang

Bij de Westsluis (en bij de Middensluis) van Terneuzen is aan de kanaalzijde van de sluis een zoutwater opvang toegepast. Deze opvang bestaat uit een verdiept gedeelte van de kanaalbodem waarin uitstromend zout water vanuit de sluiskolk wordt opgevangen. Dit systeem is effectief indien aan een aantal voorwaarden kan worden voldaan. Deze voorwaarden zijn:

- menging tussen zoet en zout water moet zoveel mogelijk worden voorkomen, zodat in de zoutvang een minimum volume zout water aanwezig is met maximum zoutgehalte;
- de omvang van de zoutvang moet voldoende zijn om de uitstroom vanuit de sluis met de bijbehorende impuls volledig op te vangen binnen de zoutvang. Het zoute water mag aan de benedenstroomse kant niet tegen de helling van de zoutvang op stromen. Uit de FINEL berekeningen blijkt dat dit echter wel gebeurt bij de zoutvang ter plaatse van de Westsluis;
- de inhoud van de zoutvang moet regelmatig ververscht kunnen worden door middel van doorspoeling met zoet water. Zo niet, dan is de zoutvang vroeg of laat vol, en dan loopt hij over. Bij nieuwe schuttingen werkt de zoutvang dan niet meer. Het overlopen van de zoutvang bij de Westsluis is in de zomer (met lage zoet water afvoer) zichtbaar in de zoutmetingen op het kanaal. De zoutvang kan met behulp van omloopriolen alleen onder vrij verval worden doorspoeld als het kanaalpeil hoger is dan het Westerschelde peil. Dit is niet altijd het geval, continu terugspoelen is dus niet altijd mogelijk, waardoor je zoutvang voor een gedeelte volloopt.

Daarnaast kan een zoutvang echter ook als een slibvang werken, slib sedimenteert in de diepe delen, waardoor de diepte in de vang afneemt en de effectiviteit als zoutvang ook afneemt. Hierdoor zullen de onderhoudskosten van de vang toenemen.



Figuur 4.2: Zoutvang met continu terugspoel systeem (Verkeer en Waterstaat, 2000)

Conclusie: een zoutvang is alleen effectief als er geen menging tussen zoet en zout optreedt, de vang groot genoeg is en de aanvoer van zoet water groot genoeg is. De FINEL berekeningen laten zien dat de aanwezigheid van een zoutvang *op zichzelf* geen enkel nut heeft. Slechts in combinatie met een andere maatregel die het opgehoopte zout weer verwijdert (zoals een omloopriool) krijgt de aanleg van een zoutvang zin.



#### 4.1.4 Omloopriolen in combinatie met zoutvang

Bij de Westsluis wordt de zoutvang doorgespoeld door gebruik te maken van de omloopriolen die bedoeld zijn voor de nivellering van de sluis. De aanvoer aan zoet water op het kanaal wordt op deze wijze ingezet om al tijdens het schutten het zoute water vanuit de zoutvang onder vrij verval te lozen op de buitenhaven. Deze methode is redelijk effectief, echter onder voorwaarde dat de aanvoer van zoet water voldoende is om de doorspoeling van de zoutvang te realiseren. Daarbij geldt dat hoe meer menging van zout en zoet optreedt bij het uitstromen van de sluis en het instromen in de zoutvang, hoe meer zoet water nodig is om de doorspoeling tot stand te brengen.

In de huidige situatie bij de Westsluis is de aanvoer van zoet water in droge zomers niet altijd voldoende. Uit de metingen van het zoutgehalte in het kanaal blijkt immers dat de zoutvang in droge zomers overloopt.

Daarnaast kunnen de omloopriolen duur zijn in onderhoud als er bijvoorbeeld mosselen zich ophopen in de rioolbuizen.

De bestaande situatie van de omloopriolen en de zoutvang bij de Westsluis biedt wellicht nog mogelijkheden voor optimalisatie van de inzet van het beschikbare zoete water. Daarbij kan gedacht worden aan een zo strikt mogelijke scheiding tussen zoet en zout, aan vergroting van de capaciteit van de zoutvang (dieper, langer), en/of aan minimalisatie van de horizontale impuls van het instromende zoute water door aanpassingen aan de vormgeving van de overgang van sluis naar zoutvang, en hoe de omloopriolen daarop aansluiten.

Als variatie op deze maatregel kan ook gedacht worden aan een omloopriool, dat onafhankelijk van het schutproces functioneert. Dit omloopriool wordt dan aangesloten op de zoutvang en wordt naar buiten toe gelegd, waarmee dan direct naar de Westerschelde kan worden gespuid. Om alleen het zoute water af te voeren moet het zoute water zo diep mogelijk worden afgevangen. Dit sluit aan bij het principe dat is aangegeven in 4.1.8, afzuigen zouttong bij deur.

Conclusie: Ook bij een combinatie van een zoutvang met omloopriolen moet de aanvoer van zoet water voldoende zijn om de doorspoeling te realiseren en dient menging te worden voorkomen om de vang effectief te laten werken. De FINEL berekeningen tonen aan dat deze maatregel in het geval van het sluizencomplex bij Terneuzen een goede maatregel kan zijn.

#### 4.1.5 Zoet-zout scheiding met bufferbekkens

Bij onder andere de Krammersluizen wordt gebruik gemaakt van een gescheiden beheer van de zoute en van de zoete watersystemen. Bij iedere schutting wordt eerst de volledige inhoud van de sluiskolk uitgewisseld voordat de deuren aan de benedenzijde worden geopend. Op deze wijze wordt voorkomen dat er een dichtheidsstroom op gang komt, omdat er geen dichtheidsverschil meer aanwezig is tussen de sluiskolk en het ontvangende water. De uitwisseling van zout en zoet water gebeurt deels onder vrij verval, en deels d.m.v. pompen. De uitwisselingsvolumes van zout en zoet water worden geborgen in speciale bufferbekkens die naast het sluizencomplex zijn gesitueerd.

Nadeel van het systeem is dat de tijdsduur van een schutting toeneemt; bij ieder schutting moet immers eerst de volledige sluisinhoud worden uitgewisseld voordat de deuren geopend kunnen worden. Bovendien vergen de bufferbekkens een groot ruimtebeslag, toch zeker als dit toegepast zou worden bij een zeeluis met grote kolkinhoud.

Rekenvoorbeeld: sluis  $l \times b \times d = 300 \times 40 \times 14 = 168.000 \text{ m}^3$ . Bij bufferbekkens met een peilfluctuatie van 3 meter moet de oppervlakte per bekken dan 5 à 6 hectare zijn ( $168.000 / \text{m}^3$ ).

Ook bij dit systeem geldt dat de effectiviteit sterk bepaald wordt door de mate waarin men erin slaagt om het zoute en het zoete water te scheiden. Het zoute water moet zo turbulentievrij mogelijk bij de bodem onttrokken te worden, en het zoete water dient zo turbulentievrij mogelijk bij het oppervlak te worden toegevoegd. Lukt dit niet, dan is in meerdere of mindere mate aanvoer van extra zoet water nodig om het systeem in stand te houden.

Rekenvoorbeeld: Wil men de uitwisseling van bovengenoemde sluiskolk in 10 minuten (600 seconden) laten plaatsvinden dan vraagt dit om een uitwisselingscapaciteit van  $168.000 / 600 = 280 \text{ m}^3/\text{s}$ . Omdat de uitwisseling in de sluiskolk zoveel als mogelijk turbulentievrij moet gebeuren (dus zonder grote stroomsnelheden) vraagt dit systeem om omvangrijke uitwisselingskanalen.

#### 4.1.6 Uitwisseling binnen de sluiskolk (Zoet-zout scheiding zonder bufferbekkens)

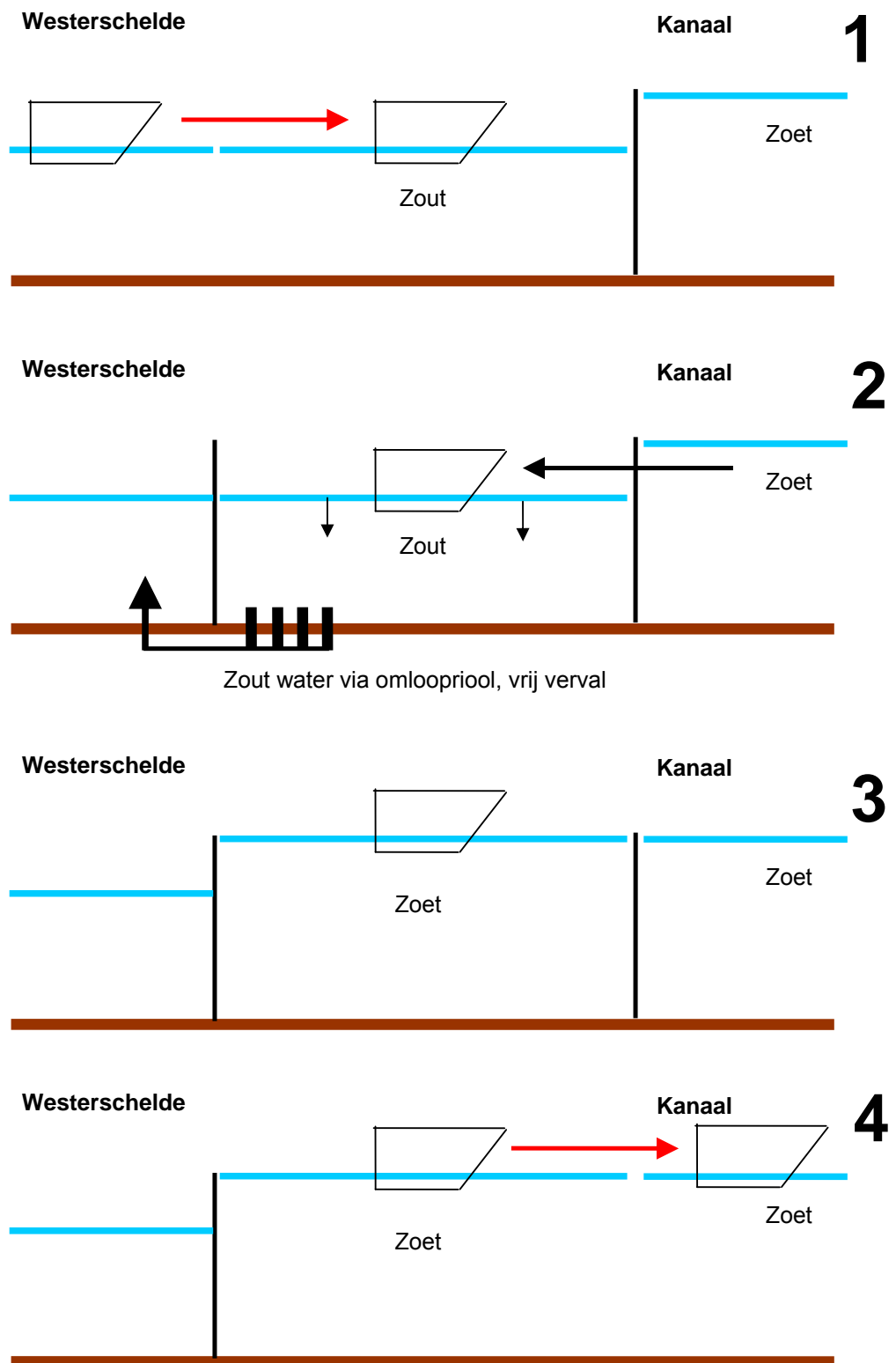
De situatie van het kanaal van Gent naar Terneuzen is uniek, in die zin dat het sluisencomplex niet alleen gebruikt wordt voor het schutten van schepen, maar ook voor het lozen van (van oorsprong zoet) water dat afgevoerd wordt via het kanaal. Momenteel wordt bij de Westsluis gebruik gemaakt van de zoet water afvoer om relatief zout water (na gedeeltelijke menging) vanuit de zoutvang onder vrij verval te lozen op de Westerschelde. Hoe minder menging optreedt, hoe effectiever de lozing vanuit de zoutvang is om de zoutlast op het kanaal te minimaliseren.

In de sluiskolk is tijdens de schutting nog niet of nauwelijks sprake van menging. In het systeem met bufferbekkens wordt dit gegeven als uitgangspunt gehanteerd: de inhoud van de sluiskolk wordt daarbij uitgewisseld voordat de sluisdeuren opengaan.

Nadeel van dit systeem is o.a. het grote ruimtebeslag van de bufferbekkens. Dit nadeel kan bij KGT mogelijk worden vermeden, dankzij de "overdosis" aan zoet water. Deze overdosis is echter niet altijd aanwezig.

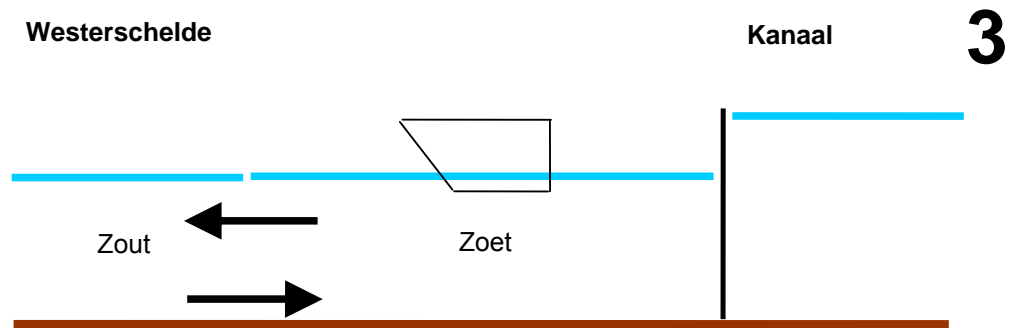
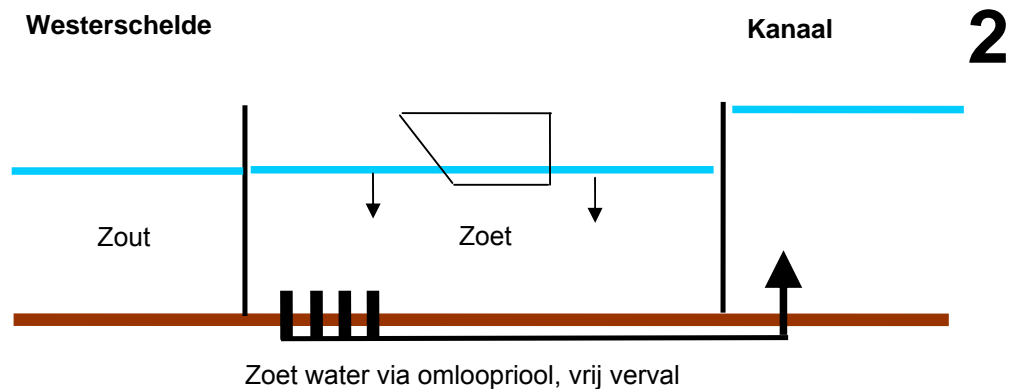
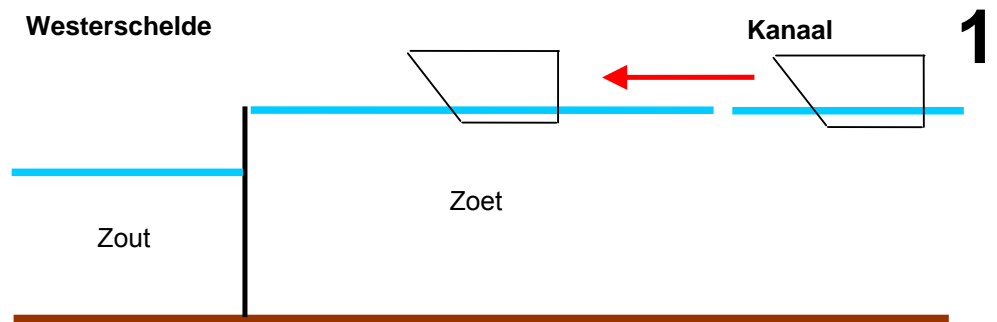
Het concept van zoet-zout scheiding zonder bekkens zou bij de nieuwe sluis te Terneuzen als volgt kunnen zijn:

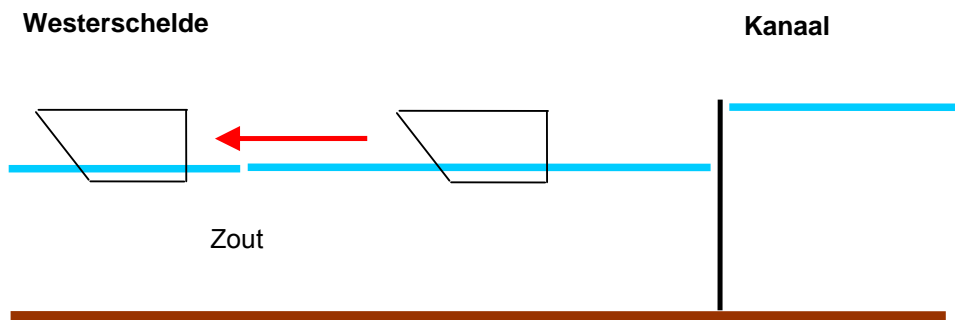
- bij inkomende schuttingen (figuur 4.3) wordt de volledige (zoute) inhoud van de sluiskolk uitgewisseld met zoet water uit het direct aansluitende kanaalpand (dus niet alleen het nivelleringsvolume). Het extra volume aan zoet water dat hiervoor nodig is wordt onttrokken aan het bovenstroomse debiet op het kanaal. Het zoute water wordt (dankzij het hogere kanaalpeil) onder vrij verval teruggevoerd naar de buitenhaven. Volgens bovenstaand rekenvoorbeeld is (om de uitwisselingstijd binnen de perken te houden) hiervoor wel een fors riolenstelsel nodig, waarbij het zoute water via de sluisbodem wordt afgevoerd, en het zoete water hoog via de sluiswanden wordt toegevoerd;



**Figuur 4.3: Situatie bij ingaande schutting**

- bij uitgaande schuttingen (figuur 4.4) wordt eveneens de volledige kolkinhoud uitgewisseld. De beginsituatie is nu zoet. Omdat het kanaalpeil (bijna) altijd hoger is dan het buitenpeil kan hierbij geen gebruik gemaakt worden van het “vrij verval” principe om direct zoet water terug te winnen. Indien geen verdere maatregelen genomen worden gaat de volledige sluisinhoud aan zoet water hierbij verloren. Daar staat tegenover dat er tijdens het schutproces geen tijdverlies is omdat de uitwisseling nu ongecontroleerd via de open sluisdeuren kan plaatsvinden;





**4**

**Figuur 4.4: Situatie bij uitgaande schutting**

- afhankelijk van de beschikbaarheid van zoet water (en van het aantal schuttingen per dag per sluis) kan het voorkomen dat er onvoldoende zoet water beschikbaar is om het geschetste proces volledig door te voeren. Er zijn dan verschillende mogelijkheden, zoals:

[a] doorvoeren van een beperkte uitwisseling, waardoor de zoutlast op het kanaal in een droge periode tijdelijk toeneemt;

[b] gedeeltelijk terugwinnen van zoet water direct naar het kanaal door middel van pompen tijdens het nivelleren bij de uitgaande schuttingen.

Stel dat de halve inhoud van de totale kolk aan zoet water wordt teruggewonnen van de grote zeesluis ( $425 \times 58 \times 17 \times 0,5 = 210.000 \text{ m}^3$ ) in 17 minuten (zie punt 1). Dan is benodigde pompcapaciteit ongeveer  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Bij 20 minuten is dit ongeveer  $170 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

[c] gedeeltelijk terugwinnen van zoet water door tijdens het nivelleren bij de uitgaande schuttingen zoet water onder vrij verval af te leiden naar een bufferbekken, van waaruit het water door middel van pompen wordt teruggebracht op het kanaal. Omdat deze pompen onafhankelijk van het schutproces kunnen werken is een veel lagere capaciteit nodig dan bij direct terugpompen. Voor de locatie van de bufferbekkens kan gedacht worden aan het gebied ten westen van de Zeesluis (figuur 4.5), in de Ecologische Hoofdstructuur. Bij deze maatregel wisselt niet de volledige kolk uit, maar alleen de zoete bovenlaag;

omdat het bufferbekken veel ruimtebeslag heeft en deze ruimte alleen ten westen van de huidige Westsluis beschikbaar is, is deze oplossing alleen realistisch als toepassing bij de Westsluis. Een bufferbekken ten westen van deze sluis is vanuit de andere sluisen lastig, danwel niet, te bereiken met riolen. Dit systeem valt dus feitelijk af voor de nieuw te bouwen sluisalternatieven ten oosten van de Westsluis;

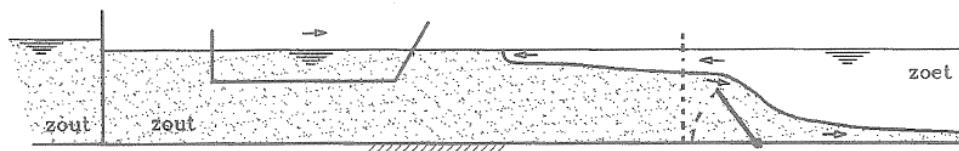
bij de bestaande Westsluis zullen echter ook forse aanpassingen moeten worden gedaan om het systeem te laten werken. Zoet water zal aan de bovenzijde van de kolk aan de zijkant (turbulentie vrij) moeten worden afgetapt, en niet zoals nu via nivelleren aan de bodem. Het water terugwinnen zal dan ook via deze riolen aan de zijkant moeten gebeuren. In tijden van droogtes zal het kanaalwater brakker zijn en zal het water in het bufferbekken meer brak dan zoet zijn. Een goede scheiding tussen het bufferbekken en de omliggende polder is daarom gewenst.



**Figuur 4.5: Gebied mogelijk beschikbaar voor opvangbekken (ten westen van de Westsluis)**

#### 4.1.7 Verstelbare zoutdrempel bij de binnendeur

Een drempel voor de binnendeur van de sluis zorgt ervoor dat het zoute water boven de kruin van de drempel wordt uitgewisseld met het zoete water. Het zoute water in de kolk onder het niveau van de drempel blijft achter in de kolk. Scheepsbewegingen kunnen dit zoute water echter wel opmengen. Figuur 6 toont een principe schets.



**Figuur 4.6: Schematische werking van een drempel bij de binnendeur (Verkeer en Waterstaat, 2000)**

Om de drempel zo effectief mogelijk te laten werken moet deze zo dicht mogelijk bij de binnendeur worden geplaatst. De kruinhoogte kan het beste instelbaar zijn.

De drempel kan bijvoorbeeld worden uitgevoerd als een soort zakdeur die in de bodem kan worden weggezakt. Ook is een klep mogelijk die draaibaar is om horizontale scharnieren.

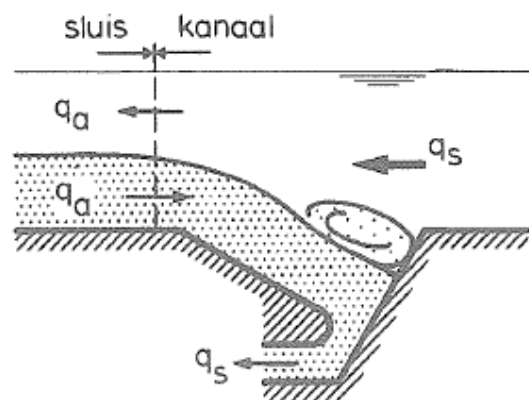
In de situatie bij het sluisencomplex van Terneuzen wordt verwacht dat de drempel op zich niet heel effectief is, omdat de menging in de grote sluisen te groot is. Bovendien blijkt uit modelresultaten van de Oostsluis dat de zouttong over de huidige aanwezige drempel heen 'springt'. Mogelijk kan de drempel wel effectief zijn in combinatie met uitwisseling binnen de sluisenkolk zelf (paragraaf 4.1.6.).

Conclusie: Omdat de sluisen bij Terneuzen groot zijn is de menging in de sluisen groot. Dit kan de effectiviteit van een drempel als maatregel in dit geval beperken. Tevens zal de menging in de sluisen, en dus de effectiviteit van de drempel, afhankelijk zijn van de verdeling in diepgang van de schepen.

#### 4.1.8 Afzuigen zouttong bij binnendeur

Als een systeem met afzuigen van de zouttong bij de binnendeur wordt toegepast wordt het zoute water uit de sluis, dat tijdens het uitwisselproces richting kanaal stroomt, direct bij de sluisuitgang weggezogen en teruggespuid via een laaggelegen zuigmond. Het principe is weergegeven in figuur 4.7. De zuigmond moet zo ver mogelijk onder het grensvlak van het zoete en zoute water wordt aangebracht, om te voorkomen dat er zoet water wordt meegezogen.

Met dit systeem kan niet het gehele uitwisselingsdebiet worden afgezogen, omdat er menging van het zoete en zoute water optreedt. Als het gebruik van extra zoetwater geen probleem oplevert kan dit echter wel.



Figuur 4.7: Direct afzuigen van de zouttong (Verkeer en Waterstaat, 2000)

Een combinatie van de afzuigmethode en de zoutvang is al eerder bij het sluisencomplex bij Terneuzen gebruikt. Deze combinatie is toegepast bij de huidige Zeesluis (westsluis). Naderhand zijn ook nog bellenschermen geplaatst in de Zeesluis, om te voorkomen dat de kolk volledig uitwisselt met de voorhavens. Het uitwisselingsdebiet in de Zeesluis bij Terneuzen is  $170 \text{ m}^3/\text{s}$  (uitgaande van 20 minuten schutting). Als dit volledige uitwisselingsdebiet zou moeten worden weggezogen dan moet er, door menging, ongeveer 2 x zoveel water worden afgevoerd ( $340 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Omdat de zoetwater aanvoer op het kanaal Gent Terneuzen beperkt is, is dit niet wenselijk. In de praktijk wordt vanwege menging en scheepvaart maar 20 % ( $34 \text{ m}^3/\text{s}$ ) van het uitwisselingsdebiet geloosd.

Conclusie: het uitwisselingsdebiet kan bij deze maatregel meestal niet volledig worden weggezogen door menging van het zoute en zoete water, tenzij er genoeg zoet water aanvoer aanwezig is.



#### 4.1.9 Aanvullende beheersmaatregelen

De indringing van het zoute water kan ook worden tegengegaan door aanvullende beheersmaatregelen te nemen, zonder extra constructies aan te leggen. Hierbij kan worden gedacht aan de volgende maatregelen (Verkeer en Waterstaat, 2000):

1. korte openingstijd deur. De sluisdeur wordt alleen geopend voor het passeren van schepen. Desnoods wachten de schepen op elkaar en gaan achter elkaar naar binnen en buiten. Het uitwisselvolume wordt hiermee beperkt. Het grootste effect wordt bereikt als de sluis lang en ondiep is en/of er sprake is van een klein dichtheidsverschil. Als de deur minder lang open kan zijn dan de tijd die nodig is voor het compleet uitwisselen van de kolk, dan kan hiermee winst worden behaald;
2. minimaal aantal schuttingen met maximale scheepsbezetting. In het geval van het sluisen complex bij Terneuzen zijn er meerdere ongelijke sluisen naast elkaar. Bij deze beheersmaatregel dient dan zoveel mogelijk gebruik gemaakt te worden van de kleinste sluis. Dit betekent dat wellicht de indeling van het type schepen voor elke sluis moet worden veranderd;
3. openen van een enkele deur of de deur voor een deel openzetten. Deze maatregel kan worden toegepast bij kleine schepen. Als de deur niet volledig wordt opengezet dan wordt het uitwisselingsvolume beperkt;
4. pontons. Bij een brede sluis zou gedacht kunnen worden aan het plaatsen van pontons aan de sluiswand, zodat het kolkvolume wordt verkleind. Deze maatregel kan alleen worden toegepast bij kleinere schepen in een brede sluis. Bij grote schepen moeten de pontons weer worden weggehaald;
5. schutten / nivelleren bij eb (laag water). Door zo veel mogelijk te schutten bij eb hoeft de zoute kolk niet naar het binnengebied te ledigen en wordt de uit te wisselen hoeveelheid water beperkt.

Conclusie: De beheersmaatregelen beperken in zekere mate de zoutindringing op het kanaal. Alle beheersmaatregelen beperken echter ook in meer of mindere mate de capaciteit van het sluisencomplex.

#### 4.1.10 Groter debiet op Kanaal Gent - Terneuzen

Het zoute water dat bij de sluisen bij Terneuzen binnenkomt, dringt door op het kanaal. Deze zoutindringing wordt beperkt door water dat van bovenstrooms (Gent) door het kanaal stroomt. Door meer debiet door het kanaal Gent – Terneuzen te laten zal de zoutindringing worden verminderd er kan eventuele extra indringing door de aanleg van nieuwe sluisen worden gecompenseerd.

Daarnaast zorgt een hogere zoetwater aanvoer voor een effectievere werking van eventuele maatregelen (zoals hierboven beschreven) bij het sluiscomplex zelf. Het kanaal wordt met water gevoed door voornamelijk de stuw bij Evergem en via de tolhuisstuw via het Verbindingskanaal met water uit de binnenstad. De belangrijkste zijlopen zijn de Moervaart (240 km<sup>2</sup>) en de Avrijevaart (59 km<sup>2</sup>). De meeste mogelijkheden om meer debiet door het kanaal te laten gaan liggen bij Evergem, omdat onder andere het debiet daar al het grootst is.

Ook de SOBEK berekeningen laten zien dat de zoutindringing op het kanaal erg afhankelijk is van het bovendebiet bij Evergem. Tijdens de natte periode nemen de concentraties af, maar tijdens de droge zomers kunnen deze chloridenconcentraties sterk oplopen. Verhogen van het debiet lijkt daarom een goede maatregel om de zoutindringing te voorkomen.



#### 4.1.11 Kosten

##### Inleiding, korte beschouwing eerdere studies (KGT 2008)

In deze paragraaf wordt globaal een kostenraming voor de maatregelen gegeven. Deze kostenraming is zeer globaal en bedoeld om een idee te vormen hoe het bedrag in verhouding staat met de totale investeringskosten die voor de verschillende alternatieven zijn geraamd (Kostenstudie KGT2008: Kostenraming van het nulalternatief en de projectalternatieven (onderdeel van onderzoekspakket 1: Technische en kostenstudie, 31 oktober 2008).

Voor de kostenraming is de grote zeesluis (netto kolkafmeting 427mx58mx17m) als referentie genomen. De totale investeringskosten bedraagt voor deze sluis 981 miljoen EUR, zie bijgaand kader.

BOUWACTIVITEITEN (Grootste schip, sluisbodem op NAP -17,18 m)		KOSTEN
<b>SLUISCONSTRUCTIE</b>		
STAAL	45.400 ton	73.862.640
BETON	220.300 m <sup>3</sup>	94.389.425
<b>ROLDEUR</b>		
STAAL		22.410.000
BEVEEGINGSWERK		14.800.000
E & M WERK		15.000.000
GELIDEWERKEN		18.500.000
KUUST en OEVERWERK		20.319.300
<b>GRONDWERK</b>		
SLUIS	2.151.800 m <sup>3</sup>	20.144.800
VOORHAVENS	16.430.800 m <sup>3</sup>	135.958.150
REMMINGWERK		11.652.000
BRUG		12.910.000
BOUWKUNDIG		14.750.000
INFRAWERK		6.220.000
OPRUMWERK		7.356.500
MILIEUMAATREGELEN		2.000.000
DETAILENGINEERING EN NADERE DETAILLERING		70.545.422
<b>DIRECTE KOSTEN Globaal Schetsontwerp</b>		540.848.237
indirecte kosten		137.691.763
<b>AANNEEMSUM Globaal Schetsontwerp</b>		678.440.000
object onvoorzien kosten		57.667.400
<b>BOUWKOSTEN</b>		736.107.400
bijkomende bouwkosten en onvoorzien		225.092.600
<b>INVESTERINGSKOSTEN Globaal Schetsontwerp Arcadis</b>		961.200.000
aanpassing door CWP-Infra		
verrekening gronden en vaaggoed		6.850.394
bagger en grondwerk		40.930.500
risico's (zie risicolijst)		54.500.000
<b>Raming INVESTERINGSKOSTEN incl. KOSTEN RISICO'S van Globaal Schetsontwerp</b>		€ 981.619.894 excl. BTW
Laagste waarde (L)	-10%	883.457.505
Hoogste waarde (U)	10%	1.073.791.863
INVESTERINGSKOSTEN Groot schip (sluisbodem NAP - 16,58m) = Investeringskosten Grootste schip -31 miljoen		
INVESTERINGSKOSTEN Groot schip (sluisbodem NAP - 14,98m) = Investeringskosten Grootste schip -114 miljoen		

Eventueel voorzieningen bij kleinere sluisalternatieven (kleine zeesluis of combisluis) kunnen grofweg worden afgeleid van de ramingen bij de grote zeesluis.

Aanpassingen aan bestaande sluisen (huidige westsluis, middensluis of binnenvaartsluis) zijn niet meegenomen. Voor deze kosten kan ook een idee worden gevormd op basis van de inschatting voor de grote zeesluis binnen het complex.

#### Uitgangspunten voor de kostenraming

Voor de kostenraming van de maatregelen zijn de volgende uitgangspunten aangehouden:

- in de kostenraming zijn de bouwkosten geraamd. Voor de investeringskosten komen hier nog bijkomende kosten en onvoorzien bij (30%). Deze zijn in de kosteninschatting **niet** meegenomen;
- voor de indirecte kosten en onvoorzien kosten zijn respectievelijk opslagen van 25%, en 10% aangehouden;
- de kosten zijn zeer grof bepaald op basis van kentallen en de grove dimensionering die in de beschrijving van de maatregelen is gegeven. In de beschrijving van de kosteninschatting is aangegeven welk kental is aangehouden en hoe de kosten voor de maatregel zijn afgeleid;
- operationele kosten (energiekosten, beheer en onderhoud) zijn niet geraamd;
- voor het verpompen van water of lucht wordt een kental aangehouden van € 500.000,-- per m<sup>3</sup>/s (directe kosten voor realisatie). Voor het verpompen van lucht zijn de installatiekosten (pompen) ongeveer hetzelfde als voor water, voor lucht zullen de toe te passen leidingen kleiner zijn, echter voor de luchtbehandeling (filters en de aanzuiging) zijn meer voorzieningen nodig, die meer kosten met zich meebrengen. Overall beschouwd zijn de kosten voor het verpompen van water en lucht vergelijkbaar;
- voor het vergraven van grond wordt €10,-- / m<sup>3</sup> aangehouden (ontgraven en afvoeren). Dit kental is gebaseerd op de raming voor het grondwerk bij de kostenraming van de zeesluis (zie de inleiding);
- grondaankoop is in de kostenraming niet meegenomen.

#### Kosteninschatting voor de maatregelen

##### 1. *luchtbellenscherm*

Voor het verpompen van lucht (orde 15 m<sup>3</sup>/s) bedragen de directe kosten 7,5 miljoen EUR.

##### 2. *zoutvang (in combinatie met lozing)*

Voor een zoutvang wordt uitgegaan van een te verdiepen gebied achter de sluis van 3 x de sluislengte en 5 x de sluisbreedte en een overdiepte van 3 m. De hoeveelheid extra te vergraven grond bedraagt orde 300.000 m<sup>3</sup>. Directe kosten 3 miljoen EUR.

##### 3. *omloopriolen in combinatie met zoutvang*

Voor extra omloopriolen langs de sluiscolk wordt het bedrag voor de omloopriolen, die langs en bij het boven en benedenhoofd zijn geraamd geëxtrapoleerd. Hiervoor is een bedrag van 100 miljoen EUR geraamd. Hierbij komt het bedrag voor de zoutvang (geraamd onder 2).

4 *zoet-zoutscheiding met bufferbekkens*

Voor een bufferbekken met een oppervlakte van orde 10 ha is een kering rondom een bekken nodig met een hoogte van 4 m (fluctuatie in het bekken 3 m), en dient het gebied als bufferbekken te worden ingericht. Er is een kering met een lengte van orde 1.500 m, kosten 3 miljoen EUR.

Voor de inrichting wordt een bedrag van 0,5 miljoen EUR aangehouden. Hiervoor kunnen bepaalde delen van het gebied worden vergraven en kan de detailwaterhuishouding worden geregeld. Het gebied dient ook laag genoeg te liggen om water onder vrij verval het bekken in te kunnen laten lopen. Het gebied dient minstens op NAP-1m te liggen. De omliggende terreinen (ten westen van de sluis) liggen op ongeveer NAP+1m. Het terrein dient dus ongeveer 2 m te worden ontgraven, kosten 2 miljoen EUR. Hier staat tegenover dat de kering rondom het terrein minder hoog hoeft te worden en daar kosten kunnen worden bespaard. Voorlopig wordt een voorziening van 1 miljoen EUR aangehouden voor vergraving van een gebied van 10 ha.

Bij deze optie dient het bedrag voor de omloopriolen te worden opgeteld. Bovendien dient voor het terugpompen van het zoete water naar het kanaal nog een pompinstallatie te worden geplaatst. Uitgaande van een capaciteit van 50 m<sup>3</sup>/s bedragen de directe kosten 25 miljoen EUR.

5 *zoet-zout scheiding zonder bufferbekkens*

Zonder bufferbekkens is langs de kolk een uitwisselsysteem met kanalen nodig. Dit systeem is ingewikkelder en complexer van uitvoering dan de omloopriolen zoals bedoeld onder 3. Voor de directe kosten wordt uitgegaan van een verhoging met een factor 1,3, dus 130 miljoen EUR voor het uitwisselsysteem. Bovendien zal water voor een gedeelte moeten worden rondgepompt. Er wordt uitgegaan van een pompinstallatie met een capaciteit van 100 m<sup>3</sup>/s; de directe kosten bedragen 50 miljoen EUR.

6 *verstelbare drempel*

Voor de verstelbare drempel is een bedrag van 3 miljoen EUR geraamd op basis van het bedrag voor de roldeur, maar nu slechts kerend over 3 m. Het bedrag is dus ongeveer 3/17 van de directe kosten voor de roldeur.

7 *afzuigen zouttong bij binnendeur*

Voor het afzuigen van de zouttong bij de binnendeur wordt uitgegaan van een pompinstallatie met een capaciteit van 100 m<sup>3</sup>/s, kosten 50 miljoen EUR.

In onderstaande tabel zijn de kosten samengevat en is aangegeven hoe de kosten zich verhouden tot de bouwkosten van de grote zeesluis (bouwkosten 736 miljoen EUR).

**Tabel 4.1: Samenvatting van de kosten per maatregel**

Maatregel	directe kosten (miljoen EUR)	indirecte kosten (25%)	aaneensom (directe+indirecte kosten)	onvoorzien	bouwkosten	ten opzichte van bouwkosten nieuwe zeesluis (736 miljoen EUR)
bellenscherm	7,50	1,88	9,38	0,94	10,31	1,4%
zoutvang	3,00	0,75	3,75	0,38	4,13	0,6%
omloopriool en zoutvang	103,00	25,75	128,75	12,88	141,63	19,2%
zoet-zoutscheiding met bufferbekken	129,50	32,38	161,88	16,19	178,06	24,2%
zoet-zoutscheiding zonder bufferbekken	180,00	45,00	225,00	22,50	247,50	33,6%
drempel	3,00	0,75	3,75	0,38	4,13	0,6%
afzuigen zouttong	50,00	12,50	62,50	6,25	68,75	9,3%

Zoals in de analyse blijkt zijn de maatregelen waarbij riolen nodig zijn erg kostbaar. Hierbij kan worden opgemerkt dat de riolen ook nodig zijn om de in natte winter maanden het zoetwater (tot maximaal 160 m<sup>3</sup>/s) af te voeren naar de Westerschelde. In dat opzicht zijn er zo wie zo riolen nodig, waardoor een deel van de kosten niet onder de bestrijding van de zoutindringing vallen.

#### 4.1.12 Samenvatting effectiviteit maatregelen

In onderstaande tabellen zijn de verschillende maatregelen gerangschikt op technisch meest effectief en op kosten. Bij de technische effectiviteit is gelet op de algemene toepasbaarheid van de maatregelen, voor alle drie de sluizen is het lijstje dus toepasbaar.

**Tabel 4.2: Samenvatting technische effectiviteit van de maatregelen**

	Technisch effectief
1 Meest effectief	Scheiding met bufferbekkens (alleen mogelijk bij Westsluis) en omloopriolen
2	Scheiding zonder bufferbekkens en omloopriolen
3	Omloopriool en zoutvang (met zo weinig menging)
4	Luchtbellenscherm / waterjet (aan de Westerschelde zijde)
5	Afzuigen zoutvang
6	Luchtbellenscherm / waterjet (aan de kanaalzijde)
7	Zoutvang
8	Drempel (in combinatie wel effectief)
9 Minst effectief	Beheersmaatregelen (beperkte invloed)

**Tabel 4.3: Samenvatting kosten van de maatregelen**

	<b>Kosten</b>
1 Goedkoopst	Beheersmaatregelen (geen tot weinig aanlegkosten)
2	Drempel
3	Zoutvang
4	Luchtbellenscherm (onafhankelijk van de locatie)
5	Afzuigen zoutvang
6	Omloopriool en zoutvang
7	Scheiding met bufferbekkens
8 Duurst	Scheiding zonder bufferbekkens

De tabellen zijn opgesteld op basis van een eerste grove inschatting van de maatregelen. Als technisch meest effectieve maatregelen lijken de scheiding met of zonder bufferbekkens het meest haalbaar (mits er voldoende zoetwater debiet beschikbaar is). Deze maatregelen zijn echter wel het duurst en de bufferbekkens zijn praktisch alleen te realiseren voor de Westsluis.

Een bellenscherm met of zonder waterjet aan de Westerschelde zijde van de sluis is een goede oplossing om de hoeveelheid zout in de sluiscolk te beperken. Dit verlaagt ook de zoutlast op het kanaal en kan makkelijk worden gecombineerd met maatregelen aan de kanaalzijde.

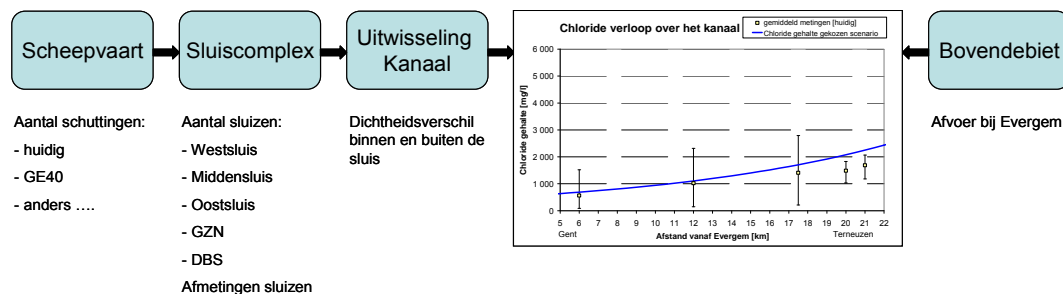
Uiteraard zijn er meerdere combinaties mogelijk waarbij sommige maatregelen effectiever kunnen worden, bijvoorbeeld de drempel in combinatie met een zoutvang. Voor de tabel zijn de maatregelen echter afzonderlijk gepresenteerd.

## 5 MODELTOOL

In hoofdstuk 3 zijn de resultaten van het parameteronderzoek weergegeven. Op basis van dit parameteronderzoek is een vereenvoudigd rekenmodel opgezet om bepaalde parameters te kunnen variëren en relatief snel een indruk van de zoutindringing te kunnen krijgen. Deze modeltool is opgezet in Excel. In de navolgende paragrafen is de opzet van het model toegelicht, waarna de beperking van dit model zijn aangegeven (paragraaf 5.4). In paragraaf 5.5 wordt een korte gebruikershandleiding gegeven.

### 5.1 Opzet model

Het model is opgezet zodat kleine variaties in de alternatieven/ scenario's niet leiden tot het opnieuw doorrekenen van de opgestelde modellen in FINEL3D en SOBEK. Met dit doel voor ogen zijn de resultaten van de FINEL3D en SOBEK berekeningen opnieuw geïnterpreteerd. Er is gezocht naar algemene kennisregels en verbanden tussen invoerparameters en de zoutconcentratie op het Kanaal Gent-Terneuzen. Schematisch is de opbouw van de modeltool weergegeven in figuur 5.1.



**Figuur 5.1: Schematische weergave van modeltool. De blauwe vlakken zijn invoervelden. De grafiek is het resultaat**

Uit figuur 5.1 blijkt dat een aantal factoren de uiteindelijke zoutconcentratie op het kanaal bepalen. Dit zijn het aantal schuttingen, het ontwerp van het sluiscomplex, de uitwisseling met het kanaal (eventuele maatregelen die hier worden getroffen) en het bovendebiet vanuit Gent.

Met deze informatie zijn algemene benaderende formules voor de ontwikkeling van de zoutlast naar het kanaal Gent-Terneuzen en het chloride verloop op het kanaal afgeleid. Deze formules zijn de zwarte pijlen in figuur 5.1. In de volgende paragrafen is het afleiden van de formules beschreven.

### 5.2 Algemene (benaderende) formule zoutlast naar het kanaal

Allereerst is een algemene formule opgesteld voor de zoutlast naar het kanaal. Dit betreft de linkerkant van het schema in figuur 5.1. Met de FINEL3D berekeningen is per schutcyclus de zoutlast naar het kanaal afgeleid. Deze zoutlast is Q genoemd. Door de zoutlast Q te vermenigvuldigen met het aantal schuttingen per etmaal en te delen door het dichtheidsverschil tussen de Westerschelde en het kanaal, wordt de zoutlast S verkregen. Deze zoutlast S is in de SOBEK berekeningen gebruikt om de zoutconcentraties op het kanaal te berekenen. In onderstaande afleiding is een algemene formule voor Q opgesteld.

### Invoerparameters:

L	=	Lengte sluiskolk [m]
B	=	Breedte sluiskolk [m]
z <sub>0</sub>	=	Bodemligging sluiskolk [in m t.o.v. NAP]
z <sub>k</sub>	=	Bodemligging kanaalpand aansluitend aan sluisdeur [in m t.o.v. NAP]
h <sub>0</sub>	=	Ligging grens zout-zoet water in sluis na nivellering [in m t.o.v. NAP]
g	=	Gravitatieversnelling [m/s <sup>2</sup> ]
ρ <sub>s</sub>	=	Dichtheid van het (relatief zoute) buitenwater [kg/m <sup>3</sup> ]
ρ	=	Dichtheid van het (relatief zoete) kanaalwater [kg/m <sup>3</sup> ]
α	=	Calibratieparameter t.b.v. snelheid uitwisselingsstroom [ – ]

### Overige variabelen:

Δ	=	(ρ <sub>s</sub> -ρ)/ρ	=	Relatieve dichtheid / buoyancy ratio [ – ]
Δ·ρ	=	(ρ <sub>s</sub> -ρ)	=	Dichtheidsverschil buiten- en binnenwater [kg/m <sup>3</sup> ]
Z <sub>max</sub>	=	max(z <sub>0</sub> , z <sub>k</sub> )	=	Hoogste aanwezige bodemligging [m]
H	=	h <sub>0</sub> -Z <sub>max</sub>	=	Dikte van de uitwisselbare zoutlaag in de kolk [m]

Het totale volume aan uitwisselbaar zout water tussen de sluiskolk en kanaal bedraagt:

$$V_{\max} = B \cdot H \cdot L \quad (5-1)$$

De totale massa zout, na aftrek van watermassa, die (per schutcyclus!) maximaal kan worden uitgewisseld tussen de sluiskolk en het kanaal bedraagt:

$$Q_{\max} = \Delta \cdot \rho \cdot B \cdot H \cdot L \quad (5-2)$$

De initiële (min of meer constante) snelheid, waarmee het water tussen sluiskolk en kanaal wordt uitgewisseld, blijkt bij benadering gelijk te zijn aan:

$$\left. \frac{\partial V}{\partial t} \right|_0 = \frac{1}{2} B \cdot H \cdot c \quad (5-3)$$

Hierin is *c* de initiële voortplantingssnelheid van de zoutgolf in de uitwisselingsstroom. (in [m/s]). Deze is te berekenen met behulp van de volgende benaderende formule:

$$c = \alpha \sqrt{\frac{1}{2} \Delta g H} \quad (5-4)$$

Hierin is *α* een dimensieloze calibratieparameter van orde grootte 1. Dit is in feite een verzamelparameter, die afhangt van onder meer de wandwrijving en de aanwezigheid van eventuele mitigerende maatregelen, die een versturende invloed kunnen hebben op de voortplantingssnelheid *c* (zoals een zoutvang).

Op grond van vergelijking (5-3) volgt de initiële snelheid waarmee de zoutmassa wordt uitgewisseld:

$$\left. \frac{\partial Q}{\partial t} \right|_0 = \frac{1}{2} \Delta \cdot \rho \cdot B \cdot H \cdot c \quad (5-5)$$

Wanneer vergelijking (2) door (5) wordt gedeeld, dan volgt er een relaxatietijdschaal  $T$  voor de zoutuitwisseling:

$$T = \frac{Q_{\max}}{\left. \frac{\partial Q}{\partial t} \right|_0} \quad (5-6)$$

Vereenvoudigd leidt dit tot:

$$T = \frac{2L}{c} \quad (5-7)$$

Deze relaxatietijd komt overeen met tweemaal de looptijd van de interne golf door de sluiskolk heen. Grosso modo wordt dus het meeste zout in de sluiskolk uitgewisseld gedurende de tijd die nodig is om de interne golf éénmaal heen en weer te laten lopen.

Indien we aannemen dat de zoutuitwisseling grosso modo plaatsvindt volgens een negatiefexponentieel verloop (en dit is in hoge mate het geval), dan kunnen we vergelijking (5-2) en (5-7) gebruiken om de totale zoutmassa  $Q$  op het kanaal te berekenen als functie van de tijd:

$$Q(t) = Q_{\max} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right\} = \Delta\rho BHL \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right\} \quad [\text{eenheid: kg/s}] \quad (5-8)$$

Het invullen van  $t = 1200$  seconden = 20 minuten leidt bij benadering tot de zoutlasten die genoemd zijn in figuren 3.2a t/m 3.2k en tabellen 3.5a t/m 3.5c in hoofdstuk 3.

De afgeleide functie van  $Q$  als functie van de tijd luidt:

$$\frac{\partial Q(t)}{\partial t} = \frac{Q_{\max}}{T} \exp\left(-\frac{t}{T}\right) = \frac{\Delta\rho BHL}{T} \exp\left(-\frac{t}{T}\right) = \frac{\Delta\rho BHc}{2} \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \quad [\text{kg/s}] \quad (5-9)$$

Voor  $t = 0$  is vergelijking (5-9) gelijk aan vergelijking (5-5).

De waarde  $\alpha$  die impliciet in vergelijking (5-9) aanwezig is (in factor  $c$ ) is een calibratieparameter. De waarde voor  $\alpha$  is per sluis bepaald voor de vier doorgerekende alternatieven. Per sluis heeft alpha een unieke waarde:

- Oostsluis            0.55;
- Middensluis        0.595;
- Westsluis           3;
- GZN                 0.935;
- CBS                 0.935.

N.B. Hoe langer de sluisdeur open staat, hoe minder belangrijk de waarde van  $\alpha$  is!



### 5.3 Omrekenen zoutlast naar chloride verloop op het kanaal afhankelijk van bovendebiet

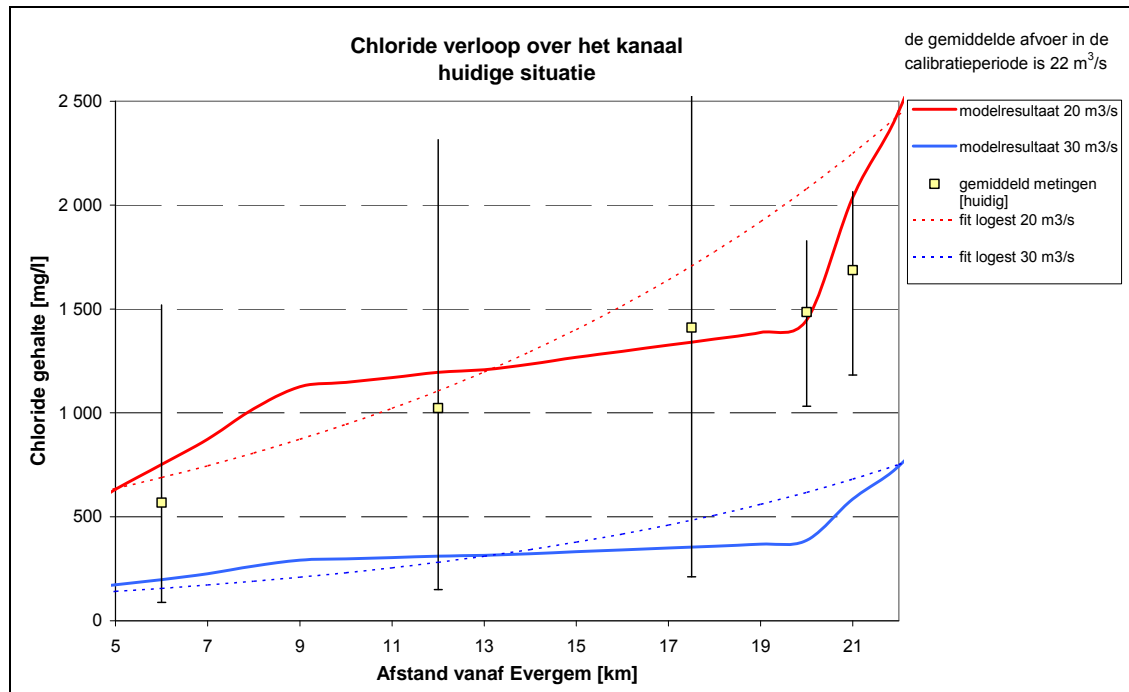
Het SOBEK model berekent op basis van de zoutlast  $S$ , de dimensies van het kanaal, het bovendebiet en de dispersiecoëfficiënt het chloride verloop. De relatie tussen het chloride gehalte en de afstand op het kanaal is exponentieel (vergelijking 5-10).

$$C_{chloride} = b \cdot m^x \quad (5-10)$$

In deze vergelijking is  $x$  de afstand vanaf Evergem in kilometers, de bovenstroomse randvoorwaarde van het model. De coëfficiënten  $b$  en  $m$  in de exponentiële vergelijking zijn afhankelijk van het bovendebiet en de zoutlast. In de bestaande berekeningen zijn de zoutlast en het bovendebiet tijdsafhankelijk doorgerekend en variëren per dag. Aangezien het chloride gehalte op het kanaal vertraagd reageert op aanpassingen in de zoutlast en het bovendebiet, is het niet mogelijk om aan de hand van deze berekeningen een relatie vast te stellen. Om de coëfficiënten  $b$  en  $m$  wel te bepalen zijn nieuwe SOBEK berekeningen uitgevoerd. De berekeningen zijn uitgevoerd met unieke combinaties van een constant zoutlast en een stationair bovendebiet. Alle berekeningen hadden een rekentijd van minimaal een half jaar, zodat zeker een evenwichtssituatie was ingesteld.

<u>constante zoutlast <math>S</math> [kg / s <math>\Delta \rho</math>]</u>		<u>stationair bovendebiet</u>
24.75	NUL_2005	10 m <sup>3</sup> /s
20.82	NUL_GE40	20 m <sup>3</sup> /s
41.90	GZN_GE40	30 m <sup>3</sup> /s
32.06	CBS_GE40	40 m <sup>3</sup> /s
		50 m <sup>3</sup> /s
		60 m <sup>3</sup> /s
		70 m <sup>3</sup> /s
		80 m <sup>3</sup> /s
		90 m <sup>3</sup> /s
		100 m <sup>3</sup> /s

Van al deze berekeningen is het evenwichtsgelalte van chloride per kilometer bepaald. Vervolgens zijn de chloride gehalten exponentieel geïnterpoleerd om de waarde van de coëfficiënten  $b$  en  $m$  vast te stellen. Op deze wijze is er voor 40 unieke combinaties (4 zoutlasten en 10 bovendebieten) een exponentiële vergelijking opgesteld voor het chloride verloop (zie figuur 5.2).



**Figuur 5.2: Vaststellen exponentiële vergelijkingen van het chloride verloop op basis van modelresultaten**

Het valt op dat het chloride verloop door het model berekend enigszins hoekig is ten opzichte van de exponentiële lijn. Dit komt doordat tijdens het calibreren drie zones met verschillende dispersiecoëfficiënten zijn gebruikt. De knik in de lijn is de overgang naar een zone met een andere dispersiecoëfficiënt.

Het model is een nog verdere schematisering van de werkelijkheid dan het FINEL / SOBEK model. Om de resultaten van de modelstudies te vertalen naar de modeltool en dit vervolgens voor alle situaties toepasbaar te maken, moest een analytische relatie worden gevonden voor het chloride verloop. Exponentieel lijkt het beste (ook op basis van het gemeten verloop, figuur 2.2), maar dit is echter wel een schematisering. Het doel van het model is om inzicht te geven van de effecten van het variëren van bepaalde parameters, wat goed mogelijk is gebleken.

De afstand die is weergegeven is in kilometers vanaf de randvoorwaarde bij Evergem. Het model is gecalibreerd met meetpunten tussen 5 km en 22 km afstand. Buiten dit bereik zijn de resultaten niet gecalibreerd en deze worden niet weergegeven.

Om in de modeltool ook een andere keuzemogelijkheid te bieden dan alleen de 40 doorgerekende unieke combinaties, zijn de exponentiële vergelijkingen lineair geïnterpoleerd. Dit maakt het bijvoorbeeld mogelijk om ook het chloride verloop bij een bovendebiet van 34 m<sup>3</sup>/s te bepalen (in plaats van 30 m<sup>3</sup>/s of 40 m<sup>3</sup>/s).

## 5.4 Berekening zoutlast bij verdieping van het kanaal en bij het nemen van maatregelen

In het model is ook de optie ingebouwd om het zoutindringingseffect te berekenen van

- een verdiept kanaal en
- bij het nemen van maatregelen om zoutindringing tegen te gaan (opvangen van zout water en terugafvoeren van zout water).

In deze paragraaf volgt kort een toelichting hoe dit in het model is ingevoerd.

### Verdiept kanaal

Optioneel kan aangevinkt worden of de berekening rekening moet houden met een verdiept kanaal (2 m dieper dan huidige situatie). Door een dieper kanaal in rekening te brengen zal bij een zelfde bovenafvoer het debiet door het kanaal gelijk blijven, maar zal de snelheid van het water afnemen (de natte sectie neemt toe). Dit heeft een negatief effect op de zoutverspreiding in het kanaal in de stroomopwaartse richting. Het zout zal minder verdrongen worden. Aangezien het debiet dat aan het sluzencomplex aangeboden wordt gelijk blijft zal dit geen effect hebben op de uitwisseling van zout aan de sluzen zelf. De grafiek van de zoutconcentraties op het kanaal zal wel wijzigen. Voor een verdiept kanaal zijn Sobek berekeningen uitgevoerd en is gebleken dat langs de as van het kanaal de zoutindringing ten opzichte van geen verdiept kanaal meer toeneemt (zie paragraaf 3.4.3). De factoren die uit de Sobekberekening zijn gevolgd, zijn verwerkt in het model en de presentatie van de grafiek voor zoutindringing.

### Maatregelen

In het rapport zijn verschillende maatregelen beschreven die een positieve impact kunnen hebben op de zoutuitwisseling en verspreiding in het kanaal. De maatregelen die hier in het model zijn opgenomen zijn de meest effectieve maatregelen, met name de uitwisseling van de sluisolk met zout water minimaliseren door bij een inwaartse schutting de volledige kolk te “verversen” met zoet water. Hierdoor wordt de uitwisseling met ongeveer 80% verminderd.

Deze maatregelen vereisen echter een grote hoeveelheid zoet water dat niet altijd ter beschikking is vanuit het bovendebiet. Daarom wordt de efficiëntie van de maatregelen aangepast aan het effectieve bovendebiet dat beschikbaar is zoals opgegeven door de gebruiker. Daarnaast wordt aangegeven hoeveel debiet dan wel noodzakelijk zou zijn om continu deze maatregel toe te passen op alle sluzen. Indien het bovendebiet hoger ligt dan dit noodzakelijke debiet, vermindert de uitwisseling met 80%.

## 5.5 Beperkingen en gevoeligheden in het gebruik van het model

Het afleiden van een de modeltool is een vereenvoudiging van berekeningen die normaal gesproken met complexe modellen worden uitgevoerd. Dit impliceert automatisch dat er door deze vereenvoudiging beperkingen zijn in het gebruik van het model. De beperkingen en gevoeligheden zijn hieronder puntsgewijs weergegeven:

- de vereenvoudigde berekening van de zoutlast is gecalibreerd op de FINEL3D berekening door de calibratieparameter  $\alpha$  aan te passen.  $\alpha$  is een verzamelparameter, die onder andere corrigeert voor de wandwrijving van de sluis. De waarde van  $\alpha$  varieert van 0,55 tot 3,0. In de modeltool is het mogelijk om de dimensies van de sluzen aan te passen. De waarde van  $\alpha$  blijft echter constant. Grote wijzigingen in de dimensies van de sluzen is dan ook niet aan te raden.

De modeltool geeft een melding als een dimensie wordt ingevuld die meer dan 50% afwijkt van de waarde waarmee de calibratie is uitgevoerd. Hierbuiten is het model onbetrouwbaar;

- het berekende chloride verloop is alleen geldig op een afstand van 5 km vanaf Evergem tot 22 km vanaf Evergem. In dit km-bereik is het SOBEK model gekalibreerd;
- het berekende chloride verloop is alleen gekalibreerd voor een bovendebiet van 15 m<sup>3</sup>/s tot 50 m<sup>3</sup>/s. Het invullen van waarden buiten dit gekalibreerde bereik maken de onzekerheid groter;
- om een interpolatie mogelijk te maken zijn SOBEK berekeningen uitgevoerd met een stationair bovendebiet. In werkelijkheid is het bovendebiet erg dynamisch. Een lage afvoer gedurende enkele dagen resulteert niet gelijk in hoge chloride gehalten, zo blijkt uit metingen. In de modelberekeningen is uitgegaan van een evenwichtsgehalte na een half jaar met hetzelfde bovendebiet. Het dynamische karakter van het chloride verloop is hierdoor verloren gegaan in het modeltool;
- voor lage bovendebieten geldt dat het chloride gehalte in een evenwichtssituatie na zes maanden erg hoog is. Dit levert geen reële waarden op, omdat uit de gegevens blijkt dat lage bovenafvoeren veelal niet langer dan 2 maanden standhouden. In de rekentool is daarom rekening gehouden met het feit dat bij een debiet lager dan 20 m<sup>3</sup>/s gerekend is met een kortere periode, waarin nog geen evenwichtssituatie is opgetreden, maar waar wel een betere benadering van de zoutgehalten langs het kanaal worden voorspeld;
- in de SOBEK modellering is de werking van de sluizen opgenomen als een puntlozing van zout. Op het lozingspunt is de zoutlast opgenomen die met de FINEL3D berekening is bepaald. Een correctere schematisatie zou zijn om de sluis als beneden randvoorwaarde op te nemen, dan is er een rechtstreekse relatie tussen de chloride gehalten op de Westerschelde en de chloride gehalten in het kanaal. De modelkeuze voor een puntlozing is echter gemaakt, zodat het effect van verschillende sluisconfiguraties berekend kan worden, namelijk de zoutlasten uit de FINEL3D berekeningen. Met de sluis als benedenstroomse randvoorwaarde is het effect van een aanpassing in de sluizen niet te modelleren in SOBEK. Een direct gevolg van deze modelkeuze is dat het mogelijk is dat de chloride gehalten in het kanaal oplopen tot boven de chloride gehalten in de Westerschelde. Dit kan optreden door bepaalde combinaties in de invoerparameters. Als het berekende chloride gehalte *hoger is dan 13.000 mg/l dan zijn de door de modeltool berekende resultaten niet betrouwbaar*. De invoerparameters liggen dan te ver buiten het gekalibreerde bereik;
- de zoutindringing is gekalibreerd met een SOBEK model en de gegevens over 2008. Deze zoutindringing is ontstaan door een aantal schuttingen, waarbij de sluizen voor een deel zijn gevuld met schepen. Dit levert een reductie op van het debiet, dat;
- de berekening met het model is zo opgezet dat evenredig met het aantal sluischuttingen de zoutbelasting is opgevoerd. Deze relatie is afgeleid van de kalibratie op basis van de huidige situatie in 2008 (zie toelichting bij kalibratie, paragraaf 3.4.2). Hier is dus eigenlijk de huidige verhouding volle / lege kolken en de huidige verhouding kleine / grote schepen in relatie tot de sluiscolkgrootte voor de 3 **huidige sluizen** aangehouden. Verschuivingen en veranderingen in deze verhouding die in toekomstige scenario's kunnen worden verwacht kunnen niet in de berekening met de modeltool worden ingevoerd.

## 5.6 Korte gebruikshandleiding gebruik Excel model

Het model dat opgebouwd is in Excel heeft als doel om een inzicht te verschaffen in de verziltingseffecten van een vernieuwing van het sluizencomplex te Terneuzen. Het maakt deel uit van de studie die door Royal Haskoning en Svašek is uitgevoerd in 2009. Dit model is een modeltool dat gebaseerd is op verschillende berekeningen uitgevoerd met het Finel3D-sluismodel en het Sobek-kanaalmodel. Die beide modellen zijn gecalibreerd op basis van bepaalde metingen. Via dit model is het mogelijk om bepaalde parameters van de sluis aan te passen om de effecten hiervan te bestuderen. Hoe verder de gekozen parameters liggen van de parameters die gebruikt zijn in de gedetailleerde modellen, hoe minder nauwkeurig en betrouwbaar het berekende resultaat is. Het Excel-model dient dan ook als hulp om inzicht te krijgen in grootteordes van effecten en kan geenszins gebruikt worden om gedetailleerde voorspellingen te maken.

Volgende parameters kunnen gewijzigd worden:

per sluis;

- lengte sluiskolk;
- breedte sluiskolk;
- bodemniveau sluiskolk (in m+NAP);
- bodemniveau kanaal ter hoogte van (binnen-)sluisdeur;
- bantal schuttingen.

Algemeen:

- densiteitverschil tussen kanaalwater en Westerschelde;
- bovendebiet kanaal.

Ingrepen:

- verdiept kanaal: een algehele kanaalverdieping met 2 meter kan worden aangevinkt;
- maatregelen: kan worden aangevinkt. Hierbij is uitgegaan van maatregelen die uitgaan van opvangmaatregelen en verversing van zout water door zoet water.

### Resultaat

Het resultaat wordt weergegeven onder vorm van een verschil in zoutuitwisseling ten opzichte van de huidige situatie en een grafiek met de chloridenconcentraties in het kanaal. De zoutuitwisseling is niet afhankelijk van het bovendebiet maar enkel van de parameters die aan de sluis van belang zijn.

Tevens wordt aangegeven of er voldoende zoetwaterdebiet aanwezig is voor de optimale werking van de maatregel tegen zoutindringing.

### Werkwijze

De gele velden op de invulpagina kunnen worden gewijzigd. Bepaalde wijzigingen worden beperkt. Daarnaast worden bij grote wijzigingen waarschuwingen gegeven. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn bij extrapolaties of afmetingen die meer dan een bepaalde waarde afwijken.

### Densiteit

Het densiteitverschil tussen buiten en binnen bepaalt mee de uitwisseling van zout bij de schuttingen. In huidige situatie bedraagt dit verschil 25 (kg/m<sup>3</sup>). (beperkt tot 30).

### Debiet

Het bovendebiet is variabel van 7 tot 100 m<sup>3</sup>/s. de berekening gaat er wel van uit dat er een constant debiet aanwezig is. Voor lage debieten (< 15 à 20 m<sup>3</sup>/s) wordt automatisch gerekend met een beperkte periode van 2 maanden voor de concentraties.

Het effect van een hoog debiet is anders. Bij hoge debieten > 30 m<sup>3</sup>/s wordt het evenwicht zeer snel bereikt. Vandaar is het gebruik van stationair resultaat verantwoord om een natte periode met een hoge afvoerpiek te simuleren. De ijking van het Sobek-model is op basis van een meetreeks waar de debieten variëren tot 50 m<sup>3</sup>/s. De betrouwbaarheid bij de hoogste waarden binnen de ijkperiode (tussen 35 en 50 m<sup>3</sup>/s) is kleiner. Bij de extrapolatie met waarden boven de 50 m<sup>3</sup>/s wordt die betrouwbaarheid nog beperkter.

### Sluisafmetingen - schuttingen

De sluisafmetingen (lengte, breedte en diepte) hebben een impact op de uitwisseling. Ook hier is de berekende uitwisseling gebaseerd op de ijking op basis van de huidige sluisafmetingen. Bij het afwijken hiervan zal een ander resultaat bekomen worden. Indien de afmetingen te veel afwijken van de originele waarden worden de invulvakjes oranje gekleurd. Het aantal schuttingen kan per sluis worden ingevuld. Indien het aantal schuttingen op 0 wordt gezet zal er geen zout uitgewisseld worden via die sluis. In de studie zijn vier alternatieven doorgerekend voor het economisch scenario Global Economy voor het jaar 2040. Het aantal schuttingen dat hoort bij elke combinatie van projectalternatief/economisch scenario kan worden gekozen via de knop aan de rechterzijde (genoemd "scenario"). Kies alternatief en druk vervolgens op de knop "selecteer". Naast het aantal schuttingen worden ook de standaardafmetingen zoals voorzien in het alternatief opnieuw ingesteld.

Bij het kiezen van het "NUL 2005" kies je voor de huidige situatie. De zoutuitwisseling is dan dus 100% ten opzichte van de huidige situatie (gelijk dus). Indien het bovendebiet op 20 wordt gezet zal ook de grafiek gelijk zijn aan het resultaat van de huidige situatie. De zoutconcentraties op de grafiek zijn een gemiddelde op een diepteprofiel. In de praktijk zal de densiteit toenemen naar de diepte toe. De grafiek is opgesteld op basis van de afstand tot Gent. kilometer 15 ligt ongeveer op de Belgisch-Nederlandse grens. De grafiek loopt van km 5 tot 22 (nog steeds een 7-tal km van Terneuzen); dit is de zone waar de voorspelling voldoende betrouwbaar is op basis van dit model.

## 6 BEREKENING ZOUTINDRINGING VOOR ALTERNATIEVEN EN SCENARIO'S

### 6.1 Inleiding

De modellentrein (FINEL – SOBEK – Modeltool), zoals beschreven in de voorgaande hoofdstukken, is opgezet met scheepstransport gegevens uit 2008 (hoofdstuk 3, parameteronderzoek). Met deze modelberekening is gebleken dat een goede relatie kan worden gelegd tussen het aantal schuttingen (die afhankelijk zijn van het aantal te verwerken schepen), de afmetingen van de sluis, de diepte van het kanaal, het bovendebiet bij Evergem en de zoutindringing. Deze relatie is verwerkt in een modeltool (hoofdstuk 5).

In februari 2010 zijn voor de 3 geselecteerde projectalternatieven uit de verkenning recentere scheepstransport gegevens beschikbaar gekomen (opgeleverd door TNO en Prosim). Deze scheepstransportgegevens geven voor het nulalternatief en de 3 projectalternatieven het aantal te verwachten schuttingen per jaar voor de verschillende sluisen.

In dit hoofdstuk is de mate van zoutindringing (of de verandering daarvan ten opzichte van de huidige situatie en ten opzichte van het nulalternatief) doorgerekend met de ontwikkelde modeltool.

De transportgegevens voor het economisch scenario GE\_40 zijn weergegeven in tabel 6.1. Ook de gegevens uit 2008 zijn hierin weergegeven.

**Tabel 6.1: Transportgegevens van 2008 en 2009 voor het economisch scenario GE\_40**

aantallen per jaar cijfers uit jaar	NUL_2005		NUL_GE40				GZN_GE40				DBS_GE40				KZN_GE40	
	Zuidwaarts 2008	noordwaarts 2008	Zuidwaarts 2008	2009	noordwaarts 2008	2009	Zuidwaarts 2008	2009	noordwaarts 2008	2009	Zuidwaarts 2008	2009	noordwaarts 2008	2009	Zuidwaarts 2009	noordwaarts 2009
<b>Oostsluis</b>																
Aantal schuttingen	6562	6557	6453	6401	6453	6401	6386	6630	6380	6635	6235	6432	6230	64210(?)	6458	6464
Waarvan vol	172	203	3874	3193	3068	3583	1690	307	894	229	4040	1576	2200	1825	1518	1929
Waarvan leegom	1045	1024	504	718	780	593	359	650	603	468	239	530	478	442	546	463
Aantal schepen	18564	17633	22927	20899	20696	22324	26187	24612	25589	25470	26270	24700	25111	25147	24560	24965
<b>Middensluis</b>																
Aantal schuttingen	3760	3765	3245	3557	3250	3552										
Waarvan vol	47	52	2756	1908	1888	1992										
Waarvan leegom	572	468	120	348	291	250										
Aantal schepen	7602	8398	7192	7696	7519	7602										
<b>Westsluis</b>																
Aantal schuttingen	4649	4649	3843	4056	3838	4056	4306	4768	4300	4768	4056	4415	4061	4415	4108	4108
Waarvan vol	754	629	3796	3094	3354	3193	1799	411	983	536	3016	2080	2272	2382	1617	2070
Waarvan leegom	1066	1056	36	161	208	395	400	416	281	562	307	260	187	484	660	712
Aantal schepen	6542	6677	11482	11081	11097	11050	15434	14425	15959	14607	12709	10993	13364	11175	9027	9334
<b>Nieuwe sluis</b>																
Aantal schuttingen							3063	3432	3063	3432	3968	4540	3968	4534	4592	4596
Waarvan vol							1352	426	754	608	3000	1451	1934	1810	1539	1934
Waarvan leegom							463	770	577	588	447	1030	650	785	338	515
Aantal schepen							15215	9948	12896	9792	15569	12615	12849	13858	14409	14737

Opvallend is dat het aantal schuttingen (bepalend voor de zoutlast) voor de Westsluis en voor de nieuwe sluis behoorlijk toenemen ten opzichte van de eerdere cijfers uit 2008.

In het NUL alternatief is dit ongeveer 5 %, maar bij GZN en CBS is dit 10 tot 15 %. Omdat de Westsluis en de nieuw aan te leggen sluis in grote mate verantwoordelijk zijn voor de zoutlast op het kanaal, zal dit betekenen dat de zoutlast ook zal toenemen.

## 6.2 Resultaten

Met het model is de zoutlast bepaald, als percentage ten opzichte van de huidige situatie, op basis van de nieuwe transportgegevens.

Om te kunnen vergelijken zijn in tabel 6.2 zijn de percentages opgenomen zoals gevonden op basis van de eerdere gegevens. Deze percentages zijn ook in paragraaf 3.4.3. behandeld.

**Tabel 6.2: Zoutlast op benedenrand als percentage t.o.v. de huidige situatie en het NUL alternatief op basis van de transportgegevens uit 2008**

Huidige situatie	NULL_GE40	GZN_GE40	GZN GE40 Met kanaalverdieping	CBS_GE40
100 % (basis)	84 %	169 %	233 %	130 %
NUL alternatief				
100 % (basis)	-	201 %	277 %	154 %

**Tabel 6.3: Zoutlast op benedenrand als percentage ten opzichte van de huidige situatie op basis van de transportgegevens uit 2009, voor 3 economische scenario's en 4 alternatieven**

Huidige situatie	NULL_GE40	GZN_GE40	GZN GE40 Met kanaalverdieping	CBS_GE40	KZN_GE40
100 % (basis)	89 %	189 %	260%	144 %	151%

Huidige situatie	NULL_SE40	GZN_SE40	GZN GE40 Met kanaalverdieping	CBS_SE40	KZN_SE40
100 % (basis)	101%	170 %	234%	139%	134 %

Huidige situatie	NULL_RC40	GZN_RC40	GZN GE40 Met kanaalverdieping	CBS_RC40	KZN_RC40
100 % (basis)	98%	126 %	174%	110%	103 %

**Tabel 6.4: Zoutlast op benedenrand als percentage ten opzichte van het NUL alternatief op basis van de transportgegevens uit 2009, voor 3 economische scenario's en 3 alternatieven**

NULL_GE40	GZN_GE40	GZN GE40 Met kanaalverdieping	CBS_GE40	KZN_GE40
100 % (basis)	213 %	294%	162 %	170 %

NULL_SE40	GZN_SE40	GZN GE40 Met kanaalverdieping	CBS_SE40	KZN_SE40
100 % (basis)	171 %	236%	139 %	134 %

NULL_RC40	GZN_RC40	GZN GE40 Met kanaalverdieping	CBS_RC40	KZN_RC40
100 % (basis)	128 %	177%	112 %	105 %



Tabel 6.3 geeft de percentages weer op basis van de transportgegevens uit 2009 t.o.v. de huidige situatie, tabel 6.4 t.o.v. het NUL alternatief. In de nieuwe cijfers is ook het alternatief van de kleine zeesluis doorgerekend. Dit was in de cijfers van 2008 niet het geval. De afmetingen van de kleine zeesluis zijn als volgt:

- lengte kleine zeesluis = 290 m;
- breedte kleine zeesluis = 40 m;
- diepte kleine zeesluis = -13,8 m.

Voor het economisch scenario GE\_40 zijn de percentages hoger dan op basis van de transportgegevens uit 2008 eerder is berekend. Dit was ook de verwachting, omdat het aantal schuttingen ook toeneemt. In het Nul alternatief is dit 5 % meer, bij de grote zeesluis 20 % en bij de Combisluis ongeveer 15%. De kleine zeesluis valt tussen het alternatief grote zeesluis en diepe binnenvaart sluis in, met een percentage van 151 %. De andere economische scenario's geven een lager percentage, zeker bij het RC\_40 scenario blijft de toename van de zoutlast beperkt.

Verder valt op dat bij de andere economische scenario's de toename het minst is bij kleine zeesluis. Bij RC\_40 is dit zelfs nihil. De uitkomsten t.o.v. de huidige situatie en t.o.v. het NUL alternatief zijn ook gelijk voor de economische scenario's SE\_40 en RC\_40.

#### Effect bovendebiet

Met behulp van de modeltool zijn ook nog gevoeligheidssommen gedaan bij een economisch scenario van GE\_40 naar de invloed van het bovendebiet.

Op basis van de voorspelde chloridenconcentraties is een percentage berekend t.o.v. de chloridenconcentratie in de huidige situatie. Dit is gedaan voor een debiet van 20, 25 en 30 m<sup>3</sup>/s en op 2 locaties op het kanaal. Tabellen 6.5 en 6.6 geven hier de resultaten van.

**Tabel 6.5: Vanuit grafiek op km 15 vanuit Gent**

Bovendebiet (m <sup>3</sup> /s)	NUL_GE40	GZN_GE40	CBS_GE40	KZN_GE40
20	90 %	182 %	140 %	146 %
25	89 %	186 %	142 %	148 %
30	92 %	165 %	131 %	136 %

**Tabel 6.6: Vanuit grafiek op km 12 vanuit Gent**

Bovendebiet (m <sup>3</sup> /s)	NUL_GE40	GZN_GE40	CBS_GE40	KZN_GE40
20	90 %	181 %	140 %	146 %
25	90 %	183 %	137 %	147 %
30	93 %	160 %	129 %	134 %

Hieruit kan worden opgemaakt dat de percentages bij 20 en 25 m<sup>3</sup>/s redelijk overeen komen. Dit is ook ongeveer de range van het gemiddelde debiet in de periode waarin het model gecalibreerd is. Bij 30 m<sup>3</sup>/s daalt het percentage, behalve bij het Nul scenario, daar stijgt het. Bij een hoger debiet blijft de verandering ten opzichte van de huidige situatie dus beperkter.

Dit geeft nogmaals weer hoe belangrijk het is om ervoor te zorgen dat er voldoende zoetwater vanuit Gent naar het kanaal wordt gestuurd, zodat de zoutlast beperkt kan worden. Wat verder opvalt, is dat de percentages tussen 15 en 12 km niet veel verschillen. Dit werd ook al geconcludeerd uit tabel 3.10.

## 7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In deze studie zijn veranderingen in zoutconcentraties berekend met behulp van het FINEL 2DV model van het sluizencomplex Terneuzen en het 1D SOBEK model van het kanaal Gent-Terneuzen. Het 1D model is een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid, maar uit een analyse van de gemeten effecten van scheepsbeweging op de menging van het zoute en het zoete water, blijkt dat deze schematisatie gerechtvaardigd is.

De effecten op de zoutindringing op het kanaal Gent-Terneuzen zijn uitgedrukt in een percentage waarmee ten opzichte van het nulalternatief de chloridenconcentratie verandert. Een toename houdt in dat de maximaal voorkomende chloridenconcentraties hoger worden en de duur dat hogere concentraties voorkomen langer worden. Nadelige effecten treden op in bepaalde perioden, als zoutconcentraties te hoog worden.

In deze studie zijn de effecten slechts globaal aangegeven en zijn de criteria voor duur, periode en hoogte van de chloridenconcentratie slechts ten dele bekend. Om in absolute zin de ernst van de effecten aan te kunnen geven zal nadere studie nodig zijn. Bij het 'vaststellen' van de effecten moet bovendien bedacht worden dat in de huidige situatie al drogere perioden voorkomen (weinig/geen afvoerdebit vanuit Evergem) en de chloridenconcentraties tot in Gent al vrij hoog kunnen worden.

### 7.1 Effecten

In het algemeen levert een zeespiegelrijzing een hogere zoutlast op. Als de zeespiegel (en dus de 'buitenwaterstand') stijgt in een meest extreem scenario van 130 cm in 2100, is op termijn een significant hogere zoutlast op het kanaal Gent-Terneuzen te verwachten.

Als er geen sluis wordt bijgebouwd (het nulalternatief) neemt de zoutindringing op het kanaal in het jaar 2040 licht af (in de orde van 10 %), afhankelijk van het economisch scenario.

Uit de modelberekeningen blijkt dat de zoutconcentraties op het kanaal van Gent naar Terneuzen worden beïnvloed door twee belangrijke parameters:

- de uitwisseling van zout (Westerschelde)water met zoet (kanaal)water via de sluischuttingen. Uit driedimensionale modelberekeningen (met FINEL 2DV) blijkt dat in geval van een diepere sluis bij een schutting nagenoeg de gehele kolkinhoud uitwisselt en een zoutlast geeft op het kanaal. Gebleken is dat hoe groter en dieper de sluis (en dus de kolkinhoud) en hoe groter het aantal schuttingen is, des te groter de zoutlast is;
- de zoutindringing op het kanaal wordt niet alleen bepaald door de zoutlast, maar ook in belangrijke mate door het bovendebiet bij Evergem. Bij Evergem wordt via het Kanaal Gent-Terneuzen water afgevoerd naar de Westerschelde. Hoe hoger het afvoerdebit, hoe kleiner de zoutindringing. Door de zoete bovenafvoer wordt het kanaal als het ware 'schoongespoeld' en het zoute water teruggedrongen.

Bij een gemiddeld bovendebiet van 20 m<sup>3</sup>/s zijn voor 2040 de veranderingen van de zoutconcentraties op het kanaal bepaald ten opzichte van het Nulalternatief. De volgende sluisalternatieven zijn beschouwd:

- het alternatief Grote Zeesluis (GZN), waarbij een nieuwe zeesluis groter (kolkinhoud orde 480.000 m<sup>3</sup> ten opzichte van de huidige westsluis 170.000 m<sup>3</sup>) dan de huidige Westsluis wordt gerealiseerd binnen het complex en de huidige Middensluis wordt opgeheven. De kolkinhoud van de grote zeesluis is orde 480.000 m<sup>3</sup>. De huidige westsluis heeft een kolkinhoud van orde 170.000 m<sup>3</sup>;
- het alternatief Kleine Zeesluis (KZN), waarbij een nieuwe zeesluis met ongeveer het formaat van de huidige Westsluis ter plaatse van de huidige Middensluis wordt gerealiseerd. De kolkinhoud van de kleine zeesluis is orde 180.000 m<sup>3</sup>. De huidige Middensluis heeft een kolkinhoud van orde 30.000 m<sup>3</sup>;
- het alternatief Combisluis (CBS), waarbij een nieuwe binnenvaartsluis (tevens toegankelijk voor kleine zeeschepen) wordt gerealiseerd tussen de huidige Middensluis en de bestaande Oostsluis. De kolkinhoud van de nieuwe Combisluis is 140.000 m<sup>3</sup>. De huidige Oostsluis heeft een kolkinhoud van orde 30.000 m<sup>3</sup>.

De effecten van de sluisalternatieven op de zoutlast in 2040 zijn doorgerekend bij drie verschillende economische scenario's:

- het Global Economy scenario (GE) met een relatief hoge toename van de goederenstroom;
- het Strong Europe scenario (SE) met een beperkte toename van de goederenstroom;
- het Regional Communities scenario (RC) met een lichte afname van de goederenstroom.

Uit de berekeningen van de zoutlast blijkt:

- ongeacht het economische scenario leiden alle sluisalternatieven ten opzichte van het nulalternatief tot een verhoging van de chloridenconcentratie op het kanaal Gent-Terneuzen. Het effect is het grootst bij het Global Economy scenario, het kleinst bij het Regional Communities scenario;
- de verschillen in zoutlast tussen de Kleine Zeesluis (KZN) en de Combisluis (CBS) zijn gering. Bij het Global Economy scenario leidt de Kleine Zeesluis tot een iets hogere zoutlast op het kanaal Gent-Terneuzen, terwijl bij het Strong Europe scenario en het Regional Communities scenario de Combisluis tot een iets hogere zoutlast dan de Kleine Zeesluis leidt;
- de Grote Zeesluis leidt tot een aanzienlijk hogere zoutlast op het kanaal Gent-Terneuzen dan de Kleine Zeesluis. Dit effect wordt versterkt, indien daarnaast ook het kanaal wordt uitgediept.

Belangrijke kanttekening bij de omvang van de zoutlast van het nulalternatief is, dat in het nulalternatief een deel van de schepen moet uitwijken naar andere routes, havens en/of vervoerwijzen (nihil in het RC scenario; beperkt in het SE scenario; aanzienlijk in het GE scenario). Hierdoor is het aantal schuttingen van het nulalternatief kleiner dan van de sluisalternatieven. Uitmijking van schepen kan elders (buiten het sluisencomplex Terneuzen) tot meer schuttingen en dus tot meer zoutlast elders leiden. Vanwege het ontbreken van simulaties van andere sluisen kon de omvang van de zoutlast elders niet geraamd worden.

In onderstaande tabel zijn de veranderingen van de zoutlast (en daarmee het chloride gehalte op het kanaal) in percentages ten opzichte van het Nulalternatief weergegeven.

**Tabel 7.1 Zoutlast op benedenrand als percentage ten opzichte van het NUL alternatief op basis van de transportgegevens uit 2010, voor 3 economische scenario's en 3 alternatieven (aantal schuttingen afgerond op 100)**

<b>NUL_GE40</b> [14.000 schuttingen]	<b>CBS_GE40</b> [15.400 schuttingen]	<b>KZN_GE40</b> [15.200 schuttingen]	<b>GZN_GE40</b> [14.800 schuttingen]	<b>GZN_GE40</b> Met kanaalaanpassing
100% (basis)	162%	170%	213%	294%

<b>NUL_SE40</b> [15.200 schuttingen]	<b>CBS_SE40</b> [15.600 schuttingen]	<b>KZN_SE40</b> [15.000 schuttingen]	<b>GZN_SE40</b> [14.900 schuttingen]	<b>GZN_SE40</b> Met kanaalaanpassing
100% (basis)	139%	134%	171%	236%

<b>NUL_RC40</b> [15.100 schuttingen]	<b>CBS_RC40</b> [13.800 schuttingen]	<b>KZN_RC40</b> [13.900 schuttingen]	<b>GZN_RC40</b> [13.800 schuttingen]	<b>GZN_RC40</b> Met kanaalaanpassing
100% (basis)	112%	105%	128%	177%

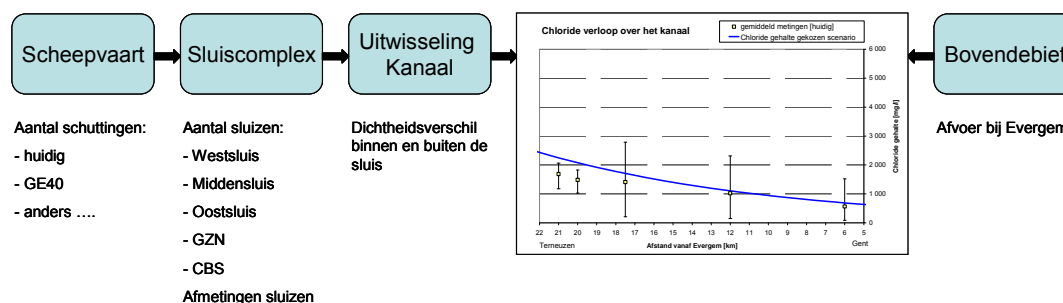
De extra verzilting levert mogelijk negatieve effecten voor industrie, infrastructuur, natuur en landbouw. Ten aanzien van de ernst van de effecten op het kanaal Gent-Terneuzen kunnen de volgende punten worden opgemerkt:

- vanuit de doelstellingen in de Kaderrichtlijn Water is aangegeven dat de huidige situatie (op basis van metingen 2006-2008) bij Sas van Gent qua zoutconcentratie voldoet aan de criteria 'Goede Ecologische Toestand'/ 'Goed Ecologisch Potentieel' (GET/GEP). De gemiddelde zoutconcentratie bedroeg 724mg/l. Voor een beoordeling 'goed' moet de zoutconcentratie tussen 300 en 3000 mg/l liggen. Voor elk van de sluisalternatieven kan – ongeacht het economisch scenario – worden geconcludeerd dat de chloridengehalten toenemen, maar niet zodanig dat deze buiten de grenzen voor een beoordeling 'goed' vallen;
- als gevolg van de toename van de zoutindringing zijn voor de industrie met name directe effecten op installaties te verwachten, daar waar koel- en proceswater wordt ingenomen. Dit is met een aanpassing aan de installaties te voorkomen/compenseren. De directe schadeverwachting wordt beperkt, doordat in de huidige situatie in bepaalde perioden al hogere chloridengehalten zijn te verwachten en de industriële installaties daar reeds op zijn uitgelegd. Dit is gebaseerd op een eerdere studie (Royal Haskoning en Envico, Verziltingsstudie Kanaal Gent-Terneuzen, september 2002), waarin ook enquêtes zijn gehouden bij bedrijven. Bovendien zijn de forse toenames pas op langere termijn te verwachten (effecten zijn berekend voor 2040) en zijn mogelijk een aantal installaties reeds vervangen in het kader van groot onderhoud waarop de noodzakelijke aanpassingen kunnen 'meeliften'. De compensatiekosten zijn dan relatief beperkt;
- als gevolg van de toename van de zoutindringing zijn secundaire effecten te verwachten voor landbouw (in de vorm van ca. 3 tot 5 % afname van de gewasopbrengst) en natuur (Canisvlietse Kreek). Deze zijn ter plaatse te compenseren en/of te voorkomen. Nadere studie moet uitwijzen hoe ernstig deze effecten zijn en welke compensatiemaatregelen dan nodig zijn.

## 7.2 Modeltool

In deze studie is ook een modeltool opgesteld om te kunnen verkennen hoe de zoutlast zich ontwikkelt bij andere sluisafmetingen en een ander verkeersaanbod, dat zich vertaalt in een wijziging in het aantal schuttingen.

Het model dat opgebouwd is in Excel en is gebaseerd op de geavanceerde berekeningen die zijn uitgevoerd met het Finel3D-sluismodel en het Sobek-kanaalmodel. Via dit model is het mogelijk om bepaalde parameters van de sluis aan te passen om de effecten hiervan te bestuderen. Hoe verder de gekozen parameters liggen van de parameters die gebruikt zijn in de gedetailleerde modellen, hoe minder nauwkeurig en betrouwbaar het berekende resultaat is. Het Excel-model dient dan ook als hulp om inzicht te krijgen in grootteordes van effecten en kan geenszins gebruikt worden om gedetailleerde voorspellingen te maken.



**Figuur 7.1: Schematische weergave van modeltool. De blauwe vlakken zijn invoervelden. De grafiek is het resultaat**

## 7.3 Maatregelen

De verhoging van de zoutconcentraties op het kanaal Gent-Terneuzen is niet wenselijk vanwege de volgende effecten:

- voor civiele constructies op het kanaal (damwanden, kaden) verhoogt de corrosiesnelheid;
- voor industriële gebruikers van kanaalwater treedt mogelijk (meer) schade op aan installaties;
- er treden depressies in de landbouwopbrengst op vanwege meer zoute kwel;
- er treden mogelijk negatieve effecten op voor het Natura 2000 gebied de Canisvlietse Kreek vanwege zoute kwel.

Om verhoging tegen te gaan zijn effectieve maatregelen aan de bron mogelijk (bij de sluisen) of dient bovenstrooms voldoende zoet water te worden toegevoerd. Voor de maatregelen bij de sluisen gelden de volgende conclusies:

- de aanwezigheid van een *zoutvang* op zichzelf heeft geen enkel nut, doordat de zoutvang de zouttong een versnellende impuls meegeeft, waardoor de kolk sneller wordt leeggetrokken. Uiteindelijke 'springt' de zouttong over de rand van de vang heen. Slechts in combinatie met een andere maatregel dit het opgehoopte zout weer verwijdert (zoals een omloopriool) krijgt de aanleg van een zoutvang zin;

- een *bellenscherm* / *waterjet* werkt meestal slechts vertragend op de uitwisseling tussen zoet en zout water, maar vermindert niet structureel de zoutlast tenzij de omstandigheden zeer gunstig zijn. Als het dichtheidsverschil tussen de kolk en het buitenwater laag is, is dit systeem effectiever. Een bellenscherm met of zonder waterjet aan de Westerschelde zijde van de sluis is een goede oplossing om de hoeveelheid zout in de sluis kolk te beperken. Dit verlaagt ook de zoutlast op het kanaal en kan eenvoudig worden gecombineerd met maatregelen aan de kanaalzijde. Een bellenscherm vlak voor het omloopriool plaatsen is niet verstandig, omdat het zout dan meer wordt opgemengd. Dit moet juist voorkomen worden bij een omloopriool;
- met name de toepassing van een *omloopriool* is een zeer effectieve maatregel om 'op maat' het optredende zoutbezwaar terug te spuien naar het buitenwater. De omloopriolen kunnen worden toegepast met of zonder *bufferbekkens*. Er wordt wel verwacht dat deze maatregel de meeste kosten met zich meebrengt.

In onderstaande tabellen zijn de technische effectiviteit en de kosten van de maatregelen bij het sluiscomplex samengevat.

**Tabel 7.2: Samenvatting technische effectiviteit van de maatregelen**

	<b>Technisch effectief</b>
1 Meest effectief	Scheiding met bufferbekkens (alleen mogelijk bij Westsluis) en omloopriolen
2	Scheiding zonder bufferbekkens en omloopriolen
3	Omloopriool en zoutvang (met zo weinig menging)
4	Luchtbellenscherm / waterjet (aan de Westerschelde zijde)
5	Afzuigen zoutvang
6	Luchtbellenscherm / waterriet (aan de kanaalzijde)
7	Zoutvang
8	Drempel (in combinatie wel effectief)
9 Minst effectief	Beheersmaatregelen (beperkte invloed)

**Tabel 7.3: Samenvatting kosten van de maatregelen**

	<b>Kosten</b>
1 Goedkoopst	Beheersmaatregelen (geen tot weinig aanlegkosten)
2	Drempel
3	Zoutvang
4	Luchtbellenscherm (onafhankelijk van de locatie)
5	Afzuigen zoutvang
6	Omloopriool en zoutvang
7	Scheiding met bufferbekkens
8 Duurst	Scheiding zonder bufferbekkens

Het vergroten van het debiet bij Evergem, indien mogelijk, is ook een goede mogelijkheid om de toename van de chloridenconcentraties op het kanaal te mitigeren, die het gevolg zal zijn van een vergroting van de sluisen.

Om gevolgen van zeespiegelstijging op termijn te voorkomen kan het kanaalpeil worden verhoogd. Hiermee kan meer zoet water op het kanaal zelf worden gebufferd, en kan het verlies aan 'tegendruk' van het kanaal naar het buitenwater om de zoutindringing te beperken worden gecompenseerd.

Als compenserende maatregelen kan (ook) worden gedacht aan:

- verhogen peil bij de Canisvlietse Kreek om kweldruk te verminderen;
- natuurcompensatie elders voor de Canisvlietse Kreek;
- afkopen landbouwschade.

## 7.4 Aanbevelingen

In een afweging van effecten versus compenserende maatregelen kunnen de volgende concluderende opmerkingen worden gemaakt:

- de zoutindringing wordt beperkt als het aantal schuttingen wordt beperkt. Een alternatief waarbij het verkeersaanbod kan worden verwerkt met zo min mogelijk schuttingen (de beschikbare sluiscapaciteit zo efficiënt mogelijk wordt gebruikt) is het gunstigst. Leeg schutten of niet vol geplande sluiskolken leveren een 'onterecht' of 'niet nuttig gebruikt' zoutbezwaar op;
- een nieuwe sluis die pas in de verdere toekomst vol wordt benut, is niet gunstig. Een alternatief dat op maat meegroeit met het verkeersaanbod, is dan het meest optimaal. Om een alternatief mee te laten groeien met het verkeersaanbod kan aan het volgende worden gedacht;
  - stel gebruik van de diepere en grotere sluis binnen het sluisencomplex zo veel mogelijk uit;
  - stel de kanaalverdieping zo lang mogelijk uit; want deze heeft een verhogend effect op de zoutindringing;
  - pas zo mogelijk flexibel peilbeheer toe om voor drogere perioden zoet water te sparen.
- het bovendebiet is van groot belang voor het beperken van de zoutindringing. Het leveren van meer bovendebiet bij Evergem, of het meer opsparen van overtollig zoet water dat vanuit het waterkwantiteitsbeheer wordt geloosd (via het kanaal Gent-Terneuzen op de Westerschelde), is dan aan te bevelen;
- maatregelen bij de sluisen die zeer effectief zijn, zijn ook kostenintensief;
- tenslotte kan overwogen worden het kanaal wat zouter te laten worden en de secundaire effecten te compenseren.

In de overweging voor een optimale sluisoplossing vanuit het aspect oppervlaktewater komen zaken naar voren die een bredere analyse vragen dan alleen het zoutindringingsproces zelf en het directe effect (toename chloridengehalte) op het kanaal van Gent naar Terneuzen. In deze bredere analyse zou nader gekeken moeten worden naar de secundaire effecten (op landbouw en natuur) en hoe ernstig deze zijn om werkelijk grip te krijgen op de noodzaak de effecten te compenseren. Ook de mogelijkheid dat meer zoet water vanuit Evergem op het kanaal wordt gegarandeerd om zoutindringing tegen te gaan, vraagt om een bredere analyse van de waterhuishouding in het achterliggende gebied. Vragen die hierbij spelen is of het zoete water zodanig kan worden verdeeld/ opgespaard, dat voldoende water te leveren is. Het minimale debiet dat moet worden geleverd, bedraagt 20 m<sup>3</sup>/s (nualternatief) tot 45 m<sup>3</sup>/s (alternatief Grote Zeesluis) in 2040.

## REFERENTIES

Arcadis (2007), Kanaal Gent – Terneuzen: Technische en kostenstudie, fase 4.

Labeur, R.J. (2009), PhD – thesis, Finite Element Modelling of Transport and Non-hydrostatic Flow in Environmental Fluid Mechanics, TU Delft.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Bouwdienst (2000), Ontwerp van schutsluizen.

ProSim bv (2008), Scheepvaartsimulatie ten behoeve van de “Verkenning maritieme toegang Kanaal Gent – Terneuzen in het licht van de logistieke potentie”.

Royal Haskoning en Envico (2002), Verziltingsstudie Kanaal Gent-Terneuzen, september 2002.

Royal Haskoning en Marin (2008), Verkenning maritieme toegankelijkheid Kanaal Gent – Terneuzen – Onderzoek nautische veiligheidseffecten.

Royal Haskoning (2009), Oppervlaktewateronderzoek Kanaal Gent – Terneuzen, deelrapport gegevensinventarisatie.



## **Bijlage 1**

### **Sluisalternatieven**

Het huidige onderzoeksprogramma richt zich op een range van 3 sluisalternatieven allen gelegen binnen het huidige sluisencomplex:

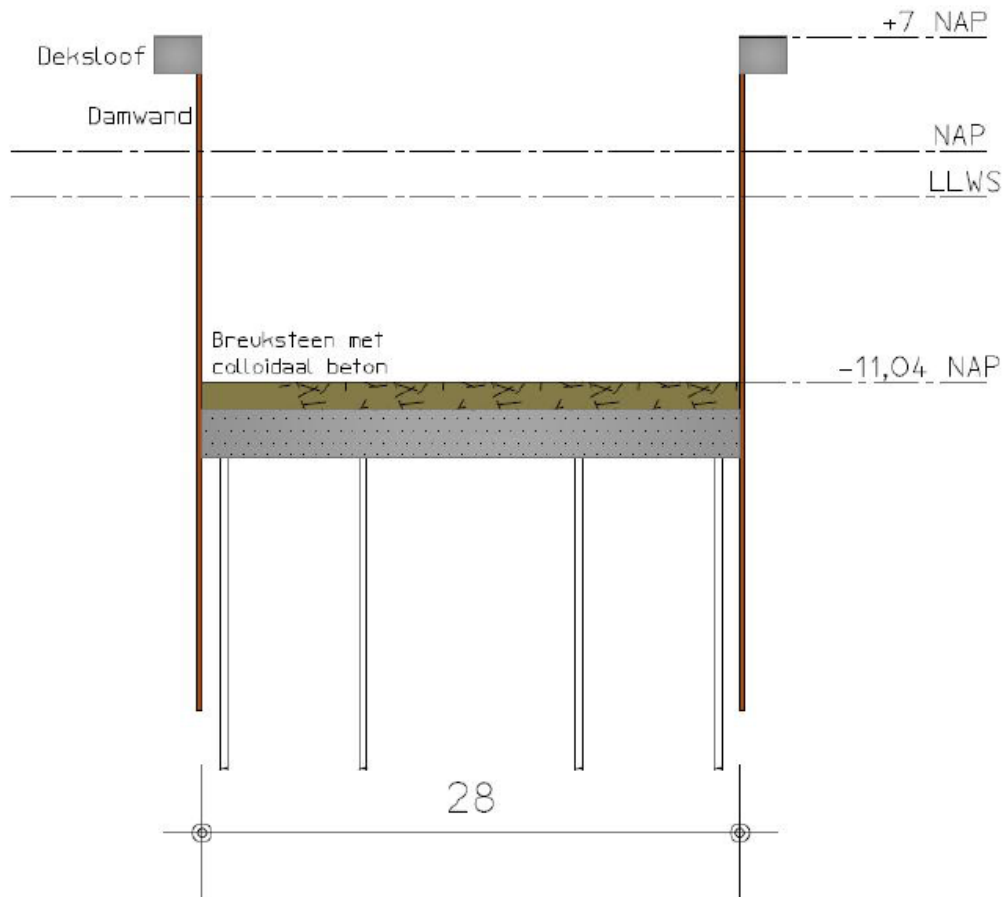
1. de Combisluis (Diepe binnenvaartsluis, ook geschikt voor zeevaart);
2. de Kleine Zeesluis;
3. Grote Zeesluis.

## COMBISLUIS

De Combisluis is gepland aan de oostzijde van het sluisencomplex tussen de huidige oostsluis en middensluis. De afmetingen zijn aangegeven in de figuren A1.1 en A1.2.



Figuur A1.1: Bovenaanzicht van de Combisluis (Arcadis, 2007)



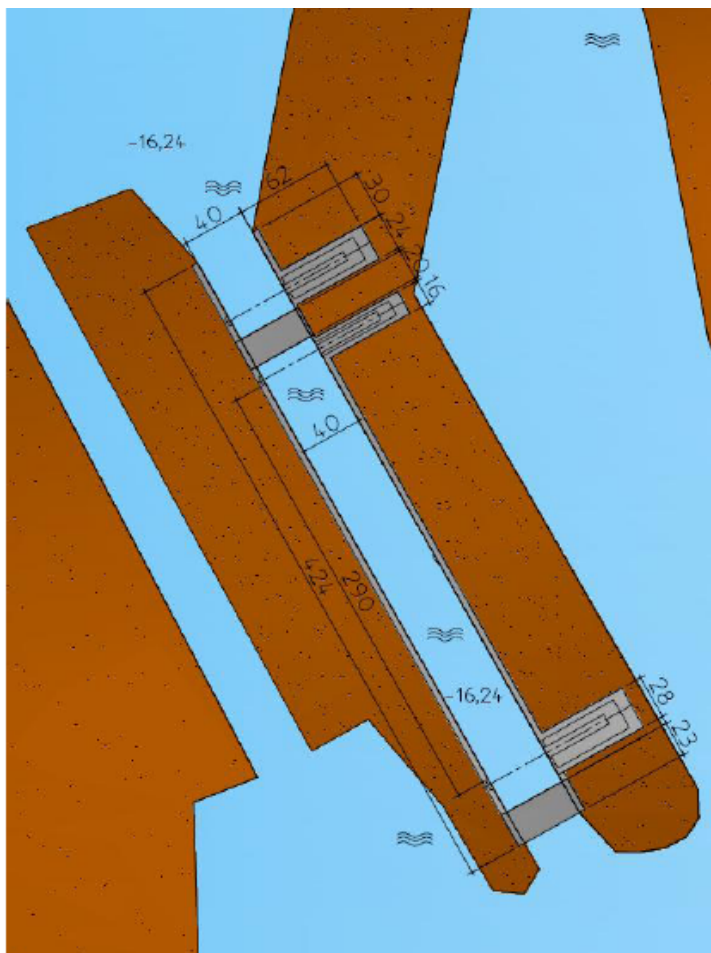
**Figuur A1.2: Dwarsdoorsnede van de Combisluis (Arcadis, 2007)**

## KLEINE ZEESLUIS

De kleine zeesluis binnen het huidige complex is gepland aan de oostkant van de huidige west sluis. Deze is weergegeven in figuur A1.3. Tabel A1.1 geeft de afmetingen van de kleine zeesluis. In de uitwerking van de alternatieven voor de KBA fase is geen dwarsdoorsnede tekening aangegeven.

Tabel A1.1: Afmetingen kleine zeesluis

	sluisafmetingen	maximale scheepsafmetingen		
	(lxbxd)	(lxb)	Diepgang kanaal	diepgang zee
gelijk aan huidig complex	290 x 40 x 13,8 m	265 x 34m	12,5 m	ca. 12,2 m



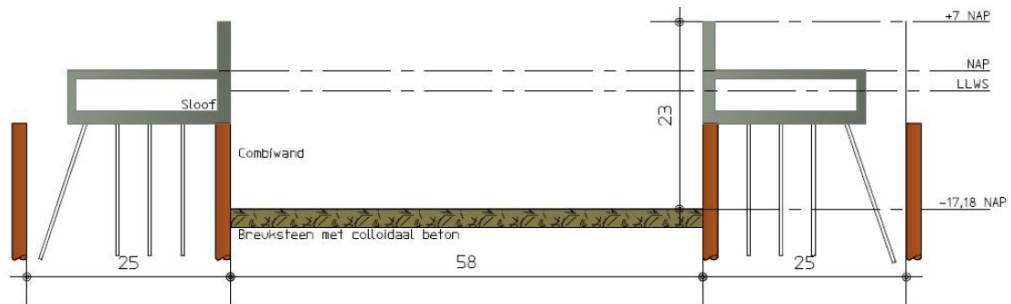
FiguurA1.3: Bovenaanzicht van de kleine zeesluis (Arcadis, 2007)

## GROTE ZEESLUIS

De grote zeesluis is op dezelfde locatie gepland als de kleine zeesluis. De afmetingen van de grote zeesluis zijn weergegeven in de figuren A1.4 en A1.5.



Figuur A1.4: Bovenaanzicht van de grote zeesluis (Arcadis, 2007)



Figuur A1.5: Dwarsdoorsnede van de grote zeesluis (Arcadis, 2007)

## Bijlage 2 Tabel scheepvaart aantallen ProSIM

**Tabel Appendix 2 - 1 aantal scuttingen bij relevante alternatieven en bij Scenario Global Economy 2040**

aantallen per jaar	NUL_2005		NUL_GE40		GZN_GE40		DBS_GE40	
	zuidwaarts	noordwaarts	zuidwaarts	noordwaarts	zuidwaarts	noordwaarts	zuidwaarts	noordwaarts
<b>Oostsluis</b>								
Aantal schuttingen	6562	6557	6453	6453	6386	6380	6235	6230
Waarvan vol	172	203	3874	3068	1690	894	4040	2200
Waarvan leegom	1045	1024	504	780	359	603	239	478
Aantal schepen	18564	17633	22927	20696	26187	25589	26270	25111
<b>Middensluis</b>								
Aantal schuttingen	3760	3765	3245	3250				
Waarvan vol	47	52	2756	1888				
Waarvan leegom	572	468	120	291				
Aantal schepen	7602	8398	7192	7519				
<b>Westsluis</b>								
Aantal schuttingen	4649	4649	3843	3838	4306	4300	4056	4061
Waarvan vol	754	629	3796	3354	1799	983	3016	2272
Waarvan leegom	1066	1056	36	208	400	281	307	187
Aantal schepen	6542	6677	11482	11097	15434	15959	12709	13364
<b>Nieuwe sluis</b>								
Aantal schuttingen					3063	3063	3968	3968
Waarvan vol					1352	754	3000	1934
Waarvan leegom					463	577	447	650
Aantal schepen					15215	12896	15569	12849

Tabel A 2-2 Schuttingen met berekening benodigd zoetwaterdebiet voor terugdringing zout

aantallen per jaar	NUL_GE40		GZN_GE40		DBS_GE40	
	zuidwaarts	noordwaarts	zuidwaarts	noordwaarts	zuidwaarts	noordwaarts

**Oostsluis (260 x 24 x [2,5+2,2] = 29.328m3/schutting)**

Aantal schuttingen	6453	6453	6386	6380	6235	6230
kolkinhoud Mm3/jr	189	189	187	187	183	183
Waarvan vol	3874	3068	1690	894	4040	2200
Waarvan leegom	504	780	359	603	239	478
Aantal schepen	22927	20696	26187	25589	26270	25111

**Middensluis (140 x 24,5 x [6,5+2,2] = 29.841m3/schutting)**

Aantal schuttingen	3245	3250				
kolkinhoud Mm3/jr	97	97				
Waarvan vol	2756	1888				
Waarvan leegom	120	291				
Aantal schepen	7192	7519				

**Westsluis (290 x 40 x [12,5+2,2] = 170.520m3/schutting)**

Aantal schuttingen	3843	3838	4306	4300	4056	4061
kolkinhoud Mm3/jr	655	654	734	733	692	693
Waarvan vol	3796	3354	1799	983	3016	2272
Waarvan leegom	36	208	400	281	307	187
Aantal schepen	11482	11097	15434	15959	12709	13364

**Nieuwe sluis (GZN 427x58x[17,5+2,2]= 487.890; DBS 380x28x[11,3+2,2]=143.640m3/schutting)**

Aantal schuttingen			3063	3063	3968	3968
kolkinhoud Mm3/jr			1492	1492	570	570
Waarvan vol			1352	754	3000	1934
Waarvan leegom			463	577	447	650
Aantal schepen			15215	12896	15569	12849

Tot. kolkinh. Mm3/jr		940		2412		1446
af: schepen (10%)		94		241		145
uitw. percentage		75		65		75
totale uitw. Mm3/jr		634		1411		976
ofwel in m3/sec		20,1		44,7		30,9