

## Beschouwing van de effecten van een zout Volkerak-Zoommeer op het grondwatersysteem

Deltares Rapport 2008-U-R0774/A



**Bodem- en  
grondwatersystemen**

Princetonlaan 6  
Postbus 85467  
3508 AL Utrecht

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)

T +31 30 256 47 50


F +31 30 256 48 55

[info@deltares.nl](mailto:info@deltares.nl)

## Deltares-rapport

**2008-U-R0774/A**

### Beschouwing van de effecten van een zout Volkerak- Zoommeer op het grondwatersysteem

Datum	5 augustus 2008
Auteur(s)	Gualbert Oude Essink Esther van Baaren Wim de Lange Anneloes de Wit
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Waterdienst; Harry van Manen
Projectnummer	092.81181
Aantal pagina's	102, inclusief 8 bijlagen
Goedgekeurd door	Bennie Minnema 

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welk andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Deltares.

Indien dit rapport werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan Deltares, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het Deltares-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

2008 Deltares



## Samenvatting

### Inleiding

Rijkswaterstaat Waterdienst heeft Deltares gevraagd een kwalitatieve beschrijving met enkele getalsmatige indicaties te geven van de mogelijke geohydrologische gevolgen van een zout Volkerak-Zoommeer met beperkt getij. Aan de hand van bestaande rapportages, gegevens en interviews met (externe) experts en enkele inschattingsberekeningen is een beeld verkregen van het grond- en oppervlaktewatersysteem op dit moment én in het verleden vóór de afsluiting en verzoeting van het meer. Om meer inzicht te krijgen in de huidige situatie van de chloride concentraties van het grondwater en de sloten heeft een veldbezoek plaatsgevonden ten noorden van de stad Tholen in Zeeland.

Op basis van (historische) data over onder andere waterstanden, polderpeilen, chloride concentraties en stijghoogten heeft een analyse van metingen plaatsgevonden. Deze analyse leidde tot vertrouwen in de gebruikte berekeningen voor de toekomstige effecten van een zout Volkerak-Zoommeer op de stijghoogte verandering in het watervoerend pakket en de kwel naar het oppervlaktewater.

### Invloedsgebied in termen van stijghoogte

Rond het Volkerak-Zoommeer zijn aan de hand van geohydrologische gegevens vijf representatieve profielen van het grondwatersysteem gekozen. Aan de hand van deze profielen en de verandering van het potentiaalverschil richting de omliggende polders, veroorzaakt door de toename van de chloride concentratie van het meer, is de verandering van de stijghoogte in het watervoerend pakket onder de polders berekend. In het noorden van de Eendracht aan de kant van Noord-Brabant is tot ruim 1 km afstand meer dan 3 cm extra stijghoogte te verwachten. Aan zowel de Tholen als de Noord-Brabant kant in het zuiden van de Eendracht is tot ruim 400 meter vanaf de rand van de Eendracht de toename van de stijghoogte groter dan 3 cm.

### Verandering grootte en chloride concentratie van de kwel

De orde grootte waarmee de stroming en dus de kwel zal toenemen, blijft beperkt tot een paar honderd meter vanaf de rand van het meer. Er zijn drie risicogebieden te onderscheiden. De eerste twee liggen aan beide kanten van het Volkerak, zowel op Goeree-Overflakkee als in Noord-Brabant. Hier is de kwel in de huidige situatie relatief groot (max. 35 mm/dag in de vorm van dijkse kwel direct naast het Volkerak) maar zal slechts 5% toenemen. Het derde gebied ligt in het noorden van Tholen langs de Eendracht; hier is de kwel nu ca 4 mm/dag en zal in de toekomst met 30% toenemen.

Daar waar de chloride concentratie snel toeneemt met de diepte zal ook de chloride concentratie van de kwel kunnen toenemen, door opwaartse stroming van dit brakkere tot zoutere grondwater (de zgn. opkegeling). Dit is vooral het geval langs de noordelijke helft van de Eendracht; zowel Tholen als het westen van Noord-Brabant. Langs de noordelijke helft van de Eendracht op Tholen neemt zowel de hoeveelheid kwel als de chloride concentratie van de kwel toe waardoor een toename van zoutvracht naar het oppervlaktewater te verwachten is. Een eerste inschatting is dat de zoutbelasting met ca 10% toeneemt. De chloride concentraties in het topsysteem zijn echter matig tot slecht bekend in het gebied, aanbevolen wordt deze inschatting van de huidige en toekomstige zoutbelasting te verbeteren door relatief eenvoudig te bepalen concentraties te meten. Tevens kan met een numeriek 3D dichtheidsafhankelijk

grondwater model een meer nauwkeurig ruimtelijke inschatting worden gegeven van de grootte en chloride concentratie van de kwel.

### **Veranderingen in zoet-zout verdeling in het grondwatersysteem**

Het huidige grondwatersysteem in de buurt van het Volkerak-Zoommeer is overwegend brak tot zout. Onder het hooggelegen gebied De Brabantse Wal bevindt zich wel zoet grondwater. De zoet-zout verdeling in het grondwatersysteem verschilt van plaats tot plaats, en is op lokale schaal sterk dynamisch. Op regionale schaal verloopt de verzilting of de verzoeting van een grondwatersysteem daarentegen langzaam, en zal door autonome oorzaken (waterhuishouding van Nederland, land onder N.A.P., bodemdaling) nog blijven veranderen.

Door verzilting van het Volkerak-Zoommeer kunnen onder het meer lokaal grote veranderingen optreden. Op basis van een 2D numeriek testmodel is voor enkele van de eerder genoemde (geohydrologische) profielen de invloed van een zout (vóór 1987) – zoet (nu) – zout (toekomst) Volkerak-Zoommeer op de chloride concentratie in het grondwater doorgerekend. De resultaten wijzen uit dat het gebied onder het Volkerak-Zoommeer direct beïnvloed wordt. Het zoutgehalte in het grondwater onder het Volkerak-Zoommeer zal binnen een tiental jaren lijken op de situatie ten tijde van vóór het zoete Volkerak-Zoommeer.

Verzilting kan relevant zijn onder de mondingen van beken en rivieren. Bij lage beekafvoeren kan in de nieuwe situatie zout oppervlaktewater binnen dringen in de monding van de twee beken de Dintel en de Vliet, in de vorm van een zoutwater tong. Door het verschil in dichtheid kan zwaar, zout oppervlaktewater relatief snel via een zgn. fingering proces naar beneden stromen in het zoete grondwatersysteem. Een numeriek testmodel toont aan dat dit proces in een ordegrrootte van uren plaats kan vinden. Het verdient de aanbeveling om dit model realistischer te maken om een inschatting van de werkelijke gevolgen te kunnen geven en daarna de inschatting van de zoutbelasting naar het achterland nader uit te werken.

Het zoutgehalte van het binnendijkse oppervlaktewater neemt toe daar waar de chloride concentratie nu al hoog is, met de diepte sterk toeneemt en waar kwel flink toeneemt door verzilting van het Volkerak-Zoommeer. Risicogebieden liggen langs het Volkerak en in het noorden van Tholen langs de Eendracht.

### **Veranderingen in zoetwaterlenzen in landbouwpercelen**

De dunne zoetwaterlenzen in de landbouwpercelen zullen in een zone van enkele honderden meters van het Volkerak-Zoommeer veranderen in vorm. De beschikbare zoetwatervoorraad in de regenwaterlenzen zal op deze locaties kunnen verminderen. De toekomstige situatie valt qua hydrologische omstandigheden tussen de huidige en de historische (van vóór de afsluiting) in, dus daar waar vóór 1987 landbouw mogelijk was zal ook in de toekomst landbouw mogelijk zijn. Complicatie bij het inschatten van de toekomstige situatie is de voorspelde klimaatverandering: ook de drogere zomers en de nattere winters zullen de dikte van de zoetwaterlens beïnvloeden. Omdat niet achterhaald kan worden hoe de zoetwaterlenzen er vóór de verzoeting uitzagen, wordt aangeraden hiernaar verder onderzoek te doen en aan te sluiten op het onderzoek *Verzilting en verzoeting van het freatisch grondwater in de Provincie Zeeland*. Daarin wordt een modelinstrumentarium ontwikkeld waarmee de veranderingen in de vorm van de zoetwaterlens onder invloed van verschillende omstandigheden zoals toename in kwel en stijghoogte door zeespiegelstijging kunnen worden ingeschat. Een relatief

eenvoudige uitbreiding van dit modelinstrumentarium zou een goede eerste inschatting kunnen geven.

### **Mogelijkheden gebruik grondwater**

De huidige chloride concentratie van het grondwater is over het algemeen te hoog om te worden gebruikt voor beregeningsdoeleinden. Onttrekkingen uit het watervoerend pakket zijn alleen mogelijk met zeer kleine debieten wegens het gevaar van opkegeling van brak tot zout grondwater. Grondwater winningen op 2 km afstand of meer vanaf het Volkerak-Zoommeer (bijvoorbeeld ter plaatse van De Brabantse Wal) zullen geen effect ondervinden van zout Volkerak-Zoommeer met beperkt getij.

Kwelsloten in de nabijheid van het Volkerak-Zoommeer aan de Brabantse kant kunnen verzilten door toename van de kwel die ter plaatse van nature zout is (aan de Zeeuwse kant zijn deze sloten van nature al langer verzilt). Metingen van de chloride concentratie van sloten in de buurt van het Volkerak-Zoommeer van vóór en na 1987 laten dit duidelijk zien. Daardoor kan het zijn dat gebruik van oppervlaktewater voor beregening of irrigatie door peilopzet van sloten niet (altijd) meer mogelijk is. Deze kwelsloten zullen waarschijnlijk niet zouter worden dan vóór de sluiting van het meer in 1987.

Voor het handhaven en uitbreiden van de mogelijkheden van het gebruik van grondwater in de toekomst wordt aanbevolen om onderzoek te doen naar de effecten van mogelijke compenserende maatregelen, waarbij gedacht kan worden aan aanpassing van peilbeheer in polders, aanpassing van drainage en aanpassing van het sloten patroon.



# Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting.....</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Inventarisatie bestaande kennis/rapportages.....</b>	<b>13</b>
2.1	Inleiding.....	13
2.2	Verslagen relevante rapportages.....	13
2.3	Bespreekverslagen.....	17
<b>3</b>	<b>Situatie oppervlaktewater systeem.....</b>	<b>19</b>
3.1	Situatie vóór de sluiting van het Volkerak-Zoommeer.....	19
3.2	Situatie Tijdens de afsluiting van het Volkerak-Zoommeer.....	20
3.3	Huidige situatie.....	20
3.4	Scenario's in geval van een zout Volkerak-Zoommeer.....	23
<b>4</b>	<b>Analyse van het grondwatersysteem.....</b>	<b>25</b>
4.1	Inleiding.....	25
4.2	Huidige situatie van het grondwatersysteem.....	25
4.2.1	Geohydrologie.....	25
4.2.2	Algemeen hoogtebestand.....	26
4.2.3	Zoet-zout verdeling.....	27
<b>5</b>	<b>Kwalitatieve inschatting effecten in grondwatersysteem.....</b>	<b>35</b>
5.1	Inleiding.....	35
5.2	Kwantitatieve effecten: invloedssfeer van een peilverhoging.....	35
5.2.1	Verandering in stijghoogte.....	35
5.2.2	Verandering in kwel.....	47
5.2.3	Weerstand bodem Volkerak-Zoommeer.....	50
5.3	Effecten op waterkwaliteit (zoutgehalte).....	51
5.3.1	Dichtheidsafhankelijke stroming van grondwater: zoutwater intrusie.....	52
5.3.2	Zoetwatervoorraad in de regenwaterlens.....	57
<b>6</b>	<b>Kort verslag veldwerk.....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>Conclusies.....</b>	<b>63</b>
<b>8</b>	<b>Beantwoording deelvragen.....</b>	<b>67</b>
<b>9</b>	<b>Aanbevelingen.....</b>	<b>75</b>
<b>10</b>	<b>Referenties.....</b>	<b>77</b>



## Bijlagen

A.	Beschikbare literatuur Volkerak-Zoommeer .....	79
B.	Bespreekverslagen .....	81
C.	Meetlocaties chloridegehalte oppervlaktewater .....	85
D.	Veldcampagne Tholen landbouwperceel .....	89
E.	Analytische formules .....	93
F.	Metingen grondwaterstanden en stijghoogten.....	97
G.	Zouttolerantie gewassen.....	99
H.	Korte beschrijving MOCDENS3D .....	101

# 1 Inleiding

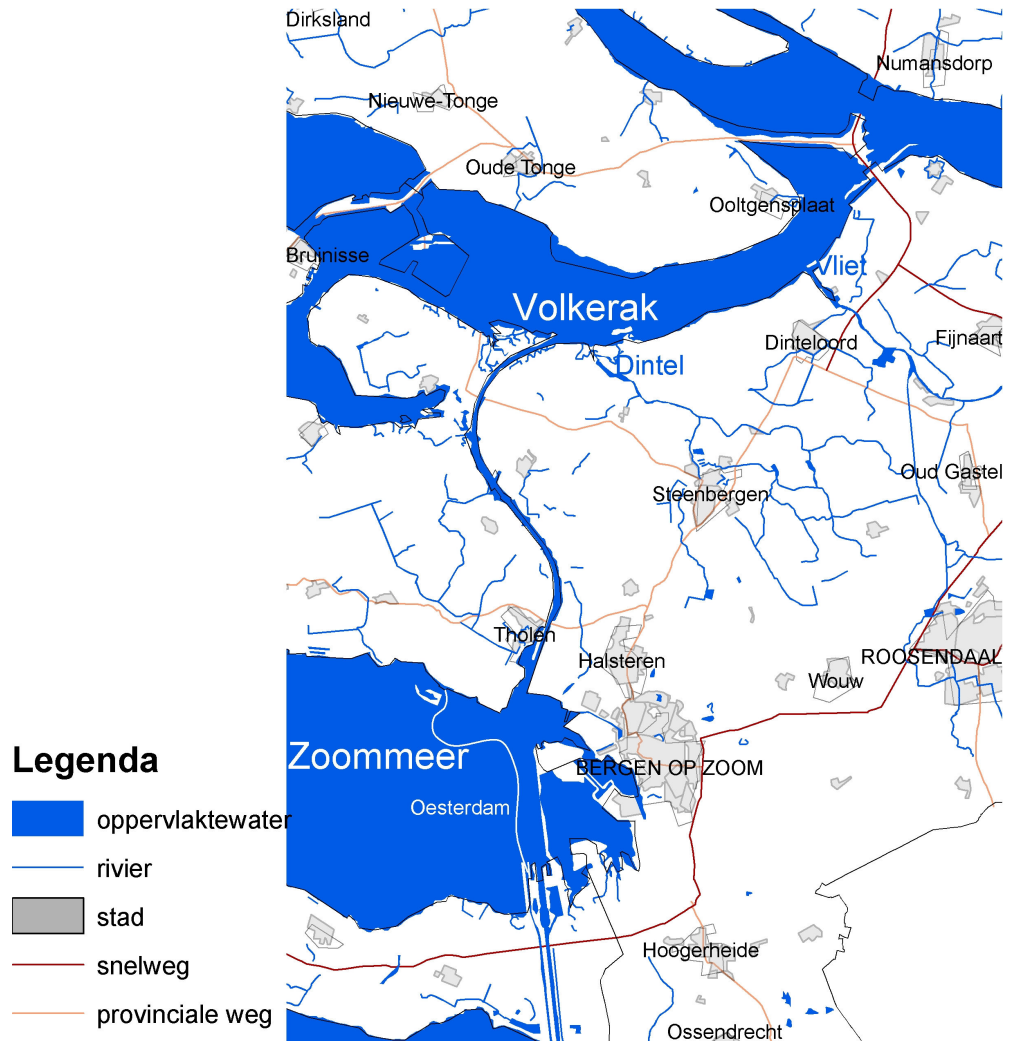
Rijkswaterstaat Waterdienst heeft Deltares gevraagd een kwalitatieve beschrijving te geven over de mogelijke invloed van een ander peilbeheer op het grondwatersysteem rond het Volkerak-Zoommeer (Figuur 1 en Figuur 2). Een uitgebreide beschrijving van alle mogelijke scenario's in geval van een zout Volkerak-Zoommeer is te vinden in "Waterkwaliteit en ecotopen in een zout Volkerak-Zoommeer" (Deltares, 2008). Voor de vraagstelling van dit rapport zijn de zoete varianten niet relevant. Vandaar dat alleen de zoute varianten worden geanalyseerd. De verkennende analyse in dit rapport spitst zich in eerste instantie toe op de veranderingen in het grondwatersysteem, zowel wat betreft de waterkwantiteit (kwel en infiltratie) als de waterkwaliteit (zoute kwel naar landbouwpercelen en zoutbelasting naar oppervlaktewater).

In deze rapportage met kwalitatieve beschrijving volgt een beschrijving van de mogelijke geohydrologische gevolgen van een ander peilbeheer met een andere (viz. zoute) waterkwaliteit in het Volkerak-Zoommeer.

In hoofdstuk 2 volgt een inventarisatie van bestaande kennis en rapportages op het gebied van grondwater. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de situatie van het oppervlaktewater systeem. In hoofdstuk 4 wordt de huidige situatie wat betreft de verdeling van zoet en zout in het oppervlaktewatersysteem beschreven en wordt het grondwatersysteem in het studiegebied geanalyseerd aan de hand van hydro(geo)logische data. In hoofdstuk 5 volgt de inschatting van de effecten op het grondwatersysteem aan de hand van analytische vergelijkingen: de invloedssfeer van een peilverhoging wordt bepaald, gevolgd door een beschouwing van de verandering in zoet, brak en zout grondwater in het studiegebied. Het veldwerk wordt kort besproken in hoofdstuk 6. In hoofdstuk 7 worden de conclusies besproken. De deelvragen die de grondslag vormen voor deze studie worden in hoofdstuk 8 besproken. De rapportage wordt afgesloten met aanbevelingen.



Figuur 1: Het studiegebied Volkerak-Zoommeer.



Figuur 2: Het studiegebied Volkerak-Zoommeer, inclusief bijbehorende grote waterlopen, steden en infrastructuur.

### Definities van zoet-brak-zout grondwater

In deze studie wordt gekeken naar de chloride concentratie in het grond- en oppervlaktewatersysteem, als dominante representant voor het zoutgehalte in het grondwater. Chloride is een conservatieve stof die relatief veel bemeten is t.o.v. andere stoffen in de ondergrond. Er zijn verschillende klasse indelingen van zoet, brak en zout grondwater in omloop, afhankelijk van o.a. het gebruiksdoel. Zo heeft de term zoet grondwater voor een bloembollenkweker een andere betekenis dan voor een agrariër die suikerbieten verbouwt. Gangbaar voor de drinkwatervoorziening is de klasse indeling van Stuyfzand (1993). In de Provincie Zeeland, waar van nature het grondwater brak tot zout is, komen nauwelijks chloride concentraties lager dan 150 mg Cl<sup>-</sup>/l voor, en wordt derhalve een andere indeling gebruikt. In Zeeland is de term *landbouwkundig zoet* geïntroduceerd, zijnde 1000 mg Cl<sup>-</sup>/l als de grens tussen zoet en brak grondwater (deze grens wordt overigens ook in het buitenland veel gebruikt). In Tabel 1 zijn de in dit rapport gebruikte definities voor zoet, brak en zout grondwater weergegeven.

Door Waterschap Brabantse Delta worden andere (lagere) grenswaarden gehanteerd voor de chloride concentraties dan in Zeeland. In de studie naar effecten van een zout VZM op West-Brabantse rivieren zijn twee toetsingskaders met grenswaarden voor chloride gehalten (in oppervlaktewater) gebruikt. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen een kader dat gebaseerd is op overwegend grondgebruik (grootste oppervlak in een inlaatgebied) en op het kritisch grondgebruik (grondgebruik met het laagste toelaatbare chloride gehalte in een inlaatgebied). Deze grenswaarden kunnen beschouwd worden als werknormen (Tabel 2).

Tabel 1: De in dit rapport gebruikte definities voor zoet, brak en zout grondwater (definitie van Zeeland).

<b>Klasse</b>	<b>Chloride concentratie (mg Cl<sup>-</sup>/l)</b>
Zoet	< 1000
Brak	1000 – 3000
zout	> 3000

Tabel 2: De door Waterschap Brabantse Delta gebruikte grenswaarden voor chloride concentraties in het oppervlaktewater.

<b>Klasse</b>	<b>Chloride concentratie (mg Cl<sup>-</sup>/l)</b>
Veeteelt	1000
Akkerbouw	600
Vollegrondstuinbouw en sierteelt	300
Bloembollen	200
Glastuinbouw	200
Fruitteelt	300
Fruitteelt nachtvorstbestrijding	600

## 2 Inventarisatie bestaande kennis/rapportages

### 2.1 Inleiding

Met behulp van bestaande rapportages en gegevens zal in dit hoofdstuk een beeld worden verkregen van het grond- en oppervlaktewatersysteem op dit moment én in het verleden vóór de afsluiting en verzoeting van het meer.

Naast bestaande rapportages toegespitst op de case studie Volkerak-Zoommeer van o.a. RWS, Haskoning en het Waterloopkundig Laboratorium betreft het TNO/Deltares achtergrondstudies over zoute kwel en peilopzet in Noord-Nederland, en over de dynamiek van zoete regenwaterlenzen in Zeeland en Noord-Nederland.

Tijdens de analyse van de historie rondom het Volkerak-Zoommeer (van zout naar zoet) wordt gekeken naar eventuele effecten op de landbouw, zowel wat betreft grondwater als oppervlaktewater.

Enkele gesprekken hebben plaatsgevonden met externe experts:

- ◆ Lein Kaland (Projectleider Provincie Zeeland) om de historie rondom het meer nader te begrijpen en inzet bestaande modellen te bespreken;
- ◆ Rinus Meeuwse (DLG);
- ◆ Dhr. vd Wel (akkerbouwer op Tholen);
- ◆ Ies de Vries (Deltares);
- ◆ Acronius Kramer (Waterschap Zeeuwse Eilanden);
- ◆ Klaas-jan Douben en Piet Polak (Waterschap Brabantse Delta): om het oppervlaktewatersysteem nader te begrijpen (telefonisch contact);
- ◆ Roelof Stuurman (Deltares).

Met medewerkers van de Provincie Noord-Brabant heeft geen gesprek plaatsgevonden; veel informatie was te achterhalen via de website van de provincie (de wateratlas) en Waterschap Brabantse Delta.

### 2.2 Verslagen relevante rapportages

#### **Kartering en meetnetontwerp zoet-brak-zout overgang in het grondwater in Noord-Brabant (Stuurman *et al*, 2006) Integrale Gebiedsanalyse De Oude Prinslandse Polder (Kuijper *et al.*, 2007)**

Voor het Waterschap Brabantse Delta heeft TNO/Deltares een gebiedsbrede, geohydrologisch onderbouwde en integrale visie op de inrichting van het watersysteem gegeven voor het gebied de Prinslandse Polders in het westen van de Provincie Noord-Brabant. Verzoeting van het Hollandsch Diep, de Dintel en de Vliet heeft er toe geleid dat deze oppervlaktewateren tegenwoordig juist zoet water infiltreren. Naar verwachting zal hierdoor een relatief smalle zone (1-2 km) langs deze oude zeearmen binnen enkele tientallen jaren verzoeten. In de kreekrestanten zelf vindt door de lage ligging en lage polderpeilen juist kwel van brak grondwater plaats.

Het optreden van brakke tot zoute kwel in dit gebied vormt een aandachtspunt omdat hierdoor doorspoeling van de poldersloten nodig is om de hoeveelheid chloride ten behoeve van landbouwkundig gebruik voldoende laag te houden.

De doelstelling van dit TNO/Deltares-onderzoek voor de Provincie Noord-Brabant bestaat uit het verbeteren van het inzicht over de diepteligging van de zoet-zout overgang op regionale schaal, het inrichten van een provinciaal 'zoutwater intrusie' meetnet en het onderzoek naar de beweging van de zoet-brak-zout overgang.

De regionale grondwaterstand- en stijghoogtedalingen die de afgelopen decennia in Noord-Brabant plaatsvonden hebben geen meetbare invloed op de zoet-zout verdeling gehad. Dit wijst erop dat de horizontale stroming in deze gebieden sterk overheerst ten opzichte van eventueel verziltende verticale stroming of dat de verticale stroming zeer gering is. De interpretatie van metingen geeft geen inzicht in de veranderingen op de lange termijn. Dat zou met dichtheidsafhankelijke grondwatermodellen inclusief zout transport voorspeld kunnen worden

#### **Deelstroomgebiedsvisie Zeeland (Projectgroep WB21 Zeeland, 2004)**

Bijna de hele provincie bestaat uit polders. De hoogteverschillen zijn gering, met uitzondering van de duingebieden. De verwevenheid van het land met het buitenwater zorgt ervoor dat het buitenwater nooit ver weg is en dat vrijwel elke polder direct op het buitenwater kan lozen. Bijna al het grondwater in Zeeland is brak tot zout (volgens de door de projectgroep WB21 gehanteerde schaal).

Problemen met verzilting situeren zich in het ondiepe grondwater in de landbouwpercelen. In het grootste deel van Zeeland bevindt zich hier een dunne laag zoet water en is er normaal gesproken geen probleem. In gebieden dichtbij de Deltawateren en kanalen is sprake van een zodanige verzilting dat de dunne zoete laag ontbreekt. Genoemde oplossingsrichtingen voor de verzilting zijn een ondiepere en intensievere drainage en het verlagen van de oppervlaktewaterpeilen.

#### **Ontwerpnota compartimenteringswerken, deelnota 4: EENDRACHT; Inventarisatie diepte, breedte en oeverstabieleit van de Eendracht na de afsluiting van de Krammer (Rijkswaterstaat directie Zeeland, 1988)**

Na sluiting van het Tholensche Gat (22-10-1986), werd het Zoommeer alleen vanuit het noorden gevuld en geleidigd onder invloed van het getij. Daardoor namen de stroomsnelheden in de Eendracht sterk toe ten opzichte van de oude situatie, waarbij water zowel vanuit het noorden als het zuiden de Eendracht in – en uitstroomde. Door de sluiting van de Krammer (18-04-1987) kwam aan deze situatie een einde en is er een stagnant waterniveau op de Eendracht ontstaan zonder stroming.

Tijdens de kritieke periode van oktober 1986 tot april 1987 was een minimale diepte van N.A.P. -6m voldoende om scheepvaart ongehinderd te laten passeren. Deze diepte moest tot 50 m ter weerszijden van de kanaal aanwezig zijn. Na beide sluitingen werden andere normen gehanteerd: N.A.P. -6.0 m over een breedte van 120 meter.

#### **Evaluatie problematiek Eendracht na de sluiting van de Oesterdam (Rijkswaterstaat directie Zeeland, bouw bureau compartimenteringswerken, werkgroep Eendracht, 1987)**

Na de sluiting van het Tholensche Gat (22-10-1986) ontstond een situatie met relatief hoge stroomsnelheden die duurde tot de sluiting van de Krammer (18-04-1987). In deze nota wordt een overzicht gegeven van de hydraulische en morfologische veranderingen die in de Eendracht hebben plaatsgevonden gedurende deze periode.

#### **Impact of Climate Change (Haasnoot *et al*, 1999)**

In dit rapport worden de gebruikte modellen (koppeling van de codes Mozart, Nagrom, Mona, Demnat en Agricom) en scenario's beschreven. Ook kunnen aannamen over o.a. zeespiegelstijging, bodemdaling, verandering van landgebruik en klimaat gevonden worden. In het model worden echter geen zout concentraties meegenomen. De invloed van deze aspecten op de hydrologie in Zeeland zijn een toename van kwel en zoutvracht.

#### **De Delta Natuurlijk (Tosserams et al, 2001)**

In dit RIZA-rapport wordt mogelijke natuurontwikkeling door middel van getij- en/of rivierdynamiek beschreven. De waterstanden van Volkerak-Zoommeer waren van 1987 – 1996 N.A.P. 0 m. Dit leidde echter tot sterke erosie van het buitendijkse gebied, dus tussen 1996 – 2001 is sprake van een vrij fluctuerend peil tussen N.A.P. -0,10m en N.A.P. +0,15m (zgn. regenmodel).

Het Markiezaatmeer kent een langzame ontbrakking sinds afsluiting van Oosterschelde door Markiezaatskade (1983). Het peilbeheer is volgens het afgetopt regenmodel en sinds 1998 is het stuwpeil N.A.P. +0,60m. In het Grevelingenmeer is het peil rond N.A.P. -0,20 m. Sinds 1999 is er een gedurende het gehele jaar uitwisseling met de zee via Brouwersdam voor waterkwaliteitsverbetering. Met betrekking tot de Brabantse polders wordt gemeld dat eind zestiger jaren Mark deels verbreed, gekanaliseerd en bedijkt werd en drie bergboezems ingericht werden. In 1983 is het Mark-Vlietkanaal aangelegd. Door afsluiting van het Volkerak-Zoommeer (1987) is een groot deel van de Vliet door kaden begrensd.

#### **Maatregelen tegen zoutindringing bij schutsluizen (D. v.d. Wiel, 2008)**

Het ministerie van Verkeer en Waterstaat beschrijft in dit rapport verschillende mogelijke maatregelen tegen zoutindringing in sluizen waaronder de drempel, een bellenscherm, zoutvang en spuien. Spuien zijn niet mogelijk wegens het onvoldoende beschikbaar zijn van zoet water. Per sluiscomplex zijn verschillende maatregelen nodig. De zoutbelasting per sluiscomplex is in het rapport te vinden.

#### **Transitie en toekomst van Deltalandbouw (Stuyt et al., 2006)**

Alterra spreekt in dit rapport de verwachting uit dat op Tholen de landbouwbedrijven groter worden en dat een deel van het areaal wordt overgenomen door melkveehouders. Op Tholen wordt weinig berekend, de schatting is slechts 10 mm/jaar. De verwachting is dat het zout worden van Volkerak-Zoommeer alleen gevolgen heeft als niet voldoende vervangend zoet water aanwezig is. De huidige chloride concentratie in ingelaten water is op Tholen 300 mg/l, in de Reigersbergschepolder 450 mg/l.

Goeree-Overflakkee, Noordwest Brabant, Tholen, St. Philipsland en Reigersbergsche Polder laten oppervlaktewater in vanuit het Volkerak-Zoommeer. De overige delen van Zeeland krijgen het direct uit het Hollandsch Diep (Voorne Putten), via een leidingenstelsel van Evides (Zuid Beveland) of vanuit het Belgische achterland (Zeeuws-Vlaanderen). Goeree-Overflakkee haalt een groot deel van haar water ook uit het Haringvliet. Dit is een alternatief voor het Volkerak-Zoommeer, maar dat wordt met het kierbesluit wellicht ook kwalitatief minder. Verwacht wordt dat er desondanks nog genoeg water zal zijn.

Tholen en St. Philipsland hebben inlaten voor zoet water voor peilbeheer sinds begin 90-er jaren. Sinds 2003 wordt Tholen doorspoeld voor waterkwaliteit. Inname zoetwater, kwel en beregning zijn betrekkelijk klein ten opzicht van overige termen. In Noordwestelijk Brabant vindt inname uit het Volkerak-Zoommeer en de Maas plaats.



**Waterkwaliteit en ecotopen in een zout Volkerak-Zoommeer (Meijers *et al*, concept 2008)**

Uit modelsimulaties is geconcludeerd dat de huidige problemen met blauwalgen niet afdoende kunnen worden opgelost als het Volkerak-Zoommeer een zoet watersysteem blijft. Een aantal zoute varianten is onderzocht, waarbij ook de invloed van grote(re) doorlaatmiddelen is beschouwd om meer water vanuit de Oosterschelde aan te voeren en daarmee een grotere getij-dynamiek en een robuust ecosysteem in het Volkerak-Zoommeer te realiseren.

Deze studie geeft ook een globale inschatting van de ecotooptypen die zullen ontstaan bij een verzilting van het Volkerak-Zoommeer en de introductie van een beperkt getij middels een habitatanalyse. Geconcludeerd is dat een groot gedeelte van het gebied niet zal veranderen, aangezien het bestaat uit bossen en ruigtes die nooit onder water komen te staan. Daarnaast bestaat een zeer groot oppervlak uit gebied dat altijd onder water staat en dit gebied zal dus compleet veranderen qua soortensamenstellingen omdat dit nu een zoetwatergebied is en een zoutwatergebied zal worden. Een klein deel zal bestaan uit inter-getijdengebied met daarin ecotooptypen die karakteristiek zijn voor inter-getijdengebieden.

**Overgangen zoet-zout in de Oosterschelde in het verleden (Pieters, 1998)**

Als onderdeel van het Overgangen Zoet-Zout in de Oosterschelde (OZZO) is een historische analyse uitgevoerd naar de opgetreden zoutgehalteverdelingen in de Oosterschelde in het verleden. Het project OZZO omvat een verkenning van de mogelijkheden en de effecten van de terugkeer van estuariene gradiënten in de Oosterschelde. De verklaring moet het inzicht vergroten in de bepalende factoren voor de karakteristieken van zoutgehalteverdelingen die kunnen optreden in de Oosterschelde. Uit deze eerste verkenning van het verloop in de tijd van de zoutgehalteverdelingen in de Oosterschelde komt een duidelijk en opmerkelijk beeld naar voren van de ontwikkeling "van estuarium naar zeearm".

**Inspraak m.b.t. grondwater en kwel (interviews met omwonenden)**

De zorg over de toename van zoute kwel is voor de initiatiefnemers een van de aanleidingen om de middenstandsverlaging van het Volkerak-Zoommeer nader te bestuderen als mogelijke variant van het aangepaste alternatief Zout. Een belangrijk aandachtspunt hierbij vormt de beschikbare vaardiepte voor de scheepvaart op de Schelde-Rijnverbinding.

Het alternatief Zoet, zoals dat beschreven staat in de Startnotitie van 2004, is uitgebreid onderzocht. Om twee redenen is dit niet effectief gebleken: blauwalgen blijken niet te verdwijnen, zelfs als het Volkerak-Zoommeer continu met een grote hoeveelheid zoet water wordt doorgespoeld en in de zomerperiode is er onvoldoende water beschikbaar om mee te spoelen.

De initiatiefnemer van de planstudie, het Bestuurlijk Overleg Krammer-Volkerak (BOKV), heeft aangegeven dat er alleen gekozen kan worden voor een zout Volkerak-Zoommeer als alternatieve zoetwatervoorziening voor de landbouw gegarandeerd is.

Waterschap Brabantse Delta onderzoekt de mogelijkheden van de aanvoer van extra zoet water via het Mark-Vlietstelsel. Deze extra aangevoerde hoeveelheid zoet water kan dienen als buffer tegen de zoutindringing in de monding van de Brabantse rivieren en als voorziening voor de landbouw in West-Brabant, Tholen en Sint Philipsland. In

hoeverre het extra aangevoerde zoete water toereikend is voor het doorspoelen van de sloten in de polders, zal het onderzoek moeten uitwijzen.

### **Planten in de Peiling, kwelproeven ten behoeve van damwandenproefvak (Van Manen, 1996)**

Het project "Planten in de Peiling" omvat in zijn algemeenheid het onderzoek naar het tot stand komen en de ontwikkeling van oevervegetatie in het Volkerak-Zoommeer. Er is een proefgebied ingericht, waar een gedeelte van het water is geïsoleerd door middel van een damwandbak. Voor het veen zijn op deze wijze doorlatendheden gevonden van 1,4 en 1,8 mm/dag. Bij nadere interpretatie kan gesteld worden dat de doorlatendheid van het zand globaal 0,30 a 0,44 m/dag is.

### **Verziltingsonderzoek in de Provincie Zeeland (2006-2009, Oude Essink, Kaland)**

De Provincie Zeeland heeft het initiatief genomen langjarig onderzoek te doen naar de verzilting van het grondwater in de bovenste meters van de ondergrond onder invloed van zeespiegelstijging en een veranderend klimaat. Het hoofddoel is te kijken welke waterbeheersmaatregelen effectief zijn in het bestrijden van de verzilting in Zeeland in landbouw- en natuurgebieden. Speciale aandacht wordt door TNO/Deltares gegeven aan de zogenaamde relatief dunne regenwaterlenzen in landbouwpercelen. Naast het ontwikkelen van een betrouwbaar modelinstrumentarium zal een uitgebreide meerjarige meetcampagne plaatsvinden waarmee het voorspellend vermogen van het modelinstrumentarium wordt vergroot.

## **2.3 Bespreekverslagen**

De andere gesprekken zijn direct verwerkt in de tekst.

### **Dhr. van der Wel; akkerbouwer pal ten Noorden van Tholen**

Als irrigatiemethode verhoogt dhr. van der Wel het peil in de sloten rondom zijn perceel met ca. 1 meter. Dit doet hij door middel van het afsluiten van 4 stuwen nabij de 4 hoeken van het perceel en door het inpompen van water vanuit de hoofdwatergang. Anderhalf uur na het opzetten van het water in de sloten is een verhoogd waterpeil zichtbaar in het midden van het perceel (ca 200 m bij de sloten vandaan). Indien daarnaast nog extra beregening nodig is, in geval van extreme droogte, haalt hij beregeningswater uit een put waarvan het filter ligt tussen N.A.P. -10m en N.A.P. -12m.

Als proefproject vanuit het waterschap worden sinds een aantal jaren de hoofdwatergangen in het groeiseizoen doorspoeld met water vanuit het Schelde-Rijnkanaal, behalve als er teveel blauwalg in het Schelde-Rijnkanaal aanwezig is.

Volgens de heer van der Wel zou er veel meer water vanuit de Maas/Rijn naar het Volkerak-Zoommeer geleid kunnen worden, als de eisen aan chloride concentratie van het oppervlaktewater elders (afgesproken in 1969) versoepeld zouden worden.

### **Lein Kaland, Provincie Zeeland, directie ruimte, milieu en water:**

In 1987 is er rondom Tholen, Sint Philipsland en Oostelijk Zuid-Beveland sprake geweest van een basisplan en een verfijningsplan met betrekking tot het waterbeheer en toevoer van zoet water ten behoeve van de landbouw. Deze plannen samen zouden een zoetwatertoevoer tot op perceelsniveau tot stand brengen. Het verfijningsplan zou door de landbouwers zelf bekostigd worden, het basisplan door het waterschap. Niet alle boeren wilde bijdragen, waardoor het verfijningsplan niet doorging. De gelden voor het basisplan waren in eerste instantie ook niet beschikbaar. Omdat het plan ook zou gaan

bijdragen aan een goede peilbeheersing, is uiteindelijk het benodigde geld voor (een deel van) het basisplan ter beschikking gekomen.

Er worden op dit moment studies uitgevoerd om water vanuit Noord Brabant naar Tholen te vervoeren om aan de garantie van zoetwater te kunnen voldoen.

Bij de aanleg van het Volkerak-Zoommeer was de inschatting dat het zoetwater massaal gebruikt zou worden. Dit blijkt in de praktijk tegen te vallen. De schade van het zout maken van het Volkerak-Zoommeer valt hierdoor waarschijnlijk erg mee. Op het moment wordt gekeken of en hoe het water dat vanuit de Brabantse Wallen in het Markiezaatmeer en de Oosterschelde stroomt, gebruikt kan worden als zoetwaterbron.

**Acronius Kramer, Waterschap Zeeuwse Eilanden:**

We ontvangen informatie over polderpeilen, zoutconcentraties in oppervlaktewater en een rapportage over kwelberekeningen voor Tholen en st. Philipsland uit de 1986.

Sinds 2001/2002 worden als proef de hoofdwatgangen tijdens het groeiseizoen doorspoeld met water uit het Schelde-Rijnkanaal, behalve als de blauwalg-concentratie te hoog is. Water wordt op 2 plekken ingelaten en stroomt via de hoofdwatgangen naar het gemaal ten zuiden van Tholen. Hierbij wordt gestuurd op een EC van 2,5 ter plaatse van het gemaal, wat ongeveer neerkomt op 700 mg chloride per liter. De chloride concentratie van het inlaatwater is ca 300 mg/l.

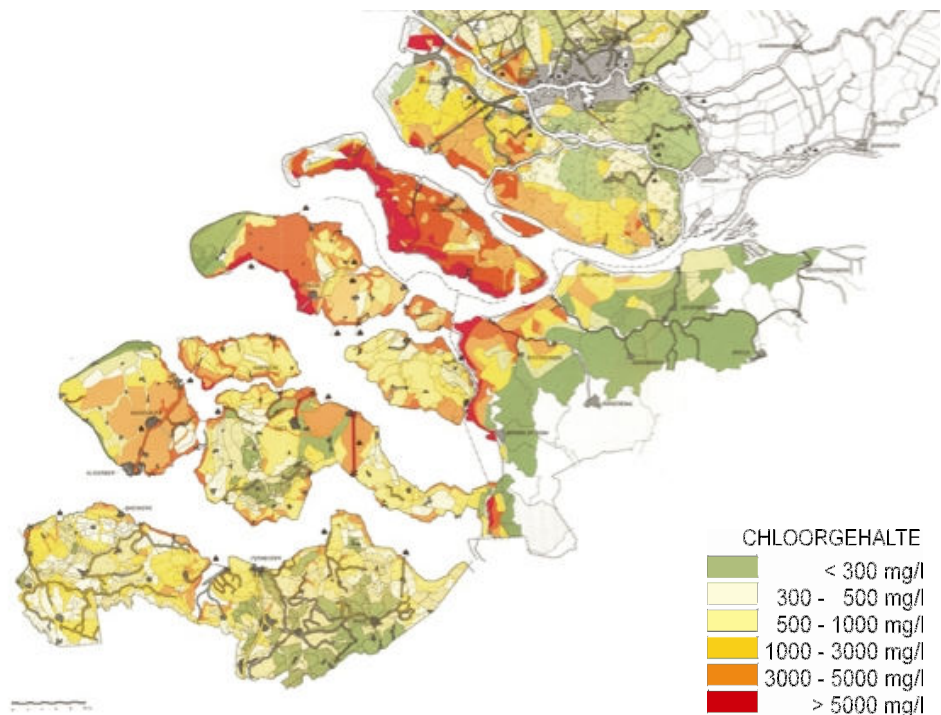
Er is relatief weinig informatie bekend over de zoete kwel vanaf de Brabantse Wallen. Omdat dit om een relatief kleine hoeveelheid gaat is dit nooit als rendabele bron aangemerkt. Bij St. Annaland komt zoet grondwater naar boven.

### 3 Situatie oppervlaktewater systeem

#### 3.1 Situatie vóór de sluiting van het Volkerak-Zoommeer

Vóór de afsluiting van het Volkerak-Zoommeer en de Deltawerken in de periode 1969-1987, stond de gehele delta onder getij-involed en was het oppervlaktewater zout. Ter plaatse van de Eendracht fluctueerde het getij rond N.A.P. met een amplitude van ongeveer 2 meter.

De polders op de Zeeuwse eilanden hebben, behalve via neerslag (en zeer plaatselijk door zoete kwel vanaf de Brabantse wallen) geen zoetwateraanvoer. Doordat de kwel op de meeste plaatsen zout is, is het oppervlaktewater 's zomers op de meeste plekken brak (zie Figuur 3). De polderwaterstanden van de peilbeheerste polders in Noordwest Brabant wijken volgens het Waterschap Brabantse Delta weinig af van de huidige polderpeilen, maximaal 0.20 m N.A.P.



Figuur 3: Chloride concentraties in het oppervlaktewater systeem begin jaren '50. De chloride concentraties rondom de Eendracht waren opvallend hoog in relatie tot de omgeving (C.O.L.N., 1958).

Het zoetwater dat nodig is voor de peilbeheersing in Noordwest Brabant wordt aangevoerd vanuit de Maas (via het Wilhelminakanaal en het Markkanaal (aangelegd in 1905). Het Mark-Vliet kanaal voert nog geen water aan.

In tijden van lage neerslag en afvoer komen hogere zoutconcentraties voor in het oppervlaktewater door zoute kwel. Dit is sterker dicht bij het Volkerak-Zoommeer (zie de meetgegevens van het Waterschap Brabantse Delta in Bijlage C).

### 3.2 Situatie Tijdens de afsluiting van het Volkerak-Zoommeer

De afsluiting van het Volkerak-Zoommeer is in stappen gegaan:

- ◆ 1969: Afsluiting Volkeraksluizen (vermindering toevoer zoetwater vanuit rivieren),
- ◆ 1983: Afdamming Markiezaatmeer nabij Bergen op Zoom,
- ◆ 1986: Afsluiting Oesterdam (ten zuiden van Eendracht, naast Markiezaatmeer),
- ◆ 1987: Afsluiting Philipsdam (scheiding met Oosterschelde).

Sinds de afsluiting van het Volkerak-Zoommeer wordt het peil in dit meer beheerst. In eerste instantie was dit rond N.A.P. en sinds 1996 is dit fluctuerend tussen N.A.P. -0.10 m en N.A.P. +0.15 m. Het peil van het Grevelingenmeer (zout) ligt rond de N.A.P. -0.20 m (bron: "De Delta Natuurlijk"). Het Haringvliet is sinds de aanleg van de Deltawerken een volledig zoet meer. Door het Kierbesluit uit 2000 komt er in 2010 een beperkte getijslag op het Haringvliet en is het zoutgehalte aan de westkant hoger. Het waterpeil in het Markiezaatmeer kan vrij variëren, met een maximum stuwpeil van N.A.P. +0.60 m. Door wegvallen van het getij, (zoute) kwel, neerslag en de beperkte rivierinstroom vanuit het zuiden is het Markiezaatmeer brak. In de periode tussen de afsluiting van de Oesterdam en de Philipsdam heeft een sterke getijstroming bestaan in de Eendracht (onderdeel van het Schelde-Rijnkanaal). Door deze sterke stroming is de Eendracht plaatselijk sterk uitgediept, in de orde van meters met maxima rond de 6 à 7 meter<sup>1</sup>.

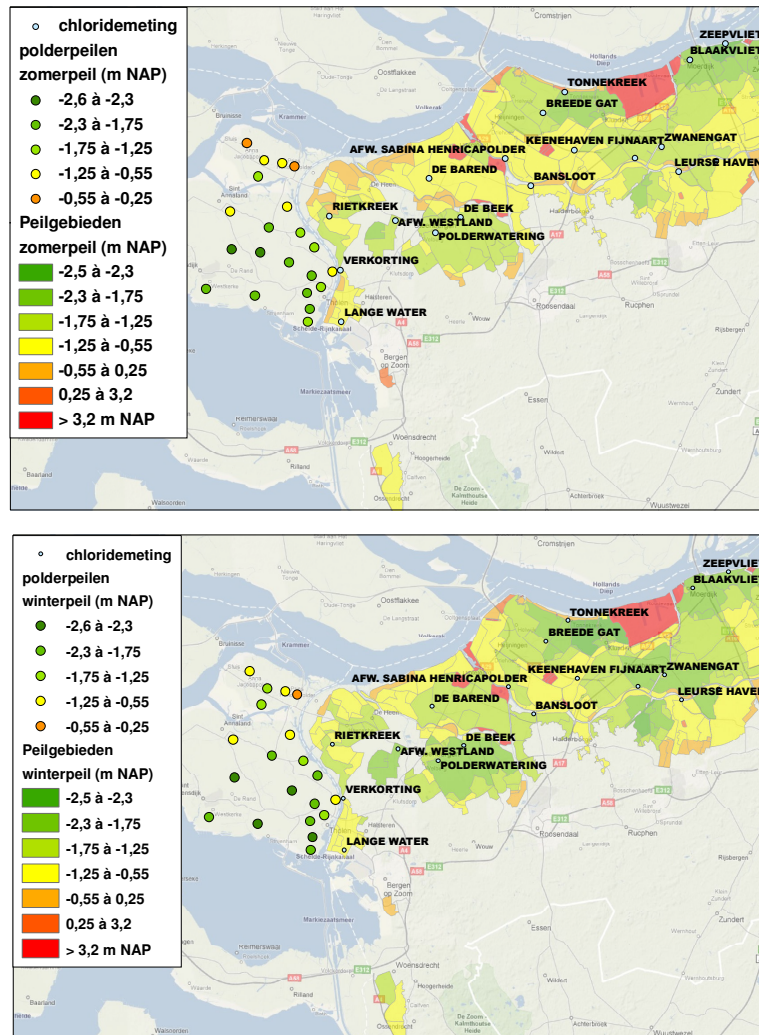
Volgens omwonenden (omgeving Tholen) was in deze periode een sterkere zoute kwel dan wel meer zout water in lokale bronnen merkbaar dan vóór de verdieping van de Eendracht. Toen het water in het Volkerak-Zoommeer zoet werd, stopte de zoute kwel weer. Er zijn geen meetgegevens beschikbaar om deze waarnemingen te ondersteunen (bron: persoonlijke communicatie 2008, dhr. van der Wel, Tholen).

### 3.3 Huidige situatie

De poldergebieden in Noord-Brabant worden beheerst volgens de zomer- en winterpeilen in onderstaande kaart (Figuur 4). De poldergebieden op Tholen worden nabij de Eendracht beheerst op peilen tussen de N.A.P. -0.25 m en N.A.P. -2.05 m (zomerpeil). De winterpeilen aldaar liggen tussen de N.A.P. -0.40 m en N.A.P. -2.40 m. Op Zuid-Beveland worden de peilen nabij het Schelde-Rijnkanaal beheerst op N.A.P. -0.10 m à N.A.P. -0.70 m (zomerpeil) en tussen N.A.P. -0.10 m à N.A.P. -0.90 m (winterpeil). Goeree-Overflakkee kent veel verschillende peilen welke niet afgebeeld zijn in Figuur 4.

---

<sup>1</sup> Bron: Ontwerpnota compartimenteringswerken, deelnota 4: Eendracht.



Figuur 4: Polderpeilen in zomer en winter en locaties van enkele chloride concentratie metingen (zie Bijlage C voor de chloride concentraties als een functie van de tijd).

Zoet water voor peilbeheersing en doorspoeling wordt voor Tholen en de Reigersbergsche Polder op Zuid-Beveland gehaald uit het Volkerak-Zoommeer. In de Reigersbergsche Polder is een verdichtingsplan uitgevoerd. Dit houdt in dat de boeren extra betalen voor de aanvoer van voldoende zoet water tot op perceelsniveau. Op Tholen is destijds niet met dit plan ingestemd. Sinds 2003 loopt er een proef op Tholen waarbij een deel van de hoofdwatgangen worden doorspoeld met zoet water. Dit vindt plaats vanaf april totdat de blauwalgconcentratie in het Volkerak-Zoommeer te hoog wordt (bron: Provincie Zeeland, Waterschap Zeeuwsche Eilanden, dhr. van de Wel).

Voor de polders in Noordwest Brabant is de aanvoer van zoetwater vanuit de Vliet en de Dintel meestal voldoende voor peilbeheer en doorspoelen. Indien nodig wordt bij voorkeur water aangevoerd uit de Maas (via o.a. het Markkanaal, Wilhelminakanaal) en het Hollandsch Diep (via de Roode Vaart). De bestaande bergboezems ten noorden van Breda worden alleen ten tijde van hoogwater (T50 en T100 situaties) ingezet. Bij voorkeur wordt water aangevoerd vanuit het Volkerak-Zoommeer. Indien dit niet

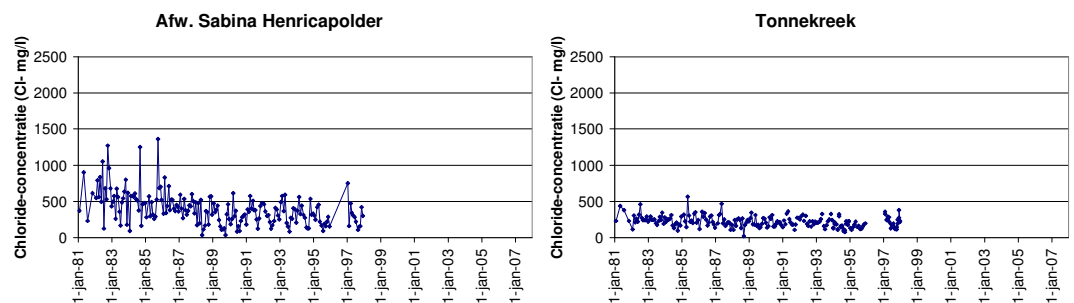
mogelijk is vanwege blauwalg wordt bij water tekort en/of onvoldoende doorspoeling in het Mark-Vlietsysteem water ingelaten vanuit het Wilhelminakanaal via de inlaatduiker bij Oosterhout. Op bestuurlijk niveau is gekozen de voorkeur te geven aan water uit het Wilhelminakanaal boven water uit het Volkerak-Zoommeer (bron: Waterschap Brabantse Delta).

Het zoutbezwaar van de polders rondom de Eendracht door zoute kwel wordt geschat op 1000-5000 kg/ha/jaar in 1995 (bron: “De Delta Natuurlijk”). De chloride-metingen in Noordwest Brabant geven nabij het Volkerak en de Eendracht een verlaging van de pieken in de zoutconcentratie te zien sinds ca. 1987 (zie Figuur 5). Dit effect wordt minder naarmate het meetpunt meer landinwaarts ligt. De vermindering van pieken treedt direct op na het zoet worden van het Volkerak-Zoommeer. De basisconcentratie is op alle meetlocaties vrijwel constant. Dit duidt erop dat deze verlaging van piekconcentraties voornamelijk wordt veroorzaakt door een meer constante aanvoer van zoetwater voor doorspoelen.

De metingen lopen door tot ca 1997, de periode waarin de blauwalgproblematiek merkbaar werd en zoetwater uit het Volkerak-Zoommeer niet meer continu beschikbaar was. Meer grafieken met chloride concentraties staan in de Bijlage C.

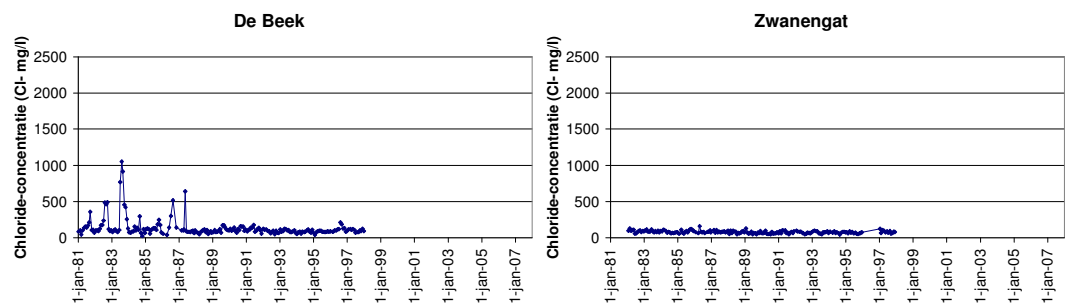
***Nabij het Volkerak-Zoommeer:***

***Langs het Hollandsch Diep:***



***Matig landinwaarts:***

***Verder landinwaarts:***



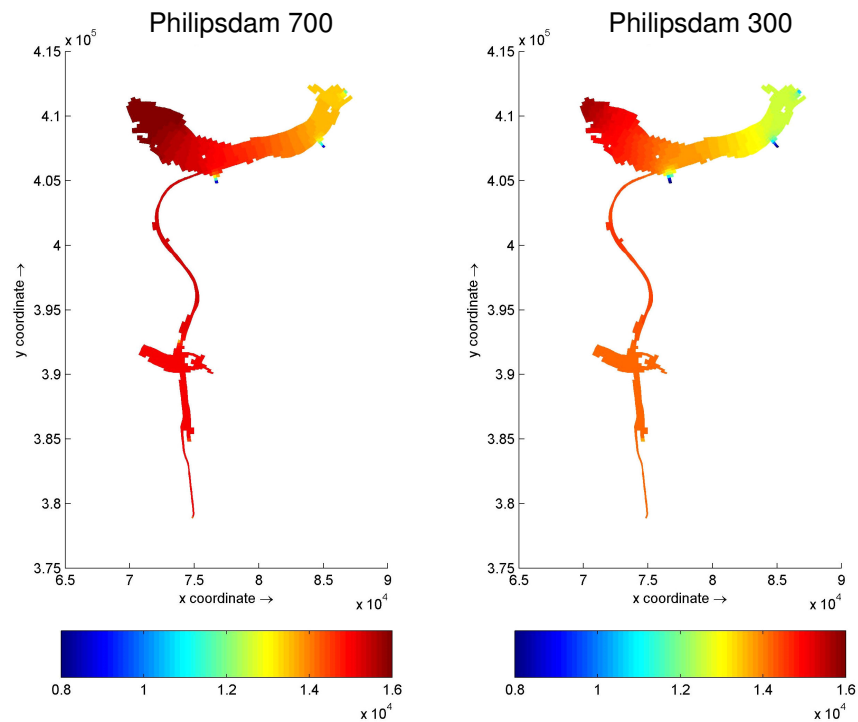
Figuur 5: Metingen van chloride concentraties in het oppervlaktewater voor 4 verschillende locaties in de tijd (locaties: zie Figuur 4). Nabij het Volkerak-Zoommeer zijn vóór 1987 hogere pieken zichtbaar in de chloride concentratie. Langs het het Hollandsch Diep is de variatie groter dan elders, maar redelijk constant. Naarmate het meetpunt meer landinwaarts ligt, wordt de variatie kleiner.

### 3.4 Scenario's in geval van een zout Volkerak-Zoommeer

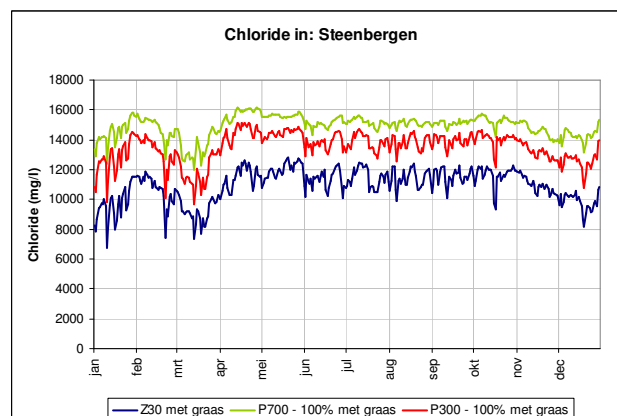
Een uitgebreide beschrijving van deze verschillende varianten is te vinden in "Waterkwaliteit en ecotopen in een zout Volkerak-Zoommeer" (Deltares, 2008). Voor de vraagstelling van dit rapport zijn de zoete varianten niet relevant. Vandaar dat alleen van de zoute varianten wordt uitgegaan. Deze varianten zijn:

- Zout-30: Philipsdam 110 m<sup>3</sup>/s, Volkeraksluizen 30 m<sup>3</sup>/s;
- Philipsdam 700 m<sup>3</sup>/s (100% variant);
- Philipsdam+Oesterdam 700 m<sup>3</sup>/s (80%-20% variant);
- Philipsdam 300 m<sup>3</sup>/s (100% variant);
- Philipsdam+Oesterdam 300 m<sup>3</sup>/s (80%-20% variant).

De verwachte zoutconcentraties bij deze varianten variëren per locatie, scenario en in de tijd. Zie ook Figuur 6 en Figuur 7 (bron: "Waterkwaliteit en ecotopen in een zout Volkerak-Zoommeer" d.d. maart 2008).



Figuur 6: Chloride concentratie op 15 augustus in het Volkerak-Zoommeer. Links is de Philipsdam 700 m<sup>3</sup>/s variant weergegeven, rechts de Philipsdam 300 m<sup>3</sup>/s variant.



Figuur 7: Chloride concentraties (mg Cl/l) in het Krammer-Volkerak, nabij de overgang naar het Schelde-Rijnkanaal. Vergelijking van de Zout-30, Philipsdam 700 m<sup>3</sup>/s en de Philipsdam 300 m<sup>3</sup>/s variant.



Het waterpeil van het Volkerak-Zoommeer zal 0.30 m fluctueren met een gemiddelde rond N.A.P. -0.10 m. Verlaging van dit gemiddelde peil zou zoutindringing en zoute kwel kunnen verminderen.

Een alternatief voor de zoetwateraanvoer is om water vanuit het Hollandsch Diep, via de Roode Vaart, de Dintel, en vervolgens over de Eendracht te transporteren naar Tholen (bron: Ies de Vries (Deltares) en Acronius Kramer (Waterschap Zeeuwse Eilanden)). Op Zuid-Beveland is ca. 10 jaar geleden een landbouwwaterleiding aangelegd door N.V. Delta Nutsbedrijven. Dit is echter niet rendabel gebleken, waardoor geen vervolginiciatieven zijn ondernomen (Stuyt *et al.*, 2006).

De zoutindringing langs sluizen en kunstwerken wordt voor de Volkeraksluizen geschat tussen de 200 en 500 kg/s, afhankelijk van de te nemen maatregelen tegen zoutindringing. Voor de Dintel en de Vliet is dit respectievelijk 10-40 kg/s en 3-7 kg/s (bronnen: “Effectiviteit zoutbestrijdingsmaatregelen bij sluizen in het Volkerak-Zoommeer”, Tom Jongeling, Deltares, 2007 en “Maatregelen tegen zoutindringing bij schutsluizen”, Rijkswaterstaat, 2008). De zoutindringing via de Volkeraksluizen en het Hollandsch Diep zal naar verwachting een beperkte verhoging van de zoutconcentratie in het Haringvliet veroorzaken (persoonlijke communicatie 2008, Ies de Vries, Deltares).

Daarnaast hebben enkele autonome processen plaats, zoals de verwachte zeespiegelstijging (ca. 25 cm tussen 2000 en 2050) en de bodemdaling (5-20 cm tussen 2000-2050). Dit veroorzaakt naar verwachting een extra zoutbelasting door kwel van 100 – 500 kg/ha/jaar (“De Delta Natuurlijk”).

## 4 Analyse van het grondwatersysteem

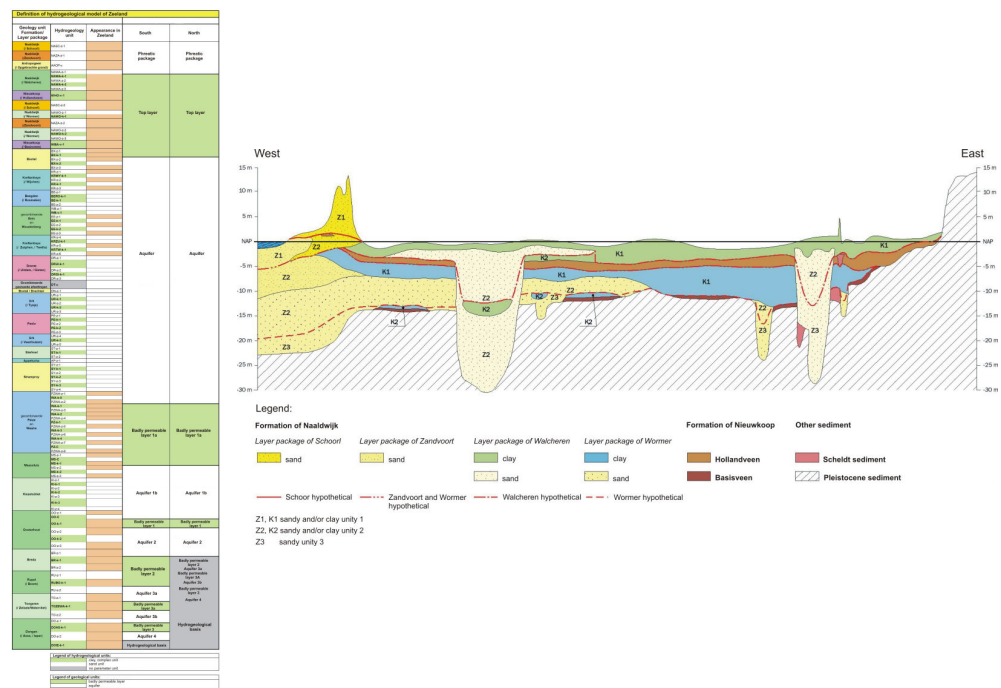
### 4.1 Inleiding

Het grondwatersysteem in het studiegebied wordt in dit hoofdstuk geanalyseerd aan de hand van hydro(geo)logische data.

### 4.2 Huidige situatie van het grondwatersysteem

#### 4.2.1 Geohydrologie

In de omgeving van het Volkerak-Zoommeer zijn de watervoerende pakketten in de ondergrond relatief goed doorlatend (Figuur 8). Boven deze watervoerende lagen is over het algemeen een Holocene deklaag aanwezig die in het studiegebied in dikte en hydraulische weerstand varieert (Figuur 10a). Duidelijk is te zien dat ter plaatse van De Brabantse Wal de deklaag dun is, of zelfs (bijna) afwezig. Als gevolg hiervan is de hydraulische weerstand van de deklaag ter plaatse van dit infiltratie gebied klein.

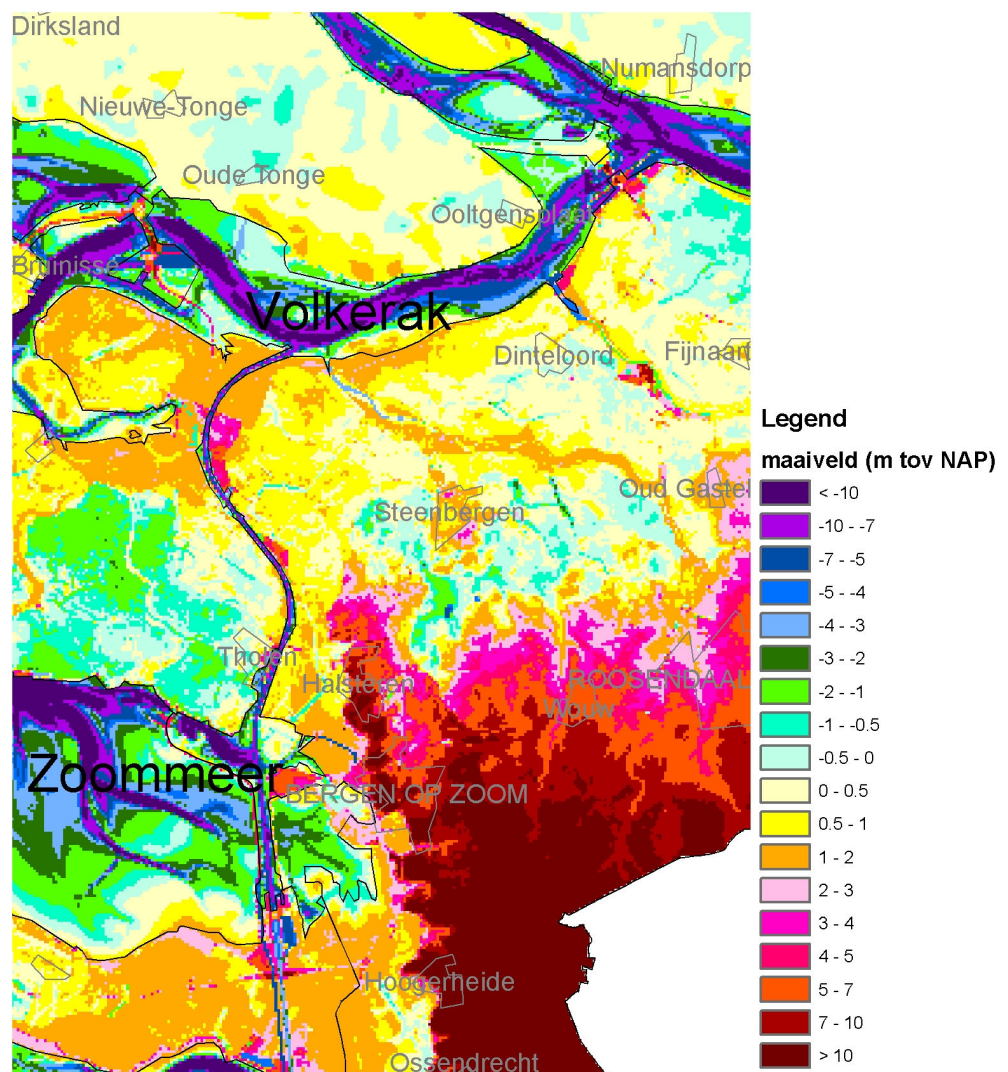


Figuur 8: De geologische, geohydrologische en hydrogeologische opbouw van de ondergrond van het studiegebied (REGIS<sup>2</sup>).

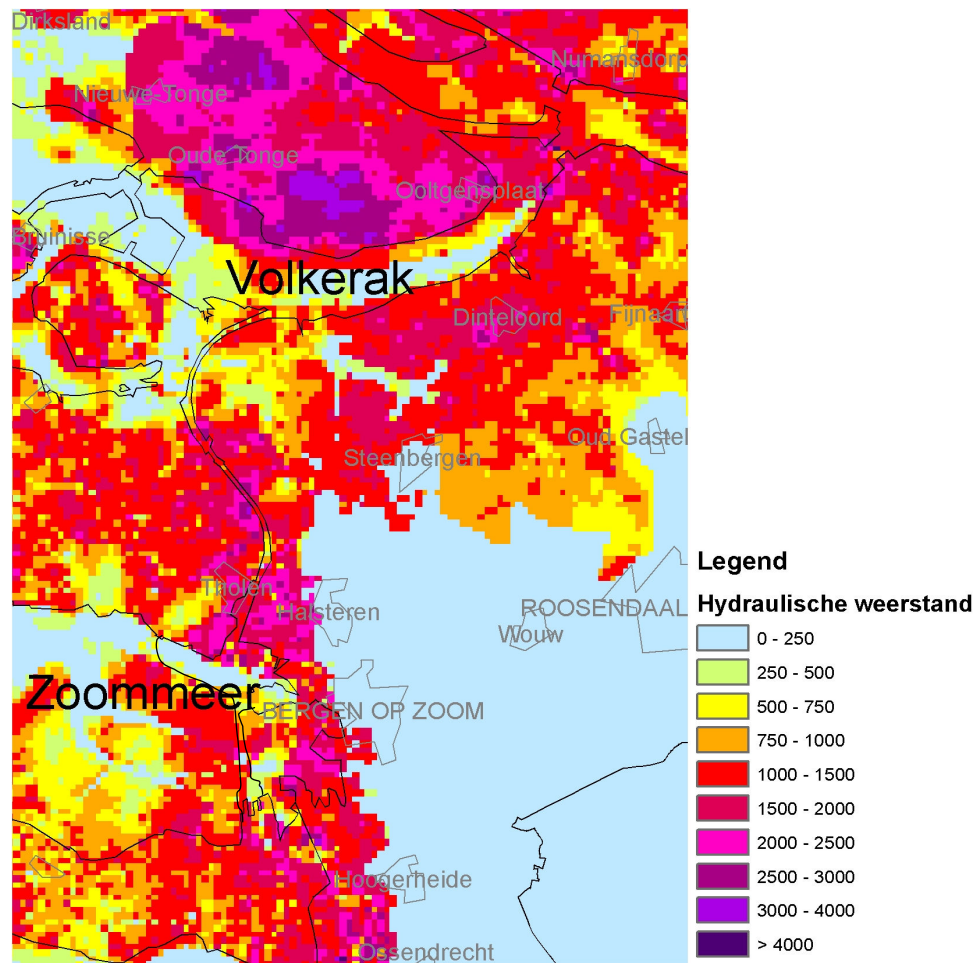
<sup>2</sup> TNO/Deltares beschikt over een geohydrologische databank genaamd REGIS (**R**egionaal **G**eohydrologisch **I**nformatie **S**ysteem). De databank bevat gegevens over boorgatmetingen, boorbeschrijvingen, grondwaterstanden en grond-waterkwaliteit. Daarnaast is door Deltares hiervan ruimtelijke informatie afgeleid, zoals de laagopbouw van de ondergrond. Zodoende bevat REGIS het geologische en hydrogeologische ondergrondmodel van Nederland. De kartering geeft inzicht in de 3D verdeling van watervoerende pakketten (zandlagen) en slechtdoorlatende lagen (o.a. klei, veen en leemlagen). Daarnaast is voor elke laag een schatting van hydraulische doorlatendheden gegeven.

#### 4.2.2 Algemeen hoogtebestand

De ligging van het maaiveld is vaak dé drijvende kracht achter de stroming van grondwater. In Figuur 9 is het hooggelegen gebied De Brabantse Wal in het zuidoosten van het studiegebied duidelijk zichtbaar. Dit gebied speelt bij de regionale grondwaterstroming een belangrijke rol. Door topografische verschillen infiltreert hier zoet (regen)water in de vorm van natuurlijke grondwater aanvulling in het grondwatersysteem. Een relatieve snelle grondwaterstroming vindt hier plaats in de richting van het Zoommeer en de Eendracht. Overigens kan het zoete (regen)water gemakkelijk infiltreren wegens het feit dat de afdekkende weerstandslaag in dit hooggelegen gebied nagenoeg afwezig is (Figuur 10). Daarentegen kwelt vanuit de ondergrond water omhoog bijvoorbeeld in het relatief laaggelegen eiland Tholen en in mindere mate ten zuiden van Steenbergen.



Figuur 9: Het Algemeen Hoogtebestand in het studiegebied Volkerak-Zoommeer.



Figuur 10: Hydraulische weerstand van de afdekkende deklaag [dag]; op De Brabantse Wal is de Holocene deklaag dun of op locaties zelfs geheel afwezig.

#### 4.2.3 Zoet-zout verdeling

DINO<sup>3</sup>-Qua (zijnde de hydrogeochemische databank van TNO) is gebruikt om de zoet-zout verdeling in de ondergrond te analyseren. Aan de hand van gemeten chloride concentraties kan het volgende worden gesteld:

##### 1. **Het huidige grondwatersysteem in de buurt van het Volkerak-Zoommeer is overwegend brak tot zout**

Het grondwater in de ondergrond van dit gebied rondom het Volkerak-Zoommeer is over het algemeen brak tot zout, zo ook dicht aan het maaiveld (Figuur 15a). Dit is tevens ruimtelijk te zien in Figuur 11 waar de chloride concentratie ter plaatse van de onderkant van de deklaag is weergegeven (Oude Essink *et al.*, 2005). Met name in de

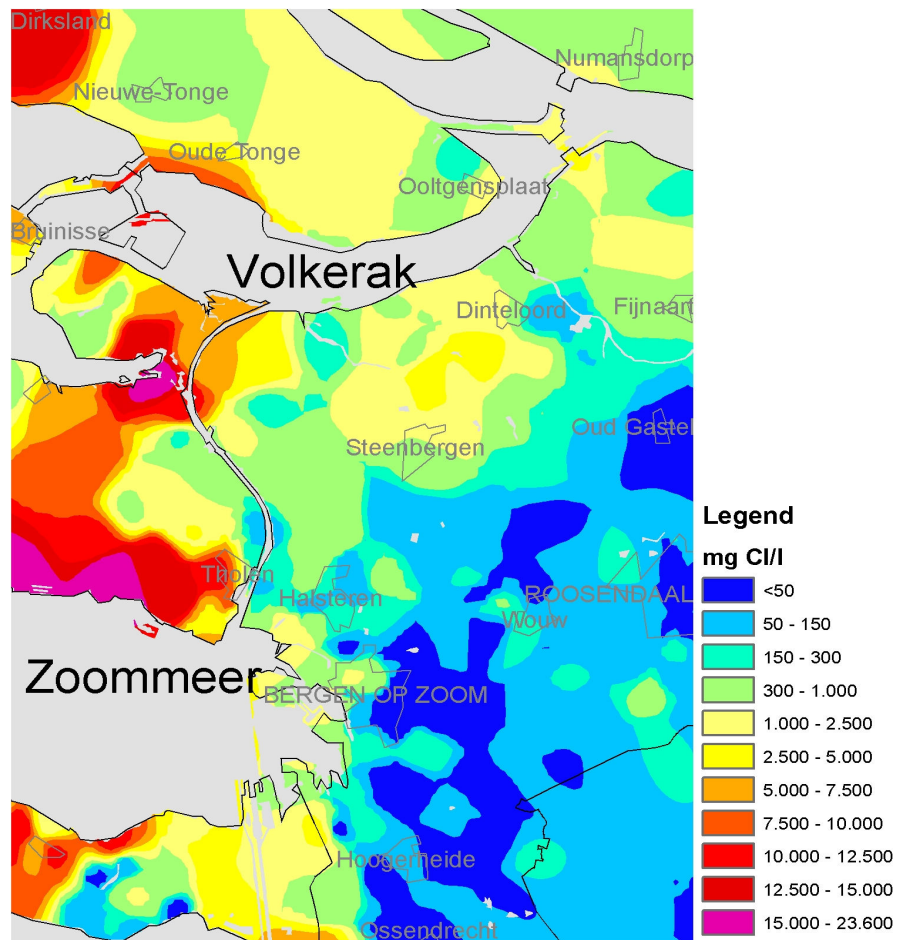
<sup>3</sup> DINOloket is de centrale toegangspoort tot **Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond (DINO)**. Het DINO-systeem is de centrale opslagplaats voor geowetenschappelijke gegevens over de diepe en ondiepe ondergrond van Nederland. Het archief omvat diepe en ondiepe boringen, grondwatergegevens, sonderingen, geo-elektrische metingen resultaten van geologische, geochemische en geomechanische monsteranalyses, boorgatmetingen en seismische gegevens: [www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl).

Provincie Zeeland zijn hoge chloride concentraties te vinden in het grondwater, met waarden van meer dan 10000 mg Cl<sup>-</sup>/l. Gedurende vele duizenden jaren stond dit gebied in open verbinding met de Noordzee zodat zout water gemakkelijk kon infiltreren in het grondwatersysteem. Figuur 14 toont een overzicht van de paleogeohydrologische ontwikkeling van 5500 v. Chr. – 800 n. Chr. Duidelijk is op te maken dat gedurende dit tweede deel van het Holoceen het gebied continu in aanraking is geweest met afwisselend zout zee water en zoet water infiltrerend vanuit relatief hooggelegen veengebied. Dit heeft zijn weerslag op de verdeling van zoet, brak en zout grondwater in de ondergrond: de verdeling is afwisselend zoet, brak of zout (behalve op De Brabantse Wal, waar al gedurende lage tijd zoet water infiltreert naar het grondwater systeem en zich een dikke zoetwater voorraad heeft kunnen vormen).

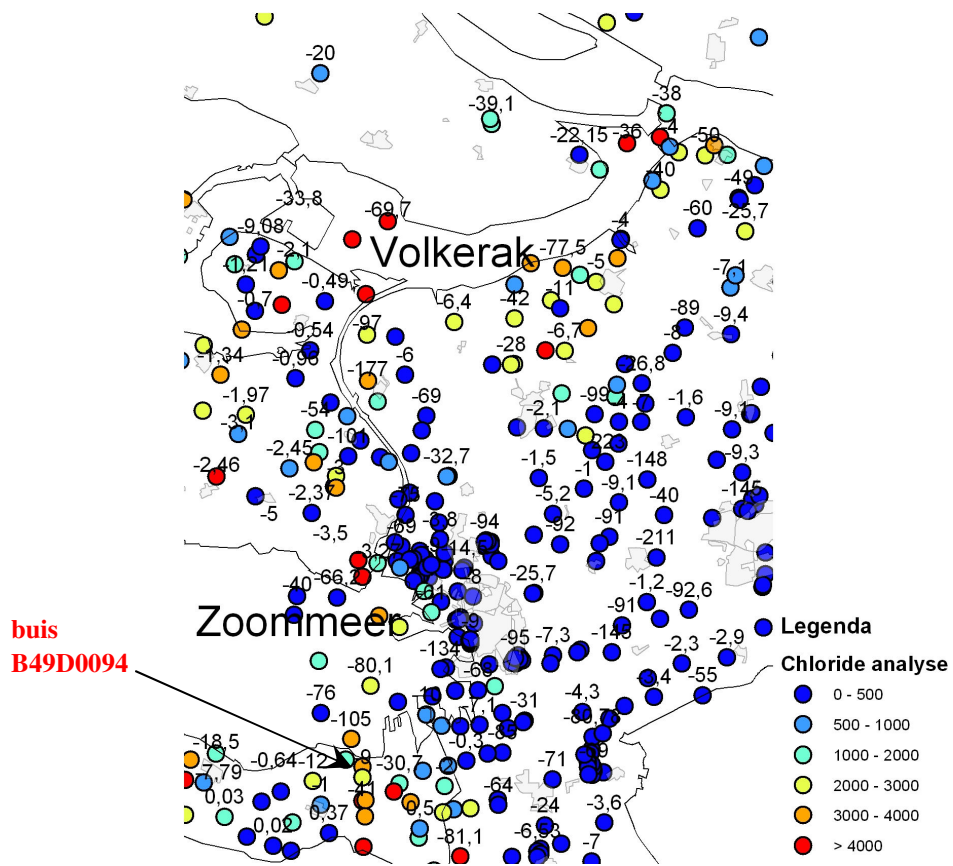
## ***2. Onder het hooggelegen gebied De Brabantse Wal bevindt zich zoet grondwater***

De kartering van het grensvlak van 150 mg Cl<sup>-</sup>/l en 1000 mg Cl<sup>-</sup>/l (Goes & Vernes, 2006) toont dat tot op een behoorlijke diepte zoet grondwater aanwezig is ter plaatse van De Brabantse Wal (Figuur 11, Figuur 12 en Figuur 13).

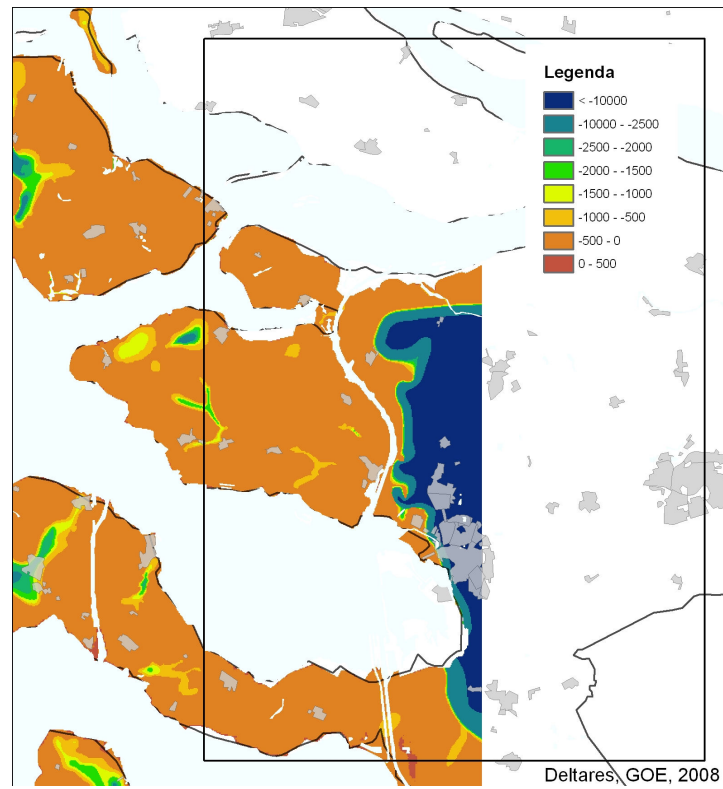
Ten westen van De Brabantse Wal is overigens een inversie van zoet en brak grondwater aanwezig. Het betreft een inversie van zoet en brak water die zich deels onder de Holocene klei- en veenlagen, deels onder kleilagen van de Formatie van Oosterhout in westelijke richting uitstrekt. Naar het westen toe wordt de inversie brak en iets ten westen van het Schelde-Rijnkanaal en de Eendracht is de inversie afwezig. Deze inversie wordt dus gevoed vanuit de Brabantse Wal. Iets westelijk daarvan komen inversies voor op Zuid-Beveland, Tholen en Sint Philipsland (Goes & Vernes, 2006). Het is waarschijnlijk dat deze inversies eveneens in verband staan met het infiltratiegebied van De Brabantse Wal.



Figuur 11: Chloride concentratie ter plaatse van de onderkant van de deklaag in het studiegebied (locatie varieert tussen -5 en -15m N.A.P.). Kartering gebaseerd op chloride concentratie monsters, boorgatmetingen en Verticale Elektrische Sonderingen uit het DINO-databestand van TNO (Oude Essink et al., 2005).

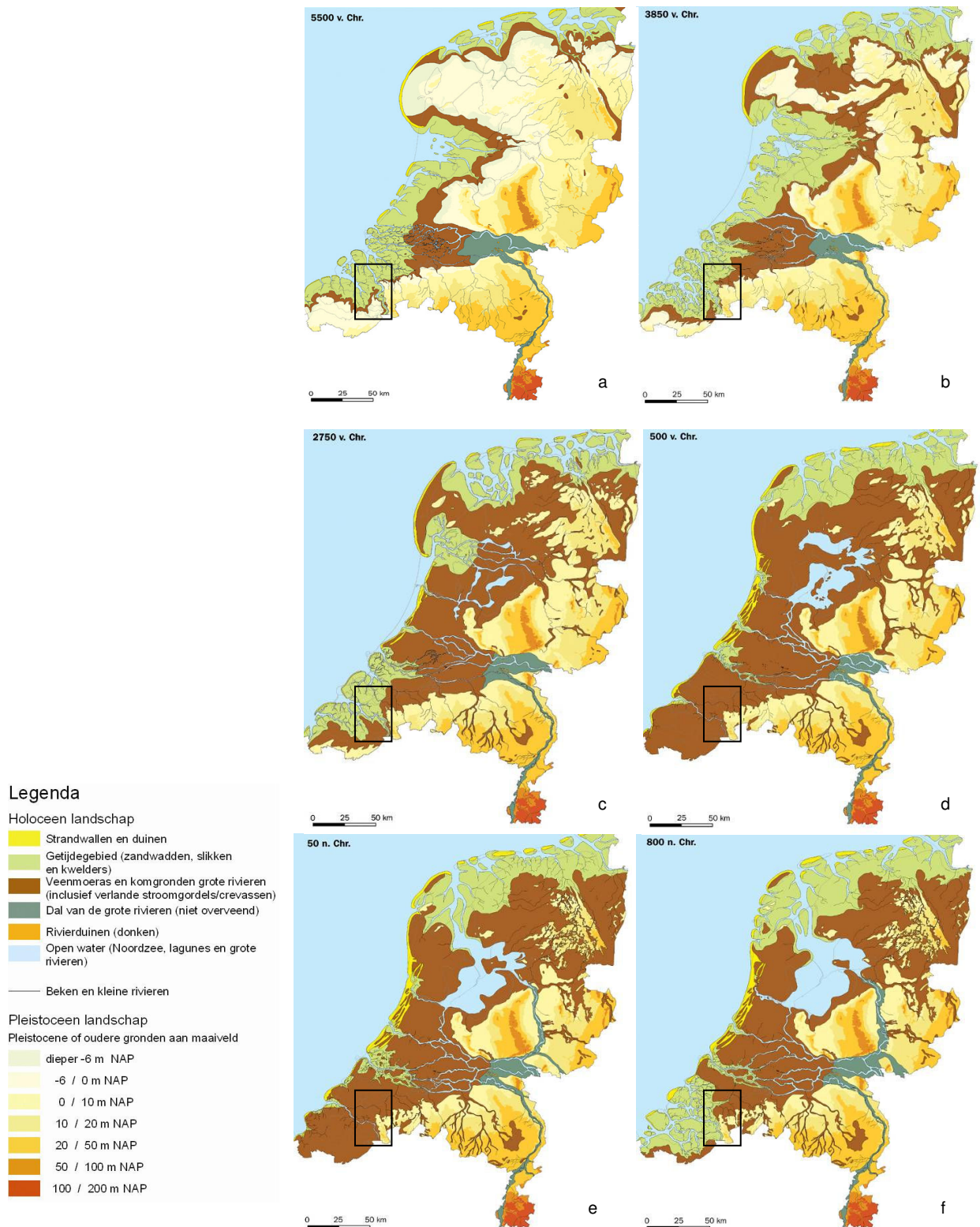


Figuur 12: Chloride concentratie analyses in het studiegebied uit DINO-Qua, in de eerste observatiebuis van bovenaf. De locatie van de observatiebuis B49D0049 is apart weergegeven Figuur 15b, waar een duidelijke inversie zichtbaar is.



Figuur 13: Kartering van de positie van het 1000 mg Cl/l grensvlak in het grondwater (Goes & Vernes, 2006). Diepte in cm -mv.



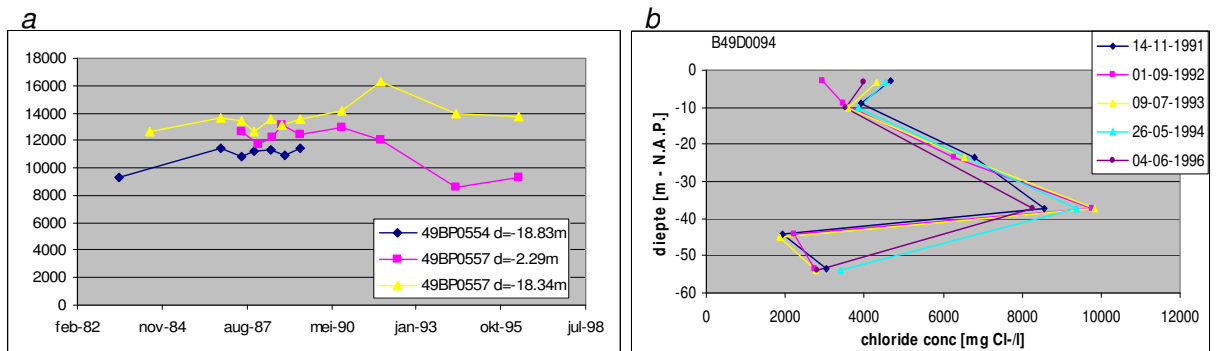


Figuur 14: Paleogeohydrologische ontwikkeling van 5500 v. Chr. – 800 n. Chr. Gedurende lange tijd was het oppervlaktewater systeem in het studiegebied zout (Peter Vos, Deltares).

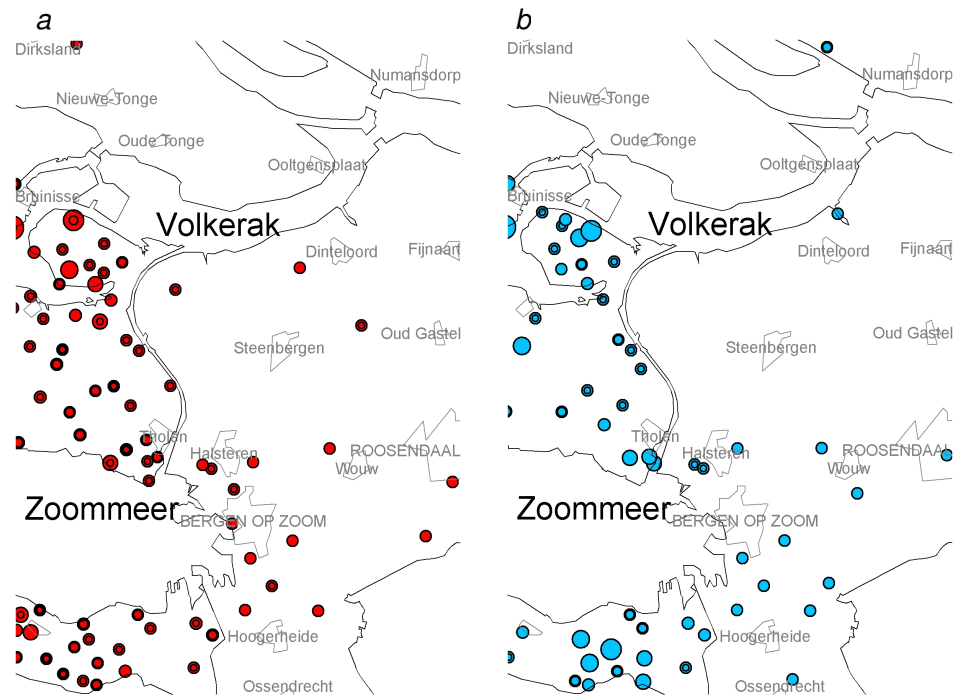
### 3. De zoet-zout verdeling is niet in evenwicht

De ontstaanswijze heeft dus grote invloed op de kwalitatieve aspecten van het huidige regionale grondwatersysteem (zie Figuur 14). Omdat grondwaterstroming een traag proces is, is de ontstaanswijze mede de oorzaak van het niet in evenwicht zijn van de zoet-brak-zout verdeling van het grondwater; omstandigheden uit het verleden (transgressies, droogleggingen polders vanaf de dertiende eeuw, geulinsnijdingen) hebben nog steeds effect op de verdeling.

Uit bovenstaande is het beeld ontstaan dat op het detailniveau van puntmetingen de chloride concentratie redelijk snel kan veranderen; de zoet-zout verdeling in het grondwatersysteem blijkt als gevolg daarvan heterogeen te zijn. Op lokale schaal kunnen kleine volumes brak grondwater, die in het verleden waren ingesloten in slechtdoorlatende lagen, de observatiebuis passeren, met als gevolg dat de chloride concentratie snel verandert. Zo varieert de chloride concentratie in het grondwater in het gebied behoorlijk over relatief korte afstanden en in korte tijd, zoals te zien is in Figuur 15. Zo kan de chloride concentratie binnen een aantal jaren met zo'n 1500 mg Cl-/l afnemen (zie observatie buis B49D0094, zie Figuur 12 nabij Rilland, op N.A.P. - 37m). Dergelijke snelle veranderingen zijn trouwens op dit detailniveau ook in andere delen van Nederland niet uitzonderlijk. Op regionale schaal verloopt daarentegen de verzilting of de verzoeting van een grondwatersysteem langzaam (Figuur 16). Zo kan dus gemiddeld genomen op regionale schaal een grondwatersysteem langzaam verzilten, terwijl op lokale schaal, bijvoorbeeld in één observatiebuis, een (tijdelijke) snelle verzoeting kan optreden.



Figuur 15: Gemeten chloride concentraties op verschillende diepten en op verschillende momenten in de tijd. Het grondwater in het studiegebied is brak tot zout. Op de locatie van observatiebuis B49D0094 (zie figuur 12, nabij Rilland) is een duidelijke inversie van zout-brak grondwater herkenbaar.



Figuur 16: Overzicht van de locaties van observatiebuizen in het studiegebied waar de chloride concentratie minimaal twee keer is gemeten. Zowel (a) verziltung (toename chloride concentratie als een functie van de tijd) als (b) verzoeting van het grondwater treedt op (Bader, 2005). Bron: DINO Qua. In dit gebied vindt zowel verziltung als verzoeting plaats.

## 5 Kwalitatieve inschatting effecten in grondwatersysteem

### 5.1 Inleiding

Aan de hand van analytische berekeningen en enkele numerieke modelleringen wordt het effect geschat van de mogelijk relevante processen van grondwaterstroming en zouttransport.

Met behulp van een analytische formule wordt de invloedssfeer ingeschat van het effect van een peilverandering in het oppervlaktewatersysteem van het Volkerak-Zoommeer op de stijghoogte in het grondwatersysteem. Dit is gedaan voor een vijftal profielen in het studiegebied, die als representatief worden beschouwd voor de karakteristieke grondwatersystemen in het gebied (Figuur 19). Vervolgens kan de toename van de kwel en een schatting van de toename van de zoutbelasting naar het topsysteem worden bepaald. Ook worden meetresultaten (tijdreeksen) weergegeven van de grondwaterstand in het studiegebied.

Daarnaast wordt gekeken naar de mate van zoutwater intrusie vanuit het toekomstige zoute Volkerak-Zoommeer naar het grondwatersysteem dat zich naast en onder het oppervlaktewater systeem bevindt, en in hoeverre de stromingsprocessen<sup>4</sup> veranderen. De huidige zoet-brak-zout verdeling in het studiegebied is daarbij van groot belang.

### 5.2 Kwantitatieve effecten: invloedssfeer van een peilverhoging

Aan de hand van een analytische benadering is het mogelijk een idee te krijgen over de mogelijke stijghoogteveranderingen rond het Volkerak Zoommeer als gevolg van ander peilbeheer.

#### 5.2.1 Verandering in stijghoogte

##### 5.2.1.1 Analytisch model

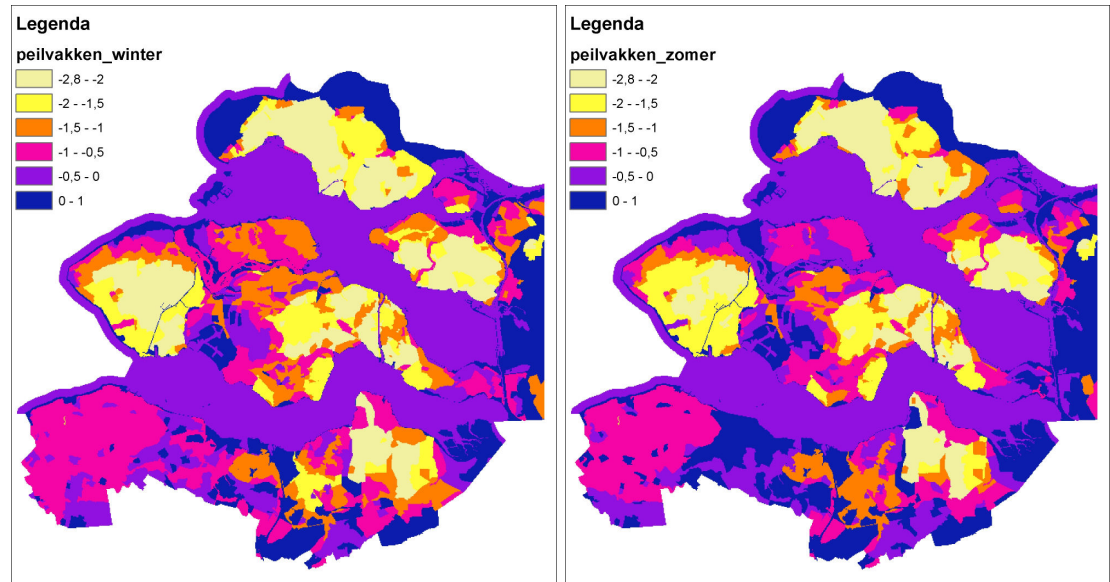
Aan de hand van verschillende analytische benaderingen is het mogelijk een idee te krijgen over de stijghoogteverdeling, invloedssfeer, kwel en grondwaterstromingsnelheden rondom een dijk, zoals de dijken rond de Eendracht, het Volkerak en het Zoommeer.

Met een analytische formule is het mogelijk de verandering in stijghoogte in het watervoerend pakket en de verandering in kwel naar het oppervlaktewater systeem bij benadering te berekenen. Deze formule is geldig als de polderdijk ondoorlatend is, de stroming door de watervoerende laag horizontaal is, de stroming door de slechtdoorlatende laag verticaal is en het kwelwater direct wordt afgevoerd.

---

<sup>4</sup> Het effect van moleculaire diffusie op de zoet-brak-zout verdeling in de ondergrond van het Volkerak-Zoommeer kan overigens over de tijdsduur waarbinnen de effecten plaatsvinden volledig verwaarloosd worden ten opzichte van advectief transport van brak en zout grondwater.

De schematisatie van het model kan gevonden worden in Figuur 18. Onder het oppervlaktewater (de Eendracht, het Volkerak of het Zoommeer), het gebied rechts en het gebied links van het oppervlaktewater zijn weerstandslagen aanwezig. De hydraulische weerstandswaarden van deze lagen ( $c1$ ,  $c2$  en  $c3$ , in dagen) hoeven niet gelijk aan elkaar te zijn. Onder de weerstandslaag bevindt zich een watervoerend pakket met hydraulische conductiviteit  $k1$ ,  $k2$  of  $k3$  (in m/dag). Alle drie de deelgebieden hebben een opgegeven polder- of kanaalpeil. Op deze manier kan de invloed van verandering van het peil van het oppervlaktewater op de stijghoogte van het grondwater (eerste watervoerend pakket) in beeld gebracht worden. Vervolgens kunnen ook de horizontale en verticale snelheid van het grondwater berekend worden. De parameters van de doorlatendheid ( $kD$ ) en hydraulische weerstand ( $c$ ) zijn bepaald met behulp van REGIS. Hiermee kan de spreidingslengte  $\lambda$  bepaald worden. De polderpeilen aan beide kanten van de vijf profielen worden bepaald met behulp van de peilvakken kaarten, hierbij is gekozen voor het gemiddelde van het zomer- en winterpeil (voor Zeeland zie Figuur 17, voor Noord-Brabant zie Figuur 4, informatie over Zuid-Holland komt uit de studie TNO (2004), Minnema, B., Kuijper, B., & Oude Essink, G.H.P., *Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland, NITG 04-189-B, 86 p., Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond*). De polderpeilen voor de representatieve profielen (Figuur 19) zijn weergegeven in Tabel 3. Het huidige peil van het oppervlaktewater in het studiegebied is N.A.P. 0m. In het aangenomen toekomstscenario zal het peil van het Volkerak-Zoommeer N.A.P. -0.1m worden. Door verzilting van het meer zal de verwachte extra drukhoogte 0.25 meter zijn, dus het potentiaalverschil van het Volkerak-Zoommeer neemt voor de berekeningen met 0.15 m toe (zie Tabel 4). Voor de vergelijkingen van dit model wordt verwezen naar Bijlage E.



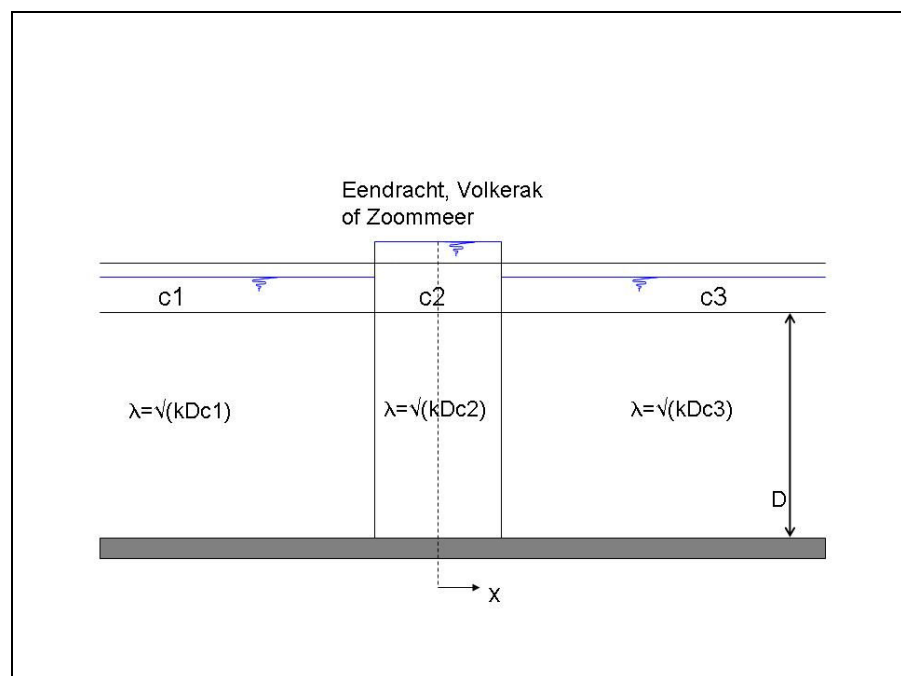
Figuur 17: Peilvakken winter en zomer (in m N.A.P.) in een groot deel van het studiegebied

Tabel 3: Gemiddelde polderpeilen

Profiel	polderpeil links (m N.A.P.)	Polderpeil rechts (m N.A.P.)
E1	-2.0	-0.8
E2	-1.6	-1.3
E3	-0.45	-0.75
V1	-1.25	-0.8
Z1	-2.25	0

Tabel 4: Extra drukhoogte Volkerak-Zoommeer aan de bovenkant van de deklaag voor het zoute toekomst scenario.

Huidig peil	Gemiddeld N.A.P.
Peil bij zout toekomstscenario	-0.1 meter N.A.P.
Extra drukhoogte	+ 0.25 meter
<b>Totaal</b>	<b>+ 0.15 meter</b>



Figuur 18: Schematisatie zoals gebruikt voor het analytische model.

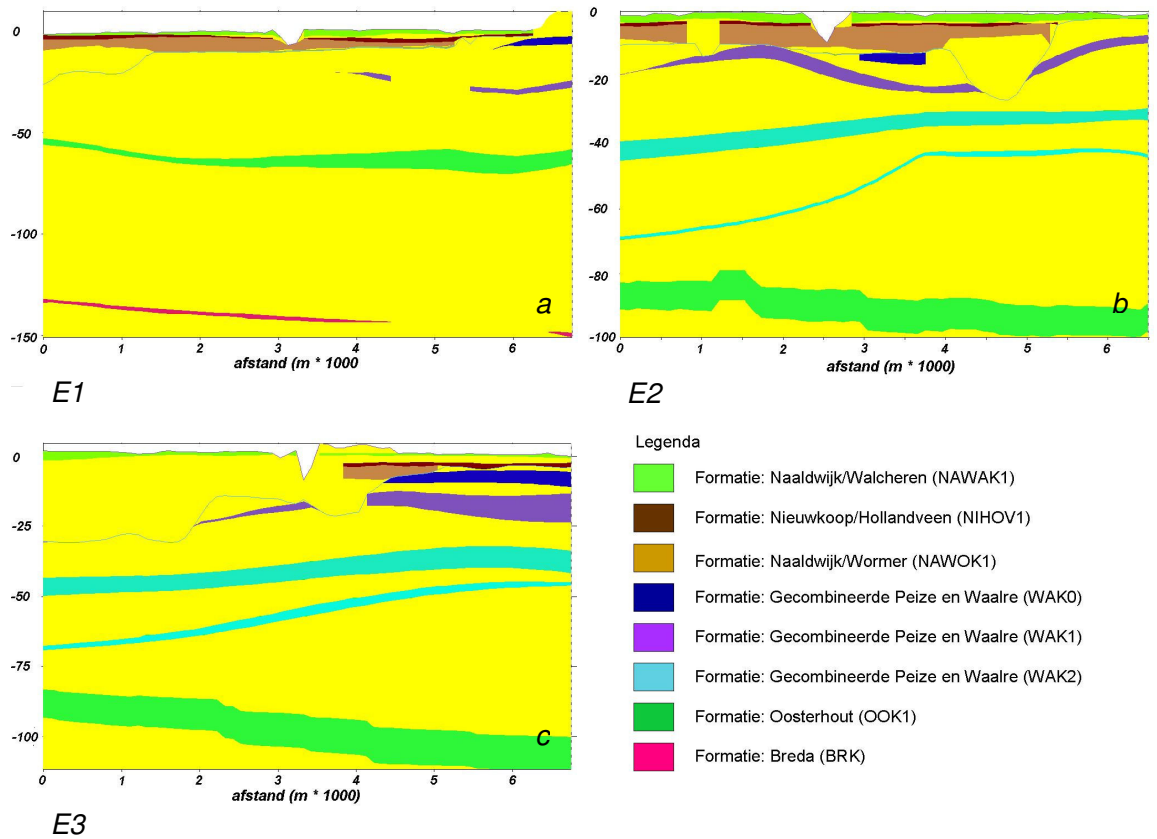
Belangrijk is dat de bodemopbouw vereenvoudigd wordt tot één homogeen watervoerend pakket met een constant doorlaatvermogen per deelgebied en één deklaag met een constante hydraulische weerstand per deelgebied. Dit past binnen het doel van dit onderzoek om een eerste inschatting te geven van de veranderingen in stijghoogte, de kwel en de grondwatersnelheden.

Om representatieve waarden te kunnen geven voor de hydraulische weerstand en doorlatendheid rond het Volkerak-Zoommeer wordt REGIS gebruikt. Met behulp van REGIS kunnen de aanwezige formaties in kaart worden gebracht met bijbehorende waarden voor de hydraulische weerstand en de doorlatendheid. In Figuur 19 is de locatie afgebeeld van de representatieve profielen.

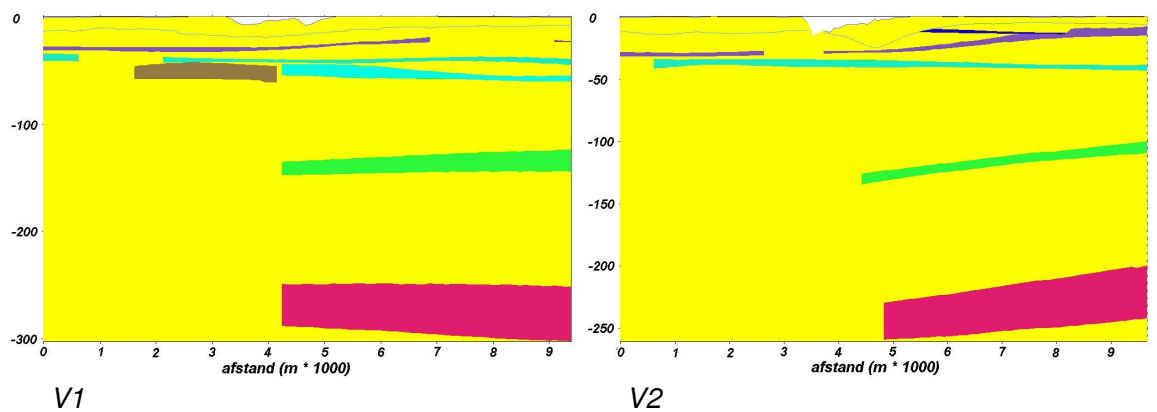
De profielen rond de Eendracht (E1, E2 en E3) zijn weergegeven in Figuur 20. In Figuur 21 staan de profielen van de ondergrond van V1 en V2 rond het Volkerak, waarvoor de legenda van de geologische formaties gevonden kan worden in Figuur 20. Opgemerkt kan worden dat deze profielen erg op elkaar lijken, daarom is in de berekeningen alleen V1 meegenomen. In Figuur 22 staat een representatief profiel voor het Zoommeer (Z1). Voor de legenda wordt weer verwezen naar Figuur 20. De schematisaties die gebruikt worden voor deze profielen staan in Figuur 23.



Figuur 19: Representatieve profiellijnen door het Volkerak (V1 en V2), de Eendracht (E1, E2 en E3) en het Zoommeer (Z1).

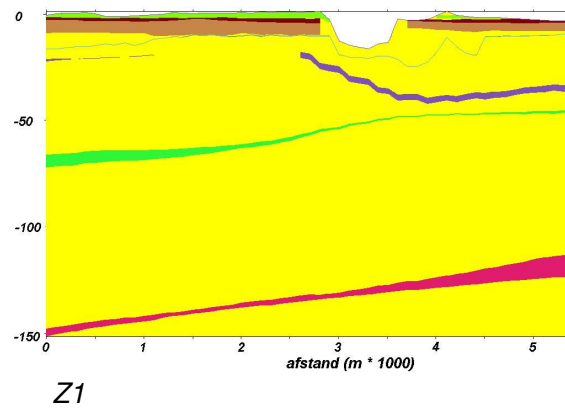


Figuur 20: Geologie rond de Eendracht voor de profiellijnen (a) E1, (b) E2 en (c) E3 (d) legenda van de (geologische) formatie met tussen haakjes de in REGIS gebruikte naam van de hydrogeologische eenheid.

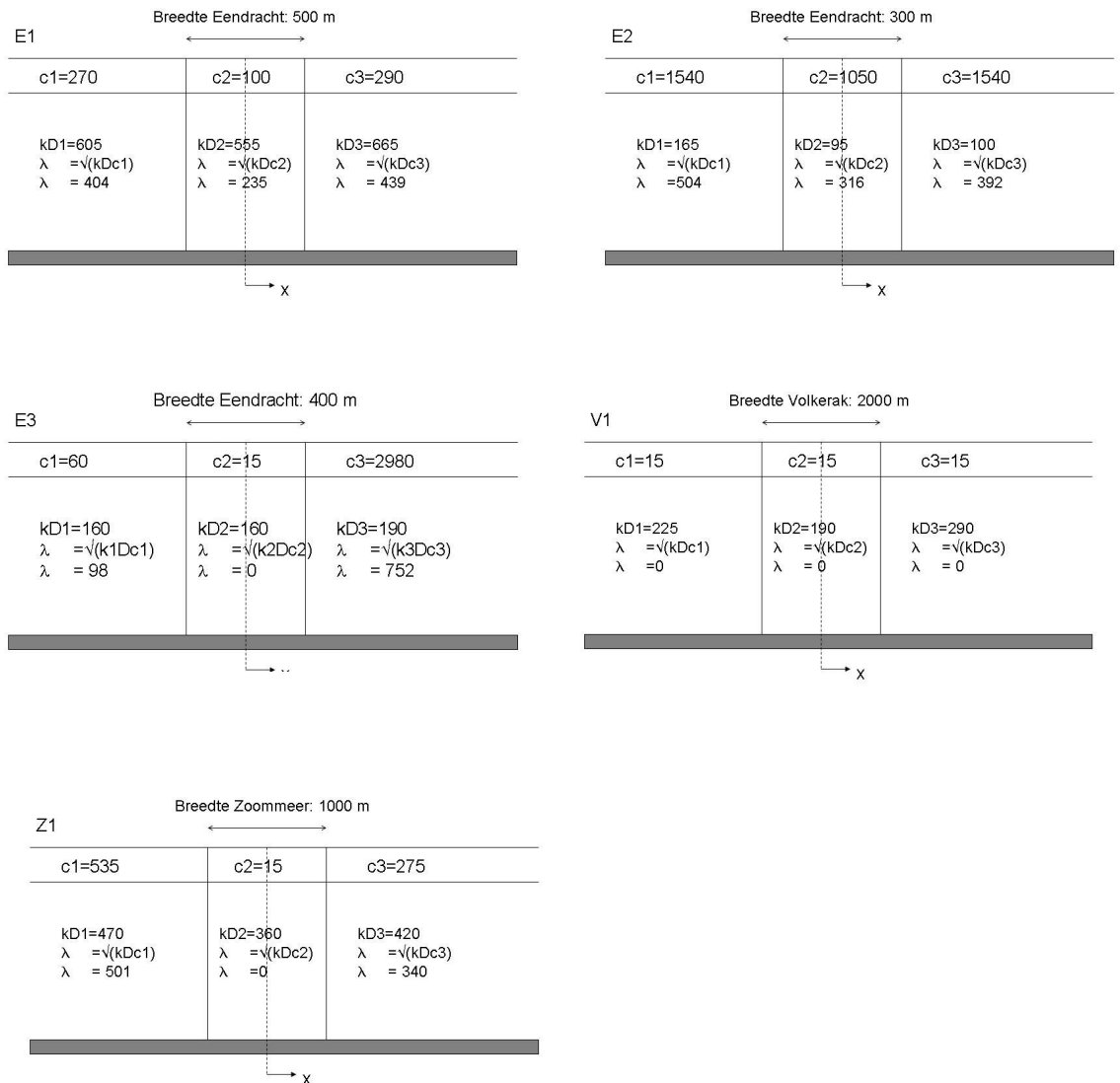


Figuur 21: Geologie rond het Volkerak voor de profiellijnen (a) V1 en (b) V2. Merk op dat de ligging van de weerstandslagen bij doorsnede V2 lijkt op V1.



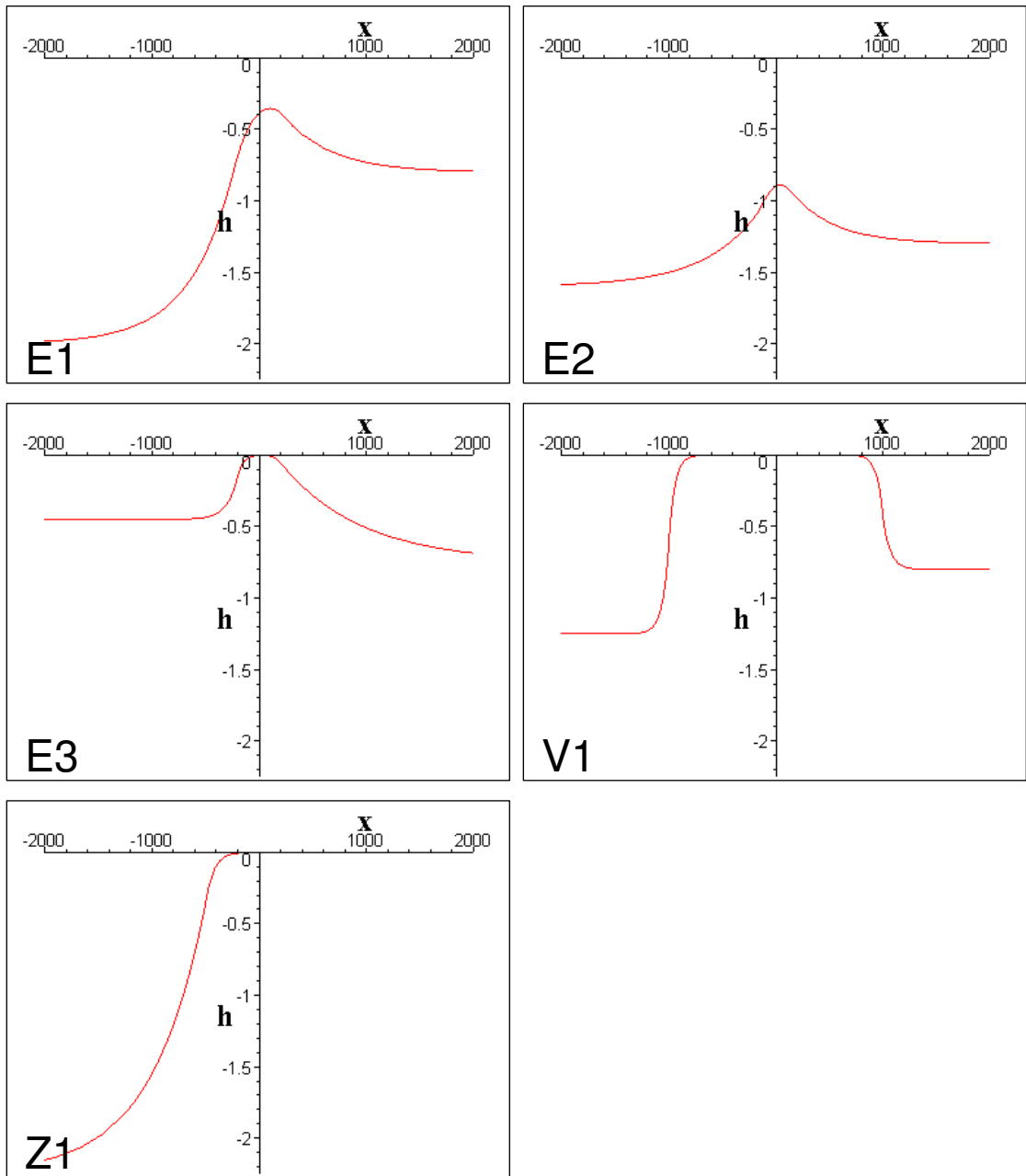


Figuur 22: Geologie rond het Zoommeer voor de profiellijn Z1.



Figuur 23: Schematisatie van de profielen E1, E2 en E3 rond de Eendracht, V1 rond het Volkerak en Z1 rond het Zoommeer zoals gebruikt in de analytische formules.

De huidige stijghoogte voor de profielen E1, E2, E3, V1 en Z1 kan gevonden worden in Figuur 24. Voor alle profielen geldt dat hoe verder je bij het oppervlaktewater vandaan gaat hoe dichter de stijghoogte het polderpeil benadert. Het gebied tussen het oppervlaktewater en waar de stijghoogte bijna gelijk is aan het polderpeil is een interessant gebied. In dit gebied heeft het peil van het oppervlaktewater invloed op de stijghoogte van het grondwater. Op dezelfde manier kan de invloed van de extra drukhoogte van 0.15 meter berekend worden. Het verschil tussen de berekende stijghoogte voor het toekomstscenario en de huidige stijghoogte is weergegeven in Figuur 25.

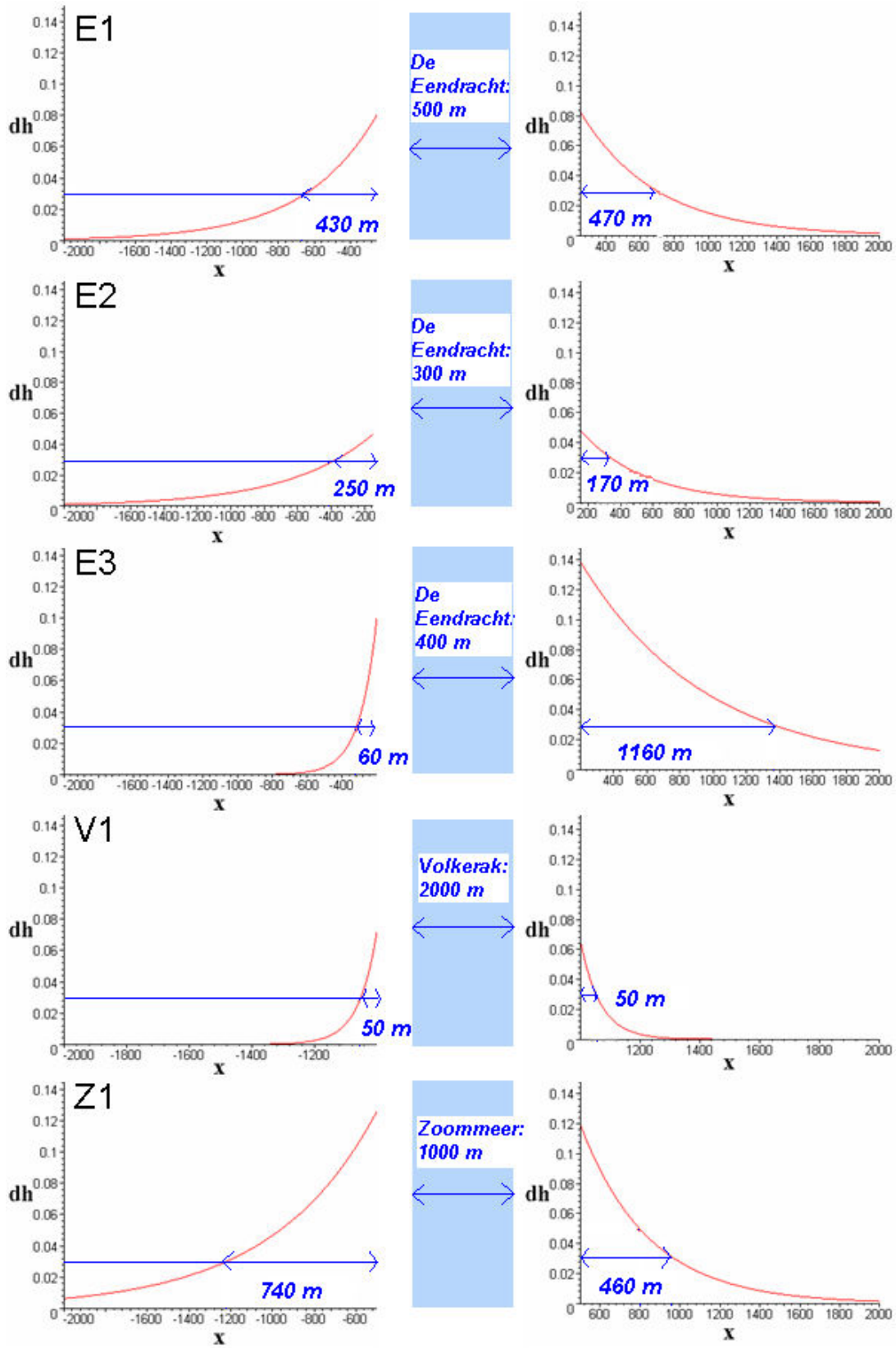


Figuur 24: Benaderde stijghoogte (m) verdeling voor de huidige situatie van het Volkerak Zoommeer voor de representatieve profielen.

In Figuur 25 is voor de vijf representatieve profielen in het gebied de verwachte verhoging van de stijghoogte weergegeven aan beide kanten van de Eendracht, het Volkerak of het Zoommeer. Met een blauwe lijn is de grens aangegeven van een verhoging van de stijghoogte met 3 cm. Er is gekozen voor een toename van de stijghoogte gelijk aan 3 cm omdat deze waarde onder normale omstandigheden in het veld duidelijk detecteerbaar (lees: meetbaar) is. Daarnaast is aangegeven tot hoeveel meter vanaf de rand van het Volkerak-Zoommeer de stijghoogte meer dan 3 cm toeneemt bij de verwachte drukhoogte van 0.15 meter. Deze resultaten zijn ook in Tabel 5 weergegeven.

Tabel 5: Invloedsgebied ten gevolge van 0.15 m extra drukhoogte door zout Volkerak-Zoommeer.

<b>Profiel</b>	<b>polderpeil links (m N.A.P.)</b>	<b>Polderpeil rechts (m N.A.P.)</b>	<b>Afstand tot OW waarbinnen meer dan 3 cm extra stijghoogte ontstaat, linkerkant profiel (m)</b>	<b>Afstand tot OW waarbinnen meer dan 3 cm extra stijghoogte ontstaat, rechterkant profiel (m)</b>
<b>E1</b>	-2.0	-0.8	430	470
<b>E2</b>	-1.6	-1.3	250	170
<b>E3</b>	-0.45	-0.75	60	1160
<b>V1</b>	-1.25	-0.8	50	50
<b>Z1</b>	-2.25	0	740	460



Figuur 25: Voorspelde toename van de stijghoogte in de nieuwe situatie van een zout Volkerak Zoommeer ten opzichte van de huidige situatie. De blauwe lijn geeft een verandering in stijghoogte van 3 cm aan.

### 5.2.1.2 Meetresultaten

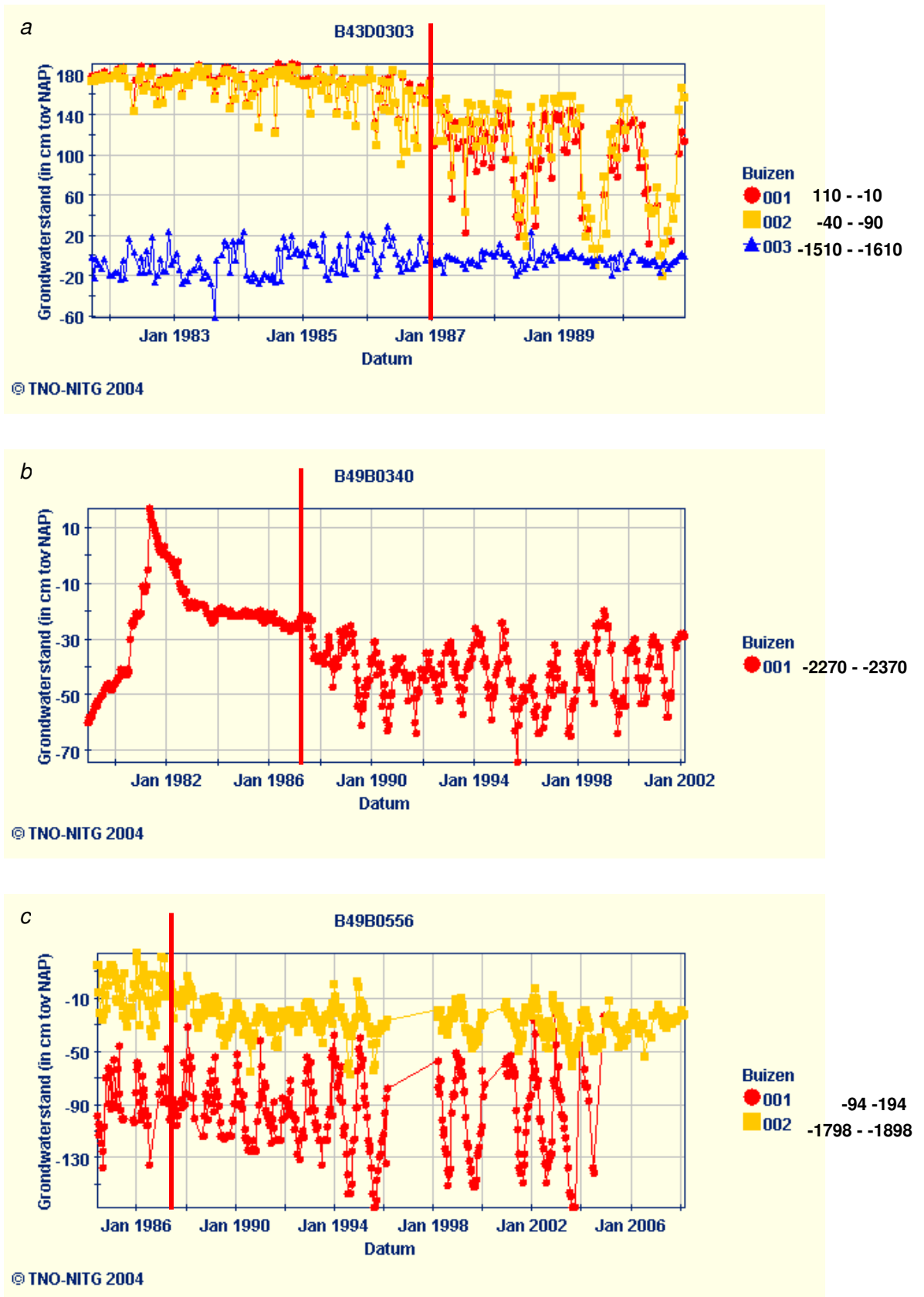
In DINO zijn de resultaten van metingen van de grondwaterstand opgenomen. Enkele metingen in de buurt van het Volkerak-Zoommeer lopen van voor tot na het jaar 1987. Hierdoor kan de grondwaterstand van een zout Volkerak-Zoommeer vergeleken worden met de grondwaterstand in de huidige situatie. In Figuur 26 zijn enkele meetlocaties weergegeven. In Figuur 27 kunnen de meetresultaten van 3 metingen worden gevonden. Meetpunt B43D0303 ligt 500 meter van het Volkerak, B49B0340 ligt 180 meter van de Eendracht en B49B0556 320 meter van de Eendracht. Voor de overige meetresultaten wordt verwezen naar Bijlage F.

De gemeten grondwaterstanden van vóór de afsluiting (1987) zijn op verschillende meetlocaties ongeveer 25 cm hoger dan na de verzoeting van het meer (Figuur 27). Het peil van het meer is gelijk gebleven (gemiddeld N.A.P. 0m), waardoor deze stijghoogteverlaging geheel toe schrijven is aan de verlaging van de chloride concentratie en daarmee de druk van het meer.

In Figuur 27b is te zien dat het watersysteem vóór 1987 op deze locatie anders was dan na 1987. Na 1987 is er seizoensvariatie in de metingen waargenomen, vóór 1987 niet. Daaruit kan geconcludeerd worden dat dit gebied vóór 1987 waarschijnlijk een voortdurende aanvoer van water had en er sprake was van peilbeheersing. Na 1987 stond het gebied onder invloed van het water regiem in het achterland met daarin seizoensfluctuaties.



Figuur 26: Meetlocaties grondwaterstanden rond het Volkerak-Zoommeer. De meetresultaten staan weergegeven in Figuur 27 en appendix F.



Figuur 27: Meetresultaten van de grondwaterstand of stijghoogte watervoerend pakket (zie positie filter, in cm N.A.P.) voor 3 meetpunten waarvan de locatie is weergegeven in Figuur 26. Met een rode verticale lijn is het jaar 1987 weergegeven, dit is het jaar waarin het Volkerak-Zoommeer zoet werd.

### 5.2.2 Verandering in kwel

In de zoute toekomst scenario's zal de drukhoogte van het Volkerak-Zoommeer met 0.15 meter toenemen. De extra kwel ontstaan door de totale stijghoogteverandering is de kwel aan de onderkant van de deklaag. De kwelwijziging is berekend door het verschil in stijghoogte tussen de nieuwe en huidige situatie te berekenen en te delen door de hydraulische weerstand van de deklaag. In Figuur 28 is de kwel  $q$  in mm/dag voor de huidige situatie weergegeven voor de profielen E1, E2, E3, V1 en Z1. In Figuur 29 is de toename van kwel te zien voor de nieuwe situatie van het Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de huidige situatie.

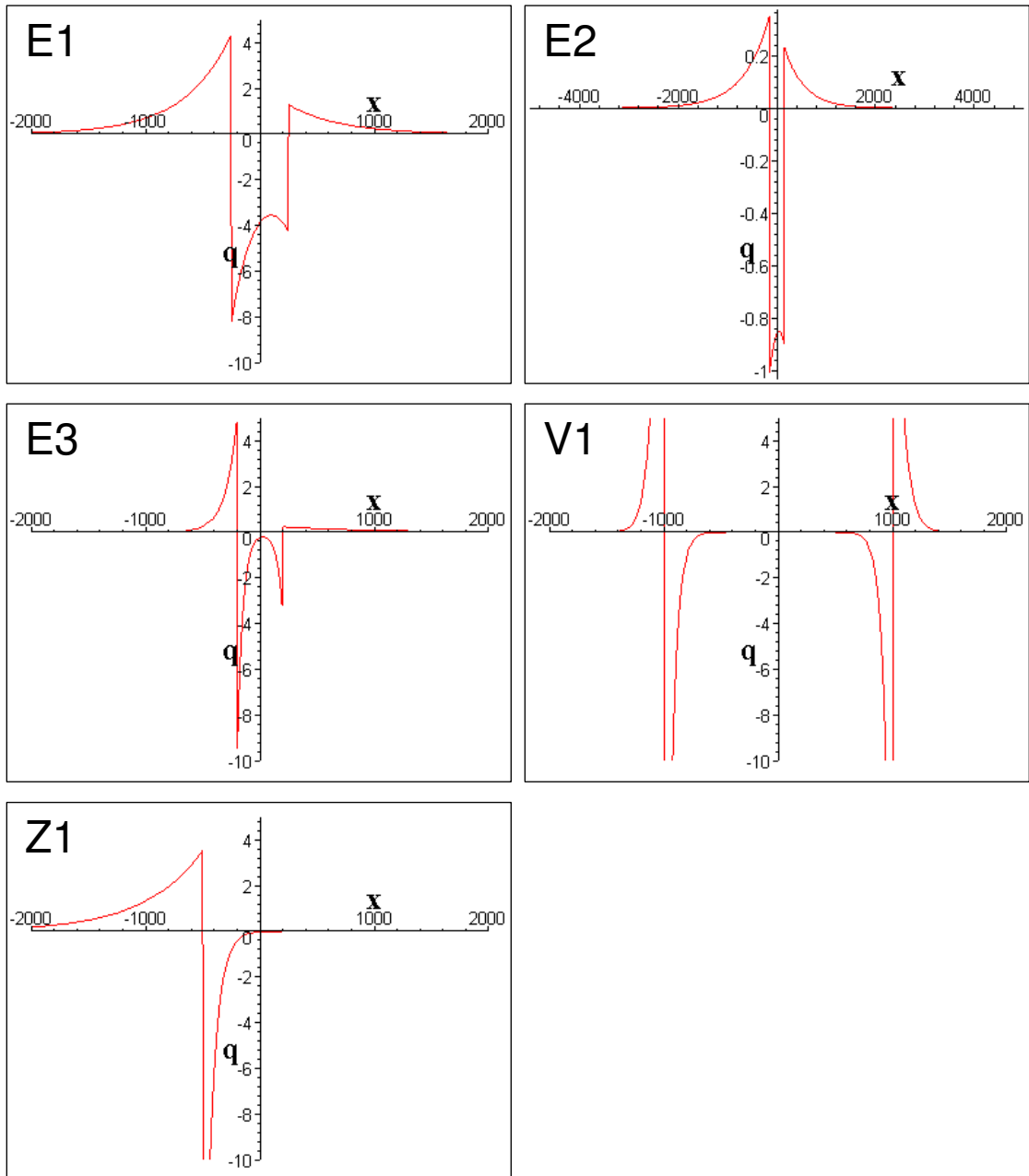
Als de spreidingslengte  $\lambda$  groot is zal de kwel over een groter gebied verspreid worden en tegelijkertijd per oppervlakte eenheid lager zijn. Een voorbeeld van een grote spreidingslengte ontstaan door een grote weerstandlaag is profiel E3 aan de kant van Noord-Brabant (zie Figuur 19 en Figuur 25c). In Figuur 29c is te zien dat de extra kwel aan de Noord-Brabant kant van het profiel verwaarloosbaar is.

Figuur 25d laat zien dat de spreidingslengte rond het Volkerak kort is door de kleine hydraulische weerstand. Dit betekent ook dat de kwel over een kleiner gebied verspreid wordt en dus (erg) hoog zal zijn in de directe omgeving van het Volkerak. Figuur 29d laat zien dat toename van de kwel binnen 400 meter van de rand van het meer voorkomt. De extra kwel is direct naast het Volkerak 2 mm/dag en 100 meter van de rand van het meer nog ongeveer 0.8 mm/dag extra. Geconcludeerd kan worden dat hoe groter de uitstraling van de peilverhoging, hoe kleiner de toename van de kwel en vice versa. In Tabel 6 staan een aantal globale waarden van verticale grondwater fluxen: gemiddelde natuurlijke grondwateraanvulling in Nederland alsmede verscheidene typen van kwel weergegeven.

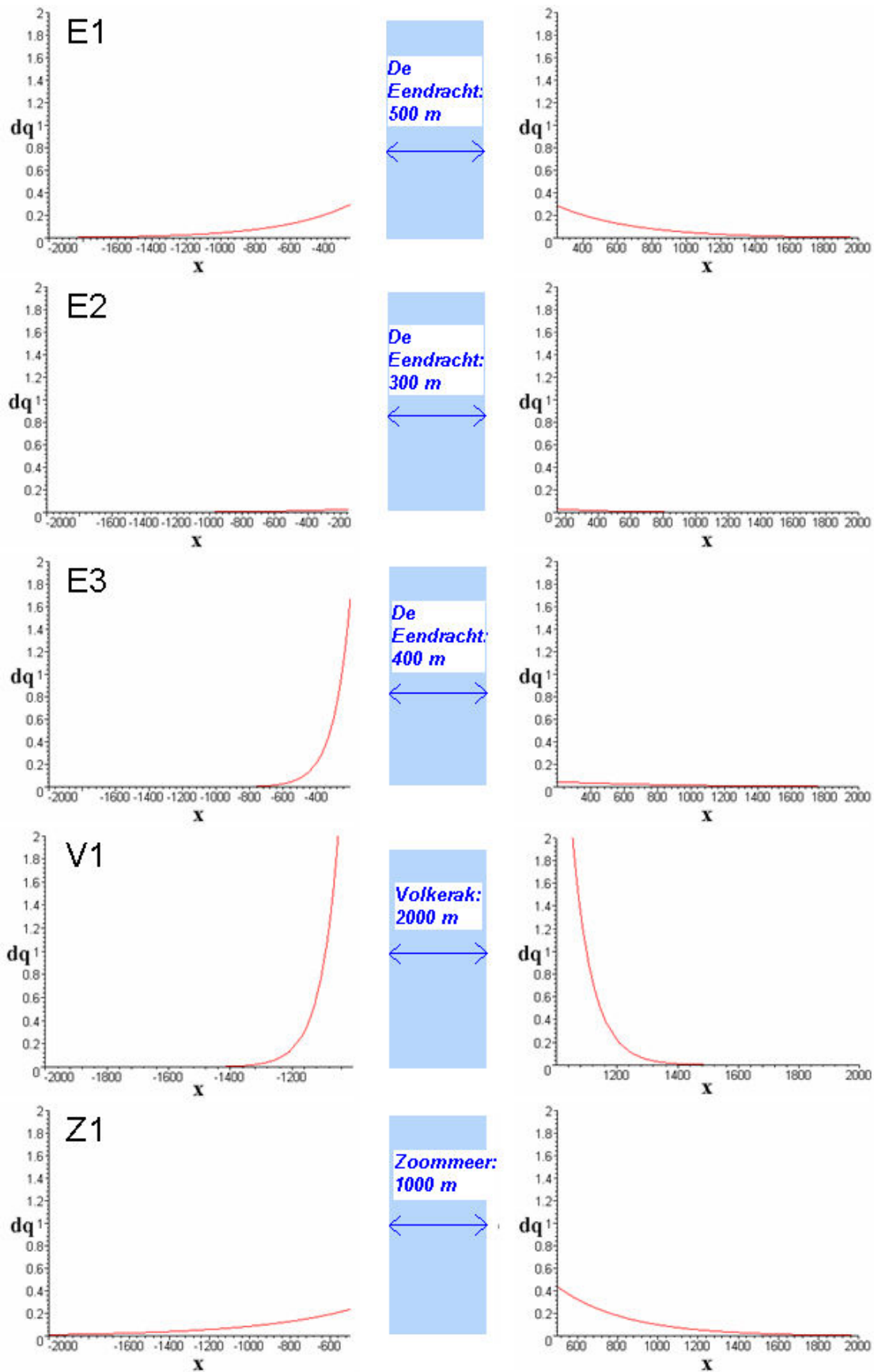
Tabel 6: Globale verticale grondwater fluxen: gemiddelde natuurlijke grondwateraanvulling en kwel in mm/dag voor een aantal representatieve situaties.

Soort verticale grondwater fluxen	Hoeveelheid (mm/dag)
Natuurlijke grondwateraanvulling NL	~0.7-0.8
Gemiddelde kwel polders NL	~<0.5
Gemiddelde kwel Groot-Mijdrecht	~5
Dijkse kwel	tientallen
Wellen	>1000





Figuur 28: Berekende kwel onderkant deklaag (mm/dag) voor de huidige situatie van het Volkerak-Zoommeer voor de representatieve profielen.



Figuur 29: Voorspelde toename van de kwel (mm/dag) in de nieuwe situatie van een zout Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de huidige situatie.

Bovengenoemde resultaten geven een indicatie van wat er verwacht mag worden. Een geografische verdeling en meer nauwkeurigere schatting van de invloedssfeer is wel te verkrijgen met een 3D model. De verwachte toename van de kwel in procenten is weergegeven in Tabel 7. Opgemerkt dient te worden dat de hoge kwelwaarde in profiel V1 lokaal plaatsvindt direct langs de dijk (de zgn. dijkse kwel) en slechts veroorzaakt wordt doordat de deklaag nagenoeg afwezig is, hetgeen heeft geresulteerd in een kleine hydraulische weerstand (zie Figuur 23). De verwachte toename van zoutbelasting van het grondwater naar het oppervlaktewater zal met ditzelfde percentage toenemen. Daarnaast kan door kwel verzilting optreden waardoor de zoutbelasting nog meer toeneemt.

Tabel 7: Huidige kwel (mm/dag) voor de profielen E1, E2, E3, V1 en Z1 en de verwachte toename

	Linkerkant profiel		Rechterkant profiel	
	Kwel huidige situatie (mm/dag)	Toename kwel	Kwel huidige situatie (mm/dag)	Toename kwel
<b>E1</b>	4	8%	1.5	15%
<b>E2</b>	0.3	10%	0.2	10%
<b>E3</b>	4	30%	0.1	30%
<b>V1</b>	35	5%	20	10%
<b>Z1</b>	4	5%	0	0

### 5.2.3 Weerstand bodem Volkerak-Zoommeer

De weerstand onder het Volkerak-Zoommeer bestaat uit de weerstand van het aanwezige bodemslib en die van de onderliggende minder-goed-doorlatende zanden. Uit in-situ metingen is gebleken dat de verticale doorlatendheid ongeveer 0.4 m/d bedraagt (Mondelinge mededelingen H. van Manen, WD, 18-06-2008). Bij een dikte van 10-15 meter geeft dit een hydraulische weerstand van 25-35 dagen. De in de berekening gekozen 15 dagen is daarmee aan de lage kant en geeft (vanwege onzekerheden in lokale bodemsamenstelling) een reële worst-case situatie weer. Aanwezige sliblagen verhogen de weerstand soms aanzienlijk.

Uit eerdere berekeningen met lagere hydraulische weerstand onder het Volkerak-Zoommeer bleek er nauwelijks verschil in resultaten te zijn ten opzichte van de nu gekozen waarde. De oorzaak daarvan ligt in het feit dat het grondwater stroomt onder invloed van alle weerstanden die op het pad komen. In dit geval zijn de weerstanden in het achterland overheersend boven de weerstand onder de oppervlakte wateren van de Eendracht, het Volkerak en het Zoommeer en heeft variatie in de laatstgenoemde weerstand weinig effect op de totale weerstand langs de stroombanen.

Alleen op plaatsen waar een lage totale weerstand langs de stroombaan optreedt in het achterland, kan de kwelstroom door de bodem weerstand worden beïnvloed. Voorbeeld hiervan is de kwelstroom vlak achter een dijk waar relatief korte stroombanen weinig weerstandbiedende lagen treffen.

De berekeningen zijn dan ook vooral een worst case voor het achterland op meer dan enkele tientallen meters achter de dijk. De voorspelde verandering in de dijkse kwel zou groter kunnen zijn (schatting: een factor twee à vijf).

De berekeningsresultaten zijn gebaseerd op KD en c waarden afkomstig uit REGIS. Wat betreft betrouwbaarheid geldt de KD waarde als betrouwbaar, omdat de waarde realistisch kan variëren binnen een factor drie hetgeen 40% variatie in de uitkomsten geeft. De hydraulische weerstanden van de deklaag zijn over het algemeen minder betrouwbaar en kunnen lokaal wel met maximaal een factor tien variëren<sup>5</sup>. Omdat de effecten het grootst worden bij lage weerstanden zijn de waarden aan de lage kant genomen (reële worst case benadering). De conclusie uit de vorige alinea geeft dat aan, en kan vanwege genoemde keuzes als voldoende betrouwbaar voor de huidige uitspraken worden gekenschetst.

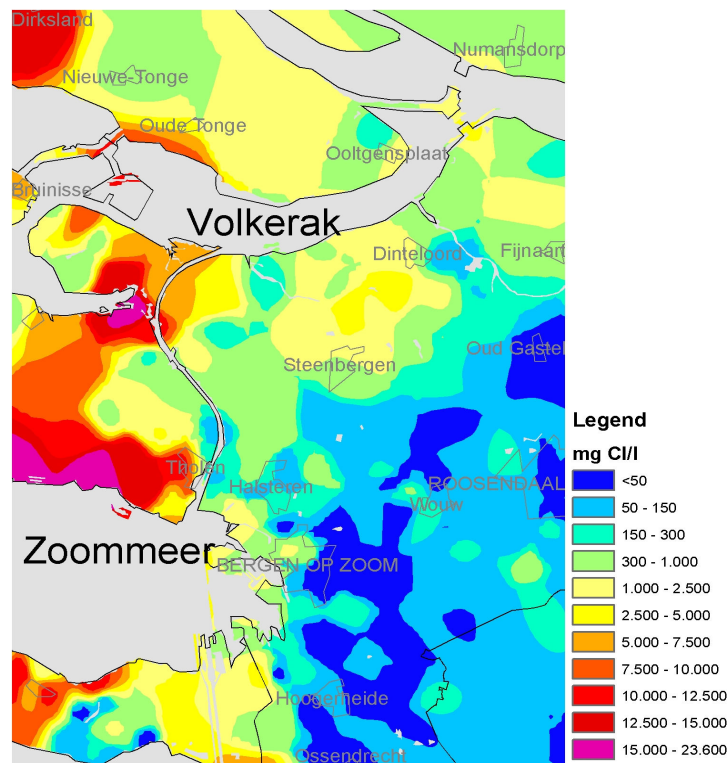
### 5.3 Effecten op waterkwaliteit (zoutgehalte)

In dit onderdeel zal gekeken worden naar de volgende kwalitatieve aspecten in het grondwatersysteem die mogelijk veranderen: huidige chloride concentraties van het grondwater, zoutwater intrusie in het grondwatersysteem door niet-stationaire dichtheidsafhankelijke stroming van grondwater en de zoetwatervoorraad in de regenwaterlens op landbouwpercelen.

De chloride concentraties zijn gebaseerd op analyses, VES en boorgatmetingen, in Figuur 30 kan de huidige chloride verdeling aan de onderkant van de deklaag gevonden worden.

---

<sup>5</sup> De relatief grote onzekerheid van de hydraulische weerstand van de deklaag wordt veroorzaakt door twee factoren. Ten eerste de dikten van de aanwezige geologische laagjes in de zogeheten deklaag, zie **Error! Reference source not found.** Deze dikten zijn met name in Zeeland relatief nauwkeurig bepaald tijdens het onderzoek waarin het Zeeuwse topsysteem quasi 3D is gekarteerd (Vernes & Menkovic, 2008, Stafleu, 2008). Ten tweede, de ruimtelijke verspreiding van de weerstands biedende geologische laagjes in de deklaag. Dit is een relatief onzekere factor, zelfs in Zeeland waar relatief veel boorgatmetingen zijn gebruikt in de kartering. Met name de grillige ruimtelijke verdeling van het zgn. basisveen (belangrijke component bij de bepaling van de totale hydraulische weerstand) speelt hierbij een significante rol. Momenteel is er een Deltares onderzoek gaande waarin voor de Provincie Zeeland de hydraulische parameters van de verschillende geologische lagen in het topsysteem in detail worden bepaald, met als gevolg een meer betrouwbare schatting van de hydraulische weerstand.

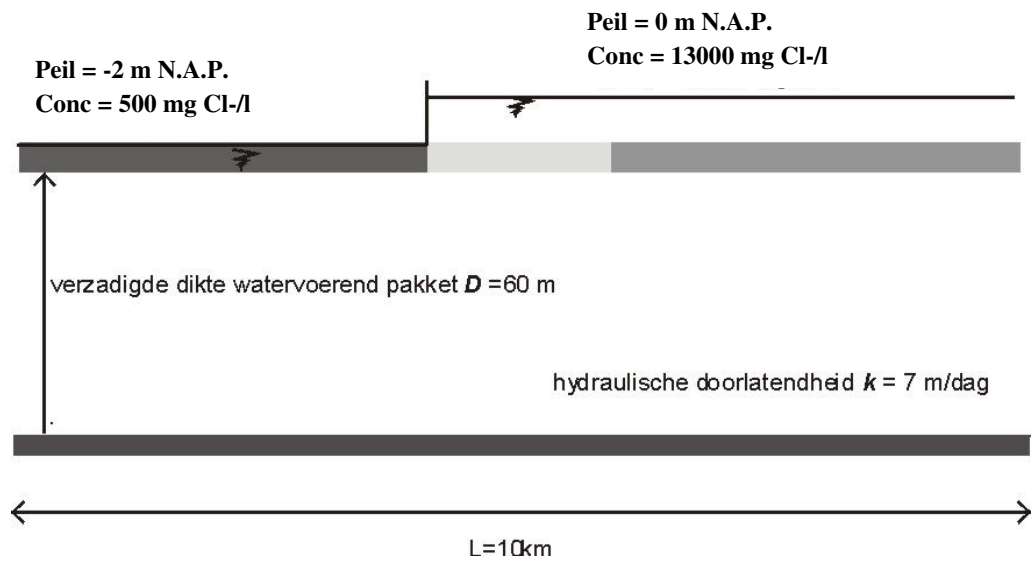


Figuur 30: Chloride concentratie onderkant deklaag (Oude Essink et al.,2005).

### 5.3.1 Dichtheidsafhankelijke stroming van grondwater: zoutwater intrusie

De mate van intrusie van zout oppervlaktewater in het grondwatersysteem in de directe omgeving het Volkerak-Zoommeer kan gekwantificeerd gemodelleerd worden met behulp van een numerieke code waarmee dichtheidsafhankelijk grondwaterstroming en gekoppeld zouttransport wordt gemodelleerd. Er kan worden geschat in hoeverre het grondwatersysteem onder het Volkerak-Zoommeer is verzoet tijdens de twee decennia na 1987 dat het oppervlaktewater systeem zoet is geweest, en hoe lang het zal duren voordat het systeem eventueel wederom verzilt in geval een zout oppervlaktewater systeem.

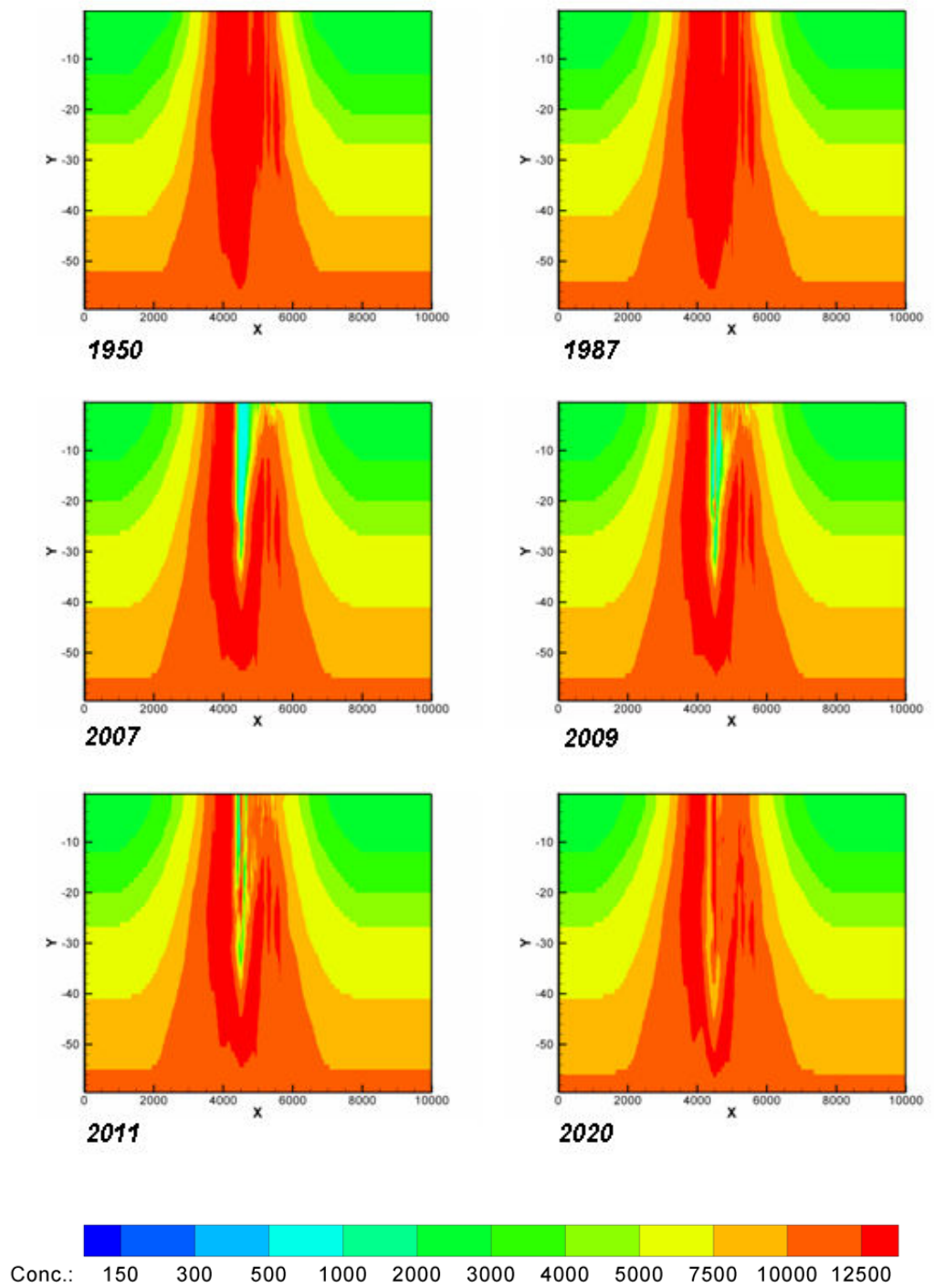
Oorspronkelijk, vóór 1987, was het oppervlaktewater systeem in het Volkerak-Zoommeer zout, en moet zwaar brak tot zout oppervlaktewater richting het grondwatersysteem zijn geïnfilteerd. Dit stromingsproces werd op sommige locaties langs het Volkerak-Zoommeer nog eens versterkt doordat in het nabij gelegen poldergebied een laag waterpeil werd gehanteerd (zie peilvakken zomer en winter in Figuur 17). Tijdens de daaropvolgende periode van 1987-2007 infiltreerde zoet water het grondwatersysteem. In de toekomst zal het systeem juist weer zout worden, met een laterale infiltratie van zout grondwater tot gevolg. De drie perioden zijn dus: 1. Periode 1950-1987: zout systeem; 2. Periode 1987-2007: zoet systeem; en tenslotte 3. Periode 2008-2050: zout systeem (toekomstig scenario). Figuur 31 toont het modelconcept van profiel Z1 gedurende de periode 2008-2050.



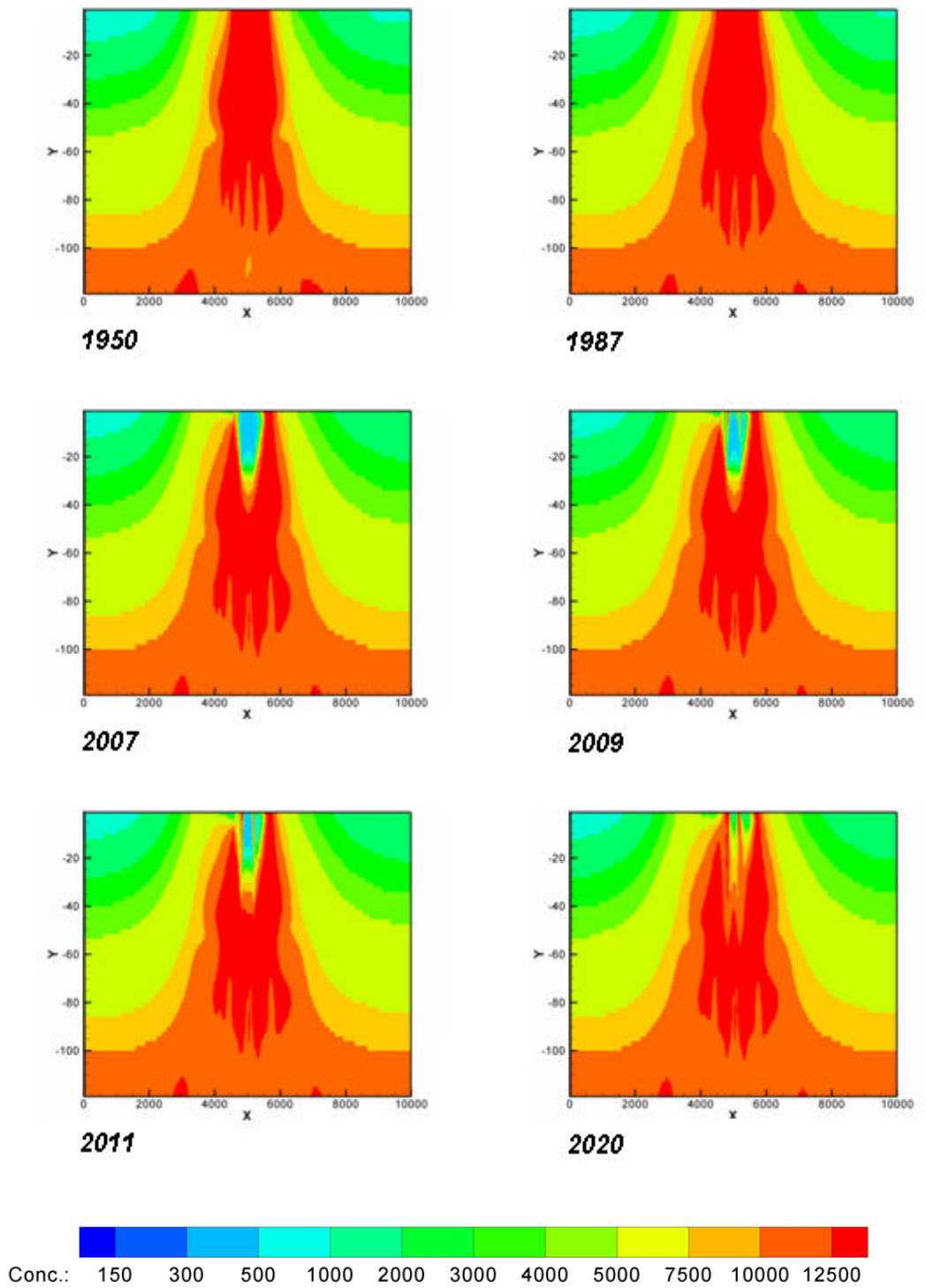
Figuur 31: Modelconcept van profiel Z1 gedurende de periode 2008-2050.

De gebruikte code om zoet-brak-zout grondwater te modelleren is MOCDENS3D (zie Bijlage F voor een korte beschrijving). Er worden hier twee profielen nader behandeld: profiel Z1 en E3. Bodemparameters zijn gebaseerd op Figuur 20, Figuur 22 en Figuur 23, en dus indirect op REGIS. De gebruikte modelparameters zoals convergentie-criterium zoetwaterstijghoogte, aantal initiële deeltjes per modelcel zijn onttrokken uit voorafgaande studies (Bijlage F).

In Figuur 32 en Figuur 33 zijn de evoluties van de zoet-brak-zout verdeling zichtbaar, in respectievelijk de profielen Z1 en E3. In beide profielen komt hetzelfde beeld naar boven. De verzoeting van het grondwatersysteem onder het Volkerak-Zoommeer is zichtbaar gedurende de zoete periode. Echter, het effect op de zoet-brak-zout verdeling van deze zoete periode zal slechts zeer tijdelijk zijn, zeker op een tijdschaal van (vele) tientallen jaren. Omdat zouttransport in een grondwatersysteem traag is heeft het immers tijd nodig om een zoet systeem met een substantiële voorraad te creëren, en blijktbaar is 20 jaar niet lang genoeg. Nadat het Volkerak-Zoommeer weer zout wordt in de toekomst simuleren alle drie de modellen dat binnen enkele jaren de *zoetwater* intrusie weer volledig verdwenen is. Daarnaast valt in de figuren op dat het effect zeer lokaal is, en wel in de directe omgeving van het Volkerak-Zoommeer.



Figuur 32: Zoet-brak-zout verdeling (mg Cl-/l) als een functie van de tijd in de ondergrond in profiel Z1 gedurende ongeveer 65 jaar. De breedte van het Zoommeer is 1000m (Figuur 23).

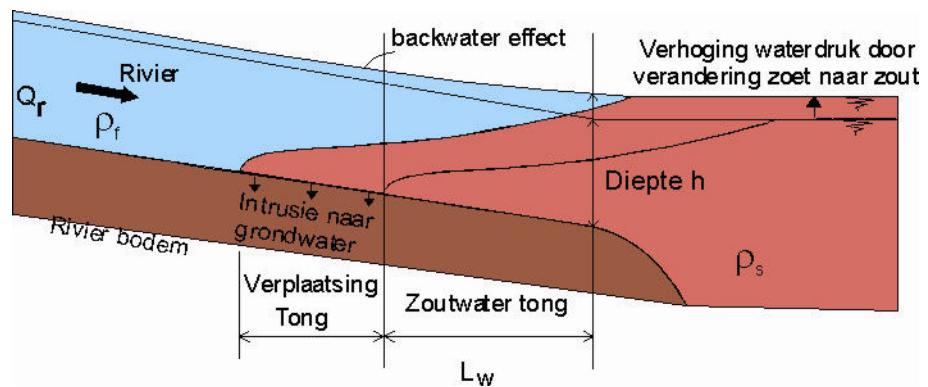


Figuur 33: Zoet-brak-zout verdeling als een functie van de tijd in de ondergrond in profiel E3 gedurende ongeveer 67 jaar. De breedte van het Zoommeer is 400m (Figuur 23).

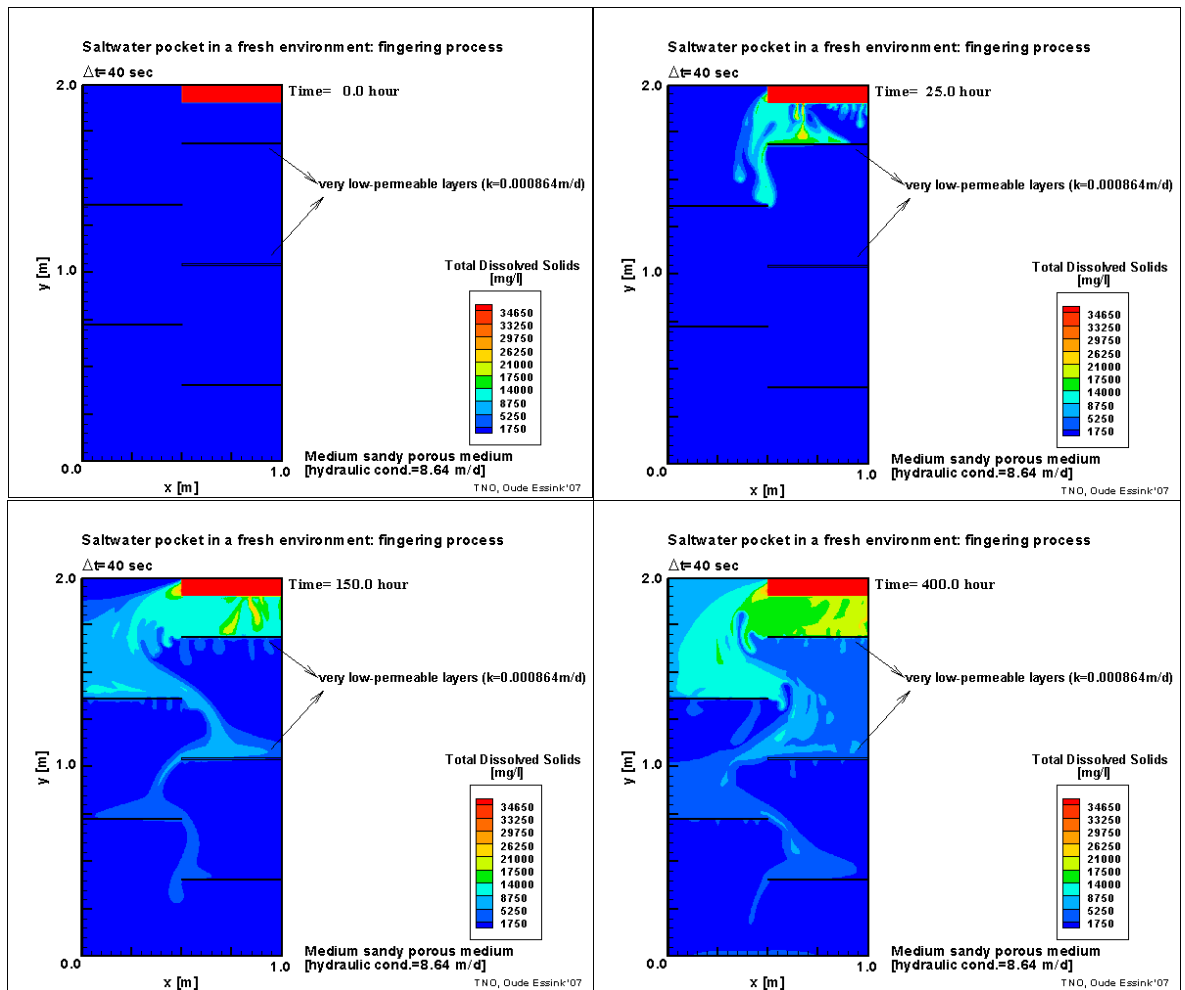
Een ander verschijnsel dat kan optreden is verzilting van het grondwatersysteem op de locatie waar door de verplaatsing van de zoutwater tong in het oppervlaktewater



stroom systeem zoutwater intrusie naar het grondwatersysteem kan optreden. Dit proces kan mogelijk plaatsvinden in de monding van de twee beken de Dintel en de Vliet (Figuur 34), afhankelijk van het doorspoel regime (zie ook Witteveen & Bos, 2008). Weliswaar zal deze verschuiving van de zoutwater tong een over het seizoen tijdelijk karakter hebben, lokaal direct in de omgeving van het oppervlaktewatersysteem kan dichtheidsstroming ervoor zorgen dat het grondwatersysteem verzilt. Dit snelle (binnen enkele dagen), lokale, verziltingproces wordt geïllustreerd in Figuur 35. Door het verschil in dichtheid kan zwaar, zout grondwater relatief snel (ordegrootte uren) via een zgn. fingering proces naar beneden stromen in het zoete grondwatersysteem; onderweg vindt menging plaats en wordt de ‘drijvende kracht’ gedempt.



Figuur 34: Verplaatsing van de zoutwater tong in het oppervlaktewater systeem



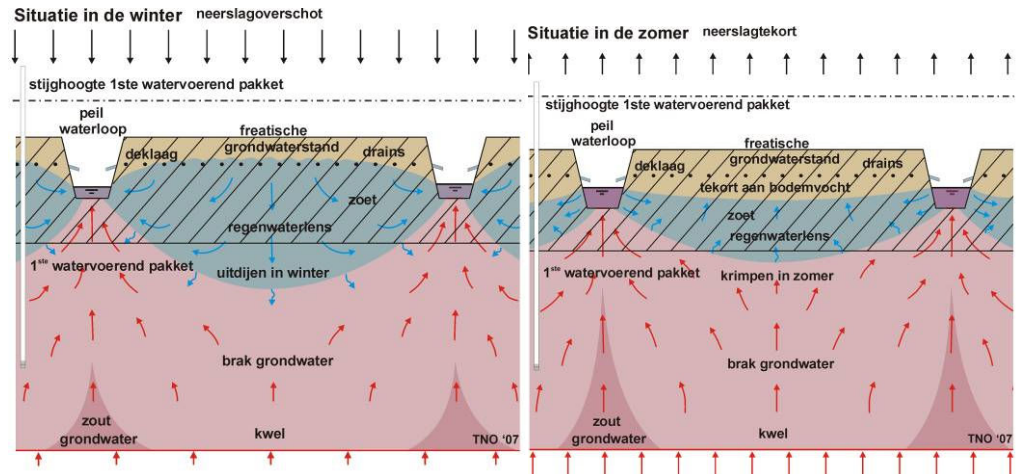
Figuur 35: Illustratie van een verzilting van het grondwatersysteem, in geval van een zout bovenlichaam (bijvoorbeeld tijdelijk zout oppervlaktewater).

### 5.3.2 Zoetwatervoorraad in de regenwaterlens

Zoute kwel in de sloten leidt tot verzilting van het oppervlaktewater waardoor het water minder geschikt wordt of niet meer geschikt is voor beregening van landbouwgewassen, tenzij men het doorspoelen met zoet water laat toenemen. Dat men in de landbouw normaal gesproken gelukkig nauwelijks hinder ondervindt van het zoute grondwater in landbouwpercelen komt door de neerslag. De natuurlijke grondwateraanvulling laat een laag zoet water ontstaan boven het brakke/zoute grondwater: de zogenaamde regenwaterlens. Dat gebeurt vooral in het najaar en in de winterperiode (Figuur 36a). Tijdens dat proces wordt het omhoog kwellende zoute en brakke water opzij geduwd, waardoor het naar de sloten stroomt, samen met het overtollige regenwater dat via drains en greppels in de sloten komt.

**Definitie regenwaterlens:**

Een regenwaterlens is een zone in het bovenste verzadigde poreuze medium waarin alleen water aanwezig is dat afkomstig is uit neerslag. De neerslaglens wordt aan de bovenkant begrensd door de grondwaterspiegel en aan de onderkant door een kwelwater systeem.



Figuur 36: Dynamiek van een regenwaterlens in een zoute omgeving: conceptueel stromingsbeeld in de winter- en zomersituatie. De pijlen symboliseren de stromingsrichting van zoet en zout grondwater.

Vanaf het voorjaar zal de grondwaterstand door drainage en gewasverdamping geleidelijk lager worden (Figuur 36b). Op een gegeven moment zal de grondwaterstand waarschijnlijk zelfs lager worden dan de slootwaterstand. Vanaf dat moment stopt de drainage en zal slootwater in de bodem infiltreren. Door capillaire opstijging en gewasverdamping ontstaat een tekort aan bodemvocht in het topsysteem en wordt de zoetwaterlaag in de zomer dunner. Dit heeft ook tot gevolg dat zout grondwater zich in de buurt van de wortelzone bevindt. Onder normale omstandigheden blijft, mede door beregening, over het algemeen genoeg zoet water in de wortelzone over.

In het vorige hoofdstuk is aangegeven dat de kwel met ca 15% zal toenemen. Er zijn nog geen berekeningsresultaten beschikbaar (binnen de duur van dit project) die voor dit soort veranderingen een indicatie geven. (In extreme gevallen kan door grote kwel de zoetwaterlens theoretisch worden "opgeblazen"). Er kan wel een inschatting op basis van de historie van het gebied worden gegeven.

De verandering in de zoetwaterlenzen zal vooral optreden in de eerste honderden meters in het achterland, namelijk daar waar de kwel relatief sterk toeneemt (zie vorige hoofdstuk). De toekomstige situatie valt qua hydrologische omstandigheden tussen de huidige en de historische (van voor de afsluiting) in. Het bestaan van deze lenzen heeft al die tijd steeds landbouw mogelijk gemaakt. Daarom kan verwacht worden dat de zoetwaterlenzen blijven bestaan in voldoende mate om landbouw te bedrijven.

## 6 Kort verslag veldwerk

April 2008 heeft een veldbezoek plaatsgevonden op een perceel boven de stad Tholen in Zeeland (Figuur 37). Het doel van dit veldbezoek was het meten van de chloride concentratie van het grondwater en open water in de sloten. De geselecteerde locatie ligt op ongeveer N.A.P. -1m, is ongeveer 5 hectare en ligt 1,5 km van de Eendracht (Figuur 38).

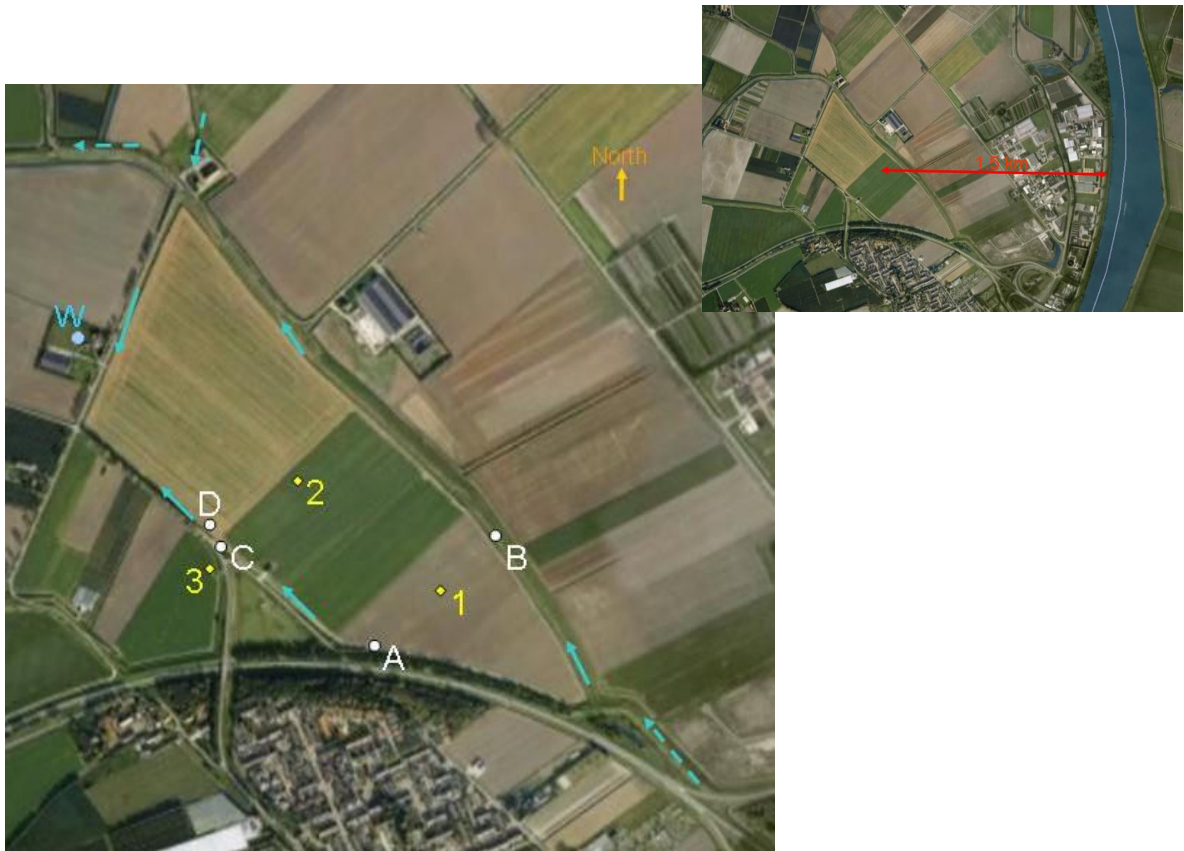
Naast de boerderij ligt een bron van 10 meter diep (W in Figuur 38). Chloride metingen hebben plaatsgevonden in de punten 1, 2 en 3 in Figuur 38 met behulp van een EC-meetinstrument. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 39. Bij meetpunt 1 zijn de hoogste chloride concentraties gemeten (1800 mg Cl/l op 3.5m -mv).

Punten A, B, C en D geven de locaties aan van de gemeten chloride concentraties in de sloot. De gemeten EC waarden en bijbehorende chloride concentraties zijn opgenomen in Tabel 8.

Uit de resultaten van Figuur 39 kan geconcludeerd worden dat binnen relatief korte afstanden (enkele honderden meters) de chloride concentraties van het grondwater erg kunnen verschillen. Bij de meetlocaties 2 en 3 zijn de chloride concentraties tot -4 m N.A.P. landbouwkundig zoet (< 1000 mg Cl/l). Op meetlocatie 1 is het grondwater in ieder geval van N.A.P. -2.5 m tot N.A.P. -4 m brak.



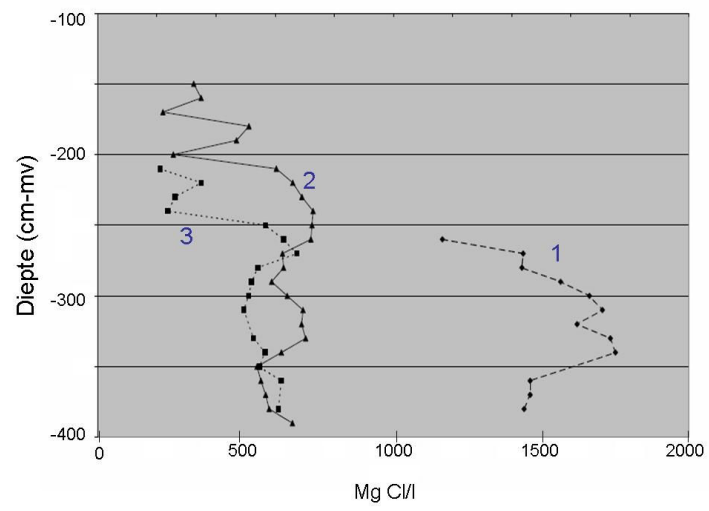
Figuur 37: Meetlocatie op Tholen.



Figuur 38: Perceel met meetlocaties van de chloride concentratie van het grondwater (1, 2 en 3) en het oppervlaktewater (A, B, C en D). W is de bron naast de boerderij.

Tabel 8: EC waarde van de metingen in de sloot en de bijbehorende chloride concentratie.

Locatie	EC [mS/cm]	Cl <sup>-</sup> [mg/l]
A	1.50	399.4
B	3.30	878.6
C	1.41	375.4
D	1.40	372.8
W	1.40	372.8



Figuur 39: Chloride concentratie van het grondwater van de meetpunten 1, 2 en 3.

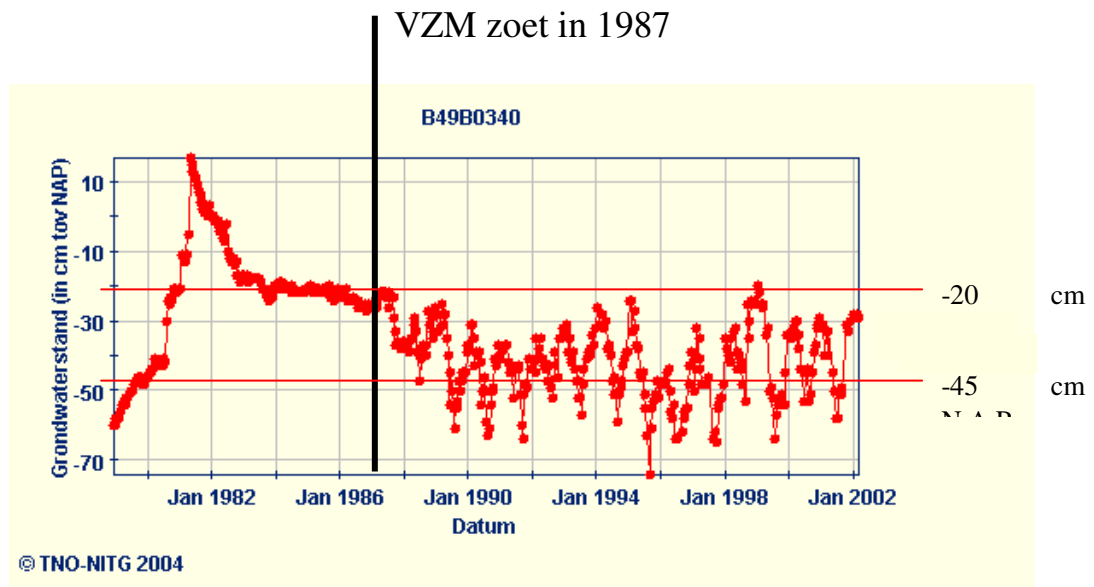


## 7 Conclusies

1 - De huidige ondergrond situatie is dynamisch en sterk variërend in zowel bodemsamenstelling als in zoet zout verdeling. Enkele stabiele zoete hoofdsystemen zijn aan te wijzen, de rest van het projectgebied kent grote variatie zowel in plaats als tijd (laatste 3500 jaar, laatste 50 / 15 jaar). In de huidige situatie is landbouw nauwelijks afhankelijk van de zoute toestand in het grondwater. Kwel achter de dijken bestaat al sinds lange tijd, zoute kwel is normaal in Zeeland. In Noord-Brabant heeft met het zoet worden van het Volkerak Zoommeer verzoeting plaats gevonden.

2 - In termen van stijghoogteverandering kan geconcludeerd worden dat de invloed van een zout Volkerak-Zoommeer beperkt blijft tot enkele honderden meters vanaf de rand van het meer. Langs de Eendracht in Noord-Brabant en in het zuiden van Tholen langs de Eendracht en het Zoommeer zal dit invloedsgebied het grootst zijn: 0.5 – 1 km vanaf de rand van het meer. Binnen dit gebied neemt de stijghoogte met 3 – 10 cm toe.

3 - De gemeten grondwaterstanden of stijghoogte watervoerend pakket van vóór de afsluiting zijn op verschillende meetlocaties ongeveer 25 cm hoger dan na de verzoeting van het meer (Figuur 40 en Figuur 27). Het peil van het meer is gelijk gebleven (gemiddeld N.A.P. 0m), waardoor deze stijghoogteverlaging geheel toe schrijven is aan de verlaging van de chloride concentratie en daarmee de druk van het meer. In de toekomst, als het Volkerak-Zoommeer weer zout is en het peil N.A.P. -0.1 m is, zal de stijghoogte waarschijnlijk tussen de huidige situatie en de situatie van vóór 1987 in zal liggen.



Figuur 40: Grondwaterstand (cm tov N.A.P.) op 180 m vanaf de rand van de Eendracht (zie Figuur 26 voor locatie).

4 - Als de verandering van stijghoogte richting het binnenland sterk wordt gedempt betekent dat, afhankelijk van de geologie (viz. de hydraulische weerstand deklaag), een relatief grote verandering in de kwel (vergelijk Figuur 25 met Figuur 29, en zie



vergelijking E.3 in Bijlage E); immers, stijghoogte- en kwelverandering zijn lineair gelijk aan elkaar. Uit de berekeningen blijkt dat ook de invloed van een zout Volkerak-Zoommeer op de kwelintensiteit beperkt zal blijven tot enkele honderden meters, vooral optredend als dijkse kwel. De grootste kwel treedt op langs het Volkerak en in het noorden van Tholen langs de Eendracht (toename tot 2 mm/dag).

5- De berekende kwelverandering sluit aan bij de conclusies die uit de metingen getrokken kunnen worden. Het potentiaalverschil tussen het polderpeil en het peil van het oppervlaktewater zal in de toekomst voor het voorbeeld van Figuur 40 met ongeveer 10% toenemen. De fluxen in het grondwater nemen met dezelfde orde grootte toe, wat overeen komt met de berekende waarden op deze locatie (Tabel 7).

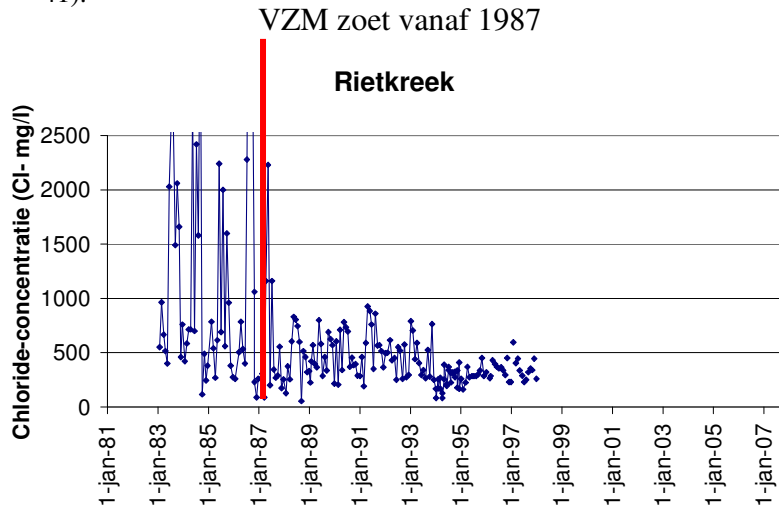
In Figuur 40 is te zien dat het watersysteem voor 1987 op deze locatie anders was dan na 1987. Na 1987 is er seizoensvariatie in de metingen waargenomen, voor 1987 niet. Daaruit kan geconcludeerd worden dat dit gebied voor 1987 waarschijnlijk een voortdurende aanvoer van water had en er sprake was van peilbeheersing. Na 1987 stond het gebied onder invloed van het water regiem in het achterland met daarin seizoensfluctuaties. In de toekomst zal de situatie van meer kwel terugkeren en is - mede vanwege het zoutgehalte van de kwel - een afgesplitst waterbeheer als voor 1987 waarschijnlijk noodzakelijk.

6 - De zoet-zout verdeling in de ondergrond is nog niet in evenwicht en zal door autonome oorzaken (opbouw van Nederland, land onder N.A.P., bodemdaling) nog blijven veranderen. Door verzilting van het Volkerak-Zoommeer kunnen lokaal veranderingen optreden. Het gebied dat direct beïnvloed wordt ligt onder het Volkerak-Zoommeer en onder de mondingen van beken en rivieren. Het zoutgehalte in het grondwater onder het Volkerak-Zoommeer zal binnen een tiental jaren lijken op de situatie ten tijde van voor het zoete Volkerak-Zoommeer. Indirect worden gebieden beïnvloed door wijziging van de stromingsomstandigheden in diepe pakketten. Algemeen kan gesteld worden dat waar stijghoogte en stroming niet veranderen door verzilting van het Volkerak-Zoommeer ook geen wijziging zal optreden met betrekking tot de zoet-zout verdeling van het grondwater.

Met name langs de noordelijke helft van de Eendracht neemt de chloride concentratie van het grondwater snel toe met de diepte. In het noorden van Tholen langs de Eendracht zal dus niet alleen de kwelflux toenemen maar ook het zoutgehalte van de kwel waardoor de zoutbelasting naar het oppervlaktewater hier zal toenemen. Daarnaast neemt in Noord-Brabant langs het noordelijke deel van de Eendracht de chloride concentratie snel toe met de diepte. De kwelflux zal hier weliswaar beperkt toenemen maar de zoutbelasting naar het oppervlaktewater wordt groter. Langs het Volkerak neemt de kwel aanzienlijk (2 mm/dag) toe maar zal de chloride concentratie slechts beperkt toenemen met de diepte; de zoutbelasting zal dus alleen door de toename van kwel groter worden.

7 - De verandering in de zoetwaterlenzen zal vooral optreden in de eerste honderden meters in het achterland, namelijk daar waar de kwel relatief sterk toeneemt (zie vorige hoofdstuk). De toekomstige situatie valt qua hydrologische omstandigheden tussen de huidige en de historische (van voor de afsluiting) in. Het bestaan van deze lenzen heeft al die tijd steeds landbouw mogelijk gemaakt. Daarom kan verwacht worden dat de zoetwaterlenzen blijven bestaan in voldoende mate om landbouw te bedrijven.

8 - Kwelsloten in de nabijheid van het Volkerak-Zoommeer kunnen verzilten door toename van de kwel die van nature zout is. Daardoor kan het zijn dat gebruik van oppervlaktewater voor beregening niet altijd meer mogelijk is. Deze kwelsloten zullen waarschijnlijk niet zouter worden dan voor de sluiting van het meer in 1987 (Figuur 41).



Figuur 41: Chloride concentratie (mg/l) in een sloot vlakbij de Eendracht.

9 - In de diepe zoetwatervoorraad – die gebruikt kan worden voor besproeiing van het land - treden van nature kleine veranderingen op door niet-evenwichtssituaties in de ondergrond, door seizoenswisselingen en door menselijk gebruik. De door dhr. Van der Wel beschreven variatie in kwel en zoutgehalte tijdens de wijzigingen van de situatie van het Volkerak-Zoommeer kunnen (binnen een zone van 1 km) door de verandering van de situatie veroorzaakt zijn. De verdieping van de Eendracht door de sterke stroming kan gezorgd hebben voor een vermindering van de weerstand van de bodem van de waterloop waardoor de kweldruk in het achterland toenam. De verzoeting ging gepaard met een aangepast peilbeheer (afwezigheid getij) waardoor het stijghoogteverschil afnam en daarmee de kweldruk. De waterput van dhr. Van der Wel zelf ligt op ongeveer 2 km afstand van het Volkerak Zoommeer. De nu voorziene veranderingen van het beheer van het Volkerak Zoommeer (peil Volkerak-Zoommeer - 0.1 m en getij slechts + of - 0.3 m) geven geen relevante veranderingen ter plaatse van deze onttrekking.

10 – Er is in deze studie voor gekozen om, naast een algemene analyse van het grondwater en oppervlaktewater systeem, de kwalitatieve beschouwing van de effecten van een zout Volkerak-Zoommeer op het grondwatersysteem toe te spitsen op een vijftal representatieve profielen. Dit beperkte aantal impliceert dat in een aantal gebieden de effecten analyse onderbelicht is. In een mogelijk vervolg kan een 3D gebieds-specifiek modelinstrumentarium een ruimtelijk beeld schetsen van de mogelijke effecten zodat deze ook in deelgebieden bekeken kunnen worden.

Zo is de omgeving van het Bathse Spuikanaal, en met name de Reigersbergsche polder, als het zuidelijkste van het studiegebied, niet meegenomen in de kwalitatieve beschrijving (hoofdstuk 5). Kijkend naar verschillende variabelen in dit deelgebied (Figuur 3 Chloride concentratie oppervlaktewater, Figuur 9 Chloride verdeling onderkant deklaag, Figuur 11 hydraulische weerstand deklaag, en Figuur 16 zomer en winter peilen) lijkt het erop dat de effecten op het grondwatersysteem in dit deelgebied niet groter zullen zijn dan in bijvoorbeeld de deelgebieden van de profielen E1 en E2.

Sterker zelfs, door de relatief hoge ligging van het maaiveld (en dientengevolge de hoge grondwaterstand) is infiltratie ter plaatse waarschijnlijker dan kwel, zodat een noemenswaardige verzilting door een zout Volkerak-Zoommeer niet waarschijnlijk is.

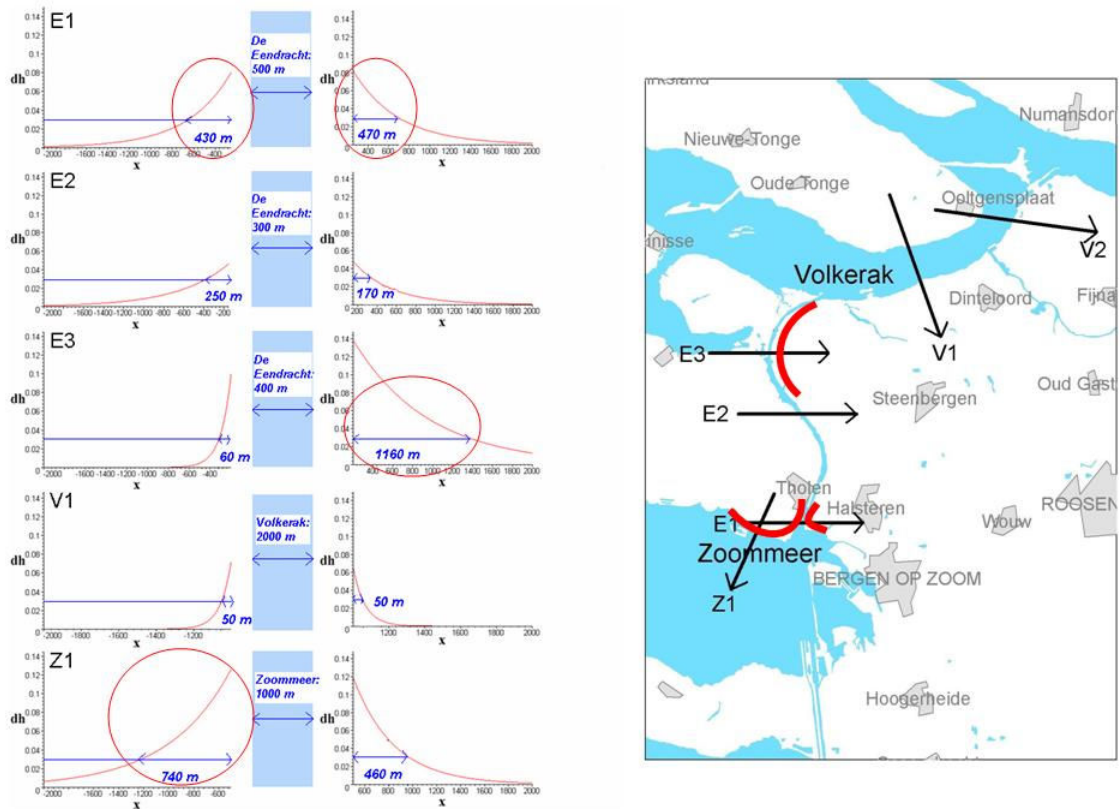
## 8 Beantwoording deelvragen

Onderliggende deelvragen binnen dit verkennende onderzoek en de daarbij horende antwoorden zijn:

**1. Wat is naar schatting het gebied waar veranderingen in het beheer van het Volkerak-Zoommeer een significante invloed hebben op de stijghoogte van het grondwater?**

In termen van stijghoogteverandering wordt het potentiaalverschil richting de Zeeuwse polders en West-Brabant met ca 0.15 meter vergroot. Op een verschil van orde 2 meter (polderpeil ca -2m N.A.P., Volkerak-Zoommeer ca 0m N.A.P.) betekent dit een wijziging met ca 8%. Dit is de ordegrrootte waarmee de grondwaterstroming zal toenemen.

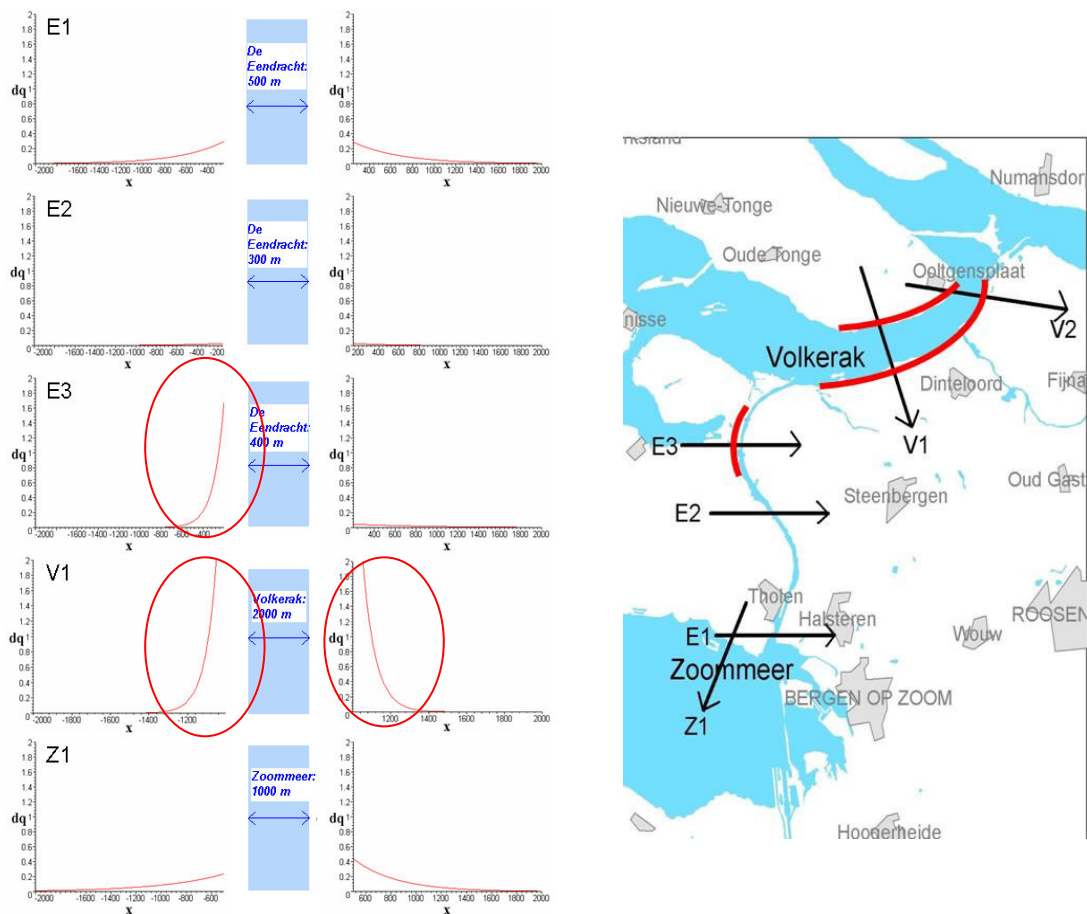
De invloed van een zout Volkerak-Zoommeer op de stijghoogte in het watervoerend pakket blijft beperkt tot maximaal een paar honderd meter vanaf de rand van het meer. Alleen rechts van profiel E3 (Noord-Brabant) is tot ruim 1 km (resp. 780 m) afstand meer dan 3 cm (resp. 5 cm) extra stijghoogte te verwachten, oftewel een meer dan marginale invloed in het grondwatersysteem. Aan zowel de Tholen als de Noord-Brabant kant van profiel E1 is tot ruim 400 m (resp. 250 m) vanaf de rand van de Eendracht de toename van de stijghoogte groter dan 3 cm (resp. 5 cm).



Figuur 42: a. De lengte van de invloedssfeer (viz. de lengte van de strook waar de toename van de stijghoogte meer dan 3 cm is) bij een peilwijziging in de vijf representatieve profielen; b. Gebieden, aangeduid met een rode lijn, waar de veranderingen in het beheer van het Volkerak-Zoommeer een meer dan marginale invloed hebben op het grondwatersysteem.

## 2. Hoeveel en waar verandert de kwelflux naar verwachting?

Hoe groter de uitstraling, hoe kleiner de toename van de kwel. De gebieden waar de stijghoogte over een grote afstand toeneemt, zullen minder last van extra kwel hebben. De invloed van een zout Volkerak-Zoommeer op de kwelintensiteit blijft beperkt tot een paar honderd meters, lijkend op dijkse kwel. Aan beide kanten van het Volkerak (profiel V1) en aan de Tholen kant van profiel E3 zal de toename van kwel maximaal 2 mm/dag zijn. De hoeveelheid extra kwel zal echter snel afnemen (binnen 400 meter van de rand van het meer).



Figuur 43: a. De toename in kwelflux (mm/dag); b. Gebieden, aangeduid met een rode lijn, waar veranderingen in het beheer van het Volkerak-Zoommeer een min of meer significante invloed hebben op de kwelflux naar het topsysteem.

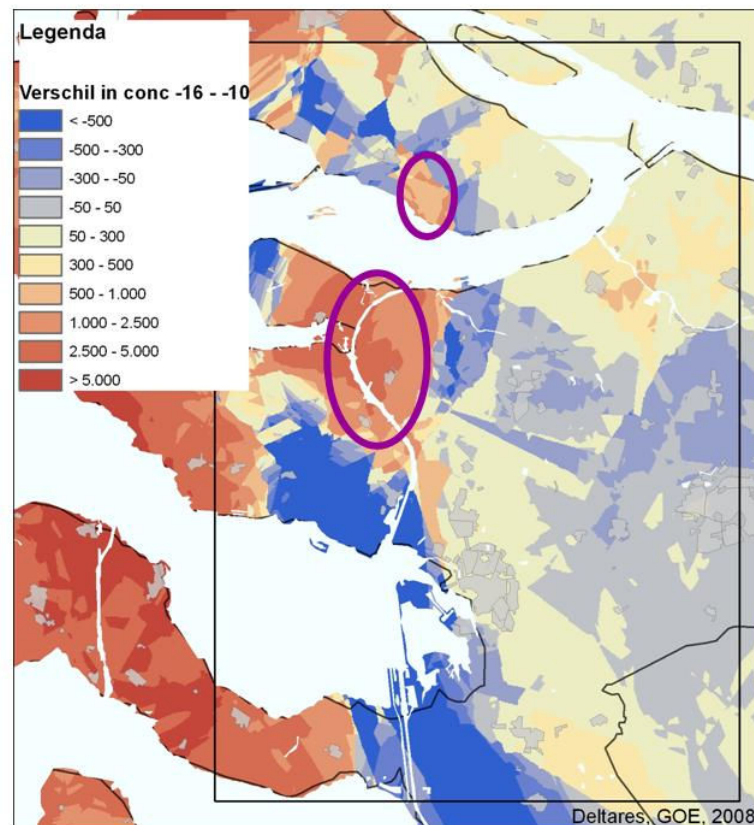
## 3. Hoeveel en waar wordt verwacht dat het zoutgehalte van de kwel zal veranderen?

De grotere dichtheid van het zoute oppervlaktewater in het Volkerak-Zoommeer zal zorgen voor een verhoging van het potentiaalverschil waardoor een toename van de snelheid van de verticale stroming ontstaat van het grondwater naar het oppervlaktewater (in de vorm van kwel). Een toename van het zoutgehalte van de kwel

wordt verwacht in gebieden waar de chloride concentratie snel toeneemt in de diepte. De gebieden waar de chloride concentratie snel toeneemt van N.A.P. -10m naar N.A.P. -16m zijn het gebied rond de bovenste helft van de Eendracht en het gebied ten noordwesten van het Volkerak. Verwacht wordt dat de toename van de chloride concentratie van de kwel enkele honderden mg Cl-/l zal bedragen.

Veranderingen in grondwaterstanden en stromingen in het achterland zijn zeer beperkt. Veranderingen treden op in de sloten direct achter de dijken. Het nu zoete tot licht brakke water dat door de dijk kwelt is in de nieuwe situatie zout. Dat betekent een relevante verandering van het chloride concentratie, vooral in tijden van weinig neerslag.

De zoutbelasting via diepe grondwaterstroming naar het achterland zal op lange termijn (vele tientallen jaren) toenemen. Op korte termijn (binnen enkele jaren) zal op verschillende locaties zout door het dijklichaam zijn gestroomd en een belasting voor de dijke kwelsloot vormen.



Figuur 44: Gebieden met significant hogere chloride concentratie op -16m dan op -10m.

Een toename in zoutvrucht van het grondwater naar het oppervlaktewater wordt verwacht op die plaatsen waar de kwel toeneemt of de chloride concentratie snel toeneemt met de diepte. De grootste extra zoutvrucht zal ontstaan aan de linkerkant van profiel E3, op Tholen. Hier zal de zoutvrucht lokaal behoorlijk kunnen toenemen, voornamelijk door de toename van (dijkse) kwel. Figuur 44 laat zien dat de chloride concentratie hier snel toeneemt met de diepte, waardoor deze zoutvrucht extra toeneemt. Ook aan beide kanten van het Volkerak kan de zoutvrucht van het grondwater naar het oppervlaktewater toenemen, met name door de toename van de kwel en in beperkte mate door een toename in de chloride concentratie van de kwel.

#### **4. Hoe groot is de verwachte verandering in de dikte van de zoete regenwaterlens?**

De afgelopen 20 jaar is zoet water geïnfiltreerd onder het Volkerak-Zoommeer. Dit zoete grondwater zal binnen een tiental jaren verdwijnen door infiltratie van brak tot zout grondwater door de bodem. Het zoutgehalte in het grondwater onder het Volkerak-Zoommeer zal relevant hoger worden, en uiteindelijk niet veel anders worden dan ten tijde van vóór het zoete Volkerak-Zoommeer.

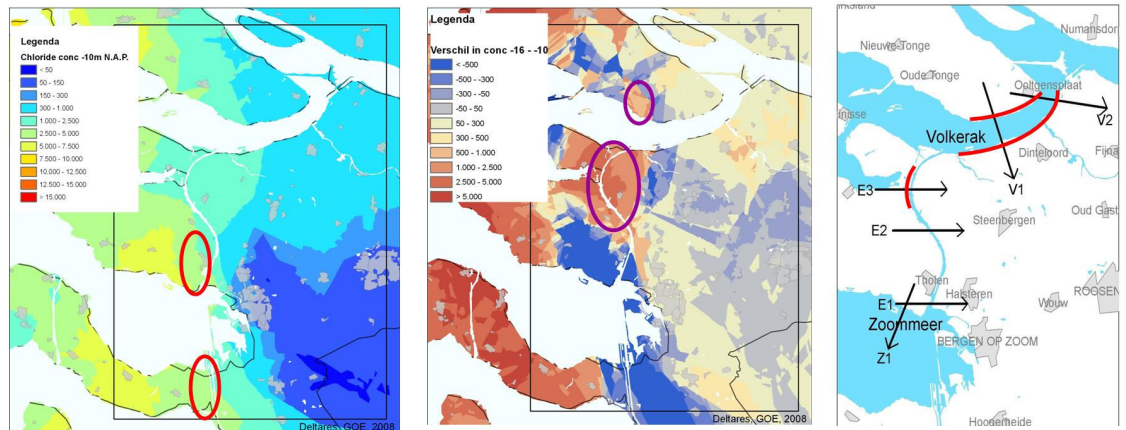
Veranderingen in stijghoogte in het achterland zijn kleiner dan enkele centimeters, in het freatische grondwater nog minder. Verwacht wordt dat de werking van regenwaterlenzen in de percelen op enige afstand van het Volkerak-Zoommeer nauwelijks wordt beïnvloed door veranderingen in het beheer van het Volkerak-Zoommeer. Alleen in de directe omgeving (binnen enkele honderden meters) van het Volkerak-Zoommeer zou de beschikbare zoetwatervoorraad in de regenwaterlenzen significant kunnen verminderen.

#### **5. Hoeveel en waar wordt het zoutgehalte in het binnendijkse oppervlaktewater beïnvloed?**

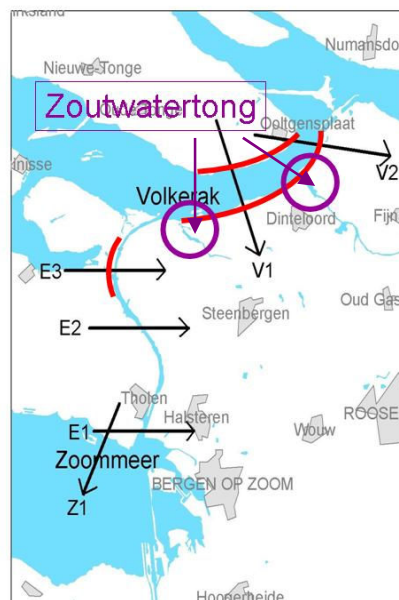
Risicogebieden ontstaan daar waar én de chloride concentratie nu al hoog is én met de diepte sterk toeneemt én waar kwel flink toeneemt door verzilting van het Volkerak-Zoommeer (Figuur 45). Er zijn drie risicogebieden: de eerste twee liggen aan beide kanten van het Volkerak, zowel op Goeree-Overflakkee als in Noord-Brabant; en het derde gebied ligt in het noorden van Tholen langs de Eendracht.

Daarnaast kan zout dat binnendringt in de monding van de twee rivieren de Dintel en de Vliet voor verzilting van het grondwater zorgen door middel van verticale en laterale infiltratie van brak- tot zout oppervlaktewater (Figuur 46).





Figuur 45: Gebieden waar (a) de chloride concentratie nu al hoog is, (b) de chloride concentratie met de diepte toeneemt en (c) de kwel significant toeneemt.



Figuur 46: Risico van verzilting van het grondwater systeem ter plaatse van de locatie van de zoutwater tong in de mondingen van de Dintel en de Vliet.

## 6. Hoeveel en waar wordt verzilting van het grondwater verwacht in de wortelzone van het invloedsgebied?

Wederom ontstaan risicogebieden daar waar de chloride concentratie nu al hoog is, met de diepte sterk toeneemt en waar kwel flink toeneemt door verzilting van het Volkerak-Zoommeer (Figuur 45). Of verzilting in de wortelzone plaatsvindt, hangt af of de huidige zoetwatervoorraad in de regenwaterlenzen in de toekomst in een ander watersysteem voldoende zijn. Naast veranderingen in het waterbeheer zijn de aanvoer van voldoende zoet oppervlaktewater, klimaatverandering (focus op met name drogere zomers, en op de lange termijn mogelijke aanpassingen in waterpeilen door de

zeespiegelstijging), bodemdaling en daaraan gelieerd het beheer van de polderpeilen van invloed op de beschikbaarheid van voldoende zoet water in de wortelzone.

De nieuwe zoet-zout situatie zal waarschijnlijk tussen de huidige situatie en de situatie van vóór 1987 in liggen; als het waterbeheer niet veel is veranderd zullen in de toekomst de zoete regenwaterlenzen waarschijnlijk blijven bestaan als die er vóór 1987 ook al waren. Redelijkerwijs is niet te verwachten dat de chloride concentraties in de wortelzone in de toekomst hoger zullen zijn dan vóór 1987 veroorzaakt door het feit dat het Volkerak-Zoommeer weer zout wordt. Complicatie bij het inschatten van de toekomstige situatie is echter de voorspelde klimaatverandering: ook de drogere zomers en de nattere winters zullen de dikte van de zoetwaterlens beïnvloeden.

#### **7. In hoeverre is het grondwater op dit moment te gebruiken en hoe wordt dat beïnvloed door een zout Volkerak-Zoommeer?**

De huidige chloride concentratie van het grondwater is over het algemeen te hoog om te worden gebruikt voor beregeningsdoeleinden. Onttrekkingen zijn alleen mogelijk met zeer kleine debieten wegens het gevaar van opkegeling van brak tot zout grondwater. Grondwater winningen op 2 km afstand of meer vanaf het Volkerak-Zoommeer (bijvoorbeeld ter plaatse van De Brabantse Wal) zullen geen effect ondervinden.

Momenteel wordt in bijzondere situaties (zoals op de landbouwpercelen van de agrariër dhr. Van der Wel in Tholen) gebruikt gemaakt van zoet oppervlaktewater uit de Eendracht om lokaal, via een significant peilopzet, de landbouwpercelen te voorzien van voldoende zoet water om een droge zomer te overbruggen. In de toekomst zal het niet meer mogelijk zijn direct uit de Eendracht zoet oppervlaktewater te onttrekken. Er wordt in droge perioden, als er geen blauwalgen voorkomen in de Eendracht, ook water ingelaten voor de Auvergnepolder en de polders van Nieuw Vossemeer in West-Brabant. Als het Volkerak-Zoommeer water niet meer bruikbaar is wordt voor deze gebieden in Noord-Brabant water uit de Maas gehaald.

Binnen een straal van 1 km om het Volkerak-Zoommeer zullen sloten verzilten door zoute kwel.

#### **8. Hoe groot zijn de ruimtelijke en temporele verschillen binnen het invloedsgebied?**

Ruimtelijk zijn de verschillen binnen het invloedsgebied groot door: 1. de variatie in zoet-zout verdeling (bijvoorbeeld door de aanwezigheid van De Brabantse Wal); 2. de variatie in geologie (viz. de aanwezigheid van weerstandbiedende lagen), en 3. de variatie in dikte deklaag. Op regionale schaal ontstaan kleine temporele verschillen doordat processen in het grondwatersysteem over het algemeen traag verlopen. Daarentegen kunnen bovenin het grondwatersysteem op lokale schaal temporele verschillen ontstaan door seizoenale verschillen in neerslag- en verdampingspatronen; hierbij moet gedacht worden aan de dynamische regenwaterlenzen vanwaar uit zoet water beschikbaar is voor de landbouw.



## 9 Aanbevelingen

In de onderbouwing van de bovenstaande conclusies is aangegeven dat er onzekerheden en onbekendheden zijn omtrent onderbouwing en inschatting van de mogelijke effecten op het grondwatersysteem en de landbouw als gevolg van een peilverhoging op het Volkerak-Zoommeer. Om deze effecten beter in te schatten worden hieronder de aanbevelingen onderverdeeld in korte termijn (najaar 2008-voorjaar 2009) en middellange termijn (1 à 2 jaar).

### Korte termijn:

#### 1. Bepalen toename zoutvracht

- De toename van de zoutvracht vanuit het grondwatersysteem naar het oppervlaktewatersysteem wordt sterk bepaald door de aanwezige chloride concentraties in de top van het grondwatersysteem, dat wil zeggen dicht onder de sloten. Deze chloride concentraties zijn matig tot slecht bekend in het gebied maar zijn relatief eenvoudig en goedkoop te bepalen (met behulp van de zogenaamde T-EC-prikstok<sup>6</sup>, zie Oude Essink *et al.*, 2007). Daarom wordt aanbevolen om op korte termijn de chloride concentraties op een flink aantal relevante locaties in het topsysteem te meten ('de nulmeting') om zodoende de onzekerheden in de verandering van de zoutvracht te verminderen.

#### 2. Onderzoeken effecten zoutwater tong

- Bij lage beekafvoeren kan, afhankelijk van het doorspoeldebiet, in de nieuwe situatie zout water binnen dringen in de monding van de twee beken de Dintel en de Vliet (Figuur 34). Door het verschil in dichtheid kan zwaar, zout oppervlaktewater relatief snel (ordegrootte uren) via een zgn. fingering proces naar beneden stromen in het zoete grondwatersysteem (Figuur 35). Dit proces kan leiden tot verzilting van het grondwatersysteem vooral in geval van (gemiddeld) infiltrerende situatie. Het maken van een realistisch model op basis van het in dit rapport ter illustratie gebruikte model zal een aanzienlijke vergroting van de inschatting van de werkelijke gevolgen geven.

#### 3. Bepalen invloed toename zoute kwel op de dikte van de zoetwaterlenzen

- Op basis van het bestaande model waarmee veranderingen van een zoetwaterlens door verandering van (zoute) kwel onder theoretische omstandigheden zijn onderzocht, kunnen berekeningen in een realistische setting worden gedaan. Daarmee worden beter onderbouwde uitspraken gegeven voor veranderingen in zoetwaterlenzen in het invloedsgebied onder invloed van de hierboven berekende kwelveranderingen, alsmede onder invloed van de voorspelde klimaatverandering. Dit onderdeel kan aansluiten bij lopend Deltares onderzoek naar de gevolgen van klimaatverandering op het Nederlandse (hoofd)watersysteem (Klimaatbestendig Nederland, Werkpakket Watervoorziening).

---

<sup>6</sup> De prikstok is een metalen stok met aan het uiteinde sensoren voor het meten van de temperatuur (T) en de elektrische geleidbaarheid (EC)

**Middellange termijn:****4. Onderzoeken mitigerende maatregelen**

- Vanzelfsprekend staat het plan voor een alternatieve zoetwateraanvoer centraal bij het onderzoek naar mitigerende maatregelen; zo kan bijvoorbeeld een hoger polderpeil worden nagestreefd, waardoor de kweldruk minder is, en het overtollige zout (verdund) kan worden doorgespoeld.
- Door de projectgroep zijn suggesties gedaan ten aanzien van het onderzoeken van de effecten van mogelijke maatregelen op veranderingen in het grondwatersysteem. Hierbij kan gedacht worden aan aanpassing van peilbeheer in polders (zie ook vorig item), aanpassing van drainage en aanpassing van het sloten patroon.

**5. Uitvoeren van een (langjarig) monitoringscampagne:**

- Om mogelijke schade claims te kunnen onderbouwen of weerleggen en om veranderingen in de toekomst (bijvoorbeeld gevolgen klimaatverandering) beter te kunnen voorspellen wordt voorgesteld om de gevolgen van de huidige ingreep goed te monitoren. Dit gebeurt in twee stappen; het vastleggen van de huidige situatie (nulmeting) en het monitoren van de veranderingen in oorzaak en gevolg:
  - Het bepalen van een nauwkeurige nulmeting, met als doel een ruimtelijk beeld te verkrijgen van de huidige situatie van het vóórkomen van zoet-brak-zout grondwater in het studiegebied. Te denken valt aan een flink aantal chloride concentratie metingen in zowel het diepe als ondiepe grondwater.
  - Het monitoring van veranderingen in het grondwater: Het opzetten van controles via herhalingsmeetcampagnes van het freatische en diepe grondwater op een beperkt aantal geselecteerde locaties.
  - Het monitoren van de veranderingen in het zoutgehalte in het oppervlaktewater.

**6. Ontwikkelen van een gebieds-specifiek modelinstrumentarium:**

- Om oorzaak-gevolg relaties beter te kunnen inschatten en begrijpen wordt aanbevolen om mee te liften met de ontwikkeling van het 3D grondwater model dat voor de Provincie Zeeland is en verder wordt ontwikkeld, en dit specifiek voor het onderhavige gebied te verfijnen en uit te breiden (bijvoorbeeld richting Noord-Brabant).
- Numerieke modellen zijn sterke hulpmiddelen voor het doen van een kwantitatieve analyse van de mogelijke effecten. Hierbij wordt dan ook gekeken naar de verzilting van het grondwater als een functie van de tijd. Zowel het diepe regionale grondwater, als het ondiepe grondwater op perceelsniveau in relatie tot het oppervlaktewater worden in ogenschouw genomen. Op termijn zijn deze modellen dan ook inzetbaar voor vragen waarbij klimaatverandering (verandering in neerslag en verdampingspatroon), bodemdaling en zeespiegelstijging moeten worden meegenomen.

## 10 Referenties

- Arcadis en TNO, 2005, Bodemdaling Barradeel II Inrichtingsplan, Wetterskip Fryslân.
- Bader, E., 2005, Verziltings- en verzoetingsprocessen in Nederland, met speciale aandacht voor de Wieringermeerpolder. Bachelorafsluiting Aardwetenschappen, stage bij TNO Bouw en Ondergrond, p. 61.
- ◆ C.O.L.N., 1958.
- ◆ Goes, B.J.M. en R.W. Vernes, 2006, REGIS Zeeland, Deelrapport C: Zoet, brak en zout grondwater, nr. 35019, Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond.
- Haasnoot, M., J.A.P.H. Vermulst en Middelkoop, H., 1999, Impacts of climate change and land subsidence on the water systems in the Netherlands. Terrestrial areas, RIZA, Lelystad.
- Huisman, L., 1972, Groundwater Recovery. MacMillan Press, London.
- Louw, P. de, Oude Essink, G.H.P. en Maljaars, P., 2007, Achtergrondstudie kwelreductietechnieken, TNO rapport 2007-U-R0357/B, 82 p., april 2007.
- MNP, 2005, Effecten van klimaatverandering in Nederland. Milieu- en Natuur Planbureau, oktober 2005. MNP-rapportnummer: 773001034.
- Oude Essink, G.H.P., Houtman, H. & B.J.M. Goes, 2005, Chloride-concentratie onderkant deklaag in Nederland, NITG 05-056-A, 17 p., Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond.
- Oude Essink, G.H.P., Stevens, S., de Veen, B., de Prevo, C., Marconi, V., Goes, B. & de Louw, P., 2007, Meetcampagne naar het voorkomen van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland, 2007-U-R0925/A, 127p.
- Oude Essink, G.H.P., Louw, P., de Baaren, E., van & Vliet, M. van, et al. 2008, Zoet-zout studie Provincie Flevoland, Deltares-rapport 2008-U-R0546/A, 160 p.
- Stafleu, J., 2008, 3D Modelling Zeeland, Intern Werkdocument (concept). Utrecht, Deltares/TNO Geological Survey of the Netherlands
- Stuyfzand, P.J., 1993, Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands. Proefschrift Vrije Universiteit Amsterdam, 366 blz.
- Stuyt, L.C.P.M, et al., 2006, Transitie en toekomst van Deltalandbouw, Indicatoren voor de ontwikkeling van de land- en tuinbouw in de Zuidwestelijke Delta van Nederland, Alterra-rapport 1132, Wageningen, 2006.
- Vernes, R.W. en A. Menkovic. 2008. REGIS Zeeland, Deelrapport B: Hydrogeologische opbouw en hydraulische eigenschappen van Holocene afzettingen (in voorbereiding). Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond.
- Stafleu, J. 2008. 3D Modelling Zeeland, Intern Werkdocument (concept). Utrecht, Deltares/TNO Geological Survey of the Netherlands.
- Werkgroep Landbouwwatervoorziening Zoommeer, 1987, Watervoorziening voor de landbouw uit het Zoommeer, 1. Onderzoeksrapport en 2. Samenvatting (20 p.).
- Witteveen & Bos, 2008, Effecten van een zout Volkerak-Zoommeer op de West-Brabantse rivieren; Vaststellen zoutindringing Mark-Vliet en mitigerende maatregelen, 63 p. + Bijlagen.



## A Beschikbare literatuur Volkerak-Zoommeer

- Integrale Gebiedsanalyse De Oude Prinslandse Polder (Kuijper *et al.*, 2007)
- Kartering en meetnetontwerp zoet-brak-zout overgang in het grondwater in Noord-Brabant (Stuurman *et al.*, 2006)
- Deelstroomgebiedsvisie Zeeland (Projectgroep WB21 Zeeland, 2004)
- Ontwerpnota compartimenteringswerken, deelnota 4: EENDRACHT; Inventarisatie diepte, breedte en oeverstabiliteit van de Eendracht na de afsluiting van de Krammer (Rijkswaterstaat directie Zeeland, 1988)
- Evaluatie problematiek Eendracht na de sluiting van de Oesterdam (Rijkswaterstaat directie Zeeland, bouw bureau compartimenteringswerken, werkgroep Eendracht, 1987)
- Impact of Climate Change (Haasnoot *et al.*, 1999)
- De Delta Natuurlijk (Tosserams *et al.*, 2001)
- Maatregelen tegen zoutindringing bij schutsluizen (D. v.d. Wiel, 2008)
- Transitie en toekomst van Deltalandbouw (Stuyt en Rijk, 2006)
- (Waterkwaliteit en ecotopen in een zout Volkerak-Zoommeer (Meijers *et al.*, concept 2008)
- Overgangen zoet-zout in de Oosterschelde in het verleden (Pieters, 1998)
- Inspraak m.b.t. grondwater en kwel (interviews met omwonenden)
- Planten in de Peiling, kwelproeven ten behoeve van damwandenproefvak (Van Manen, 1996).





## B Bespreekverslagen

### Dhr. van der Wel; akkerbouwer pal ten Noorden van Tholen

De heer van der Wel vertelt over de historie van zijn bedrijf en de omgeving. Een opsomming hiervan staat hieronder. Daarnaast uitte hij zijn bezorgdheid over de effecten van het weer zout worden van het Volkerak-Zoommeer op zijn irrigatiewerkzaamheden en dus op zijn landopbrengst. Hij is bezorgd het water niet meer te kunnen gebruiken om op te kunnen zetten in de sloten aan de randen van zijn perceel en voor irrigatiewerkzaamheden.

#### De irrigatiemethoden van der Wel:

- Het water in de sloten rondom zijn perceel wordt opgezet met ca. 1 meter. Het polderpeil is ongeveer N.A.P. -2.10m. Tijdens de irrigatie ligt de grondwaterstand op het laagste punt 0.35m onder het maaiveld. Dit kan hij doen door middel van het afsluiten van 4 stuwen nabij de 4 hoeken van het perceel en door het inpompen van water vanuit de hoofdwatgang. De capaciteit van de pomp is 1400 m<sup>3</sup>/uur.
- Indien daarnaast nog extra beregening nodig is, past hij dit eveneens toe. Meestal slechts in geval van extreme droogte. Het beregeningswater haalt hij uit het oppervlaktewater.
- Anderhalf uur na het opzetten van het water in de sloten is een verhoogd waterpeil zichtbaar in het midden van het perceel (ca 200 m bij de sloten vandaan). Geconstateerd door middel van het boren van een gat met een handboor.
- Van der Wel heeft in 2006 vanaf ca. april tot ca. half juli op deze manier geïrrigeerd.

#### Waterbeheersing in de omgeving en waterkwaliteit:

- Als proefproject vanuit het waterschap worden sinds een aantal jaren de hoofdwatgangen in het groeiseizoen doorspoeld met water vanuit het Schelde-Rijnkanaal, behalve als er teveel blauwalg in het Schelde-Rijnkanaal aanwezig is.
- Volgens de van der Wel is het waterschap daar zojuist weer mee begonnen. Hierdoor zou de waterkwaliteit in de sloten tijdelijk slechter zijn dan op zijn perceel, vanwege het relatief zoutere water uit andere delen van de polder.
- De EC-waarde van de Eendracht is ca. 1,1. De gemeten waarde in de sloten rondom het perceel is ca. EC 1,3
- In geval van regen wordt er – indien nodig - water afgevoerd vanuit een wijk van Tholen aan de overzijde van de Nieuwe Postweg. Dit water komt via duikers onder de Nieuwe Postweg in de twee sloten aan weerszijden van het perceel van dhr. Van der Wel en wordt globaal langs de Nieuwlandseweg en Nieuwlandsedijk afgevoerd naar de hoofdwatgang ten westen van het perceel.

#### Aangelegde pomp/bron nabij het huis van Van der Wel:

- De heer Van der Wel's voorganger heeft een bron laten aanleggen. Deze staat in de grote schuur van Van der Wel.
- Het onderzoek naar de chloride-concentratie dat is gedaan voor de aanleg van de bron geeft aan dat het grondwater tussen N.A.P. -4m tot N.A.P. -10m een chloride-concentratie heeft dat varieert van 1900 mg/l bovenin tot 1000 mg/l op N.A.P. -10m. Tussen de N.A.P. -10m en N.A.P. -12 m is de concentratie ca. 400 mg/l. Daaronder loopt de concentratie weer op naar ca 550 mg/l op N.A.P. -16m.

- Het filter van de bron is aangebracht in de zone tussen N.A.P. -10 en -12m.
- De hoeveelheid grondwater die jaarlijks wordt onttrokken is ca. 2000 m<sup>3</sup>.
- De EC-waarden van de bron op dit moment is 1.5.
- Op de bron is een opzetstuk boven maaiveld nodig om overstroming van de bron te voorkomen. Hieruit wordt afgeleid dat de stijghoogte op de bron op ca. N.A.P. -0,5m is. Het maaiveld ligt hier op N.A.P. -0,8m, het water van de bron komt hier circa 0.3m boven tot N.A.P. -0.5 m.
- De heer van der Wel vertelt dat de bron zoet water bevatte toen het Volkerak-Zoommeer nog zout was. In de periode tussen de afsluiting van de Oesterdam en de Philipsdam heeft een sterke getijstroming gestaan in de Eendracht waardoor slechtdoorlatende lagen doorsneden werden. Op dit moment werd de bron zout. Toen het Volkerak-Zoommeer zout werd, werd ook de bron weer zoet.

#### Overig:

- De heer van der Wel vertelt ons van een verfijningsplan dat gespeeld heeft om elke perceel van zoet oppervlaktewater te voorzien. Helaas is dit afgeketst op de kosten die door de deelnemers zelf gedragen zou moeten worden. Niet iedereen was het hiermee eens.
- Volgens de heer van der Wel zou er veel meer water vanuit de Maas/Rijn naar het Volkerak-Zoommeer geleid kunnen worden, als de eisen aan chloride-concentratie van het oppervlaktewater elders (afgesproken in 1969) versoepeld zouden worden.

#### **Lein Kaland, Provincie Zeeland, directie ruimte, milieu en water:**

De heer Kaland vertelt het volgende:

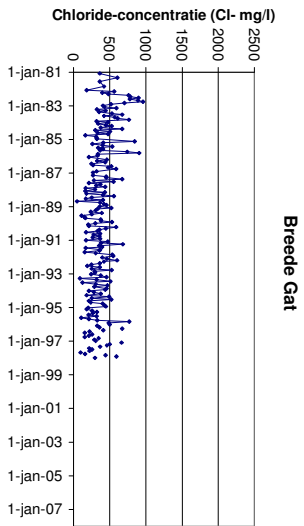
- In 1987 is er rondom Tholen sprake geweest van een basisplan en een verfijningsplan met betrekking tot het waterbeheer en toevoer van zoet water ten behoeve van de landbouw. Deze plannen samen zouden een zoetwatertoevoer tot op perceelsniveau tot stand brengen. Het verfijningsplan zou door de landbouwers zelf bekostigd worden, het basisplan door het waterschap. Niet alle boeren wilden bijdragen, waardoor het verfijningsplan niet doorging. De gelden voor het basisplan waren in eerste instantie ook niet beschikbaar. Omdat het plan ook zou gaan bijdragen aan een goede peilbeheersing, is uiteindelijk het benodigde geld voor (een deel van) het basisplan ter beschikking gekomen.
- Voor verdere informatie verwijst hij ons door naar Acronius Kramer, opsteller van het plan en destijds werkzaam bij het CWO (commissie waterbeheer en ontzilting).
- Er worden op dit moment studies uitgevoerd om water vanuit Noord Brabant naar Tholen te vervoeren om aan de garantie van zoetwater te kunnen voldoen.
- Bij de aanleg van het Volkerak-Zoommeer was de inschatting dat het zoetwater massaal gebruikt zou worden. Dit blijkt in de praktijk mee te vallen. De schade van het zout maken van het Volkerak-Zoommeer valt hierdoor waarschijnlijk erg mee.
- Op het moment wordt gekeken of en hoe het water dat vanuit de Brabantse Wallen in het Markiezaatmeer en de Oosterschelde stroomt, gebruikt kan worden als zoetwaterbron.

#### **Acronius Kramer, Waterschap Zeeuwse Eilanden:**

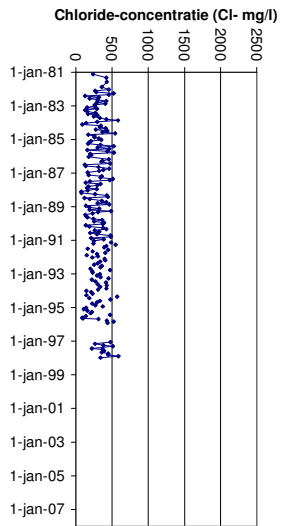
- We ontvangen informatie over polderpeilen, zoutconcentraties in oppervlaktewater en een rapportage over kwelberekeningen voor Tholen en st. Philipsland uit de 1986.
- Eveneens uitleg over het verfijningsplan en dat dat afgeketst is doordat een te groot deel van de boeren niet in de koste wilde delen.
- Sinds 2001/2002 worden als proef de hoofdwatgangen tijdens het groeiseizoen doorspoeld met water uit het Schelde-Rijnkanaal, behalve als de blauwalg-concentratie te hoog is. Water wordt op 2 plekken ingelaten en stroomt via de hoofdwatgangen naar het gemaal ten zuiden van Tholen. Hierbij wordt gestuurd op een EC van 2,5 ter plaatse van het gemaal, wat ongeveer neerkomt op 700 mg chloride per liter. De chloride concentratie van het inlaatwater is ca 300 mg/l.
- Er is relatief weinig informatie bekend over de zoete kwel vanaf de Brabantse Wallen. Omdat dit om een relatief kleine hoeveelheid gaat is dit nooit als rendabele bron aangemerkt. Bij St. Annaland komt zoet grondwater naar boven.
- Zoutconcentraties in het oppervlaktewater vanaf circa 2000 tot nu worden per mail gestuurd. Zoutconcentraties van voor 2000 zijn het makkelijkst te verkrijgen uit een rapportage van Alterra (Transities in de landbouw).





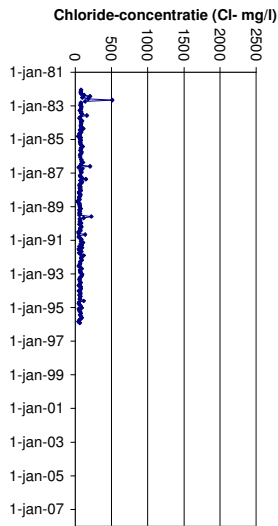


**Zeevliet**

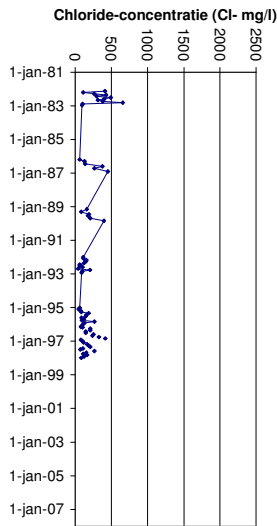


**Medlocaties matig landinwaarts**

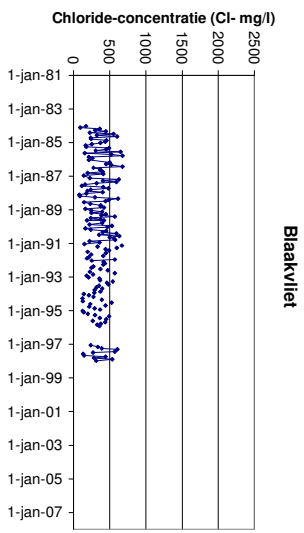
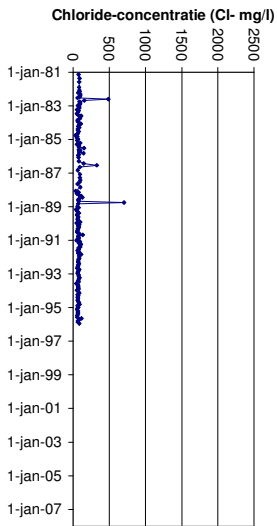
**Atw. Westland**



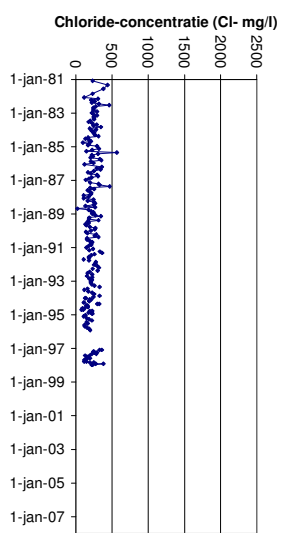
**Polderwatering**



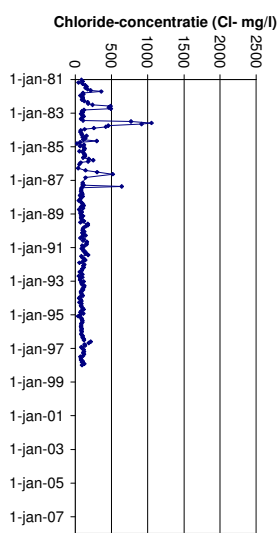
**Bansloot**



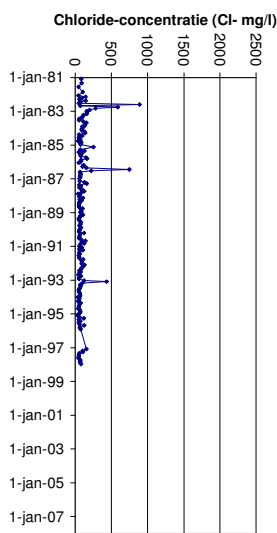
**Tonnekreek**



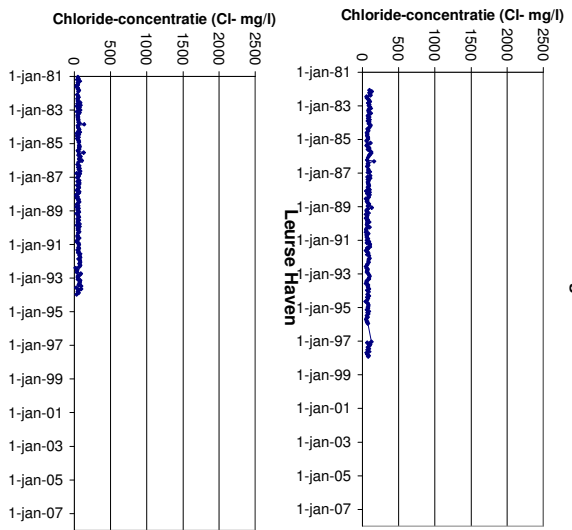
**De Beek**



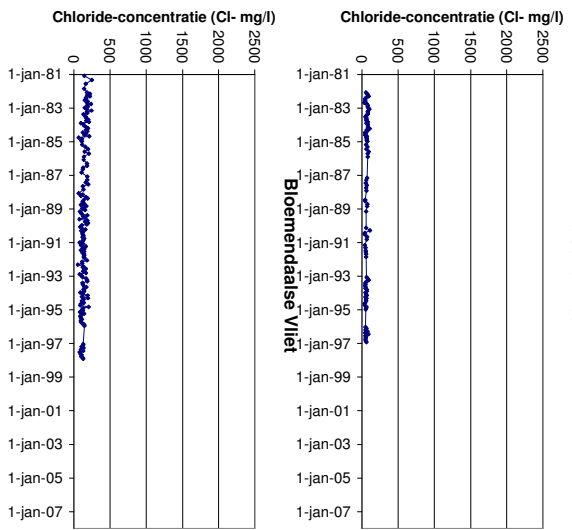
**Keenehaven Fijnaart**



**Meelocaties verder landinwaarts**  
Zwanengat



**Halsche Vliet**







## D Veldcampagne Tholen landbouwperceel

Dit veldonderzoek is uitgevoerd en uitgewerkt door Tomasso Letterio, PhD student van de Universiteit van Florence.

### **Field investigation of water chloride concentration**

On the 24<sup>th</sup> of April 2008, we carried out water chloride concentration monitoring activities at the farm of C. van der Wel. The objective of the field-investigation was measuring the chloride concentration in the water-soil profile and the ditches for fresh-brackish water interaction analysis.

The location selected for the monitoring is a parcel of about 5 hectares (figure 48) located in front of the farmhouse. The parcel is extended in direction northwest southeast for a total length of about 1.2 kilometres. The parcel bounds in southeast direction with the city of Tholen. Two main ditches define the bounds of the parcel in north and south direction. The field is located about 1.5 kilometres far from de Eendracht. The surface in the parcel is about 0.8 metre below sea level. Below the cattle shed (W), near the farmhouse, there is a well of 10 metres deep. The water of the well is used at the farmhouse as drinking water and in the parcels for the fertilizing and pesticides application with an annual consume of about 2000 cubic metres for year.

In the figure 48 it is possible to identify the points (1-2-3) where we carried out the field-investigation of groundwater chloride concentration in the soil. The method used for the investigation is the EC-probe, for the chloride concentration assessment in soil-water profile, and the common electrical conductivity measurements for water in the ditches. Using the EC-probe method it is possible to analyze the chloride concentration until a depth of 3-4 meters. The other points (A-B-C-D) represent the locations where we collected some measurements about the electrical conductivity of the water in the ditches.

The three main ditches, that define the parcel bounds, characterize the field surface hydrology. The water, which flows in the ditches toward northeast, comes from Tholen (drainage water). In the opposite side of the field, there is a pumping station used by the farmer during the summer period, for increasing the water-table in the ditches. The intake of the pumping station is on a channel where the water flows from de Eendracht. The EC of the water in the Eendracht is about 1.1 mS/cm.



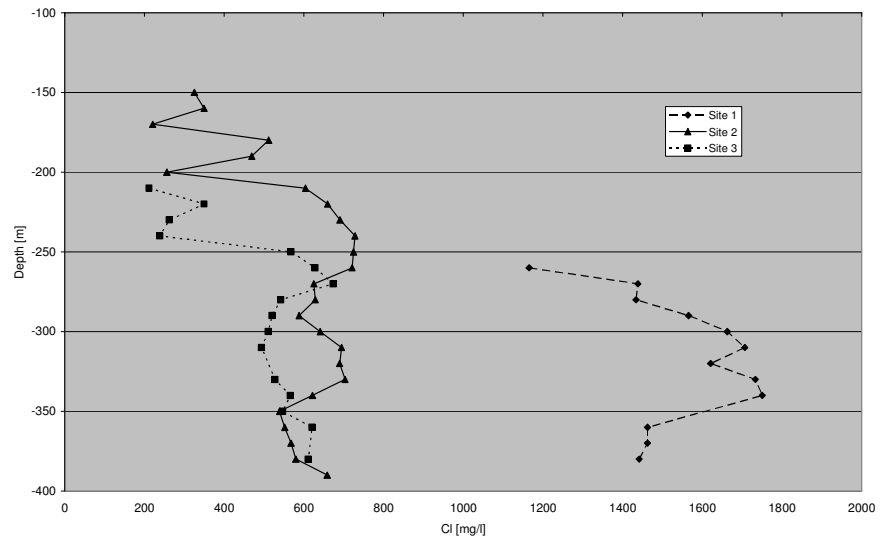
Figuur 48: Parcel with sites of measurements and distance from de Eendracht.

In the table 1 are collected the data about the electrical conductivity of the water in the ditches and in the well.

Table 9: Electrical conductivity of the water in the ditches and in the well

Localization	EC [mS/cm]	Cl <sup>-</sup> [mg/l]
A	1.50	399.4
B	3.30	878.6
C	1.41	375.4
D	1.40	372.8
W	1.40	372.8

In Figuur 49 the chloride concentrations along the profiles in the 3 sites selected for the measurements are plotted.



Figuur 49: Water chloride concentration in the soil profile in the three sites

The values of the chloride concentration in the soil profile increase with the depth at all sites. At site 1, the location nearest to the Eendracht, higher chloride concentration values are recorded than at the other sites. At point B, where we measured the EC and the chloride concentration of the water in the ditches, higher values are shown than at the other ditches. The high value of the chloride concentration at site 1 and in the ditch, at point B, could be related to the effects of the low water table presents in the upper part of the ditch. In fact, as mention before, the farmer handles the water table in the ditch, pumping water from the external channel. The effects of these activities can only be seen in the lower zone of parcel.

All the same, the values of the chloride concentration are enough low respect to the chloride concentration threshold that could be affected the crop present. In the field considered, the farmer crops the wheat and the Chloride concentration threshold for this crop is 4850 mg/l. Moreover, the depth of the groundwater table changes from 30 cm to 120 cm below the ground level during the growing season and the estimated chloride concentration related to this depth should definitely be low enough to allow an optimal wheat growth.



## E Analytische formules

Na het oplossen van de differentiaalvergelijking kan de stijghoogte van het grondwater van de drie deelgebieden beschreven worden:

$$\begin{aligned}\phi_1(x) &= A_1 e^{-x/\lambda_1} + B_1 e^{-x/\lambda_1} + pp_1, \\ \phi_2(x) &= A_2 e^{-x/\lambda_2} + B_2 e^{-x/\lambda_2} + pp_2, \\ \phi_3(x) &= A_3 e^{-x/\lambda_3} + B_3 e^{-x/\lambda_3} + pp_3,\end{aligned}\tag{E.1}$$

Met

$$\lambda_1 = \sqrt{k_1 D c_1}, \lambda_2 = \sqrt{k_2 D c_2}, \lambda_3 = \sqrt{k_3 D c_3} .\tag{E.2}$$

De snelheid kan vervolgens bepaald worden door

$$q_{hor}(x) = -kD \frac{d\phi(x)}{dx} ,\tag{E.3}$$

$$q_{vert}(x) = \frac{\phi(x)}{c} .\tag{E.4}$$

waarin:

$\phi(x)$  = stijghoogte in het watervoerend pakket (m);

$pp$  = polderpeil (m);

$x$  = lengte in het watervoerend pakket (m);

$\lambda$  = karakteristieke lengte oftewel de spreidingslengte (m);

$k$  = hydraulische conductiviteit van het watervoerend pakket (m/dag);

$D$  = verzadigde dikte van het watervoerend pakket (m);

$kD$  = doorlaatvermogen van het watervoerend pakket (m<sup>2</sup>/dag);

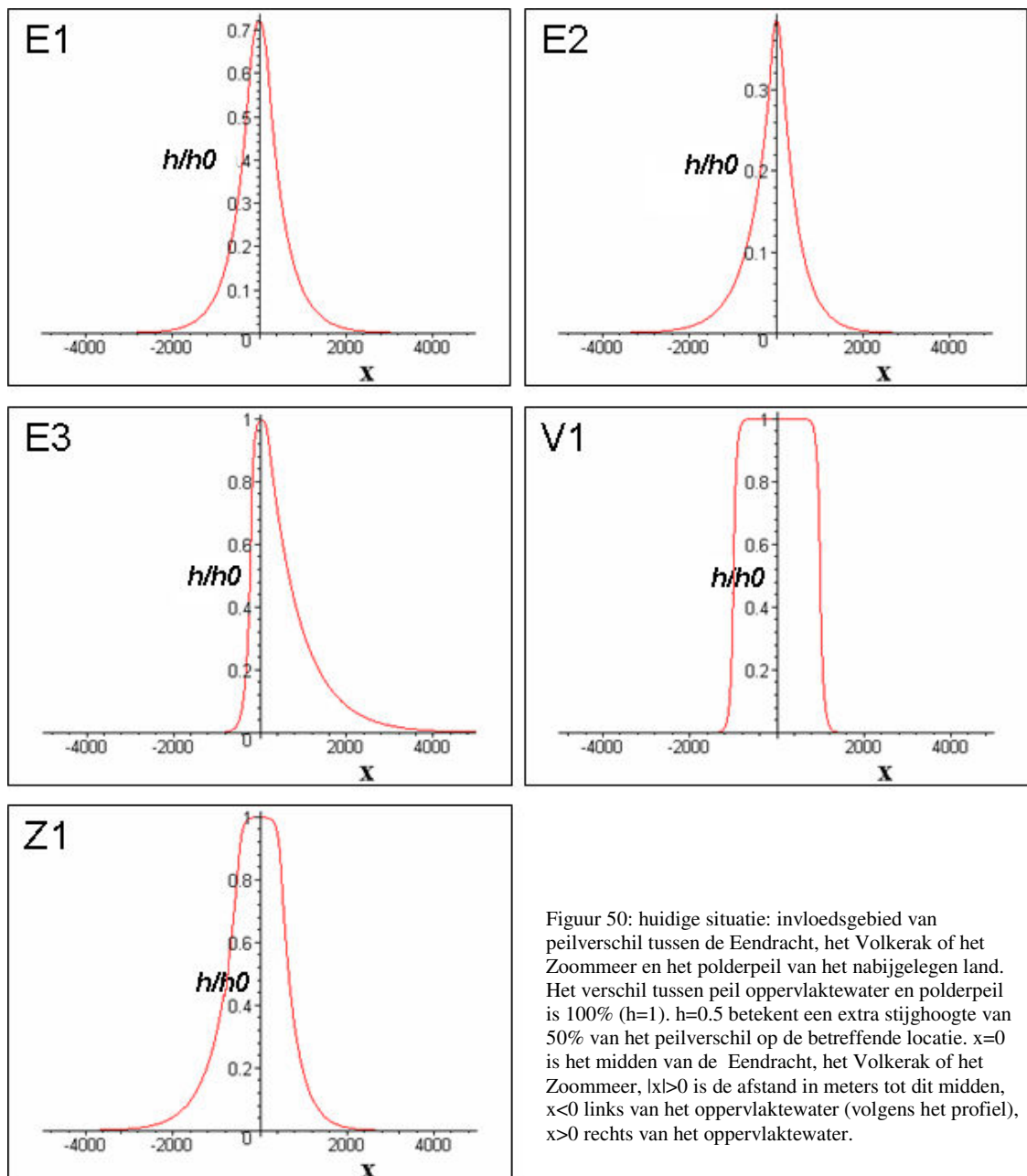
$c$  = hydraulische weerstand van de afsluitende deklaag (dag);

$q_{hor}(x)$  =  $\phi$  horizontale grondwaterstroming (m/dag);

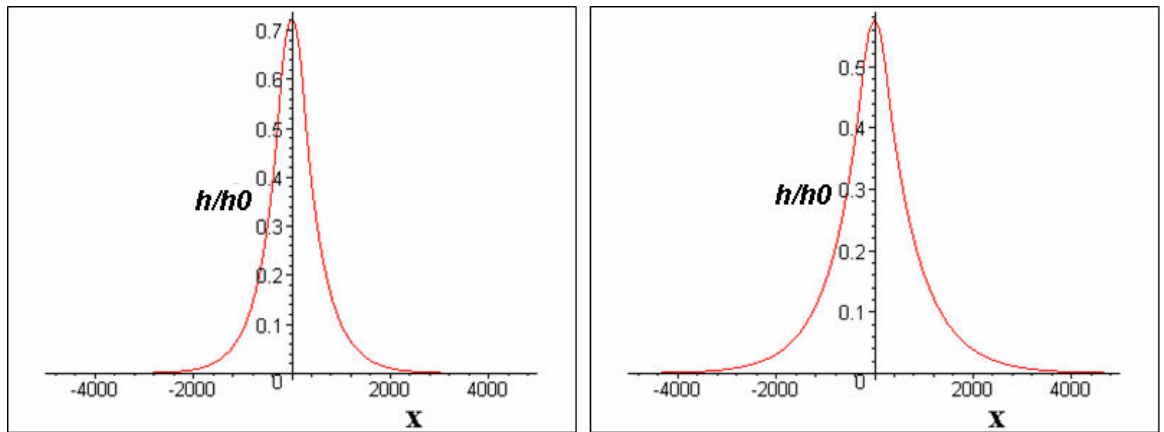
$q_{vert}(x) = \phi(x)/c$  = kwelintensiteit (verticale grondwaterstroming deklaag) (m/dag).

$A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$  zijn constanten die nog bepaald moeten worden met behulp van de randvoorwaarden. De randvoorwaarden voor dit model zijn  $\phi_1(-\infty) = pp_1$ ,  $\phi_3(\infty) = pp_2$  en de aansluitcondities tussen de deelgebieden voor de stijghoogte  $\phi$  en de horizontale snelheid  $q_{hor}$ .

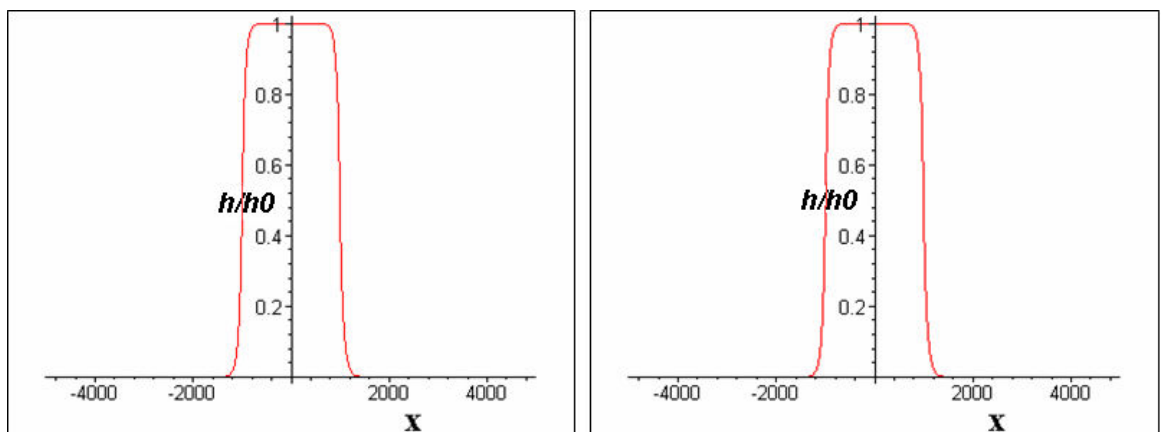
In Figuur 50 is het invloedsgebied van een peilverschil tussen de Eendracht, het Volkerak of het Zoommeer en het polderpeil van het nabijgelegen land weergegeven voor de profielen E1, E2, E3, V1 en Z1. Het verschil tussen peil oppervlaktewater en polderpeil is 100% ( $h=1$ ).  $h=0.5$  betekent een extra stijghoogte van 50% van het peilverschil op de betreffende locatie. In Figuur 51 is de invloed van een peilverhoging op de stijghoogte in de ondergrond voor profiel E1 weergegeven met verschillen diktes van het watervoerend pakket. In Figuur 52 voor profiel V1. Opgemerkt kan worden dat de invloed van de dikte van het watervoerend pakket weinig invloed heeft op het invloedsgebied van de verandering.



Figuur 50: huidige situatie: invloedsgebied van peilverschil tussen de Eendracht, het Volkerak of het Zoommeer en het polderpeil van het nabijgelegen land. Het verschil tussen peil oppervlaktewater en polderpeil is 100% ( $h=1$ ).  $h=0.5$  betekent een extra stijghoogte van 50% van het peilverschil op de betreffende locatie.  $x=0$  is het midden van de Eendracht, het Volkerak of het Zoommeer,  $|x|>0$  is de afstand in meters tot dit midden,  $x<0$  links van het oppervlaktewater (volgens het profiel),  $x>0$  rechts van het oppervlaktewater.



Figuur 51: Invloed van een peilverhoging op de stijghoogte in de ondergrond: profiel E1 met dikte watervoerend pakket (a) 40 meter en (b) 100 meter.



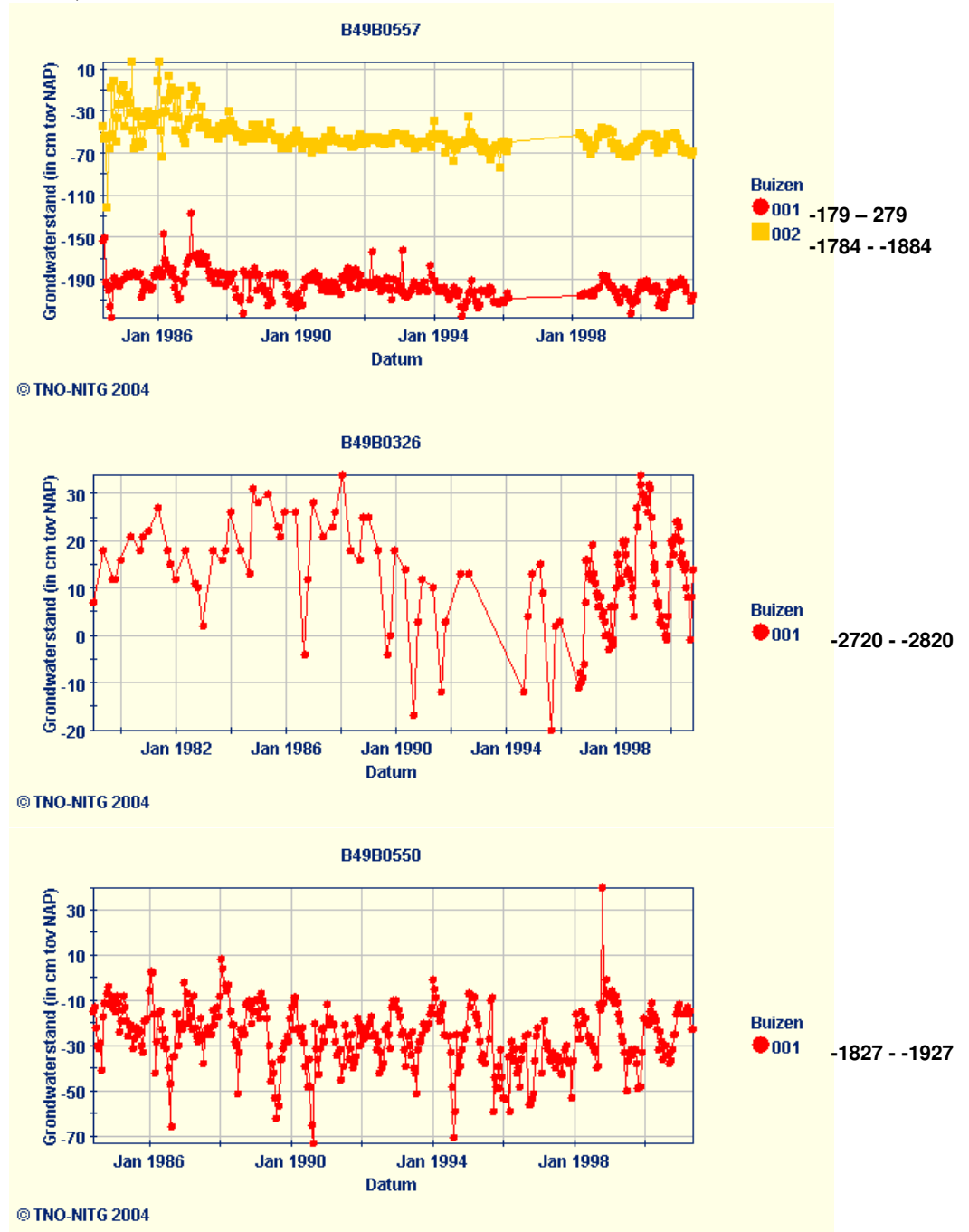
Figuur 52: Invloed van een peilverhoging op de stijghoogte in de ondergrond: profiel V1 met dikte watervoerend pakket (a) 30 meter en (b) 100 meter.

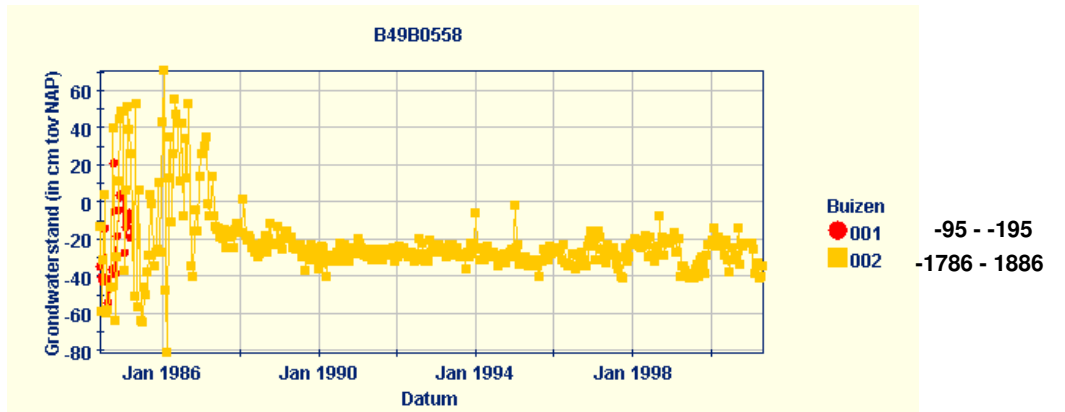




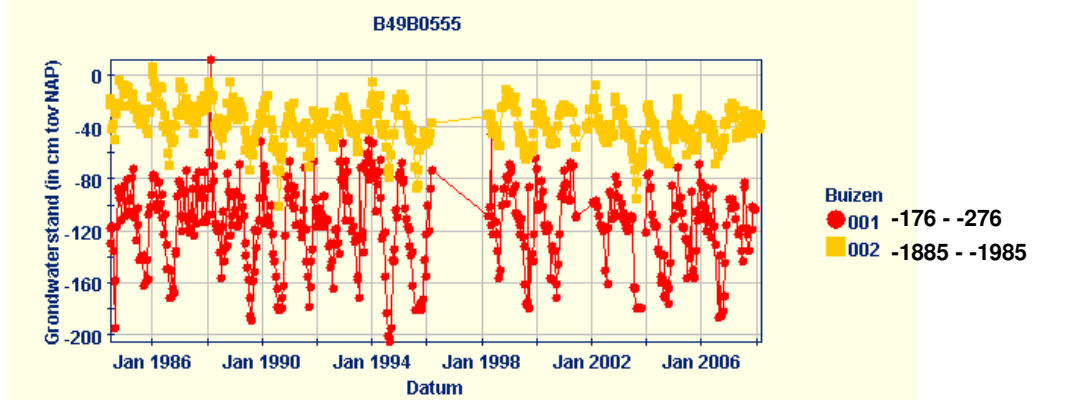
## F Metingen grondwaterstanden en stijghoogten

Voor de locaties van de metingen wordt verwezen naar Figuur 26. Meetresultaten van de grondwaterstand of stijghoogte watervoerend pakket (zie tevens positie filter, in cm N.A.P.).

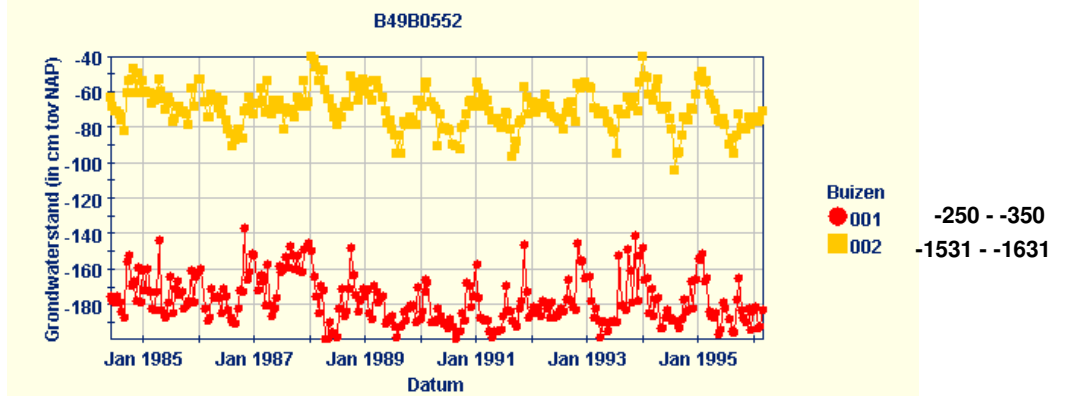




© TNO-NITG 2004

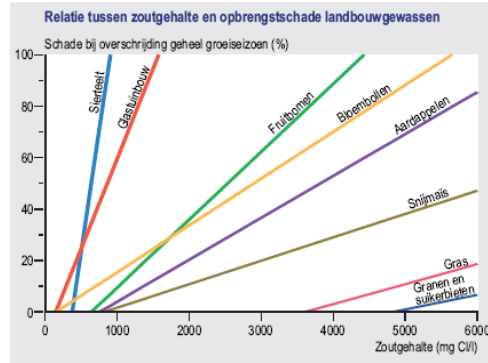


© TNO-NITG 2004



© TNO-NITG 2004

## G Zouttolerantie gewassen



### Zouttolerantie gewassen verschilt sterk

In onderstaande tabel staan de schadepercentages voor beregenen met brakwater.

gewassen	Chloridegehalten (mg/l)							Schade	
	300	600	900	1200	1500	1800	2100		2400
Gras									0%
Suikerbieten									1 - 9%
Koolzaad									10 - 19%
Granen									20 - 29%
Andijvie									30 - 39%
Asperge									40 - 49%
Broccoli									50 - 100%
Snijmais									
Bloemkool									
Kool									
Witlof									
Aardappel									
Tuinbonen									
Vlas									
Erwten									
Fruitbomen									
Uien									
Peen									
Lelie									
Tulp									
Gladiool									
Siersteit									

Figuur 53: a. Zoutschadefuncties voor landbouwgewassen (MNP, 2005); b. Zouttolerantie gewassen verschilt sterk (personal communication Lodewijk Stuyt, 2007).



## H Korte beschrijving MOCDENS3D

### MOCDENS3D

De softwarecode die gebruikt wordt voor dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld stoftransport is MOCDENS3D (Oude Essink, 1998, 2000; Vugt *et al.*, 2003). De code is gebaseerd op de volgende twee codes, die volledig geïntegreerd zijn: 1. MODFLOW (McDonald en Harbaugh, 1988) aangepast voor dichtheidafhankelijke grondwaterstroming, en 2. MOC3D (Konikow *et al.*, 1996) voor de verplaatsing van zoet, brak en zout grondwater. De code is een samenvoeging van state-of-the-art software op het gebied van zowel grondwaterstroming als stoftransport. Met MOCDENS3D is het mogelijk niet-stationaire stroming van zoet, brak en zout grondwater te modelleren. Deze code bestaat uit een module voor grondwater en een module voor stoftransport die aan elkaar gekoppeld zijn.

Voorafgaand is MOCDENS3D toegepast in een flink aantal zoet-zout studies in Nederland, zoals Project Groot Geohydrologisch Onderzoek Texel (in samenwerking met Witteveen+Bos, 2000), Project Het Zout der Aarde (verziltiononderzoek Hoogheemraadschap van Rijnland, in samenwerking met KIWA, 2005); bij de bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland (Minnema *et al.*, 2004 en Oude Essink *et al.*, 2008); de effectenberekening van Bodemdaling in Barradeel II, Friesland (Wetterskip Fryslân, 2005); bij de bepaling van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering, (Stuurman *et al.*, 2007), in de Zoet-zout studie Provincie Flevoland (Oude Essink *et al.*, 2008) en in het Deltares/WD Koploper Klimaat Werkpakket Watervoorziening (Hoogvliet *et al.*, 2008).

### Dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming

In het grondwatersysteem van de Provincie Zuid-Holland is de dichtheidsverdeling in de kustzone zodanig dat er rekening moet worden gehouden met het effect van dichtheidverschillen op de grondwaterstroming. Omdat zout grondwater zwaarder is dan zoet (of brak) grondwater, beïnvloedt het de stroming van water in de ondergrond. Zo kan zout grondwater in een natuurlijk hydrogeologisch systeem (dus zonder externe spanningen als onttrekkingen of peilverlagingen) door drukverschillen zoet grondwater wegdrücken (de welbekende zoutwater intrusie in watervoerende pakketten). Aan de andere kant kan zoet grondwater, doordat het lichter is, juist op het zoute grondwater blijven drijven en in grote mate een min of meer geïsoleerd grondwatersysteem in stand houden. Zo drijft in het Nederlandse duingebied zoet grondwater (dichtheid van 1000 kg/m<sup>3</sup>) op zout grondwater (dichtheid van ongeveer 1022 kg/m<sup>3</sup>), in de vorm van een zoetwaterlens.

### Correcties naar zoetwaterstijghoogte

Terwijl onder normale omstandigheden (d.w.z. met een dichtheid van zoet grondwater) gewerkt kan worden met 'gewone' stijghoogten, moet je in een situatie met zoet, brak en zout grondwater alles omrekenen naar drukken. Opgeloste stoffen in het grondwater verhogen namelijk de druk. De meeste hydro(geo)logen vinden het werken met stijghoogte echter prettiger. Daarom worden alle gemeten stijghoogten waar het grondwater niet zoet is gecorrigeerd voor de dichtheid. Om dit aspect mee te nemen moet de stijghoogte worden omgerekend naar een zogenaamde equivalente *zoetwaterstijghoogte*.

De zoetwaterstijghoogte is eigenlijk een fictieve parameter zonder fysische betekenis. De fysische interpretatie van zoetwaterstijghoogten patronen is niet gemakkelijk. Zo staan zoetwaterstijghoogten niet meer loodrecht op stroomlijnen als de dichtheid varieert, en betekent een gradiënt in zoetwaterstijghoogte niet automatisch dat er

stroming van grondwater optreedt. De noodzakelijke correcties voor de dichtheid kunnen significant zijn: een filterbuis gevuld met 20 m zout grondwater heeft een equivalente zoetwaterstijghoogte van 20.5 m: een verschil van 0.5m (Santing, 1980; Oude Essink, 2001).

#### Referenties:

- Hoogvliet *et al*, 2008 Koploper Klimaat Werkpakket Watervoorziening, 2008-U-R0434/A, 59p.
- KIWA (2005), Het zout der aarde: kwantificeren van de toekomstige vraag naar en beschikbaarheid van goed water voor Rijnland; onderzoeksrapport in opdracht van het Hoogheemraadschap van Rijnland.
- Konikow, L.F., D.J. Goode & G.Z. Hornberger (1996), A three-dimensional method-of-characteristics solute-transport model (MOC3D); U.S.G.S. Water-Resources Investigations Report 96-4267, 87 p.
- McDonald, M.G. & A.W. Harbaugh (1988), A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model; U.S.G.S. Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, 586 pp.
- Minnema, B., Kuijper, B., & Oude Essink, G.H.P., 2004, Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland, NITG 04-189-B, 86 p., Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond.
- Oude Essink, G.H.P. (1998), Simuleren van 3D dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming: MOCDENS3D. *Stromingen* 4(1): 5-23.
- Oude Essink, G.H.P. (2000), Zoutwaterintrusie in het grondwatersysteem van de Kop van Noord-Holland, Een toepassing van de driedimensionale computer code MOCDENS3D, *Stromingen*, 6(3), 9-21.
- Oude Essink, G. H. P. (2001). Density dependent groundwater flow: salt water intrusion and heat transport. Lecture notes, Utrecht University, Institute of Earth Sciences, The Netherlands, 136 p.
- Oude Essink, G.H.P. & R.J. Stuurman, (2006), Onderzoek naar de effecten van de Hoofdwegverbinding A6-A9 op zoet-zout grondwater nabij het Naardermeer, 2006-U-R0072/A, 37 p.
- Oude Essink, G.H.P., Baaren, E., van & Vliet, M. van, 2008, Verkennende studie klimaatverandering en verzilting grondwater in Zuid-Holland, Deltares-rapport 2008-U-R0322/A.
- Oude Essink, G.H.P., Louw, P., de, Baaren, E., van & Vliet, M. van, et al. 2008, Zoet-zout studie Provincie Flevoland, Deltares-rapport , 160 p.
- Santing, G. (1980). "Een probleem bij de stroming van zoet en zout grondwater: de correcties op de stijghoogten, (in Dutch)." *H2O* 13(22): 544-548.
- Stuurman, R. et al., 2007, Toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering, TNO rapport, concept, in opdracht van VROM, 81 p.
- Vugt, A., van, Oude Essink, G.H.P. & Biesheuvel, A. (2003), Modelleren van het zoet-zout grondwatersysteem op Texel, *Stromingen*, 9(1), 33-46.
- Wetterskip Fryslân (2005), Bodemdaling Barradeel II Inrichtingsplan, samenwerking tussen Arcadis en TNO.
- Witteveen & Bos (2000), Groot Geohydrologisch Onderzoek Texel; onderzoeksrapport in opdracht van Provincie Noord-Holland, Waterschap Hollands Kroon, Hoogheemraadschap van Uitwaterende Sluizen en Gemeente Texel.