

Verziltings- en verzoetingsprocessen in Nederland

Met speciale aandacht voor de Wieringermeerpolder

**Bachelorafsluiting Aardwetenschappen
(450027, 12 ECTS)**

Vrije Universiteit Amsterdam
Begeleider: Dr. V.E.A. Post

Uitgevoerd bij TNO-NITG
Begeleider: G.H.P. Oude Essink

01-02-2006

Elles Bader
Student nummer 1333453.



Inhoudsopgave

Abstract (Engels)	1
Abstract	2
1 Inleiding	3
2 Het gebied	5
2.1 Algemeen	5
2.2 Wieringermeer.....	5
- 2.1 Introductie	5
- 2.2 Geologische geschiedenis	6
- 2.3 Geo-hydrologische opbouw	7
- 2.4 Zoetwaterbel Hoorn	8
3 Methode	10
3.1 Chloride metingen	10
3.2 Stroombanen	11
- 2.1 Opzet	11
- 2.2 De berekeningen	13
3.3 Modeleren	16
- 3.1 Inleiding	16
- 3.2 Opzet model	17
4 Resultaten	20
4.1 Algemeen beeld Nederland	20
- 1.1 Waddeneilanden	20
- 1.2 Friesland	20
- 1.3 Groningen	22
- 1.4 Drente	22
- 1.5 Overijssel	23
- 1.6 Gelderland	23
- 1.7 Utrecht	23
- 1.8 Flevoland	24
- 1.9 Noord-Holland	24
- 1.10 Zuid-Holland	25
- 1.11 Zeeland	26
- 1.12 Noord-Brabant	28
- 1.13 Limburg	28
4.2 Wieringermeer	29
- 2.1 Spatiele variatie	30
- 2.2 Temporele variatie	31

4.3 Vergelijking van methoden	36
- 3.1 Inleiding	36
- 3.2 Resultaten vergelijking	36
- 3.3 Factoren die de correlatie beïnvloeden	38
- 3.4 Vergelijking Wieringermeer	40
4.4 Modeleren	43
- 4.1.1 Algemeen beeld model	43
- 4.1.2 Periode 1332 tot 1932	43
- 4.1.3 Periode 1932 tot 2001	46
- 4.1.4 Periode 2001 tot 2162	47
- 4.2.1 Vergelijking modeleerresultaten met meetgegevens	48
- 4.2.2 Algemeen beeld	48
- 4.2.3 Vergelijking met meetpunten	49
5 Conclusie, discussie en aanbevelingen	53
5.1 Conclusies	53
5.2 Discussie en aanbevelingen	54
Literatuurlijst	57

Abstract

The location and type of salinisation processes in the Netherlands, especially in the Wieringermeerpolder, have been investigated using chloride measurements. The computer programme MOCDENS3D has been used to create a two dimensional model of the groundwater movements in this area. The Wieringermeerpolder is a low lying polder which borders the Waddenzee, a saline estuary, in the north and the IJsselmeer in the east, a waterbody that now contains fresh water, but was a brackish estuary until 1932. A freshwater body, called the 'zoetwaterbel van Hoorn' is present in the southern part of the polder, which also influences the groundwater flow in the area.

The chloride measurements show the area of fresh water extends into the polder, covering most of the southern half of the area. After the reclamation of the polder in the early 1930's the northern part of the freshwater body has become more saline due to groundwater flow from the east. The freshening of the IJsselmeer water can be observed in the measurements taken at shallow depths from the polder area close to the IJsselmeer, which show a decreasing salinity of the groundwater since 1932.

A cursory analysis of the salinisation processes in the Netherlands shows the greatest changes in salinity appear in the coastal areas, which are largely below sea level. Salinisation and freshening of the groundwater occur approximately to the same extent.

A comparison of two salinisation analysing methods (chemical analysis of cation exchange reactions vs. chloride measurements) shows that there is no correlation between their results. The possible reasons for this disagreement are discussed in this report.

Abstract

Aan de hand van chloride metingen is onderzoek gedaan naar verziltings- en verzoetingsgebieden in Nederland, in het bijzonder in de Wieringermeerpolder. Met behulp van het programma MOCDENS3D is tevens een twee dimensionaal model opgesteld van de grondwaterstroming in dit gebied. De diepgelegen polder grenst aan het IJsselmeer en de Waddenzee, en staat ook onder invloed van de zoetwaterbel van Hoorn. Aan de chloride metingen is te zien is dat de zoetwaterbel bijna de gehele zuidelijke helft van de het gebied beslaat. Na de inpoldering is door grondwaterstroming vanuit het oosten het noordelijk deel van de zoetwaterbel verzilt. De verzoeting van het IJsselmeer na de aanleg van de afsluitdijk is te merken aan de verzoeting van het ondiepe grondwater in het gebied langs de IJsselmeerdijk.

Een analyse van de verziltings patronen in heel Nederland wijst uit dat in de kustprovincies, die grotendeels onder zeeniveau liggen, de grootste verzilting en verzoeting plaatsvindt. Deze processen vinden ongeveer in gelijke mate plaats.

Door twee verzoetings/verziltings analyse methoden met elkaar te vergelijken (chemische analyse van kation-uitwisselingsprocessen met chloride meetreeksen) kan worden gesteld dat deze twee methoden slecht met elkaar overeenkomen. De mogelijke oorzaken voor deze slechte correlatie worden besproken.

Hoofdstuk 1 - Inleiding

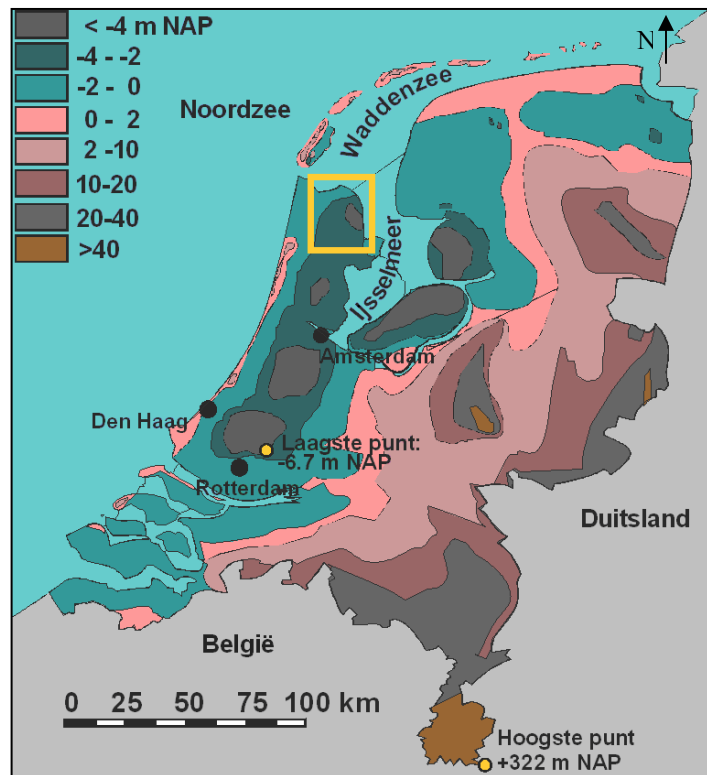
Door een combinatie van de ligging onder zeeniveau en een stijgende zeespiegel zal Nederland in de toekomst steeds meer met verzilting van het grondwater te maken krijgen. In sommige gebieden is dit al duidelijk te merken, doordat een hoog zoutgehalte de groei van gewassen beïnvloedt en consequenties heeft voor de drinkwaterwinning. Toch zijn er ook gebieden waar het grondwater zoeter is geworden. Door het patroon van verzoeting en verzilting beter te leren begrijpen kunnen de oorzaken van verzilting beter worden aangepakt.

In het onderzoek is aan de hand van 146.459 chloride metingen uit heel Nederland (directe concentratie metingen en uit VES (vertical electric sounding) metingen afgeleide concentraties) een beeld geschapen van de gebieden waar verzoeting of verzilting optreedt. Hierbij is bijzondere aandacht gevestigd op de Wieringermeerpolder, een gebied in de kop van Noord-Holland dat in 1930 is drooggelegd (zie figuur 1.1). Deze polder is gekozen vanwege de relatief simpele geohydrologische opbouw van het gebied.

Diepe polders, zoals de Wieringermeerpolder, trekken door de lage stijghoogte diep grondwater aan, waardoor veel kwel optreedt. Doordat in dit grondwater veel zouten zijn opgelost, is de verwachting dat deze diepe polders zullen verzilten. Een ander patroon dat verwacht wordt is dat langs de grens tussen polders een hooggelegen (zoete) plassen verzoeting optreedt, aangezien het water hier een korte, ondiepe stroombaan af zal leggen.

Door analyse van de chloride metingen is nagegaan of deze vooronderstellingen juist zijn, en is een ruimtelijk beeld ontstaan van de verzoetings en verziltings patronen in de polder. Het gebied is ook gebruikt voor het opstellen van een model, waarin de toekomstige ontwikkelingen gevisualiseerd konden worden.

In dit verslag zal in hoofdstuk 2 eerst dieper worden ingegaan op de geologische geschiedenis en de geo-hydrologische opbouw van de Wieringermeerpolder. Hierna wordt een overzicht gegeven van de gebruikte gegevens en programma's (hoofdstuk 3), waarna de resultaten in hoofdstuk 4 worden besproken. Tenslotte worden enkele conclusies getrokken in hoofdstuk 5.



Figuur 1.1. Hoogtekaart van Nederland met de locatie van de Wieringermeerpolder (Oude Essink, 2002).

Het onderzoek werd uitgevoerd in het kader van de bachelorafsluiting van de opleiding Aardwetenschappen op de Vrije Universiteit te Amsterdam gedurende een stage in de periode van 18 april tot 10 juni 2005 bij TNO-NITG te Utrecht. Vanuit de Vrije Universiteit werd de begeleiding gedaan door Vincent Post, en vanuit TNO-NITG door Gualbert Oude Essink. Bij deze wil ik mijn begeleiders hartelijk bedanken voor de hulp bij het uitvoeren van het onderzoek en TNO-NITG voor de toegang tot de nodige data en de mogelijkheid deze uit te werken.

Hoofdstuk 2 - Gebiedsbeschrijving

2.1 Algemeen

Nederland kan globaal worden ingedeeld in een deel dat boven zeeniveau ligt, en een deel dat lager ligt. Het westelijk deel van Nederland, dat grenst aan de Noordzee, ligt hoofdzakelijk beneden zeeniveau. Nederland is opgebouwd uit sedimenten die tijdens het Tertiair en Kwartair in het dalingsbekken van de Noordzee zijn afgezet. Het zijn hoofdzakelijk fluviaatiele afzettingen, maar ook glaciale en mariene afzettingen komen voor. De geohydrologische opbouw van Nederland kan heel globaal worden onderverdeeld in een aantal waterhoudende pakketten, met tussenliggend enkele slecht doorlatende lagen, die lateraal discontinu zijn.

De verdeling van het zoete en zoute grondwater in de ondergrond van de kustgebieden van Nederland is hydrologisch gezien niet in evenwicht. Tijdens transgressies in het Holoceen is het zoute zeewater op goed doorlatende plaatsen in de ondergrond gedrongen, waardoor de Pleistocene afzettingen zijn verzilt. Tijdens de transgressie tussen 8000 en 3800 jaar geleden hebben getijdengeulen zich in het basisveenlandschap gesneden. Deze getijdengeulen zijn op sommige plaatsen door de afdekkende kleilagen heengedrongen, waardoor hier het zeewater in de ondergrond is geïnfiltrerd. Ten gevolge van het ontstaan van duingebieden langs de kust werd het binnenland meer beschermd en heeft het veengebied zich uit kunnen breiden. In deze periode zijn onder andere enkele kleilagen afgezet. Hierdoor was de ondergrond tijdens de volgende transgressie enigszins beschermd tegen het zeewater (Post, 2004 en Beekman en Appelo, 1989). De meest recente ontwikkeling in het gebied was de inpoldering in 1930.

2.2 Wieringermeer

Als onderzoeksgebied van het uitgebreidere onderzoek is voor de Wieringermeerpolder gekozen, omdat dit gebied een relatief simpele geologische opbouw en duidelijke recente geschiedenis kent. De omgeving van de polder is de laatste paar honderd jaar tot de inpoldering niet veranderd, waardoor de veronderstelling kan worden gedaan dat er voor de inpoldering een stabiele situatie heerste. De veranderingen in de grondwaterstroming na de inpoldering kunnen dus geheel aan de inpoldering van de Wieringermeer en de verzoeting van het IJsselmeer worden toegeschreven.

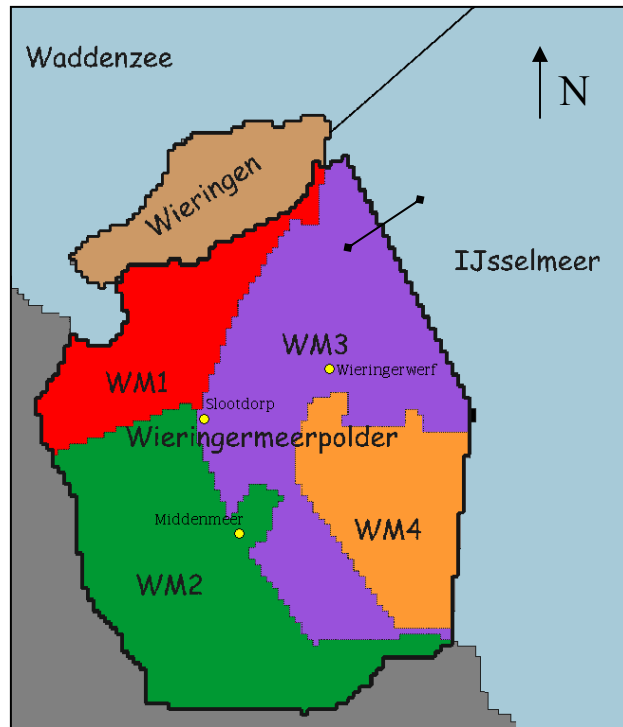
2.2.1 Introductie

De Wieringermeerpolder is een van de grootste polders van Nederland en heeft een oppervlakte van ongeveer 200 km². De hoogte van de polder varieert tussen de 6 meter onder NAP in het zuidoosten tot 1 meter boven NAP op de terp bij Wieringerwerf (met uitzondering van de dijken).

In figuur 2.1 is te zien dat de polder is opgedeeld in vier deelgebieden (WM1 - WM4) op basis van de bemalingseenheid. De vier bemalingseenheden hebben elk verschillende samenstellingen en eigenschappen van het oppervlaktewater (Hoogheemraadschap van uitwaterende sluizen in Hollands Noorderkwartier, 1996).

In de periode na de drooglegging in 1930 werd het land in gebruik genomen, voornamelijk voor akkerbouw. Er zijn enkele dorpen aanwezig in het gebied. De grootste dorpen zijn Wieringerwerf, Middenmeer en Slootdorp. In het begin van de jaren '30 werd ook de afsluitdijk aangelegd, waardoor het IJsselmeer ontstond. Deze afscheiding werd in 1932 voltooid. Door de afsluiting van zee is het IJsselmeer in de loop der tijd verzoet.

In 1936 is door de dienst der Zuiderzeewerken in samenwerking met het rijksbureau voor drinkwatervoorziening een uitgebreid rapport geschreven over de geo-hydrologische gesteldheid van de Wieringermeer (Dienst der Zuiderzeewerken i.s.m. het rijksbureau voor drinkwatervoorziening, 1936). Dit rapport is tijdens dit onderzoek erg waardevol gebleken, omdat het de opbouw van het gebied en de zoet-zout verdeling in 1932 goed beschrijft.



Figuur 2.1. Kaart van de Wieringermeerpolder en omgeving. De vier deelpolders en de grootste dorpen zijn aangegeven (Oude Essink, 2002).

2.2.2 Geologische geschiedenis/stratigrafie

Het gebied rond de Wieringermeer heeft over het algemeen dezelfde geologische geschiedenis als de rest van West Nederland. De opvulling van dit dalingsbekken heeft een basis van mariene kleien en fijne zanden uit het Tertiair. Deze afzettingen zijn voor dit onderzoek niet beschouwd, aangezien tijdens het eind Tertiair en begin Kwartair een kleilaag is afgezet die door zijn slechte doorlatendheid als basis van het hydrologisch pakket kan worden beschouwd. Deze kleilaag behoort tot de Formatie van Oosterhout.

De bovenliggende sedimenten zijn net als de Formatie van Oosterhout afgezet in een marien milieu. Deze afzettingen behoren tot de Formatie van Maassluis en bestaan voornamelijk uit schelphoudende kleien, fijne slibhoudende zanden en matig slibhoudende grove zandlagen.

Tijdens het Tiglien kwam het gebied boven zeeniveau te liggen, waardoor tijdens het einde van het Tiglien, het Eburonien, het Waalien en het Menapien fluviaatiele sedimenten af zijn gezet. De rivieren die deze sedimenten hebben aangevoerd waren in het noorden van Nederland vooral afkomstig uit het oosten en noordoosten. Deze Formatie van Peize bestaat voornamelijk uit grofzandige en grindhoudende materiaal met een dunne kleilaag als basis.

Tijdens het Cromerien zijn de Formaties van Sterksel en Urk afgezet. Deze fluviaatiele grove zanden en gronden (met lokaal enkele fijnzandige lagen) zijn afkomstig

uit de aanvoergebieden van de Rijn en de Maas, die in deze periode de rol van de oostelijke rivieren overnamen.

De glaciële afzettingen die zijn afgezet tijdens het Elsterien worden gerekend tot de Formatie van Peelo en bestaan uit fijne zand en kleilagen (potklei). Deze formatie komt niet overal in het onderzoeksgebied voor.

Tijdens de Saale IJstijd zijn diepe gletsjer bekkens uitgesleten in Noord-Holland. Deze gletsjer tongen hebben de aanwezige sedimenten opgestuwd, wat er in het noordelijk deel van de Wieringermeerpolder toe heeft geleid dat deze Formatie van Drente niet is afgezet. De sedimenten zijn opgestuwd tot het voormalige eiland Wieringen, waar een pakket kleileem van maximaal 20 m te vinden is. In het zuidelijk deel van de Wieringermeerpolder is tijdens deze periode bekkenklei afgezet.

De zeespiegelstijging ten gevolge van het afsmelten van het landijs zorgde ervoor dat in het Eemien het grootste deel van Noord-Holland door de Eemzee bedekt was. In het noordwestelijke deel van de Wieringermeerpolder en op Wieringen zijn uit deze periode echter geen mariene afzettingen gevonden, wat er mogelijk op wijst dat de Eemzee deze gebieden niet bedekt heeft.

Het landijs bereikte tijdens het Weichselien Nederland niet, maar de glaciële invloed is af te leiden uit de afzetting van eolische dekzanden die de Formatie van Boxtel vormen.

Tenslotte is in het Holoceen de zee weer gestegen en zijn verschillende formaties afgezet. De formaties die in de Wieringermeerpolder voorkomen zijn een dunne veenlaag (basisveen, Formatie van Nieuwkoop) en een klei en zandpakket (Formatie van Naaldwijk).

Deze beschrijvingen zijn opgesteld op basis van de rapporten van het ICW (1982) en Grontmij (2001), waarna de formatienamen zijn bijgevoegd met behulp van de lithostratigrafische nomenclator van de ondiepe ondergrond van TNO-NITG (2003).

2.2.3 Geo-hydrologische opbouw

Het geo-hydrologische belang van de verschillende stratigrafische eenheden hangt onder andere af van de doorlatendheid. Voor watervoerende pakketten en goed doorlatende lagen is vooral de horizontale grondwaterstroming van belang. Hiervoor wordt de horizontale doorlatendheid (k_h [m/d]) gebruikt. Voor scheidende, slecht doorlatende lagen is de verticale grondwaterstroming het belangrijkste proces. Deze wordt gekenmerkt door de verticale hydraulische weerstand (c-waarde [dagen]) van de slecht doorlatende laag.

In de Wieringermeerpolder zijn de volgende geo-hydrologische eenheden te onderscheiden (Grontmij, 2001):

1. *Holocene deklaag*

Deze slecht doorlatende laag wordt gevormd door de afzettingen van de Westland Formatie. De verticale hydraulische weerstand hangt af van de dikte van de deklaag en varieert tussen de 170 dagen (in het noordelijk deel van de polder, dikte deklaag 1 m) en 10.000 dagen (in het zuiden, dikte deklaag 20 m).

2. *Eerste watervoerend pakket*

Dit goed doorlatende pakket bestaat uit de zandige afzettingen behorend tot de Eem Formatie en de Formatie van Boxtel. De dikte varieert tussen de 10 en 25 meter. De

horizontale doorlatendheid is 15 m/d. De basis van dit pakket wordt gevormd door de Formatie van Drente. Deze formatie komt in het noordelijk deel van het gebied alleen voor langs een rand tegen Wieringen aan, waardoor het watervoerend pakket in het grootste deel van het noordelijk deel van het gebied samengaat met het tweede watervoerend pakket.

3. *Eerste scheidende laag*

De afzettingen waar deze slecht doorlatende laag uit bestaat, behoren tot de Formatie van Drente. In het uiterste noorden van de Wieringermeerpolder (en op het eiland Wieringen) is keileem afzet, terwijl het zuidelijk deel van de polder bekkenklei als afscheiding heeft. De verticale hydraulische weerstand van het keileem hangt af van de dikte van de laag, en varieert tussen de 2000 dagen (voor een laagdikte van 15 m) tot 20 dagen (laagdikte 1 meter). De bekkenklei heeft ongeveer een vaste laagdikte van 10 m, met een bijbehorende c-waarde van 2000 dagen.

4. *Tweede watervoerend pakket*

Dit goed doorlatende pakket wordt gevormd door de afzettingen van de Formaties van Harderwijk, Enschede, Sterksel en Urk. De dikte varieert tussen de 290 en 340 meter, met een geleidelijke toename in de dikte naar het zuiden toe. De horizontale doorlatendheid van dit pakket is 40 m/d.

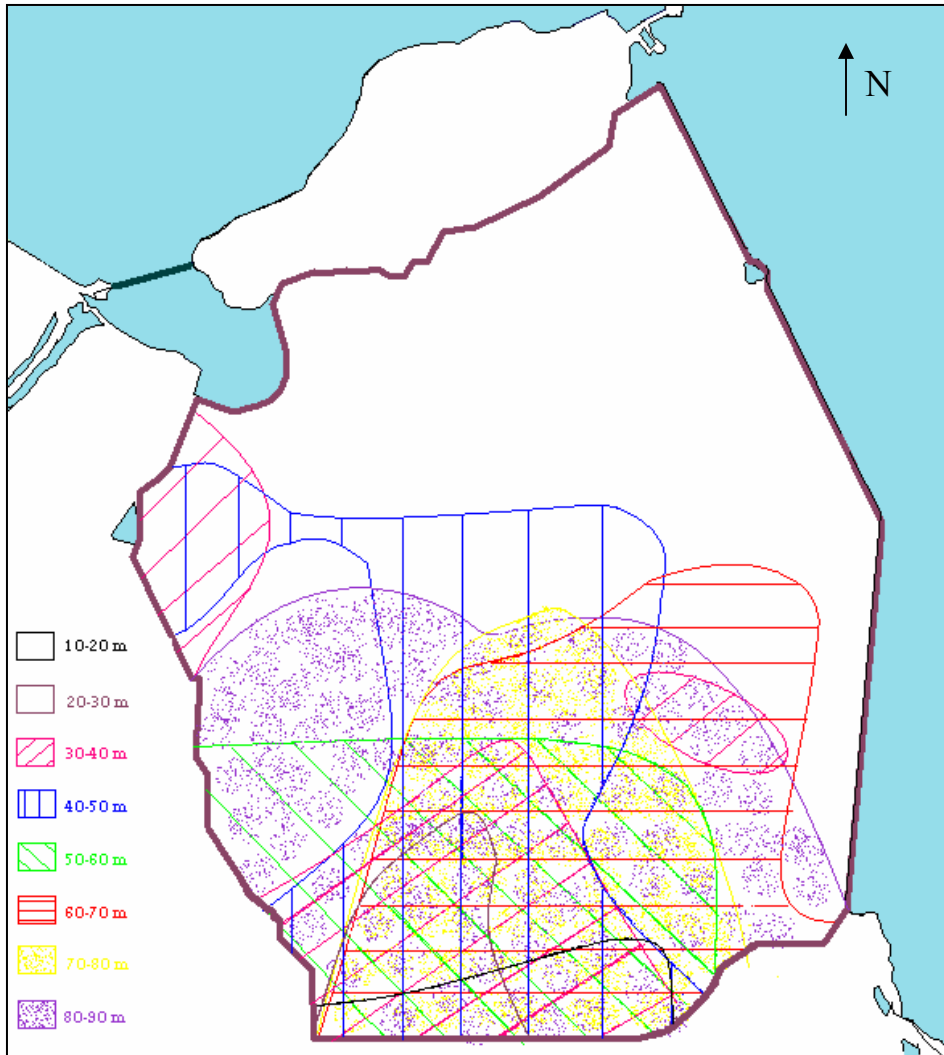
2.2.4 Zoetwaterbel Hoorn

De zoetwaterbel van Hoorn bevindt zich voornamelijk buiten het onderzoeksgebied en beslaat een groot deel van de zuidelijke helft van de Wieringermeerpolder. Het zoetwaterlichaam heeft de grootste verbreiding tussen 35 en 45 meter onder NAP, wat ook in de chloride metingen terug is te zien. In de Wieringermeer is echter ook op grotere dieptes een zoetere zone te zien. Figuur 2.2 is gemaakt op basis van de chloride gegevens (zie hoofdstuk 4.2.2).

Er zijn verschillende theorieën over het ontstaan van de zoetwaterbel. Eén theorie houdt rekening met de geulen in de Holocene getijdenafzettingen, die beter doorlaatbaar zijn. In het veengebied wat vanaf 3000 jaar geleden op deze locatie lag, heeft zoet water makkelijk kunnen infiltreren en heeft zo de zoetwaterlens gevormd. Het landoppervlak lag in deze tijd ongeveer 1,5 meter boven zeeniveau (Beekman en Appelo, 1989).

Een andere verklaring is dat het zoete water in de perioden voor het Eemien is geïnfiltrerd, waarna tijdens het Eemien afdekkende lagen zijn afgezet die het zoete water beschermden tegen infiltratie van het zeewater. Vanuit het westen is het zeewater echter wel binnengedrongen, waardoor de zoetwaterbel zijwaarts is gaan stromen en zich zo heeft uitgebreid (ICW, 1982). Het onderzoek van Beekman en Appelo (1989) naar de ouderdom van de zoetwaterbel op basis van ¹⁴C metingen heeft uitgewezen dat het grondwater enkele honderden jaren oud is en de bel zich in korte tijd heeft gevormd. Deze conclusie geeft aan dat de tweede theorie in ieder geval niet juist is en dat de geomorfologie van het gebied van belang zou kunnen zijn. Helaas zijn er geen gegevens beschikbaar over de exacte locaties van de Holocene getijdengeulen.

De kern van de zoetwaterbel ligt op dit moment in het gebied ten zuiden van de Wieringermeer. Deze regio ligt relatief hoog, waardoor zich hier waarschijnlijk het huidige infiltratiegebied voor de zoetwaterbel bevindt.



Figuur 2.2. Locatie en dieptes van zoet tot zwak brak grondwater in de Wieringermeerpolder.

Hoofdstuk 3 - Methode

3.1 Chloride metingen

Bij dit onderzoek is gebruikt gemaakt van chloride metingen uit de DINO database van het TNO-NITG. In deze dataset waren 80.813 chloride metingen beschikbaar waarvan de diepte bekend was. Ook zijn 65.646 VES metingen (Verticale Elektrische Sonderingen) gebruikt waar de omzetting naar de chloride gehalten van het grondwater op verschillende dieptes al was berekend. Er zijn 7783 punten die twee of meerdere keren zijn gemeten en die een meetreeks vormen. Deze meetreeksen zijn belangrijk voor het bepalen van de verzilting of verzoetings trend, omdat ze op dezelfde plek zijn gemeten en het gemeten verschil geen ruimtelijke oorzaak kan hebben. De metingen zijn over heel Nederland verspreid en hebben een tijdsperiode van 135 jaar (van 1867 tot 2002).

Om de gegevens te combineren met de diepte waarop ze waren gemeten en bij het maken van de meetreeksen zijn Pascal codes gebruikt. Het programma dat gebruikt is om de codes uit te voeren is Bloodshed Dev-Pascal 1.9.

De metingen die niet in een reeks vallen, de meest recente metingen uit de meetreeksen en de VES metingen zijn gezamenlijk gebruikt om een hedendaags beeld te scheppen van de verdeling van de chloride concentraties. Dit is gedaan met behulp van de inverse distance weighting (IDW) techniek die de chloride concentraties in de meetpunten interpoleert tot een dekkend vlak. Bij de IDW techniek hebben punten die dichtbij liggen de grootste invloed. De betrouwbaarheid van deze methode neemt dan ook toe met de dichtheid van de meetpunten. De parameter 'macht' bepaalt tot hoever metingen invloed kunnen uitoefenen. Deze interpolatiemethode is een van de functies van het programma ArcMap, dat deel uitmaakt van het pakket ArcGIS dat gebruikt is om de punten te analyseren. Deze techniek is gebruikt omdat uit tests is gebleken dat dit de beste resultaten oplevert.

De parameters die gebruikt zijn voor de IDW berekening zijn gegeven in tabel 3.1. Aangezien de interpolatie geen rekening houdt met de diepte waarop de metingen zijn gedaan, is de dataset opgedeeld in lagen van vijf tot twintig meter dik. De diktes van de lagen is afhankelijk van het aantal metingen en is ingedeeld in; metingen boven NAP, metingen van NAP tot NAP -5, van -5 tot -10, tot -20, tot -30, tot -40, tot -50, tot -60, tot -70, tot -80, tot -90, tot -110, tot -130, tot -150, tot -170, tot -190, tot -220, tot -260 en metingen van dieper dan 260 meter onder NAP. Per laag zijn alle gegevens geselecteerd die tussen deze diepten zijn gemeten, waarna per laag de interpolatie is uitgevoerd. Op deze manier is een redelijk goed drie dimensionaal beeld ontstaan van de spatiale variaties in de chloride concentratie. In totaal zijn 90.441 metingen, verdeeld over negentien lagen, voor deze operatie gebruikt.

Methode	Ordinary (geen trend)
Zoekradius type	variabel
Aantal punten	3
Maximale afstand	15000 meter
Grootte uitkomstcel	250*250
Macht	5

Tabel 3.1. Gebruikte parameters voor de IDW interpolatie.

Bij de beschrijving van de chloride concentraties zijn de volgende benamingen gebruikt: zoet (Cl concentratie < 300 mg/l), zwak brak (300 < Cl < 2500 mg/l), matig brak (2500 < Cl < 7500 mg/l), sterk brak (7500 < Cl < 10.000 mg/l) en zout (Cl > 10.000 mg/l).

3.2 Berekening stroombanen

3.2.1 Opzet

Voor het berekenen van de afstand die het IJsselmeerwater sinds 1930 heeft afgelegd zijn enkele scenario's opgesteld die in deel 3.2.2 gepresenteerd worden. De veronderstellingen en formules die tijdens de berekeningen gebruikt zijn, worden hier gegeven. Bij deze berekeningen moet worden opgemerkt dat dichtheidsverschillen niet worden meegenomen, wat de resultaten nog behoorlijk kan beïnvloeden. De berekeningen met dichtheidsverschillen zijn echter te complex om zonder computer programma uit te voeren.

In de berekeningen is van de volgende vooronderstellingen uitgegaan:

- De stroming door de watervoerende lagen is horizontaal
- De stroming door de slecht doorlatende lagen is verticaal
- Er is geen verschil in opslag (behoud van massa)
- De anisotropie (k_h/k_v) is 0,33
- De porositeit is 30 %
- De horizontale doorlatendheid van de eerste watervoerende laag is 15 m/d
- De horizontale doorlatendheid van de tweede watervoerende laag is 40 m/d
- De formule voor het berekenen van de hydraulische weerstand van de deklaag is: $c = 50 + 100 D_d + 20 D_d^2$ (Grontmij, 2001) met D_d = dikte van de deklaag
- De hydraulische weerstand van de eerste scheidende laag is 2000 d
- De relatie tussen stijghoogte en diepte in de (bovenste) watervoerende laag is gegeven door: $\Phi = \Phi_{.25} + 0.3125 + 0.0125 h$, met $\Phi_{.25}$ = stijghoogte op een diepte van 25 m onder NAP, Φ = stijghoogte (L) en h = hoogte t.o.v. NAP (L).
Deze formule is afgeleid uit figuur 15 en 16 uit de bijlage van het geohydrologisch onderzoek Wieringerrandmeer (Grontmij, 2001), die respectievelijk de stijghoogten op NAP – 25 m en NAP – 65 weergeven.
- Een jaar heeft een gemiddelde duur van 365,25 dagen.

De gebruikte lengte-eenheid is meter en de tijdseenheid is dagen. Voor het opstellen van de formules is het dictaat van Van Dam (1988) geraadpleegd. De volgende formules zijn bij de berekeningen gebruikt:

Om de effectieve verticale snelheid te berekenen (voor de slecht doorlatende laag):

$$(1) \quad v_{\text{veff}} = q_z/n_e, \text{ waar } q_z = \Delta\Phi/c \text{ en } c = D_s/k_v$$

v_{veff} = effectieve verticale snelheid [LT^{-1}]

q_z = filtersnelheid [LT^{-1}]

- n_e = effectieve porositeit [-]
- $\Delta\Phi$ = verschil in stijghoogte tussen boven en onderkant laag [L]
- c = hydraulische weerstand [T]
- D_s = dikte slecht doorlatende laag [L]
- k_v = verticale doorlatendheid [LT^{-1}]

Om de effectieve horizontale snelheid te berekenen (voor de watervoerende laag):

$$(2) \quad v_{heff} = k_h \Delta\Phi / \Delta x n_e$$

- v_{heff} = effectieve horizontale snelheid [LT^{-1}]
- k_h = horizontale doorlatendheid [LT^{-1}]
- $\Delta\Phi$ = verschil in stijghoogte tussen infiltratie- en kwelgebied [L]
- Δx = afstand tussen infiltratie- en kwelgebied [L]
- n_e = effectieve porositeit [-]

Om te berekenen hoeveel tijd een waterpakket nodig heeft om een bepaalde afstand te overbruggen:

$$(3) \quad t_{vinf} = D_{sinf} / v_{veffinf}, \quad t_{vkwel} = D_{skwel} / v_{veffkwel} \quad \text{en} \quad t_h = \Delta x / v_{heff}$$

Waar de toevoeging $_{inf}$ en $_{kwel}$ de waarde op respectievelijk de infiltratie- en kwellocatie aangeeft.

De totale tijd die nodig is voor infiltratie, verplaatsing en kwel overeenkomt met:

$$(4) \quad t_{tot} = t_{vinf} + t_h + t_{vkwel}$$

Om het verloop van de stijghoogte in het watervoerende pakket te berekenen met toenemende afstand van de dijk (punt van verschil in hoogte grondwaterspiegel):

$$(5) \quad \Phi = \Phi_0 e^{-x/\lambda}, \quad \text{waar} \quad \lambda = \sqrt{c k_h D_w} \quad \text{en} \quad c = D_s / k_v$$

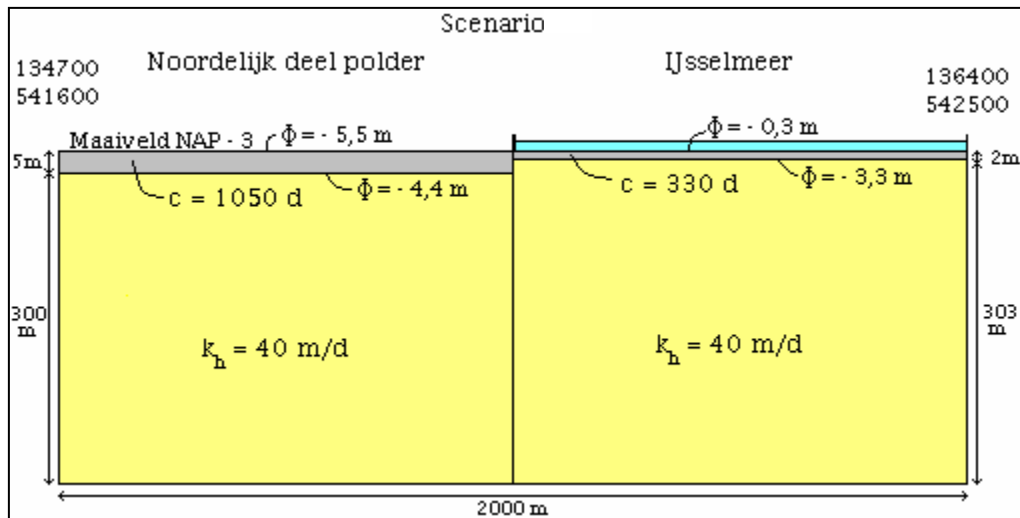
- Φ = stijghoogte van het diepe grondwater t.o.v. het polderpeil [L]
- Φ_0 = stijghoogte bij de dijk [$x = 0$] [L]
- x = afstand tot de dijk [L]
- λ = karakteristieke lengte [L]
- c = hydraulische weerstand slecht doorlatende laag [T]
- k_h = horizontale doorlatendheid [LT^{-1}]
- k_v = verticale doorlatendheid [LT^{-1}]
- D_w = dikte watervoerende laag [L]
- D_s = dikte slecht doorlatende laag [L]

Doordat de kwel volgens (1) gerelateerd is aan het verschil in stijghoogte, volgt uit (5) dat kwel het grootst is dicht bij het punt van verschil in de hoogte van de grondwaterspiegel (zoals langs de IJsselmeerdijk), en afneemt naarmate het verschil in

stijghoogte afneemt, zoals in de centrale delen van een polder. Uiteraard is dit een algemene conclusie, die niet per se op de hele Wieringermeerpolder toegepast kan worden.

3.2.2 De berekeningen

Het scenario dat is gekozen voor de berekeningen is het meest simpele scenario, dat de snelste route aangeeft. Het water infiltreert door de deklaag van het IJsselmeer en stroomt aan de top van het watervoerend pakket naar de polder, waar het als kwel uittreedt. De locatie is gekozen in het noordelijke deel van de Wieringermeerpolder, waar geen andere slecht doorlatende laag aanwezig is dan de deklaag. Als punt van infiltratie is gekozen voor punt $x=136400$ $y=542500$; 1000 meter vanaf de IJsselmeerdijk. Als kwel locatie is punt $x=134700$ $y=541600$ gekozen; 1000 meter de polder in, loodrecht vanaf de dijk. Dit is aangegeven in figuur 2.1 met de zwarte lijn, loodrecht op de IJsselmeerdijk. In figuur 3.1 is de schematische opbouw van het gebied weergegeven. De opbouw van het IJsselmeer is overgenomen uit de geologische en bodemkundige atlas van het IJsselmeer (Rijkswaterstaat, 1993).



Figuur 3.1. Schema van de opbouw van het gebied.

De gebruikte parameters zijn (in aanvulling op de parameters gegeven in deel 3.2.1);

$\Phi_{\text{IJsselmeer}}$	= - 0,3 m
$\Phi_{\text{top wvp IJsselmeer}}$	= - 3,3 m
Φ_{Polder}	= - 5,5 m
$\Phi_{\text{top wvp polder}}$	= - 4,4 m
dikte waterv. pakket	= 300 m
dikte deklaag polder	= 5,0 m
dikte deklaag IJsselm.	= 2,0 m
k_h waterv. pakket	= 40,0 md^{-1}
c deklaag polder	= 1050 d
c deklaag IJsselmeer	= 330 d
x	= 2000 m

In de werkelijkheid varieert de stijghoogtesprong over de slecht doorlatende laag in de polder met de afstand tot de dijk en varieert ook onder het IJsselmeer. Hier zijn echter de waarden gekozen die bij de berekeningen de snelste doorstroming als resultaat geven.

De berekeningen worden nu:

$$v_{\text{veffinf}} = (-0,3 - -3,3)/330/0,3 = 0,030 \text{ m/d} \quad \text{en} \quad t_{\text{vinf}} = 2/0,030 = 66,7 \text{ dagen}$$

$$v_h = (40*(-3,3 - -4,4))/2000*0,3 = 0,073 \text{ m/d} \quad \text{en} \quad t_h = 2000/0,073 = 27272,7 \text{ dagen}$$

$$v_{\text{veffkwel}} = (-4,4 - -5,5)/1050/0,3 = 0.0035 \text{ m/d} \quad \text{en} \quad t_{\text{vkwel}} = 5/0.0035 = 1428,6 \text{ dagen}$$

$$t_{\text{tot}} = 28768 \text{ dagen} = 78,8 \text{ jaar.}$$

Deze uitkomst kan ook gebruikt worden om in te schatten hoe lang het duurt voordat het water 2000 meter de polder in uitkwelt. Dit water is dan vlak naast de dijk in het IJsselmeer geïnfiltrerd. De berekening hoeft dan niet te worden aangepast want x is nog steeds 2000 meter, en de stijghoogtegradiënt is ongeveer constant in deze regio.

Aangezien de berekende grondwaterstroming in de top van het watervoerend pakket plaats vindt is ter vergelijking de berekening van v_h opnieuw uitgevoerd, nu met een k_h waarde van 15 m/d. Al wordt bij het ontbreken van een scheidende laag uitgegaan van een k_h waarde van 40 m/d voor het gehele watervoerend pakket, is het aannemelijk dat de top van dit pakket een lagere k_h zal hebben, overeenkomstig met de k_h waarde in het eerste watervoerend pakket. De berekening wordt in dit geval:

$$v_h = (15*(-3,3 - -4,4))/2000*0,3 = 0,0275 \text{ m/d} \quad \text{en} \quad t_h = 2000/0,0275 = 72727,2 \text{ dagen}$$

$$t_{\text{tot}} = 74223 = 203,2 \text{ jaar}$$

Deze uitkomst is meer dan 2,5 keer zo groot als bij een k_h waarde van 40 m/d. Voor een betrouwbare inschatting is het dus belangrijk een nauwkeurige waarde voor k_h te verkrijgen.

Naast het berekenen van de tijd met de afstand als bekende kan uiteraard ook een omgekeerde berekening worden uitgevoerd, waarbij de verstreken tijd bekend is en de afstand die het water in deze tijd heeft afgelegd berekend moet worden. In dit geval is de maximale afstand die is afgelegd van belang. Op deze manier kan de invloed van het zoete IJsselmeerwater op de Wieringermeerpolder worden uitgerekend. Het is vooral interessant om te weten wat de maximale afstand is die het water in een bepaalde tijd heeft afgelegd. Voor deze berekening kan de opzet van het oorspronkelijke scenario (dat immers de snelste route aangeeft) worden gebruikt, met enkele aanpassingen.

Ten eerste moet een stijghoogtegradiënt in horizontale richting worden vastgesteld. In de richting van het profiel van het oorspronkelijke scenario (ongeveer NEE - SWW) is de stijghoogte gradiënt in het (eerste) watervoerend pakket -1 meter stijghoogte per 1850 meter (richting het centrale deel van de Wieringermeer). De stijghoogte gradiënt $\Delta\Phi/\Delta x$ is dus $-5,4 * 10^{-4}$ [-].

De formule om de afgelegde afstand te berekenen wordt dan:

$$(6) \quad \Delta x = ((t_{\text{tot}} - t_{\text{vinf}} - t_{\text{vkwel}}) * k_h * -5,4 * 10^{-4}) / n_e$$

In hoofdstuk 4.2 wordt de afstand die het IJsselmeerwater in de afgelopen 70 jaar heeft afgelegd berekend. t_{tot} is dus 25.567,5 dagen. Uitgaande van eenzelfde situatie als in scenario 1 wordt de berekening:

$$\Delta x = ((25567 - 66,7 - 1428,6) * 40 * -5,4 * 10^{-4}) / 0,3 = 1733,2 \text{ meter.}$$

De maximale afstand die het IJsselmeerwater sinds 1935 heeft afgelegd kan nu worden gesteld op ongeveer 1750 meter.

Ook wordt de afstand berekend die het water lateraal af heeft kunnen leggen tussen 1931 en 1957. t_{tot} is nu 9.496,5 dagen. Aangezien alleen de horizontale beweging hoeft te worden berekend kunnen t_{vinf} en t_{vkwel} op nul gesteld worden. De berekening voor de afgelegde afstand wordt dan:

$$\Delta x = ((9496,5 - 0 - 0) * 40 * -5,4 * 10^{-4}) / 0,3 = 683,7 \text{ meter.}$$

De maximale afstand die het water in 26 jaar horizontaal heeft afgelegd is dus ongeveer 700 meter.

3.3 Modeleren

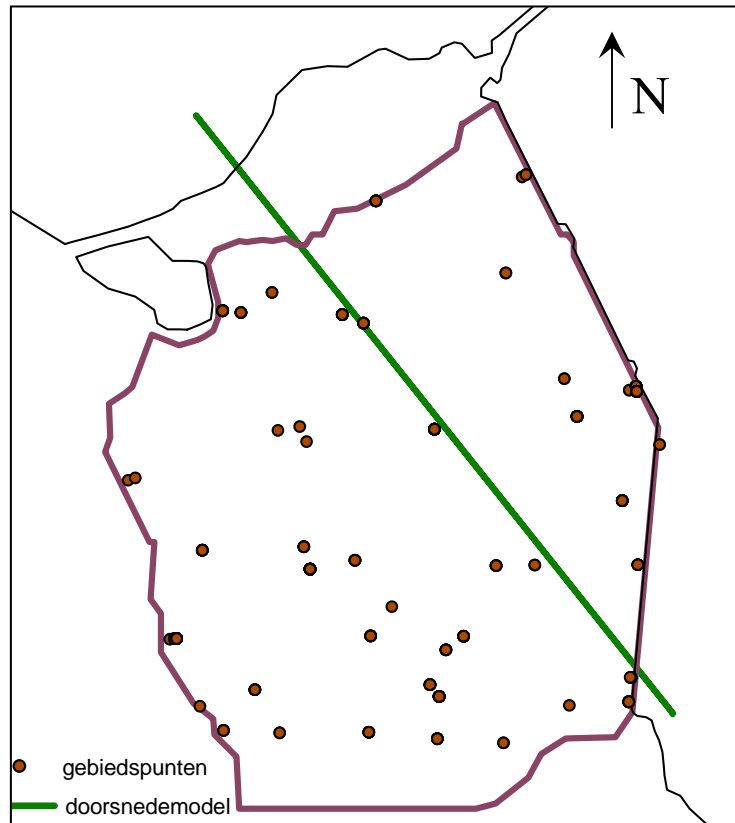
3.3.1 Inleiding

Om een beter beeld te krijgen van de grondwaterstroming in het gebied is besloten een grondwatermodel op te stellen. Hierbij berekent een computerprogramma op basis van de ingevoerde parameters hoe het grondwater zal stromen. Door ook een stoftransport programma te gebruiken kan ook de verandering in chloride concentratie berekend worden.

Gekozen is voor een twee dimensionaal model dat de Wieringermeer van het noordwesten tot zuidoosten doorkruist, zoals aangegeven in figuur 3.2. Op deze kaart zijn tevens de locaties van de meetpunten aangegeven.

Voor het modeleren van de grondwaterstroming is de computercode MOCSENS3D (Oude Essink, 1998 en 2001) gebruikt. Dit is de code MOC3D, aangepast voor dichtheidsverschillen van het grondwater. Het programma PMWIN (Processing Modflow Pro, versie 7.0.20) is gebruikt om deze codes te uitvoeren en de invoerbestanden aan te maken.

Hoewel de computercode geschikt is voor drie dimensionale modellen is vanwege de beperkt beschikbare tijd besloten een 2D model te maken. Bij een twee dimensionaal model wordt aangenomen dat geen grondwaterstroming in de derde dimensie plaatsvindt, maar in de werkelijkheid is dit vaak wel het geval. Ook in de Wieringermeer is het moeilijk een goede doorsnede te kiezen, aangezien door de lage ligging van de polder uit de hele omgeving grondwaterstroming aan wordt getrokken. De gebruikte doorsnede is zo gekozen dat de grootste stijghoogtegradiënt wordt doorsneden, terwijl ook de belangrijkste omliggende gebieden (de Waddenzee, Wieringen en het IJsselmeer) weergegeven worden. Ook is rekening gehouden met de hoeveelheid meetpunten die in de buurt van de lijn liggen, zodat deze meetpunten vergeleken kunnen worden met de uitkomst van de modelberekeningen.



Figuur 3.2. Locatie van de modellijn en de meetpunten in het gebied.

De gebruikte stijghoogtes in het model zijn zoetwaterstijghoogtes. Dit houdt in dat de dichtheid van het water wordt meegenomen in de berekening van de stijghoogte. Zout grondwater heeft door de opgeloste stoffen een hogere dichtheid dan zoet water, en zal bij dezelfde werkelijke stijghoogte een hogere zoetwaterstijghoogte geven. De formule die wordt gebruikt voor de berekening van de zoetwaterstijghoogte is:

$$(9) \quad \Phi_f = (p / \rho_f * g) + z$$

- Φ_f = zoetwaterstijghoogte [L]
 p = druk [$M L^{-1} T^{-2}$]
 ρ_f = dichtheid zoet grondwater [$M L^{-3}$]
 g = gravitatieversnelling [$L T^{-2}$]
 z = plaatshoogte [L]

3.3.2 Opzet model

Het model heeft een totale lengte van 20.800 meter en een diepte van 367,5 meter. De cellen waaruit het model is opgebouwd zijn 100 bij 1,5 meter groot, en hebben een diepte van 1 meter (noodzakelijk omdat het een 3D code is). Er is dus in totaal één rij met 245 lagen en 208 kolommen aangemaakt.

Het model begint bij punt $x=124000$ $y=548300$ (1800 meter van de kust van Wieringen in de Waddenzee) en eindigt in punt $x=137000$ $y=532000$ (1600 meter ten zuidoosten van de kust van de Wieringermeerpolder, in het IJsselmeer). De top van het model ligt op 5 meter boven NAP. Het model is opgedeeld in zes gebieden met een verschillende geo-hydrologische opbouw. De hydraulische conductiviteit van de verschillende gebieden en lagen is aangegeven in tabel 3.1.

Kolom 1-18		Kolom 19-44		Kolom 45-105		Kolom 106-108		Kolom 109-192		Kolom 193-208	
Waddenzee		Wieringen		NW Wieringmeer		Terp Wieringwerf		SE Wieringmeer		IJsselmeer	
Laag	k_h	Laag	k_h	Laag	k_h	Laag	k_h	Laag	k_h	Laag	k_h
1-4	5	1	0,0061	1-5	5	1-3	5	1-8	5	1-6	5
5	15	2	15	6-7	0,0054	4-10	0,0033	9-13	0,0039	7-8	0,0052
6-13	0,0057	3-12	0,0075	8-245	40	11-245	40	14-25	15	9-21	15
14-245	40	13-245	40					26-32	0,005	22-28	0,005
								33-245	40	29-245	40

Tabel 3.1. Horizontale hydraulische conductiviteit (k_h) [m/d] van de cellen, zoals gebruikt in het model.

Voor de opbouw van de Waddenzee is een rapport van Ente (1969) gebruikt.

De opbouw van het gebied, zoals beschreven in hoofdstuk 2, is terug te zien in de verschillende waarden voor k_h die in het model gebruikt zijn. De lage waarden geven slecht doorlatende lagen aan, terwijl de hoge k_h waarden bij de watervoerende pakketten horen. De hydraulische conductiviteit van 5 m/d in de bovenste lagen van sommige gebieden is gebruikt omdat deze cellen boven het landoppervlak liggen. De waarde van 5 m/d is gekozen zodat de opwaartse stroming zo min mogelijk wordt beïnvloed. Bij de weergave van de resultaten is besloten de bovenste 10 meter (5 meter boven tot 5 onder

NAP) van het model niet weer te geven, aangezien het model voor het bovenste deel van het systeem niet nauwkeurig genoeg is. In het model is dan ook geen rekening gehouden met neerslag, verdamping, drainering en andere processen die zich aan het oppervlak afspelen.

Als randvoorwaarden van het model is gekozen voor een general head boundary met een hoge waarde (1000 m/d) voor de hydraulische conductiviteit, zodat de stijghoogte feitelijk constant wordt. De initiële zoetwaterstijghoogtes aan de randen zijn berekend met behulp van een pascal code en zijn (bij gebrek aan oudere gegevens) gebaseerd op de stijghoogtes die gegeven zijn in figuur 15 en 16 uit de bijlagen van het onderzoek van Grontmij (2001) en figuur 50 uit het ICW rapport (1982), gecombineerd met de initiële concentraties langs de randen.

Voor de stijghoogtesprong over de deklaag onder het IJsselmeer is een waarde van - 0,75 meter gebruikt, voor de eerste slecht doorlatende laag een sprong van -0,50 meter (totaal -1,25). Aan de kant van de Waddenzee is slechts een slecht doorlatende laag aanwezig, waarover een stijghoogtesprong van -0,75 meter bestaat.

Overige parameters die in het model gebruikt zijn hebben de volgende waarden:

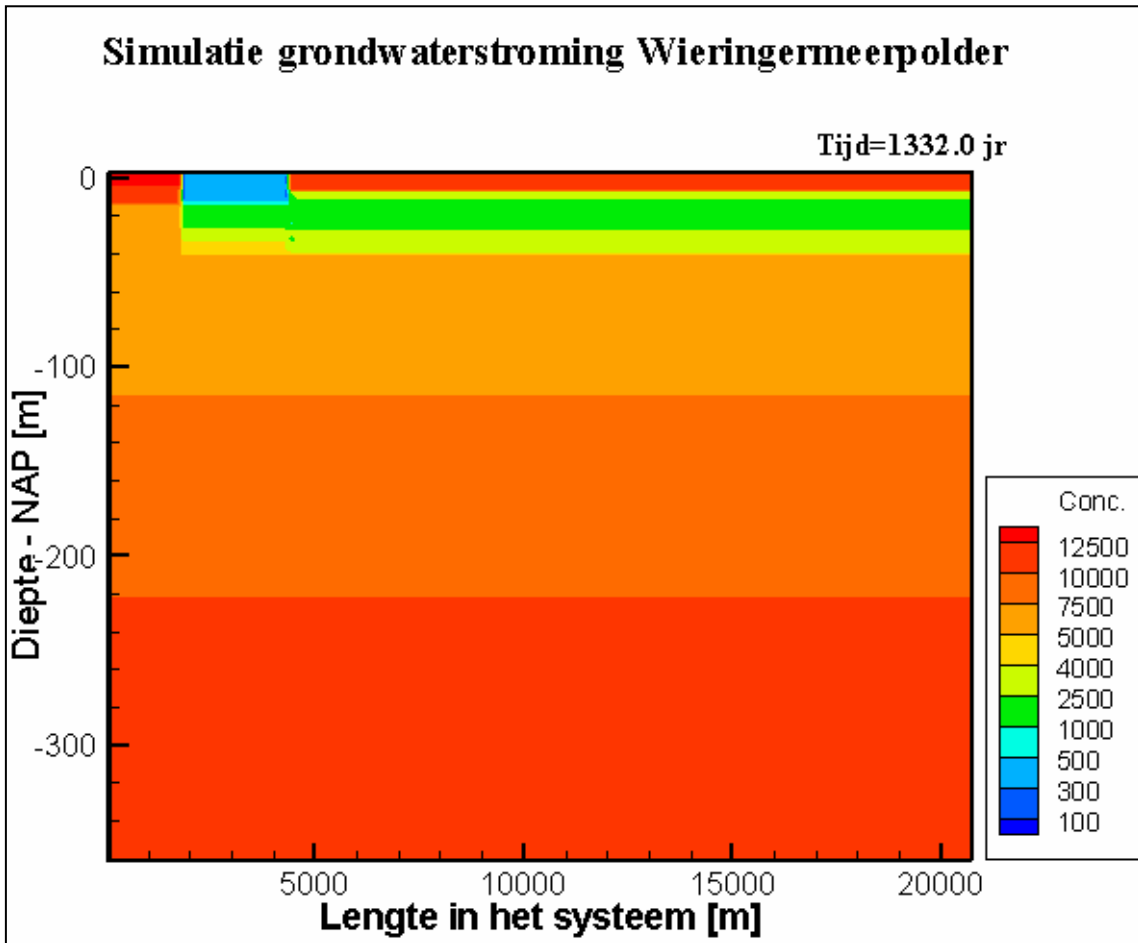
Porositeit: 30 %
Anisotropie (k_v/k_h): 0,33
Longitudinale dispersiviteit (α_l): 2
Transversale dispersiviteit (α_t): 0,2
Moleculaire diffusie: $10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$
Aantal deeltjes per cel: 9
Maximaal totaal aantal deeltjes: 500.000
Tijdsduur per berekening: 36,5 dagen
Convergentie criterium: 10^{-4} m
Courant getal: 1,75

De tijdsduur van de simulatie is in totaal 830 jaar. Het model begint in 1332 en simuleert dan 600 jaar de situatie zoals die was voor de inpoldering, met alleen Wieringen boven zeeniveau en de rest van de doorsnede bedekt met zout water (de Zuiderzee). De initiële chloride concentraties zijn afgebeeld in figuur 3.3.

Deze initiële situatie is een geschematiseerde inschatting, gebaseerd op de chloride metingen uit 1932, waaruit blijkt dat zich op een diepte van rond de 20 meter onder NAP een zoetere zone voordoet. Doordat het model op -5 meter is afgesneden zijn de bovenste zoute lagen niet te zien, waardoor de zoute zone vrij dun lijkt. De locatie van het eiland Wieringen in het linker deel van het model is duidelijk te herkennen aan de zoetwaterlens die zich onder het eiland bevindt.

Door in 1332 te beginnen met de simulatie heeft het systeem zelf een natuurlijke situatie ontwikkeld. Het systeem heeft nu de tijd gehad om in evenwicht te komen, en zal waarschijnlijk meer waarheidsgetrouw de eigenlijke initiële situatie weergeven (zie figuur 4.11). Het jaartal 1332 is gekozen omdat dit precies 600 jaar voor de inpoldering in 1932 is en het model in afgeronde berekeningsstappen rekent.

Het model is met opzet niet gecalibreerd omdat het doel van het model alleen is om algemene trends in de zoet-zout verdeling waar te nemen.



Figuur 3.3. Initiële chloride concentraties (mg/l).

In de periode na de inpoldering van de Wieringermeer en de aanleg van de afsluitdijk in 1932 zijn de randvoorwaarden veranderd. Een nieuwe set stijghoogtes is berekend, rekening houdend met de nieuwe stijghoogtes in de Wieringermeerpolder en het zoete IJsselmeer. Deze nieuwe stijghoogtes zijn toegepast in de general head boundary, waarna de gevolgen van de verandering in de randvoorwaarden zijn doorgerekend tot het einde van de simulatie in 2162.

Hoofdstuk 4 – Resultaten

4.1 Algemene beeld Nederland

De verzoetings en verziltings patronen in Nederland zijn zeer gevarieerd en complex. In deze paragraaf wordt een kort overzicht gegeven van de kenmerken van de verschillende provincies, met een beschrijving van het algemene patroon dat in het gebied te zien is. Er zal verder niet worden ingegaan op de oorzaken van de gesignaleerde trends. Wanneer in gebieden een duidelijk patroon te zien is worden deze deelgebieden, waar eventueel extra onderzoek gedaan zou kunnen worden, genoemd. Over het algemeen is te zeggen dat vooral in de kustprovincies sterke verzilting en verzoeting optreedt. De invloed van de zee is hier het grootst en dit deel van Nederland ligt bovendien voor het merendeel onder zeeniveau (zie figuur 1.1).

Voor deze analyse zijn alleen gegevens van boorputten gebruikt die meerdere malen zijn bemonsterd, zodat de verandering van de chloride concentratie in de tijd duidelijk wordt. In deze beschrijvingen betekent een significante verzoeting of verzilting dat de verhouding tussen de verandering in de concentratie (in mg/l) en de verandering in tijd (in dagen) groter is dan 0,01 mg/l/dag ($dc/dt > 0,01$), waarbij de verandering in tijd tussen de eerste en laatste meting minimaal een jaar is. Op de volgende pagina is een overzicht te zien van deze punten voor heel Nederland.

4.1.2 Waddeneilanden

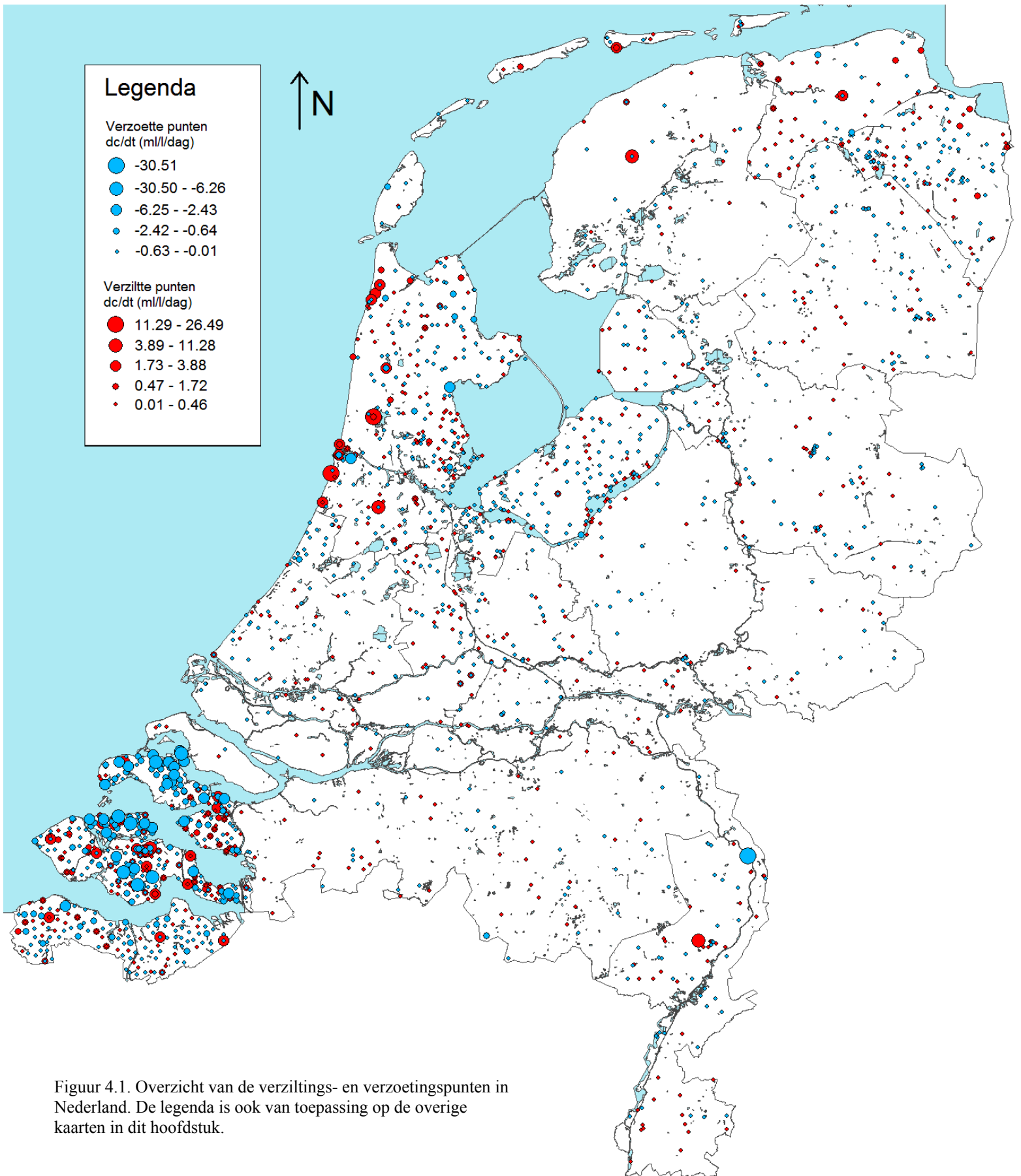
De waddeneilanden behoren tot verschillende provincies, maar zullen hier door hun gemeenschappelijk situatie samen worden besproken. Alle waddeneilanden zijn omgeven door zee en liggen volledig boven zeeniveau. Een deel van de eilanden bestaat uit duingebieden, terwijl het overige deel relatief vlak is.

Het aantal beschikbare meetpunten op de Waddeneilanden varieerde tussen de twee (op Vlieland) en meer dan tien op Texel en Ameland. Over het algemeen lijken de duinen te verzoeten, terwijl de kant die aan de Waddenzee grenst verzilt. Op Ameland is er een meetpunt waar sterke verzilting is opgetreden in het gebied ten zuiden van Ballum. Er zijn meer verzoetings- dan verziltingspunten aanwezig.

4.1.1 Friesland

In Friesland heeft men tussen de 16^e en de 18^e eeuw in het noordwesten van de provincie een deel van de Waddenzee ingedijkt. Ook zijn er in de 19^e en 20^e eeuw ten oosten van de Friese meren enkele verveningen drooggelegd (Stichting Wetenschappelijke Atlas van Nederland, 2001). Met uitzondering van deze droogmakerijen en het gebied rond de Friese Meren, ligt het grootste deel van Friesland boven zeeniveau.

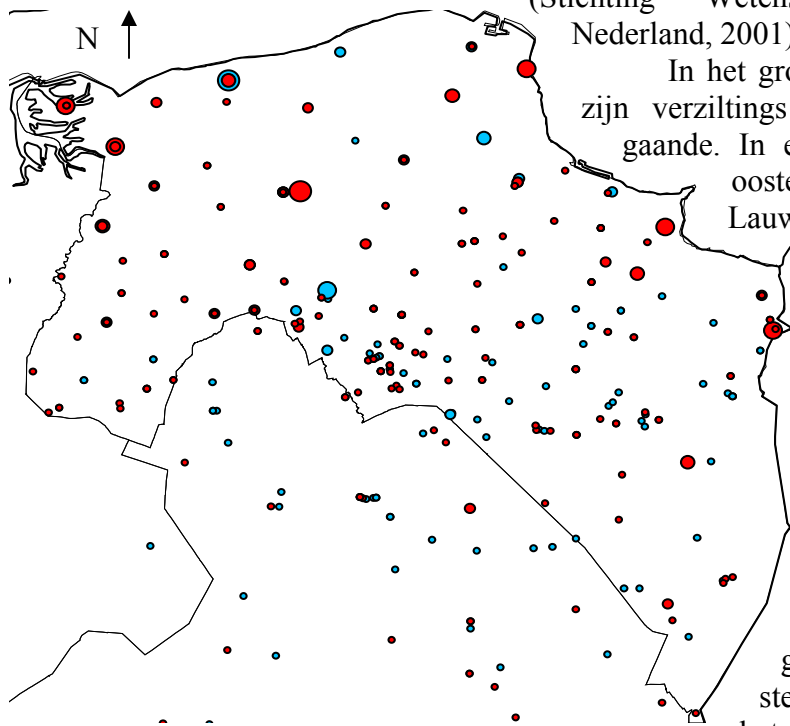
Er zijn relatief weinig meetpunten in de deze provincie, vooral weinig in het noordwesten. Zes kilometer ten zuidwesten van Leeuwarden ligt een sterk verzilt punt (boorgat B05H0073). De punten die dichtbij de Friese meren gelokaliseerd zijn lijken licht te verzoeten, terwijl de punten bij de kust verzilten. Over het algemeen zijn meer punten verzoet dan verzilt.



Figuur 4.1. Overzicht van de verziltings- en verzoetingspunten in Nederland. De legenda is ook van toepassing op de overige kaarten in dit hoofdstuk.

4.1.3 Groningen

De provincie Groningen heeft al in de 14^e eeuw land bedijkt, waarna de bedijking van de kust steeds verder is uitgebreid. Tot in de twintigste eeuw is land gewonnen, met als laatste bedijking het gebied rond het Lauwersmeer, in het noordwesten van Groningen (Stichting Wetenschappelijke Atlas van Nederland, 2001).



In het grootste deel van de provincie zijn verziltings en verzoetings processen gaande. In een gebied van 20 km ten oosten en zuiden van het Lauwersmeer komt voornamelijk verzilting voor. Er zijn veel meetpunten in deze provincie, maar er is op het eerste gezicht geen duidelijk patroon in de verziltings- en verzoetingspunten te zien. Het aantal verziltings- en verzoetingspunten is ongeveer gelijk, maar de verziltingspunten laten de grootste verandering zien. De sterkste verzilting komt voor in het noordelijk deel van de provincie.

Figuur 4.2. Overzicht van de verziltings- en verzoetingspunten (respectievelijk rood en blauw) in de provincie Groningen. De grootte van de cirkel geeft aan hoe groot de verandering in Cl concentratie in de tijd is (dc/dt).

4.1.4 Drente

In Drente komen geen droogmakerijen, bedijkingen of andere antropogene bijzonderheden voor die de grondwaterstroming zouden kunnen beïnvloeden (Stichting Wetenschappelijke Atlas van Nederland, 2001). De provincie ligt op een hoogte van enkele meters boven NAP, en wordt niet begrensd door zee. Deze provincie zal dus weinig invloed van zeewater ondervinden en de saliniteitssituatie zal waarschijnlijk in evenwicht zijn.

De meetpunten in Drente hebben een redelijk goede ruimtelijke verdeling. Er zijn redelijk veel meetpunten, maar bij de meeste punten treedt geen significante verzoeting of verzilting op. In een gebied rondom Dwingeloo lijken vrij veel verziltingspunten gelokaliseerd te zijn. In de rest van de provincie is geen duidelijke trend in de data te zien.

4.1.5 Overijssel

In het noorden van Overijssel is een voormalig veengebied drooggelegd. Deze polders bevinden zich ten noorden van het natuurreservaat De Wieden (Stichting Wetenschappelijke Atlas van Nederland, 2001). Het noordwestelijk deel van deze provincie ligt onder zeeniveau, waarna de hoogte naar het oosten toe langzaam toeneemt.

De verspreiding van de meetpunten in deze provincie is matig. Hoewel er redelijk veel meetpunten zijn, is de verdeling vrij gegroepeerd waardoor sommige gebieden geen meetpunten bevatten. Bij de meeste meetpunten is geen significante verzoeting of verzilting opgetreden. In het noordwesten van de provincie, aan de grens met de Noordoostpolder, zijn veel punten licht verzoet. Dit is een gebied met veel open water; natuurreservaten Weerribben en De Wieden, en het Giethoornse Meer. Van de polders ten noorden van De Wieden zijn geen gegevens beschikbaar.

4.1.6 Gelderland

In Gelderland zijn geen polders die de grondwaterstroming zouden kunnen beïnvloeden (Stichting Wetenschappelijke Atlas van Nederland, 2001). De samenstellingen van de verscheidene rivieren die door deze provincie stromen zouden wel in zekere mate invloed op het chloride gehalte van het grondwater kunnen uitoefenen. Verontreinigd rivierwater kan hogere chloride gehalten hebben, wat eventueel een verzilting zou kunnen veroorzaken. Deze provincie bevat het bos en heide gebied 'De Hoge Veluwe', dat enkele tientallen meters boven zeeniveau ligt. Ook de rest van Gelderland ligt vrijwel geheel boven zeeniveau.

In verhouding tot het landoppervlak zijn er in Gelderland relatief weinig meetpunten. Het aantal meetpunten dat een significante verzoeting of verzilting laat zien is zeer gering. Er zijn enkele verziltingspunten rondom Wijchen. De overige punten zijn dun gezaaid en laten alleen kleine veranderingen zien.

4.1.7 Utrecht

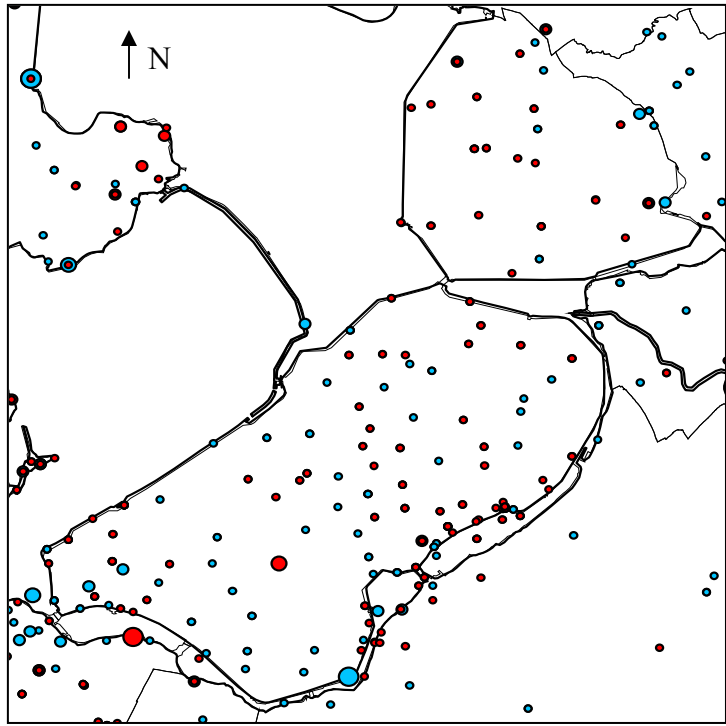
De polder Groot Mijdrecht en de kleine Polder Bethune zijn enkele polders in Utrecht (Stichting Wetenschappelijke Atlas van Nederland, 2001). Groot Mijdrecht is een vrij diepe polder (5,9 m -NAP) en grenst aan de hogergelegen Vinkeveense Plassen. Het geïnfiltreerde water zal door het verschil in stijghoogte richting de polder stromen, om daar als kwel uit te treden. Het westelijk deel van Utrecht ligt grotendeels onder zeeniveau, terwijl het oostelijk deel de Utrechtse Heuvelrug herbergt, wat meer dan tien meter hoog ligt.

De provincie heeft redelijk veel meetpunten. Er zijn echter weinig punten aanwezig die een significante verzoeting of verzilting hebben ondervonden. In het westen zijn langs de Amstel enkele verzilte punten aanwezig. In de polder Groot Mijdrecht verzilt vooral het westelijk deel. Er zijn hier te weinig meetpunten om meer over de lokale processen te kunnen zeggen.

4.1.8 Flevoland

De provincie Flevoland bestaat uit de Noordoost- en de Flevopolder. Deze polders zijn zeer recent drooggelegd (het laatste deel in 1968). De Noordoostpolder werd voornamelijk drooggelegd voor de winning van landbouwgrond, terwijl de Flevopolder tevens een belangrijke functie heeft als woon- en recreatiegebied (Provincie Flevoland, 2005). Vrijwel het gehele oppervlak van deze provincie ligt onder zeeniveau, met uitzondering van de dijken.

Er is een gemiddelde hoeveelheid meetpunten in deze provincie. In de Noordoostpolder komt vooral verzilting voor, met name langs de kust. In de Flevopolder treedt vooral verzoeting op. Het gebied waar alleen verzoeting plaats vindt is de meest zuidelijke punt van de polder (ten zuiden van Zeewolde). Verzilting treedt vooral op langs de noordkust en in een zone van Lelystad tot Harderwijk, hoewel daar ook verzoetingspunten liggen. Er is verder geen duidelijke verdeling tussen de verzoetings- en verziltingspunten. In het midden van de zuidelijke helft van de Flevopolder ligt een punt (B26D0021) dat zowel een redelijk sterke verzoeting als verzilting laat zien (op verschillende dieptes).



Figuur 4.3. Overzichtskartaal van de provincie Flevoland. De meetpunten met significante verzilting of verzoeting zijn aangegeven met respectievelijk een rode en blauwe kleur.

4.1.9 Noord-Holland

De provincie Noord-Holland bevat veel droogmakerijen. Hierdoor zijn kunstmatige hoogteverschillen ontstaan die de grondwaterstroming hebben beïnvloed, waardoor ook het saliniteitspatroon is veranderd. Met uitzondering van de kustduinen en het voormalige eiland Wieringen ligt heel Noord-Holland beneden zeeniveau.

De vele verzoete en verzilte punten in deze provincie zijn te verklaren door het lage landoppervlak, de nabijheid van de zee en de vele polders die in Noord-Holland aanwezig zijn.

In het uiterste noordwesten zijn langs de kust enkele sterke verziltingspunten zichtbaar (van Julianadorp tot Bergen aan Zee). Ook in het zuiden, bij Bloemendaal aan Zee is verzilting opgetreden.

Het gebied ten zuidoosten van Schagen is juist verzoet. De Wieringermeer heeft enkele redelijk sterke verzoetings- en verziltingspunten. De meeste verzoeting lijkt in het

zuiden van de polder plaats te vinden, hoewel er ook verzilting plaatsvindt (voor een uitgebreide analyse van de Wieringermeer, zie hoofdstuk 4.2).

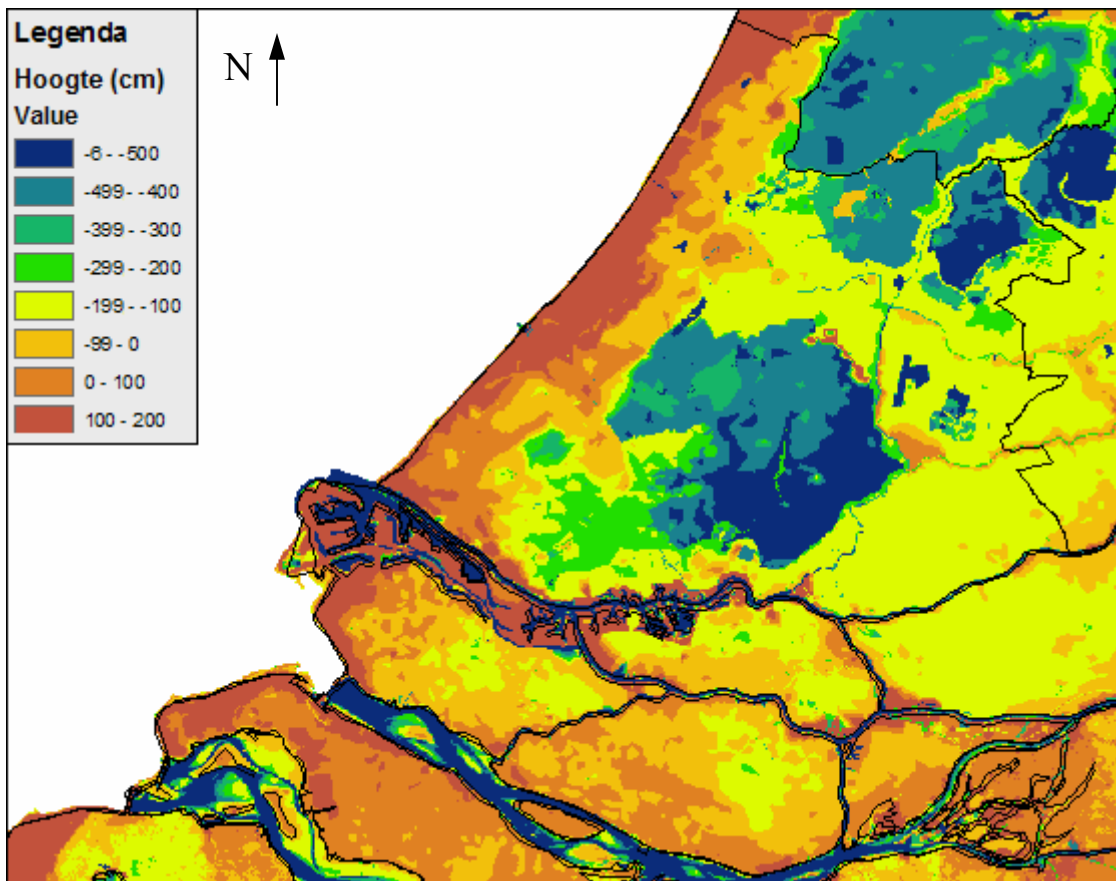
Ten noorden van Alkmaar ligt een punt (B19B0170) dat op diepte vrij sterk verzilt, terwijl dicht bij het oppervlakte verzoeting optreedt. Ten zuidwesten van Hoorn is een ander punt (B19E0085) met metingen op grote diepte (onder 100 meter – NAP) die daar juist sterk is verzoet.

Ten zuiden van dit punt, ligt een gebied dat zowel De Beemster als een deel van De Schermer beslaat. In dit gebied vindt veel verzilting plaats, net als langs de kust in de buurt van Volendam. Ook rond de mond van het Noordzeekanaal is sterke verzilting opgetreden, hoewel er ook verzoeting te zien is. Het grondwater van de Amsterdam is ook zouter geworden, evenals het water in de ondergrond van de Haarlemmermeerpolder.

In het zuidoostelijk deel van de provincie, tussen het IJmeer, Gooimeer en Naardermeer, zijn enkele verzoetingspunten te vinden.

4.1.10 Zuid-Holland

Zuid-Holland heeft enkele polders in het centrale deel van de provincie en enkele polders in het noorden (zoals Polder Nieuwkoop op NAP -5,6 meter). Het grootste deel van Zuid-Holland ligt onder zeeniveau, met uitzondering van de duinen langs de kust. In de hoogtekartaart van Zuid-Holland zijn de polders duidelijk te herkennen (zie figuur 4.3). Ook de Haarlemmermeerpolder, in het zuiden van Noord-Holland, is duidelijk te zien.



Figuur 4.4. Hoogtekartaart van Zuid-Holland. De provinciegrens en de kustlijn zijn met een zwarte lijn aangegeven.

Het diepste punt van Nederland ligt op 6,74 m - NAP in de Zuidplaspolder in het centrale deel van Zuid-Holland, in de buurt van Nieuwerkerk aan de IJssel.

Er zijn vrij weinig meetpunten in Zuid-Holland. In het gebied ten zuiden van Vianen zijn enkele verziltingspunten te vinden. Er zijn weinig meetpunten op het eiland Goeree-Overflakkee. De punten die er zijn, bevinden zich hoofdzakelijk in het uiterste westen van het eiland, een gebied dat voornamelijk is verzoet. Ook het gebied rondom Monster, ten noorden van Hoek van Holland, is verzoet. Het grondwater onder Rotterdam is voornamelijk verzilt, net als het gebied tussen Bergschenhoek en Berkenwoude, waar ook Nieuwerkerk aan de IJssel ligt.

4.1.11 Zeeland

Bijna de gehele oppervlakte van Zeeland bestaat uit land dat is bedijkt. Alleen het westelijk deel van Walcheren en Schouwen-Duiveland (het gedeelte 'Schouwen'), het gebied ten zuiden van Goes, Zeeuws-Vlaanderen en een gebied bij Tholen waren oorspronkelijk (voor het jaar 1300) al land (Stichting Wetenschappelijke Atlas van Nederland, 2001). Toch ligt het grootste deel van Zeeland boven zeeniveau, met uitzondering van het middelste deel van Schouwen-Duiveland en de centrale delen van Walcheren en Zuid-Beveland.

Er zijn veel sterk verzoete en verzilte punten in Zeeland. Deze provincie heeft een hoge dichtheid aan metingen, die voornamelijk in de jaren '80 en '90 genomen zijn. Doordat er veel meetpunten en gegevens van deze provincie zijn, is een wat uitgebreidere analyse gemaakt. Hiermee kan beter worden ingeschat waar interessante gebieden voorkomen waar eventueel in de toekomst onderzoek uit gevoerd kan worden.

De huidige situatie van de saliniteitsverdeling per regio is geanalyseerd met behulp van de resultaten van de inverse distance weighting interpolatie techniek van de meest recente data. De gegevens van de chloride reeksen zijn gebruikt voor de verzilting/verzoeting analyse.

➤ Schouwen-Duiveland

De westelijke punt van Schouwen-Duiveland is een duingebied, en ligt boven zeeniveau. Dit is duidelijk terug te zien in de saliniteitsverdeling, aangezien dit gebied tot ongeveer 100 meter diepte zoet is. Het overige deel van Schouwen-Duiveland is voornamelijk zout, hoewel het centrale oostelijke deel tot ongeveer 10 meter diep zoet tot zwak brak is. Onder het natuurgebied Schuddebeurs is tot 30 meter diepte een zoeter punt te zien. In de tijd is vooral in het centrale deel van het eiland sterke verzoeting opgetreden, hoewel enkele punten juist sterk verzilt zijn.

➤ Tholen

Dit deel van Zeeland is geen eiland, maar grenst aan Noord-Brabant. Over het algemeen is een verzilting met toenemende diepte te onderscheiden. Vooral het westelijk deel is zout, doordat het oosten door de hooggelegen Brabantse Wal zoet water aangevoerd krijgt. De trend is dat het westen verzoet, terwijl het oostelijk deel zouter wordt. Direct aan de kust treedt in het westen wel verzilting op.

➤ Noord-Beveland

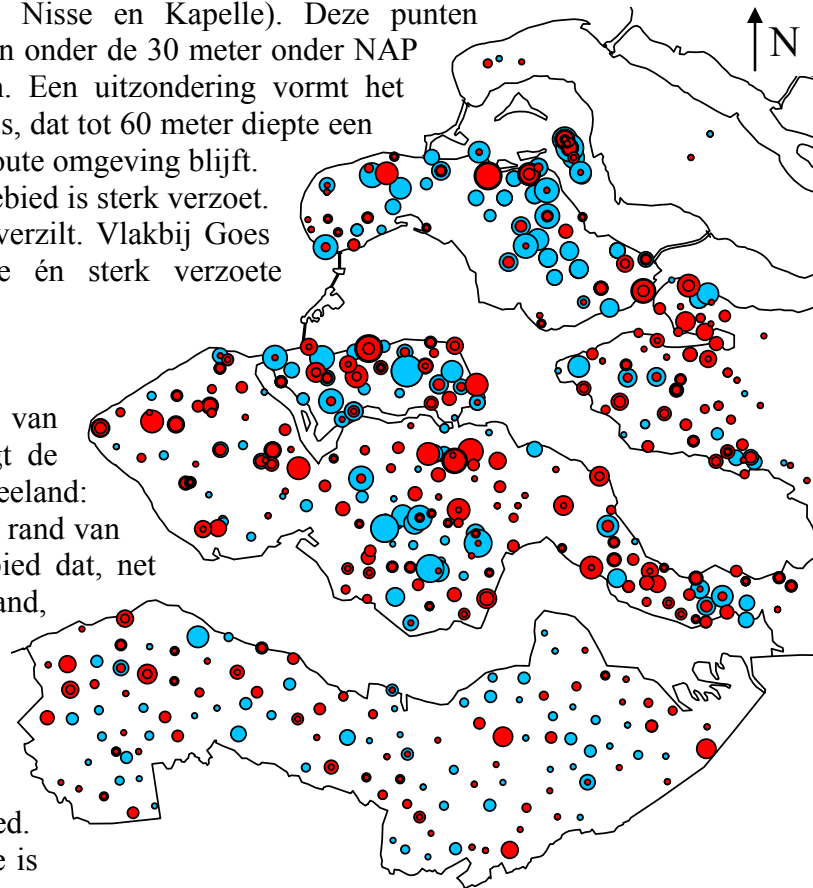
Het grondwater van dit eiland heeft over het algemeen hoge chloride concentraties. Tot vijf meter onder NAP zijn de randen en het westen van het eiland nog zoet tot zwak brak. Tot tien meter diep zijn er nog maar enkele zoete tot matig zilte plekken over (bij de dorpen Wissekerke en Colijnsplaat). De laag hieronder (tot 20 meter) laat alleen nog het zoet punt bij Colijnsplaat zien. Op grotere diepten is het gehele eiland sterk brak tot zout. Op Noord-Beveland zijn veel verzoetingspunten, maar er zijn ook veel punten die sterk verzilt zijn. Er lijkt geen patroon in deze verdeling te zijn.

➤ Zuid-Beveland

Dit gebied is over het algemeen zoeter dan het noordelijke deel van Beveland. Tot 10 meter diepte is het centrale deel zoet, terwijl de kustzone zout is. Met name het gebied ten noorden van Goes is nabij het oppervlakte zout. Op grotere diepte neemt de zoutheid toe en zijn er enkele geïsoleerde zoete punten in het centrale deel van het gebied te vinden (bij Goes, Heinkenszand, Nisse en Kapelle). Deze punten verzilten met diepte, en zijn onder de 30 meter onder NAP niet meer terug te vinden. Een uitzondering vormt het gebied in de buurt van Goes, dat tot 60 meter diepte een matig brak gebied in een zoute omgeving blijft. Het centrale deel van dit gebied is sterk verzoet. Het zuidwesten is vooral verzilt. Vlakbij Goes zijn enkele sterk verzilte én sterk verzoete punten gelokaliseerd.

➤ Walcheren

Walcheren ligt ten westen van Zuid-Beveland en herbergt de hoofdstad van Zeeland: Middelburg. De noordwest rand van deze regio is een duingebied dat, net als op Schouwen-Duiveland, een duidelijke invloed op het saliniteitspatroon in deze omgeving uitoefent. Het centrale deel is over het algemeen zouter dan de randen van het gebied. Van 10 tot 30 meter diepte is een zoet punt bij Nieuw en Sint Joosland aanwezig. Tot 50 meter diepte blijft de zoetwaterbel onder de kustduinen zichtbaar. Er zijn geen metingen gedaan op grotere dieptes. Dit gebied is sterk verzilt. Er zijn enkele verzoetingspunten, zoals langs de kust in het noordwesten, waar de duinen liggen.



Figuur 4.5. Overzicht van de verziltings- en verzoetingspunten (respectievelijk rood en blauw) in de provincie Zeeland. De grootte van de cirkel geeft aan hoe groot de verandering in Cl concentratie in de tijd is (dc/dt).

➤ Zeeuws-Vlaanderen

Zeeuws-Vlaanderen is over het algemeen minder zout dan de rest van Zeeland door dat het alleen in het noorden aan zee grenst. Tot tien meter diep is het overgrote deel zoet, met uitzondering van enkele punten in het noordoosten en noordwesten van het gebied, en bij de Braakmankreek ten zuidwesten van Terneuzen. Tien meter dieper in de ondergrond is het gebied grotendeels zout. Het land dat binnen zeven kilometer van zee af ligt is nu zout, met uitzondering van een gebied ten noordoosten van Terneuzen. Op grotere dieptes lijkt het gehele gebied zout te zijn, maar er zijn hier te weinig gegevens om een harde conclusie te kunnen trekken.

Er zijn relatief minder metingen in Zeeuws-Vlaanderen dan in overig Zeeland. Over het algemeen is er meer verzoeting, maar in een gebied ten zuiden van Groede is juist verzilting opgetreden. De verziltings- en verzoetings gebieden zijn erg lokaal en kunnen overlappen.

4.1.12 Noord-Brabant

Deze provincie is niet onderhevig aan grote veranderingen ten gevolge van inpolderingen en dergelijke. Dit komt overeen met het geringe aantal punten dat een belangrijke verandering in de chloride concentratie in de tijd laat zien. Het merendeel van Noord-Brabant ligt boven zeeniveau, waarbij de hoogte naar het zuidoosten toe geleidelijk oploopt.

Er zijn vrij weinig meetpunten in deze provincie en het aantal punten dat een significante verzoeting of verzilting ondervindt is gering. Nabij de grens met België, ten zuiden van het dorp Reusel, ligt een punt dat is verzoet. Het gebied ten noorden van deze plaats, ten westen van Eindhoven, bevat veel verzilte punten. De meetpunten zijn echter zo verspreid dat geen conclusies getrokken kunnen worden, behalve dat over het algemeen weinig verzoeting en verzilting optreedt.

4.1.13 Limburg

Limburg is de meest zuidelijke provincie, en wijkt door zijn hoogte af van de rest van Nederland. Met name het zuiden van Limburg is hooggelegen en bevat het hoogste punt van Nederland (op 322 m + NAP). Het is een gebied dat al gedurende lange tijd boven zeeniveau ligt, en bovendien ver van zee afligt, waardoor de invloed van zeewater gering is.

Hoewel het aantal meetpunten niet klein is, zijn er weinig meetpunten die verziltings- of verzoetingsverschijnselen laten zien. Langs de Maas ligt 15 kilometer ten noorden van Venlo een punt dat in een jaar tijd sterk verzoet is. Er is ook een sterk verzilt punt in deze provincie te vinden, vlakbij Panningen op enige afstand van de Maas. Er zijn enkele gebieden waar alleen verziltingspunten liggen, en enkele gebieden die verzoet zijn. Door de geringe hoeveelheid punten is over de trend in de ruimtelijke verdeling van deze gebieden niets te zeggen.

4.2 Wieringermeer

In de Wieringermeerpolder zijn 44 meetpunten aanwezig, waar in totaal 378 chloride metingen zijn uitgevoerd. De metingen zijn gedaan op verschillende dieptes (van 5,4 tot 301,88 m onder NAP) en op verschillende momenten in de tijd (van 1916 tot 2001). Uit deze gegevens zijn de verschillende observaties gemaakt, die hier worden gegeven.



Figuur 4.6. De locaties van de meetpunten in de Wieringermeerpolder.

4.2.1 Spatiele variatie

Voor deze analyse zijn de resultaten van de inverse distance weighting interpolatie techniek van de meest recente data gebruikt. Per laag is gekeken hoe de chloride concentraties variëren om zo een beeld te krijgen van de hedendaagse spatiele variatie in de drie dimensies.

Laagdiepte (-NAP)	Omschrijving
5 tot 10 m	Zuid westelijk deel gebied is matig brak, noordoosten is licht brak tot zoet onder de terp bij Wieringerwerf.
10 tot 20 m	Zwak brak, matig brak in centrale delen. Gebied onder de terp is zwak brak.
20 tot 30 m	NE en centrale deel sterk brak, randen zwak tot matig brak. In zuiden zoet.
30 tot 40 m	Algehele inversie; zuidelijke zoete gebied uitgebreid. Grootste deel gebied zwak brak, twee sterk brakke punten N en E.
40 tot 50 m	Zoete bel heeft grootste verbreiding. Langs rand IJsselmeer sterk brak (IJsselmeer is op deze diepte sterk brak tot zout).
50 tot 60 m	Zoete bel wordt kleiner, nu alleen in zuiden. Sterk brakke zone langs IJsselmeer breidt zich uit.
60 tot 70 m	Zoete bel verzoet. Sterk brakke zone beslaat grootste deel noordelijke helft. Sterke gradient.
70 tot 80 m	Sterk brakke zone beslaat gehele noordelijke helft. Oosten matig brak, zuiden licht brak, de zoete bel is versmald.
80 tot 90 m	Zoete bel breidt zich uit in oost-west richting. Noordelijk deel nog steeds sterk brak.
90 tot 110 m	Zoete bel niet aanwezig (wel zichtbaar ten zuiden van het gebied). Noordelijke helft sterk brak, zuiden matig brak.
110 tot 130 m	In het noorden sterk brak tot matig brak in het zuiden.
dieper dan 130 m	Onvoldoende gegevens

Tabel 4.1. Omschrijving saliniteitspatroon per laag.

Over het algemeen verzilt het grondwater naarmate het zich dieper in de ondergrond bevindt. Dit is een stabiele situatie, aangezien zout water zwaarder is dan zoet grondwater. Er kunnen echter inversies voorkomen, waar zout(er) water boven zoet water ligt. In de Wieringermeerpolder is hier ook sprake van, aangezien het grondwater tot 30 meter diepte brak is, terwijl hieronder een zoetwaterbel voorkomt. Hoewel de zoetwaterbel alleen in het zuiden van het gebied voorkomt, is ook in het noorden van het gebied een verzoeting van deze diepere laag (van matig en sterk brak tot zwak brak) aanwezig.

Ook in het horizontale vlak zijn enkele trends in de verdeling van de chloride concentraties waar te nemen.

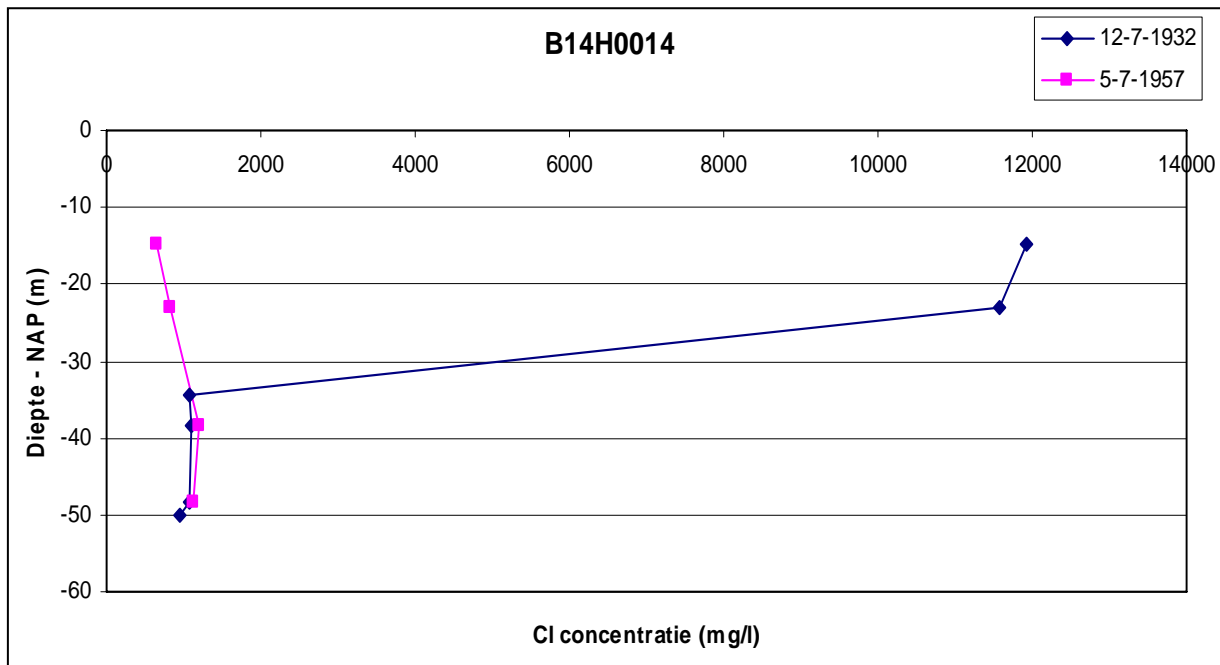
De terp bij Wieringerwerf veroorzaakt lokaal een verzoeting van het grondwater. De verhoging van ongeveer 6 meter ten opzichte van het polderoppervlak heeft invloed op het chloride gehalte van het grondwater tot 20 meter onder NAP.

De hoogste chloride gehalten bevinden zich voornamelijk in het noorden en oosten van de polder. Doordat deze gebieden weinig landinvloed ondervinden is er

weinig aanvoer van zoet grondwater. Hoewel het IJsselmeer na de aanleg van de afsluitdijk zoet is geworden, blijkt uit de chloridemetingen die in de ondergrond van het IJsselmeer zijn uitgevoerd dat het grondwater op diepte zwak tot sterk brak is. Gedurende de afgelopen 70 jaar (ongeveer sinds de verzoeting van het IJsselmeer) heeft het IJsselmeerwater volgens de kortste route maximaal 1750 meter de polder in kunnen stromen om daar zoete kwel te veroorzaken (zie hoofdstuk 3.2, Berekening stroombanen). Alleen de punten die binnen 1750 meter van de IJsselmeerdijk af liggen zouden dus onder invloed van het IJsselmeerwater kunnen zijn verzoet.

4.2.2 Temporele variatie

De metingen bevatten verscheidene tijdreeksen, wat een redelijk beeld geeft van de veranderingen in de variatie van de chloride concentraties in de tijd. Er zijn verschillende veranderingen gaande in het gebied.

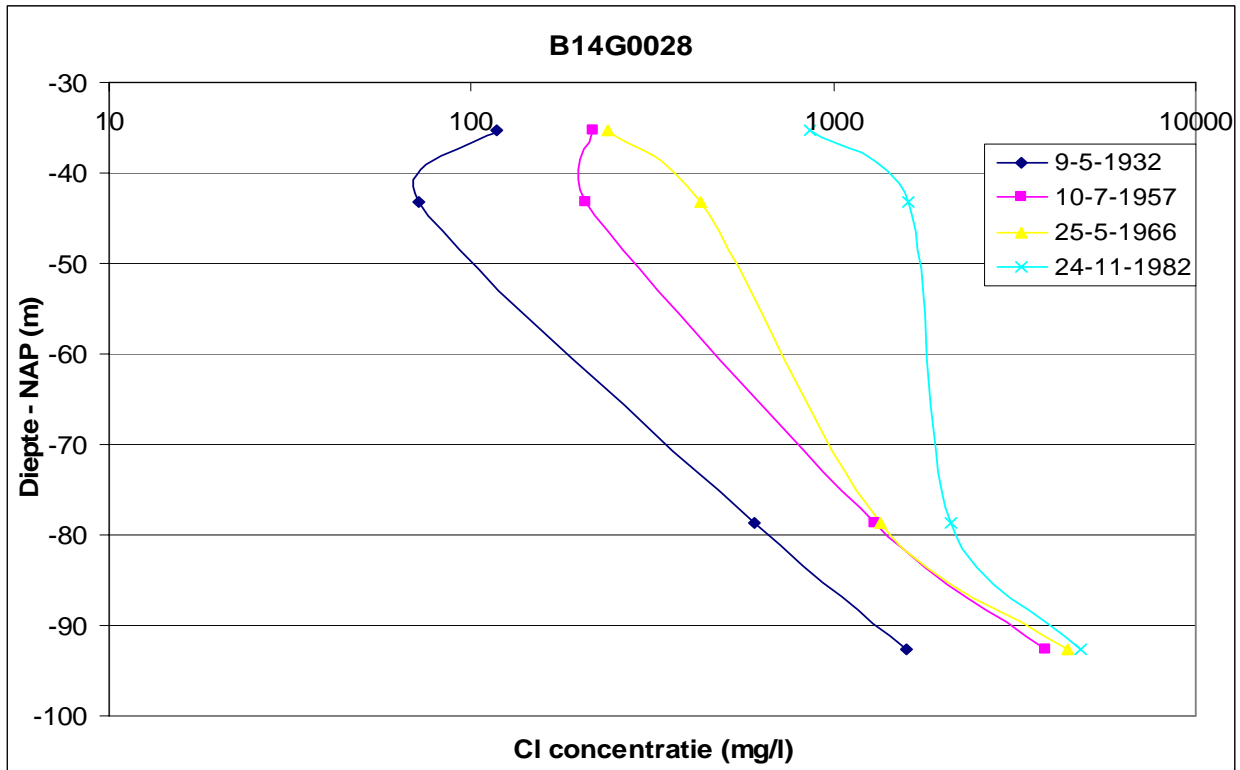


Figuur 4.7. Diepteprofiel van chloride gegevens uit boorgat B14H0014

In het algemeen is te zeggen dat direct langs de kust van het IJsselmeer en het Amstelmeer verzoeting plaatsvindt. Deze verzoeting vindt voornamelijk plaats in de ondiepe ondergrond; ongeveer tot de 25 meter diep. Op grotere diepte kan een lichte verzilting plaatsvinden, zoals bij boorgat B14H0014 (zie figuur 4.7) en B14F0032. Op een afstand van ongeveer 1850 meter van de IJsselmeerdijk liggen twee punten die juist verzilt zijn (punt B14F0010 en B14F0030). Deze punten liggen juist buiten de berekende invloedssfeer van het verzoete IJsselmeerwater. De toename in chloride concentratie kan te wijten zijn aan opwelling van zouter grondwater uit dieperliggende lagen.

Op de grens tussen de Wieringermeerpolder en de westelijke polders lijkt vooral verzilting op te treden. Dit kan verklaard worden door de hoge chloride concentratie van het grondwater in deze polders, wat door het peilverschil naar de lagergelegen Wieringermeerpolder zal stromen.

De verzilting lijkt af te nemen met de diepte, zoals te zien is in de grafiek van boorgat B14G0028 (figuur 4.8).



Figuur 4.8. Diepteprofiel van chloride gegevens uit boorgat B14G0028

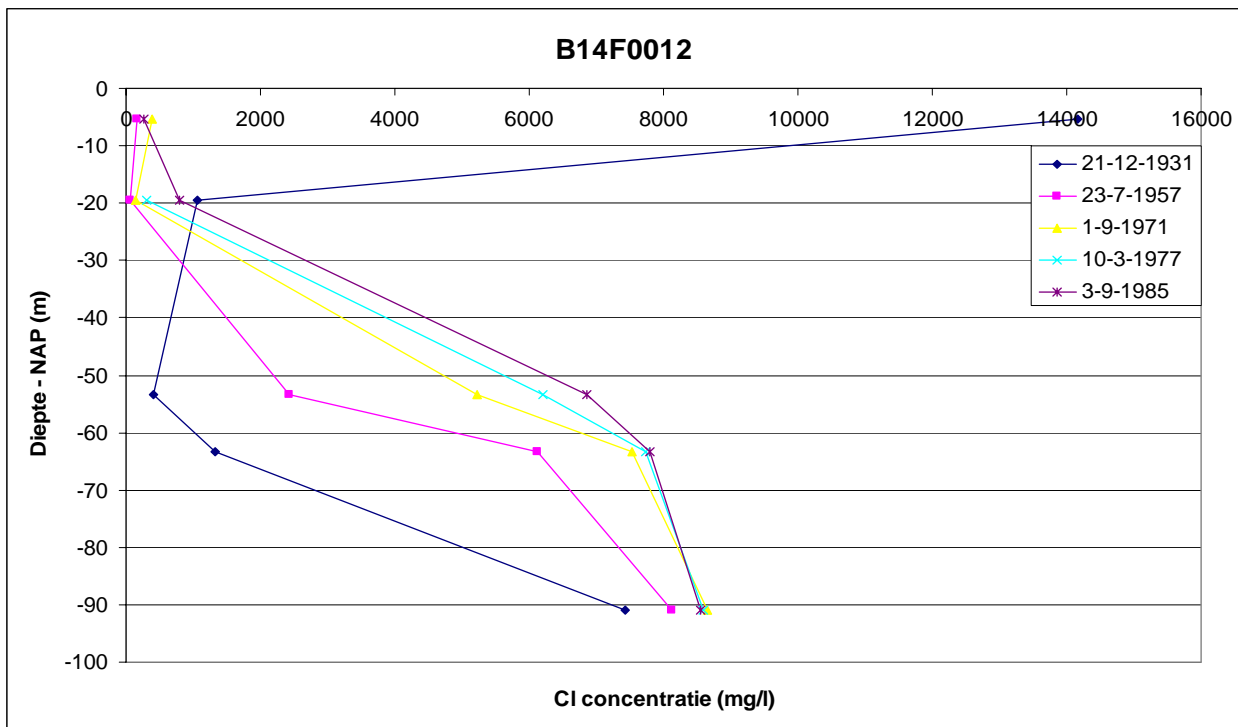
De zoetwaterbel van Hoorn die zich in het zuidelijk deel van de Wieringermeerpolder bevindt heeft een duidelijke invloed op de verziltings- en verzoetingsprocessen. Ook zal de grondwaterstroming vanaf het IJsselmeer invloed uitoefenen op de zoutheid van het grondwater, doordat dit water minder zout is dan het grondwater dat oorspronkelijk aanwezig was in de ondergrond.

In de profielen van de volgende punten is de zoetwaterbel terug te vinden: B14E0066, B14E0067, B14G0026/27, B14H0040, B14H0052, B14H0059, 14GE8024, 14GE8025, 14GE8026, 14HE8010, 14HE8014, 14HE8015. Door de gegevens van deze punten te combineren met de metingen die maar op een diepte zijn gedaan is de verspreiding van de zoetwaterbel in kaart gebracht (zie figuur 2.2). Op deze figuur is te zien dat de zoetwaterbel voorkomt bij dieptes tussen de 30 en 90 meter.

Er zijn verschillende meetpunten die tussen de zoetwaterbel en het oppervlak gelegen zijn (voornamelijk tussen 20 en 30 meter diepte). Deze punten hebben over het algemeen een matig tot sterk brakke chloride concentratie. Er zijn helaas weinig meetpunten met een lange tijdreeks, maar aan de hand van de beschikbare gegevens kan worden gesteld dat het ondiepe grondwater enigszins verzoet. Dit zou veroorzaakt

kunnen worden door een opwaartse beweging van het zoete water van de zoetwaterbel. Waarschijnlijk zijn de chloride verlagingen slechts gering doordat de opwaartse stroming beperkt wordt door de bekkenlei die in dit deel van het gebied aanwezig is. Door de verlaging van het grondwaterpeil in de Wieringermeerpolder kan het verschil in stijghoogte groot genoeg zijn geworden om beperkte verticale stroming mogelijk te maken.

Er zijn helaas geen metingen die de verandering van de chloride concentraties in de zoetwaterlens op grotere diepten laten zien, zodat niet kan worden vastgesteld of de zoetwaterlens door bovenstaand proces verzilt is. Alleen boorgat B14F0012 heeft een tijdreeks op grotere diepte, maar dit punt ligt enkele kilometers ten noorden van het beoogde gebied. In figuur 4.9 is te zien dat hier op dieptes groter dan 30 m -NAP inderdaad verzilting plaats heeft gevonden.



Figuur 4.9. Diepteprofiel van chloride gegevens uit boorgat B14F0012

Het boorgat heeft een interessant profiel, zoals bovenstaand figuur laat zien. Het punt bevindt zich op de terp bij Wieringerwerf, ongeveer in het midden van de polder. Dit boorgat heeft de meest volledige reeks gegevens, aangezien er op de vijf meetmomenten steeds in alle filters is gemeten.

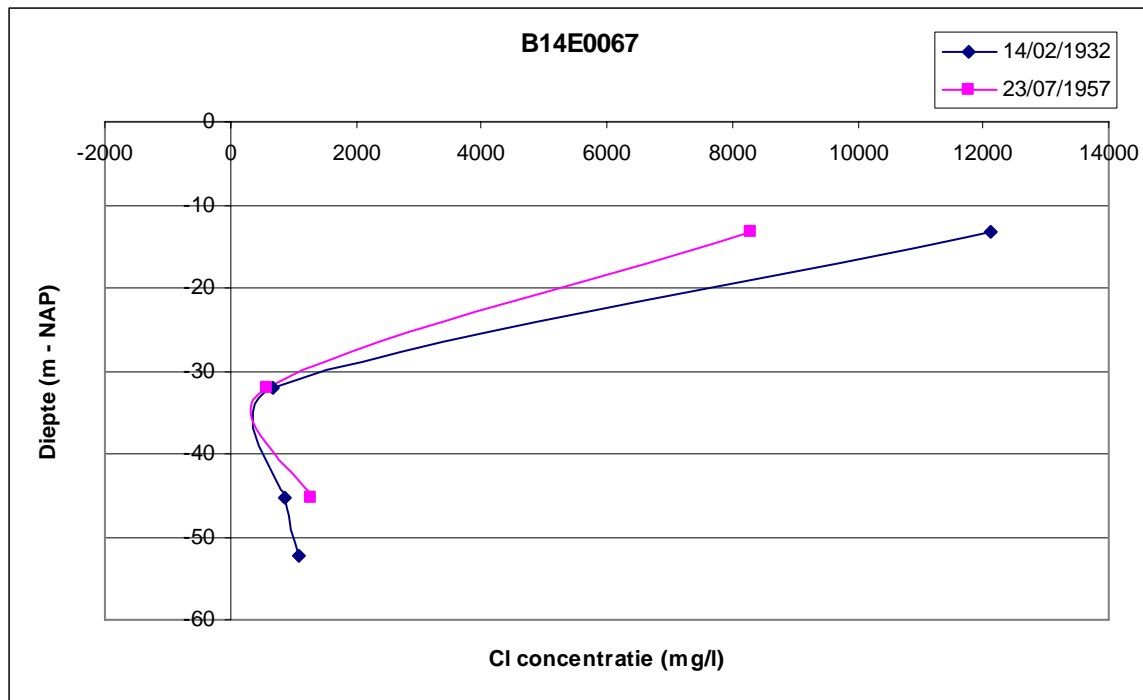
In het profiel is te zien dat op een diepte van 5 meter onder NAP na 1931 een sterke verzoeting is geweest, waarna enige verzilting is opgetreden. De verzoeting kan worden toegeschreven aan de hoge ligging van de terp, die door infiltratie van het regenwater zoeter zal zijn geworden.

Een tweede punt van aandacht is de verziltende trend die te zien is onder de 30 meter. De grootste verzilting heeft plaatsgevonden tussen de 50 en 70 meter diep, waarbij de grootste verandering is opgetreden tussen 1931 en 1971. In de periode hierna lijkt de mate van verzilting af te nemen.

De vorm van het profiel in 1931 lijkt erop te wijzen dat er toen tussen 40 en 60 meter diepte een zoetwaterbel aanwezig was, wat qua diepte overeenkomt met de zoetwaterbel van Hoorn. Ook de lokatie van dit punt, in het midden van de polder, ligt net buiten de grenzen van de huidige bel. Het lijkt erop dat de zoetwaterbel sinds 1931 aan de noordkant is verzilt, waardoor in de recente profielen geen zoetwaterreservoir op diepte kan worden gezien.

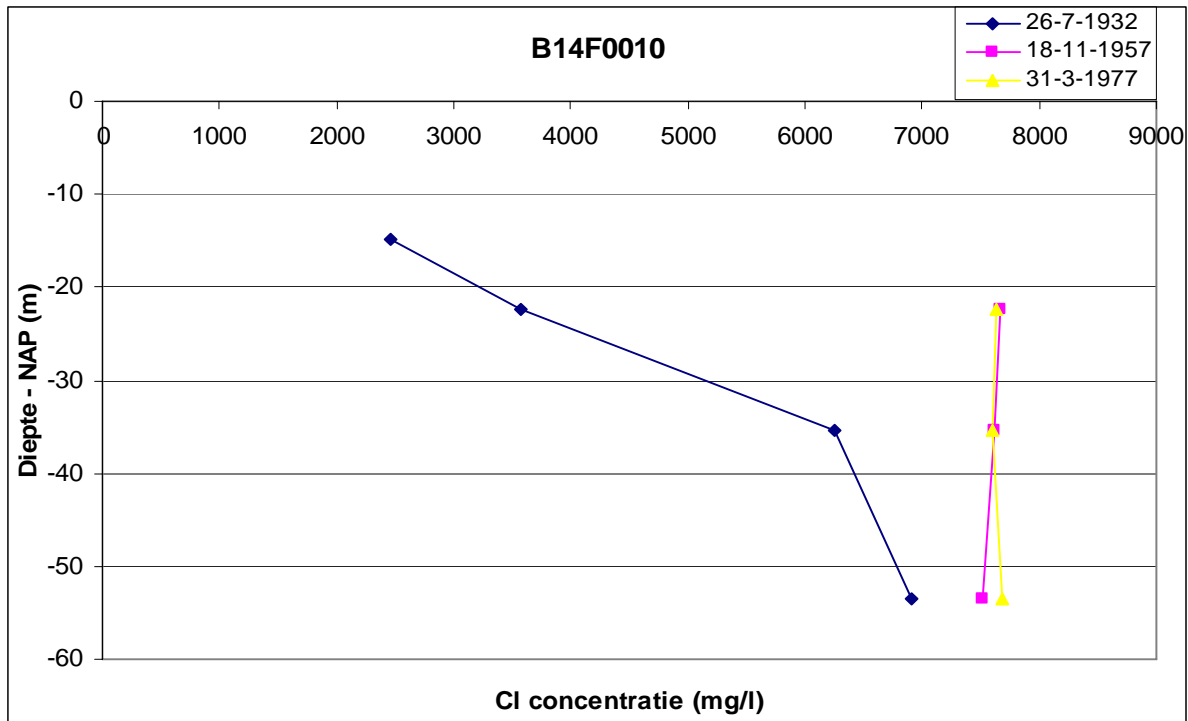
In de periode tussen 1931 en 1957 kan het grondwater lateraal ongeveer 700 meter zijn verplaatst (zie hoofdstuk 3.2, Berekening stroombanen). Helaas zijn er geen meetpunten die binnen een straal van 700 meter om deze boorput vallen, dus is gekeken naar de punten die het dichtst bij punt B14F0012 in de buurt liggen:

- In het noorden ligt het meest nabijgelegen punt 3500 meter naar het NNW; punt B14E0067. Dit punt vertoont een verzoeting onder de 30 meter, is sinds 1932 ondiep verzoet, maar is verder relatief constant gebleven. Dit zal waarschijnlijk niet de bron van de verzilting op diepte zijn geweest. Het verloop van de chloride concentratie met diepte in de tijd wordt gegeven in figuur 4.10.



Figuur 4.10. Diepteprofiel van chloride gegevens uit boorgat B14E0067

- In het oosten ligt punt B14F0010. Dit punt laat voor de reeks van 1932 eenzelfde trend zien als de latere reeksen van punt B14F0012 (zie figuur 4.11).



Figuur 4.11. Diepteprofiel van chloride gegevens uit boorgat B14F0010

- In het zuiden is de meest nabijgelegen boorput uit de periode van 1931 te vinden op 5000 meter afstand (punt B14G0015). Dit is echter maar een meting op 40 meter diepte (Cl concentratie 866 mg/l), en bovendien is het punt vrij ver weg, dus kan hier weinig over gezegd worden.
- In het westen ligt een groep van drie punten op 3500 meter afstand. Uit deze punten zijn op verschillende dieptes in totaal drie metingen gedaan in 1931. Uit deze metingen valt een grof profiel op te stellen voor deze lokatie: zwak brak op 22 meter, zoet op 27 meter en weer zwak brak op 53 meter – NAP. Ook deze lokatie lijkt enigszins overeen te komen met het profiel van een zoetwaterbel, hoewel niet duidelijk. Dit is in ieder geval waarschijnlijk niet de bron van de verzilting van punt B14F0012, aangezien de verzilting groter is dan de zoutheid van het hier aanwezige grondwater.

Het is dus zeer waarschijnlijk dat de verzilting die in punt B14F0012 voorkomt, veroorzaakt wordt door een grondwaterstroming die afkomstig is uit het oosten; uit de richting van het IJsselmeer. Dit is afgeleid uit het 1932 diepteprofiel van de saliniteit van punt B14F0010 (geleidelijke toename saliniteit, met op grotere diepte minder sterke toename van de saliniteit), die overeenkomt met de meer recente metingen in B14F0012.

4.3 Vergelijking van methoden

4.3.1 Inleiding

Er bestaan meerdere methoden om te bepalen of een put verzilt of verzoet. In dit onderzoek is de methode gebruikt waarbij in een punt op verschillende momenten de chloride concentratie wordt gemeten om zo een beeld van de verzoeting of verzilting te verkrijgen.

Een andere methode is het analyseren van de chemische samenstelling van het grondwater. Deze methode is erop gebaseerd dat kation uitwisseling plaatsvindt wanneer zoet water zout water verdringt, en omgekeerd. Zout grondwater bevat hoofdzakelijk Na^+ , Mg^+ en Cl^- . Door oplossing van calciet zijn de dominante ionen in zoet grondwater Ca^+ en HCO_3^- . Als zout grondwater verdrongen wordt door zoet grondwater (verzoeting) zal het resulterende grondwater door kation uitwisseling een verhoogd Na gehalte krijgen. Bij voortdurende verzoeting zal ook het Mg gehalte toenemen. Dit komt doordat deze kationen voorheen aan het sediment gehecht waren, maar door de intrusie van CaHCO_3 rijk water zullen de Ca kationen preferent aan de sedimentkorrels gaan hechten. Hierdoor vindt kation uitwisseling plaats en zal een Na- HCO_3 en vervolgens een Mg- HCO_3 watertype gevormd worden (Griffioen, 2003).

De chemische analysedata die voor deze vergelijking gebruikt is, is afkomstig van Jasper Griffioen en is aangemaakt voor zijn onderzoek naar kation-uitwisselingspatronen, zoals gepubliceerd in 2003. De gegevens beslaan de provincies Noord- en Zuid-Holland, Utrecht en westelijk Flevoland, en bestaan in totaal uit 3280 metingen. Hiervan laten 780 metingen een verzilting zien, en 2035 metingen een verzoeting. Het valt op dat de gegevens van de kation-uitwisselings methode een groot verschil in de hoeveelheid verziltings- en verzoetingspunten laten zien, terwijl de chloridereksen een relatief evenwichtige verdeling hebben (1473 meetpunten zijn verzilt en 1658 verzoet). De chloride meetreeksen komen echter uit heel Nederland, dus dit hoeft geen verschil tussen de twee methoden op te leveren. Door de chloride reeksen in de westelijke provincies te selecteren (het gebied overeenkomstig met de verspreiding van de chloride analyses), kan echter worden vastgesteld dat ook hier de chloride metingen een gelijke verdeling in het aantal verzoetings- en verziltingspunten heeft (ongeveer 450 verzilt en 465 verzoet).

Bij de koppeling van de locaties van de punten is een nauwkeurigheid van 100 meter gebruikt, zodat punten met kleine verschillen in de coördinaten toch als een punt worden gerekend.

4.3.2 Resultaten vergelijking

Van de 2815 chemische analyses die verzoeting of verzilting vertonen komen 883 metingen overeen met de lokaties van de chloride meetpunten (met een nauwkeurigheid van 100 meter). Uit deze 883 chemische analyses zijn 222 punten verzilt en 661 verzoet. Tabel 4.2 laat zien hoe deze punten bij de andere methode zijn ingedeeld. Een plot van deze data levert figuur 4.12 op.

	Chemische analyse: verzilt	Chemische analyse: verzoet
Cl reeks: verzilt	102	285
Cl reeks: verzoet	120	376

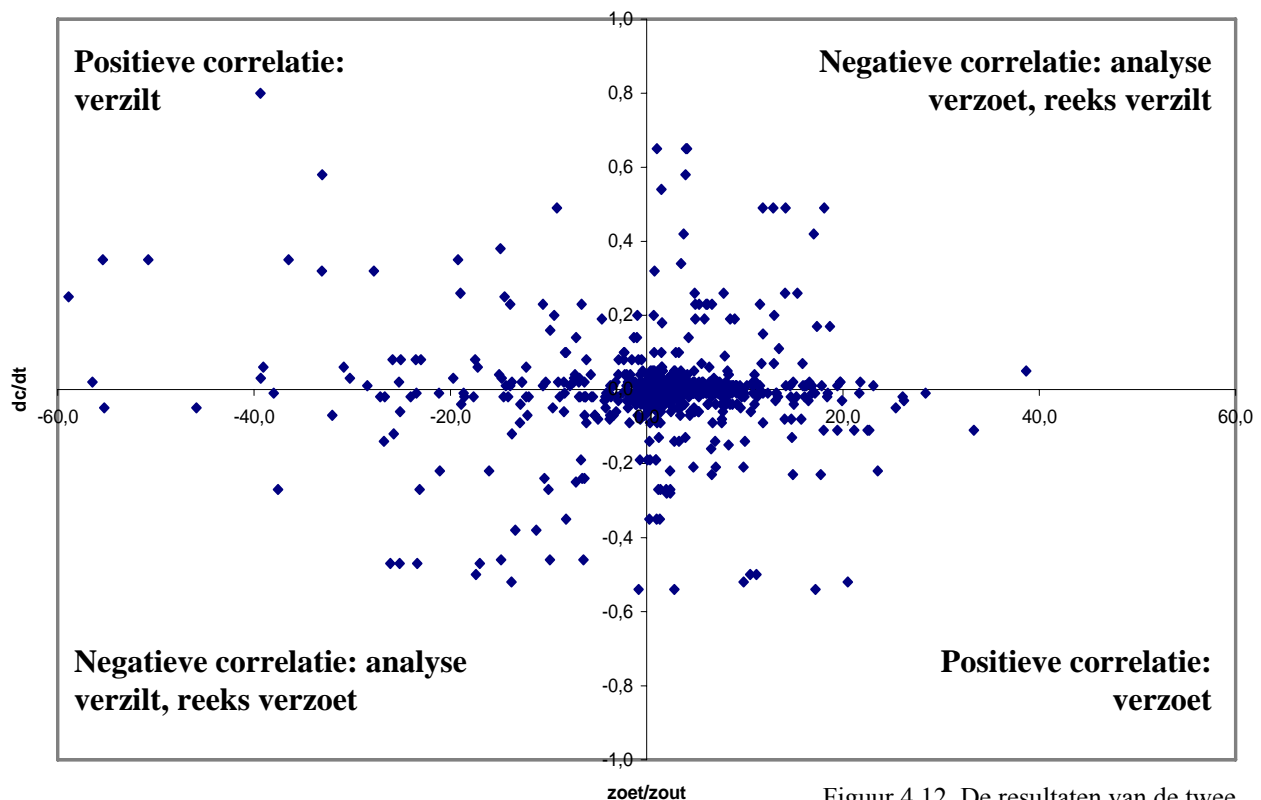
Tabel 4.2. Correlatie tussen de twee methoden. Het aantal metingen is als getal en als percentage aangegeven.

De uitkomst van de chemische analyse wordt gegeven op de x-as door de parameter 'zoet/zout', wat de uitkomst is van de berekeningen aan de concentraties van de verschillende opgeloste stoffen. De exacte berekening van deze parameter is gegeven door:

$$zoet / zout = \frac{NaZ}{22,98977} + \frac{2 \cdot MgZ}{24,305} + \frac{KZ}{39,09}$$

Een positieve waarde geeft verzoeting aan en een negatieve waarde verzilting. De metingen in linker deel van de grafiek zijn dus volgens deze methode verzilt, terwijl het rechter deel verzoet is.

De parameter die op de y-as de verzilting of verzoeting aangeeft voor de chloride reeks methode is dc/dt . Dit is het verschil in concentratie (mg/l) tussen de eerste en laatste meting, gedeeld door de tijdsduur van de meetreeks (in dagen). Een afname van de chloride concentratie resulteert in een negatieve waarde voor dc/dt , waardoor verzoeting negatief is, en verzilting positief.



Figuur 4.12. De resultaten van de twee methoden zijn tegen elkaar uitgezet. Voor verdere uitleg, zie tekst.

Uit deze grafiek en de tabel is af te leiden dat er een slechte correlatie is tussen de twee onderzoeks methoden. Er is geen trend in de data, die wel verwacht wordt als er een goede correlatie tussen de twee methoden zou bestaan.

In tabel 4.2 is te zien dat ongeveer de helft van de punten die volgens de chemische analyse verzoet zijn, overeen komen met de verzoeting in de tijdreeks methode. De andere helft laat echter een negatieve correlatie zien. Er lijkt dus geen correlatie te bestaan tussen de twee methoden.

4.3.3 Factoren die de correlatie beïnvloeden

Om te onderzoeken of de chloride concentratie van het grondwater effect heeft op de correlatie van de methoden, is de dataset opgedeeld in drie groepen; gegevens met een chloride concentratie lager dan 300 mg/l, tussen de 300 en 1000 mg/l en hoger dan 1000 mg/l. Tabel 4.3 geeft een overzicht van de resultaten.

Chemische analyse:	Cl concentratie < 300 mg/l		Cl concentratie 300 - 1000 mg/l		Cl concentratie > 1000 mg/l	
	Verzilt	Verzoet	Verzilt	Verzoet	Verzilt	verzoet
Cl Reeks: verzilt	26	177	20	52	56	56
Cl Reeks: verzoet	29	279	14	55	77	41

Tabel 4.3. Correlatie tussen de twee methoden voor verschillende chloride concentraties. Per klasse is het aantal metingen en het percentage van het totaal aantal chemische analyses met die trend aangegeven.

Uit deze onderverdeling blijkt dat bij de verzilte punten de chloride concentratie van het grondwater nauwelijks verschil uitmaakt. De zoutheid van het water heeft voor verzilte gebieden dus waarschijnlijk geen invloed op de kation uitwisselingsprocessen.

De correlatie voor de verzoete punten lijkt enigszins af te nemen met toenemende chloride concentratie. Dit zou verklaard kunnen worden doordat er zoveel Na en Mg in het water aanwezig is, zodat een afname van de chloride concentratie niet direct tot kation uitwisseling leidt.

Verder is goed te zien dat de verhouding tussen het aantal verzilte en verzoete punten toeneemt met een toenemende chloride concentratie. Dit suggereert dat zout grondwater over het algemeen meer verzilt dan zoeter grondwater.

Er zijn verschillende algemene redenen waarom de twee methoden, die gebruikt worden om hetzelfde uit te rekenen, niet met elkaar in overeenstemming zijn.

- De metingen zijn niet altijd in dezelfde periode genomen. Er zijn punten die in de loop der tijd zowel verzoeting als verzilting hebben ondergaan. Afhankelijk van het moment waarop de metingen zijn gedaan, kan dit verschillende resultaten opleveren.
- De ruimtelijke koppeling is gedaan met een nauwkeurigheid van 100 meter, zodat een punt dat in de datasets kleine verschillen in de xy coördinaten heeft, toch als hetzelfde punt wordt gerekend. Door ruimtelijke variaties in de verzilting en verzoeting, zou dit echter tot verschillende resultaten kunnen leiden.

- De metingen zijn op verschillende diepten gedaan. De verzoetings- en verziltingspatronen kunnen echter variabel zijn in de diepte. Bij deze analyse is geprobeerd de metingen met elkaar te vergelijken die het dichtst bij elkaar liggen, maar toch zullen de diepten voor sommige vergelijkingen niet met elkaar overeenkomen. Het gebruikte GIS programma maakt het niet mogelijk de gegevens in drie dimensies met elkaar te combineren.
- De mate van kation uitwisseling hangt af van de lithologie van de ondergrond, aangezien sommige sedimenten beter kationen absorberen dan andere, en de samenstelling van zoet grondwater onder andere afhangt van de hoeveelheid calciet. De lithologie heeft echter geen directe invloed op de chloride metingen.

De laatste twee mogelijke oorzaken hebben direct betrekking op de chemische analyse methode zelf, en geven een fundamenteel verschil tussen de twee methoden aan. Alleen door alle overige mogelijke oorzaken van verschillen tussen de uitkomsten van de twee methoden te minimaliseren kan de invloed van de laatste twee punten worden ingeschat. Om de invloed van de overige genoemde aspecten te analyseren, zijn de gegevens opgesplitst in twee delen: een deel dat positieve correlatie heeft, en een deel dat negatieve correlatie vertoont.

Ten eerste is gekeken naar de periode waarin de metingen zijn gedaan. Van de chemische analyses is alleen het jaar waarin de meting is gedaan bekend. De vergelijking is gedaan tussen de laatste meting uit de tijdreeks en één juli van het jaar waarin de chemische analyse is gedaan. Het gemiddelde verschil tussen deze twee data verschilt niet veel tussen de twee delen; 7,1 jaar voor het deel met een positieve correlatie, en 6,7 jaar voor de negatieve correlaties. Ook de standaard deviatie komt redelijk overeen (respectievelijk 5,7 en 6,0 jaar). Als het jaar waarin de meting is genomen een grote invloed op de verziltings- of verzoetingstrend heeft, zou het gemiddelde verschil tussen de twee metingen bij het deel met de negatieve correlatie het grootst moeten zijn. Aangezien het omgekeerde het geval is, en de gemiddelden dicht bij elkaar liggen, kan worden gesteld dat het jaar waarin de metingen zijn gedaan geen invloed heeft op de correlatie van deze twee datasets. Ook is gekeken naar de duur van de tijdreeksen, aangezien kortere tijdreeksen misschien beter overeen komen met de chemische analyse, maar dit is niet het geval. De punten met een positieve correlatie hebben een gemiddelde tijdreeks duur van 11,7 jaar, en de punten met een negatieve correlatie 11,8 jaar.

Het tweede punt dat van invloed zou kunnen zijn is de honderd meter speling die is toegestaan bij de koppeling van de twee datasets. Ter vergelijking is een analyse gedaan van de punten uit de twee datasets die exact dezelfde x en y coördinaten hebben, en dus in ieder geval in dezelfde boorput zijn gemeten. Er zijn in totaal 745 chemische analyses die aan deze voorwaarden voldoen. Hiervan zijn 189 punten verzilt en 556 punten verzoet. Tabel 4.4 laat het resultaat van de vergelijking met de uitkomst van de chloride reeksen zien.

	Chemische analyse: verzilt	Chemische analyse: verzoet
Reeks: verzilt	80	225
Reeks: verzoet	109	331

Tabel 4.4. Correlatie tussen de twee methoden in punten met dezelfde xy coördinaten.

Vergeleken met tabel 4.2 is geen verbetering in de correlatie opgetreden. De honderd meter speling in de afstand tussen de punten heeft dus geen invloed op de correlatie van de twee methoden, en kan worden aangehouden.

De verschillen in de diepte van de metingen in de datasets zijn ook bekeken. Bij het deel dat positieve correlatie vertoont is het gemiddelde verschil in diepte tussen de twee datasets 13,1 meter, bij het andere deel is dat 18,8 meter. Dit is een aanwijzing dat bij een toenemend verschil in diepte tussen de metingen de correlatie tussen de methoden afneemt. Dit komt voort uit de verschillen in verzilting en verzoeting in de diepte. In beide datasets komen inderdaad punten voor waar in dezelfde boorput zowel verzoeting als verzilting optreedt. In de tabel 4.5 wordt aangegeven hoeveel van het totale aantal metingen een tegenovergestelde trend in hetzelfde boorgat (op een andere diepte) heeft. Doordat er bijvoorbeeld twee verzoete punten en een verzilt punt in een boorgat voor kunnen komen, komen de getallen niet precies overeen.

Chloride reeksen		Chemische analyses	
Verzilt	Verzoet	Verzilt	Verzoet
177/450 (39%)	185/465 (40%)	134/661 (20%)	103/222 (46%)

Tabel 4.5. Aantal metingen dat in een boorput met tegenovergestelde trends voorkomt.

Uit de tabel blijkt dat wanneer een punt gekoppeld wordt aan een punt op dezelfde lokatie (in xy coördinaten) er een redelijk grote kans is dat onterecht een verkeerde correlatie ontstaat. De verschillende dieptes waarop de metingen zijn gedaan is dus waarschijnlijk de belangrijkste oorzaak van de slechte correlatie tussen de twee methoden. Voor kleine gebieden is het mogelijk om de punten handmatig met elkaar te vergelijken, waardoor een betere correlatie gerealiseerd kan worden.

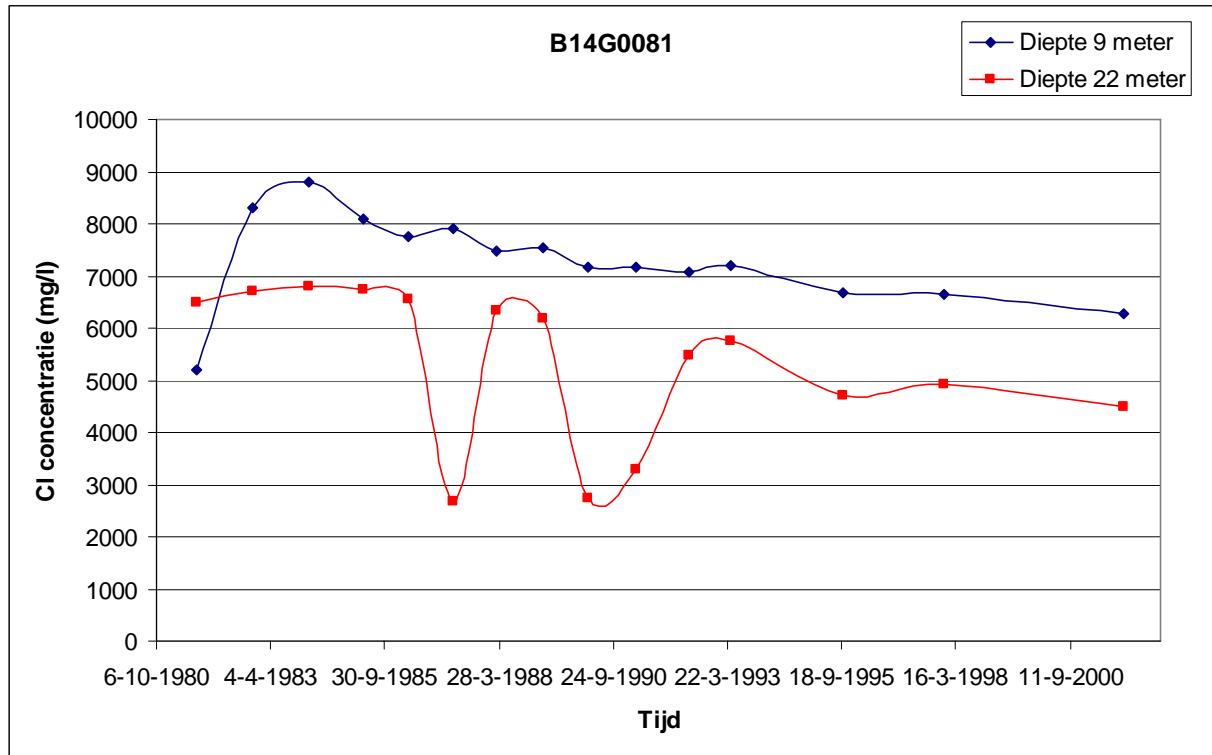
4.3.4 Vergelijking Wieringermeer

Door de focus van het onderzoek op de Wieringermeerpolder is van dit gebied een lokale analyse gemaakt. Er zijn hier 27 chemische analyses gedaan die qua lokatie overeenkomen met de chloridereeksen. Over het algemeen komen deze punten wat betreft de resultaten goed overeen. Een uitzondering vormt het meest zuidelijke deel van het gebied, waar het patroon van verzoeting en verzilting voor enkele punten tegenovergesteld is. Dit zou verband kunnen houden met de aanwezigheid van de zoetwaterbel van Hoorn in deze regio.

Voor de acht punten waar bij de algemene vergelijking een negatieve correlatie bestaat tussen de datasets van de twee methoden, is meer gedetailleerd bekeken waar dit verschil uit voortkomt. De punten in kwestie zijn: B14F0012, B14G0081, B14G0028, B14H0040, B14H0059, B14G0077, B14G0070 en B14H0042.

- Bij punt *B14F0012* is de diepte van de metingen verantwoordelijk voor het verschil, aangezien bij de automatische correlatie de punten van de chemische analyse zijn vergeleken met chloride reeksen die veel dieper zijn gemeten. Na herziening blijkt uit metingen dat de chloride reeksen ondiep wel verzoeting vertonen, dus is er toch wel een positieve correlatie tussen de twee methoden.

- De chloride reeks van punt *B14G0081* reikt van 1981 tot 2001, en is over deze periode over het algemeen verzoet op 22 meter – NAP. De chemische analyse die in 1993 op deze diepte is gedaan geeft echter een verzilting aan. In figuur 4.13, die de chloride concentratie in de loop der tijd aangeeft, is echter te zien dat op deze diepte enkele oscillaties plaats hebben gevonden, waardoor in de periode van 1990 tot 1993 wel verzilting heeft opgetreden.



Figuur 4.13. Verloop van de chloride concentratie in de tijd op twee dieptes van punt B14G0081.

- In punt *B14G0028* zijn op vier verschillende dieptes chloride metingen gedaan (35, 43, 79 en 93 meter – NAP). Op al deze dieptes heeft gedurende de hele reeks verzilting plaatsgevonden. De chemische analyses die 70 meter naar het westen toe zijn genomen in put 14GP0082 zijn op 38, 45 en 63 meter diepte gedaan. De meting op 63 meter diepte heeft als resultaat verzoeting. Deze afwijking hoeft niet per se een discrepantie te betekenen, aangezien de meting niet op precies dezelfde lokatie en diepte is gedaan. Het is echter onwaarschijnlijk dat op deze afstand van punt B14G0028 een verzoetende zone tussen de verziltende lagen ligt. Voor deze diepte klopt de correlatie dus niet.
- Punt *B14H0040* heeft op twee dieptes een meetfilter; op 22 en 45 meter onder NAP. De drie chloride metingen die tussen 1974 en 1988 op 45 meter diepte zijn uitgevoerd laten geen verzoeting of verzilting zien. De twee metingen die op 22 meter diepte zijn uitgevoerd (in 1974 en 1983) laten een verzoeting zien. De chemische analyse die gebruikt heeft gemaakt van de gegevens uit 1983 laat echter een verzilting zien op 22 meter diepte, en een verzoeting op 45 meter. Er

- zou hier sprake kunnen zijn van kleine fluctuaties in de trend, die door het geringe aantal chloride metingen niet in de chloride reeks te zien zijn.
- Uit de reeks chloride metingen die in punt *B14H0059* zijn gedaan blijkt dat op een diepte van 25 - NAP verzilting is opgetreden, terwijl het grondwater op 15 meter diepte verzoet is. De chemische analyses stellen echter dat op beide dieptes verzoeting is opgetreden. De metingen zijn in dezelfde tijd genomen, dus hier komen de resultaten van de twee methoden niet overeen.
 - Bij punt *B14G0077* zijn er op een diepte van 25 meter twee chloride metingen gedaan (in 1977 en 1979). Door de relatief korte reeks heeft de relatief kleine afname in Cl toch tot een significante dc/dt geleid. De verzoeting tussen de twee meetdata heeft misschien niet de algemene trend aangegeven. Dit zou kunnen verklaren waarom de chemische analyse die in 1979 gedaan is een verzilting aangeeft.
 - Bij punt *B14G0070* komen geen van de metingen overeen. De chloride reeksen geven op drie verschillende dieptes verzilting aan (aan de hand van twee metingen, in 1974 en 1983). De chemische analyse uit 1974 stelt echter dat op deze dieptes verzoeting plaatsvindt. Alleen door fluctuaties in de trend zouden beide methoden toch met elkaar overeen kunnen komen, maar deze fluctuaties zijn niet te achterhalen aangezien er niet genoeg chloride metingen zijn.
 - Ook bij punt *B14H0042* komen de gegevens niet overeen. De chloride metingen geven een verzoeting aan, terwijl de chemische analyse op dezelfde diepte op verzilting duidt. Er is sprake van een korte reeks met twee punten, waardoor eventuele fluctuaties niet tot uiting komen.

De correlatietabel voor de Wieringermeer (aangepast voor het verschil in diepte van punt B14F0012) is gegeven in tabel 4.6.

	Chemische analyse: verzilt	Chemische analyse: verzoet
Reeks: verzilt	13	8
Reeks: verzoet	6	13

Tabel 4.6 Correlatie tussen de twee methoden voor de Wieringermeer.

Na deze lokale interpretatie kan gesteld worden dat de verschillende dieptes van de metingen niet zo'n grote rol spelen als gedacht. In slechts een van de acht punten is hierdoor een negatieve correlatie ontstaan. De oorzaak die tot de meeste negatieve correlaties leidt is een fundamenteel verschil tussen de twee methoden, namelijk de tijdsduur waarover de verzilting of verzoeting wordt berekend. De resultaten van de chemische analyses zijn waarschijnlijk wel correct voor het moment waarop ze worden gemeten, maar doordat de chloride concentratie kan fluctueren, zal de algemene trend worden gemist.

De methode voor het bepalen van verzilting of verzoeting aan de hand van de chloride analyses is vooral waardevol als er meerdere metingen door de tijd heen zijn gemaakt. Zo is de algemene trend te herkennen en kunnen ook de fluctuaties eruit gehaald worden.

4.4 Modeleren

4.4.1 Algemeen beeld model

De resultaten van het modeleren kunnen worden ingedeeld in drie perioden; de periode voor de inpoldering van de Wieringermeer en de aanleg van de afsluitdijk, (1332-1932), de periode vanaf de inpoldering tot nu (1932 tot 2000) en de periode vanaf 2000. In deel 4.4.2 worden de modeleer resultaten uit de tweede periode vergeleken met de trends die te zien zijn in de chloride metingen.

4.4.1.1 Periode 1332 tot 1932

De initiële opbouw van de chloride concentraties in het gebied is niet stabiel. Bij de Waddenzee en de Zuiderzee zijn de bovenste lagen van het systeem zout, maar hieronder bevindt zich zoeter grondwater (zoals te zien figuur 3.3). Doordat het zoute water een grotere dichtheid heeft zal dit proberen te dalen, terwijl het zoete water omhoog trekt. In het model is inderdaad te zien dat de zoete zone omhoog komt en er treedt dichtheidsgedreven stroming (vrije convectie) van het zoute water op.

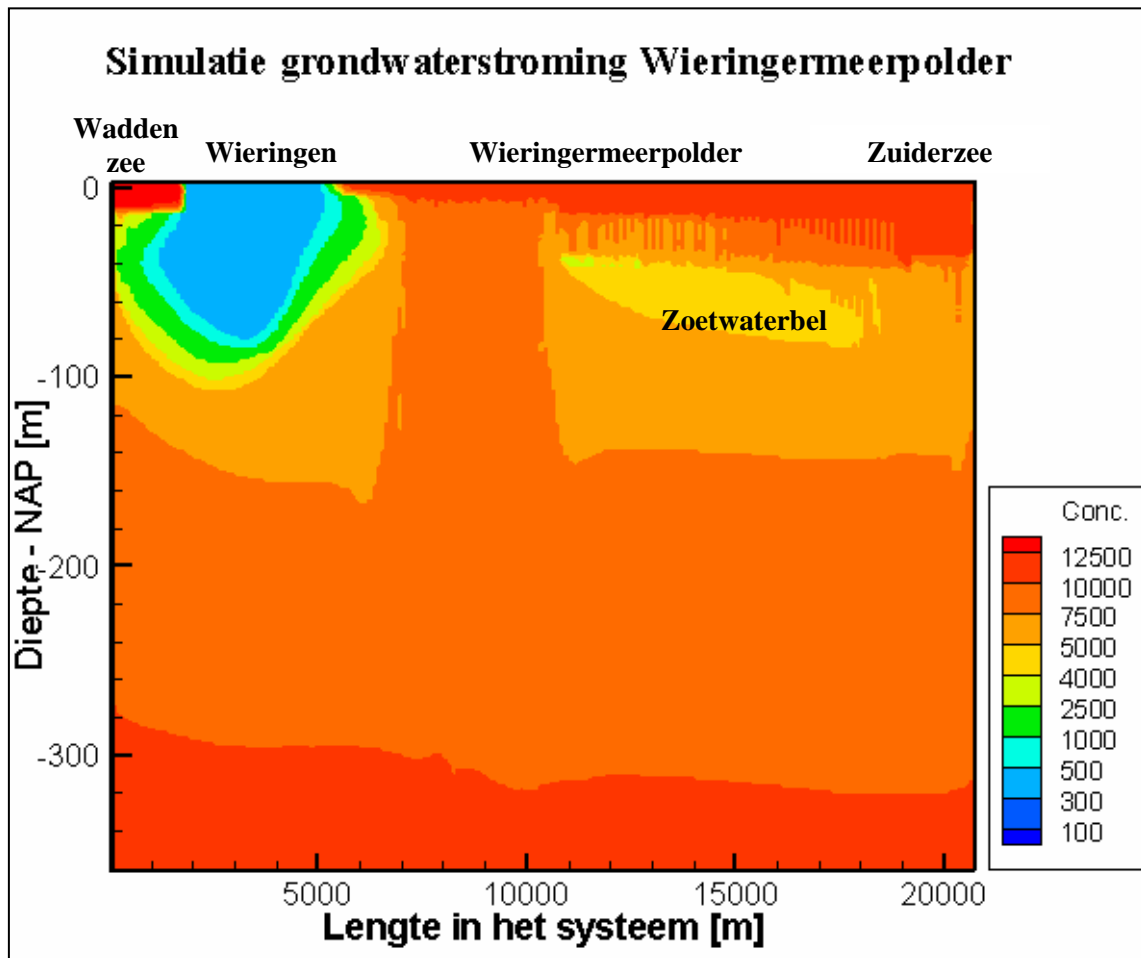
In het model gebeuren verschillende dingen tegelijkertijd, dus zal per deelgebied worden besproken welke processen plaatsvinden in deze eerste periode.

➤ *Waddenzee*

Tot 1350 vind alleen diffusie plaats, waarbij de bovenste zoute zone zich enigszins uitbreidt. Na 1350 vind op kleine schaal vrije convectie plaats tot een diepte van ongeveer 40 meter. Na 1450 is de zoetwaterbel onder Wieringen zo ver uitgebreid dat deze ook onder de Waddenzee voorkomt. Door de druk van de zoetwaterbel kan geen vrije convectie meer plaatsvinden. Tot het einde van deze periode blijft de bovenste 20 meter van het systeem zout, met hieronder (tot een diepte van 90 meter - NAP) een zwak tot matig brakke zone die de rand van de zoetwaterbel aangeeft. De grens tussen de matig brakke en sterk brakke zone daalt in de loop der tijd naar een diepte van 120 meter - NAP. Ook de grens met het zoute water daalt, naar een diepte van ongeveer 300 meter - NAP. Deze dieptes worden in 1600 bereikt, en blijven dan ongeveer stabiel. De zoetwaterbel breidt zich tot 1700 uit en blijft dan een constante grootte houden (zie figuur 4.12).

➤ *Wieringen*

Onder het eiland Wieringen breidt het zoetwatergebied snel uit in de diepte. Rond het jaar 1700 is de maximale diepte van de zoetwaterbel bereikt. Het zoete deel van de bel ligt tot een diepte van 80 meter, terwijl de zwak tot matig brakke rand tot een diepte van 100 meter voorkomt. De dikte van deze overgangszone blijft ongeveer gelijk, behalve aan de kant van de Wieringermeer, waar de zone breder wordt.



Figuur 4.14. Verdeling van de chloride concentraties in 1700.

Door de verschillende ontwikkeling aan beide kanten van Wieringen wordt de zoetwaterbel asymmetrisch. Aan de kant van de Waddenzee is de grens enigszins bol, terwijl aan de kant van de Wieringermeer een rechte grens voorkomt, waar de bel aan de top het breedst is. Waarschijnlijk komt dit door de top van de Waddenzee die vastgelegde randvoorwaarden heeft, waardoor de zoetwaterbel hier niet verder uit kan breiden. Hieronder komen echter lage stijghoogtes voor, waardoor de bel zich hier wel goed uit kan breiden. Aan de kant van de Wieringermeer is vindt sterke verticale dichtheidsstroming plaats, waardoor de bel zich hier niet staande kan houden.

➤ *Wieringermeer (westelijk deel Zuiderzee)*

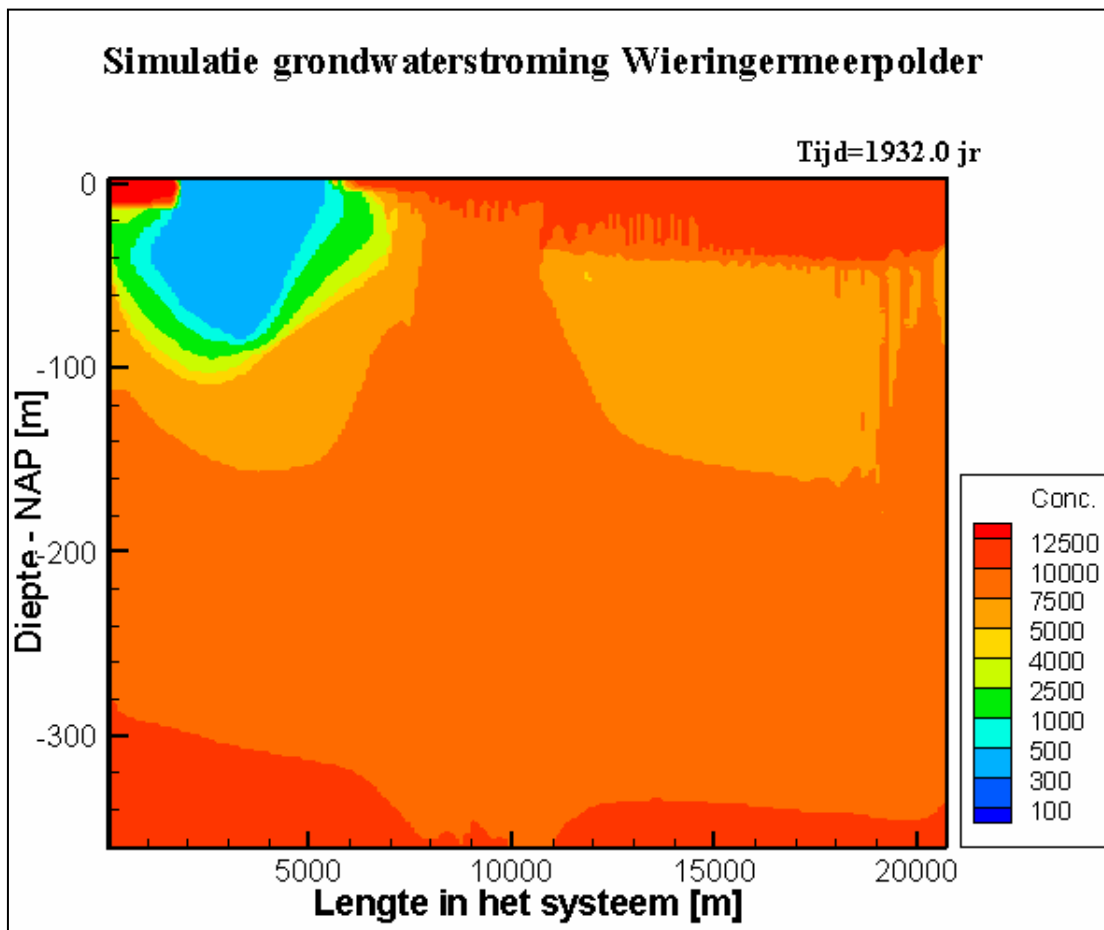
Door het ontbreken van een tweede afsluitende laag heeft het noordwestelijke deel van de Wieringermeer een andere ontwikkeling dan het zuidoostelijke deel.

In het noordwesten zorgt de hoge hydraulische conductiviteit van de ondergrond ervoor dat de instabiele initiële situatie niet in stand kan blijven. Direct na de start van de simulatie treedt dichtheidsgedreven stroming op. Vanaf het jaar 1700 is de situatie zo stabiel dat geen vrije convectie meer optreedt. De zoetwaterbel zelf is vanaf dit jaar op maximale grootte, terwijl de overgangszone zich langzaam uit blijft breiden naar het zuidoosten. Waarschijnlijk is dit het effect van diffusie en verandert het stromingspatroon

van de zoetwaterbel niet. De zoute zone aan de basis van het hydrologisch pakket is hier dieper komen te liggen dan in de rest van het onderzoeksgebied (zie figuur 4.15).

De slecht doorlatende laag die zich in het zuidoosten van het gebied bevindt remt de verticale stroming, waardoor dat gebied redelijk stabiel blijft. Tot 1420 zakt de zoete zone langzaam naar beneden, zonder dichtheidsgedreven stroming. Na deze datum krijgt de instabiliteit de overhand en beginnen de eerste zoutwater vingers te vormen. Deze stromingen lopen tot ongeveer 20 meter diep, waarna de chloride concentratie weer toeneemt met de diepte. Alleen de top van het systeem is onstabiel, dus alleen hier komt dichtheidsstroming voor. De stroming wordt waarschijnlijk afgeremd door de lagere hydraulische conductiviteit (vergeleken met het noordwestelijk deel van het gebied), waardoor hier minder hevige vrije convectie plaatsvindt. De verzilting begint in het zuidoosten van dit deelgebied en verschuift vervolgens naar noordwesten.

Na 1550 is het laatste zwak brakke water verdwenen. In het beeld van 1932 ligt tussen de 40 en 140 meter - NAP een matig brak gebied, in een omgeving van sterk brak grondwater. Dit is veel zouter dan uit de metingen van 1932 naar voren komt, maar het is wel een goed teken dat het model na 600 jaar verziltende invloed nog steeds een minder zoute zone in de ondergrond simuleert. De grenzen van de matig naar sterk brakke, en sterk brakke naar zoute zone blijven langzaam dalen.



Figuur 4.15. Verdeling van de chloride concentraties in 1932.

➤ *IJsselmeer (oostelijk deel Zuiderzee)*

De zoute top van dit deel van de Zuiderzee zakt tot het jaar 1550 door midden van dichtheidsgedreven stroming en diffusie tot een diepte van 40 meter. Deze situatie blijft tot 1700 enigszins stabiel (met een enkele zoutwater vinger, zie figuur 4.14), waarna de vrije convectie toeneemt en op de diepte die onder de Wieringermeer nog matig brak is, hier een sterk brakke samenstelling ontstaat.

In de periode tot 1932 verandert het beeld van de opgestelde initiële situatie naar een natuurlijk ontwikkelde situatie. Het beeld van 1932, zoals te zien in figuur 4.14, kan als uitgangssituatie kan worden gezien voor de veranderingen na 1932.

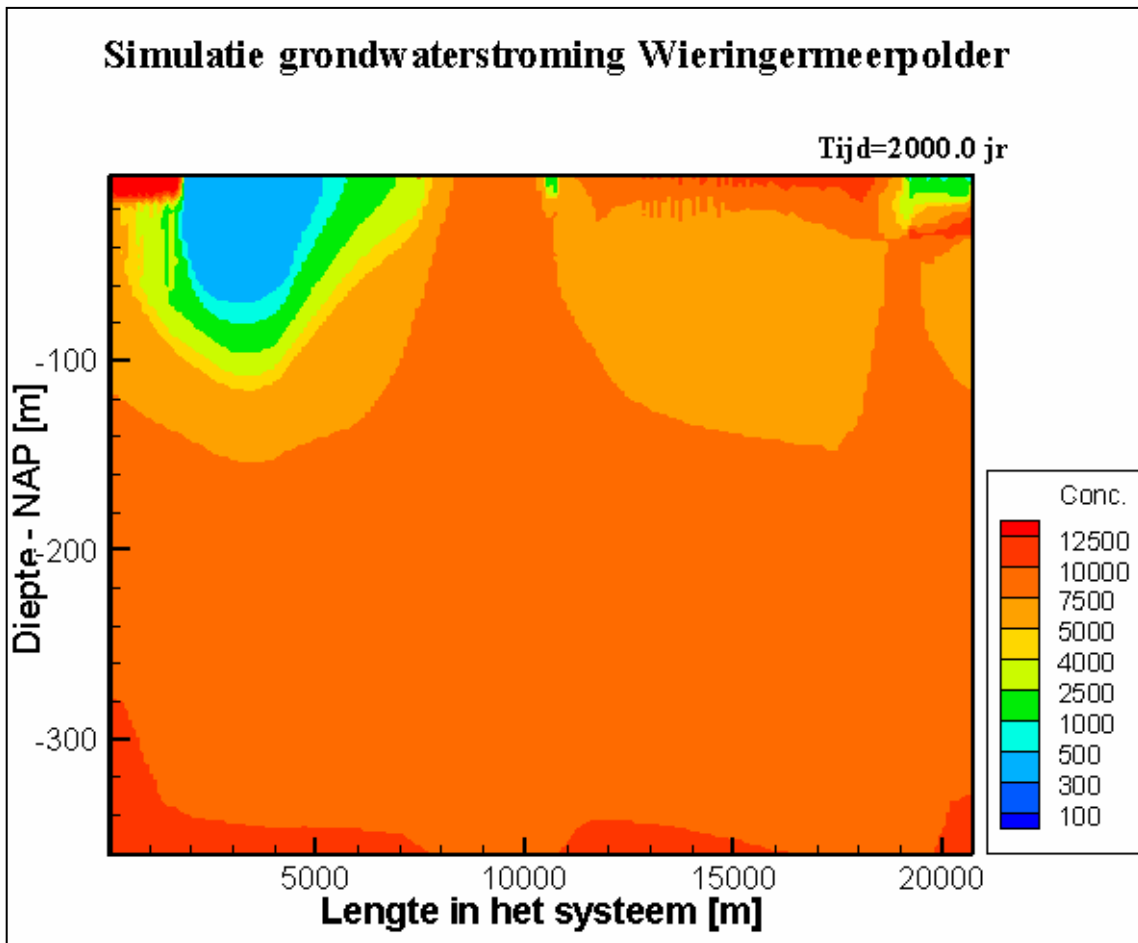
4.4.1.2 Periode 1932 tot 2000

Na de inpoldering van de Wieringermeer in 1932 is de stijghoogte in dit gebied plotseling verlaagd. Hierdoor is een groot verschil in stijghoogte tussen de Wieringermeerpolder en de naburige gebieden ontstaan. In het model is duidelijk te zien dat de grondwaterstroming van richting verandert. Ook neemt de snelheid waarmee de chloride concentraties veranderen na 1932 toe in vergelijking met de situatie van enkele tientallen jaren voor 1932, aangezien het saliniteits- en stromingspatroon toen in evenwicht was.

Doordat het stromingspatroon verandert, krijgt de Waddenzee de kans om het zoutwatergebied uit te breiden. Vrije convectie vindt plaats, waardoor de zoetwaterbel aan deze kant verzilt en de bolle vormt verdwijnt. Hierdoor wordt de zoetwaterbel meer symmetrisch. Het zoetwatergebied verschuift ook naar ondiepere gebieden, het zoete water reikt tot 60 meter - NAP, terwijl de diepte van de ondergrens van de overgangszone alleen in horizontale richting (naar het zuidoosten) verschuift. De dikte van de overgangszone neemt dus toe. Ook naar het zuidoosten neemt de dikte van de overgangszone toe, met name in de ondiepere lagen.

De saliniteit in het noordwestelijk deel van de polder blijft ongeveer gelijk. Door de laterale uitbreiding van de bovenste lagen van de zoetwaterlens verzoet de top van het meest noordwestelijke deel. Vanaf 1950 begint de invloed van de hoger liggende terp in het midden van de Wieringermeer toe te nemen. In 2000 komt hier tot een diepte van 15 meter - NAP een duidelijk zwak brak gebied voor. Door de opwaartse beweging van het grondwater begint het zuidoostelijk deel van de polder te verzoeten, aangezien de chloride concentraties hier in initieel afnemen met toenemende diepte.

De invloed van het IJsselmeer wordt mooi weergegeven door de geleidelijke verzoeting die hier in de ondergrond plaatsvindt. In 2000 zijn de bovenste 20 meter verzoet tot een zwak brakke samenstelling. Hieronder bevindt zich nog de sterk brakke tot zoute laag die in de vorige periode was ingetrokken, met hieronder een minder brakke zone. Ook treedt enige verzoeting op in de richting van het Wieringermeer (zie figuur 4.16). Deze figuur geeft het beeld in het jaar 2000 weer, omdat alleen de even jaren bij het modeleren zijn afgedrukt. Het is het onwaarschijnlijk dat het beeld in 2000 veel af zal wijken van dat in 2000.

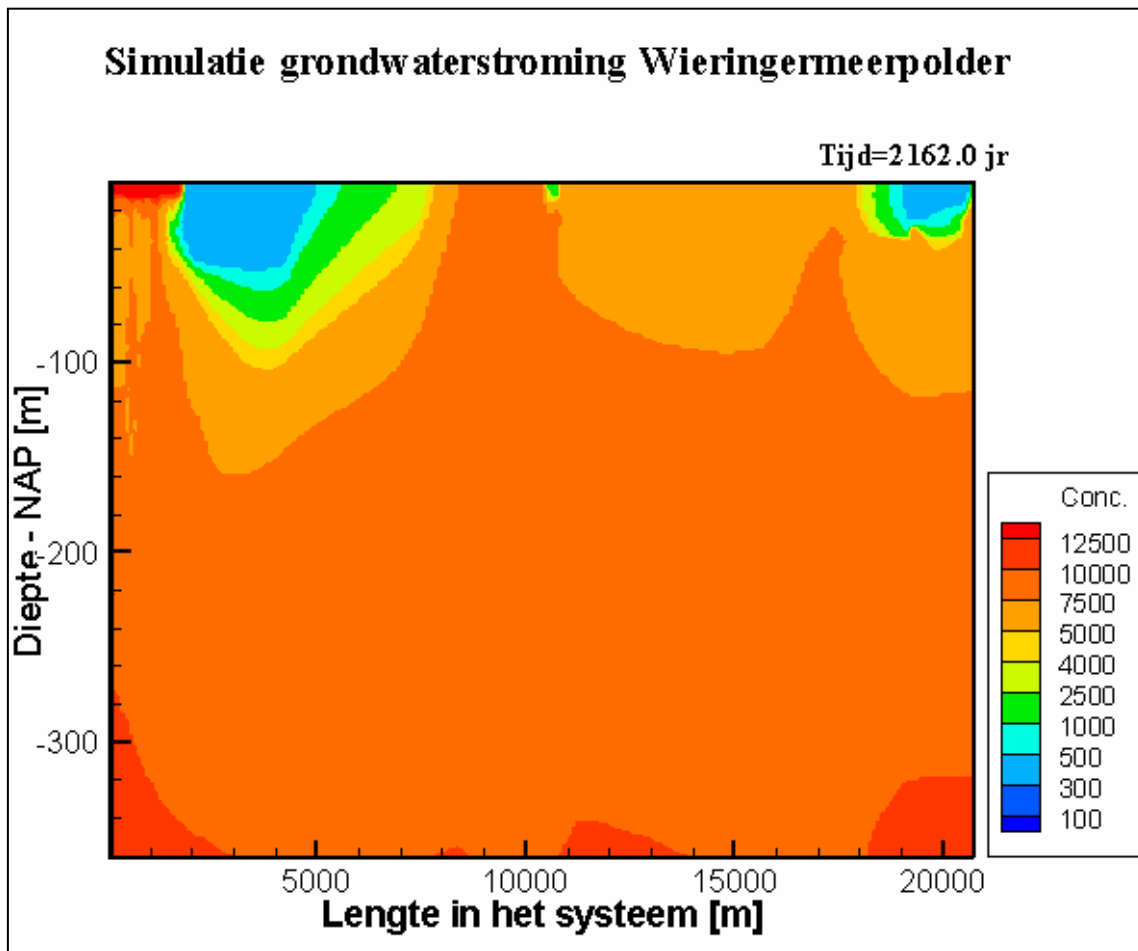


Figuur 4.16. Verdeling van de chloride concentraties in 2000.

4.4.1.3 Periode 2000 tot 2162

Het beeld dat het model geeft voor de toekomst is een voortzetting van de processen die sinds de inpoldering plaats hebben gevonden, al vermindert de snelheid waarmee deze processen plaatsvinden. De Waddenzee blijft een verziltende invloed uitoefenen op de ondergrond, waardoor de zoete bel onder Wieringen in de diepte steeds meer teruggedrongen wordt tot de grens tussen het land en de Waddenzee. Vanaf 2035 komt onder de Waddenzee vrije convectie voor, waardoor de ondergrond snel verzilt. De rest van de zoetwaterbel blijft wel constant, waardoor opnieuw een asymmetrische vorm ontstaat (zie figuur 4.17).

In de Wieringermeerpolder is weinig verandering te zien, het noordwestelijk deel lijkt in evenwicht, en in het zuidoostelijk deel blijft verzoeting optreden. Aan het einde van deze periode is de minst zoute laag bereikt, waardoor in de verdere toekomst een verzilting te verwachten is. De invloed van het IJsselmeer blijft toenemen, waardoor het zuidoostelijk deel van de polder vanaf de IJsselmeerdijk steeds verder zal verzoeten. Met name de bovenste 30 meter zullen een verzoeting ondervinden. Het zwak brakke gebied onder de terp bij Wieringerwaard blijft constant.



Figuur 4.17. Verdeling van de chloride concentraties in 2162.

Vanaf ongeveer 2080 treedt weinig verandering meer op. Alleen de zoutwaterpunt die voorheen onder de Zuiderzee lag verschuift verder naar het noordwesten.

4.4.2.1 Vergelijking modelresultaten met meetgegevens

De resultaten van het modeleren kunnen goed gebruikt worden voor een vergelijking met de chloride metingen. In het ideale geval komen de resultaten van het modeleren overeen met het beeld dat de chloride metingen geven, maar dat is niet het geval. Toch kan het algemene beeld over de grondwaterstromingen en de verandering in chloride concentraties ten gevolge van deze stromingen gebruikt worden voor de interpretatie van de chloride reeksen. Ook kan iets gezegd worden over de oorzaken van de afwijkingen tussen de twee data sets.

4.4.2.2 Algemeen beeld

Het algemene patroon van zoete en zoute gebieden komt redelijk overeen met de chloridemetingen (de 'werkelijkheid'), hoewel de absolute waarden wel verschillen. Het model geeft over het algemeen hogere chloride waarden aan dan uit de metingen blijkt, maar dit kan te wijten zijn aan een onjuiste initiële concentratie (zie hoofdstuk 5.2 voor

de discussie). De zoetwaterbel onder het voormalige eiland Wieringen heeft in de diepte juist een grotere extensie dan de metingen uitwijzen.

De chloride metingen van terp bij Wieringerwerf hebben een goede overeenstemming met de resultaten van de modelering. Hoewel de concentratie in het model groter is (zwak brak i.p.v. zoet), komt de diepte waarop de verhoging invloed uitoefent goed overeen. In het model ligt de basis van het zwak brakke gebied op 15 meter - NAP, terwijl in de chloride metingen te zien is dat de ondergrond van de terp tot een diepte van 20 meter zoet is.

De verzoeting die plaats vindt in de polder nabij Wieringen en het IJsselmeer komt overeen met de gestelde hypothese. Te zien is dat de verzoeting door het eiland Wieringen vooral in de eerste periode plaatsvindt, terwijl de verzoeting aan de rand van het IJsselmeer in de laatste twee perioden voorkomt. Het systeem in de buurt van Wieringen is in deze perioden al in evenwicht. Ook in de chloride metingen worden deze bevindingen gedaan: langs de grens met Wieringen vindt geen overheersende verzoeting of verzilting plaats. Aan de rand met het IJsselmeer heeft echter verzoeting plaatsgevonden.

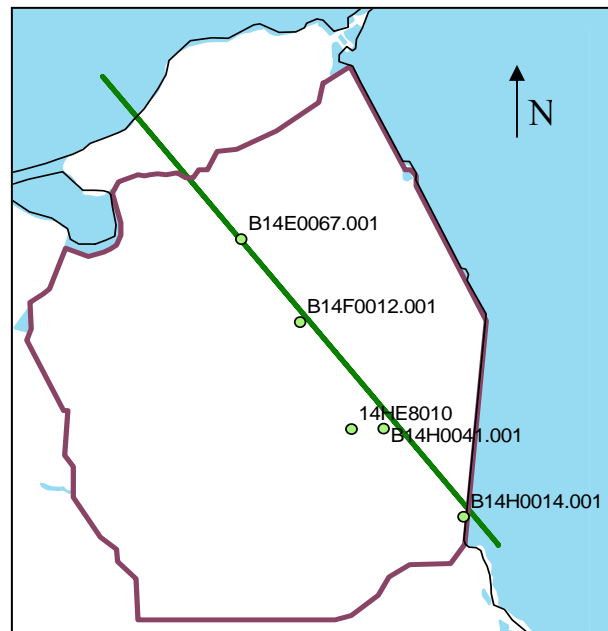
In de chloride metingen is ook te zien dat het gebied op Wieringen langs de grens van Wieringen met de Waddenzee is verzilt. Dit is ook in het model terug te zien, aangezien de zoetwaterbel na de inpoldering wordt teruggedrongen.

Het diepteprofiel dat onder het IJsselmeer te zien is komt ook overeen met de metingen. Met de diepte neemt de chloride concentratie eerst toe, dan af, en uiteindelijk weer toe. Het zoutere tussenliggende gedeelte heeft nog niet de tijd gehad om met het infiltrerende zoete water te mengen. Aangezien de zoete zone in de toekomst steeds dikker wordt, is het aannemelijk dat deze inversie uiteindelijk wordt opgeheven.

4.4.2.3 Vergelijking met meetpunten

Een minder algemene vergelijking kan worden gemaakt door de meetpunten die op of nabij de modellijn liggen direct te vergelijken met de trend die in het model te zien is. De meetpunten die hiervoor in aanmerking komen zijn: B14E0067, B14F0012, B14H0041 (in combinatie met 14HE8010) en B14H0014. Bij meetpunt B14H0041 is ook een VES meting van een nabijgelegen punt gebruikt, zodat een goed diepteprofiel van worden opgesteld. In figuur 4.18 worden de locaties van deze punten aangegeven.

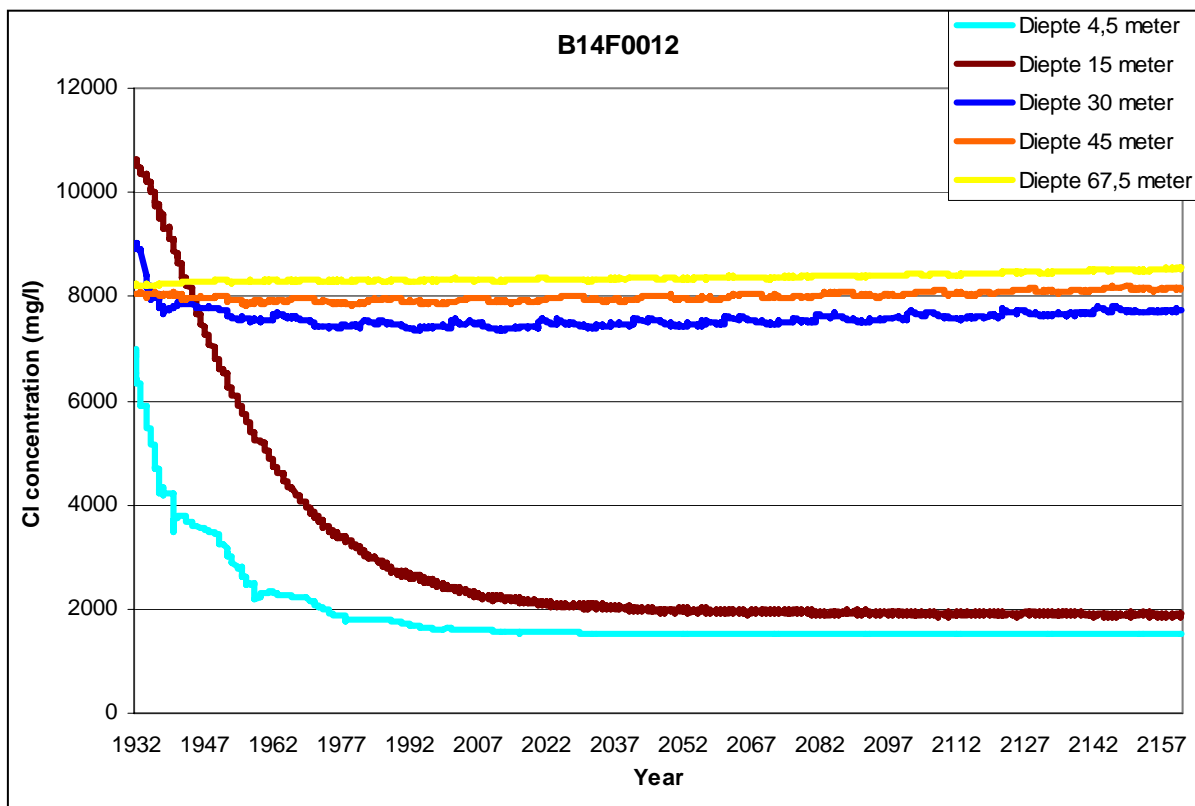
Tijdens het modeleren zijn enkele observatiepunten aangemaakt die het verloop van de chloride concentraties met de tijd hebben geregistreerd. Deze



Figuur 4.18. Overzichtskartaal met de vergeleken boorputten en de modellijn.

observatiepunten zijn zo gekozen dat de locaties overeenkomen met twee van de meetlocaties langs het profiel; boorgat B14F0012 en B14H0014. Het gesimuleerde verloop van de concentratie in deze punten is weergegeven in figuur 4.19 en 4.20, respectievelijk.

In meetpunt B14E0067 zijn in 1932 en 1957 metingen gedaan op verschillende dieptes, wat in figuur 4.10 is weergegeven. Ondiep (tot 30 meter - NAP) is tussen deze twee data verzoeting opgetreden, terwijl dit punt op 45 meter diepte verzilt is. Dit patroon komt overeen met de resultaten van het model. Het punt ligt op de buitenrand van de zoetwaterbel. De top verzoet door de uitbreiding van de zoetwaterbel, terwijl de diepere lagen verziltten door het stijgende zoute water. De zoetwaterbel breidt zich alleen in de bovenste lagen uit. Hoewel het patroon wel overeenkomt, zijn de concentraties die het model voorspelt rond de 35 meter diepte tot duizenden mg/l hoger dan uit de metingen blijkt. In de metingen is een zoet tot zwak brakke zone aanwezig op deze diepte, die waarschijnlijk deel uitmaakt van de zoetwaterbel van Wieringen. Dit is in het model echter niet terug te zien.



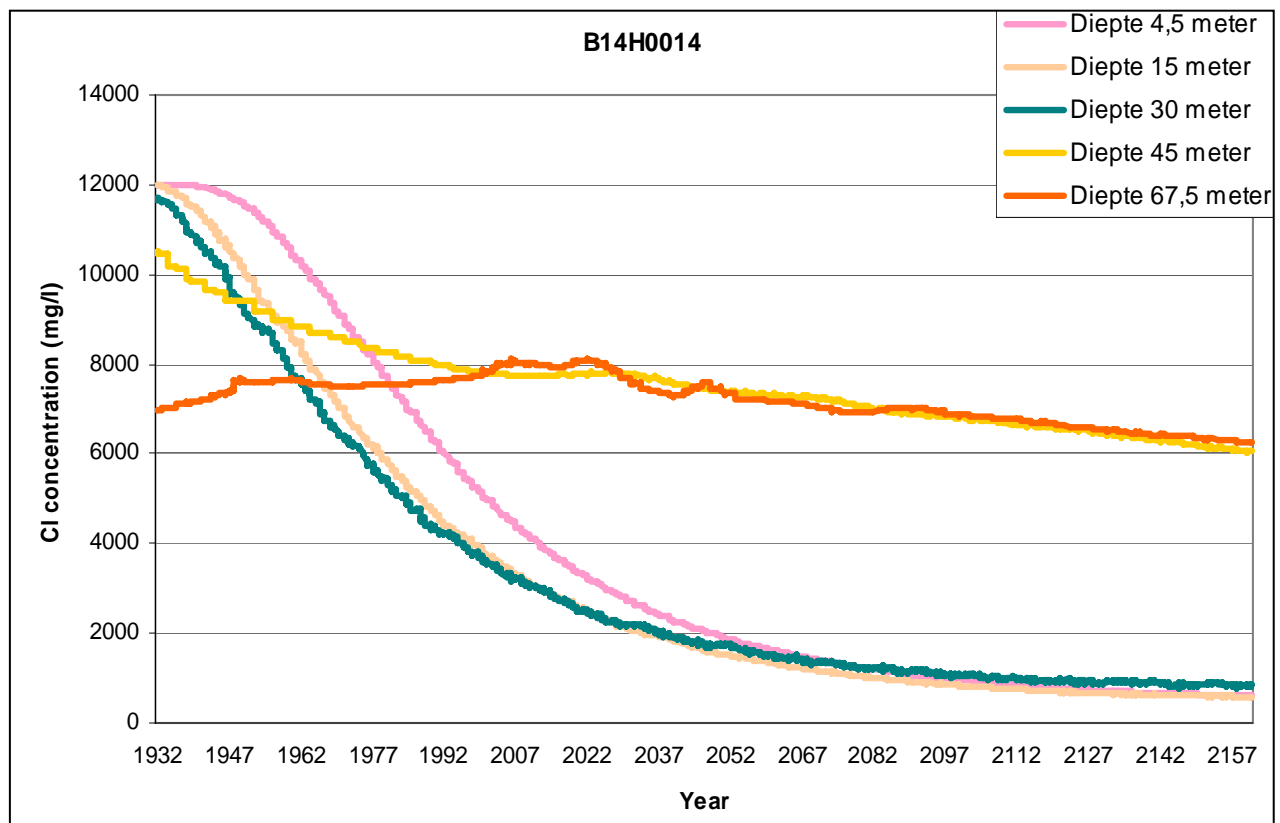
Figuur 4.19. Verwacht verloop van de chloride concentratie in de tijd in punt B14F0012.

In dit profiel is te zien dat in de twee ondiepe cellen sterke verzoeting optreedt, en dat de chloride concentraties vanaf ongeveer 2010 constant blijven. Opvallend is dat de diepere lagen bijna geen reactie vertonen op de veranderende omstandigheden en zeer langzaam iets verziltten.

De chloride metingen in punt B14F0012 geven een profiel dat in figuur 4.9 is gegeven. De bovenste meetpunt verzoet sterker en sneller in de werkelijkheid dan in het

model wordt berekend. Dit is waarschijnlijk een gevolg van het negeren van de oppervlakteprocessen. Ook in de ondergrond komen de patronen niet overeen. De metingen van 1932 geven een veel lagere chloride concentratie aan dan uit het model naar voren komt. Hierdoor komt de verzilting die op deze diepte voorkomt in het model niet naar voren. De uiteindelijke chloride concentraties (uit de metingen vanaf 1970) komen wel overeen met die van het model.

De combinatie van boorgat B14H0041 en VES meting 14HE8010 heeft een goede overeenkomst met het model. In het boorgat zijn op een diepte van 36,4 meter - NAP twee metingen gedaan. Hieruit blijkt dat verzoeting is opgetreden. In het model is te zien dat gedurende deze tijd (1977 tot 1979) een opwaartse beweging van het water plaatsvond. Doordat de chloride concentratie hier echter afneemt met de diepte, komt inderdaad verzoeting voor. De VES meting geeft een diepteprofiel voor 1978. Ook hieruit blijkt dat de chloride concentratie afneemt met de diepte. De absolute chloride concentraties zijn in het model echter te hoog, aangezien zowel de chloride meting als de VES meting een zoete zone aangeven op diepte, terwijl het model een matig brakke zone heeft berekend.



Figuur 4.20. Verwacht verloop van de chloride concentratie in de tijd in punt B14H0014.

Boorgat B14H0014 bevindt zich op de rand van de Wieringermeerpolder, dicht bij de grens met het IJsselmeer. In figuur 4.20 is te zien dat op deze locatie voorspeld wordt dat tot een diepte van 30 meter sterke, snelle verzoeting plaatsvindt. De diepere lagen verzoeten met een lagere snelheid. De verzoeting neemt af in snelheid vanaf 2060, maar blijft doorgaan. De diepere lagen verzoeten met een constante snelheid.

Het profiel van de chloride metingen in dit boorgat is gegeven in figuur 4.7. Te zien is dat tussen 1932 en 1957 tot een diepte van 30 meter sterke verzoeting heeft plaatsgevonden, met een heel lichte verzilting op grotere diepten. Het model voorspelt op grotere diepten een gestage verzoeting, maar de sterke verzoeting in de ondiepere lagen is in goede overeenstemming met de chloride metingen. Ook de absolute concentraties komen goed overeen.

Over het algemeen is te zeggen dat de modelresultaten goed overeenkomen met de gemeten chloridetrends. Het opvallendste verschil is de hogere chloride concentraties in het model, en zodoende het gemis van de zoetwaterbel van Hoorn. Dit kan te wijten zijn aan de te hoge chloride gehalten in de uitgangssituatie. Ook processen die in de derde dimensie plaatsvinden kunnen een ander saliniteitspatroon veroorzaken. De zoetwaterbel zou bijvoorbeeld buiten het onderzoeksgebied aangevuld kunnen worden met regenwater, wat in het model niet is meegerekend.

Hoofdstuk 5 - Conclusie, discussie en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Uit de voorgaande hoofdstukken zijn enkele conclusies te trekken. Wat betreft het algemene beeld van verzoeting en verzilting dat in Nederland te zien is, kan gesteld worden dat de meeste verzilting en verzoeting plaatsvindt in de gebieden die onder zeeniveau liggen. De verzoetings- en verziltingspunten zijn gemiddeld genomen van dezelfde intensiteit en komen ongeveer even vaak voor. Er is in Nederland dus geen algemene verziltings of verzoetingstrend.

De lokale analyse in de Wieringermeer wijst uit dat veel factoren het lokale zoet/zout patroon kunnen beïnvloeden. De invloed van het IJsselmeerwater is te bemerken langs de IJsselmeerdijk, waar de meetpunten sinds de inpoldering zijn verzoet. Dit komt overeen met de oorspronkelijke verwachting over verzoetingsprocessen bij de grens tussen hoger gelegen plassen en diepe polders.

De verwachting dat diepe polders, zoals de Wieringermeerpolder, zullen verzilten is slechts deels juist gebleken. Met uitzondering van de punten langs de IJsselmeerdijk zijn er net zoveel punten verzoet als verzilt. Dit komt doordat niet alleen zout water wordt aangetrokken door de lage stijghoogtes, maar ook zoetwater, zoals uit de zoetwaterbel van Hoorn. Dit water kan het gebied binnenstromen en zo lokaal voor verzoeting zorgen. Doordat meerdere processen invloed uitoefenen op het patroon van verzilting en verzoeting, gaat de verwachting dat diepe polders zullen verzilten niet altijd op.

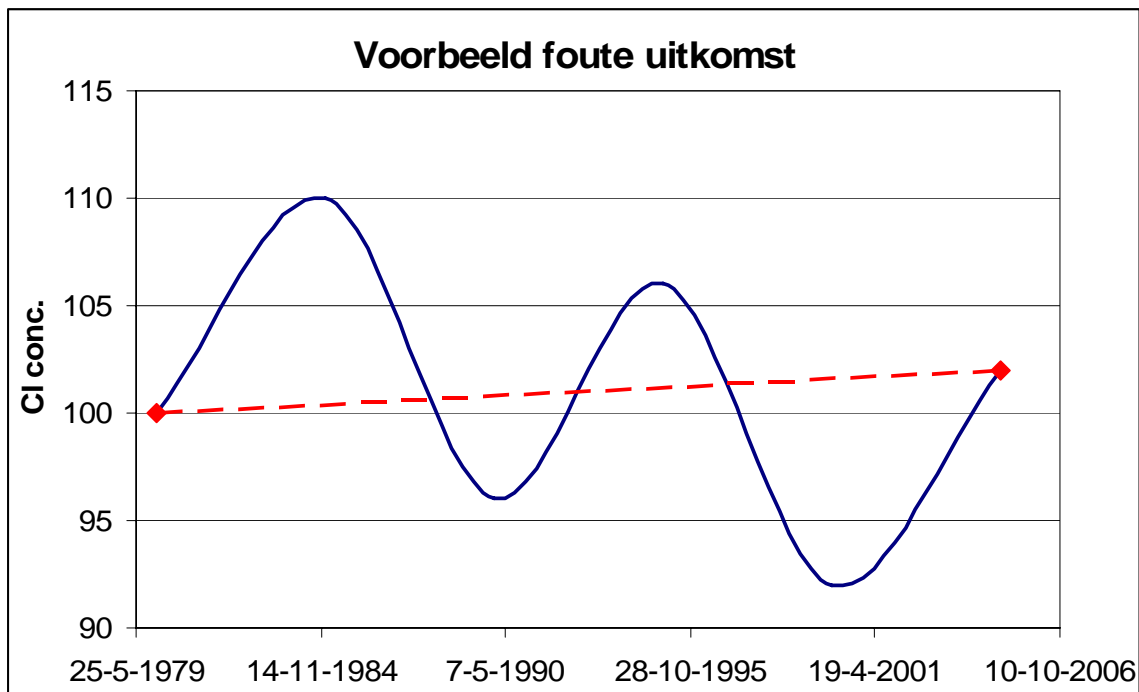
De goede doorlatendheid van de Holocene getijdengeulen die in het gebied aanwezig zijn hebben een tweeledig resultaat. Aan de ene kant heeft zeewater tijdens transgressies door vrije convectie de ondergrond in kunnen dringen, waardoor de watervoerende pakketten zijn verzilt. Aan de andere kant heeft vervolgens op deze locaties in het veengebied dat rond het jaar 800 aanwezig was, zoet water kunnen infiltreren. In dit geval kan geen dichtheidsgedreven stroming plaats hebben gevonden, maar zal een verhoogde stijghoogte voor infiltratie hebben gezorgd. Het uiteindelijke effect hangt onder andere af van de hydraulische gradiënt die in het veengebied aanwezig is, wat de mate van infiltratie bepaalt (Post, 2004). Het zoute grondwater in de ondergrond van het noordelijk van de Wieringermeer kan erop wijzen dat het ingedrongen zeewater hier nog niet uitgespoeld is. Aangezien de Wieringermeer tot de inpoldering deel uitmaakte van de zoute Zuiderzee, zou het zoute grondwater ook van recenter oorsprong kunnen zijn. Een ouderdomtest van dit grondwater zou kunnen uitwijzen of het hier Holoceen of recenter zeewater betreft.

De vergelijking met de andere methode die bepaalt of verzoeting of verzilting heeft opgetreden, de kationuitwisselingsmethode, leverde een onverwacht resultaat op. Uit de vergelijking blijkt dat er een slecht correlatie is tussen de twee methoden. Dit is waarschijnlijk een gevolg van de verschillende tijdsduur waarvoor de resultaten geldig zijn, en van de vergelijking zelf, aangezien de diepte van de metingen niet is meegenomen bij de vergelijking.

Het model dat van het gebied is gemaakt komt goed overeen met de trends in de chloride metingen. De concentraties in het model zijn voor het gebied onder de Wieringermeer te hoog, maar dit kan verholpen worden door het model aan te passen.

5.2 Discussie en aanbevelingen

Bij het uitvoeren van het onderzoek kwamen enkele problemen naar voren. De methode die werd gebruikt voor de bepaling van verzilting of verzoeting in een reeks van chloride metingen, houdt alleen rekening met de eerste en laatste meting in de reeks. Als fluctuaties in het chloride gehalte voorkomen, kan de uitkomst verkeerd uitkomen. Dit kan gebeuren doordat metingen niet altijd in hetzelfde seizoen worden gemeten, waardoor jaarlijkse fluctuaties verkeerd kunnen worden geïnterpreteerd. Een verzoetende trend kan op deze manier voor verzilting aan worden gezien (zie figuur 5.1) of vice versa. Door veel metingen te nemen kan de fluctuatie in de data worden herkend, en kan de fout worden gecorrigeerd.



Figuur 5.1. Voorbeeld van een hypothetische meetreeks van twee meetpunten (rode, gestreepte lijn) die een verzilting aangeeft, terwijl de werkelijke chloride fluctuaties (blauwe lijn) een verzoetende trend heeft.

Voor een goede interpretatie van welke processen zich in de ondergrond afspelen is het noodzakelijk dat geregeld metingen worden gedaan. De meetpunten zijn er vaak al, dus ze hoeven alleen gemeten te worden. Verziltings en verzoetingsprocessen zijn langzame processen, dus is het belangrijk dat regelmatig metingen worden gedaan, ook al is daar nu niet direct behoefte aan. Voor toekomstig onderzoek is het essentieel een zo compleet mogelijke verzameling gegevens te hebben.

Bij de vergelijking met de kationuitwisselingsmethode is een slechte correlatie ontstaan. Dit is ten dele het gevolg van de fundamentele verschillen tussen de twee

methoden. Zoals besproken in het vorige punt, analyseert de chloridemetingen methode meetreeksen die minstens een jaar lang zijn. Hierdoor kan, vooral als verschillende metingen zijn gedaan, de algemene trend worden herkend. De kationuitwisselings methode gebruikt echter gegevens die op een moment in de tijd zijn gemeten. Hierdoor is deze methode erg vatbaar voor korte fluctuaties in het saliniteits patroon. Alleen door op meerdere momenten een chemische analyse te nemen en die te analyseren kan de langdurige trend worden gesignaleerd.

Het tweede probleem werd veroorzaakt door de beperkingen van het ArcGIS pakket. Hierin is het mogelijk twee datasets met elkaar te correleren op basis van de x en y coördinaten, waardoor de correlatie tussen de resultaten van de twee methoden kon worden vergeleken. Helaas was het niet mogelijk ook de diepte van de metingen met elkaar te correleren, zodat de metingen met elkaar werden vergeleken die niet op dezelfde diepte gedaan waren. Hierdoor is waarschijnlijk een minder goede correlatie ontstaan.

Hetzelfde probleem ontstond bij het interpoleren van de chloridemetingen. Doordat dit niet in drie dimensies mogelijk was, was het noodzakelijk de dataset in lagen met verschillende dieptes op te delen, om zo een enigszins driedimensionaal beeld te verkrijgen.

Voor de vergelijking van de twee methoden zou ook met de hand een correlatie gemaakt kunnen worden, maar met 883 meetpunten is dit geen snelle opgave. Het zou handig zijn als het GIS pakket wordt aangepast, zodat in drie dimensies correlaties en interpolaties gemaakt kunnen worden.

Bij het modeleren werd geen rekening met de oppervlakteprocessen gehouden. Hierdoor was de top van het systeem niet nauwkeurig, en werden alleen de lagen dieper dan 5 meter onder NAP weergegeven. Het is echter waarschijnlijk dat de oppervlakteprocessen op sommige plaatsen een diepere invloed hebben, zoals bij de terp van Wieringerwerf. Dit levert een afwijking op in vergelijking met de chloride metingen. Er zijn vrij veel gegevens over het oppervlaktewater beschikbaar, die gebruikt kunnen worden voor een nauwkeurige simulatie van de processen die zich in het oppervlaktewater afspelen.

Omdat de chloride concentraties in het model over het algemeen te hoog uitvielen, is het waarschijnlijk dat de initiële concentraties of de randvoorwaarden niet goed zijn ingeschat. Met name in de periode van 1332 tot 1932 heeft dit tot grote afwijkingen kunnen leiden, wat tot in de latere perioden effect heeft.

Het zou interessant zijn het model aan te passen op de veranderende randvoorwaarden tussen 1332 en 1932, aangezien die in werkelijkheid niet gelijk zijn gebleven. De Zuiderzee heeft misschien pas na 1332 de Wieringermeer overspoeld, wat voorheen een veengebied was waar zoet water infiltreerde. Ook kan de simulatie eerder worden begonnen, om zo de ontwikkeling van het gebied volledig te simuleren. Een probleem hierbij is dat het moeilijk is te achterhalen wanneer het hoogveen overspoeld werd door zee, en wat de originele stijghoogten en chloride concentraties waren.

Een uitgebreide, waarheidsgetrouwe simulatie zal waarschijnlijk voor lagere chloride concentraties zorgen. Met een zoetere situatie in de eerste periode zal het gebied ook in de latere perioden lagere concentraties hebben, waardoor het model en de metingen beter overeenkomen.

Eventuele onderzoeksvragen voor de provincie Zeeland zijn:

- Wat is de invloed van de (hoogte van de) duinen op de saliniteits verdeling?
- Is in het patroon van verzilting en verzoeting de ligging van de oude geulen en kreek te herkennen?
- Hoe kan een punt op bepaalde dieptes sterk verzilt, terwijl op andere dieptes sterke verzoeting plaatsvindt?
- Wat is er aan de hand in de buurt van Goes?
- Noord-Beveland en Zeeuws-Vlaanderen: Wat is het patroon achter de verzoetings- en verziltingspunten?
- Walcheren: Welk proces veroorzaakt de verzilting?
- Schouwen-Duiveland en Zuid-Beveland: Welk proces zorgt voor de verzoeting in het centrale deel van deze gebieden?

Literatuurlijst

- **Beekman, H.E. en Appelo, C.A.J., 1989.** De zoetwaterbel van Hoorn in een hydrochemisch perspectief. I. inventarisatie Hydrochemie en Isotopenchemie. Centrale huisdrukkerij, Vrije Universiteit Amsterdam. 50 p.
- **Dam, J.C. van, 1988,** Aantekeningen en figuren bij het college Geohydrologie f 15 B. Technische Universiteit Delft. pp. 59-60.
- **Dienst der Zuiderzeewerken i.s.m. het rijksbureau voor drinkwatervoorziening, 1936.** Geo-hydrologische gesteldheid van de Wieringermeer. Rapporten en mededeelingen betreffende de Zuiderzeewerken no. 5. Algemeene landsdrukkerij, 's Gravenhage, 131 p.
- **Ente, P.J., 1969.** De bodemgesteldheid en de bodemgeschiktheid van het Balgzand en de Breehorn. Flevo-berichten no.66. Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Zwolle, 29 p. plus bijlagen.
- **Griffioen, J., 2003.** Kation-uitwisslingspatronen bij zoet/zout grondwaterverplaatsingen. Stromingen 9, nr. 4. pp. 35-45.
- **Grontmij, 2001.** Geohydrologisch onderzoek Wieringerrandmeer. Grontmij Noord-Holland, Alkmaar, 48 p. plus bijlagen.
- **Hoogheemraadschap van uitwaterende sluizen in Hollands Noorderkwartier, 1996.** De kwaliteit van water, bodem en oevers in het waterschap Hollands Kroon, 1993-1994, deel 2, aangedijkte landen, Wieringen en Wieringermeer, 171 p.
- **ICW, 1982.** Kwantiteit en kwaliteit van het grond- en oppervlaktewater in Noord-Holland benoorden het IJ. Werkgroep Noord-Holland, ICW regionale studies 16, 185 p.
- **Oude Essink, G.H.P., 1998.** MOC3D adapted to simulate 3D density-dependent groundwater flow; Proceedings of MODFLOW'98 Conference, Golden, Colorado, USA, pp. 291-303.
- **Oude Essink, G.H.P., 2001.** Salt Water Intrusion in a Three-dimensional Groundwater System in The Netherlands: a Numerical Study; Transport in Porous Media, 43 (1), pp. 137-158.
- **Oude Essink, G.H.P., 2002.** Salinisation of the Wieringermeerpolder, The Netherlands, Proceedings of 17th Salt Water Intrusion Meeting (SWIM-17), Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, pp. 399-411.

- **Post, V.E.A., 2004.** Groundwater salinization processes in the coastal area of the Netherlands due to transgressions during the Holocene. Academisch proefschrift, Vrije Universiteit. 138 p.
- **Provincie Flevoland, 2005.** De geschiedenis van de provincie Flevoland. Website: <http://www.flevoland.nl/smartsite.dws?id=275&main=3>, geraadpleegd op 19/05/05.
- **Rijkswaterstaat, 1993.** Geologische en bodemkundige atlas van het IJsselmeer. Samengesteld door Directoraat Rijkswaterstaat, directie Flevoland, R. Koopstra, G. Lenselink en U. Menke. Schaal 1:100.000.
- **Stichting Wetenschappelijke Atlas van Nederland, 2001.** Landaanwinning sinds 1300. Atlas van Nederland, deel 15: Water, 1986. Website: <http://avn.geog.uu.nl/index15.html>, geraadpleegd op 19/05/05.
- **TNO-NITG, Afdeling Geo-Infrastructuur, 2003.** Lithostratigrafische nomenclator ondiepe ondergrond Nederland, versie 1.0. Website: <http://www.nitg.tno.nl/nomenclatorShallow/start/start/introduction/index.html>, geraadpleegd op 10/12/05.