

1491-184

TNO Bouw en Ondergrond

Princetonlaan 6
Postbus 80015
3508 TA Delft

www.tno.nl

T 030 256 42 56
F 030 256 44 75
info@nitg.tno.nl

TNO-rapport

Onderzoek naar de effecten van de Hoofdwegverbinding A6-A9 op zoet-zout grondwater nabij het Naardermeer

Datum	11 mei 2006
Auteur(s)	dr.ir. Gualbert Oude Essink drs. Roelof Stuurman
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Noord-Holland
Projectnummer	034.69179
Rubricering rapport	2006-U-R0072/A
Titel	
Samenvatting	
Rapporttekst	
Bijlagen	
Aantal pagina's	36 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	0

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

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

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

© 2006 TNO

Samenvatting

Inleiding

In dit rapport wordt verslag gedaan van een aanvullend geohydrologisch onderzoek voor de planstudie MER / Schiphol-Amsterdam-Almere. Doel van het onderzoek is om de effecten in beeld te brengen van verschillende tunnelvarianten op de niet-stationaire zoet-zout verdeling in de ondergrond. De aandacht gaat daarbij vooral uit naar het Naardermeer, waar veranderingen in de waterhuishouding de natuurwaarden onder druk zetten. De effecten worden zowel kwalitatief als kwantitatief bepaald in termen van veranderingen in (zoetwater)stijghoogte, dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming, kwelintensiteit en zoutbelasting op het oppervlaktewater in het studiegebied. Bovendien worden de effecten gekwantificeerd van eventueel aanwezige zandbanen.

Geohydrologie in het studiegebied

In het oostelijke deel van het Naardermeer kwelt grondwater op dat afkomstig is van de stuwwallen van Het Gooi. Het westelijke deel van het Naardermeer is een infiltratie gebied. Van hieruit stroomt grondwater in noordwestelijke richting naar de diepe Nieuwe Keverdijksche Polder. In deze polder wordt de tunnelmond gesitueerd. Kwel in de Nieuwe Keverdijksche Polder is sterk. Voeding aan het regionale grondwatersysteem vindt tevens plaats vanuit de rivier de Vecht. In het verleden is geprobeerd het Naardermeer droog te leggen maar dat is niet gelukt wegens hoge drainage kosten (de kwel is groot) en lage landbouwopbrengsten (de zout concentraties zijn hoog).

Zoet-zout grondwater in het studiegebied

Het grondwater dat in de Nieuwe Keverdijksche polder omhoog komt heeft een relatief hoge zoutconcentratie. Zout transport in het grondwatersysteem is een traag proces. Uit de analyse van de chloride concentratie metingen blijkt dat het grondwatersysteem wat de zoet-zout verdeling betreft nog niet in evenwicht is. Ingrepen in het (verre) verleden liggen hieraan ten grondslag. Zowel verzilting als verzoeting zal optreden in het studiegebied.

Methodiek

Numerieke modellen van de ondergrond zijn geconstrueerd waarmee dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld zout transport worden gemodelleerd. MOCDENS3D is de gebruikte computer code. Deze code bestaat uit MODFLOW, een 'eindige verschillen methode' voor grondwaterstroming, en MOC3D, een 'deeltjesverplaatsingsmethode' voor zout transport. De effecten zijn gesimuleerd met behulp van 2D-dwarsprofiel modellen op zowel een regionaal als een lokaal schaalniveau. Het 3D grondwatermodel van Grontmij is gebruikt bij de bepaling van de locatie, de geohydrologische opbouw en de randvoorwaarden van de 2D-dwarsprofiel modellen. De initiële chloride concentratie verdeling in het gehele dwarsprofiel voor het jaar 2006 AD is iteratief bepaald aan de hand van chloride concentratie metingen en 'expert judgement'. Een viertal scenario's zijn doorgerekend over een tijdsperiode van 250 jaar:

- a) Geen tunnel en geen zandbaan,
- b) Een tunnel en geen zandbaan,
- c) Geen tunnel en een zandbaan,
- d) Een tunnel en een zandbaan.

De tunnel heeft een breedte van 50m, en wordt gemodelleerd als een zeer slecht doorlatende element in het watervoerend pakket. De zandbaan is geplaatst op de locatie van de tunnel, en heeft een breedte van 150m.

Resultaten en conclusies

Uit de modelberekeningen blijkt dat gedurende de komende 250 jaar ingrepen in het (verre) verleden nog steeds een groot effect hebben op de chloride concentratie verdeling en de zoutbelasting in het topsysteem. Per saldo neemt de zoutbelasting in dit dwarsprofiel gedurende de komende 250 jaar af.

Door de aanleg van een tunnel verandert op de lange termijn de zoet-zout verdeling, de kwelintensiteit en de zoutbelasting op het oppervlaktewater in de directe omgeving van de tunnel (maximaal 50m aan weersijden van de tunnel), maar deze verandering is slechts marginaal. Onder de tunnel zal verzoeting optreden omdat infiltrerend zoet grondwater vanuit het Naardermeer onder de tunnel naar grotere diepten moet stromen.

De aanwezigheid van een zandbaan laat het zoete grondwater vanuit het Naardermeer gemakkelijker toestromen: de verzoeting onder de tunnel neemt nog meer toe. Een zandbaan op de locatie van de te bouwen tunnel heeft tot gevolg dat de kwelintensiteit en de zoutbelasting groter is ten westen en ten oosten van de tunnel. Door de aanleg van een tunnel neemt de kwelintensiteit en de zoutbelasting toe. Hoewel de aanwezigheid van een zandbaan een grotere invloed op de kwelintensiteit en zoutbelasting heeft dan de aanwezigheid van een tunnel, blijft de invloed marginaal (over een zone van maximaal 50m, met name aan de westkant van de tunnel).

De korte tunnel variant zal de grootste effecten op het grondwatersysteem wat betreft kwelintensiteit en zoutbelasting veroorzaken. Ter plaatse van het Naardermeer zijn deze effecten echter verwaarloosbaar. Voor de overige tunnelverbindingsalternatieven geldt hetzelfde: ter plaatse van het Naardermeer treden geen effecten op wat betreft de kwelintensiteit en de zoutbelasting.

De verandering in (zoetwater)stijghoogte tijdens het bouwproces is klein en heeft nauwelijks effect op de grondwaterstroming. Het effect op de veranderingen in de chloride concentratie verdeling in het grondwatersysteem is eveneens te verwaarlozen.

Concluderend kan gesteld worden dat de veranderingen in (zoetwater)stijghoogte en kwelintensiteit als gevolg van de aanwezigheid van de tunnel marginaal zijn. Zo vallen de veranderingen in (zoetwater)stijghoogte en kwelintensiteit ruimschoots binnen de natuurlijke variatie van een grondwatersysteem, bijvoorbeeld onder invloed van de seizoenen. De effecten op de zoet-zout verdeling in het grondwater, en met name nabij het Naardermeer, zijn te verwaarlozen.

Inhoudsopgave

	Samenvatting.....	2
1	Inleiding.....	5
1.1	Doelstelling.....	5
1.2	Projectafbakening	5
1.3	Worst-case benadering.....	5
2	Nadere analyse van de gegevens	6
2.1	Het grond- en oppervlaktewatersysteem in het studiegebied.....	6
2.2	Zoet-zout grondwater in het studiegebied.....	8
2.3	Kwalitatieve inschatting van de mogelijke veranderingen	13
3	Kwantitatieve inschatting van mogelijke veranderingen	15
3.1	Bepaling exacte locatie 2D-dwarsprofiel.....	15
3.2	Opbouw van het model	16
3.3	Calibratie.....	23
3.4	Regionaal model: doorrekenen van de korte tunnel variant.....	25
3.5	Lokaal model: doorrekenen van de korte tunnel variant.....	28
3.6	Veranderingen tijdens het bouwproces	33
3.7	Effecten op de overige tunnelvarianten	33
4	Conclusies	34
5	Referenties	35

1 Inleiding

Het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat heeft de planstudie Schiphol-Amsterdam-Almere Fase 1 uitgevoerd (2006). In deze studie worden verschillende tracés onderzocht ter verbetering van de bereikbaarheid, waaronder het Verbindingsalternatief (de A6-A9). Een onderdeel van die studie is het in beeld brengen van de milieu effecten van de verschillende tunnelvarianten. Voor het onderdeel grondwater is door Grontmij een 3D grondwatermodel opgesteld met behulp van de 3D software code Microfem. De geohydrologie is vertaald uit REGIS gegevens. Met dit model zijn veranderingen in (zoetwater)stijghoogte en kwel berekend als gevolg van de tunnelvarianten. Het model houdt echter geen rekening met dichtheidsverschillen van het grondwater. Hiervan is verondersteld dat deze (door superpositie) uiteindelijk weinig invloed hebben op de berekende verandering in grondwaterstand en kwel als gevolg van de ingreep. De commissie MER heeft geoordeeld dat zoet-zout problemen, en het niet-stationaire aspect hiervan in het bijzonder onvoldoende onderzocht zijn. Om tegemoet te komen aan de zorgen van de commissie MER is TNO gevraagd extra onderzoek te verrichten.

1.1 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om de effecten van de verscheidene tunnelvarianten op zoet-zout grondwater nader in beeld te brengen. De aandacht is hierbij gericht op het grondwatersysteem van het Naardermeer. Een tweetal subdoelstellingen zijn geformuleerd:

1. Analyseren van de zoet-zout verdeling in het studiegebied en op basis van 'expert judgement' en metingen een kwalitatieve schatting geven van de mogelijke veranderingen in grondwaterstand en grondwaterstroming, wanneer rekening wordt gehouden met dichtheidsverschillen.
2. Met behulp van numerieke modellen in 2D-dwarsprofielen kwantitatief bepalen wat het effect is op de zoet-zout verdeling en de zoutvracht in de loop van de tijd is als gevolg van de ingreep (tunnel). Hierbij wordt expliciet gekeken naar het niet-stationaire aspect van de zoet-zout problematiek.

1.2 Projectafbakening

Dit project spits zich in eerste instantie toe op de omgeving van het Naardermeer en de korte tunnel variant, en wel op die plekken waar de grootste effecten berekend zijn met het (in de MER gebruikte) 3D grondwatermodel (Grontmij, 2005a, 2005b) en waar het zoet-zout grensvlak dicht bij het maaiveld ligt (zie figuur 6). Tevens worden de andere varianten in elk geval kwalitatief beoordeeld. De tijdsafbakening betreft effecten van de ingreep over de tijdsperiode van de huidige situatie tot en met 250 jaar later. Deze lange tijdsperiode is nodig omdat de verplaatsing van zout grondwater een traag proces is.

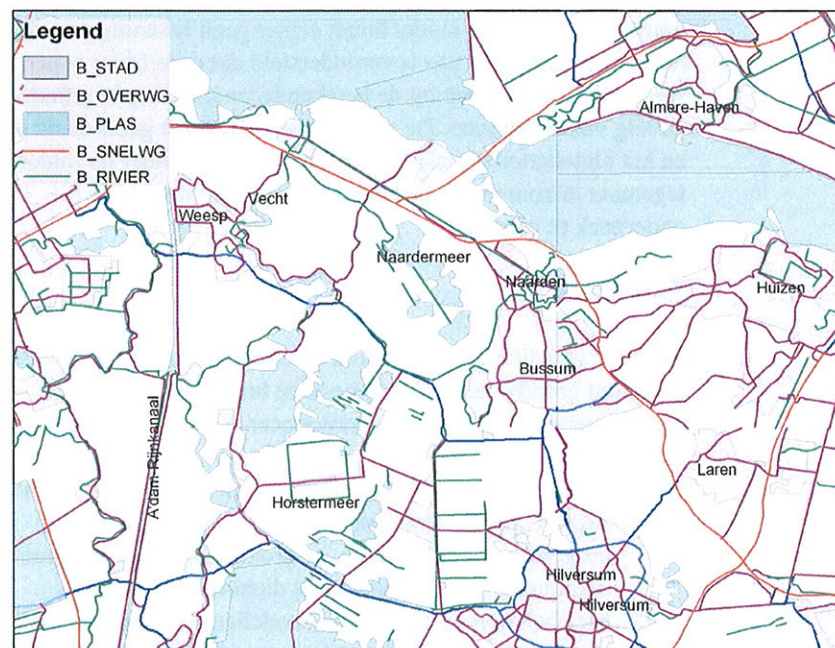
1.3 Worst-case benadering

Het onderzoek zal zich in eerste instantie richten op de korte tunnel variant, waarvan de tunnelmond het dichtst bij het Naardermeer ligt. Deze variant veroorzaakt namelijk de grootste effecten op het grondwatersysteem (zie Grontmij, 2005a). Indien blijkt dat de effecten zelfs hier verwaarloosbaar klein zijn, wordt voor de effecten van de overige tunnelvarianten een kwalitatieve beschrijving gegeven.

2 Nadere analyse van de gegevens

2.1 Het grond- en oppervlaktewatersysteem in het studiegebied

In figuur 1 is de positionering van het studiegebied weergegeven. Ten noordwesten van het Naardermeer is de tunnel voorzien. De kortste afstand tussen de tunnelmond en het Naardermeer zelf (Groote Meer) is ongeveer 750m; en tussen de tunnelmond en de richtlijngebieden van het Naardermeer ongeveer 350m.



Figuur 1: Studiegebied.

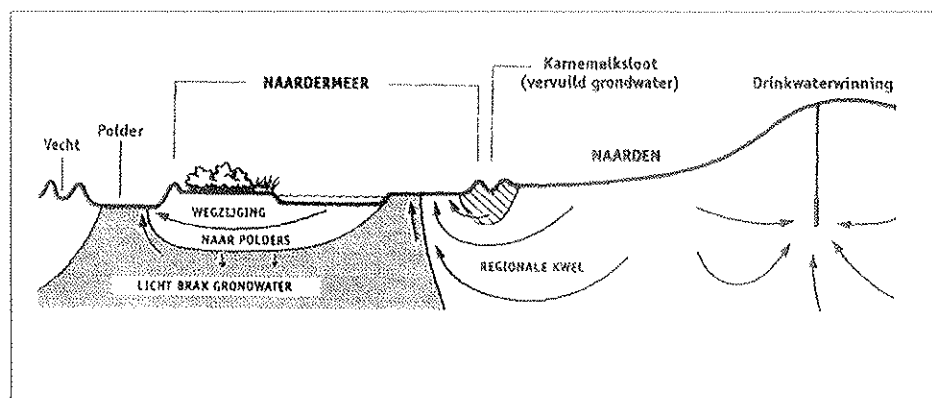
Het concept van het grondwaterstromingssysteem in de regio is redelijk eenduidig. In figuur 2 is het systeem weergegeven vanuit een grondwaterstromingsbenadering, en in figuur 3 vanuit een geochemische benadering. De stuwwallen in Het Gooi dienen als infiltratiegebied (Schot, 1991; Bloem en Ooteman, 2002). Grondwater kwelt in het oostelijke deel van het Naardermeer op. Het westelijke deel van het Naardermeer dient als infiltratiegebied. Van hieruit stroomt grondwater richting het noordwesten naar de relatief diepe Nieuwe Keverdijksche Polder. Deze polder maakt deel uit van de regio Gooi en Vechtstreek. De noordelijke tunnelmond zal in de polder worden aangelegd. De kwelstroming naar het oppervlak in de Nieuwe Keverdijksche Polder is sterk. Voeding vindt tevens plaats vanuit de rivier de Vecht.

Het Naardermeer is een natuurlijk meer en heeft een glaciële oorspong. Eeuwen geleden had het meer een open verbinding via de Vecht met de toenmalige zoute Zuiderzee (zie bijvoorbeeld figuur 4). De verbinding is waarschijnlijk tegen het einde van de 14de eeuw afgesloten door een dam. In de 17de eeuw (1629) heeft men geprobeerd het meer droog te leggen, maar doordat Spaanse troepen Amsterdam bedreigden heeft men de dijken doorgestoken. In 1883 is het meer wederom drooggelegd, maar ditmaal waren het economische redenen die ervoor zorgden dat de drooglegging tijdelijk was: 1. hoge

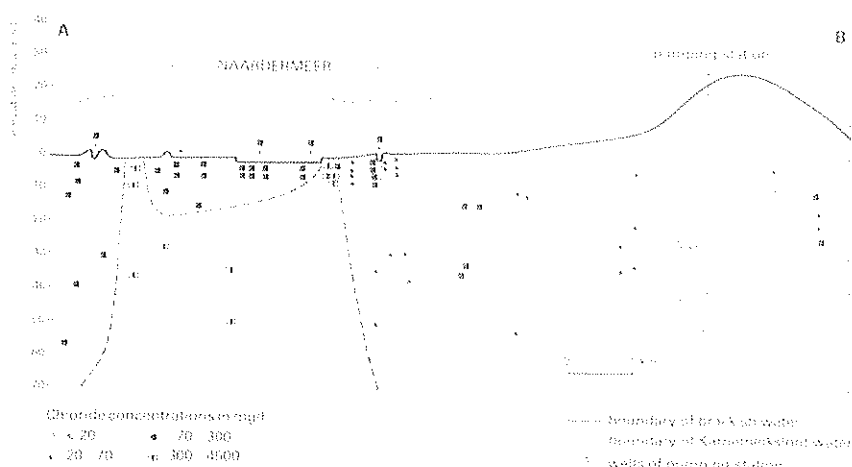
drainage kosten door grote kwel hoeveelheden, en 2. lage landbouwopbrengsten door hoge zout concentraties (en dientengevolge relatief grote zoutshade). Op de Historische Atlas van 1888 is al weer te zien dat op enkele plaatsen de drooggelegde polder waterplassen vertoond.

De natuurwaarden van het Naardermeer zijn sinds het eind van de zeventiger jaren achteruitgegaan. Hoofdoorzaak was een verandering van de waterhuishouding. Door grondwaterwinningen, peilverlagingen in de omgeving en de aanleg van de IJsselmeerpolders nam de wegzijging toe, terwijl de kwel naar het Naardermeer juist afnam. Om het water in de plassen op peil te houden was steeds meer aanvoer van gebiedsvreemd water nodig (Provincie Noord-Holland, 2002).

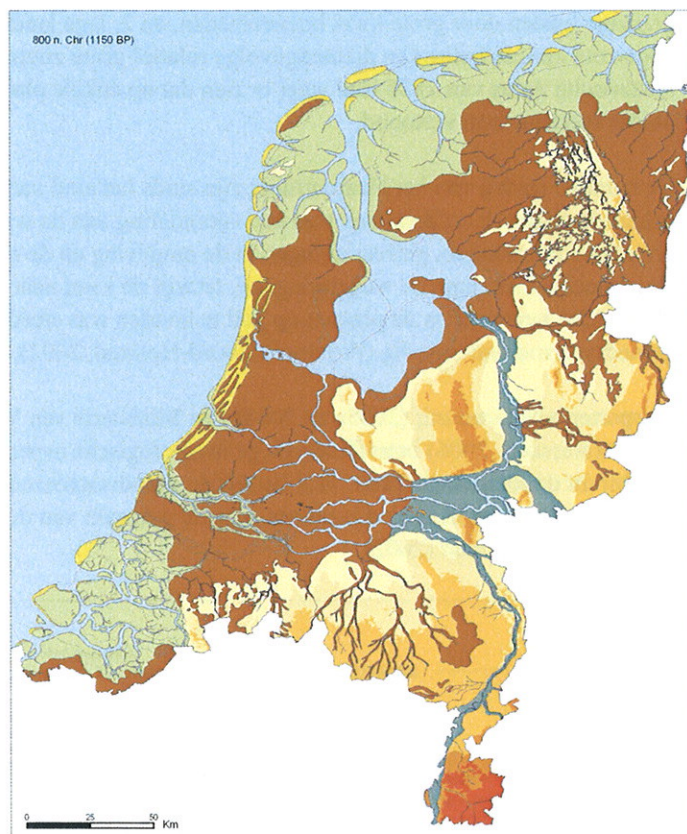
Rapporten van Grontmij (2005a en 2005b) en Ministerie van Verkeer en Waterstaat (Rijkswaterstaat, 2006) betreffende de geohydrologische aspecten van de planstudie zijn bij dit onderzoek gebruikt. Wat betreft de grondwaterstromingen en de zoet-zout verdeling in het studiegebied is tevens gebruik gemaakt van de studies van Schot (1991) en Bloem & Ooteman (2002).



Figuur 2: Schematisatie van de grondwaterstroming in het studiegebied (Natuurmonumenten, 1995).



Figuur 3: Chloride concentraties in het grondwater in het studiegebied (Schot, 1991).



Figuur 4: Anno 800 AD lag de zoute Zuiderzee zee dichtbij het studiegebied.

2.2 Zoet-zout grondwater in het studiegebied

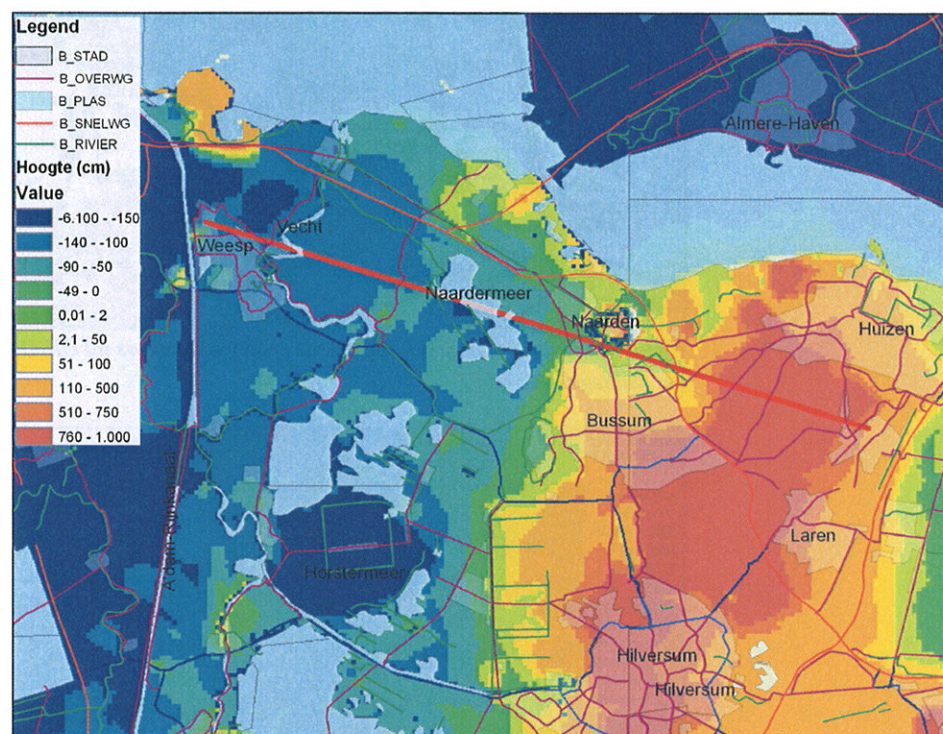
De geologie is vanzelfsprekend van invloed op de verdeling van zoet en, brak en zout¹ grondwater in het studiegebied. Door infiltratie uit gebieden in de omgeving (Vecht en Naardermeer) komt brak grondwater met de sterke kwelstroming aan het oppervlak. Bovendien zal grondwater vanaf de stuwwal (noordelijke deel van de Utrechtse Heuvelrug, figuur 5) onder relatief hoge druk het grondwatersysteem binnendringen, en een regionale grondwaterstroming richting het laaggelegen studiegebied veroorzaken.

De oorsprong van het voorkomen van het brakke grondwater is niet duidelijk. Verschillende fysische processen als moleculaire diffusie van zout Zuiderzee water in de watervoerende pakketten (Volker, 1961) en mechanische dispersie (menging) vanuit de diepe zoute mariene Formatie van Maassluis lijken niet waarschijnlijk (het diffusie proces is erg langzaam en de chloride concentratie neemt in het gebied met de diepte af). Aannemelijker is dat zout grondwater het grondwatersysteem is binnengedrongen tijdens extreme situaties (transgressies/inundaties), en dat dichtheidsstromingen het grondwatersysteem in verticale richting heeft verzilt (Post, 2003). Bovendien was waarschijnlijk destijds ook onder normale omstandigheden intrusie van zout zeewater te verwachten omdat de monding van de Vecht (een zijtak van de Rijn) te maken heeft gehad met de indringing van zout oppervlaktewater in de riviermonding (figuur 4).

¹ Voor zoet, brak en zout grondwater zijn de volgende chloride concentraties gehanteerd: **zoet**: chloride concentratie grondwater < 150 mg/l, **brak**: chloride concentratie tussen 150 mg/l en 1000 mg/l; **zout**: chloride concentratie > 1000 mg/l.

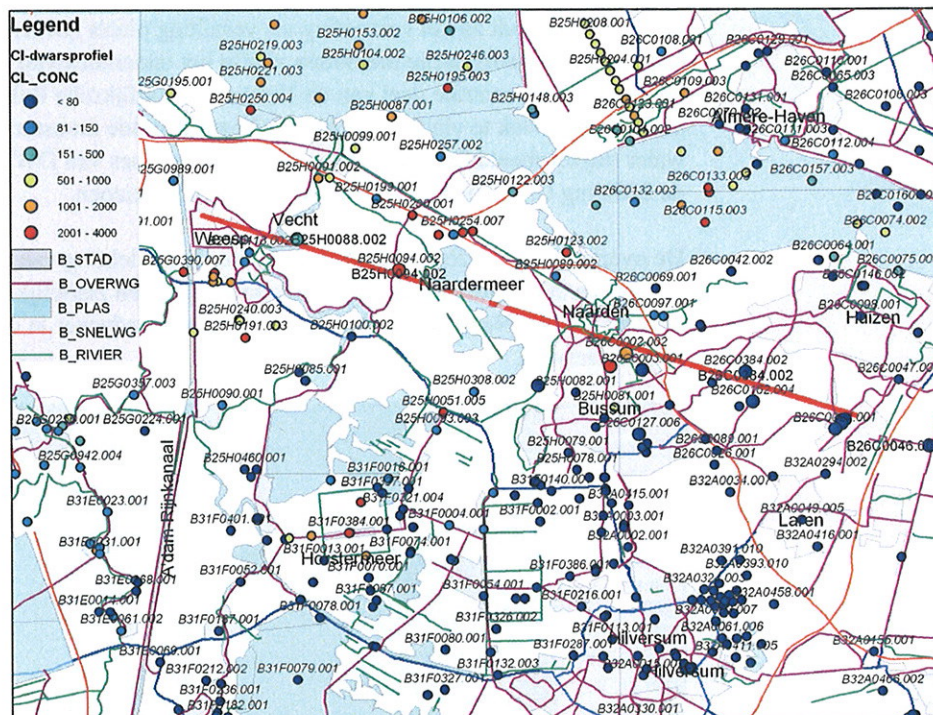
In dit gebied vindt zowel verzoeting als verzilting plaats (Bloem & Ooteman, 2002). Verschillende geofysische methoden zijn in het onderzoek van Bloem & Ooteman gebruikt. In het centrale deel van de Nieuwe Keverdijksche Polder is brak grondwater aan het oppervlak te vinden. Dit blijkt ook uit chloride monsters uit het oppervlakte water (bijvoorbeeld COLN, 1958 en chloride analyses van DWR). Concentraties boven de 2000 mg Cl-/l worden er gemeten in het zomerseizoen.

De overgang tussen zoet en brak grondwater in de richting van de rivier de Vecht ligt dieper dan 20m onder maaiveld. In het noordelijke en zuidelijke deel, evenals in de richting van het Naardermeer bevindt zich brak grondwater in deze polder tot 60m onder maaiveld.

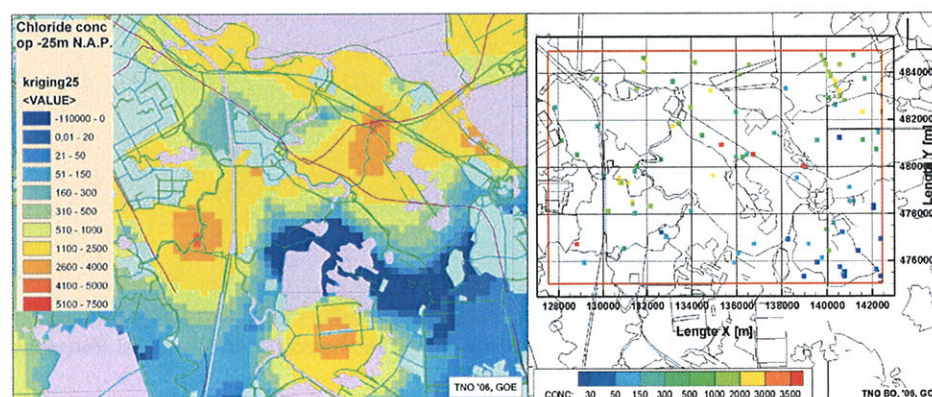


Figuur 5: Hoogtekaart van het studiegebied, AHN: Actueel Hoogtebestand Nederland, in cm.

DINO-Qua (te weten de geochemische databank van TNO) is vervolgens gebruikt om de zoet-zout verdeling in de ondergrond te analyseren. Het betreft chloride concentratie monsters vanaf 1900 (figuur 6). Figuur 7 toont aan dat de chloride concentraties van het grondwater op -25m N.A.P. relatief hoog zijn (TNO, 2005).



Figuur 6: Posities van de geanalyseerde chloride-monsters uit DINO-Qua in de omgeving van het studiegebied.



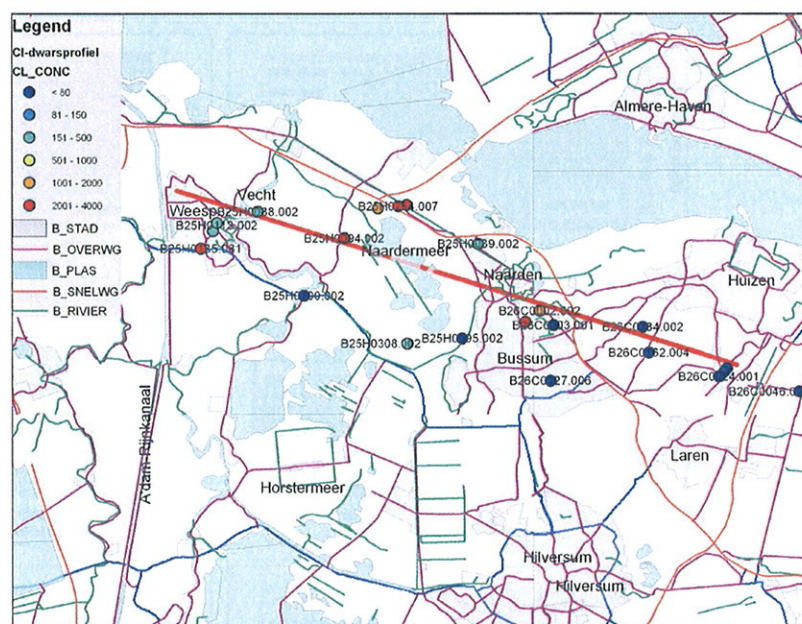
Figuur 7: a. Voorbeeld van een schatting van de chloride concentratie in het grondwater op -25m N.A.P. in het studiegebied, aan de hand van chloride concentratie analyses, VES-metingen en boorgatmetingen (TNO, 2005), b. positionering observatiebuizen.

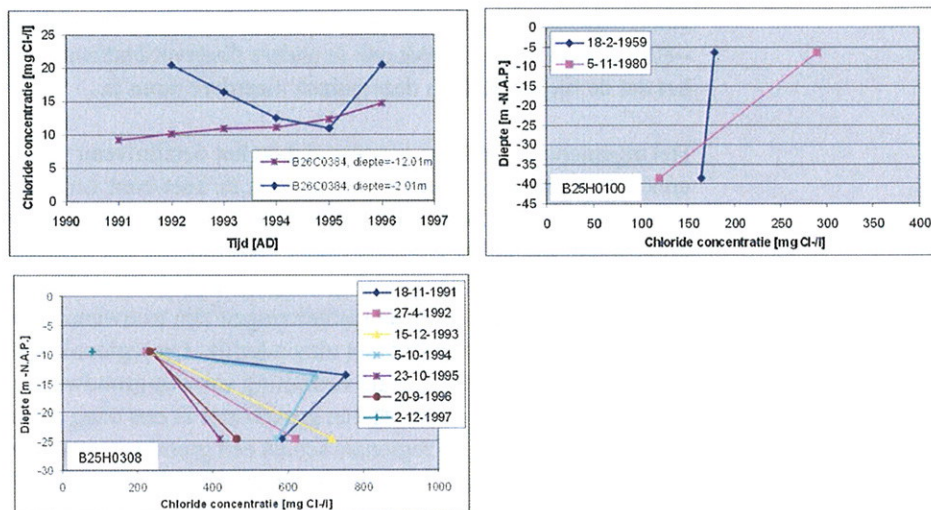
Een aantal chloride concentratie monsters uit DINO-Qua die in de buurt van het 2D-dwarsprofiel liggen zijn nader bekeken (figuur 8). Het betreft hier voornamelijk tijdreeksen² van chloride concentraties (de figuren 9, 10 en 11). Figuur 9 is te zien dat in het studiegebied zowel zout als zoet grondwater voorkomt. In figuur 10 zijn een tweetal observatiebuizen afgebeeld waar zowel verzoeting als verzilting optreedt. In figuur 11 zijn een aantal reeksen vermeld die een verzoeting van het grondwater laten zien. Opvallend is dat in een aantal tijdreeksen de chloride concentratie over een relatief korte tijdsperiode afneemt. Zo neemt in observatiebuis 25H0254 over een tijdsperiode

² Een tijdreeks wordt hier aangeduid als minimaal twee metingen op één locatie.

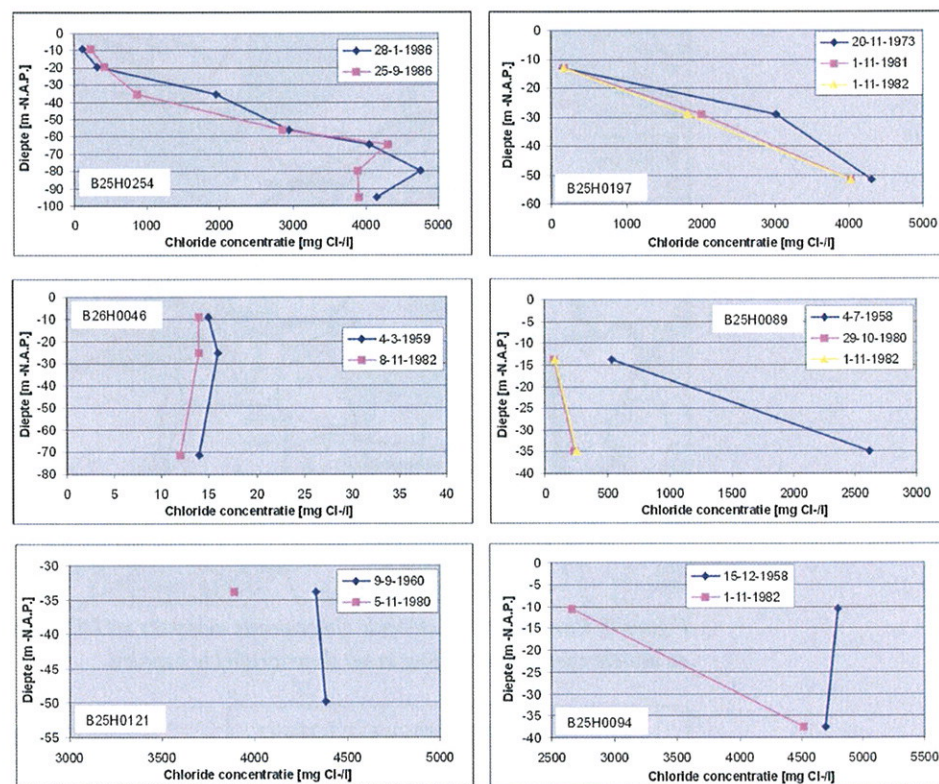
van 8 maanden de chloride concentratie zo'n duizend mg Cl⁻/l af op zowel -35m als -80m N.A.P. Verder treedt ook in andere observatiebuizen een sterke verzoeting op, zij het dat de tijdsperiode in deze buizen meerdere jaren is.

Het algemene beeld is nu ontstaan dat op het detailniveau van puntmetingen de chloride concentratie redelijk snel kan veranderen; de zoet-zout verdeling in de ondergrond blijkt heterogeen te zijn. Zo kunnen bijvoorbeeld op deze lokale schaal kleine volumes brak grondwater, die in het verleden waren ingesloten in slechtdoorlatende lagen, de observatiebuis passeren, met als gevolg dat de chloride concentratie snel kan veranderen. Dergelijke snelle veranderingen zijn trouwens op dit detailniveau ook in andere delen van Nederland niet uitzonderlijk. Op regionale schaal verloopt daarentegen de verzilting of de verzoeting van een grondwatersysteem langzaam; immers de regionale stroming van grondwater is een traag proces. Zo kan dus gemiddeld genomen op regionale schaal een grondwatersysteem langzaam verzilten, terwijl op lokale schaal, bijv. in één observatiebuis, een (tijdelijke) snelle verzoeting kan optreden.





Figuur 10: Zowel verzilting als verzoeting van het grondwater in het studiegebied.



Figuur 11: Verzoeting van het grondwater in het studiegebied.

Aan de hand van de chloride concentratie monsters kan het volgende gesteld worden:

1. Metingen hebben plaatsgevonden over een tijdsperiode van tientallen jaren

De chloride concentraties in het studiegebied zijn gemeten in de loop van vele tientallen jaren. Aangezien het grondwatersysteem qua zoet, brak en zoutverdeling nog niet in evenwicht is, zullen de huidige concentraties in de observatiebuizen waarschijnlijk afwijken van de destijds gemeten waarden.

2. Het grondwatersysteem is wat de zoet-zout verdeling betreft nog niet in evenwicht

De tijdsreeksen (figuren 9-11) tonen aan dat het grondwatersysteem in dit gebied zich wat betreft de zoet-zout verdeling nog steeds niet in een stabiele evenwichtssituatie bevindt. Dit geldt voor de meeste Nederlandse grondwatersystemen in het (voormalige) kustgebied. Geohydrologische veranderingen in de randvoorwaarden (bijvoorbeeld polderpeilaanpassingen veroorzaakt door maaiveldverlagingen) hebben grondwaterstromingen in gang gezet die zoet, brak en zout grondwater verplaatsen. Transport van zout in het grondwatersysteem is een traag proces, en de evenwichtssituatie is nog niet bereikt.

3. Brak tot zout grondwater kwelt op in de Nieuwe Keverdijksche polder

Het grondwater dat in de Nieuwe Keverdijksche polder opkwelt is brak tot zout. Het oppervlaktewater in de polder heeft tevens een hoog zoutgehalte.

2.3 Kwalitatieve inschatting van de mogelijke veranderingen

De uitgebreide modelberekeningen van Grontmij (2005a en 2005b) hebben betrekking op de waterkwantiteit: te weten stijghoogtepatroon en kwelintensiteit. De effectberekeningen van Grontmij laten zien dat de permanente verandering in kwelintensiteit bij alle tunnelvarianten beperkt blijft, en dat de invloedszone van verandering is maximaal enkele honderden meters: het is dus een lokaal effect. Binnen de invloedszone liggen de veranderingen in kwelintensiteit in de range van 0.1 en 0.5 mm/dag (Grontmij, 2005a). Ten opzichte van de absolute waarden in dit gebied, zijnde in de range van 1 mm/dag tot 5 mm/dag is dit marginaal. Seizoensale veranderingen in de kwelintensiteit door bijvoorbeeld polderpeilaanpassingen (zomer- en winterpeil) liggen namelijk in dezelfde orde van grootte. In alle varianten is de verandering in kwel en infiltratie door de aanleg van de tunnelmond al enkele honderden meters vanaf het tracé verwaarloosbaar klein.

Bovenstaande betekent echter niet automatisch dat buiten de invloedszone als gevolg van de aanleg van de tunnel ook geen verandering in de positie van het zoet-zout grensvlak te verwachten is. Zo kan het stijghoogtepatroon weliswaar nauwelijks veranderen, een ander stromingspatroon zou over een tijdsperiode van 250 jaar de zoet-zout verdeling behoorlijk kunnen wijzigen.

Ondanks het feit dat in het studiegebied de gemeten chloride concentraties (tot enkele duizenden mg Cl⁻/l) in de directe omgeving van het 2D-dwarsprofiel beduidend lager zijn dan de concentraties in het kustgebied, is toch het dichtheidseffect op de grondwaterstroming niet op voorhand te verwaarlozen. Bovenin het grondwatersysteem zullen de grondwaterstroming en het zout transport waarschijnlijk nauwelijks worden beïnvloed door dichtheidseffecten (de chloride concentraties zijn er niet hoog genoeg). In het deel van het grondwatersysteem dieper dan ongeveer -100m N.A.P. zal het zout transport door dichtheidseffecten waarschijnlijk anders verlopen dan wanneer we te maken zouden hebben gehad met een volledig zoet grondwatersysteem. Bovendien is de tijdschaal van belang waarover het verziltingproces zich afspeelt. Op een tijdschaal van 250 jaar kunnen zelfs marginale dichtheidseffecten resulteren in een andere zoet-zout verdeling in het 2D-dwarsprofiel. Het Naardermeer ligt weliswaar in alle varianten buiten de invloedszone, ook daar is het effect van de aanleg van de tunnel op de positie van het zoet-zout grensvlak (en diensgevolge de zoutbelasting) kwalitatief niet direct eenduidig te bepalen.

Daarom zal in het volgende hoofdstuk 3 met behulp van numerieke modellen een gedetailleerde kwantificering worden gegeven. Er is daarbij gerekend aan dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld stoftransport om de effecten op de zoet-zout verdeling als gevolg van veranderingen in de grondwaterstroming te bepalen.

Tenslotte moet worden opgemerkt dat de zoet-zout verdeling in het studiegebied zich niet in een evenwichtssituatie bevindt (zie ook paragraaf 2.2). Na de aanleg van de tunnel zal de zoet-zout verdeling zeer waarschijnlijk veranderen, maar deze verandering is dan niet te wijten aan de ingrepen.

3 Kwantitatieve inschatting van mogelijke veranderingen

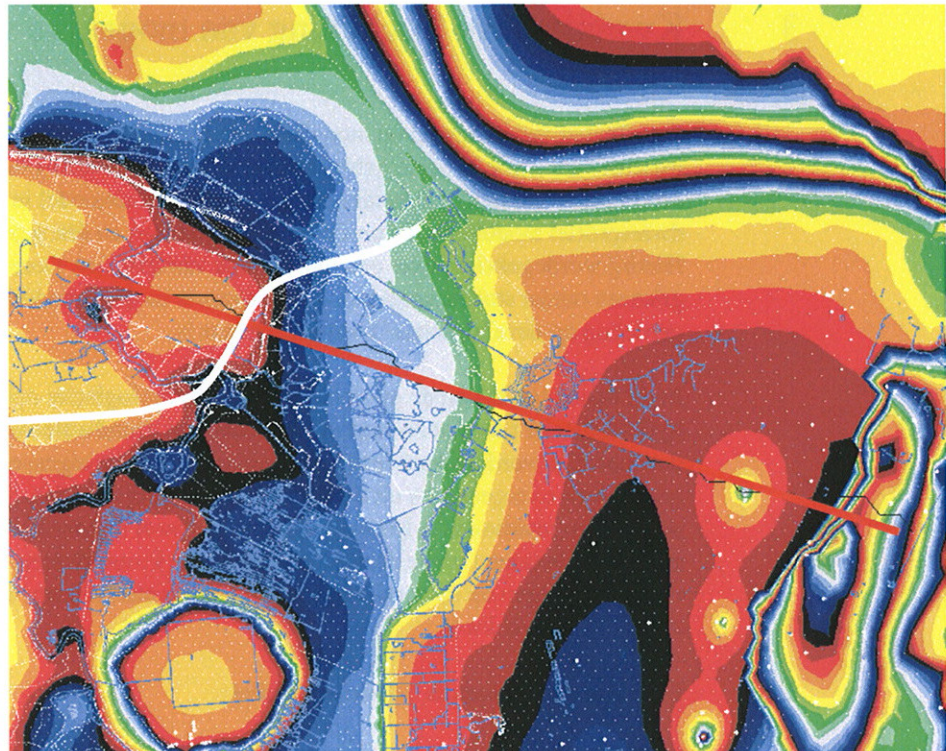
De effecten van de tunnel op mogelijke veranderingen in de zoet-zout verdeling zijn op inzichtelijke wijze in beeld gebracht door gebruik te maken van zowel een regionaal als een lokaal numeriek dichtheidsafhankelijk grondwatermodel in een tweetal 2D-dwarsprofiel modellen (één profiel zonder zandbaan en één profiel mét zandbaan). Hierbij wordt gekeken over een tijdsperiode van 250 jaar. Deze periode is zo lang gekozen omdat stoftransport een traag proces is en de verandering in de zoet-zout verdeling op deze tijdschaal kwantificeerbaar is.

In dit hoofdstuk zullen de geometrie, de geohydrologische opbouw en de hydrologische randvoorwaarden van zoet-zout grondwatermodellen over het 2D-dwarsprofiel worden beschreven. De geohydrologische eigenschappen in het model zijn grotendeels overgenomen uit de studie van Grontmij (2005a). Met het in dit hoofdstuk beschreven instrument is het mogelijk om op zowel regionale als lokale schaal het effect van de tunnel op de zoet-zout verdeling te kwantificeren. Er is daarbij gekeken naar de gevolgen op de verzilting van het grondwatersysteem, de kwelintensiteit en de zoutbelasting via kwel.

3.1 Bepaling exacte locatie 2D-dwarsprofiel

Uit het huidige 3D grondwatermodel van Grontmij is met behulp van stroombaanberekeningen een voorstel gedaan van een 2D-dwarsprofiel over de verscheidene tunnelvarianten (figuur 12). Vervolgens is de numerieke modellering opgestart. Hierbij is de positie van het 2D-dwarsprofiel zodanig gekozen dat de locaties waar de effecten uit de Grontmij berekeningen maximaal zijn ook in het 2D-dwarsprofiel zijn opgenomen.

Het 2D-dwarsprofiel bevindt zich over de relevante onderdelen in het studiegebied: de Utrechtse Heuvelrug (inclusief de grondwateronttrekking nabij Huizen), het Naardermeer, de Nieuwe Keverdijksche Polder, de tunnelmond, de rivier de Vecht, en tenslotte de Bloemendaler polder.



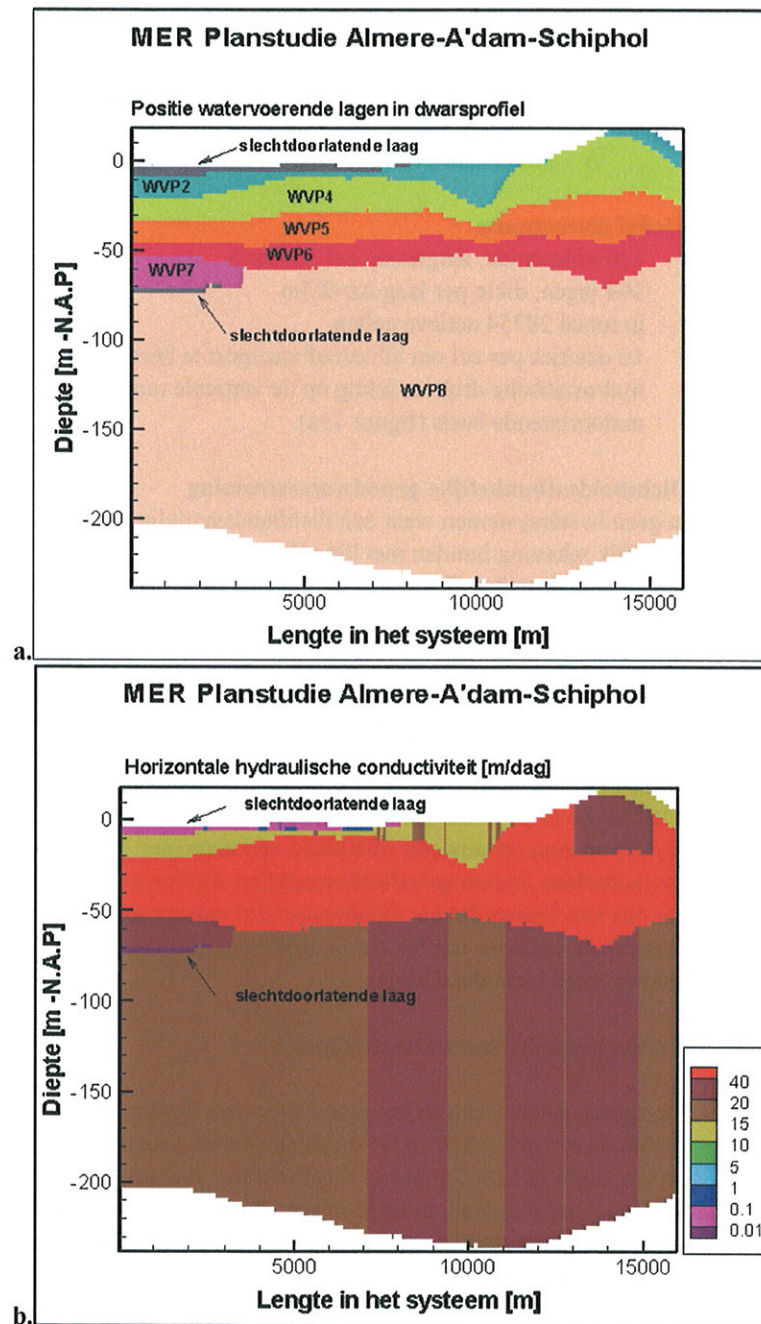
Figuur 12: Stijghoogtepatroon ontleend uit het 3D grondwatermodel van Grontmij (2005a) (legenda niet beschikbaar). Gebaseerd op dit stijghoogtepatroon en stroombaanberekeningen is het 2D-dwarsprofiel gekozen (zie getrokken rode lijn). De locatie van de korte tunnelmond is zichtbaar in wit.

3.2 Opbouw van het model

De karakteristieken van de 2D-dwarsprofiel modellen zijn als volgt:

Geohydrologie

- Lengte profiel=16km, totale dikte grondwatersysteem=260m
- Bodemopbouw geohydrologie (zie figuur 13a en 13b)
 1. maximale hoogte maaiveld=+27.03 m N.A.P.
 2. de deklaag: dikte=0m-5.04m; horizontale hydraulische doorlatendheid $k=0.013-0.082\text{m/d}$
 3. het watervoerend pakket bestaat uit verschillende Formaties. In figuur 13a is de ligging van de Formaties te zien. Er is sprake van één watervoerend pakket; alleen in het westelijk deel van het 2D-dwarsprofiel zorgt een dunne slechtdoorlatende laag dat twee watervoerende pakketten te vinden zijn. Dikte= $\sim 200\text{m}-240\text{m}$; horizontale hydraulische doorlatendheid $k=\sim 13-62\text{m/d}$ (zie figuur 13b).
 4. anisotropie verticale versus horizontale hydraulische doorlatendheid is 1/3.
 5. in het studiegebied komen zandbanen in de deklaag voor die in het 2D-dwarsprofiel model mét zandbaan worden geïmplementeerd. De zandbaan heeft in dit 2D-dwarsprofiel model een totale breedte van 150m. De geohydrologische karakteristieken van de zandbanen zijn overgenomen uit Grontmij (2006).



Figuur 13: a. Ligging van de verschillende Formaties (aangeduid als WVP's) die tezamen in het grootste deel van het 2D-dwarsprofiel één watervoerend pakket vormen; b. Horizontale hydraulische doorlatendheid in de watervoerende pakketten (en slechtdoorlatende lagen) in m/dag.

Stoftransport

- Effectieve porositeit=30%
 - Hydrodynamische dispersie:
 - longitudinale dispersiviteit: $\alpha_L=1\text{m}$; $\alpha_{TH}=\alpha_{TV}=\text{transversale disp.}=1/10*\alpha_L$
- De grootte van de dispersiviteiten is een onderwerp van vele studies (bijvoorbeeld Gelhar *et al.*, 1992). De schattingen voor de grootte van de

longitudinale dispersiviteit in Nederlandse en Belgische regionale grondwatersystemen met Holocene en Pleistocene afzettingen van marine en fluviatile oorsprong zijn over het algemeen klein (bijvoorbeeld Lebbe, 1983; Kooiman, 1989; Stuyfzand, 1993 en Oude Essink, 2001).

- moleculaire diffusie: $D_{mol}=8.64 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{dag}$

Model discretisatie

- 320 kolommen, lengtestap cel $\Delta x=50\text{m}$
- 104 lagen, dikte per laag $\Delta z=2.5\text{m}$
- in totaal 28754 actieve cellen
- 16 deeltjes per cel om advectief transport te berekenen
- hydrostatische drukverdeling op de verticale randen
- ondoorlatende basis (figuur 13a).

Dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming

In grondwatersystemen waar een dichtheidsverdeling niet-uniform is moet men eigenlijk rekening houden met het effect van dichtheidverschillen op de grondwaterstroming. Omdat zout grondwater (bijvoorbeeld met een dichtheid van 1025 kg/m^3) zwaarder is dan zoet (of brak) grondwater, beïnvloedt het de stroming van water in de ondergrond. Zo kan het in een natuurlijk hydrogeologisch systeem (geen externe spanningen als onttrekkingen of peilverlagingen) door drukverschillen zoet grondwater weg drukken (de welbekende zoutwaterintrusie in watervoerende pakketten). Aan de andere kant kan zoet grondwater, doordat het lichter is, juist op het zoete grondwater blijven drijven en in grote mate een min of meer geïsoleerd grondwatersysteem in stand houden. Zo drijft in het Nederlandse duingebied zoet grondwater (dichtheid van 1000 kg/m^3) op zout grondwater (dichtheid van ongeveer 1022 kg/m^3), in de vorm van een zoetwaterlens. Indien grondwatermodellen worden gemaakt van dergelijke systemen, is het dus van belang dat het dichtheidseffect wordt meegenomen. Dat is dus gedaan in dit onderzoek, ondanks het feit dat de dichtheden van het grondwatersysteem in het studiegebied beduidend kleiner zijn.

Correcties naar zoetwaterstijghoogte

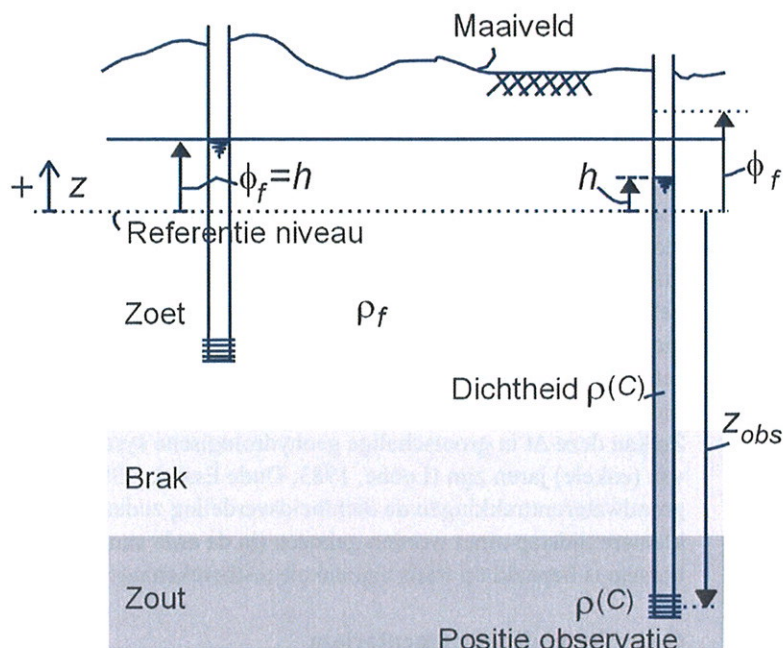
De zoutconcentraties van het grondwater zijn dusdanig hoog dat de verschillen in dichtheid effect hebben op de stroming van het grondwater. Terwijl onder normale omstandigheden (dwz met een dichtheid van zoet grondwater) gewerkt kan worden met 'gewone' stijghoogten, moet je in een situatie met zoet, brak en zout grondwater alles omrekenen naar drukken. Opgeloste stoffen in het grondwater verhogen namelijk de druk. De meeste hydro(geo)logen vinden het werken met stijghoogte echter prettiger. Daarom worden alle gemeten stijghoogten waar het grondwater niet zoet is gecorrigeerd voor de dichtheid. Om dit aspect mee te nemen moet de stijghoogte worden omgerekend naar een zogenaamde equivalente *zoetwaterstijghoogte*, zie figuur 15:

$$\phi_f = z_{obs} + \frac{\rho(C)}{\rho_f} (h - z_{obs}) \quad (1)$$

waarin:

- ϕ_f = de zoetwaterstijghoogte (m);
- z_{obs} = plaatshoogte observatie punt (m);
- h = de drukhoogte van de waterkolom t.o.v. het referentie niveau (m);
- $\rho(C)$ = dichtheid van het grondwater (kg/m^3), ter plaatse van het observatie punt;

C = chloride-concentratie van het water (mg Cl/l);
 ρ_f = referentiedichtheid, hier gesteld op 1000 kg/m³;



Figuur 14: Correcties naar zoetwaterstijghoogte.

Met behulp van de volgende lineaire formule wordt de dichtheid berekend uit het chloride concentratie:

$$\rho(C) = \rho_f \left(1 + \alpha \frac{C}{C_s} \right) \quad (2)$$

waarin:

ρ_s = dichtheid van zout water (kg/m³), hier gesteld op 1025 kg/m³;
 α = $(\rho_s - \rho_f) / \rho_f$ = relatieve dichtheidverschil (-);
 C = chloride concentratie van het water (mg Cl/l);
 C_s = referentie chloride concentratie water (mg Cl/l), gesteld op 19.300 mg Cl/l.

De zoetwaterstijghoogte is eigenlijk een fictieve parameter zonder fysische betekenis. De fysische interpretatie van zoetwaterstijghoogten patronen is niet gemakkelijk. Zo staan zoetwaterstijghoogten niet meer loodrecht op stroomlijnen als de dichtheid varieert, en betekent een gradiënt in zoetwaterstijghoogte niet automatisch dat er stroming van grondwater optreedt! De noodzakelijke correcties voor de dichtheid kunnen significant zijn: een filterbuis gevuld met 20 m zout groundwater heeft een equivalente zoetwaterstijghoogte van 20.5 m: een verschil van 0.5m (Santing, 1980, Oude Essink, 2001b). In het studiegebied kunnen de stijghoogtecorrecties oplopen tot maximaal 0.85m.

De correctie in stijghoogte voor elke modellaag in het model is als volgt:

$$\Delta\phi_f[i, k] = \left(\frac{\rho(C) - \rho_f}{\rho_f} \right) \left(\frac{\Delta z[k] + \Delta z[k-1]}{2} \right) \quad (3)$$

waarin:

$\Delta \phi_f[i, j, k]$ = de correctie van de stijghoogte met de diepte (-);
 $\Delta z[k]$ = dikte van de modellaag k (-);

Grootte van de tijdstap Δt

Bij grondwaterstroming met een variabele dichtheid is de snelheidsverdeling afhankelijk van de dichtheidsverdeling (via het zoetwaterstijghoogtepatroon). Door de verplaatsing van zoet, brak en zout grondwater verandert de dichtheidsverdeling. Het zoetwaterstijghoogtepatroon moet telkens opnieuw berekend worden op basis van de nieuwe berekende dichtheidsverdeling, omdat anders de snelheidsverdeling niet meer in overeenstemming is met de dichtheidsverdeling. De grootte van de tijdstap Δt is belangrijk, want deze tijdstap bepaalt hoe vaak de snelheidsverdeling opnieuw berekend moet worden. Zo veroorzaakt een te grote tijdstap een onrealistische oplossing, en zal een te kleine tijdstap te veel rekentijd vergen. Het is dus van belang te weten welke tijdstap Δt nog acceptabel is. Dit hangt af van de snelheid van het te beschrijven proces. Zo kan deze Δt in grootschalige geohydrologische systemen in duingebieden in de orde van (enkele) jaren zijn (Lebbe, 1983; Oude Essink, 1996), tenzij bijvoorbeeld sterke grondwateronttrekkingen de dichtheidsverdeling zodanig snel doet veranderen dat een kleinere tijdstap moet worden gekozen (in de orde van maanden). De grootte van de tijdstap is bepaald op basis van enkele testberekeningen: $\Delta t = 22.8$ dagen.

Gebruikt modelinstrumentarium

De softwarecode die gebruikt wordt voor dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming is MOCSENS3D (Oude Essink, 1998, 2000; Vugt et al., 2003). Met MOCSENS3D is het mogelijk niet-stationaire stroming van zoet, brak en zout grondwater te modelleren. Deze code bestaat uit een module voor grondwater en een model voor stoftransport die aan elkaar gekoppeld zijn. Op deze manier wordt dichtheidstroming in de oplossingsvergelijking meegenomen. Dichtheid beïnvloedt namelijk de grondwaterstroming. De code is gebaseerd op de volgende twee codes, die volledig geïntegreerd zijn: 1. MODFLOW (McDonald en Harbaugh, 1988) aangepast voor dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming, en 2. MOC3D (Konikow et al., 1996) voor de verplaatsing van zoet, brak en zout grondwater. De code is een samenvoeging van state-of-the-art software op het gebied van zowel grondwaterstroming als stoftransportmodellering. De software maakt het mogelijk op interpolatie gebaseerde initiële dichtheidsvelden flexibel te verbeteren. Voorafgaand is MOCSENS3D toegepast in een aantal zoet-zout studies in Nederland, zoals Project Groot Geohydrologisch Onderzoek Texel (in samenwerking met Witteveen+Bos, 2000), Project Het Zout der Aarde (verziltiononderzoek Hoogheemraadschap van Rijnland, in samenwerking met Kiwa, 2005); de Bepaling van de toekomstige verziltion van het grondwater in Zuid-Holland (TNO-NITG, 2004), en recent voor de Effectenberekening van Bodemdaling in Barradeel II, Friesland (Wetterskip Fryslân, 2005).

Randvoorwaarden in het topsysteem

Met de zogenaamde MODFLOW pakketten is het mogelijk de omstandigheden in randvoorwaarden zo nauwkeurig mogelijk te modelleren (McDonald en Harbaugh, 1988). In het model zijn gemiddelde waarden gebruikt voor de natuurlijke grondwateraanvulling, de slootpeilen in de polders en de grondwateronttrekkingen. Het zoetwaterstijghoogtepatroon en de bijbehorende grondwatersnelheden zullen hierdoor alleen veranderen als de zoet-zout verdeling en dus de dichtheid in het

grondwatersysteem veranderd. Het transport van zout wordt niet-stationair gemodelleerd.

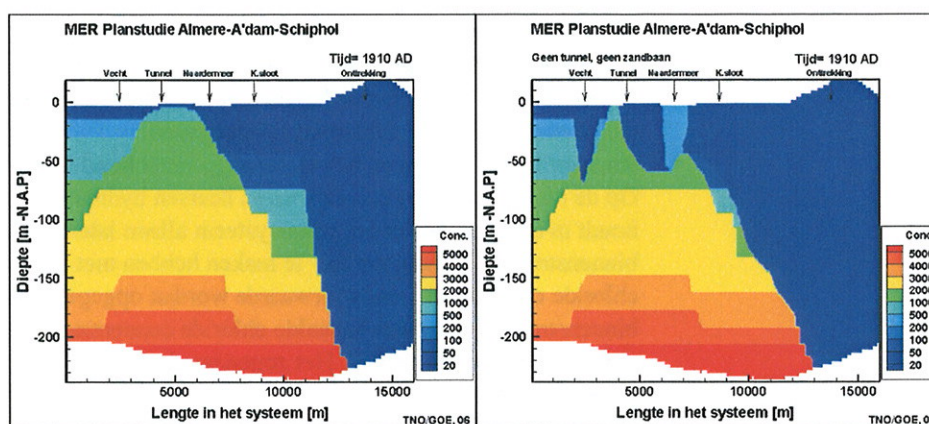
Hieronder worden de verschillende pakketten, die gebruikt zijn, kort geschreven.

- **Rivier (river package)**
De Vecht en het Naardermeer worden gemodelleerd als zogenaamde rivieren in het grondwatersysteem. De specifieke weerstand in deze rivier/waterplas is conform de Grontmij modellering: te weten 30 dagen. Voor de chloride concentratie in de infiltrerende Vecht is genomen 200 mg Cl-/l; voor het Naardermeer 230 mg Cl-/l.
- **Drainage (drain package)**
Een drainage is aangelegd in de poldergebieden die liggen in het 2D-dwarsprofiel. In het model wordt de drainage gemodelleerd door zowel de positie van de drains als de drainagecapaciteit in het model te voeren. De weerstand van de drains is conform de Grontmij modellering gelijk gesteld aan 100 dagen.
- **Natuurlijke grondwateraanvulling (via well package)**
De natuurlijke grondwateraanvulling vindt overal plaats, maar varieert in waarde: 0.55-1.2 lmm/d.
- **Poldergebieden (general head boundary package)**
Gemiddelde slootpeilen worden per cel in de bovenste actieve laag ingevoerd, op die plaatsen waar een polderpeil is opgegeven.
- **Randen in het oosten en het westen (general head boundary package)**
Op de randen in het oosten en westen heersen hydrostatische drukverdelingen. Dit houdt in dat grondwater het watersysteem alleen lateraal (horizontaal) kan binnenstromen. Omdat we hier te maken hebben met zout transport moet ook een chloride concentratie randvoorwaarde worden opgegeven: het grondwater dat binnenstroomt, heeft een bepaalde chloride concentratie die ingevoerd moet worden voor elke cel aan de randen. Het zogenaamde General Head Boundary Package is hiervoor gebruikt.

Bepaling initiële dichtheidsverdeling 2006 AD

We zouden idealiter de numerieke modellering van zout transport willen starten met de huidige situatie in de ondergrond wat betreft de verdeling van zoet, brak en zout grondwater. Dit is echter onmogelijk omdat slechts een zeer beperkt aantal chloride concentratie metingen voorhanden is (zie figuur 8). Hieruit is helaas geen betrouwbare chloride concentratie veld te extraheren. De volgende procedure wordt normaal gesproken bij dit soort studies gevolgd om een betrouwbare initiële chloride concentratie te verkrijgen. De zoet-zout verdeling van een bepaald moment in het verleden, bijvoorbeeld honderd jaar terug, wordt zo goed mogelijk geconstrueerd (soms wordt ook wel eens begonnen met een volledig gelaagde zoet-zout verdeling). Vervolgens wordt met het model de verplaatsing van de zoet-zout verdeling over die tijdsperiode van honderd jaar berekend. Hierbij worden in het model de juiste randvoorwaarden, die voor die tijdsperiode gelden, gebruikt. Het resultaat, de huidige berekende chloride concentratie verdeling, wordt vergeleken met de gemeten chloride concentraties. Grote verschillen tussen meting en modelberekening worden verkleind door de zoet-zout verdeling in het verleden aan te passen, net zolang tot meting en modelberekening ongeveer hetzelfde resultaat geven. Deze iteratieve procedure is erg arbeidsintensief. Bovenstaande procedure is in dit onderzoek gevolgd om de initiële chloride concentratie verdeling te bepalen in het gehele 2D-dwarsprofiel voor 2006 AD. Deze initiële chloride concentratie verdeling is ingevoerd in het numerieke model en wordt gebruikt om de komende 250 jaar met de verschillende scenario's door te rekenen.

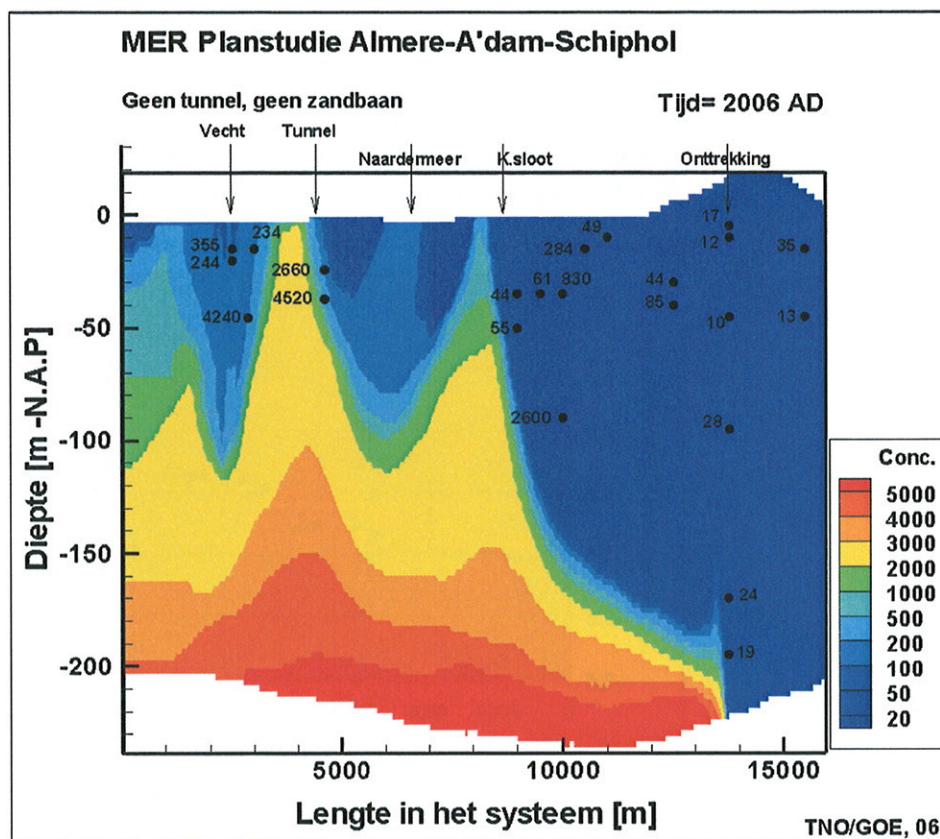
Met behulp van de analyse in paragraaf 2.2 ('Zoet-zout grondwater in het studiegebied') is een schatting gemaakt van de meest waarschijnlijke chloride concentratie verdeling in het 2D-dwarsprofiel (zonder zandbaan) zoals die aanwezig was in het jaar 1910 AD (figuur 15a). Hierbij is met name gekeken naar de chloride concentraties die gemeten zijn in het eerste deel van de 20^{ste} eeuw. Vervolgens is het numerieke model 96 jaar doorgerekend. De geohydrologische randvoorwaarden zoals die golden gedurende de afgelopen 96 jaar zijn hierbij gemodelleerd. Het resultaat is vervolgens een zoet-zout verdeling zoals die op dit moment, anno 2006 AD, aanwezig zou moeten zijn. Na vergelijking van de modelresultaten met de metingen is opnieuw een schatting voor het jaar 1910 AD gemaakt (figuur 15b), en deze chloride concentratie verdeling wordt opnieuw doorgerekend, enzovoorts. Tijdens het iteratieve proces is de chloride concentratie verdeling anno 1910 AD zodanig verbeterd, dat na simulatie de berekende chloride concentratie verdeling op dit moment, anno 2006 AD, overeenkomt met de metingen.



Figuur 15: a., b.: Een tweetal schattingen van de chloride concentratie verdeling in het 2D-dwarsprofiel voor het jaar 1910 AD.

Uiteindelijk heeft dit geresulteerd in een chloride concentratie verdeling zoals die wordt gebruikt in de numerieke modellering (figuur 16). De grootste opwelling van brakke kwel vindt plaats in de Nieuwe Keverdijksche Polder, waar de chloride concentraties hoog zijn. Afwijkingen met de gemeten chloride concentraties blijven bestaan. Chloride concentratie metingen in met name het brakke grondwater zijn er nauwelijks. De metingen die wel in de buurt van het 2D-dwarsprofiel liggen, hebben zo hun eigenaardigheden. Observatiebuis B25H0094 in de buurt van de tunnel (zie ook figuur 11f, concentraties 2660 mg Cl⁻/l en 4520 mg Cl⁻/l) vertoont een grillig patroon en de meest recente meting dateert van 1982. Observatiebuis B25H0088 (zie figuur 9a, concentratie 4240 mg Cl⁻/l) dateert van 1958, en observatiebuis B25H0063 (zie ook figuur 9a, concentratie 2600 mg Cl⁻/l) dateert zelfs van 1930!

Dezelfde procedure is gevolgd voor de situatie met een zandbaan in het 2D-dwarsprofiel model.



Figuur 16: De chloride concentratie verdeling in het jaar 2006 AD in het 2D-dwarsprofiel zoals die is gebruikt in de numerieke modellering, inclusief de metingen die in de buurt van het 2D-dwarsprofiel liggen.

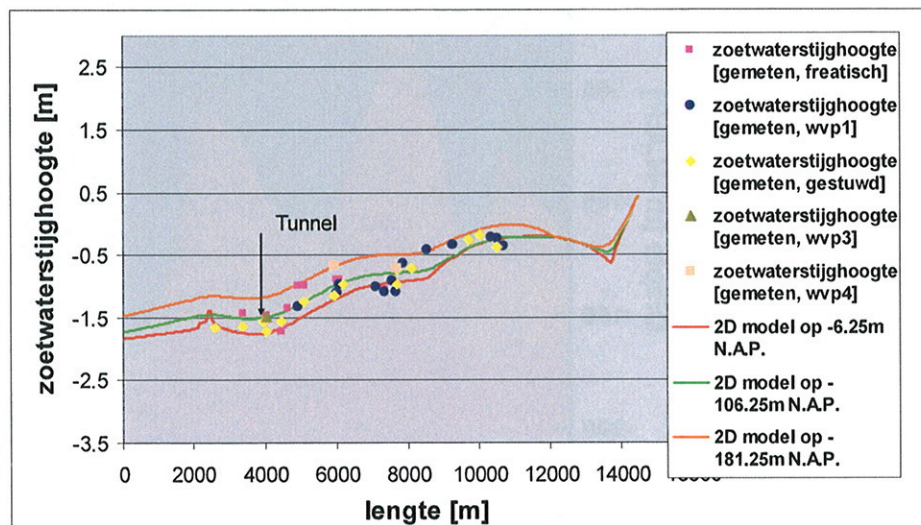
In elke cel van het model is vervolgens een initiële dichtheid bepaald.

3.3 Calibratie

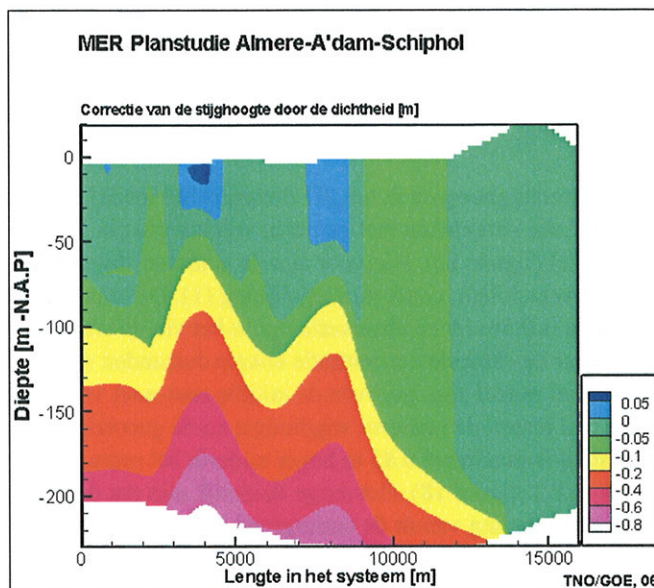
De zoetwaterstijghoogten in het 2D-dwarsprofiel model (de referentie-situatie zonder zandbaan) zijn vergeleken met gemeten stijghoogten in de buurt van het 2D-dwarsprofiel (figuur 12). Hiervoor zijn de gemeten stijghoogten gecorrigeerd voor dichtheidsverschillen, conform vergelijking (1). De maximale correctie van de stijghoogte is 0.5m (deze observatie ligt in het vierde watervoerend pakket op een locatie waar de chloride concentratie enkele duizenden mg Cl/l bedraagt). Met het 2D-dwarsprofiel model kan, gegeven de initiële zoet-zout verdeling, berekend worden wat het verschil tussen de gemeten stijghoogte en de gecorrigeerde zoetwaterstijghoogte. Dit verschil is maximaal 0.85 m hoger onderin het grondwatersysteem (ongeveer op -210m N.A.P.) (figuur 18). Het moge duidelijk zijn dat deze correctie niet als een extra grondwaterstroming vanuit de ondergrond kan worden vertaald.

De meeste correcties bedragen slechts een paar millimeter omdat de observatiebuizen in zoet grondwater liggen. In geval dat de chloride concentratie niet bekend is (ongeveer in 80% van de metingen), is een schatting van de concentratie gedaan aan de hand van de berekende chloride concentratie verdeling (figuur 16).

Figuur 17 toont dat de berekende zoetwaterstijghoogten in het 2D-dwarsprofiel model op de verschillende diepten overeen komen met de 'gemeten' zoetwaterstijghoogte (dat wil zeggen de gemeten stijghoogte na correctie voor dichtheidseffecten). De verschillen die optreden zijn voornamelijk te wijten aan het feit dat hier metingen zijn gebruikt die niet precies in het 2D-dwarsprofiel liggen. Bovendien is in een groot aantal gevallen de chloride concentratie geschat.



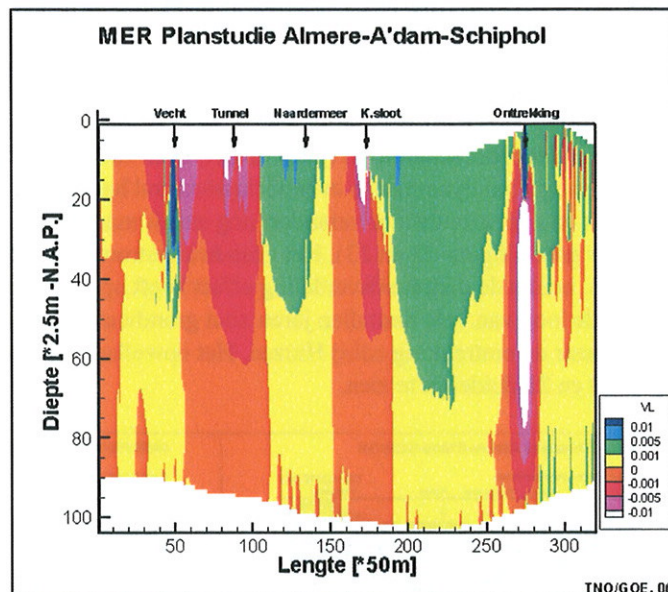
Figuur 17: (Zoetwater)stijghoogte verdeling over het 2D-dwarsprofiel. Getrokken lijnen zijn de de zoetwaterstijghoogten in het 2D-dwarsprofiel model op drie diepten (de waarden zijn onttrokken uit het centrum van een cel). De cirkels, driehoekjes en vierkantjes zijn de gemeten zoetwaterstijghoogten in de buurt van het 2D-dwarsprofiel.



Figuur 18: Correctie van de stijghoogte [m] door de dichtheid van het grondwater.

Figuur 20 laat zien dat het Naardermeer in het oosten een kwelzone heeft en in het westen een infiltratie zone. De Vecht is ook sterk infiltrerend. De kwelintensiteit in de Nieuwe Keverdijksche Polder is groot. De grondwateronttrekking nabij Huizen trekt

van grote diepte grondwater aan (zodat hier op de lange termijn opwelling van brak grondwater te verwachten is). Zoals wij verwachten komt dit stromingspatroon overeen met andere studies (bijvoorbeeld Schot, 1991 en Natuurmonumenten, 1995) en waarnemingen in het veld. Zodoende geeft het ons vertrouwen in de uitkomsten van de modelleerexercitie die in de volgende paragrafen plaats vindt.



Figuur 19: Verticale snelheid in m/dag in het 2D-dwarsprofiel. Positieve waarde (geel, groen en blauw) betekent neerwaartse stroming/inzinking, negatieve waarde (oranje, rood en paars) betekent opwaartse stroming.

3.4 Regionaal model: doorrekenen van de korte tunnel variant

3.4.1 Beschrijving scenario's

Met het regionaal 2D-dwarsprofiel model worden de volgende vier scenario's doorgerekend voor een periode van 250 jaar:

- Geen tunnel en geen zandbaan (de referentie-situatie),
- Tunnel en geen zandbaan,
- Geen tunnel en een zandbaan,
- Tunnel en een zandbaan.

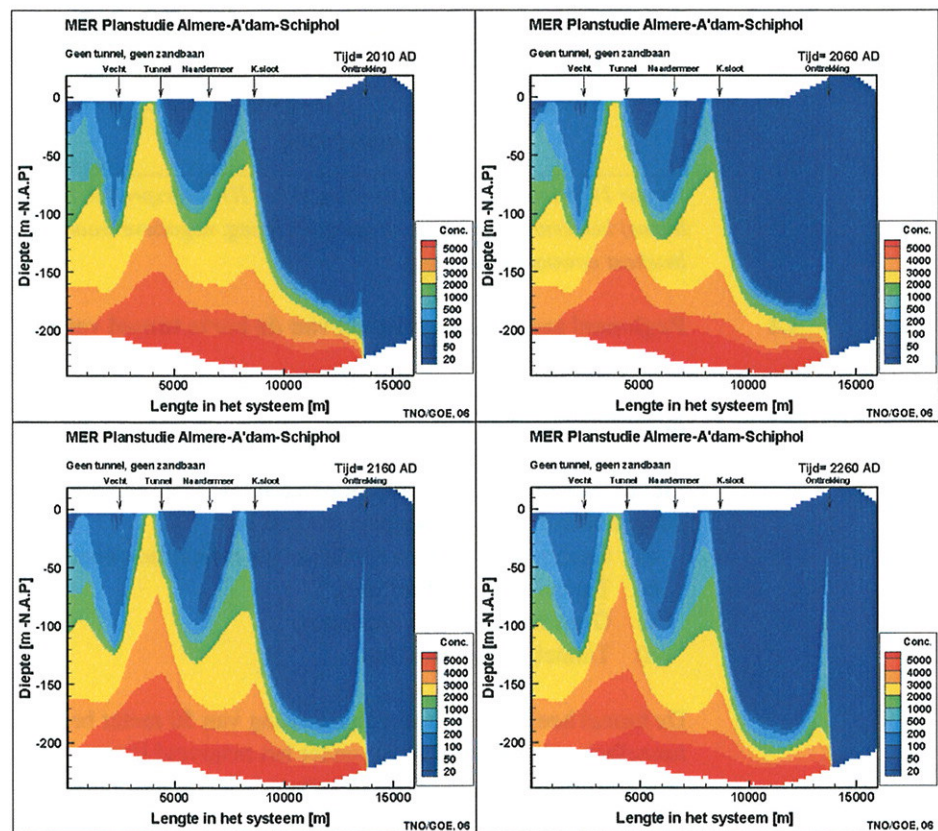
De tunnel heeft in het model een omvang van 50 meter breed. De onderkant van de tunnelbak zal ongeveer 37.5m onder het maaiveld liggen (ongeveer -38.7m N.A.P.). De tunnel(mond) wordt in het model gemodelleerd door middel van het invoeren van een zeer slecht doorlatende weerstandslaag op de locatie van de tunnel. In het rapport van Grontmij (2006) zijn in het studiegebied zandbanen in de deklaag geanalyseerd. Zandbanen zijn relatief goed doorlatende plekken in het topsysteem. Deze zandbanen zouden kunnen leiden tot een extra hoge zoutbelasting vanuit het diepere grondwatersysteem indien de tunnel de zandbanen doorsnijdt. De zandbaan heeft in het 2D-dwarsprofiel een totale breedte van 150m. De zandbaan bevindt zich op de locatie van de korte tunnel variant; de tunnel zal deze zandbaan in de scenario's c) en d)

doorsnijden. De geohydrologische karakteristieken van de zandbanen zijn overgenomen uit Grontmij (2006).

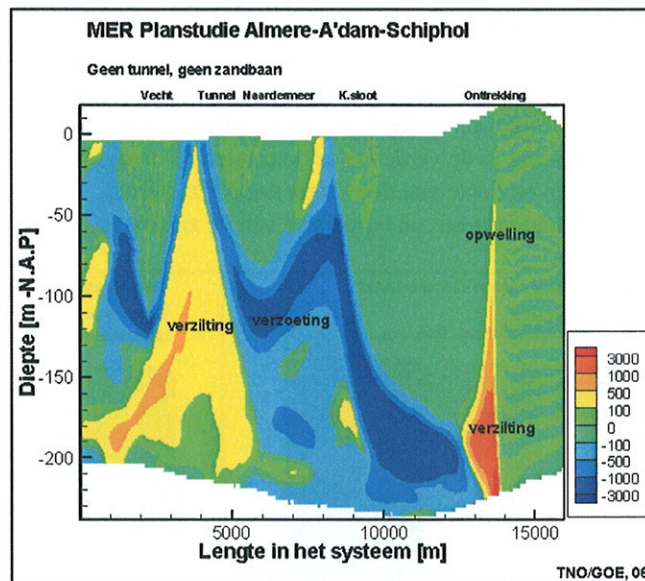
In deze paragraaf ligt de nadruk op de ruimtelijke veranderingen in chloride concentraties als gevolg van de aanleg van de tunnel. De kwantificering van de effecten in termen van kwelintensiteit en zoutbelasting zijn te vinden in paragraaf 3.5, waar de lokale modellen (lengtestap cel $\Delta x=10\text{m}$) worden gemodelleerd.

3.4.2 Effect korte tunnel variant op het grondwatersysteem zonder een zandbaan

Uit de resultaten van scenario a) (geen tunnel, geen zandbaan) blijkt dat de zoet-zout verdeling nog geen dynamische evenwichtstoestand heeft bereikt. De verdeling van zoet, brak en zout grondwater verandert nog steeds maar de veranderingen zijn niet bijzonder groot (figuur 22 en 23). Het grondwaterstromingspatroon verandert hierdoor enigszins, omdat de dichtheidsverdeling effect heeft op de grondwaterstroming. Zo komt in de loop van vele tientallen jaren zout grondwater van grote diepte omhoog en stroomt naar de onttrekking nabij Huizen. Het opwellen van zout grondwater is in figuur 20 en 21 duidelijk te zien.

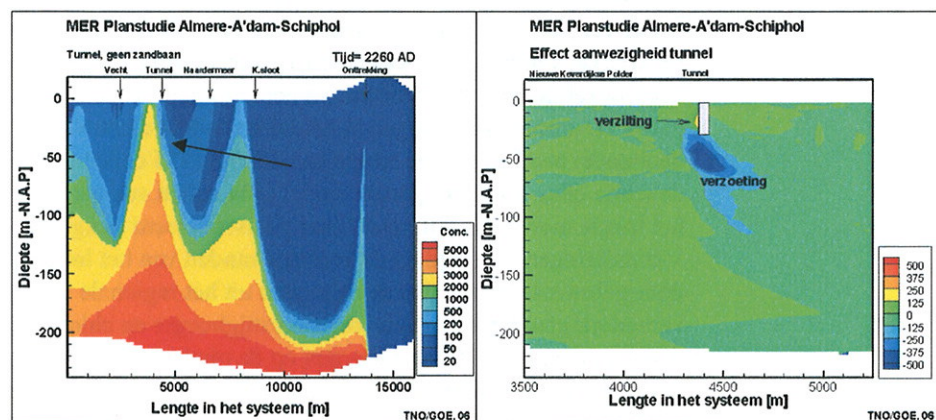


Figuur 20: Verandering in zoet-zout verdeling in de tijd, tot 250 jaar na heden.



Figuur 21: Verandering in zoet-zout verdeling. Verschil in chloride concentratie [mg Cl/l] tussen het jaar 2260 AD en het heden (2010 AD). Positieve waarde (geel en rood) geeft verzilting aan, negatieve waarde (blauw) verzoeting.

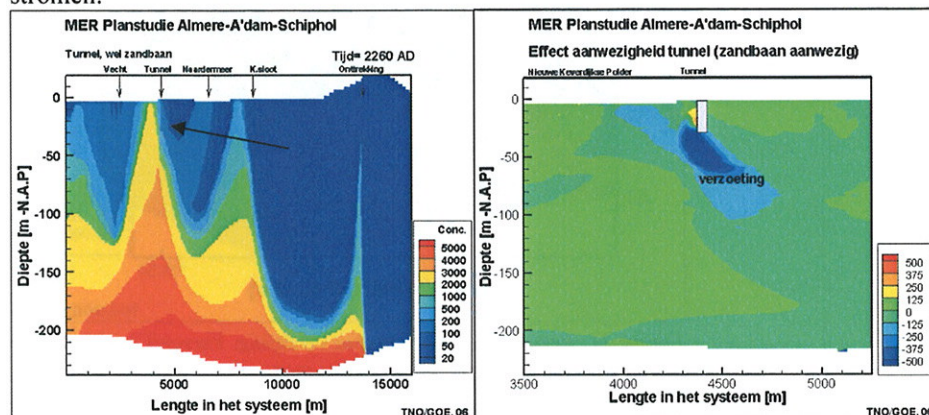
Figuur 22 laat het effect zien van de korte tunnel variant op de chloride concentratie verdeling in de ondergrond. Er is een kleine lokale verstoring in de verdeling te detecteren (figuur 22b is het verschil tussen figuur 22a minus figuur 20d). Infiltrerend zoet grondwater vanuit het Naardermeer stroomt onder de tunnel door, en daar treedt ter plaatse verzoeting op. Een kleine hoeveelheid brak grondwater, op ongeveer -30 tot -40m N.A.P. wordt tegelijkertijd versneld omhoog geduwd, en veroorzaakt tijdelijk een lichte verzilting aan de westelijke kant van de tunnel (figuur 22b, op de locatie van de verzilting). Op een langere tijdschaal zal deze 'prop' brak grondwater uit het systeem verdwijnen, en zal ook hier verzoeting zijn opgetreden. In de toekomst neemt de kwelintensiteit trouwens af, ten gevolge van een herverdeling van zoet, brak en zout grondwater in de ondergrond.



Figuur 22: Effect van de tunnel op chloride concentratie verdeling [mg Cl/l]: a. scenario b) (tunnel, geen zandbaan) in het jaar 2260 AD, en b. het effect van de aanwezigheid van de tunnel: het grondwatersysteem onder de tunnel verzoet (zoet grondwater vanuit het Naardermeer gebied stroomt onder de tunnel door), en direct ten westen van de tunnel treedt tijdelijk lichte verzilting op.

3.4.3 Effect korte tunnel variant op het grondwatersysteem met een zandbaan

Figuur 23 toont het effect van de korte tunnel variant op de zoet-zout verdeling in de ondergrond, in geval dat een zandbaan het tunneltracé doorsnijdt. Er is wederom een kleine verstoring in de verdeling te detecteren: er treedt verzoeting op. Deze verzoeting neemt toe ten opzichte van de situatie zonder zandbaan. Infiltrerend zoet grondwater vanuit het Naardermeer zal ter plaatse van de zandbaan gemakkelijker onder de tunnel stromen.



Figuur 23: Effect van de tunnel op chloride concentratie verdeling [mg Cl/l], in geval van de aanwezigheid van een **zandbaan**: a. scenario d) (tunnel, wel een zandbaan) in het jaar 2260 AD, en b. het effect van de aanwezigheid van de tunnel: het grondwatersysteem onder de tunnel verzoet, en tijdelijk zal een lichte verzilting ten westen van de tunnel plaatsvinden.

3.5 Lokaal model: doorrekenen van de korte tunnel variant

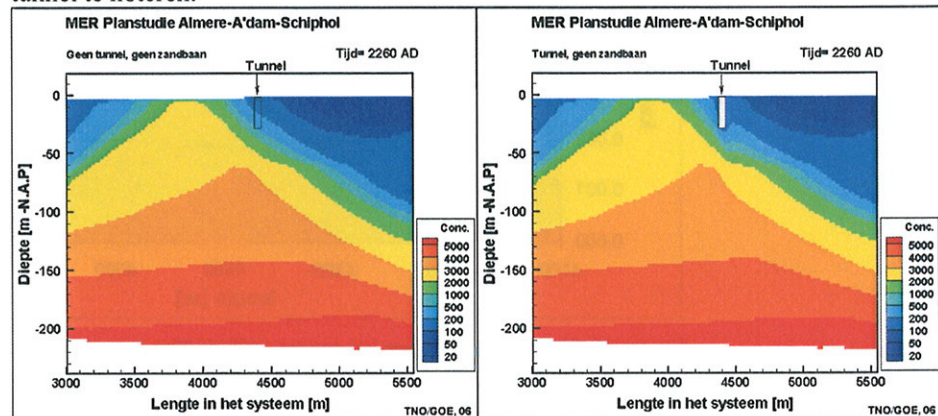
3.5.1 Beschrijving lokaal model

Met het regionale model zijn uitspraken gedaan over de ruimtelijke verandering in de chloride concentratie verdeling in het grondwatersysteem ten gevolge van de aanwezigheid van de tunnel. Een lokaal model, met een fijnere discretisatie ($\Delta x=10\text{m}$ in plaats van $\Delta x=50\text{m}$), is echter ontworpen om voldoende detail rondom de tunnel te verkrijgen, wat betreft de kwelintensiteit en de zoutbelasting. Het lokale deelmodel heeft dezelfde bodemparameters als het regionale model. De verticale randvoorwaarden in het 2D-dwarsprofiel liggen in het lokale model dicht bij de tunnelmond. Het lokale deelmodel heeft een totale lengte van 2550m (255 cellen van 10m breed) en heeft dezelfde dikte als het regionale model (104 cellen van elk 2.5m). In horizontale zin is het lokale model dus vijf maal fijner gediscetiseerd (lengtestap cel is nu $\Delta x=10\text{m}$). Veranderingen in de tijd op de verticale randen van het lokale model zijn meegenomen door gebruik te maken van de resultaten uit het regionale model. Het betreft hier veranderingen in termen van zoetwaterstijghoogte en chloride concentratie. Aangenomen is dat de voorwaarden op de randen van het lokale model veranderen door het regionale stromingspatroon en niet door activiteiten in het modelgebied zelf (de aanwezigheid van de tunnel heeft dus geen effect op de randvoorwaarden).

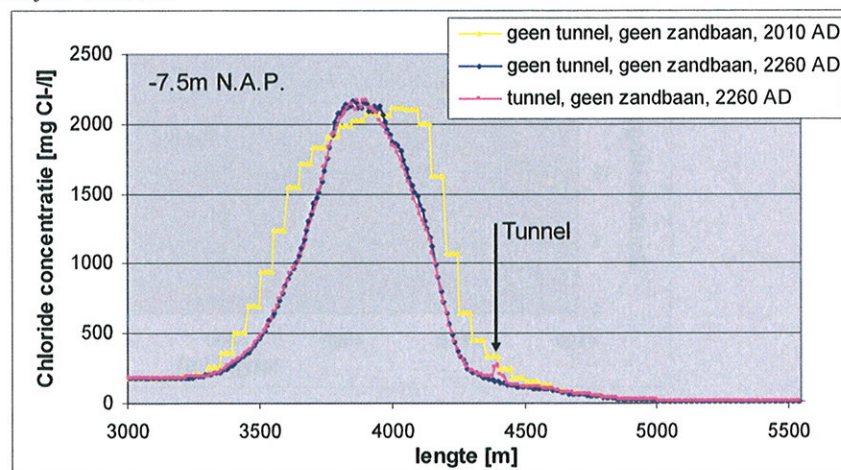
3.5.2 Effect korte tunnel variant op het grondwatersysteem zonder een zandbaan

De chloride concentraties in een groot deel van de Nieuwe Keverdijksche Polder zijn hoog (figuur 24 en 25). De kwel is substantieel in deze polder en heeft een brakke tot

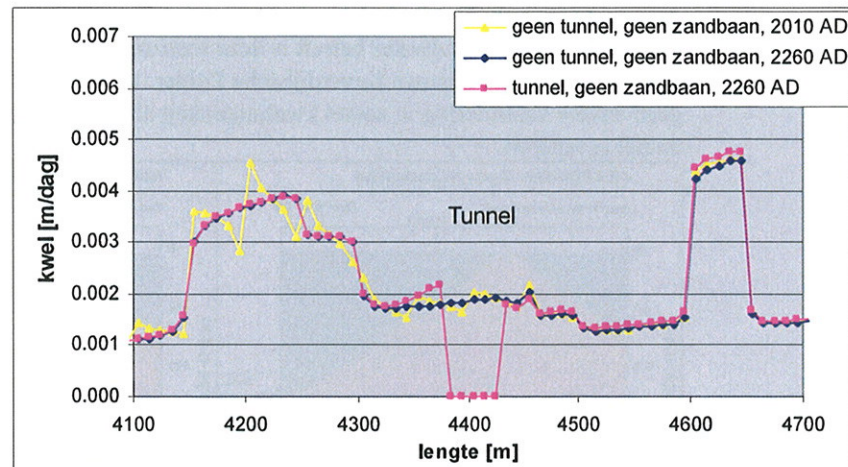
zoute compositie (figuur 26). Door de aanleg van de tunnel zal ten westen van de tunnel de kwel toenemen. De zoutbelasting neemt ook toe, maar omdat het op deze locatie relatief licht brak grondwater betreft is deze toename marginaal t.o.v. de totale zoutbelasting in de Nieuwe Keverdijksche Polder. In de richting van het Naardermeer is geen enkele verandering in zowel kwelintensiteit als zoutbelasting ten gevolge van de tunnel te noteren.



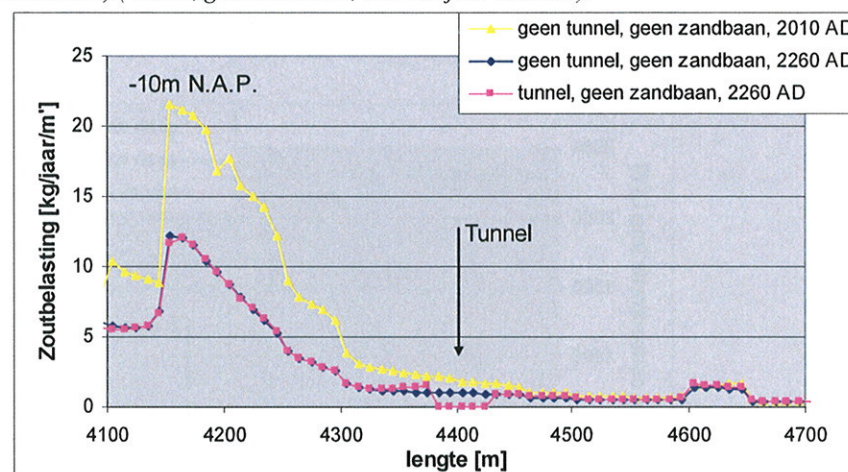
Figuur 24: Effect van de tunnel op chloride concentratie verdeling [mg Cl-/l]: a. scenario a) (geen tunnel, geen zandbaan) in het jaar 2260 AD, en b. scenario b) (tunnel, geen zandbaan) in het jaar 2260 AD.



Figuur 25: Chloride concentratie op -7.5m N.A.P. over het traject 3000-5550m in geval van geen zandbaan: scenario a) (referentie-situatie, geen tunnel, geen zandbaan, voor de jaren 2010 AD en 2260 AD) en scenario b) (tunnel, geen zandbaan, voor het jaar 2260 AD).



Figuur 26: Kwelintensiteit over het traject 4100-4700m in geval van geen zandbaan: scenario a) (referentie-situatie, geen tunnel, geen zandbaan, voor de jaren 2010 AD en 2260 AD) en scenario b) (tunnel, geen zandbaan, voor het jaar 2260 AD).



Figuur 27: Zoutbelasting over het traject 4100-4700m in geval van geen zandbaan: scenario a) (referentie-situatie, geen tunnel, geen zandbaan, voor de jaren 2010 AD en 2260 AD) en scenario b) (tunnel, geen zandbaan, voor het jaar 2260 AD).

De kwantificering van de veranderingen is terug te vinden in tabel 1. In de tabel is een gemiddelde waarde voor de kwel en de zoutbelasting op het oppervlaktewater gegeven over het segment $x=3000-5550\text{m}$ van het 2D-dwarsprofiel, voor scenario a) zonder een tunnel en scenario b) met een tunnel.

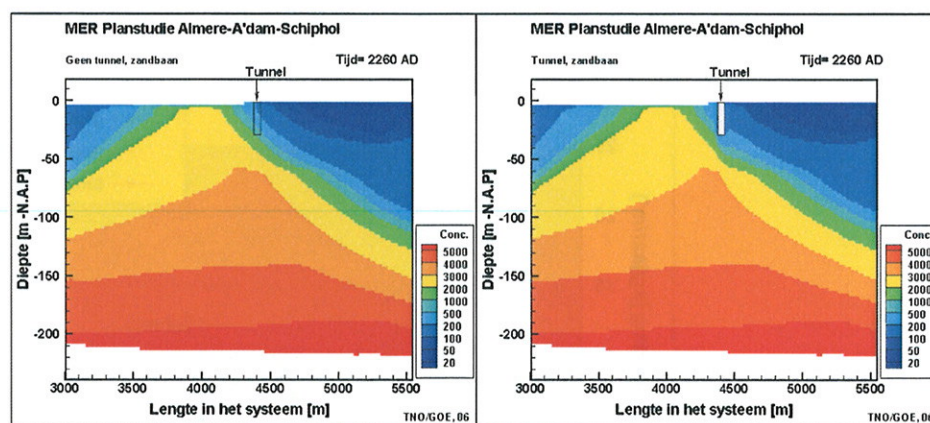
Tabel 1: Effecten van de tunnel op de gemiddelde kwel [in $\text{m}^3/\text{jaar}/\text{m}'$] en gemiddelde zoutbelasting [in $\text{kg}/\text{jaar}/\text{m}'$] in het segment van de korte tunnel variant ($x=3000-5550\text{m}$), gemeten op -10m N.A.P.

	Kwel [$\text{m}^3/\text{jaar}/\text{m}'$]	Zoutbelasting [$\text{kg}/\text{jaar}/\text{m}'$]
Tunnel afwezig	a) 1080	a) 546
Tunnel aanwezig	b) 1064, -1.3%	b) 539, -1.4%

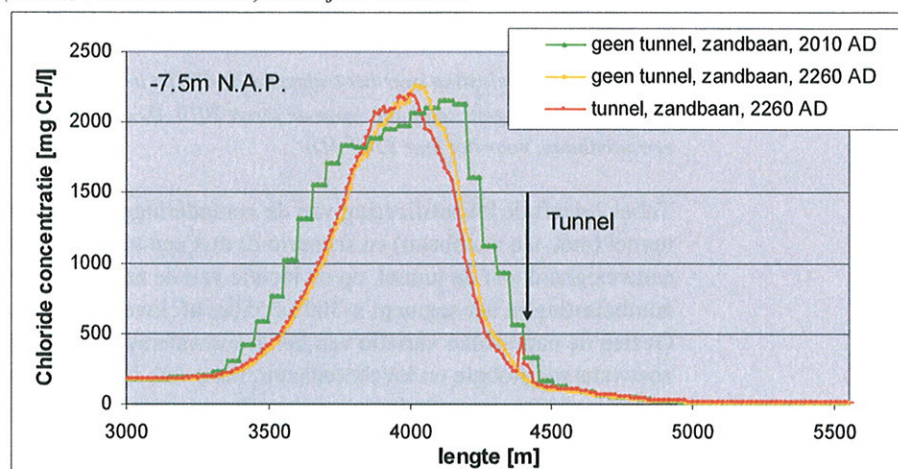
Uit tabel 1 is af te lezen dat het effect van de tunnel op de kwelintensiteit en de zoutbelasting op het oppervlaktewater te verwaarlozen is. De gemiddelde afname in zowel kwelintensiteit als zoutbelasting is minder dan 2%. Het betreft voor de gehele simulatieperiode van 250 jaar. In deze periode neemt de zoutbelasting trouwens af door een ruimtelijke herverdeling in zoet, brak en zout grondwater in de ondergrond wegens ingrepen in het (verre) verleden (zie figuur 20 en 28).

3.5.3 Effect korte tunnel variant op het grondwatersysteem met een zandbaan

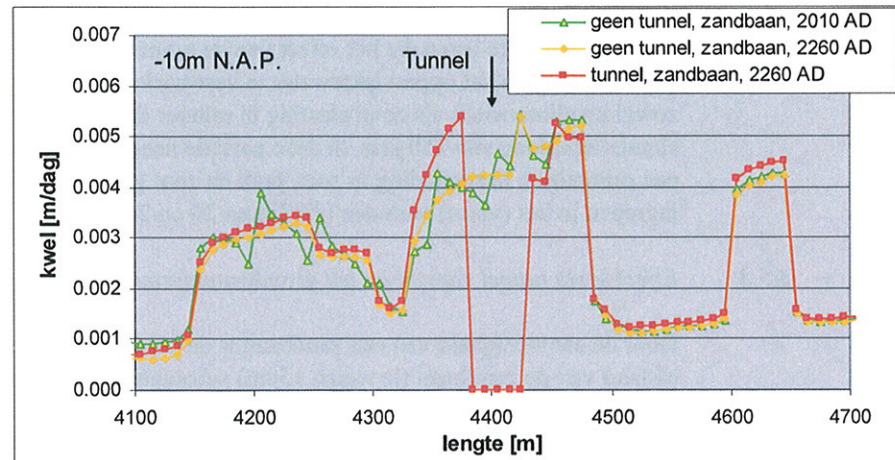
Door de aanwezigheid van een zandbaan is de kwelstroming alleen over de gehele afstand van de zandbaan (te weten 150m) substantieel groter; daarbuiten is de toename marginaal (figuur 30). Er is een preferente stroming van brak en zout grondwater richting deze zandbaan (figuur 28 en 30). De opwelling van brak grondwater is hierdoor ongeveer 100m naar het oosten verschoven t.o.v. de situatie zonder zandbaan (figuur 29).



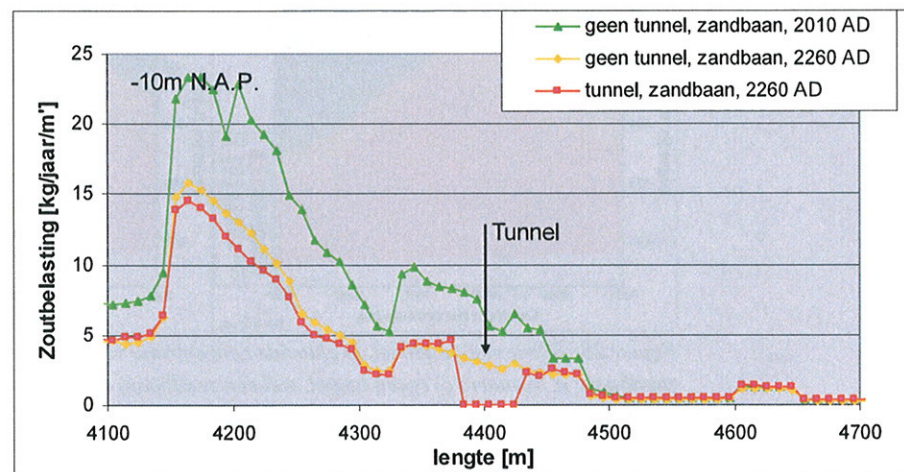
Figuur 28: Effect van de tunnel op chloride concentratie verdeling [mg Cl-/l], in geval van een zandbaan: a. scenario c) (geen tunnel, wel een zandbaan) in het jaar 2260 AD, en b. scenario d) (tunnel, wel een zandbaan) in het jaar 2260 AD.



Figuur 29: Chloride concentratie over het traject 3000-5550m in geval van een zandbaan: scenario c) (geen tunnel, wel een zandbaan, voor de jaren 2010 AD en 2260 AD) en scenario d) (tunnel, wel een zandbaan, voor het jaar 2260 AD).



Figuur 30: Kwelintensiteit over het traject 4100-4700m in geval van een zandbaan: scenario c) (geen tunnel, wel een zandbaan, voor de jaren 2010 AD en 2260 AD) en scenario d) (tunnel, wel een zandbaan, voor het jaar 2260 AD). Ter plekke van de zandbaan (traject 4330-4480m) is de kwel groter.



Figuur 31: Zoutbelasting over het traject 4100-4700m in geval van een zandbaan: scenario c) (geen tunnel, wel een zandbaan, voor de jaren 2010 AD en 2260 AD) en scenario d) (tunnel, wel een zandbaan, voor het jaar 2260 AD).

Tabel 2 geeft de kwantificering van de veranderingen, voor scenario c) zonder een tunnel (met een zandbaan) en scenario d) met een tunnel (met een zandbaan). Door aanwezigheid van de tunnel, op de locatie van de zandbaan, neemt de totale kwel- en zoutbelasting in het segment x-3000-5550m af: kwel -2.8% en zoutbelasting -4.0%. Gezien de natuurlijke variatie van het grondwatersysteem in termen van zoetwaterstijghoogte en kwelintensiteit, maar ook in termen van chloride concentratie (paragraaf 2.2) en zoutbelasting, bijvoorbeeld onder invloed van de seizoenen, zijn dit marginale veranderingen.

Tabel 2: Effecten van de tunnel in geval van een **zandbaan** op de gemiddelde kwel [in $\text{m}^3/\text{jaar}/\text{m}'$] en gemiddelde zoutbelasting [in $\text{kg}/\text{jaar}/\text{m}'$] in het segment van de korte tunnel variant ($x=3000\text{-}5550\text{m}$), gemeten op -10m N.A.P.

	Kwel [$\text{m}^3/\text{jaar}/\text{m}'$]	Zoutbelasting [$\text{kg}/\text{jaar}/\text{m}'$]
Tunnel afwezig	c) 1111	c) 564
Tunnel aanwezig	d) 1080, -2.8%	d) 541, -4.0%

3.6 Veranderingen tijdens het bouwproces

Grondwaterstroming en zout transport is een traag proces. Een verandering in geohydrologische randvoorwaarden tijdens het bouwproces heeft in principe effect op de zoetwaterstijghoogte, maar de stijghoogteverandering is klein en heeft dus nauwelijks effect op de grondwaterstroming (Grontmij, 2005a, 2005b en 2006). De verandering in stijghoogte is tevens van korte duur in relatie tot de tijdsperiode die nodig is voor zout transport processen. Hierop gebaseerd wordt aangenomen dat veranderingen in de geohydrologische randvoorwaarden tijdens het bouwproces een marginaal effect zal hebben op de grondwaterstroming. Veranderingen in de chloride concentratie verdeling in het grondwatersysteem worden zodoende verwaarloosd.

3.7 Effecten op de overige tunnelvarianten

Zoals aangegeven ligt van alle varianten de tunnelmond van de korte tunnel variant het dichtst bij het Naardermeer. Voor deze variant zijn de effecten van de tunnel marginaal. Voor de overige tunnelvarianten is het effect nog kleiner.

Hieronder volgt een korte kwalitatieve beschrijving van de effecten voor de verschillende tunnelvarianten:

- Lange tunnel (met/zonder een aansluiting A1): voor deze variant geldt dat in de buurt van het Naardermeer sprake is van een tunnel op diepte, de tunnelmond ligt ten noorden van de A1. Effecten in termen van verandering in kwelintensiteit en zoutbelasting op het oppervlaktewater zullen door het relatief kleine oppervlak van de buis verwaarloosbaar klein zijn.
- Verdiepte ligging (open tunnelbak) en in situ tunnel: deze twee tunnelvarianten zijn vergelijkbaar in termen van effecten voor het grondwatersysteem. In beide gevallen komt de onderkant minder diep te liggen dan de korte tunnel variant, zodat de effecten minder zullen zijn dan nu onderzocht
- Korte tunnel (op het tracé van de bovengrondse variant / op een tracé westelijk langs de spoorweg Amsterdam-Almere): voor beide gevallen geldt dat de afstand tot het Naardermeer groter is dan het 'worst-case scenario', zodat de effecten minder zullen zijn dan nu reeds onderzocht.

4 Conclusies

Zout transport in het grondwatersysteem is een traag proces. Uit de analyse van de chloride concentratie metingen in de buurt van het 2D-dwarsprofiel blijkt dat het grondwatersysteem wat de zoet-zout verdeling betreft nog niet in evenwicht is. Ingrepen in het (verre) verleden liggen hieraan ten grondslag. Zowel verzilting als verzoeting zal optreden in het 2D-dwarsprofiel.

De veranderingen in (zoetwater)stijghoogtepatroon en kwelintensiteit door de aanleg van een tunnel vallen binnen de natuurlijke variatie van een grondwatersysteem. Als gevolg hiervan is te verwachten dat de effecten van de tunnel op de zoet-zout verdeling in het grondwater nabij het Naardermeer te verwaarlozen zijn.

Door de aanleg van een tunnel verandert de zoet-zout verdeling, de kwelintensiteit en de zoutbelasting op het oppervlaktewater alleen in de directe omgeving van de tunnel, maar deze verandering is slechts marginaal. Ingrepen in het (verre) verleden zullen gedurende de komende 250 jaar nog steeds een groter effect hebben op de chloride concentratie verdeling en de zoutbelasting in het topsysteem. Per saldo neemt de zoutbelasting in dit 2D-dwarsprofiel gedurende de komende 250 jaar af. Onder de tunnel zal verzoeting optreden omdat infiltrerend zoet grondwater vanuit het Naardermeer onder de tunnel door via grotere diepten zal stromen.

Een zandbaan op de locatie van de te bouwen tunnel heeft tot gevolg dat de kwelintensiteit en de zoutbelasting groter is ten westen en ten oosten van de tunnel. Een zandbaan laat het zoete grondwater vanuit het Naardermeer gemakkelijker toestromen: de verzoeting onder de tunnel neemt nog meer toe. Tegelijkertijd wordt een propje brak grondwater versneld omhoog worden geduwd, en veroorzaakt een kleine verzilting direct westelijk van de tunnel: dit effect is echter tijdelijk.

De verandering in (zoetwater)stijghoogte tijdens het bouwproces is klein en heeft nauwelijks effect op de grondwaterstroming. Het effect op de veranderingen in de chloride concentratie verdeling in het grondwatersysteem is eveneens te verwaarlozen.

De korte tunnel variant zal de grootste effecten op het grondwatersysteem wat betreft kwelintensiteit en zoutbelasting veroorzaken. Ter plaatse van het Naardermeer zijn deze effecten echter verwaarloosbaar. Voor de overige tunnelvarianten geldt hetzelfde: ter plaatse van het Naardermeer treden geen effecten op wat betreft de kwelintensiteit en de zoutbelasting.

5 Referenties

- Bloem en Ooteman (2002), Hydrological study on brackish groundwater in the Nieuwe Keverdijkse Polder, An integrated project of ecohydrology and applied geophysics. Afstudeerscriptie Vrije Universiteit Amsterdam en TUDelft, 68 p.
- COLN-TNO (1958), De landbouwwaterhuishouding in de Provincie Noord-Holland. Commissie Onderzoek Landbouwwaterhuishouding Nederland – TNO, H. De Vries en B. Vrijhof.
- Dam, J.C., van (1998), Collegediktaat Geohydrologie, TUDelft, Civiele Techniek.
- Gelhar, L. W., C. Welty, et al. (1992), A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers. *Water Resour. Res.* 28(7): 1955-1974.
- Grontmij (2005a), Planstudie/MER Schiphol-Amsterdam-Almere, MER Eerste Fase, Definitief, 216 p.
- Grontmij (2005b), Planstudie/MER Schiphol-Amsterdam-Almere, Deelrapport Bodem en Water, 65 p.
- Grontmij (2006), Bijlage 1 Grondwatermodel, bijlage bij hoofdrapport “Planstudie/MER Schiphol-Amsterdam-Almere, MER Eerste Fase, Definitief, 216 p.”, 31 maart 2006, Houten.
- Huisman, L. (1972), *Groundwater Recovery*. MacMillan Press, London.
- KIWA (2005), Het zout der aarde: kwantificeren van de toekomstige vraag naar en beschikbaarheid van goed water voor Rijnland; onderzoeksrapport in opdracht van het Hoogheemraadschap van Rijnland.
- Konikow, L.F., D.J. Goode & G.Z. Hornberger (1996), A three-dimensional method-of-characteristics solute-transport model (MOC3D); U.S.G.S. Water-Resources Investigations Report 96-4267, 87 p.
- Kooiman, J. W. (1989), Modelling the salt-water intrusion in the dune water-catchment area of the Amsterdam Waterworks. *Proc. 10th Salt Water Intrusion Meeting*, Ghent, 1988, Ghent, Belgium: 132-142.
- Lebbe, L. C. (1983), Mathematical model of the evolution of the fresh-water lens under the dunes and beach with semi-diurnal tides. *Proc. 8th Salt Water Intrusion Meeting*, Bari, Italy, *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Vol. XVIII, Parte II: 211-226.
- McDonald, M.G. & A.W. Harbaugh (1988), A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model; U.S.G.S. *Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6, Chapter A1, 586 pp.
- Natuurmonumenten (1995), Beheerplan 1995 Naardermeer. Middellange termijnplan 1996-2001. Vereniging Natuurmonumenten. ‘s-Gravenhage.
- Oude Essink, G.H.P. (1996). Impact of sea level rise on groundwater flow regimes, A sensitivity analysis for the Netherlands, Delft University of Technology, 411 p.
- Oude Essink, G.H.P. (1998), Simuleren van 3D dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming: MOCDENS3D. *Stromingen* 4(1): 5-23.
- Oude Essink, G.H.P. (2000), Zoutwaterintrusie in het grondwatersysteem van de Kop van Noord-Holland, Een toepassing van de drie-dimensionale computer code MOCDENS3D, *Stromingen*, 6(3), 9-21.
- 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): 137-158.
- Post, V.E.A. (2003), Groundwater salinization processes in the coastal area of the Netherlands due to transgressions during the Holocene. Amsterdam, The Netherlands, Vrije Universiteit: 138.

- Provincie Noord-Holland (2002), Milieukwaliteit in Noord-Holland, Milieu en Natuur.
- Rijkswaterstaat (2006), Ministerie van Verkeer en Waterstaat: Alternatieven- en Variantennota Planstudie Schiphol-Amsterdam-Almere, Rijkswaterstaat, 169 p.
- Schot, P.P. (1991), Solute transport by groundwater flow to wetland ecosystems. Ph.D.-thesis. Geografisch instituut Rijksuniversiteit Utrecht, Utrecht.
- Stuyfzand, P. J. (1993), Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands. Amsterdam, The Netherlands, Vrije Universiteit: 366.
- TNO (2004), Minnema, B., Kuijper, B., & Oude Essink, G.H.P., Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland.
- TNO (2005), Oude Essink, G.H.P., Goes, B. & Houtman, H., Chloride-concentratie onderkant deklaag in Nederland, NITG rapport 05-056-A.
- Vugt, A., van, Oude Essink, G.H.P. & Biesheuvel, A. (2003), Modelleren van het zoet-zout grondwatersysteem op Texel, Stromingen, 9(1), 33-46.
- Wetterskip Fryslân (2005), Bodemdaling Barradeel II Inrichtingsplan, samenwerking tussen Arcadis en TNO.
- Witteveen & Bos (2000), Groot Geohydrologisch Onderzoek Texel; onderzoeksrapport in opdracht van Provincie Noord-Holland, Waterschap Hollands Kroon, Hoogheemraadschap van Uitwaterende Sluizen en Gemeente Texel.