

---

# Zoet en zout Grondwater in de Provincie Flevoland

Gualbert Oude Essink, Christoffel Klepper,

Perry de Louw, Esther van Baaren<sup>1</sup>

---

*Om de Kaderrichtlijn Grondwater in Flevoland te implementeren zijn twee beleidsonderbouwende studies uitgevoerd: één gericht op effecten van onttrekkingen op het zoet grondwaterbeheer en één gericht op de kwetsbaarheid van het grondwatersysteem voor verontreiniging (Grontmij, 2008). In dit artikel wordt de eerste studie behandeld, waarin de draagkracht van het grondwater systeem is bepaald. Hiervoor zijn een inventarisatie van chlorideconcentratiemetingen, een watersysteemanalyse, een 3-dimensionale zoet-zout kartering, een meetcampagne en resultaten van analytische en numerieke modelleringen geïntegreerd. Dit heeft geleid tot meer inzicht in de ontwikkeling en de ontstaansgeschiedenis van de zoet-zout patronen en de effecten van onttrekkingen op het grondwatersysteem, uitmondend in risicokaarten bij verschillende onttrekkingsdiepten.*

## **Plan van aanpak**

De Provincie Flevoland heeft behoefte aan inzicht in de effecten van grondwateronttrekkingen op de ontwikkeling van de zoete grondwatervoorraden. De Kaderrichtlijn geeft in de definitie van de goede chemische toestand van het grondwater aan dat geen zoutwaterintrusie mag optreden. Om deze effecten te bepalen zijn een aantal activiteiten uitgevoerd. Chlorideconcentratiemetingen zijn geïnventariseerd om de verzoiing en verzilting van het grondwatersysteem te bestuderen. Een watersysteemanalyse heeft plaatsgevonden om de grondwaterstroming beter te begrijpen. Daarnaast is een driedimensionale zoet-brak-zout grondwaterkartering uitgevoerd, en is gemeten aan chlorideconcentraties in grondwater en oppervlaktewater nabij het dorp Espel in de Noordoostpolder. Het risico van opgegelen van brak-zout grondwater is bepaald aan de hand van analytische en numerieke modelleringen van de effecten van onttrekkingen op het grondwater systeem. Dit heeft geleid tot een serie risicokaarten voor het aantrekken van zout grondwater.

## **Over de verdeling zoet, brak en zout grondwater**

De chlorideconcentratie wordt als dominante representant beschouwd voor het zoutgehalte van het grondwater, vooral omdat deze conservatieve stof relatief vaak en betrouwbaar bemeten is ten opzichte van andere stoffen in de ondergrond. De chlorideconcentratie van het grondwater bepaalt de classificering in zoet, brak en zout, waarbij de klassen gelijk zijn genomen aan die zoals gebruikt voor het oppervlaktewater (tabel 1).

---

<sup>1</sup> De auteurs, Gualbert Oude Essink, Christoffel Klepper, Perry de Louw, Esther van Baaren, zijn werkzaam bij Deltares.

**Tabel 1:** Klassenindeling chloride concentratie in oppervlaktewater van de Provincie Flevoland.

| Klasse | Gemiddelde Chloride conc. (mg Cl-/l) | Omschrijving |
|--------|--------------------------------------|--------------|
| 1      | < 150                                | Zoet         |
| 2      | 150-250                              | Licht brak   |
| 3      | 250-500                              | Matig brak   |
| 4      | 500-750                              | Brak         |
| 5      | 750-1000                             | Zeer brak    |
| 6      | 1000-2500                            | Zout         |
| 7      | > 2500                               | Zeer zout    |

Voor de bepaling van de driedimensionale verdeling van zoet, brak en zout grondwater is gebruik gemaakt van DINO Qua, ([www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl)). Er zijn daarbij drie typen data gebruikt: 4260 chlorideconcentratie metingen, 3401 VES-metingen<sup>2</sup> en 6071 boorgat-metingen<sup>3</sup>.

Aan de hand van al deze metingen, alsmede op basis van geologie geïnterpoleerde kunstmatige waarden (Kloosterman, 2007), is een continu 3-dimensionaal veld van de chlorideconcentratie gecreëerd. Het gebied binnen de coördinaten X=130000–200000 en Y= 469000–542000 is bekeken, en wel tussen NAP+5 m en NAP-250 m. Figuren 1,2 en 3 laten een aantal impressies zien van het 3-dimensionale veld.

De chlorideconcentratie varieert sterk in de ruimte en veel minder in de tijd. Los van de bekende grote zoete grondwatervoorraden in Zuidelijk Flevoland<sup>4</sup> bevinden zich winbare ondiepe zoete grondwatervoorraden bij de randmeren en ten zuidoosten van de Oostvaarderplassen. Het IJsselmeer en het centrale deel van Oostelijk en Zuidelijk Flevoland zijn grotendeels brak tot zeer brak tot een diepte van ongeveer NAP-40 m. Op een grotere diepte (NAP-40 m tot NAP-60 m) is het grondwater onder het IJsselmeer zeer brak tot zout en is vooral rond Almere een groot zout tot zeer zout gebied te vinden. In de Noordoostpolder bevindt zich al op 15 meter diepte brak grondwater onder de driehoek Emmeloord-Urk-Espel en op de provinciegrens met Friesland en Overijssel. Dieper zijn in de Noordoostpolder de zoutgehalten echter lager dan de zoutgehalten op vergelijkbare diepten bij Almere en Lelystad/Dronten.

2 Verticale Elektrische Sonderingen zijn geo-elektrische metingen vanaf het oppervlak die informatie geven over de lithologie en het zoutgehalte van grondwater. In combinatie met de temperatuur, het bicarbonaat (HCO<sub>3</sub>)-gehalte ter plaatse en de geologische opbouw geeft een VES-meting een indicatie van het chloride-gehalte.

3 Bij een boorgatmeting laat men een geofysisch apparaat (sonde) in een boorgat zakken en wordt de natuurlijke gamma straling en geo-elektrische weerstand gemeten. Op basis hiervan kan een schatting worden gemaakt van de hydrogeologische opbouw. De chloride concentratie is geschat op basis van een empirisch bepaalde relatie tussen het bicarbonaat (HCO<sub>3</sub>)-gehalte en de elektrische geleidbaarheid (EC 20 C) inclusief temperatuurcorrectie van de elektrische weerstand van het grondwater (TNO, 1992).

4 Vitens onttrekt voor de drinkwaterwinning grondwater uit het diepe derde watervoerend pakket.

## Het ontstaan van de zoete grondwatervoorraden

Gezien de lange perioden waarin tijdens het Pleistoceen de bodem met zoet water kon worden doorgespoeld, zijn de huidige patronen in de zoet-zout verdeling niet toe te schrijven aan de transgressies gedurende het Pleistoceen. De Eemzee heeft waarschijnlijk gedurende een periode van ongeveer 6000 jaar ongeveer 130.000 jaar geleden de gehele ondergrond verzilt. Gedurende de daarop volgende continentale periode van ruim 100.000 jaar doorstroomden vlechtende rivieren het gebied. Deze fase was lang genoeg om veel watervoerende pakketten weer te verzoeten. Echter, hoe dieper hoe moeilijker de verzoeting ging. Het is daarom mogelijk dat in de slechter doorlatende pakketten op ongeveer 200m diepte zout water van de Eemzee terug is te vinden.

Aanwezigheid van zout grondwater in de bovenste 200 meter van de provincie Flevoland is volledig toe te schrijven aan de transgressies gedurende het Holoceen. De belangrijkste transgressie was die in het vroege Holoceen ongeveer 6000 jaar geleden (Figuur 4a). Omdat de deklaag nog nauwelijks was gevormd, kon infiltratie van zout water eenvoudig plaatsvinden. Het infiltratieproces werd ook nog eens versneld door dichtheidstroming<sup>5</sup>. De verzilting is het grootst ter plaatse van de getijdengeulen waar weerstandsbiedende lagen grotendeels afwezig waren. De hoger gelegen delen die bedekt waren met hoogveen werden niet bereikt door de zee, waardoor in deze gebieden geen verzilting van onderliggende watervoerende pakketten optrad. Het zoute oppervlaktewater dat infiltreerde varieerde in zoutgehalte met locatie en tijd door verdunning als gevolg van de aanwezigheid van de monding van beken en/of rivieren. Ook de aanwezigheid van scheidende lagen in de ondergrond speelde een grote rol bij de verzilting van de watervoerende pakketten tijdens het Holoceen. Een mooi voorbeeld is te vinden in Zuidelijk Flevoland. De aanwezigheid van de bekkenklei, afgezet in het glaciële bekken uit het Saalien, voorkwam infiltratie van zeewater gedurende het gehele Holoceen. Boven de bekkenklei wordt daarom hedendaags zout grondwater aangetroffen terwijl onder de bekkenklei zoet water aanwezig is. Deze inversie is te zien in Figuur 3b.

Vanaf 500 na Chr. vinden hernieuwde inbraken plaats en transformeerde Almere in een lagune met een toenemende zoutbelasting vanuit het noorden: de Zuiderzeefase (Figuur 4b). In deze periode maakt de Rijn contact met de IJssel waardoor de afvoer van deze rivier sterk toenam. Dit veroorzaakte een sterke gradiënt in het zoutgehalte van het lagunewater, met de westkant veel zouter dan de oost- en zuidkant.

De Noordoostpolder heeft alleen mariene invloed gehad ten tijde van de aanwezigheid van de Zuiderzee. Verzilting van de ondergrond van een deel van de Noordoostpolder heeft daardoor slechts gedurende een relatief korte tijdsperiode van enkele eeuwen kunnen plaatsvinden. In deze periode was de deklaag al behoorlijk ontwikkeld. Deze deklaag bemoeilijkte infiltratie van brak en zout water. Bovendien waren de zoutgehalten in dit deel van de Zuiderzee door menging met zoet rivierwater van de monding van de IJssel laag. Deze drie factoren verklaren waarom in de ondergrond zout grondwater aanwezig is én waarom deze zoutgehalten lager zijn dan de voorkomens in Zuidelijk en Oostelijk

---

<sup>5</sup> In dit geval zorgt de instabiele situatie (zwaar zout oppervlaktewater bovenop licht zoet grondwater) ervoor dat zoute 'vingers' het grondwater systeem versneld binnendringen. Binnen relatief korte tijd kan het systeem tot op grote diepte verzilten (zie onder andere Post, 2004).

Flevoland bij Almere en Lelystad/Dronten. De snelheid waarmee verzilting vanuit de Zuiderzee in andere delen van Flevoland optrad was vanwege de aanwezigheid van de Holocene deklaag en de kortere periode waarin dit plaatsvond veel lager dan tijdens het Vroeg Holoceen. Het zoute grondwater bereikte daardoor vaak niet eens het eerste watervoerende pakket.

De afsluiting van de Zuiderzee (1932) heeft ten slotte geleid tot een geleidelijke overgang van zoute naar brakke tot zoete condities. Uit de in 2007 uitgevoerde meetcampagne in het detailgebied rondom Espel in de Noordoostpolder komt echter naar voren dat er vooralsnog geen direct bewijs is dat het ondiepe grondwater door de kwelstroom vanuit het IJsselmeer verzoet. Het lijkt er zelfs op dat dieper gelegen brak tot zout grondwater door de sterke verticale grondwaterstroming als gevolg van het grote peilverschil versneld naar het oppervlak wordt 'gedrukt'.

### **Aanvulling zoete grondwatervoorraden**

Kwel en infiltratie zijn niet alleen van belang voor het grondwaterstromingsregime maar ook bepalend voor de zoet-zout verdeling in de watervoerende pakketten. Bij de randen van de polders wordt een sterke kwelflux gegeneerd terwijl in het centrale deel van Zuidelijk en Oostelijk Flevoland en het overgrote deel van de Noordoostpolder infiltratie dominant is. Verder valt op dat in alle grote vaarten kwel optreedt; dus ook in de vaarten in de infiltratiegebieden (Minnema e.a., 2000).

Sinds de inpoldering vindt infiltratie plaats vanuit het IJsselmeer, Markermeer en de randmeren, waarna het water opkwelt in de polders (Haskoning, 2003). De reistijden van het water dat direct achter de dijk opkwelt is kort: enkele tientallen jaren. De reistijd van kwelwater neemt zeer sterk toe met de afstand tot het open water. In Oostelijk Flevoland is door inpoldering het grensvlak van het IJsselmeersysteem en het Veluwesysteem in de richting van het centrum van de polder opgeschoven (Artesia/DHV, 2006). Dit gaat echter zeer langzaam, namelijk slechts maximaal enkele tientallen meters per eeuw.

Door de insnijding van de watergangen door de deklaag en door het lage waterpeil in de watergangen is een lokaal poldersysteem ontstaan.. De watergangen verlagen lokaal de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket. Er treedt kwel op in de watergangen en tussen de watergangen stroomt het deklaagwater naar beneden het eerste watervoerend pakket in. Opgeloste stoffen in dit lokaal geïnfiltereerd regenwater komen op deze manier het eerste watervoerende pakket in. Dit lokale poldersysteem treedt voornamelijk op in de gebieden met een dunne deklaag, dus het oostelijke deel van de Noordoostpolder en de Flevopolder (Grontmij, 2008; Oude Essink e.a., 2008 en Haskoning, 2003).

In principe zijn de genoemde kwel- en infiltratiegebieden van belang voor de aanvulling van zoete grondwatervoorraden, en indirect dus van belang voor de zoet-zout verdeling in de watervoerende pakketten. Pas na een tijdsperiode van minstens enkele tientallen jaren zal de aanvulling van zoet grondwater echter substantieel kunnen zijn, grondwaterstroming is immers een traag proces.

## **Invloed grondwateronttrekkingen op het zoetwaterbeheer**

Voor de analyse om te komen tot risicokaarten waarin de invloed van de grondwateronttrekkingen op het zoetwaterbeheer in de Provincie Flevoland is weergegeven zijn 4 methoden gecombineerd: 1) het bepalen van de positie van het filter, debiet en regime van de onttrekkingen en het bepalen van de positie van slechtdoorlatende lagen, zoet-brak grensvlak en zoet-zout inversies in alle bestaande onttrekkingsputten, 2) het bepalen van stijghoogteverlaging door grondwateronttrekkingen met behulp van de Formule van De Glee, Kruseman en de Ridder, 1970, 3) het bepalen van de opkegeling van het zoet-zout grensvlak met behulp van de analytische vergelijkingen van Dagan & Bear, 1968 en Schmorak & Mercado, 1969 en 4) het numeriek modelleren van dichtheidsgedreven grondwater en gekoppeld stoftransport.

De methoden 2 en 3 zijn slechts indicatief gebruikt om het risico van opkegelen van brak tot zout grondwater te bepalen, voornamelijk omdat de veronderstellingen van de analytische vergelijkingen in werkelijkheid niet volledig van toepassing zijn. Volgens methode 2 is de stijghoogteverlaging significant in Zuidelijk Flevoland. Dit komt door de grote drinkwateronttrekkingen. Volgens methode 3 is in het algemeen de maximale verplaatsing van het huidige zoet-zout grensvlak ter plaatse van de onttrekkingsputten klein (<1m) in een groot deel van het studiegebied. Een verhoging van het grensvlak komt volgens deze methode alleen voor bij grote onttrekkingsdebieten en/of op locaties waar het (berekende) brak-zout grensvlak (1000 mg Cl-/l) nú al erg hoog ligt.

Nieuw in dit soort onderzoek betreft het numeriek modelleren van het opkegelen van brak-zout grondwater, waarbij rekening kan worden gehouden met een meer realistische weergave van zowel de positie van weerstandsbiedende lagen, het onttrekkingsregime als de zoet-zout verdeling. In Bijlage 1 wordt uitvoerig ingegaan op de technische aspecten van het modelleren van opkegelen van brak-zout grondwater onder onttrekkingsputten.

Uit de numerieke modellering blijkt dat de afstand van de onttrekking tot brak-zout grondwater de belangrijkste factor is voor de verzilting in de onttrekkingsput. Hoe zouter het grondwater, hoe meer zout logischerwijs in de onttrekkingsput terecht zal komen. Bij aanwezigheid van slecht doorlatende lagen treedt bij onttrekking juist verzoeting van het grondwatersysteem op als de onttrekking plaatsvindt boven de slecht doorlatende laag. Relatief zoet oppervlaktewater kan gemakkelijk naar de onttrekking toestromen, terwijl brak-zout grondwater door de scheidende laag op afstand wordt gehouden. Als de onttrekking echter plaatsvindt onder een slecht doorlatende laag, en het zoute grondwater niet ver weg ligt zal juist verzilting optreden; de slecht doorlatende laag bemoeilijkt toestroming van zoet water van boven. Hoe hoger de weerstand van deze laag, hoe meer verzoeting (laag onder put) of verzilting (laag boven put) in de onttrekking. En hoe groter de afstand tussen de put en de initiële positie van het grensvlak, hoe kleiner de opkegeling van brak tot zout grondwater.

De vele ondiepe grondwateronttrekkingen hebben een zodanig klein debiet dat ze slechts lokaal verzilting van het grondwatersysteem zullen veroorzaken. Weliswaar neemt de chlorideconcentratie toe bij toenemend onttrekkingsdebiet (Figuur 7), maar deze toename is niet spectaculair. Van een regionale vermindering van de totale zoetwatervoorraad in de Provincie Flevoland lijkt geen sprake te zijn. In infiltratiegebieden zal de zoetwatervoorraad zelfs enigszins groeien.

## Risicokaarten

Na combinatie van de verschillende methoden zijn risicokaarten voor toekomstige exploitatie ten behoeve van strategieontwikkeling opgesteld voor drie verschillende chlorideconcentratielimieten (500, 1000 en 2000 mg Cl-/l) en voor drie verschillende onttrekkingsdiepten (NAP-20, -40 en -60 m). Om de kans op verzilting in te schatten, is in eerste instantie voor iedere put vastgesteld of er een slechtdoorlatende weerstandslaag aanwezig is tussen het chloride concentratie grensvlak en de filter van de put. In verschillende stappen (weergegeven in Figuur 8) is getoetst of er op iedere putlocatie aan de volgende voorwaarden wordt voldaan:

1. Er is minimaal één slecht doorlatende laag op de putlocatie aanwezig die zich boven het chloride concentratie grensvlak bevindt;
2. De scheidende laag bevindt zich tussen het filter van de onttrekkingsput en het chloride concentratie grensvlak.

Aleen voor de putten die volledig aan beide voorwaarden voldoen, kan geconcludeerd worden dat er een kleine kans is op het omhoog komen van brak-zout grondwater door putonttrekkingen. Een kans op opkegeling van brak-zout grondwater is echter altijd aanwezig. Het volledig uitsluiten van de kans op opkegeling is niet mogelijk. Brak grondwater is immers altijd aanwezig in dit gebied, in elk geval op grote diepte, en slecht doorlatende lagen zijn niet volledig continu.

Figuur 9 toont twee kaarten ter illustratie. Uit de analyse blijkt dat voor het grensvlak van 500 mg/l er in totaal 85% van de bestaande putten behoren tot de categorie met een potentieel hoog risico en slechts 14% tot de categorie laag risico, terwijl dit voor het grensvlak van 2000 mg/l respectievelijk 44% en 56% is. Dit is bijna een halvering in aantal putten met potentieel hoog risico.

## Conclusies

Juist de combinatie van verschillende methoden: inventarisatie van chlorideconcentratiemetingen, watersysteemanalyse, 3-dimensionale zoet-zout kartering, meetcampagne en analytische en numerieke modelleringen heeft geleid tot meer inzicht in de effecten van grondwateronttrekkingen voor een duurzaam zoet grondwaterbeheer.

Om de zoetwatervoorraden duurzaam te exploiteren moet duidelijkheid zijn over de afstand van brak en zout grondwater tot de onttrekkingsput, de aanwezigheid van zoetzout inversies, de hoedanigheid van slechtdoorlatende lagen en de kenmerken van de onttrekking. Daarnaast is het belangrijk te weten welke chlorideconcentratie van het onttrokken grondwater nog acceptabel is voor het gebruiksdoel.

Verzilting is in Flevoland een veel voorkomend, maar kleinschalig probleem onder onttrekkingsputten. Van een regionale vermindering van de zoetwatervoorraad is in Flevoland geen sprake, in infiltratiegebieden zal de zoetwatervoorraad zelfs groeien. Dit is echter een langzaam proces.

## Literatuur

- Artesia/DHV (2004)** *Winning van zoet grondwater in Zuidelijk en Oostelijk Flevoland, Onderbouwing voor onttrekkingsplafonds voor de openbare drinkwaterwinning; PN W8570-01-001, pag 121.*
- Bakker, M., G.H.P. Oude Essink, en C. Langevin (2004)** *The rotating movement of three immiscible fluids; in: Journal of Hydrology 287, pag 270-278*
- Dagan, G. en J. Bear (1968)** *Solving the problem of local interface upconing in a coastal aquifer by the method of small perturbations; in: Journal of Hydraulic Research vol 6, pag 15-44.*
- Grontmij, (2008)** *Kwetsbaarheid Flevolands Grondwater; pn 232546.*
- Haskoning, (2003)** *Rapportage meetnet grondwaterkwaliteit Provincie Flevoland 1937-2003; 9M6053/R0003/AV/vh.*
- Kruseman, G.P. en N.A. de Ridder (1970)** *Analysis and evaluation of pumping test data; ILRI, Wageningen, 1970.*
- Minnema, B., P. Vermeulen en P. Venema (2000)** *Bestrijdingsmiddelenonderzoek grondwater Provincie Flevoland; TNO-rapport.*
- Oude Essink, G.H.P. (1998)** *Simuleren van 3D dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming: MOCDENS3D; in: Stromingen 4(1): pag 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; in: Stromingen 6(3) pag 9-21.*
- Oude Essink, G.H.P., P.G.B. de Louw, E.S. van Baaren, M.T.H. van Vliet, B.J.M. Goes, V.E.A. Post, P.C. Vos, I. Bakker, C. Prevo, F. Sergi, V. Marconi (2008)** *Zoet-zout studie Provincie Flevoland; Deltares-rapport 2008-U-R0546/A.*
- Post, V.E.A. (2004)** *Groundwater salinization processes in the coastal area of the Netherlands due to transgressions during the Holocene; Ph.D.-thesis, Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands*
- TNO (1992)** *Inleiding in geofysisch boorgatmeten, een praktische cursus voor grondwater onderzoek.*

## **Bijlage 1: Technische aspecten numeriek model**

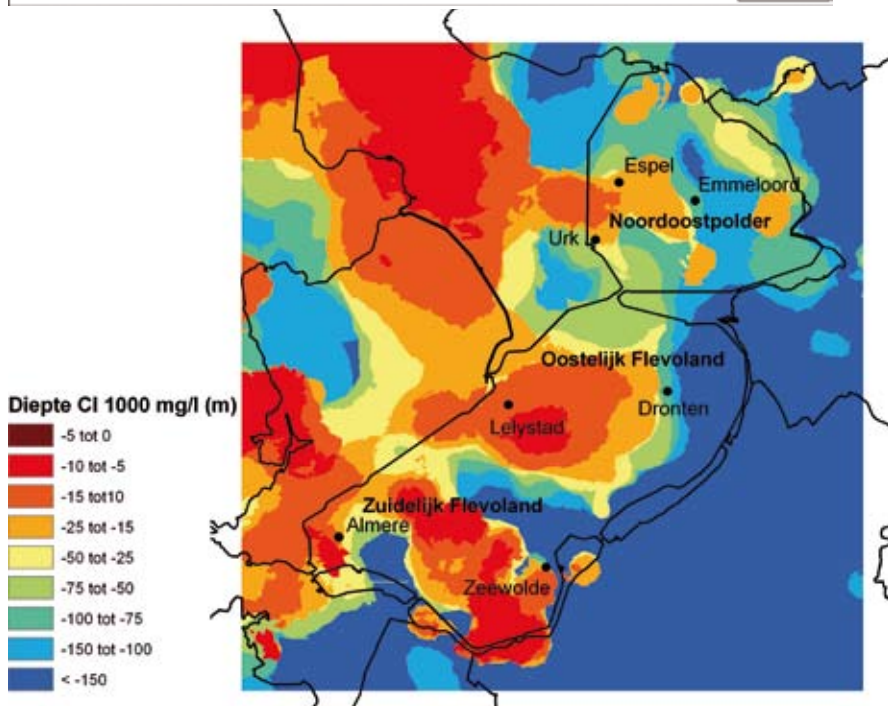
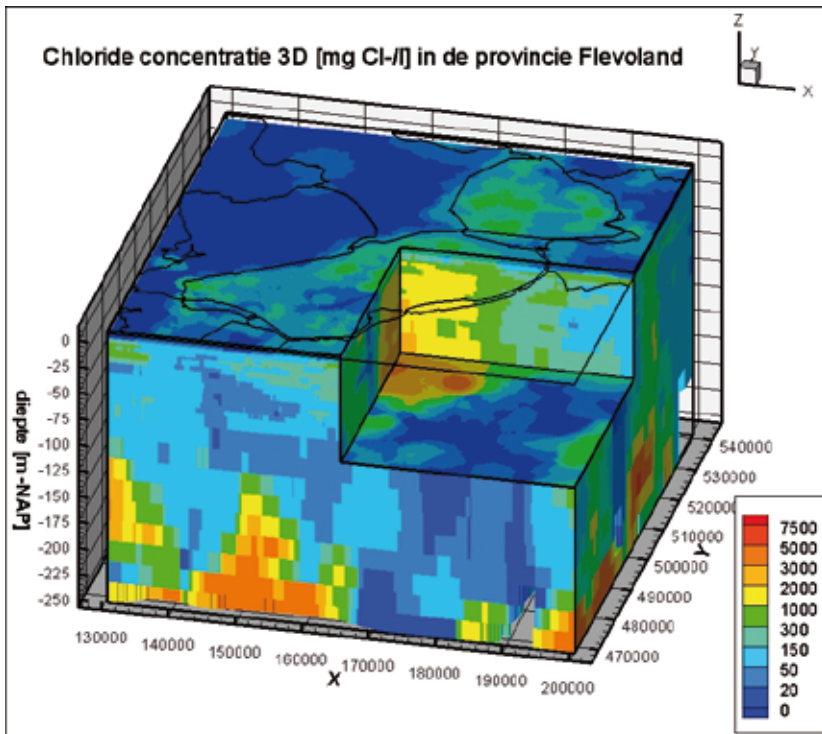
Doel van de numerieke modellering is inzicht te krijgen onder welke geo(hydro)logische en onttrekkingsomstandigheden opkegeling van brak tot zout grondwater optreedt. Er zijn daarvoor in totaal 45 (3 typen geologie \* 3 typen initiële chloride verdeling \* 5 typen onttrekking) numerieke modellen gemaakt om de verplaatsing van zoet, brak en zout grondwater in de ondergrond als gevolg van grondwateronttrekkingen te berekenen.

Op de locatie van elke huidige grondwateronttrekking in de provincie is een geologische profiel met bijbehorende parameters (kD, weerstand) bepaald aan de hand van REGIS (Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem). Hier zijn 3 representatieve typen geologische opbouw geabstraheerd, zie Figuur 5. Voor alle grondwateronttrekkingen is de chlorideconcentratie verdeling in de ondergrond bepaald met behulp van het initiële 3-dimensionale chlorideconcentratie veld (Figuur 1). Op basis van deze gegevens zijn drie representatieve typen initiële chlorideconcentratie verdeling verkregen waarvan de effecten op verzilting zijn onderzocht (Figuur 6). Uit analyse van de chlorideconcentratie verdeling met de diepte van alle beregeningsonttrekkingen, bronbemalingen en warmte-koude opslag onttrekkingen blijkt type 1 het meest voor te komen

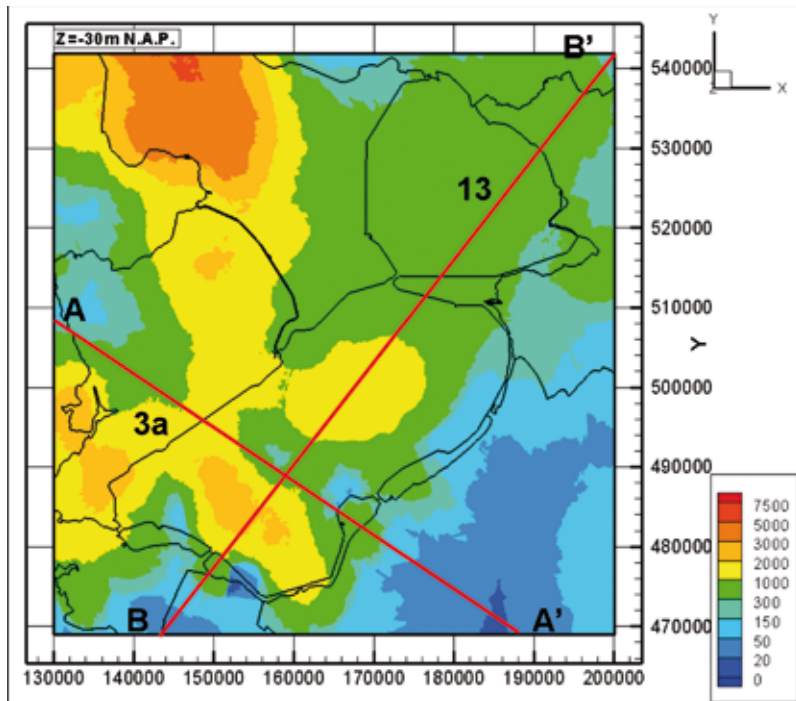
In samenspraak met de Provincie Flevoland is gekozen voor een vijftal typen onttrekkingen met verschillende pompregimes: 1) Type Beregening ondiep: variabele onttrekking op 30-60m–mv in het zomerseizoen, 2) Type Beregening diep: variabele onttrekking op 80-110m–mv in het zomerseizoen, 3) Type Beregening, Cluster boeren (ondiep): variabele onttrekking op 30-60m–mv in het zomerseizoen, 9 in getal met een onderlinge afstand van 200 meter, 4) Type Bronbemaling diep: twee grote onttrekkingen (150 m<sup>3</sup>/uur) op 10-40m–mv gedurende 14 dagen in alleen het eerste jaar en 5) Type WKO (Warmte Koude Opslag - diep): twee seizoenaal variabele onttrekkingen op 80-110m–mv met een onderlinge afstand van 125 meter. Voor meer details van de onttrekkingsregimes, zie Oude Essink et al (2008).

Er is gekozen een gebied van 2.5 km x 2.5 km en 270 meter diep te modelleren. Het numerieke model heeft in horizontale richting 100\*100 cellen van 25x25 meter en in verticale richting 61 modellen van 1\*5m, 10\*2m en 50\*5m. De beschreven scenario's zijn gemodelleerd met het software pakket MOCDENS3D, waarmee dichtheidsafhankelijk grondwaterstroming en gekoppeld zoet-zout transport kan worden gesimuleerd. Het instrumentarium is uitgebreid beschreven in Oude Essink (1998, 2000) en is vergeleken met onder andere SEAWAT in Bakker et al (2004). Aan de randen van de modellen geldt een hydrostatische drukverdeling die gecorrigeerd is voor dichtheidsverschillen. De simulatieperiode varieert van 10 tot 25 jaar, afhankelijk van het onttrekkingdebiet.

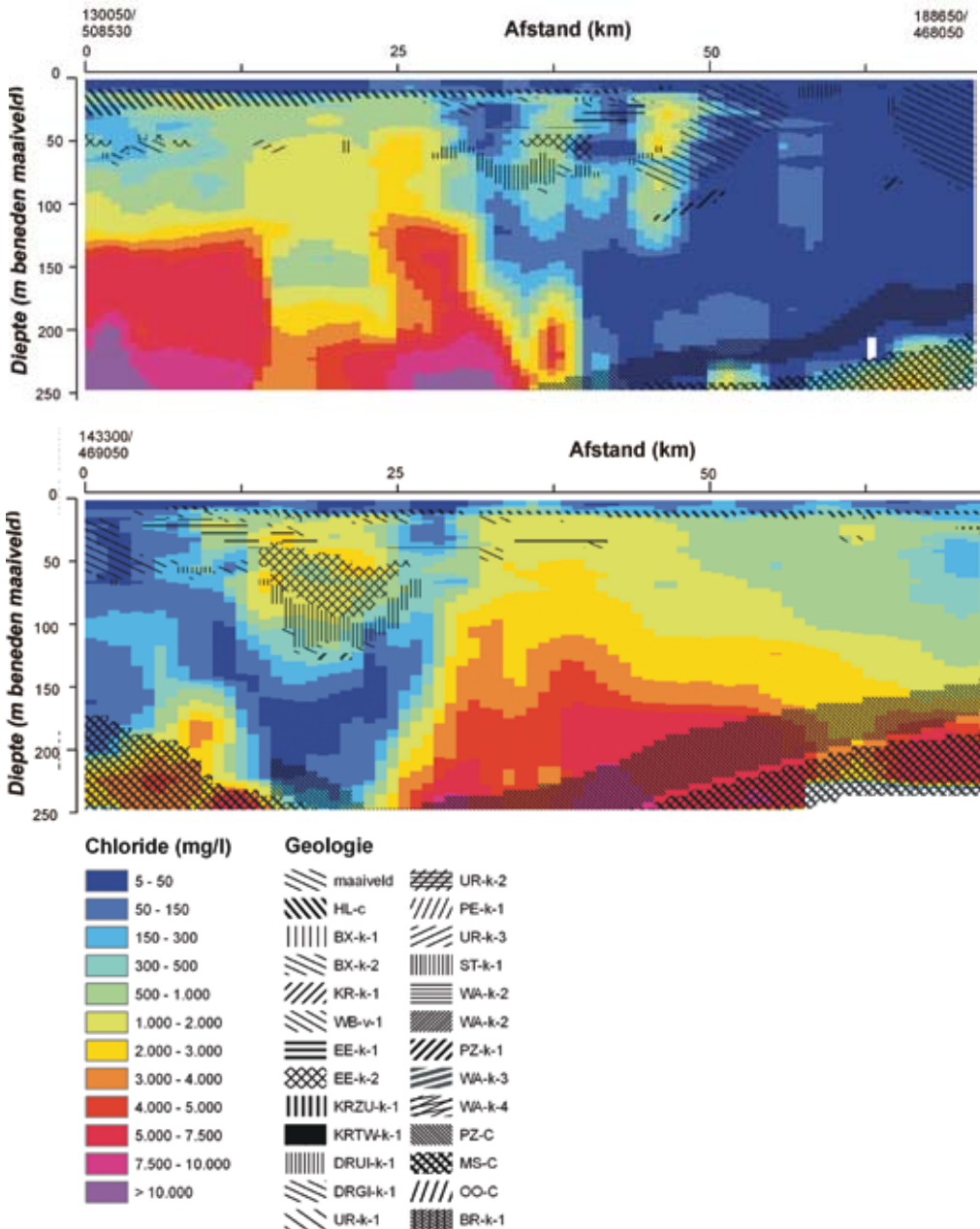




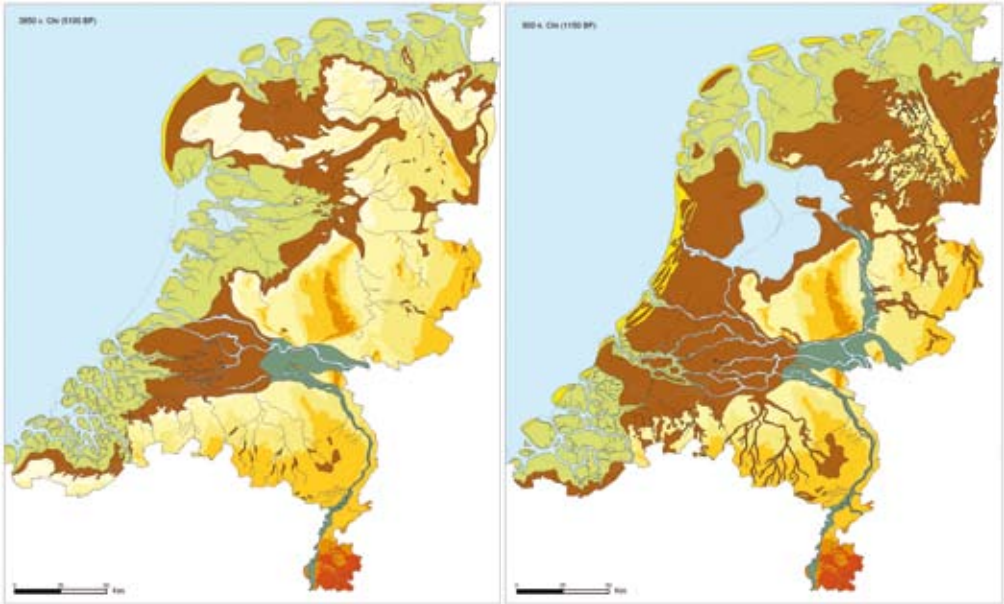
**Figuur 1:** a. 3-dimensionale chloride concentratie veld in de Provincie Flevoland; b. diepte van het 1000 mg/l grensvlak



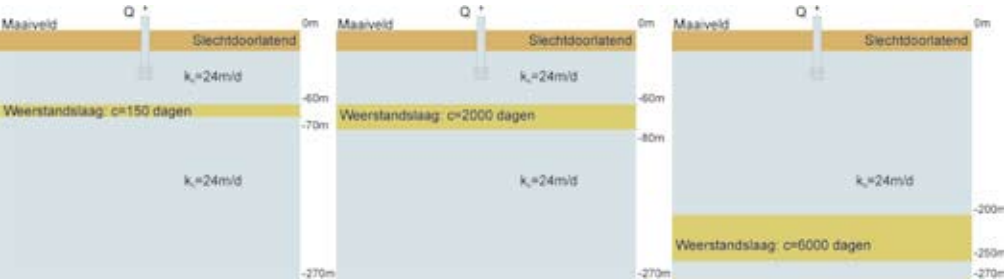
**Figuur 2:** chloride concentratie op NAP-30 m en de positie van een tweetal dwarsprofielen, zie Figuur 3a en b.



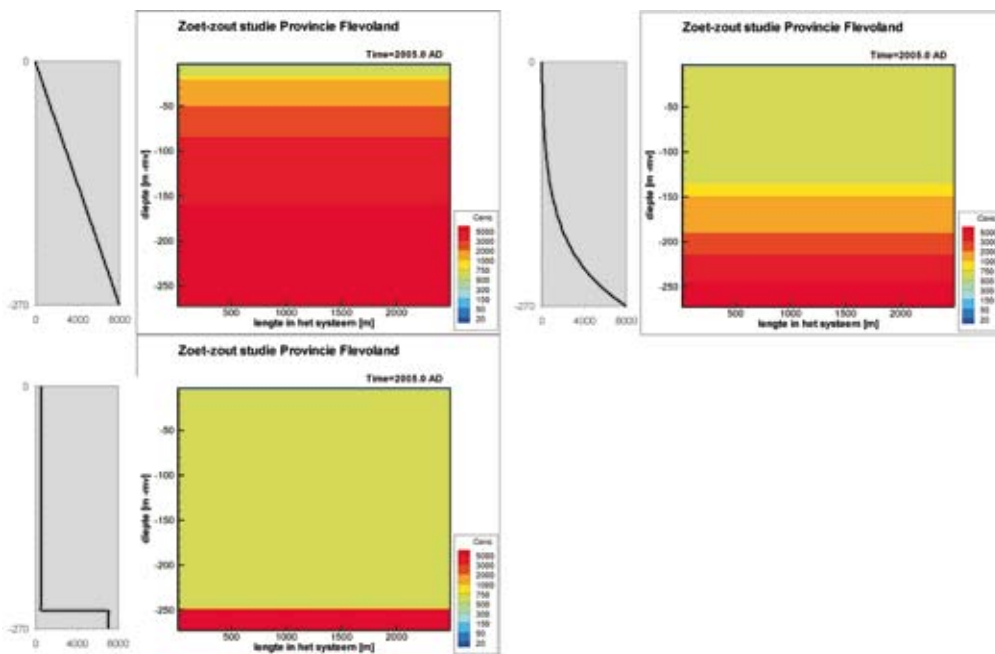
**Figuur 3:** a. Chloride concentratie en aanwezigheid van kleilagen in de ondergrond bij profiel 3a. De pijlen tonen de doordringing van het zoute grondwater van onderaf, doordat weerstandslagen ontbreken of dieper in de ondergrond aanwezig zijn; b. Chloride concentratie en aanwezigheid van kleilagen in de ondergrond bij profiel 13. De bekkenklei in Zuidelijke Flevoland voorkwam diepere infiltratie van zout water gedurende het Holoceen waardoor de watervoerende pakketten onder de bekkenklei zoet zijn gebleven maar boven op en in de bekkenklei brak tot zout grondwater wordt aangetroffen.



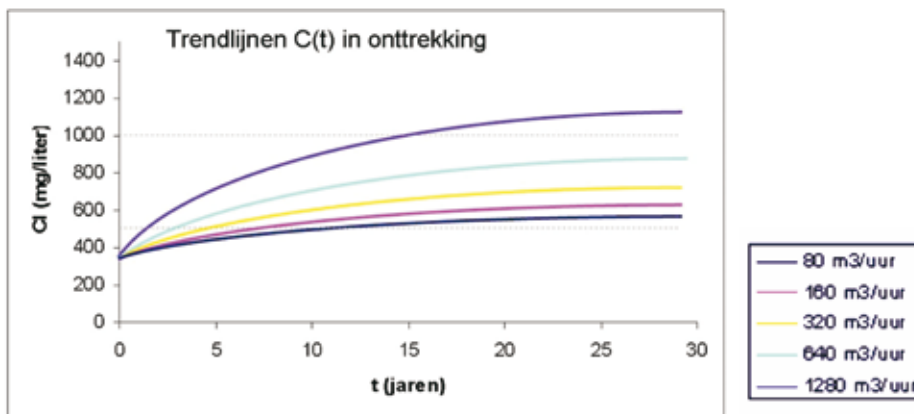
**Figuur 4:** Paleogeohydrologische situatie anno ~3850 v. Chr. en ~800 na Chr. Gedurende deze perioden kon brak tot zout oppervlaktewater gemakkelijk infiltreren in het grondwatersysteem van de Provincie Flevoland (Peter Vos, Deltares).



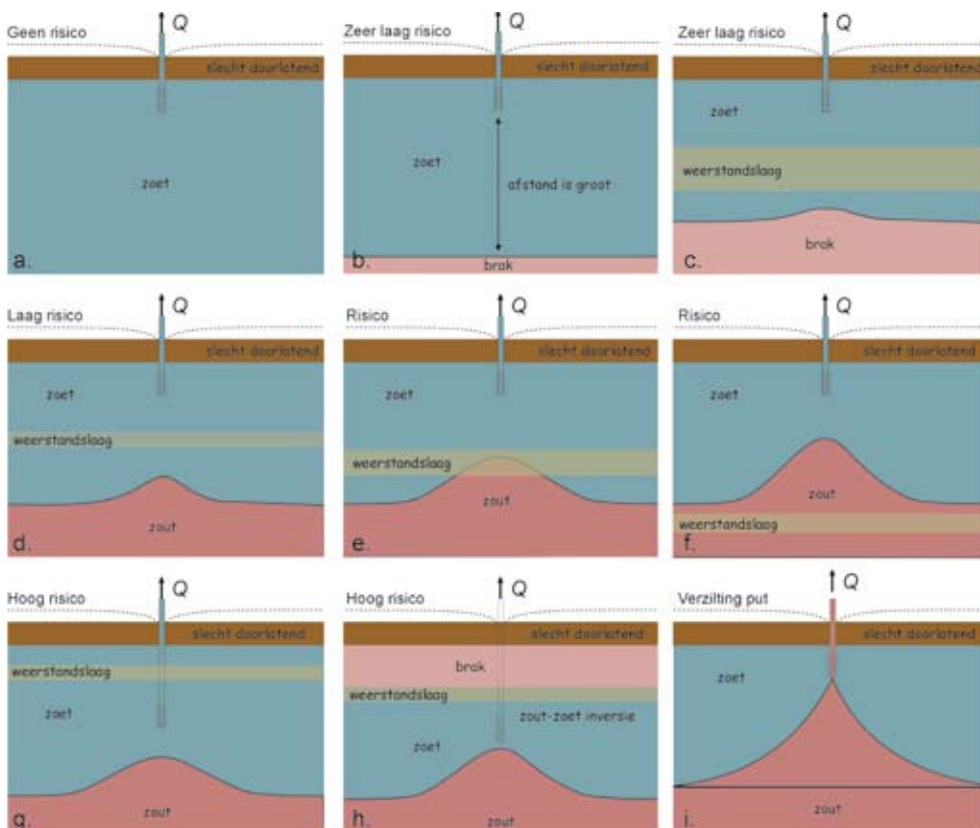
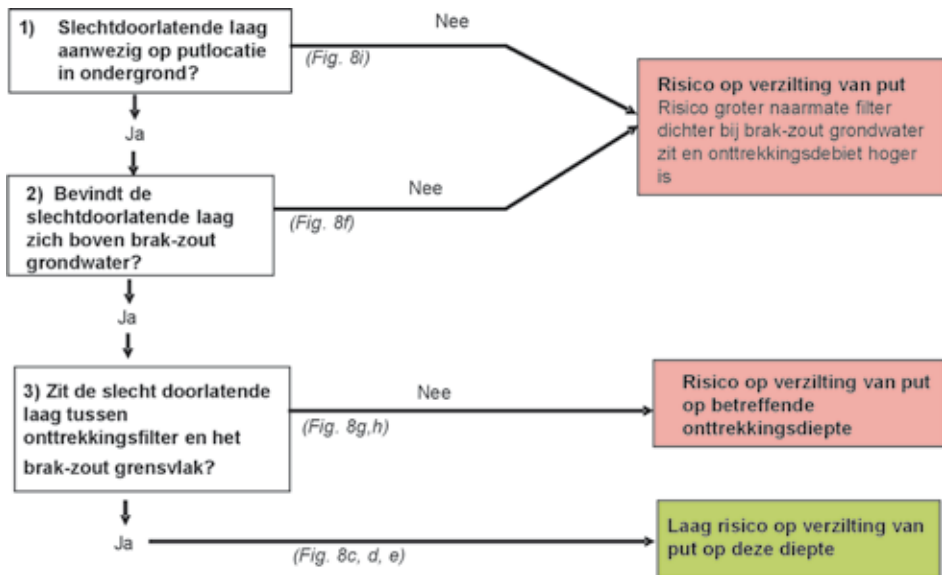
**Figuur 5:** Drie representatieve typen geologische opbouw.



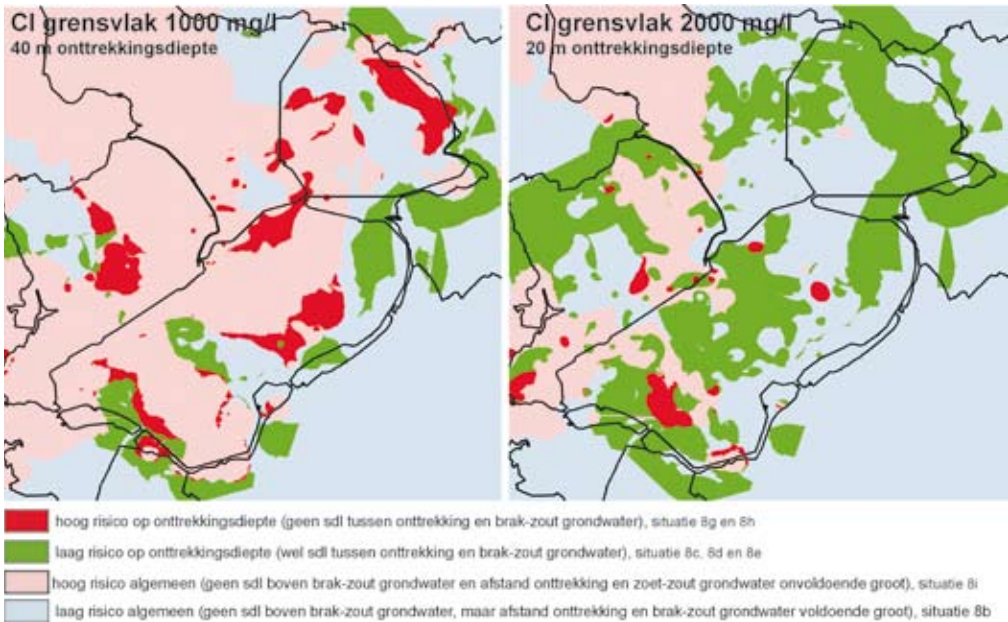
**Figuur 6:** Drie representatieve typen initiële chlorideconcentratieverdeling.



**Figuur 7:** Voorbeeld van de toename in chlorideconcentratie bij een toenemend onttrekkingsdebiet.



**Figuur 8:** Stappenschema risico-analyse putlocaties met bijbehorende schematisatie van mogelijke onttrekkingsituaties



**Figuur 9:** Risico-analyse uitgaande van chloride concentratie grensvlak van: a. 1000 mg/l bij een onttrekkingsdiepte van 40 m en b. 2000 mg/l bij een onttrekkingsdiepte van 20 m.