

# Oriënterende verziltingsberekeningen Fryslân

Harry Boukes<sup>1</sup>, Ruben Caljé<sup>2</sup>, Johan Medenblik<sup>3</sup>

*Ter voorbereiding van een grondwatervisie voor de Provincie Fryslân wordt een studie uitgevoerd naar de chlorideconcentraties in het grondwater. Bij wijze van voorstudie is een 2D-verticaal profiel gekozen van de Waddenzee in het noordwesten naar het Drents Plateau in het zuidoosten. Binnen dit profiel is met behulp van het programma SEAWAT de chlorideverplaatsing in verleden en toekomst gesimuleerd. De relevante stromingsprocessen verlopen erg traag en de geologische processen in het deltagebied Fryslân hebben het land tot in het recente verleden veranderd. Om de huidige voorkomens te begrijpen, is de berekening opgestart in het jaar 5500 v. Chr. We zien het noordwestelijk gebied overstroomd worden door de zee als gevolg van zeespiegelstijging na de laatste ijstijd. Dit leidt vanaf de oppervlakte en door de ondergrond tot het binnendringen van zout grondwater. Dankzij tegendruk van zoet water vanaf het Drents Plateau wordt deze intrusie op enig punt tegengehouden.*

*Vanaf de middeleeuwen zorgen bedijkingen ervoor dat het zoute zeewater niet meer van bovenaf infiltreert. Veenafgravingen en peilverlagingen leiden ertoe dat het zoute grondwater verder oostwaarts door de ondergrond trekt. Dit gaat uiterst traag, maar gestaag. In het jaar 2100 zijn de veranderingen nog niet erg schokkend, maar is de motor in gang gezet om over een periode, in de orde van een duizendtal jaar, een flinke verzilting te veroorzaken.*

## Inleiding

De provincies hebben in Nederland een regierol ten aanzien van het gebruik van grondwater voor verschillende toepassingen. Om deze regierol goed in te kunnen vullen is kennis nodig van de werking van het watersysteem. Fryslân werkt aan een visie over het gebruik van het grondwatersysteem, en wil die visie met een brede grondwaterstudie te onderbouwen.

Fryslân vormt het laaggelegen uiteinde van een deltagebied waar de invloeden van zout grond- en zeewater duidelijk merkbaar zijn. Te hoge concentraties zout, c.q. chloride, maken het water ongeschikt als ongecompliceerde grondstof voor drinkwaterbereiding en voor veel agrarische toepassingen. Verzilting zal dan ook een belangrijk onderwerp zijn in de grondwatervisie en de onderbouwende studie. De

1 Adviesburo Harry Boukes, De Meern (info@harryboukes.nl)

2 Artesia, Schoonhoven (r.calje@artesia-water.nl)

3 Provincie Fryslân, Leeuwarden (j.h.medenblik@fryslan.frl)

verziltingsproblematiek werd op voorhand als zeer complex beoordeeld, zodat het raadzaam werd geacht om eerst een voorstudie uit te voeren. Doel hiervan was gevoel te krijgen voor de omvang van deze problematiek, het identificeren van de belangrijkste processen en de tijdschaal ervan. Het leek een goed plan om ervaring op te doen met de in te zetten rekentechnieken en de sturende parameters. De voorstudie is uitgevoerd in een 2D-verticaal profiel dat overeenkomsten vertoont met een dwarsdoorsnede door Fryslân vanaf de Waddenzee in zuidoostelijke richting tot aan het Drents Plateau (Afbeelding 1). De voorstudie bleek al dermate interessante informatie op te leveren dat er alle aanleiding is om hierover in Stroomingen te publiceren. Een uitgebreide rapportage is te vinden in Caljé en Beekman (2017).

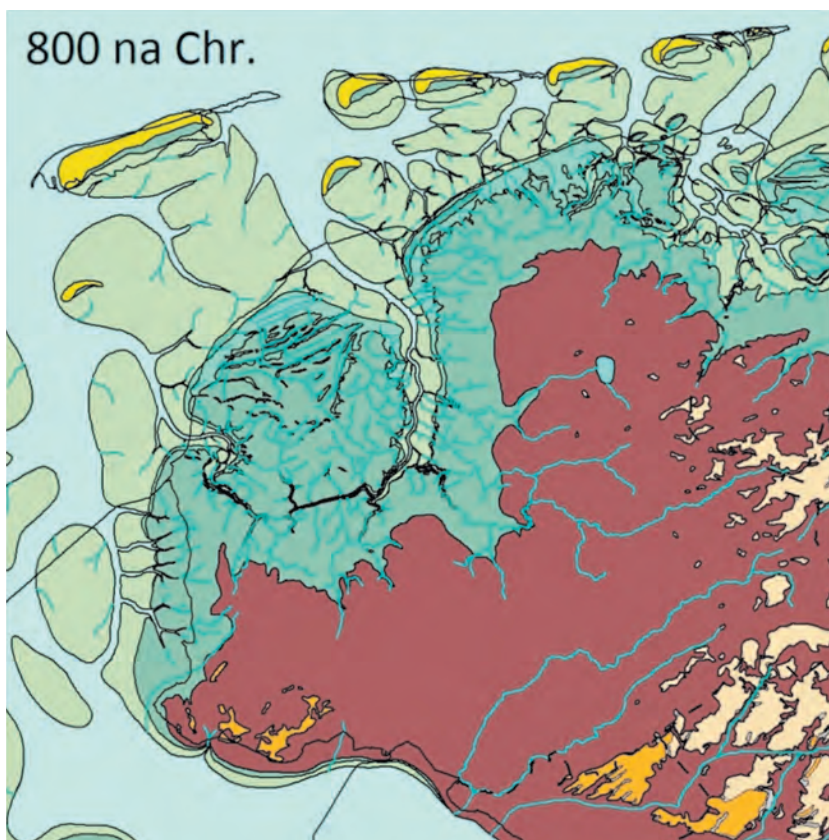


**Afbeelding 1.** Positionering van het dwarsprofiel waarlangs de chloridevoorkomens zijn doorgerekend.

### Het ontstaan van Fryslân

Op circa 200 tot 300 meter onder NAP bevinden zich zanden die in een marien milieu zijn afgezet. Deze zijn in diverse ijstijden en interglacialen afgedekt door sedimenten van rivieren en smeltende gletsjers. Tijdens de laatste ijstijd (Weichselien) vormden zich rond de aardpolen enorme ijskappen, waardoor het water in de oceanen en

zeeën veel lager stond dan nu. Zo'n 20.000 jaar geleden (dat is dus eigenlijk nog heel recent) stond het zeewater zo'n 120 meter onder het huidige niveau. De Noordzee en Waddenzee stonden droog, en Fryslân was een koude, droge en zandige vlakke. Vanaf dat moment warmde de aarde weer op, smolten de ijskappen en steeg de zeespiegel in rap tempo (ca. 1 meter per eeuw). Zo'n 7500 jaar geleden, dus in het jaar 5500 v. Chr., vertraagde deze zeespiegelstijging. De zee stond toen ca. 2 meter onder het huidige NAP. Met het stijgen van de zeespiegel was ook het grondwater onder het vasteland dichterbij de oppervlakte komen te staan. Het mildere klimaat maakte weer meer plantengroei mogelijk, en waar dit in zompige omstandigheden afstierf, werd veen gevormd. Het oostelijk deel van Fryslân kon zo door metersdikke veenlagen meegroeien met de nog slechts langzaam doorstijgende zeespiegel. De zee reikte in 5500 v. Chr. tot aan de huidige noordwestkust van de provincie. Af en toe overspoelde de zee het gevormde veen. Het veen werd weggespoeld of afgedekt met een laagje zeelei. Als het zoute water eenmaal de baas is, is het ook afgelopen met de veenvorming. In het jaar 800 na Chr. bestond een groot deel van Fryslân uit kweldergebieden (Afbeelding 2). Omdat er dan alleen maar kleilaagjes bijkomen (de gebieden werden op den duur alleen met hoge waterstanden overstroomd), kon het maaiveld tot boven NAP komen.



**Afbeelding 2.** Fryslân in het jaar 800 na Chr. met in bruin de veengebieden en in blauwgroen de kwelders (Vos en De Vries, 2013).

Tot circa 800 na Chr. leefden de mensen in afhankelijkheid van de zee. Men woonde er op terpen en landbouw was niet mogelijk. Vanaf dat moment werd de invloed van de mens steeds manifester. In het noordwesten werden de kweldergebieden bedijkt. De zee kon hierdoor niet meer bij het land komen en het grondwater werd uitsluitend aangevuld met zoet regenwater. Er ontstonden regenwaterlenzen waarop wel landbouw mogelijk was. In het binnenland ontdekten de mensen de exploitatie van het veen. Er vonden grootschalige afgravingen plaats waarbij het veen uiteindelijk tot meters onder NAP werd weggegraven. Later werden ook deze gebieden ingepolderd, waarbij inmiddels waterpeilen tot enkele meters onder NAP geen uitzondering zijn. De ontwikkelingen worden ook voor de rest van Nederland uitermate helder in beeld gebracht in de paleogeografische kaarten die vrij op internet toegankelijk zijn (zie Vos en De Vries, 2013)

## **De bedreigingen van Fryslân**

In 5500 v. Chr. was er sprake van een gelijkmatig grondwaterverhang van zuidoost naar noordwest, waardoor het zoete water een continue tegendruk gaf tegen de indringing van het zoute water. Door veenontginningen en inpolderingen zijn de polderpeilen inmiddels verlaagd tot plaatselijk enkele meters onder NAP, waardoor er mogelijk een landinwaartse grondwaterstroming is ontstaan. Deze omkering van de grondwaterstromingsrichting wordt nog versterkt door de te verwachten zeespiegelstijging en verdere maaiveld daling. Maaiveld daling kan door veenafbraak optreden, maar ook als gevolg van de winning van gas en andere delfstoffen uit de ondergrond. Drinkwateronttrekkingen kunnen deze omkering van de stromingsrichting versterken en blijken op enkele plaatsen in de praktijk al last te hebben van hoge chlorideconcentraties. De vraag is of de huidige situatie leidt tot een autonome verzilting, en zo ja, hoe snel dat gaat en tot hoe ver deze reikt.

## **Aanpak**

De Provincie Fryslân heeft stappen ondernomen om bovenstaande problematiek uiteindelijk met een integraal zoet-zout-model voor de hele provincie door te rekenen. Het was echter de vraag of dat haalbaar zou zijn. Een voorstudie die betrekking heeft op een 2D-vertikaal profiel moest hier helderheid over geven.

Het dwarsprofiel is zodanig gekozen dat de karakteristieke gebieden uit bovenstaande systeembeschrijving in het model zitten. Het loopt vanaf Dwingeloo in Drenthe in een rechte lijn over Sint-Annaparochie naar de Waddenzee. Als karakteristieke gebieden onderscheiden we:

1. De Waddenzee
2. De hoge kleigronden van noordwest-Fryslân
3. De westelijke veengebieden, met relatief dunne veenlagen, vaak afgedekt door zeeklei
4. De oostelijke veengebieden waar de oorspronkelijk meters dikke veenlagen grotendeels zijn verwijderd
5. De hogere zandgronden van Oost-Fryslân en Drenthe.
6. Een representatie van het Friese boezemsysteem.

De bodemopbouw binnen de dwarsdoorsnede is in principe overgenomen uit MIPWA

3.0. MIPWA is een gedetailleerd grootschalig grondwatermodel voor de vier noordelijke provincies. Versie 3.0 was op het moment van het project nog niet in zijn geheel opgeleverd, maar de bodemschematisatie al wel. Het was geen doel om principieel een goede weergave van de werkelijkheid te krijgen. Sowieso betekent de schematisatie van een 3D-werkelijkheid naar een 2D verticaal profiel een forse vervorming van die werkelijkheid. Zo hebben we een gat in het Peize/Waalre-complex (de voormalige Tegelenklei) in het 2D-profiel opgenomen, terwijl dat in werkelijkheid een paar kilometer noordelijker ligt. Door het te verschuiven, konden we ook de werking van zo'n gat verkennen.

Het model houdt rekening met vier zandpakketten en als slechtdoorlatende lagen van boven naar onderen: de holocene deklaag, keileem, potklei en het Peize/Waalre-complex.

Geïnspireerd door het werk van Joost Delsman, is besloten tot een paleo-reconstructie van het grondwatersysteem (Delsman, 2015, zie ook <https://www.youtube.com/watch?v=BUfSIVfxxy>), en dat ook in de vorm van een animatiefilmpje weer te geven. Fenomenen als de stijgende zeespiegel, de bedijkingen met de omslag van zoute naar zoete infiltratie, de maaiveldverlagingen door de afgravingen en latere inpolderingen zijn in het model ingebracht. Vanaf 1960 is er een winning aangebracht die vergelijkbaar is met de winning Nij Beets.

Als rekenprogramma is gebruik gemaakt van SEAWAT. SEAWAT is een op MODFLOW en MT3D gebaseerd rekenprogramma voor 3-D dichtheidsafhankelijke stroming, gecombineerd met stoftransport (in ons geval: chloride). Zie: <https://water.usgs.gov/ogw/seawat/>. Er moet immers rekening gehouden worden met de dichtheidsverschillen tussen het zoete en zoute grondwater. Met vraagstukken die tot op een paar honderd meter diep rekenen, levert verwaarlozing van de dichtheidsverschillen potentiële afwijkingen op in de orde van meters. Ten tijde van de opdrachtformulering liepen er discussies of voor vraagstukken als binnen Fryslân het programma SWI voldoende geschikt was (een grensvlakbenadering met daardoor relatief bescheiden rekentijden) of dat een heel concentratieveld berekend moet worden, met dienstegevolge lange rekentijden. Er is voor de tweede benadering gekozen, waarbij één van de doelstellingen was om een indruk te krijgen van de rekentijden wanneer de berekening in 3D voor heel Fryslân uitgevoerd zou worden.

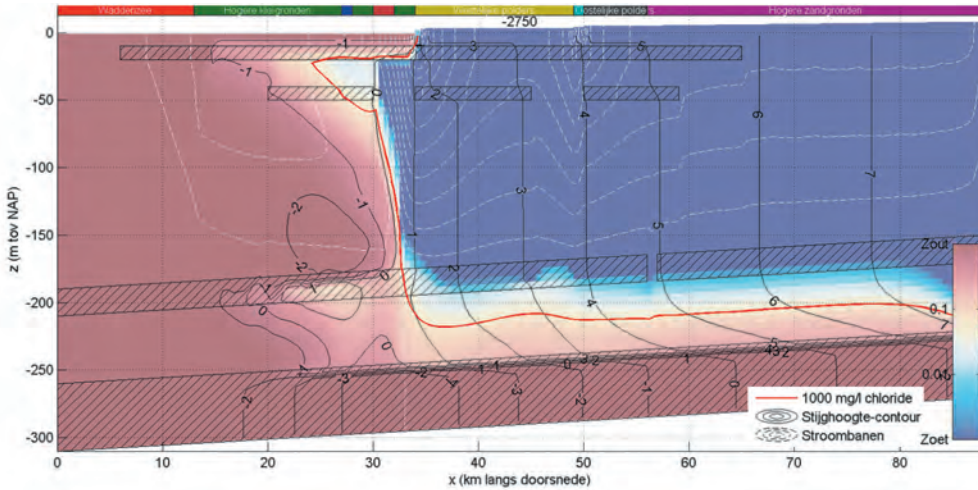
## Resultaten

In een aantal pogingen is een reconstructie gemaakt van de chloridesituatie over het dwarsprofiel. In de eerste runs ging veel fout, maar juist van die fouten hebben we erg veel geleerd over hoe het dan wél moet zijn. Het resultaat had de vorm van een technisch ogend animatiefilmpje. Om uit te leggen wat er te zien is, is de animatie ingepast in een nieuwe, publieksvriendelijke animatie. Deze is inmiddels beschikbaar op Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=dbsSly867Bs>

De berekening geeft ons gevoel voor snelheid en omvang van een aantal processen. Als vanaf 5500 v. Chr. de huidige hoge kleigronden in het model worden overstroomd met zeewater, treedt er verzilting op van bovenaf, maar erg snel gaat dat niet. Bovendien treedt er in de ondergrond vanaf het noordwesten indringing van zout zeewater

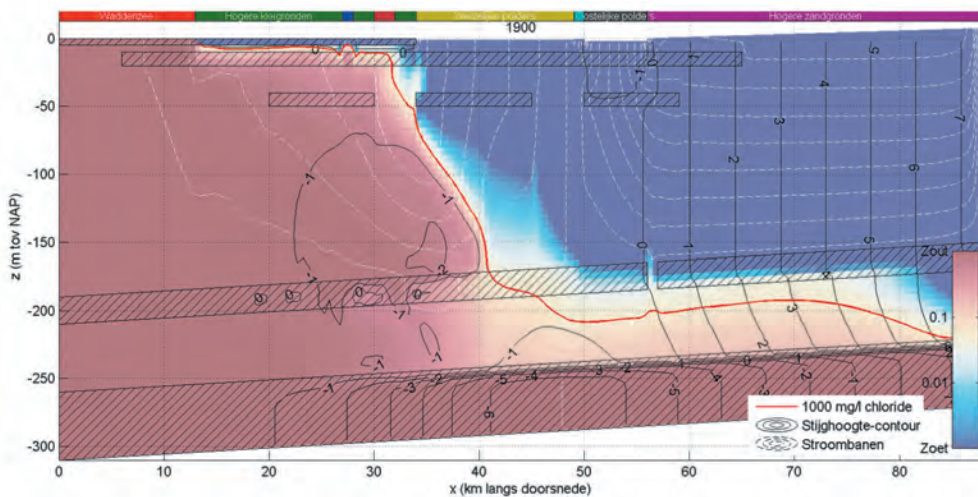


op, mede onder invloed van de dichtheidsverschillen. Op de overgang van de westerlijke veengronden en de hoge kleigronden berekent het model gedurende de eerste duizenden jaren een kwelzone. Die vormt een barrière tegen het indringen van het diepe zoute grondwater. Die barrière valt in het model wel erg stevig uit, omdat we aannemen dat alle veen al gevormd is.



**Afbeelding 3.** Zoet/zout-verdeling Fryslân in 2750 v. Chr.: het indringen van zout water wordt tegengehouden door afstromend zoet grondwater vanuit het zuidoosten.

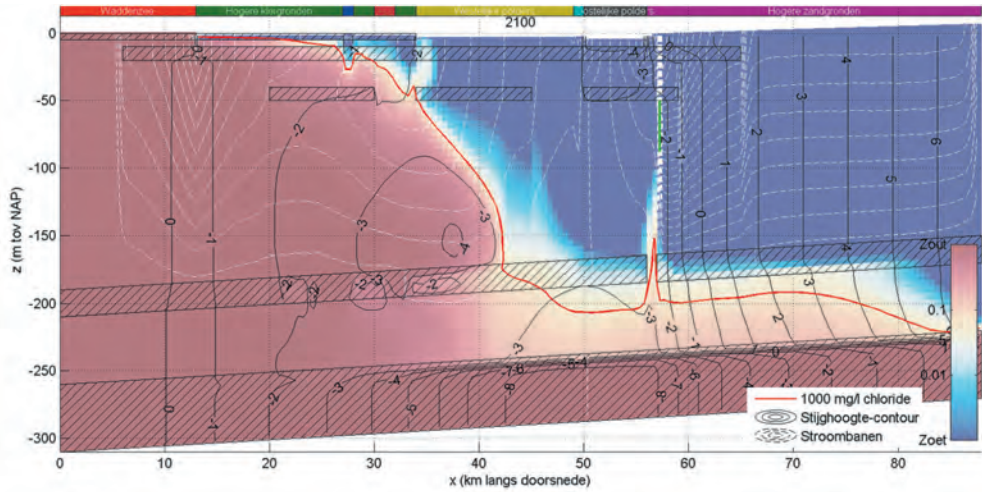
Met het stijgen van de zeespiegel tot aan het begin van onze jaartelling wordt de barrière-werking geleidelijk minder sterk. In de diepe pakketten komt zout grondwater omhoog uit de diepe mariene lagen. Dispersie is hier de motor achter het optrekken.



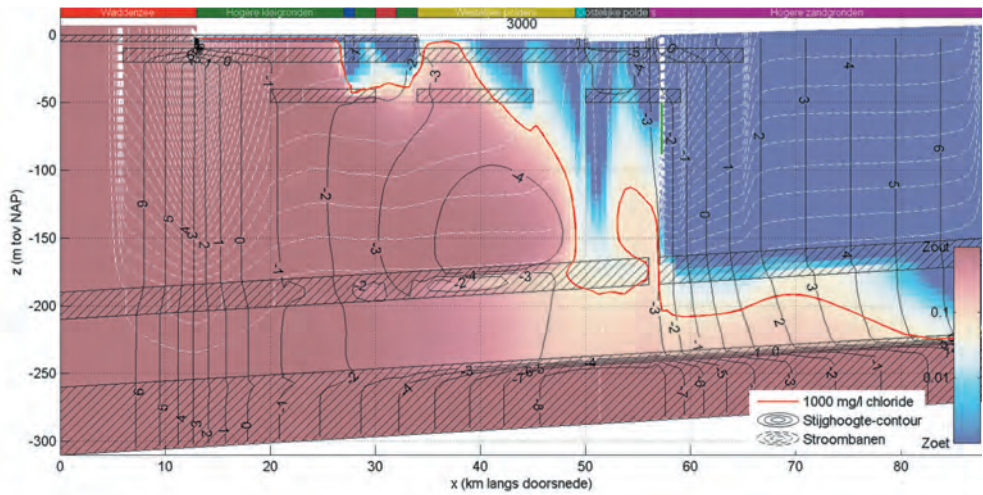
**Afbeelding 4.** Zoet/zout-verdeling Fryslân in het jaar 1900: de barrière tegen indringing van zout water is verschoven tot rond de oostelijke veengebieden.

In het jaar 1400 worden in het model alle hoge kleigronden in één keer omdijkt. Vanaf dat moment treedt daar wel enige verzoeting op van het bovenste grondwater, maar dit proces van bovenaf gaat niet erg snel. Vanaf 1600 vinden er veenontginningen van grotere omvang plaats. Rond 1850 is de barrière tegen zoutwaterintrusie verschoven van de overgang tussen klei en het westelijk veengebied naar de overgang tussen beide veengebieden. Verdere ontvening en peilverlaging doen de barrière nog verder verschuiven.

In 2017 is de stromingsrichting zodanig verschoven dat ook de oostelijke veengebieden op den duur zout water aantrekken. In 1960 is in het model een drinkwaterwinning geplaatst in de buurt van een gat in de Tegelenklei. Dit versterkt vanaf dat moment het optrekken van zout water uit de ondergrond. Door de stromingsdruk vanuit



**Afbeelding 5.** Berekende zoet/zout-verdeling Fryslân in het jaar 2100



**Afbeelding 6.** Berekende zoet/zout-verdeling Fryslân in het jaar 3000

het zuidoosten bereikt dit omhooggetrokken water niet de winput, maar komt het uiteindelijk in de oostelijke veengebieden aan de oppervlakte.

Rond het jaar 2100 is de situatie niet dramatisch verslechterd. De urgentie van de problematiek lijkt daardoor niet groot. Het is echter ook duidelijk dat de situatie dan nog niet stabiel is.

Doorrekenen tot aan het jaar 3000 geeft aan dat pas tegen die tijd de situatie wel heel erg is achteruitgegaan. Het stromingsbeeld dat tot deze achteruitgang leidt (de motor achter dit proces) is in de huidige periode (met name zo ongeveer de laatste 200 jaar) in gang gezet.

Met name die enorme traagheid van het systeem was een belangrijk leerpunt. Het betekent bijvoorbeeld dat uit monitorreeksen van tientallen jaren (als we die al zouden hebben) amper veranderingen waar te nemen zijn die sluipenderwijs toch het hele systeem op zijn kop kunnen zetten. Een KRW-cyclus van zes jaar of een zittingstermijn van een gedeputeerde (vier jaar) lijken in dit perspectief stofjes in de wind.

## Scenario's

Met het beschikbare model zijn vervolgens een flink aantal scenario's doorgerekend. Enerzijds hadden die betrekking op de gevoeligheid van modelparameters, anderzijds op het bepalen van de effecten van externe veranderingen (zoals verdere zeespiegelstijging) of inrichtingsmaatregelen (zoals uitbreiding van de Friese boezem waar een relatief hoog peil van 0,52 m-NAP wordt gehandhaafd, of inrichtingsvarianten van de drinkwaterwinning).

De berekeningen leren dat dispersie een relevant mechanisme is. Zonder dispersie wordt geen zout vanuit de diepte omhooggetrokken, en aangezien een aantal winningen in Fryslân hier in de praktijk wel mee te maken heeft, moeten we dit in de modelleringen meenemen. Het betekent dat het rekenprogramma SWI afvalt en SEAWAT als enige alternatief overblijft. Waar de rekentijden voor het 2D-dwarsprofiel in de orde van tien minuten lag, zal uitbreiding van het model naar een 3D-schema de rekentijd doen exploderen. Toch is er vertrouwen dat het uitvoerbaar is.

Een andere belangrijke conclusie uit de scenario's is dat verdere zeespiegelstijging amper een verdere indringing van het zoutwaterfront veroorzaakt. De peilen van het oppervlaktewater en de grote afstand tussen de zee en de lage polders dempen de invloed van de zeespiegel uit. Overigens was dit ook al een conclusie uit het proefschrift van Gualbert Oude Essink (Oude Essink, 1996) en een studie uit 2012 (Sanchez e.a., 2012).

Een derde belangrijke conclusie is dat de situatie nog wel enigszins bij te sturen is. Zo kan bijvoorbeeld de aanleg van extra boezemwater meer naar het westen een nieuwe buffer vormen tegen de indringing van zout water door de ondergrond. Ook met de positionering van drinkwaterwinningen is er winst te behalen. Dat blijkt wel maatwerk te zijn: bij één van de scenario's was een nieuwe buffer gecreëerd waardoor de oostelijke veengebieden ook op termijn geen last van verzilting hadden, maar deze ingreep dreef het eerder opgetrokken zoute water juist in de richting van de drinkwaterwinning, waardoor de oplossing voor de ene partij een probleem veroorzaakt voor de ander.



## Conclusies

Voor complexe vraagstukken zoals de verzilting in Fryslân blijkt het handig om het probleem niet in één keer groots te willen doorrekenen, maar eerst een verkenning uit te voeren om gevoel te krijgen voor de omvang en tijdschaal van de problematiek en de inzetbaarheid van verschillende rekentechnieken. De uitgevoerde voorstudie heeft ons veel geleerd over de problematiek, juist ook doordat we niet alles in één keer goed hoefden te doen. Het eindresultaat is verwerkt in een publieksvriendelijke animatie, die onder meer vertoond is in een ook voor niet-hydrologen geschikte collegemiddag over grondwater. Op deze manier worden de Friese bevolking en bestuurders meegenomen in het denken over verzilting en de vraag of en welke maatregelen genomen moeten worden.

## Het vervolg

Inmiddels is de studie aanbesteed om de berekeningen in 3D voor heel Fryslân uit te voeren. Veel stromingspatronen in de ondergrond hebben een 3D-karakter, zoals de stroming naar een put of naar een polder. In een 3D-berekening wordt dit karakter beter beschreven en is het eenvoudiger om het modelresultaat met waarnemingen uit het veld te vergelijken.

Om deze studie te voeden is een nadere inventarisatie uitgevoerd om alle bekende informatie nog eens op een rij te zetten (Rus, in prep.). Binnen de Provincie wordt gewerkt aan een proces om aan het einde van de studie de juiste beleidsbeslissingen te kunnen nemen. Dit betekent onder andere dat de juiste scenario's doorgerekend moeten worden. Deze processen worden in IPO-verband gedeeld met andere provincies en ingebracht in de verkenning naar de drinkwatervoorziening van de toekomst, zoals die voortkomt uit de Structuurvisie Ondergrond. Voor bewoners en bestuurders is er een collegemiddag georganiseerd, waar de verkregen kennis laagdrempelig gedeeld is. Dit is zeker door de Friese media goed opgepakt. De collegemiddag is integraal op Youtube terug te zien. (<https://www.youtube.com/watch?v=IpeINBZLZw&t=4920s>).

## Literatuur

**Caljé, R. en Beekman, W.** (2017) Oriënterende modelberekening verzilting Fryslân. Artesia; rapport 16.16.84.

**Delsman, J.** (2015) Saline groundwater – surface water interaction in coastal lowlands; Deltares Select Series 15/2015.

**Sanchez, M.F., J.L. Gunnink, E.S. van Baaren, G.H.P. Oude Essink, B. Siernon, E. Auken, W. Elderhorst, P.G.B. de Louw** (2012) Modelling climate change effects on a Dutch coastal groundwater system using airborne electromagnetic measurements; *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012 – 16.

**Oude Essink, G.H.P.** (1996) Impact of Sea Level Rise on Groundwater Flow Regimes, A Sensitivity Analysis for the Netherlands; TU Delft.

**Rus, J.S. (in prep)** Grondwatersysteembeschrijving Fryslân; Hunzebreed, rapport 188.

**Vos, P. en De Vries, S.** (2013) Tweede generatie paleogeografische kaarten van Nederland (versie 2.0); [online], Deltares, downloaddatum 5 september 2016.  
zie: <https://archeologiein nederland.nl/bronnen-en-kaarten/paleogeografische-kaarten>.

---

## Exploratory groundwater modelling of salinization processes in Fryslân

*The Dutch province of Fryslân is developing a vision on the use of groundwater. This requires a thorough understanding of chloride concentrations and salinization processes in groundwater. This paper presents a groundwater modelling study for a 2D-vertical profile stretching from the Waddensee in the northwest to the Drents Plateau in the southeast. The transient distribution of chloride, in the past and future, has been simulated using the model code SEAWAT. Dominating flow processes are very slow, and geological developments changed the delta-area of Fryslân up to the recent past. In order to explain the present chloride distribution, simulations had to be started in the year 5500 B.C. The modelling showed that seawater flooding of the north-western part of the province following the last glacial period caused intrusion of saline groundwater, both from the surface and the deeper aquifers. Recharge of rainfall in the southeast generated a fresh groundwater body which stops this intrusion at a certain point. After the Middle Ages man-made dikes prevent seawater flooding and associated seawater infiltration. Removal of peat and lowering of the surface water levels in polder areas cause saline groundwater to migrate further east. Modelling shows that this is a very slow, but steadily continuing process. Although the changes are not very prominent up to the year 2100, modelling suggests more extended salinization of fresh groundwater resources over a period of a thousand years.*

---