

Verzilting van het Nederlandse grondwatersysteem

**Model versie 1.3 -
2009-U-R91001**

Gualbert Oude Essink
Esther van Baaren

Titel

Verziltling van het Nederlandse grondwatersysteem

Opdrachtgever
Alterra

Kenmerk
0903-0026

Pagina's
27

Projectnummer
092.91001

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	2009-03-03	Esther van Baaren				Bennie Minnema	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Verzilting door autonome en antropogene processen	1
1.2 Verzilting door Klimaatverandering	3
1.3 Chlorideconcentraties	4
1.4 Overzicht	5
2 Aanpak	6
2.1 Inleiding	6
2.2 Geohydrologie	6
2.3 Huidige zoet-zout verdeling grondwater	7
2.4 Klimaatscenario's	8
2.5 Numeriek model	8
3 Verzilting grondwater	9
4 Kwel	11
5 Zoutvrachten	12
6 Conclusies	14
7 Aanbevelingen en gebruik kaarten	15
8 Referenties	16
 Bijlage(n)	
A Korte beschrijving MOCDENS3D	17
B Chlorideconcentratie onderkant deklaag	19
C Zoutvrachten	22

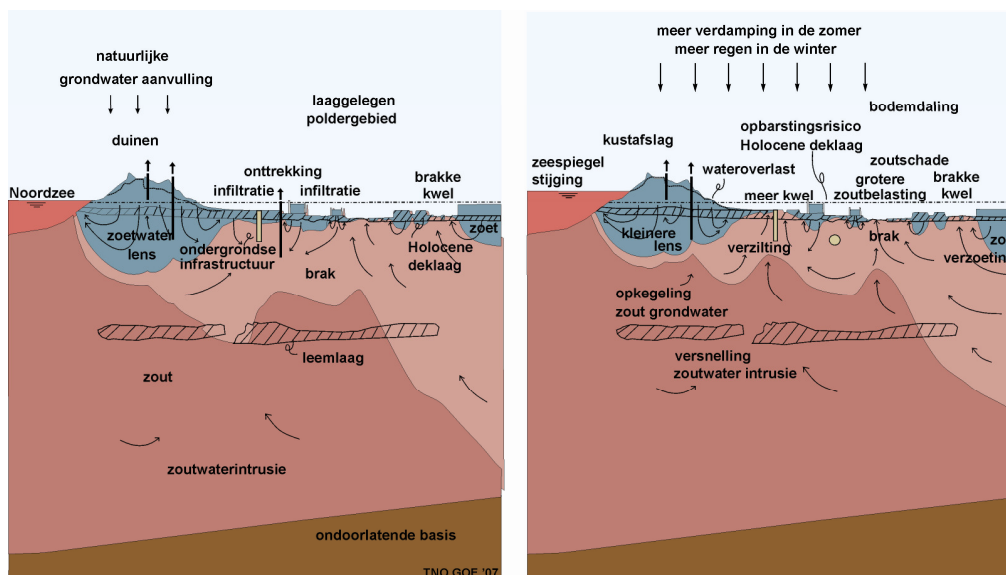
1 Inleiding

1.1 Verzilting door autonome en antropogene processen

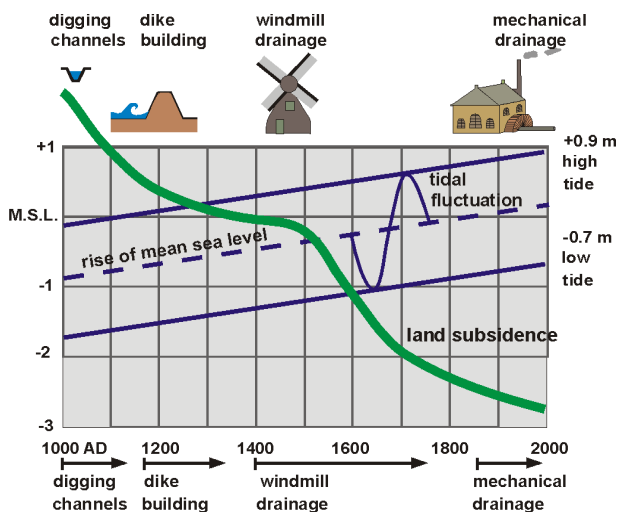
Het grondwatersysteem in het Nederlandse kustgebied wordt bedreigd door de intrusie van zout grondwater als gevolg van natuurlijke processen en antropogene activiteiten, die al vele eeuwen gaande zijn. Aan de verzilting liggen de volgende twee dominante oorzaken ten grondslag:

- ♦ *Toename van het peilverschil tussen zeeniveau en maaiveld gedurende de afgelopen eeuwen.* Het grote peilverschil van minimaal enkele meters tussen het zeeniveau en het achterliggende polderland heeft tot gevolg dat zeewater de watervoerende pakketten binnendringt in een, in grondwatertermen, relatief hoog tempo en dat zout grondwater opwelt vanuit diepe (mariene) watervoerende pakketten (Figuur 2). Door de verlaging van het waterpeil als gevolg van de daling van het landoppervlak begon het grondwater tussen de verschillende poldergebieden, elk met een eigen gecontroleerd polderpeil lager dan het gemiddeld zeeniveau, sneller te stromen. Kwelwater in de centrale delen van de diepe polders gaat in het kustgebied vaak vergezeld met een brakke compositie. Daarnaast vindt infiltratie van oppervlaktewater plaats in het duingebied en de ondiepe zoetwatermeren. De autonome verzilting van de ondergrond is een omvangrijk, langzaam en nauwelijks omkeerbaar proces. Dit proces is al vele eeuwen aan de gang en wordt veroorzaakt door de continue daling van het waterpeil en daaraan gelieerd het maaiveld. Natuurlijke ontwikkelingen en antropogene activiteiten liggen hieraan ten grondslag. Vooral de aanleg van de laaggelegen droogmakerijen vanaf het begin van de Gouden (17^e) Eeuw heeft gedurende de afgelopen eeuwen een sterke toestroming van zout grondwater veroorzaakt. Deze ontwikkelingen in het verleden hebben nog steeds invloed op de verdeling van zoet, brak en zout grondwater. Zelfs bij een constant peilverschil zal het autonome verziltingproces nog een aantal eeuwen duren (Oude Essink, 1996). De afgelopen eeuwen is het verschil in zeeniveau en gemiddelde grondwaterstand in de poldergebieden toegenomen (Figuur 1). Zoutwater intrusie vanuit de Noordzee lijkt te zijn toegenomen in het kustgebied; immers, de invloed van de nabijgelegen zee is hier groot, het zoutgehalte in het grondwater is relatief hoog en dit deel van Nederland ligt voor het merendeel onder zeeniveau.
- ♦ *Toename van grondwateronttrekkingen.* De bevolkingsgroei en de toename aan economische activiteiten heeft de afgelopen eeuw geleid tot een toename van grondwateronttrekkingen ten behoeve van de watervoorziening. Op vele locaties is het grensvlak tussen zoet en zout grondwater ter plaatse van de onttrekkingen meters omhoog gekomen. Tot nu toe zijn reeds zo'n honderd pompstations wegens opkegeling gesloten, terwijl zo'n 20% van alle bestaande onttrekkingsvelden enige mate van verzilting ondervinden (Grakist *et al.*, 2002). Zo zijn in de jaren 1950 de zoete grondwatervoorraden in de zoetwaterlenzen in het Hollandse duingebied (DZH, Waternet, en PWN) flink afgenomen doordat er destijds grote hoeveelheden grondwater uit het eerste watervoerend pakket werd onttrokken (Stuyfzand, 1993). Eind jaren '50 was in het duingebied tussen Katwijk aan Zee en Zandvoort het onttrekkingsdebiet uit het eerste watervoerend pakket zo'n 18 miljoen m³, terwijl het debiet vanaf de jaren '60 flink is verminderd. Sindsdien is men overgeschakeld op kunstmatige infiltratie in het freatisch watervoerend pakket vanuit waterplassen. Grondwater werd vervolgens nauwelijks meer

onttrokken uit het eerste watervoerend pakket. Het omhooggekomen brakke en zout grondwater kan zich (zeer) langzaam maar zeker weer wegzakken.



Figuur 1: Vereenvoudiging van het regionale grondwatersysteem in het kustgebied: a. huidige situatie, inclusief grondwateronttrekkingen en b. toekomstige situatie, met de processen die mogelijke zullen optreden. Zoutwater intrusie vindt op regionale schaal plaats omdat het gemiddeld polderpeil enkele meters lager ligt dan het gemiddeld zeeniveau, terwijl op lokale schaal verzoeting kan optreden op de overgang van hooggelegen gebieden waar infiltratie plaatsvindt en laaggelegen droogmakerijen.

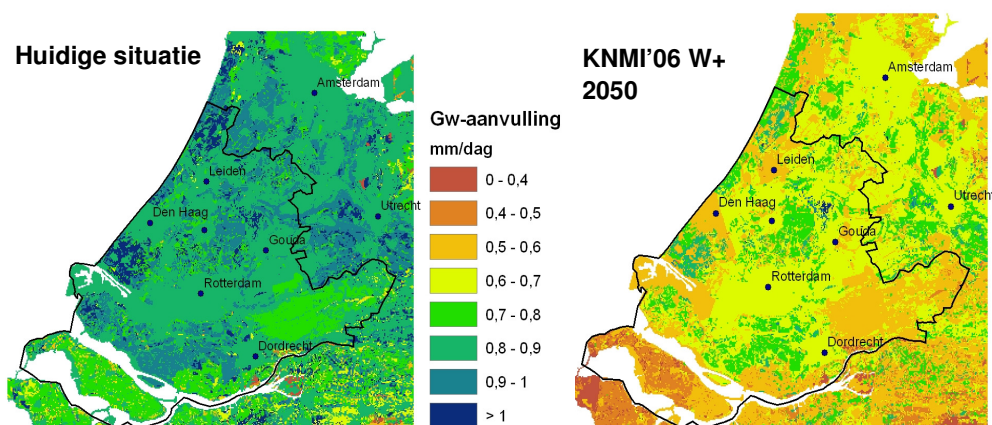


Figuur 2: Schets van de continue daling van het maaiveld en stijging van de zeespiegel gedurende de afgelopen 1000 jaar; lag 1000 jaar geleden het maaiveld nog gemiddeld 2.5 m boven het zeeniveau, momenteel ligt het land 2.5 m onder het zeeniveau (bron: G.P. van der Ven, 1993). Voor het jaar 2050 is op sommige locaties de voorspelde bodemdaling meer dan 60cm; de maximale zeespiegelstijging is 25 cm (G) of 35 cm (W), conform de KNMI'06 scenario's (van der Hurk, 2006).

1.2 Verzilting door Klimaatverandering

Een ander proces dat invloed zal hebben op het grondwater systeem is klimaatverandering. Klimaatverandering heeft via zowel veranderende grondwateraanvulling (neerslag en verdamping, voorbeeld Zuid-Holland zie Figuur 3) als indirect zeespiegelstijging invloed op de stijghoogten in de watervoerende pakketten van het grondwatersysteem.

In 2006 heeft het KNMI nieuwe klimaatscenario's opgesteld voor 2050 en 2100 (KNMI 2006). In deze scenario's wordt op basis van aannames over wereldwijde temperatuurstijging en luchtstromingspatronen een overzicht van verwachte veranderingen in weer gegeven. Deze veranderingen hebben betrekking op temperatuur, neerslag en wind gedifferentieerd naar winter en zomer, evenals verwachte zeespiegelstijging. De KNMI'06 scenario's zijn een vervolg op de WB21-scenario's. In deze scenario's vormde 1 graad temperatuurstijging tot 2050 (en 2 graden stijging in 2100) nog het middenscenario. In de KNMI'06-scenario's is 1 graad temperatuurstijging tot 2050 en 2 graden tot 2100 min of meer het lage scenario. In Tabel 1 staan de klimaatscenario's G, G+, W en W+ voor het jaar 2100.



Figuur 3: Grondwateraanvulling in mm/dag in de provincie Zuid-Holland voor a. de huidige situatie en b. KNMI klimaatscenario W+ in het jaar 2050.

Tabel 1: Klimaatscenario's rond 2100 voor Nederland ten opzichte van 1990 (KNMI, 2006).

2100		G	G+	W	W+
Wereldwijde temperatuurstijging in 2050		+1°C	+1°C	+2°C	+2°C
Wereldwijde temperatuurstijging in 2100		+2°C	+2°C	+4°C	+4°C
Verandering in luchtstromingspatronen in West Europa		nee	ja	nee	ja
Winter	gemiddelde temperatuur	+1,8°C	+2,3°C	+3,6°C	+4,6°C
	koudste winterdag per jaar	+2,1°C	+2,9°C	+4,2°C	+5,8°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+7%	+14%	+14%	+28%
	aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	0%	+2%	0%	+4%
	10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+8%	+12%	+16%	+24%
	hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	-1%	+4%	-2%	+8%
Zomer	gemiddelde temperatuur	+1,7°C	+2,8°C	+3,4°C	+5,6°C
	warmste zomerdag per jaar	+2,1°C	+3,8°C	+4,2°C	+7,6°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+6%	-19%	+12%	-38%
	aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	-3%	-19%	-6%	-38%
	dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+27%	+10%	+54%	+20%
	potentiële verdamping	+7%	+15%	+14%	+30%
Zeespiegel	absolute stijging	35-60 cm	35-60 cm	40-85 cm	40-85 cm

1.3 Chlorideconcentraties

Volgens de definitie van bijvoorbeeld Stuyfzand (1993) bevat zoet water minder dan 150 mg Cl/l; brak water ligt tussen 150 – 1000 mg Cl/l en zout water bevat meer dan 1000 mg Cl/l (klasse indeling van Stuyfzand 1993). In de provincie Zeeland, waar van nature het grondwater brak tot zout is, is de term *landbouwkundig zoet* geïntroduceerd, zijnde 1000 mg Cl/l als de grens tussen zoet en brak grondwater. De brak-zout grens wordt hier gedefinieerd als 3000 mg Cl/l.

In kustgebieden is chloride (Cl-) de dominante negatieve ion, waardoor de focus in numerieke modellen meestal ligt bij de chlorideverdeling. Indien alleen veranderingen in chloride verdeling worden gemodelleerd, wordt eigenlijk de verdeling van alle opgeloste stoffen bedoeld. Met andere woorden, de verdeling van de chlorideconcentratie is representatief voor de verdeling van alle opgeloste stoffen die ook in oceaan- of zeewater zitten. Hoge

chlorideconcentraties in het grondwater hangen dus samen met hoge natriumconcentraties van het grondwater, welke schadelijk kunnen zijn voor de groei van planten [10].

1.4 Overzicht

In deze rapportage worden de kaarten van de

1. chlorideconcentraties aan de onderkant van de deklaag;
2. kwel;
3. en zoutvrachten van het grondwater naar het oppervlaktewater

gepresenteerd voor de situatie zonder klimaatverandering (*de autonome situatie*) en de KNMI '06 klimaatscenario's *G*, *G+*, *W* en *W+* voor de jaren 2020, 2050 en 2100 ten opzichte van het jaar 2000. De kaarten zijn gemaakt met het zoet-zout grondwatermodel versie 1.3 welke een conceptversie is en in 2009 verbeterd zal worden. Bij deze toekomstige verbetering zal aansluiting plaatsvinden met het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (NHI) [3]. Bij de presentatie van de kaarten is voor een grove legenda gekozen welke rekening houdt met de nauwkeurigheid van de modelresultaten.

2 Aanpak

2.1 Inleiding

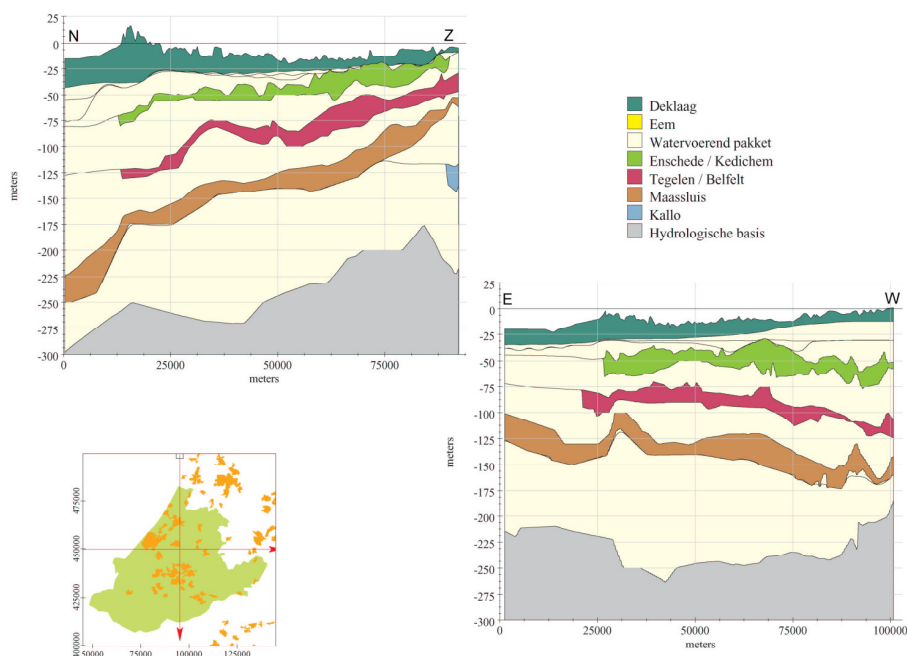
Het modelinstrumentarium ontwikkeld voor deze studie is een vervolg op twee eerdere studies die zijn uitgevoerd voor MNP in 2007 [1] en voor VROM in 2008 [2]. In de MNP studie [1] staat de invloedsfeer van de zeespiegelstijging centraal, waarvoor een landsdekkend grondwatermodel voor stroming en zouttransport ontwikkeld is op een schaal van $1 \times 1 \text{ km}^2$. Dit modelinstrumentarium is verbeterd voor de VROM studie [2], waarmee de zoetwatervoorraad van Nederland bepaald is. Een van de verbeteringen is het dynamische topsysteem met waterlopen, drainagesystemen en grondwateraanvulling.

Voor deze studie zijn de initiële chlorideconcentraties verbeterd, waarbij nieuwe metingen zijn gebruikt. Ook zijn de KNMI '06 klimaatscenario's (G, G+, W, W+) en het bodemdalingsscenario WB21 toegevoegd. Opgemerkt moet worden dat het gebruikte model met een schaal van $1 \times 1 \text{ km}^2$ een conceptversie is van het Nederlandse zoet-zout grondwatermodel dat op dit moment ontwikkeld wordt met een schaal van $250 \times 250 \text{ m}^2$ en verbeterde invoerparameters (zie hoofdstuk 7: Aanbevelingen en gebruik kaarten).

2.2 Geohydrologie

TNO/Deltares beschikt over een geohydrologische databank genaamd REGIS (Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem). De databank bevat gegevens over boorgatmetingen, boorbeschrijvingen, grondwaterstanden en grondwaterkwaliteit. Daarnaast is door Deltares hiervan ruimtelijke informatie afgeleid, zoals de laagopbouw van de ondergrond. Zodoende bevat REGIS het geologische en hydrogeologische ondergrondmodel van Nederland. De kartering geeft inzicht in de 3D verdeling van watervoerende pakketten (zandlagen) en slechtdoorlatende lagen (o.a. klei, veen en leemlagen). Daarnaast is voor elke laag een schatting van hydraulische doorlatendheden gegeven. Een voorbeeld is weergegeven in Figuur 4.

Voor de ondergrondschematisatie in de MNP studie [1] is gebruik gemaakt van REGIS versie I, waarbij voor het noorden van Groningen en de Friese Waddeneilanden nog niet voldoende gegevens beschikbaar waren. De resultaten van de Provincie Zeeland zijn van de landelijke kaart verwijderd. Op dit moment wordt door Deltares een nauwkeuriger model van $100 \times 100 \text{ m}^2$ in opdracht van de Provincie Zeeland gemaakt waarbij afgesproken is dat tussenresultaten (op een grovere schaal) niet openbaar beschikbaar zijn. In de loop van het jaar 2009 zijn de resultaten van het zoet-zout grondwatermodel van de Provincie Zeeland bekend.

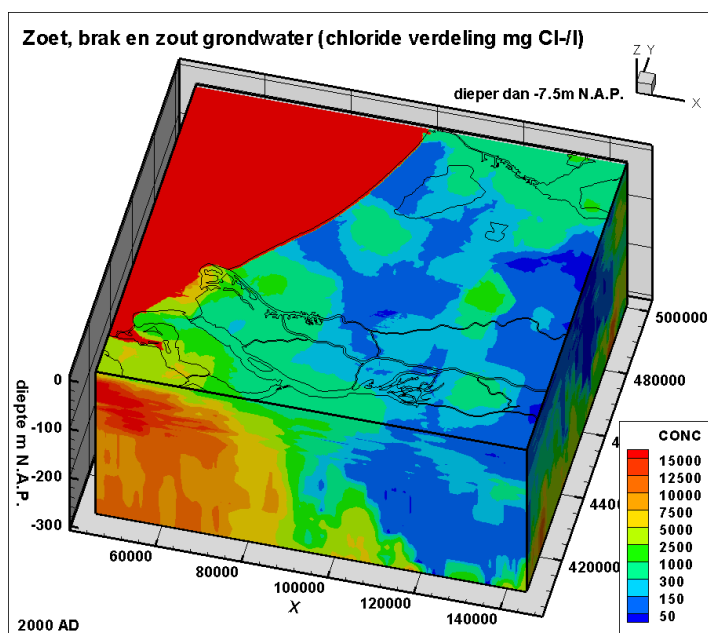


Figuur 4: Voorbeeld van de geohydrologische opbouw van de ondergrond in de provincie Zuid-Holland (REGIS).

2.3 Huidige zoet-zout verdeling grondwater

Voor de bepaling van de huidige zoetwatervoorraad is gebruik gemaakt van de uitgebreide databestanden die bij TNO in beheer zijn (DINO Qua; zoet-zout REGIS, Kloosterman, 2007, concept). Ruim 60.000 in aantal, gemeten vanaf 1853. Slechts ongeveer 10% van de metingen ligt dieper dan -70m N.A.P., terwijl ongeveer 30% van de metingen brak of zout grondwater betreft (juist deze waarden zijn waardevol voor de bepaling van de zoet, brak en zout verdeling in Nederland). De chloride concentraties zijn gebaseerd op analyses, VES en boorgatmetingen.

Aan de hand van deze puntenwolk is een continue 3D veld van chloride concentraties van het grondwater gecreëerd (voor een voorbeeld van de verdeling in de provincie Zuid-Holland zie Figuur 5). De totale hoeveelheid zoet grondwater (<300 mg Cl-/l) in Nederland bedraagt iets meer dan 1100 miljard m³, terwijl tot 1000 mg Cl-/l ongeveer 1475 miljard m³ grondwater aanwezig is. Hiervan bevindt zich zeer weinig in Zeeland tot weinig in Zuid-Holland (~10 miljard m³). De oostelijke provincie en vooral Noord-Brabant bezitten het meeste zoete grondwater. De huidige grote voorraad laat zich verklaren door het proces 'tijd'. Over zeer lange tijd (duizenden tot tienduizenden jaar) is het mogelijk geweest voor zoet grondwater om te infiltreren.



Figuur 5: Initiële chlorideverdeling in mg Cl/l voor de provincie Zuid-Holland waarbij gebruik is gemaakt van alle typen metingen (analyses, VES en BGM).

2.4 Klimaatscenario's

De veranderingen in neerslag- en verdampingspatronen, die ingrijpen in het bovenste deel van het grondwatersysteem, zijn voor de modelberekeningen over het jaar gemiddeld. De zeespiegelstijging neemt lineair toe in stapjes van 1 jaar tot het jaar 2100. Voor deze studie worden de resultaten van de KNMI'06 klimaatscenario's G, G+, W en W+ weergegeven.

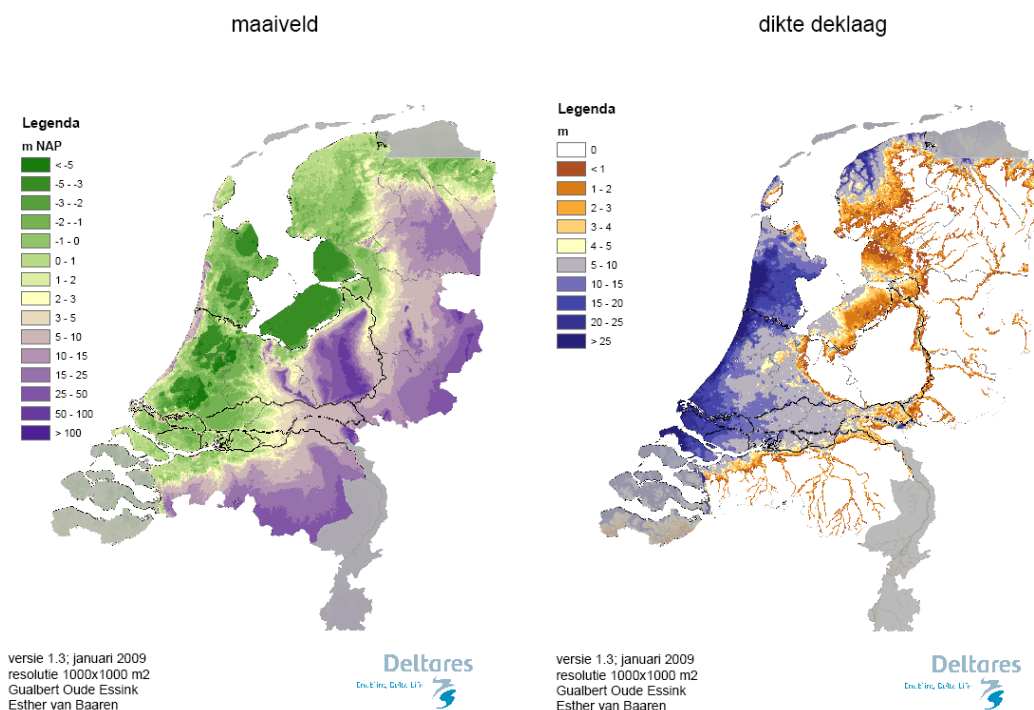
2.5 Numeriek model

De softwarecode die gebruikt wordt voor dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld stoftransport is MOCDENS3D (Oude Essink, 1998, 2000; Vugt *et al.*, 2003). Met dit numerieke modelinstrumentarium wordt de snelheid van verplaatsing van zoet-brak-zout grondwater bepaald. Meer informatie kan gevonden worden in bijlage A.

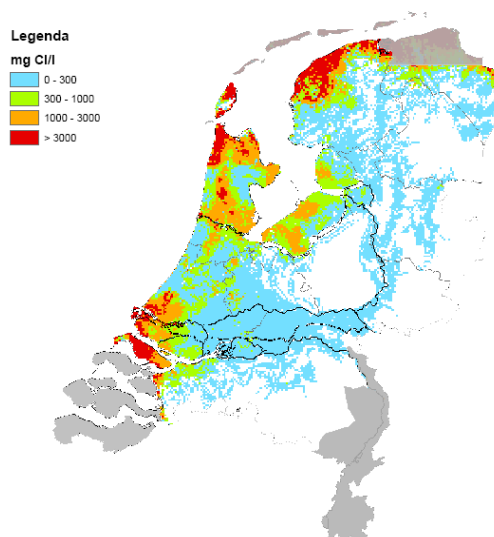
Het zoet-zout grondwatermodel versie 1.3 heeft 280 kolommen, 325 rijen en 31 modellagen. De cellen zijn $1 \times 1 \text{ km}^2$, de bovenkant van het model ligt op 10 m+NAP en de onderkant op 280 m-NAP. Het model heeft een dynamisch topsysteem met waterlopen, drainagesystemen en grondwateraanvulling. De modelresultaten zijn weergegeven tot het jaar 2100.

3 Verzilting grondwater

Verzilting van het grondwater wordt bepaald door de chlorideconcentraties aan de onderkant van de deklaag te berekenen (maaiveld zie Figuur 6a; dikte deklaag zie Figuur 6b). Het gebruikte modelinstrumentarium MOCDENS3D is slechts geschikt om de verzadigde zone te modelleren. Enkele modelresultaten van de chlorideconcentratie aan de onderkant van de deklaag staan in Figuur 7 en Figuur 8. Op dit moment is het grondwater in enkele kustgebieden (sommige locaties in kop van Noord-Holland, Zuid-Holland, Friesland, Groningen en Zeeland) zout (> 3000 mg Cl/l). In deze kustgebieden en in enkele laaggelegen polders zal het grondwater over het algemeen verder verzilt. De verschillen tussen het autonome model en de modellen met de klimaatscenario's zijn klein; voor regionale verzilting is het autonome proces dominant ten opzichte van klimaatverandering. Voor lokale processen geldt dit niet; zo kan verandering in neerslag grote invloed hebben op de ontwikkeling van regenwaterlenzen (zie [6, 7 of 8] voor meer informatie over deze lokale processen).

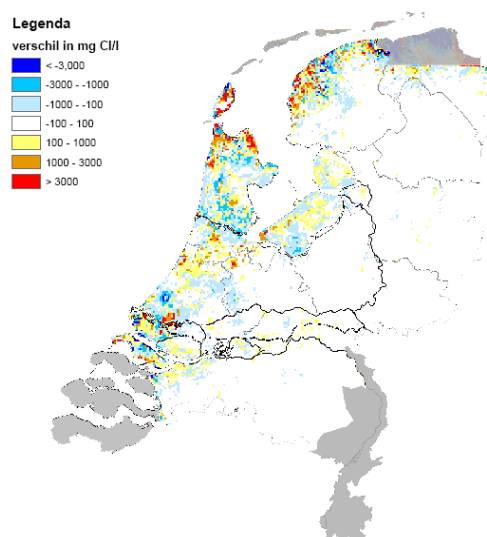


Figuur 6: a. maaiveld in m NAP en b. dikte van de deklaag in m.

Chlorideconcentratie onderkant deklaag
situatie in het jaar 2000

versie 1.3; januari 2009
resolutie 1000x1000 m2
Gualbert Oude Essink
Esther van Baaren

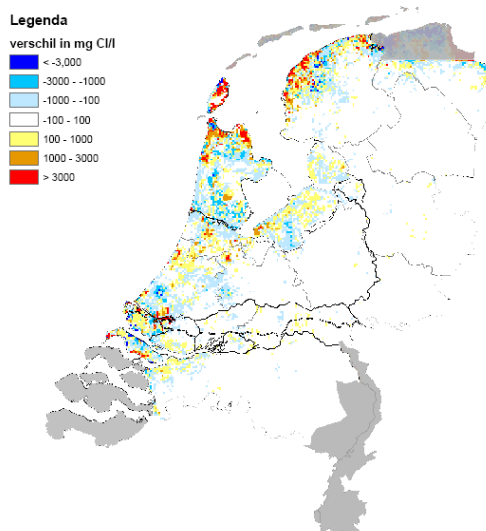
Deltares
Facing Data Life

Verschil chlorideconcentratie onderkant deklaag:
ref 2100 tov 2000

versie 1.3; januari 2009
resolutie 1000x1000 m2
Gualbert Oude Essink
Esther van Baaren

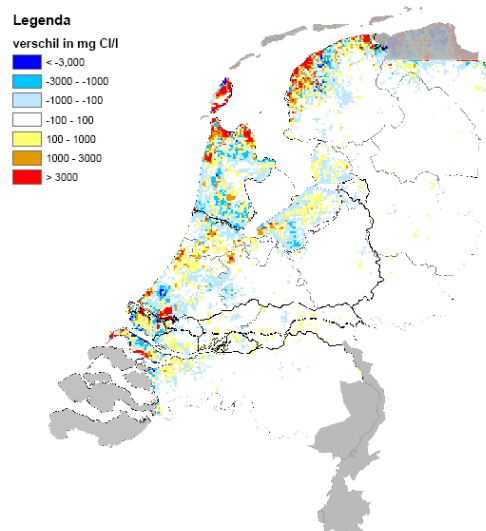
Deltares
Facing Data Life

Figuur 7: a. referentiecasse: chlorideconcentratie in mg Cl/l onderkant deklaag, situatie in het jaar 2000 en
b. verschil chlorideconcentratie onderkant deklaag: autonoom 2100 – referentiecasse (situatie 2000).

Verschil chlorideconcentratie onderkant deklaag:
W 2050 tov 2000

versie 1.3; januari 2009
resolutie 1000x1000 m2
Gualbert Oude Essink
Esther van Baaren

Deltares
Facing Data Life

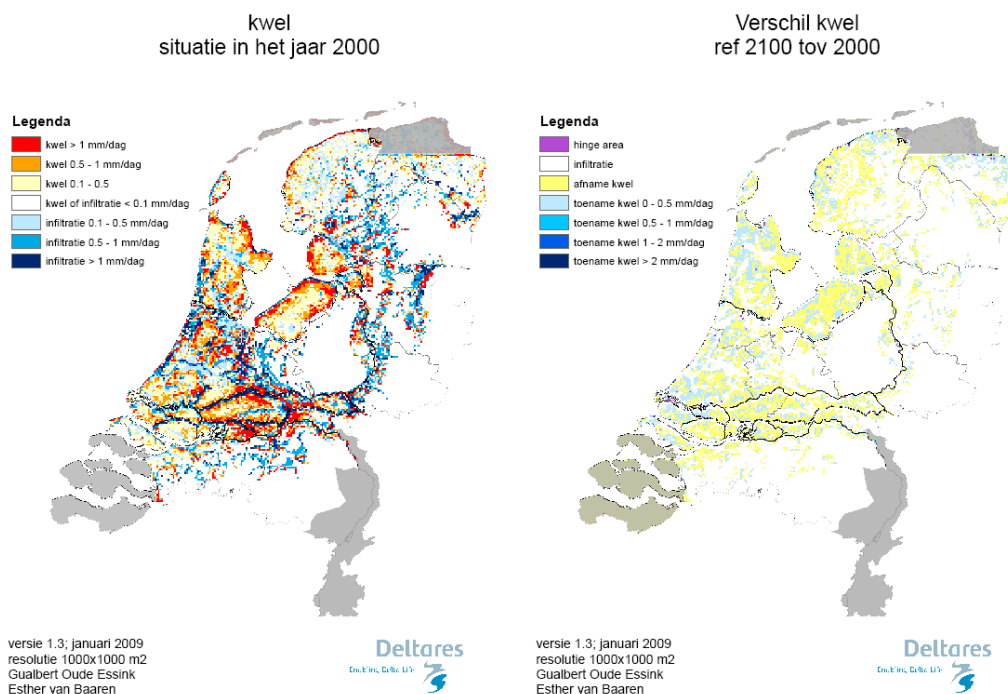
Verschil chlorideconcentratie onderkant deklaag:
W 2100 tov 2000

versie 1.3; januari 2009
resolutie 1000x1000 m2
Gualbert Oude Essink
Esther van Baaren

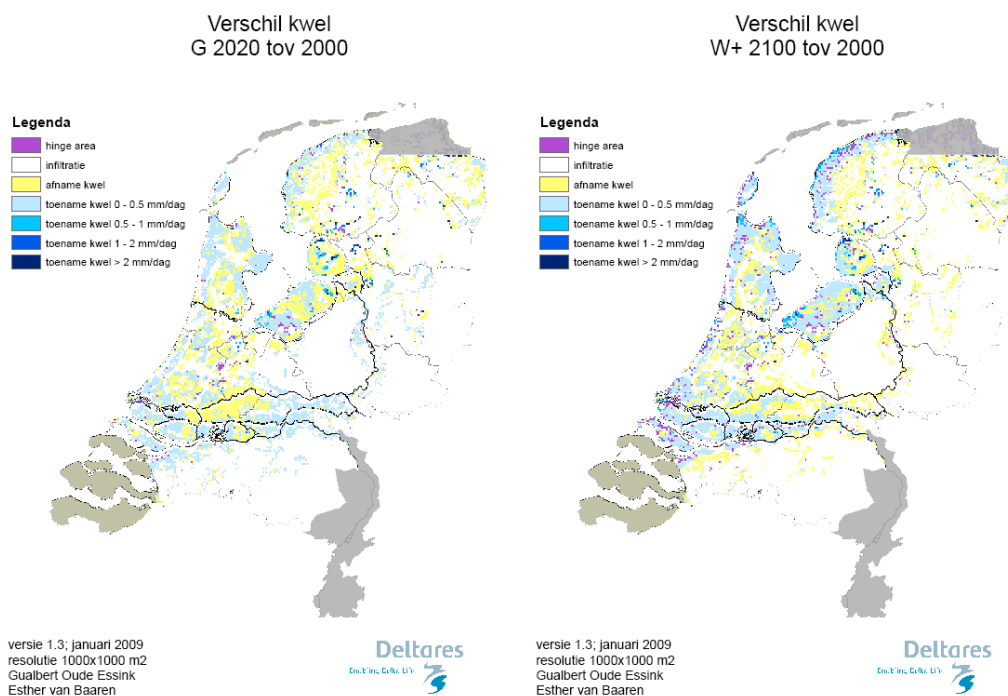
Deltares
Facing Data Life

Figuur 8: Verschil chlorideconcentratie onderkant deklaag: a. klimaatscenario W 2050 – referentiecasse (situatie 2000) en b. klimaatscenario W 2100 – referentiecasse.

4 Kwel



Figuur 9: a. kwel huidige situatie en b. verschil in kwel tussen autonoom 2100 en 2000.

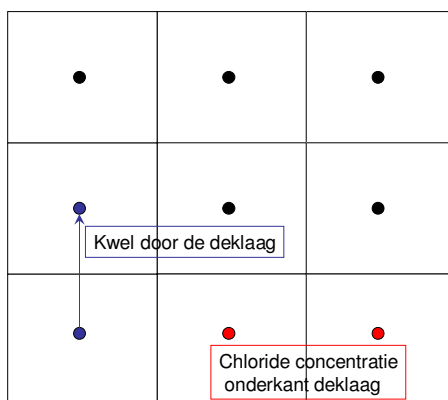


Figuur 10: Verschil in kwel tussen a. G 2020 en autonoom 2000 en b. W+2100 en autonoom 2000.

5 Zoutvrachten

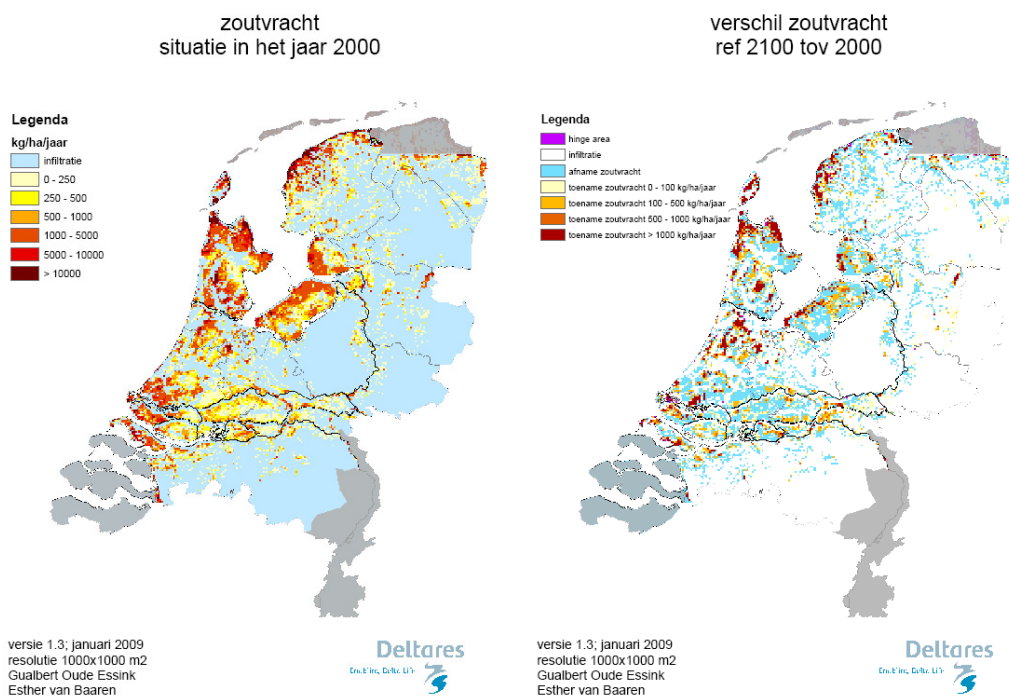
Een zoutvracht is hier gedefinieerd als de chlorideconcentratie van het grondwater aan de onderkant van de deklaag vermenigvuldigd met de flux die door de deklaag richting het oppervlaktewater en de wortelzone stroomt (Figuur 11). Van deze zoutvracht, weergegeven in kg/ha/jaar, gaat het grootste gedeelte richting het oppervlaktewater, slechts een klein deel zal uiteindelijk in de wortelzone worden opgenomen.

$$\text{Zoutvracht} = \text{kwel} \times \text{chloride concentratie}$$

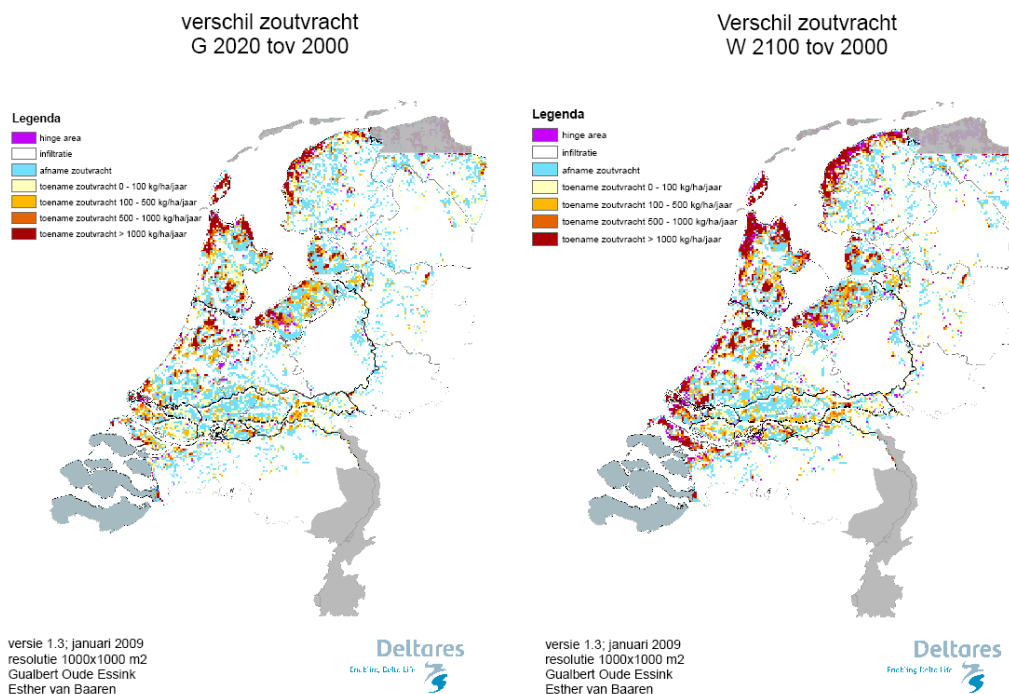


Figuur11: Definitie van de zoutvracht.

De zoutvracht in de huidige situatie is weergegeven in Figuur 12a. De rode gebieden duiden op hoge zoutvrachten, de lichtblauwe gebieden zijn infiltratiegebieden. De veranderingen door autonome processen zijn weergegeven in Figuur 12b. Door klimaatverandering nemen de zoutvrachten in kustgebieden toe; door de zeespiegelstijging zal de stijghoogte in het kustgebied toenemen waardoor de hoeveelheid kwel toeneemt (Figuur 13). Hier geldt: hoe groter de zeespiegelstijging hoe groter de toename in kwel en dus de zoutvracht naar het oppervlaktewater. De invloed van de zeespiegelstijging is echter maximaal 10-15 km vanaf de kustlijn [11].



Figuur 12: a. zoutvracht huidige situatie en b. verschil zoutvracht autonoom 2100 – 2000.



Figuur 13: Verschil in zoutvracht tussen a. G 2020 en 2000 en b. W 2100 en 2000.

6 Conclusies

Voor deze studie is het 3D zoet-zout grondwater model ontwikkeld voor MNP [1] en VROM [2] gebruikt nadat de initiële chlorideconcentratie is verbeterd. Voor dit onderzoek zijn met behulp van het ontwikkelde modelinstrumentarium kaarten gemaakt voor de veranderingen in chlorideconcentraties aan de onderkant van de deklaag, in kwel en in zoutvracht voor de autonome case zonder klimaatverandering en de KNMI '06 klimaatscenario's G, G+, W en W+ voor de jaren 2020, 2050 en 2100. Alle kaarten voor chlorideconcentratie onderkant deklaag en zoutvracht staan in de bijlage.

In sommige kustgebieden en polders in Zeeland, Zuid-Holland, Noord-Holland, Flevoland, Friesland en Groningen is al sprake van zout grondwater (>3000 mg Cl/l) aan de onderkant van de deklaag. Enkele van deze gebieden zullen in de toekomst over het algemeen verder verzilt door met name autonome processen. De invloed van klimaatverandering op de chlorideconcentratie aan de onderkant van de deklaag is voor regionale systemen klein.

De zoutvrachten zullen in deze zelfde gebieden toenemen door autonome processen, daar waar de chlorideconcentratie door autonome processen toeneemt. Zeespiegelstijging zal tot enkele kilometers vanaf de kust zorgen voor een verhoging van de stijghoogte waardoor de kwel zal toenemen en daarmee de zoutvracht. Meer dan 10-15 kilometer landinwaarts zal het effect van de zeespiegelstijging verdwenen zijn; in het rivierengebied is het effect wel iets groter.

Opgemerkt moet worden dat klimaatverandering lokaal grote gevolgen kan hebben op de zoetwatervoorraad in met name het topsysteem. In polders zal een afname van de hoeveelheid grondwateraanvulling (bv droge zomers) voor het kleiner worden van de regenwaterlenzen en daarmee verzilting van de wortelzone kunnen zorgen. Dit valt echter buiten deze studie, voor meer informatie wordt verwezen naar [6, 7, 8].

7 Aanbevelingen en gebruik kaarten

Het gebruikte model is een conceptversie van het Nederlandse zoet-zout grondwatermodel met een schaal van $1 \times 1 \text{ km}^2$. In 2009 wordt dit modelinstrumentarium verder ontwikkeld waarbij aansluiting zal plaatsvinden met het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (NHI), met een schaal van $250 \times 250 \text{ m}^2$. Enkele aanbevelingen ten opzichte van het voor deze studie gebruikte model zijn:

1. Gebruik resolutie $250 \times 250 \text{ m}^2$ in plaats van $1 \times 1 \text{ km}^2$.
2. Verbetering initieel 3D chloride concentratie veld van het grondwater op basis van de nieuwste metingen en door gebruik van verbeterde technieken.
3. Verbetering grondwateraanvulling (per seizoen of maand: i.s.m. KNMI)
4. Gebruik weerstanden en eigenschappen drainage en waterlopen conform NHI [3].
5. Gebruik van de nieuwste versie van REGIS (schematisatie van de ondergrond) [4].
6. Verbetering geologie topsysteem
7. Koppeling grondwater-oppevlaktewater zoet-zout
8. IJking stijghoogte en zoutvrachten deelgebieden
9. Neerschaling landelijk > regionaal > lokaal (regenwaterlens, wortelzone)

Door de schaal van $1 \times 1 \text{ km}^2$ van dit model kunnen de modelresultaten slechts gebruikt worden voor regionale veranderingen in zoutconcentraties, kwel en zoutvrachten. Lokale geohydrologische processen zoals dynamische regenwaterlenzen in het topsysteem, of de toestroming van grondwater en zout naar het oppervlaktewatersysteem ter plaatse van zandbanen en wellen kunnen niet meegenomen worden.

8 Referenties

- [1] Kwadijk, J., Vuren, van, S. Verhoeven, G., Oude Essink, G., Snepvangers, J. & Calle, E. 2007, Gevolgen van grote zeespiegelstijging op de Nederlandse zoetwaterhuishouding, i.o.v. Milieu en Natuurplan Bureau, Deltares-rapport, Q4394, 73 p.
- [2] Stuurman, R., Baggelaar, P., Berendrecht, W., Buma, J., Louw, P., de, Oude Essink, G., 2008, Toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering, Deltares rapport, i.o.v VROM, 2008-U-R0074/B, 85 p.
- [3] 2008, Nationaal Hydrologisch Instrumentarium – NHI, Modelrapportage hoofdrapport zie www.nhi.nu
- [4] zie <http://www.dinoloket.nl/>
- [5] Kloosterman, F. (2007), Kartering zoet/brak/zout verdeling Nederland; Beschrijving van de ZZ-REGIS software suite. Concept TNO-rapport.
- [6] Louw, P.G.M. de & Oude Essink, G.H.P., 2005, Verzilting grondwatersysteem Wetterskip Fryslan, i.s.m. Arcadis, TNO-rapport 2006-U-R0152/A, 29p.
- [7] Oude Essink, G.H.P., Stevens, S., de Veen, B., de Prevo, C., Marconi, V., Goes, B. & de Louw, P., 2007, Meetcampagne naar het voorkomen van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland, 2007-U-R0925/A, 127p.
- [8] Louw, P.G.M., de, Oude Essink, G.H.P., Maljaars, P., Achtergrondstudie kwelreductietechnieken, TNO rapport 2007-U-R0357/B.
- [9] Oude Essink, G.H.P., Baaren, E., van & Vliet, M. van, 2008, Verkennende studie klimaatverandering en verzilting grondwater in Zuid-Holland, Deltares-rapport 2008-U-R0322/A.
- [10] Oude Essink, G.H.P., 2001, Density Dependent Groundwater Flow, Utrecht University.
- [11] Oude Essink, G.H.P., 2007, Effect zeespiegelstijging op het grondwatersysteem in het kustgebied, H2O, nr 19, 60-64.

A Korte beschrijving MOCDENS3D

MOCDENS3D

De softwarecode die gebruikt wordt voor dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld stoftransport is MOCDENS3D (Oude Essink, 1998, 2000; Vugt *et al.*, 2003). De code is gebaseerd op de volgende twee codes, die volledig geïntegreerd zijn: 1. MODFLOW (McDonald en Harbaugh, 1988) aangepast voor dichtheidafhankelijke grondwaterstroming, en 2. MOC3D (Konikow *et al.*, 1996) voor de verplaatsing van zoet, brak en zout grondwater. De code is een samenvoeging van state-of-the-art software op het gebied van zowel grondwaterstroming als stoftransport. Met MOCDENS3D is het mogelijk niet-stationaire stroming van zoet, brak en zout grondwater te modelleren. Deze code bestaat uit een module voor grondwater en een module voor stoftransport die aan elkaar gekoppeld zijn. Voorafgaand is MOCDENS3D toegepast in een flink aantal zoet-zout studies in Nederland, zoals Project Groot Geohydrologisch Onderzoek Texel (in samenwerking met Witteveen+Bos, 2000), Project Het Zout der Aarde (verziltiononderzoek Hoogheemraadschap van Rijnland, in samenwerking met KiWA, 2005); bij de bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland (Minnema *et al.*, 2004); de effectenberekening van Bodemdaling in Barradeel II, Friesland (Wetterskip Fryslân, 2005); bij de bepaling van de effecten van de Hoofdwegverbinding A6-A9 op zoet-zout grondwater nabij het Naardermeer (Oude Essink *et al.*, 2006); bij de bepaling van de effecten van zomerbedverdieping van het stuwpand Sambeek op de drinkwaterwinning (Oude Essink, G.H.P. & Kleine, M., 2006); en bij de bepaling van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering, (Stuurman, R. *et al.*, concept, 2007).

Dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming

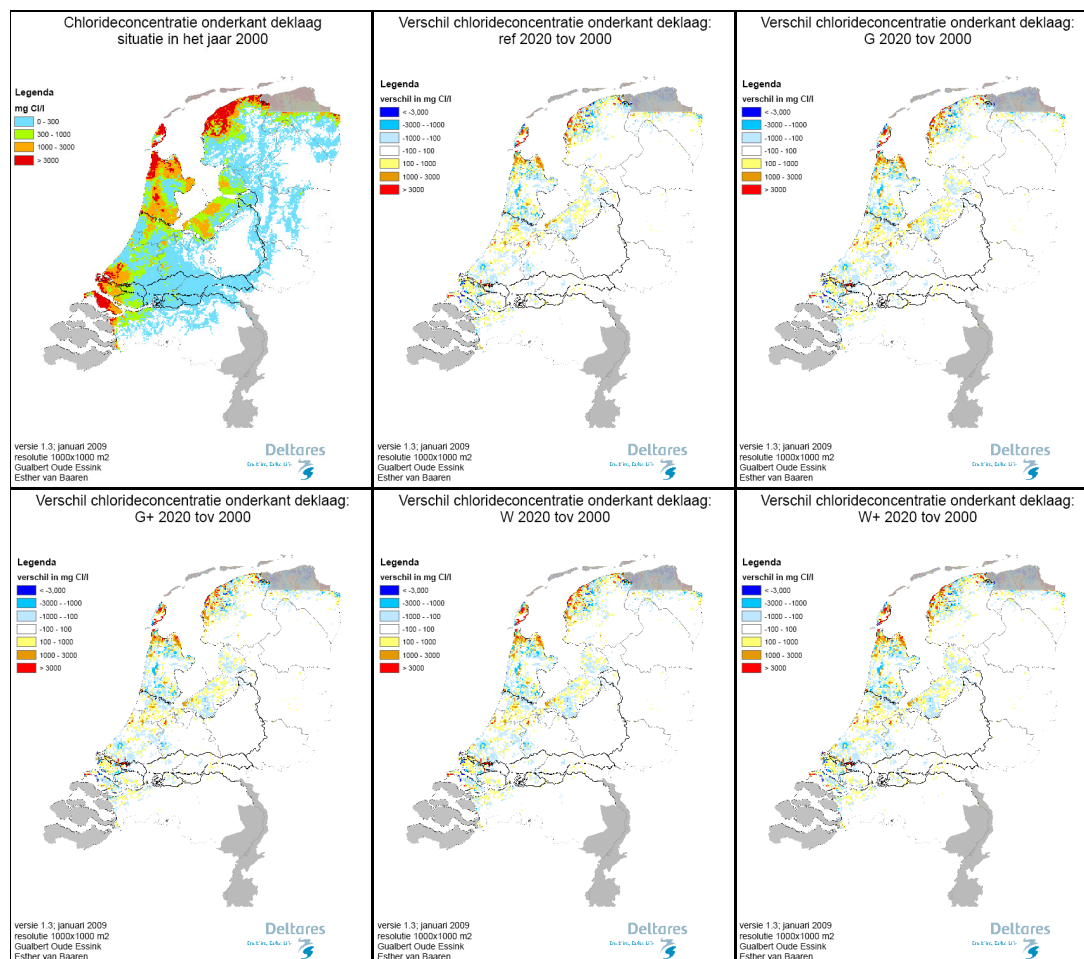
In het grondwatersysteem van de Nederlandse kust is de dichtheidsverdeling in de kustzone zodanig dat er rekening moet worden gehouden met het effect van dichtheidverschillen op de grondwaterstroming. Omdat zout grondwater zwaarder is dan zoet (of brak) grondwater, beïnvloedt het de stroming van water in de ondergrond. Zo kan zout grondwater in een natuurlijk hydrogeologisch systeem (dus zonder externe spanningen als onttrekkingen of peilverlagingen) door drukverschillen zoet grondwater wegdrücken (de welbekende zoutwaterintrusie in watervoerende pakketten). Aan de andere kant kan zoet grondwater, doordat het lichter is, juist op het zoute grondwater blijven drijven en in grote mate een min of meer geïsoleerd grondwatersysteem in stand houden. Zo drijft in het Nederlandse duingebied zoet grondwater (dichtheid van 1000 kg/m³) op zout grondwater (dichtheid van ongeveer 1022 kg/m³), in de vorm van een zoetwaterlens.

Correcties naar zoetwaterstijghoogte

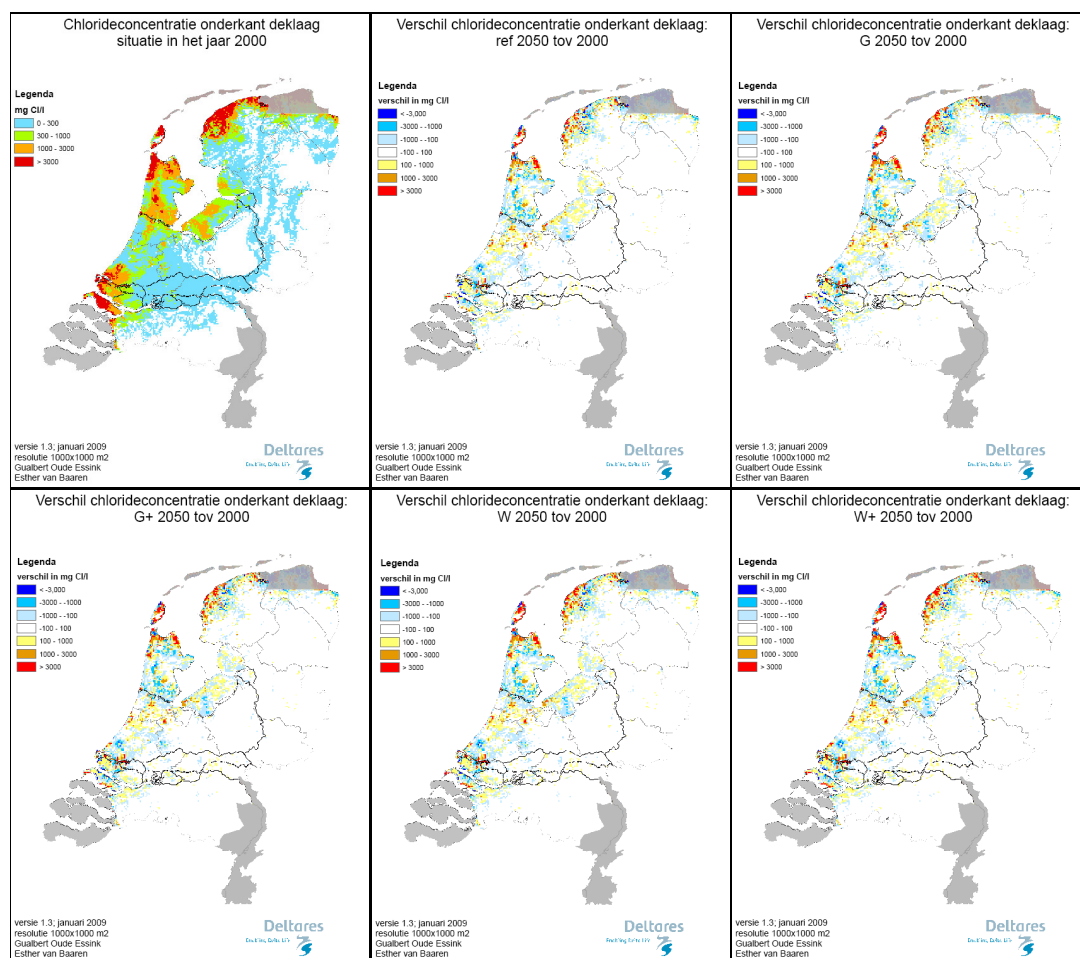
Terwijl onder normale omstandigheden (d.w.z. met een dichtheid van zoet grondwater) gewerkt kan worden met 'gewone' stijghoogten, moet je in een situatie met zoet, brak en zout grondwater alles omrekenen naar drukken. Opgeloste stoffen in het grondwater verhogen namelijk de druk. De meeste hydro(geo)logen vinden het werken met stijghoogte echter prettiger. Daarom worden alle gemeten stijghoogten waar het grondwater niet zoet is gecorrigeerd voor de dichtheid. Om dit aspect mee te nemen moet de stijghoogte worden omgerekend naar een zogenaamde equivalente *zoetwaterstijghoogte*. De zoetwaterstijghoogte is eigenlijk een fictieve parameter zonder fysische betekenis. De fysische interpretatie van zoetwaterstijghoogten patronen is niet gemakkelijk. Zo staan zoetwaterstijghoogten niet meer loodrecht op stroomlijnen als de dichtheid varieert, en betekent een gradiënt in zoetwaterstijghoogte niet automatisch dat er stroming van

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

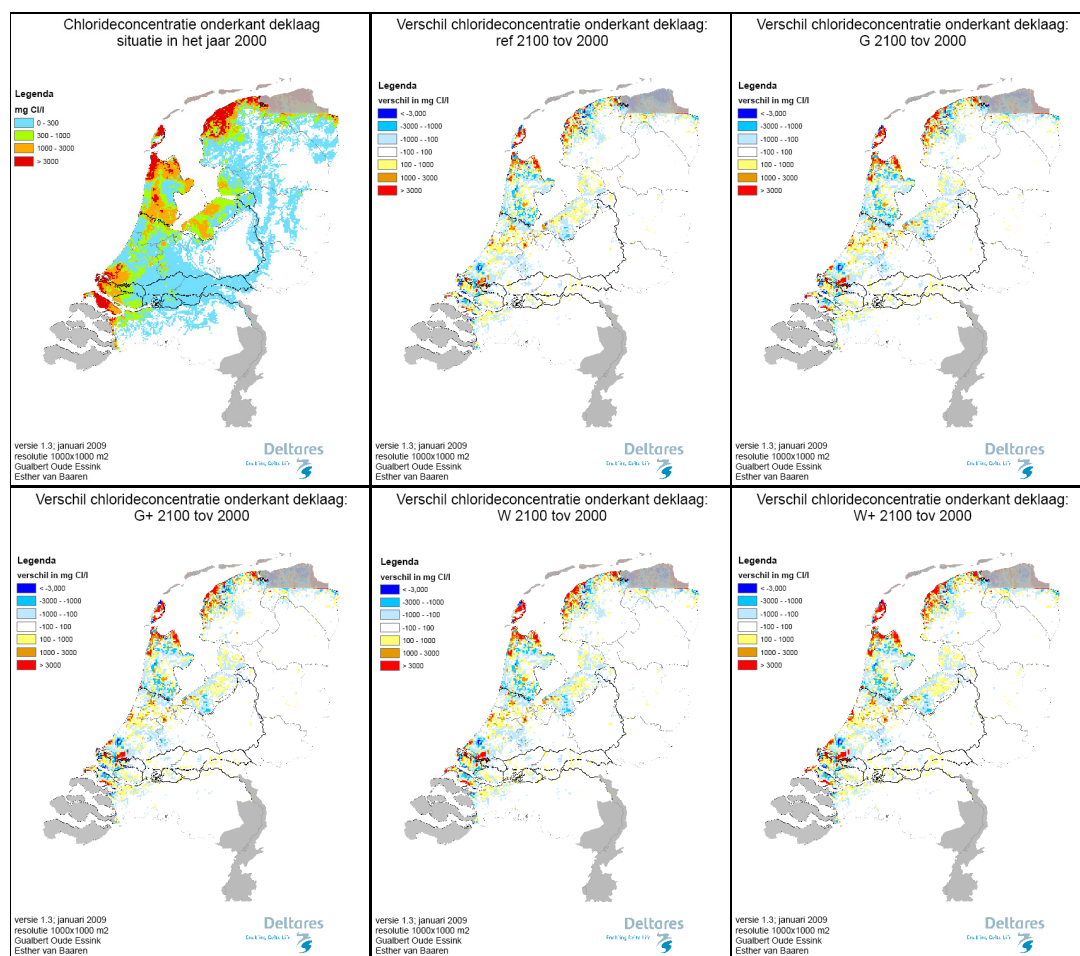
B Chlorideconcentratie onderkant deklaag



Figuur 14: Chlorideconcentratie onderkant deklaag a. huidige situatie (2000), b t/m f: verschil autonoom 2020 t.o.v. 2000, G, G+, W, W+.

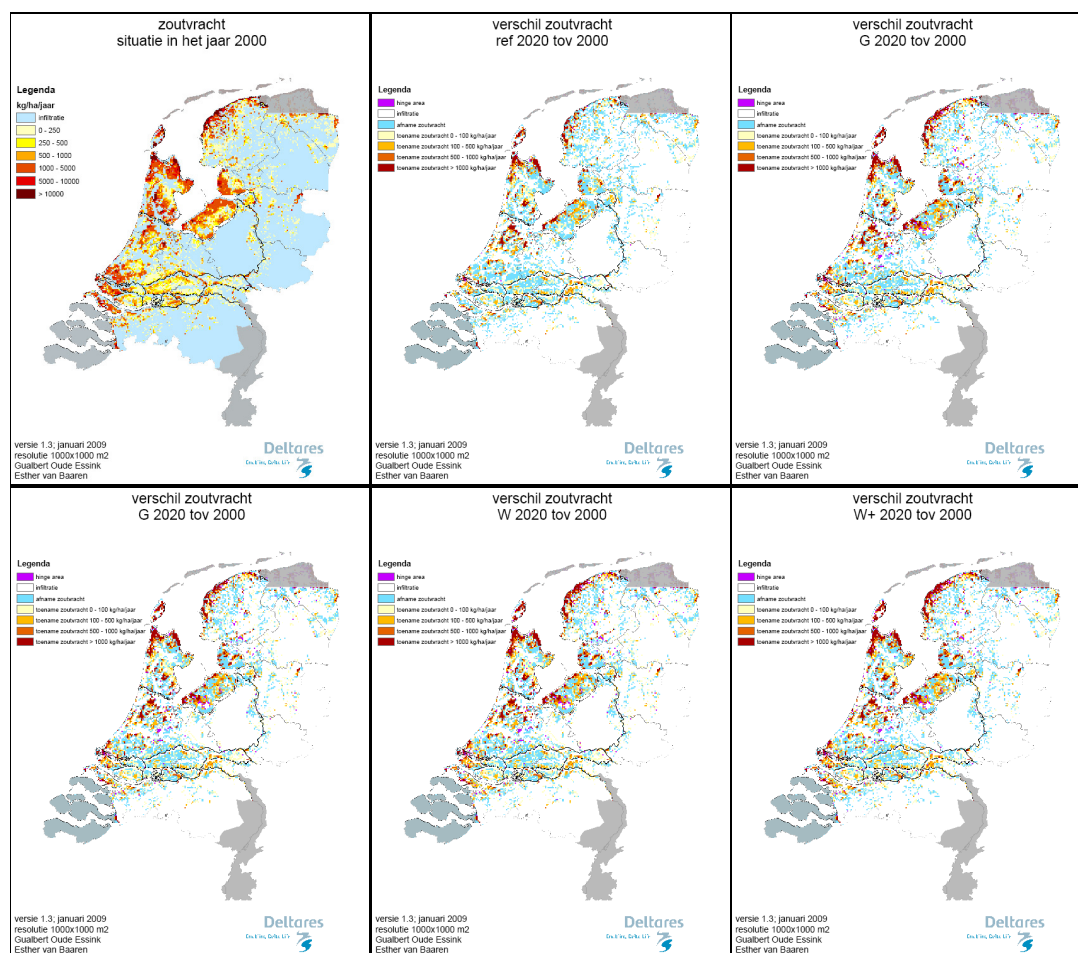


Figuur 15: Chlorideconcentratie onderkant deklaag a. huidige situatie (2000), b t/m f: verschil autonoom 2050 t.o.v. 2000, G, G+, W, W+.

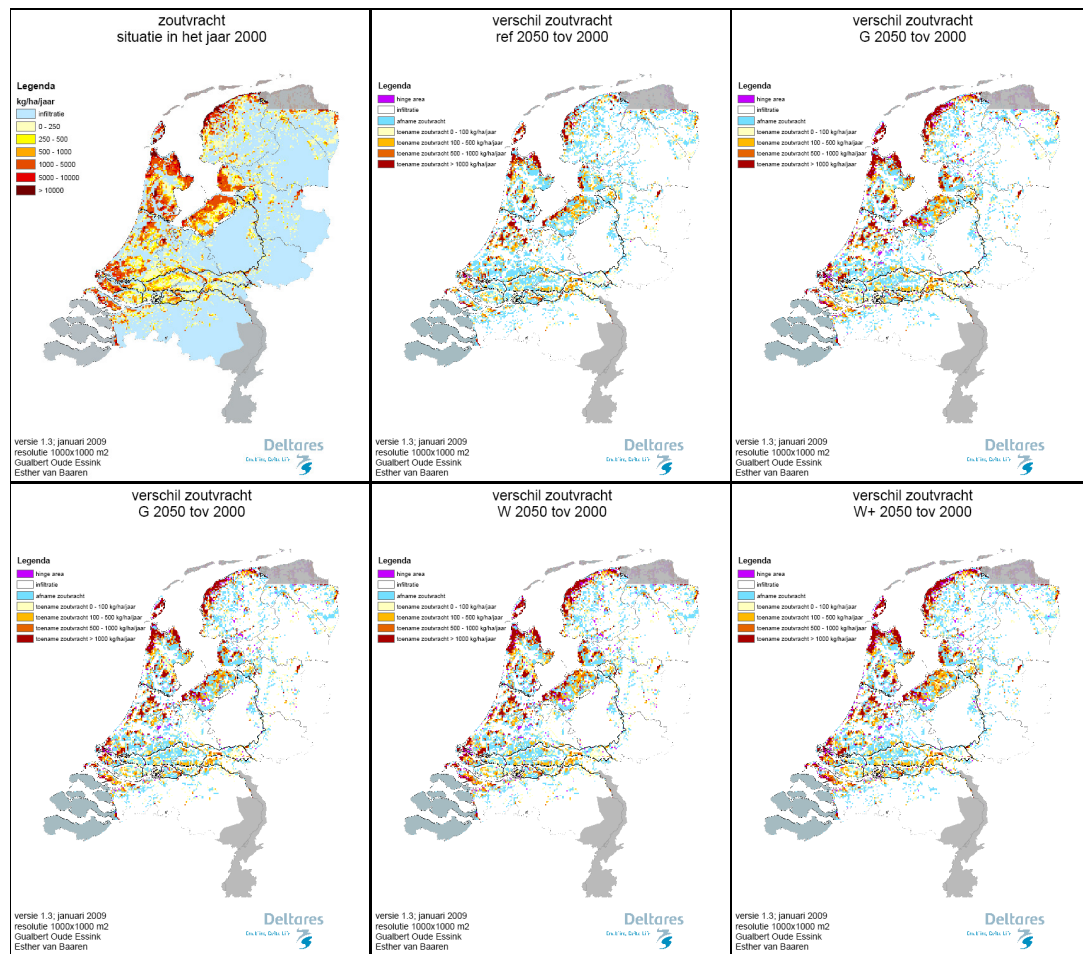


Figuur 16: Chlorideconcentratie onderkant deklaag a. huidige situatie (2000), b t/m f: verschil autonoom 2100 t.o.v. 2000, G, G+, W, W+.

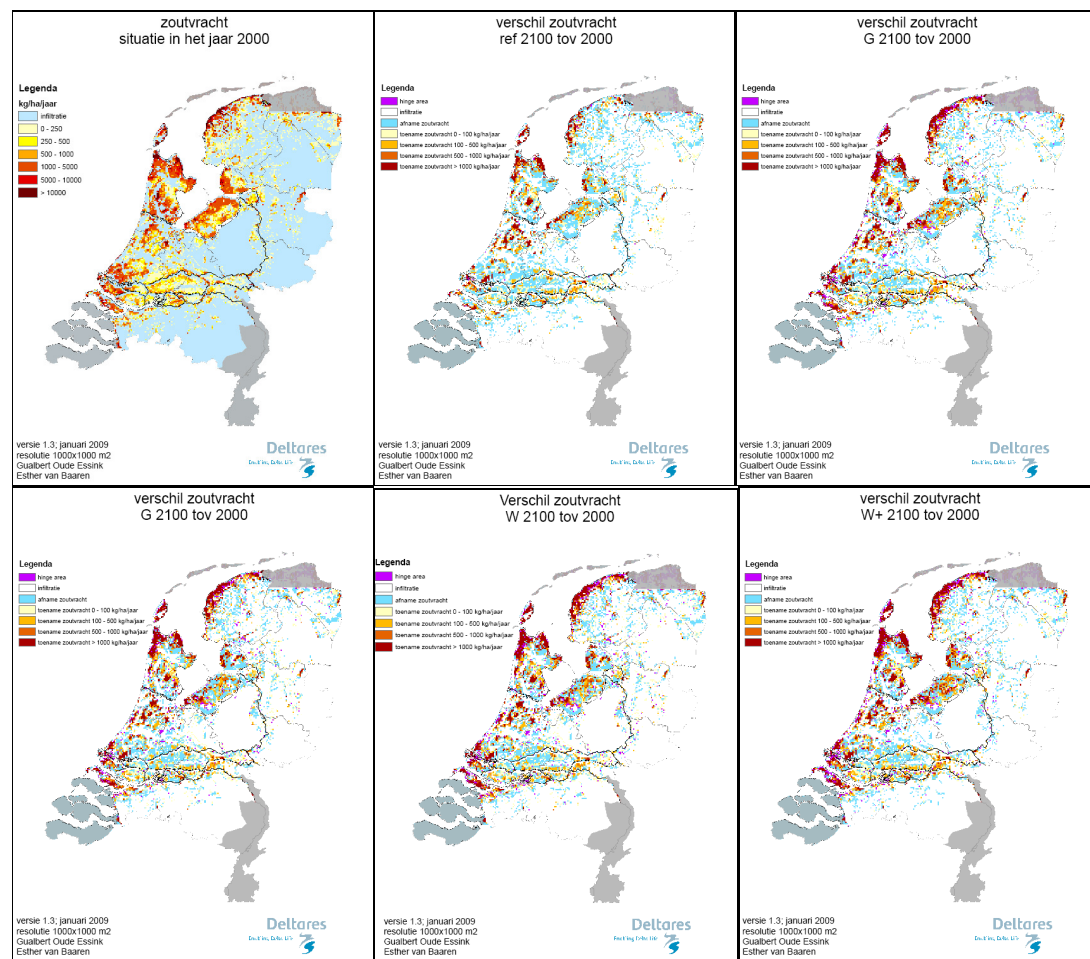
C Zoutvrachten



Figuur 17: Zoutvrachten van het grondwater naar het oppervlaktewater a. huidige situatie (2000), b t/m f: verschil autonoom 2020 t.o.v. 2000, G, G+, W, W+.



Figuur 18: Zoutvrachten van het grondwater naar het oppervlaktewater a. huidige situatie (2000), b t/m f: verschil autonoom 2050 t.o.v. 2000, G, G+, W, W+.



Figuur 19: Zoutvrachten van het grondwater naar het oppervlaktewater a. huidige situatie (2000), b t/m f: verschil autonoom 2100 t.o.v. 2000, G, G+, W, W+.