

Memo

Aan
Marco Hoogvliet

Datum	Kenmerk	Aantal pagina's
30 januari 2009		14
Van	Doorkiesnummer	E-mail
Esther van Baaren	+31 (30) 25 64 743	Esther.vanBaaren@deltares.nl
Gualbert Oude Essink	+31 (30) 25 64 761	Gualbert.Oudeessink@deltares.nl
Perry de Louw	+31 (30) 25 6 48 06	Perry.deLouw@deltares.nl

Onderwerp
Kwetsbaarheid regenwaterlenzen in landbouwgebieden voor klimaatverandering en zeespiegelstijging

1 Inleiding

In [6] wordt onderscheid gemaakt tussen twee typen zoetwaterlenzen: 1. zoetwaterlenzen op zout grondwater zonder duidelijk kwelcomponent (bv bij duinen en kreekruigen) en 2. zoetwaterlenzen op zout grondwater met duidelijk kwelcomponent. Het tweede type zoetwaterlens, de zogenaamde regenwaterlens¹, is sterker afhankelijk van externe veranderingen en wordt in dit document besproken. Binnen dit tweede type zoetwaterlens wordt weer onderscheid gemaakt tussen zoetwaterlenzen in relatief oude transgressiegebieden en zoetwaterlenzen in recente transgressiegebieden². Zoetwaterlenzen in relatief oude transgressiegebieden komen vooral voor in de diepe polders van west Nederland en de Flevopolders. Verzilting van de wortelzone speelt hier op dit moment geen rol: de brak-zout³ grens ligt diep (15-75 m -mv). Bij zoetwaterlenzen in recente transgressiegebieden komt wel zout water voor op geringe diepte. Dit type komt vooral voor op de Zeeuwse en Zuid-Hollandse eilanden, het noorden van Friesland en Groningen en de polders op enkele Waddeneilanden.

De regenwaterlenzen zijn van belang voor terrestrische natuur en landbouwgewassen. Een te hoge zoutconcentratie in de wortelzone kan leiden tot zoutschade. Op dit moment zorgen, over het algemeen, de regenwatersystemen op perceelsniveau voor een goede zoetwatervoorziening. De mate waarin zout grondwater de wortelzone van landbouwgebied bereikt, hangt onder meer af van de aanvoer van zoet water in de bovenste bodemlaag. Momenteel lijken over het algemeen landbouwgewassen redelijk resistent te zijn tegen een verhoogde zoutconcentratie in de wortelzone [2]. De vraag is of in geval van klimaatverandering (bijv. drogere zomers) en zeespiegelstijging (toename stijghoogte en zoute kwel) het watersysteem zodanig onder druk wordt gezet dat de zoete grondwatervoorraad op perceelsniveau en de regionale zoetwatervoorziening in het algemeen in gevaar komt. Lopend onderzoek (in Zeeland) toont aan dat een relatief kleine toename in zoute kwel de zoetwatervoorraad op perceelsniveau significant zou kunnen minderen.

¹ Een regenwaterlens is een zone in de bovenste laag van de verzadigde zone waarin alleen water aanwezig is dat afkomstig is uit neerslag. De neerslaglens wordt aan de bovenkant begrensd door de grondwaterspiegel en aan de onderkant door een kwelwatersysteem.

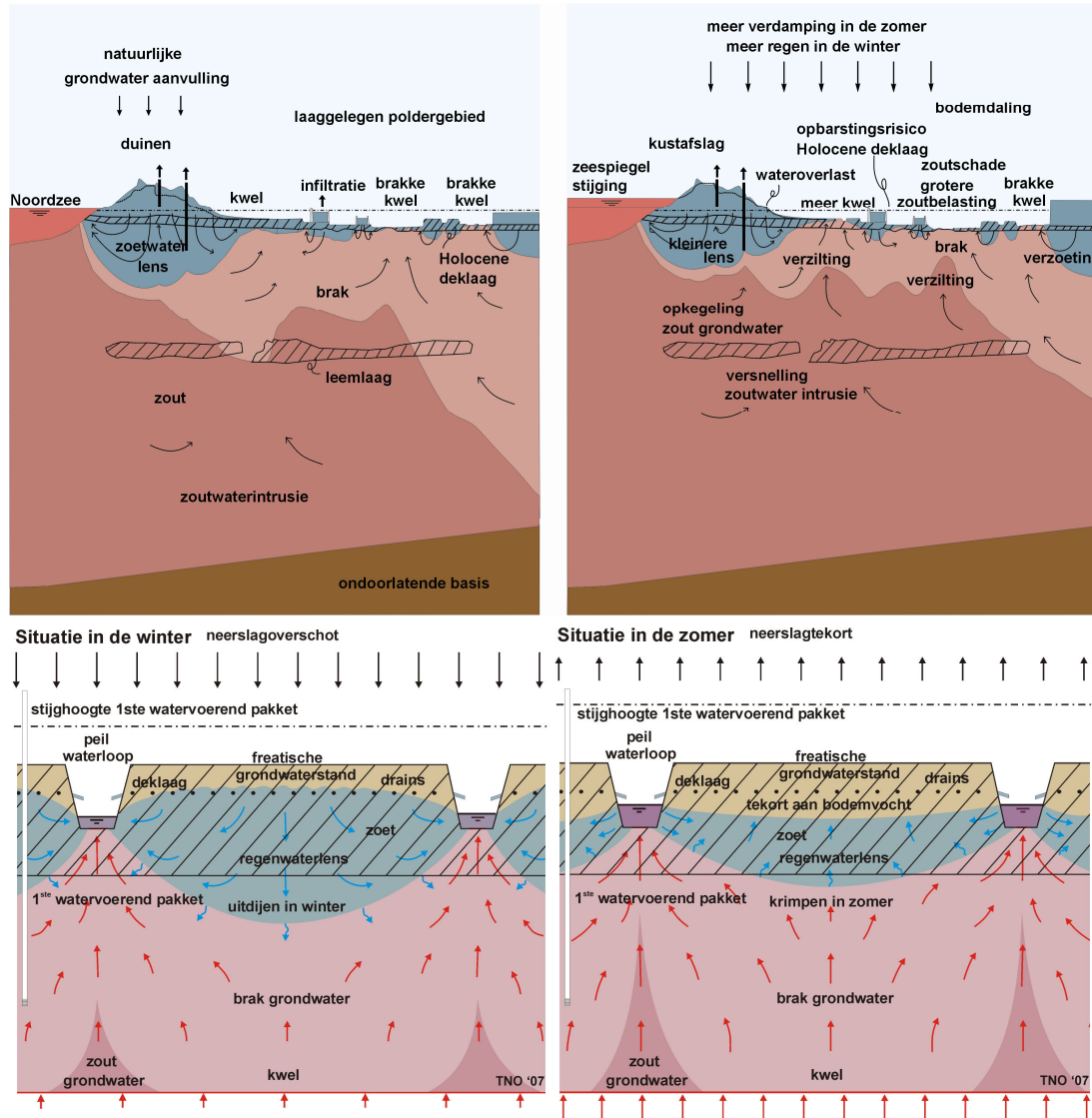
² Transgressie is gedefinieerd als het overstromen van stukken land langs de zeekust als gevolg van zeespiegelstijging en/of bodemdaling in de kuststreek.

³ 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.

Met behulp van numerieke modellen voor dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld stoftransport wordt de dynamiek van de regenwaterlens uitgerekend en geanalyseerd (zie bijlagen).

Factoren als klimaatverandering (KNMI'06 klimaatscenario's), zeespiegelstijging en bodemdaling worden in deze fase meegenomen. Compenserende maatregelen (veranderingen waterpeil, drainage diepte, etc.) worden vooralsnog buiten beschouwing gelaten. Lokale factoren zoals ontwatering, peilbeheer, geohydrologische opbouw, maaiveldhoogte, neerslagoverschot, kwelintensiteit en zoutgehalte van het kwelwater bepalen de dikte, vorm en dynamiek van de regenwaterlens (Figuur 1c, 1d). De dikte van de lens zal (sterk) variëren met de seizoenen.

In dit onderzoek is de kwetsbaarheid van zoetwaterlenzen in vijf deelgebieden onderzocht: 1. Flevoland, 2. Noord Friesland, 3. Haarlemmermeer, 4. oude droogmakerijen Noord-Holland en 5. Zeeland.



Figuur 1: Vereenvoudiging van het grondwatersysteem bij de kust: a. huidige situatie en b. toekomstige situatie. 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; c. en d. schematische weergave van een dynamische regenwaterlens. Gedurende het gehele jaar stroomt brak grondwater naar de sloten omdat het slootpeil laag ligt ten opzichte van de stijghoogte in het watervoerend pakket.

2 Beschrijving

Regenwaterlenzen op zout grondwater met een kwelcomponent komen met name voor in die gebieden waar het polderpeil lager is dan de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket. Om een beeld te krijgen van de algemene situatie in heel Nederland is gekozen voor vijf representatieve deelgebieden:

1. Flevoland,
2. Noord Friesland,
3. Haarlemmermeer,
4. Oude droogmakerijen Noord-Holland (Schermer, Beemster, Wormer en Purmer) en
5. Zeeland (vergelijkbaar met de Hoeksche Waard).

Binnen elk deelgebied is een representatief kleiner deelgebied of een gemiddelde waarde gekozen (Figuur 2).

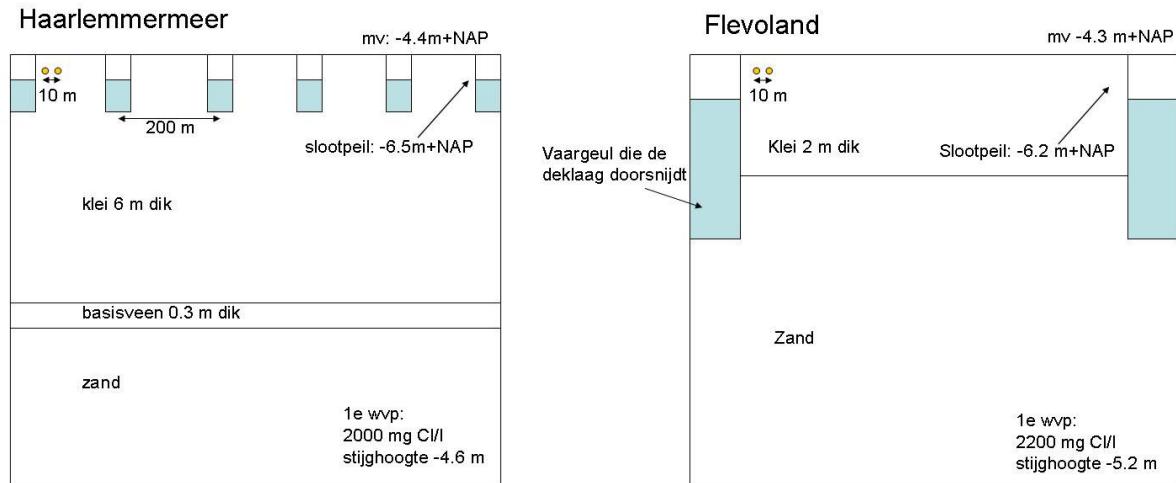
Van invloed op de ontwikkeling van een regenwaterlens zijn:

1. bodemopbouw,
2. slootkarakteristieken (o.a. peil, slootdichtheid, diepte bodem, bodemweerstand),
3. drainagekarakteristieken (o.a. hoogteligging, weerstand),
4. chlorideconcentratie in het eerste watervoerend pakket,
5. grondwateraanvulling (neerslag - verdamping),
6. stijghoogte eerste watervoerend pakket.

Hierin zijn de nummers 1 t/m 4 karakteristiek voor het deelgebied (voor voorbeelden zie Figuur 3) en de nummers 5 en 6 zijn zowel afhankelijk van het klimaatscenario als van de hydrogeologische situatie van het deelgebied. Zowel de invloed van veranderingen in neerslag en verdamping op maandbasis volgens de klimaatscenario's W en W+ als de invloed van zeespiegelstijging (klimaatscenario W/W+ in combinatie met bodemdalingsscenario WB21) op de zoetwaterlenzen is onderzocht. De klimaatscenario's G en G+ zijn minder extreem dan W en W+ en zijn in deze fase van de studie weggelaten. De karakteristieken per deelgebied staan weergegeven in bijlage A.



Figuur 2: deelgebieden onderzoek naar kwetsbaarheid zoetwaterlenzen: 1. Flevoland (grens Zuidelijk en Oostelijk Flevoland), 2. noord Friesland (Dongeradeel), 3. Haarlemmermeer (profiel buiten de getijdegeul), 4. Oude droogmakerijen Noord Holland (Schermer) en 5. Zeeland (oude land op Schouwen-Duiveland)



Figuur 3: Vereenvoudigde weergave van de karakteristieken van de Haarlemmermeer en Flevoland.

3 Kwetsbaarheid zoetwaterlenzen

In totaal zijn 25 numerieke modellen gemaakt: voor elk van de 5 representatieve gebieden 5 verschillende scenario's (referentiecasi, W zonder zeespiegelstijging (zss) en bodemdaling, W+ zonder zeespiegelstijging en bodemdaling, W met bodemdaling en W+ met bodemdaling). De zeespiegelstijging zal alleen invloed hebben op regenwaterlenzen in gebieden dicht bij de kust, verder van de kust zal in geval van klimaatverandering alleen de grondwateraanvulling (neerslag-verdamping) veranderen. Resultaten kunnen weergegeven worden tot het jaar 2050. De zeespiegelstijging voor klimaatscenario W is 35 cm, de invloed van de zeespiegelstijging op de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket is bepaald in [5]. Voor de neerslag en verdampingsgegevens is gebruik gemaakt van de gemiddelde neerslag van 1971 – 2000 op maandbasis voor verschillende weerstations (KNMI). Per deelgebied is het weerstation gekozen dat volgens de neerslagkaart (KNMI) het beste bij het gebied past (zie bijlage B).

In Figuur 4 is het profiel van de regenwaterlens weergegeven in het jaar 2030 voor de deelgebieden Flevoland, Friesland en Zeeland. De huidige chlorideconcentraties van het eerste watervoerend pakket verschillen sterk; zo bevat het grondwater onder de zoetwaterlens in Flevoland 1000 – 1500 mg Cl/l en in Zeeland 7000 – 10000 mg Cl/l. Door de grotere grondwateraanvulling in de winter zijn de regenwaterlenzen in de winter dikker. Sloten en drainagebuizen werken in deze kwelgebieden als grondwateronttrekkingen en zijn zichtbaar in Figuur 4.

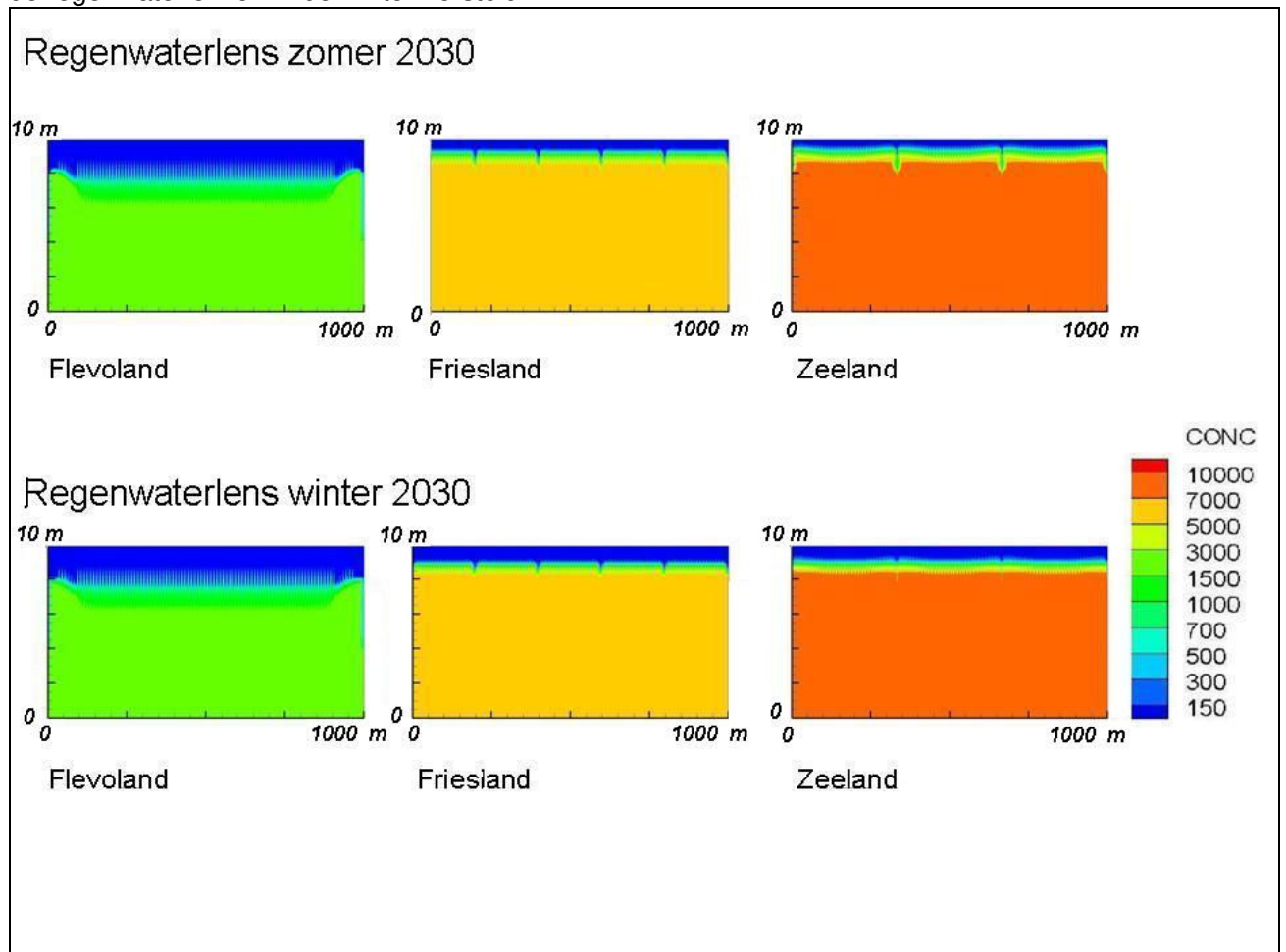
Als voorbeeld is de chlorideconcentratie van het grondwater in het jaar 2030 in Friesland weergegeven voor alle scenario's (Figuur 5). Duidelijk is dat zeespiegelstijging en bodemdaling in dit algemene geval nauwelijks invloed hebben op de chlorideconcentratie van het ondiepe grondwater en daarmee op de regenwaterlens. Lokaal, in kustgebieden, en verder in de tijd of bij grotere zeespiegelstijging kan de invloed op de regenwaterlens wel groter zijn.

In Figuur 6 is te zien dat het volume zoet water in de regenwaterlens voor klimaatscenario W+ afneemt en in de zomer geheel zal verdwijnen; de voorraad opgebouwd in de winter is over enkele tientallen jaren niet voldoende om de regenwaterlens in de zomer in stand te houden. De dikte van de regenwaterlens in de zomer neemt af voor klimaatscenario W+ door de totale jaarlijkse afname van de grondwateraanvulling (zie Figuur 11 bijlage). De fluctuaties in de grafieken zijn de seizoensvariaties; de grondwateraanvulling in de winter is positief waardoor het zoetwatervolume van de regenwaterlens

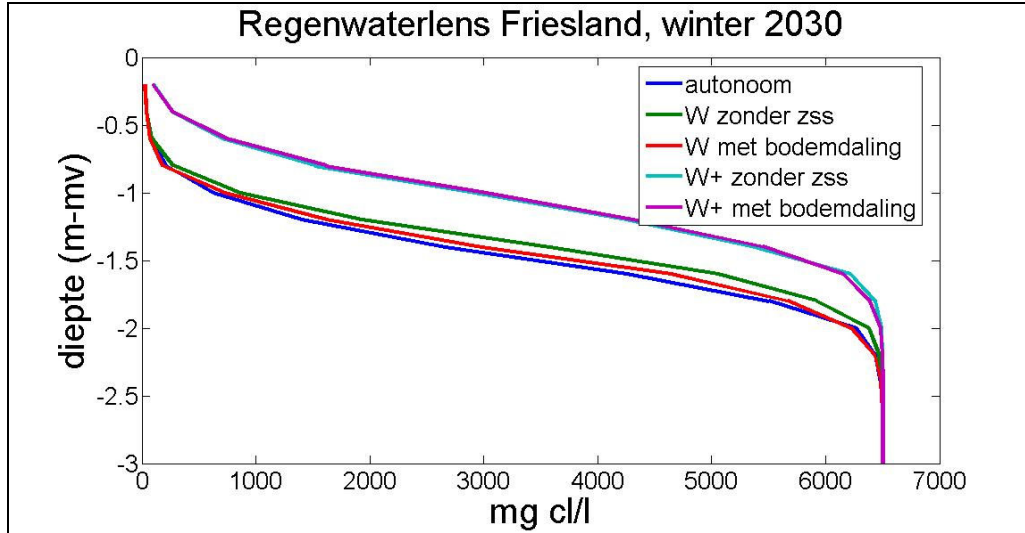
toeneemt, de grondwateraanvulling in de zomer is negatief waardoor het zoetwatervolume van de regenwaterlens afneemt of zelfs geheel verdwijnt.

De dikte van de regenwaterlens in het jaar 2050 voor de verschillende klimaatscenario's is weergegeven in Figuur 7. Indien de zoetwatergrens van 300 mg Cl/l gehanteerd wordt verdwijnt de regenwaterlens in de zomer in Friesland, Schermer en Zeeland voor scenario W+. In de winter zal de regenwaterlens in Zeeland niet meer herstellen. In Zeeland wordt echter de definitie landbouwkundig zoet vaak gebruikt. Volgens deze definitie verdwijnen de regenwaterlenzen in 2050 niet, in de zomer wel bijna. Bij extreme droge perioden en het klimaatscenario W+ in het jaar 2100 zullen deze lenzen waarschijnlijk wel verdwijnen.

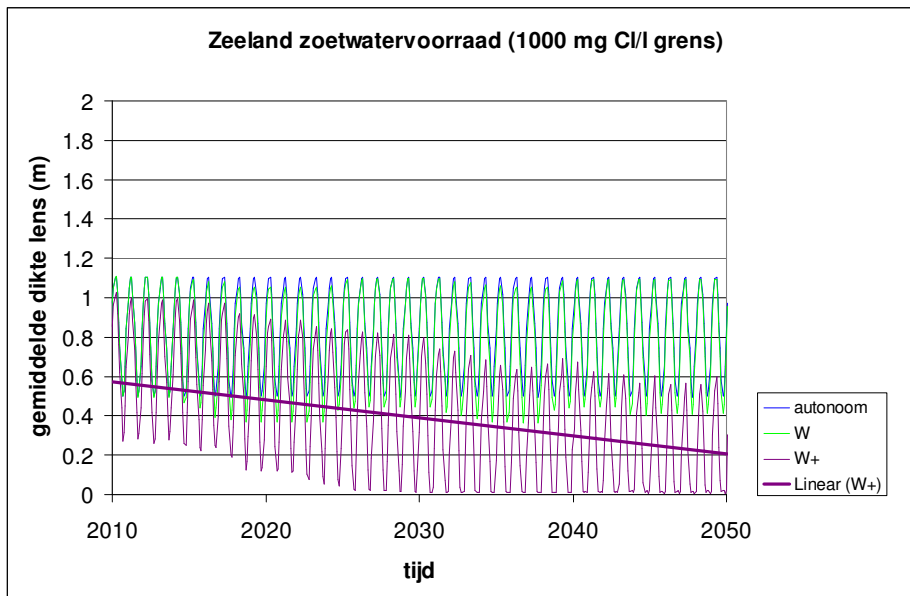
Naast bovengenoemde modellen is de invloed van droge zomers op de dikte van de regenwaterlens onderzocht. Voor regenwaterlenzen vormen perioden van droogte een risico, omdat de dikte van de regenwaterlens flink kan afnemen of zelf kan verdwijnen. In Figuur 8 is nog geen rekening gehouden met een droogtescenario volgens de KNMI scenarios; hier is gekozen voor een zomer (in 2030) zonder neerslag en 3 zomers (in 2030, 2031 en 2032) achter elkaar zonder neerslag. De grondwateraanvulling in de winter is in deze jaren wel volgens het W+ klimaatscenario. Binnenkort vindt overleg plaats met het KNMI over gebruik van extreme weersomstandigheden en klimaatverandering. De grondwateraanvulling in de winter is tijdens deze droge jaren niet voldoende om de regenwaterlens te laten voortbestaan; zelfs in de winter is er geen zoetwaterlens. Enkele jaren na de droge periode zijn de regenwaterlenzen in de winter hersteld.



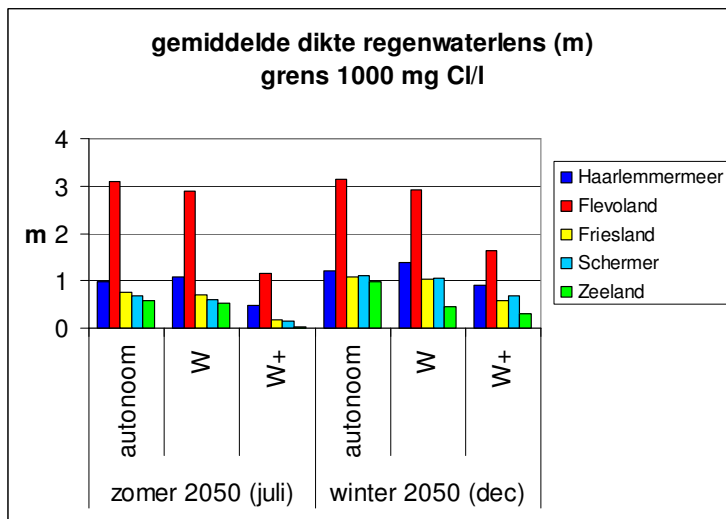
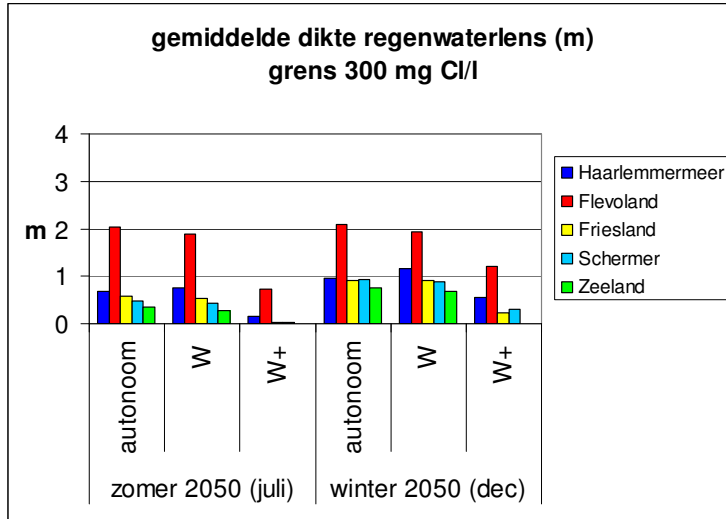
Figuur 4: Profiel van de regenwaterlens voor het autonome scenario in het jaar 2030 voor de deelgebieden Flevoland, Friesland en Zeeland. Weergave chlorideconcentratie van het grondwater in mg Cl/l.



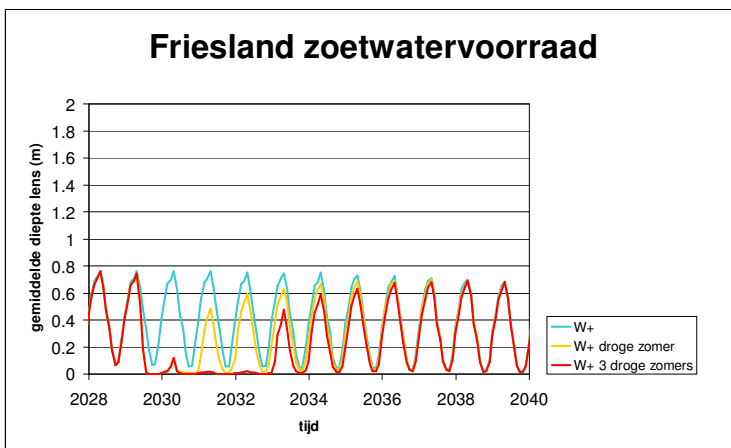
Figuur 5: Chlorideconcentratie van het grondwater tot 3 m-maaiveld voor de wintermaand februari in het jaar 2030 voor de klimaatscenario's W en W+ en de autonome case.



Figuur 6: Gemiddelde dikte van de zoetwaterlens in Zeeland volgens de definitie van landbouwkundig zoet.



Figuur 7: gemiddelde dikte regenwaterlens voor de verschillende deelgebieden in het jaar 2050 met a. zoet-brak grens 300 mg Cl/l en b. zoet-brak grens volgens de definitie van landbouwkundig zoet (1000 mg Cl/l).



Figuur 8: Dikte van de regenwaterlens in Friesland in geval van het klimaatscenario W, W+ met 1 droge zomer in het jaar 2030 en W+ met 3 droge zomers (in de jaren 2030, 2031 en 2033).

4 Conclusies

Algemeen

- Voor elk deelgebied is een representatieve case gekozen, hiermee is het wel mogelijk trends weer te geven maar absolute getallen zullen lokaal verschillen.

Zeespiegelstijging

- Voor klimaatscenario W is de zeespiegelstijging tot het jaar 2050 35 cm; de invloed van deze zeespiegelstijging op de stijghoogte zal in de gekozen deelgebieden maximaal enkele cm zijn [5]. De invloed van de zeespiegelstijging op de ontwikkeling van de regenwaterlenzen is in het algemeen voor deze cases klein.
- De invloed van de zeespiegelstijging op de regenwaterlenzen wordt groter naarmate de zeespiegelstijging groter wordt en naarmate de polder dichterbij de kust ligt. Lokaal langs de kust zou de invloed op de dikte van de regenwaterlens dus groter kunnen zijn.

Grondwateraanvulling

- Voor klimaatscenario W+ (waarbij de gesommeerde jaarlijkse grondwateraanvulling afneemt tov de huidige situatie) zullen de regenwaterlenzen steeds kleiner worden en in het ergste geval verdwijnen.

Droogte

- De voorraad zoet water die tijdens regenperioden in de winter opgebouwd wordt, is niet voldoende voor zomers zonder noemenswaardige neerslag. In gebieden met relatief kleine regenwaterlenzen zoals bijvoorbeeld Friesland, Schermer, Zeeland en de Haarlemmermeer zal de regenwaterlens tijdens deze perioden verdwijnen.
- Na een zomer zonder noemenswaardige neerslag herstelt het systeem van regenwaterlenzen binnen enkele jaren indien de grondwateraanvulling na de droogte genormaliseerd is.

Risicogebieden

- Op locaties met een dunne deklaag met kleine weerstanden zal de regenwaterlens gevoeliger reageren op vermindering van de grondwateraanvulling, dwz sneller reageren en snel dunner worden.
- In Zeeland, Friesland, de Haarlemmermeer en de Schermer zullen de regenwaterlenzen in de zomer voor het W+ klimaatscenario (bijna) geheel verdwijnen rond het jaar 2050.

5 Aanbevelingen

- Het onderzoeken van de gevoeligheid van de regenwaterlenzen voor verschillende parameters als weerstand en dikte van de deklaag, drainageafstand en diepte van de sloten. Het aangeven van een invloedssfeer per parameter kan meer duidelijkheid geven over de werkelijke dikte van de regenwaterlenzen.
- Het onderzoeken van de invloed van extreme weersomstandigheden als droogte volgens de KNMI scenario's, differentiatie klimaatscenario's naar maanden in plaats van zomer/winter en gebruik 'echte' neerslagjaren in plaats van gemiddelde waarde neerslag en verdamping.
- Het vergelijken van de ontwikkeling van de regenwaterlens met metingen in het veld.

6 Referenties

- [1] Stuurman, R. et al., 2008, Toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering, TNO rapport, i.o.v VROM, 2008-U-R0074/B, 85 p.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Louw, P.G.M., de, Oude Essink, G.H.P., Maljaars, P., Achtergrondstudie kwelreductietechnieken, TNO rapport 2007-U-R0357/B.
- [5] Oude Essink, G.H.P., 2007, Effect zeespiegelstijging op het grondwatersysteem in het kustgebied, H2O, nr 19, 60-64.
- [6] TNO (2006), Maljaars, P.S., Wils, R.A., de Louw, P., Oude Essink, G. en Wirdum, G., Regenwaterlenzen in zoute kwelsystemen, 2006-U-R0086/A, 121 p.

Bijlage A: Karakteristieken per deelgebied

Bodemopbouw

Elk model is 10 meter hoog en 1000 meter breed. Van maaiveld richting ondergrond zijn de volgende parameters voor de bodemopbouw gebruikt:

Flevoland:

1. klei 2 m, weerstand 400 dagen
2. zand 8 m

Friesland:

1. klei 4 m, weerstand 500 dagen
2. zand 6 m

Haarlemmermeer:

1. klei 6 m, weerstand 1200 dagen
2. basisveen 0.3 m, weerstand 750 dagen
3. zand 3.7 m

Oude droogmakerijen Noord-Holland:

1. klei 7 m, weerstand 1050 dagen
2. zand 3 m

Zeeland:

1. klei 1.2 m, weerstand 380 dagen
2. zand 0.6 m
3. klei 1.0 m, weerstand 320 dagen
4. zand 7.2 m

Overige karakteristieken

Deelgebied	Slootafstand (m)	Winterpeil (m+NAP)	Zomerpeil (m+NAP)	Stijghoogte 1° wvp (m)	Maaiveld (m+NAP)	Mg Cl/l 1° wvp
Flevoland	1000 (*)	-6.2	-6.2	-5.2	-4.3	2200
Friesland	150 – 200	-1.85	-1.65	-1.1	-0.7	6500
Haarlemmermeer	200	-6.5	-6.5	-4.6	-4.4	2000
Oude droogmakerijen NH	100	-4.6	-4.4	-4.3	-3.6	8000
Zeeland	300 – 400	-1.7	-1.4	-1.2	-0.5	10000

(*) Dit deelgebied heeft weinig sloten, wel vaarten die de deklaag doorsnijden.

Voor alle deelgebieden geldt een slootbreedte van 3 meter en een drainageafstand van 10 meter. Door zeespiegelstijging neemt de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket toe:

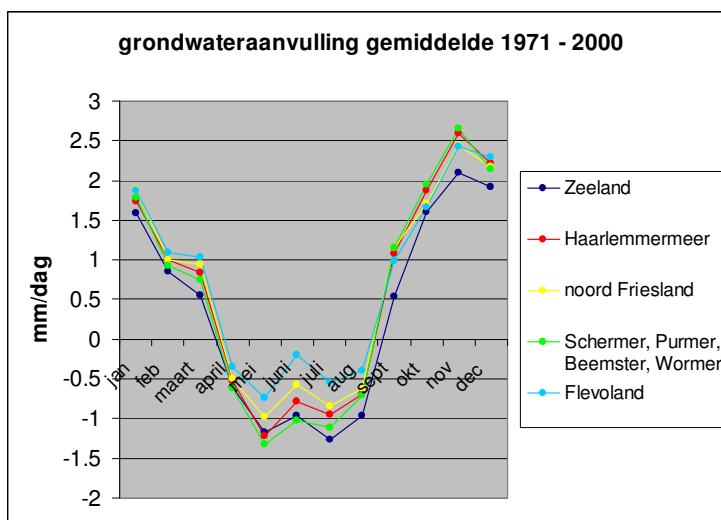
Deelgebied	Toename stijghoogte 1° wvp 2050 door zss scenario W en W+ (0.35 m tot 2050) (m)	Bodemdaling (m)
Flevoland	0	0.1
Friesland	0.07	0.1
Haarlemmermeer	0	0.3
Oude droogmakerijen NH	0	0.3
Zeeland	0.13	0.1

Bijlage B: Grondwateraanvulling

Voor de neerslag en verdampingsgegevens is gebruik gemaakt van de gemiddelde neerslag van 1971 – 2000 op maandbasis voor verschillende weerstations (KNMI). Per deelgebied is het weerstation gekozen dat volgens de neerslagkaart (KNMI) het beste bij het gebied past. Van 5 weerstations (De Kooy, De Bilt, Eelde, Vlissingen en Maastricht) is ook de gemiddelde verdamping 1971 - 2000 volgens Makkink bekend per maand. Met behulp van de contourlijnen voor de verdamping ('Reference crop evatranspiration isopleths for the netherlands 1965-1990' (KNMI)) is bepaald welk station het meest representatief is voor het deelgebied. De deelgebieden volgende stations zijn gebruikt voor neerslag en verdampingsreeksen:

- Friesland
 - Neerslag: Leeuwarden
 - Verdamping: Eelde
- Flevoland
 - Neerslag: Emmeloord
 - Verdamping: De Bilt
- Haarlemmermeer
 - Neerslag: Schiphol
 - Verdamping: gemiddelde van de Bilt en de Kooy
- Oude droogmakerijen Noord-Holland
 - Neerslag: gemiddelde van de Bilt en De Kooy
 - Verdamping: gemiddelde van de Kooy en Schiphol
- Zeeland:
 - Neerslag: Vlissingen (Schouwen is gemiddeld iets lager)
 - Verdamping: Vlissingen

De grondwateraanvulling wordt vervolgens berekend door het verschil te nemen tussen de neerslag en de verdamping, waarbij een positief getal zorgt voor grondwateraanvulling. De grondwateraanvulling in mm/dag is weergegeven in Figuur 9.

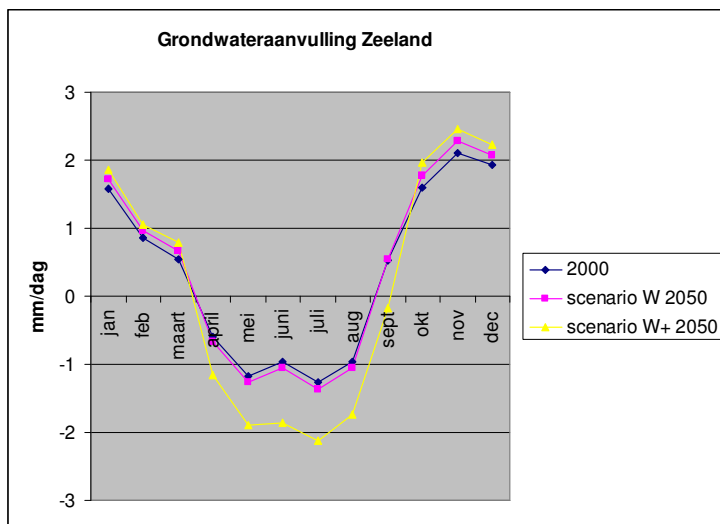


Figuur 9: Gemiddelde grondwateraanvulling 1971 – 2000 in mm/dag voor de verschillende deelgebieden.

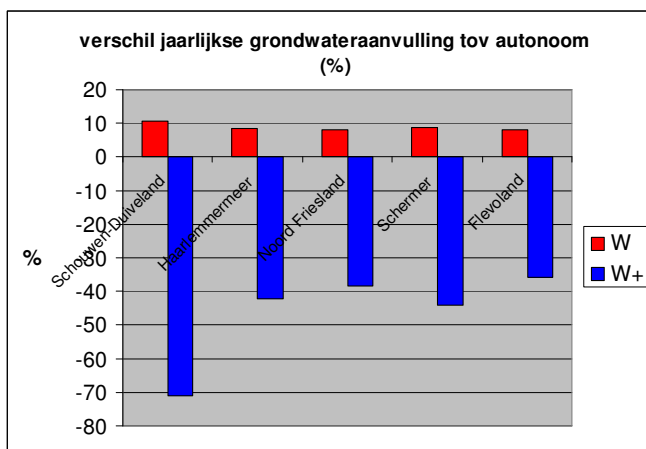
Voor de klimaatscenario's is gebruikt gemaakt van de KNMI'06 scenario's W en W+, waarbij de toe- of afname van neerslag en verdamping voor het jaar 2050 is berekend volgens de volgende door het KNMI vastgestelde percentages:

Het jaar 2050		zomer ⁴	winter
W	Neerslag	+ 6%	+ 7%
	Verdamping	+ 7 %	+ 0%
W+	Neerslag	- 19%	+ 14%
	Verdamping	+ 15%	+ 0%

In Figuur 10 staat een voorbeeld van de huidige gemiddelde grondwateraanvulling en de grondwateraanvulling in het jaar 2050 volgens de klimaatscenario's W en W+.



Figuur 10: Grondwateraanvulling Zeeland in mm/dag voor de huidige gemiddelde situatie en de verwachte situatie voor de klimaatscenario's W en W+ in het jaar 2050.



Figuur 11: toe- of afname van de totale jaarlijkse grondwateraanvulling in 2050 voor de klimaatscenario's W en W+ in procenten ten opzichte van het referentiescenario.

⁴ De zomermaanden zijn april, mei, juni, juli, augustus en september; de overige maanden zijn wintermaanden.

Bijlage C: overzicht resultaten 2050

	Stijghoogteverschil (m) (stijghoogte 1 ^e wvp - peil)		Weerstand deklaag (dagen)	Kwel (mm/dag)		Dikte regenwaterlens in 2050 (m)			
	zomer	winter		zomer	winter	Autonoom zomer	W+ zomer	Autonoom winter	W+ winter
Haarlemmermeer	1.9	1.9	1200	1.6	1.6	1.0	0.5	1.2	0.9
Flevoland	1	1	100	10	10	3.1	1.2	3.1	1.6
Friesland	0.55	0.75	500	1.1	1.5	0.8	0.2	1.1	0.6
Schermer	0.1	0.3	1050	0.1	0.3	0.7	0.1	1.1	0.7
Zeeland	0.2	0.5	700	0.3	0.7	0.6	0	1.0	0.3

	Grondwater aanvulling autonoom 2050 (totaal per half jaar)		Dikte lens 2050 autonoom (volgens definitie landbouwkundig zoet)	
	zomer	winter	zomer	winter
Haarlemmermeer	-96	312	1.0	1.2
Flevoland	-38	316	3.1	3.1
Friesland	-73	309	0.8	1.1
Schermer	-112	311	0.7	1.1
Zeeland	-136	262	0.6	1.0

	Grondwater aanvulling W+ 2050 (totaal per half jaar)		Dikte lens 2050 W+ (volgens definitie landbouwkundig zoet)	
	zomer	winter	zomer	winter
Haarlemmermeer	-234	370	0.5	0.9
Flevoland	-182	374	1.2	1.6
Friesland	-208	365	0.2	0.6
Schermer	-248	368	0.1	0.7
Zeeland	-274	315	0	0.3

Bijlage D: Korte beschrijving MOCDENS3D

De softwarecode die gebruikt wordt voor dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld stoftransport is MOCDENS3D (Oude Essink, 2001). 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, voor waterschappen, provincies en De Waterdienst.

Dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming

In de gemodelleerde grondwatersystemen 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 wateronttrekking of peilverlaging) door drukverschillen zoet grondwater wegdrücken (de welbekende zoutwater intrusie 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), en wel in de vorm van een zoetwaterlens.

In de 2D perceelsmodellen zijn de volgende fysische processen meegenomen:

- Niet-stationaire grondwaterstroming,
- Dichtheidseffecten op de grondwaterstroming,
- Zout transport volgens advectie, dispersie en diffusie.

De volgende concepten worden meegenomen:

- Sloten: niet-stationair waterpeilen variërend over het seizoen,
- Ontwatering door middel van drains,
- Grondwateraanvulling: neerslagoverschot/tekort (klimaatverandering)
- Mogelijkheid om stijghoogte in onderliggend watervoerend pakket te verhogen (zeespiegelstijging)

Correcties naar zoetwaterstijghoogte

Terwijl onder normale omstandigheden (dat wil zeggen, met een dichtheid van zoet grondwater) gewerkt kan worden met 'gewone' stijghoogten, moet in een situatie met zoet, brak en zout grondwater alles worden omgerekend 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.

Deze 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 10 meter zout grondwater heeft een equivalente zoetwaterstijghoogte van 10,25 meter: een verschil van 0,25 meter (Oude Essink, 2001).