

Evaluatie en verdiepend onderzoek naar
grondwateronttrekkingsregels in de provincie Zeeland



Evaluatie en verdiepend onderzoek naar grondwateronttrekkingsregels in de provincie Zeeland

Gualbert Oude Essink
Pieter Pauw

1231011-001

Titel

Evaluatie en verdiepend onderzoek naar grondwateronttrekkingsregels in de provincie Zeeland

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Provincie Zeeland	1231011-001	1231011-001-BGS-0001	157

Trefwoorden

Zoutwater opkegeling, onttrekkingen, zoet grondwater, zoutwaterintrusie, Zeeland, regelgeving.

Samenvatting

Motivatie en doelstellingen

In de provincie Zeeland onttrekken agrariërs zoet grondwater voor de beregening van gewassen. Deze onttrekkingen bevinden zich voornamelijk in de zoetwaterbellen onder de kreek- en dekzandruggen. Het oppompen van zoet grondwater leidt in veel gevallen tot het omhoog komen (opkegelen) van brak en zout grondwater onder de onttrekkingsbron. Vanwege de duurzaamheid van het grondwatersysteem in het algemeen (Kaderrichtlijn Water; KRW) en de grondwateronttrekking in het bijzonder zijn grondwateronttrekkingen onderworpen aan specifieke regels die zijn vastgelegd in de 'Beleidsnota Grondwater versie 3.5' van Waterschap Scheldestromen. In het kader van diverse recente (kennis)ontwikkelingen, het Deltaplan Zoetwater en ter voorbereiding van een nieuwe omgevingsvisie 2018-2024 van de provincie Zeeland heeft Deltares van Provincie Zeeland opdracht gekregen voor een evaluatie van de bestaande onttrekkingsregels en advisering voor een eventuele herziening van deze regels op basis van literatuur- en modelonderzoek. De volgende onderzoeksactiviteiten zijn daarbij opgesteld:

- 1) Genereren van een overzicht van algemene kennis van onttrekken en het opkegelen van brak tot zout grondwater die de basis vormt voor de huidige regelgeving voor landbouwonttrekkingen in zoetwaterbellen in de provincie Zeeland.
- 2) Analyseren van de huidige onttrekkingsregels, met name welke aannames daarbij gemaakt zijn, en wat dat betekent met het oog op recente ontwikkelingen zoals het geologische model GEOTOP.
- 3) Geven van een overzicht van nieuwe kennis en inzichten op het gebied van grondwateronttrekkingen in Zeeland, voornamelijk vergaard ná het opstellen van het Grondwaterbeheersplan Zeeland 2002-2007 en in relatie tot de volgende onderwerpen:
 - a) Heterogeniteit van de ondergrond; o.a. met het geologische model GEOTOP van de Geologische Dienst Nederland (TNO).
 - b) Grondwateraanvulling en klimaatverandering; o.a. weergegeven door klimaatscenario's van het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI).
 - c) Zeespiegelstijging; aan de hand van de invloedssfeer van een zeespiegelstijging (m.b.v. het provincie-dekkende, regionale grondwatermodel van Zeeland).
 - d) Fysiogeografische kenmerken; de invloed van bijvoorbeeld een drainage in de buurt van een grondwateronttrekking.
 - e) Zoetwatervoorzieningsmaatregelen; onder andere invloed van ondergrondse waterbergingsactiviteiten (zoals bijv. uitgevoerd in GO-FRESH).
 - f) Onttrekkingstypes en -configuraties; lengte filter, locatie, onttrekkingsregime en oriëntatie onttrekking.
- 4) Geven van een kwantitatieve indicatie van de implicaties van de nieuwe kennis en inzichten, genoemd onder item 3), voor de huidige 'algemene regels' voor permanente onttrekkingen en niet-kwetsbare, zoete gebieden. De hantering van een

Titel

Evaluatie en verdiepend onderzoek naar grondwateronttrekkingsregels in de provincie Zeeland

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Provincie Zeeland	1231011-001	1231011-001-BGS-0001	157

bufferzone voor onttrekkingen dicht bij natuurgebieden maakt hier ook onderdeel van uit.

- 5) Regionale analyse van de invloed van onttrekkingen onder het kreekrugsysteem van Zuid-Beveland m.b.v. het regionale grondwatermodel van Provincie Zeeland.
- 6) Geven van een advies voor eventuele aanpassing van de huidige regels, met name de algemene regels, alsook de lengte van de huidige bufferzone (300 m).

Om de omvang van deze samenvatting te beperken zijn hoofdzakelijk de inzichten uit de numerieke modelsimulaties (onderzoeksactiviteiten 4-6) beschreven, alsmede de adviezen die op basis hiervan zijn opgesteld.

Resultaten

Numerieke modelsimulaties laten zien dat toepassing van de maximale debieten binnen de huidige algemene regels voor permanente onttrekkingen in niet-kwetsbare, zoete gebieden leidt tot zoutwater opkegeling onder de onttrekkingen en een afname van het zoetwatervolume binnen de vastgestelde bufferzone (10 ha) rondom de onttrekking. Het zoetwatervolume van een 15 m dikke zoetwaterlens neemt zo'n 5-10% af over een periode van 40 jaar, waarna een dynamisch evenwicht wordt bereikt. Ook wordt in de onttrekking de grenswaarde voor zout grondwater (1.5 g Cl l^{-1}) in droge jaren (licht) overschreden, al vindt dit in veel gevallen pas na 10-20 jaar na aanleg van de onttrekking plaats. Toepassing van kunstmatige infiltratie kan zowel de afname van het zoetwatervolume als een ongewenst zoutgehalte in de onttrekking voorkomen.

Bij gemiddelde waarden voor de verticale (4.3 m d^{-1}) en horizontale (6.2 m d^{-1}) doorlatendheid vindt de eerste overschrijding van de grenswaarde van zout water plaats na ~20 jaar bij het toegepaste 'realistische onttrekkingsregime (o.a. max. 8000 m^3 per jaar, 3000 m^3 per kwartaal, 42 m^3 per uur). In de daarop volgende 20 jaar vindt in sommige jaren een lichte overschrijding plaats, vooral in droge jaren waarbij er veel vraag is naar irrigatiewater. Bij een lagere waarde van de horizontale doorlatendheid neemt de kans op een overschrijding van de grenswaarde van zout water in de onttrekking toe. Ook een hogere verticale doorlatendheid verhoogt de kans op een overschrijding. De doorlatendheid van de sedimenten onder de kreekruigen is gerelateerd aan de afzettingscondities van de geulafzettingen, de breedte van de kreekrug en de geografische positie. Een lagere doorlatendheid is vooral te verwachten bij relatief smalle kreekruigen. Bij een gegeven breedte van een kreekrug zijn lagere doorlatendheden meer te verwachten in het oosten dan in het westen van Zeeland. Er is relatief weinig bekend over de heterogeniteit van de geulafzettingen onder kreekruigen. Simulaties van een log-normaal verdeelde heterogeniteit (doorlatendheid) onder kreekruigen tonen aan dat de invloed van heterogeniteit in de doorlatendheid op de zoutwater-opkegeling beperkt is, en dat de gemiddelde waarde van de verticale en horizontale doorlatendheid belangrijker is. Een lateraal breed aanwezige kleilaag heeft een gunstig effect op de chlorideconcentratie onder en in de onttrekking, vooral wanneer deze zich tussen de onttrekking en het zoet-zout grensvlak bevindt. Het valt op basis van de bestaande geologische gegevens niet te zeggen in hoeverre de kleilagen ruimtelijk aaneengesloten zijn onder de kreekruigen.

Titel

Evaluatie en verdiepend onderzoek naar grondwateronttrekkingsregels in de provincie Zeeland

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Provincie Zeeland	1231011-001	1231011-001-BGS-0001	157

Op het GH scenario van het KNMI na lijkt de invloed van klimaatverandering op de grondwateraanvulling klein en in het 'L' scenario juist gunstig. Om die reden is het effect op de zoutwater opkegeling ook beperkt. In de 'L' scenario's neemt de grondwateraanvulling en de dikte van de zoetwaterbel toe. De invloed van zeespiegelstijging is alleen voor het 'W' scenario doorgerekend, voor drie verschillende doorwerkingspercentages (10%, 20% en 40% van de voorspelde zeespiegelstijging), gebaseerd op het regionale numerieke grondwatermodel van de provincie Zeeland. De invloed van zeespiegelstijging is groter dan de klimaatverandering, zowel op de concentratieverdeling in de onttrekking maar vooral op de relatieve afname van het volume van de zoetwaterbel. Bij 40% doorwerking van de zeespiegelstijging neemt het volume zoet water met zo'n 16% af, tegen gemiddeld 6% afname in het geval van geen zeespiegelstijging. Echter, het areaal van doorwerking van de invloed van zeespiegelstijging is beperkter dan bij klimaatverandering.

Een kleinere longitudinale dispersie leidt tot een afname van de zoutconcentratie in de onttrekking. Bij een lagere dichtheid van het zoute grondwater onder de onttrekking (lager zoutgehalte) is de kans op een ongewenst hoog chloridegehalte groter dan bij een hogere dichtheid. De afname van het zoetwatervolume in het buffergebied rondom de onttrekking is echter kleiner. Sloten binnen 50 m van de onttrekking¹ kunnen leiden tot versnelde zoutwater opkegeling en een ongewenst zoutgehalte in de onttrekking. De mate hiervan hangt sterk samen met het peil van de sloot (en of/wanneer deze watervoerend is) en de hydraulische eigenschappen van de sloot.

Illustratieve simulaties van de zoetwatervoorzieningsmaatregelen Freshmaker en Kreekrug Infiltratie Systeem tonen duidelijk aan dat bij deze toepassingen het zoetwatervolume niet afneemt door de tijd heen (gegeven dat voldoende wordt geïnfiltrerd, zoals gedaan is in de simulaties), als gevolg van het kunstmatig infiltreren van zoet water in de wintermaanden. Hoewel er opkegeling van zout water onder de onttrekking plaatsvindt blijven de concentraties in de onttrekking relatief laag, zeker in het geval van de Freshmaker. Bij het Kreekrug Infiltratie Systeem zijn de concentraties in de onttrekking enigszins hoger, maar is de toename van het totale zoetwatervolume ook hoger dan bij de Freshmaker.

Een niet-uniform debiet in de horizontale onttrekking heeft een negatief maar mild effect op de chlorideconcentratie van het opgepompte water. Een langere onttrekking heeft een gunstige invloed op de chlorideconcentratie in de onttrekking. Een 1 m hogere ligging heeft weinig effect op de concentratie in de onttrekking. Een langere onttrekking van 80 naar 100 m lijkt effectiever dan ondiepere aanleg. Wanneer men twee onttrekkingen achter elkaar met een totale lengte van 160 m met elk een half debiet gebruikt in plaats van één onttrekking dan neemt het chloridegehalte in de onttrekking fors af en overstijgt bij lange na niet de grenswaarde voor zout grondwater. Deze configuratie heeft daarom de voorkeur boven een kortere onttrekking. Het effect van een 160 m lange onttrekking op mogelijke interferentie met andere onttrekking buiten het buffergebied is niet onderzocht, maar de verwachting is dat dit bij een relatief laag debiet te verwaarlozen is. In de huidige regelgeving is van interferentie tussen onttrekkingen waarschijnlijk geen sprake, dan wel beperkt.

¹ De helft van deze waarde (25 m) is de minimale afstand tussen sloot en onttrekking die binnen de huidige regelgeving wordt geëist.

Titel

Evaluatie en verdiepend onderzoek naar grondwateronttrekkingsregels in de provincie Zeeland

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Provincie Zeeland	1231011-001	1231011-001-BGS-0001	157

Bij de geldende debieten van tijdelijke verticale onttrekkingen is de verlaging van de grondwaterstand altijd minder uitgebreid dan de huidige omvang van de bufferzone (300 m) die rondom kwetsbare natuurgebieden gehanteerd wordt. Een brede verspreiding vindt met name plaats bij langdurige onttrekkingen (tot 6 maanden) met een laag debiet, een beperkte transmissiviteit van het watervoerende pakket en een relatief kleine freatische bergingscoëfficiënt ('specific yield'), en is afhankelijk van de weerstand van de deklaag.

In gebieden die in de algemene regels als 'zout' zijn gedefinieerd (zoetwaterbel minder dan 15 m dikte) kan, hoewel de naamgeving anders doet vermoeden, zoutwaterintrusie en een afname van de zoetwatervoorraad plaatsvinden, en kunnen onttrekkingen bovendien na verloop van tijd de grenswaarde voor zout grondwater overschrijden. Dit geldt zowel voor de permanente onttrekkingen binnen de algemene regels (max. 5 m³ per uur, 12000 m³ per jaar) als tijdelijke onttrekkingen. Een onttrekking onder een kleilaag waar amper freatische grondwateraanvulling over plaatsvindt leidt tot een snellere zoutwater opkegeling dan wanneer er wel freatische grondwateraanvulling plaatsvindt.

Aanbevelingen

Over het algemeen lijkt de huidige regelgeving afdoende om sterke verzilting onder en rondom de onttrekking te voorkomen. Het zoetwatervolume neemt in veel gevallen niet meer dan 10% af, en na verloop van tijd (~ 40 jaar bij een zoetwatersysteem van 15 m dikte) bereikt het zoetwatervolume een dynamisch evenwicht. Aanpassing van de huidige bufferzone rondom de onttrekking lijkt daarmee niet noodzakelijk. In de huidige regelgeving staat beschreven dat geen afname van het zoetwatervolume op mag treden. Aangezien dit wel degelijk het geval is, zou dit bij de nieuwe regelgeving moeten worden geherformuleerd.

Om te voorkomen dat na verloop van tijd de zoutconcentratie in de onttrekking de waarde van zout grondwater (1.5 g Cl l⁻¹) overschrijdt, zullen de in de algemene regels beschreven debieten enigszins verlaagd moeten worden. In voorliggende studie is uitgegaan van een maximaal debiet van 42 m³ per uur, omdat 60 m³ per uur in de praktijk vaak als pompcapaciteit wordt aangenomen, maar er door drukverliezen vaak niet meer dan 45 m³ per uur daadwerkelijk wordt onttrokken. Het verdient aanbeveling om dit in de nieuwe regelgeving te vermelden en uit te gaan van een daadwerkelijk debiet van bijvoorbeeld 40 m³ per uur.

Gezien de onzekerheid van de klimaat- en zeespiegelstijgingsscenario's en de tijdschaal waarop deze processen plaatsvinden in relatie tot frequentie van de herziening van de onttrekkingsregels, lijkt het niet nodig om deze effecten voorlopig (in de komende herziening van de algemene regels) mee te nemen.

Het verdient aanbeveling de kunstmatige infiltratie van zoet water te stimuleren. Implementatie van kunstmatige infiltratie in de algemene regels zal echter nog aanvullend onderzoek vergen. Middels een vergunning is kunstmatige infiltratie wel al mogelijk. Ook zou kunstmatige infiltratie in een nieuwe beleidsnota gestimuleerd moeten worden.

Sloten binnen 50 m van de onttrekking kunnen leiden tot versnelde zoutwater opkegeling en een ongewenst zoutgehalte in de onttrekking. De mate hiervan hangt echter sterk samen met

Titel

Evaluatie en verdiepend onderzoek naar grondwateronttrekkingsregels in de provincie Zeeland

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Provincie Zeeland	1231011-001	1231011-001-BGS-0001	157

het peil van de sloot en de hydraulische eigenschappen van de sloot. Dit zou verder uitgezocht moeten worden alvorens een advies over eventuele aanpassing van de huidige eis voor de minimale afstand tussen de onttrekking en een sloot (25 m). Data van de opkegeling onder de sloot (bijvoorbeeld uit het FRESHEM onderzoek) kan al duidelijk maken wat de mogelijke invloed van de sloot is. Lokale condities moeten daarom worden onderzocht indien men vermoedt dat een sloot invloed heeft op de zoutwater opkegeling onder een onttrekking.

In de huidige regelgeving staan geen eisen ten aanzien van de lengte van de horizontale onttrekking beschreven. Hier wordt aangeraden om dat in een volgende versie wel te doen, waarbij 80 m als minimum kan worden aangehouden. Een langere onttrekking zal zorgen voor een lichte toename van de reductie van het zoetwater volume rondom de onttrekking, maar zal een sterk positief effect hebben op de concentraties in de onttrekking. Aanpassing van de eis van de diepte van de onttrekking is niet nodig.

Voor onttrekkingen onder een scheidende laag waarover geen of amper grondwateraanvulling plaatsvindt, verdient het aanbeveling een vergunning te vereisen, waarin moet worden aangetoond hoe en hoeveel grondwateraanvulling er plaatsvindt.

Hoewel het waarschijnlijk is dat onttrekkingen van minder dan 5 m³ per uur maar wel 12000 m³ per jaar nauwelijks voorkomen in de als 'zout' (waar de zoetwaterbel dunner is dan 15 m) gedefinieerde gebieden in de provincie, kan dit wel mogelijk leiden tot een ongewenst zoutgehalte in de onttrekking. Het is daarom aan te raden deze regels aan te passen. Het is ook aan te raden om regels voor bijvoorbeeld de configuratie en lengte van de onttrekking op te stellen, net als bij de 'zoete' gebieden.

De verlaging van de grondwaterstand bij de algemene regels voor tijdelijke onttrekkingen werkt altijd minder ver door dan de huidige omvang van de bufferzone (300 m). De in deze studie beschreven resultaten zouden gebruikt kunnen worden om een nieuwe bufferzone vast te stellen afhankelijk van de weerstand van de deklaag.

Tenslotte worden in de huidige algemene regels zoete en zoute gebieden onderscheiden op basis van één enkele dikte van de zoetwaterbel (15 m). Uit het recente FRESHEM onderzoek kunnen nauwkeurig andere diktes van zoetwaterbellen worden bepaald, waar het maximale debiet op zou kunnen worden afgesteld, en daarmee ook de duurzaamheid van de onttrekking en tegelijkertijd de mogelijkheden voor beregening. Dit, tezamen met een onderzoek (rekentool) naar de lokale (hydrogeologische) condities op het onttrekken van grondwater, zal kunnen leiden tot een optimaler en duurzamer gebruik van het zoete grondwater in de provincie Zeeland.

Deltares

Titel

Evaluatie en verdiepend onderzoek naar
grondwateronttrekkingsregels in de provincie
Zeeland

Opdrachtgever
Provincie Zeeland

Project
1231011-001

Kenmerk
1231011-001-BGS-0001

Pagina's
157

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	1 juni 2018	Gualbert Oude Essink		Gijs Janssen		Hanneke van der Klis	
Pieter Pauw							

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	3
1.1 Aanleiding onderzoek	3
1.2 Onderzoeksactiviteiten	3
1.3 Algemene aanpak en leeswijzer	4
2 Literatuuroverzicht; veld- model- en literatuuronderzoek in Zeeland (1980-2005)	5
2.1 Infiltratieproef Kapelle 1983-1986	5
2.2 Onttrekkingsexperiment Heinkenszand (1985-1986)	7
2.3 Kreekruigenonderzoek Zuid Beveland (IWACO)	8
2.4 Gebruiksmogelijkheden grondwater (IWACO studie uit 1992)	12
2.5 Praktijkproef beregening Oostkapelle (IWACO studie uit 1996)	14
2.6 Kreeverhille praktijkproef (IWACO studie uit 2000)	15
2.7 Huidige regels onttrekken grondwater in de provincie Zeeland	16
2.8 Aannames in algemene regels voor permanente onttrekkingen en niet-kwetsbare, zoete gebieden	20
3 Overzicht van nieuwe kennis en inzichten op het gebied van grondwateronttrekkingen in Zeeland	22
3.1 Heterogeniteit van de ondergrond	22
3.1.1 REGIS Zeeland	22
3.1.2 GeoTOP Zeeland en hydraulische parameterisatie	26
3.1.3 Ontstaansgeschiedenis Zeeland	29
3.1.4 Hydrogeologie van kreekruigen	31
3.2 Grondwateraanvulling en klimaatverandering	34
3.3 Zeespiegelstijging	36
3.4 Fysiogeografische kenmerken	38
3.5 Zoetwatervoorzieningsmaatregelen	42
3.6 Onttrekkingstypes en configuraties	44
3.6.1 Algemeen begrip van zoutwater opkegeling onder onttrekkingen	44
3.6.2 Horizontale onttrekkingen	47
4 Kwantitatieve indicatie van de implicaties van de nieuwe inzichten voor de huidige onttrekkingsregels	49
4.1 Algemene aanpak	49
4.2 Methode en resultaten referentie modellen	49
4.2.1 Modelopzet en randvoorwaarden	49
4.2.2 Grondwateraanvulling en verdamping	53
4.2.3 Doorlatendheid	56
4.2.4 Onttrekking (realistisch en maximaal onttrekkingsregime)	56
4.2.5 Resultaten	59
4.3 Heterogeniteit van de ondergrond	71
4.3.1 Heterogeniteit; ruimtelijke variaties in K_h en K_v	71
4.3.2 Doorlatendheid en verticale anisotropie (K_h / K_v)	75
4.3.3 De invloed van een lateraal breed aanwezige kleilaag	77
4.4 Grondwateraanvulling en klimaatverandering	81
4.4.1 GL scenario	83
4.4.2 GH scenario	85

4.4.3	WL scenario	87
4.4.4	WH scenario	89
4.5	Zeespiegelstijging	90
4.6	Fysiogeografische kenmerken	93
4.6.1	Invloed van longitudinale dispersie	93
4.6.2	Invloed van een kleinere dichtheid van het grondwater	95
4.6.3	Invloed van een nabijgelegen sloot	96
4.7	Zoetwatervoorzieningsmaatregelen	99
4.8	Onttrekkingstypes en –configuraties	103
4.8.1	Langere horizontale onttrekking	103
4.8.2	Ondiepere onttrekking	104
4.8.3	Variatie van onttrekking over de lengte van de onttrekking	105
4.8.4	Twee horizontale onttrekkingen met elk een half debiet	108
4.8.5	Interferentie van onttrekkingen	109
4.9	Bufferzone voor kwetsbare gebieden	110
4.9.1	Analytische vergelijking voor begrip van onttrekkingen	111
4.9.2	Numeriek model	114
4.10	Mogelijke overexploitatie zoet grondwater uit kreekruigen Zuid-Beveland	118
4.10.1	FRESHM data implementeren in Zeeland deelmodel 2	118
4.10.2	Beschrijving van de modelscenario's	121
4.10.3	Analysen en vergelijken	122
4.11	Invloed van een onttrekking zonder freatische grondwateraanvulling	124
4.12	Uitbreiden van het aantal categorieën van diktes van zoetwatervolumes en bijbehorende debieten	128
5	Conclusies	131
5.1	Introductie	131
5.2	Deelonderwerpen	131
6	Advies aanpassing huidige regels	135
6.1	Algemene regels voor onttrekkingen in niet-kwetsbare, zoete gebieden (zoetwaterbel > 15 m dikte)	135
6.2	Algemene regels voor onttrekkingen in niet-kwetsbare, zoute gebieden (zoetwaterbel < 15 m dikte)	136
6.3	Bufferzone	137
6.4	Andere aanbevelingen	137
7	Literatuuropgave	138
8	Bijlagen	141

1 Inleiding

1.1 Aanleiding onderzoek

In de provincie Zeeland onttrekken agrariërs zoet grondwater voor de beregening van gewassen. Deze onttrekkingen bevinden zich voornamelijk in de zoetwaterbellen onder de kreek- en dekzandruggen. Het oppompen van zoet grondwater leidt in veel gevallen tot het omhoog komen (opkegelen) van brak en zout grondwater onder de onttrekkingsbron. Voor de duurzaamheid van het grondwatersysteem in het algemeen (Kaderrichtlijn Water; KRW) en de grondwateronttrekking in het bijzonder is het belangrijk dat zoutwater opkegeling beperkt blijft. Daarom zijn de grondwateronttrekkingen onderworpen aan specifieke regels. De huidige onttrekkingsregels zijn vastgelegd in de 'Beleidsnota Grondwater versie 3.5' van Waterschap Scheldestromen. Het waterschap is verantwoordelijk voor het naleven van de regels. De onttrekkingsregels zijn grotendeels overgenomen uit het Grondwaterbeheersplan Zeeland 2002-2007 (Provincie Zeeland, 2002).

De laatste jaren is de vraag naar zoet grondwater voor beregening toegenomen. Dit heeft onder andere geleid tot een toename van de aanvragen voor nieuwe grondwateronttrekkingen. Ook is er recent veel nieuwe kennis verzameld over zoet, brak en zout grondwater in de provincie Zeeland, zoals de invloed van klimaatverandering en zeespiegelstijging op het grondwatersysteem (Van Baaren et al., 2016), nieuwe onttrekkingstechnieken, verbeterde modellen van de geologie (Stafleu et al. 2011), ondergrondse zoetwateropslag pilots (GO-FRESH, zie Oude Essink et al. (2014)) en een provincie-dekkende geofysische kartering van de verdeling van zoet, brak en zout grondwater (FRESHM, zie Van Baaren et al. 2017).

In het kader van deze ontwikkelingen, het Deltaplan Zoetwater en ter voorbereiding van een nieuwe omgevingsvisie 2018-2024 van de provincie Zeeland heeft Deltares van Provincie Zeeland opdracht gekregen voor een evaluatie van de bestaande onttrekkingsregels en advisering voor een eventuele herziening van deze regels op basis van literatuur- en modelonderzoek. De nadruk ligt hierbij op de zogenaamde 'algemene regels' voor permanente onttrekkingen in niet-kwetsbare, zoete gebieden (zie sectie 2.7). Voorliggend rapport beschrijft de opbouw, de activiteiten en de resultaten van dit onderzoek.

1.2 Onderzoeksactiviteiten

In overleg met Provincie Zeeland zijn de volgende onderzoeksactiviteiten opgesteld:

- 1) Genereren van een overzicht van algemene kennis van onttrekken en het opkegelen van brak tot zout grondwater die de basis vormt voor de huidige regelgeving voor landbouwonttrekkingen in zoetwaterbellen in de provincie Zeeland.
- 2) Analyseren van de huidige onttrekkingsregels, met name welke aannames daarbij gemaakt zijn, en wat dat betekent met het oog op recente ontwikkelingen zoals het geologische model GEOTOP.
- 3) Geven van een overzicht van nieuwe kennis en inzichten op het gebied van grondwateronttrekkingen in Zeeland, voornamelijk vergaard ná het opstellen van het Grondwaterbeheersplan Zeeland 2002-2007 en in relatie tot de volgende onderwerpen:
 - a) Heterogeniteit van de ondergrond; o.a. met het geologische model GEOTOP van de Geologische Dienst Nederland (TNO).

- b) Grondwateraanvulling en klimaatverandering; o.a. weergegeven door klimaatscenario's van het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI).
 - c) Zeespiegelstijging; aan de hand van de invloedssfeer van een zeespiegelstijging (m.b.v. het provincie-dekkende, regionale grondwatermodel van Zeeland).
 - d) Fysiogeografische kenmerken; de invloed van bijvoorbeeld een drainage in de buurt van een grondwateronttrekking.
 - e) Zoetwatervoorzieningsmaatregelen; onder andere invloed van ondergrondse waterbergingsactiviteiten (zoals bijv. uitgevoerd in GO-FRESH).
 - f) Onttrekkingstypes en -configuraties; lengte filter, locatie, onttrekkingsregime en oriëntatie onttrekking.
- 4) Geven van een kwantitatieve indicatie van de implicaties van de nieuwe kennis en inzichten, genoemd onder item 3), voor de huidige 'algemene regels' voor permanente onttrekkingen en niet-kwetsbare, zoete gebieden. De hantering van een bufferzone voor onttrekkingen dicht bij natuurgebieden maakt hier ook onderdeel van uit.
 - 5) Regionale analyse van de invloed van onttrekkingen onder het kreekrugsysteem van Zuid-Beveland m.b.v. het regionale grondwatermodel van provincie Zeeland.
 - 6) Geven van een advies voor eventuele aanpassing van de huidige regels, met name de algemene regels, alsook de lengte van de huidige bufferzone (300 m).

1.3 Algemene aanpak en leeswijzer

De bovengenoemde zes onderzoeksactiviteiten zijn in dit rapport beschreven in verschillende hoofdstukken. Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de Nederlandse literatuur die de basis heeft gevormd voor de huidige onttrekkingsregels (onderzoeksactiviteit 1). De huidige onttrekkingsregels en de aannames die daarbij zijn gedaan worden ook kort toegelicht in hoofdstuk 2 (onderzoeksactiviteit 2). Relevante kennis die voornamelijk verzameld is ná het opstellen van het Grondwaterbeheersplan Zeeland 2002-2007 is beschreven in hoofdstuk 3 (onderzoeksactiviteit 3). Hoofdstuk 4 omvat een kwantitatieve analyse van de invloed van de in hoofdstuk 3 beschreven nieuwe kennis op de huidige onttrekkingsregels (onderzoeksactiviteit 4). Voor deze analyse zijn analytische berekeningen en conceptuele numerieke modelsimulaties gebruikt. In hoofdstuk 4 is ook de regionale analyse van de invloed van onttrekkingen onder het kreekrugsysteem van Zuid-Beveland (onderzoeksactiviteit 5) beschreven. De conclusies van dit onderzoek zijn beschreven in hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 beschrijft suggesties voor aanpassingen van de huidige regelgeving (onderzoeksactiviteit 6).

2 Literatuuroverzicht; veld- model- en literatuuronderzoek in Zeeland (1980-2005)

In de periode 1980-2005 zijn verschillende veld- en modelstudies uitgevoerd naar onttrekkingen en kunstmatige opslag van zoet water onder kreekruigen in de provincie Zeeland. Secties 2.1 t/m 2.6 geven een samenvatting van deze studies. Eerder gerelateerd onderzoek, zoals het geologisch onderzoek van de Rijks Geologische Dienst (RGD, 1970), het hydrogeologisch onderzoek van TNO-IGG (bijv. TNO-IGG 1982) en internationale literatuur zijn hier niet beschreven. Sectie 2.7 geeft een samenvatting van de huidige onttrekkingsregels. In sectie 2.8 komen de aannames die ten grondslag liggen aan de huidige onttrekkingsregels aan bod.

2.1 Infiltratieproef Kapelle 1983-1986

In de periode 1983-1986 is door de toenmalige Commissie Waterbeheersing en Ontzilting (CWO) onderzoek uitgevoerd naar kunstmatige infiltratie onder een kreekrug bij Kapelle (Zuid-Beveland) (Mann 1985; Mann 1987; Projectgroep Zoetwateronderzoek 1986). Tijdens het onderzoek werd tijdens perioden van neerslagoverschot zoet oppervlaktewater geïnfiltreerd via verticale infiltratieputten. In de loop van het onderzoek zijn drie infiltratieputten geïnstalleerd en in gebruik genomen.

De in het winterseizoen 1983-1984 geteste putten vroegen veel onderhoud en het gebruikte filtersysteem functioneerde matig tot slecht. Voorafgaand aan het tweede infiltratie seizoen (winter 1984-1985) werden verbeteringen aan de infiltratieputten gerealiseerd. Half november 1984 werd het tweede infiltratie seizoen gestart. Half maart 1985 kon ook een derde infiltratieput in gebruik worden genomen. Begin juni 1985 werd de hoeveelheid oppervlaktewater die naar de putten kon worden aangevoerd onvoldoende en werd de infiltratie gestopt.

Uit bemonstering van diepe peilbuizen en uit de metingen van zoutwachters bleek dat aan het einde van het tweede infiltratie seizoen de zoet-zout grens lager lag dan na het eerste infiltratie seizoen. Na afloop van het tweede infiltratie seizoen kon een globale kostprijs worden geraamd van het opgeslagen en teruggewonnen irrigatiewater. Economische berekeningen toonden aan dat het systeem niet rendabel genoeg was om in de praktijk toe te passen. Het derde infiltratie seizoen 1985-1986 heeft geen belangrijke nieuwe informatie opgeleverd.

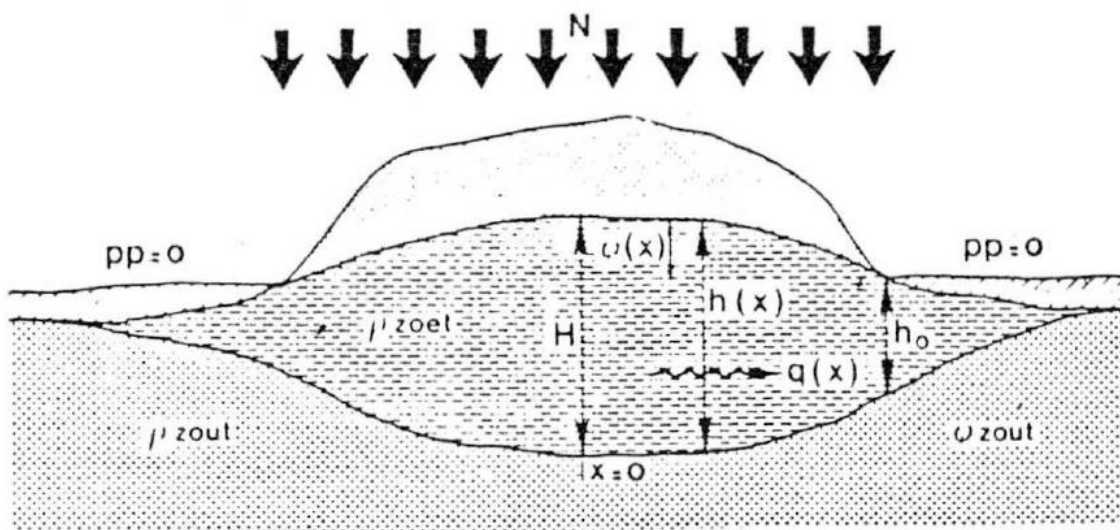
In aanvulling op de veldonderzoeken van de infiltratieproef in Kapelle is door Provinciale Waterstaat in Zeeland modelonderzoek uitgevoerd. In een tussen-nota uit 1986 (Glas et al. 1986) is een berekeningsmethode gepresenteerd voor het bepalen de omvang van een zoetwaterbel ter plaatse van de kreekrug (programma KREEK) en de winbare hoeveelheid grondwater in een kreekrug (VORMBEL), waarbij als randvoorwaarden de maximaal toelaatbare verplaatsing van het zoet-zout grensvlak ter plaatse van het winmiddel wordt aangenomen. Deze stationaire berekeningen zijn gebaseerd op differentiaalvergelijkingen die numeriek worden opgelost.

Door van Meerten (1986) is aanvullend onderzoek gedaan naar niet-stationaire rekenmethoden om het verplaatsen van zout grondwater te simuleren. Hierbij is gebruik gemaakt van het numerieke programma BUBBLE.

Enkele belangrijke aannames die zijn gemaakt in de programma's KREEK, VORMBEL en BUBBLE zijn:

- 1) Zoet en zout grondwater worden gescheiden door materiele grensvlakken waarover geen massa (opgeloste deeltjes) kan worden getransporteerd. Menging door mechanische dispersie² en moleculaire diffusie wordt hiermee dus verwaarloosd. We noemen dit de scherp grensvlak benadering.
- 2) De aanname van Dupuit; de weerstand tegen verticale grondwaterstroming (in een watervoerend pakket) is verwaarloosbaar en leidt dus niet tot verticale verschillen in stijghoogte. Dit geldt ook onder de onttrekking. Er kan wel verticale stroming plaatsvinden.
- 3) De berekeningen gaan uit van een tweedimensionaal concept (dwarsdoorsnede) en puntonttrekkingen.
- 4) De doorlatendheid is uniform/homogeen; dat wil zeggen dat de variatie in horizontale en verticale doorlatendheid niet in de ruimte varieert. Er kan wel sprake zijn van anisotropie (de verticale doorlatendheid is niet gelijk aan de horizontale doorlatendheid).

Voor de jaren 1980 waren de modelconcepten van de drie programma's KREEK, VORMBEL en BUBBLE state-of-the-art. Momenteel –met de kennis en numerieke mogelijkheden van nu– zouden bovenstaande aannames in veel gevallen niet gemaakt worden vanwege de toegenomen mogelijkheden waardoor realistischere situaties kunnen worden doorgerekend: zo is bijvoorbeeld hydrodynamische dispersie bij opkegeling onder onttrekkingen een belangrijk proces en varieert de doorlatendheid ruimtelijk. De aannames over parameterwaarden die in de twee rapporten worden besproken zijn hier niet uiteengezet.



Figuur 2.1: Concept voor grondwaterstroming onder een kreekrug. Voor een verklaring van de symbolen en nadere uitleg over het concept wordt verwezen naar Glas et al. (1986).

² Mechanische dispersie: menging door lokale variaties in stroomsnelheid (poriewatersnelheid) ten opzichte van de gemiddelde snelheid van de grondwaterstroming. Longitudinale dispersie is mechanische dispersie die parallel aan de stromingsrichting plaatsvindt, transversale dispersie vindt haaks (horizontaal en verticaal) op de stromingsrichting plaats. Menging door diffusie vindt plaats door random (Brownse) beweging van stoffen die leidt tot een netto verplaatsing van stoffen van een hoge naar een lage concentratie. Het gecombineerde effect van mechanische dispersie en diffusie noemen we hydrodynamische dispersie.

Aan de hand van de modellen werd geconcludeerd dat winning met behulp van horizontale onttrekkingen minder zoutwater opkegeling teweeg brengt dan met behulp van verticale onttrekkingen. De winning kan ook worden geoptimaliseerd door de stijghoogte van het zoute grondwater te verlagen, bijvoorbeeld door bij onttrekking van zoet grondwater gelijktijdig daaronder zout grondwater te onttrekken. Deze techniek, die in het buitenland bekend staat als 'scavenger wells', wordt reeds decennia lang succesvol toegepast in droge kustgebieden zoals die van Israël, India en Pakistan.

2.2 Onttrekkingsexperiment Heinkenszand (1985-1986)

In 1985 werd een vooronderzoek gestart naar grondwateronttrekking met behulp van een horizontale onttrekking (Mann, 1986). Het vooronderzoek betrof een test met een horizontale onttrekking onder een kreekruig in Heinkenszand, in opdracht van de Provinciale Waterstaat Zeeland en in uitvoering van de CWO. Het uiteindelijke onderzoek is verricht ter onderbouwing van het toekomstig beleid ten aanzien van de zoetwatervoorraden onder de kreekruigen in Zeeland. De volgende effecten van de grondwateronttrekking zijn onderzocht:

- invloed op de totale zoete grondwatervoorraad.
- invloed op de diepte van de zoet-zout grens (seizoen grens, langjarig effect).
- invloed op het freatisch niveau en de peilen van het open water.

In 1985 was er nog weinig praktische kennis over het onttrekken van grondwater door middel van horizontale onttrekkingen.

Uit het vooronderzoek bleek dat de zoetwaterbel in de omgeving van Heinkenszand een dikte had van ongeveer 20 m beneden maaiveld (variatie tussen 16 en 22 m beneden maaiveld). Op de onderzoekslocatie (ter plekke van de onttrekkingen) bedroeg de dikte van de bel meer dan 20 m. Op de onderzoekslocatie waren 5 onttrekkingen aanwezig, met een diameter van 9 cm, een diepte van 5 m beneden maaiveld en een lengte van 85 m. Vanaf het onttrekkingspunt bestond de eerste 10 meter van de onttrekking uit een blinde buis. De bovenste 30 meter van de ondergrond werd beschreven als een 0-2 m dikke kleiige toplaag met daaronder fijn tot matig zand.

Er werden twee onttrekkingen gekozen voor nader onderzoek. Bij beide onttrekkingen werd in een raai loodrecht op de onttrekking en op ongeveer 10 meter van het bovengrondse einde, een aantal landbouwbuizen geplaatst. In de diepe waarnemingsputten van Provinciale Waterstaat was geen verschil te zien tussen het freatische niveau en de diepe stijghoogte. Er was dus geen sprake van de aanwezigheid van kleilagen die leidden tot stijghoogteverliezen.

Eind september 1985 werd gedurende enige uren water onttrokken aan een van de onttrekkingen. Doel van deze onttrekking was het verkrijgen van een betrouwbaar beeld van het verlagingspatroon rond de onttrekking. Voor de proef werd een aantal extra landbouwbuizen geplaatst buiten de reeds bestaande meetraai. Voor de onttrekking van het water werd gebruik gemaakt van dezelfde pomp die normaal voor de berekening werd gebruikt. Dit is een centrifugaalpompe die wordt aangedreven door de aftak-as van een trekker. De pomp was bij de onttrekkingsproef niet aangesloten op de beregeningsinstallatie; het opgepompte water werd met een korte leiding waarin een watermeter was opgenomen naar de nabij gelegen sloot afgevoerd. De onttrekking werd gestart om tien uur 's morgens en gestopt om half drie 's middags. Het onttrokken debiet liep bij ongewijzigd toerental van de pomp terug van ca. 48 m³ uur⁻¹ aan het begin, tot ca. 44 m³ uur⁻¹ aan het einde van de proef. De grondwaterstand aan het begin van de proef bedroeg op het gehele perceel ca. -0.15 m t.o.v. NAP.

Uit de resultaten kon het volgende gesteld worden:

- Na 3.5 uur pompen met een debiet van ca. $45 \text{ m}^3 \text{ uur}^{-1}$ had de resulterende grondwaterstroming nog geen stationair karakter.
- Boven de onttrekking werden verlagingen van meer dan 3 m waargenomen.
- De verlaging van de grondwaterstand/stijghoogte neemt af met de afstand tot de kop van de onttrekking.
- Op een afstand van 50 m uit de onttrekking bedroeg de optredende verlaging van de grondwaterstand/stijghoogte hoogstens enkele cm.

In 1986 vond vervolgonderzoek plaats. De metingen werden geïntensiveerd, en er vond ook een financiële analyse plaats (welke hier niet uiteen wordt gezet). Gedurende de onttrekkingen werden vlakbij het onttrekkingspunt de grootste verlagingen tot bijna aan het onttrekkingniveau gemeten. Boven het achterste einde van de onttrekking werden veel kleinere verlagingen gemeten. Uit dit verloop van de grondwaterspiegel boven de onttrekking na 8 uur onttrekking kon worden afgeleid dat de onttrekking op dat moment nog niet gelijkmatig over de lengte van de onttrekking verliep. Vooraan bij het onttrekkingspunt werd vermoedelijk aanzienlijk meer water onttrokken dan achteraan. Bij deze laatste waarneming tijdens de onttrekking was echter nog steeds geen stationaire situatie bereikt.

De verplaatsing van het zoet-zout grensvlak werd gemeten aan de hand van chemische analyses van monsters van het onttrokken grondwater. Alle waarnemingen duiden op zoet grondwater; geconcludeerd werd dat het zoet-zout front gedurende het pompen de onttrekking niet dicht heeft genaderd. De vraag is echter of deze conclusie getrokken mag worden op basis van de meetresultaten aangezien de overgang van zoet naar zout grondwater zich nog steeds dicht onder de filters zou kunnen bevinden.

2.3 Kreekruggenonderzoek Zuid Beveland (IWACO)

Rond de jaarwisseling 1988-1989 gaf Provinciale Waterstaat Zeeland opdracht aan ingenieursbureau IWACO B.V. voor een onderzoek naar het kreekruggenstelsel in Zuid-Beveland. Dit onderzoek was verdeeld in de volgende vier fasen:

- 1) Inventarisatie van bestaande gegevens en beschrijving van het geohydrologisch systeem.
- 2) Aanvullend veldonderzoek en detaillering van de beschrijving van het geohydrologisch systeem.
- 3) Modelling.
- 4) Analyse van verschillende varianten met betrekking tot het integrale waterbeheer.

Fase I (deelrapporten I en II)

Deelrapport I (IWACO, 1992b, 1992c) beschrijft een inventariserende studie van het kreekruggenstelsel in Zuid-Beveland. Het deelrapport begint met een samenvatting van eerdere studies. Voorts wordt ingegaan op de geologische formaties die relevant zijn voor de grondwaterstroming (vanwege de nieuwe naamgeving in 2003 worden in voorliggende studie de nieuwe namen gebruikt) en worden waarden voor de doorlatendheid gegeven op basis van korrelgrootteanalyses (zeefkrommen). Alleen de Pleistocene en Holocene formaties zijn beschreven (Figuur 2.2).

De Pleistocene formaties die worden aangetroffen zijn de formaties van Maassluis, Waalre, Eem, Kreftenheye, Boxtel en Koewacht. De Holocene formaties zijn de formaties van Naaldwijk, Kreekrak en Nieuwkoop. Binnen de Holocene formatie van Nieuwkoop kan

onderscheid gemaakt worden tussen het laagpakket van Wormer (voorheen: Afzettingen van Calais; tussen het Basisveen en Hollandveen), het laagpakket van Walcheren (voorheen: afzettingen van Duinkerke, boven Hollandveen), het laagpakket van Schoorl (duinzand) en het laagpakket van Zandvoort (strand- en wadafzettingen). Van een aantal formaties is in Tabel 2.1 een indicatie van de horizontale doorlatendheid (K_h^3 ; $m d^{-1}$) weergegeven op basis van de korrelgrootte-analyse.

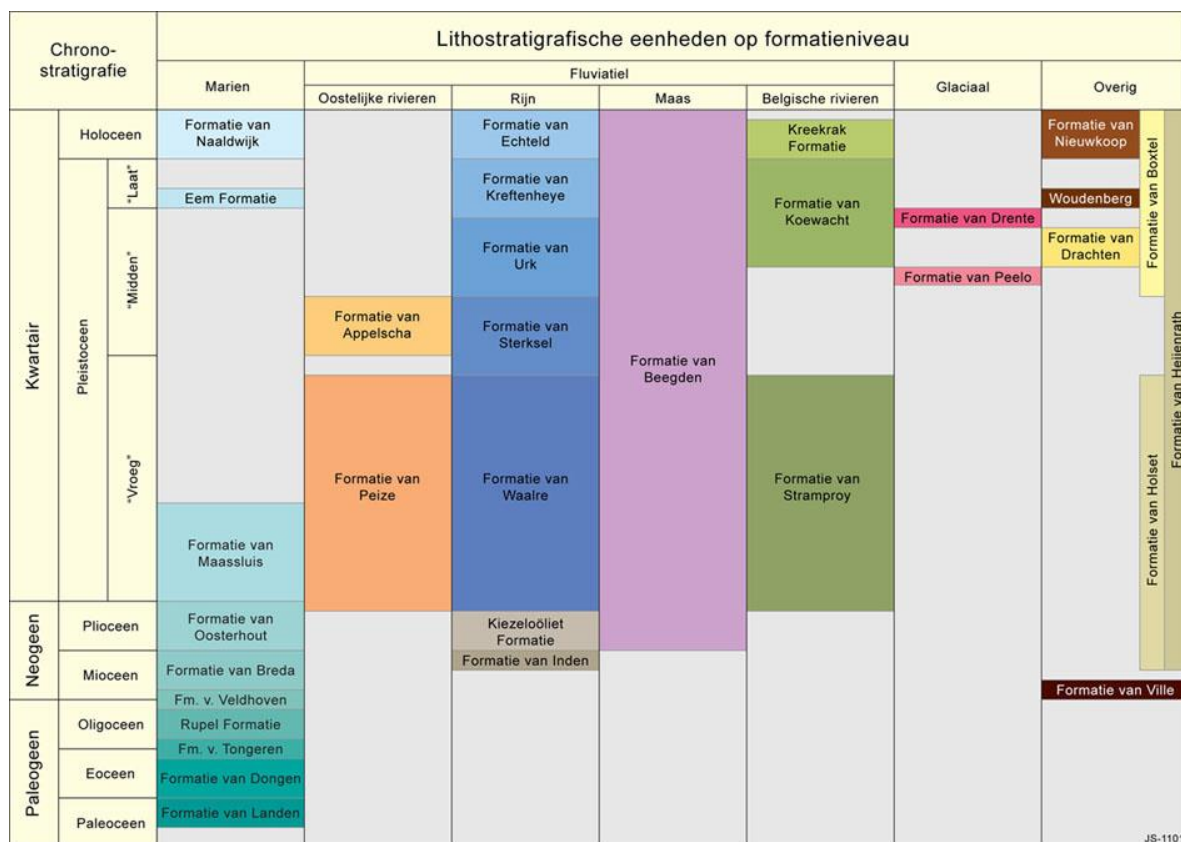
Tabel 2.1: Indicatie van de horizontale doorlatendheid (K_h ; $m d^{-1}$) van een aantal formaties op basis van de korrelgrootte-analyses die door IWACO zijn uitgevoerd.

Formatie	K_h ($m d^{-1}$)	Opmerking
Maassluis	< 1	Zeer variabel door variatie in kleigehalte
Waalre	10	Zeer variabel, waarde gebaseerd op pompproef
Eem	10	Zeer variabel
Boxtel	3	Zeer variabel

De kleilagen van de laagpakketten van Wormer en Walcheren hebben een zeer lage doorlatendheid waar weinig over bekend was.

Het zandige materiaal van de kreekruggen behoort tot het laagpakket van Walcheren. Uit de zeefkrommen volgt een horizontale doorlatendheid van 3 - 12 $m d^{-1}$. Uit een pompproef bij het infiltratie-experiment in Kapelle volgde een horizontale doorlatendheid van ongeveer 10 $m d^{-1}$ (Tabel 2.1). Op verschillende plaatsen worden dunne kleilaagjes aangetroffen. Op grotere schaal is hier dus sprake van heterogeniteit. Op grotere schaal kan dit zich manifesteren in anisotropie; de verticale doorlatendheid is lager dan de horizontale.

³ In dit rapport worden de gangbare (en in dit rapport gebruikte) eenheden vermeld achter elke eerste keer dat een parameter gedefinieerd wordt.



Figuur 2.2: Lithostratigrafie (op formatieniveau) van Nederland:
<http://www2.dinoloket.nl/nomenclatorShallow/start/start/introduction/tabel4-1.html>

De deklaag bestaat uit klei, leem en veenlagen die voornamelijk tot de Formatie van Naaldwijk behoren. Over de hydraulische weerstand was destijds weinig bekend.

De inventariserende studie beschrijft verder representatieve data van de neerslag, verdamping en grondwateraanvulling. De grondwateraanvulling N ($m\ d^{-1}$) werd berekend met:

$$N = P - f E_{ref} = P - E_p \tag{1}$$

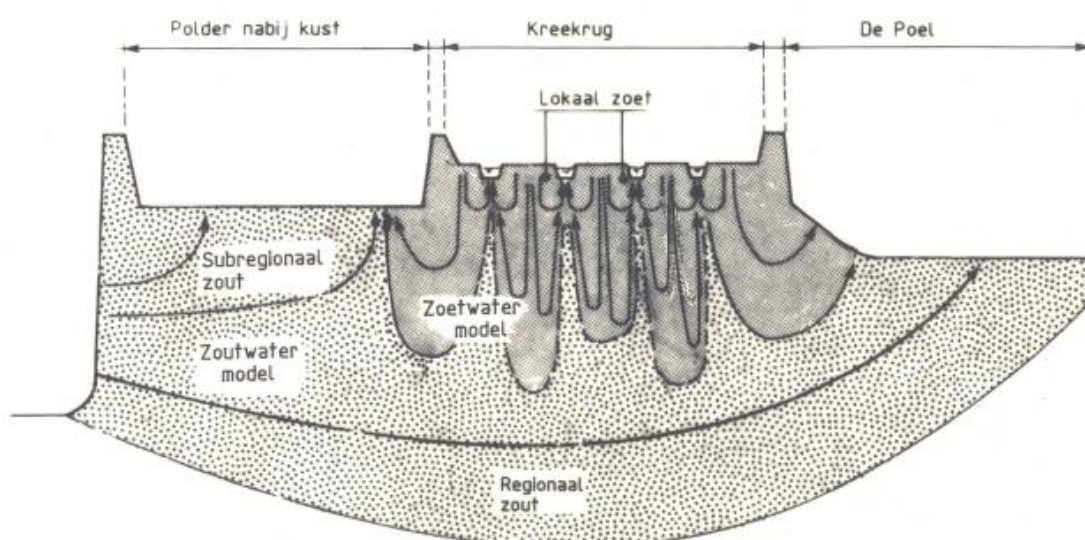
waarbij P ($m\ d^{-1}$) de neerslag, E_{ref} ($m\ d^{-1}$) de referentieverdamping, E_p ($m\ d^{-1}$) de actuele potentiële verdamping en f de (dimensieloze) gewasfactor is. De gewasfactor is onder andere seizoensafhankelijk (ontwikkeling gewas) en gewasafhankelijk.

Fase II (deelrapporten I en II)

In deze fase werd aanvullend onderzoek verricht in de vorm van veldonderzoek ter voorbereiding op fase III (zijnde de modellering van grond- en oppervlaktewaterstroming) (IWACO, 1992b, 1992c).

Het aanvullende veldonderzoek bestond uit boringen / 'puntproeven' (hydrogeologie / doorlatendheden), grondwaterstandmetingen, temperatuurmetingen peilbuizen (grondwaterstroming kreekrug), zoet-zout grensvlak metingen (sonderingen en elektromagnetische inductie technieken), hydrochemische analyses van grond- en oppervlaktewater en afvoermetingen van oppervlaktewateren. Uit het aanvullende veldonderzoek is het volgende geconcludeerd:

- De stroming van het zoete grondwater bestaat uit lokale grondwatersystemen in de kreekruigen; stroming vindt plaats van infiltrerende neerslag door het watervoerende pakket naar de dichtstbijzijnde waterloop (Figuur 2.3).
- Een subregionaal zoet grondwatersysteem is waarschijnlijk niet aanwezig.
- De drainerende waterlopen beïnvloeden de ligging van het zoet-zout grensvlak sterk. Uitbreiding wordt verhinderd door drainage. Het grensvlak vertoont door de drainerende werking van sloten een grillig patroon.
- Het grensvlak is kwetsbaar voor het omhoog komen door onttrekking.
- Er wordt sterk aangeraden horizontale onttrekkingen te gebruiken voor de onttrekking.



Figuur 2.3: Schematisatie van lokale grondwatersystemen onder kreekruigen. Uit: IWACO (IWACO, 1992b).

Voor de hydraulische weerstand van de (meestal Holocene) deklaag wordt een waarde van 200 d per meter aangenomen. De gemiddelde doorlatendheden van het eerste watervoerende pakket en de kreekruigen zijn in Tabel 2.2 weergegeven (de waarden van de Formatie van Boxtel en Eem wijken af van de waarden in Tabel 2.1). De onderliggende pakketten zijn wel beschreven, maar zijn in voorliggend rapport niet opgenomen.

Tabel 2.2: De gemiddelde doorlatendheden van het eerste watervoerende pakket en de kreekruigen (IWACO, 1992b).

Formatie	Doorlatendheid (m d ⁻¹)
Naaldwijk; Laagpakket Walcheren (kreekruigen)	10
Naaldwijk; Laagpakket Wormer	8
Boxtel	5

De drainageafstanden die in Zeeland worden gebruikt staan in Tabel 2.3. 90% van de gronden wordt gedraineerd; alleen op de hoge (kreekrug)zandgronden wordt niet gedraineerd.

Tabel 2.3: Drainageafstanden per grondgebruik.

Grondgebruik	Afstand drains (m)
Akkerbouw	10 – 16
Weiland	12 - 20
Tuinbouw (fruitteelt)	7 - 12

Van de grondwatersystemen die zich onder de kreekruggen en onder de daaraan aangrenzende gebieden bevinden, is het lokale zoet-grondwatersysteem dominant. Dit blijkt uit de opbolling van de grondwaterstand tussen de waterlopen, uit temperatuurmetingen nabij waterlopen, uit een grillig isohypsenpatroon van het eerste watervoerende pakket en uit de ligging van het zoet-zout grensvlak nabij waterlopen.

Fase III (deelrapporten I en II)

Deze fase beschrijft het modelonderzoek. Het modelgebied strekt zich uit van de Sloehaven tot aan het Kanaal door Zuid-Beveland en wordt begrensd door het Veerse Meer, de Ooster- en Westerschelde. Het model is onderverdeeld in een zoutwater-model en een zoetwater-model, ter bepaling van de respectievelijk de zoutwaterstijghoogten, zoetwaterstijghoogten en het zoet-zout grensvlak. Binnen het zoetwatermodel met een regionaal karakter is tegelijkertijd meer gedetailleerd gerekend in het gebied ten westen van Heinkenszand.

Na ijking van de modellen zijn enkele proefvarianten doorgerekend, waarbij waterhuiskundige ingrepen zijn gesimuleerd. Enerzijds zijn maatregelen gesimuleerd ter vergroting van de voorraad zoet grondwater; verhoging van de polderpeilen en vermindering van het aantal waterlopen in het modelgebied. De eerste maatregel heeft een beduidend groter effect op de vergroting van de zoet grondwatersystemen dan de tweede maatregel. Anderzijds zijn twee verschillende onttrekkingen gesimuleerd: een groot aantal verspreide onttrekkingen en een aantal grootschalige onttrekkingen. Uit de berekeningen blijkt dat beide onttrekkingen mogelijk zijn, mits het zoete grondwatersysteem een voldoende dikte heeft en men niet in de nabijheid van een waterloop onttrekt. Ter bepaling van het effect van de verspreide onttrekkingen zijn tevens enkele niet-stationaire berekeningen uitgevoerd.

Het model is opgebouwd met behulp van het programmapakket TRIWACO/TRACE. Met dit pakket kan de ligging van het zoet-zout grensvlak in een evenwichtssituatie worden berekend. Het zoet-zout grensvlak kan niet door de tijd heen verplaatsen en er vindt geen massatransport (dispersie en diffusie) plaats door het grensvlak.

Enkele conclusies van het rapport zijn:

- Van de grondwatersystemen die op de kreekruggen en de aangrenzende gebieden een rol spelen is het lokale zoet-grondwatersysteem zeer dominant.
- De invloed van de oppervlaktewatersysteem op de zoet-zout verdeling is zeer groot.
- Het zoete grondwatersysteem onder de kreekruggen vormt geen aaneengesloten systeem. De zoete grondwatersystemen blijken zich tussen twee doorgaande waterlopen (apart) te ontwikkelen. De begrenzing van de systemen wordt echter niet veroorzaakt door de kleinere waterlopen.

2.4 Gebruiksmogelijkheden grondwater (IWACO studie uit 1992)

Dit rapport (IWACO, 1992a, 1992b, 1992c) kan beschouwd worden als een regionalisering van de resultaten van het kreekruggenonderzoek op Zuid-Beveland (zie vorige sectie). Er is onderscheid gemaakt tussen de volgende gebruiksmogelijkheden voor onttrekkingen:

- 1) Grootschalige lijnonttrekkingen.
- 2) Landbouwonttrekkingen in combinatie met geofysisch onderzoek.
- 3) Landbouwonttrekkingen in combinatie met verzoetende maatregelen.
- 4) Landbouwonttrekkingen als gebruiksmogelijkheid in de toekomst na verzoetende maatregelen.
- 5) Geen onttrekkingsmogelijkheden.

Onder landbouwonttrekkingen worden verspreid over het gebied liggende onttrekkingen verstaan met een relatief gering debiet ten behoeve van beregeningsinstallaties voor landbouw en fruitteelt. Onder grootschalige onttrekkingen worden onttrekkingen verstaan voor andere doeleinden op meer geconcentreerde locaties met grotere debieten dan voor landbouwdoeleinden gebruikelijk (denk aan winningen voor de drinkwatervoorziening).

Voor de bovenstaande categorieën gebruiksmogelijkheden zijn de gehanteerde uitgangspunten als volgt geformuleerd:

Grootschalige lijnonttrekkingen

De onttrekkingen moeten i.c.m. verzoetende maatregelen plaatsvinden. Het opzetten van het polderpeil wordt als meest effectief omschreven. De onttrekkingen vinden plaats middels puttenrijen of horizontale onttrekkingen voor een zo'n groot mogelijke ruimtelijke spreiding van de onttrekking. Voorafgaand aan het plaatsen van de onttrekking dient nader onderzoek van het zoetwatersysteem uitgevoerd te worden.

Kenmerken:

- Diepte zoetwatersysteem: tenminste 20 m,
- Breedte en lengte zoetwatersysteem tenminste 1500 m,
- Peilopzet met minimaal 0.3 m mogelijk tot maximaal 1 m beneden maaiveld, waarbij de resulterende grondwaterstand niet tot 0.8 m –mv mag stijgen,
- Oppervlaktewater is zoet,
- Deklaag is dunner dan 5 m.

Landbouwonttrekking in combinatie met geofysisch onderzoek

Kenmerken:

- Onttrekking vindt plaats door middel van horizontale onttrekkingen op ca. 5 m diepte,
- Diepte zoetwaterbel meer dan 15 m. Tussen 10-15 m dient aanvullend onderzoek te worden uitgevoerd,
- Breedte en lengte zoetwatersystemen tenminste 600 m.

Landbouwonttrekkingen in combinatie met verzoetende maatregelen

Kenmerken:

- Onttrekking via horizontale onttrekkingen op 5 m,
- Diepte zoetwatersystemen tenminste 7.5 m,
- Breedte en lengte zoetwatersystemen tenminste 600 m,
- Peilopzet met minimaal 0.3 m mogelijk tot maximaal 1 m beneden maaiveld, waarbij de resulterende grondwaterstand tot maximaal 0.8 m –mv mag stijgen,
- Oppervlaktewater is zoet,
- Dikte deklaag is minder dan 5 m.

Landbouwonttrekkingen als gebruiksmogelijkheid in de toekomst na verzoetende maatregelen

- Onttrekking via horizontale onttrekkingen op 5 m,
- Diepte zoetwatersystemen 2-5 m,

- Peilopzet van minimaal 0.5 m mogelijk tot maximaal 1 m beneden maaiveld, waarbij de resulterende grondwaterstand tot maximaal 0.8 m –mv mag stijgen,
- Oppervlaktewater zoet,
- Dikte deklaag minder dan 5 m.

De regionale gegevens van de diepte van het zoet-zout grensvlak was destijds gebrekkig. Aan de hand van de destijds beschikbare regionale gegevens is over de gehele provincie een kaart gepresenteerd, met daarin gebieden aangegeven per categorie van de in deze sectie vijf genoemde gebruiksmogelijkheden.

De gebieden zijn begrensd met inachtneming van een afstand van 300 m ten opzichte van de rand van het zoetwatersysteem. Zeeuws Vlaanderen vormt daarop een uitzondering.

In bijlage 2 van het rapport wordt een aanbeveling gedaan van de hoeveelheden grondwater die per categorie kan worden onttrokken. Hier worden alleen de landbouwonttrekkingen besproken. Het grondwater dient onttrokken te worden door middel van horizontale onttrekkingen op een maximale diepte van 5 m –mv. De onttrokken hoeveelheid per meter lengte van de onttrekking mag maximaal 10 m³ per maand bedragen gedurende het groeiseizoen. Afhankelijk van de diepte van het zoetwatersysteem kunnen de volgende eisen ten aanzien van de onttrekkingslocatie worden geformuleerd:

- 1) Diepte zoetwaterbel > 15 m: de onttrekking dient ten minste op 300 m afstand van de rand van het zoetwatersysteem en op ten minste 25 m afstand van aanwezige waterlopen gelegd te worden. De afstand tot andere onttrekkingen moet ten minste 200 m bedragen.
- 2) Diepte zoetwaterbel tussen 10 en 15 m. Geofysisch vooronderzoek is vereist. Locatie onttrekking op tenminste 300 m van de rand van zoetwatersysteem en op tenminste 50 m van waterlopen. De afstand tot de andere onttrekkingen moet tenminste 250 m bedragen.
- 3) Landbouwonttrekkingen in combinatie met verzoetende maatregelen. Het grondwater dient onttrokken te worden door middel van horizontale onttrekkingen op een maximale diepte van 5 m –mv. de onttrokken hoeveelheid per meter onttrekking mag maximaal 10 m³ per maand bedragen gedurende het groeiseizoen. De onttrekkingslocatie dient zich tenminste 300 m van de rand van het zoetwatersysteem te bevinden en op tenminste 50 m afstand van waterlopen. De afstand tot andere onttrekkingsen moet tenminste 250 m zijn.

2.5 Praktijkproef beregning Oostkapelle (IWACO studie uit 1996)

Dit rapport beschrijft één van de praktijkproeven die in de jaren 1990 werd gestart (IWACO, 1996) ter onderbouwing van het grondwaterbeleid ten aanzien van beregning uit kleine zoetwatervoorraden in kreekruigen. De praktijkproef vond plaats op het terrein van dhr. Korstanje, in Oostkapelle.

Ter plaatse van het perceel bevindt zich een relatief dun freatisch pakket, dat aan de onderzijde begrensd wordt door een kleilaag op 8.5 m –mv. In het freatisch pakket bevindt zich zoet grondwater. Onder deze kleilaag bevindt zich het 1^{ste} watervoerende pakket, dat zout grondwater bevat. De kleilaag bleek het omhoog komen van het zoet-zout grensvlak dusdanig te beïnvloeden (d.w.z. het grensvlak kwam niet noemenswaardig omhoog) dat men concludeerde dat deze proef niet representatief is. Het zoet-zout grensvlak zal in het geval van afwezigheid van een kleilaag veel sneller omhoog komen.

2.6 Kreverhille praktijkproef (IWACO studie uit 2000)

Bij de toenmalige vergunningsverlening moest een grondwateronttrekking ten behoeve van beregening voldoen aan een aantal normen. Volgens deze normen moest het zoet-zout grensvlak (vastgesteld op circa $1500 \text{ mg Cl l}^{-1}$) zich ter plaatse van de onttrekking op een diepte van minimaal 15 meter ten opzichte van het maaiveld bevinden. De totaal te onttrekken hoeveelheid grondwater per jaar was 8000 m^3 , met maximaal 1000 m^3 per maand en 3000 m^3 per seizoen.

Het doel van de praktijkstudie bij Kreverhille (Zeeuws Vlaanderen) was om vast te stellen of de normen van destijds (en die grotendeels nog steeds gelden) voor de hierboven beschreven vergunningsverlening voldeden en of deze nog konden worden verruimd (IWACO, 2000). Middels een beregeningsproef werd onderzocht of een duurzame winning mogelijk is als het zoet-zout grensvlak zich op een diepte bevindt die minder is dan 15 meter. Uitgangspunt ten aanzien van duurzaamheid was daarbij dat de diepte van het zoet-zout grensvlak door de onttrekking niet blijvend verandert.

Het onttrekkingssysteem bestond uit een verticale en horizontale onttrekking. Tijdens de beregeningsproef werd alleen de horizontale onttrekking gebruikt. Het zoet-zout grensvlak bevond zich tussen de 10 en 11 meter. Hieronder volgen een aantal conclusies van de proef:

- De grondwaterstandsmetingen lieten zien dat het hydrogeologische systeem snel reageert als gevolg van een onttrekking. De beregeningsproef liet zien dat de grondwaterstand vrijwel direct na de start van de onttrekking daalt in alle (dichtbijgelegen) peilbuizen. De verschillende onttrekkingen in de periode vóór de proef en de onttrekking van proef zelf hebben aangetoond dat de grondwaterstand zich snel herstelt (in de orde van enkele uren).
- In vrijwel alle peilbuizen werd een stijging van de chlorideconcentratie gemeten. Ruim 5 maanden na het beëindigen van de beregeningsproef had de chlorideconcentratie de oorspronkelijke waarde in de peilbuizen nog steeds niet bereikt. Na beëindiging van een onttrekking was in eerste instantie wel een daling van de chlorideconcentratie zichtbaar, maar deze stabiliseerde zich op een waarde die aanzienlijk hoger lag dan de oorspronkelijke waarde.
- De VES metingen rondom de onttrekking gaven aan dat het zoet-zout grensvlak nabij de bron en het midden van het perceel sinds de nulmeting in maart 1997 circa 3-4 m hoger is komen te liggen dan voorheen gemeten.
- Ondanks de grotere hoeveelheid neerslag (20 mm) voorafgaand aan de beregeningsproef en de lager dan toegestane onttrokken hoeveelheid onttrokken grondwater (630 m^3 i.p.v. 1000 m^3 -horend bij zoet-zout grensvlakken dieper dan 15 m-) kon het zoet-zout grensvlak zich onvoldoende herstellen na 5.5 maand. Op basis hiervan werd in het rapport daarom aangeraden om voor een dergelijke locatie (uniforme ondergrond zonder storende kleilagen en een zoet-zout grensvlak ondieper dan 15 m -mv) de huidige norm niet te verruimen en in dergelijke gevallen geen onttrekkingsvergunning te verlenen. Of dit een terechte conclusie is, zal in voorliggend rapport niet verder worden besproken.

Uit de vervolgproef in de periode 2003-2006 (Royal Haskoning, 2006) wordt geconcludeerd dat bij een zoetwaterbel met een dikte van minder dan 15 m onttrekking van grondwater kan worden toegestaan zonder de duurzaamheid van de bel aan te tasten. Dit is uiteraard afhankelijk van de te onttrekken hoeveelheid en duur van de onttrekking. Aangeraden werd om de huidige vergunningseisen te handhaven. De vraag of de normen kunnen worden verruimd was lastig te beantwoorden. Dit is afhankelijk van de bodemopbouw en heersende zoet-zout gradiënt. Op basis van deze studie wordt aangeraden de huidige norm van 15 m diepte aan te houden, als veilige ondergrens. De diversiteit aan systeemkenmerken en de

beperktheid van één / enkele praktijkproeven maakten verdergaande inschatting onmogelijk. In de huidige studie kunnen we nu middels detailmodellen de inzichten nu wel verfijnen/uitwerken. Dit zal verder duidelijk worden in de volgende hoofdstukken.

2.7 Huidige regels onttrekken grondwater in de provincie Zeeland

De huidige regels voor het onttrekken van grondwater in de provincie Zeeland zijn beschreven in de 'Beleidsnota grondwater versie 3.5' van Waterschap Scheldestromen (Scheldestromen, 2013). De regels zijn grotendeels vergelijkbaar met de regels volgens het Grondwaterbeheersplan Zeeland 2002-2007 van de Provincie Zeeland (Provincie Zeeland, 2002). Beide documenten lopen 31 december 2018 af. De hoofddoelstelling is een goede kwantitatieve en chemische toestand van het grondwater, afgestemd op de functies van het gebied. Een belangrijk aspect daarvan is de instandhouding van de zoetwatervoorkomens.

Voor onttrekkingen voor beregening in de landbouwonttrekkingen kunnen de volgende regels van toepassing zijn:

- 1) *Registratie*. Deze regel bestaat uit het éénmalig melden van de onttrekking en het meten en jaarlijks opgeven van de onttrokken hoeveelheden.
- 2) *Vergunning*. Deze regel is van toepassing wanneer volgens de regels er een vergunning moet worden aangevraagd voor de grondwateronttrekking.
- 3) *Algemene regels*. Voor bepaalde onttrekkingen hoeft geen vergunning te worden aangevraagd omdat ze zijn uitgezonderd van vergunningplicht of omdat daarvoor, in de plaats van individuele vergunningplicht, 'algemene regels' gelden. Hierbij moet een melding bij het waterschap worden gedaan.

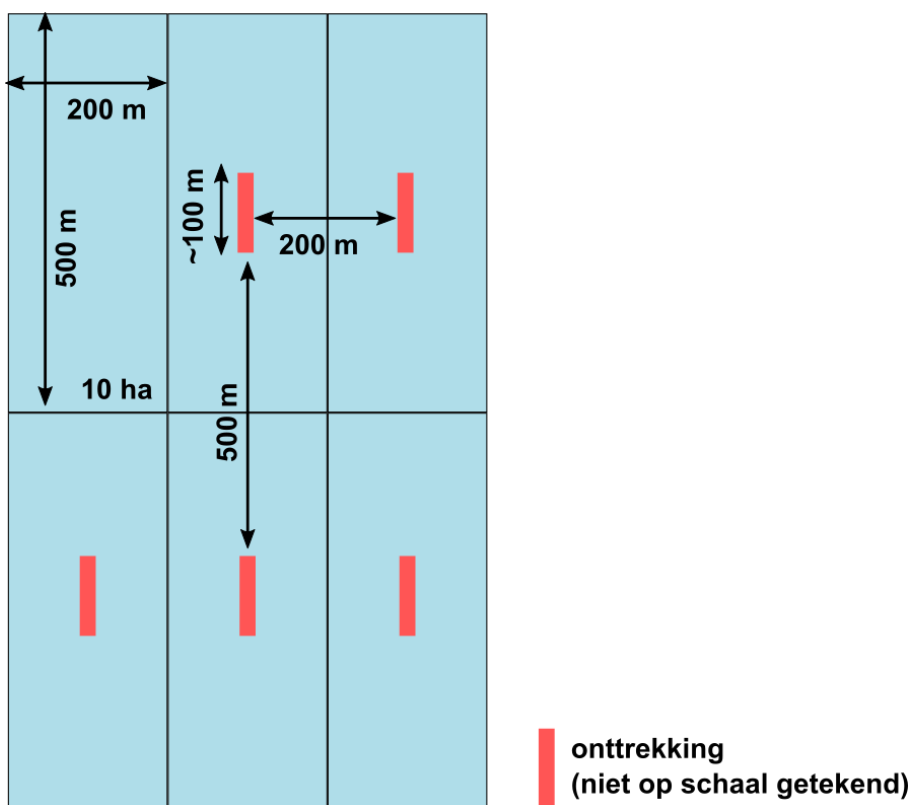
In de regels is zoet grondwater gedefinieerd als water met een chlorideconcentratie tot 1500 mg Cl l⁻¹. Indien het grondwater een hogere chlorideconcentratie heeft, is er sprake van zout grondwater. Gebieden met zoetwatervoorkomens omvatten zoetwaterbellen met een dikte van minimaal 15 meter of waar de zoetwaterbel reikt tot aan de geohydrologische basis. In Figuur 2.5 zijn de zoetwatervoorkomens zoals toegepast in de keur weergegeven. Verder is de kwetsbaarheid van het gebied van belang. In kwetsbare gebieden gelden, vanwege de gevoeligheid van hydro(geo)logische ingrepen, strengere regels dan in niet-kwetsbare gebieden. De in deze sectie beschreven regels hebben toepassing op gebieden die buiten kwetsbare gebieden vallen. In dit hoofdstuk 2 is verder de nadruk gelegd op landbouwonttrekkingen uit zoetwaterbellen onder kreekruggen, en op de algemene regels die hiervoor gelden.

Indien de pompcapaciteit kleiner is dan 5 m³ per uur zijn onttrekkingen vrijgesteld van registratieplicht, op voorwaarde dat er niet meer dan 12000 m³ per jaar wordt onttrokken. Bij een groter jaarlijks volume en/of een debiet van groter dan 5 m³ per uur én kleiner dan 10 m³ per uur geldt de registratieplicht. Indien men met een hoger debiet wil onttrekken, dan kan in gebieden waar de zoetwaterbel dikker is dan 15 m of reikt tot de geohydrologische basis worden volstaan met de algemene regels, mits er aan de criteria wordt voldaan die hieronder en in Tabel 2.4 zijn weergegeven. Alle overige onttrekkingen voor beregening vallen onder de vergunningsplicht.

Indien de algemene regels van toepassing zijn, gelden er momenteel voor de onttrekkingen de volgende eisen:

- 1) De inrichting moet bestaan uit een horizontale onttrekking, op een diepte van maximaal 6 m beneden het maaiveld. Dit geldt niet in de gebieden waar de

- zoetwaterbel reikt tot aan de geohydrologische basis en er daarom geen risico bestaat voor verzilting;
- 2) De afstand tussen het onttrekkingsmiddel en de aanwezige waterlopen moet minimaal 25 m bedragen;
 - 3) De afstand tot andere onttrekkingsmiddelen moet minimaal 200 m bedragen (zie Figuur 2.4);
 - 4) De te onttrekken hoeveelheid grondwater mag niet meer bedragen dan 800 m^3 per jaar per hectare van het perceel (of de percelen) waarbinnen het onttrekkingsmiddel is geplaatst (om dit met een voorbeeld te duiden: met een inrichting die is geplaatst op een perceel van 6 hectare mag per jaar maximaal $6 \times 800 = 4.800 \text{ m}^3$ grondwater worden opgepompt). Er geldt hier een maximum van 10 ha (8000 m^3), dat gerelateerd is aan het vastgestelde buffergebied rondom de onttrekking (Figuur 2.4). Dus ook voor een perceel van bijv. 20 ha. mag voor één onttrekking maximaal 8000 m^3 grondwater op jaarbasis worden onttrokken.
 - 5) De afstand tot percelen van derden dient tenminste 50 m te bedragen (hiervan kan ontheffing worden verleend).



Figuur 2.4: Vastgesteld buffergebied rondom een landbouwonttrekking (blauwe vlakken). In deze situatie bevindt de dichtstbijzijnde onttrekking zich op 200 m van een andere onttrekking. In de richting loodrecht op deze onttrekking moet zich een onttrekking op (minimaal) 500 m afstand bevinden om tot 10 ha (totale oppervlakte buffergebied) te komen. De lengte van de onttrekking is in dit geval ~80-100 m, gebaseerd op praktijksituaties. In de regelgeving is echter geen expliciete eis ten aanzien van de lengte van de onttrekking meegenomen.

Dezelfde regelgeving zoals hierboven beschreven geldt ook voor landbouwonttrekkingen in gebieden waar de zoetwaterbel reikt tot aan de geohydrologische basis, zoals in de dekzandgebieden in Zeeuws-Vlaanderen. Ook buiten de aangegeven gebieden kunnen

zoetwaterbellen van meer dan 15 meter dik in de bodem voorkomen. Als dit wordt aangetoond kan ook daarop basis van algemene regels grondwater voor beregening worden onttrokken.

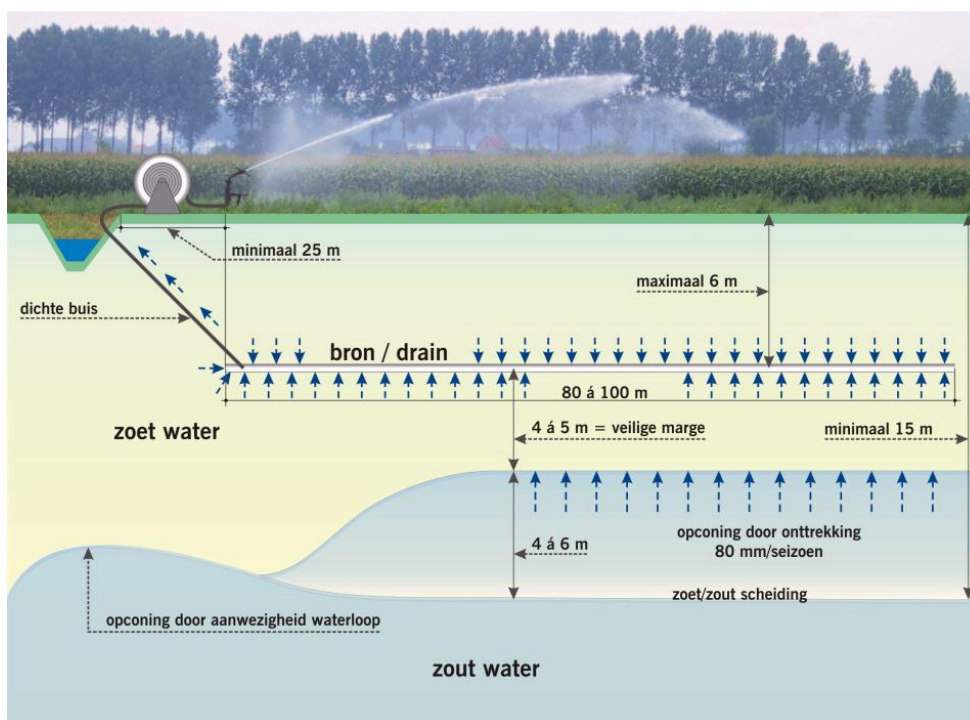


Figuur 2.5: Zoetwatervoorkomens en kwetsbare gebieden. Uit: <http://scheldestromen.maps.arcgis.com>. De donkergroene gebieden geven natuurgebieden aan, de lichtgroene gebieden een bufferzone met een lengte van 300 m. De zoetwatervoorkomens zijn de gearceerde gebieden.

Tabel 2.4: Regels voor onttrekkingen in de provincie Zeeland. Q is te onttrekken hoeveelheid grondwater per tijdseenheid.

REGIEM	KWETSBAAR GEBIED	
	zoet	zout
Registratie	$Q > 0 \text{ m}^3$ per uur	$Q > 0 \text{ m}^3$ per uur
Vergunningplicht	$Q > 0 \text{ m}^3$ per uur	$Q > 0 \text{ m}^3$ per uur
Algemene regels (meldplicht i.p.v. vergunningplicht), alleen voor tijdelijke onttrekkingen	$Q < 100 \text{ m}^3$ per uur en $Q < 1.000 \text{ m}^3$ per maand en duur < 6 maanden	$Q < 100 \text{ m}^3$ per uur en $Q < 1.000 \text{ m}^3$ per maand en duur < 6 maanden
NIET-KWETSBAAR GEBIED		
Registratie (meldplicht i.p.v. vergunningplicht)	Pompcapaciteit > 5 m^3 per uur $Q < 12.000 \text{ m}^3$ per jaar	Pompcapaciteit > 5 m^3 per uur $Q < 12.000 \text{ m}^3$ per jaar
Vergunningplicht	$Q > 10 \text{ m}^3$ per uur of $Q > 1.000 \text{ m}^3$ per maand of $Q > 8.000 \text{ m}^3$ per jaar	$Q > 10 \text{ m}^3$ per uur of $Q > 30.000 \text{ m}^3$ per jaar
Algemene regels (meldplicht i.p.v. vergunningplicht), alleen voor tijdelijke onttrekkingen	$10 < Q < 100 \text{ m}^3$ per uur en $Q < 3.000 \text{ m}^3$ per kwartaal en duur < 6 maanden	$10 < Q < 100 \text{ m}^3$ per uur en $Q < 15.000 \text{ m}^3$ per maand en $Q < 30.000 \text{ m}^3$ per 6 maanden ¹ en duur < 6 maanden
Algemene regels (meldplicht i.p.v. vergunningplicht), alleen voor beregening uit zoetwaterbellen > 15 meter of zoetwaterbellen tot de geo-hydrologische basis	$10 < Q < 60 \text{ m}^3$ per uur en $Q < 3.000 \text{ m}^3$ per kwartaal en $Q < 8.000 \text{ m}^3$ /jaar	

¹Deze beperking geldt niet voor sleufbemalingen.



Figuur 2.6: Grafische toelichting op de onttrekkingsregels. Uit: Grondwaterbeheersplan Zeeland 2002-2007 overgenomen in Beleidsnota grondwater Versie 3.5 van Waterschap Scheldestromen.

In de regelgeving over grondwateronttrekkingen omvat de term kwetsbaar gebied natuurgebieden, gebieden met de functie landbouw/natuur (beiden met hun hydrologisch invloedgebied / bufferzone), en grondwaterbeschermingsgebieden (inclusief waterwingebieden). Deze gebieden zijn in de Provinciale Milieuverordening aangewezen. Voor de bufferzone van deze kwetsbare gebieden wordt overal dezelfde breedte genomen, namelijk 300 m afstand vanaf de grens van het natuurgebied. Daarop gelden de volgende uitzonderingen:

- de binnendijkse zone grenzend aan buitendijkse natuurgebieden waar natuurwaarden door het getij worden bepaald;
- als de grens van een te beschermen gebied samenvalt met de grens van (groot) oppervlaktewater, zoals kreken en kanalen, dan vervalt aan die zijde de bufferzone.

2.8 Aannames in algemene regels voor permanente onttrekkingen en niet-kwetsbare, zoete gebieden

De in de vorige sectie beschreven onttrekkingsregels vertonen grote gelijkenissen met de aanbevelingen die door IWACO (sectie 2.4) zijn opgesteld eind jaren 1980, en zijn daar dus grotendeels op gebaseerd. Ook de vervolgstudies van IWACO (IWACO, 1992a, 1992b, 1992c) hebben bijgedragen aan de regelgeving, maar hebben niet geleid tot grote veranderingen. Dit betekent dat de regelgeving gebaseerd is op de resultaten van de modellering van destijds, inclusief de aannames die daar aan ten grondslag lagen.

Een belangrijke algemene aanname in de modellering is dat de overgang tussen zoet en zout grondwater abrupt (scherp, dus zonder menging) is, zoals ook beschreven in sectie 2.1. Voor de modellering betekent dit dat het onttrokken grondwater óf zoet is, óf zout; nuances met oplopende brakke chlorideconcentraties zijn niet mogelijk. In werkelijkheid is er echter sprake van een overgangszone waarin het zoutgehalte geleidelijk toeneemt van zoet water naar de maximale concentratie van het onderliggende zoute grondwater. Onder onttrekkingen kan de overgangszone aanzienlijk zijn vanwege de dynamiek van de (verticale) grondwaterstroming; dit proces was destijds niet meegenomen. Ook is in de modellen de Dupuit aanname toegepast waarmee verticale stijghoogteverschillen worden verwaarloosd.

Uit de beschikbare gegevens valt niet op te maken waar de 300 m zone op gebaseerd is. In overleg met Provincie Zeeland is besloten om de te hanteren bufferzone opnieuw te analyseren aan de hand van modellen. Het uitgangspunt hierbij is de bufferzone in relatie tot de debieten binnen de algemene regels (Tabel 2.4).

In relatie tot de onderzoeksaspecten van deze huidige studie (sectie 1.2) kan over de modellering van destijds het volgende worden gesteld:

a) Heterogeniteit van de ondergrond

De numerieke modellering is verricht op basis van een homogene, anisotrope hydraulische doorlatendheid binnen een modellaag die één hydrogeologische eenheid voorstelt (bijvoorbeeld de deklaag of het 1e watervoerende pakket). Inmiddels zijn nieuwe modellen voorhanden zoals GeoTOP van TNO Geologische Dienst Nederland (Stafleu et al. 2010; Stafleu en Gunnink 2016), waarmee ook binnen deze hydrogeologische eenheden informatie beschikbaar is over de variatie in doorlatendheid en lithologie.

b) Grondwateraanvulling en klimaatverandering

In de numerieke modellering is men destijds uitgegaan van een stationaire benadering voor wat betreft de positie van het zoet-zout grensvlak. Effecten van klimaat zijn niet onderzocht. Ook in de regelgeving zijn de effecten van klimaatverandering niet opgenomen.

c) Zeespiegelstijging

De invloed van zeespiegelstijging is niet meegenomen in zowel de modellering als de regelgeving.

d) Fysiogeografische kenmerken

De invloed van bijvoorbeeld een drainage in de buurt van een grondwateronttrekking is onderzocht, zij het met behulp van diverse (vereenvoudigende) aannames. In de regelgeving is ook een afstand tot andere onttekkingsen en drainage (waterloop) opgenomen. Een tweede fysiografisch kenmerk is de diepte van het zoet-zout grensvlak. Hierbij is de '15 meter zoet-zout grensvlak' een belangrijke grens in de regelgeving. De FRESHEM studie (van Baaren et al., 2017) in de provincie Zeeland (zie volgend hoofdstuk 3) laat zien dat er ook een flink areaal aanwezig is waar de zoetwaterbellen (iets) minder dik zijn.

e) Zoetwatervoorzieningsmaatregelen

Hoewel in de IWACO studies uit de jaren 1980 en 1990 de invloed van zoetwatervoorzieningsmaatregelen (peilopzet) en de invloed daarvan op de onttekkingsen is onderzocht, is dit aspect niet meegenomen in de regelgeving. Recente onderzoeken hebben laten zien dat ondergrondse waterbergingsactiviteiten (zoals bijv. uitgevoerd in GO-FRESH (Oude Essink et al. 2014)) kunnen leiden tot een toename van de zoetwatervoorraad en –gebruik. Ook dit is niet meegenomen in de regelgeving.

f) Onttekkingsstypes en -configuraties

Veel horizontale onttekkingsen hebben een lengte van 80 – 100 m, maar dit is niet expliciet meegenomen in de regelgeving. In de regelgeving zijn wel aspecten over de locatie en het onttekkingsregime meegenomen. Deze aspecten zijn grotendeels gebaseerd op de IWACO studies uit de jaren 1980 en 1990.

Sinds de jaren 1990 zijn er veel nieuwe inzichten verworven. Deze inzichten worden in het volgende hoofdstuk nader beschreven.

3 Overzicht van nieuwe kennis en inzichten op het gebied van grondwateronttrekkingen in Zeeland

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van nieuwe kennis en inzichten die vergaard zijn ná het opstellen van het Grondwaterbeheersplan Zeeland 2002-2007, betreffende de volgende onderwerpen:

- Heterogeniteit van de ondergrond
- Grondwateraanvulling en klimaatverandering
- Zeespiegelstijging
- Fysiogeografische kenmerken
- Zoetwatervoorzieningsmaatregelen
- Onttrekkingstypes en -configuraties

In de volgende secties worden deze onderwerpen kort besproken. In hoofdstuk 4 wordt een kwantitatieve indicatie gegeven van de implicaties van de nieuwe inzichten voor de huidige onttrekkingsregels. De nadruk ligt hierbij op de algemene regels voor permanente onttrekkingen in zoete gebieden, waarbij geen vergunning hoeft worden aangevraagd.

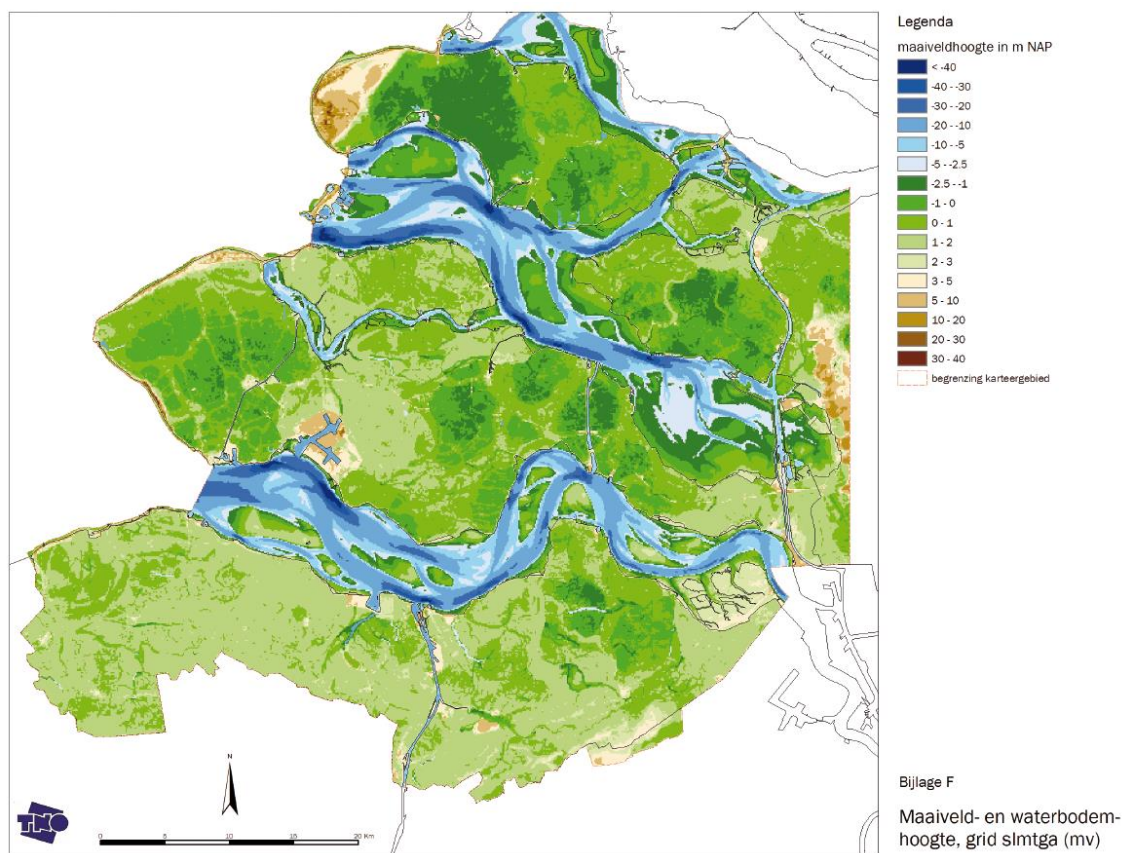
3.1 Heterogeniteit van de ondergrond

3.1.1 REGIS Zeeland

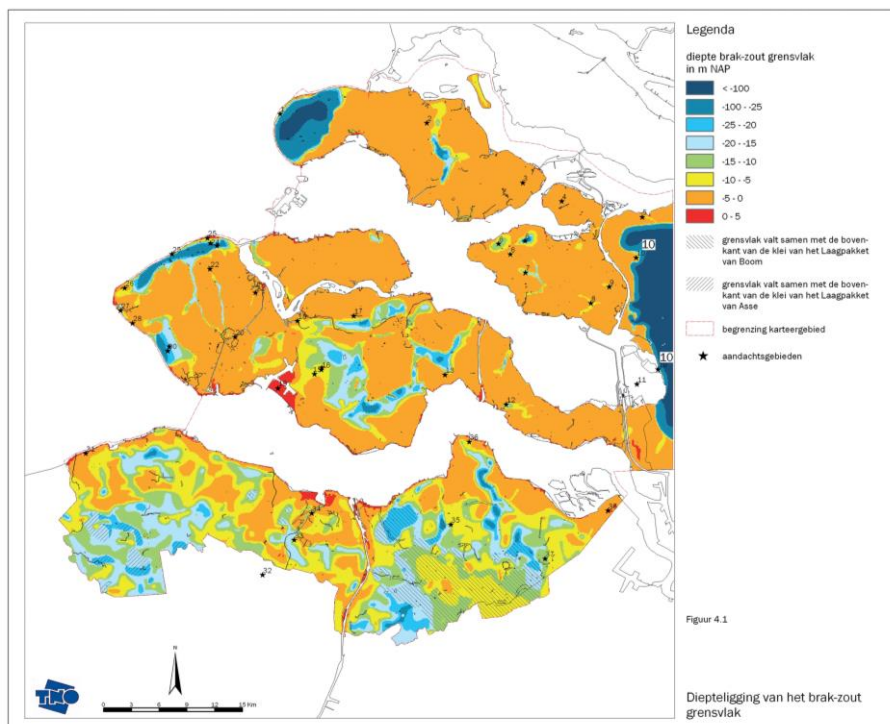
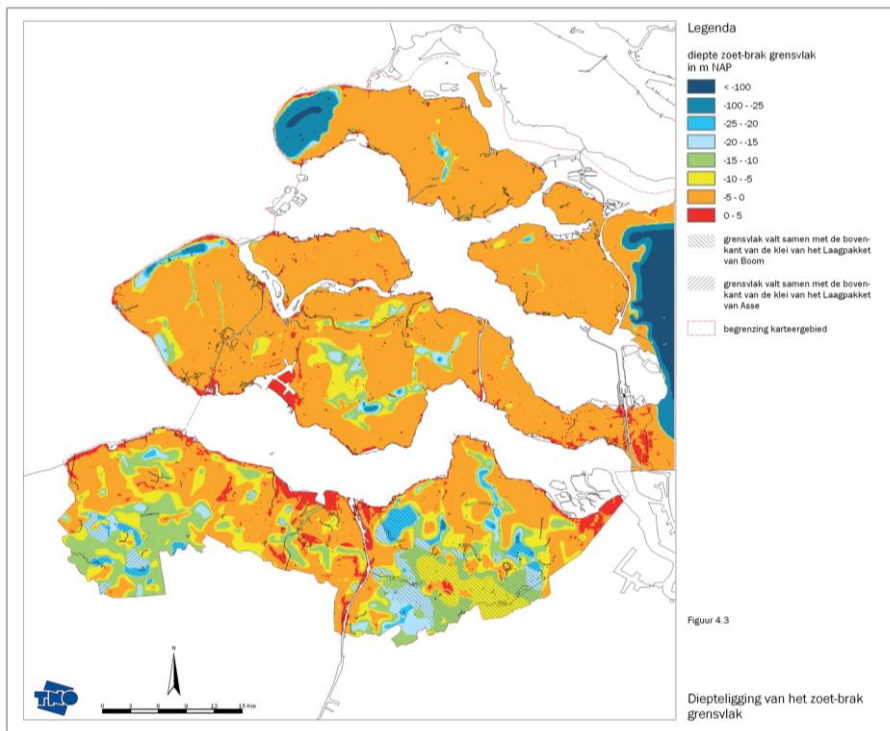
De eerste belangrijke hydrogeologische studie na het opstellen van het Grondwaterbeheersplan Zeeland 2002-2007 was die van REGIS (REgionaal Geohydrologisch Informatie Systeem) Zeeland, die na goedkeuring in 1998 werd uitgevoerd door TNO Geologische Dienst Nederland. In 2010 zijn vier deelrapporten over deze studie verschenen (Vernes 2010; Vernes al. 2010; Goes en Vernes 2010; Snepvangers en Vernes 2010). De studie had als algemeen doel om een regionaal hydrogeologisch model van Zeeland te genereren. Deelrapport A (Vernes, 2010) bevat informatie over de hoogte van het maaiveld en de waterbodem, op basis van het Actueel Hoogtebestand Nederland, wat destijds voor het eerst vervaardigd werd (zie Figuur 3.1). Hierin zijn de kreekruggen goed herkenbaar. Deelrapport D (Snepvangers en Vernes 2010) beschrijft de stijghoogteverdeling binnen de provincie Zeeland, welke gerelateerd is aan de hoogte van het maaiveld (en dus drainage). De stijghoogteverdeling wordt hier verder niet nader beschreven.

Deelrapport B (Goes en Vernes 2010) beschrijft de verdeling van zoet, brak en zout grondwater in de provincie Zeeland. Aan de hand van grondwateranalyses, boorgatmetingen, sonderingen en geo-elektrische en elektromagnetische metingen aan het oppervlak zijn provincie-brede kaarten gegenereerd (Figuur 3.2).

In de FRESHM studie (Van Baaren et al. 2017, zie sectie 3.4) zijn deze kaarten verder gedetailleerd op basis van een geofysische meetcampagne met behulp van een helikopter.



Figuur 3.1: Kaart van de maaiveld- en waterbodemhoogte in de provincie Zeeland, zoals gebruikt voor REGIS Zeeland. Uit: Goes en Vernes (2010).

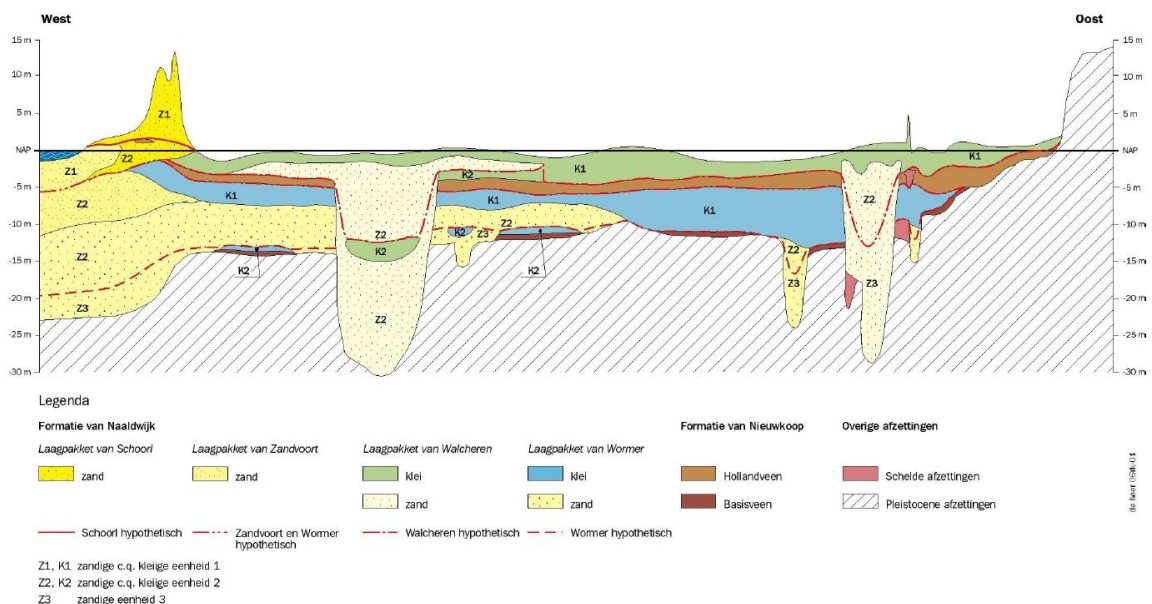


Figuur 3.2: Diepte van het zoet-brak (boven) en brak-zout (onder) grensvlak. Uit: Goes en Vernes (2010).

Deelrapport B (Vernes et al. 2010) bevat belangrijke informatie over de hydraulische eigenschappen van Holocene afzettingen, die van groot belang zijn voor de grondwaterstroming onder kreekkruggen. Op basis van lithologische en geologische gegevens is het hydrogeologische model vervaardigd. Het model heeft een horizontale resolutie van 100x100 m en bestaat uit 15 lagen (met variabele diktes), waarvan elke hydrogeologische

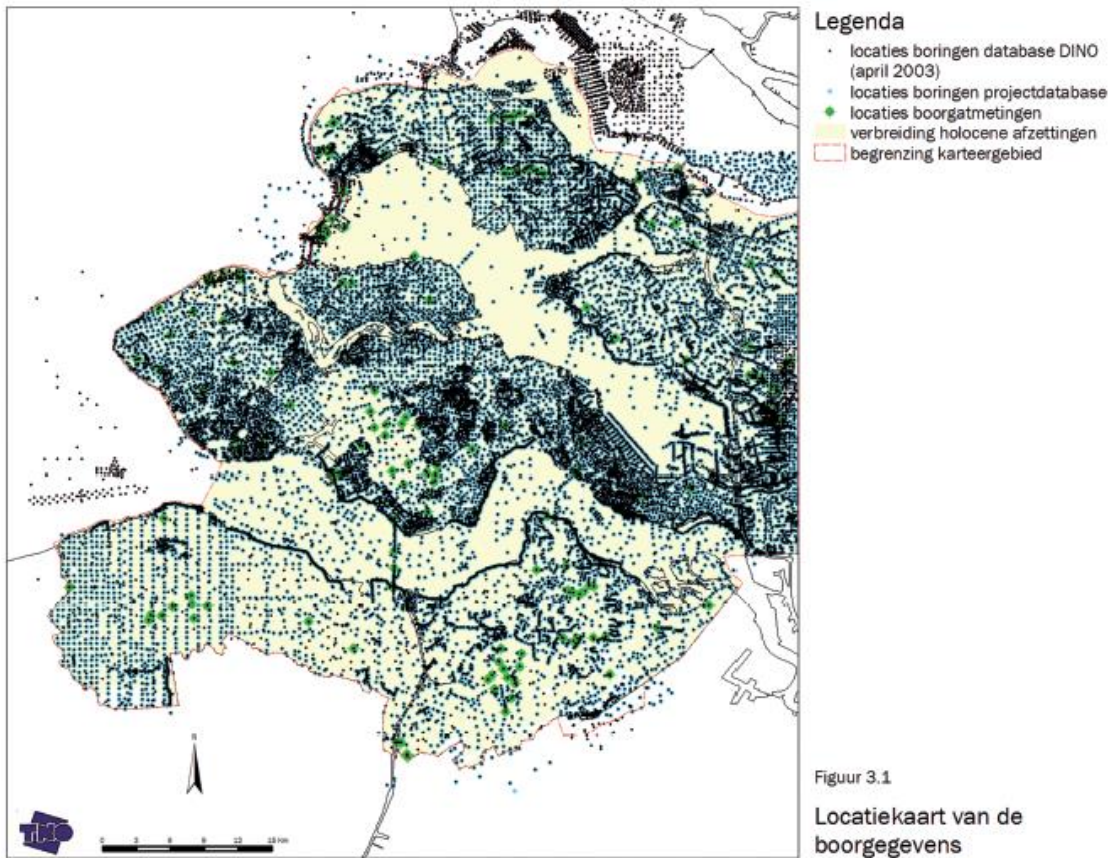
eenheid overeenkomt met één laag. Voor elke laag zijn de doorlatendheid, de transmissiviteit en de weerstand van de hydrogeologische eenheden bepaald op basis van veldgegevens en literatuurdata.

De verschillende hydrogeologische eenheden zijn in Figuur 3.3 weergegeven. De Holocene afzettingen onder de kreekkruggen worden tot het Laagpakket van Walcheren gerekend. Binnen dit laagpakket worden nog drie zandige eenheden en twee kleiige eenheden onderscheiden. Alle eenheden zijn belangrijk voor de grondwaterstroming onder kreekkruggen. De zandige eenheid z1 is afwezig in Zeeland. Verder valt in Figuur 3.3 op dat richting het oosten de afzettingen over het algemeen rijker zijn aan klei en veen dan in het westen van het profiel. Ook dit heeft invloed op de grondwaterstroming onder kreekkruggen; verwacht mag worden dat de geulafzettingen in het oosten over het algemeen fijner zijn dan in het westen.



Figuur 3.3: Conceptueel hydrogeologisch dwarsprofiel door de provincie Zeeland. Uit: Vernes et al. (2010).

Voor de grondwaterstroming onder kreekkruggen is de heterogeniteit van de afzettingen van het laagpakket van Walcheren erg belangrijk. Er is echter relatief weinig bekend over deze heterogeniteit. In eerdere geologische studies werd aan de geologie in de lager gelegen gebieden (poelgronden) meer aandacht gegeven dan aan de geologie in de geulafzettingen. Daarom zijn relatief veel boringen gezet in de poelgronden, en relatief weinig in de geulen (Figuur 3.4). Om deze reden is het moeilijk om in de geulafzettingen te schatten wat de continuïteit van kleilagen is. Ook hebben de boringen maar een beperkt dieptebereik; van het totaal aantal boringen dat gebruikt is voor REGIS is ongeveer 70% ondieper dan 10 meter.



Figuur 3.4: Boringen zoals gebruikt voor REGIS Zeeland. Uit: Vernes et al. (2010).

Binnen de ‘zand’ en ‘klei’ eenheden van de Laagpakketten van Walcheren en Wormer is aangenomen dat de hoofdgrondsoorten ‘klei’ en ‘leem’ tot de kleien behoren, en dat de hoofdgrondsoorten ‘zand’, ‘grind’, ‘stenen’ en ‘schelpen’ tot de zanden behoren. Zandlagen dunner dan 1 meter en kleilagen dunner dan 0.5 m worden binnen een eenheid van een laagpakket verwaarloosd. De zandige geulafzettingen bestaan vaak uit matig fijn zand.

Voor de hydraulische parameterisatie van de sedimenten die tot het Laagpakket van Walcheren behoren worden waarden gegeven voor de verticale doorlatendheid (Vernes et al. 2010) zoals weergegeven in Tabel 3.1. Waarden van de horizontale doorlatendheid zijn berekend met een anisotropiefactor gelijk aan 1.4, gebaseerd op (internationale) literatuurwaarden.

Tabel 3.1: Gemiddelde doorlatendheden (in $m d^{-1}$) per lithoklasse binnen het Laagpakket van Walcheren. k = klei, kz = zandige klei, zf = fijn zand, zm = matig fijn tot matig grof zand, zg = grof zand. K_v = verticale doorlatendheid, K_h = horizontale doorlatendheid (beiden in $m d^{-1}$).

	k	kz	zf	zm	zg
K_v	$3.5 \cdot 10^{-3}$	$5.2 \cdot 10^{-2}$	$5.2 \cdot 10^{-1}$	2.6	17
K_h	-	-	0.75	3.7	24.2

3.1.2 GeoTOP Zeeland en hydraulische parameterisatie

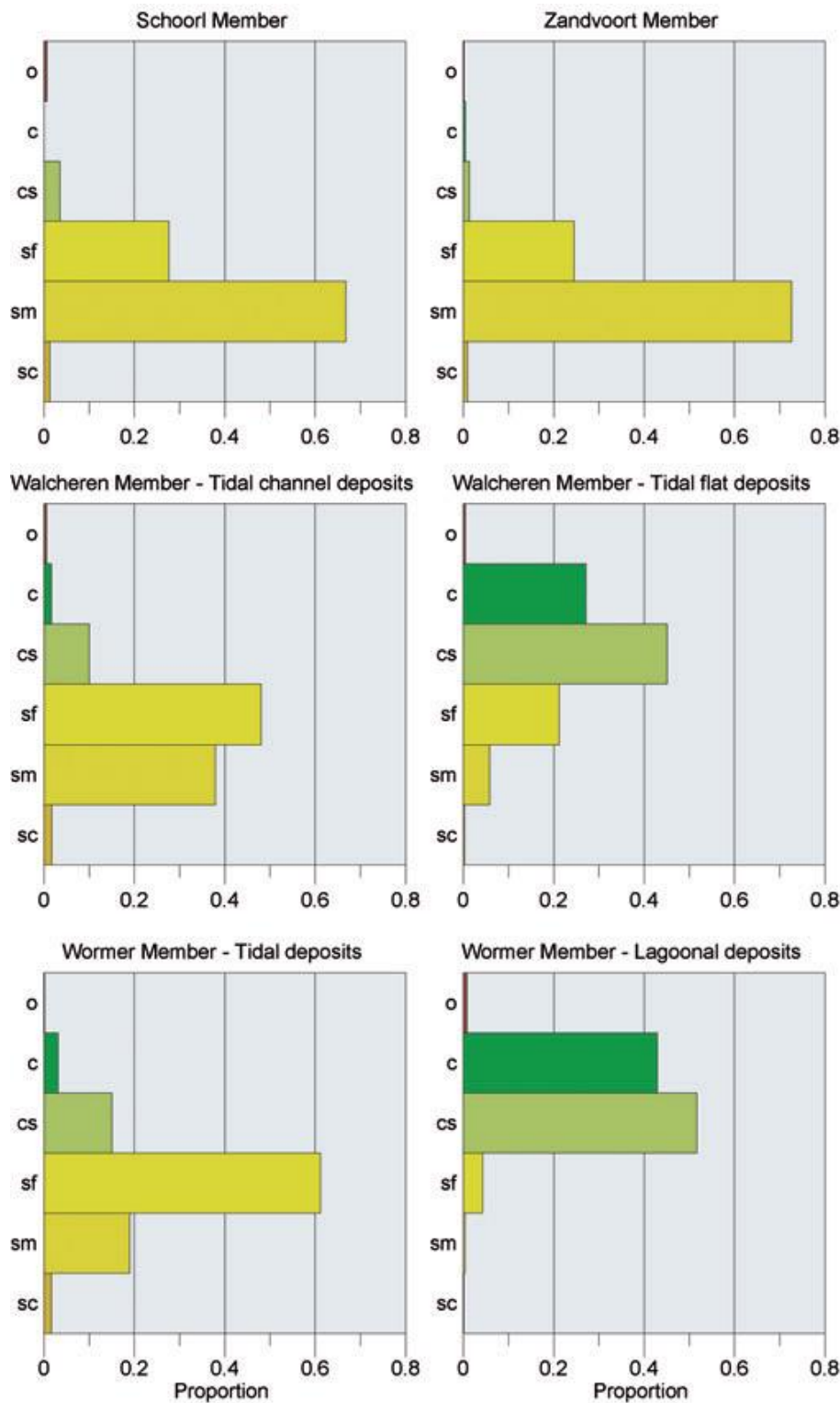
Na de oplevering van het hydrogeologische model REGIS Zeeland verscheen het geologische en lithologische model GeoTOP (Stafleu et al. 2011) voor de provincie Zeeland,

als eerste provincie in Nederland. In tegenstelling tot REGIS Zeeland is GeoTOP geen (2D gestapeld) lagenmodel met variabele diktes, maar een voxel (**volume** en **pixel**) model met cellen van constante horizontale lengtes van 100 m en een dikte van 0.5 m. Ongeveer 23000 boringen waren beschikbaar voor het ontwikkelen van GeoTOP Zeeland. Voor het tot stand komen van het model zijn de volgende stappen doorlopen:

- 1) Stratigrafische interpretatie van de boringen.
- 2) Facies interpretatie (afzettingsmilieu) van de boringen.
- 3) Indeling in lithologische eenheden (veen, klei, kleilig zand/zandige klei, fijn zand, matig zand, grof zand/grind/schelpen) van de boringen (zie Figuur 3.5). Merk op dat dezelfde indeling is gebruikt als voor REGIS Zeeland.
- 4) Lithostratigrafische modellering van de top en basis van de verschillende lithostratigrafische eenheden. Vervolgens zijn de voxel-cellen toegekend aan de corresponderende lithostratigrafische eenheid m.b.v. een geostatistisch model, resulterend in 50 statistisch even waarschijnlijke resultaten van de 3D lithofacies distributie waaruit de modelonzekerheid kan worden afgeleid.
- 5) Lithofacies en lithologische modellering, resulterend in 100 statistisch even waarschijnlijke resultaten waarmee de modelonzekerheid is bepaald.

Het GeoTOP model is dus een voxelmodel van stratigrafie, lithofacies en lithologie, inclusief modelonzekerheid. GeoTOP Zeeland is openbaar en te gebruiken via www.dinoloket.nl.

De hydraulische parameterisering van GeoTOP verscheen in 2016 (Stafleu en Gunnink 2016). Deze parameterisering is gebaseerd op een unieke set doorlatendheden afgeleid uit doorlatendheidsproeven in het laboratorium, binnen het programma 'Topintegraal' van TNO-Geologische Dienst Nederland. Een belangrijk aspect binnen de parameterisering is de vertaling van schalen; de samples voor de laboratoriumproeven hebben een veel kleiner volume dan de 5000 m³ van de voxel. Voor de methode van deze opschaling wordt verwezen naar Stafleu en Gunnink (2016).



Figuur 3.5: Geschaalde voorkomens van lithoklassen (o = veen, c= klei, cs = kleilig zand of zandige klei, sf = fijn zand, sm = matig zand en sc = grof zand, schelpen en grind) voor een aantal lithostratigrafische eenheden. Voor de Walcheren en Wormer members zijn twee lithofacies getoond. Uit: Stafleu et al. (2011)

Voor de Walcheren member (laagpakket) van de Formatie van Naaldwijk zijn de resulterende gemiddelde waarden van de horizontale (K_h) en verticale doorlatendheden (K_v) weergegeven

in Tabel 3.2, voor de modellen GeoTOP en REGIS Zeeland. Voor de GeoTOP waarden zijn voor de zandige lithoklassen (fijn zand, matig zand en grof zand) alleen de horizontale waarden gemeten.

Tabel 3.2: Gemiddelde horizontale (K_h) en verticale (K_v) doorlatendheden van de Walcheren member van de Formatie van Naaldwijk volgens REGIS Zeeland en GeoTOP. Alle waarden zijn in $m d^{-1}$.

Eenheid & facies	Lithoklasse	K_h REGIS Zeeland	K_h GeoTOP	K_v REGIS Zeeland	K_v GeoTOP
NAWA, getijdegeul	k	-	2×10^{-2}	3.5×10^{-3}	2×10^{-2}
	kz	-	2×10^{-2}	5.2×10^{-2}	2×10^{-2}
	zf	0.75	1.09	5.2×10^{-1}	-
	zm	3.7	5.31	2.6	-
	zg	24.2	13.2	17	-

In Tabel 3.2 valt op dat voor de zandige lithoklassen zf en zm de horizontale doorlatendheid uit REGIS Zeeland lager is dan GeoTOP.

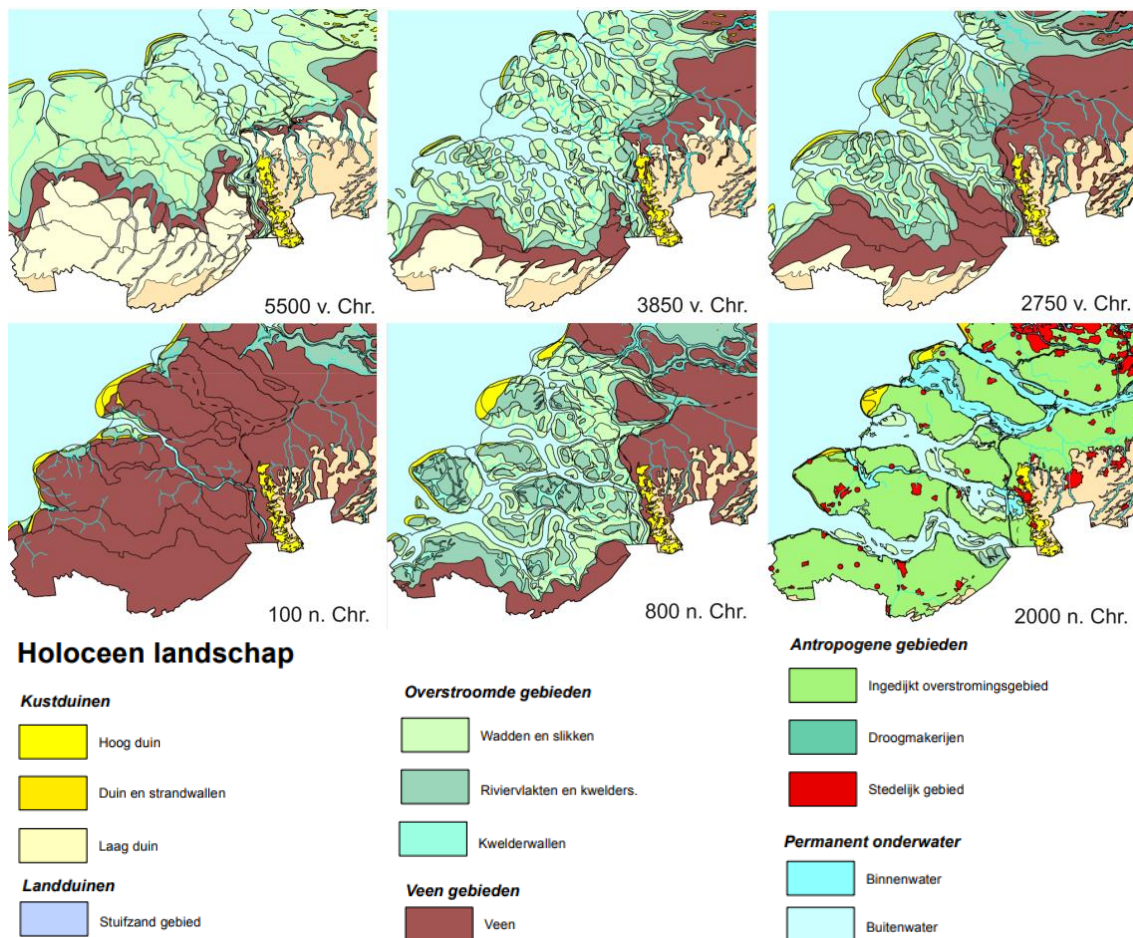
De lithoklassen en doorlatendheden in de overige eenheden en facies die door Stafleu en Gunnink (2011) worden beschreven zijn hier niet herhaald, omdat deze minder van toepassing zijn voor de grondwaterstroming onder de kreekruigen. In hoofdstuk 4 wordt de invloed van heterogeniteit en doorlatendheden nader beschouwd.

3.1.3 Ontstaansgeschiedenis Zeeland

De geologie en hydrologie van kreekruigen hangt sterk samen met de ontstaansgeschiedenis van Zeeland. Deze ontstaansgeschiedenis is de afgelopen decennia in beeld gebracht via diverse geologische studies. Vos (2015) geeft in zijn proefschrift een recent overzicht hiervan. De nieuwe informatie heeft tot een verbeterde kartering van de geulen geleid en een beter begrip van het ontstaan van de Zeeuwse ondergrond, bodem en landschap.

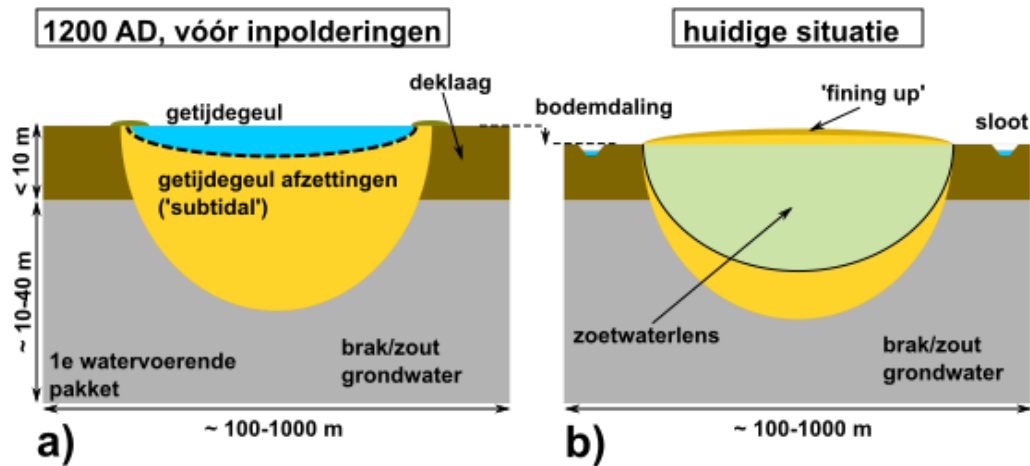
Het ontstaan van kreekruigen in de provincie Zeeland is beïnvloed door Holocene erosie- en depositieprocessen en de invloed van de mens in het landschap. De overgang van de laatste IJstijd in het Pleistoceen naar het Holoceen wordt gekenmerkt door een stijging van de wereldwijde temperatuur en een zeespiegelstijging (Holocene transgressie). Het zoete Pleistocene grondwater in de ondiepe watervoerende pakketten werd hiermee blootgesteld aan verzilting door vrije convectie van zout zeewater. Rond 3850 B.C. bereikte de transgressie haar maximum in Zeeland (Figuur 3.6). In het zuidelijk deel van Zeeuws Vlaanderen vond geen inundatie plaats.

Na de maximale transgressie nam de sedimentatie langs de kust toe en de snelheid van de zeespiegelstijging af. Hierdoor begon het land zich uit te breiden richting zee waarbij op grote schaal klei- zand- en veenafzettingen werden gevormd in combinatie met de infiltratie van zoet water. Rond 100 BC waren er langs de Zeeuwse kust strandwallen aanwezig die het achterliggende land beschermden tegen erosie en inundatie. Na 100 BC vond erosie van de strandwallen plaats en kreeg de zee meer invloed op het achterland waarbij inundatie en infiltratie van zeewater plaatsvond. Veengebieden erodeerden deels en in het achterland vond erosie en depositie van wadafzettingen (klei en zand) plaats. De geulen werden hierbij gevormd. Dit proces bleef zich tot en met de Middeleeuwen voortzetten. Het is belangrijk hier te vermelden dat veel geulafzettingen onder 'subtidal' omstandigheden (zeewaarts van het laagwaterniveau en dus permanent onder water) zijn afgezet (Erkens, 2012).

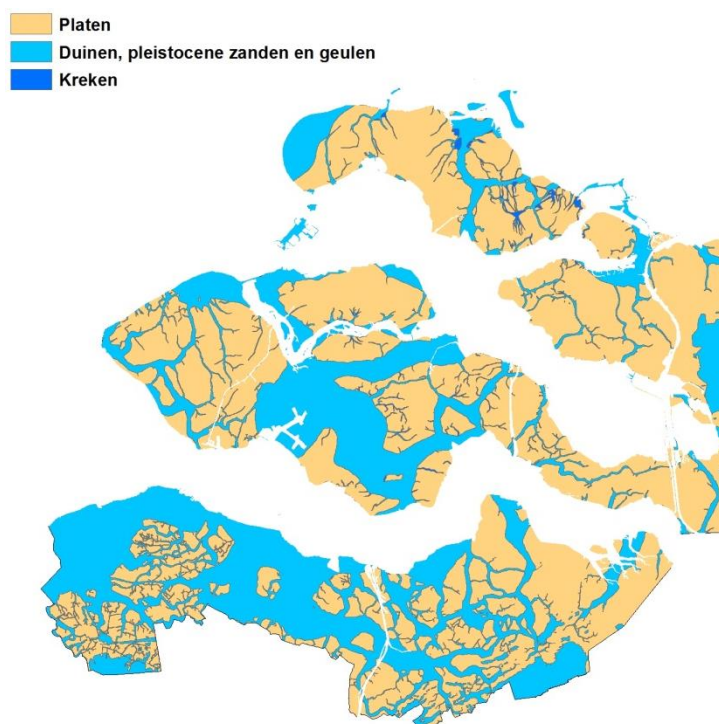


Figuur 3.6: Paleogeografische ontwikkeling van Nederland gedurende het Holoceen. Uit: Vos, P. & S. de Vries (2013): 2e generatie palaeogeografische kaarten van Nederland (versie 2.0). Deltares, Utrecht. Op 16 februari 2017 gedownload van www.archeologieinnederland.nl.

Vanaf de Middeleeuwen kreeg de mens echter ook meer invloed op het landschap, waardoor inundaties op minder grote schaal voorkwamen. De mensheid zorgde voor inpoldering, drainage en veenontginning, wat resulteerde in bodemdaling en het dichtslibben van getijdegeulen. Klei- en veenrijke sedimenten waren vatbaarder voor bodemdaling dan de zandige sedimenten. Omdat in de getijdegeulen voornamelijk zandige sedimenten waren afgezet en daarbuiten juist meer klei en veen, vond reliëfinversie plaats. De geulen, die vroeger het lage deel van het landschap vormden, liggen daarom nu juist hoger in het landschap en staan bekend als kreekruggen (Figuur 3.7 en Figuur 3.8).



Figuur 3.7: Ontstaan van kreekruggen in dwarsdoorsnede; a) situatie vóór de inpolderingen door de mens en b) huidige situatie. Aangepast uit: Pauw et al. (2015)



Figuur 3.8: In lichtblauw, de ligging van de kreekruggen, de duinen en pleistocene zanden in Zeeland.

3.1.4 Hydrogeologie van kreekruggen

Nadat door toedoen van de mens het landschap gevrijwaard bleef van inundaties van zout (zee)water, kon verzoeting van de ondergrond plaatsvinden. De verzoeting vond vooral plaats in de geulafzettingen onder de hoger gelegen kreekruggen met een relatief hoge doorlatendheid; dit verzoetingsproces kan vele tientallen jaren duren. In de omliggende lager gelegen gebieden met een lagere doorlatendheid van de veen- en kleirijke sedimenten vond juist kwel van zout en brak grondwater plaats, waardoor daar zoet grondwater niet diep in de

ondergrond kon doordringen. Om deze reden vinden we onder de duinen en onder de kreekruggen een zoetwaterbel (De Louw 2013; Pauw 2015).

In Figuur 3.9 is een concept van de grondwaterstroming onder kreekruggen weergegeven. Er zijn over het algemeen vier hydrogeologische eenheden te onderscheiden (Figuur 3.9a):

- 1) de kleiige toplaag van de kreekruggen afzettingen
- 2) de zandige kreekrug (geul) afzettingen
- 3) de klei- en veenrijke deklaagafzettingen
- 4) de zandige afzettingen onder de deklaag en onder de zandige kreekrug afzettingen.

De grondwaterstroming onder kreekruggen wordt gevoed door het neerslagoverschot. Het neerslagoverschot stroomt richting sloten en drainage, en ondervindt daar hydraulische weerstand. Hierdoor is onder de kreekruggen tussen de sloten een opbolling van de grondwaterstand aanwezig. Deze opbolling is sterk gerelateerd aan de dikte van de zoetwaterbel onder de kreekrug. Hoe hoger de opbolling / grondwaterstand, hoe dikker de zoetwaterbel. Dit kan verklaard worden door het Badon-Ghijben – Herzberg principe:

$$h = \delta H$$

$$\delta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \quad (2)$$

waarbij h (m) de grondwaterstand is ten opzichte van een referentieniveau (bijv. zeeniveau), H (m) de dikte van de zoetwaterbel vanaf het referentieniveau, δ het relatieve dichtheidsverschil, ρ_s de dichtheid van het zoute grondwater (kg m^{-3}) en ρ_f de dichtheid van het zoete grondwater is (kg m^{-3}). Een lage doorlatendheid, hoge grondwateraanvulling en het ontbreken, of minimaliseren van drainage zorgt voor een hoge grondwaterstand en dus een dikkere zoetwaterbel. Naast een hogere grondwaterstand draagt een kleiner dichtheidsverschil ook bij aan dikkere zoetwaterbellen. In het Badon-Ghijben – Herzberg principe is o.a. aangenomen dat de verticale drukverdeling hydrostatisch verloopt, wat in de praktijk niet altijd het geval is. Voor meer details over het principe wordt verwezen naar Pauw (2015).

Het Badon Ghijben – Herzberg principe kan gecombineerd worden met de Wet van Darcy en het continuïteitsprincipe om tot een één-dimensionale vergelijking van de dikte van de zoetwaterbel te komen (Van Dam, 1983):

$$H = \sqrt{\frac{xN(-x + L)}{\delta K(1 + \delta)}} \quad (3)$$

Hierin is x (m) de afstand tot de waterloop⁴ op $x = 0$ m, L (m) de breedte van de bel, H de dikte van de zoetwaterbel (m), N de constante grondwateraanvulling (m d^{-1}) en K (m d^{-1}) de homogene en isotrope doorlatendheid. Hieruit valt af te leiden dat de dikte van de zoetwaterbel H toeneemt bij:

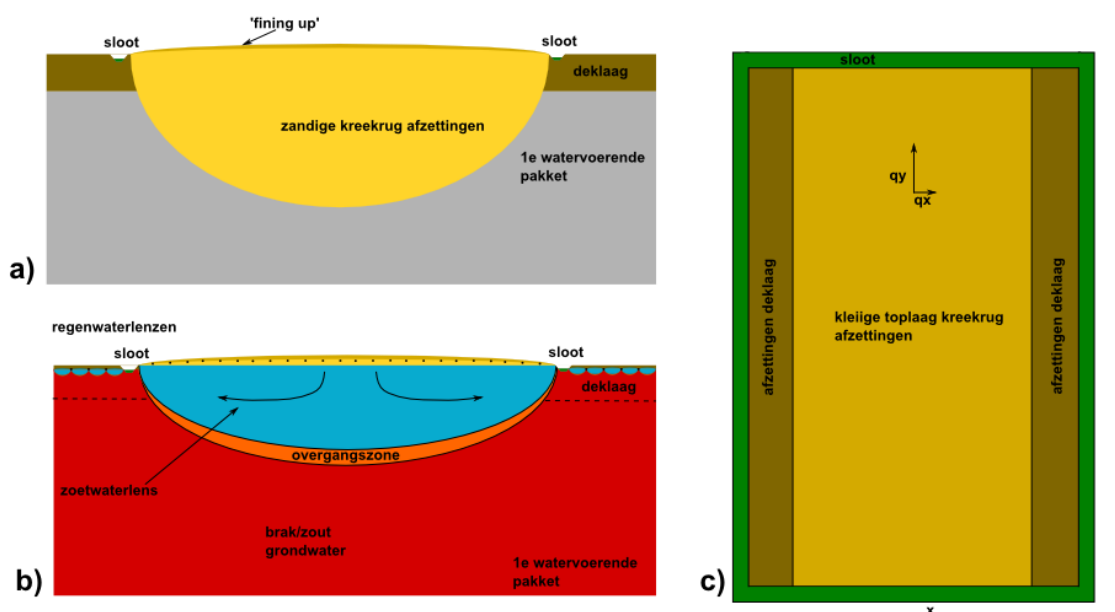
- een hogere grondwateraanvulling N ,

⁴ De andere waterloop is aanwezig op $x = L$.

- een bredere kreekrug / afstand tussen de waterlopen L ,
- een kleiner relatief dichtheidsverschil δ ,
- een lagere doorlatendheid (K).

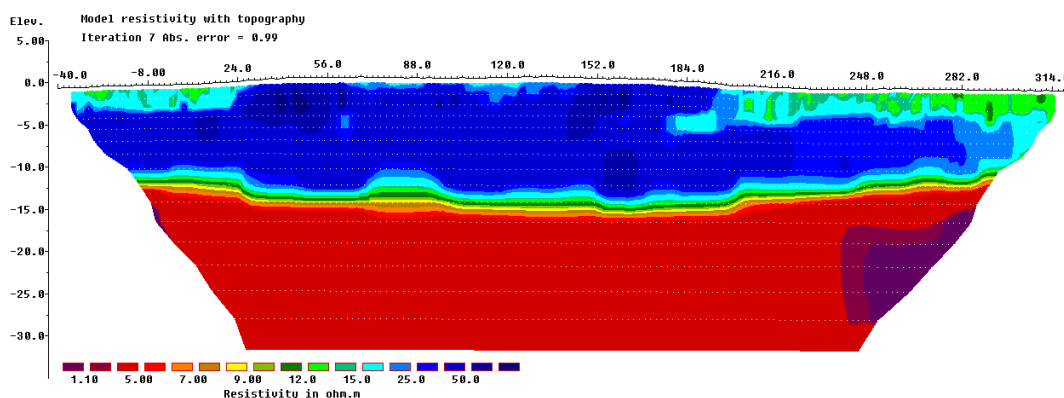
Van deze parameters is de invloed van δ en L op de maximale dikte van de zoetwaterbel (op $x = 0.5L$) het grootst in vergelijking (3). De geografische variatie in L in de kreekrugsystemen in de provincie Zeeland is over het algemeen groter dan δ , N en K . Om deze reden vinden we onder de duinen (hoogste waarde van L) de dikste zoetwaterbellen, en onder de smalste kreekruggen en tussen drains de dunste zoetwaterbellen.

In het geval dat de sloten zich in de Holocene deklaag bevinden, is K niet meer homogeen. De deklaag fungeert in deze situatie als een weerstand tegen grondwaterstroming richting de sloot, en heeft dus een positief effect op de hoogte van de grondwaterstand en (dus) de dikte van de zoetwaterbel. Wanneer drainerende sloten aanwezig zijn dwars op de kreekrug (Figuur 3.9c) kan de stroming ook significant parallel aan de strekking van de kreekrug zijn. De stroming is in dat geval driedimensionaal, waardoor vergelijking (3) niet meer toegepast kan worden. Deze situatie kan vooral bij kleinere kreekruggen voorkomen.



Figuur 3.9: Concept van de hydrogeologie van kreekruggen; a) dwarsaanzicht van de hydrogeologische eenheden, b) zoet-zout verdeling en c) bovenaanzicht.

De zoetwaterbel onder de kreekrug kan zich uitstrekken tot aan de randen van de deklaag (zie Figuur 3.9), maar kan zich ook voortzetten onder de deklaag, of de kleilige sedimenten die zijn afgezet tijdens de verlandingsfase van de geul. In Figuur 3.10 is daarvan een voorbeeld gegeven. Het ontstaan van dergelijke verschillen hangt voornamelijk samen met de hydrogeologie van kreekruggen, maaiveldhoogte en (de daarbij samenhangende) drainage.



Figuur 3.10 : Geofysische meting dwars op de strekking van een kreekrug op Walcheren. De koude (blauwe) kleuren duiden op zoet grondwater in zandig sediment, de warme (rode) kleuren op brak/zout grondwater en meer kleiig sediment. Het zoete grondwater stroomt onder de kleiige sedimenten aan de randen van de kreekrug.

3.2 Grondwateraanvulling en klimaatverandering

Er bestaan verschillende methodes voor het bepalen van de grondwateraanvulling via de onverzadigde zone. Voorbeelden daarvan zijn lysimeters, bodemvochtmetingen (i.c.m. Darcy/Richards vergelijkingen, 0-flux vlakken/'zero flux plane'), tracer technieken (kunstmatige tracers, maar ook semi-natuurlijke tracers zoals ^3H en ^{36}Cl), remote sensing en grondwaterstandsmetingen (Scanlon et al. 2002). In Nederland zijn deze methodes toegepast, maar veelal voor onderzoeksdoeleinden met een beperkte ruimte- en tijdsresolutie. Een breder toegepaste methode om de grondwateraanvulling te berekenen, is aan de hand van gegevens over neerslag en verdamping. In de IWACO studie over kreekruggen op Zuid-Beveland (sectie 2.3) is deze methode bijvoorbeeld ook toegepast.

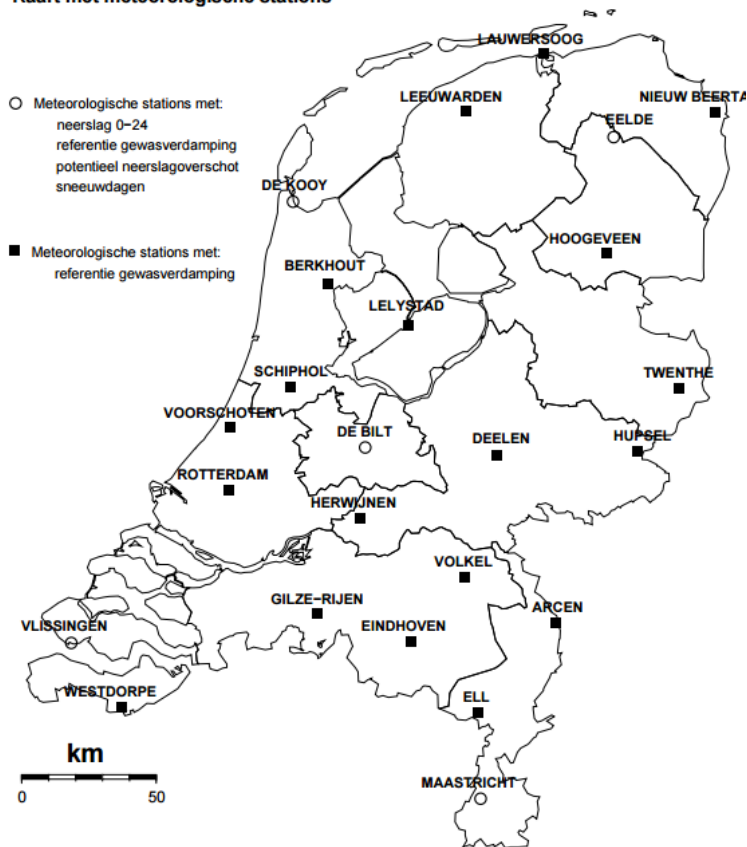
Het KNMI meet sinds begin vorige eeuw aan neerslag en sinds de jaren 1950 van vorige eeuw gegevens aan verdamping, op verschillende plekken in Nederland (zie Figuur 3.11). Vóór 1987 berekende het KNMI de referentie-gewasverdamping met de formule van Penman. Sinds 1987 hanteert het KNMI de Makkink methode. Beide methodes zijn o.a. beschreven in CHO-TNO rapporten uit de jaren 1980, bijv. CHO-TNO (1988)). De Makkink referentieverdamping is een manier om de potentiële verdamping van een gewas te schatten. De potentiële verdamping wordt als volgt bepaald (zie ook sectie 2.3):

$$E_p = f E_{ref} \quad (4)$$

Hierbij is E_p de potentiële verdamping van een specifiek gewas⁵, f de gewasfactor en E_{ref} de referentieverdamping. De gewasfactor f volgens de Makkink methode hangt o.a. af van het type gewas en het groeistadium; het omvat interceptieverdamping, transpiratie en bodemverdamping. De gebruikte methode is belangrijk; f verschilt tussen de Penman en Makkink methodes. De werkelijke verdamping E_{act} (m d^{-1}) hangt af van de atmosferische condities, begroeiing (landgebruik), bodemsoort, bodem(vocht)toestand en de toestand van de begroeiing (NHV-Werkgroep Verdamping, 2015). Buiten het groeiseizoen heeft f geen fysische basis.

⁵ Een uitgestrekt groen grasveld, van uniforme hoogte tussen 8 en 15 cm, actief groeiend, dat volledig de bodem beschaduwde en dat goed van water is voorzien (Doorenbos & Allen, 1977).

Kaart met meteorologische stations



(c) 2015 KNMI

Figuur 3.11: Kaart met de meteorologische stations in Nederland (2015). Van: www.knmi.nl.

De verkregen waarde van E_p bij toepassing van vergelijking (4) kan gezien worden als een optimale verdamping van een gewas bij voldoende beschikbaarheid van water. Indien dit het geval is kan de grondwateraanvulling N berekend worden met:

$$N = P - E_p \quad (5)$$

Waarbij P de neerslag is. Als er minder water beschikbaar is om het gewas optimaal te laten verdampen, dan zal de werkelijke verdamping E_{act} lager zijn E_p .

De voordelen van het gebruik van vergelijkingen (4) en (5) zijn de beschikbaarheid en toegankelijkheid van de (KNMI) data, en de eenvoudigheid van de formules. Het nadeel van het gebruik van de gewasfactor is dat dit een sterk vereenvoudigd concept van de werkelijkheid is. Zo hangt de interceptieverdamping af van de temperatuur en de natheid van het bladoppervlak, welke niet zijn meegenomen in de gewasfactor. Verder zal de werkelijke verdamping ook minder zijn wanneer het gewas niet optimaal van water is voorzien of wanneer bodemcondities (zoals het zoutgehalte) anders zijn dan 'optimaal'. In de afgelopen decennia is daarom vooral rekenkundig geprobeerd om dit soort effecten in de hydrologische modellen mee te nemen. Te denken valt daarbij aan SWAP, waarin de Richards vergelijking voor waterstroming in de onverzadigde zone numeriek wordt opgelost, inclusief een 'sink' term voor het simuleren van transpiratie door planten. In het NHI wordt het aan SWAP gerelateerde MetaSWAP gebruikt om rekentechnisch efficiënt verdamping en grondwateraanvulling te kunnen simuleren. Voor een overzicht van deze rekentechnieken wordt hier verwezen naar de speciale NHV Stroomingen uitgave 8 (2015).

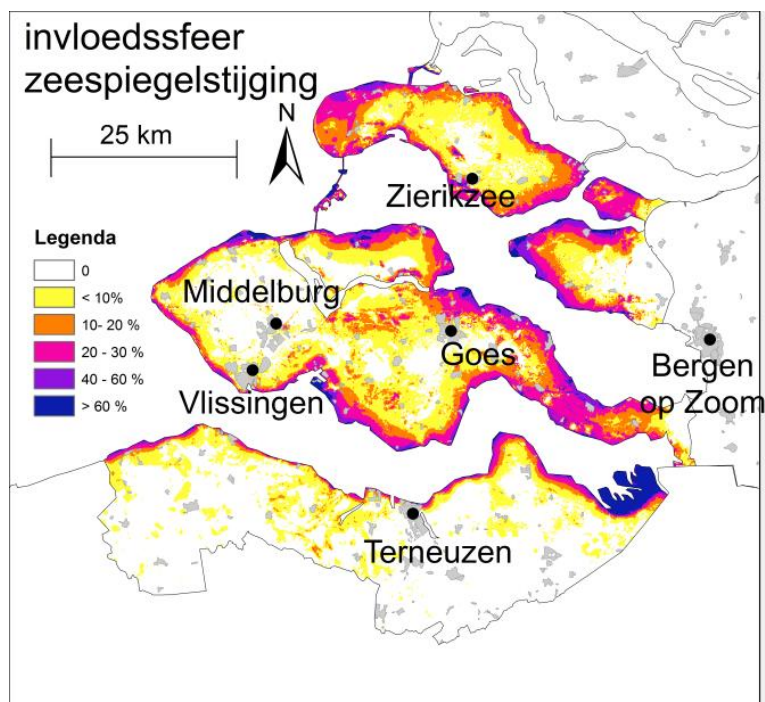
Het schatten van verdamping aan de hand van remote-sensing data is sinds de jaren 1990 sterk in opkomst. Aan de hand van satellietgegevens kan de uitgezonden en weerkaatste straling worden bepaald. Verdamping beïnvloedt deze straling; met remote sensing data kan dus de invloed van de verdamping op de straling worden bepaald. Echter, behalve verdamping er zijn meer factoren die de straling beïnvloeden, waardoor het bepalen van de verdamping geen evidente klus is. In Nederland wordt sinds 2011 binnen het SAT-WATER-consortium (zie <http://hydromedah.nl/satwater/>) gewerkt aan het schatten van de actuele verdamping aan de hand van satelliet data. Ook hebben diverse onderzoeken plaatsgevonden om deze gegevens te vergelijken met andere methoden (Beekman et al, 2014; Voortman et al. 2016). Deze onderzoeken vonden voornamelijk plaats op specifieke plekken; een landsdekkende validatie aan de hand van validatie-meetstations ontbreekt echter nog. Dit geldt overigens ook voor de monitoring van de verdamping in Nederland in het algemeen. De omvang hiervan staat (nog) niet in verhouding tot de monitoring van neerslag (NHV-Werkgroep Verdamping, 2015).

3.3 Zeespiegelstijging

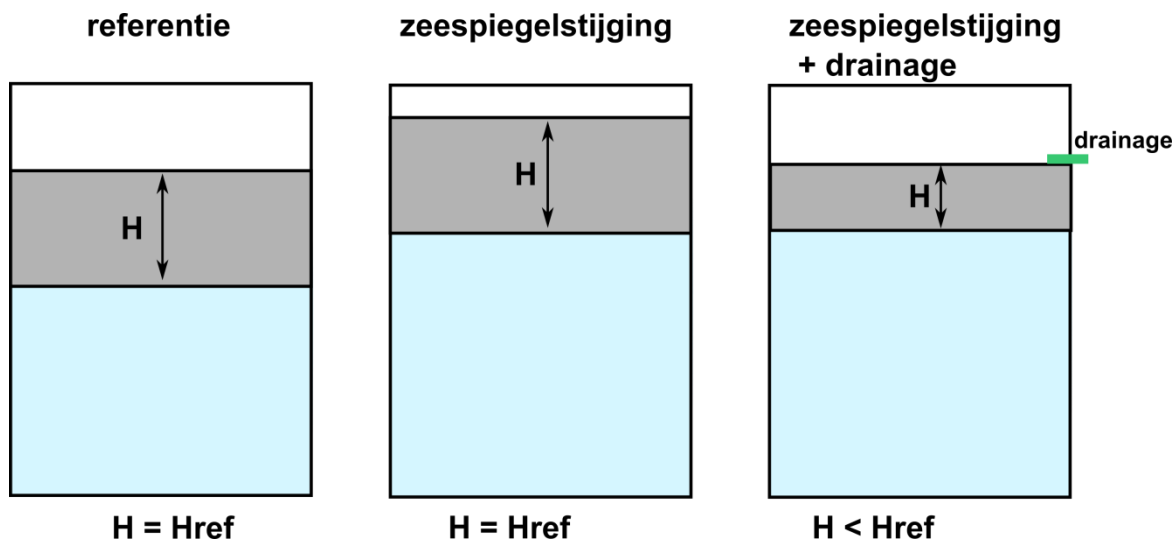
Met het regionale grondwater model van de provincie Zeeland (Van Baaren et al., 2016) is recent de invloed van de zeespiegelstijging op de grondwaterstand, stijghoogte en zoetwatorvoorraden bepaald, volgens de prognoses van de zeespiegelstijging volgens het KNMI (Klein Tank et al., 2015; KNMI, 2006). De resultaten van deze analyse zijn getoond in Figuur 3.12. De zeespiegelstijging zorgt in de zone rondom de kustgebieden, met name de Noordzee, Westerschelde en Oosterschelde voor een toename van de stijghoogte, wat vooral leidt tot een toename van de kweldruk en de zoutvracht richting ondiepe polders. Het effect van de beperkte hoeveelheid diepe polders in Zeeuws Vlaanderen is goed te zien in Figuur 3.12.

Ook de grondwaterstand neemt toe, maar in veel mindere mate dan de stijghoogte. Dat komt onder andere door de drainagemiddelen (sloten, drains, greppels) die dicht bij het maaiveld liggen.

Een toename van de grondwaterstand en zoutwaterstijghoogte heeft theoretisch geen invloed op de dikte van de zoetwaterbel onder de kreekruggen indien er geen (buis) drainage aanwezig is en als het effect van de verhoogde grondwaterstand (die zich volledig kan ontwikkelen) op de verdamping kan worden genegeerd (Figuur 3.13). Als dit niet het geval is, zal dit leiden tot een afname van de zoetwaterbel.



Figuur 3.12 : Relatieve invloed van de zeespiegelstijging op het grondwatersysteem (toename stijghoogte eerste watervoerend pakket) in de provincie Zeeland, als percentage van de totale zeespiegelstijging.



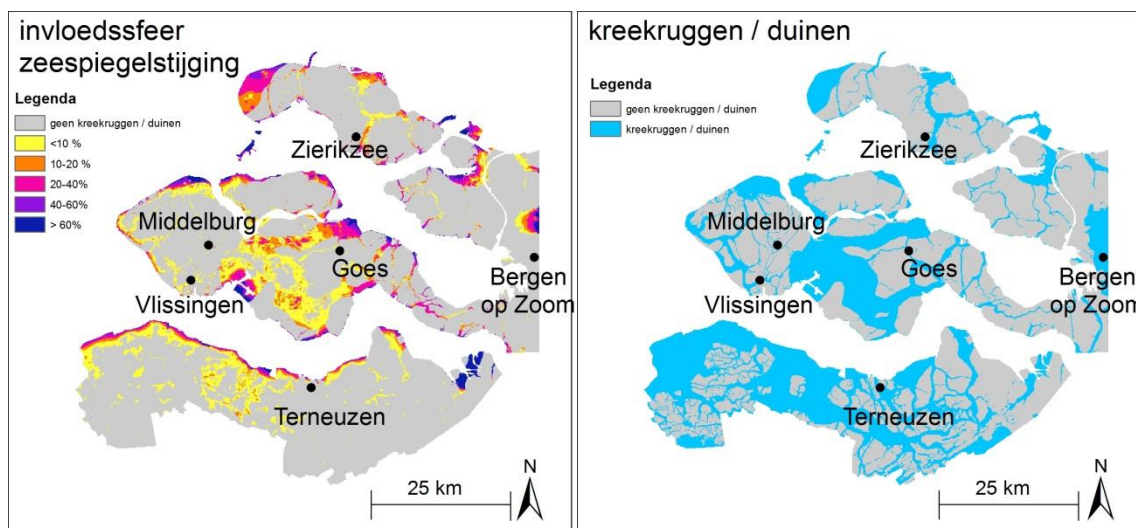
Figuur 3.13 : Concept van de invloed van drainage en zeespiegelstijging op de dikte van de zoetwaterbel (H), aan de hand van een glas met twee niet-mengbare vloeistoffen met een verschillende dichtheid (bijvoorbeeld olie (grijs, het zoete water) en water (blauw, het zoute water)). In geval van zeespiegelstijging (toename van het blauwe (zoute) niveau, leidt een situatie zonder drainage niet tot een afname van de dikte H van de olie laag ($H = H_{ref}$). Bij drainage is dit wel het geval ($H < H_{ref}$).

Aan de hand van Figuur 3.12 en de ligging van de kreekruggen en duinen is een GIS analyse gedaan van de relatieve stijging van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket voor de kreekrug- en duingebieden. Het resultaat daarvan is gegeven in Figuur 3.14. In Tabel 3.3 is per veranderingsklasse het percentage landoppervlakte ten opzichte van de totale oppervlakte kreekrug- en duingebieden weergegeven. In meer dan de helft van de gebieden

is de invloed van de relatieve zeespiegelstijging minder dan 10%. In bijna driekwart van de gebieden is deze minder dan 20%.

Tabel 3.3: Percentage oppervlakte duin- en kreekruggebieden en de bijbehorende invloed van de zeespiegelstijging.

Invloed zeespiegelstijging	% landoppervlakte
< 10%	50.5
10-20%	19.2
20-40%	16.8
40-60%	7.7
>60%	5.8



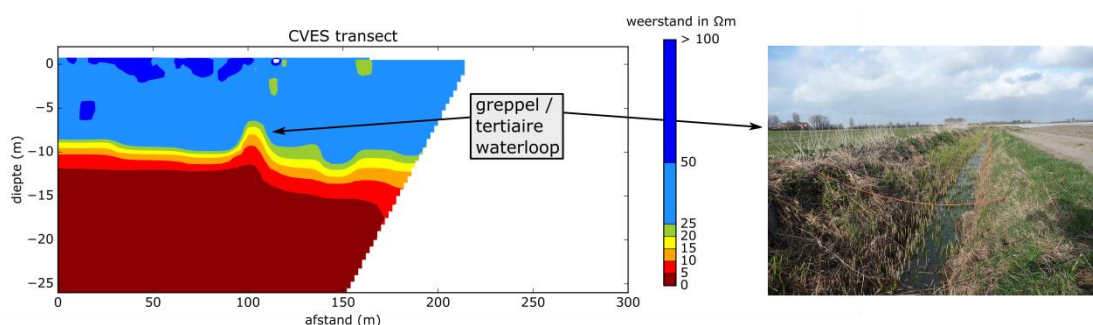
Figuur 3.14: Relatieve invloed van de zeespiegelstijging in de gebieden met kreekruggen of duinen (links) en de ligging van de kreekruggen & duinen (rechts).

3.4 Fysiogeografische kenmerken

In overleg met Provincie Zeeland en Waterschap Scheldestromen is besloten om onder 'fysiogeografische kenmerken' een tweetal aspecten nader te onderzoeken:

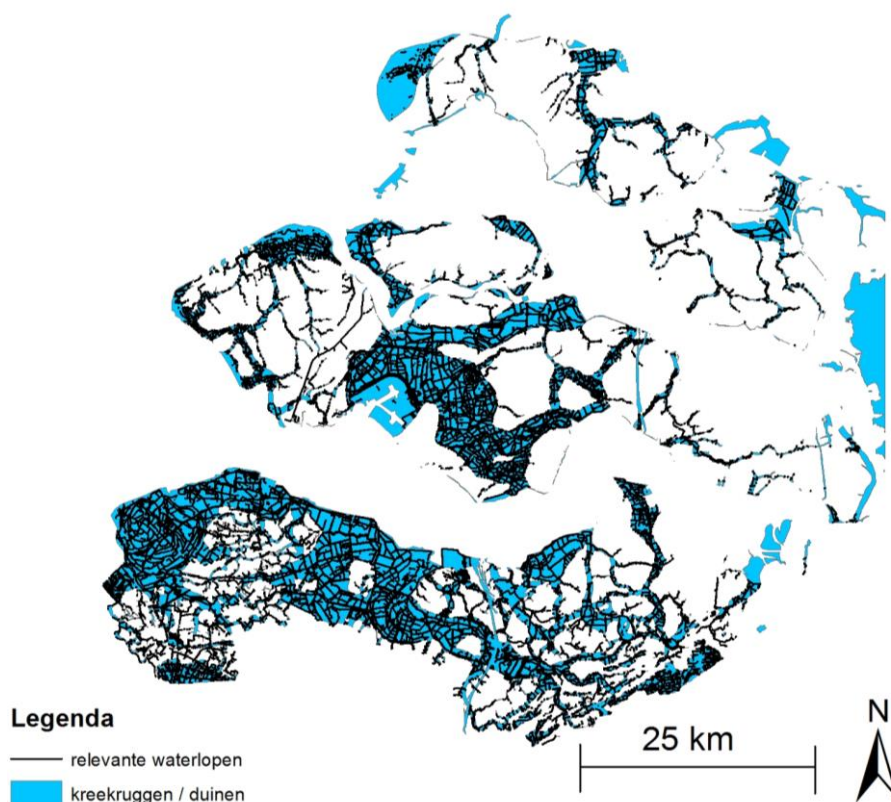
- 1) De invloed van een waterloop op de zoutwater opkegeling onder de waterloop en onder een grondwateronttrekking.
- 2) De variatie in dikte van de zoetwaterbellen tussen 7 (arbitraire keuze) en > 15 m, ten opzichte van het huidige onderscheid tussen kleiner en groter dan 15 m. Dit is gedaan aan de hand van de FRESHM resultaten.

Hoe lager het slootpeil en slootbodem en hoe breder de waterloop, hoe groter de invloed op de zoutwater opkegeling. De reden hiervoor is dat de sloten de grondwaterstand verlagen, waardoor de dikte van de zoetwaterbel afneemt. In Figuur 2.3 is dit schematisch weergegeven. Ook diverse metingen hebben dit aangetoond (zie bijvoorbeeld Figuur 3.15 en de CVES meting gepresenteerd in Zuurbier et al. (2015)). Indien een onttrekking dichtbij een waterloop ligt, kan de waterloop invloed hebben op de snelheid van de zoutwater opkegeling omdat de grondwaterstand (en dus de dikte van de zoetwaterbel) wordt beïnvloed. De eis in de huidige algemene regels is een afstand van 25 m tussen de onttrekking en de waterloop.



Figuur 3.15: Resultaat van een CVES meting over een greppel / tertiaire waterloop. Het zoet-zout grensvlak onder de waterloop komt duidelijk omhoog.

Aan de hand van een GIS-analyse is bepaald wat de gemiddelde drainagedichtheid in de kreekrug- en duingebieden in Zeeland is (zie Figuur 3.16). Deze gemiddelde drainagedichtheid is gedefinieerd als de totale lengte van de waterlopen in de kreekrug- en duingebieden gedeeld door de totale oppervlakte van de kreekrug- en duingebieden. Aan de hand van een waterlopenbestand van Waterschap Scheldestromen is de totale lengte van de belangrijkste waterlopen (de primaire, secundaire en tertiaire waterlopen) bepaald op 5538 km. Het totale oppervlakte van de kreekrug- en duingebieden bedraagt 1446 km². Hiermee komt de drainagedichtheid neer op 3.83 km / km², of 0.00383 m/m². Voor de vastgestelde bufferzone van de onttrekking (10 ha) komt dit neer op 383 m sloot. Deze gemiddelde waarde zal in hoofdstuk 4 verder worden gebruikt.



Figuur 3.16 : Waterlopen in de kreekrug- en duingebieden van Zeeland.

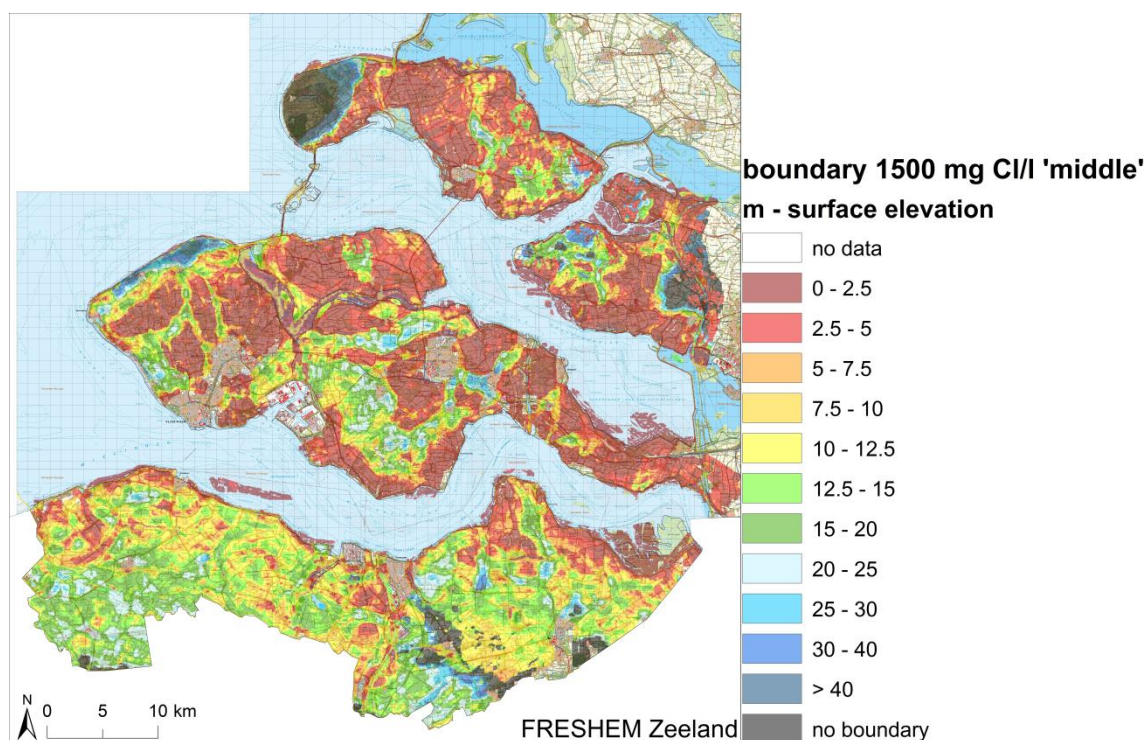
Zoals in sectie 3.1.4 is beschreven hangt de diepte van de zoetwaterbel onder de kreekruggen samen met de grondwaterstand en een aantal andere fysiogeografische en ondergrond parameters. De hoeveelheid zoet grondwater die kan worden onttrokken uit een

zoetwaterbel zonder dat er teveel zoutwater opkegeling plaatsvindt hangt, naast een aantal andere parameters, af van de dikte van de zoetwaterbel. Bij een gegeven dikte van de bel hoort dus een maximaal, duurzaam onttrekkingsdebiet. In de huidige regelgeving is echter een grens gelegd bij 15 m. Om te bepalen hoe relevant het beschouwen van verschillende diktes van de zoetwaterbel is, zijn de gegevens van een recente geofysische airborne EM⁶ studie (FRESHEM; (van Baaren et al., 2017) in de provincie Zeeland gebruikt om te analyseren wat het relatieve aandeel van verschillende diktes van de zoetwaterbellen onder kreekrug- en duingebieden is. Vanwege de meetdichtheid van de meetcampagne mag verwacht worden dat deze dataset een verbetering is ten opzichte van de zoet-brak en zoet-zout grensvlakken die binnen REGIS Zeeland zijn gegenereerd aan de hand van puntmetingen (Goes en Vernes 2010).

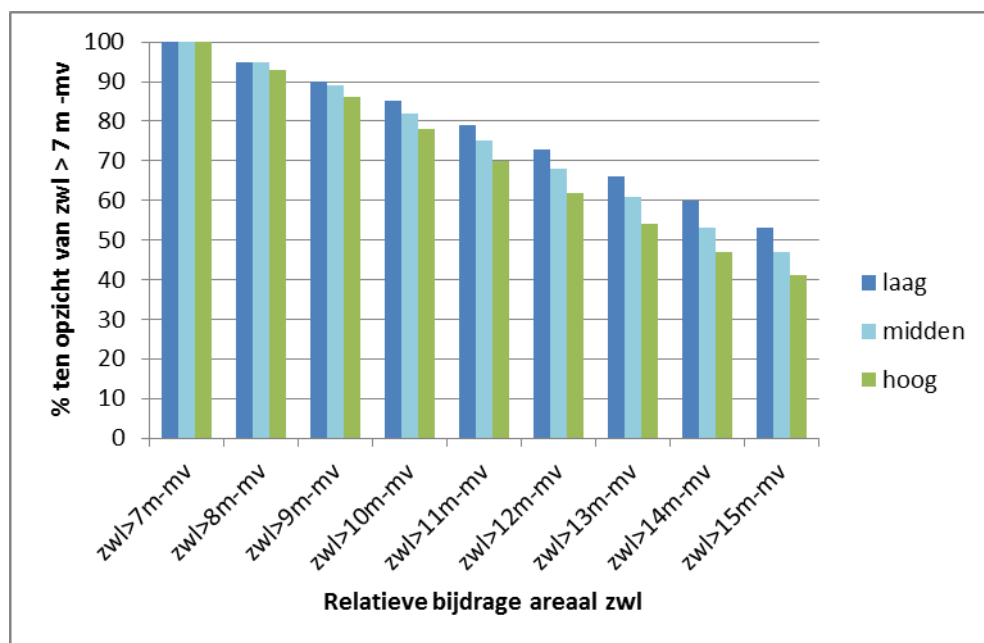
Met de airborne EM gegevens is de schijnbare elektrische geleidbaarheid van de ondergrond in de gehele provincie Zeeland bepaald. Inversiemodellen zijn vervolgens gebruikt om deze schijnbare geleidbaarheden om te zetten in lagenmodellen van werkelijke elektrische weerstanden van de ondergrond. Vervolgens is aan de hand van geologische gegevens (GeoTOP) en nieuwe data van de formatie factor en de oppervlaktegeleidbaarheid een chlorideconcentratie bepaald. Eén van de unieke aspecten van de FRESHEM studie is dat onzekerheid van de uitkomst is meegenomen. In Figuur 3.17 is de diepte van het 1500 mg Cl l⁻¹ grensvlak van het resultaat 'midden' (een 'gemiddeld resultaat') weergegeven.

Aan de hand van de FRESHEM resultaten is het oppervlaktepercentage van de dikte van de zoetwaterbellen vanaf 7 m –mv voor een aantal diepteklassen bepaald voor de resultaten 'laag', 'midden' en 'hoog'. De resultaten van deze GIS analyse zijn getoond in Figuur 3.18. Hieruit komt duidelijk naar voren dat het aandeel zoetwaterbellen tussen 7 en 15 meter significant is. Van de zoetwaterbellen met een diepte van meer dan 7 m –mv is volgens het FRESHEM resultaat 'midden' ongeveer de helft minder dik dan 15 m –mv. Uit deze zoetwaterbellen kan ook 'duurzaam' worden onttrokken, zij het met een lager debiet. In hoofdstuk 4 zal hier nader op in worden gegaan.

⁶ 'Airborne' duidt op metingen vanuit de lucht, in dit geval met behulp van een helikopter. 'EM' staat voor elektromagnetisch.

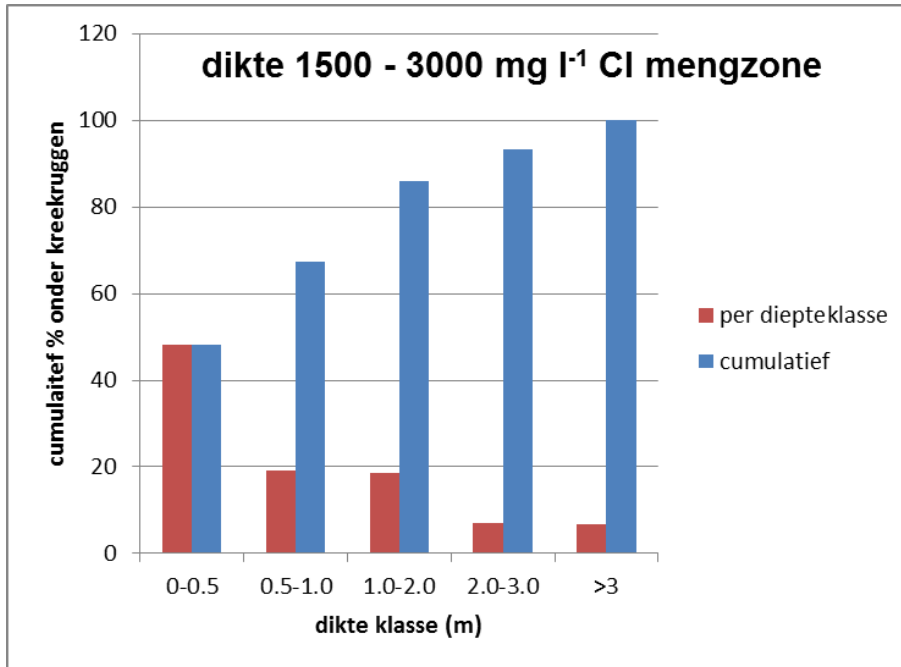


Figuur 3.17 : Resultaat 'midden' van de FRESH-EM studie in Zeeland (uit: van Baaren en al. (2017)).



Figuur 3.18 : Relatieve voorkomens (areaal) van dikte van zoetwaterbellen > 7 m -mv, voor een aantal diepteklassen en voor de FRESHM resultaten 'laag', 'midden' en 'hoog'.

Uit de FRESHM dataset is ook de dikte van de mengzone bepaald, voor een vergelijking met de uitkomsten van de numerieke simulaties (hoofdstuk 4). Hiervoor is met behulp van een GIS analyse het verschil tussen de diepte van de 1500 en 3000 mg Cl l⁻¹ grensvlakken bepaald, als kenmerk voor de mengzone. De resultaten van deze analyse zijn weergegeven in Figuur 3.19. Daarin komt naar voren dat in bijna 70 % van de gevallen de dikte minder is dan 1 m.

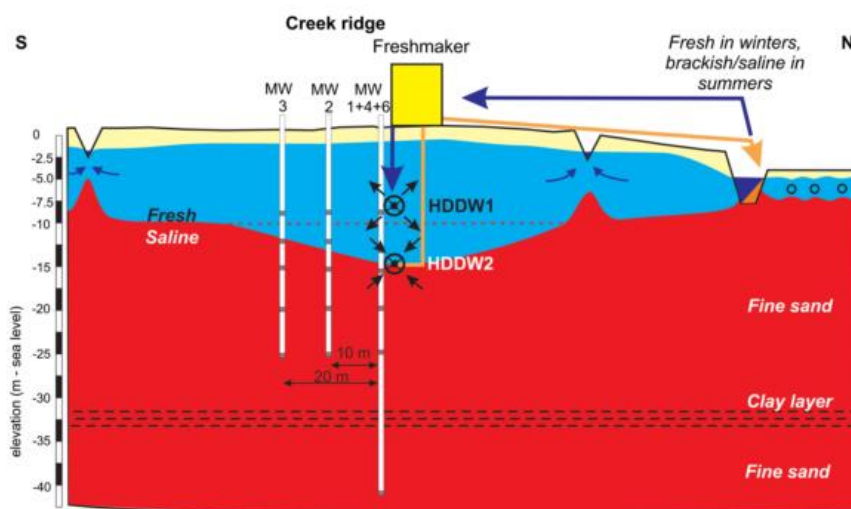


Figuur 3.19: Dikte van de mengzone (verschil tussen de 1500 en 3000 mg Cl l⁻¹ grensvlakken uit FRESHEM) per diepteklasse.

3.5 Zoetwatervoorzieningsmaatregelen

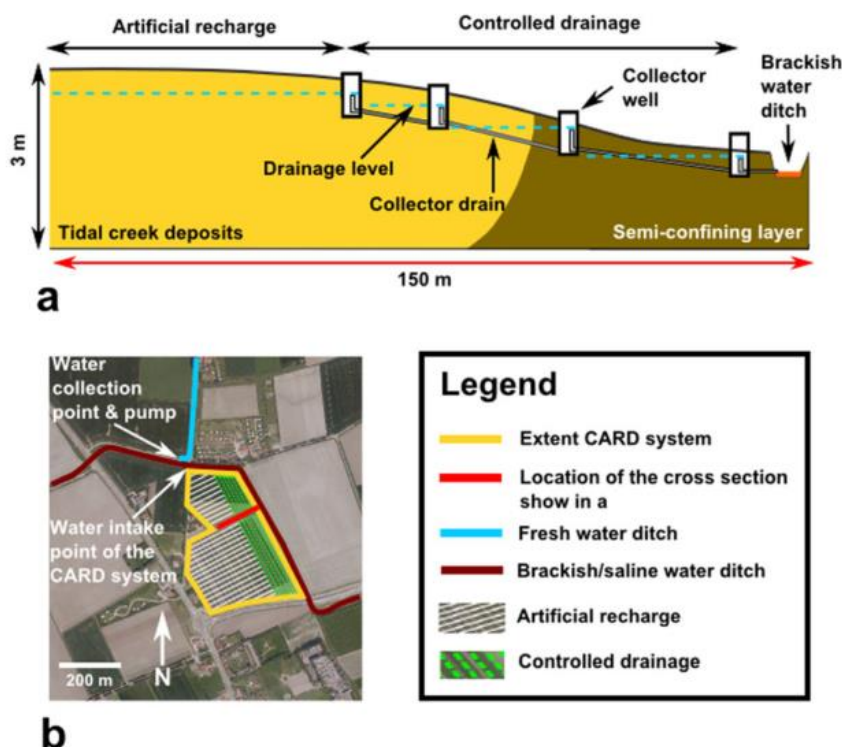
Binnen het project GO-FRESH (oplevering begin 2018) zijn twee veldproeven (Freshmaker en Kreekrug Infiltratie Systeem) gestart om kunstmatige infiltratie van zoet water te realiseren, met als doel om dit in de winter opgeslagen water te gebruiken voor beregeningsdoeleinden in de zomer. De resultaten van beide proeven zijn dusdanig positief dat een toename van de te onttrekken hoeveelheid zoet water verwacht mag worden. Naar verwachting eind 2018 wordt bekend welke volumes precies extra kunnen worden onttrokken.

Extra infiltratie leidt tot een verdieping van de zoetwaterbel. Bij de Freshmaker (Zuurbier et al., 2015) gebeurt dat relatief snel maar vooral lokaal (zie Figuur 3.20). Met behulp van een horizontale onttrekking (HDDW1) wordt zoet water ingebracht in de winter en onttrokken tijdens de zomer. De onderliggende zoute onttrekking wordt gebruikt om zout water weg te pompen op zoutwater opkegeling te beperken en om ruimte te creëren voor de ontwikkeling van de zoetwaterbel.



Figuur 3.20: Opzet van de Freshmaker. Uit: Zuurbier et al. (2015).

Bij het Kreekrug Infiltratie Systeem vindt de uitbreiding van de zoetwaterbel langzamer maar over een groter oppervlak plaats. Hiervoor wordt een peilgestuurd drainagesysteem gebruikt (Pauw et al., 2015), zie Figuur 3.21.



Figuur 3.21: Schets van het Kreekrug Infiltratie Systeem. Uit: Pauw et al. (2015)

Voor verdere details over de proeven wordt hier verwezen naar Oude Essink et al. (2014). In relatie tot de algemene regels zijn beide proeven niet direct opgenomen, alhoewel het duidelijk is dat extra infiltratie leidt tot extra mogelijkheden tot onttrekking. Een systeem met infiltratie valt onder het vergunningsregime vanwege het benodigde maatwerk.

In hoofdstuk 4 wordt ter indicatie een korte kwantitatieve analyse gedaan van het kunstmatig infiltreren van zoet water in de ondergrond.

3.6 Onttrekkingstypes en configuraties

3.6.1 Algemeen begrip van zoutwater opkegeling onder onttrekkingen

Voor een algemeen, kwantitatief begrip van zoutwater opkegeling onder onttrekkingen kunnen analytische oplossingen gebruikt worden. Deze analytische oplossingen zijn vanwege de complexiteit van het mengen van zoet en zout grondwater vaak gebaseerd op de scherp grensvlak benadering (zie sectie 2.1). Een analytische oplossing heeft ten opzichte van numerieke modellen als voordeel dat het snel inzicht oplevert in de gevoeligheden van de verschillende parameters. Aan de hand van de volgende analytische oplossing (aangepast uit Dagan en Bear (1968) en Pauw et al. (2015)), zijn deze gevoeligheden bepaald:

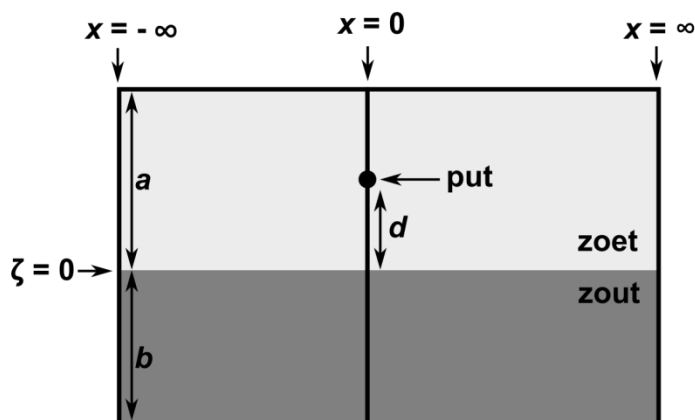
$$\zeta_{om}(x, t) = \frac{Q_d}{\delta\pi\sqrt{K_h K_v}} \int_0^{\infty} \frac{1}{\lambda} \frac{\cosh[\lambda(a-d)]}{\sinh(\lambda a)} \left[1 - \exp \frac{-\lambda t}{\frac{n}{\delta K_v} \coth(a\lambda) + \frac{n}{\delta K_v} \coth(b\lambda)} \right] \cos\left(\lambda x \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}\right) d\lambda \quad (6)$$

Hierin is, met dezelfde eenheden die in dit hoofdstuk zijn gebruikt:

- ζ (m) de hoogte van het grensvlak ten opzichte van de initiële diepte
- x (m) de afstand tot de onttrekking
- t (d) de tijd
- Q_d ($m^2 d^{-1}$) het debiet van de onttrekking per strekkende meter horizontale onttrekking
- δ (-) het dimensieloze relatieve dichtheidsverschil (zie vergelijking (2))
- K_h ($m d^{-1}$) de horizontale doorlatendheid
- K_v ($m d^{-1}$) de verticale doorlatendheid
- a (m) de dikte van het zoetwaterpakket
- b (m) de dikte van het zoutwaterpakket
- d (m) de afstand van de onttrekking tot het initiële grensvlak
- n (-) de porositeit
- λ (-) de integratieconstante

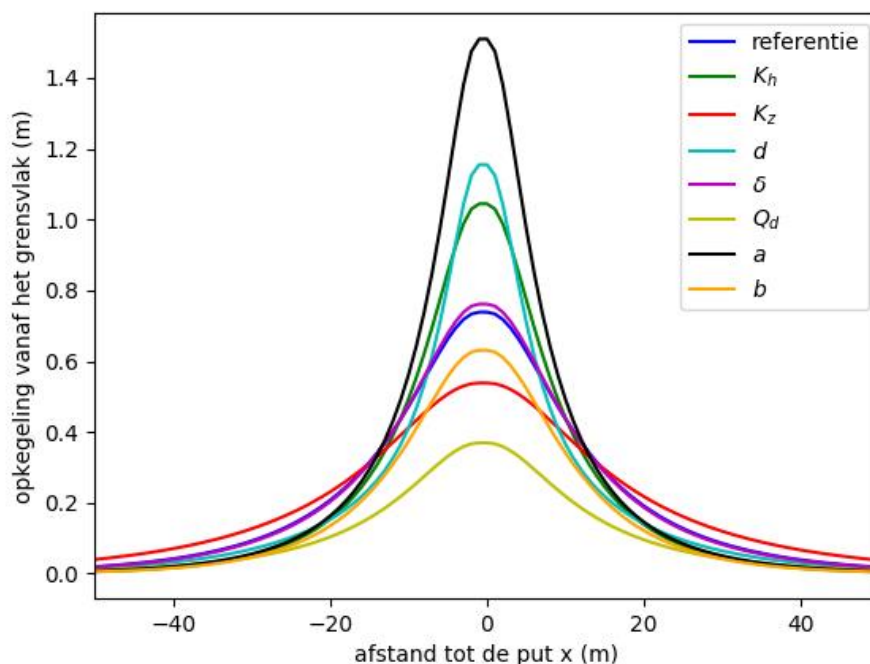
In Figuur 3.22 is een schets weergegeven van het achterliggende modelconcept van vergelijking (6). Het concept omvat een horizontale onttrekking met een oneindige lengte in een oneindig horizontaal domein. Het verticale domein is wel eindig (a en b). Voor verdere details wordt hier verwezen naar Dagan en Bear (Dagan & Bear, 1968). Voor een periode van $t = 7$ dagen zijn de volgende referentieparameters gebruikt:

- $Q_d = 2 m^2 d^{-1}$ (160 m^3 per dag voor 80 m onttrekking)
- $\delta = 0.025$ (dichtheid zoet grondwater = 1000 $kg m^{-3}$ en zout grondwater = 1025 $kg m^{-3}$)
- $K_h = 7 m d^{-1}$
- $K_v = 7 m d^{-1}$
- $a = 15 m$
- $b = 25 m$
- $d = 10 m$
- $n = 0.38$



Figuur 3.22: Modelopzet in dwarsdoorsnede voor vergelijking (6).

Met uitzondering van de porositeit is voor elk van deze parameters apart het effect van een halvering van de waarden onderzocht. Figuur 3.23 geeft daarvan de resultaten.



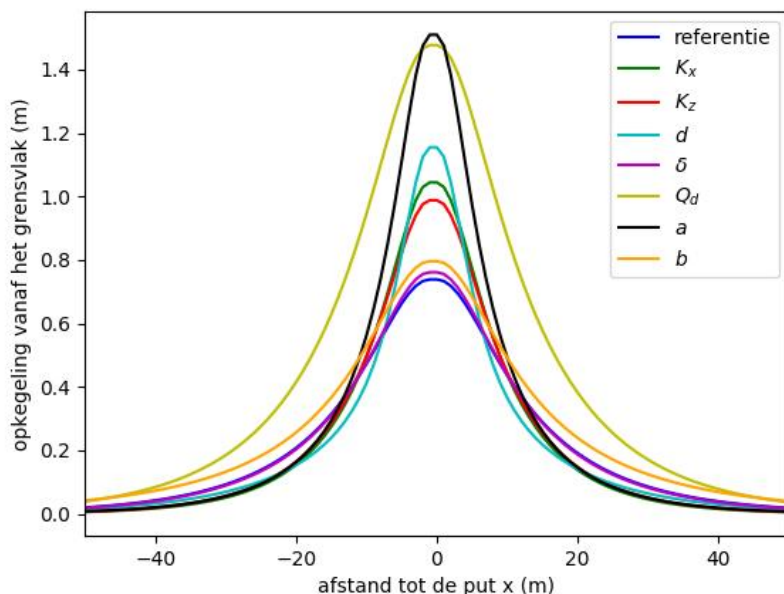
Figuur 3.23: Effect van een halvering van verschillende parameters ten opzichte van de referentiewaarden, op de hoogte van het grensvlak ζ onder de onttrekking (zoutwater opkegeling).

Figuur 3.23 laat zien dat de zoutwater opkegeling toeneemt bij:

- een afname van de dikte van het zoetwater pakket (a), de afstand tussen de onttrekking en het initiële grensvlak (d), de horizontale doorlatendheid (K_h) en het relatieve dichtheidsverschil δ .
- een toename van de dikte van het zoutwater pakket (b), de verticale doorlatendheid (K_v), en het debiet (Q_d).

Een afname van de horizontale doorlatendheid leidt dus tot een dikkere zoetwaterbel (zie ook sectie 3.1.4) maar snellere zoutwater opkegeling. Verder suggereert Figuur 3.23 dat de invloed van b en δ beperkt is voor deze variatie in parameters. Verdubbelt i.p.v. halveert men de parameters Q_d , b en K_v , dan leiden alle parameters tot een verhoging van de zoutwater opkegeling ten opzichte van de referentieparameters, zie Figuur 3.24. Hieruit valt op te

maken dat het debiet van de onttrekking Q_d , de dikte van het zoetwater pakket a en de afstand van de onttrekking tot het initiële grensvlak d de meest invloedrijke parameters zijn voor de gekozen set van parameter waarden. De doorlatendheden hebben een minder grote invloed. De parameters b en δ hebben de minste invloed.



Figuur 3.24: Effect van een halvering of verdubbeling (in geval van Q_d , b en K_v) van verschillende parameters ten opzichte van de referentiewaarden, op de hoogte van het grensvlak ζ onder de onttrekking (zoutwater opkegeling).

Zoals in sectie 3.1.4 is beschreven houdt de scherp grensvlak benadering geen rekening met menging van zoet en zout grondwater. Verder is aangenomen dat K_h en K_v uniform zijn (homogeen) en Q_d constant. Deze aannames zullen in de numerieke modellering (hoofdstuk 4) verder worden beschouwd.

Na het opstellen van de huidige regels in de Beleidsnota Grondwater versie 3.5 en het Grondwaterbeheersplan Zeeland 2002-2007 zijn relatief veel studies verschenen waarin de menging van zoet en zout grondwater middels modellen is onderzocht, met name studies van numerieke modellering (Werner et al., 2013). Studies die specifiek gerelateerd zijn aan zoutwater opkegeling zijn gedocumenteerd door o.a. Werner et al. (2009), Jakovovic et al. (2011) en De Louw et al. (2013). De Louw et al. (2013) beschrijven het proces van zoutwater opkegeling die gepaard gaat met zoute wellen in de diepe Nederlandse polders, en laten duidelijk zien dat in een stationaire situatie, waarbij het zoutgehalte van de wel niet meer varieert, het zoutgehalte van de wel een mix is van grondwater dat van verschillende dieptes met verschillend zoutgehalte wordt aangevoerd.

Recent hebben Werner et al. (2009) en Jakovovic et al. (2011) resultaten van laboratorium experimenten van zoutwater opkegeling gepresenteerd. Belangrijke conclusies in deze onderzoeken waren dat:

- 1) Vergelijking (6) goed gebruikt kon worden voor het reproduceren van de hoogte van het centrum van de zoet-zout overgangszone onder de onttrekking, tot een bepaalde hoogte die gelijk is aan $0.3d$. Boven deze hoogte verandert de vorm van de kegel van zout grondwater van concaaf naar convex en is de analytische vergelijking niet

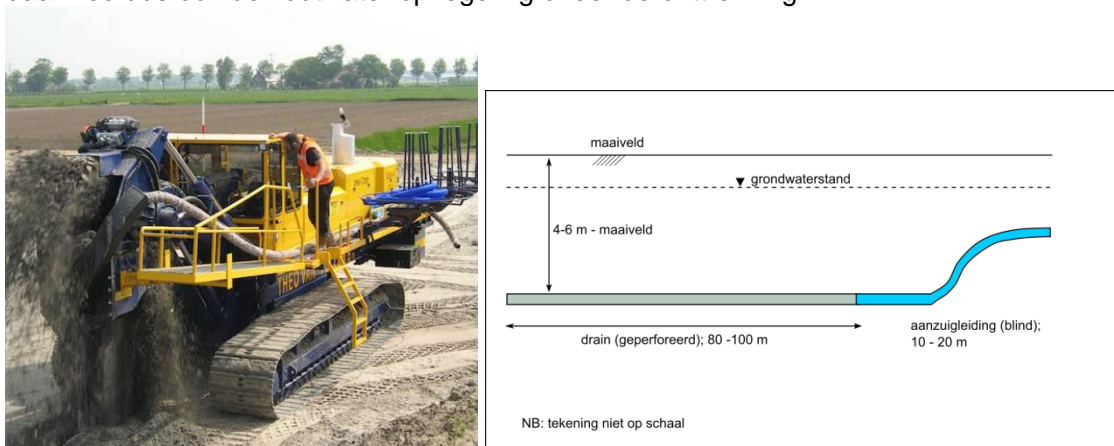
nauwkeurig meer. Onder deze omstandigheden mag ook verwacht worden dat er (enig) zout water in de onttrekking terecht komt door mening (Pauw et al. 2016). Voor veel praktische situaties kan vergelijking (6) dus goed gebruikt worden voor een inschatting van de zoutwater opkegeling. Menging kan echter maar beperkt gesimuleerd worden (Pauw et al. 2016).

- 2) Numerieke modellen goed gebruikt kunnen worden voor het simuleren van zoutwater opkegeling, inclusief menging door hydrodynamische dispersie.

Beide bovenstaande conclusies zijn belangrijk voor de meerwaarde van modellen wat betreft het simuleren van zoutwater opkegeling.

3.6.2 Horizontale onttrekkingen

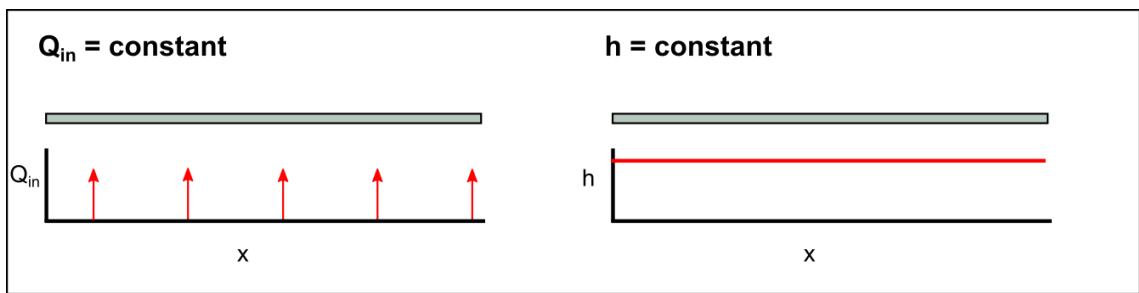
Horizontale onttrekkingen voor de beregening in Zeeland bestaan in veel gevallen uit een drain, die met een (speciale) drainagemachine in de grond gefreesd wordt op zo'n 4 tot 6 meter beneden maaiveld (Figuur 3.25). Het geperforeerde gedeelte is doorgaans 80 – 100 meter lang. Aan het begin van de onttrekking bevindt zich een dicht (blind) gedeelte dat fungeert als aanzuigleiding. In de aanzuigleiding kan de pomp worden geplaatst. Het voordeel van horizontale onttrekkingen ten opzichte van verticale onttrekkingen is dat de stijghoogteverlaging bij de onttrekking per volume onttrokken grondwater kleiner is, en daarmee dus ook de zoutwater opkegeling onder de onttrekking.



Figuur 3.25: Links: voorbeeld van een grondwateronttrekking die wordt aangelegd door een drainagemachine (bron: www.theovanvelzen.nl). Rechts: schematische opzet van een horizontale onttrekking. De pomp bevindt zich in de aanzuigleiding.

In veel (numerieke) modellen wordt aangenomen dat over de lengte van de horizontale onttrekking de instroom of de stijghoogte constant is (Figuur 3.26). Tarnish (1992) heeft met modelberekeningen als eerste aangetoond dat de instroom over de lengte van de onttrekking vaak varieert, en dat ook de stijghoogte in de onttrekking varieert. Hetzelfde kan overigens verwacht worden in verticale onttrekkingen; hier worden dergelijke aannames ook vaak gedaan.

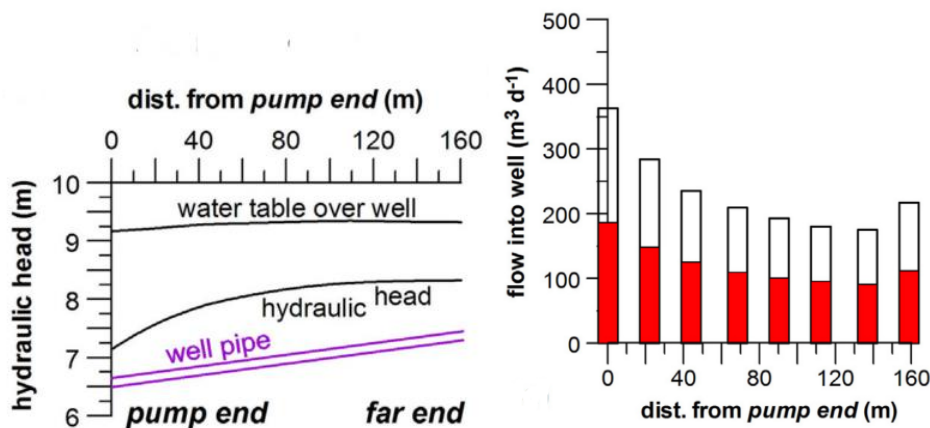
Er is relatief weinig experimenteel werk gedocumenteerd over de werking van horizontale onttrekkingen. Kim et al. (2008) toonden met een laboratorium experiment aan dat ongeveer 80% van de stijghoogteverliezen optreden in de eerste helft van de horizontale onttrekking, gezien vanaf de aanzuigkant. Chen et al. (2003) gebruikten een 4.63 meter lange onttrekking in hun laboratorium experiment, en kwam tot dezelfde conclusie als Tarnish (1992), namelijk dat zowel de stijghoogte als de instroom varieert langs de horizontale onttrekking.



Figuur 3.26: Twee aannames die vaak worden gedaan in (numerieke) modellen. Links: constante instroom van grondwater (Q_{in}) over de gehele lengte van de onttrekking. Rechts: constante stijghoogte in de onttrekking.

In het onttrekkingsexperiment in Heinkenszand (sectie 2.2) bleek ook onder andere dat de verlaging van de grondwaterstand boven de onttrekking afneemt vanaf het punt waar het water wordt aangezogen (begin van de onttrekking) tot aan het einde van de onttrekking. Dit kan betekenen dat er binnen de onttrekking drukverliezen optreden en dat de toestroming van water naar de onttrekking afneemt vanaf het begin tot aan het eind.

Rushton en Brassington (2013a) presenteerden recent de bevindingen van een veldexperiment van een 300 m lange horizontale onttrekking in het noordwesten van Engeland. Daarbij is o.a. gebleken, net als voorgaande studies, dat de instroom per lengte onttrekking niet constant is. In een gerelateerd onderzoek (Rushton en Brassington 2013b) toonden zij aan dat voor een 160 meter lange onttrekking met een debiet van 1880 m³ per dag ook significante drukverliezen op kunnen treden (zie Figuur 3.27). In dit geval kwam er aan het begin van de onttrekking ongeveer 1.5 keer zoveel water in de onttrekking terecht vergeleken met aan het eind van de onttrekking. In hoofdstuk 4 zal verder worden ingegaan op de mogelijke invloed van deze variaties op de zoutwater opkegeling onder de onttrekking.



Figuur 3.27: Resultaten uit Rushton en Brassington (2013b). Links: vergelijking van de stijghoogte in de horizontale onttrekking aan het eind (far end) en begin (pump end) van de horizontale onttrekking. Rechts: variatie van de instroom van grondwater over de lengte van de horizontale onttrekking.

4 Kwantitatieve indicatie van de implicaties van de nieuwe inzichten voor de huidige onttrekkingsregels

4.1 Algemene aanpak

Voor een kwantitatieve indicatie van de implicatie van de nieuwe inzichten voor de huidige regelgeving zijn, naast een aantal analytische berekeningen, voornamelijk numerieke modellen gebruikt. De voornaamste redenen voor het gebruik van numerieke modellen zijn:

- 1) Om dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld (advectief en dispersief) zouttransport te simuleren. Vooral het simuleren van menging van zoet, brak en zout grondwater (hydrodynamische dispersie) is een nieuw aspect ten opzichte van de numerieke modellen die ten grondslag liggen aan de huidige onttrekkingsregels.
- 2) Om complexe ruimtelijke en tijdsafhankelijke randvoorwaarden te simuleren.

De numerieke code SEAWAT (Langevin et al. 2007) is gebruikt voor de simulaties. Voor een overzicht van de differentiaalvergelijkingen die in SEAWAT worden opgelost (en die dus in deze studie ook zijn gebruikt) wordt verwezen naar Guo en Langevin (2002).

Aan de hand van de numerieke simulaties zijn de algemene regels binnen de onttrekkingsregels (Tabel 2.4) geëvalueerd voor wat betreft de permanente onttrekkingen. Voor zoetwaterbellen > 15 m ('zoete gebieden') of voor zoetwaterbellen tot de geohydrologische basis gelden daarbij de volgende debieten:

- $10 < Q < 60 \text{ m}^3$ per uur én
- $Q < 3.000 \text{ m}^3$ per kwartaal én
- $Q < 8.000 \text{ m}^3$ per jaar

In overleg met Provincie Zeeland en Waterschap Scheldestromen is besloten om van een maximaal debiet van 42 m^3 per uur (ongeveer 1000 m^3 per dag) uit te gaan, omdat in de praktijk door drukverliezen een debiet van 60 m^3 per uur veelal niet gehaald wordt.

Binnen de algemene regels voor permanente onttrekkingen voor zoetwaterbellen < 15 m gelden de volgende debieten (sectie 2.7):

- Pompcapaciteit $Q < 5 \text{ m}^3$ per uur én een jaarlijks debiet Q van < 12000 m^3 per jaar.

Voor zowel de algemene regels voor zoetwaterbellen > 15 meter als voor zoetwaterbellen < 15 meter is allereerst een referentie model gemaakt met een representatieve modelopzet, bijbehorende randvoorwaarden en gemiddelde modelparameters. De opzet en resultaten van deze modellen zijn beschreven in de volgende sectie 4.2.

4.2 Methode en resultaten referentie modellen

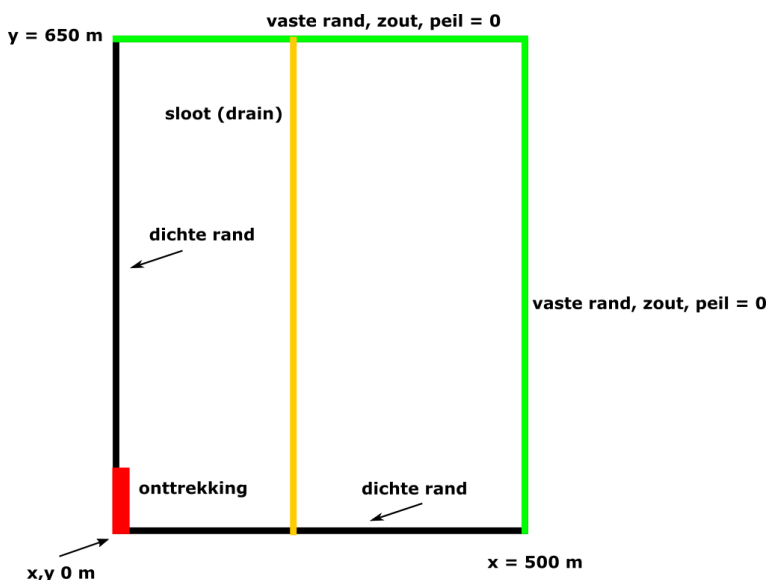
4.2.1 Modelopzet en randvoorwaarden

4.2.1.1 Zoetwaterbel > 15 m dikte

In Figuur 4.1 is een bovenaanzicht van het referentie model weergegeven voor het geval van een zoetwaterbel met een dikte van meer dan 15 m. Dit model is representatief voor relatief brede kreekkruggen waar drainerende sloten op de kreekkrug aanwezig zijn, zoals valt af te leiden uit Figuur 3.16. Het model heeft arbitraire horizontale afmetingen van 650 bij 500 m en een dikte van 41 meter. De top van het model bevindt zich op 2 meter boven NAP.

Er is gebruikt gemaakt van symmetrie om de rekentijd van de numerieke simulaties te beperken. De dichte randen van het model (Figuur 4.1) fungeren hierbij als symmetrieassen, zodat maar $\frac{1}{4}$ van het werkelijke domein hoeft te worden doorgerekend. Voor het berekenen van de invloed van heterogeniteit, klimaatverandering, zeespiegelstijging, fysiogeografische kenmerken en zoetwatervoorzieningsmaatregelen is dit concept toegepast. In sectie 4.8, waarin verschillende onttrekkingsconfiguraties aan bod komen, komen situaties aan bod waar symmetrie beperkter toepasbaar is; in deze sectie is daarom voor een enigszins andere opzet gekozen. Het centrum van de horizontale onttrekking met een lengte van 40 m bevindt zich op $x = 0$ en $y = 0$ m en op een diepte van - 5 m beneden maaiveld (-3 m NAP).

Op 150 m van de onttrekking bevindt zich een sloot met een afvoerpeil van 1.7 m beneden maaiveld. De sloot is over de gehele lengte van de y-as aanwezig en is representatief voor sloten die over de kreekkrug heen lopen. Het afvoerpeil en de weerstand van de sloot zijn dusdanig gekozen om de zoetwaterbel op de gewenste dikte te krijgen (in dit geval op 15 m beneden maaiveld). Er is dus uitgegaan van een 'worst case' scenario; bij dikkere zoetwaterbellen zal de opkegeling onder de onttrekking en het zoutgehalte in de onttrekking lager zijn. Deze sloot fungeert als een droogvallende sloot (drain); wanneer het grondwaterpeil beneden 1.7 m beneden maaiveld zakt, treedt er geen drainage op.



Figuur 4.1: Boven-aanzicht van de randvoorwaarden van het model waarin de zoetwaterbel een dikte heeft van meer dan 15 m beneden maaiveld.

Op $y = 650$ m bevindt zich ook een sloot, maar met een lager waterpeil (0 m NAP). Dit waterpeil zorgt ervoor dat de zoetwaterbel eindigt op $y = 650$ m, wat weer een 'worst case' aanpak is. Onder deze sloot heerst een hydrostatische drukverdeling en is de chlorideconcentratie gelijk aan de maximale chlorideconcentratie van het grondwater. Door deze manier van schematisatie kan er zout water het model instromen.

Beide bovengenoemde sloten bevinden zich op de kreekrug, en hebben in dit concept een slootdichtheid van $(500 + 650 \text{ m} / (500 \cdot 650 \text{ m})) = 0.003538 \text{ m/m}^2$ of 354 m/ha. Dit komt goed overeen met de slootdichtheid dit gevonden is in sectie 3.4 (383 m/ha).

De sloot op $x = 500 \text{ m}$ die over 650 m aanwezig is, is representatief voor een sloot die buiten de kreekrug ligt (in de poelgronden). Deze sloot heeft ook een waterpeil van 0 m en een hydrostatische drukverdeling waardoor zout grondwater het model kan instromen. Tussen $x = 460 \text{ m}$ en $x = 500 \text{ m}$ is over de gehele lengte in de y -as richting een slecht doorlatende laag aanwezig vanaf maaiveld tot -5 m NAP met een weerstand van ongeveer 1200 dagen. Deze laag is representatief voor de poelgronden. Een gevoeligheidsanalyse van de invloed van de weerstand van de deklaag heeft uitgewezen dat deze geen significante invloed heeft op de diepte van het zoet-zout grensvlak onder de onttrekking. De reden hiervoor is dat de drainerende sloot op $x = 150 \text{ m}$ zorgt voor een lokaal stromingssysteem (zie Figuur 2.3) die vooral van invloed is op de diepte van het grensvlak onder de onttrekking.

In het model zijn (gewone) drains aanwezig met een constant peil van 1 m –mv en met een onderlinge afstand van 10 m. De weerstand van de drains is berekend op basis van de methode van Wim de Lange (De Lange, 1999), en hangt af van de doorlatendheid van het watervoerende pakket en de weerstand van de drain zelf (10 dagen).

Twee simulaties zijn gebruikt voor het simuleren van de invloed van een onttrekking onder de kreekrug; een initialisatie-simulatie en een onttrekking-simulatie. De initialisatie-simulatie start met een concentratie in het model die gelijk is aan de maximale concentratie van het grondwater. Gedurende 200 jaar treedt er als gevolg van de zoete grondwateraanvulling (sectie 4.2.2) verzoeting op waardoor er een zoetwaterbel ontstaat. Er is in deze initialisatie-simulatie gerekend met wekelijkse stress-perioden; de grondwateraanvulling en de verdamping hebben dus ook deze dynamiek. Zowel de grondwateraanvulling als de verdamping zijn gebaseerd op een gemeten tijdserie van 20 jaar (zie sectie 4.2.2). Aan het eind van de initialisatie-simulatie is de zoetwaterbel min of meer in evenwicht gekomen en breidt zich niet meer naar de diepte toe uit. In deze simulatie is de onttrekking niet aanwezig.

De uitvoer van de initialisatie-simulatie is de invoer voor de onttrekkingssimulatie, waarin voor een periode van 40 jaar de invloed van een onttrekking op de concentratie in de onttrekking en de diepte van het zoet-zout grensvlak ($1500 \text{ mg Cl l}^{-1}$) is gesimuleerd met dagelijkse stress-perioden. Secties 4.2.2 t/m 4.2.4 beschrijven in meer detail hoe de grondwateraanvulling, verdamping, onttrekking en doorlatendheid zijn gesimuleerd.

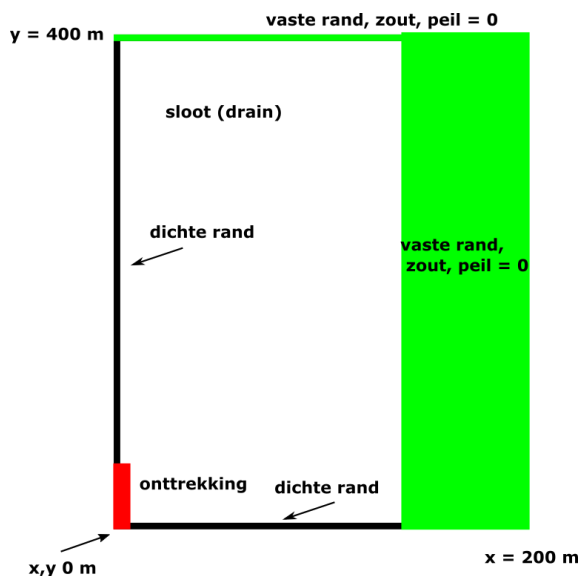
De gridcellen rondom de onttrekking zijn fijn genoeg gekozen om de invloed van numerieke dispersie en 'versmering' ('numerieke mening') van de concentraties op de modeluitkomsten rondom de onttrekking te beperken. In 'Verantwoording van de gridresolutie' zijn de gekozen waarden uitgebreid toegelicht. Buiten de invloedzone van de onttrekking nemen de gridcellen stapsgewijs in volume toe. In de simulaties zijn verder een aantal referentie (model)parameters gehanteerd. Deze zijn weergegeven in Tabel 4.1. In alle simulaties is chloride (Cl) als maat voor het zoutgehalte gebruikt en is de dichtheid van het grondwater lineair afhankelijk van de chlorideconcentratie.

Tabel 4.1: Referentie (model)parameters in de numerieke simulaties.

Parameter	Symbool	Waarde
Initiële dichtheid	ρ_s	1022 kg m ⁻³
Initiële concentratie	C_s	16.4 g Cl l ⁻¹
Freatische bergingscoëfficiënt	S_y	0.15
Freatische bergingscoëfficiënt	S_s	10 ⁻⁴ m ⁻¹
Convergentie criterium stijghoogte	$HCLOSE$	10 ⁻⁵ m
Convergentie criterium massa	$RCLOSE$	1 kg
Relatief concentratie convergentie criterium	$CCLOSE$	10 ⁻⁵
Longitudinale dispersie	α_l	0.1 m
Transversale horizontale dispersie	α_{TH}	0.01 m
Transversale verticale dispersie	α_{TV}	0.001 m
Diffusie coefficient	D_m	0.25 · 10 ⁻⁹ m d ⁻¹
Courant getal	Cr	1.0

4.2.1.2 Zoetwaterbel < 15 m dikte

De opzet van het model waarin een zoetwaterbel met een dikte van minder dan 15 m is gesimuleerd is weergegeven in Figuur 4.2. De opzet is vrijwel gelijk aan de opzet van het model met een zoetwaterbel dikker dan 15 meter, behalve dat de drainerende sloot die over de kreekrug heen loopt niet aanwezig is. Het afwezig zijn van deze sloot heeft een positieve invloed op de dikte van de zoetwaterbel. Echter, de breedte van de kreekrug is smaller waardoor de dikte van de zoetwaterbel uiteindelijk toch geringer is. De breedte is aangepast door een vaste stijghoogte rand tussen $x = 120$ m en $x = 200$ aan te brengen. Deze is niet over de gehele verticaal aanwezig maar alleen in de eerste modellaag, en heeft als doel een sloot- of drainagesysteem te simuleren. Zoals in sectie 4.2.5 is beschreven, zorgt de afwezigheid van een sloot ervoor dat er geen lokaal stromingssysteem aanwezig is. Bovendien heeft, zoals verderop in dit hoofdstuk zal blijken, in dit geval de doorlatendheid van de deklaag wél invloed op de diepte van het grensvlak. Deze opzet van dit model is representatief voor smalle kreekruggen waar (in de richting parallel aan de strekking van de kreekrug) geen drainerende sloten aanwezig zijn en waar de sloot of het slootsysteem op het lager gelegen gedeelte van de kreekrug (loodrecht op de strekking van de kreekrug) in de kleiige sedimenten gelegen is, waardoor de stroming onder de waterloop door verwaarloosd kan worden.



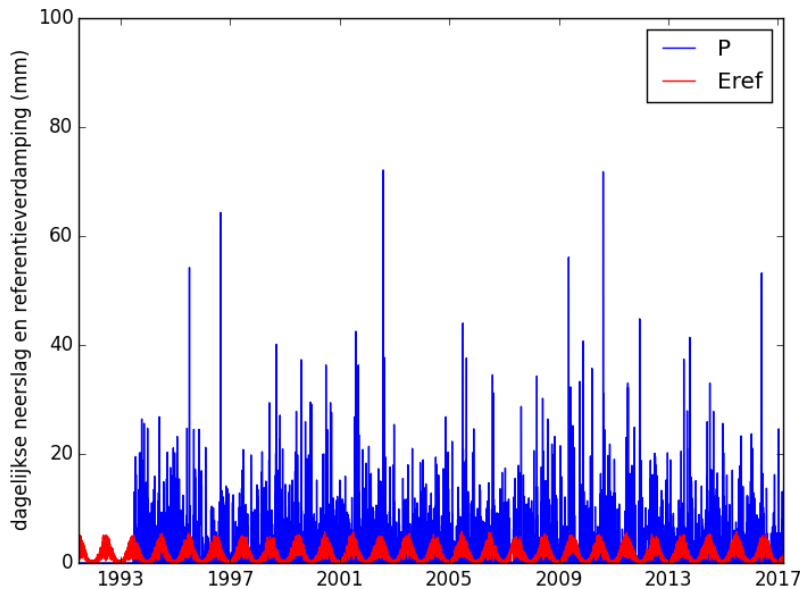
Figuur 4.2: Bovenaanzicht van de randvoorwaarden van het model waarin de zoetwaterbel een dikte heeft van minder dan 15 m beneden maaiveld.

4.2.2 Grondwateraanvulling en verdamping

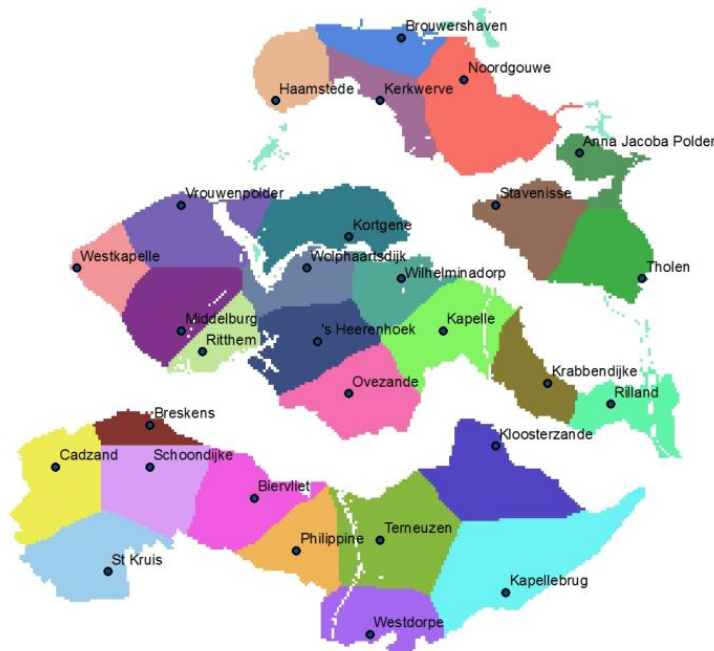
Voor deze studie is gekozen om de grondwateraanvulling te berekenen uit gegevens van de verdamping en de neerslag. Voor de verdamping is gekozen om het concept van Makkink te gebruiken (sectie 2.3) in combinatie met de verdampingsdata van het KNMI. De voornaamste reden voor deze keuze is de beschikbaarheid van de data; voor de verdampingsdata is een lange (enkele decennia) periode gewenst om een representatieve tijdserie van de grondwateraanvulling te genereren voor het ontwikkelen van de zoetwaterbel onder de kreekruggen.

In de provincie Zeeland wordt de verdamping gemeten bij de weerstations Vlissingen en Westdorpe (Figuur 3.11). Vlissingen ligt dicht bij de kust. Het lokale klimaat in een smalle strook langs de kust kan aanzienlijk afwijken van het binnenland (CHO-TNO, 1988). Daarom is besloten om alleen het weerstation Westdorpe te gebruiken voor de actuele verdamping. Van dit weerstation is data beschikbaar vanaf 1991 (zie Figuur 4.3).

De neerslag wordt op veel meer plekken gemeten dan de verdamping. Om een 'gemiddelde' neerslag in de provincie Zeeland te berekenen is het ruimtelijk gewogen gemiddelde van de neerslag bepaald van alle regenstations in de provincie Zeeland. De invloedssfeer van elk neerslag station is allereerst bepaald via een GIS-analyse (Figuur 4.4). Vervolgens is op basis van deze gebieden een areaalgewogen gemiddelde bepaald van de dagelijkse neerslag op basis van de invloedssfeer. Vanaf 1996 is van elk van de stations een continue serie beschikbaar. Daarom is een 20-jarige tijdserie van 1996 t/m 2015 gebruikt. Dezelfde serie is gebruikt voor de verdampingsreeks. Voor de 40-jarige simulatie zijn twee series van 20 jaar achter elkaar gebruikt.



Figuur 4.3: Dagelijkse neerslag (P) en referentieverdamping (E_{ref}), gemeten bij het KNMI weerstation Westdorpe.



Figuur 4.4: Ruimtelijke verdeling en invloedssfeer van de neerslagstations in Zeeland.

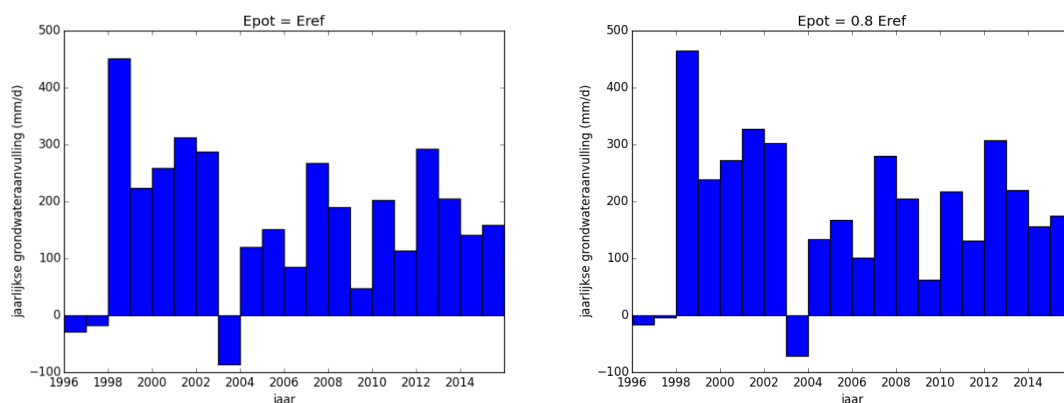
De grondwataanvulling is bepaald volgens vergelijking (5) ; het verschil tussen de neerslag (P) en de potentiële verdamping (E_p). De potentiële verdamping is berekend door de gemeten Makkink referentieverdamping E_{ref} te vermenigvuldigen met de gewasfactor (4). Er is gekozen voor gemiddelde gewasfactor tussen aardappelen en boomgaard (CHO-TNO, 1988; NHV-Werkgroep Verdamping, 2015). De resulterende waarden zijn weergegeven in Tabel 4.2. In

mei, juli en augustus varieert de gemiddelde gewasfactor; per week is deze variatie lineair geïnterpoleerd.

Tabel 4.2: Toegepaste gewasfactoren per maand.

Maand	Gewasfactor aardappel	Gewasfactor boomgaard	gemiddeld
Januari	0.7	1.0	0.85
Februari	0.7	1.0	0.85
Maart	0.7	1.4	1.05
April	0.7	1.4	1.05
Mei	0.7 – 0.9	1.4	1.05 - 1.15
Juni	1.2	1.6	1.4
Juli	1.1 – 1.2	1.7	1.4 - 1.45
Augustus	1.1	1.2 – 1.3	1.15 - 1.2
September	0.7	1.2	0.95
Oktober	0.7	1.0	0.85
November	0.7	1.0	0.85
December	0.7	1.0	0.85

De referentieverdamping volgens Makkink heeft in de winter (oktober t/m februari) geen fysische betekenis (CHO-TNO, 1988). Het gebruik ervan, en de waarde van de gewasfactor f , is dus discutabel. Echter, verdamping in de winter is vaak een orde grootte kleiner dan de neerslag, waardoor de invloed van de verdamping in de winter op de grondwateraanvulling relatief beperkt is. Schattingen van de potentiële verdamping van oktober t/m februari lopen uiteen van een waarde gelijk aan E_{ref} tot $0.8E_{ref}$. In deze studie is gekozen om voor de boomgaard een gewasfactor van $f = 1$ te kiezen en voor aardappelen $f = 0.7$. Het effect van een reductie van 80% op deze waarden op de berekende grondwateraanvulling is weergegeven in Figuur 4.5. Over de periode 1996 – 2015 bedragen de gemiddelde jaarlijkse grondwateraanvullingen respectievelijk 169 mm en 184 mm. Gezien dit relatief kleine verschil is in deze studie ervoor gekozen om in de winter de in Tabel 4.2 weergegeven waarden te hanteren.



Figuur 4.5: Berekende grondwateraanvulling tussen 1996 en 2016 bij $E_p = E_{ref}$ (links) en $E_p = 0.8 E_{ref}$ (rechts).

De in Figuur 4.5 getoonde waarden voor de grondwateraanvulling gaan uit van de potentiële verdamping, dus van een gewas wat altijd optimaal van vocht is voorzien. Toepassing van de potentiële verdamping leidt tot een onderschatting van de grondwateraanvulling en (dus) van de dikte van de zoetwaterbel. In veel gevallen zal door een te lage grondwaterstand een niet-optimale verdamping ontstaan. Dit effect wordt bijvoorbeeld meegenomen in onverzadigde

zone modellen zoals HYDRUS, SWAP en het NHI (MetaSWAP). In deze studie is niet gekozen voor een onverzadigde zone model, omdat de koppeling hiervan met SEAWAT buiten het bereik van deze opdracht valt vanwege de complexiteit van deze koppeling. Een onafhankelijke berekening van de grondwateraanvulling, zonder het effect van een wegzakkende grondwaterstand door drainage en laterale afstroming, is ook niet als optie beschouwd.

Om toch enigszins het effect van niet-optimale verdamping in de modellering mee te nemen is de Evapotranspiration module van SEAWAT gebruikt. Deze module wordt in werking gesteld in het geval van een negatieve grondwateraanvulling (verdamping) binnen een stress periode. De invoer voor deze module bestaat uit de parameters SURF (diepte waarbij maximale verdamping optreedt) en EXPD (diepte vanaf SURF waarop verdamping vanuit het grondwater 0 is). Tussen SURF en EXPD neemt de verdamping lineair af. In werkelijkheid zal deze relatie echter niet-lineair zijn, zeker in het geval van een grote waarde van EXPD (Shah et al. 2007). Om voor dit effect te compenseren kan een lagere waarde voor EXPD worden gebruikt. In alle modellen zijn voor deze waarden 0.5 m voor de parameter (SURF) gebruikt. Deze waarde is gebaseerd op gemiddelde literatuurwaarden (numerieke modelstudie met HYDRUS) voor silt/zand en een gras/bos vegetatie (Shah et al., 2007). Voor dezelfde omstandigheden geven Shah et al. (2007) een waarde van ruim 3 meter voor EXPD. Om te compenseren voor het niet-lineaire effect is deze waarde verminderd tot een waarde van 2.5 m.

Complexere modelconcepten en koppelingen dan de hierboven beschreven pragmatische aanpak van de verdamping en grondwateraanvulling zijn mogelijk, maar vereisen o.a. invoerparameters die op provincieschaal niet altijd voldoende goed te bepalen zijn. Ook is de potentiële verdamping gebaseerd op slechts één meetstation in de provincie Zeeland omdat er geen ander station voorhanden is. De invloed van de doorwerking van deze aanname is in deze studie niet verder onderzocht. Zoals in sectie 3.2 is beschreven is verdamping ten opzichte van de neerslag een relatief onderbelicht aspect in hydro(geo)logische studies. Daar zou in de toekomst meer onderzoek naar gedaan moeten worden.

4.2.3 Doorlatendheid

Voor de gemiddelde doorlatendheid van de geulafzettingen onder de kreekruggen zijn de gemeten GeoTOP doorlatendheden voor de lithoklassen 'zf', 'zm' en 'zg' gebruikt, binnen de lithostratigrafische eenheid NAWA en facies 'getijdegeul'. De relatieve voorkomens van deze lithoklassen komen redelijk goed overeen met die uit REGIS Zeeland (Figuur 3.5), in dezelfde lithostratigrafische eenheid. Doorlatendheden kleiner dan 0.01 m d^{-1} zijn hierbij niet meegenomen. Het gemiddelde (de effectieve doorlatendheid volgens Stafleu en Gunnink (2016)) is berekend op 4.3 m d^{-1} . Hoewel deze waarde door Stafleu en Gunnink (2016) als representatief voor de horizontale K_h doorlatendheid is beschreven, is deze waarde in dit rapport als verticale doorlatendheid K_v aangehouden. Deze waarde komt namelijk dichter in de buurt bij gebruikte waarden in recente grondwater studies in Zeeland en is wellicht representatiever voor de diepere secties van de geulafzettingen, ook omdat veel boringen relatief ondiep zijn gezet. De horizontale doorlatendheid is berekend met een anisotropie waarde van 1.43 (REGIS Zeeland). Daarmee komt de horizontale doorlatendheid uit op 6.2 m d^{-1} .

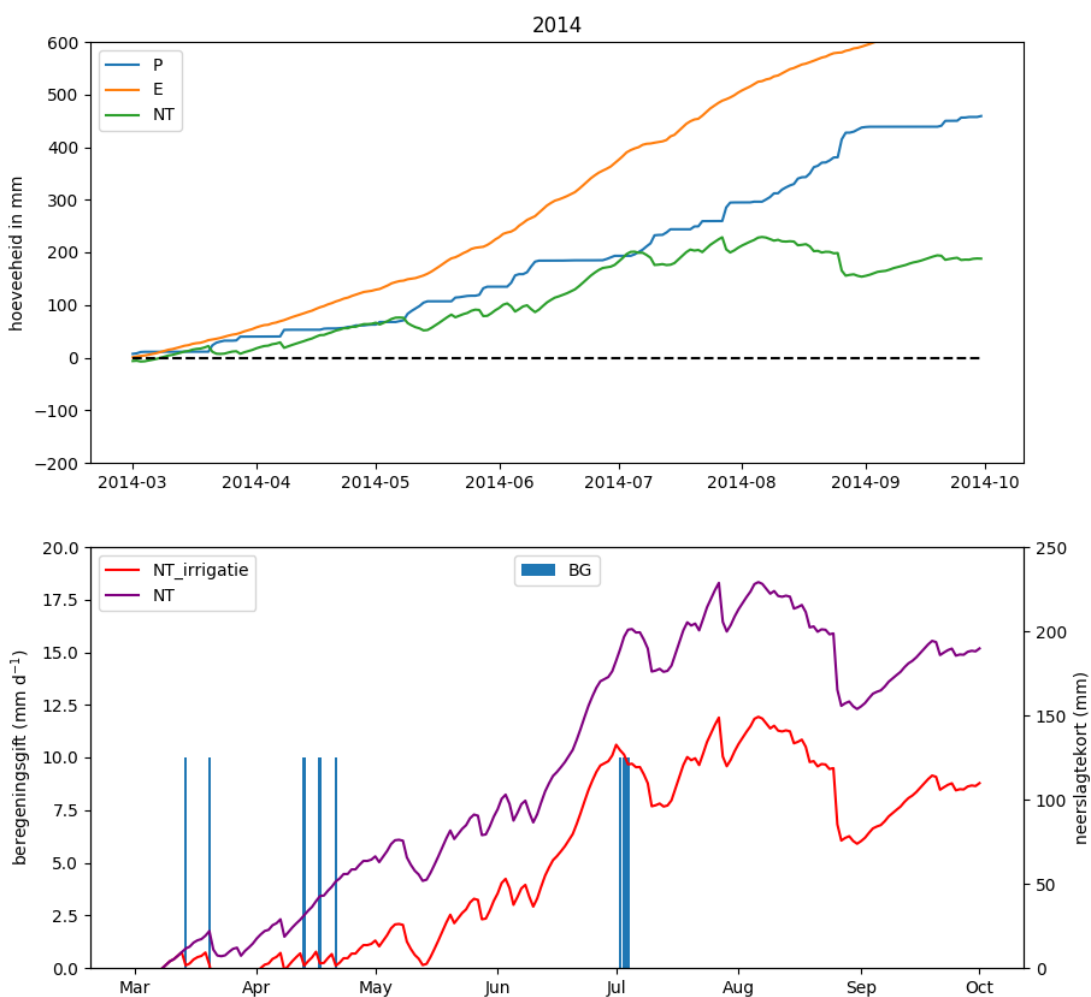
4.2.4 Onttrekking (realistisch en maximaal onttrekkingsregime)

Een onttrekking met een lengte van 80 m wordt in het model gesimuleerd m.b.v. symmetrie als een onttrekking van 40 m (van $y = 0 \text{ m}$ tot $y = 40 \text{ m}$) op $x = 0 \text{ m}$. Er wordt aangenomen dat

het debiet per strekkende meter gelijk is (constant over de gehele onttrekking). In sectie 4.8 zal hier verder aandacht aan worden besteed.

Voor wat betreft de regelgeving voor de zoetwaterbellen dikker dan 15 m wordt uitgegaan van een maximaal debiet van 3000 m³ per kwartaal én 8000 m³ per jaar. De momenten waarop in het 'realistisch onttrekkingsregime' onttrokken wordt zijn bepaald op basis van het doorlopende (1 maart⁷ – 1 oktober) neerslagtekort, gebaseerd op de berekende potentiële verdamping en gewogen gemiddelde neerslag zoals in sectie 4.2.2 is beschreven. Daarbij is een neerslagtekort van 10 mm gehanteerd als drempel voor de berekening. Dus wanneer het neerslagtekort hoger is dan 10 mm en er volgens de regelgeving nog beregend mag worden, dan wordt er beregend met 10 mm per dag; het neerslagtekort neemt op deze manier met 10 mm per dag af. In Figuur 4.6 is dit als voorbeeld voor het jaar 2014 weergegeven. In 'Berekende verdamping, neerslag, neerslagtekort en beregeningsgift 1996-2015' is dit overzicht voor alle jaren weergegeven. In Figuur 4.6 is te zien dat wanneer het neerslagtekort al hoog is, er ook meerdere dagen kan worden beregend. Zo kan er 30 mm in 3 dagen worden beregend. De weersomstandigheden en de regelgeving bepalen in dit geval het beregeningsregime. Als maximaal debiet van de pomp is 42 m³ per uur aangenomen omdat in de praktijk door drukverliezen de 60 m³ vaak niet gehaald wordt.

⁷ Voor de kwartalen geldt: kwartaal 1 = jan, feb, mrt; kwartaal 2 = apr, mei, juni, kwartaal 3 = juli, aug, sept, en kwartaal 4 is okt, nov, dec.



Figuur 4.6: Gewogen gemiddelde neerslag (P), potentiële verdamping (E), beregeningsgift (BG; 10 mm) neerslagtekort (NT) en gecorrigeerd neerslagtekort door beregeningsgift (NT_irrigatie). Een negatief neerslagtekort betekent een neerslagoverschot.

Het daadwerkelijke debiet van de onttrekking hangt af van welk areaal men beregent. Zo zal men met een debiet van 42 m³ per uur voor een perceel van 10 hectare (bufferzone van de onttrekking) voor een gift van 10 mm 1 dag nodig hebben, terwijl dit voor 5 hectare bij een debiet van 42 m³ per uur een halve dag onttrekking volstaat. In de simulaties is van een worst-case uitgegaan, waarbij 10 hectare als uitgangspunt is genomen. Dat betekent dat er met ongeveer 42 m³ per uur oftewel ongeveer 1000 m³ per dag wordt onttrokken. Om te onderzoeken of dit een realistisch debiet is, heeft overleg plaatsgevonden met de Zuidelijke Land en Tuinbouw Organisatie (ZLTO; contactpersonen Johan Elshof en Michael van der Schoot) en is tijdens één van de open GO-FRESH bijeenkomsten in 2017 een enquête onder agrariërs uitgedeeld. In de bijlage ‘Enquête beregening’ zijn de vragen en antwoorden terug te vinden van een beperkt aantal deelnemers. Uit de resultaten komt o.a. naar voren dat de gift per keer gemiddeld hoger is dan 10 mm (namelijk 25 mm). Daarentegen is het beregende oppervlak gemiddeld lager dan 10 ha (namelijk tot 5 ha). Om deze redenen is 10 mm per dag (1000 m³ per dag) toch als worst-case (maar toch realistisch) onttrekkingsregime genomen. In deze studie wordt dit scenario aangegeven met ‘realistisch onttrekkingsregime’. Over de reeks van 20 jaar wordt gemiddeld 71 mm per jaar onttrokken.

Naast het realistische onttrekkingsregime is er ook een scenario doorgerekend met een onttrekking met een debiet van 16 m^3 per uur, maar dan gedurende een gehele week en op drie momenten in het jaar; half maart, eind april en eind juni. Het debiet per jaar is ongeveer 8000 m^3 en per kwartaal 2688 m^3 . Dit regime wordt in dit rapport aangeduid met 'maximaal volume onttrekkingsregime'. Voor de zoetwaterbellen < 15 m dikte is gekozen om het maximale debiet van 5 m^3 per uur gedurende een periode van 100 dagen achtereenvolgens toe te passen, voor de periode eind maart tot en met eind juni. Ook dit is weer een worst case scenario.

4.2.5 Resultaten

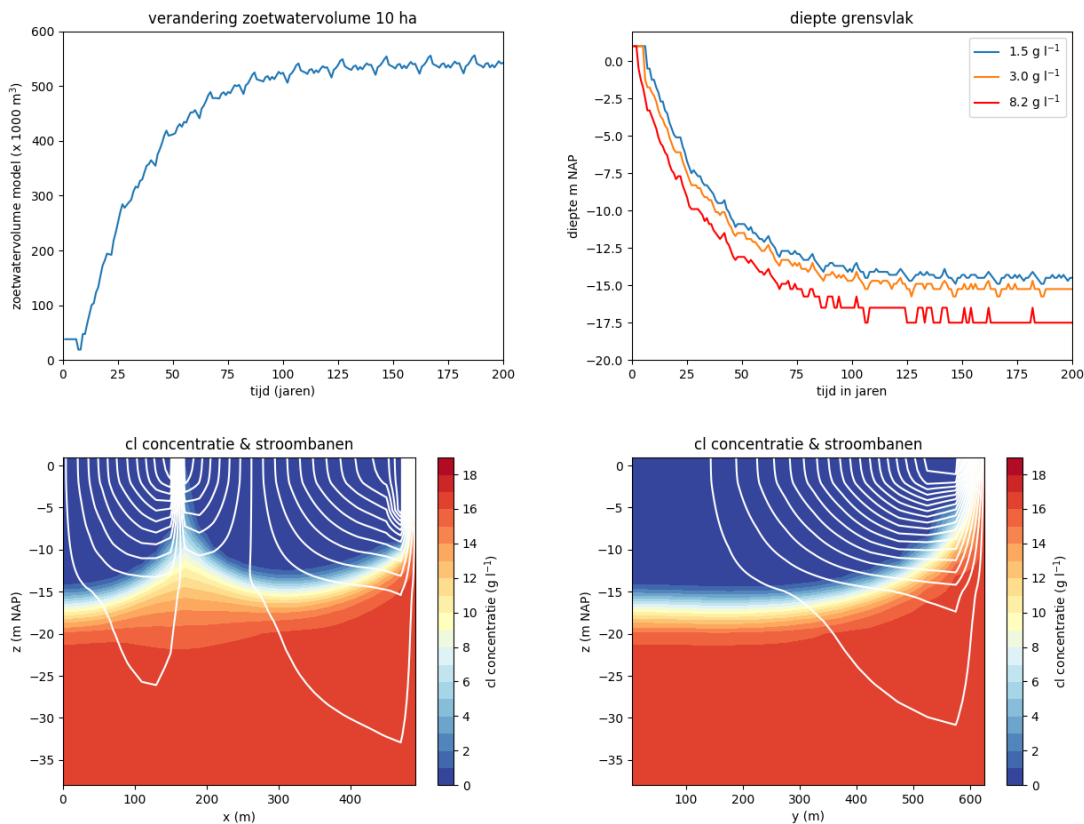
4.2.5.1 Zoetwaterbel > 15 m dikte; initialisatie-simulatie

In Figuur 4.7 zijn de resultaten weergegeven van de initialisatie-simulatie van het referentiemodel met een zoetwaterbel van meer dan 15 m dikte. De zoetwaterbel rondom het buffergebied van de onttrekking (10 ha^8) is na ongeveer 150 jaar nagenoeg in dynamisch evenwicht. De grensvlakken vertonen hierna een variatie in diepte die toe te schrijven is aan de dynamica in neerslag, verdamping en drainage. Merk op dat in Figuur 4.7, rechtsboven, door de dikte van de modellagen op sommige dieptes 'sprongen' te zien zijn; dit zijn numerieke artefacten vanwege de diktes van de modellagen. Aan het einde van de initialisatie-simulatie is er ongeveer $542 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ zoetwater in het model aanwezig rondom het buffergebied van de onttrekking, zijnde de eerder genoemde 10ha.

De stroombanen zijn weergegeven aan het einde van de simulatie en geven op dat moment een indruk van de stroombanen bij een stationaire situatie. De stroombanen kruisen de concentratiecontouren van de zoetwaterbel omdat de grondwaterstanden sneller reageren op de hydrologische randvoorwaarden (neerslag en verdamping) dan de zoet-zout verdeling. Zowel aan de stroombanen als aan de zoet-zout verdeling is de invloed van de sloot in het model duidelijk zichtbaar.

De zoet-zout verdeling in Figuur 4.7 toont aan dat het verschil tussen het 1.5 g Cl l^{-1} en het 3.0 g Cl l^{-1} grensvlak in de orde van 0.5 tot 1.0 m is. Dit komt goed overeen met de dikte die afgeleid is uit de FRESHM data (sectie 3.4). De dikte van de zoetwaterbel (1.5 g Cl l^{-1} grensvlak) schommelt tussen de 13 en 14 m-NAP (15-16 m beneden maaiveld).

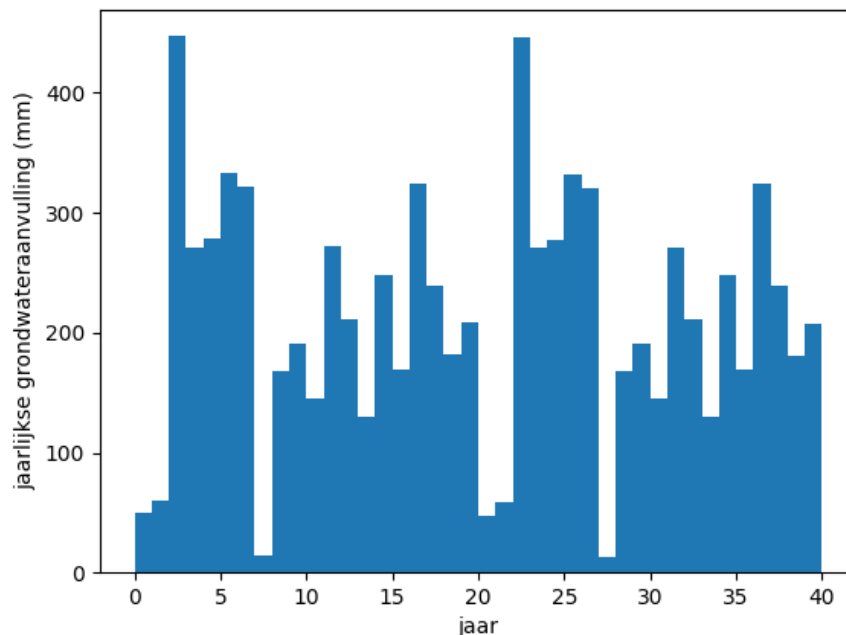
⁸ Voor de 10 ha is $1 \times 100 \text{ m}$ in de 'x richting' genomen en $1 \times 250 \text{ m}$ in de 'y richting' genomen, beide gezien vanaf $x,y = 0,0$. Dit getal is vervolgens met 4 vermenigvuldigd vanwege de symmetrie van het model. Verder is alleen het zoetwatervolume onder 0 m NAP meegenomen voor de dikte van de zoetwaterbel; veranderingen van het zoetwatervolume t.g.v. veranderingen van de grondwaterstand zijn dus niet meegenomen.



Figuur 4.7: Resultaten van de initialisatie-simulatie (200 jaar) van het referentiemodel met een zoetwaterbel > 15 m. Linksboven: verandering van het zoetwatervolume binnen het buffergebied van de onttrekking (10 ha) gedurende de simulatietijd. Rechtsboven: het verloop van de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l⁻¹ grensvlakken gedurende de simulatietijd, direct onder de locatie van de onttrekking (x,y = 0,0). In beide subfiguren is de rechte lijn in het begin van de simulatie gerelateerd aan de dikte van de eerste modellaag. Linksonder: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de x-as van het model op y = 0 m. Rechtsonder: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de y-as van het model op x = 0 m.

4.2.5.2 Zoetwaterbel > 15 m dikte; onttrekking-simulaties

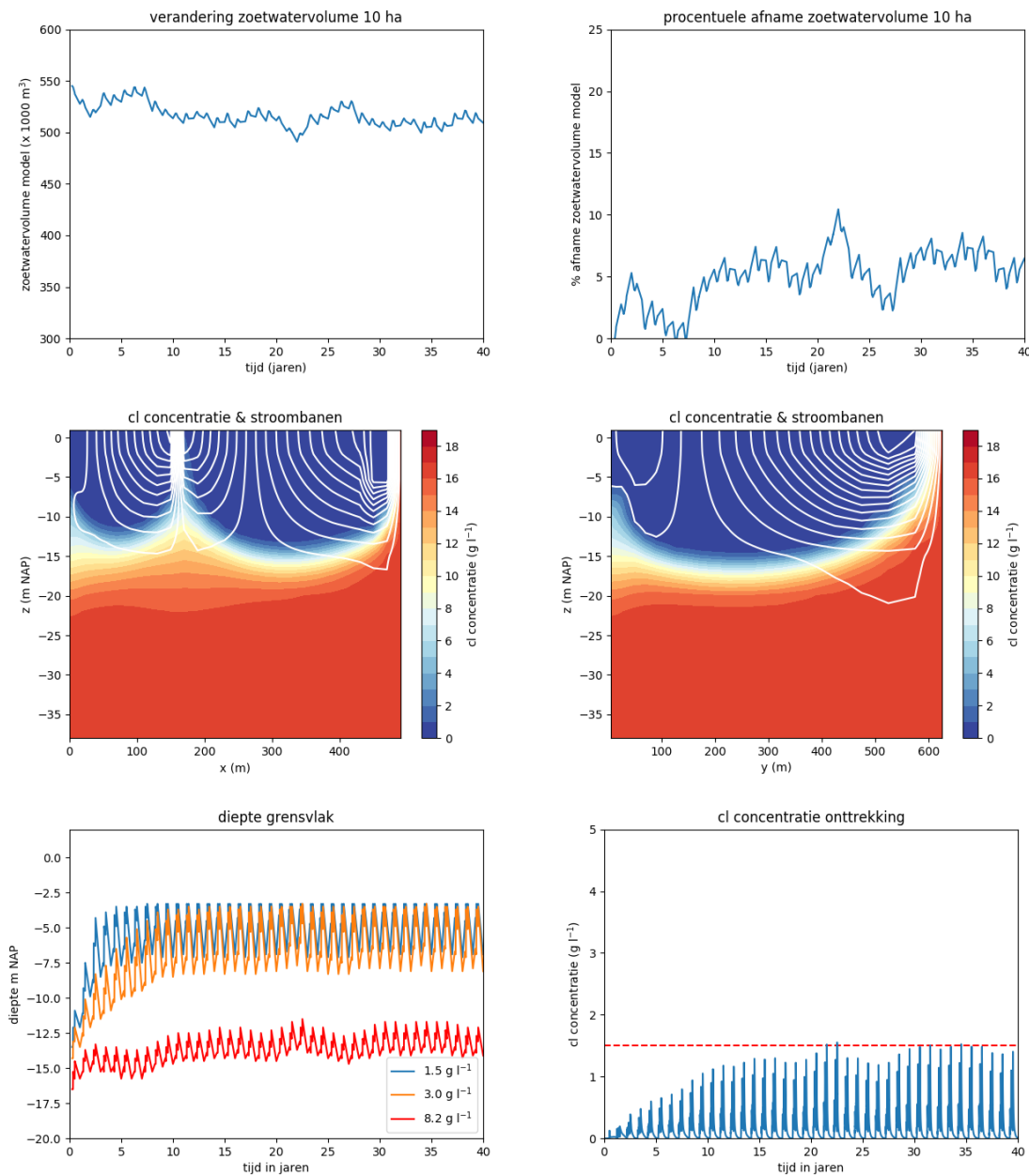
In Figuur 4.8 is de (door het model berekende) grondwateraanvulling weergegeven over de gehele simulatieperiode. Deze grondwateraanvulling is hoger dan de grondwateraanvulling berekend met de potentiële verdamping (Figuur 4.5). Het verschil kan verklaard worden door de afname van de verdamping wanneer de grondwaterstand afneemt; dit effect wordt in het model gesimuleerd. De gemiddelde grondwateraanvulling is 213 mm per jaar. Deze grondwateraanvulling komt goed overeen met recente numerieke modelstudies in Zeeland (Zuurbier et al. 2014; Pauw et al. 2015).



Figuur 4.8: Door het model berekende daadwerkelijke jaarlijkse grondwateraanvulling.

In Figuur 4.9 zijn de resultaten van het maximaal volume onttrekkingsregime weergegeven. Als gevolg van de jaarlijkse onttrekking van 8000 m^3 neemt het zoetwatervolume in het buffergebied van de onttrekking af met ongeveer $30 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ na 40 jaar. Ten opzichte van de beginsituatie is dat 6.5%. Er is een variatie in zoetwatervolume te zien die toe is te schrijven aan verschillen in neerslag en verdamping en de onttrekking.

Een vergelijking met de stroombanen uit Figuur 4.7 laat zien dat de onttrekking een duidelijke invloed heeft op de grondwaterstroming, zelfs enkele maanden na de laatste onttrekking. Verder heeft de onttrekking invloed op de concentratieverdeling, vooral dicht bij de onttrekking. Na ongeveer 10 jaar zijn de 1.5 en 3.0 g Cl l^{-1} grensvlakken dicht bij de onttrekking genaderd en vertonen een dynamiek met een amplitude van $3 - 5 \text{ m}$. Het 8.2 g Cl l^{-1} grensvlak (helpt van de maximale concentratie in het model) ligt dieper en laat een minder grote variatie zien. Beide aspecten zijn gerelateerd aan de hogere dichtheid ten opzichte van de lagere concentratie grensvlakken.

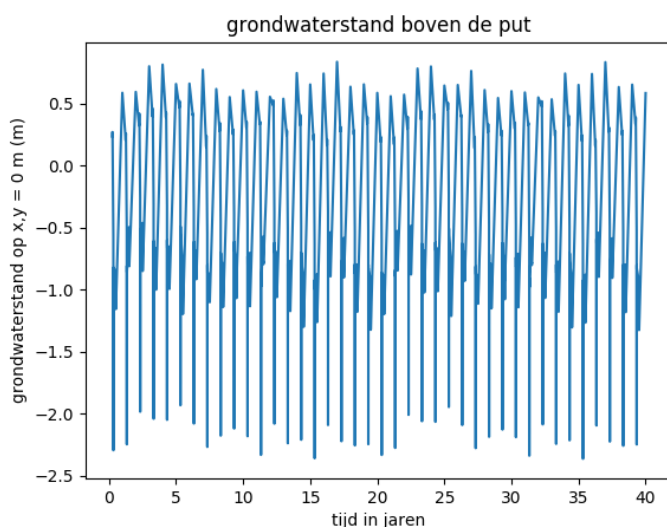


Figuur 4.9: Resultaten van de onttrekking-simulatie (40 jaar) van het referentiemodel met een zoetwaterbel > 15 m bij het maximaal volume onttrekkingsregime. Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking (10 ha). Rechtsboven: de relatieve verandering van het zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de x-as van het model op $y = 0$ m. Rechtsmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de y-as van het model op $x=0$ m. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l^{-1} grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking ($x,y = 0,0$). Rechtsonder: het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking (gemiddeld over de 4 cellen van de onttrekking). De rode stippellijn geeft hierbij de zoet-zout grenswaarde (1.5 g Cl l^{-1}) aan.

Het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking door de tijd heen laat zien dat de maximale concentratie soms de waarden voor zout grondwater (1.5 g Cl l^{-1}) een klein beetje overschrijdt. De eerste 15 jaren na de start van de onttrekking komt het zoute grondwater

langzaam omhoog. Pas na 20 jaar vindt de eerste overschrijding plaats. Na 20 jaar lijkt 1.5 g Cl l^{-1} de maximale concentratie van het grondwater in de onttrekking.

In Figuur 4.10 is het verloop van de grondwaterstand boven de onttrekking weergegeven (op $x,y = 0,0 \text{ m}$). Verlagen tot ruim 3 meter zijn waar te nemen. Dit komt goed overeen met de waarden gevonden bij het onttrekkingsexperiment nabij Heinkenszand in de jaren 80 (zie sectie 2.2).

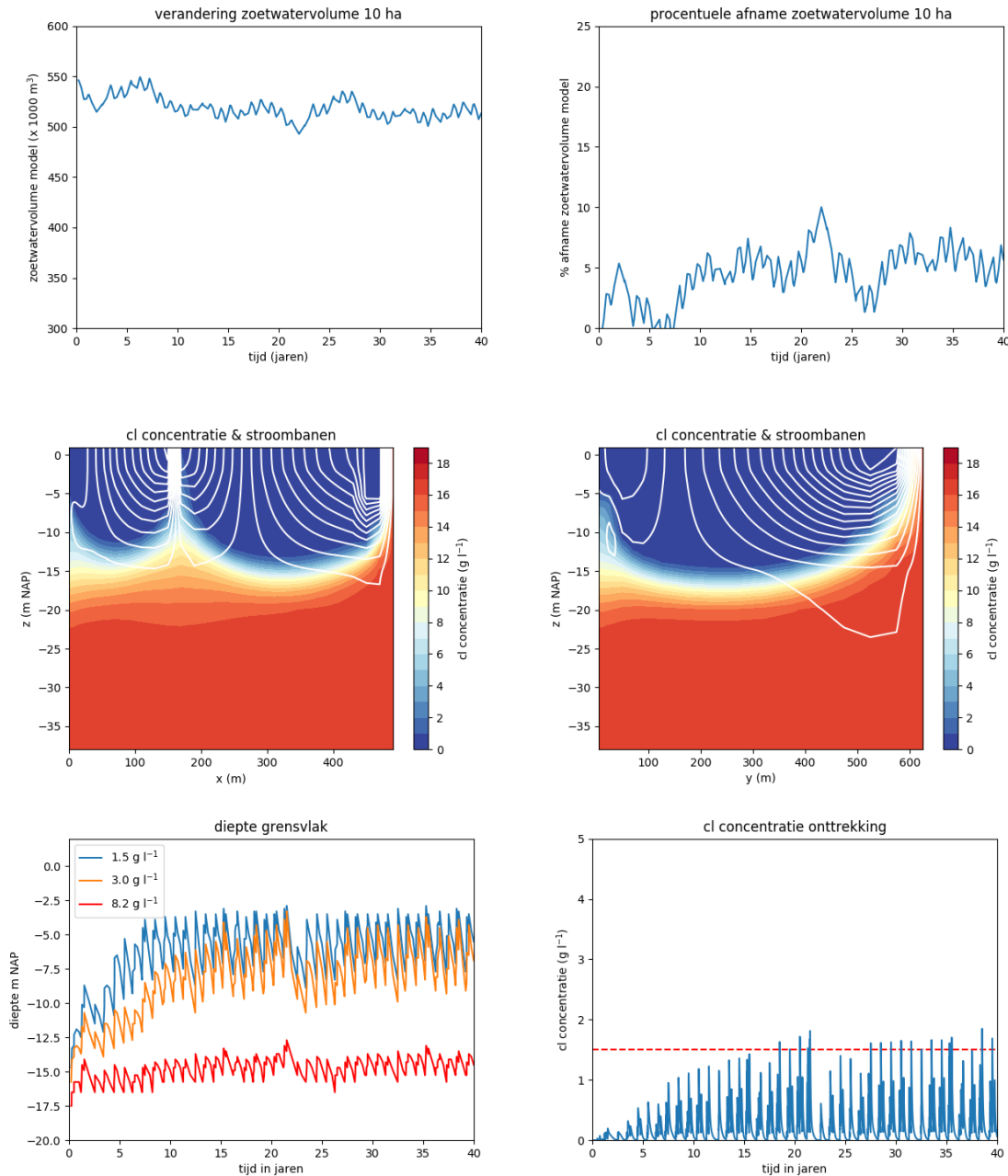


Figuur 4.10: Grondwaterstand bij het maximaal-volume onttrekkingsregime boven de onttrekking (op $x,y = 0,0 \text{ m}$).

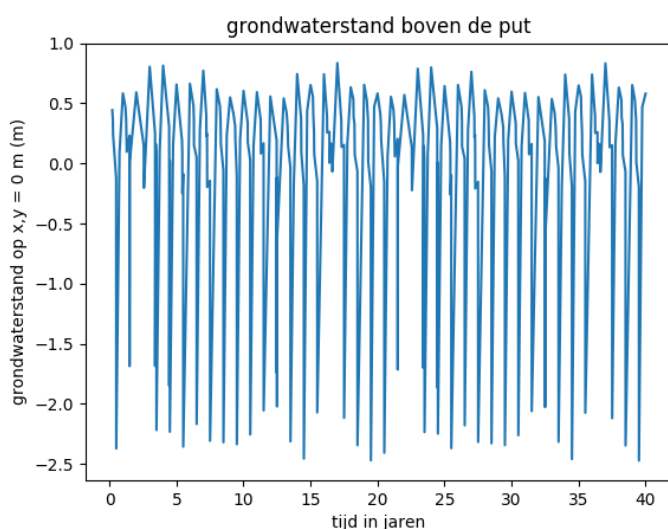
In Figuur 4.11 zijn de resultaten van het realistisch onttrekkingsregime weergegeven. Daarin valt op dat de afname van het zoetwatervolume weinig verschilt met het maximaal volume onttrekkingsregime; de relatieve afname is zo'n 5.7% en dus iets minder dan bij het maximaal volume onttrekkingsregime. Ook de concentratieverdeling in dwarsdoorsnede en de stroombanen tonen weinig verschillen. De gesloten stroombaan (Figuur 4.11, linksmiddelen) die te zien is in de dwarsdoorsnede langs de $x = 0 \text{ m}$ -as duidt op rotatiestroming die plaatsvindt nadat de onttrekking is stopgezet. Deze rotatiestroming wordt gedreven door ruimtelijke dichtheidsverschillen (Bakker et al. 2004; Pauw et al. 2016). In het maximaal volume onttrekkingsregime vindt dit ook plaats, maar door het gekozen contourinterval van de stroombanen is dit niet zichtbaar in Figuur 4.9.

De verschillende grensvlakken onder de onttrekking vertonen echter meer dynamiek dan bij het maximaal volume onttrekkingsregime. In periodes van een groter neerslagoverschot met minder behoefte aan beregening (laag neerslagtekort) vindt enig herstel van de grensvlakken plaats, zoals tussen 21 en 23 jaar simulatietijd. Ook is dit herstel te zien in de chlorideconcentratie in de onttrekking. Echter, de chlorideconcentraties in de onttrekking zijn regelmatig op piekmomenten wel hoger dan 1.5 g Cl l^{-1} . In deze periodes is het onttrokken water dus potentieel ongeschikt voor beregening.

De grondwaterstanden boven de onttrekking op $x,y = 0,0$ zijn net als bij het maximaal volume onttrekkingsregime op momenten van onttrekking in de orde van 2.5 tot 3.5 m lager dan in de winter- of rustperiode (waarin er niet onttrokken wordt). Net als bij de concentraties is er meer variatie in dynamiek aanwezig dan bij het maximaal volume onttrekkingsregime. Dit kan wederom verklaard worden door het neerslagtekort en de daaraan gekoppelde beregeningsvraag.



Figuur 4.11: Resultaten van de onttrekking-simulatie (40 jaar) van het referentiemodel met een zoetwaterbel > 15 m bij een realistisch onttrekkingsregime. Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking (10 ha). Rechtsboven: de relatieve verandering van het zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de x-as van het model op $y = 0$ m. Rechtsmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de y-as van het model op $x = 0$ m. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g l^{-1} grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking ($x, y = 0, 0$). Rechtsonder: het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking (gemiddeld over de 4 cellen van de onttrekking). De rode stippellijn geeft hierbij de zoet-zout grenswaarde (1.5 g Cl l^{-1}) aan.

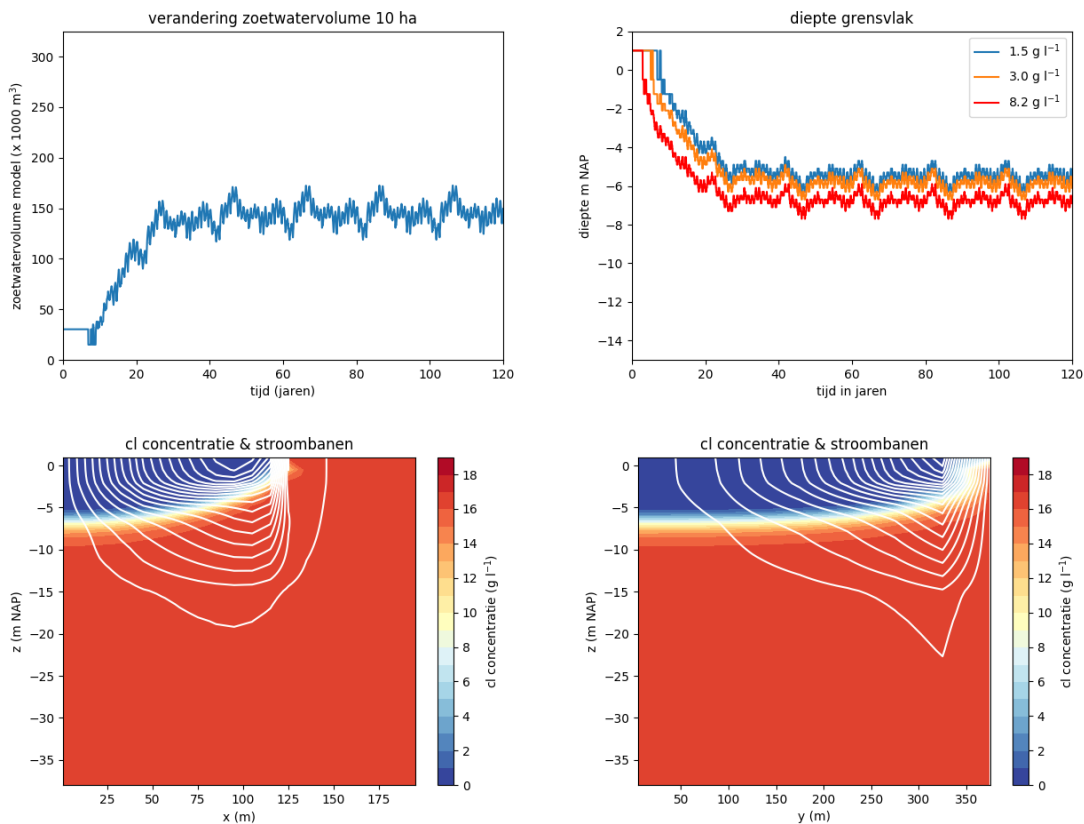


Figuur 4.12: Grondwaterstand in het realistisch onttrekkingsregime boven de onttrekking (op $x,y = 0,0$ m).

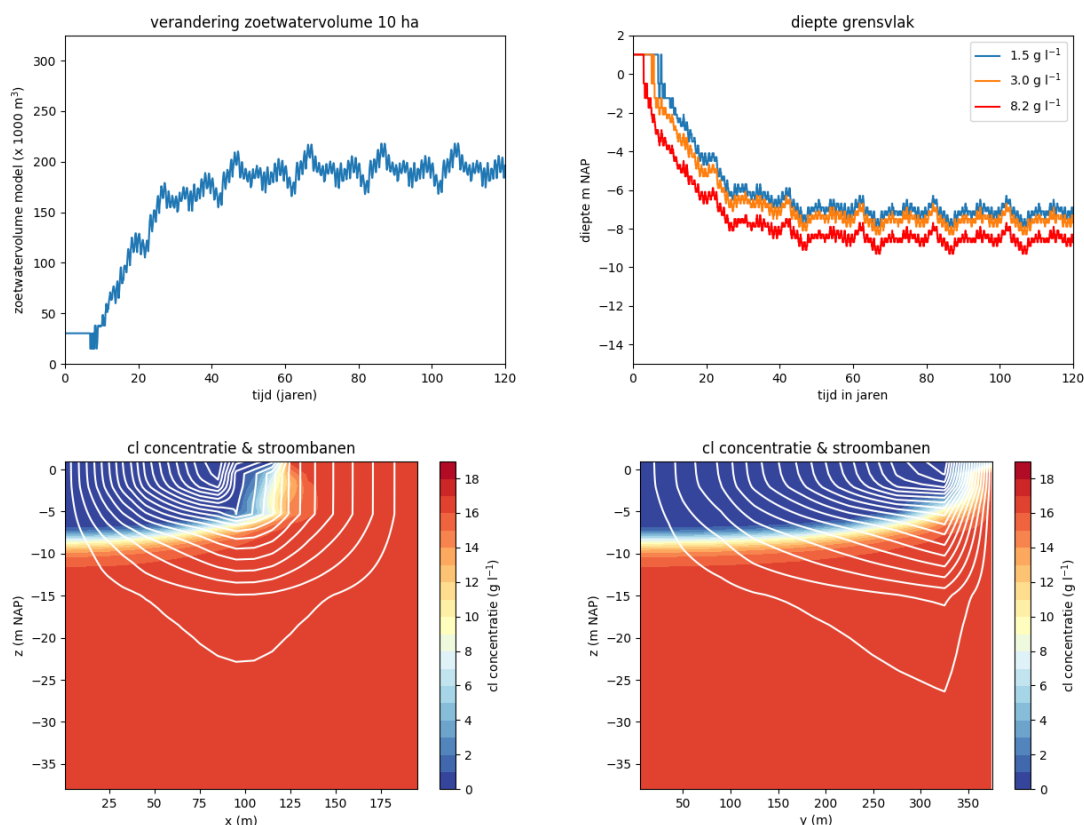
4.2.5.3 Zoetwaterbel < 15 m dikte; initialisatie-simulaties

In Figuur 4.13 zijn de resultaten weergegeven van de initialisatie-simulatie van het referentiemodel met een zoetwaterbel < 15 m (dikte is ongeveer 7.5 m – mv) en zonder de aanwezigheid van een slechtdoorlatende laag aan de rand van het model (vanaf $x = 120$ m). Daarin is te zien dat de zoetwaterbel rondom het buffergebied van de onttrekking (10 ha) na ongeveer 30 jaar in dynamisch evenwicht is. Het evenwicht wordt sneller bereikt dan in de simulatie met een zoetwaterbel van > 15 m dikte vanwege de beperktere dikte van de zoetwaterbel. De grensvlakken vertonen na 30 jaar een variatie in diepte die net als bij de dikkere zoetwaterbel toe te schrijven is aan de dynamica in neerslag, verdamping en onttrekking. De zoet-zout verdeling toont aan dat het verschil tussen het 1.5 g Cl l^{-1} en het 3.0 g Cl l^{-1} grensvlak in de orde van 0.5 m is. Net als bij de dikkere zoetwaterbel komt dit goed overeen met de dikte die afgeleid is uit de FRESHM data (sectie 3.4).

In Figuur 4.14 zijn dezelfde resultaten als Figuur 4.13 weergegeven, maar dan met de aanwezigheid van een deklaag tot -5 m NAP en met een doorlatendheid van 0.1 m d^{-1} . Opvallend is dat de zoetwaterbel dikker is dan in het geval de deklaag afwezig is. De zoetwaterbel is dikker omdat de hydraulische weerstand naar de sloten die zich aan de rand van de kreekrug bevindt (op $x = 120$ m) hoger is. Dit zorgt voor een hogere grondwaterstand en dus een ook dikkere zoetwaterbel. Dit effect neemt toe naarmate de weerstand toeneemt; in het geval de deklaag een doorlatendheid heeft van 0.001 m d^{-1} ligt het 1.5 g Cl l^{-1} grensvlak aan het eind van de simulatie op -7.5 m NAP; bij de afwezigheid van de deklaag ligt deze op iets dieper dan -5.0 m NAP. De resultaten van de simulaties met een doorlatendheid van de deklaag van 0.01 en 0.001 m d^{-1} zijn omwille van de bondigheid van dit rapport niet weergegeven.



Figuur 4.13: Resultaten van de initialisatie-simulatie (120 jaar) van het referentiemodel met een zoetwaterbel < 15 m en zonder de aanwezigheid van een slecht doorlatende laag. Linksboven: verandering van het zoetwatervolume binnen het buffergebied van de onttrekking (10 ha) gedurende de simulatietijd. Rechtsboven: het verloop van de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l⁻¹ grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking (x,y = 0,0). Linksonder: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de x-as van het model op y=0 m. Rechtsonder: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de y-as van het model op x=0 m.



Figuur 4.14: Resultaten van de initialisatie-simulatie (120 jaar) van het referentiemodel analoog aan Figuur 4.13, maar met de aanwezigheid van een slecht doorlatende laag met een doorlatendheid van 0.1 m d^{-1} .

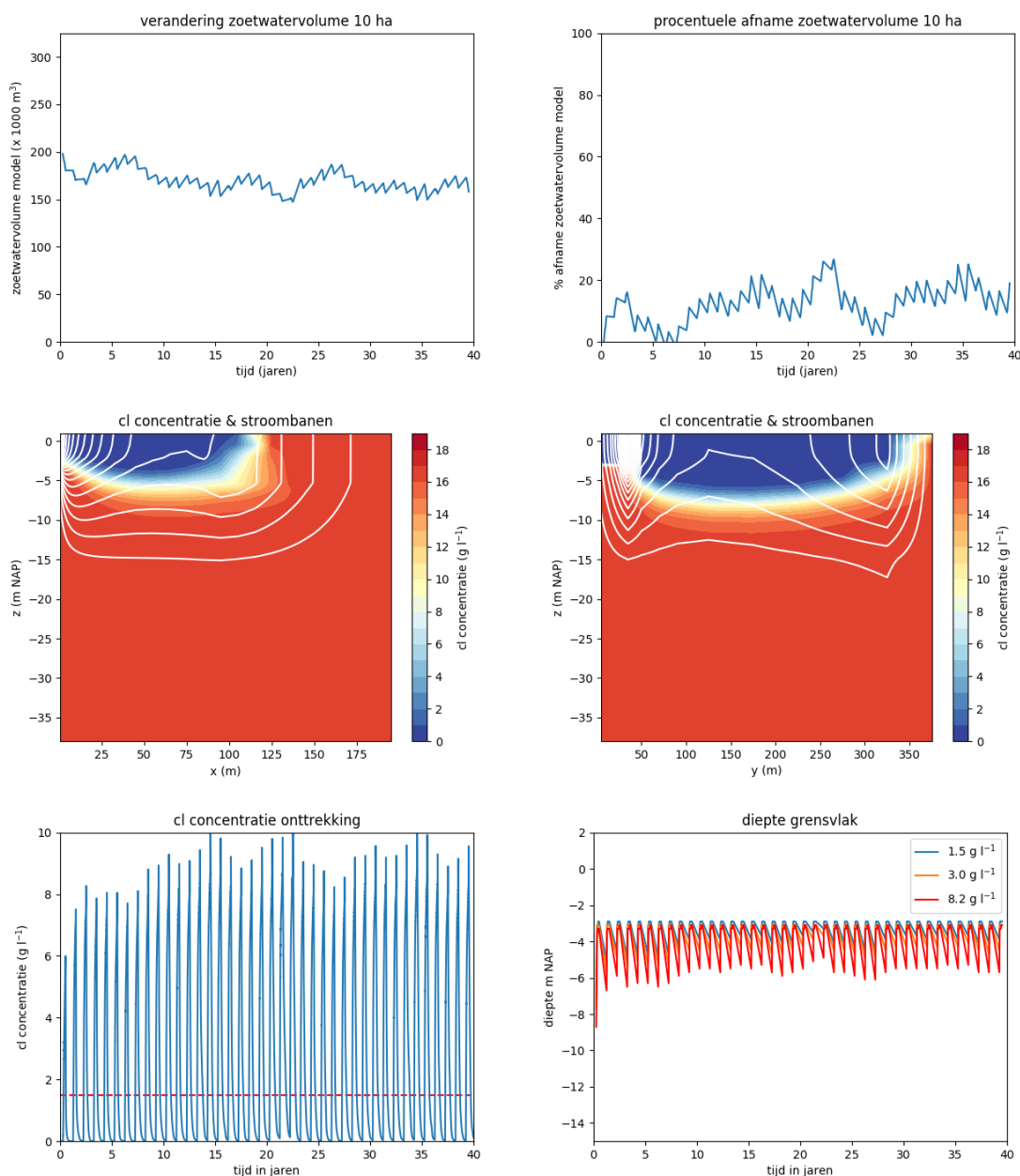
4.2.5.4 Zoetwaterbel < 15 m dikte; onttrekking-simulaties

In Figuur 4.15 zijn de resultaten weergegeven van de onttrekking-simulatie ('maximaal volume regime') van het referentiemodel met een zoetwaterbel < 15 m (waarvan de initiële dikte ongeveer 7.5 meter is) en met de aanwezigheid van een deklaag met een doorlatendheid van 0.1 m d^{-1} . Het is duidelijk dat bij dit onttrekkingsregime (100 dagen achtereenvolgens een onttrekking met een debiet van 5 m^3 per uur; totaal 12000 m^3 per jaar) de onttrekking al snel ongeschikt wordt voor beregeningsdoeleinden; al in het eerste jaar wordt water van $> 1.5 \text{ g Cl l}^{-1}$ aangetrokken. Het zoetwatervolume binnen het buffergebied van de onttrekking volgens de algemene regels (10 ha)⁹ is in absolute zin met zo'n $25 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ afgenomen aan het einde van de simulatie. In relatieve zin is dat zo'n 20% ten opzichte van de situatie vóór de onttrekking.

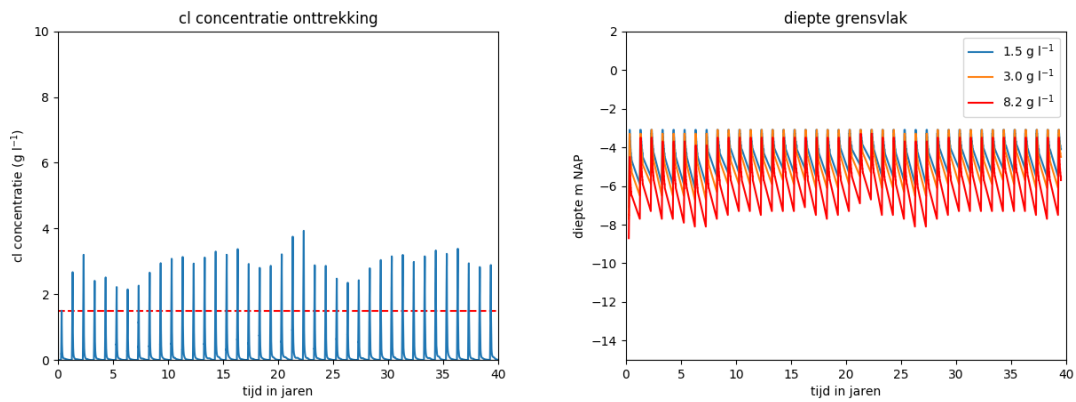
Bij een reductie van het volume dat onttrokken wordt van 12000 m^3 naar 4000 m^3 per jaar (33 dagen met een debiet van 5 m^3 per uur) nemen de concentraties in de onttrekking af (Figuur 4.16). In relatieve zin is de afname van de zoetwaterbel minder dan 20%. Desalniettemin blijft de onttrekking ongeschikt voor beregening. Bij een debiet van 1200 m^3 per maand en ook een totaal van 1200 m^3 per jaar (5 m^3 per uur) kan de onttrekking wel duurzaam gebruikt worden (Figuur 4.17). Zo zou het mogelijk zijn om een perceel van 10 ha eenmalig met 10

⁹ De 10 ha bufferzone geldt strikt genomen niet voor onttrekkingen met een pompcapaciteit van $< 5 \text{ m}^3$ per uur.

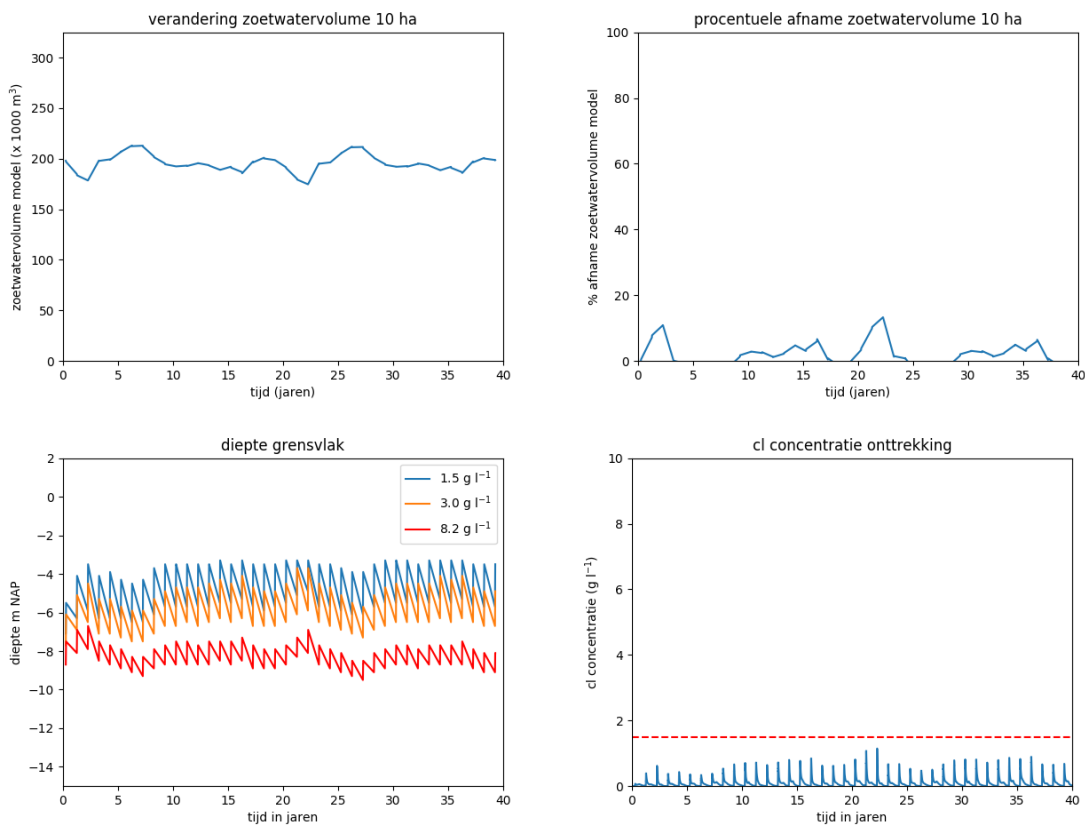
mm te beregenen, of 5 ha met 20 mm, etc. Bij een geringere dikte van de zoetwaterbel is dat uiteraard minder, bij een dikkere bel meer.



Figuur 4.15: Resultaten van de onttrekking-simulatie (40 jaar) van het referentiemodel met een zoetwaterbel < 15 m en met de aanwezigheid van een slecht doorlatende laag met een doorlatendheid van 0.1 m d^{-1} . Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking (10 ha). Rechtsboven: de relatieve verandering zoetwatervolume door de tijd heen ten opzicht van het begin van de simulatie. Linksmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de x-as van het model op $y=0 \text{ m}$. Rechtsmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de y-as van het model op $x=0 \text{ m}$. Linksonder: het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking (gemiddeld over de 4 cellen van de onttrekking). De rode stippellijn geeft hierbij de zoet-zout grenswaarde (1.5 g Cl l^{-1}) aan. Rechtsonder: de diepte van de 1.5 , 3.0 en 8.2 g Cl l^{-1} grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking ($x,y = 0,0$).



Figuur 4.16: Resultaten (concentratie in de onttrekking, links, en diepte grensvlakken onder de onttrekking, rechts) analoog aan Figuur 4.15, maar dan met een debiet van 5 m^3 per uur en 4000 m^3 gedurende 33 dagen.



Figuur 4.17: Resultaten analoog aan Figuur 4.15 (echter, zonder concentratie contouren langs de $x=0 \text{ m}$ en $y=0 \text{ m}$ assen), maar dan met een debiet van 5 m^3 per uur gedurende 10 dagen.

4.3 Heterogeniteit van de ondergrond

Zoals in de vorige sectie is beschreven, zijn de gemiddelde horizontale doorlatendheid K_h en verticale doorlatendheid K_v bepaald op respectievelijk 6.2 en 4.3 m d⁻¹. De ruimtelijke variaties van deze doorlatendheden is in deze studie alleen kwalitatief beschreven (sectie 3.1). Kennis over de lithologische opbouw van de geulopvullingen onder de kreekruggen is relatief beperkt ten opzichte van de lithologische en geologische kennis van de naastgelegen poelgronden. Dit heeft vooral een historische reden; in het verleden zijn meer boringen verricht op de poelgronden voor geologische en paleogeografische doeleinden. Systeemkennis over de variaties in lithologie (en dus doorlatendheid) onder de kreekruggen is daarom relatief beperkt. Uit de geologische ontstaansgeschiedenis van Zeeland kan worden beredeneerd dat de doorlatendheid in kreekruggen in het oosten van Zeeland over het algemeen lager is dan in de geulafzettingen in het westen van Zeeland (aangenomen dat deze een vergelijkbare breedte hebben), omdat in het oosten de sedimenten zijn afgezet in een lager energetisch milieu vergeleken met het westen. Dit is in deze studie echter niet verder onderzocht. De analytische vergelijkingen en de numerieke simulaties die in dit rapport zijn gepresenteerd laten zien dat een lage horizontale doorlatendheid een positieve invloed heeft op de dikte van de zoetwaterbel, maar een negatieve invloed op de zoutwater opkegeling. Het risico op verhoogde afname van het zoetwatervolume en een ongewenst hoog chloridegehalte in de onttrekking lijkt dus hoger in het oosten dan in het westen. Echter, vanwege de beperkte hoeveelheid informatie over de doorlatendheid en lithologie onder de kreekruggen zou dit beter onderzocht moeten worden.

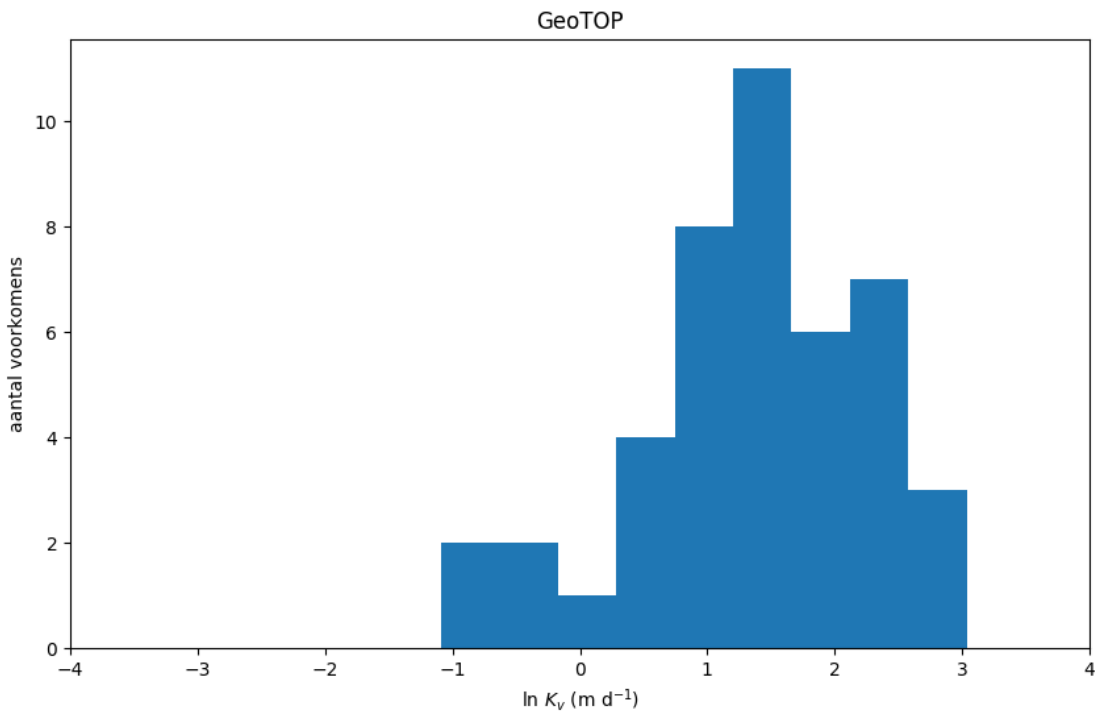
Voor een kwantitatieve inschatting van de invloed van de doorlatendheid op de zoutwater opkegeling is de invloed van een aantal variaties van de doorlatendheid onderzocht op basis van de volgende drie aspecten:

- 1) Heterogeniteit; ruimtelijke variaties in K_h en K_v
- 2) Doorlatendheid en verticale anisotropie (K_h / K_v)
- 3) De invloed van een lateraal breed aanwezig kleilaag.

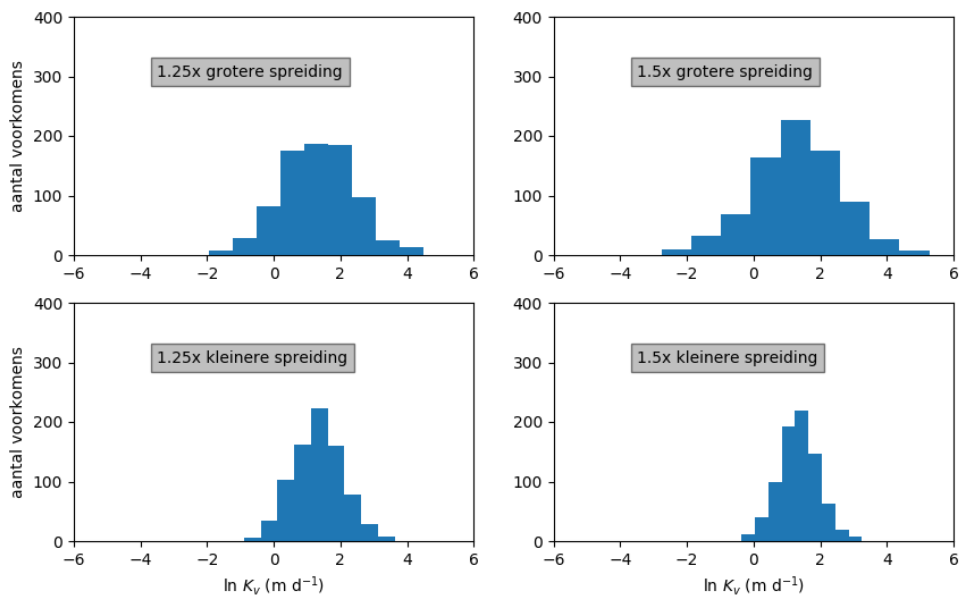
Voor al deze drie aspecten zijn initialisatiesimulaties en per aspect twee onttrekkingssimulaties ('maximaal volume' en 'realistisch' onttrekkingsregime) doorgerekend. Omdat de horizontale doorlatendheid K_h invloed heeft op de dikte van de zoetwaterbel, is voor $K_h = 4.3 \text{ m d}^{-1}$ en 10 m d^{-1} het niveau in de sloot respectievelijk verlaagd en verhoogd om de gewenste dikte van de zoetwaterbel (15 m) aan het einde van het simulatiemodel te verkrijgen.

4.3.1 Heterogeniteit; ruimtelijke variaties in K_h en K_v

Heterogeniteit is meegenomen door in een viertal simulaties aan te nemen dat de log-waarden van de doorlatendheid normaal verdeeld zijn; een aanname die in veel stochastische (model)studies wordt gedaan (Simmons et al. 2001; Dagan et al. 2013). Hierbij is de gemiddelde verticale doorlatendheid van 4.3 m d⁻¹ gebruikt als gemiddelde voor de verdeling. De verticale anisotropie is als constant beschouwd (1.43). Als standaarddeviatie zijn 1.25 en 1.5 maal zo grote ('grotere spreiding') en kleine ('kleinere spreiding') waarde voor de standaarddeviatie van de uit GeoTOP berekende gemiddelde waarde gebruikt, om een inzicht in de invloed van een toenemende mate van heterogeniteit te onderzoeken. In Figuur 4.18 en Figuur 4.19 zijn de verdelingen van de verticale doorlatendheden weergegeven.



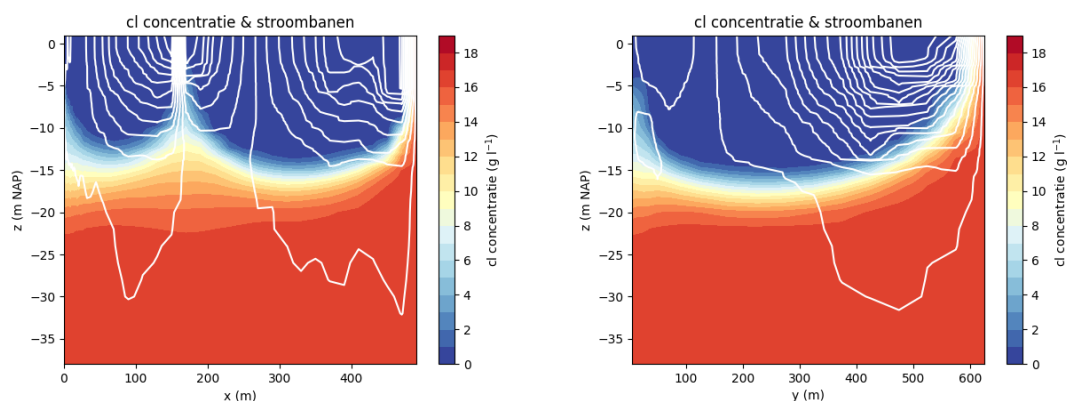
Figuur 4.18: Verdeling van K_v in de GeoTOP Zeeland analyses (aantal monsters $n = 44$).



Figuur 4.19: Verdeling van K_v in de random gegenereerde set met verschillende waarden voor de standaarddeviatie ten opzichte van de standaard deviatie uit de GeoTOP Zeeland series.

De heterogeniteit heeft een duidelijke invloed op de stroombanen. Ter illustratie is dit weergegeven in Figuur 4.20, voor de onttrekkingssimulatie met een realistisch onttrekkingssregime met een 1.5 keer grotere spreiding. Als gevolg van de heterogeniteit laten de stroombanen een grillig verloop zien. Ook bij de andere 7 simulaties is dit het geval. De

concentratieverdelingen zijn meer geleidelijk en verschillen weinig van elkaar en van de onttrekkingssimulatie van de referentiemodellen.

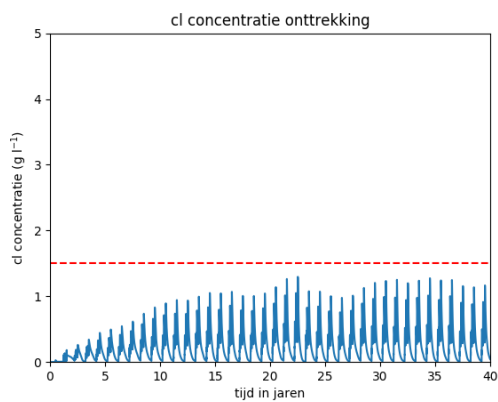


Figuur 4.20: Stroombanen en chlorideconcentraties in dwarsdoorsnede aan het einde van de simulatie voor de onttrekkingssimulatie met een realistisch onttrekkingsregime en een 1.25 keer grotere spreiding (Figuur 4.19): Links langs de x-as van het model op $y = 0$ m en rechts langs de y-as van het model op $x = 0$ m.

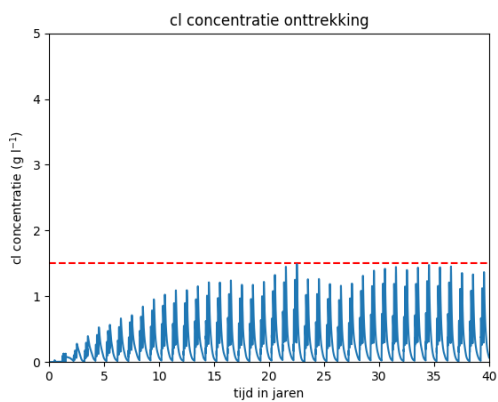
De relatieve afnames van de zoetwatervolumes in het buffergebied van de onttrekking zijn weergegeven in Tabel 4.3. Net als bij de referentiescenario's is de afname van het zoetwatervolume bij het maximaal volume onttrekkingsregime structureel hoger dan bij het realistisch onttrekkingsregime. Verder zijn er geen patronen waar te nemen bij een toe- of afname van de spreiding van de doorlatendheid. Dit geldt ook voor de berekende concentraties in de onttrekking (Figuur 4.21 en Figuur 4.22). De relatieve afname van het zoetwatervolume is vergelijkbaar met de referentiescenario's (Figuur 4.9 en Figuur 4.11, allebei rechtsonder).

Tabel 4.3: Afname van de zoetwatervolumes voor de verschillende simulaties. De afname van het zoetwatervolume in het buffergebied van de referentie onttrekkingssimulaties bedraagt 6.5% voor het maximaal volume onttrekkingsregime en 5.7% voor het maximaal volume onttrekkingsregime.

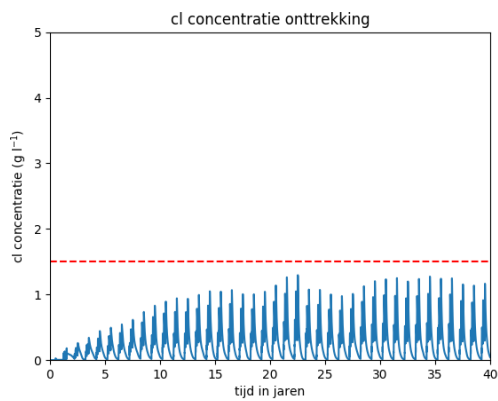
Onttrekkingssimulatie	Relatieve afname zoetwatervolume bij een oppervlak van 10 ha (in %)
1.25 keer kleinere spreiding, maximaal volume onttrekkingsregime	5.9
1.25 keer kleinere spreiding, realistisch onttrekkingsregime	5.4
1.5 keer kleinere spreiding, maximaal volume onttrekkingsregime	6.8
1.5 keer kleinere spreiding, realistisch onttrekkingsregime	5.8
1.25 keer grotere spreiding, maximaal volume onttrekkingsregime	6.1
1.25 keer grotere spreiding, realistisch onttrekkingsregime	5.5
1.5 keer grotere spreiding, maximaal volume onttrekkingsregime	6.2
1.5 keer grotere spreiding, realistisch onttrekkingsregime	5.4



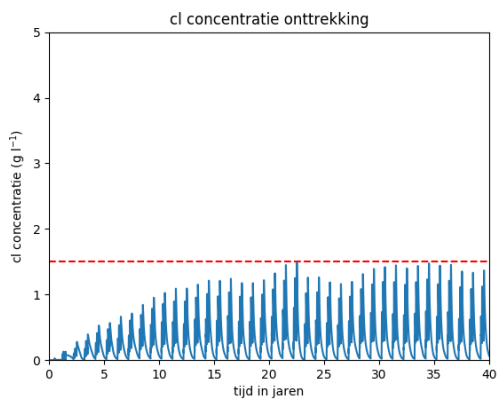
1.25 keer kleinere spreiding



1.5 keer kleinere spreiding

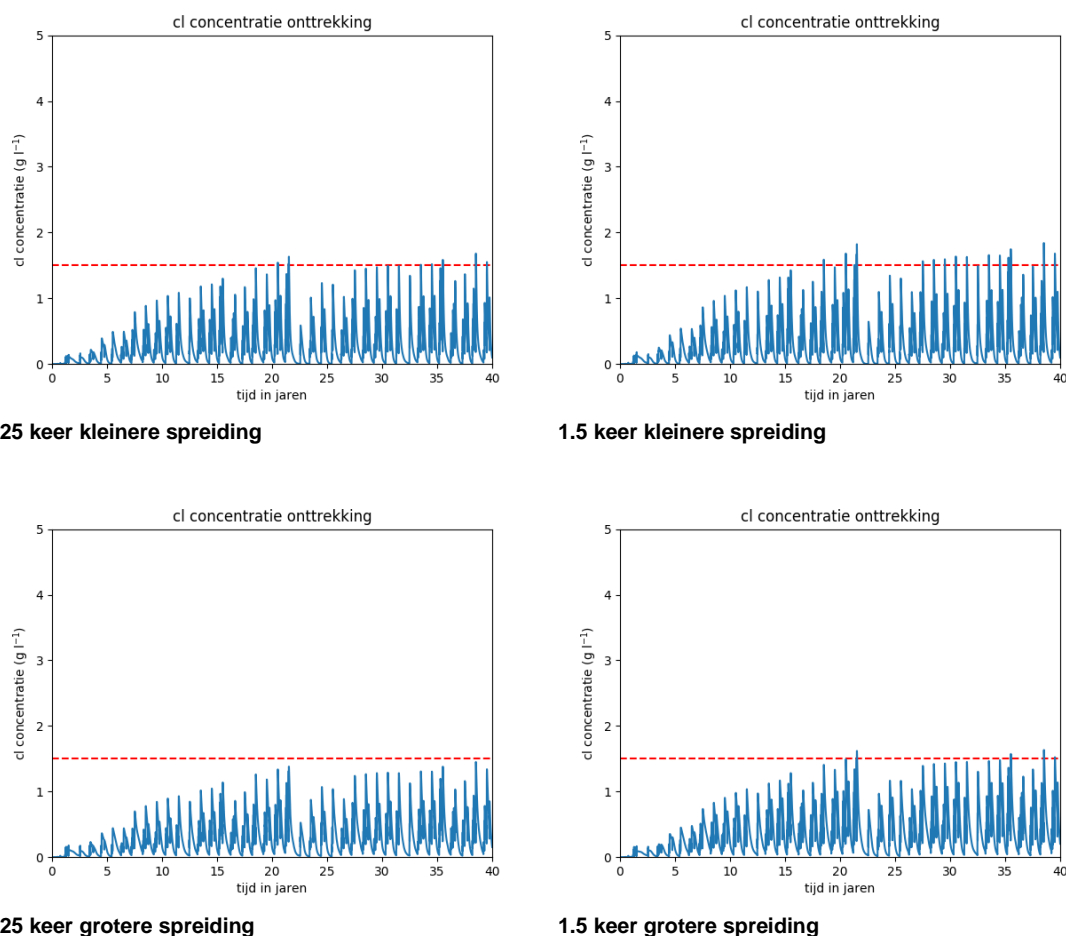


1.25 keer grotere spreiding



1.5 keer grotere spreiding

Figuur 4.21: Chlorideconcentraties in de onttrekking voor de verschillende simulaties bij een maximaal volume onttrekkingsregime.



Figuur 4.22: Chlorideconcentraties in de onttrekking voor de verschillende simulaties bij een realistisch onttrekkingsregime.

4.3.2 Doorlatendheid en verticale anisotropie (K_h / K_v)

Voor de doorlatendheid en verticale anisotropie zijn 8 verschillende variaties gesimuleerd. (Tabel 4.4). De invloed van een verticale anisotropie van 1.43 (referentie), 1 en 3 zijn doorgerekend. Een anisotropie van 1 is alleen gekozen voor illustratiedoeleinden; gezien de lithologische opvulling van de 'Walcheren geulen' is een verticale anisotropie van 1 onwaarschijnlijk. Voor de K_h zijn de waarden 6.2 (referentie), 10 en 4.3 m d^{-1} doorgerekend.

In Tabel 4.5 zijn de relatieve afname van het zoetwatervolume en eerste overschrijding van zout in de onttrekking (in jaren na start van de onttrekking) voor de verschillende onttrekkingssimulaties weergegeven. Volgens de verwachting leidt een hogere verticale anisotropie (K_h / K_v) tot minder risico op zout grondwater in de onttrekking. Verder is het risico op zout grondwater alsmede de relatieve afname van het zoetwatervolume groter bij een lagere K_h waarde. Voor de laagste waarde ($K_h = 4.3 \text{ m d}^{-1}$) wordt vroeg of laat altijd zout grondwater aangetrokken, ongeacht de waarde van K_v of het onttrekkingsregime. Bij de hoogste doorlatendheid ($K_h = 10.0 \text{ m d}^{-1}$) wordt juist nooit zout water aangetrokken. Bij de referentie waarde van K_h (6.2 m d^{-1}) wordt alleen bij een lage waarde van de verticale doorlatendheid (2.1 m d^{-1}) de grenswaarde voor zout grondwater niet overschreden. De

afname van het zoetwatervolume in het buffergebied van de onttrekking varieert tussen de 4.6 en 6.8%.

Tabel 4.4: Variaties in doorlatendheid en verticale anisotropie.

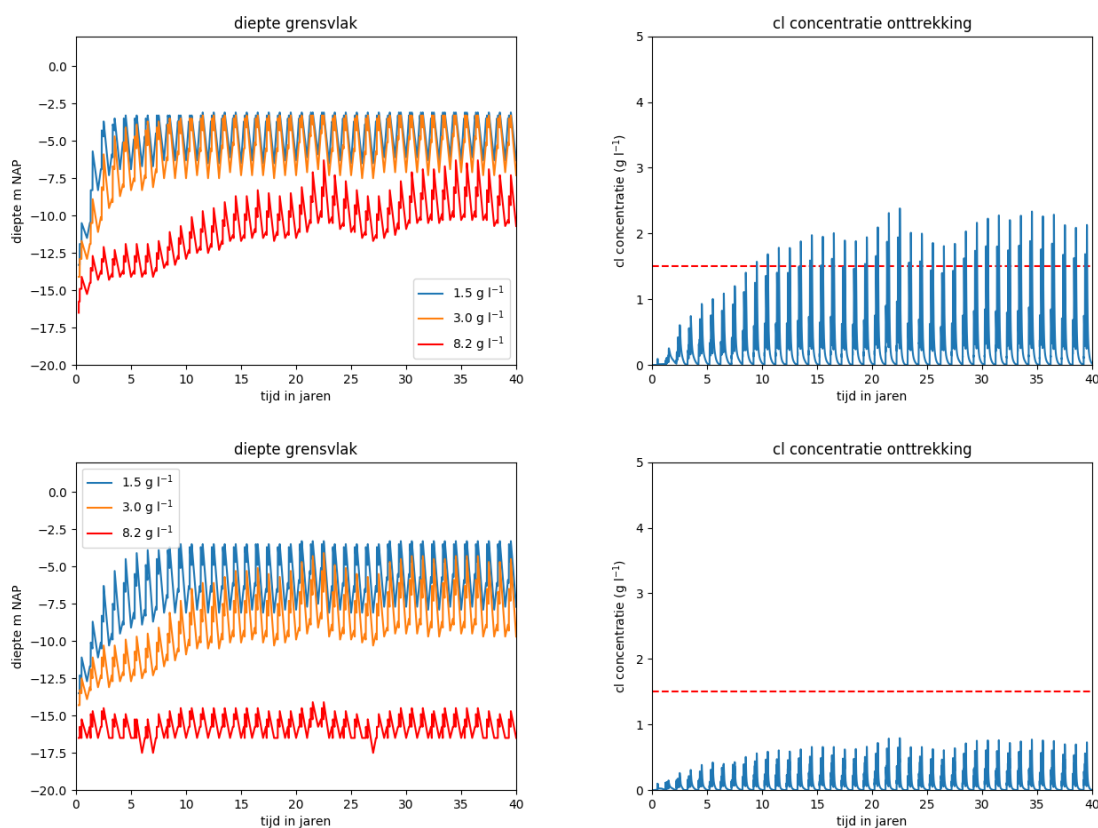
Simulatie nummer	K_h (m d ⁻¹)	K_v (m d ⁻¹)	Anisotropie (K_h / K_v)
1 (referentie)	6.2	4.3	1.43
2	10.0	7.0	1.43
3	4.3	3.0	1.43
4	6.2	6.2	1
5	10.0	10.0	1
6	4.3	4.3	1
7	6.2	2.1	3
8	10.0	3.3	3
9	4.3	1.4	3

Tabel 4.5: Relatieve afname zoetwatervolume en eerste overschrijding zout in de onttrekking voor de verschillende onttrekkings simulaties.

Simulatie	K_h (m d ⁻¹)	K_v (m d ⁻¹)	Relatieve afname zoetwater volume	Eerste overschrijding zout in onttrekking (in jaren)
2, maximaal volume onttrekkingsregime	10.0	7.0	5.1	Nooit
2, realistisch onttrekkingsregime	10.0	7.0	4.6	Nooit
3, maximaal volume onttrekkingsregime	4.3	3.0	6.6	10
3, realistisch onttrekkingsregime	4.3	3.0	6.0	8
4, maximaal volume onttrekkingsregime	6.2	6.2	6.3	21
4, realistisch onttrekkingsregime	6.2	6.2	5.7	15
5, maximaal volume onttrekkingsregime	10.0	10.0	5.1	Nooit
5, realistisch onttrekkingsregime	10.0	10.0	4.8	Nooit
6, maximaal volume onttrekkingsregime	4.3	4.3	6.6	8
6, realistisch onttrekkingsregime	4.3	4.3	6.0	8
7, maximaal volume onttrekkingsregime	6.2	2.1	6.3	Nooit
7, realistisch onttrekkingsregime	6.2	2.1	5.6	Nooit
8, maximaal volume onttrekkingsregime	10.0	3.3	5.1	Nooit
8, realistisch onttrekkingsregime	10.0	3.3	4.7	Nooit
9, maximaal volume onttrekkingsregime	4.3	1.4	6.8	20
9, realistisch onttrekkingsregime	4.3	1.4	6.0	16

In Figuur 4.23 is voor het maximaal volume onttrekkingsregime van simulaties 3 (worst case) en 8 (best case) het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking en de diepte van chlorideconcentraties 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l⁻¹ vlak onder de onttrekking weergegeven. Daarin is wederom het effect van de doorlatendheid op de overschrijding van de 1.5 g Cl l⁻¹ waarde (zout grondwater) in de onttrekking duidelijk. Verder valt het gedrag van de concentratiecontouren onder de onttrekking op; bij simulatie 3 met de lage doorlatendheden komt ook de 8.2 g Cl l⁻¹ contour dicht in de buurt van de onttrekking, terwijl bij de hoge doorlatendheden deze contour min of meer op zijn plek blijft. Gaat men van deze contour uit voor het berekenen van de zoetwatervoorraad in het model (zoals in principe wordt gedaan wanneer de scherp grensvlakbenadering wordt toegepast) dan trekt men dus een andere

conclusie dan wanneer menging wordt meegenomen en een lagere contourwaarde wordt gekozen.



Figuur 4.23: Resultaten van het maximaal volume onttrekkingsregime bij simulaties 3 (boven) en 8 (onder). Links: chlorideconcentratie contouren onder de onttrekking (op $x,y = 0,0$). Rechts: chlorideconcentratie in de onttrekking.

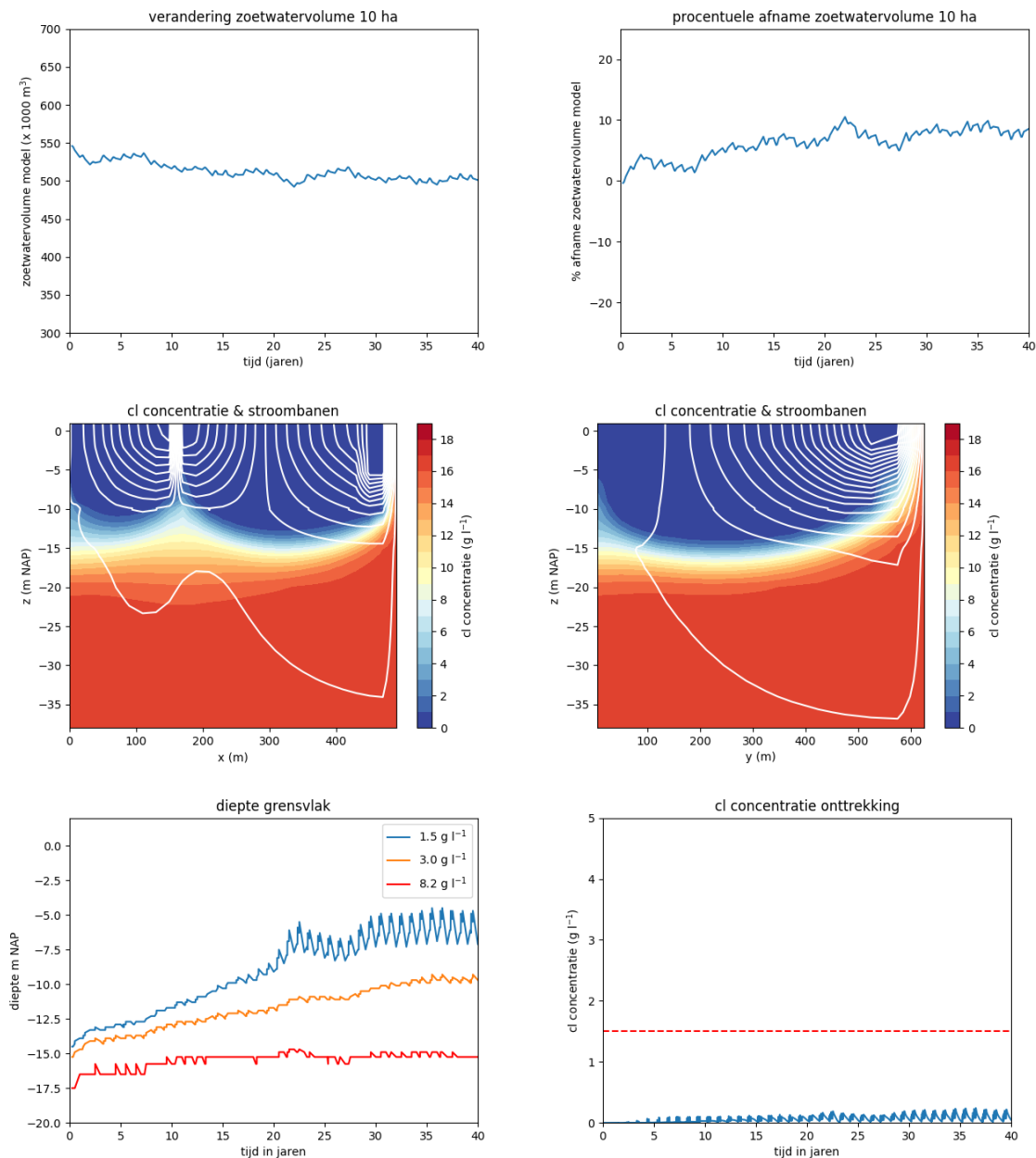
4.3.3 De invloed van een lateraal breed aanwezige kleilaag

Voor de invloed van de aanwezigheid van een lateraal breed aanwezige kleilaag zijn twee varianten doorgerekend; één op -10 m NAP (tussen de onttrekking en het zoet-zout grensvlak) en de ander op -17 m NAP (zowel onder de onttrekking als onder het zoet-zout grensvlak). Beide kleilagen hebben een hydraulische weerstand van 100 dagen en zijn over de gehele horizontaal van het model aanwezig.

De resultaten van de simulatie met de kleilaag op -10 m NAP met het realistische onttrekkingsregime zijn weergegeven in Figuur 4.24. De stroombanen laten de invloed van de kleilaag op de concentratieverdeling zien. Ook heeft de kleilaag een positieve invloed op de diepte van de grensvlakken en de concentratieverdeling in de onttrekking, welke bij lange na niet de waarde van zout grondwater benadert.

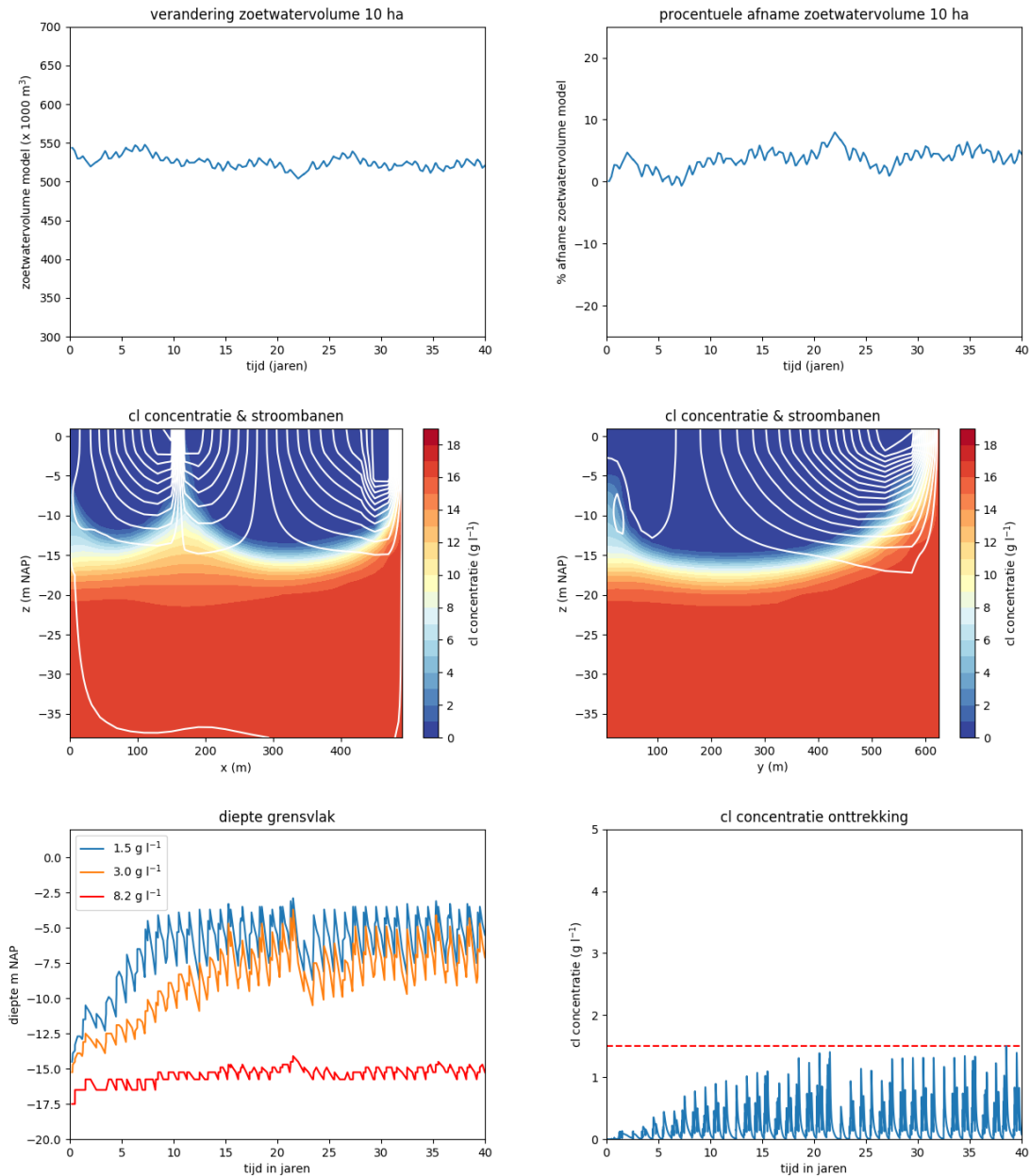
Opvallend is dat de kleilaag wel een negatievere invloed heeft op het zoetwatervolume in het buffergebied van de onttrekking (7.9% aan het einde van de simulatie). De reden daarvan is dat de opkegeling van zout grondwater meer wordt verspreid dan bij het referentiemodel (waar meer lokale opkegeling plaatsvindt) en dus het zoetwatervolume meer aantast.

Uit de resultaten van het maximaal volume onttrekkingsregime kunnen geen andere inzichten worden verworven dan tot dusver zijn beschreven, en zijn daarom hier niet verder beschouwd.



Figuur 4.24: Resultaten van de onttrekking-simulatie van het model een lateraal breed aanwezige kleilaag op -10 m NAP met een realistisch onttrekkingsregime. Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking (10 ha). Rechtsboven: de relatieve verandering van het zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de x-as van het model op $y = 0$ m. Rechtsmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de y-as van het model op $x = 0$ m. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l^{-1} grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking ($x,y = 0,0$). Rechtsonder: het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking.

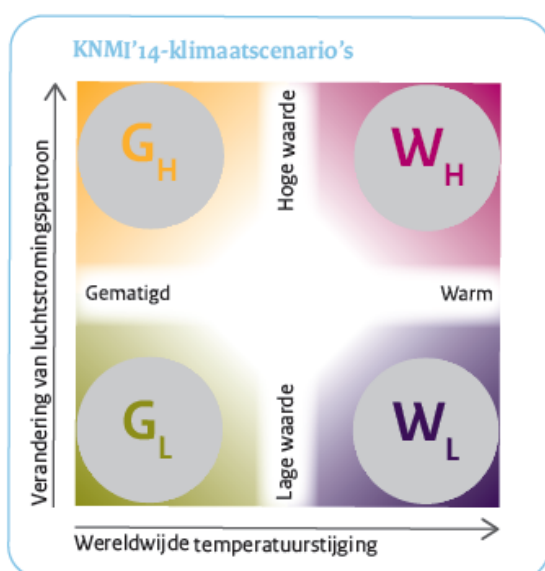
De resultaten van de kleilaag op -17 m NAP zijn weergegeven in Figuur 4.25, voor het realistische onttrekkingsregime. De stroombanen laten in dit geval minder goed de invloed van de kleilaag zien omdat er minder stroming in het zoute grondwater plaatsvindt. De concentraties duiden echter op een positieve invloed van de kleilaag op de concentraties onder en in de onttrekking, al is deze minder groot dan wanneer de kleilaag zich tussen de onttrekking en de zoet-zout grens bevindt. De invloed van de kleilaag op de afname van de zoetwatervoorraad is vergelijkbaar met het referentiescenario (5% bij het maximaal volume onttrekkingsregime, 4% bij het maximaal volume onttrekkingsregime). Net als bij de simulatie met de kleilaag op -10 m NAP zijn de resultaten van het maximaal volume onttrekkingsregime omwille van de beknoptheid van dit rapport niet beschreven.



Figuur 4.25: Resultaten van de onttrekking-simulatie van het model een lateraal breed aanwezige kleilaag op -17 m NAP met een realistisch onttrekkingsregime. Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking (10 ha). Rechtsboven: de relatieve verandering van het zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de x-as van het model op $y = 0$ m. Rechtsmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de y-as van het model op $x = 0$ m. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l^{-1} grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking ($x,y = 0,0$). Rechtsonder: het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking.

4.4 Grondwateraanvulling en klimaatverandering

Voor het voorspellen van de effecten van klimaatverandering op de dikte van de zoetwaterbel onder de kreekruggen is gebruik gemaakt van de vier klimaatscenario's van het KNMI (van den Hurk et al., 2014); 'Gematigd Laag' (GL), 'Gematigd Hoog' (GH), 'Warm Laag' (WL) en 'Warm Hoog' (WH), zie ook Figuur 4.26. De scenario's zijn gerelateerd aan temperatuurstijging en verandering van luchtstroming. De scenario's geven voor de toekomst een indruk van de ontwikkeling van twaalf klimaatvariabelen, zoals temperatuur en neerslag. Voor deze studie is het klimaatscenario voor het jaar 2050 gehanteerd, en zijn alleen veranderingen in neerslag en de Makkink referentieverdamping meegenomen. Het KNMI heeft de periode 1981 – 2010 genomen als de referentieperiode; hier wordt aangenomen dat dit representatief genoeg is voor de in deze studie gehanteerde referentieperiode 1996 t/m 2015.



Figuur 4.26: Klimaatscenario's van het KNMI uit 2014. Van <http://www.klimaatscenarios.nl/brochures/index.html>.

Tabel 4.6: Veranderingen in neerslag (P) en Makkink referentieverdamping (E_{ref}) voor de vier KNMI klimaatscenario's. De berekende gemiddelde potentiële grondwateraanvulling (de grondwateraanvulling berekend met behulp van de neerslag en de potentiële verdamping) voor de periode 1996-2015 is 169 mm/jaar.

	GL	GH	WL	WH
Verandering P (%)	+4%	+2.5	+5.5%	+5%
Verandering E_{ref} (%)	+3%	+5%	+4%	+7%
Gemiddelde potentiële grondwateraanvulling (mm per jaar)	182	155	188	163

Met de in Tabel 4.6 weergegeven percentages is vervolgens voor een periode van 40 jaar de verandering in de potentiële grondwateraanvulling berekend. Hierbij is aangenomen dat de veranderingen direct vanaf 2016 (na de periode 1996-2015 die gebruikt is voor de berekening van de gemiddelde grondwateraanvulling) plaatsvinden. Vanwege de hantering van de algemene regels is het onttrekkingsregime niet aangepast voor de klimatologische omstandigheden. Dus hoewel de vraag naar grondwateronttrekking in de klimaatscenario's toeneemt door de toename van de E_{ref} is dit niet meegenomen in het daadwerkelijke onttrekkingsregime.

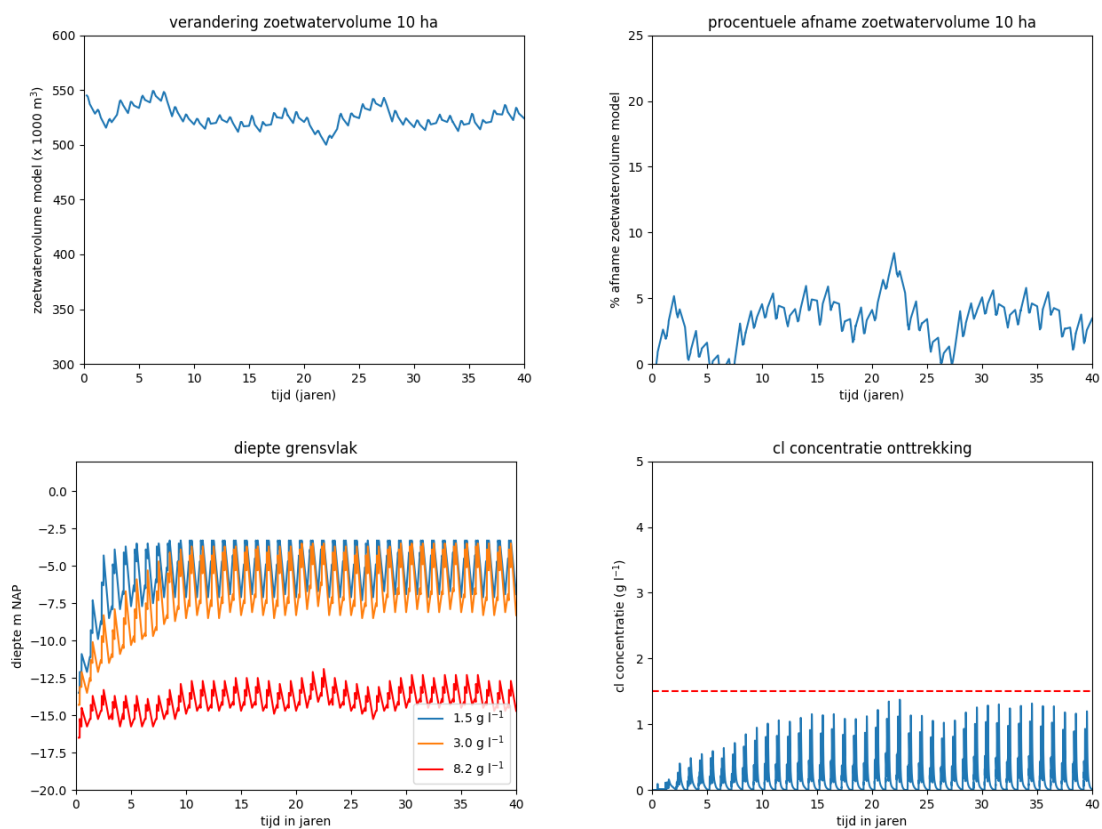
Vanwege de complexiteit van het koppelen van bepaalde processen met het grondwatermodellen zijn de volgende effecten o.a. niet meegenomen:

- Het effect van piekbuien op de grondwateraanvulling (reductie van de grondwateraanvulling door oppervlakkige afstroming en directe verdamping). Dit effect is overigens überhaupt niet meegenomen in deze studie.
- Verandering in interceptie door klimaatverandering
- Veranderingen in landbouwgewassen in Zeeland.

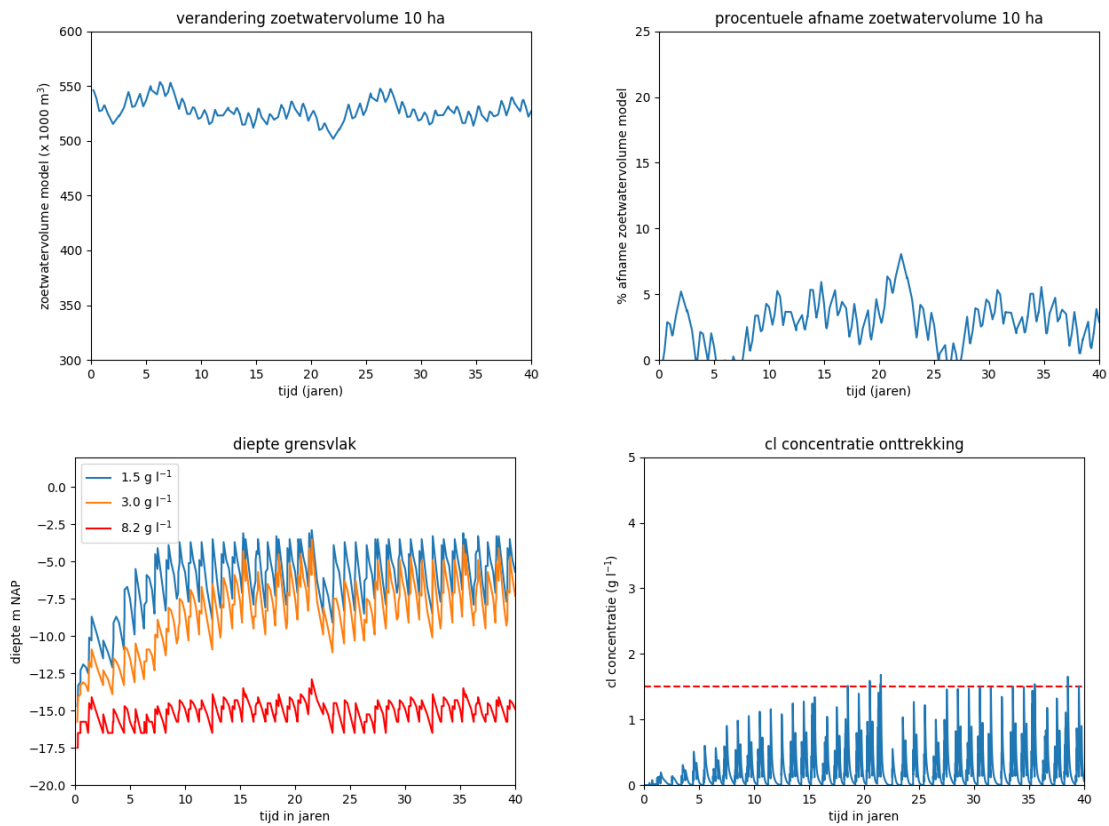
De gemiddelde verandering van de potentiële grondwateraanvulling is in Tabel 4.6 weergegeven. Voor de twee onttrekkingsregimes zijn de resultaten van de verandering van het zoetwatervolume (absoluut en relatief), de diepte van drie grensvlakken onder de onttrekking en de concentratie in de onttrekking weergegeven per klimaatscenario in secties 4.4.1 t/m 4.4.4.

De resultaten laten zien dat de 'L' scenario's GL en WL een positieve invloed hebben op de zoetwatorvoorraad en de concentratieverdeling onder en in de onttrekking. De reden hiervoor is dat de grondwateraanvulling toeneemt. Hoewel de potentiële verdamping in deze scenario's ook toeneemt, heeft dit voor de grondwateraanvulling een minder grote invloed omdat de daadwerkelijk berekende grondwateraanvulling ook afhangt van de diepte van de grondwaterstand; bij lagere grondwaterstanden zal de verdamping afnemen. Om dezelfde reden is de invloed van het WH scenario klein ten opzichte van de referentiesituatie. Binnen het GH scenario neemt de potentiële grondwateraanvulling af ten opzichte van de referentiesituatie. Dit heeft ook zijn invloed op de concentraties en de afname van het zoetwatervolume.

4.4.1 GL scenario

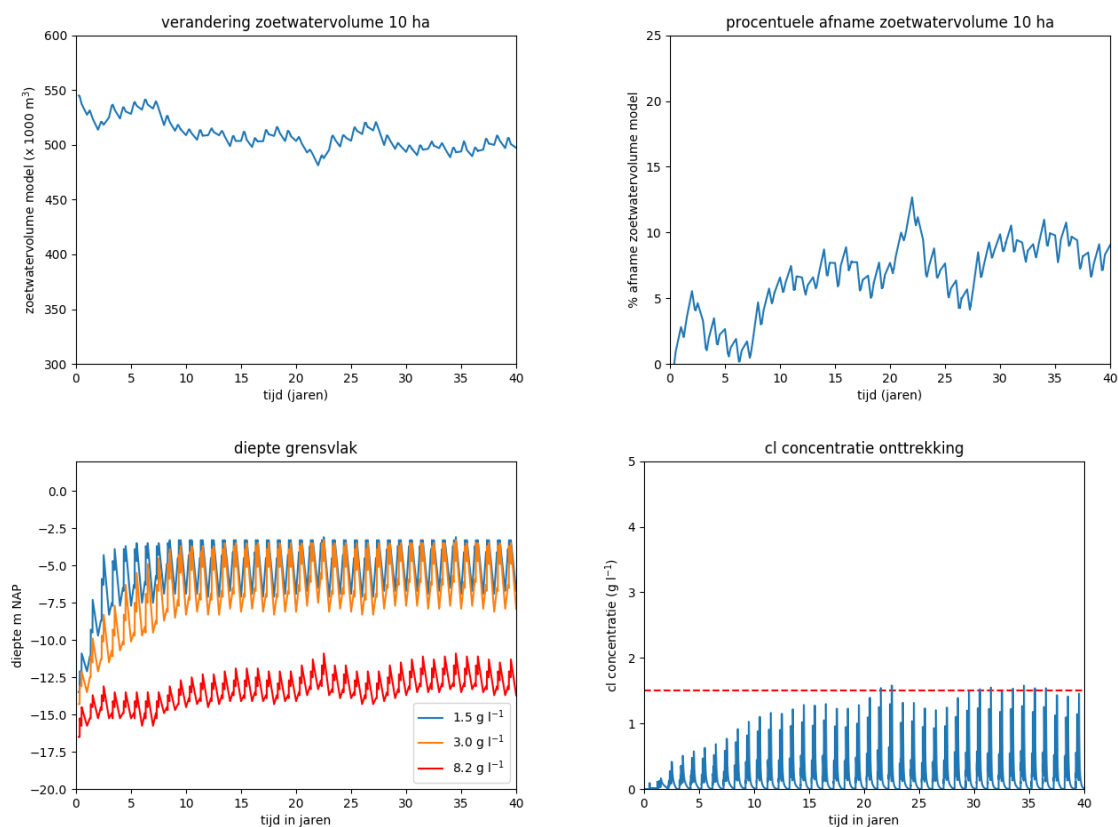


Figuur 4.27: Resultaten van de onttrekking-simulatie van het GL scenario met het maximaal volume onttrekkingsregime. Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking. Rechtsboven: de relatieve verandering zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l⁻¹ grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking (x,y = 0,0). Rechtsonder: verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking.

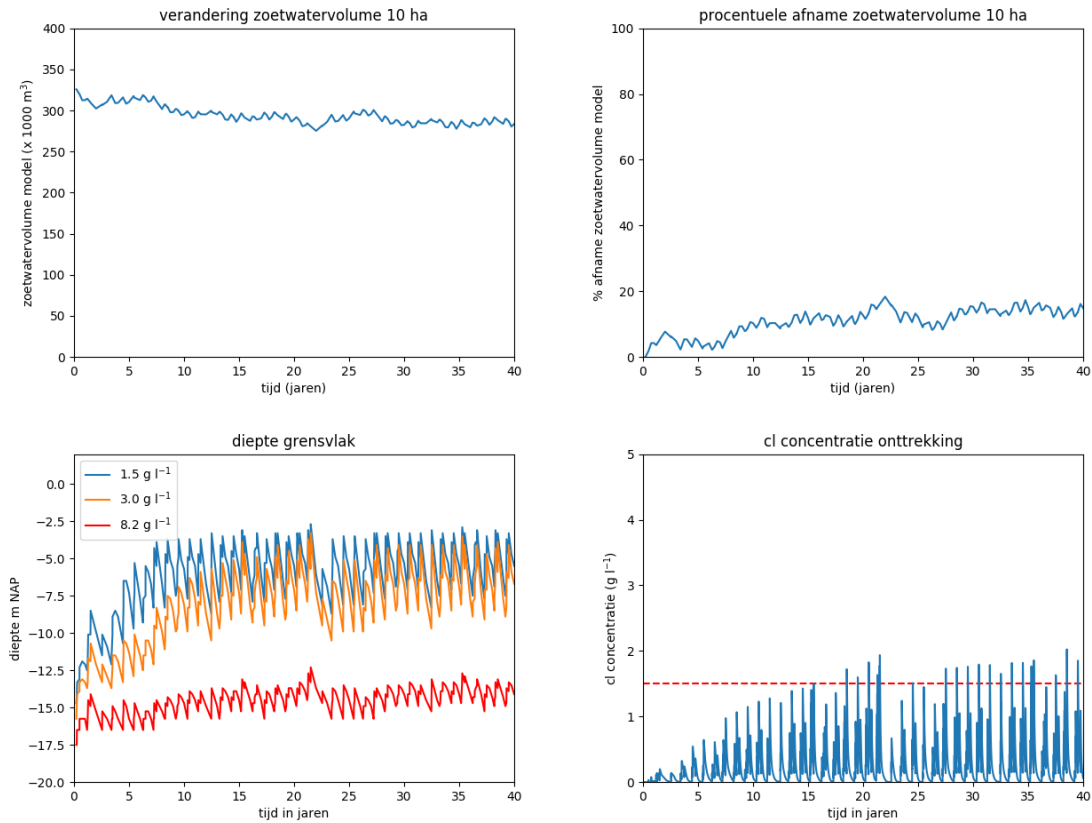


Figuur 4.28: Resultaten van de onttrekking-simulatie van het GL scenario met het realistisch onttrekkingsregime.
Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking.
Rechtsboven: de relatieve verandering zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie.
Linksonder: de diepte van de 1.5 , 3.0 en 8.2 g Cl l^{-1} grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking ($x,y = 0,0$).
Rechtsonder: verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking.

4.4.2 GH scenario

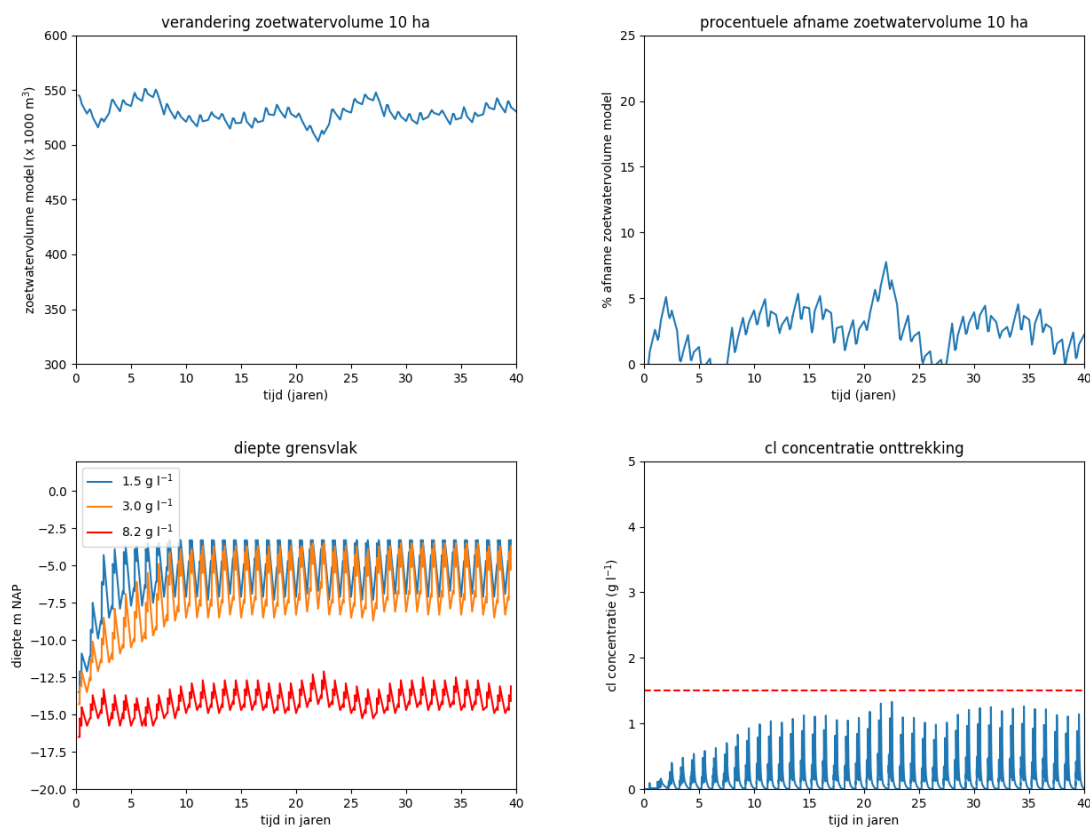


Figuur 4.29: Resultaten van de onttrekking-simulatie van het GH scenario met het maximaal volume onttrekkingsregime. Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking. Rechtsboven: de relatieve verandering zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l⁻¹ grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking (x,y = 0,0). Rechtsonder: verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking.

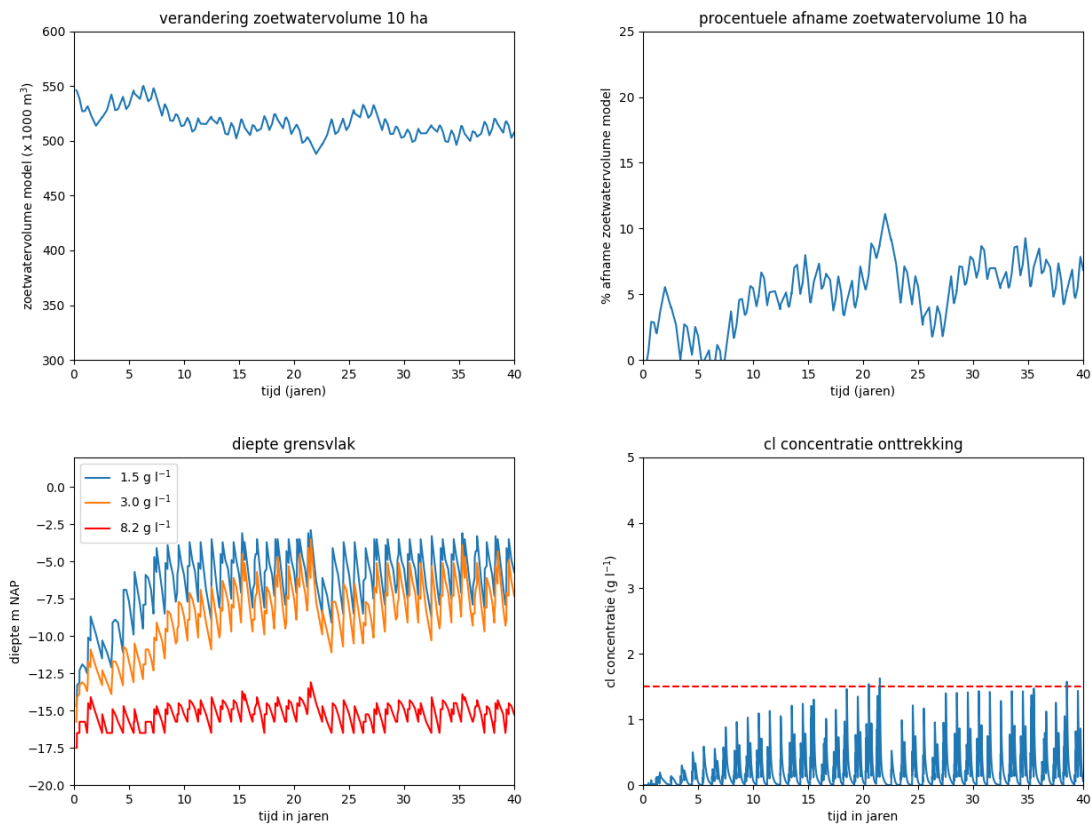


Figuur 4.30: Resultaten van de onttrekking-simulatie van het GH scenario met het realistisch onttrekkingsregime.
Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking.
Rechtsboven: de relatieve verandering zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie.
Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l⁻¹ grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking (x,y = 0,0).
Rechtsonder: verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking.

4.4.3 WL scenario

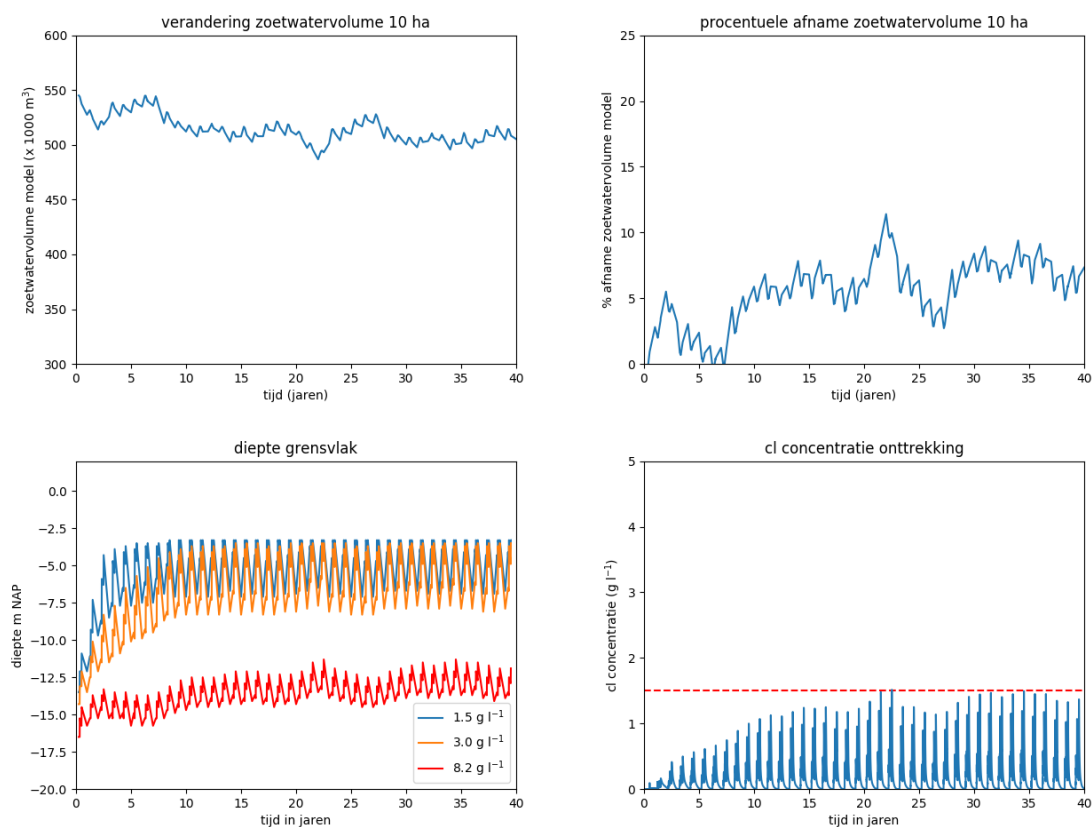


Figuur 4.31: Resultaten van de onttrekking-simulatie van het WL scenario met het maximaal volume onttrekkingsregime. Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking. Rechtsboven: de relatieve verandering zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l⁻¹ grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking (x,y = 0,0). Rechtsonder: verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking.

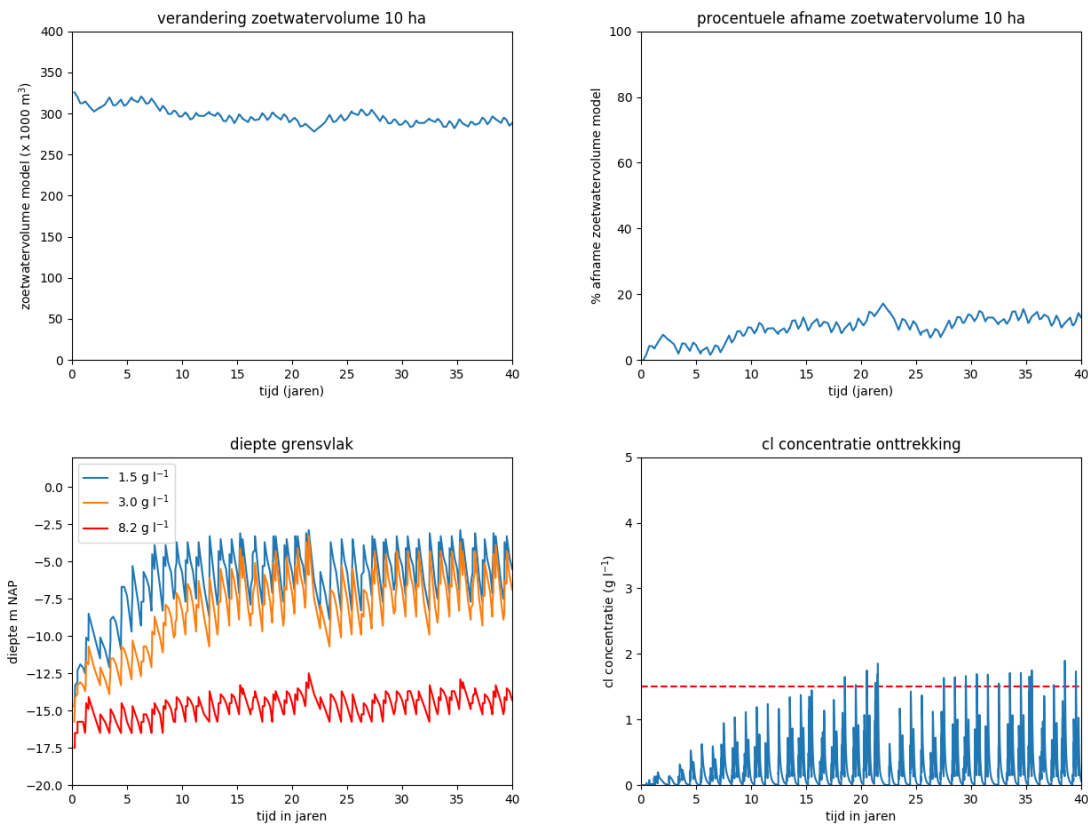


Figuur 4.32: Resultaten van de onttrekking-simulatie van het WL scenario met het realistisch onttrekkingsregime. Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking. Rechtsboven: de relatieve verandering zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l⁻¹ grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking (x,y = 0,0). Rechtsonder: verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking.

4.4.4 WH scenario



Figuur 4.33: Resultaten van de onttrekking-simulatie van het WH scenario met het maximaal volume onttrekkingsregime. Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking. Rechtsboven: de relatieve verandering zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l⁻¹ grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking (x,y = 0,0). Rechtsonder: verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking.



Figuur 4.34: Resultaten van de onttrekking-simulatie van het WH scenario met het realistisch onttrekkingsregime.
 Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking.
 Rechtsboven: de relatieve verandering zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l⁻¹ grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking (x,y = 0,0). Rechtsonder: verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking.

4.5 Zeespiegelstijging

Voor het voorspellen van de effecten van zeespiegelstijging is gebruik gemaakt van dezelfde KNMI klimaatscenario's als in de vorige sectie, maar dan alleen het 'W' scenario, waar een zeespiegelstijging van 5.5 mm per jaar is voorspeld. Verder is gebruik gemaakt van de numerieke simulaties van het regionale zoet-zout grondwatermodel van de provincie Zeeland. In Figuur 3.14 is de ruimtelijke verbreiding van de invloed van de zeespiegelstijging weergegeven. Daarin is te zien dat voor veel gebieden de invloed van de zeespiegelstijging relatief snel wegdempt. Voor de kreekrug gebieden zijn de drie meest voorkomende categorieën (10%, 20% en 40%) van doorwerking van de zeespiegelstijging doorgerekend voor een 40-jarige periode. Voor deze categorieën is de jaarlijkse zeespiegelstijging dus als volgt:

- 10%: 0.55 mm/jaar
- 20%: 1.1 mm/jaar
- 40%: 2.2 mm/jaar

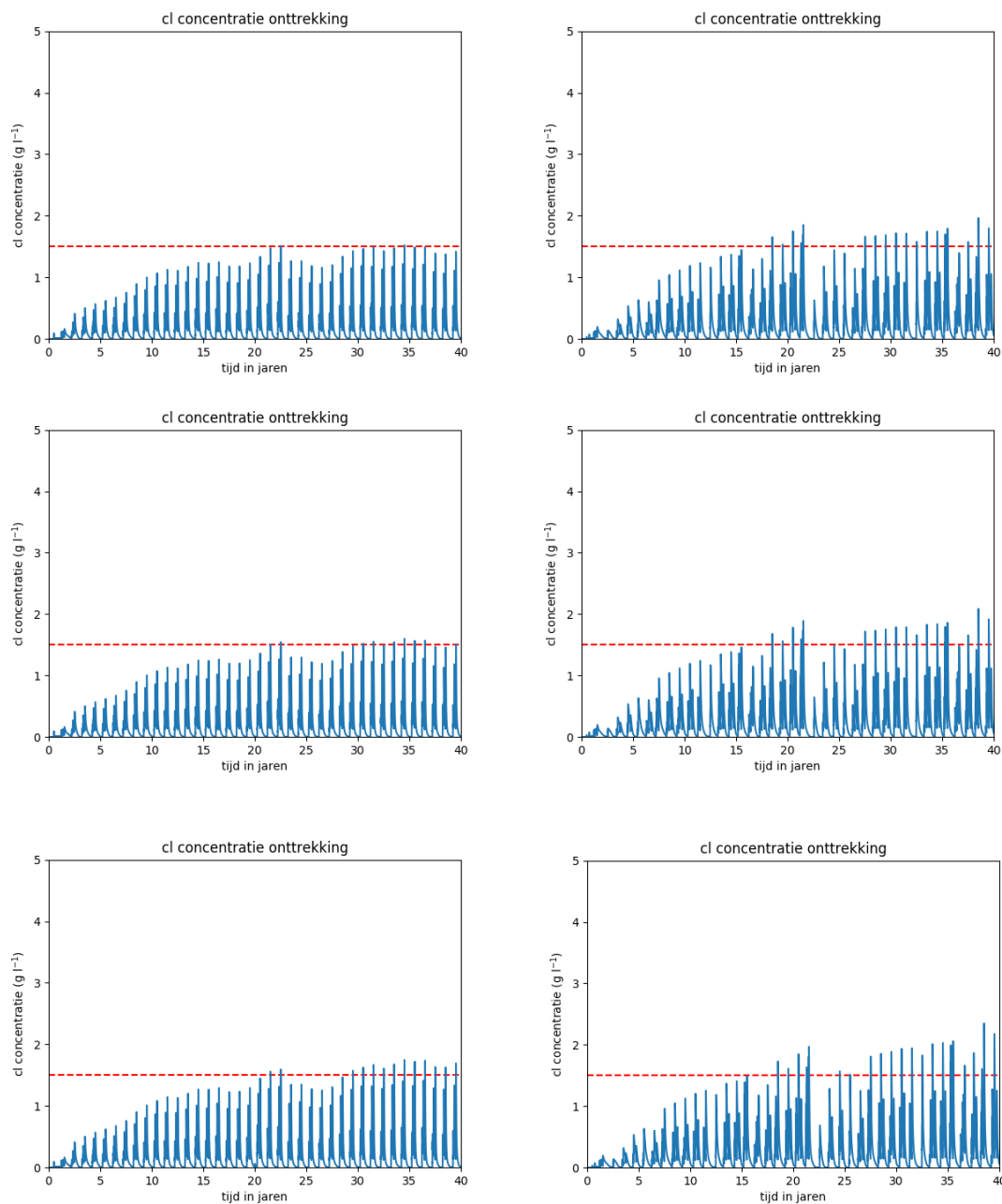
De zeespiegelstijging is gesimuleerd door langs de 'vaste stijghoogte randen' van het model over de gehele verticaal de vaste stijghoogte te verhogen..

In Tabel 4.7 is de relatieve afname van het volume van de zoetwaterbel in het buffergebied van de onttrekking (10 ha) voor de 6 zeespiegelstijging scenario's weergegeven. Daarin valt op dat de zeespiegelstijging een duidelijke invloed heeft op de afname van de zoetwaterbel. In het scenario met 40% doorwerking van de zeespiegelstijging kan het volume met bijna 16% afnemen. Ook heeft de zeespiegelstijging invloed op de concentraties in de onttrekking (Figuur 4.35).

Tabel 4.7: Relatieve afname van het volume van de zoetwaterbel in het buffergebied van de onttrekking (10 ha) in % voor de 6 zeespiegelstijgingsscenario's.

Simulatie	Relatieve afname volume zoetwaterbel (%)
Zeespiegelstijging 10%, maximaal volume onttrekkingsregime	9.8
Zeespiegelstijging 10%, realistisch onttrekkingsregime	9.4
Zeespiegelstijging 20%, maximaal volume onttrekkingsregime	11.8
Zeespiegelstijging 20%, realistisch onttrekkingsregime	11.0
Zeespiegelstijging 40%, maximaal volume onttrekkingsregime	15.8
Zeespiegelstijging 40%, realistisch onttrekkingsregime	15.5

De invloed van de andere zeespiegelstijging scenario's zijn niet doorgerekend. Ook zijn de voorspellingen van de diverse zeespiegelstijging scenario's onzeker. Gezien het relatief trage effect van de zeespiegelstijging wordt hier aanbevolen om bij een toekomstige herziening van de onttrekkingsregels het effect nogmaals te onderzoeken, gezien de verwachte toename van de kennis en wellicht data over de zeespiegelstijging. Dergelijke trage verandering zullen uit toekomstige metingen moeten blijken. Uiteindelijk bepaalt de ligging van het grensvlak op een bepaald moment wat de bijbehorende onttrekkingsmogelijkheden dan zijn.



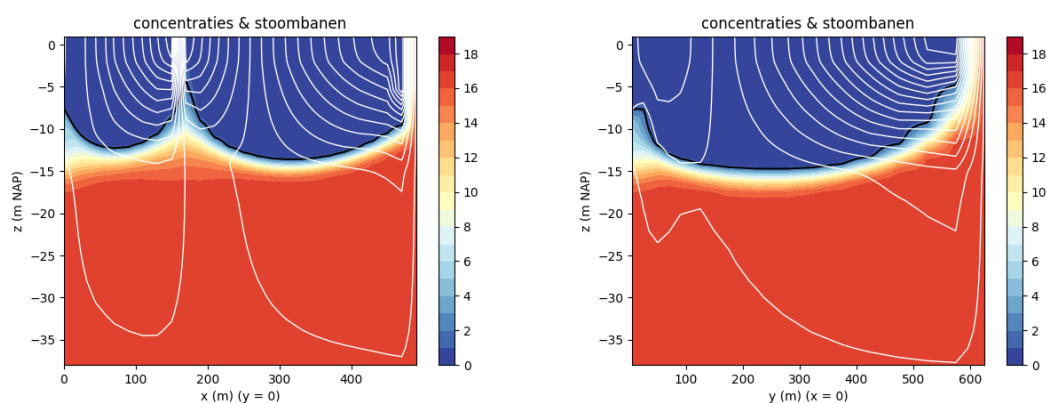
Figuur 4.35: Invloed van de zeespiegelstijging (van boven naar beneden: 10%, 20% en 40% doorwerking) op de chlorideconcentratie in de onttrekking. Links: de simulaties met een maximaal volume onttrekkingsregime. Rechts: de simulaties met een realistisch onttrekkingsregime.

4.6 Fysiogeografische kenmerken

4.6.1 Invloed van longitudinale dispersie

In sectie 4.2.5.1 is beschreven dat de dikte van de mengzone in het referentiemodel goed overeenkomt met de FRESHEM data. De dikte van de mengzone wordt vooral bepaald door de longitudinale dispersie (Eeman et al. 2011), welke in deze studie een waarde van 0.1 m heeft. De waarde van de longitudinale dispersie is gebaseerd op numerieke model studies in Zeeland op een vergelijkbare ruimtelijke schaal (Pauw et al. 2015; Zuurbier et al. 2015).

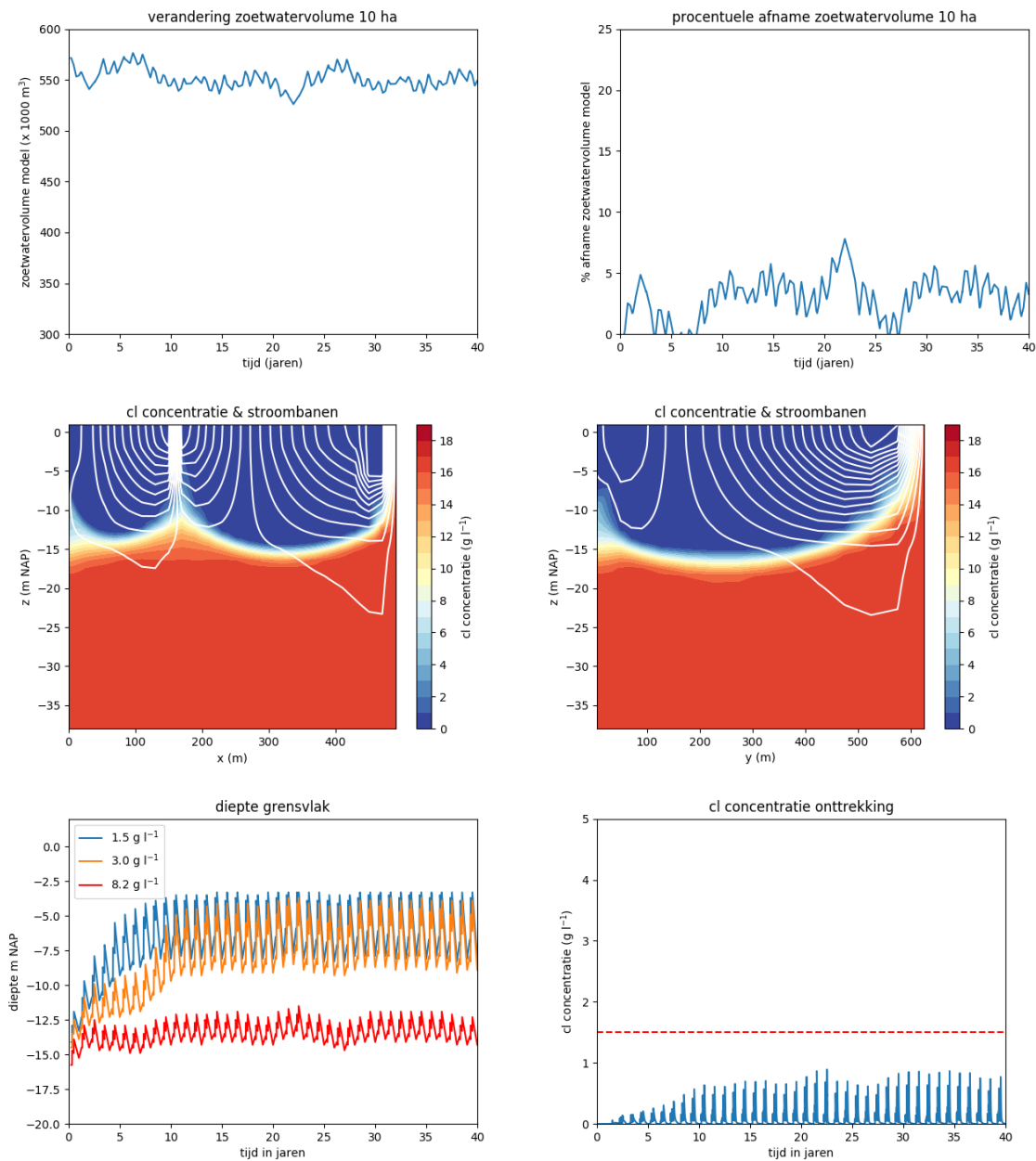
Hoe hoger de longitudinale dispersie, hoe breder de mengzone. Gezien de ruimtelijke schaal waarop grondwaterstroming onder kreekruggen optreedt, alsmede de schaal waarop concentraties door onttrekking variëren¹⁰, lijkt een hogere waarde voor de longitudinale dispersiviteit niet realistisch. De invloed van een hogere waarde van de longitudinale dispersiviteit is daarom niet doorgerekend. Wel is de invloed van een kleinere waarde van 1 cm gesimuleerd voor een begrip van dit effect. In Figuur 4.36 zijn hiervan de resultaten van de initialisatie simulatie weergegeven. Vergeleken met de referentiesimulatie is de mengzone significant minder dik.



Figuur 4.36: Concentratieverdeling en stroombanen in de initialisatie simulatie met een longitudinale dispersiviteit van 0.01 m.

De afname van de menging heeft ook een positieve invloed op het zoetwaterniveau in het model en de concentraties in en onder de onttrekking. Omwille van de omvang van dit rapport zijn alleen de resultaten van het realistisch onttrekkingsregime weergegeven (Figuur 4.37); uit het maximaal volume onttrekkingsregime kunnen soortgelijke conclusies worden getrokken. Het opvallendste verschil ten opzichte van het referentiescenario is dat de concentraties in de onttrekking ruim beneden de grenswaarde voor zout grondwater blijven.

¹⁰ In dit geval de afstand tussen de onttrekking en de diepte van het (initiële) zoet-zout grensvlak.



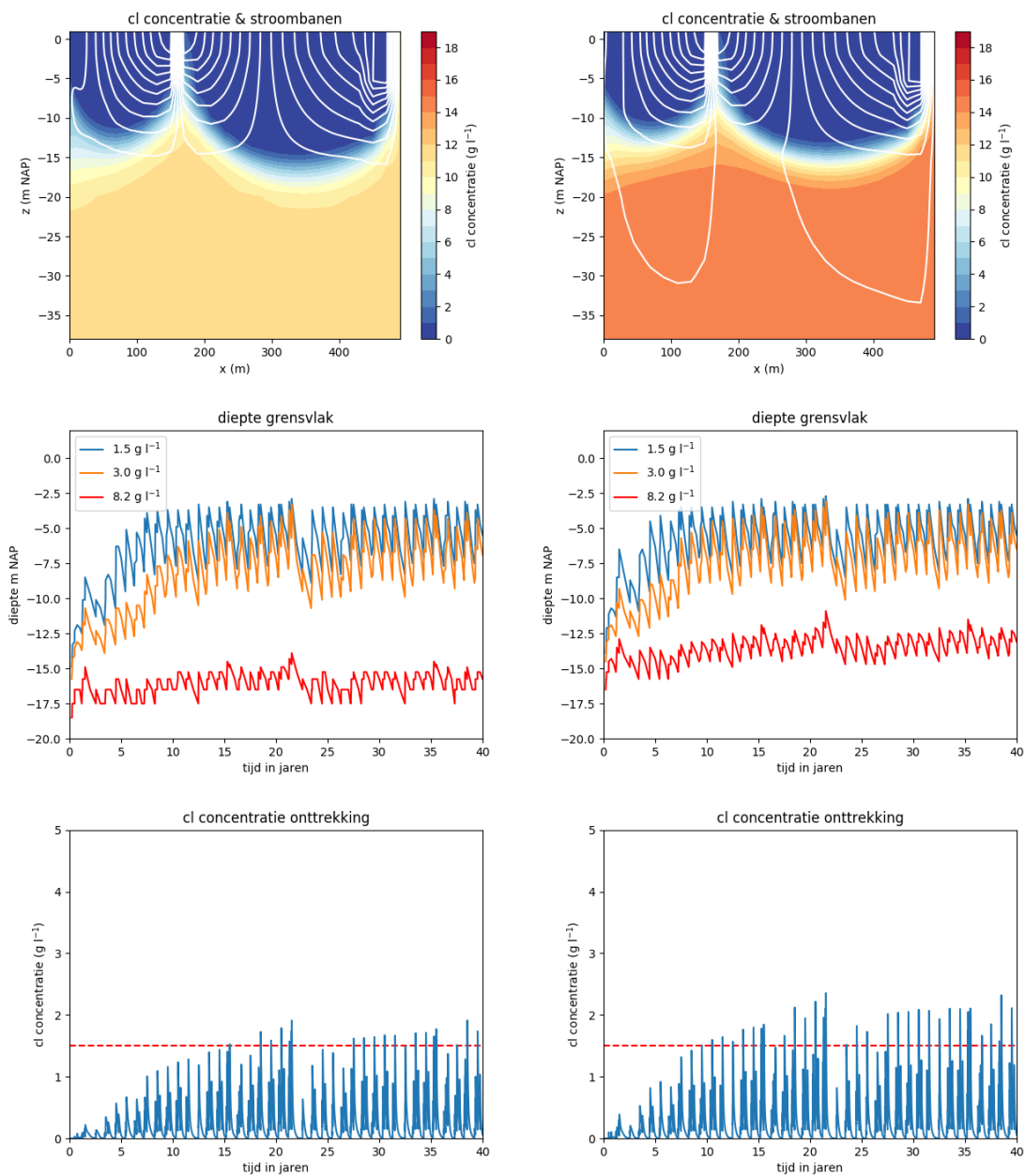
Figuur 4.37: Resultaten van de onttrekking-simulatie bij het realistisch onttrekkingsregime en een longitudinale dispersie van 0.01 m. Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking. Rechtsboven: de relatieve verandering van het zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de x-as van het model op $y=0$ m. Rechtsmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de y-as van het model op $x=0$ m. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l^{-1} grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking ($x,y = 0,0$). Rechtsonder: het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking (gemiddeld over de 4 cellen van de onttrekking). De rode stippellijn geeft hierbij de zoet-zout grenswaarde (1.5 g Cl l^{-1}) aan.

4.6.2 Invloed van een kleinere dichtheid van het grondwater

De concentratie van het zoute grondwater verschilt ruimtelijk in Zeeland, en daarmee dus ook de dichtheid. Uit de analytische vergelijkingen (2) en (3) kan worden afgeleid dat een lagere dichtheid een positieve invloed heeft op de dikte van de zoetwaterbel. Toepassing van een lagere dichtheid in het referentiemodel leidt dus tot een dikkere zoetwaterbel. In deze sectie is voor dit effect gecompenseerd door het waterpeil in de nabijgelegen sloot te verlagen, zodat een dikte van 15-16 m -mv voor wat betreft de zoet-zout grens van 1.5 g Cl l^{-1} wordt verkregen als uitkomstsituatie voor de onttrekkingssimulatie. Twee simulaties zijn doorgerkend; één met een dichtheid van het onderliggende zoute grondwater van 1015 kg m^{-3} (11 g Cl l^{-1}) en één met een dichtheid van 1020 kg m^{-3} (15 g Cl l^{-1}).

In Figuur 4.38 zijn resultaten van de twee simulaties met een andere dichtheid en het realistische onttrekkingsregime weergegeven. Hierin valt op dat aan het begin van de simulatie de 8.2 g Cl l^{-1} concentratiecontour verschilt; bij een dichtheid van 1020 kg m^{-3} ligt deze hoger. De reden hiervoor is vermoedelijk de sloot op $x = 200 \text{ m}$, waarvan het peil moest worden aangepast om de gewenste dikte van de zoetwaterbel te verkrijgen. De hogere ligging van de 8.2 g Cl l^{-1} contour (en uiteraard de andere hogere concentratiecontouren) is vermoedelijk de reden waarom de concentratie in de onttrekking bij een dichtheid van 1020 kg m^{-3} hoger is dan bij een lagere dichtheid.

De relatieve afname van de zoetwatervoorraad binnen het buffergebied van de onttrekking is bij een dichtheid van 1015 kg m^{-3} 4.7% voor het maximaal volume onttrekkingsregime en 5.3% voor het maximaal volume onttrekkingsregime aan het eind van de 40 jarige simulatie. Voor een dichtheid van 1020 kg m^{-3} zijn dit respectievelijk 5.5% en 6.2%. Ook dit is waarschijnlijk toe te schrijven aan de hogere ligging van de hogere concentratiecontouren.

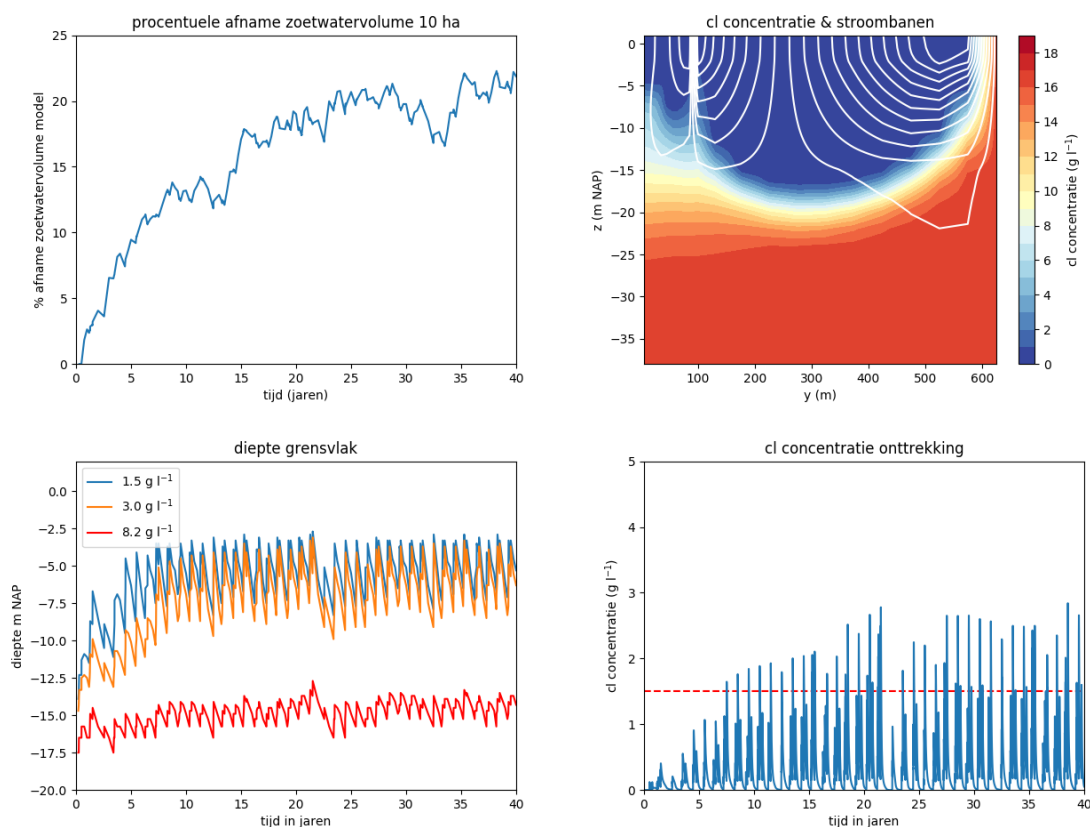


Figuur 4.38: Resultaten van de simulaties met een lagere dichtheid (links: 1015 g Cl l^{-1} , rechts: 1020 g Cl l^{-1}) van het zoute grondwater. Van boven naar beneden: stroombanen en concentratieverdeling in dwarsdoorsnede.

4.6.3 Invloed van een nabijgelegen sloot

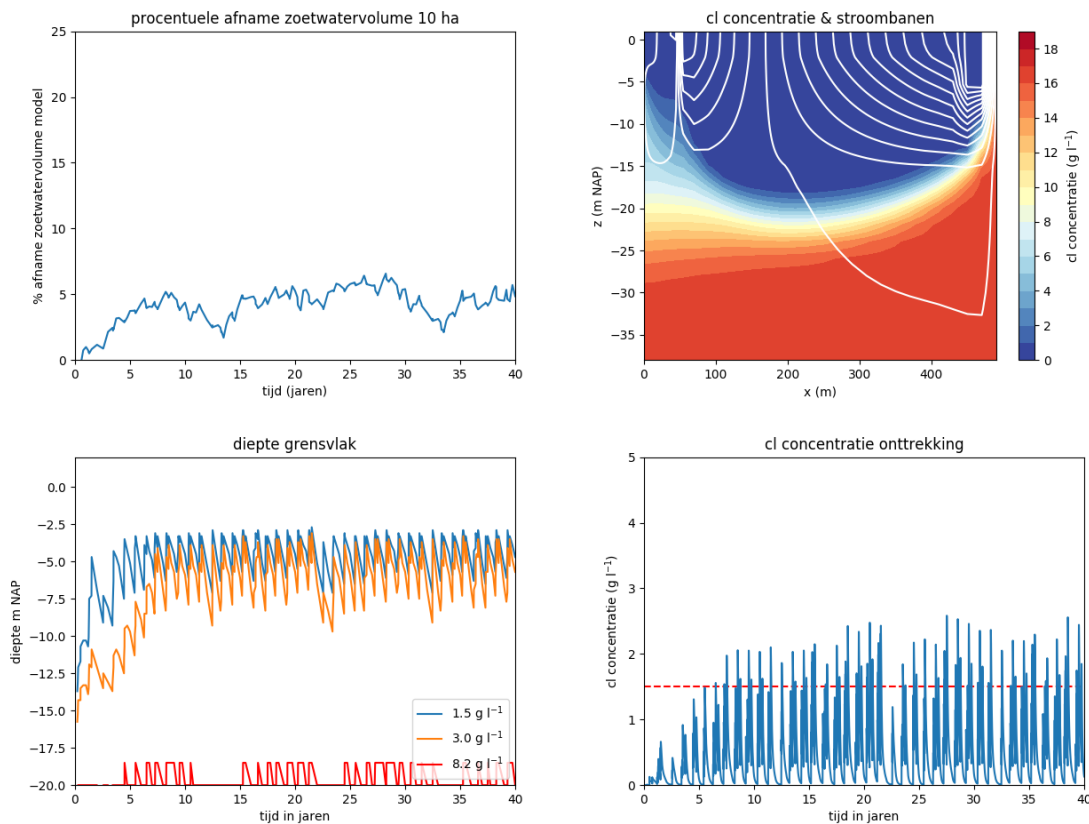
Op basis van een overleg met Waterschap Scheldestromen en Provincie Zeeland is de invloed van een nabijgelegen sloot onderzocht. Dit is gedaan in zowel de x-richting als in de y-richting. In beide gevallen is een sloot op 50 m afstand van de onttrekking gesimuleerd, waarbij het slootpeil dusdanig is gekozen dat de zoetwaterbel onder de onttrekking een dikte heeft van 15 m (worst case). Er is een peil gehanteerd van 1.4 m beneden maaiveld en er is voor een relatief hoge conductance (lage weerstand van de waterloop) gekozen. De sloten bevinden zich over de gehele lengte of breedte van het model. Het realistische onttrekkingsregime is toegepast.

De resultaten van de simulatie waarbij een sloot aanwezig is op 50 m van de onttrekking in de y richting (loodrecht op de onttrekking) zijn weergegeven in Figuur 4.39. Daarin valt direct op dat de chlorideconcentratie in de onttrekking snel de grenswaarde van 1.5 g Cl l^{-1} overschrijdt. Ook de relatieve afname van de zoetwaterbel binnen het buffergebied van de onttrekking is veel hoger dan in de referentiesimulatie. Een dynamisch evenwicht lijkt binnen 40 jaar amper bereikt te zijn.



Figuur 4.39: Resultaten van de onttrekking-simulatie bij het realistisch onttrekkingsregime in het geval een sloot aanwezig is op 50 m van de onttrekking, loodrecht op de oriëntatie van de onttrekking. Linksboven: de relatieve afname van de zoetwaterbel binnen het buffergebied van de onttrekking. Rechtsboven: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de y-as van het model op $x=0$ m. Linksonder: de diepte van de 1.5 , 3.0 en 8.2 g Cl l^{-1} grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking ($x,y = 0,0$). Rechtsonder: het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking (gemiddeld over de 4 cellen van de onttrekking). De rode stippellijn geeft hierbij de zoet-zout grenswaarde (1.5 g Cl l^{-1}) aan.

Ook in het geval de sloot parallel aan de onttrekking is gelegen (op 50 m afstand) zijn de chlorideconcentraties al vrij snel te hoog voor het gebruik van zoet water (Figuur 4.40). De relatieve afname van de zoetwaterbel binnen het buffergebied van de onttrekking is wel minder groot.



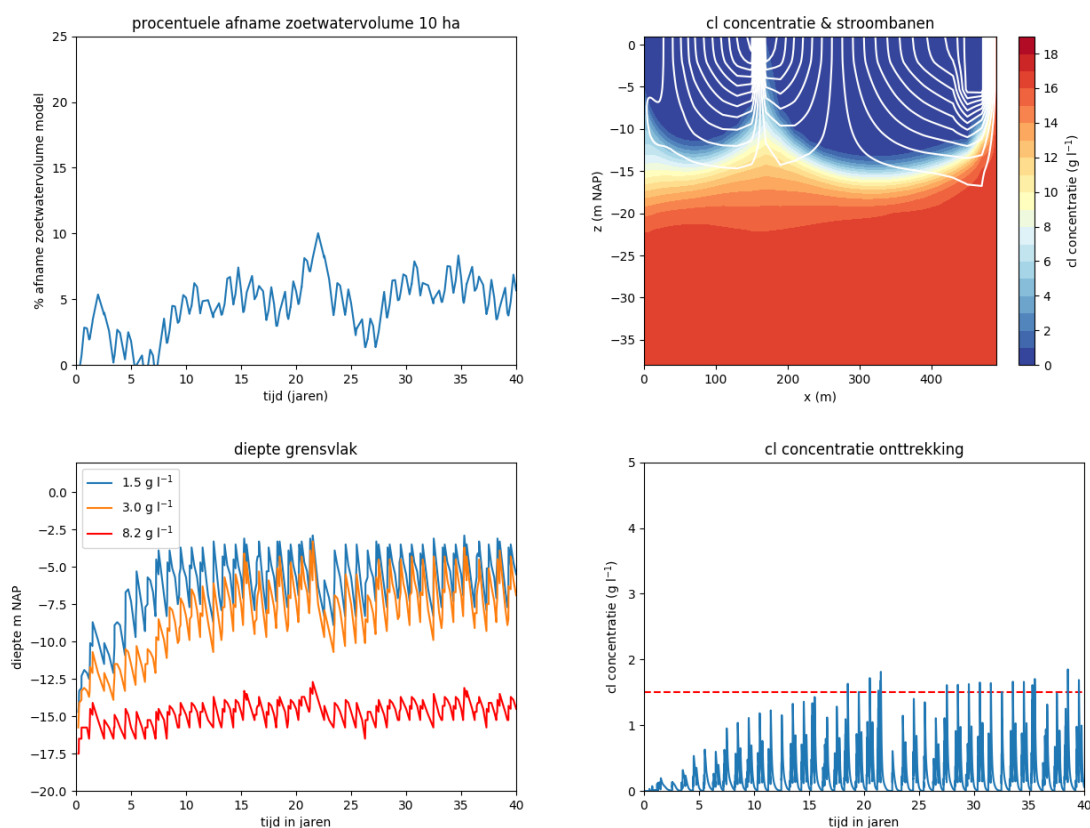
Figuur 4.40: Resultaten van de onttrekking-simulatie bij het realistisch onttrekkingsregime in het geval een sloot aanwezig is op 50 m van de onttrekking, parallel aan de oriëntatie van de onttrekking. Linksboven: de relatieve afname van de zoetwaterbel binnen het buffergebied van de onttrekking. Rechtsboven chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de y -as van het model op $x=0$ m. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g l^{-1} grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking ($x,y = 0,0$). Rechtsonder: het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking (gemiddeld over de 4 cellen van de onttrekking). De rode stippellijn geeft hierbij de zoet-zout grenswaarde (1.5 g Cl l^{-1}) aan.

In beide analyses is een worst-case aanpak gekozen. Het hoeft echter niet te betekenen dat in de praktijk een sloot op 50 m van de onttrekking altijd dergelijke zoutwater opkegeling veroorzaakt. Veel hangt samen met het peil van de sloot en de hydraulische weerstand (zoals de hydraulische weerstand van de slootbodem en de breedte) en de daaraan gerelateerde (model)conductance.

In Figuur 4.41 zijn de resultaten weergegeven van een simulatie met een modelinvoer gelijk aan die van de referentiesimulatie met een realistisch onttrekkingsregime (sectie 4.2.5.2), maar met een extra sloot op $x = 50$ m met een zeer lage conductance en een peil van 1.4 m – mv. Daarin is te zien dat de lage conductance nauwelijks leidt tot zoutwater opkegeling onder de sloot. Ook de concentratieverdeling, concentratie in de onttrekking en de relatieve afname van het zoetwatervolume in het buffergebied van de onttrekking zijn vergelijkbaar met de referentiesimulatie. Dit duidt op de belangrijke invloed van de hydraulische kenmerken van de sloot en het peil van de sloot op de zoutwater opkegeling. De zoutwater opkegeling onder de sloot geeft een indicatie van deze twee effecten; is er veel opkegeling dan is het peil van de sloot en/of is de hydraulische weerstand van de sloot laag. Data van de opkegeling onder

de sloot (bijvoorbeeld uit de FRESHEM Zeeland data) kan al duidelijk maken wat de mogelijke invloed van de sloot is. Lokale condities moeten daarom worden onderzocht indien men vermoedt dat een sloot invloed heeft op de zoutwater opkegeling onder een onttrekking.

Verder is in de simulaties aangenomen dat de sloot al aanwezig was bij de vorming van de zoetwaterbel. De mengzone onder de sloot is om deze reden dan ook aanzienlijk. De vraag is of dit in werkelijkheid ook het geval is. Ook hier zouden lokale condities moeten worden bekeken, bijvoorbeeld op basis van de FRESHEM Zeeland data.



Figuur 4.41: Resultaten van de onttrekking-simulatie bij het realistisch onttrekkingsregime en gelijke omstandigheden als in het referentiemodel, maar met een extra sloot aanwezig op 50 m van de onttrekking in de x-richting met een lage conductance. Linksboven: de relatieve afname van de zoetwaterbel binnen het buffergebied van de onttrekking. Rechtsboven chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de y-as van het model op $x=0$ m. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l⁻¹ grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking ($x,y = 0,0$). Rechtsonder: het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking (gemiddeld over de 4 cellen van de onttrekking). De rode stippellijn geeft hierbij de zoet-zout grenswaarde (1.5 g Cl l⁻¹) aan.

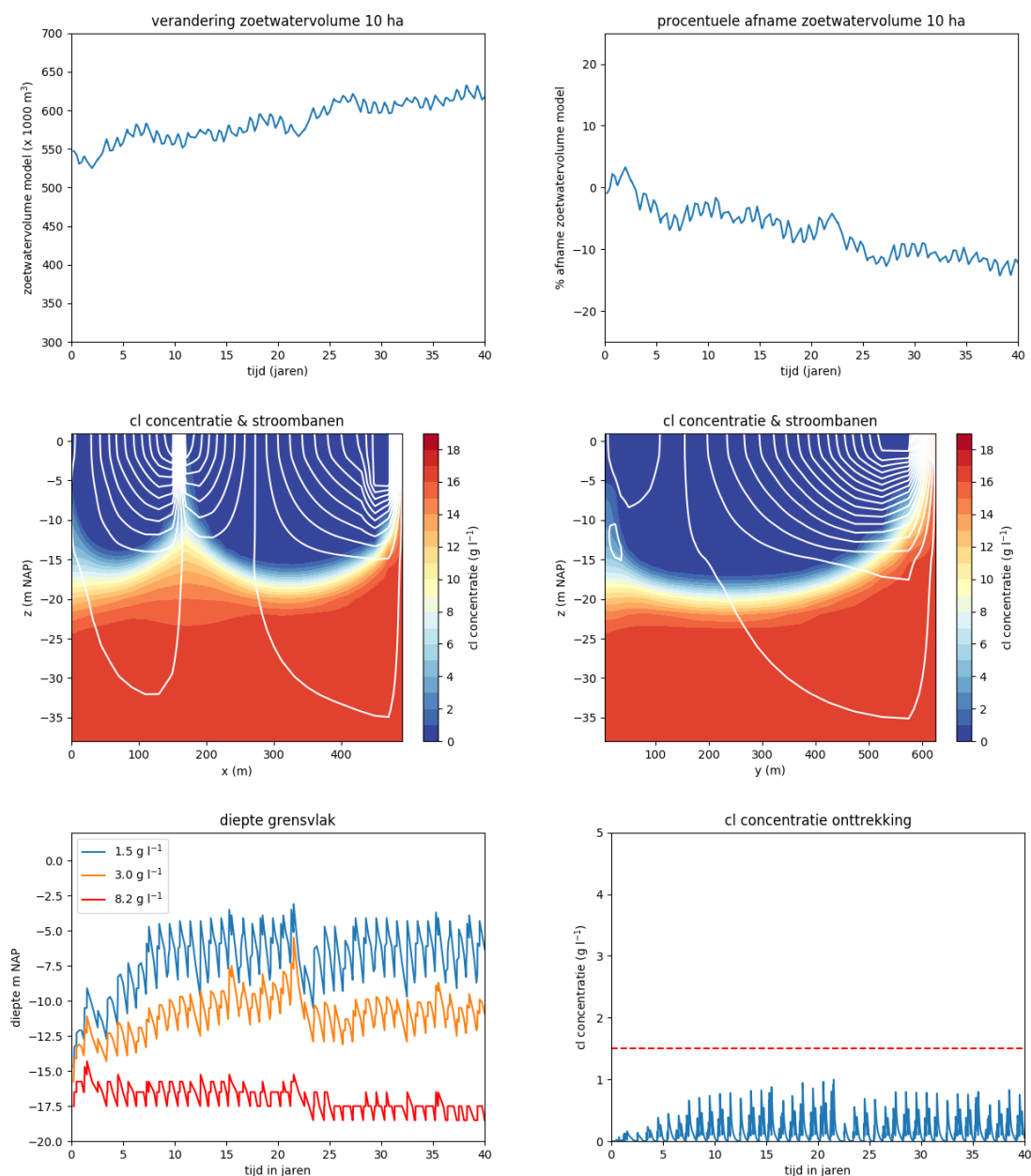
4.7 Zoetwatervoorzieningsmaatregelen

De effecten van de FRESHMAKER en het Kreekrug Infiltratie Systeem zijn op een vereenvoudigde manier gesimuleerd. Voor het Kreekrug Infiltratie Systeem is een extra neerslagoverschot¹¹ van 120 mm in 4 wintermaanden gesimuleerd, zonder dat de drainage is

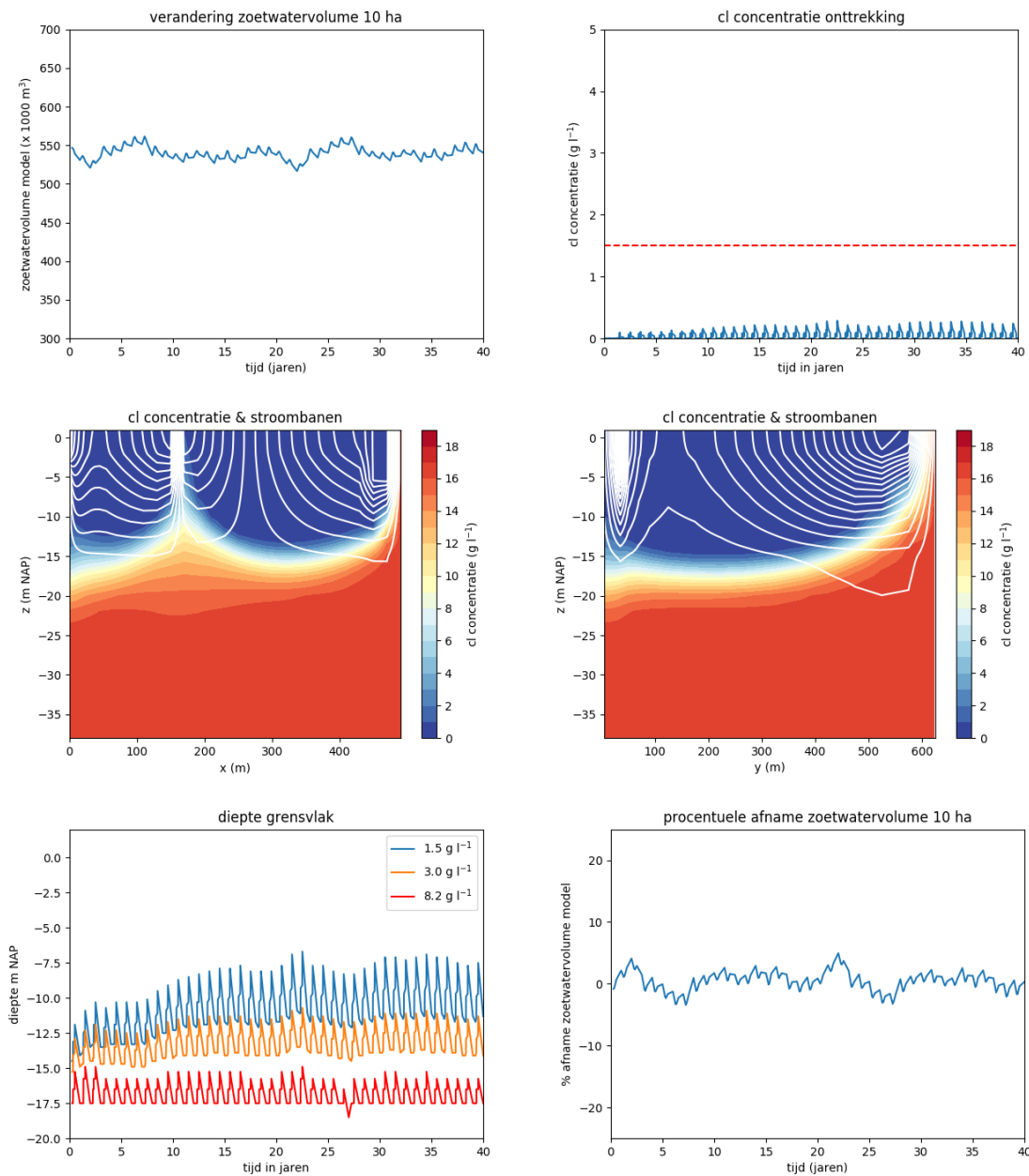
¹¹ Boven op de 'normale' grondwateraanvulling dus.

aangepast. Deze hoeveelheid is minder dan er plaatsvindt in de proef van het Kreekrug Infiltratie Systeem zoals aangelegd in Serooskerke, waar gemiddeld 180 mm op jaarbasis extra wordt geïnfiltreerd.

In Figuur 4.42 zijn de resultaten van de simulatie met een realistisch onttrekkingsregime weergegeven voor de simulatie van het Kreekrug Infiltratie Systeem. Hoewel er opkegeling van zout water onder de onttrekking plaatsvindt blijven de concentraties in de onttrekking relatief laag. Opvallend is dat de 1.5 g Cl l^{-1} en 3.0 g Cl l^{-1} concentratiecontouren dicht bij de onttrekking komen, maar de 8.2 g Cl l^{-1} contour in diepte toeneemt. Verder heeft het Kreekrug Infiltratie Systeem een duidelijk positieve invloed op het zoetwatervolume in het buffergebied van de onttrekking. De relatieve toename bedraagt 12%, en het systeem lijkt na 40 jaar nog steeds iets zoeter te worden. Bij het maximaal volume onttrekkingsregime zijn vergelijkbare patronen waar te nemen, en bedraagt de toename van het zoetwatervolume 11%.



Figuur 4.42: Resultaten van de onttrekking-simulatie van het model van het Kreekrug Infiltratie Systeem met een realistisch onttrekkingsregime. Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking (10 ha). Rechtsboven: de relatieve verandering van het zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de x-as van het model op $y = 0$ m. Rechtsmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de y-as van het model op $x = 0$ m. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l^{-1} grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking ($x,y = 0,0$). Rechtsonder: het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking.



Figuur 4.43: Resultaten van de onttrekking-simulatie van het model van de Freshmaker met een realistisch onttrekkingsregime. Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking (10 ha). Rechtsboven: de relatieve verandering van het zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de x-as van het model op $y = 0$ m. Rechtsmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de y-as van het model op $x = 0$ m. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l^{-1} grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking ($x,y = 0,0$). Rechtsonder: het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking.

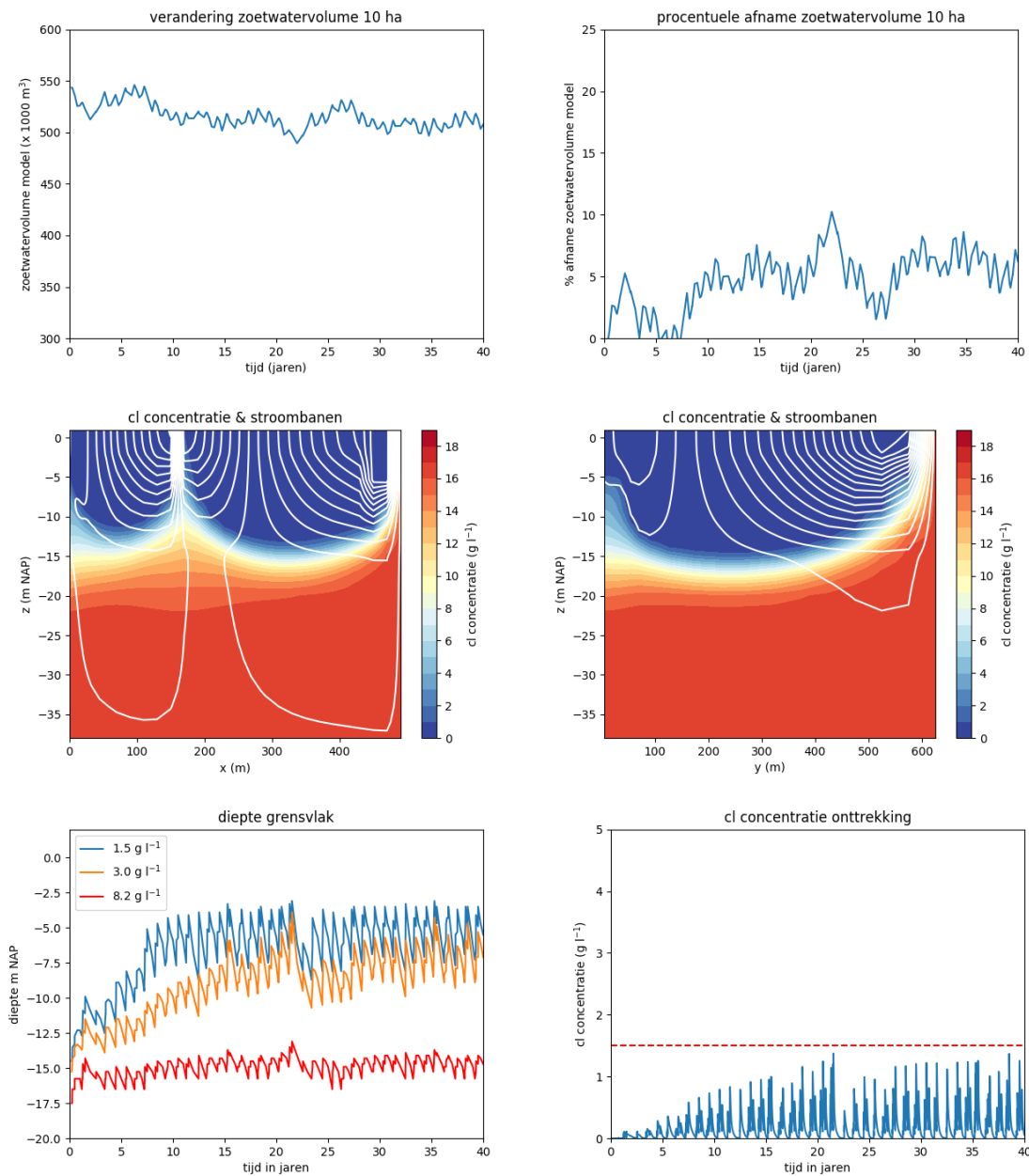
Voor de simulatie van het effect van de Freshmaker is de horizontale onttrekking van het zoute grondwater niet meegenomen (worst case). Voor de injectie van zoet water in de onttrekking is voor een periode van 120 dagen elk jaar een debiet van 5 m^3 per uur aangenomen (in totaal 14400 m^3 per jaar = $140 \text{ mm} * 10 \text{ ha}$). De resultaten van deze

simulatie, voor het hoge onttrekkingsdebiet, zijn weergegeven in Figuur 4.43. Daarin is te zien dat ook de Freshmaker duidelijk leidt tot een afname van de zoutconcentratie in de onttrekking. De afname is sterker dan bij de simulatie van het Kreekrug Infiltratie Systeem. Dat kan verklaard worden doordat er in de simulatie van de Freshmaker ter plaatse van de onttrekking actief zoet grondwater geïnfiltreerd (in plaats van over een groter oppervlak, zoals bij het Kreekrug Infiltratie Systeem). Tevens wordt ook iets meer (20 mm) geïnfiltreerd. De toename van het zoetwatervolume is echter minder groot; voor het maximaal volume onttrekkingsregime is dit 0.3% en voor het maximaal volume onttrekkingsregime 0.4%. Dit verschil is weer toe te schrijven aan de lokale infiltratie van zoet water (Freshmaker) ten opzichte van de wijdverspreide infiltratie bij het Kreekrug Infiltratie Systeem.

4.8 Onttrekkingstypes en –configuraties

4.8.1 Langere horizontale onttrekking

In Figuur 2.6 is als indicatie voor de lengte van de horizontale onttrekking 80-100 m aangegeven. Aangezien in het referentiemodel een lengte van 80 m voor de horizontale onttrekking is gebruikt, is in deze sectie een simulatie beschreven waarbij de onttrekking 100 m lang is. De resultaten voor het hoge onttrekkingsregime zijn weergegeven in Figuur 4.44. Daarin valt op dat de chlorideconcentratie in de onttrekking de grenswaarde voor zout water niet overschrijdt, in tegenstelling tot het referentiemodel (Figuur 4.11, pagina 64). De reden hiervoor is omdat het debiet over een grotere lengte wordt verspreid, waardoor de verlaging van de grondwaterstand per strekkende meter van de onttrekking minder groot wordt, en daarmee dus ook de zoutwater opkegeling. De afnames van het zoetwatervolume in het buffergebied van de onttrekking bedragen 6.9% voor het maximaal volume onttrekkingsregime en 6.3% voor het maximaal volume onttrekkingsregime. Deze waarden liggen dus iets hoger dan bij de referentiemodellen.

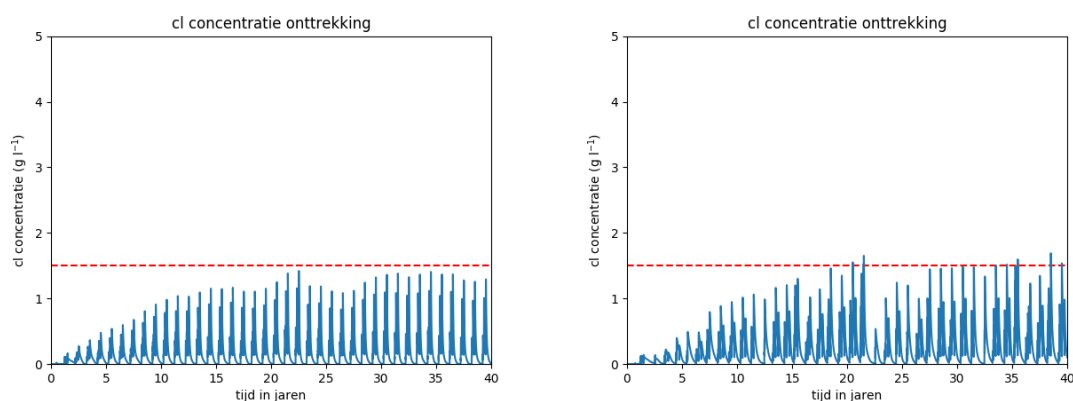


Figuur 4.44: Resultaten van de onttrekking-simulatie van het model met een 100 m lange onttrekking en een realistisch onttrekkingsregime. Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied van de onttrekking (10 ha). Rechtsboven: de relatieve verandering van het zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de x-as van het model op $y = 0$ m. Rechtsmidden: chlorideconcentratie en stroombanen aan het einde van de simulatie langs de y-as van het model op $x = 0$ m. Linksonder: het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking. Rechtsonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 $g\ l^{-1}$ grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking ($x, y = 0, 0$).

4.8.2 Ondiepere onttrekking

Het effect van een ondieper gelegen horizontale onttrekking is onderzocht door de onttrekking op een diepte van 4 m beneden maaiveld (i.p.v. 5 m beneden maaiveld) te

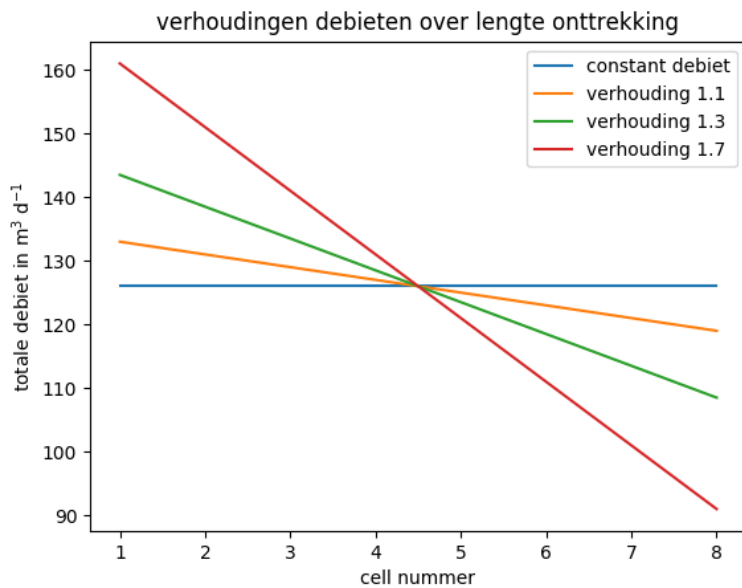
simuleren. Gezien de waterstandsfluctuatie (3.5 meter) is dit een absoluut minimum en is in sommige gevallen mogelijk problematisch omdat de verlaging tot aan het drainniveau komt. Door de onttrekking ondieper te plaatsen neemt ook de afstand tussen de onttrekking en het zoet-zout grensvlak toe. Uit vergelijking (6) volgt dat dit een positief effect heeft op de zoutwater opkegeling (deze neemt af) en dus ook op de chlorideconcentratie in de onttrekking. Voor dit laatste aspect zijn de resultaten voor het realistische en het maximaal volume onttrekkingsregime weergegeven in Figuur 4.45. Zoals verwacht nemen de concentraties af ten opzichte van het referentiemodel (zie voor maximaal volume onttrekkingsregime Figuur 4.9, pagina 62 en voor realistisch onttrekkingsregime Figuur 4.11, pagina 64). De concentratie overschrijdt de waarde van zout grondwater echter nog steeds bij een realistisch onttrekkingsregime. De invloed op de afname van de zoetwatorvoorraad in het buffergebied van de onttrekking verschilt weinig met die van de referentiescenario's.



Figuur 4.45: Resultaten van het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking van de simulatie met een onttrekking op 4 m beneden maaiveld. Links: resultaten van het maximaal volume onttrekkingsregime. Rechts: resultaten van het realistische onttrekkingsregime.

4.8.3 Variatie van onttrekking over de lengte van de onttrekking

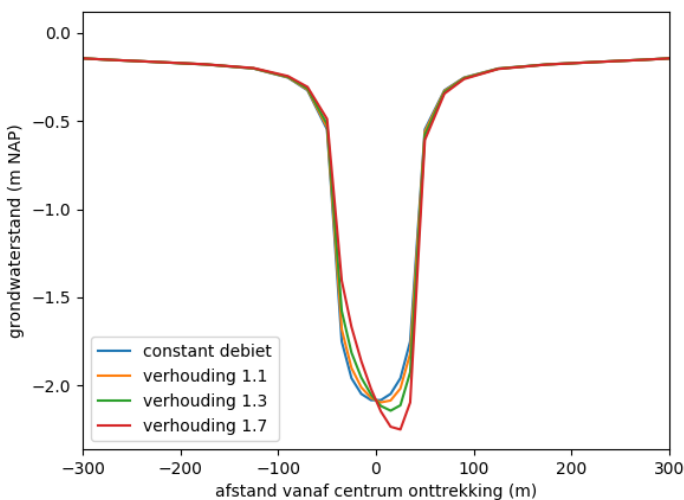
Om de invloed van een variabele instroom van grondwater in de onttrekking door drukverliezen in de onttrekking te simuleren, zijn de gegevens uit Rushton en Brassington (2013b) gebruikt, die aan de hand van een met veldgegevens gekalibreerd model de invloed van een onttrekking op instroom langs de horizontale onttrekking onderzochten. Bij een debiet van 1880 m³ per dag kwamen Rushton en Brassington (2013b) uit op een verhouding tussen het voorste deel (waar de aanzuiging van de pomp begint) en het achterste deel van de onttrekking van 1.5. Een aantal variaties van deze verhouding (1.1, 1.3, 1.7) zijn gesimuleerd om het effect van de variabele instroom in de onttrekking te onderzoeken. Daarbij is aangenomen dat de afname van het debiet over de lengte van de onttrekking lineair is. De gesimuleerde debieten zijn weergegeven in Figuur 4.46. Er is voor een worst case aanpak gekozen voor de debietverdeling in de onttrekking; daarom is alleen het maximaal volume onttrekkingsregime gesimuleerd.



Figuur 4.46: Gesimuleerde debieten per cel voor de simulaties met een debietverhouding van 1.1, 1.3 en 1.7 tussen het vooste (cel nummer 1) en het achterste deel van de onttrekking (cel nummer 8).

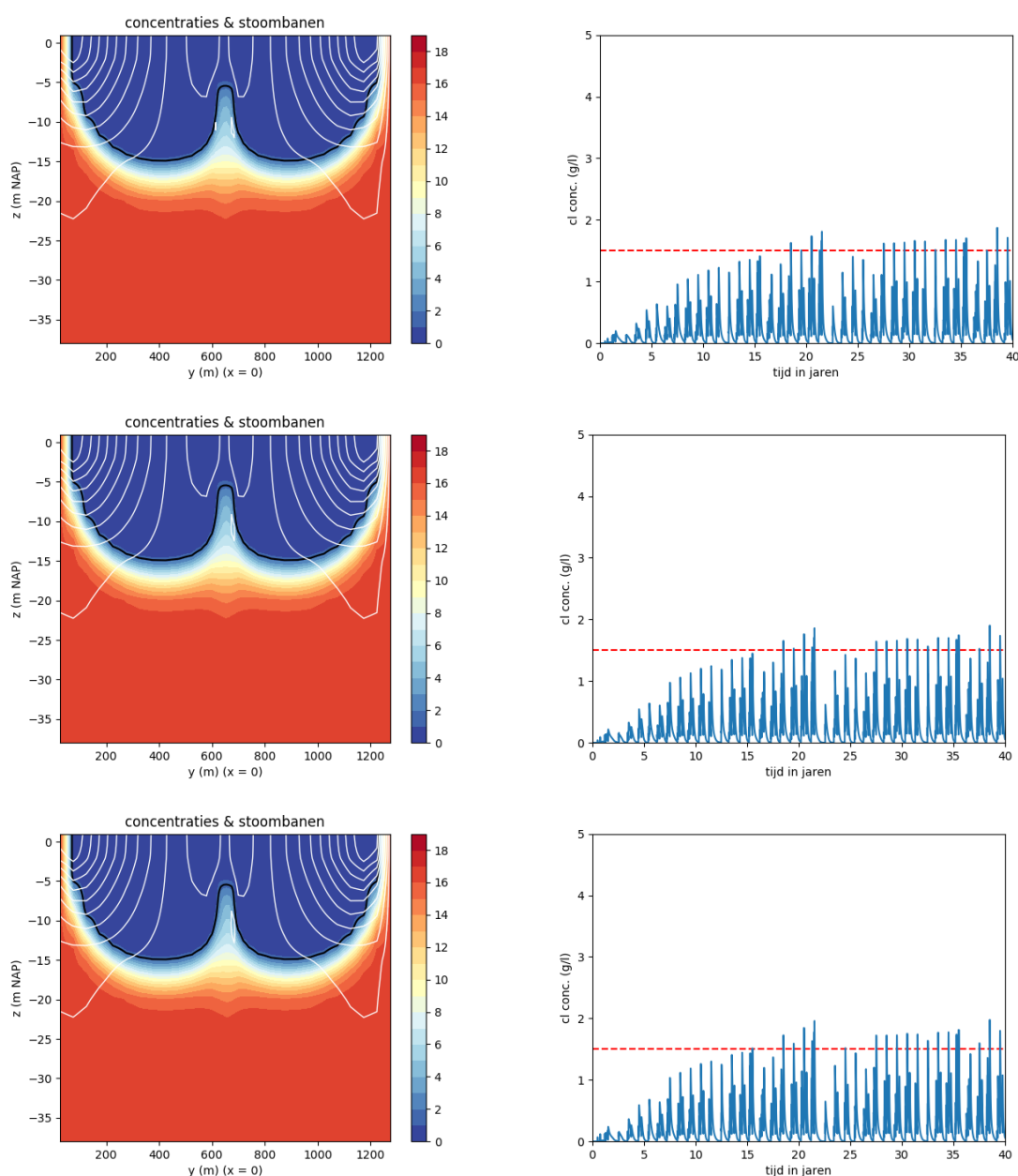
Voor deze simulaties kan symmetrie over de y-as niet meer worden toegepast omdat het debiet niet constant is. Het modeldomein is daarom uitgebreid (verdubbeld) over de y-as. Over de x-as kan symmetrie wel worden toegepast.

Figuur 4.47 laat zien dat de verschillende debietverhoudingen hun invloed hebben op de grondwaterstanden. Bij een constant debiet is het centrum van de verlagingkegel gelegen boven het centrum van de onttrekking ($x = 0$ m in Figuur 4.47). Naarmate de verhouding van het debiet vooraan en achteraan de onttrekking toeneemt, verplaatst ook de maximale verlaging richting het punt waarbij het meeste water wordt aangezogen.



Figuur 4.47: Verloop van de grondwaterstand langs de y-as tijdens een onttrekking voor elk van de vier verhoudingen.

De resultaten van de chlorideconcentratie verdeling langs de y-as ($x = 0$ m) en chlorideconcentratie¹² in de onttrekking zijn weergegeven in Figuur 4.48. Daarin valt vooral op dat de concentraties heel gering toenemen bij een toename van de debietverhouding. De invloed op de concentratieverdeling onder de onttrekking is relatief gering.

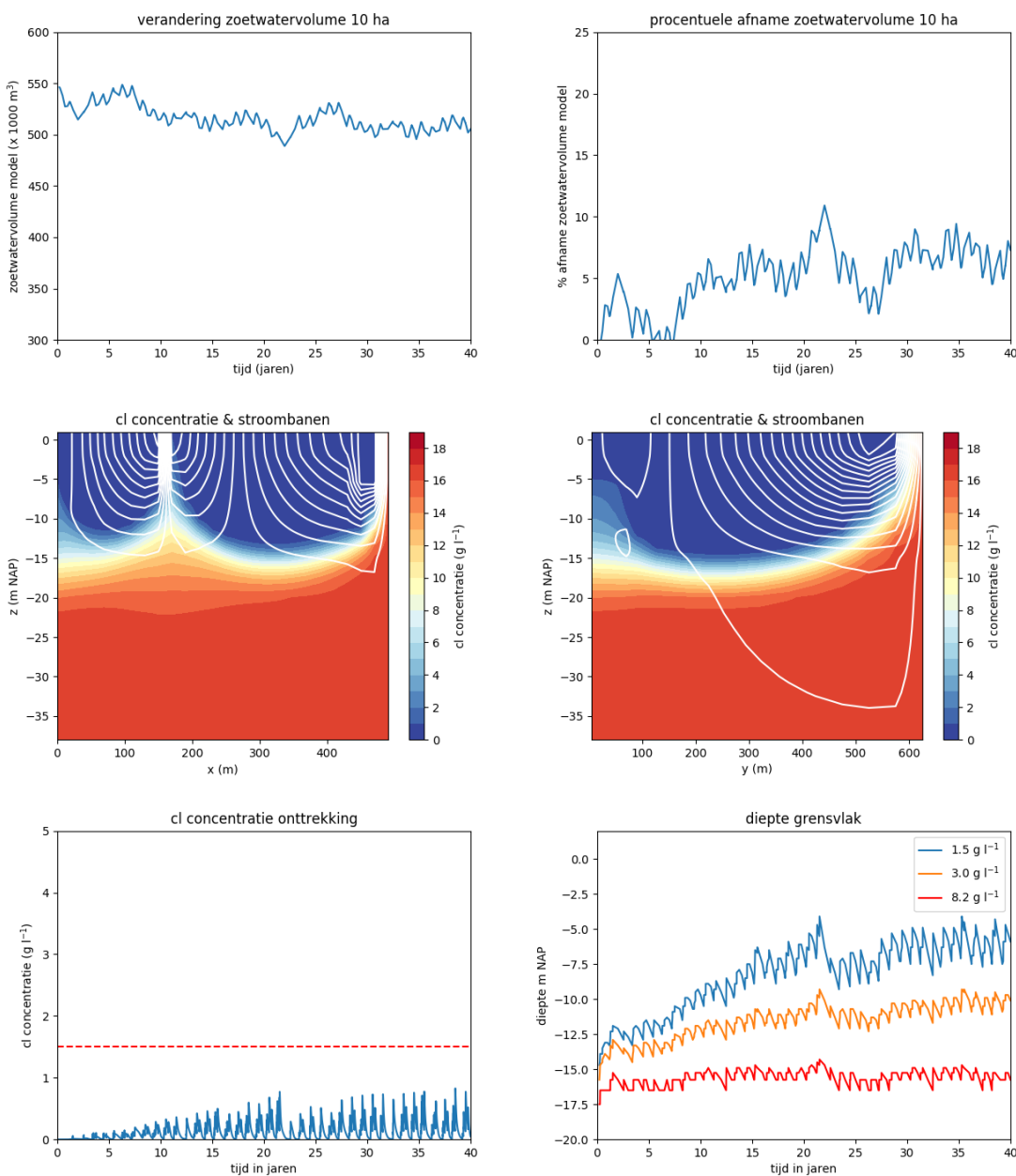


Figuur 4.48: Resultaten van de simulaties waarin variatie van onttrekking over de lengte van de onttrekking is berekend. Links: de chlorideconcentratie verdeling langs de y-as ($x = 0$ m). Rechts: de concentratieverdeling in de onttrekking. Van boven naar beneden zijn weergegeven de verhouding 1.1, 1.3 en 1.7.

¹² Voor het berekenen van de chlorideconcentraties is rekening gehouden met de debietverdeling; de berekende chlorideconcentratie is het debiet-gewogen gemiddelde van de 8 cellen in het model.

4.8.4 Twee horizontale onttrekkingen met elk een half debiet

Een scenario van twee onttrekkingen binnen het buffergebied van 10 ha is gesimuleerd met twee 80 m lange onttrekkingen die achter elkaar gelegen zijn in de y richting van het model. De twee onttrekkingen hebben elk een debiet gelijk aan de helft van het debiet in het referentiescenario. De resultaten van het scenario met het maximaal volume onttrekkingsregime zijn weergegeven in Figuur 4.49. Volgens verwachting zijn de chlorideconcentratiecontouren significant lager gelegen dan bij het referentiescenario en zijn de chlorideconcentraties in de onttrekking ook lager. Het zoetwatervolume neemt iets sterker af dan bij het referentiescenario (7.3 %).



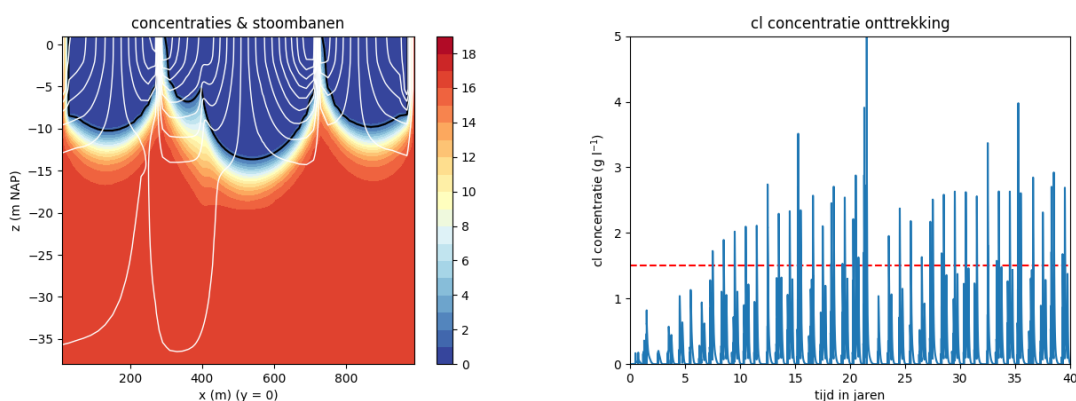
Figuur 4.49: Resultaten van de simulaties waarin twee onttrekkingen zijn gesimuleerd. Boven: de concentratieverdelingen langs de het centrum van één van de onttrekkingen in de x-richting (links) en in de y-richting (rechts). Onder: links: de chlorideconcentraties onder het centrum van één van de onttrekkingen. Rechts: de chlorideconcentratie in één van de onttrekkingen.

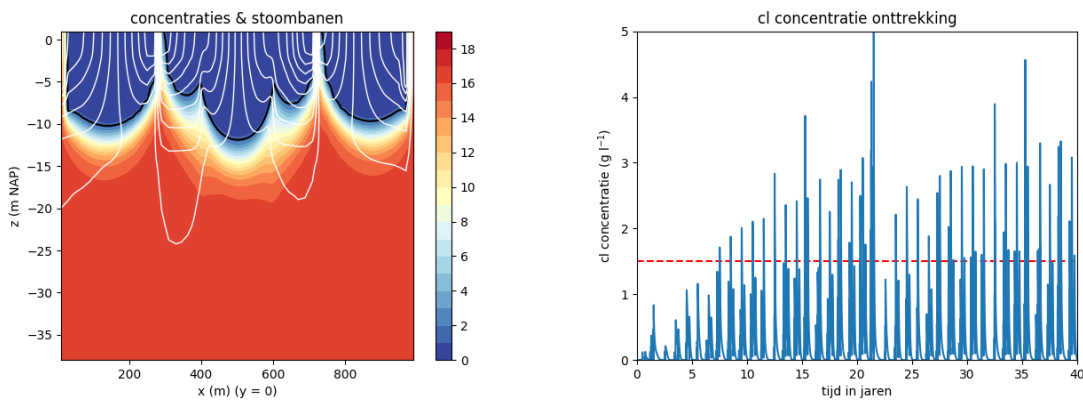
4.8.5 Interferentie van onttrekkingen

Voor het bepalen van de geschiktheid van het buffergebied rondom de onttrekking is onderzocht of er interferentie tussen twee onttrekkingen plaatsvindt indien deze op minimale (binnen de regels) afstand van elkaar liggen. In de x richting is de minimale afstand tussen de onttrekkingen 200 m, in de y richting is deze 500 m. De concentratie in de onttrekking is gebruikt als kenmerk voor de interferentie. Zowel de x richting als de y richting is onderzocht door simulaties met één onttrekking (zoals in de referentiesimulaties) te vergelijken met simulaties van twee onttrekkingen. Afhankelijk van de richting is het model uitgebreid in de x of y richting. Het realistische onttrekkingsregime is toegepast.

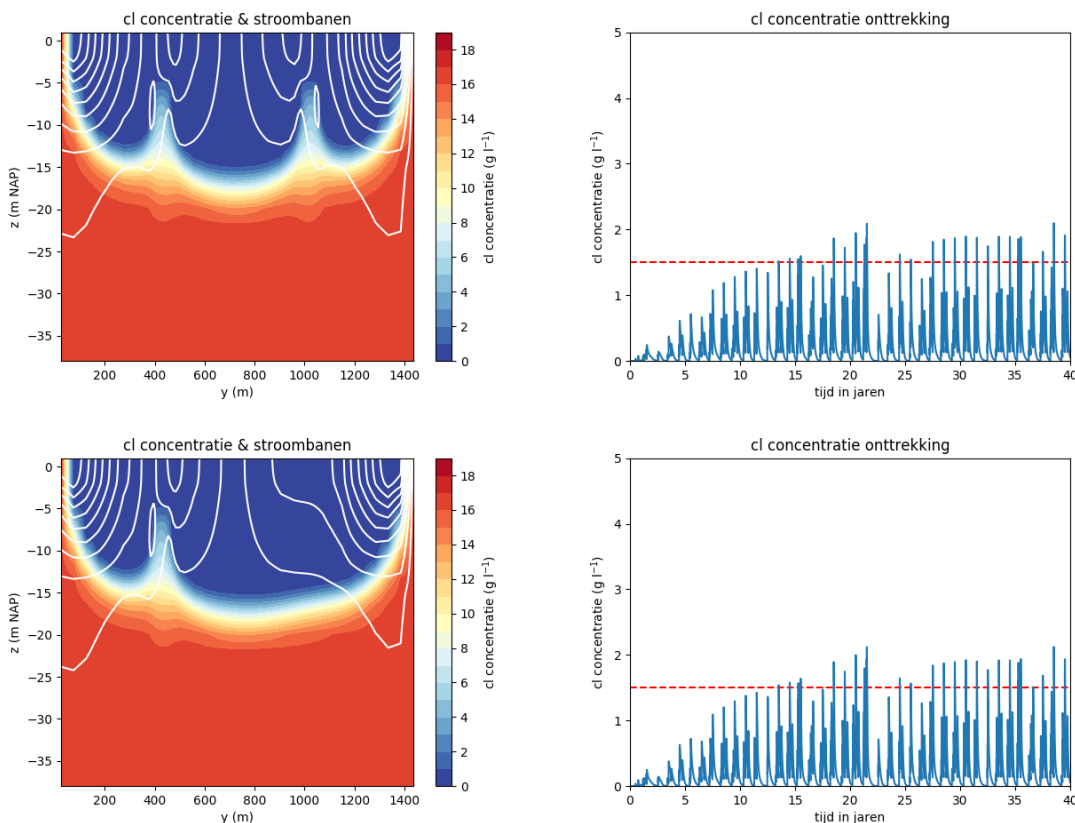
De resultaten van de analyse van interferentie in de x richting zijn weergegeven in Figuur 4.50. De onttrekkingen zijn omwille van de symmetrie verschoven richting de drainerende sloten; de afstand tussen de onttrekking en de sloot bedraagt ruim 100 m. Het gevolg hiervan is dat de chlorideconcentratie veel hoger is dan in het referentiemodel, waar de afstand van de onttrekking tot de sloot groter is. Dit aspect is ook besproken in sectie 4.6.3.

Er zijn weinig verschillen in de concentratieverdeling in en onder de onttrekking tussen de simulatie met één onttrekking en de simulatie met twee onttrekkingen; interferentie in de x richting lijkt daarom beperkt. Ook in de y richting lijkt dit het geval. Hier zijn de chlorideconcentraties hoger omdat het initiële grensvlak onder de onttrekking ook hoger ligt dan in de referentiesimulaties.





Figuur 4.50: Resultaten van de simulaties waarin interferentie in de x-richting is onderzocht. Boven: de resultaten van één onttrekking. Onder: de resultaten van twee onttrekkingen. Links: de chlorideconcentratie in g Cl^{-1} langs de x-as ($y = 0$ m). Rechts: het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking gedurende de simulaties.



Figuur 4.51: Resultaten van de simulaties waarin interferentie in de y-richting is onderzocht. Boven: de resultaten van één onttrekking. Onder: de resultaten van twee onttrekkingen. Links: de chlorideconcentratie in g Cl^{-1} langs de y-as ($x = 0$ m). Rechts: het verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking gedurende de simulaties.

4.9 Bufferzone voor kwetsbare gebieden

Door Provincie Zeeland is gevraagd om de invloed van (tijdelijke) verticale onttrekkingen op de stijghoogte en grondwaterstand te analyseren, zodat de toelaatbaarheid c.q. vergunningplicht (verder maatwerk) ervan beter afgebakend kan worden. Deze verticale onttrekkingen worden vooral gebruikt voor (bron)bemalingen. In overleg met Waterschap Scheldestromen en Provincie Zeeland is besloten om voor de kwetsbare (verdrogingsgevoelige) natuurwaarden (beheertypen) een maximale verlaging van 5 cm in het freatisch grondwater als grens aan te houden ten opzichte van de uitgangssituatie vóór het starten van de onttrekking. De regels voor de 'zoute gebieden' (zie Tabel 2.4) zijn gebruikt, als een worst case situatie. De huidige breedte van de bufferzone is vastgesteld op 300 m rondom de onttrekking.

Sectie 4.9.1 beschrijft een analytische vergelijking voor een begrip van de invloed van onttrekking, met name tussen de effect op korte en langere termijn. Voor het bepalen van de daadwerkelijke verlaging van de grondwaterstand zijn numerieke modellen gebruikt. Deze modellen zijn in sectie 4.9.2 beschreven.

4.9.1 Analytische vergelijking voor begrip van onttrekkingen

Aan de hand van analytische formules kan het gedrag van parameters op de verlaging worden geschat. Een voorbeeld daarvan is de vergelijking van Theis, voor de niet-stationaire verlaging van de stijghoogte in een afgesloten pakket (Theis, 1935):

$$s = \frac{Q}{4\pi KD} W(u) \quad (7)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4KDt}$$

Waarbij:

- s is de verlaging van de stijghoogte ten opzichte van de beginsituatie (m).
- Q is het debiet van de onttrekking ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$).
- K is de homogene, isotrope doorlatendheid van het watervoerende pakket (m d^{-1}).
- D is de dikte van het watervoerende pakket (m).
- r is de radiale afstand tot de onttrekking (m)
- S is de dimensieloze bergingsparameter, de bergingscoëfficiënt
- t is de tijd (d)
- $W(u)$ is de speciale 'put-functie'.

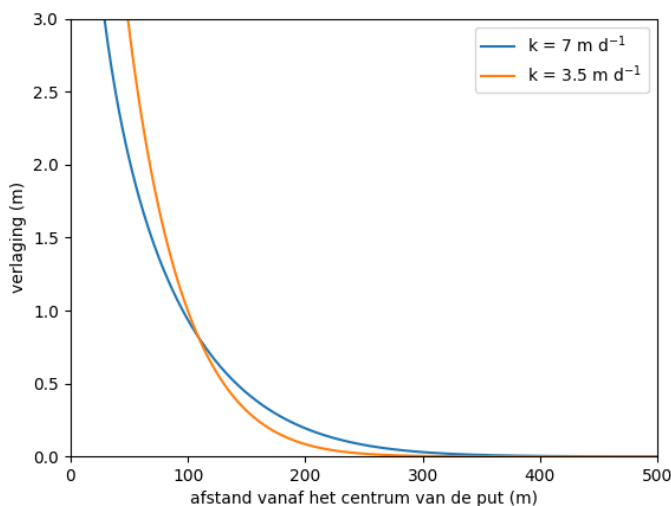
In vergelijking (7) wordt uitgegaan van een afgesloten pakket met een filter dat over de hele lengte aanwezig is. In een deels afgesloten of freatisch pakket zal bij een langere pompperiode, grondwateraanvulling of infiltratie vanuit sloten van toepassing zijn. Ook zal in veel gevallen het filter onvolkomen zijn. In een freatisch pakket zal de stijghoogteverlaging s tevens minder snel gaan vanwege de hogere bergingscoëfficiënt (S), en hangt D ook enigszins af van s .

Aan de hand van vergelijking (7) kan onderscheid worden gemaakt tussen de verlaging die relatief dichtbij de onttrekking teweeg wordt gebracht, en effecten verder van de onttrekking af. Als voorbeeld zijn in Figuur 4.52 twee resultaten van vergelijking (7) weergegeven, met $Q = 2400 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ (100 m^3 per uur), $t = 6$ dagen (dus 14400 m^3 in totaal), $S = 0.15$, $D = 30$ m en twee verschillende K waarden; 3.5 en 7 m d^{-1} . Dicht bij de onttrekking is de verlaging bij $K = 3.5 \text{ m d}^{-1}$ het grootst, terwijl vanaf ongeveer 110 m afstand van de onttrekking, juist het omgekeerde het geval is. Hetzelfde effect ziet men bij:

- een verlaging van D ,
- een langere onttrekkingstijd t in combinatie met een lager debiet Q , waarbij eenzelfde volume water wordt onttrokken.

Verder zal bij een afname van S de verlagingssnelheid hoger zijn.

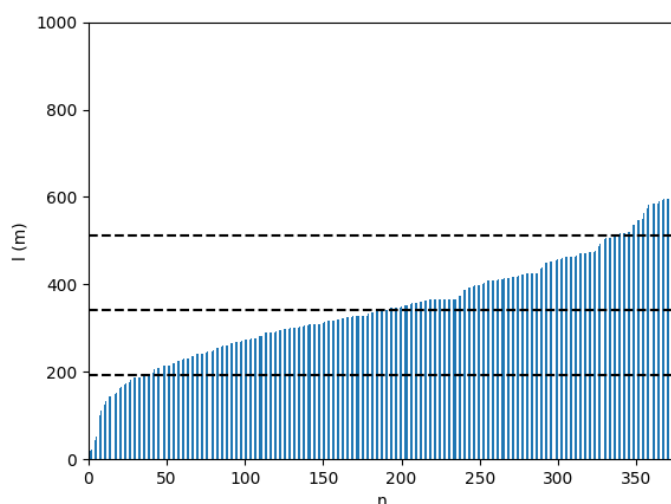
In Figuur 4.52 is het duidelijk dat de 5 cm verlaging grens (l (m); de afstand vanaf het centrum van de onttrekking tot de 5 cm verlaging) groter is bij een hogere doorlatendheid dan bij een lagere doorlatendheid. Dit kan echter per parameter-combinatie verschillen. Om inzicht te krijgen in de invloed van verschillende parametercombinaties is voor een gegeven set aan parameters (Tabel 4.8) de waarde van l berekend. Het resultaat daarvan is weergegeven in Figuur 4.53.



Figuur 4.52: Verlaging als functie van de afstand vanaf het centrum van de onttrekking, met $K = 3.5 \text{ m d}^{-1}$ en 7.0 m d^{-1} .

Tabel 4.8: Parameter variaties voor het berekenen van l met behulp van vergelijking (7).

$Q \text{ (m}^3 \text{ d}^{-1}\text{) en } t \text{ (d)}$	$K \text{ (m d}^{-1}\text{)}$	$D \text{ (m)}$	$S \text{ (-)}$
182 d / 30000 m ³ d ⁻¹ , 90 d / 30000 m ³ d ⁻¹ , 30 d / 15000 m ³ d ⁻¹ , 15 d / 15000 m ³ d ⁻¹ , 7 d / 15000 m ³ d ⁻¹	50, 25, 12.5, 7.0, 3.5	50, 40, 30, 20, 10	0.25, 0.2, 0.15



Figuur 4.53: Gesorteerde waarden van l voor de verschillende parameter combinaties die in Tabel 4.8 zijn weergegeven. De stippellijnen geven de 10, 50 en 90 percentielen weer.

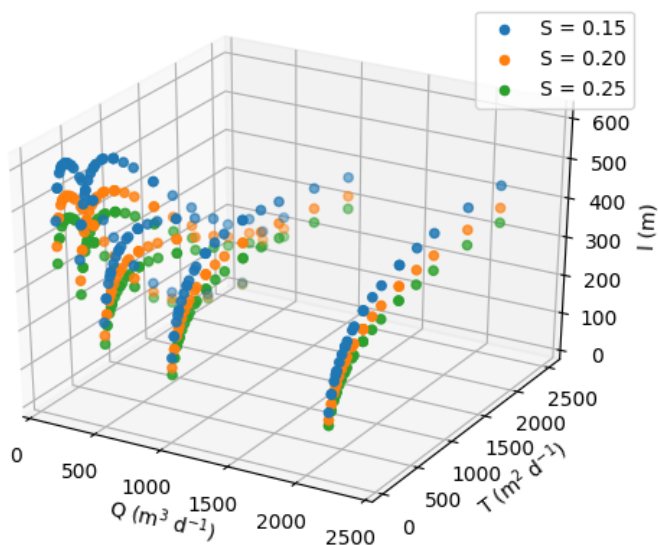
De maximaal berekende waarde van l is 599 m. De 10, 50 en 90 percentielen (Figuur 4.53) bedragen respectievelijk 192, 342 en 512 m. De mediaan komt dus redelijk overeen met de huidige omvang van de bufferzone (300 m).

Voor de 10 en 90 percentielen zijn de bijbehorende parametercombinaties weergegeven in Tabel 4.9. Daarin valt op dat de parameters K en D een gelijke invloed hebben. Dit is goed te verklaren aan de hand van vergelijking (7); in afgesloten watervoerende pakketten kan men daarom beter het product van K en D , de transmissiviteit T ($\text{m}^2 \text{d}^{-1}$), gebruiken.

Tabel 4.9: Parametercombinaties voor de 10 en 90 percentielen.

Percentiel	Q ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$)	t (d)	K (m d^{-1})	D (m)	S (-)	l (m)
10	500	30	3.5	10	0.25	187
10	1000	15	7	10	0.25	187
10	2143	7	7	10	0.15	187
10	1000	15	3.5	20	0.25	187
10	2143	7	3.5	20	0.15	187
90	333	90	25	10	0.2	512
90	333	90	12.5	20	0.2	512

Voor de invloed van Q (en de gerelateerde t), T en S zijn alle parametercombinaties en bijbehorende waarden van l geplot in Figuur 4.54. Daarin is duidelijk te zien dat l altijd toeneemt bij een afname van de bergingscoëfficiënt S . Verder zijn hoge waarden van l te vinden bij relatief lage (maar niet per se de laagste) waarden van T én van Q (en hogere waarden van t) samen.

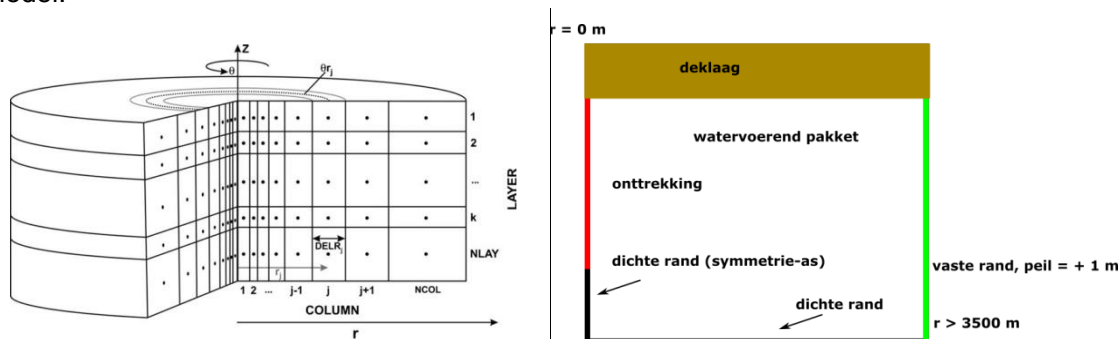


Figuur 4.54: Waarden van I voor de verschillende parameter combinaties. N.B.: t is hier niet weergegeven maar gerelateerd aan Q . T is het product van K en D .

Als de onttrekking niet over de volledige lengte van het watervoerende pakket aanwezig is, zal de verlaging sterker zijn, en zullen ook verticale stijghoogte gradiënten aanwezig zijn. Een andere belangrijke aanname is dat de doorlatendheid homogeen en isotroop is. Deze aannames zijn verder met een numeriek model onderzocht. Voor de parameter variatie zijn de inzichten uit analytische vergelijking meegenomen. Daarbij een worst-case analyse gedaan, met relatief lage waarden voor S , T (K en D) en Q (en dus hogere waarden voor t).

4.9.2 Numeriek model

Voor het numerieke model is gebruik gemaakt van een axisymmetrisch model met de grondwaterstromingcode MODFLOW. Bij een axisymmetrisch model gaat men uit van radiale symmetrie van het stromingsprobleem (in deze analyse een verticale en een radiale stromingscomponent). Er is gekozen voor een aanpak zoals beschreven door Langevin (2008), waarbij de hydraulische eigenschappen in radiale richting uniform zijn. Gelaagde heterogeniteit kan wel gesimuleerd worden. Figuur 4.55 toont de opzet van het numerieke model.



Figuur 4.55: Opzet van axisymmetrisch numerieke model. De linkerfiguur is ontleend aan Langevin (Langevin, 2008), de rechterfiguur toont de randvoorwaarden en de algemene opzet van het model.

Met het model is grondwaterstroming in een watervoerend pakket met dikte D gesimuleerd dat van boven wordt afgesloten door een deklaag met een watervoerende dikte van 5 meter. De onderrand van het model is dicht (geen stroming), net zoals de symmetrie as op radiale

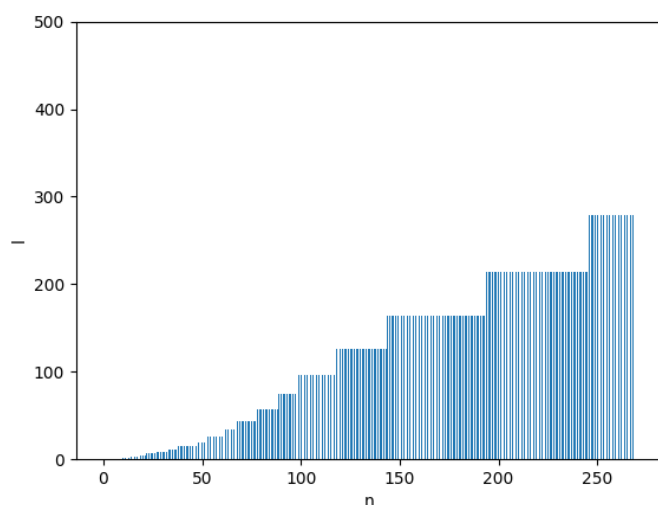
afstand $r = 0$ m van de onttrekking. De kolom breedte is 0.1 m bij de onttrekking en neemt in radiale afstand richting de vaste rand exponentieel toe met stapgrootte 1.302. De vaste rand ligt ver genoeg (> 3500 m) om geen invloed te hebben op de onttrekking. De tijdstappen hebben een lengte van 1 dag. De verticale anisotropie (1.43) en de elastische bergingscoëfficiënt (10^{-4} m^{-1}) zijn als constanten beschouwd. De verschillende waarden van de parameters K_r (radiale doorlatendheid, gelijk aan de horizontale doorlatendheid), t , Q , (gerelateerd aan t) D , S_y (freatische bergings coëfficiënt) en c (weerstand van de deklaag), die voor alle combinaties (270 simulaties) zijn doorgerekend, zijn weergegeven in Tabel 4.10. Deze parametercombinaties zijn gebaseerd op de analyse van analytische vergelijking, de parameters zoals toegepast bij de horizontale onttrekkingen (zie vorige secties) en de in Tabel 2.4 vermelde waarden van debieten binnen de algemene regels. Voor onttrekkingen in niet-kwetsbare, zoute gebieden geldt een maximum debiet van 100 m^3 per uur, met een maximum van 15000 m^3 per maand en 30000 per 6 maanden. Bij deze onttrekkingen is er sprake van een tijdelijke onttrekking.

Tabel 4.10: Parametercombinaties die zijn toegepast in het numerieke model.

Parameter	Waarden
K_r	25, 12.5, 6.2 m d^{-1}
D	36, 26, 16 m
t en Q	182, 90, 30 d en 30000, 30000, 15000 $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$
S_y	0.2, 0.15
c	10, 100, 500, 1000, 2000 d

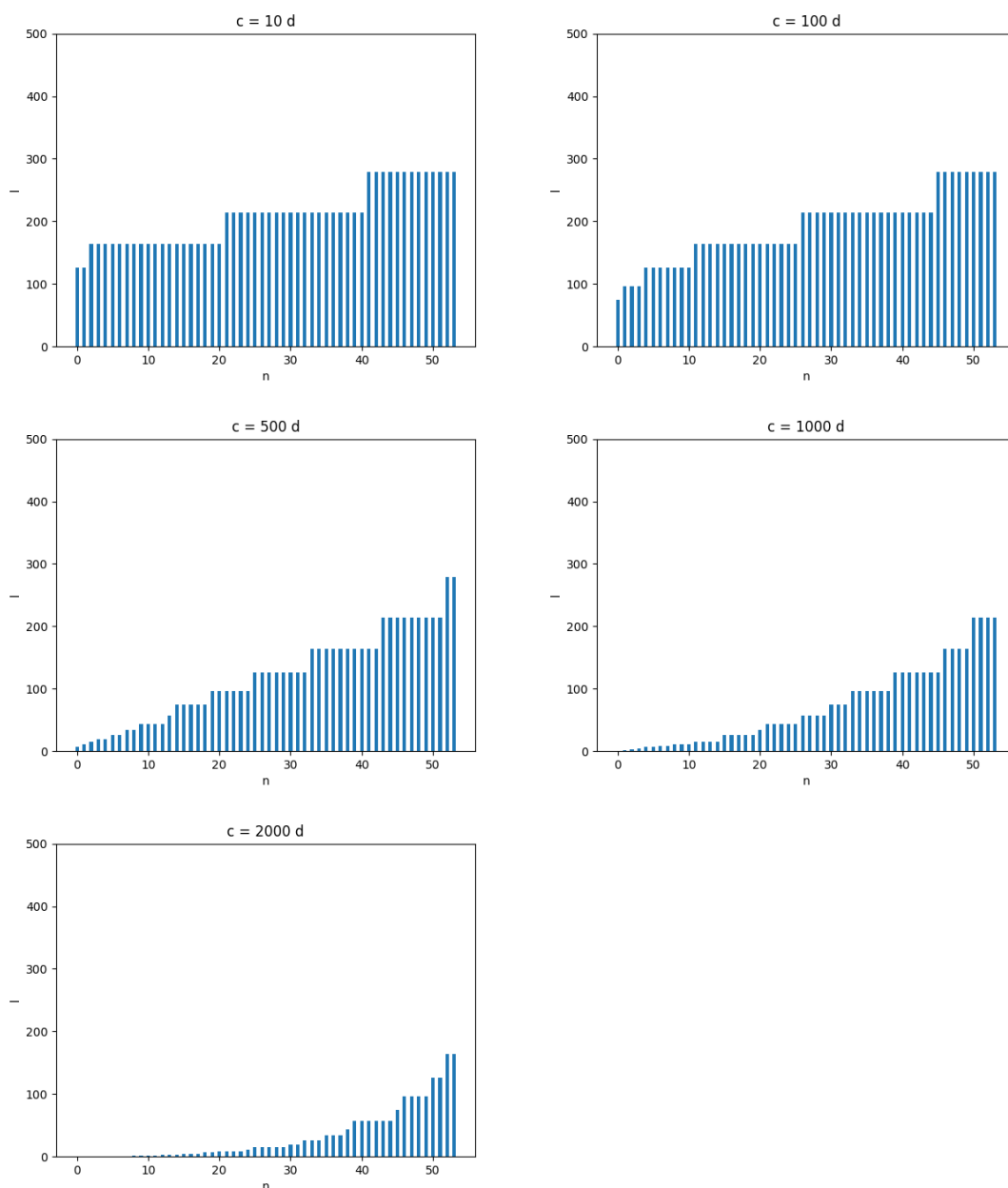
In Tabel 4.10 valt op dat er relatief hoge waarden voor D en K_r zijn gebruikt, terwijl uit de vorige sectie bleek dat juist lage waarden de grootste waarden voor het maximale verlagingbereik van 5 cm (l) gaven. Echter, toepassing van lagere waarden bleek te resulteren in onrealistisch lage verlagingen van de stijghoogte en de grondwaterstand, resulterend in het niet-convergeren van de modellen. Om deze reden zijn hogere waarden toegepast.

In Figuur 4.56 zijn de waarden van l weergegeven voor alle parameter combinaties. De maximale waarden van l liggen rond de huidige omvang van de bufferzone die gehanteerd wordt (300 m). Verder valt op dat veel combinaties leiden tot eenzelfde waarde van l . Dit kan aan de hand van de analytische vergelijking verklaard worden door analoog gedrag van een aantal parameters (zoals bijvoorbeeld K_r en D).



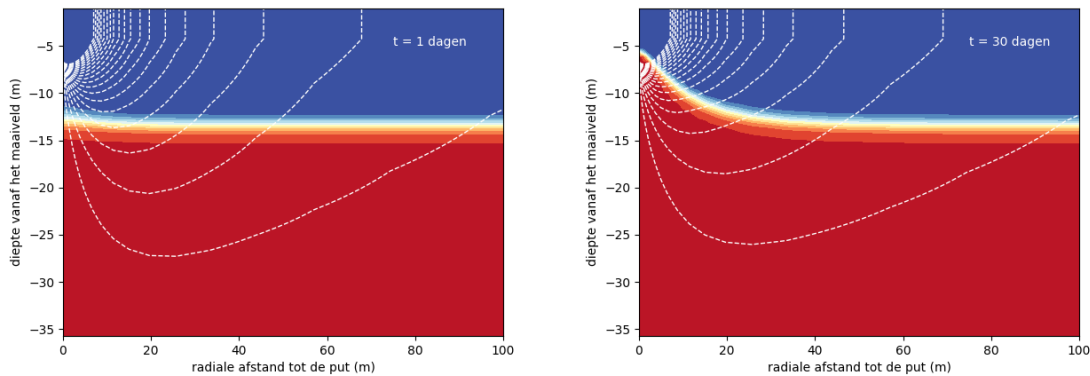
Figuur 4.56: Verlagingbereik van 5 cm (l) bij toepassing van alle parametercombinaties ($n=270$), gesorteerd op waarden van l .

In Figuur 4.57 zijn dezelfde resultaten weergegeven, maar dan per verschillende weerstanden van de deklaag (c). Hieruit komt naar voren dat de verlaging van de grondwaterstand sterk samenhangt met de weerstand van de deklaag. Zo is voor een deklaag van 1000 dagen of meer de maximale waarde van l minder dan 300 m (de huidige omvang van de bufferzone). Uit deze resultaten kan met behulp van gegevens over de weerstand van de deklaag gedifferentieerd worden met de bufferzones.



Figuur 4.57: Verlagingsbereik van 5 cm (l) bij toepassing van alle parametercombinaties, gesorteerd op waarden van l .

Wanneer een tijdelijke onttrekking in een 'zoutwatergebied' ligt (zoetwaterbel kleiner dan 15 m) kan een afname van de zoetwatorvoorraad optreden als gevolg van verzilting en zoutwater opkegeling. Ter illustratie is deze situatie gesimuleerd. De resultaten hiervan staan in Figuur 4.58, waar in plaats van met een constante dichtheid (chlorideconcentratie) zoals in sectie 4.9 met een variabele dichtheid is gewerkt. Gedurende 30 dagen wordt er 30000 m³ water middels een verticale onttrekking onttrokken. Er is gekozen voor een relatief hoge doorlatendheid van 12.5 m d⁻¹, een watervoerend pakket van 36 m dikte en een deklaag weerstand van 1000 dagen. De zoetwaterbel heeft een initiële dikte van ongeveer 12 m. Na 30 dagen is de onttrekking sterk verzilt en is de zoetwaterbel in de omgeving ook afgenomen. Zoutwater opkegeling onder een verticale onttrekking gaat veel sneller dan wanneer er met een horizontale onttrekking wordt gewerkt.



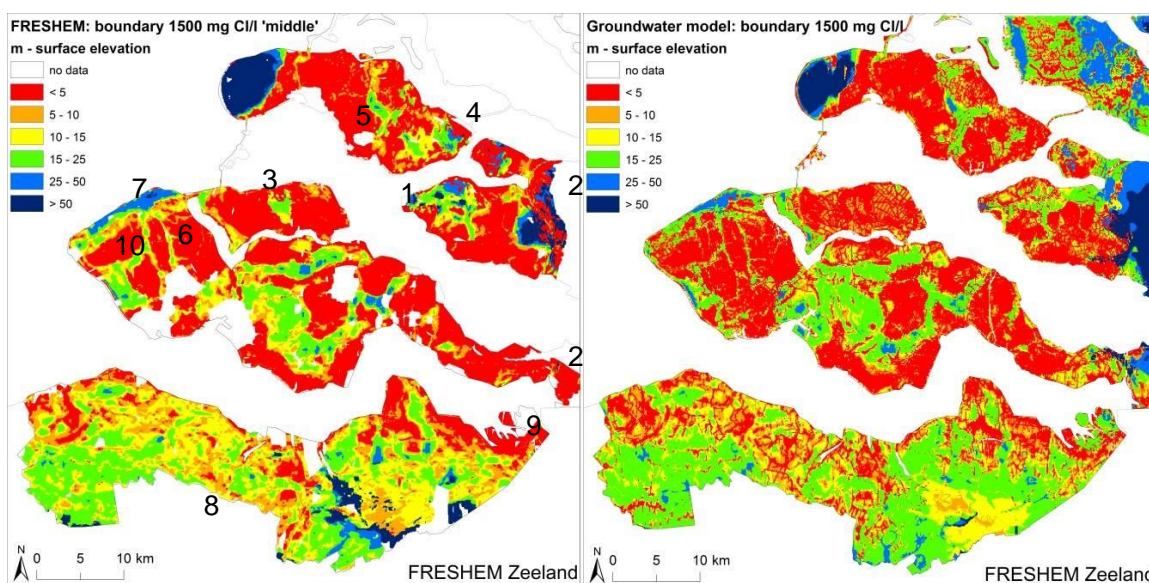
Figuur 4.58: Chlorideconcentratie aan het begin (links) en aan het eind (rechts) van de simulatie van een verticale onttrekking.

4.10 Mogelijke overexploitatie zoet grondwater uit kreekruggen Zuid-Beveland

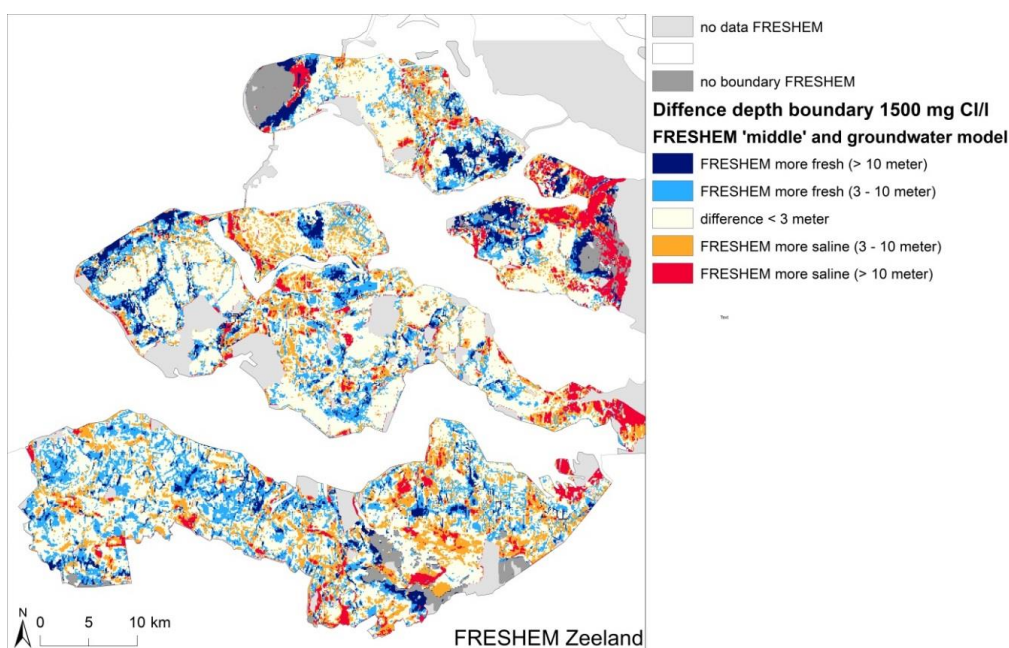
Tijdens het onderzoek werd vanuit Waterschap Scheldestromen en Provincie Zeeland de wens uitgesproken om eventuele overexploitatie op regionale schaal in Zuid-Beveland te onderzoeken. De afzonderlijke kleinschalige conceptuele 3D deelmodellen bleken hier minder goed bruikbaar voor. Daarom is deze vraag met behulp van het Zeelandmodel, deelmodel 2, (Van Baaren et al., 2016) onderzocht. In het model is in eerste instantie de zoet-zout kartering van het project FRESHEM (Van Baaren et al., 2018) geïmplementeerd. Een drietal scenario's zijn gesimuleerd: 1. de referentie situatie met de reeds opgegeven onttrekkingen uit het Zeeland model, 2. zonder de onttrekkingen uit het Zeeland model, en 3. met een verdubbeling van de onttrekkingen uit de referentie situatie.

4.10.1 FRESHEM data implementeren in Zeeland deelmodel 2

In Van Baaren et al. (2018) zijn de zoet-brak-zout verdelingen van het Zeeland model en het project FRESHEM met elkaar vergeleken. Figuur 4.59 toont dat de twee $1500 \text{ mg Cl}^- \text{ l}^{-1}$ grensvlakken op het eerste gezicht een goede match lijken te hebben, maar dat op een aantal locaties de verschillen significant zijn (zie de nummering in Figuur 4.59a). Figuur 4.60 laat de verschillen in het $1500 \text{ mg Cl}^- \text{ l}^{-1}$ grensvlak positie zien. In het zuidwestelijke deel van Zuid-Beveland varieert het verschil in diepte van het grensvlak behoorlijk willekeurig. FRESHEM ('midden'-scenario) geeft in het noordwestelijk deel ietwat minder zoet grondwater aan dan in het Zeeland model, terwijl ter plaatse van de meeste grondwateronttrekkingen (zie Figuur 4.64) juist wat meer zoet grondwater.

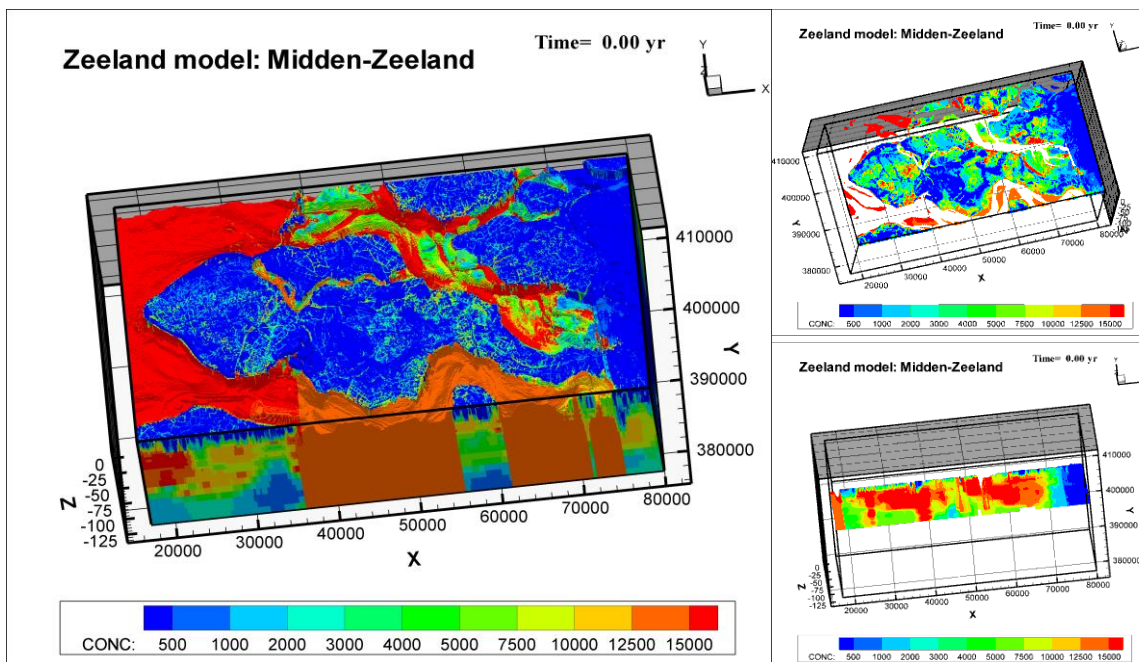


Figuur 4.59: a. diepte 1500 mg Cl l⁻¹ grensvlak FRESHM Zeeland 'midden' en b. diepte 1500 mg Cl l⁻¹ grensvlak Zeeland model

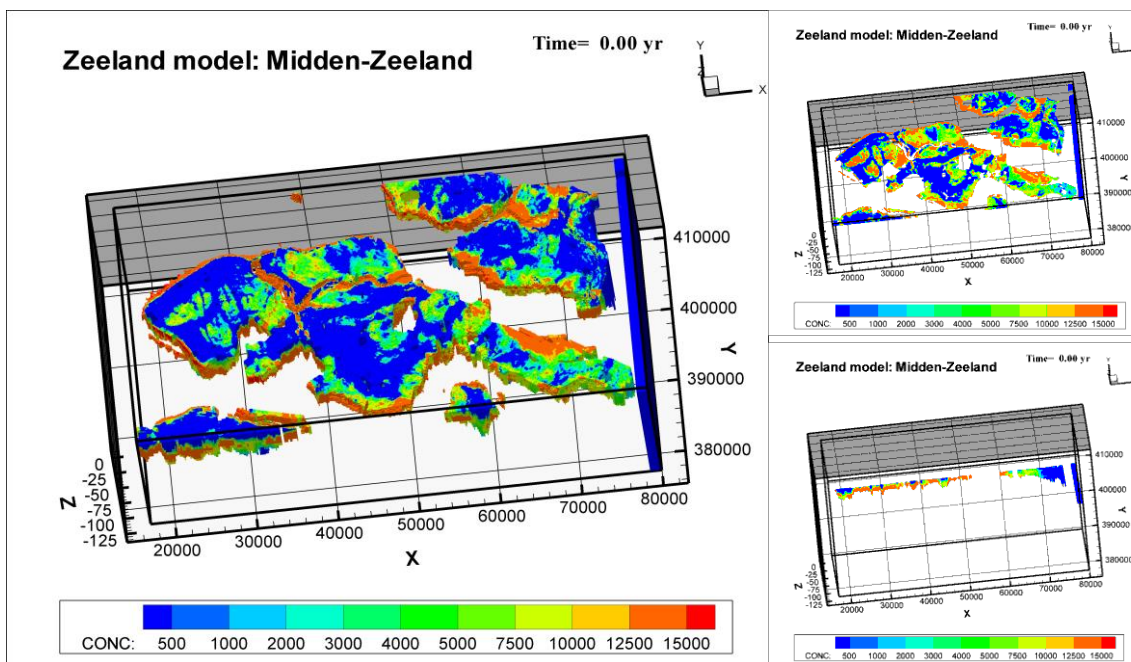


Figuur 4.60: De verschillen in de diepte van het 1500 mg Cl l⁻¹ grensvlak FRESHM Zeeland 'midden' tegenover de diepte van het 1500 mg Cl l⁻¹ grensvlak Zeeland model.

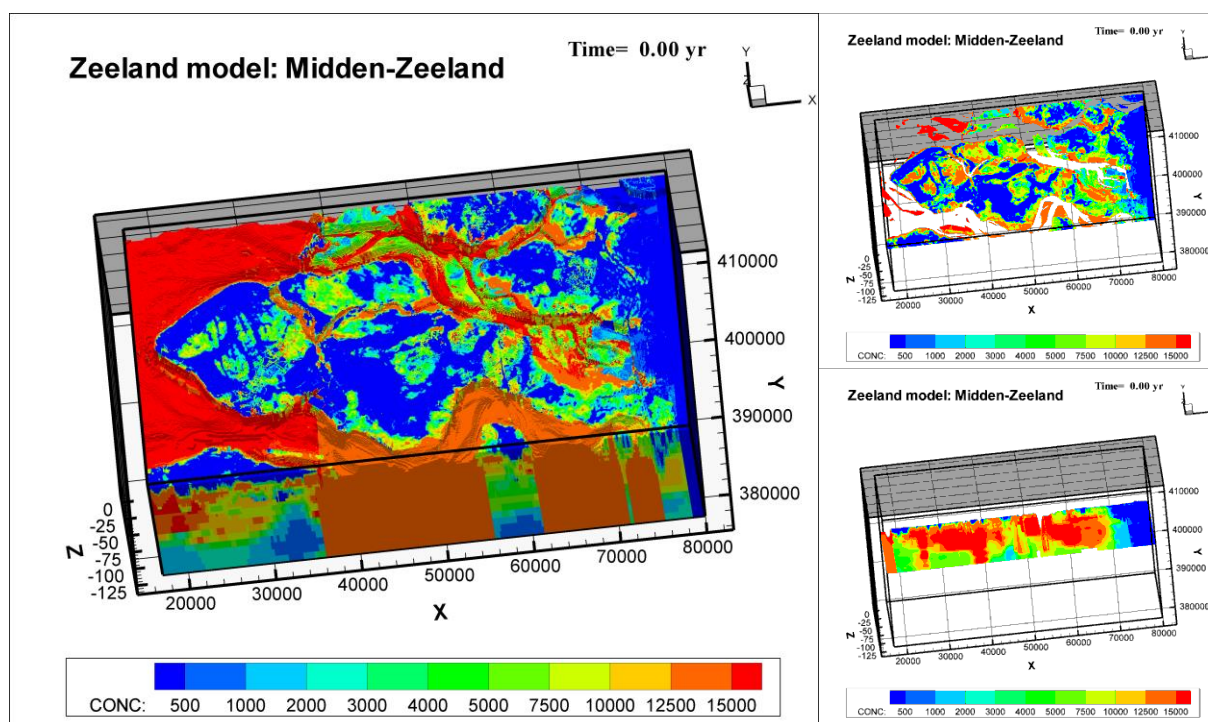
Het numerieke Zeeland model heeft voor elke actieve modelcel een chloride concentratie nodig. Wat opvalt tussen de chloride data van het Zeeland model (Figuur 4.61) en FRESHM (Figuur 4.62) is dat FRESHM slechts in een beperkt deel van het model een chloride concentratie heeft: op grote diepte in het model zijn geen chloride data beschikbaar. Er is hier gekozen om voor het diepe deel van het model waar geen FRESHM chloride data bekend is, de zoet-brak-zout verdeling van het bestaande Zeeland model te gebruiken. De samenvoegde databanken leveren een zoet-brak-zout verdeling op die de gehele modelleerruimte opvult (Figuur 4.63).



Figuur 4.61: Zoet-brak-zout verdeling in de provincie Zeeland. Zeeland model in deelgebied 2: links 3D verdeling; rechts boven op diepte -4.5m NAP en rechts onder op Y = 396000m.



Figuur 4.62: Zoet-brak-zout verdeling in de provincie Zeeland. FRESHEM Zeeland 'midden' resultaat in deelgebied 2: links 3D verdeling; rechts boven op diepte -4.5m NAP en rechts onder op Y=396000m.



Figuur 4.63: Zoet-brak-zout verdeling in de provincie Zeeland: Gecombineerde kaart FRESHEM ('midden') én Zeeland model: links 3D verdeling; rechts boven op diepte -4.5m NAP en rechts onder op Y=396000m.

4.10.2 Beschrijving van de modelscenario's

Met het Zeeland model worden een drietal onttrekkingsscenario's gedraaid:

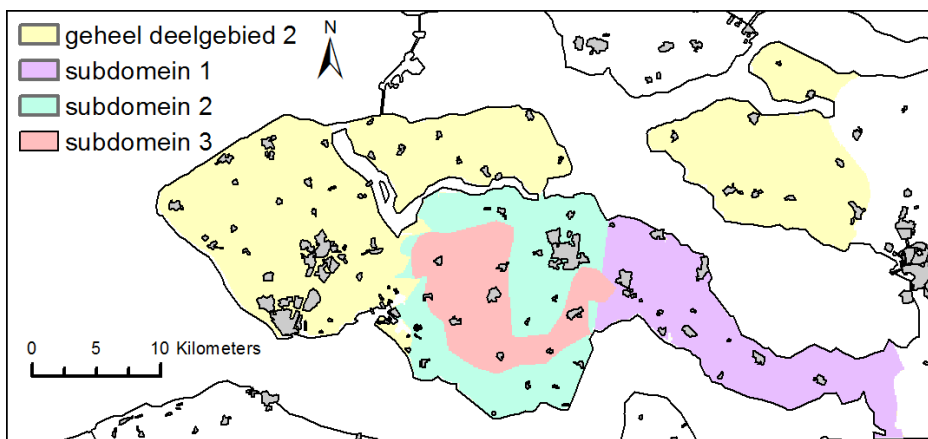
- 1) Referentie case: met de opgegeven onttrekkingen uit het Zeeland model.
- 2) Case geen onttrekking: de onttrekkingen in het Zeeland model zijn uitgezet.
- 3) Case dubbele onttrekking: de onttrekkingen van de referentie case zijn verdubbeld in het Zeeland model.

De tijdsduur van de gehele simulatie is 90 jaar. Elk jaar bestaat uit 36 tijdperiodes; elke tijdperiode duurt 10 dagen (soms ook 11 of 9 dagen, afhankelijk van de maand). Figuur 4.64 laat de locaties van de grondwateronttrekkingen in het Zeeland model. Een aantal interessegebieden te Zuid-Beveland zijn gedefinieerd in de vorm van subdomeinen, zie Figuur 4.65. Het subdomein 3 (9160 ha) is het gebied waar zich de meeste grondwateronttrekkingen bevinden (zie ook de kaart van het Waterschap Scheldestromen: Grondwaterbeheer, grondwateronttrekkingen, berekening, Figuur 4.64b). De subdomeinen 2 en 3 tezamen zijn 23378 ha groot.

In het Zeeland model, deelmodel 2, bevinden zich in het interessegebied van Zuid-Beveland in totaal 312 onttrekkingspunten. Per grondwateronttrekkingpunt is het onttrekkingsregime in totaal 8000 m³ per jaar, verspreid over drie kwartalen: tweemaal 3000 m³ in de eerste decade van april en van juli, en éénmaal 2000 m³ in de eerste decade van oktober. Voor verdere details over het Zeeland model, zie Van Baaren et al. (2016).



Figuur 4.64: a. De locaties van de onttrekkingspunten in het Zeeland model, deelgebied 2; b. de locatie van grondwateronttrekkingen zoals beschikbaar bij het Waterschap Scheldestromen.



Figuur 4.65: Oppervlakten waarover het totaal volume zoet grondwater is bepaald: per subdomein en over het gehele deelgebied 2 van het Zeeland model (inclusief de subdomeinen).

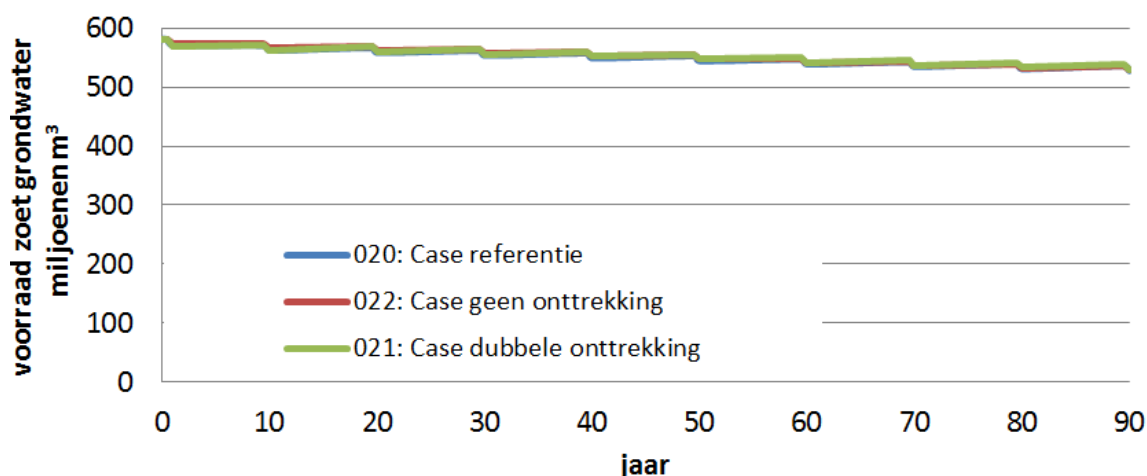
4.10.3 Analyseren en vergelijken

Er wordt in totaal ~2.5 miljoen m³ per jaar onttrokken uit de 312 onttrekkingspunten in de subdomeinen 2 en 3 tezamen (oppervlakte 23378 ha). Het aantal onttrekkingenpunten in dit gebied nadert bij lange na niet het in deze studie eerder geduide één onttrekkingspunt per 10 ha. Het geaccumuleerde onttrekkingsdebiet is in relatie tot de andere waterbalans termen bijzonder klein: de winterneerslag is geaccumuleerd in dit interessegebied ongeveer 61 miljoen m³, terwijl ook de grondwater-oppervlakte interactie vele factoren meer zijn dan de ~2.5 miljoen m³ aan onttrekkingen.

De hoeveelheid zoet grondwater per subdomein is in Tabel 4.11 weergegeven.

Tabel 4.11: Hoeveelheid zoet grondwater per subdomein

Gebied	Oppervlakte (km ²)	Zoet grondwater (miljoen m ³)
geheel deelgebied 2	834	~4000
subdomein 1+2+3	309	~1800
subdomein 2+3	234	~900
subdomein 3	92	~600

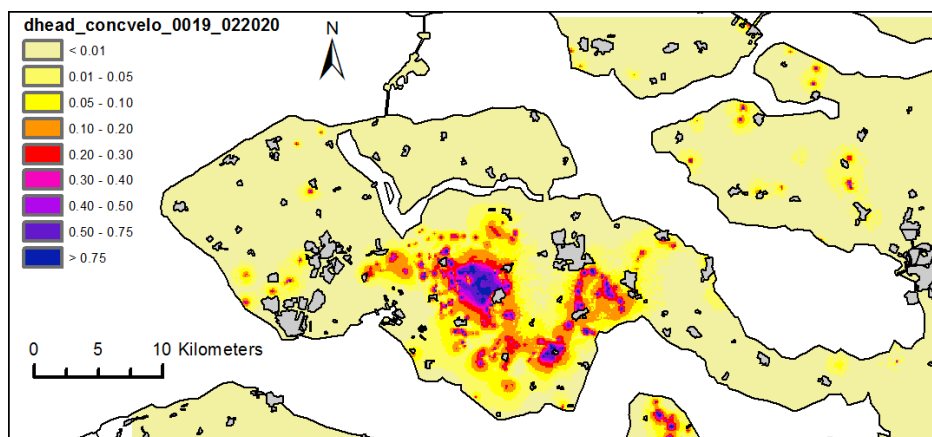


Figuur 4.66: Verandering in volume zoet grondwater ($<1500 \text{ mg Cl}^{-1} \text{ l}^{-1}$) in de subdomeinen 2 en 3 tezamen. De kleine sprongetjes elke 10 jaar zijn afdrukmomenten van de resultaten en duiden het verschil aan tussen de situatie in de winter en de zomer: absoluut gezien betreft het ongeveer 8 miljoen m^3 in deze twee subdomeinen.

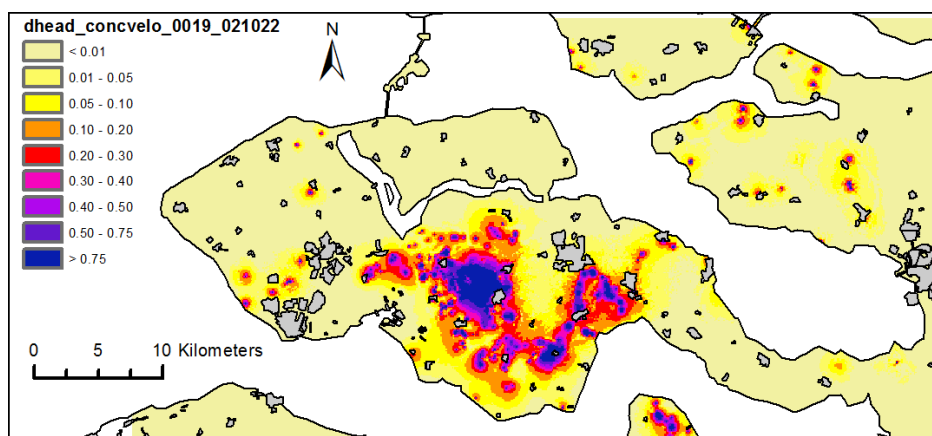
Het volume zoet grondwater neemt in het model over een periode van 90 jaar af (Figuur 4.66): van ongeveer 580 naar 530 miljoen m^3 zoet grondwater. De afname wordt veroorzaakt door het autonoom verziltingsproces, zeker in het diepere deel van het grondwatersysteem. De veranderingen in de zoete grondwatervoorraden vergen immers een lange tijd (zoet transport is een traag proces), en waarschijnlijk heeft de zoet-brak-zout verdeling nog geen dynamisch evenwicht bereikt. Een duidelijk voorbeeld waarin wordt beschreven dat andere hydrologische randvoorwaarden in het (verre) verleden nog steeds effect hebben op de huidige zoet-brak-zout verdeling is te vinden in Delsman et al. (2013).

De verschillen in volumes over de drie scenario's zijn marginaal. Het aantal onttrekkingen en de bijbehorende debieten over slechts een drietal decades per jaar zijn te klein om dit terug te vinden in de zoete grondwateraanvoorraad. De andere termen, met name de neerslag in de winter, maar ook de aanvulling vanuit het oppervlaktewatersysteem zijn veel groter en dientengevolge veel dominant op de regionale schaal. Lokaal kan een grondwateronttrekking wel effecten hebben op de verdeling. Dit is ook aangetoond in de lokale modellen, maar met een celgrootte van $100 \times 100 \text{ m}^2$ is het huidige Zeeland model te grof (zie ook Bijlage 1).

De veranderingen in de stijghoogte door de grondwateronttrekkingen zijn terug te vinden in Figuur 4.67 en Figuur 4.68. Het Zeeland model is wel in staat de verandering in de stijghoogte in het watervoerend pakket te laten zien. De figuren tonen de situatie tijdens het moment dat alle grondwateronttrekkingen aanstaan gedurende de decade. Lokaal waar veel onttrekkingen aanwezig zijn is een supralokaal (of subregionaal) effect te zien. De snelheid van beweging van het $1500 \text{ mg Cl}^{-1} \text{ l}^{-1}$ grensvlak is weliswaar aantoonbaar in de desbetreffende modelcellen waaruit wordt onttrokken, maar het Zeeland model is te grof om dit te kwantificeren.



Figuur 4.67: Daling in stijghoogte in het eerste watervoerend pakket door grondwateronttrekkingen tijdens de zomersituatie: referentie case versus case geen onttrekking.



Figuur 4.68: Daling in stijghoogte in het eerste watervoerend pakket door een verdubbeling van de grondwateronttrekkingen tijdens de zomersituatie: : case dubbele onttrekking versus case geen onttrekking.

4.11 Invloed van een onttrekking zonder freatische grondwateraanvulling

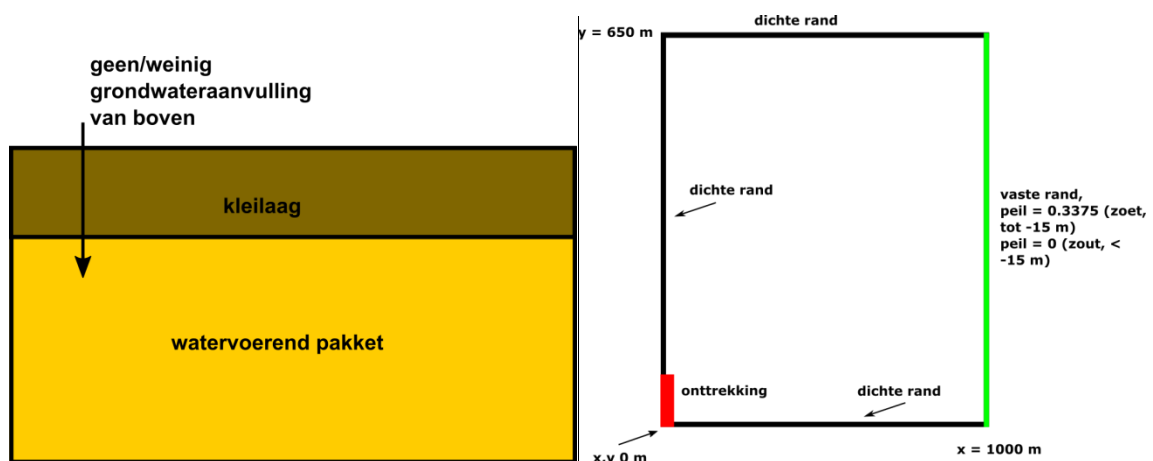
Tijdens één van de besprekingen die zijn gevoerd zijn een aantal praktijksituaties besproken, waaronder een situatie zonder of met beperkte freatische grondwateraanvulling, zoals in geval van een zoet watervoerend pakket dat bedekt wordt door een scheidende (dek)laag. In Zeeland vinden we deze situaties o.a. in Zeeuws Vlaanderen (de diepe watervoerende pakketten van Tertiaire ouderdom), langs sommige binnenduinranden in Zeeland en op een aantal plekken in de buurt van de Brabantse Wal. Voor een completer overzicht wordt hier verwezen naar Van Baaren et al. (2017). De voeding van het zoete water in deze watervoerende pakketten kan van boven of lateraal vanuit hoger gelegen gebieden komen. Ook kan het zoete water in vroegere periodes (bijv. tijdens het Pleistoceen) zijn afgezet en niet tot amper weer worden aangevuld.

In voorliggend beschreven onderzoek is geen kwantitatieve analyse gedaan van de voeding van zoete watervoerende pakketten in Zeeland die worden afgesloten door een scheidende laag. Wel is het effect van een onttrekking op een dergelijk watervoerend pakket berekend middels numerieke simulaties. Daarbij is uitgegaan van een worst-case situatie.

Figuur 4.69 geeft een overzicht weer van de randvoorwaarden van het model. Het model heeft horizontale afmetingen van 650 m bij 1000 m. De top van het model is gelegen op 0 m

(geen referentiesysteem maar een fictieve hoogte), die overeenkomt met de basis van de kleilaag en de top van het watervoerende pakket. Dat betekent dat de kleilaag niet expliciet is meegenomen in de modellering. Verder is er aangenomen dat er geen grondwateraanvulling over deze laag plaatsvindt. Er zijn drie randen die over de gehele verticaal dicht zijn. Twee daarvan zijn symmetrieassen, net zoals bij het referentiemodel (sectie 4.2). De andere rand is dicht gehouden om de instroom van (zoet) water te beperken (worst case). Alleen de rechterrands is open, dus alleen hier kan grondwater instromen (zowel zoet als zout). Het peil aan deze rand is 0.3375 m in het zoete water (van 0 – 15 m, met een vaste concentratie van 0 g Cl l^{-1}) en 0 m in het onderliggende zoute water (met een vaste concentratie van 16.7 g Cl l^{-1}). Het model heeft een verticaal bereik van 0 tot -30 m. De onttrekking ligt op 5 m onder de bovenkant van het model.

Als initiële conditie is een scherpe concentratieverdeling opgelegd; van 0 tot -15 m een chlorideconcentratie van 0 g Cl l^{-1} en van -15 tot -30 m 16.7 g Cl l^{-1} . Er is eerst 100 jaar doorgerekend zonder onttrekking en alleen moleculaire diffusie om een initiële overgangszone te creëren. Vervolgens is met een onttrekkingsperiode van 40 jaar gerekend, met het in sectie 4.2.4 beschreven 'realistische onttrekkingsregime'. Als overige modelparameters zijn de referentiewaarden (zie sectie 4.2) genomen.



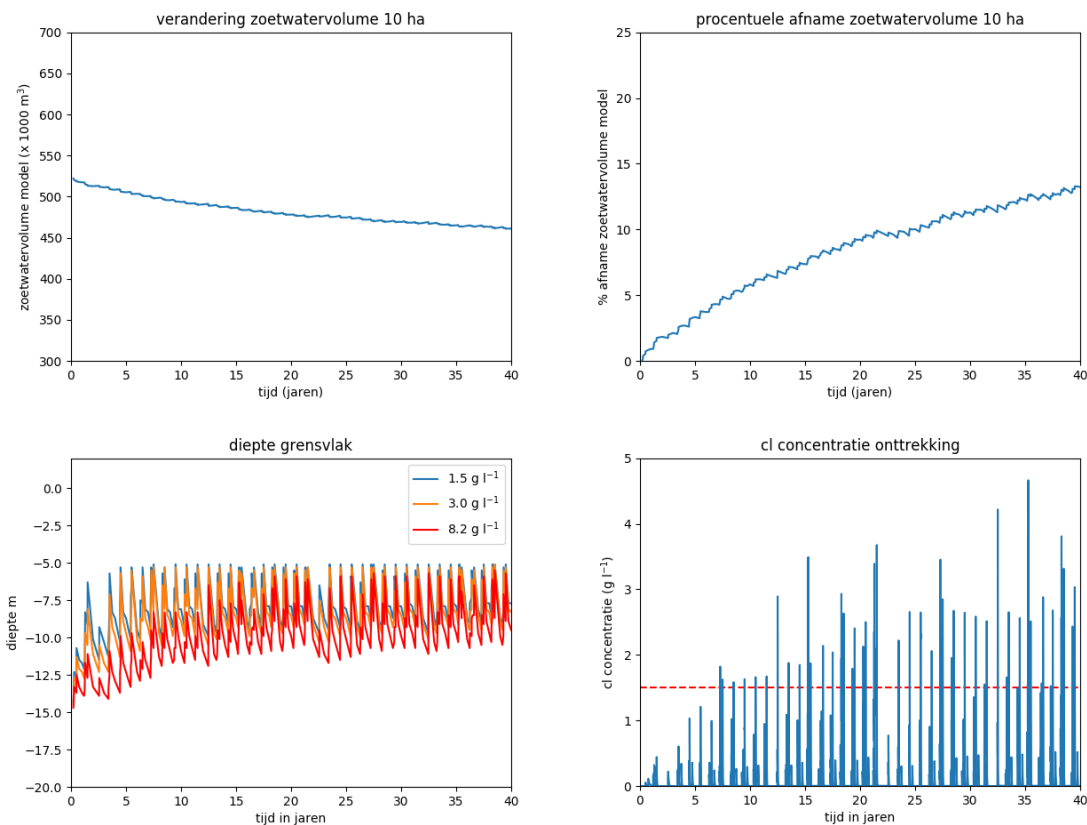
Figuur 4.69: Links: situatie van een watervoerend pakket dat van boven wordt afgesloten door een kleilaag. Rechts: randvoorwaarden van het model van een onttrekking onder een scheidende laag.

De open rand aan de rechterkant van het model is ver genoeg gekozen om geen invloed te hebben op de onttrekking. Dit is getest door twee modellen te analyseren; één waarbij de rand open is en een ander model waarbij de rand volledig dicht is. Beide modellen bleken dezelfde resultaten te geven wat betreft de Cl concentraties en zoetwatervolume in het buffergebied.

In Figuur 4.70 zijn de resultaten van het model weergegeven. Vanwege de afwezigheid van freatische grondwateraanvulling nemen de concentraties onder en in de onttrekking snel toe. Na zo'n 7 jaar vindt de eerste overschrijding van de 1.5 g Cl l^{-1} plaats. Er is enig herstel van de chlorideconcentraties gedurende de periodes zonder onttrekking, maar vergeleken met de in sectie 4.2.5.2 beschreven modellen is dit herstel veel minder. De toestroom van het water uit de omgeving is dus niet voldoende om de concentraties voldoende te doen laten afnemen. Na 7 jaar is de onttrekking in veel gevallen te zout voor verder gebruik.

¹³ Dit komt overeen met een dichtheid van 1022.5 kg m^{-3} .

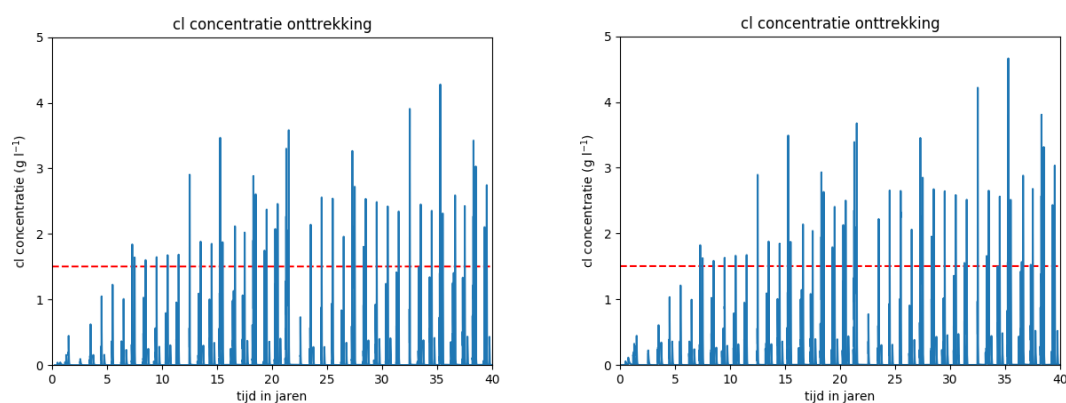
Wat verder opvalt in Figuur 4.70 is dat er na 40 jaar geen dynamisch evenwicht in de afname van het zoetwatervolume in het buffergebied is; er treedt dus een doorgaande in-tering van de zoetwatervoorraad op. Na 40 jaar bedraagt deze bijna 15%.



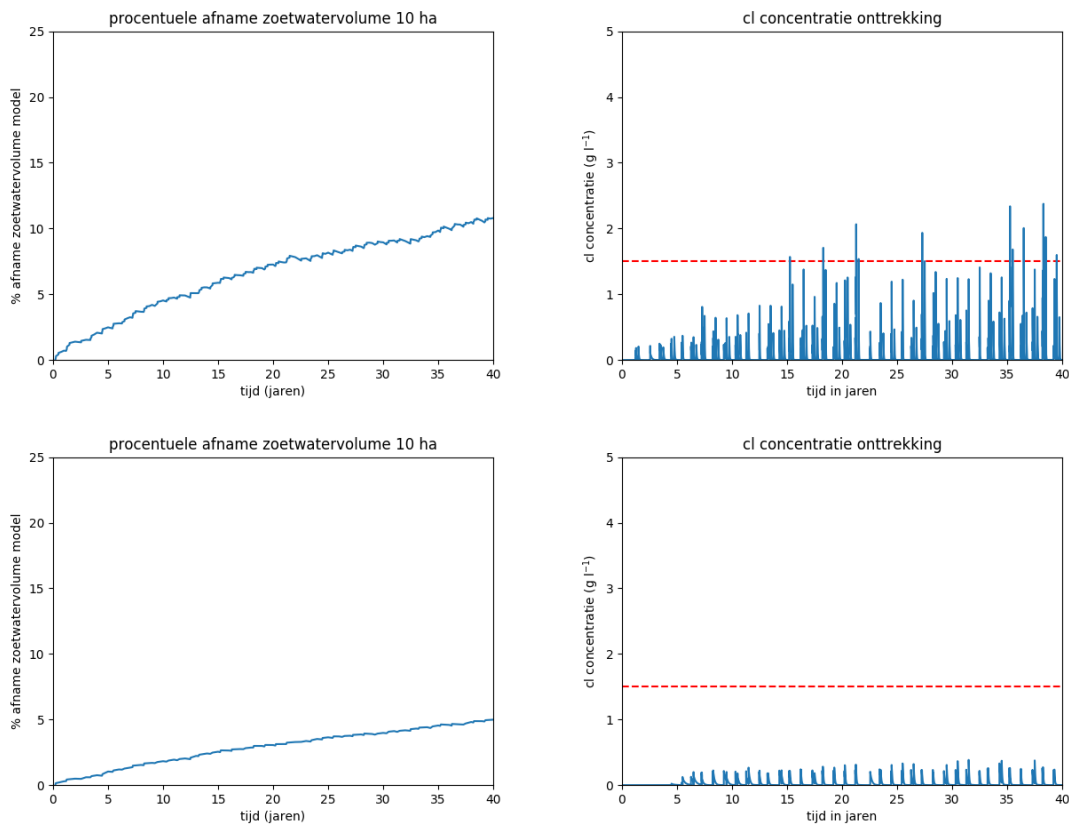
Figuur 4.70: Resultaten van de onttrekking-simulatie van het scenario zonder freatische grondwateraanvulling. Linksboven: de verandering van het zoetwatervolume rondom het buffergebied (10 ha) van de onttrekking. Rechtsboven: de relatieve verandering van het zoetwatervolume door de tijd heen ten opzichte van het begin van de simulatie. Linksonder: de diepte van de 1.5, 3.0 en 8.2 g Cl l⁻¹ grensvlakken gedurende de simulatietijd, juist onder de locatie van de onttrekking (x,y = 0,0). Rechtsonder: verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking.

Voor het verhogen van de laterale instroom van zoet water is de rechter rand van het model verschoven naar 300 m afstand van de onttrekking. Op basis van de referentie modellen mag verwacht worden dat hier op lange termijn enige invloed is van de onttrekking. De resultaten van de concentratie in de onttrekking zijn weergegeven in Figuur 4.70. Hieruit volgt dat een extra zoetwateraanvoer een beperkte invloed heeft op de chlorideconcentraties in de onttrekking. Ook de chlorideconcentratie onder de onttrekking en het zoetwatervolume in het buffergebied van de onttrekking (niet weergegeven) leveren een vergelijkbaar beeld op. Er is niet verder onderzocht wat de invloed van een hogere toestroom van zoet grondwater is. Dit vereist complexere randvoorwaarden en een analyse van de laterale toestroom van zoet grondwater onder kleilagen in verschillende gebieden in Zeeland. Deze aspecten vallen buiten het bereik van het huidige onderzoek.

In Figuur 4.72 zijn de relatieve afname van het zoetwatervolume in het buffergebied rondom de onttrekking en de chlorideconcentratie in de onttrekking weergegeven voor twee scenario's met een lager debiet; één scenario met een jaarlijks debiet van 6000 m³ (2000 m³ per kwartaal) en één met een jaarlijks debiet van 2000 m³ (1000 m³ per kwartaal). Alleen bij het laagste debiet blijven de chlorideconcentraties onder de 1.5 g Cl l⁻¹. Echter, bij beide scenario's is na 40 jaar nog steeds geen dynamisch evenwicht bereikt wat betreft het zoetwatervolume in het buffergebied rondom de onttrekking. De reden hiervoor is uiteraard dat er te weinig aanvulling van zoet grondwater vanuit de omgeving plaatsvindt.



Figuur 4.71: Verloop van de chlorideconcentratie in de onttrekking van het scenario zonder freatische grondwateraanvulling met de open rand dichtbij (links, op 300 m) en veraf (rechts, op 1000 m).



Figuur 4.72: Boven: resultaten van de simulatie zonder freatische grondwateraanvulling en een jaarlijks debiet van 6000 m³ (maximaal 2000 m³ per kwartaal). Onder: idem, maar dan voor een jaarlijks debiet van 2000 m³ (maximaal 1000 m³ per kwartaal). Links: relatieve afname van het zoetwatervolume in het buffergebied rondom de onttrekking. Rechts: chlorideconcentratie in de onttrekking gedurende de simulatie.

4.12 Uitbreiden van het aantal categorieën van diktes van zoetwatervolumes en bijbehorende debieten

In de huidige algemene regels worden zoete en zoute gebieden onderscheiden op basis van een enkele dikte van de zoetwaterbel (15 m). Uit het recente FRESHM onderzoek kunnen nauwkeurig andere diktes van zoetwaterbellen worden bepaald, waar het maximale debiet op zou kunnen worden afgesteld, en daarmee ook de duurzaamheid van de onttrekking en tegelijkertijd de mogelijkheden voor beregening.

Ter illustratie en voor een indruk van de debieten die horen bij verschillende categorieën van diktes van zoetwaterbellen is een groot aantal simulaties gedraaid met verschillende diktes van de zoetwaterbel. De verschillende diktes zijn tot stand gekomen door het peil in de drainerende sloot stapsgewijs te verhogen/verlagen. Het realistische onttrekkingsscenario is toegepast (maximaal debiet van 42 m³ per uur).

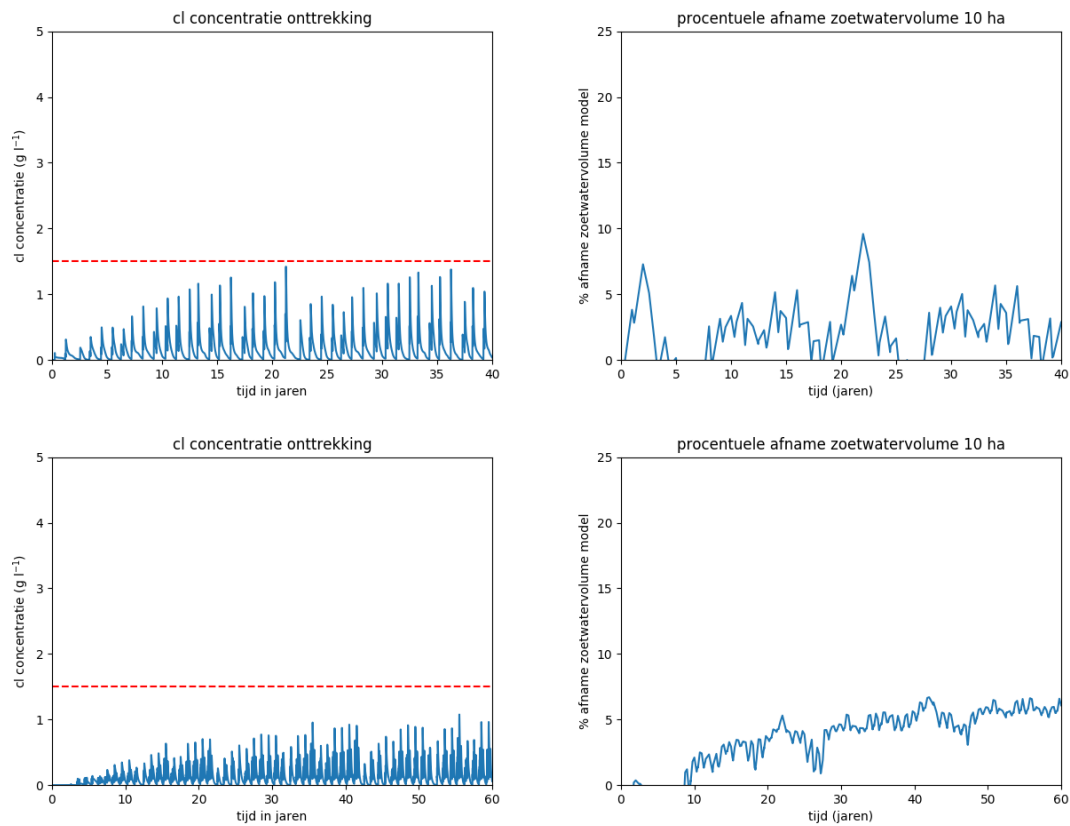
In Tabel 4.12 zijn de maximale debieten per kwartaal en per jaar weergegeven, zonder dat de chlorideconcentratie in de onttrekking boven de 1.5 g Cl l⁻¹ uitkomt. In Figuur 4.73 zijn voor de categorieën 7.5 – 10 m –mv en > 25 m –mv de concentraties in de onttrekking en de relatieve afname van de zoetwaterbel in het buffergebied rondom de onttrekking weergegeven

gedurende de simulaties. Voor de simulatie van de zoetwaterbel > 25 m –mv is 60 jaar doorgerkend en lijkt zelfs dan nog niet volledig in evenwicht.

De resultaten laten zien dat er per categorie van de dikte van de zoetwaterlens (diepte grensvlak) een andere hoeveelheid zoet water kan worden onttrokken. Verder neemt de afname van de zoetwaterbel toe per toenemende dikte van de zoetwaterbel en debieten. De resultaten in Tabel 4.12 moeten echter alleen gezien worden als een indicatie; extra invloeden van de eigenschappen van de ondergrond (lage doorlatendheid), zeespiegelstijging, klimaatverandering, en de aanwezigheid van een nabijgelegen sloot zijn niet meegenomen.

Tabel 4.12: Maximaal debiet (Q_{max}) per kwartaal en per jaar en relatieve afname van de zoetwaterbel in het buffergebied per 7 verschillende categorieën van de dikte van de zoetwaterbel.

Diepte grensvlak (m – mv)	Q_{max} per kwartaal (m^3)	Q_{max} per jaar (m^3)	Relatieve afname zoetwaterbel in buffergebied (%)
7.5 – 10	1000	1000	3
10 – 12.5	1000	2000	2
12.5 – 15.0	2000	4000	2
15 – 17.5	3000	6000	5
17.5 – 20	3000	8000	7
20 – 25	4000	10000	7
> 25 m	10000	12000	7



Figuur 4.73: Chlorideconcentratie in de onttrekking (links) en relatieve afname van het zoetwatervolume binnen het buffergebied van de onttrekking van twee simulaties (diepte grensvlak 7.5 – 10 m (boven) en > 25 m (onder)).

5 Conclusies

5.1 Introductie

Toepassing van de maximale debieten¹⁴ binnen de huidige algemene regels voor permanente onttrekkingen in niet-kwetsbare, zoete gebieden leidt veelal tot zoutwater opkegeling onder de onttrekkingen en een afname van het zoetwatervolume binnen de vastgestelde bufferzone (10 ha) rondom de onttrekking. De numerieke modelsimulaties laten zien dat bij toepassing van de maximaal vastgestelde debieten het zoetwatervolume van een 15 m dikke zoetwaterlens zo'n 5-10% afneemt over een periode van 40 jaar, waarna een dynamisch evenwicht wordt bereikt. Ook wordt de chlorideconcentratie voor zout grondwater (1.5 g Cl l⁻¹) in droge jaren (licht) overschreden, al vindt dit in veel gevallen pas na 10-20 jaar na aanleg van de onttrekking plaats. Kunstmatige infiltratie kan zowel de afname van het zoetwatervolume als een ongewenst zoutgehalte in de onttrekking voorkomen.

Voor wat betreft de deelonderwerpen (van onderzoeksactiviteit 3, zie sectie 1.2) die voor deze studie zijn gedefinieerd zijn de belangrijkste bevindingen en conclusies hieronder puntsgewijs beschreven. In het volgende hoofdstuk komen de aanbevelingen voor toekomstig beleid aan bod.

5.2 Deelonderwerpen

Heterogeniteit van de ondergrond

- In het referentiemodel waarbij gemiddelde waarden voor de verticale (4.3 m d⁻¹) en horizontale (6.2 m d⁻¹) doorlatendheid zijn gebruikt, vindt de eerste overschrijding van de grenswaarde van zout water plaats na ~20 jaar¹⁵ bij het toegepaste 'realistische' onttrekkingsregime (o.a. max. 8000 m³ per jaar, 3000 m³ per kwartaal, 42 m³ per uur). In de daarop volgende 20 jaar vindt in sommige jaren een lichte overschrijding plaats, vooral in droge jaren waarbij er veel vraag is naar irrigatiewater.
- Bij een lagere waarde van de horizontale doorlatendheid neemt de kans op een overschrijding van de grenswaarde van zout water in de onttrekking toe. Ook een hogere verticale doorlatendheid verhoogt de kans op een overschrijding.
- De doorlatendheid van de sedimenten onder de kreekruigen is gerelateerd aan de afzettingscondities van de geulafzettingen. De afzettingscondities zijn te relateren aan de breedte van de kreekrug en de geografische positie. Een lagere doorlatendheid is vooral te verwachten bij relatief smalle kreekruigen, en bij een gegeven breedte van een kreekrug zijn lagere doorlatendheden meer te verwachten in het oosten dan in het westen.
- Er is relatief weinig bekend over de heterogeniteit van de geulafzettingen onder kreekruigen. De simulaties van een log-normaal verdeelde heterogeniteit (doorlatendheid) onder kreekruigen tonen aan dat deze invloed op de zoutwater opkegeling beperkt is, en dat de gemiddelde waarde van de verticale en horizontale doorlatendheid belangrijker is.
- Een lateraal breed aanwezige kleilaag heeft een gunstig effect op de chlorideconcentratie onder en in de onttrekking, vooral wanneer deze zich tussen de

¹⁴ Waarbij een maximum dagelijks debiet van 42 m³ per uur is aangehouden, in plaats van de aangegeven 60 m³ per uur. Dit vanwege drukverliezen in de praktijk (zie H4).

¹⁵ In dit geval: 20 jaar na aanleg van de onttrekking.

onttrekking en het zoet-zout grensvlak bevindt. Het valt op basis van de bestaande geologische gegevens niet te zeggen in hoeverre de kleilagen ruimtelijk aaneengesloten zijn onder de kreekruigen. In elk geval zorgt een kleilaag voor minder zoutwater opkegeling.

Klimaatverandering en grondwateraanvulling

- Op het GH scenario na lijkt de invloed van klimaatverandering op de grondwateraanvulling klein en in het 'L' scenario juist gunstig. Om die reden is het effect op de zoutwater opkegeling ook beperkt. In de 'L' scenario's neemt de grondwateraanvulling en de dikte van de zoetwaterbel toe. De invloed van klimaatverandering op de watervraag is niet meegenomen in deze studie.

Zeespiegelstijging

- De invloed van zeespiegelstijging is alleen voor het 'W' scenario (van den Hurk et al., 2014), doorgerekend, voor drie verschillende doorwerkingspercentages gebaseerd op het regionale numerieke grondwater model van de provincie Zeeland. De modelresultaten laten zien dat de invloed van zeespiegelstijging groter is dan de klimaatverandering, zowel op de concentratieverdeling in de onttrekking maar vooral op de relatieve afname van het volume van de zoetwaterbel. Bij 40% doorwerking van de zeespiegelstijging neemt het volume zoet water met zo'n 16% af, tegen gemiddeld 6% afname in het geval van geen zeespiegelstijging.
- Echter, het areaal van doorwerking van de invloed van zeespiegelstijging is beperkter dan bij klimaatverandering en grondwateraanvulling. Ook zijn de zeespiegelstijging prognoses van de andere klimaatscenario's in deze studie niet meegenomen.

Fysiogeografische kenmerken

- Longitudinale dispersie heeft een belangrijke invloed op de concentratie in de onttrekking; een afname van de longitudinale dispersie leidt tot een afname van de concentraties. In deze studie is een representatieve waarde (0.1 m) voor de longitudinale dispersie gekozen, die overeenkomt met de resultaten (dikte van de mengzone) van het FRESHEM onderzoek.
- De dichtheid van het grondwater is ook een belangrijke factor voor de berekende concentratie in de onttrekking. Uit de simulaties komt naar voren dat bij een lagere dichtheid de kans op een ongewenst hoog chloridegehalte groter is dan bij een hogere dichtheid. De afname van het zoetwatervolume in het buffergebied rondom de onttrekking is echter kleiner. De variaties in de dichtheid van het grondwater kunnen tot 10 g Cl l^{-1} worden afgeleid uit het FRESHEM onderzoek.
- Een sloot op een afstand van 50 m van de onttrekking kan leiden tot versnelde zoutwater opkegeling en een ongewenst zoutgehalte in de onttrekking (in de huidige algemene regels staat een minimale afstand van 25 m beschreven). De mate hiervan hangt sterk samen met het peil van de sloot (en of/wanneer deze watervoerend is) en de hydraulische eigenschappen van de sloot. Data van de opkegeling onder de sloot (bijvoorbeeld uit het FRESHEM onderzoek) kan al duidelijk maken wat de mogelijke invloed van de sloot is. Lokale condities moeten daarom worden onderzocht indien men vermoedt dat een sloot invloed heeft op de zoutwater opkegeling onder een onttrekking.

Zoetwatervoorzieningsmaatregelen

- De illustratieve simulaties van de zoetwatervoorzieningsmaatregelen Freshmaker en Kreekrug Infiltratie Systeem tonen duidelijk aan dat bij deze toepassingen het zoetwatervolume niet afneemt door de tijd heen (gegeven dat voldoende wordt geïnfiltrerd, zoals gedaan is in de simulaties), wat bereikt wordt middels het kunstmatig infiltreren van zoet water in de wintermaanden. Hoewel er opkegeling van zout water onder de onttrekking plaatsvindt blijven de concentraties in de onttrekking relatief laag, zeker in het geval van de Freshmaker. Bij het Kreekrug Infiltratie Systeem zijn de concentraties in de onttrekking enigszins hoger, maar is de toename van het totale zoetwatervolume ook hoger dan bij de Freshmaker.

Onttrekkingstypes en –configuraties

- Een niet-uniform debiet in de horizontale onttrekking heeft een negatief maar mild effect op de chlorideconcentratie van het opgepompte water.
- Een langere onttrekking heeft een gunstige invloed op de chlorideconcentratie in de onttrekking¹⁶. Verder heeft een 1 meter hogere ligging weinig effect op de concentratie in de onttrekking. Een langere onttrekking van 80 naar 100 m is effectiever dan een 1 m ondiepere aanleg.
- Wanneer men twee onttrekkingen achter elkaar met een totale lengte van 160 m met elk een half debiet gebruikt in plaats van één onttrekking dan neemt het chloridegehalte in de onttrekking fors af en overstijgt bij lange na niet de grenswaarde voor zout grondwater. Deze configuratie heeft daarom de voorkeur boven een kortere onttrekking. Het effect van een 160 m lange onttrekking op mogelijke interferentie is niet onderzocht, maar de verwachting is dat dit bij een relatief laag debiet te verwaarlozen is.
- In de huidige regelgeving is van interferentie tussen onttrekkingen waarschijnlijk geen sprake, dan wel beperkt.

Bufferzone

- De numerieke simulaties van de tijdelijke verticale onttrekkingen laten zien dat de verbreiding van de 5 cm verlaging van de grondwaterstand altijd minder uitgebreid is dan de huidige omvang van de bufferzone (300 m) die rondom kwetsbare natuurgebieden gehanteerd wordt. Een grote verbreiding vindt met name plaats bij langdurige onttrekkingen met een laag debiet, een beperkte transmissiviteit van het watervoerende pakket en een relatief kleine freatische bergingscoëfficiënt ('specific yield'). Bovendien is deze afhankelijk van de weerstand van de deklaag.

Overige belangrijke conclusies

- In gebieden die in de algemene regels als 'zout' zijn gedefinieerd (zoetwaterbel dunner dan 15 m dikte) kan, ondanks dat definitie iets anders kan suggereren, zoutwaterintrusie plaatsvinden, en kunnen onttrekkingen bovendien na verloop van tijd de grenswaarde voor zout grondwater overschrijden. Dit geldt zowel voor de permanente onttrekkingen binnen de algemene regels (max. 5 m³ per uur, 12000 m³ per jaar) als tijdelijke onttrekkingen.
- Een onttrekking onder een kleilaag waar geen/weinig freatische grondwateraanvulling over plaatsvindt leidt tot een snellere zoutwater opkegeling dan wanneer er wel

¹⁶ Met vanzelfsprekend een gelijk totaal debiet.

freatische grondwateraanvulling plaatsvindt. Bovendien leidt deze situatie, in tegenstelling tot een situatie met freatische grondwateraanvulling, tot een structurele afname van het zoetwatervolume wanneer de laterale toestroming van grondwater beperkt is.

6 Advies aanpassing huidige regels

Op basis van de resultaten van deze studie is in dit hoofdstuk een aantal aanbevelingen voor wat betreft aanpassing van de huidige regelgeving (algemene regels) beschreven. Over het algemeen lijkt de huidige regelgeving afdoende om sterke verzilting onder en rondom de onttrekking te voorkomen. Verandering van het huidige buffergebied rondom een onttrekking (10 ha) lijkt niet nodig. Er zijn echter ook aspecten die wel herzien moeten worden.

6.1 Algemene regels voor onttrekkingen in niet-kwetsbare, zoete gebieden (zoetwaterbel > 15 m dikte)

Een belangrijk algemeen aspect van het onttrekken van grondwater met de maximale debieten volgens de algemene regels voor permanente onttrekkingen in niet-kwetsbare, zoete gebieden is dat dit leidt tot een vermindering van het volume zoet grondwater rondom het buffergebied van de onttrekking (10 ha). Deze vermindering bedraagt in veel gevallen niet meer dan 10%, en na verloop van tijd (~ 40 jaar bij een zoetwatersysteem van 15 m dikte) bereikt het zoetwatervolume dynamisch evenwicht. Hoe dikker het zoetwatersysteem, hoe langer het zal duren voordat er dynamisch evenwicht bereikt wordt. In de huidige regelgeving staat echter beschreven dat met de algemene regels geen afname van het zoetwatervolume optreedt. Dit verschil kan verklaard worden doordat de huidige regelgeving gebaseerd is op modellen waar a) menging van zoet en zout water niet is meegenomen en b) een hogere doorlatendheid is aangenomen dan in de modellen van voorliggende studie. Dit zorgt voor een onderschatting van de zoutwater opkegeling onder de onttrekking en de afname van het zoetwatervolume. Aangezien beide wel degelijk optreden zou dit bij de nieuwe regelgeving moeten worden gecorrigeerd. De zoetwatervoorraden (>15 m) in kreekruigen of dekzand zijn als KRW-grondwaterlichamen aangemerkt. Een vereiste daarbij is dat de (zoet)waterbalans op orde blijft. Een afweging tussen benutten en borgen van balans is noodzakelijk. Drinkwater- en natuurbelangen worden via de provinciale verordening en de waterschapskeur geborgd. De KRW heeft oog voor bestaand gebruik mits deze een duurzame exploitatie borgt. De resultaten van deze studie kunnen worden gebruikt voor een afweging hiervan.

De maximale debieten die binnen de algemene regels gelden zijn:

- $10 < Q < 60^{17} \text{ m}^3$ per uur én
- $Q < 3.000 \text{ m}^3$ per kwartaal én
- $Q < 8.000 \text{ m}^3$ per jaar

Om te voorkomen dat na verloop van tijd de zoutconcentratie in de onttrekking de waarde van zout grondwater (1.5 g Cl l^{-1}) overschrijdt, zullen deze debieten enigszins verlaagd moeten worden. In voorliggende studie is uitgegaan van een maximaal debiet van 42 m^3 per uur, omdat 60 m^3 per uur in de praktijk vaak als pompcapaciteit wordt aangenomen, maar er door drukverliezen vaak niet meer dan 45 m^3 per uur daadwerkelijk wordt onttrokken. Het verdient aanbeveling om dit in de nieuwe regelgeving te vermelden en uit te gaan van een daadwerkelijk debiet van bijvoorbeeld 40 m^3 per uur.

Kunstmatige infiltratie van zoet water, bijvoorbeeld door middel van de Freshmaker en Kreekrug Infiltratie Systeem (GO-FRESH) concepten, kan een zeer positief effect hebben op

¹⁷ Dit is aangenomen als de pompcapaciteit; voor het daadwerkelijke debiet is 42 m^3 per uur genomen. Zie eerder in de tekst.

zowel de concentraties in de onttrekking als het zoetwatervolume rondom de onttrekking. Implementatie van kunstmatige infiltratie in de algemene regels zal echter nog aanvullend onderzoek vergen. Middels een vergunning is kunstmatige infiltratie wel al mogelijk. Ook zou kunstmatige infiltratie in een nieuwe beleidsnota gestimuleerd moeten worden.

De mogelijke effecten van zeespiegelstijging en klimaatverandering zijn in deze studie gekwantificeerd. Gezien de onzekerheid van de scenario's en de tijdschaal waarop deze processen plaatsvinden in relatie tot frequentie van de herziening van de onttrekkingsregels, lijkt het voorlopig niet nodig om deze effecten (in de komende herziening van de algemene regels) mee te nemen.

Sloten binnen 50 m van de onttrekking kunnen leiden tot versnelde zoutwater opkegeling en een ongewenst zoutgehalte in de onttrekking. De mate hiervan hangt echter sterk samen met het peil van de sloot en de hydraulische eigenschappen van de sloot. Dit zou verder uitgezocht moeten worden alvorens een advies over eventuele aanpassing van de huidige eis voor de minimale afstand tussen de onttrekking en een sloot (25 m). Data van de opkegeling onder de sloot (bijvoorbeeld uit het FRESHM onderzoek) kan al duidelijk maken wat de mogelijke invloed van de sloot is. Lokale condities moeten daarom worden onderzocht indien men vermoedt dat een sloot invloed heeft op de zoutwater opkegeling onder een onttrekking.

Voor onttrekkingen onder een scheidende laag waarover geen of amper grondwateraanvulling plaatsvindt verdient het aanbeveling een vergunning te vereisen, waarin moet worden aangetoond hoe en hoeveel laterale grondwateraanvulling / toestroming plaatsvindt, en of er op een duurzame manier kan worden onttrokken.

In de huidige regelgeving staan geen eisen ten aanzien van de lengte van de horizontale onttrekking beschreven. Hier wordt aangeraden om dat in een volgende versie wel te doen, waarbij 80 m als minimum kan worden aangehouden. Een langere onttrekking zal zorgen voor een lichte toename van de reductie van het zoetwater volume rondom de onttrekking, maar zal een sterk positief effect hebben op de concentraties in de onttrekking. Aanpassing van de eis van de diepte van de onttrekking is niet nodig.

6.2 Algemene regels voor onttrekkingen in niet-kwetsbare, zoute gebieden (zoetwaterbel < 15 m dikte)

Toepassing van de gespecificeerde debieten (5 m^3 per uur, 12000 m^3 per jaar) voor de zoute gebieden kan leiden tot hoge zoutconcentraties in de onttrekking. Uit sectie 4.2.1.2 blijkt dat bij toepassing van de maximale debieten de onttrekking al vrij snel zout grondwater aantrekt bij een zoetwaterbel met een dikte van 7 meter. Er is niet uitgezocht wat het effect is bij dikkere bellen, maar het vermoeden is dat ook bij een bel van 10 meter dikte de concentraties zullen worden overschreden. Pas bij een jaarlijks debiet van 1200 m^3 kan de onttrekking bij dit debiet duurzaam gebruikt worden in het geval van een dikte van de zoetwaterbel van 7 meter. Dit is ook weer afhankelijk van vele factoren, zoals het type onttrekking (horizontaal / verticaal) en de lengte van de onttrekking.

Hoewel het waarschijnlijk is dat onttrekkingen van minder dan 5 m^3 per uur maar wel 12000 m^3 per jaar nauwelijks voorkomen in de provincie, is het aan te raden om de regels voor het maximale jaarlijkse debiet aan te passen. Zo kan het voor het vullen van bassins best mogelijk zijn dat onttrekkingen met een laag debiet voor langere tijd gebruikt worden. Ook kunnen meerdere onttrekkingen dicht naast elkaar gelegd worden (daar zijn geen regels voor beschreven zoals bij de zoetwaterbellen $> 15 \text{ m}$) zodat dit samen tot een hoger debiet leidt.

In de huidige regelgeving staan dergelijke eisen ten aanzien van de onttrekkingen niet beschreven. Hier wordt aangeraden om dat in een volgende versie wel te doen, met regels voor bijv. de configuratie, lengte en het buffergebied, net als bij de zoete gebieden. Hierbij moet ook rekening worden gehouden met het feit dat bij een verticale onttrekking de zoutwater opkegeling veel sneller gaat dan bij een horizontale onttrekking.

6.3 Bufferzone

De numerieke simulaties van de tijdelijke verticale onttrekkingen laten zien dat de verlaging van de grondwaterstand altijd minder ver doorwerkt dan de huidige omvang van de bufferzone (300 m). Een brede verspreiding vindt met name plaats bij langdurige onttrekkingen met een laag debiet, een beperkte transmissiviteit van het watervoerende pakket en een relatief kleine freatische bergingscoëfficiënt ('specific yield'). Bovendien is de verlaging van de grondwaterstand afhankelijk van de weerstand van de deklaag. De in sectie 4.9 beschreven resultaten zouden gebruikt kunnen worden om een nieuwe bufferzone vast te stellen afhankelijk van de weerstand van de deklaag.

6.4 Andere aanbevelingen

Uit voorliggende studie blijkt dat er veel (lokale) factoren zijn die bepalen of er sprake is van een onttrekking waarbij er na verloop van tijd geen brak of zout water wordt onttrokken. Deze factoren zijn afzonderlijk behandeld middels conceptuele modellen. Combinaties ervan zijn niet verder onderzocht, en er is ook niet in detail gekeken naar hoe deze verschillende omstandigheden ruimtelijk in de provincie Zeeland variëren. Het verdient aanbeveling om dit via bijvoorbeeld een (online) rekentool verder te ontwikkelen, om maatwerk voor wat betreft duurzame debieten van een onttrekking mogelijk te maken. Een voorlopige aanzet voor wat betreft het maximale onttrekkingsdebiet/-volume in relatie tot de dikte van de zoetwaterlens (onder 'gemiddelde omstandigheden') is gegeven in Tabel 4.12. Deze getallen moeten gebruikt worden als een indicatie; verder onderzoek is nodig voor daadwerkelijke implementatie in een nieuwe regelgeving.

Ten slotte is het belangrijk te vermelden dat modellen altijd een benadering zijn van de werkelijkheid. Veldmonitoring is een alternatieve en aanvullende manier om de invloed van zoutwater opkegeling als gevolg van een (horizontale) onttrekking beter te reguleren. Er zijn verschillende geofysische methoden voorhanden voor deze veldmonitoring, zoals Electrical Resistivity Tomography (ERT) en EM-inductie boorgatmetingen. Indien in het veld middels metingen aangetoond kan worden dat er op een duurzame manier onttrokken kan worden, dan zou toekomstig beleid daar ruimte voor moeten geven.

7 Literatuuropgave

- Bakker, M., Oude Essink, G. H. P., & Langevin, C. D. (2004). The rotating movement of three immiscible fluids—a benchmark problem. *Journal of Hydrology*, 287(1–4), 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.10.007>
- Beekman, W., Caljé, R., & Heijkers, F. S. J. (2014). Vergelijking van enkele schattingsmethoden voor de actuele verdamping, 20(2), 39–46.
- Chen, C., Wan, J., & Zhan, H. (2003). Theoretical and experimental studies of coupled seepage-pipe flow to a horizontal well. *Journal of Hydrology*, 281, 159–171.
- CHO-TNO. (1988). Van Penman naar Makkink—een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen.
- Dagan, G., & Bear, J. (1968). Solving The Problem Of Local Interface Upconing In A Coastal Aquifer By The Method Of Small Perturbations. *Journal of Hydraulic Research* (Vol. 6). <https://doi.org/10.1080/00221686809500218>
- Dagan, G., Fiori, A., & Jankovic, I. (2013). Upscaling of flow in heterogeneous porous formations: Critical examination and issues of principle. *Advances in Water Resources*, 51, 67–85. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.12.017>
- De Lange, W. J. (1999). A Cauchy boundary condition for the lumped interaction between an arbitrary number of surface waters and a regional aquifer. *Journal of Hydrology*, 226(3–4), 250–261. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00143-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00143-2)
- De Louw, P. G. B. (2013). Saline seepage in deltaic areas. VU University Amsterdam.
- De Louw, P. G. B., Vandenbohede, A., Werner, A. D., & Oude Essink, G. H. P. (2013). Natural saltwater upconing by preferential groundwater discharge through boils. *Journal of Hydrology*, 490(0), 74–87. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.025>
- Doorenbos, J., & Allen, R. G. (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24.
- Eeman, S., Leijnse, A., Raats, P. A. C., & Van der Zee, S. E. A. T. M. (2011). Analysis of the thickness of a fresh water lens and of the transition zone between this lens and upwelling saline water. *Advances in Water Resources*, 34(2), 291–302. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.12.001>
- Erkens, G. (2012). Karakterisatie Plaat- en Lagunefacies NAWA/NAWO. Deltares rapport
- Glas, C. P., Maas, C., & Lambert, J. W. M. (1986). Projektgroep zoetwateronderzoek Kreekruggen.
- Goes, B. J. M., & Vernes, R. W. (2010). REGIS Zeeland Deelrapport C: Zoet, brak en zout grondwater.
- Guo, W., & Langevin, C. D. (2002). User's Guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow. USGS Techniques of Water Resources Investigations.
- IWACO. (1992a). Gebruiksmogelijkheden zoetwatersystemen in het kader van de voorbereiding van het waterhuishoudingsplan Zeeland, Eindrapport.
- IWACO. (1992b). Hydrologisch onderzoek kreekruggenstelsel Zuid-Beveland, Fase 2, Eindrapport: Figuren en Bijlagen, Aanvullend veldonderzoek en detaillering van de beschrijving van het (geo)hydrologisch systeem.
- IWACO. (1992c). Hydrologisch onderzoek kreekruggenstelsel Zuid-Beveland, Fase 3: modellering, Eindrapport Deel II: Technische beschrijving Kreekruggen-model.
- IWACO. (1996). Praktijkproef beregeningsonttrekking kreekruggen.
- IWACO. (2000). Uitwerking praktijkproef beregening te Kreverhille.
- Jakovovic, D., Werner, A. D., & Simmons, C. T. (2011). Numerical modelling of saltwater upconing: Comparison with experimental laboratory observations. *Journal of Hydrology*, 402(3–4), 261–273. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.021>
- Kim, S. H., Ahn, K. H., & Ray, C. (2008). Distribution of discharge intensity along small diameter collector well laterals in a model riverbed filtration. *Journal of Irrigation and Drainage*. E. – ASCE.
- Klein Tank, A., Beersma, J., Bessembinder, J., Hurk, B. van den, & Lenderink, G. (2015). KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie.

- KNMI. (2006). KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands.
- Langevin, C. D. (2008). Modeling axisymmetric flow and transport. *Ground Water*, 46(4), 579–90. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00445.x>
- Langevin, C. D., Thorne, D. T., Dausman, A. M., Sukop, M. C., & Guo, W. (2007). SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport: US Geological Survey Techniques and Methods Book 6, Chapter A22.
- Mann, M. A. M. (1985). Zoetwater onderzoek Zeeland Infiltratie Praktijkproef Kapelle.
- Mann, M. A. M. (1986). Het effect van grondwateronttrekking doormiddel van horizontale drains op de zoetwatervoorraad in de kreekrug van Heinkensand.
- Mann, M. A. M. (1987). Infiltratiepraktijkproef Kapelle.
- NHV-Werkgroep Verdamping. (2015). Verdamping in de hydrologie, NHV-Special 8, 2015.
- Oude Essink, G. H. P., Van Baaren, E. S., & De Louw, P. G. B. (2010). Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. *Water Resources Research*, 46(10). <https://doi.org/10.1029/2009WR008719>
- Oude Essink, G. H. P., Van Baaren, E. S., Zuurbier, K. G., Velstra, J., Veraart, J., Brouwer, W., ... Schroevers, M. (2014). GO-FRESH: Volarisatie kansrijke oplossingen voor robuuste zoetwatervoorziening, KvK rapport.
- Pauw, P. S. (2015). Field and Model Investigations of Freshwater Lenses in Coastal Aquifers. Wageningen University.
- Pauw, P. S., van Baaren, E. S., Visser, M., de Louw, P. G. B., & Essink, G. H. P. O. (2015). Increasing a freshwater lens below a creek ridge using a controlled artificial recharge and drainage system: a case study in the Netherlands. *Hydrogeology Journal*, 23(7), 1415–1430. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1264-z>
- Pauw, P. S., van der Zee, S. E. A. T. M., Leijnse, A., & Oude Essink, G. H. P. (2016). Saltwater Upconing Due to Cyclic Pumping by Horizontal Wells in Freshwater Lenses. *Groundwater*, 54(4), 521–531. <https://doi.org/10.1111/gwat.12382>
- Projectgroep Zoetwateronderzoek. (1986). Zoetwaterinfiltratieproef Kapelle.
- Provincie Zeeland. (2002). Samen omgaan met (grondwater). Grondwaterbeheersplan 2002-2007.
- RGD. (1970). Geologische kaart van Nederland 1:50.000. Kaartbladen: Beveland (1978); Zeeuwsch-Vlaanderen West en Oost (1977); Walcheren (1972); Schouwen-Duiveland (1970).
- Royal Haskoning. (2006). Voortzetting praktijkproef berekening Kreverhille; Resultaten en conclusies geoelectrisch en geomagnetisch onderzoek 2002-2004.
- Rushton, K. R., & Brassington, F. C. (2013a). Hydraulic behaviour and regional impact of a horizontal well in a shallow aquifer: example from the Sefton Coast, northwest England (UK). *Hydrogeology Journal*, 21(5), 1117–1128. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-0985-0>
- Rushton, K. R., & Brassington, F. C. (2013b). Significance of hydraulic head gradients within horizontal wells in unconfined aquifers of limited saturated thickness. *Journal of Hydrology*, 492, 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.006>
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 18–39. <https://doi.org/10.1007/s10040-0010176-2>
- Scheldestromen, W. (2013). Beleidsnota grondwater Versie: 3.5.
- Snepvangers, J. J. J. C., & Vernes, R. W. (2010). REGIS Zeeland Deelrapport D: Stijghoogteverdeling in het eerste watervoerende pakket. *regis2010d*.
- Shah, N., Nachabe, M., & Ross, M. (2007). Extinction depth and evapotranspiration from ground water under selected land covers. *Ground Water*, 45(3), 329–338. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00302.x>
- Simmons, C. T., Fenstemaker, T. R., & Sharp, J. M. (2001). Variable-density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media: approaches, resolutions and future challenges. *Journal of Contaminant Hydrology*, 52(1–4), 245–75. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11695743>
- Stafleu, J., & Gunnink, J. (2016). Hydraulische parameterisering van GeoTOP Zeeland.
- Stafleu, J., Maljers, D., & Gunnink, J. L. (2011). 3D modelling of the shallow subsurface of Zeeland, the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences / Geologie En Mijnbouw*, 90(4), 293–310.

- Stafleu, J., Maljers, D., Gunnink, J. L., & Menkovic, A. (2010). 3D Subsurface modelling of Zeeland. *Frontiers in Shallow Subsurface Technology*, 20–23.
- Stafleu, J., Maljers, D., Gunnink, J. L., Menkovic, A., & Busschers, F. S. (2011). 3D modelling of the shallow subsurface of Zeeland, the Netherlands. *Geologie En Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences*, 90(4), 293–310. <https://doi.org/10.5242/iamg.2011.0076>
- Tarnish, M. (1992). Combined mathematical model of flow in an aquifer-horizontal well system. *Ground Water*, 30, 931–935.
- Theis, C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Transactions American Geophysical Union*, 16, 519–524.
- TNO-IGG. (1982). Grondwaterkaart van Nederland; Inventarisatierapport Zeeuwsch-Vlaanderen; Kaartblad 47 Oost, 48, 49 West, 53 Oost, 54, 55 West; Rapportnr. GWK 30.
- van Baaren, E. S., Delsman, J. R., Karaoulis, M., Pauw, P. S., Vermaas, T., Bootsma, H., ... Meyer, U. (2017). FRESHEM Zeeland - FRESH Salt groundwater distribution by Helicopter ElectroMagnetic survey in the Province of Zeeland. *Deltares Report 1209220*, 141.
- Van Baaren, E. S., Oude Essink, G. H. P., Janssen, G. M. C. M., De Louw, P. G. B., Heerdink, R., & Goes, B. J. M. (2016). Verzoeting en verzilting freatisch grondwater in de Provincie Zeeland, Rapportage 3D regionaal zoet-zout grondwater model.
- Van Dam, J. C. (1983). The shape and position of the salt water wedge in coastal aquifers. In *Proceedings of the Hamburg Symposium on Relation of Groundwater Quantity and Quality*. IAHS 146 (pp. 59–75).
- van den Hurk, B., Siegmund, P., Klein Tank, A., Attema, J., Bakker, A., Beersma, J., ... van Zadelhoff, G. (2014). KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective. *Scientific Report WR2014-01*, KNMI, De Bilt, The Netherlands. www.climatescenarios.nl, (May), 115. Retrieved from www.climatescenarios.nl
- Van Meerten, J. J. (1986). *Kunstmatige Infiltratie in Kreekruggen*. Delft.
- Vernes, R. W. (2010). *REGIS Zeeland Deelrapport A: Maaiveld en waterbodemoogte Samenvatting*.
- Vernes, R. W., Hummelman, H. J., & Menkovic, A. (2010). *REGIS Zeeland Deelrapport B: Hydrogeologische opbouw en hydraulische eigenschappen van Holocene afzettingen*.
- Voortman, B., Witte, J., Rheenen, H. Van, Bosveld, F., Elbers, J., Bolt, F. Van Der, ... Bolman, A. (2016). Een nieuwe en handzame lysimeter : eerste stap naar een nationaal netwerk voor de werkelijke verdamping ?, 26(2), 49–64.
- Vos, P. (2015). *Origin of the Dutch Coastal Landscape. Long-term landscape evolution of the Netherlands during the Holocene, described and visualized in national, regional and local palaeogeographical map series*. Utrecht University.
- Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E. A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., ... Barry, D. A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, 51, 3–26. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.004>
- Werner, A. D., Jakovovic, D., & Simmons, C. T. (2009). Experimental observations of saltwater up-coning. *Journal of Hydrology*, 373(1–2), 230–241. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.05.004>
- Zheng, C., & Bennett, G. (2002). *Applied Contaminant Transport Modeling (2nd ed.)*. John Wiley & Sons Ltd.
- Zurbier, K. G., Kooiman, J. W., Groen, M. M. A., Maas, B., & Stuyfzand, P. J. (2014). Enabling Successful Aquifer Storage and Recovery of Freshwater Using Horizontal Directional Drilled Wells in Coastal Aquifers. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1–7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000990](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000990).
- Zurbier, K. G., Kooiman, J. W., Maas, B., Groen, M. M. A., & Stuyfzand, P. J. (2015). Enabling Successful Aquifer Storage and Recovery of Freshwater Using Horizontal Directional Drilled Wells in Coastal Aquifers. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(3), B4014003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000990](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000990)

8 Bijlagen

A Verantwoording van de gridresolutie

A.1 Algemeen

Bij numerieke simulaties van zoutwater opkegeling hebben de afmetingen van de cellen in het numerieke grid (de gridresolutie) een belangrijke invloed op de resultaten. De schaal waarop opkegeling van zout grondwater in de provincie Zeeland plaatsvindt is naar verwachting in de orde van decimeters tot meters. Voor het expliciet simuleren van deze zoutwater opkegeling is minimaal een vergelijkbare gridresolutie nodig. Het belangrijkste nadeel van een hoge gridresolutie is de langere rekentijd ten opzichte van modellen met een lage gridresolutie. Daarom zijn modellen met een hoge gridresolutie vaak lokale modellen met een beperkt ruimtelijk bereik. Regionale modellen hebben een lagere resolutie dan lokale modellen om de rekentijd realistisch te houden voor het simuleren van regionale processen. Vanwege de lage gridresolutie zijn regionale modellen niet geschikt voor het expliciet simuleren van deze zoutwater opkegeling.

In het geval van talrijke numerieke simulaties op lokale schaal, bijvoorbeeld voor een gevoeligheidsanalyse, is het belangrijk om een optimale (laagste) gridresolutie te hanteren voor een efficiënte (minimale) rekentijd en geheugencapaciteit. De optimale gridresolutie kan een subjectieve keuze zijn. In het geval van zoutwater opkegeling kan men bijvoorbeeld genoegen nemen met een onnauwkeurigheid van een meter voor het simuleren van de opkegeling direct onder de onttrekking. Deze onnauwkeurigheid bepaalt men aan de hand van een simulatie met een (zeer) hoge resolutie, wat als referentie dient. Een andere manier om de optimale gridresolutie te kiezen is om deze stapsgewijs verhogen, totdat de uitkomsten van de simulatie bij verdere verfijning geen noemenswaardige verschillen oplevert. Deze procedure wordt ook wel 'gridconvergentie test' genoemd en is ook toegepast in deze studie.

Voor de gridconvergentietest is gekozen voor twee typen modellen. Beide modellen zijn, vanwege het beperken van de rekentijd, tweedimensionaal en worden gebruikt om de opkegeling van zout grondwater in dwarsdoorsnede te simuleren. In het 'X-model' is de dwarsdoorsnede loodrecht op de strekking van de horizontale onttrekking, in het 'Y-model' is de dwarsdoorsnede parallel aan de onttrekking.

A.2 X-model

A.2.1 Methode

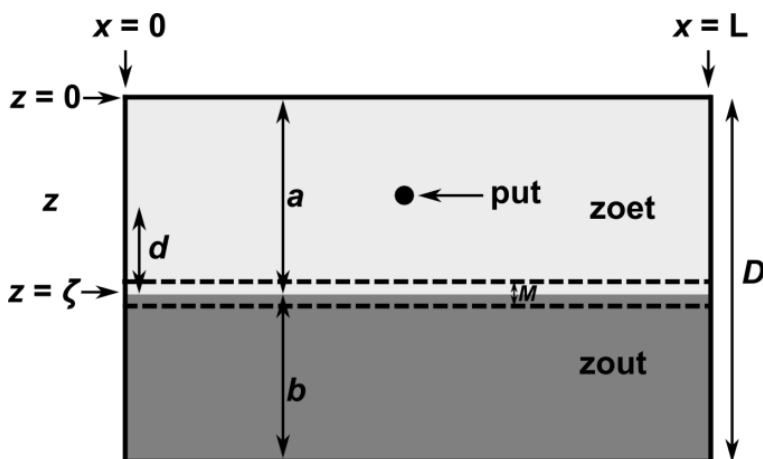
De opzet van het X-model is weergegeven in Figuur A1. In Figuur A2 zijn de bijbehorende randvoorwaarden van het model weergegeven. De totale lengte 200 m, de diepte 20 m. Aan de randen van het model is een vaste stijghoogte aanwezig over de gehele diepte. De drukverdeling is hier hydrostatisch (geen verticale stroming) en de concentratie is constant in de tijd. Op $x = 100$ m en $z = -5$ m is een onttrekking aanwezig. Deze onttrekking onttrekt grondwater met een constant debiet van $0.25 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. De simulatietijd bedraagt 182 dagen (ongeveer een half jaar).

In de simulatie wordt met relatieve concentraties gerekend. 0 is hierbij de minimale concentratie, 1 de maximale concentratie. De dichtheid van het grondwater hangt lineair af van de concentratie. De dichtheid van het grondwater bij een concentratie van 0 is 1000 kg

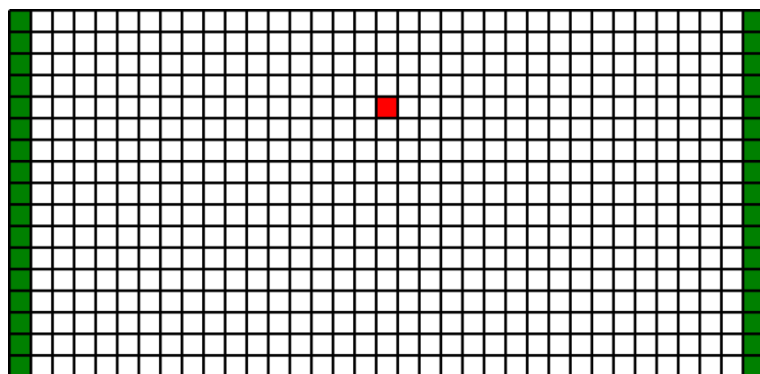
m^{-3} , de dichtheid van het grondwater bij een concentratie van 1 is 1023 kg m^{-3} . Van -5 tot -20 m is de initiële concentratie 1. De simulaties zijn uitgevoerd met de numerieke modelcode SEAWAT.

Met het X-model zijn simulaties zijn uitgevoerd met verschillende gridresoluties, elk met een verschillende karakteristieke kolombreedte (dx) en laagdikte (dz) (Tabel). De horizontale positie van het knooppunt van de modelcel waarin de onttrekking zich bevindt is in elk van de simulaties gelijk aan $x = 100 \text{ m}$. Om dit te realiseren zijn de breedtes van de eerste en laatste kolom aangepast ($0.5dx$). Ook de dikte van de zoetwaterkolom (a) en de verticale positie van het knooppunt van de cel waarin zich de onttrekking bevindt is in elke simulatie gelijk. Hiervoor zijn de diktes van de lagen direct onder en boven de laag waarin zich de onttrekking bevindt aangepast ($0.5dx$).

Naast variaties van de gridresolutie zijn ook de TVD en MOC opties voor het simuleren van advectie vergeleken. Ook deze methodes kunnen een invloed hebben op de gesimuleerde concentraties. Voor een nadere toelichting op het verschil tussen deze methodes wordt verwezen naar Zheng & Bennett (2002).



Figuur A1 Modelopzet van de gridconvergentie test in het X-model.



■ constante stijghoogte; hydrostatische drukverdeling

■ onttrekking

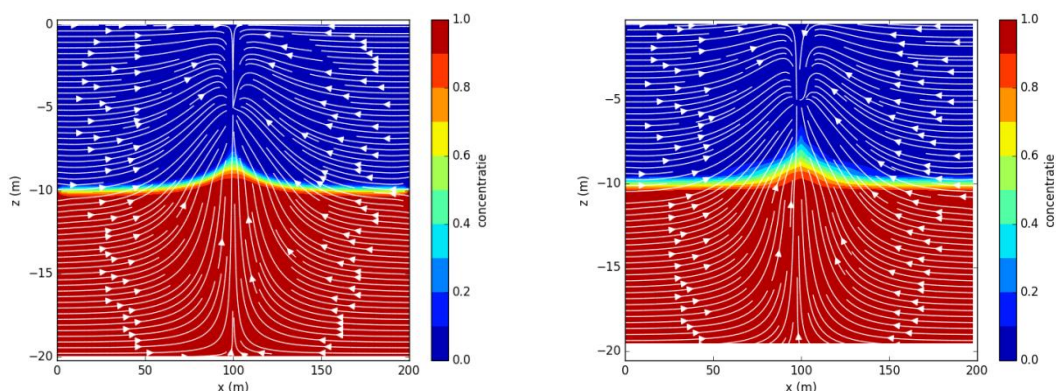
Figuur A2 Randvoorwaarden in het model van de gridconvergentie test in het X-model.

Tabel A1 Toegepaste dx en dz in de verschillende simulaties voor de gridconvergentie test.

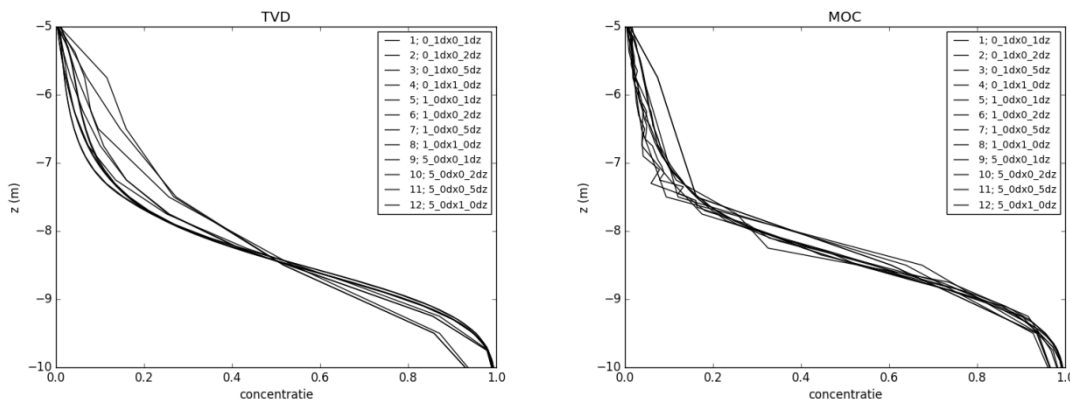
TVD			MOC		
simulatiernr.	dx (m)	dz (m)	simulatiernr.	dx (m)	dz (m)
1	0.1	0.1	1	0.1	0.1
2	0.1	0.2	2	0.1	0.2
3	0.1	0.5	3	0.1	0.5
4	0.1	1.0	4	0.1	1.0
5	1.0	0.1	5	1.0	0.1
6	1.0	0.2	6	1.0	0.2
7	1.0	0.5	7	1.0	0.5
8	1.0	0.1	8	1.0	0.1
9	5.0	0.1	9	5.0	0.1
10	5.0	0.2	10	5.0	0.2
11	5.0	0.5	11	5.0	0.5
12	5.0	1.0	12	5.0	1.0

A.2.2 Resultaten

Ter illustratie van het effect van de gridresolutie zijn in Figuur A3 de resultaten van simulaties 1 en 12 weergegeven. Zoals verwacht is de concentratieverdeling van de zoutwateropkegeling onder de onttrekking in simulatie 1 (hoogste gridresolutie) minder geleidelijk dan in simulatie 12 (laagste gridresolutie). Een nadere beschouwing van de verschillende simulatieresultaten is gedaan op basis van de concentratieverdeling direct onder de onttrekking (op $x = 100$ m). De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur A4. Ook hier zijn duidelijke verschillen waarneembaar tussen de simulaties. De verschillen treden met name op bij de lage concentraties in het bovenste deel tussen de onttrekking en de diepte van het originele grensvlak (ζ). De grotere spreiding van de concentratieverdeling bij de TVD simulaties geeft aan dat de gridresolutie een grotere invloed heeft bij TVD simulaties dan bij MOC simulaties. Een aantal van de MOC simulaties tonen echter een (onrealistisch) grillig verloop van de concentratieverdeling onder de onttrekking.

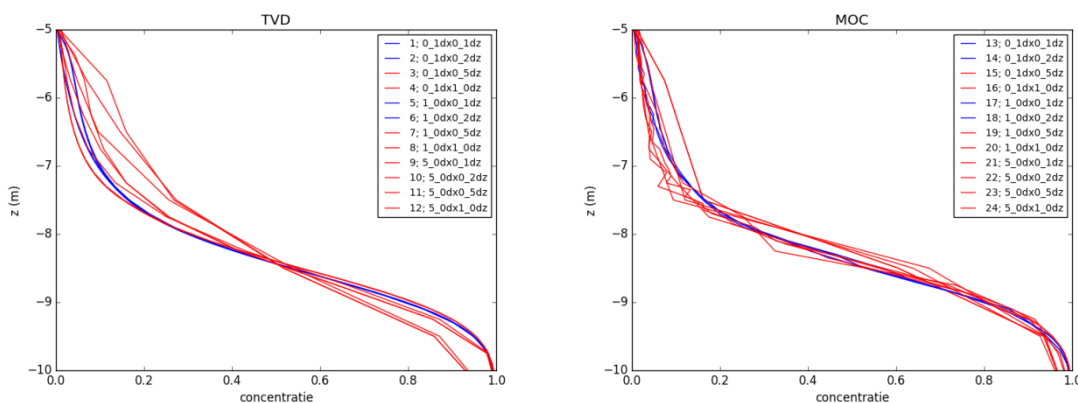


Figuur A3 Concentratieverdeling aan het einde van simulaties 1 (hoogste gridresolutie bij de TVD simulaties) en 12 (laagste gridresolutie bij de TVD simulaties). Weergegeven zijn de stroombanen (in wit) en de concentratiecontouren (in kleur).



Figuur A4 Concentratieverdeling op $x = 100$ m (direct onder de onttrekking) voor simulaties 1-12 (links) en 13-24 (rechts).

De verschillende simulaties lijken te convergeren naar eenzelfde concentratieverdeling onder de onttrekking. In Figuur A5 zijn met blauwe lijnen de simulaties weergegeven waar de concentratieverdeling binnen acceptabele grenzen (enkele decimeters) overeen komt. Dit zijn de TVD simulaties 1, 2, 5 en 6 en MOC simulaties 13, 14, 17 en 18. Op basis van deze resultaten is besloten om voor de numerieke simulaties in deze studie te kiezen voor een dx van 1.0 m en een dz van 0.2 m.

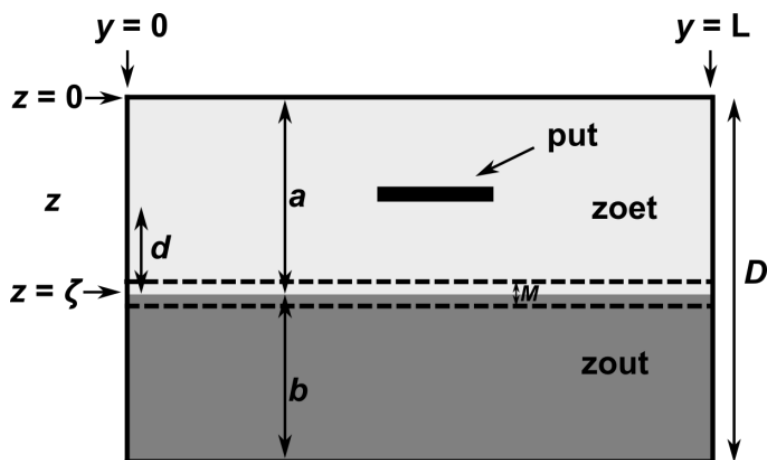


Figuur A5 Concentratieverdeling op $x = 100$ m (direct onder de onttrekking) voor simulaties 1-12 (links) en 13-24 (rechts). In blauw zijn de simulaties weergegeven waarin de concentratieverdeling binnen acceptabele nauwkeurigheid is gesimuleerd. De rode lijnen geven de overige simulaties weer.

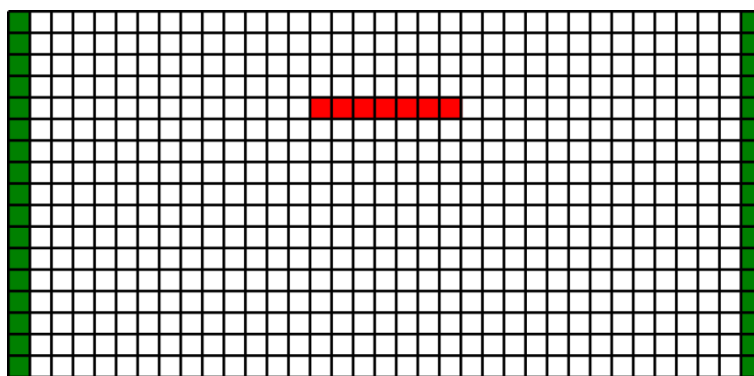
A.3 Y-model

A.3.1 Methode

De opzet van het Y-model is vrijwel gelijk aan de opzet van het X-model. Het Y-model verschilt van het X-model in dat de oriëntatie parallel aan de onttrekking is. De lengte van de onttrekking bedraagt 80 m. Het totale debiet van de onttrekking is $0.5 \text{ m}^3/\text{d}$. Hierbij is aangenomen dat er per lengte onttrekking even veel water wordt onttrokken. Dit is, zoals in hoofdstuk 3 is beschreven, een versimpeling van de werkelijkheid. Echter, voor deze gridconvergentietest is dit minder van belang. Op basis van de resultaten van het X-model is gekozen voor een laagdikte van 0.2 m en de TVD solver. Alleen de breedte van de cellen is gevarieerd (0.1, 1.0, 5.0 en 10.0 m).



Figuur A6 Modelopzet van de gridconvergentie test in het Y-model.



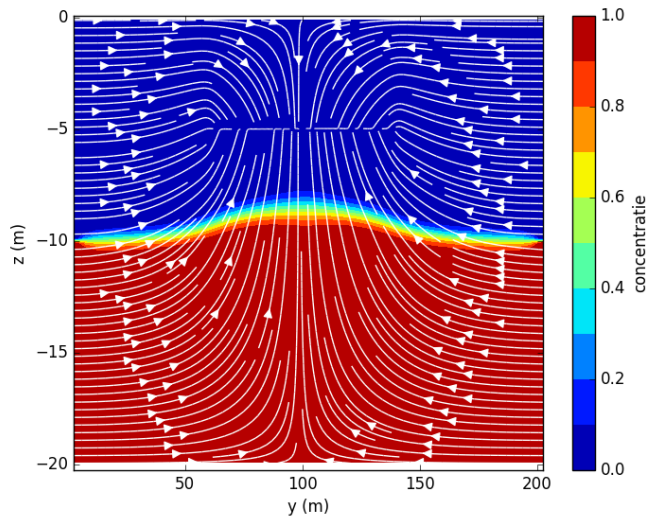
■ constante stijghoogte; hydrostatische drukverdeling

■ onttrekking

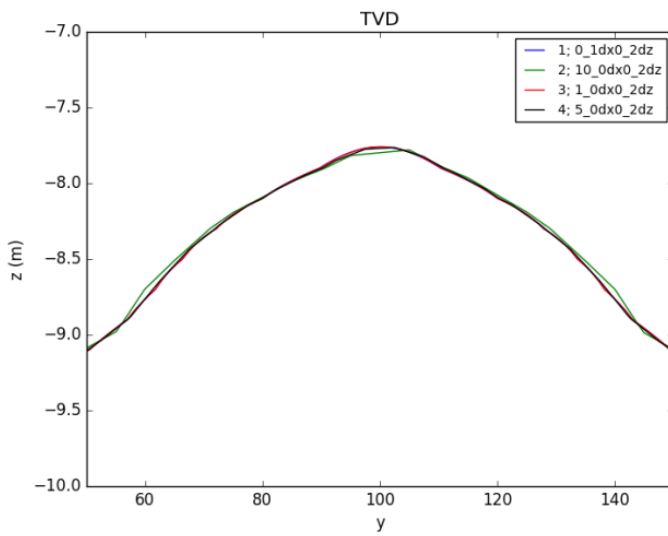
Figuur A7 Randvoorwaarden in het model van de gridconvergentie test in het Y-model.

A.3.2 Resultaten

In Figuur A7 zijn de concentratiecontouren en stroombanen van de simulatie met $dy = 5.0$ m weergegeven. Zoals verwacht vindt opkegeling plaats over de gehele lengte van de onttrekking. In Figuur A8 zijn de resultaten van de vier verschillende simulaties weergegeven, voor concentratiecontour $C = 0.1$. Daarin is te zien dat pas bij $dy = 10$ m verschillen optreden, maar te overzien zijn. Tussen $dy = 0.1$, 1.0 en 5.0 zijn de verschillen zeer gering. Op basis van de gridconvergentieresultaten is daarom gekozen voor een rijbreedte dy van 10 m en een kolombreedte dx van 1 m.



Figuur A7 Concentratiecontouren in het Y-model met $dy = 5$ m.



Figuur A8 Concentratiecontour $C = 0.1$ voor alle simulaties met het Y-model.

B Enquête beregening

Inzicht in beregenen in Zeeland

Het beregenen van gewassen is afhankelijk van vele factoren, zoals de teelt, de bodemopbouw, het plantstadium, het seizoen, de regelgeving en uiteraard de ervaring van de agrariër zelf. In Zeeland speelt daarnaast de aanwezigheid van brak en/of zout grondwater een rol. Met deze enquête willen wij een beeld vormen van de variatie van het beregenen van gewassen in Zeeland middels het onttrekken van grondwater met horizontale drains. De enquête kan anoniem ingevuld worden. Bij meerdere antwoorden omcirkelt u wat van toepassing is; bij open vragen kunt u zelf een antwoord invullen.

Wij danken u voor uw medewerking!

Teelt:

Fruittest // akkerbouw // tuinbouw // grasland // boomteelt // anders:

Gebied

Zeeuws Vlaanderen // Walcheren, Zuid-Beveland, Noord-Beveland // Schouwen-Duiveland, Tholen en St. Philipsland

Lengte drain:

50-75 m // 75-100 m // 100-125 m

Beregeningsgift per keer (in mm):

25 mm

Debiet per beregeningsgift (in kubieke meters per uur, of per dag):

30 m³/uur

Gemiddeld aantal beregeningsgiften per jaar

4

Momenten beregening

Voorjaar // voorjaar en zomer // zomer // hele jaar door

Problemen met brak/zout grondwater (te hoog zoutgehalte in het opgepompte grondwater in de drain)

Nooit // soms // veel

Gemiddelde, daadwerkelijk beregende oppervlakte per dag (in hectare)

0-5 hectare // 5 - 10 hectare // 5-15 hectare // 15-20 hectare

Inzicht in beregenen in Zeeland

Het beregenen van gewassen is afhankelijk van vele factoren, zoals de teelt, de bodemopbouw, het plantstadium, het seizoen, de regelgeving en uiteraard de ervaring van de agrariër zelf. In Zeeland speelt daarnaast de aanwezigheid van brak en/of zout grondwater een rol. Met deze enquête willen wij een beeld vormen van de variatie van het beregenen van gewassen in Zeeland middels het onttrekken van grondwater met horizontale drains. De enquête kan anoniem ingevuld worden. Bij meerdere antwoorden omcirkelt u wat van toepassing is; bij open vragen kunt u zelf een antwoord invullen.

Wij danken u voor uw medewerking!

Teelt:

Fruiteelt // akkerbouw // tuinbouw // grasland // boomteelt anders:.....

Gebied

Zeeuws-Vlaanderen // Walcheren, Zuid-Beveland, Noord-Beveland // Schouwen-Duiveland, Tholen en St. Philipsland

Lengte drain:

50-75 m // 75-100 m // 100-125 m

Beregeningsgift per keer (in mm):

passen de 20 en 30 mm

Debiet per beregeningsgift (in kubieke meters per uur, of per dag):

70 m³ per uur

Gemiddeld aantal beregeningsgiften per jaar

4

Momenten beregening

Voorjaar // voorjaar en zomer // zomer // hele jaar door

Problemen met brak/zout grondwater (te hoog zoutgehalte in het opgepompte grondwater in de drain)

Nooit // soms // veel

Gemiddelde, daadwerkelijk beregende oppervlakte per dag (in hectare)

0-5 hectare // 5 - 10 hectare // 5-15 hectare // 15-20 hectare

0-5 ha

5 ha 30 m³ =

Inzicht in beregenen in Zeeland

Het beregenen van gewassen is afhankelijk van vele factoren, zoals de teelt, de bodemopbouw, het plantstadium, het seizoen, de regelgeving en uiteraard de ervaring van de agrariër zelf. In Zeeland speelt daarnaast de aanwezigheid van brak en/of zout grondwater een rol. Met deze enquête willen wij een beeld vormen van de variatie van het beregenen van gewassen in Zeeland middels het onttrekken van grondwater met horizontale drains. De enquête kan anoniem ingevuld worden. Bij meerdere antwoorden omcirkelt u wat van toepassing is; bij open vragen kunt u zelf een antwoord invullen.

Wij danken u voor uw medewerking!

Teelt:

Fruittest // akkerbouw // tuinbouw // grasland // boomteelt anders:.....

Gebied

Zeeuws-Vlaanderen // Walcheren, Zuid-Beveland, Noord-Beveland // Schouwen-Duiveland, Tholen en St. Philipsland

Lengte drain:

50-75 m // 75-100 m // 100-125 m

Beregeningsgift per keer (in mm):

+ 20 tot 25 mm

Debiet per beregeningsgift (in kubieke meters per uur, of per dag):

.....

Gemiddeld aantal beregeningsgiften per jaar

In april... max 3 keer
In mei + 2 of 3 keer, rest niet

Momenten beregening

Voorjaar // voorjaar en zomer // zomer // hele jaar door

Problemen met brak/zout grondwater (te hoog zoutgehalte in het opgepompte grondwater in de drain)

Nooit // soms // veel

Gemiddelde, daadwerkelijk beregende oppervlakte per dag (in hectare)

0-5 hectare // 5 - 10 hectare // 5-15 hectare // 15-20 hectare

Inzicht in beregenen in Zeeland

Het beregenen van gewassen is afhankelijk van vele factoren, zoals de teelt, de bodemopbouw, het plantstadium, het seizoen, de regelgeving en uiteraard de ervaring van de agrariër zelf. In Zeeland speelt daarnaast de aanwezigheid van brak en/of zout grondwater een rol. Met deze enquête willen wij een beeld vormen van de variatie van het beregenen van gewassen in Zeeland middels het onttrekken van grondwater met horizontale drains. De enquête kan anoniem ingevuld worden. Bij meerdere antwoorden omcirkelt u wat van toepassing is; bij open vragen kunt u zelf een antwoord invullen.

Wij danken u voor uw medewerking!

Teelt:
~~Erft~~ // akkerbouw // ~~tuinbouw~~ // grasland // ~~beemtsland~~ // anders:.....

Gebied
~~Zeeuwse-Vlaanderen~~ // ~~Walcheren~~ // ~~Zuid-Beveland~~ // Noord-Beveland // ~~Schouwen~~ // ~~Roosendaal~~ // ~~Thurston~~ // ~~West-Beveland~~

Lengte drain:
 50-75 m // 75-100 m // 100-125 m

Beregeningsgift per keer (in mm):
20


Debiet per beregeningsgift (in kubieke meters per uur, of per dag):
30

Gemiddeld aantal beregeningsgiften per jaar
2

Momenten beregening
~~Voorjaar~~ // voorjaar en zomer // ~~zomer~~ // ~~hele-jaar-door~~

Problemen met brak/zout grondwater (te hoog zoutgehalte in het opgepompte grondwater in de drain)
 Nooit // soms // veel

Gemiddelde, daadwerkelijk beregende oppervlakte per dag (in hectare)
 0-5 hectare // ~~5-10 hectare~~ // ~~6-15 hectare~~ // ~~15-20 hectare~~



Inzicht in beregenen in Zeeland

Het beregenen van gewassen is afhankelijk van vele factoren, zoals de teelt, de bodemopbouw, het plantstadium, het seizoen, de regelgeving en uiteraard de ervaring van de agrariër zelf. In Zeeland speelt daarnaast de aanwezigheid van brak en/of zout grondwater een rol. Met deze enquête willen wij een beeld vormen van de variatie van het beregenen van gewassen in Zeeland middels het onttrekken van grondwater met horizontale drains. De enquête kan anoniem ingevuld worden. Bij meerdere antwoorden omcirkelt u wat van toepassing is; bij open vragen kunt u zelf een antwoord invullen.

Wij danken u voor uw medewerking!

Teelt:

Fullteelt // ~~akkerbouw~~ // tuinbouw // ~~groenteteelt~~ // ~~boemteelt~~ // anders:

Gebied

~~Zeeland~~ // ~~Schaerbeek~~ // ~~Walcheren~~ // ~~Zuid-Beveland~~ // ~~Noord-Beveland~~ // ~~Schouwen-Duiveland~~ // ~~Tholen en St. Philipsland~~

Lengte drain:

50-75 m // 75-100 m // 100-125 m

Beregeningsgift per keer (in mm):

5 - 35 mm

Debiet per beregeningsgift (in kubieke meters per uur, of per dag):

20 - 40 m³ / uur

60000
600 m³
→ 1 uur

Gemiddeld aantal beregeningsgiften per jaar

1 a 2

Momenten beregening

Voorjaar // voorjaar en zomer // zomer // hele jaar door

Problemen met brak/zout grondwater (te hoog zoutgehalte in het opgepompte grondwater in de drain)

Nooit // soms // veel

Gemiddelde, daadwerkelijk beregende oppervlakte per dag (in hectare)

0-5 hectare // 5 - 10 hectare // 5-15 hectare // 15-20 hectare

Inzicht in beregenen in Zeeland

Het beregenen van gewassen is afhankelijk van vele factoren, zoals de teelt, de bodemopbouw, het plantstadium, het seizoen, de regelgeving en uiteraard de ervaring van de agrariër zelf. In Zeeland speelt daarnaast de aanwezigheid van brak en/of zout grondwater een rol. Met deze enquête willen wij een beeld vormen van de variatie van het beregenen van gewassen in Zeeland middels het onttrekken van grondwater met horizontale drains. De enquête kan anoniem ingevuld worden. Bij meerdere antwoorden omcirkelt u wat van toepassing is; bij open vragen kunt u zelf een antwoord invullen.

Wij danken u voor uw medewerking!

Teelt:

Fruitteelt // akkerbouw // tuinbouw // grasland // boomteelt — anders:

Gebied

Zeeuws-Vlaanderen // Walcheren, Zuid-Beveland, Noord-Beveland // Scheuven-Dorveland, Tholen en St-Philipsland

Lengte drain:

50-75 m // 75-100 m // 100-125 m

hoog met behoud

Beregeningsgift per keer (in mm):

..... 25 mm

Debiet per beregeningsgift (in kubieke meters per uur, of per dag):

..... 60 m³

Gemiddeld aantal beregeningsgiften per jaar

..... 2-3

Momenten beregening

voorjaar // voorjaar en zomer // zomer // het jaarseizoen

Problemen met brak/zout grondwater (te hoog zoutgehalte in het opgepompte grondwater in de drain)

Nooit // soms // veel

hoog met

Gemiddelde, daadwerkelijk beregende oppervlakte per dag (in hectare)

0-5 hectare // 5 - 10 hectare // 5-15 hectare // 15-20 hectare

Inzicht in beregenen in Zeeland

Het beregenen van gewassen is afhankelijk van vele factoren, zoals de teelt, de bodemopbouw, het plantstadium, het seizoen, de regelgeving en uiteraard de ervaring van de agrariër zelf. In Zeeland speelt daarnaast de aanwezigheid van brak en/of zout grondwater een rol. Met deze enquête willen wij een beeld vormen van de variatie van het beregenen van gewassen in Zeeland middels het onttrekken van grondwater met horizontale drains. De enquête kan anoniem ingevuld worden. Bij meerdere antwoorden omcirkelt u wat van toepassing is; bij open vragen kunt u zelf een antwoord invullen.

Wij danken u voor uw medewerking!

Teelt:

Fruittesteelt // akkerbouw // tuinbouw // grasland // boomteelt // anders:

Gebied

Zeeuws Vlaanderen // Walcheren, Zuid-Beveland, Noord-Beveland // Schouwen-Duiveland // Tholen en St. Philipsland

Lengte drain:

50-75 m // 75-100 m // 100-125 m

NVT

Beregeningsgift per keer (in mm):

20 mm aangevoerd met vrachtwagens uit zomer

Debiet per beregeningsgift (in kubieke meters per uur, of per dag):

70 m³

Gemiddeld aantal beregeningsgiften per jaar

2

Momenten beregening

Voorjaar // voorjaar en zomer // zomer // hele jaar door

Problemen met brak/zout grondwater (te hoog zoutgehalte in het opgepompte grondwater in de drain)

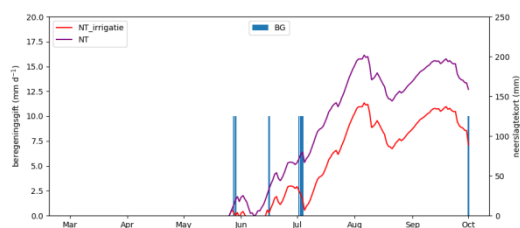
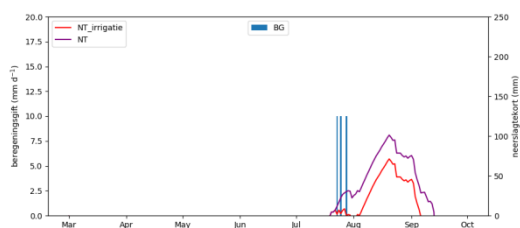
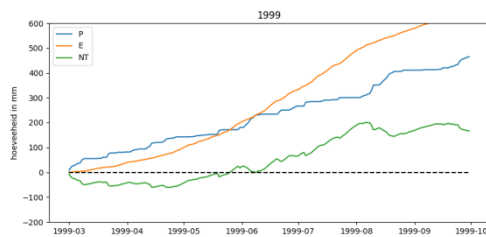
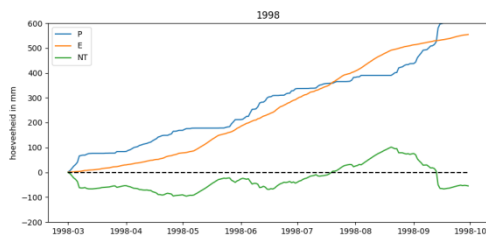
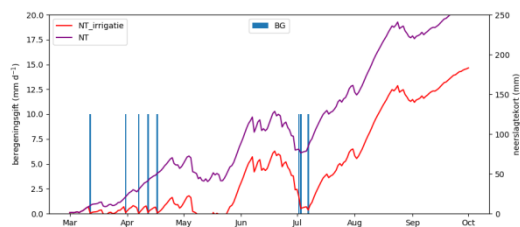
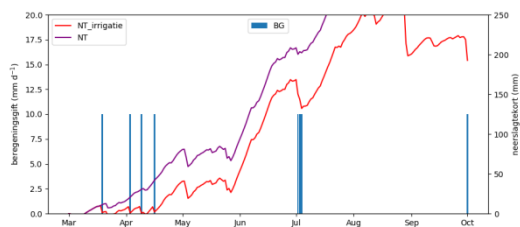
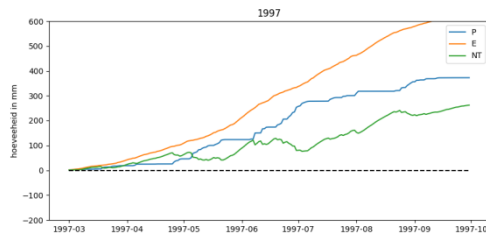
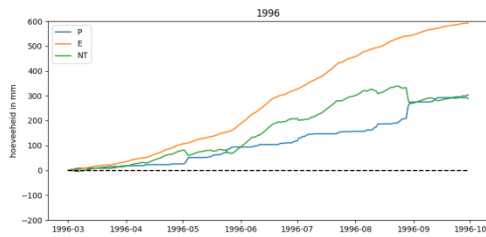
Nooit // soms // veel

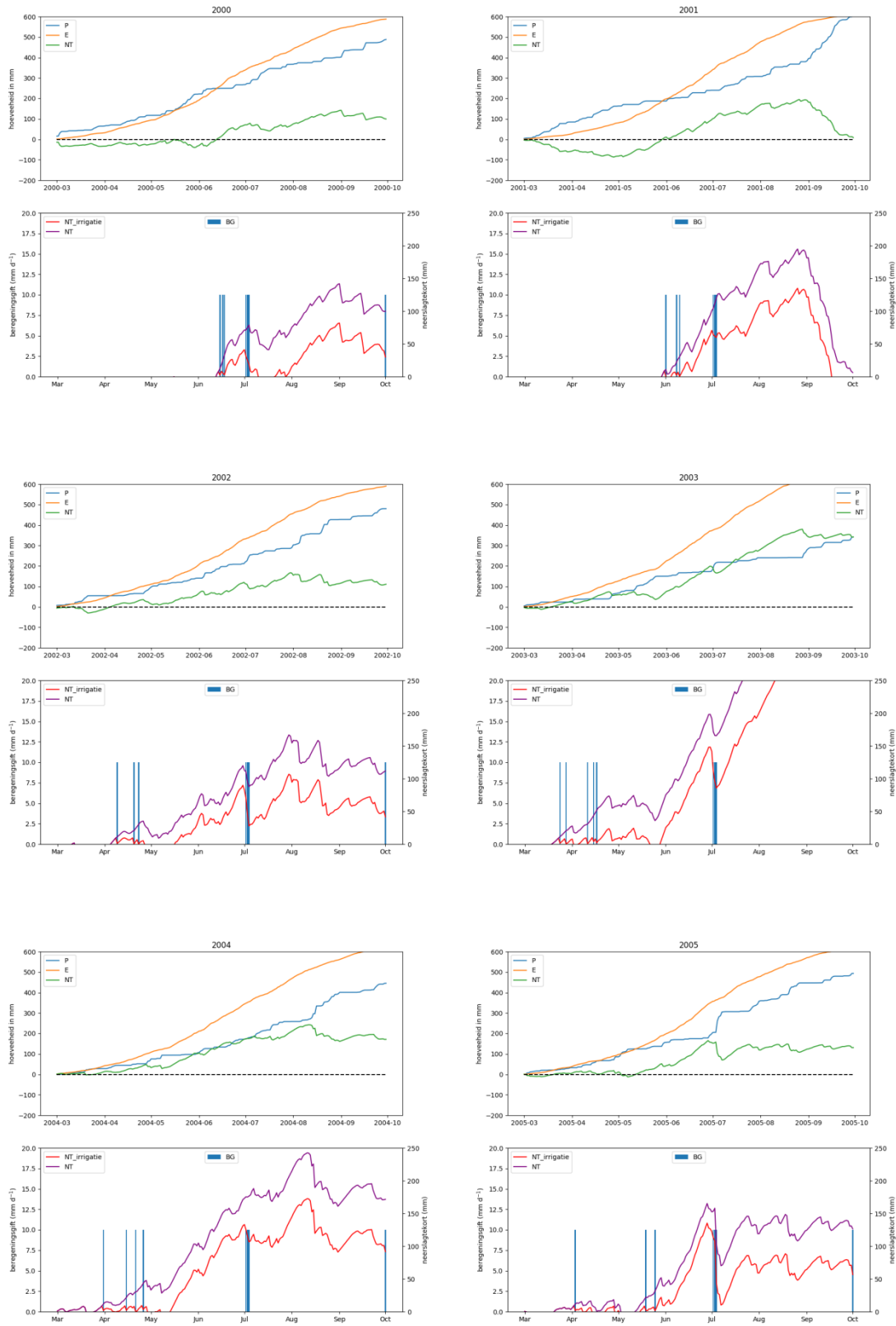
NVT

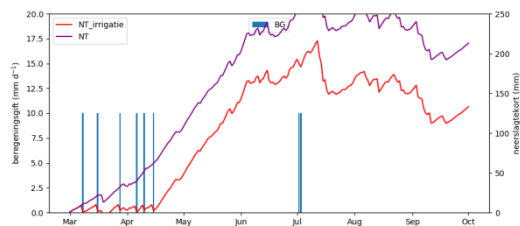
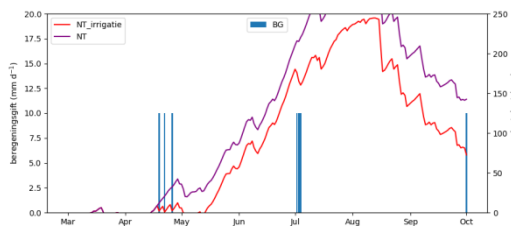
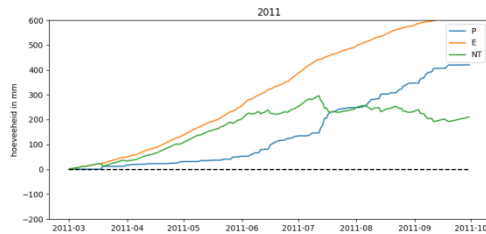
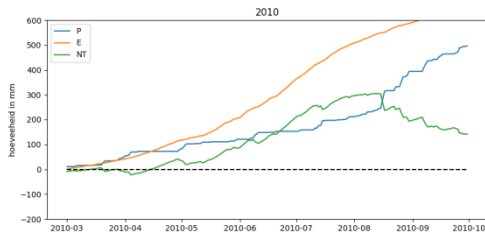
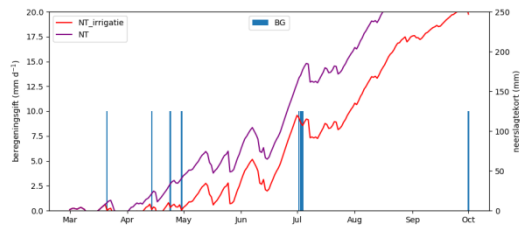
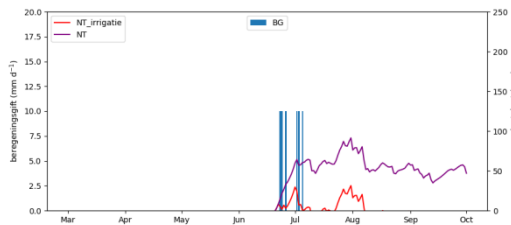
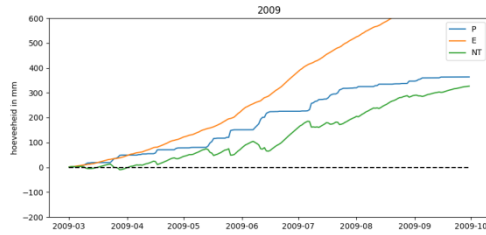
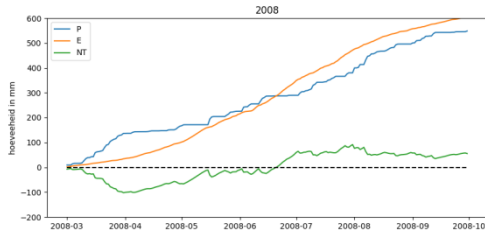
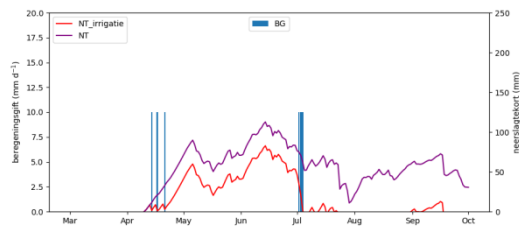
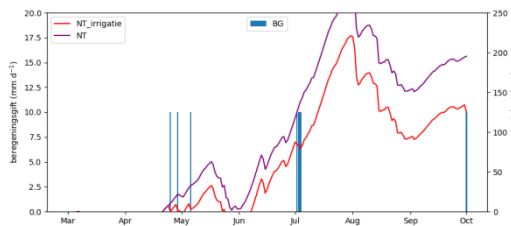
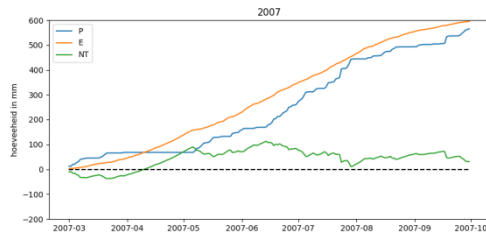
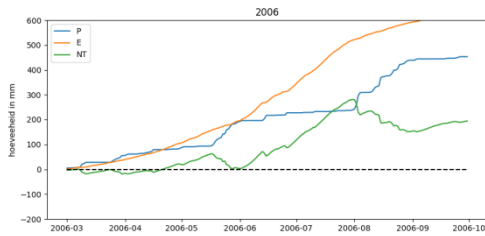
Gemiddelde, daadwerkelijk beregende oppervlakte per dag (in hectare)

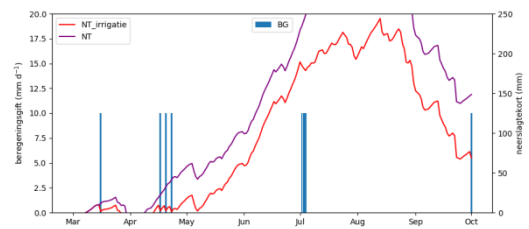
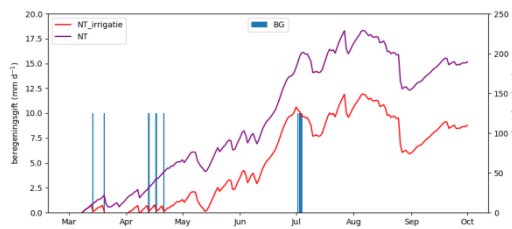
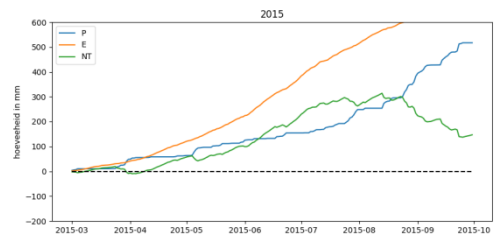
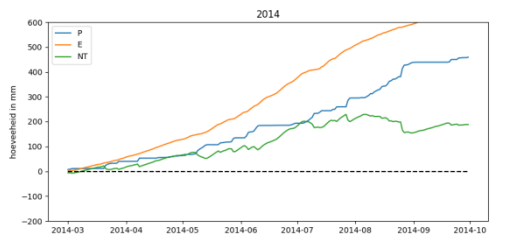
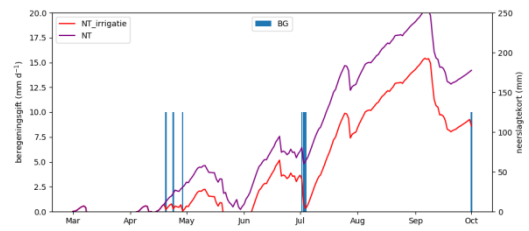
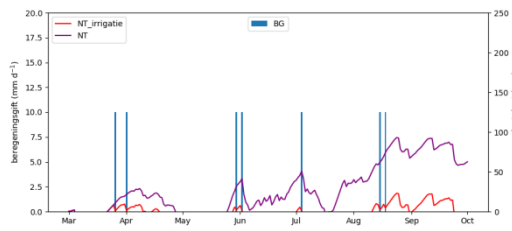
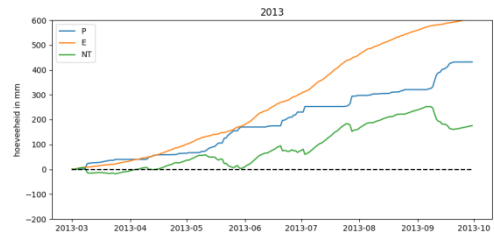
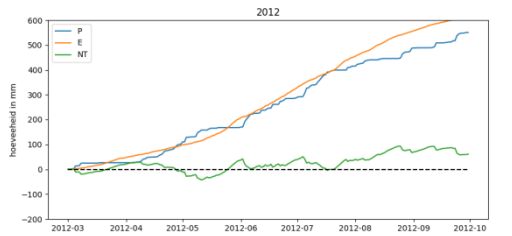
0-5 hectare // 5 - 10 hectare // 5-15 hectare // 15-20 hectare

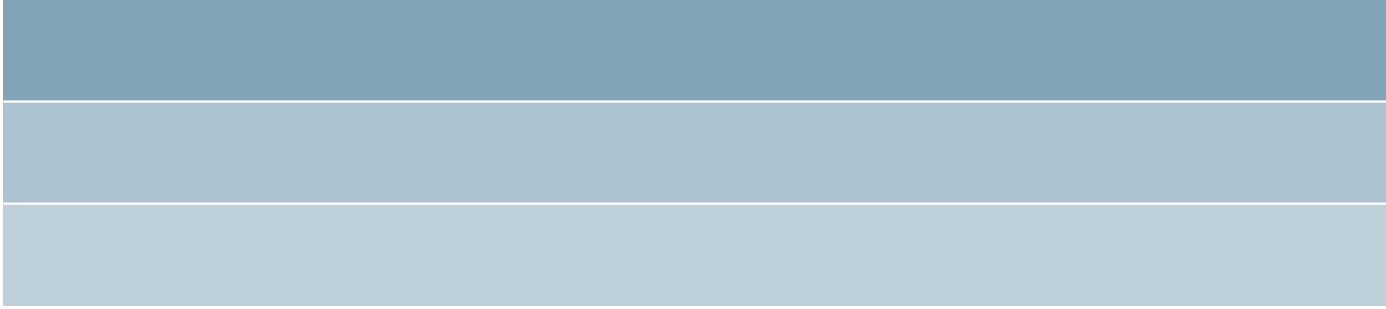
C Berekenende verdamping, neerslag, neerslagtekort en beregeningsgift 1996-2015











Deltares

PO Box 177
2600 MH Delft, The Netherlands
T +31 (0)88 335 82 73
info@deltares.nl
www.deltares.nl