

**Kustverbreding Hondsbossche
Zeewering: hydrologische
referentiesituatie, verwachte
binnendijkse verzoeting en mitigerende
maatregelen**

Definitief eindrapport 5 maart 2015

vrije Universiteit amsterdam



i.s.m.

Acacia Water

Samenvatting

Als gevolg van de zandsuppletie en het ontstaan van de nieuwe duinen voor de Hondsbossche en Pettemer Zeewering is het mogelijk dat de zoute kwel onder de dijk afneemt en het bovenste grondwater en het water in de sloten verzoeten. Deze verzoeting heeft gevolgen voor de flora en de fauna van dit zout tot brakwatergebied. Het doel van de referentiemeting is het huidige watersysteem in beeld te brengen en een voorstel te doen voor de monitoring voorafgaand (nulmeting) en na aanleg.

Om de verwachte verzoeting in de Lei- en Hargerpolder als gevolg van de kustversterking zo veel mogelijk te voorkomen en de huidige zoute condities te behouden is onderzoek uitgevoerd naar mogelijke mitigerende maatregelen. Dit heeft geleid tot de keuze voor een maatregel die financieerbaar is en ook recht doet aan de randvoorwaarden van water- en natuurbeheerders.

Colofon

Documenttitel	. Kustverbreding Hondsbossche Zeewering: hydrologische referentiesituatie, verwachte binnendijkse verzoeting en mitigerende maatregelen
Opdrachtgever	. Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Status	. Definitief eindrapport
Datum	. 5 maart 2015
Projectnummer	. 556
Projectteam	. Jouke Velstra (Acacia), Koos Groen (VU/Acacia), Sieger Burger (Acacia), Kyra Hu-a-ng (Acacia), Michel Groen (VU) en Jacob Oosterwijk (Acacia)

Disclaimer

Rapport: Aan dit rapport kunnen geen rechten worden ontleend. De auteurs zijn niet verantwoordelijk voor eventuele fouten of consequenties. Aanvullingen of verbeteringen zijn welkom via info@acaciawater.com

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doelstelling.....	1
1.3	Onderzoeksgebied.....	2
1.4	Beperkingen vanwege het broedseizoen	3
1.5	Leeswijzer	4
2	Aanpak en methoden	5
3	Systeembeschrijving polders	6
3.1	Systeembeschrijving grondwater	6
3.2	Polderbeheer	9
3.3	Zoet-zout verdeling	10
3.4	Hydrochemie en isotopen.....	19
3.5	Grondwater	22
3.6	Oppervlaktewaterstroming.....	25
3.7	Water- en zoutbalans	26
4	Systeembeschrijving duinen	29
4.1	Systeembeschrijving	29
4.2	Zout-zout verdeling.....	29
4.3	Verwachte veranderingen na zandsuppletie en duinvorming	31
5	Voorstel monitoring	32
5.1	Inleiding	32
5.2	Grondwater	32
5.3	Oppervlaktewater.....	35
5.4	Geofysische metingen	36
5.5	Acties voor monitoring	37
6	Verzoeting Lei- en Hargerpolder.....	40
6.1	Inleiding	40
6.2	Berekeningen met een numeriek grondwatermodel	41
6.3	Berekeningen met een waterbalansmodel	45
7	Mitigerende maatregelen Lei- en Hargerpolder	47
7.1	Inleiding	47
7.2	Van mogelijke naar realistische maatregelen	47
7.3	Effecten en effectiviteit maatregelen op de waterhuishouding	51

7.4	Conclusies.....	57
8	Conclusies en aanbevelingen	58
8.1	Referentiemeting	58
8.2	Verzoeting.....	59
8.3	Mitigerende maatregel.....	59
9	Literatuur.....	60

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Het voorliggende rapport bevat de resultaten van een hydrologisch onderzoek en mitigerende maatregelen, dat is uitgevoerd door de Vrije Universiteit Amsterdam in samenwerking met Acacia Water in het gebied achter de Hondsbosse Zeewering en de duinen bij het Zwanewater. Aanleiding voor het onderzoek is de (voorgenomen) zandsuppletie en het ontstaan van de nieuwe duinen voor de Hondsbosche en Pettemer Zeewering. Mogelijk dat de huidige zoute kwel onder de dijk zal afnemen en het bovenste grondwater en het water in de sloten in het gebied daarachter op termijn gaan verzoeten. Dit gebied heeft een hoge natuurwaarde vanwege de aan brak-zout water gerelateerde ecosystemen en waarvoor de komende jaren grondwater en oppervlaktewater zal worden gemonitord.

De achterliggende vragen van de monitoring zijn als volgt:

1. Treedt als gevolg van de zandsuppletie verzoeting op van het grondwater en oppervlaktewater ter plaatse van de zout- en brakwaterafhankelijke natuurgebieden achter de zeewering?
2. Indien verzoeting optreedt; hoe groot is deze verzoeting?
3. Indien verzoeting optreedt; in hoeverre verandert het zoutgehalte van het grondwater naar de diepte?
4. Indien verzoeting optreedt; wat is het verloop van de verzoeting van het grondwater en water in de sloten naar afstand vanaf de zeewering?
5. Indien een verandering van de grondwaterstand of de kweldruk in de duinen optreedt; hoe groot is de verandering en treedt een significante verandering op binnen vochtige duinvalleien en duinmeren, zoals het Zwanewater?
6. Zijn er meetbare veranderingen in de chemische samenstelling van het grondwater in de duinen?

De focus van de monitoring ligt op het meten van de ontwikkeling van de zoetwaterbel in het nieuwe duin (nu nog zee) en het tijdig waarnemen van verzoeting van het zout- en brakwater afhankelijke natuurgebied De Putten, direct achter de Hondsbosche en Pettemer Zeewering en op de Pettemer Duinen en Zwanewater en de Schoorlse Duinen. In een later stadium is het rapport aangevuld met de Hazepolder.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is een zogenaamde referentiemeting, als eerste deel van de nulmeting, ten behoeve van de bovengenoemde monitoring. Mogelijke veranderingen in de toekomst zullen met deze nulmeting worden vergeleken. De referentiemeting is tegelijkertijd een systeembeschrijving, die de basis vormt voor het ontwerp van het monitoringsysteem, welke de tweede doelstelling van deze studie vormt.

Het onderzoek spitst zich toe op de Lei- en Hargerpolder ten oosten van Hondsbosse Zeewering en het duingebied bij het Zwanewater ten noorden van Petten. Eerder is door Acacia (2013) een voorlopige notitie uitgebracht over de monitoring. Hierin is ook monitoring voorzien van de Schoorlse Duinen en

het Corfwater bij Petten. In deze duingebieden werd weinig effect verwacht. Om die reden is in het kader van deze opdracht geen nader onderzoek verricht in deze gebieden.

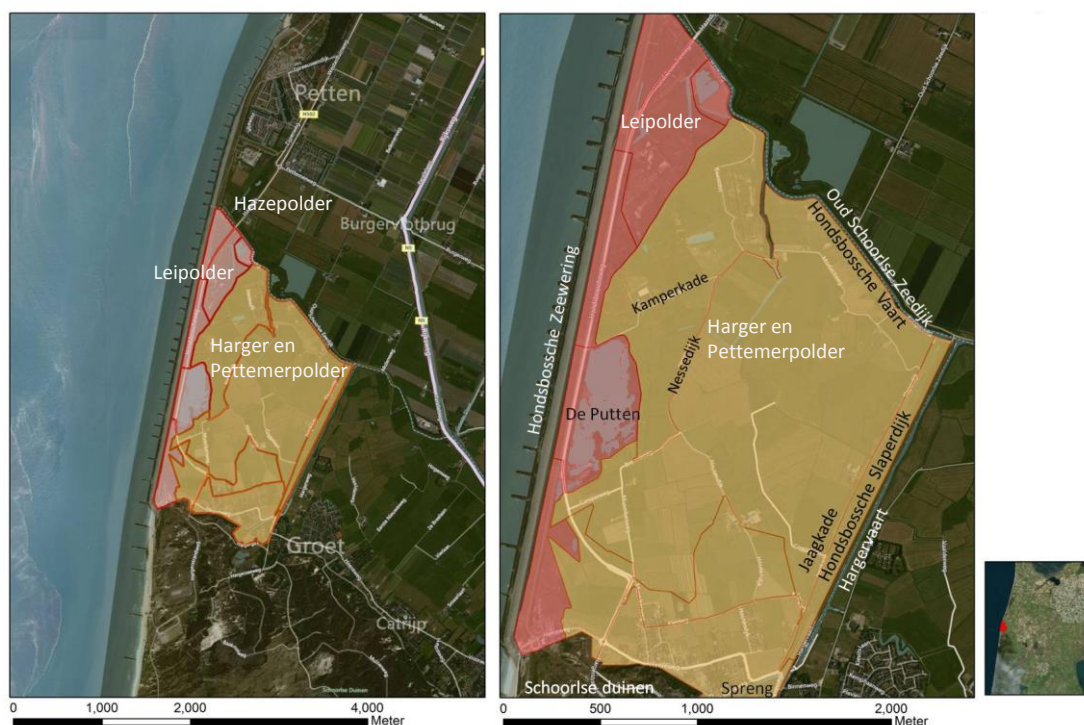
De derde doelstelling van dit onderzoek is om op basis van de verwachte veranderingen de meest kansrijke mitigerende maatregelen te bepalen die het behouden van het zeer waardevolle brakke ecosysteem mogelijk maken.

Referentiemeting en Nulmeting

Voorliggend onderzoek vormt de eerste fase van de nulmeting. In deze rapportage wordt dit onderzoek aangeduid als referentiemeting. De referentiemeting brengt de basissituatie in beeld en maakt onderdeel uit van de nulmeting. De nulmeting is de meetperiode van 1 jaar voorafgaand aan de uitvoering van de zandsuppletie en duinvorming.

1.3 Onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied betreft de Lei- en Hargerpolder en het duingebied bij het Zwanewater bij Petten. De Lei- en Hargerpolder bevinden zich direct ten oosten van de Hondsbossche Zeewering (Figuur 1).



Figuur 1 Locatie Leipolder (rood) en Hargerpolder (oranje) en naamgeving locaties.

Aan de zuidzijde worden de polders begrensd door de Schoorlse Duinen (Camperduin), aan de oostzijde door de Slaperdijk met daarachter de Hargervaart en aan de noordzijde door de Hondsbossche Vaart met daarachter de Oude Schoorlse Zeedijk. De polder maakt deel uit van het beheersgebied van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK).

Water uit de Leipolder en Hargerpolder wordt in het noorden van het gebied uitgeslagen op de Hondsbossche Vaart, die samen met de Hargervaart deel uitmaakt van de boezem van HHNK. Water wordt ingelaten vanuit sprengen, die in het zuidelijke duincomplex ontspringen. Het land is hoofdzakelijk in gebruik als hooi- en weideland, hoewel veel percelen in handen zijn van Natuurmonumenten en daarom een natuurdoelstelling hebben. Al vanaf de 9^{de} eeuw begon men dit gebied te ontginnen. Echter, pas in de 15^{de} eeuw werd het bedijkt door de aanleg van de Schoorlse

Zeedijk en de Hondsbossche Zeewering. Er waren menigmaal doorbraken in de zeewering, die pas eind 19^{de} eeuw zijn huidige positie verkreeg na versterking met basaltblokken. Voor de aanleg en onderhoud van de zeewering is grond gebruikt uit het gebied achter de dijk, waardoor de plas De Putten is ontstaan (Figuur 1). Ook voor de Slaperdijk is grond afgegraven in de strook tussen het Jaagpad en de dijk (Figuur 1). waardoor dit gebied wat lager ligt.

Het studiegebied van de Lei- en Hargerpolder is in 1995 uitgebreid onderzocht door het Staringcentrum/DLO (Mulder en Spoelstra, 1995). Het onderzoek toonde aan dat zich gradiënten in zoutconcentratie voordeden zowel in grond als oppervlaktewater. De meest zoute delen bevonden zich direct achter de Zeewering, de zoetere delen ten noorden van het duincomplex. Een meer recent hydrologisch onderzoek, dat direct verband houdt met dit onderzoek is de modelstudie van Arcadis (2012). Uit deze studie kwam naar voren dat het zoutgehalte van het kwelwater in een zone van 50 tot 300 m achter de zeewering op termijn zou kunnen afnemen.

Het andere onderzoeksgebied bevindt zich in het duingebied 't Zwanenwater ten noorden van Petten tussen de kust en de plas Het Tweede Water (Figuur 2). Dit natuurgebied wordt beheerd door Natuurmonumenten. In dit gebied wordt geen actief waterbeheer toegepast. Het belangrijkste hydrologische onderzoek in dit gebied is uitgevoerd door Stuyfzand (1989).



Figuur 2 Locatie Tweede Water

1.4 Beperkingen vanwege het broedseizoen

Helaas was het gebied beperkt toegankelijk in verband met het broedseizoen wat loopt van half maart tot half juni. Hierdoor was het niet mogelijk om overal in de polder metingen uit te voeren, peilbuizen te plaatsen dan wel te bemonsteren.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt een kort overzicht gegeven van de aanpak en methoden. De onderzoeksmethoden worden meer gedetailleerd beschreven in Bijlage 7. Daarna volgen de systeembeschrijvingen in de Hoofdstukken 3 en 4 van de Lei- en Hargerpolder en het duingebied bij het Zwanewater. In hoofdstuk 5 wordt een voorstel gedaan voor de benodigde hydrologische monitoring op basis van de systeembeschrijvingen en de verwachte veranderingen als gevolg van de zandsuppletie zoals beschreven door Arcadis (2012). In hoofdstuk 6 is met behulp van verschillende rekenmethoden bepaald wat de impact van de zoete kwel uit de nieuwe duinen is op de Lei- en Hargerpolder. Vervolgens zijn in hoofdstuk 7 mitigerende maatregelen bepaald, waaruit de meest kansrijke is gekozen. Tenslotte worden in Hoofdstuk 8 de belangrijkste conclusies en aanbevelingen gepresenteerd.

2 Aanpak en methoden

Voor dit onderzoek is bestaande literatuur bestudeerd en zijn basisgegevens uit allerlei databases verzameld en geïnterpreteerd. Dit betreft:

- Gegevens uit de REGIS en Dinoloket m.b.t. bodemopbouw, grondwaterstanden en grondwaterkwaliteit
- Provinciale gegevens m.b.t. grondwaterkwaliteit
- Gegevens van HHNK m.b.t. uitslag van gemalen van de Lei- en Hargerpolder en analyses van oppervlaktewater
- KNMI gegevens van de stations Petten en De Kooy m.b.t. neerslag en Makkink verdamping.
- AHN data
- Leggerkaart van Lei- en Hargerpolders

In het veld zijn de volgende werkzaamheden uitgevoerd:

- geofysische metingen om de ondergrond in kaart te brengen wat betreft de zoutgehalten en lithologie, namelijk 7 CVES sonderingen, 1 DUALEM profiel, 6 prikstokmetingen,
- handboringen om grondwaterstanden te meten en grondwatermonsters (6) te nemen,
- monsternamen van oppervlaktewater (9),
- Metingen van het ruimtelijke patroon van de elektrische geleidbaarheid (EC) in de watergangen in de polders (EC routing)
- Metingen van de variatie in de tijd van de elektrische geleidbaarheid van het oppervlaktewater bij de gemalen gedurende bepaalde perioden
- Afvoermetingen (3) van de spreng bij de kruising Heereweg/Jaagpad, die de belangrijkste inlaat vormt van de Hargerpolder (Hargerspreng).

Verder zijn 15 monsters geanalyseerd op hydrochemische macroparameters. Twaalf daarvan zijn tevens geanalyseerd op stabiele isotopen (^{18}O en ^2H).

Aan de hand van deze gegevens is getracht een consistent beeld te schetsen van de zoutgehalten in de ondergrond en het oppervlaktewater en die te passen in een conceptueel beeld van de grond- en oppervlaktewaterstroming. Deze beschrijving vormt de referentiemeting, de eerste fase van de nulmeting. Daarna zal worden beredeneerd waar de grootste veranderingen in de zoute milieus zullen optreden mede op basis van de modelstudie van Arcadis (2012) en op welke wijze die veranderingen het best kunnen worden gemonitord.

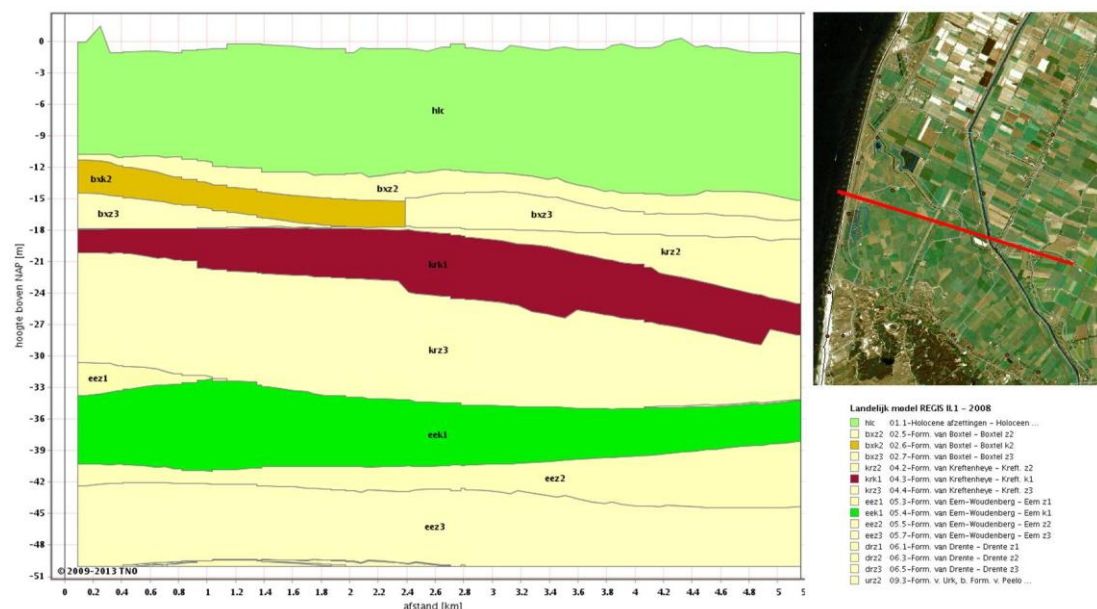
Voor een meer uitvoerige beschrijving van de onderzoeksmethoden wordt verwezen naar Bijlage 7.

3 Systeembeschrijving polders

3.1 Systeembeschrijving grondwater

Het hydrologisch systeem van de polders kan op verschillende wijze worden beschreven. De water- en stoffenbalans is een geëigende manier om de waterstromen te kwantificeren. Metingen en literatuurstudie leveren gegevens voor de waterbalans en geven extra inzicht in het hydrologische systeem van de polders.

De variatie van zoutgehaltes in het oppervlakte- en grondwater, zowel in tijd als ruimte, worden vooral door de zoete en zoute grondwaterkwel bepaald (Mulder en Spoelstra, 1995). De ondergrond bestaat uit een deklaag aan het oppervlak bestaande uit Holocene klei- en veenlagen (Calais IV en Duinkerken o afzettingen) van enkele meters dikte met daaronder een Holocene fijnzandige laag (Calais afzettingen) tot ca NAP - 15 m onder maaiveld, die het eerste watervoerende pakket vormt (WVP1). Pleistocene kleilagen en eventueel het Hoolocene basisveen tussen NAP- 15 en NAP - 20 m diepte vormen weer een slechtdoorlatende laag. Daaronder bevindt zich het tweede watervoerende pakket bestaande uit de zandlagen van de Formatie van Bostel en Eem. Deze wordt op ca NAP - 35 m begrensd door de een kleilaag van de Eemformatie.



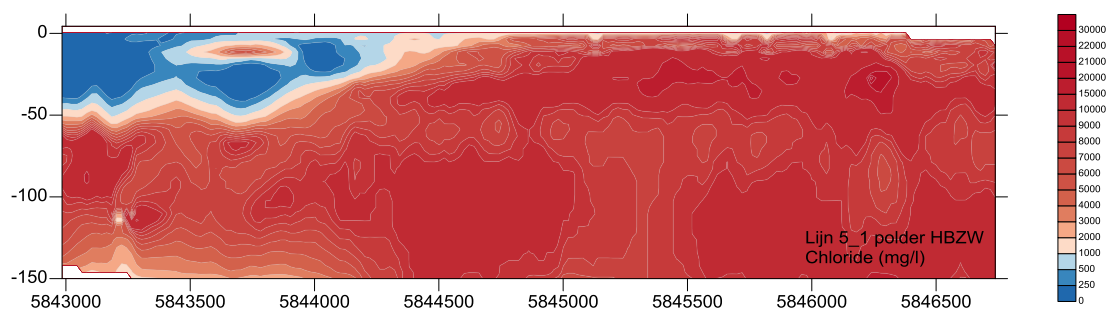
Figuur 3 Geologisch Oost-West profiel door Lei en Hargerpolders (REGIS)

Stuyfzand (1989) toont met het isohypsen beeld van de grondwaterstanden aan dat er sterke grondwaterstroming bestaat vanuit de Schoorlse duinen naar het poldergebied (Duinsysteem).

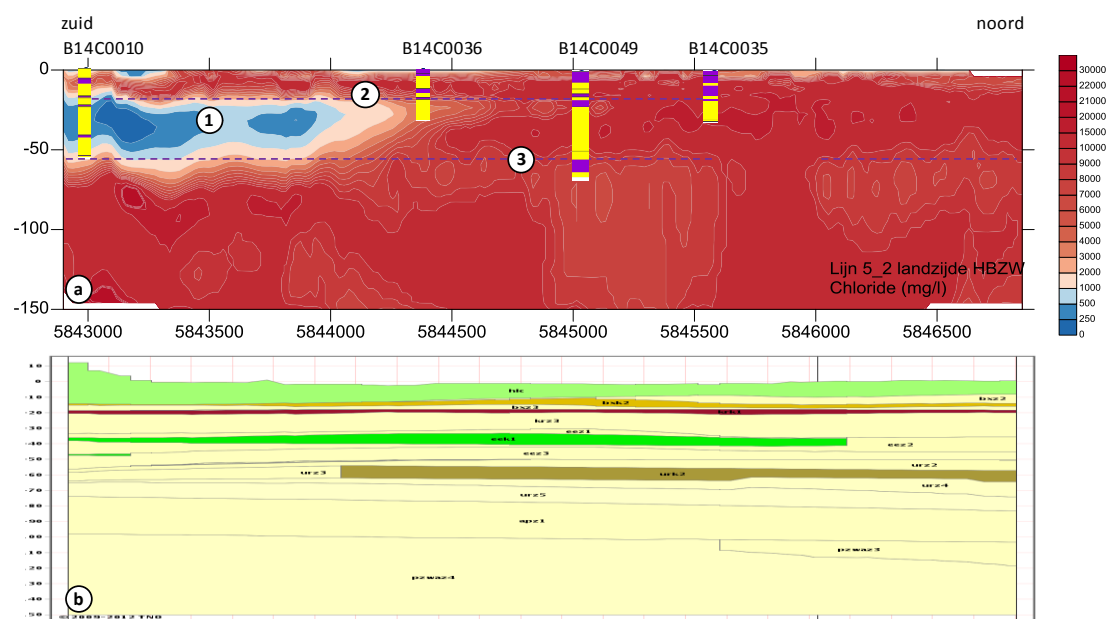
Aangenomen mag worden dat er ook een stromingscomponent bestaat van de Noordzee naar de lager gelegen polders. Dit wordt bevestigd door het onderzoek van Velstra (2013). Daarin wordt verslag gedaan van de ‘airborne’ geofysische metingen (Skytem) langs de Hondsbossche en Pettermer Zeewering.



Figuur 4. Vluchtlijnen Skytem



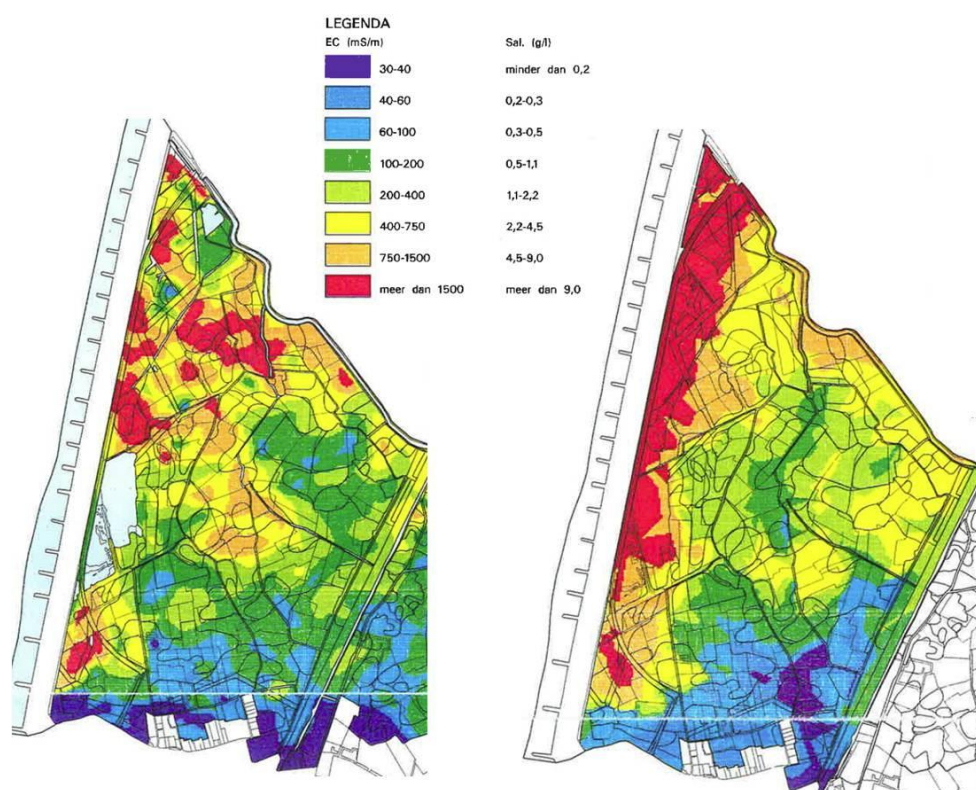
Figuur 5 Doorsnede vluchtlijn 5.1 met daarin interpretaties van zoet-zout uitgedrukt in chlorideconcentraties (links is Zuid, rechts is Noord, verticale as in mNAP en horizontale as in m)



Figuur 6 a) doorsnede vluchtlijn 5.2 met daarin interpretaties van zoet-zout uitgedrukt in chlorideconcentraties en lithologie. b) doorsnede uit REGIS van de bodemopbouw (verticale as in mNAP en horizontale as in m)

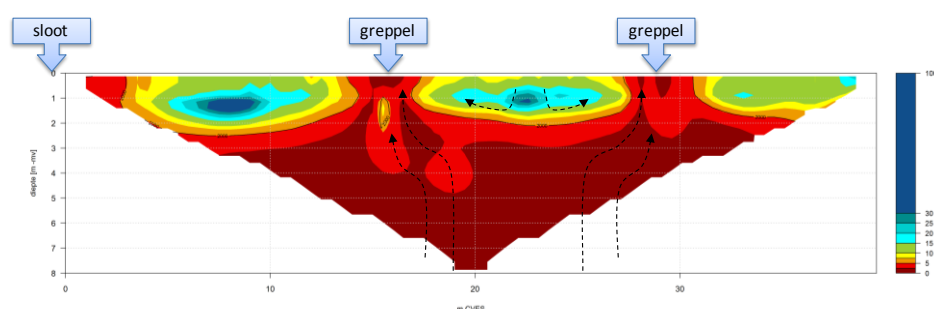
Uit deze geofysische noord-zuid profielen blijkt dat zich een tong van hoge elektrische weerstanden, die zoet grondwater vertegenwoordigt, uitstrekt vanaf de Schoorlse duinen (Heereweg) tot ca 1000 m in de polders (Figuur 5). De onderkant van de tong reikt tot ca 50 m diepte. Daaronder bevinden zich dermate lage weerstanden, dat die moeten worden toegeschreven aan brak en zout grondwater. Het profiel op een afstand van 400 m ten oosten van de Zeewering (Figuur 5, vluchtlijn 5.1) laat zien dat zoet grondwater tot aan het oppervlak reikt. In het profiel direct langs de Zeewering (Figuur 6, vluchtlijn 5.2) nemen we ook de zoete tong waar. Echter, in de bovenste 20 m komen zeer lage weerstanden voor, die duiden op brak en zout grondwater. Dit zoute grondwater is kwelwater vanuit de Noordzee (Noordzeesysteem), dat buitendijks infiltreert. Verder naar het noorden wordt de zoute kwel van het Noordzeesysteem bepalend.

Deze bevindingen komen overeen met de studie van Mulder en Spoelstra (1995). De kaarten in dat rapport (Figuur 7) laten het saliniteitspatroon in het freatische grondwater en oppervlaktewater zien in de vorm van EC waarden in mS/m. Het freatische grondwater is gezien vanaf de binnenduinrand zoet tot 250 m in het zuidwestelijk gedeelte van de polder en tot 1000 m in het zuidoostelijk gedeelte (zie definities saliniteitsklassen paragraaf 8.3.4. Dit komt overeen met de bevindingen van Velstra (2013). Dat de zoetwatertong nabij de Zeewering in het onderzoek van Velstra (2013) toch verder reikt is een aanwijzing dat daar het noordelijke deel van de tong stagnant is geworden, nadat de zoute kwel langs de Zeewering de laatste honderden jaren oostwaarts is verschoven. In de DLO kaart (Mulder en Spoelstra, 1995) zien we dat verder noordelijk in het poldergebied de zoutgehalten toenemen. De hoogste zoutgehalten worden waargenomen langs Zeewering en het gebied in de noordpunt (brak tot zout). Het Noordzeesysteem met de kwel van zout water wint dus aan invloed verder naar het noorden. In het centrale gedeelte van de polder is het freatische grondwater brak. De vraag is of dit water als Noordzeewater kan worden aangemerkt. De huidige kwelzone van Noordzeewater bestaat pas sinds enkele honderden jaren na de oostwaartse verschuiving van de kustlijn (Velstra, 2013). Vermoedelijk is het brakke grondwater in het centrale gedeelte afkomstig van opkwellend ouder marien water gevormd tijdens een van de Duinkerken of Calais transgressies.



Figuur 7 Zoutgehalten in EC waarden van het freatische grondwater (links) en het oppervlaktewater (rechts) in de Lei en Hargerpolder (Mulder en Spoelstra, 1995)

Opvallend is de zone met relatief lichtbrak grondwater in het noordoosten. Volgens Mulder en Spoelstra (1995) houdt dit verband met de relatief hoge ligging van maaiveld en de grotere afstand van de infiltratiegebieden van de Schoorlse duinen en de Noordzee. Hierdoor kunnen hogere grondwaterstanden ontstaan, die in combinatie met de relatief lage stijghoogten in het diepe pakket tot continue wegzijging leiden. Tenslotte zijn er nog een smalle kwelzones langs de Hondsbossche Vaart in het noorden en de Hargervvaart in het oosten, waar grondwater uit deze boezemwateren opkwelt. Dit water is vaak iets brakker dan de wat verder weg gelegen percelen vanwege de hoge zoutgehaltes in deze vaarten. Opgemerkt wordt dat recente inzichten in de perceelshydrologie aantonen dat de freatische grondwaterkwaliteit in brakke kwelpolder lokaal sterk kan verschillen. De regenwaterlenzen worden vaak meer door de greppels of drains bepaald dan door de watergangen (Verziltingsstudie HHNK, Velstra et al., 2013). Onder de greppels wordt vaak in perioden met neerslagoverschot “upconing” van dieper brak grondwater waargenomen, terwijl tussen de greppels het grondwater zoet is (Figuur 8). In de zomer kunnen de regenwaterlenzen soms geheel verdwijnen.



Figuur 8 CVES meting begreppeld perceel in de Schermer, mei 2009. Weerstand in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/l berekend met een formatiefactor van 3. Met stippellijnen zijn de geïnterpreteerde stromingsrichting representatief voor de natte periode ingetekend (Velstra et al., 2013).

Vermoedelijk zal dit ook in dit gebied aan de orde zijn. Figuur 7 van Mulder en Spoelstra (1995) moet daarom met de nodige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd. Verder maakt DLO (Mulder en Spoelstra, 1995) de kanttekening dat de opname van de EC waarden plaatsvond na een relatief nat jaar.

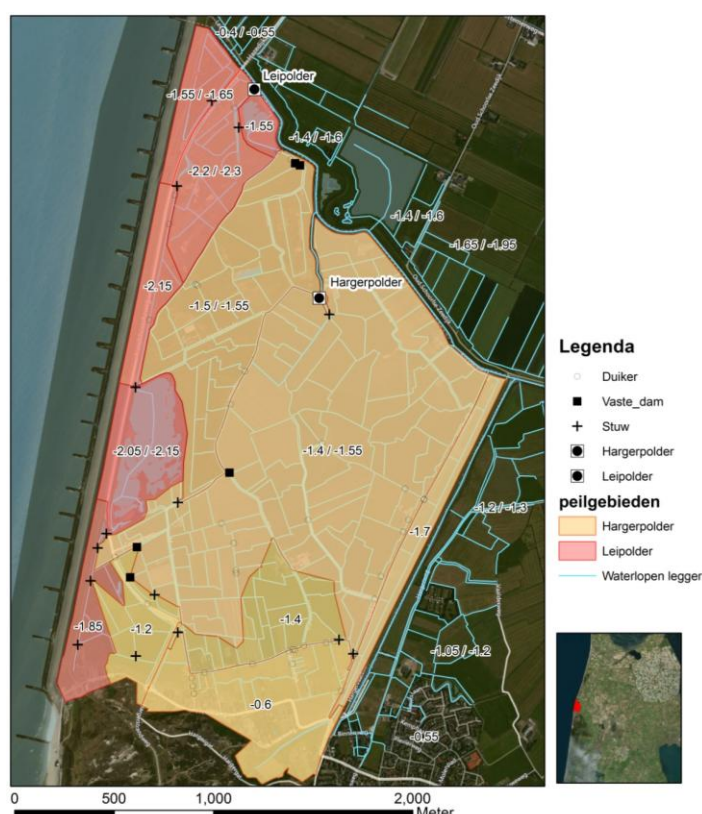
In het EC patroon van de watergangen van Mulder en Spoelstra (1995) nemen we ook een zoute zone waar langs de Zeewering en het noordelijk deel (Figuur 7). Dit komt overeen met het kwelgebied van het Noordzeesysteem. Dit gebied beslaat voornamelijk de afwateringseenheid van de Leipolder. In de Hargerpolder toont Figuur 7 een zoete zone langs de binnenduintrand overeenkomend met het zoete kwelgebied van het Duinsysteem. De relatief grote Hargerspreng mondt uit in de watergang van de Hargerpolder ten westen van het Jaagpad in het zuidoosten. Er is ook een kleine spreng in het zuidwesten die uitmondt in de watergang van de Leipolder langs de Zeewering. Mogelijk zijn er meerdere sprengen in de watergangen in het zuiden, maar eigenlijk kan men dan beter spreken van kwelwater uit de duinen. De rest van het oppervlaktewater in de polder bevat lichtbrak tot brak grondwater. Dat laatste komt niet goed overeen met het beeld van het grondwater, maar daarbij moet worden bedacht dat de watergangen een mengwater bevatten van zoet water uit het zuiden en lokaal opkwellend brak grondwater. Zo heeft de hoofdwatgang in het centrale gedeelte, waar het grondwater juist brak is, een laag zoutgehalte omdat hierin het zoete water van de spreng wordt afgevoerd.

3.2 Polderbeheer

Het studiegebied bestaat uit de Leipolder en de Hargerpolder (Figuur 9, Bijlage 4). De polders worden afzonderlijk bemalen en staan niet met elkaar in verbinding. De polders zijn opgedeeld in peilvakken die met elkaar verbonden zijn door middel van duikers en stuwtjes.

Het water stroomt globaal vanuit het zuidelijke gebied (uitlopers van de duinen) richting de gemalen in het noorden. De zuidelijke peilvakken hebben alleen een minimumpeil omdat dit hellend gebied is. Het oostelijke peilvak langs de Jaagkade heeft een lager peil dan de Hargerpolder, via een molentje wordt water uit dit peilvak in de Hargerpolder gepompt. Het peil van de Leipolder is ongeveer 75 cm lager dan het peil van de Hargerpolder. Ten oosten en noorden van de polders bevindt zich de boezem met een zomer / winterpeil van -0.55 / -0.4 m NAP. Het water uit beide polders wordt op deze boezem uitgemalen.

In principe wordt er geen water ingelaten t.b.v. peilhandhaving of doorspoelen (pers. comm. beheerder HHNK mevr. L. van de Velde). Wellicht is er wel een mogelijkheid om water in te laten vanuit de Harger- of Hondsbossche vaart. Wel stroomt er aan de zuidkant, zowel in de Harger- als de Leipolder water uit de duinen het gebied in.



Figuur 9 Peilvakken Harger- en Leipolder met locaties van duikers, dammen, stuwen en gemalen. Peilen (m NAP) zomer/winter (2 waarden) of ondergrens / vast peil (1 waarde). Zie ook Bijlage 4.

3.3 Zoet-zout verdeling

3.3.1 Grondwater

CVES metingen

Bij het bekijken van de CVES metingen is het van belang dat iedere weergave van een CVES meting een andere legenda/schaal heeft, omdat de metingen zowel in zeer zoute gebieden alsook in gebieden met zowel brak als zout grondwater gedaan zijn. De locaties van de metingen zijn te vinden in Figuur 17.

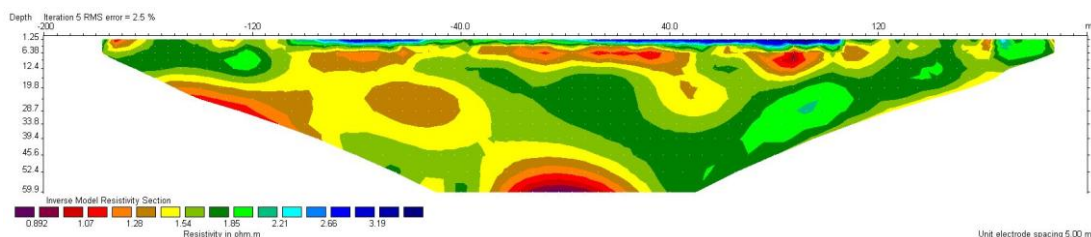
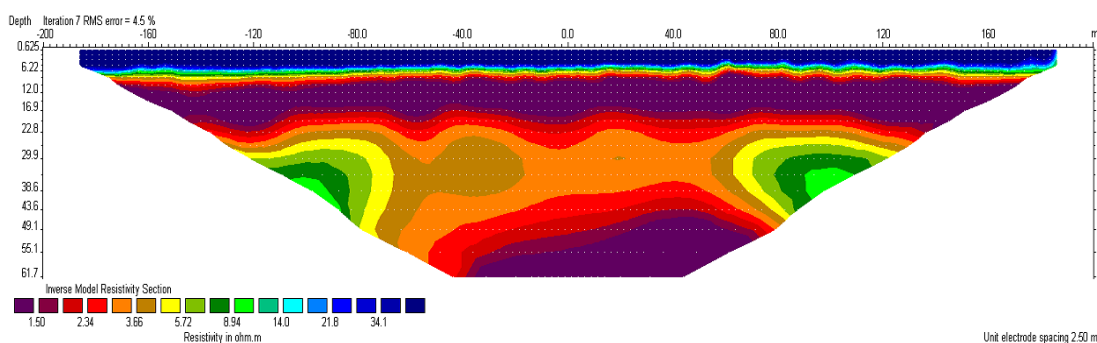


Figure 10a. CVES 8, parallel aan de Hondsbossche Zeewering bij de Hazepolder.

Meting 10a loopt parallel aan de Hondsbossche Zeewering in de Hazepolder. De weerstanden zijn bijzonder laag en variëren tussen 1 en 2 Ohmm. Dit duidt op hoge zoutgehalten. Zout water stroomt vanuit de Noordzee door alle watervoerende pakketten naar de achtergelegen Hazepolder.

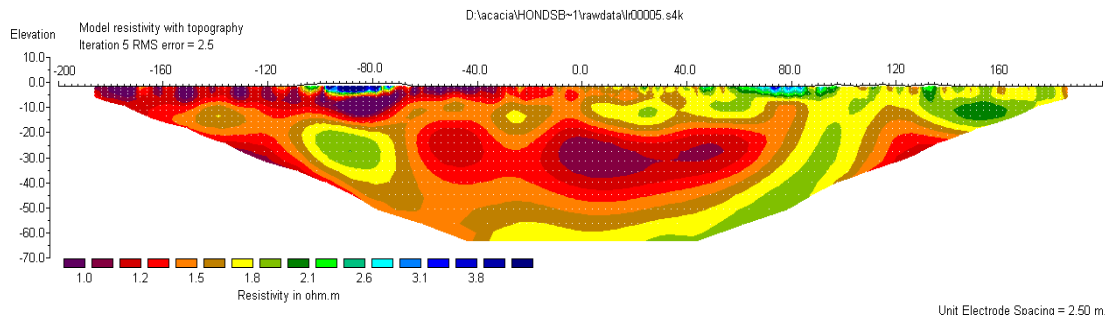
CVES 1 (Figuur 10) parallel aan de Zeewering bij locatie B laat hoge weerstanden zien (20 tot 50 Ohmm) in de eerste 8 m vanaf maaiveld. De metinglocatie ligt op het talud van de Zeewering en dus hoger dan het maaiveld van de polder. Mogelijk heeft de hoge weerstand deels te maken met de onverzadigde dijkmaterialen, maar misschien ook met een dunne zoetwaterlens die zich hier heeft ontwikkeld door infiltratie van regenwater. Een aanwijzing is ook dat deze hoge weerstandslaag ontbreekt in de nabijgelegen CVES 4 in de polder.

Onder maaiveld – 8 m neemt de weerstand snel af tot waarden onder 2.5 Ohmm, ook in de zandlaag van het eerste watervoerende pakket, wat duidt op zout water. In het tweede watervoerende pakket tussen maaiveld - 20 en - 50 m zijn de weerstanden weer wat hoger (2.5 tot 4 Ohmm). Dat kan een lithologie-effect zijn. De zanden in dit pakket (Boxtel en Eem Formatie) zijn mogelijk grover en bevatten minder kleilagen in tegenstelling tot de wadzandafzettingen van het eerste watervoerende pakket. Het grondwater is in ieder geval brak tot zout. Onder maaiveld - 50 m worden de weerstanden weer lager. De afzettingen bevatten daar zout grondwater. Het is ook mogelijk dat zich in het tweede watervoerende pakket brak grondwater bevindt met een lager zoutgehalte dan de boven en onderliggende pakketten. Dat zou dan kunnen gaan om paleogroundwater, dat gevormd is tijdens de Midden-Holocene transgressie.



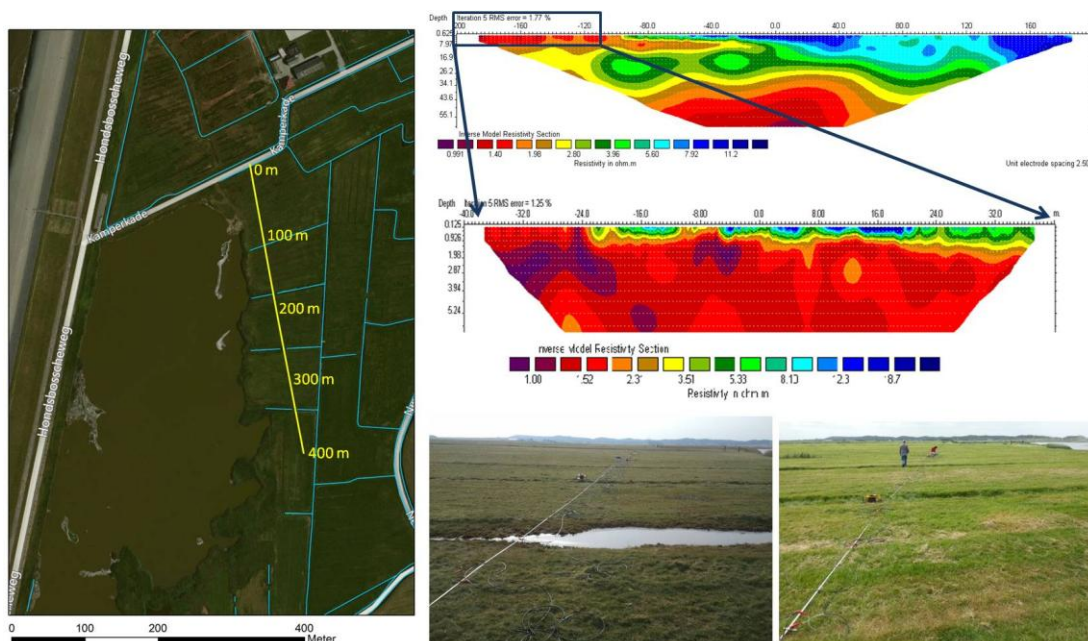
Figuur 10 CVES 1, parallel aan de Hondsbossche Zeewering bij de "Putten"

CVES 3 (Figuur 11) bij locatie A loopt vanaf de Zeewering de polder in. Overal zijn de weerstanden lager dan 2.5 Ohmm. Het grondwater is dus overal zout. De variaties zijn gering. Er is van west naar oost een geringe toename te zien van de weerstand in de eerste 10 m vanaf maaiveld (van 1 tot 2.5 Ohmm). Mogelijk neemt de kwel in die richting af en wordt de invloed van regenwater merkbaar. Het grillige verloop in de bovenste meters houdt mogelijk verband met regenwaterlenzen tussen de greppels.

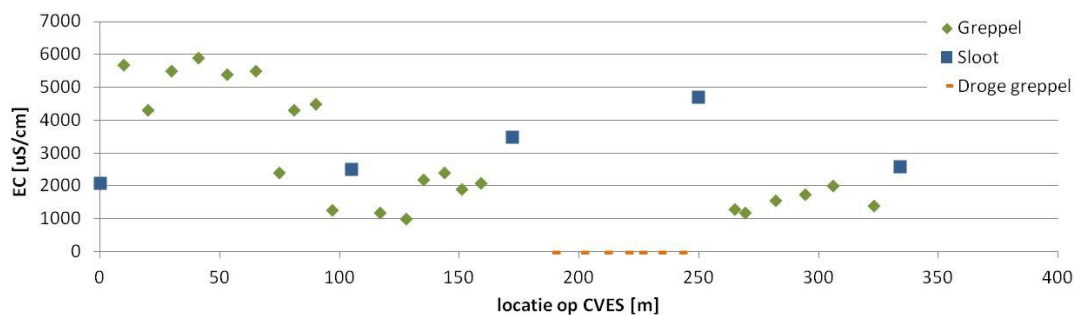


Figuur 11 CVES 3, vanaf de Hondsbossche Zeewering de polder in

CVES 4 (Figuur 12 boven) achter de plas De Putten loopt van noord naar zuid. Deze meting ligt ca 300 m ten oosten van meting CVES 1. De weerstanden zijn ook hier overwegend laag. Opvallend is de toename van 1 tot 15 Ohmm in de bovenste 20 m richting het zuiden. Waarschijnlijk doet zich hier de invloed van de zoete kwel van het zuidelijke duinsysteem zich gelden. Het noordelijk deel van de meting toont net als CVES 1, dat de weerstanden van het 2^{de} wvp iets hoger zijn (2.5 tot 4 Ohmm) als gevolg van de lithologie. De grafiek in toont het verloop van de EC in de greppels en sloten die gekruist worden door CVES 4, ook hier is de invloed van zoete kwel richting het zuiden zichtbaar in de greppels (lagere EC vanaf ±100m). De EC van de sloten staat minder onder invloed van kwel en wordt voornamelijk beïnvloed door de instroom vanuit de duinen.



Figuur 12 CVES metingen achter De Putten, CVES 4 (boven) en CVES 5 (onder). Situatie in het veld maart 2013 (foto links) en juli 2013 (foto rechts).

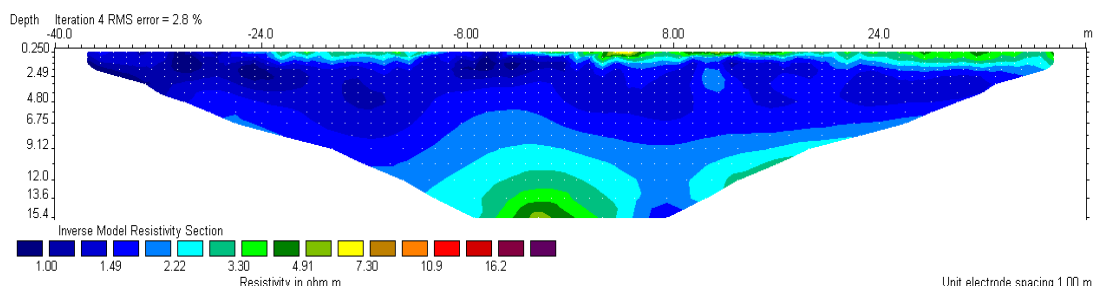


Figuur 13 EC verloop in greppels en sloten langs profiel CVES 4

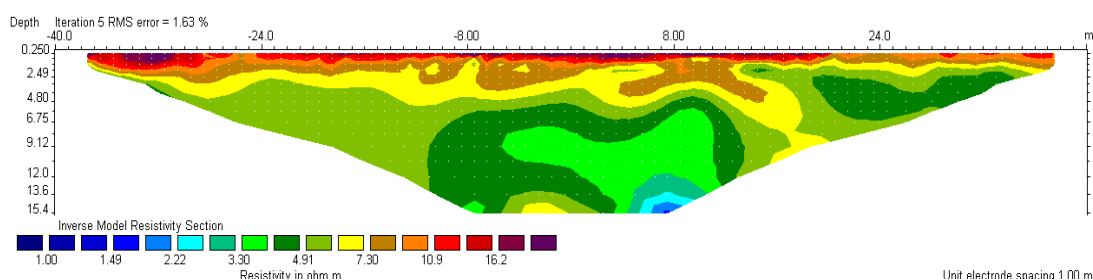
CVES 5 (Figuur 12 onder) is langs CVES 4 uitgevoerd met een kleinere elektrodenafstand. Daarmee kan met een hogere resolutie worden gemeten. De doordringingsdiepte is dan wel kleiner (ca 6 m). De meting is uitgevoerd over 80 m (verlengde CVES) van noord naar zuid, beginnend op hetzelfde punt als meting CVES 4.

Doel van deze meting was de mogelijke regenwaterlenzen te onderzoeken. Het weerstandspatroon in de bovenste meter lijkt het bestaan van regenwaterlenzen en zoute kwel onder de greppels te bevestigen. Daarbij moet worden opgemerkt dat de weerstanden in die zone toch laag zijn (< 10 Ohmm). Bovendien is een groot deel daarvan onverzadigd. Deze meting is in maart 2013 uitgevoerd in een periode dat de lenzen hun maximale dikte zouden moeten hebben. De regenwaterlenzen zijn dus weinig ontwikkeld. Vanwege de lage weerstand is het vermoeden dat zich in het bovenste grondwater en wellicht ook het bodemvocht brak water bevindt. De grote invloed van seaspray en de sterke directe verdamping (zie discussie isotopengehalten in paragraaf 3.4) leiden ertoe dat zich hier altijd lichtbrak grondwater vormt in deze zone direct achter de dijk.

CVES 6 (Figuur 14) is uitgevoerd in juli 2013 op dezelfde locatie als CVES 5. Voor deze meting is een grotere elektrodenafstand gekozen dan die van CVES 5. De doordringingsdiepte is ca 15 m. De kleurcoderingen zijn anders in deze figuur. Echter, de weerstanden zijn nagenoeg gelijk. Ook die in de bovenste meters. Het lijkt er dus op dat de relatief hoge weerstanden in de bovenste meter vooral te maken hebben met de onverzadigde zone en eventueel zoutaccumulatie in de bodem. Immers na de lange droge tijd in het voorjaar en de zomer van 2013 zouden de toch al zeer geringe regenwaterlenzen moeten zijn verdwenen.



Figuur 14 CVES 6 (op zelfde locatie als CVES 4 en 5)



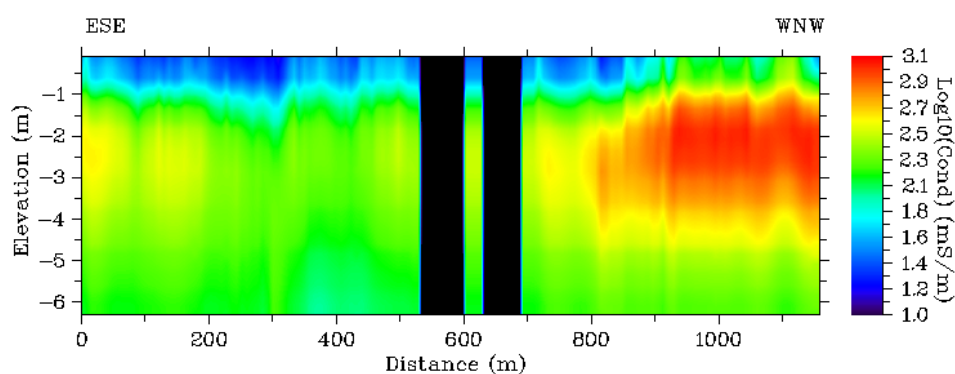
Figuur 15 CVES 7 ten oosten van de Nessedijk

CVES 7 (Figuur 15), ook gemeten in juli 2013, is gelokaliseerd ca 400 m ten oosten van CVES 6 in de Hargerpolder. De weerstanden in deze CVES zijn hoger dan die CVES 6 en CVES 5. De weerstanden in het 1^{ste} wvp (maaiveld - 5 tot NAP -15 m) variëren van 2.5 tot 6 Ohmm (brak tot lichtbrak). De zoutgehalten in het 1^{ste} wvp beginnen hier al af te nemen in oostelijke richting. Dit komt overeen met de berekeningen met het grondwatermodel langs raaien 2 en 3 van Arcadis (2012). Relatief hoge weerstanden worden aangetroffen in de zone tot maaiveld - 5 m. De bovenste meters hebben de hoogste weerstanden (11 tot 20 Ohmm), welke samenhangen met de onverzadigde zone (zie discussie meting CVES 6). Opmerkelijk zijn de weerstanden in de zone van maaiveld -1 tot -5 m, die voornamelijk uit klei bestaat (6 tot 11 Ohmm). Deze zijn hoog ten opzichte van die van het zandige 1^{ste} wvp eronder.

Vanwege de lithologie verwacht men hier het omgekeerde. Het lijkt er dus op dat in dit gebied zich regenwaterlenzen kunnen ontwikkelen of dat regenwater zich in ieder geval mengt met het onderliggende brakke grondwater.

FDEM meting

Voor het onderzoek is ook een FDEM profiel (Dualem) gemeten van oost naar west over de locaties van meting CVES 1, 6 en 7 (Figuur 17). De FDEM meting (Figuur 16) toont een 2D beeld van de elektrische geleidbaarheden tot een diepte van 6 m. Er is een scherpe omslag zichtbaar in de geleidbaarheden rond een afstand van 800 m vanaf het begin. Dit punt bevindt zich juist voor de locatie van CVES 5 en 6. Ten oosten van dit punt heeft de onverzadigde zone een geleidbaarheid van 10 tot 40 mS/m en de ondergrond (tot 6 m diepte) een geleidbaarheid van 100 tot 300 mS/m (brak grondwater). In de zone binnen 300 m vanaf de Zeewering heeft de onverzadigde zone een geleidbaarheid van 100 tot 300 mS/cm en de ondergrond een geleidbaarheid van 300 tot 1000 mS/cm (zout grondwater). Dit is consistent met de bevindingen van CVES 5, 6 en 7. De conclusie is dat in die zone achter de Zeewering de kwelstroom zeer sterk is en dat het Noordzeewater de grondwaterkwaliteit tot aan de onverzadigde zone bepaalt.



Figuur 16 Resultaten FDEM meting



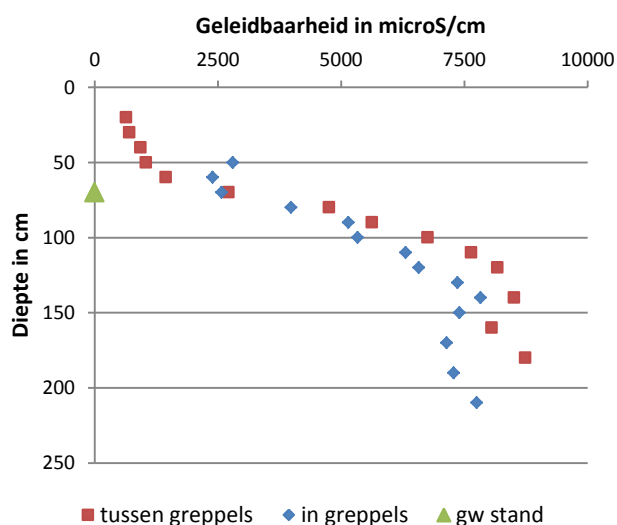
Figuur 17 Locatie FDEM meting

Prikstok metingen

De locaties van de prikstokmetingen worden weergegeven in Figuur 18. In het profiel van CVES 5 en 6 zijn twee prikstokmetingen uitgevoerd (meting 1 en 2): een tussen twee greppels en een in een greppel. Het zelfde is gedaan langs het profiel van CVES 7 (meting 3 en 4). Verder is ook een prikstokmeting uitgevoerd in het zuidwesten dichtbij de Zeewering (meting 5).

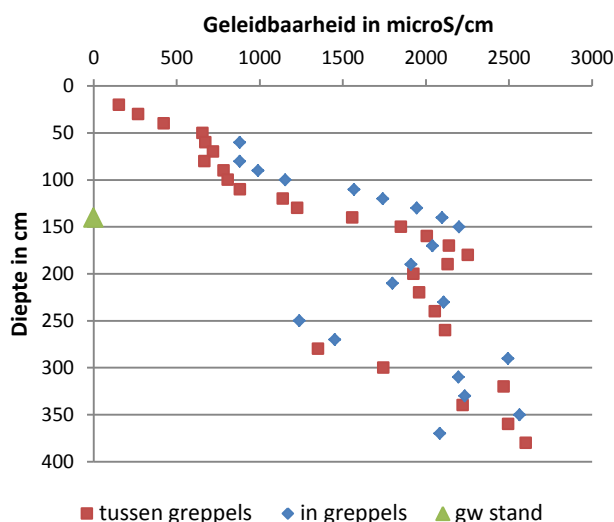


Figuur 18 Locaties prikstokmetingen en CVES metingen in de polder



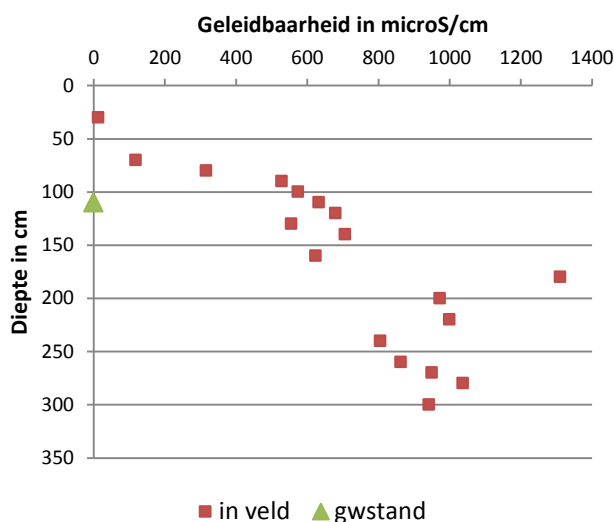
Figuur 19. Prikstokmetingen 1 en 2 ten oosten van plas "De Putten" ter plaatse van CVES 5 en 6

Meting 1 en 2 laten zien dat onder grondwaterstand de geleidbaarheid snel toeneemt tot waarden boven de 5000 microS/cm, wat zoute condities aangeeft. Het verschil tussen metingen in en tussen de greppels is niet groot. Tussen de greppels zijn de waardes zelf nog iets hoger, wat tegengesteld is aan de verwachting voorkomend uit het regenwaterlenzenconcept. Daarbij moet worden bedacht dat deze meting is uitgevoerd in juli 2013. In de zomer verdwijnen de grondwaterlenzen in hun geheel in dit gebied (zie discussie over CVES metingen hierboven).



Figuur 20 Prikstokmetingen 3 en 4 ter plaatse van CVES 7 400 m ten oosten van plas "De Putten"

Meting 3 en 4 bij CVES 7 zijn 400 m ten oosten van de metingen 1 en 2 uitgevoerd. Ook hier nemen de geleidbaarheden van de ondergrond toe onder de grondwaterspiegel. De geleidbaarheden (1500 tot 2500 microS/cm) zijn echter lager dan die van metingen 1 en 2 en wijzen op brakke condities. Er is weinig verschil tussen de metingen in en tussen de greppels.



Figuur 21. Prikstok meting 5 in zuidwesten bij de Zeewering.

Meting 5 in het zuidwesten dicht bij de Zeewering laat ook een sprong zien van de geleidbaarheid bij de grondwaterstand met daaronder lichtbrak grondwater. Waarschijnlijk bevindt de locatie zich op een uitloper van het Duinsysteem.

Boorgatmeting B1

De boorgatmeting in de diepe peilbuis van de nieuwe boring B1 nabij “de Putten” (Fig 68) laat het verloop van de natuurlijke gammastraling zien en de elektrische weerstand. Uit de gammastraling kan worden afgeleid dat dat er zich kleilagen bevinden in de bovenste 4 m en verder enkele kleilagen op 13 en 17 m. De bovenste kleilaag vormt de afdekkende Holocene klei. De diepere kleilagen zijn van Vroeg Holocene of Pleistocene ouderdom en vormen de slechtdoorlatende laag tussen het eerste en tweede watervoerende pakket. De weerstandsmeting toont waarden van 1 tot 2 Ohmm voor de Holocene zandlaag van het eerste watervoerende pakket tussen 4 en 12 m. Dat duidt op grondwater met hoge zoutgehalten. Daaronder nemen de weerstanden toe tot 4 a 6 Ohmm. Mogelijk heeft het grondwater op die diepte een lager zoutgehalte of het zandpakket is grover. Dit beeld komt overeen met de geofysische meting CVES 1. Op 16 mei liep de peilbuis van het diepste filter op 22 m in het tweede watervoerende pakket over. Duidelijk was dat de stijghoogte het getij volgde. De stijghoogten van de stijgbuizen op ca 8 m (eerste watervoerend pakket) en 1.5 m (freatische pakket) waren achtereenvolgens lager dan de stijghoogte van het tweede watervoerende pakket, maar wel hoger dan het polderpeil. Er heerst hier dus een kwelsituatie.

3.3.2 Oppervlaktewater

Het zoutgehalte van het oppervlaktewater is in kaart gebracht met de EC routing, hoe hoger de geleidbaarheid, hoe hoger het zoutgehalte.



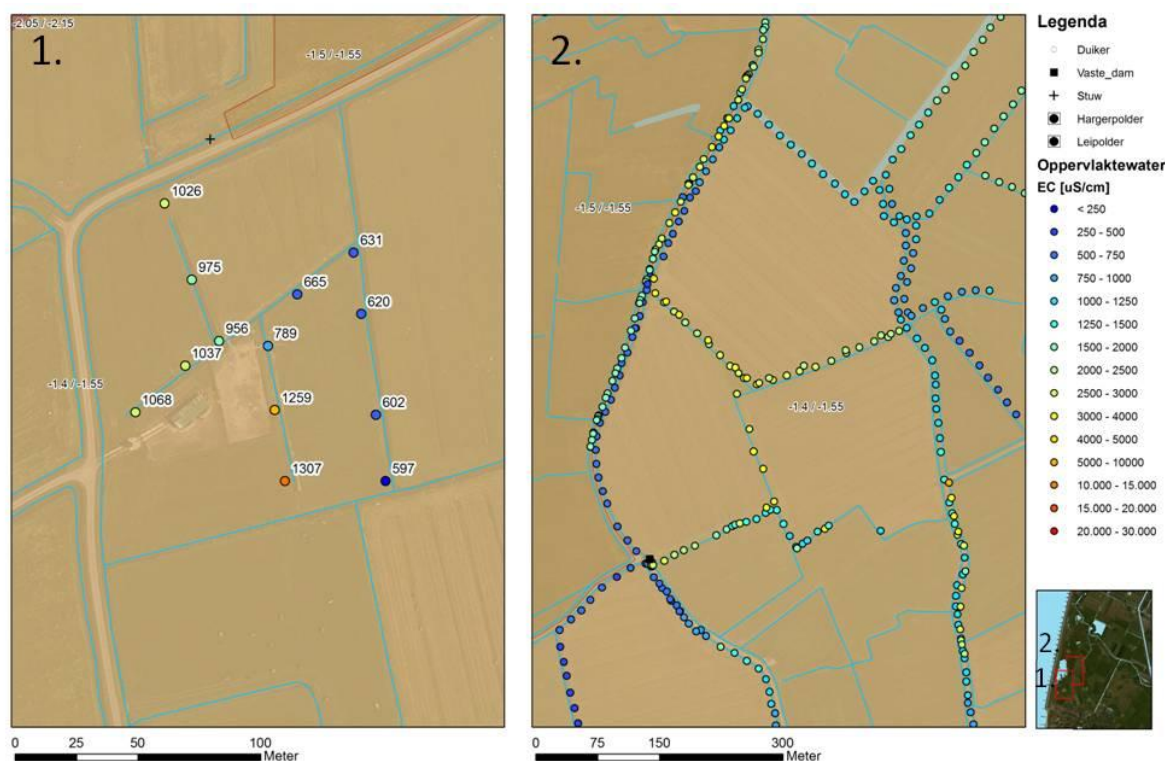
Figuur 22 Overzicht resultaten EC routing. In rood nummer 1 en 2, de ingezoomde locaties in Figuur 23.

Kustverbreding Hondsbossche Zeewering:
hydrologische referentiesituatie, verwachte
binnendijkse verzoeting en mitigerende
maatregelen

Het resultaat van de EC routing (Figuur 22, Bijlage 5) toont een overwegend zoute Leipolder en een grote variatie in zoutgehalten in de Hargerpolder. Globaal gezien geldt hoe dichterbij de dijk en hoe verder weg van de duinen, hoe zouter.

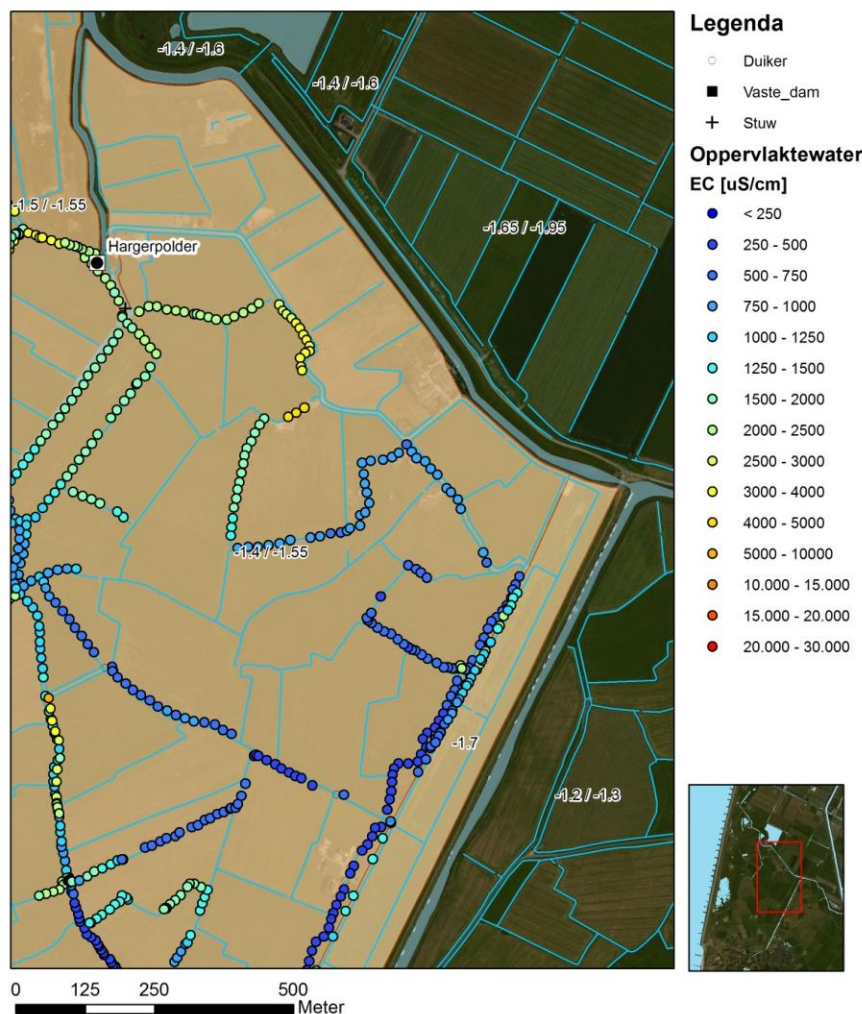
De zoutgehalten van het oppervlaktewater weerspiegelen de invloed van de verschillende posten van de waterbalans. Zowel in de Leipolder als in de Hargerpolder stroomt zoet duinwater de polder in. In de Leipolder is de invloed van zoute kwel zo groot dat in De Putten en meer noordelijk daarvan EC waarden boven de 15.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ liggen. In de Hargerpolder is de invloed van het instromende duinwater zodanig dat een groot aantal watergangen EC waarden heeft lager dan 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. EC waarden in de Hargerpolder zijn het hoogst in het zuidwesten en noorden.

Opmerkelijk is het EC verloop in sommige sloten: verder van de hoofdwatervgangen loopt de EC op (Figuur 23). Blijkbaar is de invloed van instromend duinwater hier gering omdat een sloot doodloopt of niet op de hoofdroute ligt. De waterkwaliteit in deze sloten wordt grotendeels bepaald door kwel en afstroom van de percelen.



Figuur 23 EC van het oppervlaktewater, links doodlopende sloten (afwijkende legenda EC waarden), rechts slecht doorstroomde sloten (voor locaties zie Figuur 22).

In het oosten en noordoosten van de polder wordt zichtbaar dat er ook water van de omringende Schermerboezem instroomt (Figuur 24). De EC van het oppervlaktewater van het peilgebied tussen de Hondsbossche Slaperdijk en de Jaagkade (-1.7 m NAP) is hoger dan de nabijgelegen watergangen van de Hargerpolder. Ook aan de noordkant is zichtbaar dat de EC (langs de Hondsbossche Vaart) is verhoogd.



Figuur 24 EC van het oppervlaktewater in het Noordoosten van de Hargerpolder.

3.4 Hydrochemie en isotopen

In deze paragraaf wordt de hydrochemische samenstelling van het grondwater op basis van nieuwe en oude analyses besproken (tabel met resultaten in Bijlage 1). Leidraad is het Stuyfzand classificatiesysteem en de karakterisatie zoals besproken in Stuyfzand (1989) en Mulder en Spoelstra (1995). De analyses zijn puntwaarnemingen, waarbij het voor de interpretatie van belang is onderscheid te maken tussen het freatische grondwater, het grondwater uit het eerste, tweede en dieper gelegen watervoerende pakketten. Voor de dynamiek van de regenwaterlenzen moet voor de analyses van het freatische grondwater ook onderscheid worden gemaakt tussen zomer- en wintersituatie.

Ondiep grondwater

Het ondiepe grondwater in de duinen (monsters B14C0042 t/m B14C0047, 14C-A15 en 14C-A16, en C5-001) en dat van de Hargerspreng in het zuidoosten is van het FoNaCl type. Het is water heeft een laag zoutgehalte (EC < 500 microS/cm) en is kalkarm en zuur. De dominante ionen worden bepaald door natte en droge depositie van mariene aerosolen (seaspray). Het diepere water, dat ook via het 2^{de} wvp in de polder uitstroomt is mogelijk meer gemineraliseerd door kalkoplossing. Monster C5-001 uit het freatische duin pakket op 7 m diepte in de Pettemer duinen is van het F2CaHCO₃ type. Dit is dus meer gemineraliseerd en bevat meer kalk.

Duinwater kwelt op in het zuidelijk deel van de Lei- en Hargerpolder. Echter de vraag is of dit water de wortelzone bereikt vanwege de regenwaterlenzen op de percelen. Zou dat het geval zijn, dan zal het

duinwater zeker verder zijn gemineraliseerd tijdens de passage door de mariene Holocene kleilagen. Verder speelt de indamping op de percelen in de zomer en het seaspray effect een rol.

De analyses van het ondiepe grondwater in het zuiden bij Loc9 (f₃NaCl+), HG1 (F₄CaHCO₃+), 14C-A02 (F₁CaMIX+) en 14C-A03 (Cl = 44 mg/l) zijn wel zoet, maar hebben inderdaad een hoger zoutgehalte dan het duinwater. Het duinwater kwelt voornamelijk op in de zuidelijke watergangen en mogelijk ook in de greppels op de percelen. In de sloten tot op een afstand van 1,5 km ten noorden van de binnenduintrand komen zoete kwelindicerende plantensoorten voor (pers. comm. Theo Bakker). De meeste watergangen zijn derhalve zoet in het zuiden, maar een aantal wordt ook continu doorspoeld met water uit de Hargerspreng.

Het zoete grondwater van HG3 (F₄CaHCO₃+) in het noordoosten van de Hargerpolder bevestigt het zoete wegzijgingsgebied (Figuur 30) zoals beschreven door Mulder en Spoelstra (1995). Niet ver daarvan, dichtbij de kruising van de Harger- en Hondsbossche Vaart is sample HG2 bemonsterd. Deze heeft een opvallend hoog zoutgehalte (b₄NaCl+) en bevestigt het bestaan van kwel vanuit deze brakke boezemwateren (Mulder en Spoelstra, 1995). De plustekens in de codes voor het ondiepe grondwater geven aan dat er cationuitwisseling heeft plaatsgevonden als gevolg van het verzoeten van de voormalige zoute mariene afzettingen door het zoete duin- of regenwater.

De overige putten 14C-A05 (B₄CaMIX+), 14C-A06 (b₅NaCl-), Loc2 (S?NaCl-) en Loc3 (B₃CaSO₄+) in de Leipolder en het westelijk deel van de Hargerpolder zijn brak en zout en staan duidelijk onder invloed van de sterke kwel van het Noordzeesysteem. Kenmerkend is het hoge bicarbonaatgehalte van het kwelwater en de verziltingssignatuur (zie hieronder). De locatie ten opzichte van greppels is onbekend, maar we nemen aan dat zich in dit gebied nauwelijks regenwaterlenzen kunnen vormen, zoals ook werd bevestigd door de CVES meting ten oosten van De Putten (paragraaf 3.3.1). Mogelijk dat de monsters in de zomer zijn genomen, wanneer lenzen een minimale dikte hebben. (De monsterdatum van 1 januari 1984 is waarschijnlijk onjuist).

De monsters van het freatische grondwater in de Hazepolder (putten 14C-0142, 14C-0143, 14C-0144 en 14C-0147 zijn zoet en van het FoNaCl of FoNaMix type. Hier kunnen zich wel zoete grondwaterlensen ontwikkelen. Mogelijk is de kwel hier minder sterk vanwege het hogere polderpeil.

WVP 1

Van het grondwater uit het 1^{ste} wvp zijn put B14C0049 in het noordelijk deel van de Hargerpolder (2 filters op verschillende diepten), put B1-002 tussen de Zeewering en de Putten beschikbaar en de putten B14C0143, B14C0144, B14C0146, B14C0147, B14C0148, B14C0149 in de Hazepolder. Bij de meeste putten is het grondwater in dit pakket brak tot zout. Opvallend zijn de hoge bicarbonaatgehalten, die zijn ontstaan door sulfaatreductie tijdens de ondergrondse passage. De mintekens achter de coderingen duiden weer op kationuitwisseling, maar in dit geval is er sprake van brak en zout water dat doordringt in afzettingen, die voorheen zoeter waren. De verzilting door dit Noordzeesysteem bestaat slechts enkele honderden jaren. Voorheen lag de kustlijn veel verder westwaarts (Velstra, 2013). Daarvoor waren de mariene Holocene afzettingen enkele duizenden jaren onderhevig aan verzoeting als gevolg van de toestroom van water uit veenkussens, strandwallen en duinen, zoals nu nog plaatsvindt in het zuidelijk deel van de polders. Opgemerkt wordt dat de putten 14C0143, 14C0144 en 14C0147 een hoog zoutgehalte hebben, veel hoger dan B1-002. Het lijkt erop dat langs de Zeewering naar het noorden toe het zoutgehalte hoger wordt. Deze trend blijkt ook uit de analyses uit het 2^{de} wvp. Daarom is het zoete grondwater in de putten 14C0146, 14C0148 en 14C0149 des te opvallender. Deze liggen direct ten noord en oosten van de Abtskolk. Er is hier kennelijk sprake van een infiltratiesituatie, mogelijk vanuit de Abtskolk.

WVP 2 en 3

Dezelfde watertypen als die van het 1^{ste} wvp treffen we aan in het 2^{de} en 3^{de} wvp. De putten staan allen in de Leipolder en het westelijk deel van de Hargerpolder. Ook hier zien we hoge zout- en

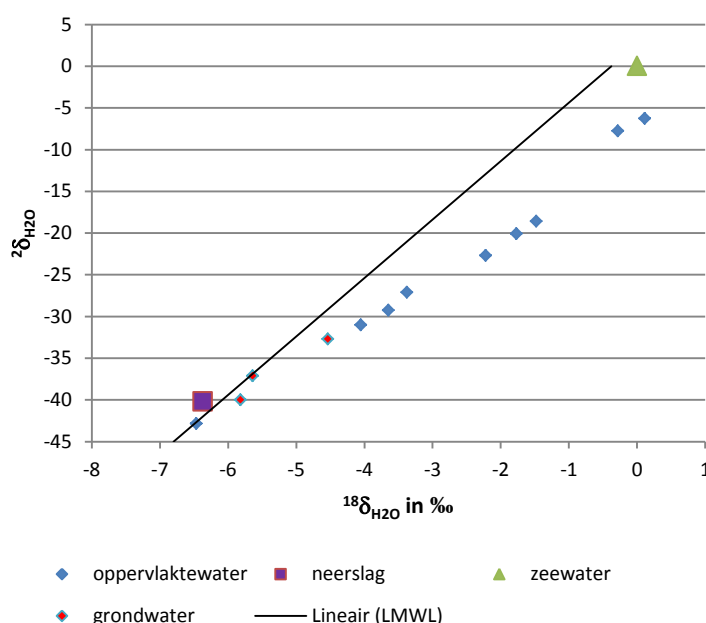
bicarbonaatgehalten en een verziltingssignatuur. Met name het zoutgehalte van B14C0035 is bijna gelijk aan dat van zeewater. Dit is een aanwijzing dat het Noordzeesysteem doorwerkt tot in de diepere watervoerende pakketten. Toch zijn er verschillen in zoutgehalten. De analyses in B1-002 en 14C0036 tussen de Zeewering en “de Putten” zijn wel zout maar hebben een chloride gehalte dat veel lager is dan de meer noordelijke gelegen put 14C0035, ook aan de voet van de Zeewering. De chloridegehalten nemen toe naar het noorden. Tot aan de Putten vindt er kennelijk in het 2^{de} en waarschijnlijk ook 1^{ste} wvp nog menging plaats met het zoete grondwater dat zich vanuit de duinen noordwaarts strekt. Dat bleek ook al uit de geofysische CVES en Skytem metingen (Fig. 6 en 12).

Oppervlaktewater

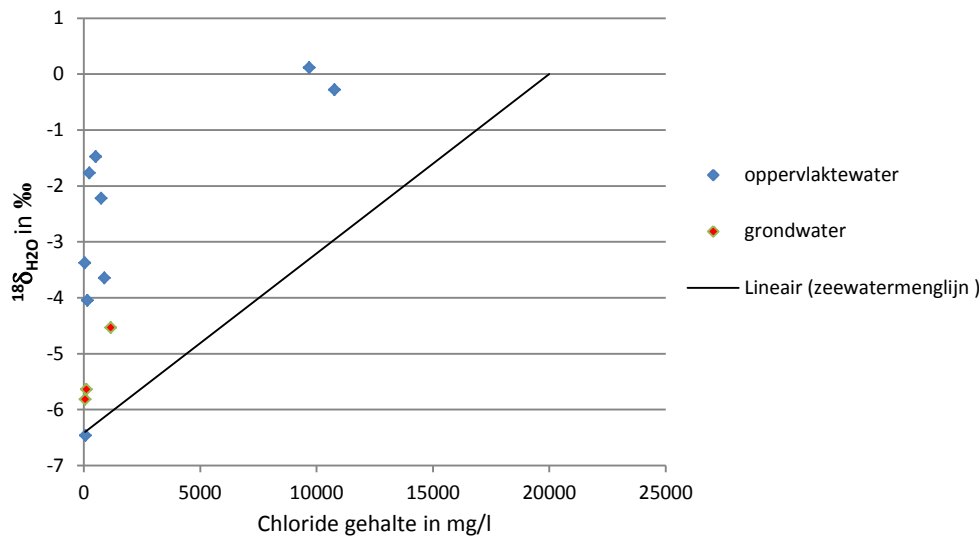
Van het oppervlaktewater zijn ook enkele watermonsters genomen en geanalyseerd. Deez komen overeen met de EC routing. Opvallend is echter dat het oppervlaktewater van de Putten (HO-2F en HO-6F) in de Leipolder zouter is dan het grondwater in put B1 aan de voet van de Zeewering vlakbij de Putten. Mogelijk is dit een effect van indamping van het oppervlaktewater (zie isotopenratio's). Het kan ook zijn dat in het noordelijk deel van de Leipolder (bij 14C0035) zouter water opkwelt met een hogere intensiteit en daardoor bepalend is voor het zoutgehalte van het oppervlaktewater van de Leipolder.

Isotopenratio's

In Figuur 25 zijn de isotopenratios geplot van ^{18}O en ^2H van watermonsters, die zijn bemonsterd tijdens de periode mei 2013. Verder zijn in deze figuur ook de gemiddelde isotopenratios van zeewater en neerslag van KNMI station de Kooy weergegeven, alsmede de Local Meteoric Water Line (LMWL). De LMWL is de regressielijn van de isotopenratios van de maandelijkse neerslagen van station de Kooy. Als de analyses puur neerslagwater zouden vertegenwoordigen zouden ze op de LMWL moeten liggen. In de polders hebben we te maken met mengwater tussen marien water en neerslag. Toch liggen ze ook niet op de zeewatermenglijn (lijn tussen gemiddelde neerslag en zeewater). Ze liggen daar nog onder, wat een aanwijzing is dat het water aan verdamping onderhevig is geweest. Het gaat dan om verdamping, die plaatsvond vanaf het wateroppervlak of van natte percelen, en geen transpiratie, omdat die niet tot fractionering leidt.



Figuur 25. Isotopenratios van Zuurstof-18 en Waterstof-2 (Deuterium) van enkele watermonsters uit de Lei- en Hargerpolders



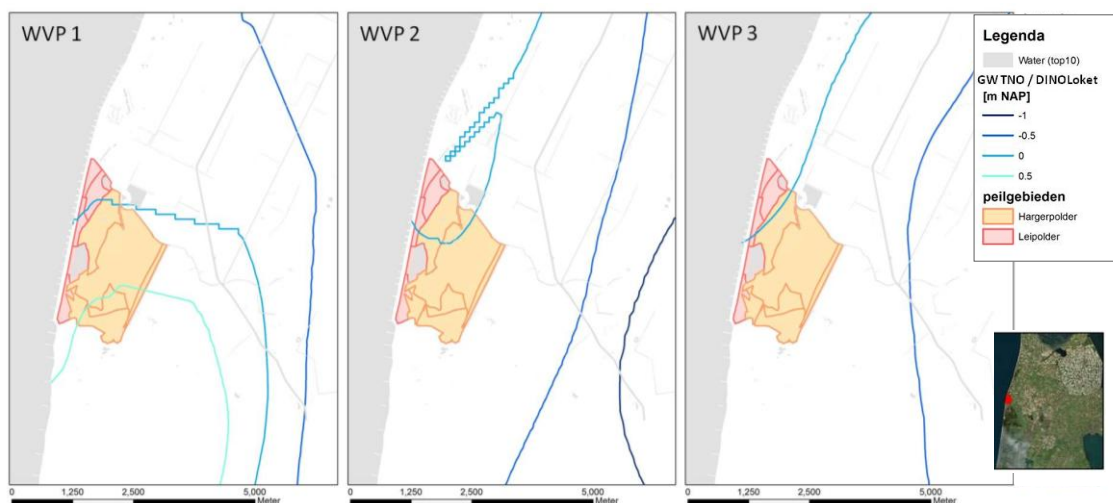
Figuur 26. Chloridegehalten en isotopenratios van Zuurstof-18 van enkele watermonsters uit de Lei- en Hargerpolders.

Dat is ook te zien in Figuur 26. Hierin zijn de chloridegehalten geplotted tegen de isotopenratios van ^{18}O . Hierin is ook de zeewatermenglijn getekend van meteorisch water (gemiddelde KNMI station de Kooy) en zeewater. Het is duidelijk dat de isotopenratios te hoog zijn op grond van de zoutgehalten. Ook dit is een aanwijzing dat er verdamping heeft plaatsgevonden, omdat bij verdamping de isotopenratios snel toenemen (verrijking). De oppervlaktewatermonsters zijn nog het meest beïnvloed door de verdamping. Daarbij moet worden bedacht dat het tijdens de monsternamen in de periode van mei 2013 vrij droog was en de doorstroming in de watergangen en de meertjes bij De Putten gering was. In andere perioden zal het verdampingseffect kleiner zijn.

3.5 Grondwater

3.5.1 Regionaal

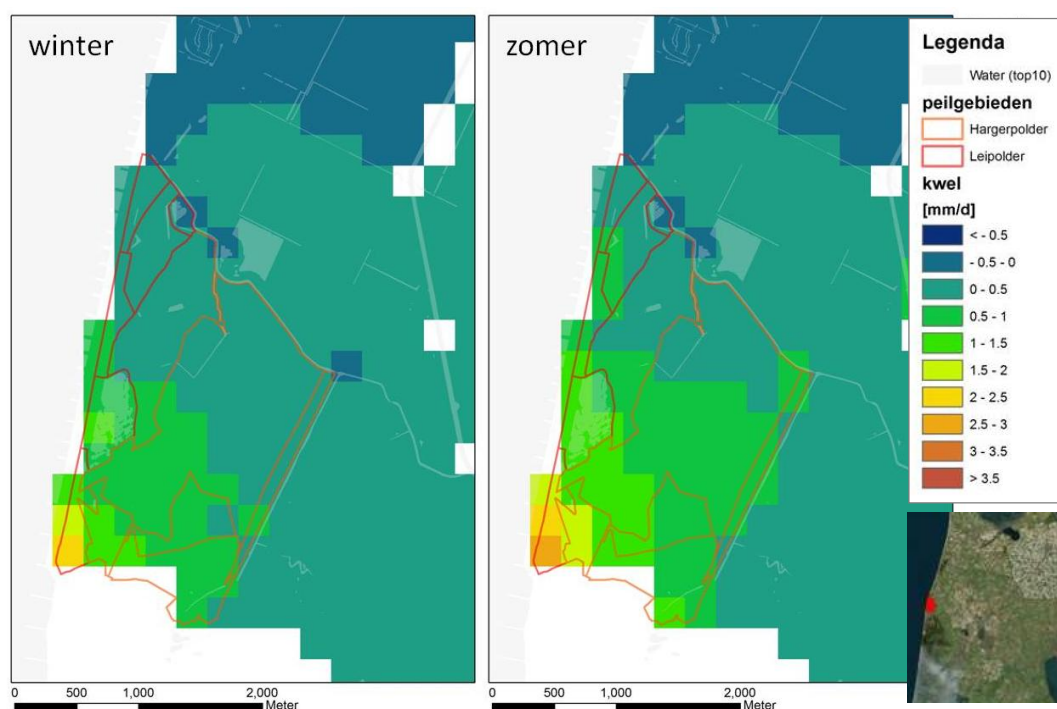
Het regionale stromingspatroon van het grondwater laat een gradiënt vanuit de Schoorlse duinen richting het noorden (WVP 1) en een gradiënt vanaf de Noordzee richting het IJsselmeer zien (WVP 2 en 3) (Figuur 27). Figuur 27 Isohypsens stijghoogte WVP 1, 2 en 3 op basis van beschikbare peilbuizen (naar TNO grondwaterkaarten/DINOLoket).



Figuur 27 Isohypsens stijghoogte WVP 1, 2 en 3 op basis van beschikbare peilbuizen (naar TNO grondwaterkaarten/DINOLoket).

3.5.2 Kwel

Beschikbare kwelkaarten zijn voornamelijk gebaseerd op de regionale grondwaterstroming: aan de hand van de stijghoogte van het eerste watervoerend pakket en freatische stijghoogten ofwel peilen en de doorlatendheid van de deklaag is een kwelwaarde bepaald. Uit de kaarten komt een beeld naar voren met vooral richting de duinen en richting de Noordzeedijk hogere kwelwaarden. De kwelkaart zoals gemaakt door TNO (Griffioen et al., 2002) geeft waarden rond 2 mm per dag bij de duinen tot 0.5 mm per dag in het noorden van de polder (Figuur 28).



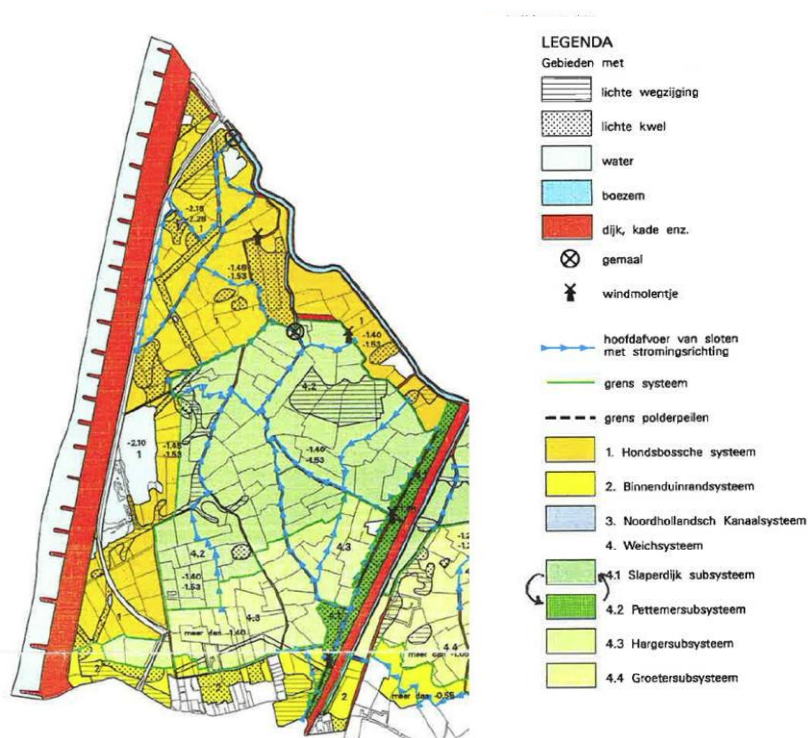
Figuur 28 Kwel in de winter en de zomer zoals bepaald uit stijghoogten en peilenkaarten (naar Griffioen et al., 2002)

Meer lokaal spelen omringende polders en hoogteverschillen binnen de polders een rol. Het DLO rapport (Mulder en Spoelstra, 1995) onderscheidt op basis van de herkomst van de kwel een aantal subsystemen (Figuur 29): het Hondsbossche systeem met kwel vanuit de Noordzee en vanuit de (brakke) Hondsbossche Vaart, het Binnenduindrandsysteem met zoete kwel vanuit de duinen en het Slaperdijk subsysteem met kwel vanuit de Hargervaart (langs het Jaagpad). In het 'middengebied' zijn het Groeter-, het Harger- en het Pettemersubstelsysteem apart benoemd zonder dat de herkomst van de kwel verder wordt uitgewerkt. Tevens zijn gebieden met lichte kwel en lichte wegzijging aangegeven.

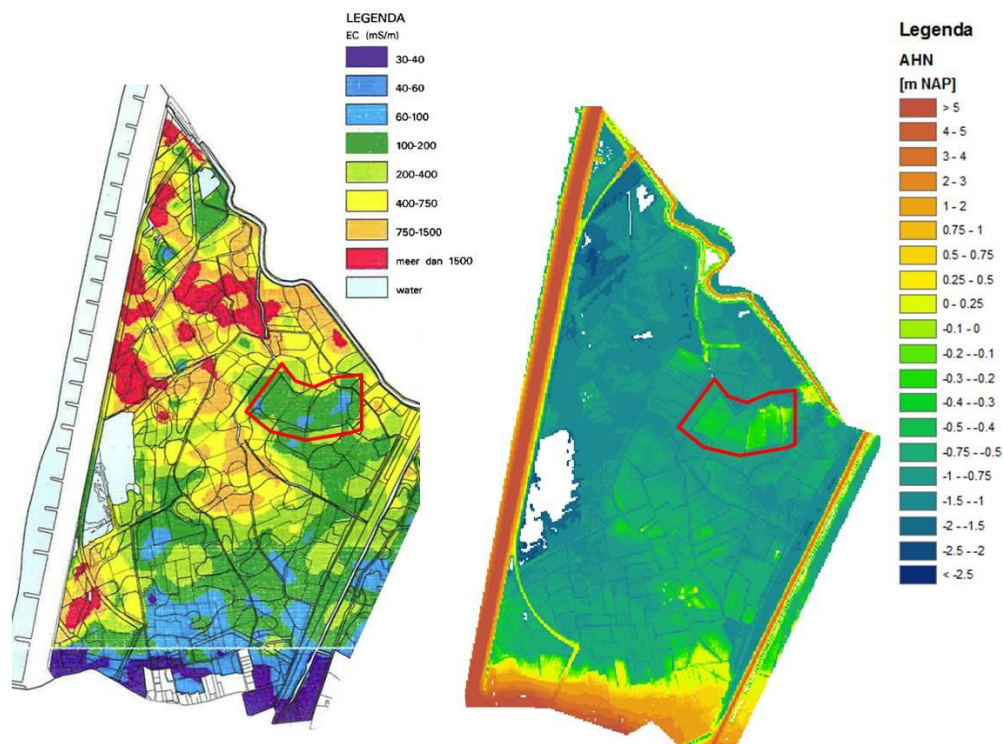
3.5.3 Perceelschaal

Op perceelschaal spelen processen een rol die zorgen voor heterogeniteit op korte afstand. Hoogteverschillen, bodemopbouw en ontwatering spelen hierin een grote rol. Zo kunnen bijvoorbeeld in een gebied met zoute kwel toch (landbouw)gewassen groeien door de opbouw van een zoetwaterlens tussen de drainagemiddelen (studies Leven met Zout Water (2013) en Verzilting Noord-Nederland (2012), Acacia Water).

Het grootste gedeelte van de polder staat onder invloed van kwel. Alleen bij een aantal hogere terreingedeelten treedt wegzijging op (Mulder en Spoelstra, 1995). De natste gronden zijn geclassificeerd als Gt Ia en IIa. Deze gronden komen we tegen op de afgegraven terreinen langs de Hondsbossche Zeewering en de oude Schoorlse Zeedijk en een strook grond ten westen van de Hondsbossche Slaperdijk.



Figuur 29 Geohydrologische systemen (Mulder en Spoelstra, 1995).



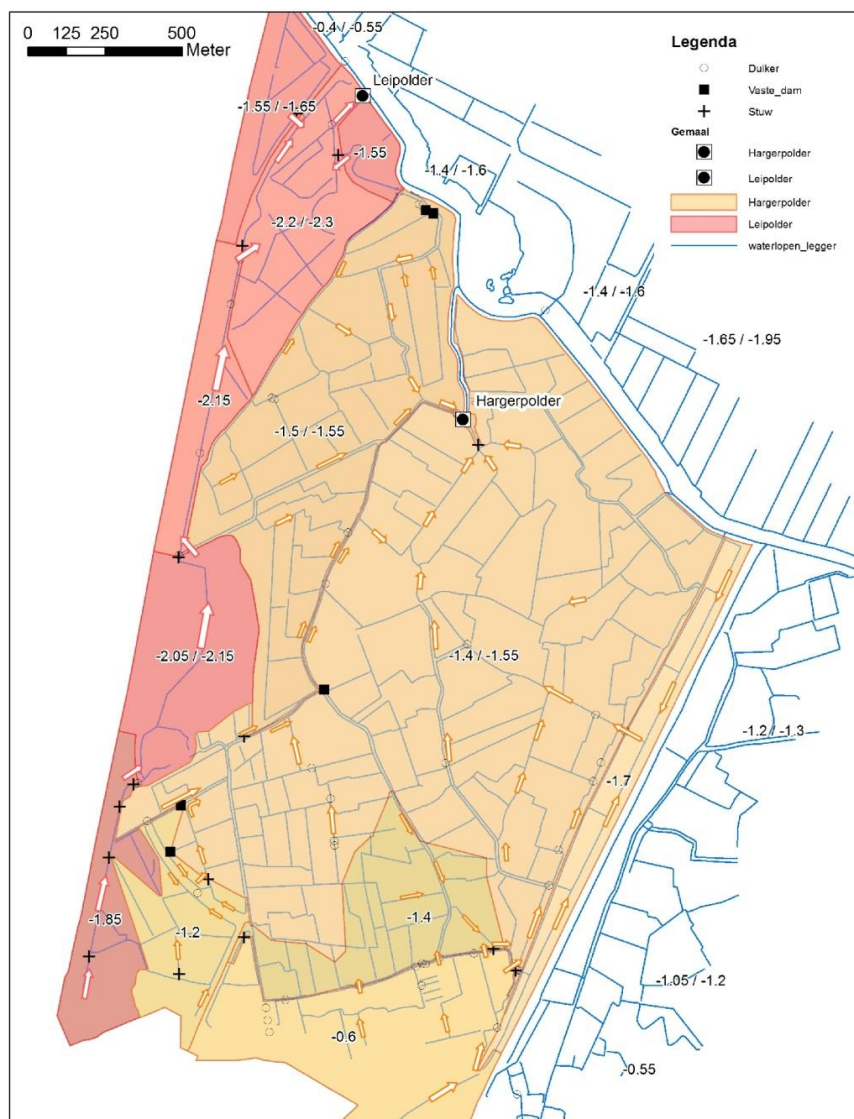
Figuur 30 Zoutgehalte ondiep grondwater (Mulder en Spoelstra, 1995) en AHN. Rood omcirkeld een aantal hoger gelegen percelen.

De invloed van hoogte is zichtbaar bij een aantal hoger gelegen percelen in het noordoosten van de polder (Figuur 30). Het grondwater onder hoger gelegen delen heeft een lager zoutgehalte omdat hier voornamelijk wegzijging optreedt en zich een zoet/brakwaterlens kan vormen. Monsternamen op het perceel (juni 2013) gaf een EC waarde van het grondwater van 1634 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dit komt overeen met de

range (100 – 200 mS/m) die de kaart van het ondiepe grondwater (Mulder en Spoelstra, 1995) aangeeft.

3.6 Oppervlaktewaterstroming

Op basis van de gegevens van HHNK (legger, locaties duikers, dammen, stuwen, peilenkaart, gesprekken met de beheerder mevr. L. van de Velde) en onze ervaringen in het veld (EC routing) is een kaart met de stroomrichtingen in de polders gemaakt (Figuur 31, Bijlage 6). Het water stroomt globaal vanuit het zuidelijke gebied (uitlopers van de duinen) richting de gemalen in het noorden.



Figuur 31 Stroomrichting in Hargerpolder en Leipolder (zie ook Bijlage 6)

3.6.1 Leipolder

Aan de zuidkant van de polder stroomt duinwater de polder binnen, dit water heeft een relatief lage EC (rond de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Via een aantal stuwtjes bereikt dit water het meertje De Putten. De toenemende EC maakt duidelijk dat de kwelinvloed vanuit de Noordzee toeneemt. De Putten staat in direct contact met de zee (Mulder en Spoelstra, 1995) en is zout (EC is hoger dan 28 mS/cm). Via een aantal peilvakken stroomt het water richting gemaal Leipolder in het noorden. Nabij gemaal Leipolder zijn enkele hoger gelegen peilvakken met invloed vanuit de Schermerboezem (kwel).

3.6.2 Hargerpolder

Aan de zuidkant van de polder stroomt duinwater de polder binnen. Dit water komt binnen via verschillende sprengen langs de duinrand. Het debiet van de spreng in het zuidoosten van de Hargerpolder is diverse malen bemeten, debieten variëren tussen 10 l/s (juni en juli 2013) en 17 l/s (mei 2013). De EC van deze spreng ligt rond de 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Zoet water uit de peilvakken direct tegen de duinrand loopt via stuwtdjes richting het noorden. Aan de zuidkant kwelt water vanuit de Hargervaart in het lager gelegen peilvak langs de Jaagkade (peil -1.7 m NAP), door middel van een molentje wordt dit de Hargerpolder in gemalen. Via enkele hoofdroutes stroomt het water richting het gemaal.

Het midden en noordelijk deel van de Hargerpolder bestaat uit twee grote peilvakken gescheiden door de Nessedijk (gelegen ten oosten van De Putten). Via beide peilvakken komt het water bij gemaal Hargerpolder. Het meest westelijke peilvak (oude Pettemerpolder) wordt beïnvloed door zoute kwel (hogere EC waarden in de EC routing). In het oostelijke peilvak is wel kwelinvloed zichtbaar (hogere EC waarden in sloten met weinig stroming), maar de doorstroming met duinwater zorgt in de meeste watergangen voor lage EC waarden. Langs de noordelijke rand van de Hargerpolder kwelt brak water op afkomstig van de hoger gelegen Hondsbossche Vaart.

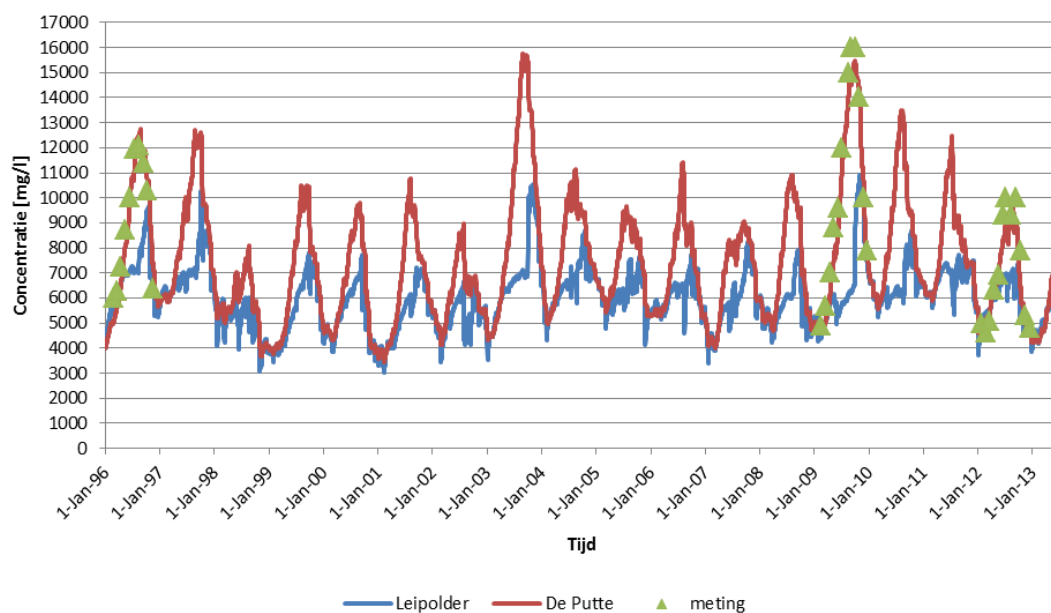
3.7 Water- en zoutbalans

De waterbalans geeft inzicht in de bijdragen die de verschillende posten van de waterbalans leveren aan het totaalplaatje. Onderstaand zijn de belangrijkste resultaten getoond, voor een meer uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar de bijlage (Bijlage 3).

Voor het iken van de waterbalans zijn 2 datasets beschikbaar: maalstaten van het gemaal in de Leipolder en chloride metingen. Er zijn echter maar een beperkt aantal jaren waarbij de maalstaat als een volledige reeks beschikbaar is, 2001, 2003 en 2012 zijn volledig, 2010 is vanaf midden februari beschikbaar. Deze 4 jaren zijn gebruikt voor het iken van de waterbalans wat betreft de maalgegevens van het gemaal van de Leipolder. Binnen de Leipolder zijn alleen in de Putten metingen van de chloride concentratie beschikbaar. Hierbij zijn metingen uitgevoerd in 1996, in 2009 en in 2012.

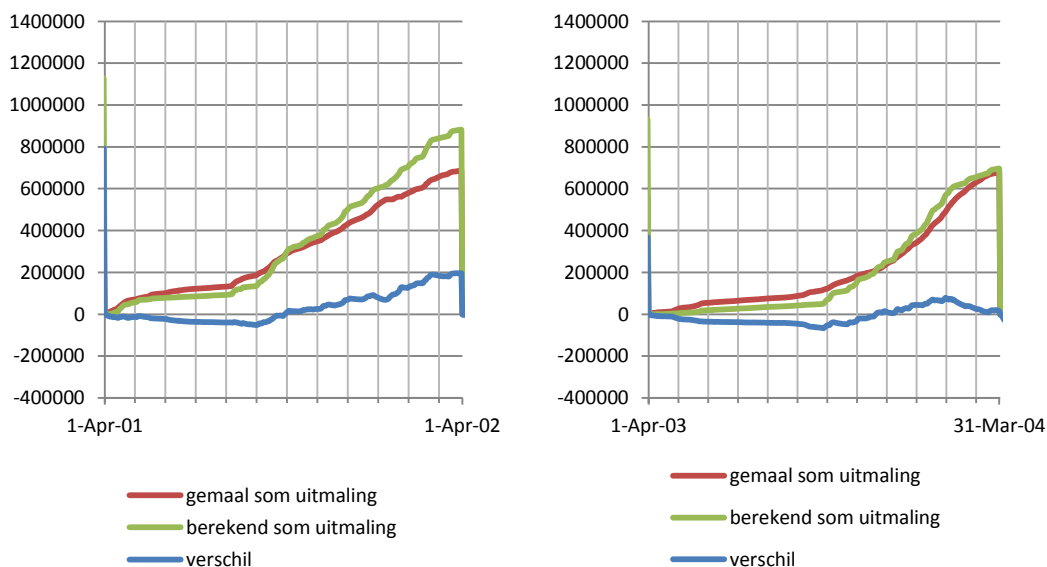
Met behulp van deze gegevens is de waterbalans geïkt. Allereerst is de waterbalans van de gehele Leipolder opgesplitst in 2 delen: deel 1 voor de Putten, waarbij de chloride waarden gebruikt zijn, en deel 2 voor de het noordelijke deel van de Leipolder. Deze 2 modellen zijn aan elkaar gekoppeld, zodat al het water uit de hele Leipolder via dit gemaal de polder verlaat.

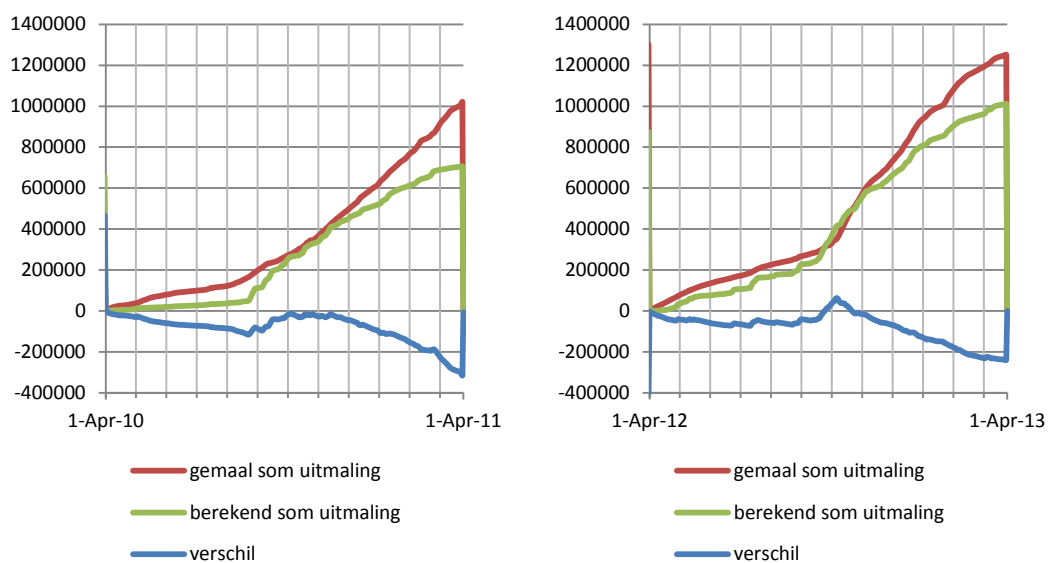
De waterbalans van de Putten bestaat voor ongeveer 40% uit open water, terwijl het noordelijke deel voor ongeveer 10% uit open water bestaat. Door grootte oppervlak open water treedt er veel indamping op, wat leidt tot grote variaties in de chloride concentraties in de Putten. Doordat indamping veel minder optreedt in het noordelijke deel, is de chloride fluctuatie hier veel minder, zoals te zien is in de Figuur 32.



Figuur 32 Berekend verloop van chloride concentratie door de tijd in de Putten (rood), vergeleken met de gemeten concentratie (groene punten) en de berekende concentratie in de noordelijke Leipolder.

In de waterbalans wordt ook berekend hoeveel water er wordt uitgeslagen door het gemaal van de Leipolder. De cumulatieve debieten (m³) per hydrologisch jaar (van 1 april tot en met 31 maart het jaar erna) zijn weergegeven in de onderstaande figuur. Te zien is dat met het model de debieten in de zomer goed kunnen worden gesimuleerd. Bij de winter debieten wordt in sommige jaren een onderschatting berekend, in andere jaren is dat een overschatting. Dit weerspiegelt de onzekerheden van een aantal parameters in het model maar kan ook gerelateerd zijn aan de onzekerheid van het geregistreerde maaldebit.



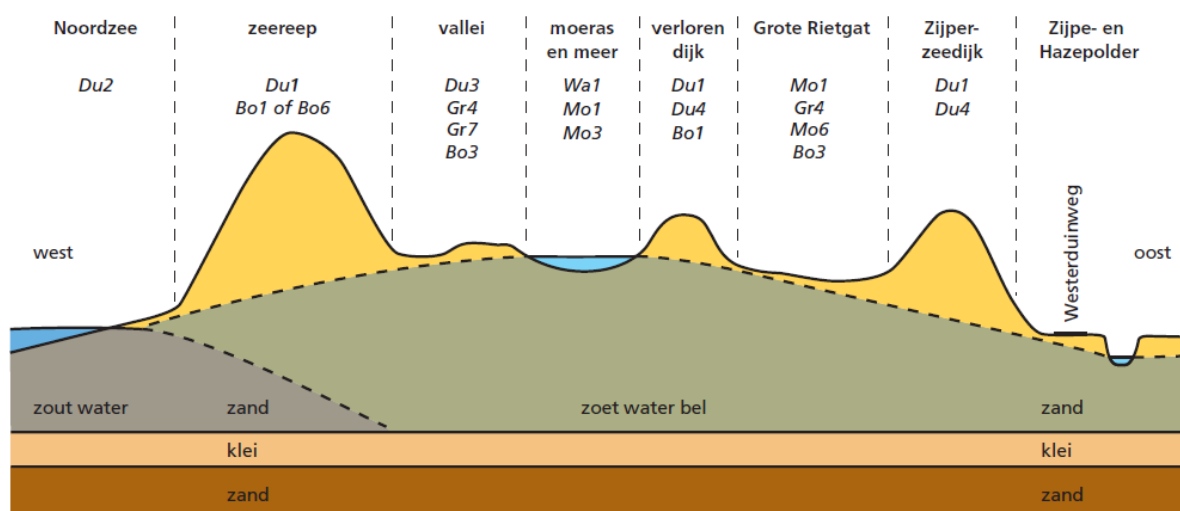


Figuur 33 Berekende (rode lijn) en gemeten uitmalingsdebieten (groene lijn) van het gemaal van de Leipolder en het verschil tussen de gemeten en berekende uitmalingsdebieten (blauwe lijn) in verschillende hydrologische jaren

4 Systeembeschrijving duinen

4.1 Systeembeschrijving

De hydrologie in het duingebied het Zwanenwater ten noorden van Petten, dat is gelegen op 2 tot 10 m + NAP, wordt geheel beheerst door de grondwaterstroming. Het infiltrerende regenwater stroomt via de ondergrond naar de Noordzee en naar de polders ten oosten en ten noorden van het duingebied. Het grondwater dagzoomt in meren (Eerste en Tweede Water) en natte duinvalleien, die geïsoleerde waterpartijen vormen. De grondwaterstanden en de peilen van de meren fluctueren sterk als gevolg van de seizoensmatige variatie van neerslag en verdamping. De waterstand in de meren schommelt tussen circa +2.40m NAP en +2.85m NAP. In veel duinsystemen is er sprake van een zoete grondwaterlens ingebed in zout grondwater. In dit duingebied bevindt zich op circa -2.50m NAP een zeer slechtdoorlatende laag bestaande uit klei en veen. Deze beperkt de ontwikkeling van de lens, zodat onder de slecht doorlatende laag, dus op geringe diepte, al zout grondwater wordt aangetroffen. Om verdroging tegen te gaan is een kwelscherm gemaakt langs de relatief diep gelegen Zijpe en Hazepolders ten oosten van het duingebied. Het zoutgehalte van de grote meren in het centrale gedeelte is relatief hoog door de accumulatie van zouten uit neerslag en sea spray. De duinen vormen een uniek natuurgebied, dat in tegenstelling tot ander duingebieden weinig is aangetast door drinkwaterwinning, afgraving en peilverlaging. Met name de vochtige duinvalleien herbergen een unieke flora.

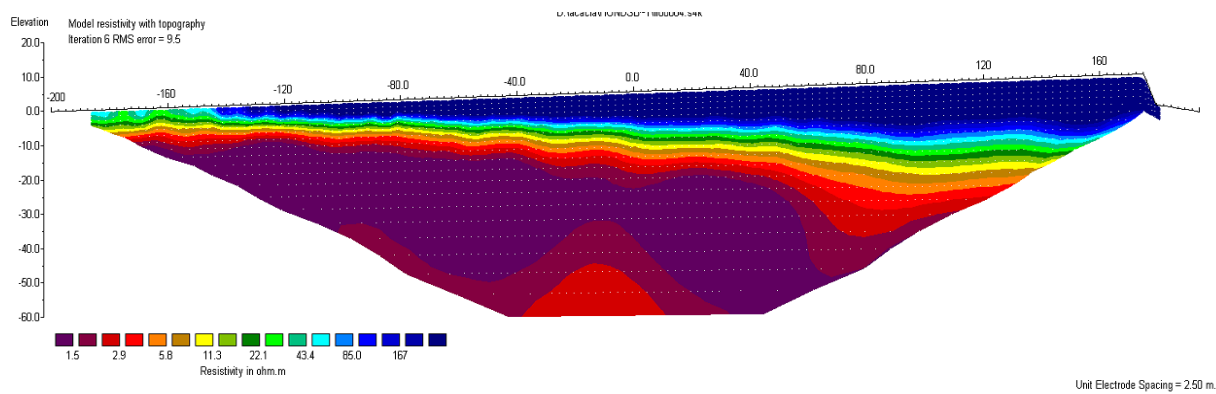


Figuur 34. Schematisch profiel door het duingebied het Zwanenwater (Natuurmonumenten, 2005).

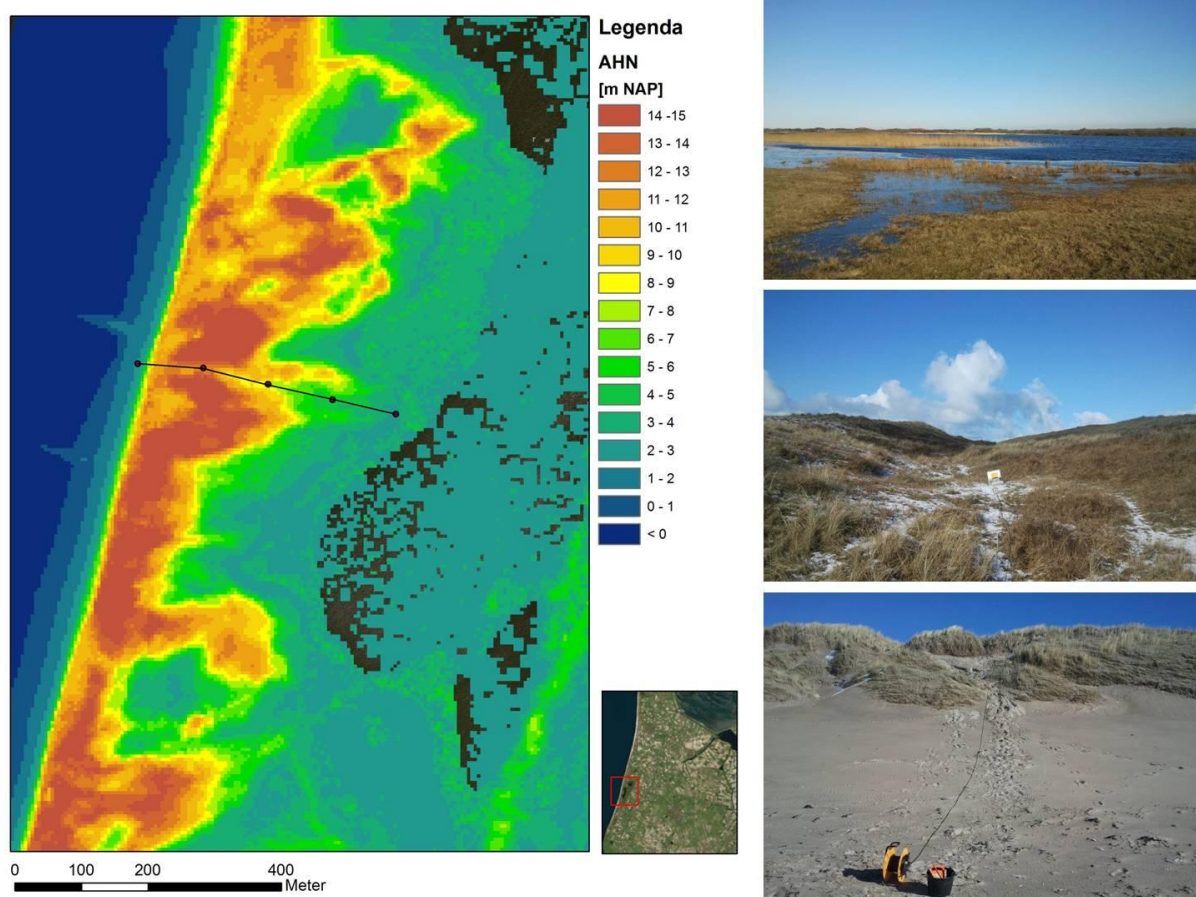
4.2 Zout-zout verdeling

De CVES meting in de duinen (Figuur 35 en Figuur 36) laat zien dat op geringe diepte relatief lage weerstanden voorkomen. Ter plaatse van de Tweede Water is op ca NAP - 8 m diepte sprake van brak en zout water. Het Zwanenwater zelf is zoet.

Handmatige EC metingen op diverse plaatsen in het Tweede Water gaven waarden tussen de 530 en 560 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Onder de hoger gelegen duinen reikt het zoet grondwater een tiental meters dieper. De weerstanden in de bovenste deel van de duinen zijn relatief hoog ($> 100 \text{ Ohmm}$), maar daar doet de invloed van de onverzadigde zone met een hoge weerstand zich gelden. We zien, in tegenstelling tot het schematisch plaatje uit het rapport van Natuurmonumenten (2005), dat de zoetwaterlens het diepst en het dikst is onder de westelijke duinenrij van het Zwanenwater.



Figuur 35 Resultaat CVES meting 2 (maart 2013) in de duinen. Links het Tweede Water rechts de Noordzee



Figuur 36 CVES meting 2 tov. de AHN (links). Rechts situatiefoto's, van boven naar beneden: Tweede Water, duinen, Noordzeestrand.

Er zijn weinig boringen in dit gebied. Boring B14C0025 ligt nabij het Tweede Water dichtbij de oostzijde van het CVES profiel. Verder zijn er geen boringen in de zone tussen de zee en het Tweede Water. Het filter van deze peilbuis staat in het tweede watervoerende pakket op ca NAP -22 m. De grondwaterstanden gemeten in deze boring liggen tussen NAP en NAP - 0.5 m. Dat is beduidend lager dan de freatische grondwaterstand en het peil in het Tweede Water (> NAP 2 m). Er is dus in principe een wegzijgingssituatie vanuit het duinlichaam. Echter, het grondwater in deze peilbuis is brak (EC = 6550 microS/cm en Cl = 2040 mg/l).

Dat wijst er op dat de Holocene kleilagen een grote hydraulische weerstand bezitten die de wegzijging verhindert. Mogelijk bestaat er in het tweede watervoerende pakket een onderstroom van zout grondwater vanuit de Noordzee naar de dieper gelegen polders ten oosten van het Zwanewater.

In de nieuwe boring C5 nabij de kust (Fig. 38) is een geofysische boorgatmeting uitgevoerd in 2014 (Fig 69). Deze meting bevestigt het bovenbeschreven systeem. Uit de geoelectrische weerstandsmeting blijkt dat het freatische duinzandpakket tot ca 7.5 m diepte een hoge weerstand heeft van ca 80 Ohmm en derhalve zoet grondwater bevat. De gammameting laat zien dat er zich van 7 tot 12 m diepte een kleilaag bevindt. Daaronder in het eerste watervoerende pakket is de weerstand relatief laag, namelijk 4 tot 5 Ohmm, wat duidt op brak grondwater. Op 16 mei 2014 was de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket, in het filter op 15 m diepte, ongeveer 1.7 m lager dan die in het freatische pakket op 7 m diepte. Dit duidt dus op infiltratie vanuit de duinen naar het eerste watervoerende pakket

4.3 Verwachte veranderingen na zandsuppletie en duinvorming

De zandaanwinning reikt tot aan de zuidelijke grens van het Zwanewater. Als er geen drainerende zone wordt gecreëerd tussen het nieuwe zandlichaam en de duinen zouden de freatische grondwaterstanden kunnen stijgen. Ook grondwaterstijghoogten in het tweede wvp zouden kunnen stijgen. Gezien het huidige potentiaalverschil tussen het eerste en tweede pakket lijkt opwaartse stroming vanuit dit pakket naar de meren en duinvalleien niet aannemelijk, ook vanwege de hoge weerstand van de ondiepe kleilaag. Er kan een onderstroom van zoet grondwater door het tweede watervoerende pakket worden opgewekt richting de polders ten oosten van het Zwanewater, maar dit kan ook weinig effect hebben op het natuurgebied.

5 Voorstel monitoring

5.1 Inleiding

Begin 2013 is een eerste monitoringsplan gemaakt (Arcadis, 2013), op basis van het effectrapport van eind 2012 (Arcadis, 2012). Aansluitend is in een notitie (Acacia Water, 2013) de monitoring verder uitgewerkt. Nadien is besloten om eerst te starten met de referentiemeting (binnen de nulmeting) en vervolgens een definitief voorstel voor monitoring van grond- en oppervlaktewater te doen op basis van de inzichten verkregen uit de referentiemeting.

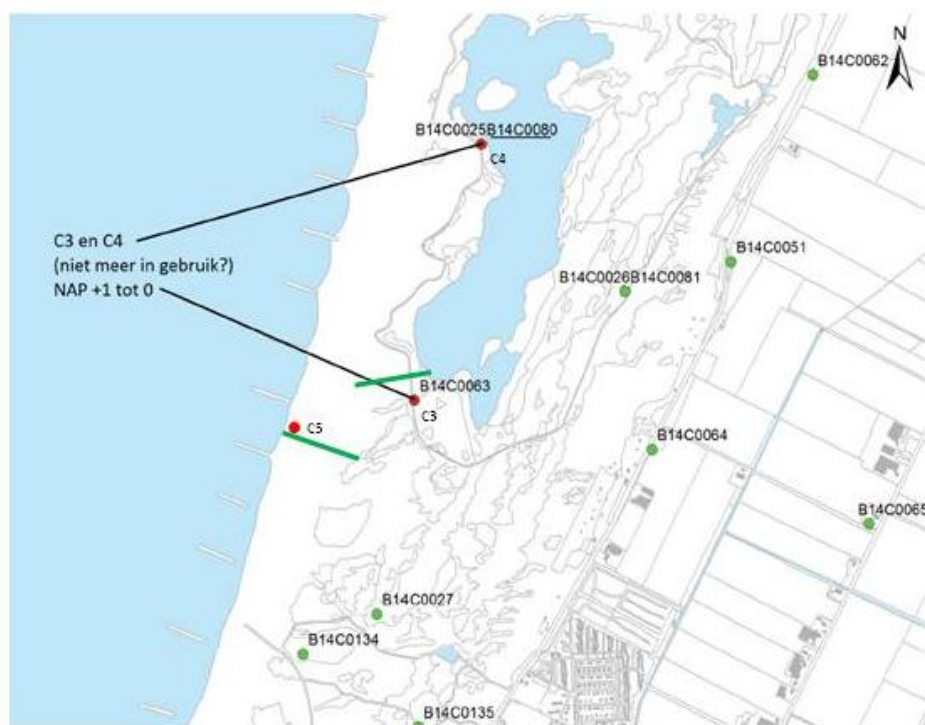
Met betrekking tot de effecten moet onderscheid gemaakt worden tussen de drukgolf (verandering grondwaterstand en kwelintensiteit) en de kwaliteitsveranderingen. De verwachting is dat grondwaterstanden (en daarmee samenhangend de kwelintensiteit) sneller zullen veranderen dan de kwaliteit van grond- en oppervlaktewater. Ook is het mogelijk dat in sommige gevallen eerst verzilting optreedt omdat 'oud' zout omhoog komt voor dat eventueel zoet water omhoog komt.

De inzichten uit de effectrapportage van Arcadis (2012) en de referentiemeting laten zien dat effecten als eerste in de Leipolder zullen optreden. De verwachting is dat deze vooral in het afgegraven deel (De Putten) zichtbaar zullen worden. In De Putten is in de nulsituatie sprake van sterke zoute kwel en er lijkt sprake van een 'directe' verbinding met de Noordzee: het effect van (met name) springvloed is direct merkbaar (Mulder en Spoelstra, 1995).

In grote lijnen bevelen we een monitoringssysteem aan dat gelijk is aan dat van Arcadis (2013) en Acacia Water (2013). Naast het monitoren van effecten in de polders wordt nu aanbevolen om ook te meten in de nieuw opgespoten duinen. Deze metingen geven inzicht in de opbouw van de zoetwaterlens in de duinen. Verder wordt aanbevolen om zout-en waterbalansen, zoals hier is toegepast in dit onderzoek te gebruiken als monitoringsinstrument.

5.2 Grondwater

In dat rapport wordt aanbevolen om ten behoeve van de effecten op Lei en Hargerpolder het grondwater langs de twee raaien A en B te monitoren.



Figuur 37. Peilbuislocaties (rood) en CVES locaties (groen) in Zwanewater

Bij de locaties (A1, t/m A5 en B1 t/m B5) zullen daartoe nieuwe en bestaande peilbuizen worden gebruikt, die tot in het freatische grondwater, het 1^e wvp en het 2^{de} wvp reiken. In raai A zullen de bestaande putten B14C0035 (A1 in Arcadis, 2013) en B14C0049 (A3 in Arcadis, 2013) worden opgenomen. Een voorbehoud wordt gemaakt voor put B14C0035, omdat niet zeker is of deze bruikbaar is. Put B14C0049 heeft peilfilters op diepten van ca NAP - 6, NAP - 16, NAP - 26, NAP - 46 en NAP - 64 m. Put B14C0035 heeft alleen een filter op ca NAP - 30 m. Als nieuwe waarnemingspunten worden langs raai A de volgende peilbuizen geplaatst: Bij locatie A1 komen 3 peilbuizen tot diepten van ca NAP - 3.5 m, NAP - 10 m en NAP - 22 m (of 30 m indien B14C0035 niet meer bruikbaar is); bij locatie A2 gaat het om 3 peilbuizen op diepten van ca NAP - 3.5 m, NAP - 10 m en NAP - 25 m; bij A3 wordt 1 peilbuis geplaatst tot ca NAP - 3.5 m. Zodra het zandsuppletiegebied voor de Zeewering begaanbaar is zullen daar bij elk van de nog nader vast te stellen locaties A4 en A5 3 peilbuizen worden geplaatst tot diepten van ca NAP - 3.5 m, NAP - 10 m en NAP - 25 m.

In raai B zijn ook 5 monitoring locaties voorzien. De bestaande putten B14C0036 (B1 in Arcadis, 2013) en B14C0022 (B3 in Arcadis, 2013) worden opgenomen in het monitoringssysteem. Een voorbehoud wordt gemaakt voor put B14C0022, omdat niet zeker is of deze nog bruikbaar is. Als nieuwe waarnemingspunten worden langs raai B de volgende peilbuizen geplaatst: bij locatie B1 komen 3 peilbuizen tot diepten van ca NAP - 3.5 m, NAP - 10 m en NAP - 22 m; bij locatie B2 gaat het om 3 nieuwe peilbuizen op diepten van ca NAP - 3.5 m, NAP - 10 m en NAP - 25 m; bij locatie B3 komen 3 peilbuizen tot diepten van ca NAP - 3.5 m, NAP - 10 m en NAP - 22 m (of 30 m indien B14C0022 niet meer bruikbaar is). Ook hier zullen, zodra het zandsuppletiegebied voor de Zeewering begaanbaar is, bij elk van de nog nader vast te stellen locaties B4 en B5 3 peilbuizen worden geplaatst tot diepten van ca NAP - 3.5 m, NAP - 10 m en NAP - 25 m.

Indien blijkt dat B14C0022 niet meer bruikbaar is stellen we voor om de locaties van B2 en B3 iets naar het noorden te verplaatsen, zodat ze samenvallen met de locaties, waar respectievelijk CVES 6 en 7 zijn uitgevoerd en de grondwatermonsters van Loc2 en Loc3 zijn genomen.

Voor de uitvoering van de peilbuizen bij de overige locaties C1, C2, D1 en D2 en de extra peilbuis bij Petten, verwijzen we naar de notitie van Acacia (2013). Zie ook figuur 51.

Wij bevelen verder aan om voor de diepste peilbuizen bij de monitorinlocaties een diameter van minimaal 2 inch (51 mm) aan te houden. In deze buizen kan dan gedurende de monitoring geofysische EM39 metingen worden uitgevoerd. Daarmee kan een verticaal profiel van de weerstand van de ondergrond worden verkregen ter aanvulling op de puntinformatie van de analyses van de drie filters.

Wat betreft de grondwaterstanden adviseren we om de peilbuizen van alle raaien uit te rusten met automatische drukopnemers (TD divers of een vergelijkbaar product) om de grondwaterstanden en -stijghoogten continu te kunnen volgen. Het is van belang om een lange record te hebben om systeemveranderingen te kunnen duiden aan de hand van tijdreeksanalyse (bijvoorbeeld met Menyanthes). De divers worden eens per kwartaal uitgelezen en geïnspecteerd.

In de putten A1, A4, A5, B1, B4, B5 en C5 zullen tijdens tweejaarlijkse monitoringrondes ook grondwatermonsters worden genomen van alle filters en worden geanalyseerd op macro-ionen. Aanbevolen wordt om met de monsternamen te beginnen 1 jaar na uitvoering van de zandsuppletie. Zodra het grondwater begint te verzoeten dienen ook de andere meer landinwaarts gelegen peilbuizen te worden bemonsterd en geanalyseerd.

In de Hazepolder ten noorden van de Lei- en Hargerpolder zijn voor deze studie geen veldmetingen gedaan. Het watersysteem zal naar alle verwachting niet veel anders zijn dan dat van de laatstgenoemde polders. De polderpeilen van NAP -1.4 m tot NAP - 1.95 m zijn vergelijkbaar behoudens een smalle zone achter de zeewering, waar peilen van NAP-0.4 m tot NAP -0.55 m worden gehandhaafd. Ook in de Hazepolder heerst overwegend kwel van brak grondwater. De zoute kwel van het Noordzeewater, die ook hier vermoedelijk in een zone van enkele honderden meters achter de zeewering plaatsvindt, zal geringer zijn dan in de zuidelijker polders vanwege de hoge peilen. In de polder staan een aantal peilbuizen, die geschikt zijn voor monitoring. De filters van deze peilbuizen reiken tot ca 1.5 en 5 m onder maaiveld, respectievelijk in het freatische grondwater en in het eerste watervoerende pakket. Van deze peilbuizen zijn geen analyses bekend. Wij bevelen aan om de volgende peilbuizen in het monitoringsysteem op te nemen: B14-141, B14-144, B14-145. Van deze buizen en de buizen B14-146, B14-148 en B14-149 dienen in het eerste jaar alle filters te worden bemonsterd. Daarna kan worden volstaan met bemonstering en analyses van put B14-141 om de twee jaar. Na doorbraak van zoet kwelwater dienen ook de putten B14-144 en B14-145 te worden opgenomen in de tweejaarlijkse bemonstering. We bevelen aan om ter plaatse van B14-141 een diepe put te boren tot ca 25 m met een diameter van 50 mm om jaarlijks EM39 metingen te kunnen uitvoeren om de doorbraak te kunnen volgen. In het gebied tussen B14-141 en B14-144 zal elke twee jaar een CVES sondering worden uitgevoerd om na te gaan of het zoete kwelwater doordringt tot in de freatische grondwater. Tenslotte bevelen we aan om de grondwaterstanden in de putten B14-141, B14-144 en B14-145 te monitoren door middel van divers om het eventuele effect van grondwaterstandverhoging te volgen.

5.3 Oppervlaktewater

De aanbeveling voor monitoring van het oppervlaktewater wijkt enigszins af van het voorstel van Arcadis (2012). Naast de reguliere monitoring, die nu al plaatsvindt door het waterschap, stellen we om op 3 locaties zoutgehalte, temperatuur en druk automatisch te registreren (CTD divers).

De eerste locatie is de Putten, waar naar de effecten in het oppervlaktewater het eerst worden verwacht. De waterbalans en de CTD metingen laten zien dat deze effecten ook meetbaar zullen zijn bij het gemaal Leipolder. Daar zal ook automatische registratie plaatsvinden d.m.v. CTD divers. Dat laatste is ook van belang met het oog op de monitoring door middel van de zout- en waterbalansmethode. De Hargerpolder is nu relatief zoet – ook bij het gemaal – vanwege de instroom van zoet water uit de Hargerspreng. We bevelen aan om bij het gemaal ook een CTD diver te plaatsen. De zoute kwel in het

zuidwestelijke en noordelijk (oude Pettemerpolder) gedeelte zal ook kunnen afnemen op termijn. De verwachting is dit ook effect zal hebben op het zoutgehalte van de Hargerpolder. Ook hier maakt de automatische registratie van zoutgehalte bij het gemaal monitoring m.b.v. de zout en waterbalansmethode mogelijk.

Opgemerkt wordt dat de drukopnemers van de divers, die voor het onderzoek zijn gebruikt bij de 2 gemalen, lieten zien dat het mogelijk is om de aanslag en afslagmomenten te bepalen van de gemalen. Deze zijn zichtbaar in sprongen van de drukopnemers (waterpeilfluctuaties).

5.4 Geofysische metingen

Ten behoeve van de monitoring wordt voorgesteld om elke twee jaar bij de twee meetraaien A en B in de Lei- en Hargerpolders CVES metingen van 160 m lengte uit te voeren (figuur 39). Deze metingen leveren een 2D beeld op van de elektrische weerstanden van de ondergrond. De CVES metingen staan loodrecht op de Zeewering bij locaties A1 en B1. Door de gemeten elektrische weerstanden van de metingen te vergelijken met de referentiemeting of de voorgaande CVES metingen kan de verandering van het zoutgehalte worden bepaald. Verder wordt aanbevolen om in het duingebied het Zwanenwater ook een elke twee jaar een CVES meting van 400 m uit te voeren nabij locatie C5 (figuur 38). Als blijkt tijdens de monitoringsrondes dat in een van de raaien zoete kwel begint door te breken wordt ook voorgesteld om op de locaties A2, B2 en C3 een CVES uit te voeren.

In het nieuwe zandsuppletiegebied aan de zeezijde (A4 en B4) gaan naar verwachting de ontwikkelingen veel sneller. Daar wordt aanbevolen om elk jaar een CVES van 160 m lengte uit te voeren.

Verder wordt aanbevolen om elk jaar boorgatmetingen uit te voeren met de EM39 in de diepste 51 mm diameter peilbuizen van B1, B4, A1, A4 en C5 om een nauwkeurig verticaal profiel van de weerstanden te verkrijgen, waaruit de zoutgehalten kunnen worden bepaald. Hier geldt hetzelfde als voor de CVES metingen. Als de metingen “positief” (als zoet grondwater doorbreekt) kunnen ze ook worden uitgevoerd in de diepe peilbuizen van locatie B2, A2 en C3.

Aanbevolen wordt om met de geofysische monitoring te beginnen 1 jaar na de start van de zandsuppletie.

5.5 Acties voor monitoring

5.5.1 Overzicht alle monitoringactiviteiten

In de tabel 1 hieronder volgt een kort overzicht van de voorgestelde monitoringsactiviteiten.

Tabel 1. Monitoringactiviteiten

Monitoring	Techniek	Locaties 1 ^{ste} fase	Frequentie	Locaties 2 ^{de} fase
Grondwater	CVES (2D beeld geleidbaarheid langs profiel)	1 CVES in duinen Zwanenwater 2 CVES in Lei en Hargerpolder bij A1 en B1 1 CVES in Hazepolder tussen de putten B14-141 en B14-144	Tweejaarlijks	Na zoutdoorbraak bij A1, B1 en C5 ook CVES metingen bij locaties A2, B2 en C3
	CVES in gebied zandsuppletie	2 CVES in nieuwe duingebied buiten de zeewering bij A4-A5 en B4-B5	Jaarlijks	
	EM39 (continu verticaal beeld geleidbaarheid in peilbuis)	In peilbuizen A4, A5, A1, B4, B5, B1 en C5, nieuwe put bij B14-141 in de Hazepolder	Jaarlijks	Na doorbraak zout bij A1, B1 en C5 ook EM39 metingen bij A2, B2 en C3 en eventueel nog later in A3 en B3
	Monsternamen en chem. analyse	in peilbuizen A4, A5, A1, B4, B5, B1 en C5, B14-141 (Hazepolder)	tweejaarlijks	Na doorbraak zout in A1, A2 en C5 ook analyses van A2, B2 en C3 en B14-144 en B14-145 in Hazepolder
	TD divers (grondwaterstanden en temperatuur)	in peilbuizen A1, A2, A4, A5, B1, B2, B4, B5, C4 en C5 en peilbuizen B14-141, B14-144 en B14-145 (Hazepolder)	tweemaal per jaar inspectie en uitlezing	
Oppervlaktewater	CTD divers (waterstanden, temperatuur en geleidbaarheid)	bij gemalen van Leipolder en Hargerpolder en in de plas "de Putten	tweemaal per jaar inspectie en uitlezing	
	Monsternamen en chem. analyse	plas de Putten en reguliere monsternamenpunten HHNK	jaarlijks	
Zoutbelasting	Water- en zoutbalansen (methode Acacia Water)	Leipolder en Hargerpolder	tweejaarlijks	

5.5.2 Plaatsen peilbuizen

Hieronder volgt een overzicht van de nieuwe te plaatsen peilbuizen (zie verder ook Acacia, 2013).

Tabel 2 Overzicht aanwezige en te plaatsen peilbuizen. Tussen haakjes (V) wanneer er mogelijk een nieuwe peilbuis moet worden geplaatst (afhankelijk van kwaliteit aanwezige peilbuis).

Peilbuis locatie	Nog aanwezig	Mogelijk aanwezig	Nieuw plaatsen	Filterdiepte	Diameter
A1		B14C0035		30 m	
			V	22 m (als B14C0035 niet bruikbaar, dan tot 30 m)	2 inch
			V	6 - 10 m (onder deklaag)	
			V	freatisch	
A2			V	25 m	2 inch
			V	6 - 10 m (onder deklaag)	
			V	freatisch	
A3	B14C0049			6 m, 16 m, 26 m, 46 m, 64 m	
B1	B14C0036			30 m	
			V	22 m	2 inch
			V	6 - 10 m (onder deklaag)	
			V	freatisch	
B2			V	25 m	2 inch
			V	6 - 10 m (onder deklaag)	
			V	freatisch	
B3		B14C0022		30 m	
			V	25 m (als B14C0022 niet bruikbaar, dan tot 30 m)	2 inch
			V	6 - 10 m (onder deklaag)	
			V	freatisch	
D1	B14C0138			freatisch	
D2	B14C0139			freatisch	
C1		B14C0108	(V)	freatisch	
			V	6 - 10 m (onder kleilaag)	
C2		B14C0130	(V)	freatisch	
C3		B14C0063	(V)	freatisch	
			V	6 - 10 m (onder kleilaag)	
C4		B14C0025	(V)	freatisch	
C5			V	Freatisch	
			V	6 - 10 m (onder kleilaag)	2 inch
extra			V	25 m	2 inch
Petten			V	6 - 10 m (onder deklaag)	
			V	freatisch	

Onderstaande tabel geeft de locaties van de peilbuizen. Streven bij het plaatsen van peilbuizen is om deze zo ver mogelijk van de sloot te plaatsen. Dit in overleg met de terreinbeheerder. Gegeven XY locaties zijn dus indicatief, doel is om binnen maximaal 20 meter van deze locatie de peilbuizen te plaatsen.

Tabel 3 Coördinaten (XY, Rijksdriehoekstelsel) locaties peilbuizen.

Coördinaten		
naam	X	Y
A1	105090	529265
A2	105350	529082
A3	105862	528792
B1	104890	528220
B2	105194	528198
B2alternatief	105082	528351
B3	105420	527820
B3alternatief	105436	528190
extra Petten	105653	531374
C1	106357	532073
C2	106568	532556
C3	107607	535560
C4	107793	536460
C5	107090	534800
D1	105505	526091

5.5.3 Tijdschema

In het onderstaande schema worden de activiteiten voor de komende 2 jaar weergegeven rond de installatie van nieuwe peilbuizen, het onderhoud en de monitoring.

Actie	Begin	frequentie
Plaatsen nieuwe peilbuizen en registratieapparatuur (divers) en EM39 meting in diepe 2 inch buizen in polder en duinen	September 2013	
Plaatsen van peilbuizen en registratieapparatuur (divers) en EM39 meting in diepe 2 inch peilbuizen in zandsuppletiezone	Januari 2014 ? (na droogvallen)	
CVES monitoring zandsuppletiegebied bij A4 en B4.	Januari 2014	Jaarlijks
EM39 monitoring in diepe filters A4, A1, B4, B1, C5. Na doorbraak zoekt ook in A2, B2 en C3	Januari 2015	Jaarlijks
CVES monitoring overig bij A1, B1 en C5. Na doorbraak zoekt ook bij A2, A3, B2 en B3	Januari 2015	Tweejaarlijks
Monsternamen peilbuizen en analyse A1, A4, A5, B1, B4, B5, C5. Bij doorbraak zoekt ook A2, A3, B2, B3 en C3	Januari 2015	Tweejaarlijks
Onderhoud en uitlezen registratieapparatuur	September 2013	Elk kwartaal

6

Verzoeting Lei- en Hargerpolder

6.1 Inleiding

Naar verwachting zal na de uitvoering van de kustversterking voor de Hondsbossche Zeewering zich een zoet grondwaterlichaam gaan vormen in de ca. 300 m brede duingordel ten westen van de Zeewering. Dat zoete water zal vermoedelijk geheel of deels gaan afstromen naar de binnendijks gelegen Lei- en Harger polder. In 2009 is door Arcadis (2009) een regionale modelstudie uitgevoerd naar de hydrologische effecten van de kustversterking. Die gaf inderdaad aan dat de zoutgehalten zouden afnemen in een zone van 100 tot 200 m binnendijks van de Zeewering. In 2012 heeft Arcadis (2012) een meer gedetailleerde modelstudie uitgevoerd, waarbij de grondwaterstroming en zoutgehalten gesimuleerd werden in een 2D beeld langs enkele raaien loodrecht op de kust. De conclusie was dat in een zone variërend van 50 tot 300 m achter de Zeewering de huidige kwel van zout grondwater op termijn zou kunnen veranderen in zoete kwel. Volgens Arcadis moet met een gemiddelde invloedszone van 150 m rekening worden gehouden. Verwacht wordt dat het zoete grondwater na 10 a 20 jaar zal doorbreken als zoete kwel in die zone. Uit de berekeningsresultaten kan worden afgeleid dat de stroming van zoet grondwater onder de Zeewering voornamelijk via het 1^{ste} wvp plaatsvindt (NAP-5 tot NAP-15 m), maar ook in geringe mate via het 2^{de} wvp (NAP-20 tot NAP -45 m). De kwel zou gemiddeld 2.5 mm/dag bedragen. In die invloedszone zal het water, dat in de watergangen en percelen opkwelt, verzoeten. Dat leidt weer tot een afname van het zoutgehalte van het oppervlaktewater van de Leipolder. De gevolgen voor de Hargerpolder voor zowel grond als oppervlaktewater zullen naar alle waarschijnlijkheid beperkt zijn.

Gedurende het onderzoek groeide de noodzaak om de verzoeting nader te kwantificeren met het oog op de omvang en dimensionering van mogelijke mitigerende maatregelen. Om die reden zijn voor dit onderzoek hernieuwde berekeningen uitgevoerd, waarbij ook nieuwe data en inzichten zijn gebruikt die uit de systeemanalyse of referentiemeting van dit onderzoek zijn voortgekomen. Daartoe zijn berekeningen met een numeriek grondwater model uitgevoerd, ook langs een raai, om de ontwikkeling van verzoeting van de ondergrond en de zoete kwel in de polder te volgen. Op basis hiervan is een schatting gemaakt van de zoet en zoute kwel in de polder. Vervolgens zijn de zoutgehalten in het oppervlaktewater berekend met behulp van een water- en zoutbalansmodel voor de Leipolder. Dit model is al toegepast voor het beschrijven van de referentiesituatie in paragraaf 3.7.

In de hierop volgende paragrafen worden de berekeningen met beide modellen toegelicht, welke de opmaat vormen voor het volgende hoofdstuk over de mitigerende maatregelen.

6.2 Berekeningen met een numeriek grondwatermodel

6.2.1 Inleiding

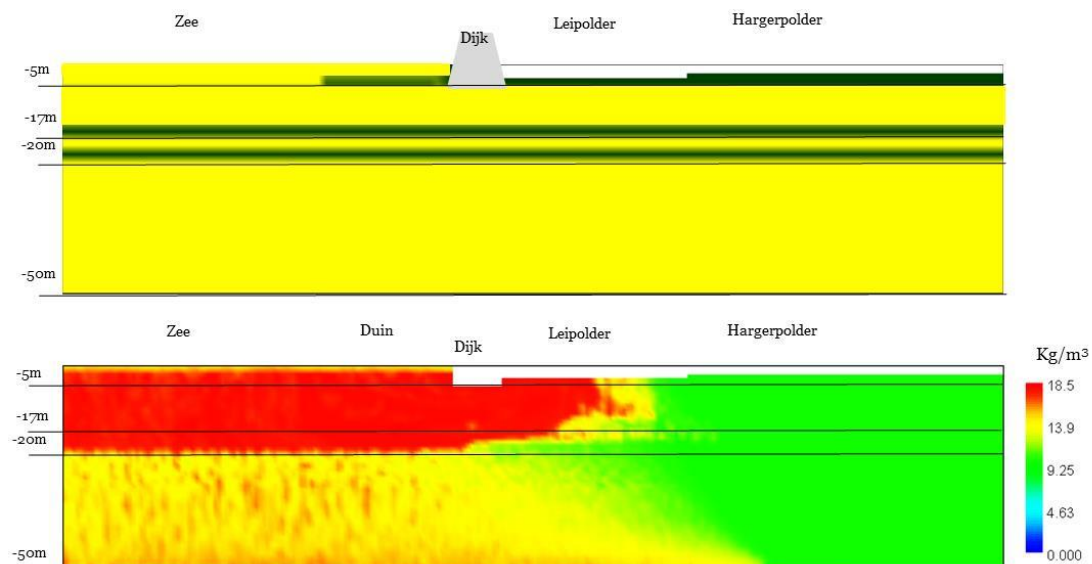
Doel van de numerieke modellering is tweeledig. Ondanks de grote hoeveelheid geohydrologische informatie die er verzameld in het projectgebied bestond nog steeds twijfel over de mate en of verzoeting zal optreden. Het eerste doel van het numerieke model is dan ook om zekerheid te krijgen over de of verzoeting zal optreden. Het tweede doel is er aan gerelateerd en gaat over de mate van verzoeting die optreedt. Deze is van belang voor het ontwerp van de mitigerende maatregelen en de besluitvorming in het algemeen. Om voor beide doelen inzicht te krijgen zijn een aantal modelscenario's doorgerekend die hieronder worden toegelicht.

6.2.2 Modelbeschrijving

Voor het simuleren van de grondwaterstroming en de verzoeting is gebruik gemaakt van het programma SEAWAT, een dichtheidsafhankelijke grondwatermodel (Langevin et al., 2008). Het model is gemaakt voor 2-dimensionale grondwaterstroming in een raai loodrecht op de kust. Omdat er de nodige onzekerheid bestaat met betrekking tot bepaalde waarden van randvoorwaarden en bodemparameters zijn een aantal scenario's doorgerekend. Het model is grotendeels gebaseerd op geohydrologische informatie uit GEOTOP en REGIS.

Het grondwatermodel representeert een dwarsdoorsnede van 2.5 km loodrecht op de kust beginnend in de zee en eindigend in de Hargerpolder. De dwarsdoorsnede is gebaseerd op de situatie ter hoogte van de Putten in het zuidelijk deel van de polder (Figuur 39). De geohydrologische situatie alhier is min of meer representatief voor de gehele Leipolder. Bovendien vormt dit het meest kritische deel van de Leipolder.

Het model omvat de elementen zee, het nieuwe duinlichaam, de Hondsbossche Zeewering, de Leipolder en de Hargerpolder. De ondoorlatende basis van het model ligt op 50 meter diepte en komt overeen met de Eemklei. Het model is verdeeld in cellen met een hoogte en lengte van respectievelijk 1 en 10 m.



Figuur 39: Boven: Schematisatie van het grondwatermodel voor het referentiescenario, geel zijn de watervoerende pakket, groen zijn de weerstandlagen. Onder: Zoet-zout verdeling berekend met het referentiescenario, wat tevens de initiële situatie vormt voor de overige scenario's.

Er zijn drie weerstandslagen aanwezig volgens GEOTOP, namelijk: de Holocene deklaag tot 5 m diepte, dan een tweede 2 m dikke laag op ca. NAP - 11 m. diepte (tijdens het project uitgevoerde boringen lieten zien dat deze laag zich bevindt op ca. NAP - 16 m te zijn) en de derde laag van 2 m dikte op ca. 21 m. diepte. Tussen de weerstandslagen bevinden zich de watervoerende pakketten bestaande uit zand. Het eerste watervoerende pakket heeft een hydraulische doorlatendheid van 15 m/dag, de diepere watervoerende pakketten hebben een hydraulische doorlatendheid van 25 m/d. De weerstanden van de weerstand biedende lagen bedragen 300 dagen per m dikte voor de deklaag en 400 dagen per m dikte voor de dieper gelegen lagen. Voor een overzicht van de schematisering van het model zie Figuur 39 (boven).

De dijk is een element, waarin geen stroming mogelijk is. De zijranden en de onderrand zijn ondoorlatend. Langs de open bovenrand zijn vaste stijghoogten opgelegd, gelijk aan de polderpeilen van de Leipolder (NAP -2.15 m) en de Hargerpolder (NAP -1.55 m). Voor de scenario's wordt er een constante grondwateraanvulling van 1 mm/d voor de duinen aangehouden. Behalve in het deel dat de zee representeert, wordt aangenomen dat bij voeding vanaf de bovenrand van het model zoet water infiltreert.

De aannames voor de longitudinale en transversale dispersiviteit zijn respectievelijk 0.1 en 0.01 m. De diffusie coëfficiënt is geschat op 10^{-5} m/s. Het verzoetingsproces in de rekenscenarios is gesimuleerd gedurende een periode van 50 jaar. Een simulatie met een langere rekentijd (100 jaar) toont dat daarna de zoutgehalten niet veel meer veranderen.

Eerst is een berekening uitgevoerd met een referentiemodel op basis van de geohydrologische situatie voor de aanleg van de kustversterking. Deze wordt getoond in Figuur 39 (onder). Bij aanvang van de berekening is uitgegaan van een zoutgehalte van 10000 mg/l chloride in alle pakketten. Dit is ongeveer de helft van de zeewaterkwaliteit (18000 mg/l). Een typische waarde dat langs de kuststrook en in dit gebied wordt aangetroffen (zie hoofdstuk 4).

Het patroon van zoutgehalten komt goed overeen met de gemeten patronen in de Leipolder. Een uitzondering vormt het zuidelijk deel van de Leipolder waar het grondwaterstromingssysteem van de Schoorlse duinen de watervoerende pakketten tussen NAP-20 en NAP-50 heeft verzoet.

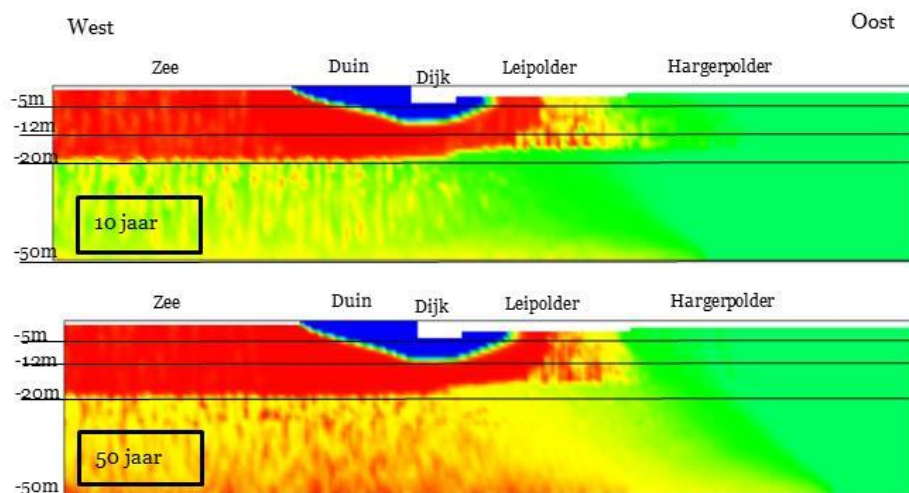
De resultaten berekend met het referentiemodel zijn in de scenarioberekeningen gebruikt als startvoorwaarde.

6.2.3 Scenarioberekeningen

Scenario 1: geen deklaag buitendijks, gehalveerde weerstand van deklaag binnendijks, voeding in de duinen van 1 mm/dag

Dit scenario is gebaseerd op het Arcadis model (Arcadis 2012), waarin is aangenomen dat de deklaag ten westen van de zeewering afwezig is. Een andere aanname is dat de weerstand van de binnendijkse deklaag half zo groot is ten opzichte van het referentiemodel. Dit vanwege het vermoeden dat de deklaag onder de Putten zou zijn vergraven. Verder bevindt de tweede weerstandsbiedende kleilaag in dit scenario zich tussen NAP-10 en NAP-12 m conform GEOTOP en het Arcadis model.

Figuur 40 toont de ontwikkeling van de zoete bel voor scenario 1: na 10 jaar zal verzoeting optreden aan de rand van de Leipolder. De zoete bel blijft zich verder ontwikkelen en reikt tot ongeveer 200 a 250m in de Leipolder. Ontwikkeling en verplaatsing van de zoete bel vindt plaatst in de duinen en het bovenste deel van het eerste watervoerende pakket. De kwel in de Leipolder varieert van 3 tot 2 mm/dag vanaf de zeewering naar het oosten. Ongeveer 75 % van de kwel in de Leipolder is zoet en 25 % is brak grondwater. In totaal neemt de kwel af met ca 20 % ten opzichte van de het referentiescenario. In de duinen liggen de grondwaterstanden slechts enkele centimeters boven zeeniveau.

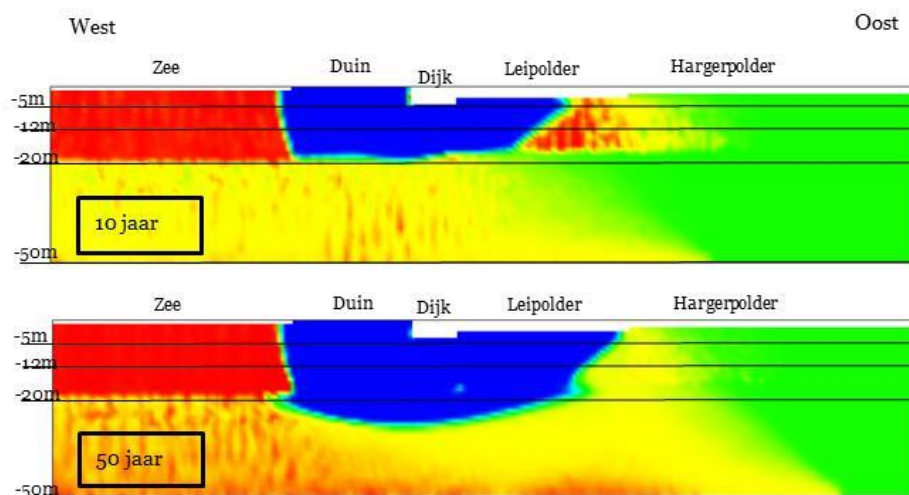


Figuur 40: Scenario 1: geen deklaag buitendijks, gehalveerde weerstand van deklaag binnendijks, voeding in de duinen van 1 mm/dag. Kwel in Leipolder neemt af van 3 mm tot 2 mm/dag in oostelijke richting.

Scenario 2: geen deklaag buitendijks, gehalveerde weerstand van deklaag binnendijks, vast peil van NAP+0.5 m in de duinen

Scenario 2 is gelijk aan scenario 1 maar in dit scenario is in de duinen een vast peil opgelegd van NAP + 0.5 m in plaats van een voeding van 1 mm/dag. Dit peil is opgelegd omdat voor het ontwerp van de duinmorfologie de aannemer is uitgegaan van een toekomstige grondwaterstand van NAP +0.5 m.

Figuur 41 geeft de resultaten van scenario 2 weer. Vanwege de hoge grondwaterstand in de duinen en het ontbreken van een deklaag ontstaat een grote waterstroom naar de duinen. De kwel varieert van 4 tot 2.3 mm/dag. Reeds na 10 jaar kwelt in en een groot deel van de Leipolder zoet grondwater op. Na 50 jaar is de gehele Leipolder verzoet. Ook het gehele eerste watervoerende pakket verzoet. Het blijkt echter dat de berekende infiltratie onder de duinen groter is dan de mogelijke voeding vanuit de neerslag. Dit scenario kan daarom als onrealistisch worden beschouwd.



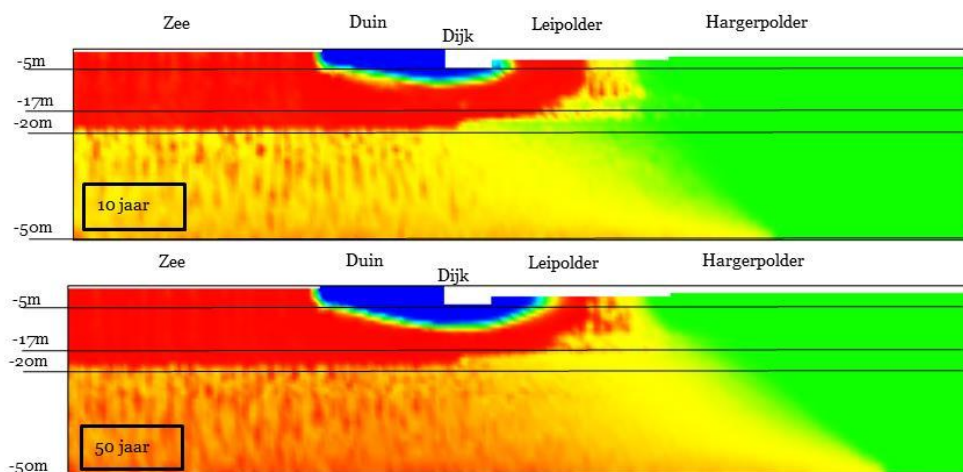
Figuur 41: Scenario 2: geen deklaag buitendijks, gehalveerde weerstand van deklaag binnendijks, vast peil van NAP+0.5 m in de duinen. Kwel in Leipolder neemt af van 4 tot 2.3 mm/dag in oostelijke richting

Scenario 3: aanwezigheid deklaag buitendijks, voeding in de duinen van 1 mm/dag

Uit nieuwe boringen in de duinen is gebleken dat de deklaag wel aanwezig is ten westen van de zeewering. Voor scenario 3 is daarom een weerstand van 500 dagen ingevoerd voor de deklaag aldaar (In scenario 1 en 2 had buitendijkse deklaag geen weerstand). Verder bleek de tweede

weerstandsbiedende kleilaag niet op NAP - 11 m maar op NAP - 16 m voor te komen. Ook dat is aangepast in scenario 3. In scenario 2 heeft de binnendijkse deklaag een weerstand gelijk aan het referentiemodel en is dus niet gehalveerd zoals in scenario 1 en 2.

Scenario's 3 lijkt op scenario 1. De kwel in de Leipolder is lager en varieert van 2 tot 1 mm/dag. Dit is het gevolg van de aanwezigheid van de deklaag buitendijks. Toch verloopt het verzoeting niet veel anders dan in scenario 1. In dit scenario met een deklaag buitendijks is de maximale stijghoogte NAP + 0.20 m.

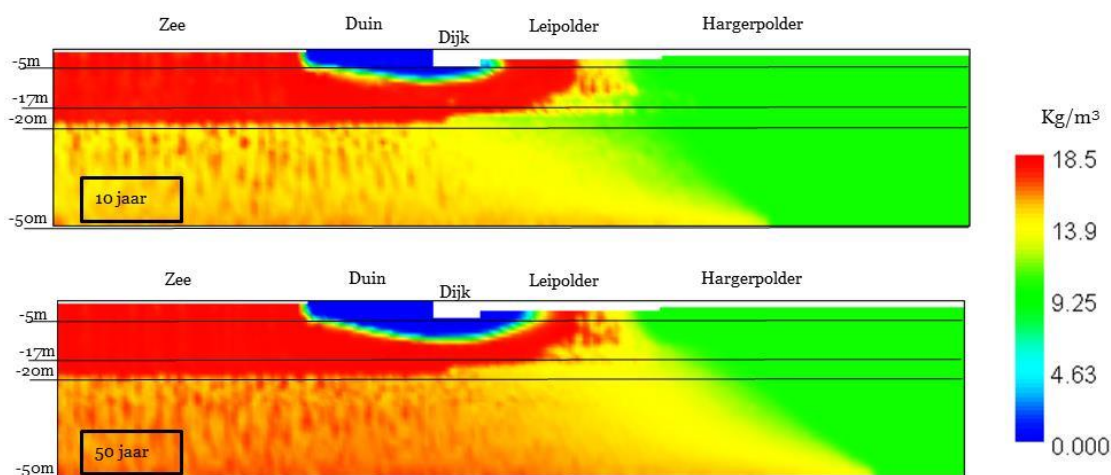


Figuur 42: Scenario 3: aanwezigheid deklaag buitendijks, voeding in de duinen van 1 mm/dag. Kwel in Leipolder neemt af van 2 tot 1 mm/dag in oostelijke richting

Scenario 4: aanwezigheid deklaag buitendijks, gehalveerde weerstand van deklaag binnendijks, voeding in de duinen van 1 mm/dag.

Scenario 4 is gelijk aan scenario 3 behalve dat de weerstand van de binnendijkse deklaag is gehalveerd.

Ook scenario's 4 lijkt op scenario 1. De kwel in de Leipolder is lager en varieert van 2 tot 1 mm/dag. Dit is het gevolg van de aanwezigheid van de deklaag buitendijks. Toch verloopt het verzoeting niet veel anders dan in scenario 1 en 3. Halvering van de weerstand binnendijks heeft weinig invloed. In dit scenario met een deklaag buitendijks is de maximale stijghoogte NAP + 0.20 m.



Figuur 43: Scenario 4: aanwezigheid deklaag buitendijks, gehalveerde weerstand van deklaag binnendijks, voeding in de duinen van 1 mm/dag. Kwel in Leipolder neemt af van 2 tot 1 mm/dag in oostelijke richting.

6.2.4 Conclusies

Doel van de numerieke modellering was tweeledig. Het eerste doel was dan ook om zekerheid te krijgen over de of verzoeting zal optreden. De modelberekeningen bevestigen de eerdere berekeningen die zijn uitgevoerd door Arcadis (2013). Daarnaast tonen de hier uitgevoerde berekeningen aan dat ook met een deels aanwezige deklaag aan de zeezijde van de waterkering (onder de nieuwe duinenrij) verzoeting zal optreden.

Het tweede doel was gerelateerd aan de mate van verzoeting. De resultaten van scenario 3 en 4 zijn representatief voor het deel van de polder bij de Putten (scenario 3) en het noordelijk deel van de Leipolder (scenario 4). Deze zijn dan ook gebruikt voor het ontwerp van de mitigerende maatregelen en de besluitvorming in het algemeen.

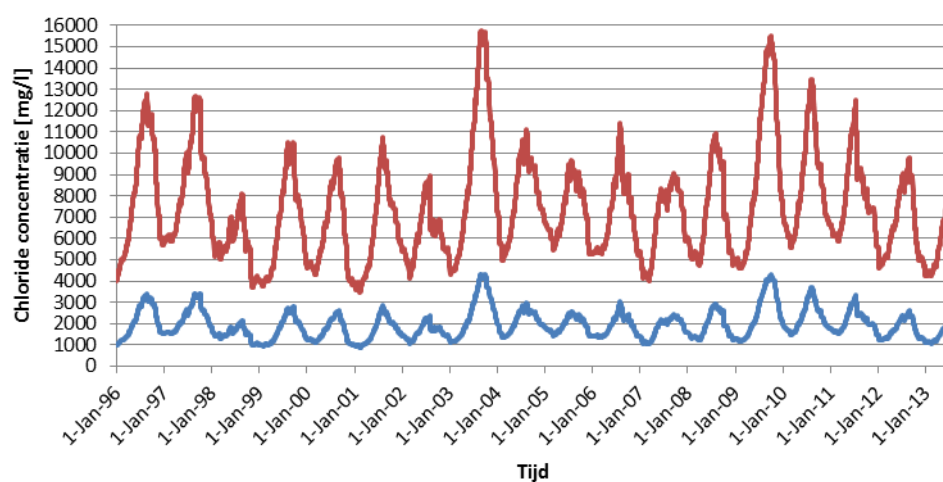
6.3 Berekeningen met een waterbalansmodel

6.3.1 Methode en data

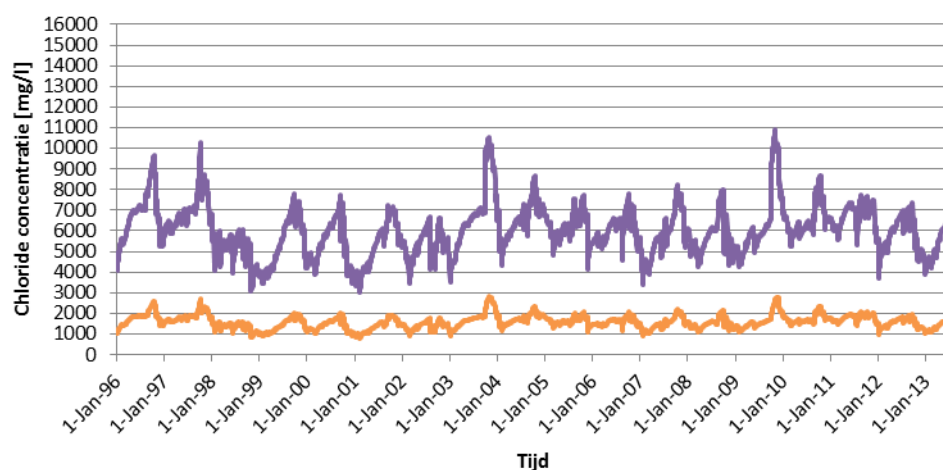
Om de verzoeting van het oppervlaktewater te bestuderen is gebruik gemaakt van het water- en zoutbalansmodel, dat is ontwikkeld voor de studie van de referentiesituatie (Hoofdstuk 3 en Bijlage 3). Dit model bestaat uit twee delen of peilvakken: de Putten en het noordelijk deel van de Leipolder. Met dit model konden de gemeten zoutgehalten in de huidige situatie vrij goed worden gesimuleerd voor de Putten en het noordelijk deel van de Leipolder. Op basis van de informatie verkregen uit de grondwatermodelberekeningen is de kwel in de Putten en de Leipolder aangepast. Uit de grondwatermodelberekeningen is gebleken dat na de duinvorming de aanvoer naar en kwel in de polder afneemt met ca 20%. Van die kwel is 75 % zoet en 25 % brak. Onder zoet en brak wordt daarbij verstaan chloridegehalten van respectievelijk 300 en 10.000 mg/l. Nadat deze kwelstromen en zoutgehalten in het zout- en waterbalansmodel zijn ingevoerd (situatie na 50 jaar), werden vervolgens een paar karakteristieke jaren doorgerekend om het effect op de zoutgehalten te onderzoeken.

6.3.2 Resultaten en conclusies

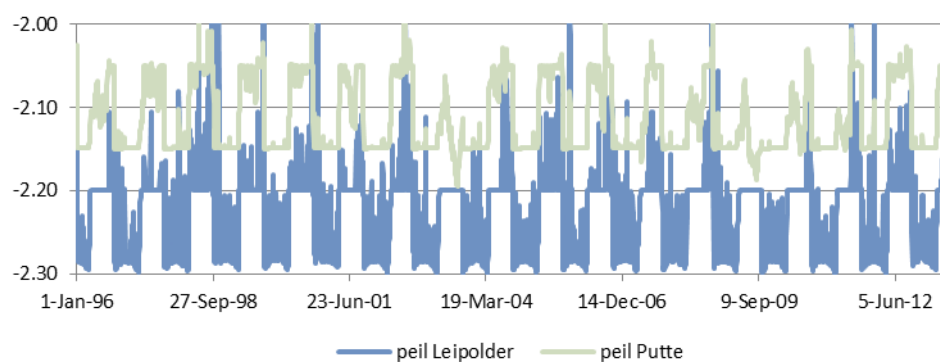
Met het zout- en waterbalansmodel is berekend dat de jaarlijkse zoutbelasting van het uitgemalen water fors afneemt van ongeveer 5100 ton/jaar naar 1300 ton/jaar (Figuur 44). De gemiddelde chloride concentratie van het uitgemalen water neemt af van ongeveer 5870 mg/l naar ongeveer 1550 mg/l. Doordat de kwel veel minder zout is, heeft de indamping ook veel minder effect: in droge tijden kan gedurende de zomer de concentratie in de Putten toenemen tot 3000 a 4000 mg/l.



— De putte met duin — de putte zonder duin



— Leipolder met duin — Leipolder zonder duin



— peil Leipolder — peil Putte

Figuur 44: Resultaten berekeningen zout- en waterbalansmodel op basis van klimaat van 1996 t/m 2012 voor de situatie met duinen en verzoeting na 50 jaar. Boven: chlorideconcentraties in de Putten. Midden: chlorideconcentraties in de Noordelijk deel Leipolder. Onder: peilvariaties in de Noordelijke deel Leipolder en de Putten voor de situatie met duinen en verzoeting na 50 jaar

7 Mitigerende maatregelen Lei- en Hargerpolder

7.1 Inleiding

Om de verwachte verzoeting in de Lei- en Hargerpolder als gevolg van de kustversterking zo veel mogelijk te voorkomen en de huidige zoute condities te behouden is een onderzoek opgestart naar mogelijke mitigerende maatregelen. In dit hoofdstuk wordt verslag gedaan van het trechteringsproces, dat heeft geleid tot een keuze voor een maatregel die financieerbaar is en ook recht doet aan de randvoorwaarden van water- en natuurbeheerders. Bij de beoordeling, keuzes en besluitvorming zijn het waterschap HHNK en natuurbeheerders van Natuurmonumenten nauw betrokken geweest.

7.2 Van mogelijke naar realistische maatregelen

7.2.1 Opstellen groslijst van maatregelen

Om te bepalen welke maatregel het meest kansrijk is, is een trechteringsproces bewandeld. Hierbij is als eerste een groslijst opgesteld van mogelijk maatregelen. Uit deze groslijst zijn de 3 meest kansrijke oplossingen gekozen, welke verder zijn uitgewerkt. Op basis hiervan is vervolgens de keuze gemaakt voor de aanleg van 1 van de maatregelen.

Mogelijke maatregelen zijn onder te verdelen in een matrix:

1. Tegengaan verzoeting buitendijs	2. Tegengaan verzoeting binnendijs
3. Bevorderen verzilting buitendijs	4. Bevorderen verzilting binnendijs

Buitendijkse maatregelen zijn niet toegestaan daarom er geen oplossingen hiervoor niet uitgewerkt. Voor de binnendijkse maatregelen zijn acht mogelijke maatregelen gedefinieerd, waarvan op kwalitatieve wijze de voor- en nadelen zijn aangegeven in Tabel 4.

De maatregel 1, 2 en 3, waarbij het zoete kwelwater wordt afvangen middels een bestaande of nieuwe sloot dan wel een diepdrain langs de binnentoe van de Hondsbossche Zeewering, is qua logistiek en ruimtebeslag niet goed uitvoerbaar.

Maatregel 6, waarbij zout water vanuit het 3^e watervoerend pakket naar het 1^e watervoerend pakket wordt gebracht, is onzeker wat de uiteindelijke impact hiervan gaat zijn. Ook deze is daarom niet verder uitgewerkt.

Het afkoppelen van het zoete water uit het zuidelijk deel van de Leipolder naar de Hargerpolder (maatregel 5) is een no-regret maatregel, die in elk geval een gunstig effect heeft. Deze maatregel heeft

altijd een gunstig effect op het brak houden van de Leipolder, aangezien zoet water wordt afgekoppeld. Verdere uitwerking om het effect hiervan te bepalen is daarom niet nodig.

De aanleg van ventielputten (maatregel 4) in combinatie met een drain of sloot langs de Hondsbossche Zeewering werd wel als een uitvoerbare maatregel aangemerkt. De ventielputten dienen het zoete kwelwater af te vangen, dat vanuit de nieuwe duinen naar de Leipolder stroomt.

Ook maatregelen 7, de aanleg van kwelputten die water vanuit het 3^e watervoerend pakket naar het oppervlakte water brengt, is als kansrijk beschouwd. Deze putten worden zodanig uitgevoerd dat brak grondwater vanuit diepere watervoerende pakketten (ca. 25 en 60 m) vanzelf uit de putten in het oppervlaktewater stroomt als gevolg van de heersende artesische stijghoogte in deze pakketten. De directe aanvoer van zeewater onder de duinen door (maatregel 8) is eveneens als kansrijk beschouwd en is daarom verder uitgewerkt.

De gekozen maatregelen zijn vooral effectief in het reguleren van het zoutgehalte van het oppervlaktewater. Hoe de zoutgehalten van het bodemvocht in de wortelzone zich gaan gedragen is moeilijker te voorspellen. De kwel onder de zilte graslandpercelen in de Leipolder zal mogelijk gaan afnemen of verzoeten als gevolg van de kustversterking en de mitigerende maatregelen.

Tabel 4. Eerste inventarisatie van mitigerende maatregelen

Maatregel			Investering [volgorde]	O&M kosten [volgorde]	Doelb. Oppw. [%]	Doelb. percelen [%]	Onzekerh. Doelb. (o,+,++,+++)
1	Afvang zoetwater uit nieuwe duinenrij	In bestaande kwelsloot	6	2	80	60	+
2		in nieuwe kwelsloot	7	2	80	60	+
3		In diepdrain (tot 5 m diepte)	5	3	80	60	+
4		In ventielputten	4	3	80	60	+
5	Afvoeren zoetwater uit Schoorlse duinen		1	1	30	0	o
6	Bevorderen verzilting	Kortsluitingsputten WVP 3 naar 1	8	0	50	50	+++
7		Kwelputten WVP 3 naar opp.water	3	0	70	0	++
8		Inlaat van zeewater	2	0	90	0	o

7.2.2 Nadere uitwerking van drie kansrijke maatregelen

De gekozen 3 maatregelen, ventielputten, kwelputten en het inlaten van zeewater via een persleiding onder de duinen zijn verder uitgewerkt.

Maatregel 4: Ventielputten

Met behulp van analytische modellen is berekend dat ca. 50 tot 100 ventielputten nodig zijn langs de binnentoe van de Zeewering teneinde het zoete water af te vangen dat vanuit de duinen zal gaan toestromen. Uitgangspunt is dat de putten onder vrij verval overstroomd vanwege de artesische druk in het eerste watervoerende pakket. De kosten van de ventielputten inclusief verzamelleiding zijn berekend op ca. 110.000 euro. De putten beogen de gehele verzoeting te voorkomen. Echter daarmee zal ook de kwel sterk afnemen in de Leipolder, wat mogelijk negatief uitpakt voor de terrestrische natuur op de percelen vanwege lagere grondwaterstanden. Afname van de kwel leidt tot een andere balans tussen hemelwater en kwelwater en kan leiden tot sterkere fluctuaties in zoutgehalten (tijdelijke verzoeting).

Voor het afvoeren van zoet kwelwater uit de ventielputten moet een verzamelleiding worden aangelegd of een zoete parallelsloot in de berm ten oosten van de provinciale weg of de zeewering. Dat water kan worden geloosd bij het gemaal Leipolder of het kan halverwege de Leipolder worden opgepompt naar de watergang van de Hargerpolder langs de manege.

Afhankelijk van waar het water wordt verpompt, kan de uitslag van water en zout op de boezem van HHNK vanuit de Leipolder afnemen.



Figuur 45: Maatregel 4 Ventielputten

Maatregel 7: Kwelputten

Voor het dimensioneren van de kwelputten van maatregel 7 is ook een analytisch model gebruikt. Ook hier is het uitgangspunt dat de putten vrij overlopen. Zodra de kwel vanuit het buitendijkse gebied geheel is verzoet zijn 2 à 3 kwelputten nodig om de zoutgehalten in het oppervlaktewater te herstellen tot de oorspronkelijke waarden. De totale aanlegkosten bedragen dan 45.000 tot 90.000 euro exclusief de kosten voor de ontijzering en beluchting van het kwelwater. Het voordeel is dat het gaat om een klein aantal putten, die gericht kunnen worden ingezet. Nadeel is dat de uitslag van water en zout zal toenemen en daarmee de zoutbelasting op de boezem. De zoutgehalten in het oppervlaktewater kunnen worden afgeregeld door regeling van de debieten van de kwelputten. Dit zal mogelijk gepaard gaan met schommelingen in de zoutgehalten. Met deze maatregel wordt alleen invloed uitgeoefend op de zoutgehalten in het oppervlaktewater. Verzoeting van de kwel op de percelen in de zone tot ca. 150 m achter de zeewering in de polder zal niet worden tegengegaan.

Maatregel 8: Persleiding

Het regelen van de zoutgehalten in het oppervlaktewater in de Leipolder kan ook worden bewerkstelligd door aanvoer van zeewater. Er dient dan een 300 m lange persleiding te worden aangelegd. De aanlegkosten van de leiding zonder toebehoren komen op ca. 150.000 euro. Deze oplossing heeft dezelfde voor- en nadelen als die van de kwelputten. Een bijkomend nadeel is dat de leiding door een primaire waterkering moet worden geperst, wat kan leiden tot een lokale verzwakking.

7.2.3 Het voorkeursalternatief: combinatie van ventiel en kwelputten

Nadere uitwerking van de 3 maatregelen heeft geleid tot een duidelijk voorkeursalternatief: de combinatie van ventielputten en kwelputten:

- Een *persleiding* onder de dijk is niet haalbaar vanwege grote technische maar vooral ook bestuurlijke belemmeringen.
- *Ventielputten* vangen dermate veel kwel af, dat ze kunnen leiden tot een tekort aan water
- *Kwelputten* alleen kunnen leiden tot een toename van de zoutlast op de boezem.

De combinatie van ventielputten en kwelputten is echter wel zeer kansrijk, en is bestempeld als voorkeursalternatief. Dit kan worden gecombineerd met het afkoppelen van het zuidelijke deel van de Leipolder. Veldverkenningen hebben laten zien dat het zuidelijke deel van de Leipolder (ten zuiden van de Putten) kan worden omgeleid naar de Hargerpolder (zie Figuur 46).



Figuur 46: Maatregel 4 Afkoppeling zuidelijk deel Hargerpolder

De mogelijke vergroting van de zoutlast zou een mogelijke kans kunnen bieden. Dit brakke water zou mogelijk kunnen worden gebruikt om percelen in de Hargerpolder tijdelijk (2x per jaar) te innunderen dan wel te bevoeien. Echter innunderen blijkt niet goed mogelijk te zijn, het vereist een grote hoeveelheid water in een vrij korte tijd, en die hoeveelheid water is niet beschikbaar, daarnaast is er een grote pompcapaciteit nodig om het water uit de Leipolder de Hargerpolder in te pompen. Tenslotte moeten hiervoor kades en dammetjes worden opgeworpen. Cultuurhistorisch zijn deze ingrepen niet wenselijk, daarnaast zijn de aanleg en beheerskosten erg hoog. Berekening met brak water is makkelijk te realiseren, maar is dan louter een beheersmaatregel.

7.3 Effecten en effectiviteit maatregelen op de waterhuishouding

7.3.1 Inleiding

Uit de eerste analyses is gebleken dat de maatregelen 4 (ventielputten), 5 (afkoppelen Schoorlse duinen) en 7 (kwelputten) al dan niet in combinatie tot de meest kansrijke oplossing leidt. Als vervolg op de globale kwalitatieve uitwerking is een kwantitatieve uitwerking middels een water- en zoutbalans uitgevoerd. Deze balans is al eerder beschreven in paragraaf 3.7 en bijlage 3. Om de uitkomsten van deze berekeningen te toetsen zijn randvoorwaarden opgesteld ten aanzien van zoutgehalten in de Leipolder, de peilfluctuaties en de zoutbelasting naar de boezem.

7.3.2 Randvoorwaarden

Randvoorwaarde 1: Zoutbelasting

Vanuit het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (2015) is aangegeven dat genomen maatregelen niet mogen leiden tot een vergroting van de zoutbelasting van de boezem vanwege de toenemende verziltingsproblematiek in het voorzieningsgebied van het hoogheemraadschap.

Randvoorwaarde 2: Zoutgehalten Leipolder

Door ecologisch adviesbureau Ten Haaf&Bakker (bijlage 9) is binnen het voorliggende onderzoek een notitie gemaakt over zoutgehalten in het oppervlaktewater van de Leipolder en de minimumwaarden noodzakelijk voor de huidige ecologie. De conclusie is dat de zoutgehalten uitgedrukt in chlorideconcentraties de laatste 30 jaar variëren van enkele duizenden tot 10.000 mg/l. Gewoonlijk zijn de chloridegehalten in de Putten rond 5000 mg/l aan het eind van de winter of vroege voorjaar. Gedurende voorjaar en zomer kunnen die dan tot 10.000 mg/l oplopen als gevolg van de indamping. Als streefwaarden voor de zoutgehalten moet een bandbreedte van 5000 (winter) tot 7500 (zomer) mg/l worden aangehouden.

Randvoorwaarde 3: Waterstand de Putten

De peilfluctuaties in de polder dienen vanuit ecologisch oogpunt niet te groot te zijn. Met name het zuidelijk deel de Putten is daarvoor gevoelig. Het vormt immers een afgesloten peilvak achter een stuw en is sterk onderhevig aan verdamping in de zomer. Volgens ten Haaf (bijlage 9) dient de fluctuatie niet meer dan 20 cm te bedragen of in ander woorden: de peilen in de Putten mogen in de zomer niet verder uitzakken dan 20 cm onder het zomerpeil.

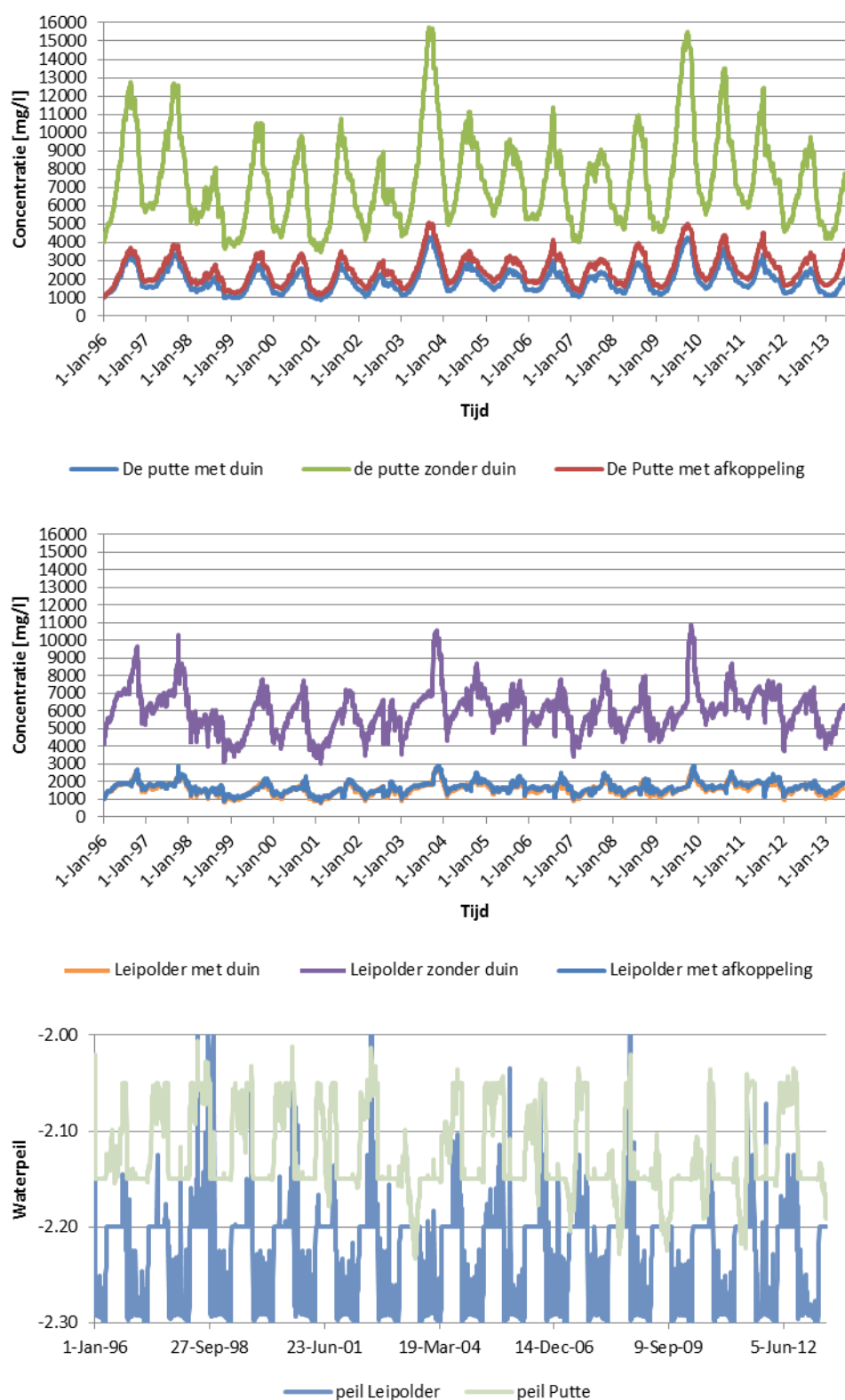
7.3.3 Maatregel 1: Afkoppeling zuidelijke peilvak Leipolder

Maatregel

Bij de eerste maatregel die wordt doorgerekend wordt als uitgangssituatie de modelsituatie uit hoofdstuk 6 gebruikt. Hierbij wordt het zuidelijke deel van de polder afgekoppeld. Het gaat hierbij om 13 ha. Tevens wordt de volledige instroom uit de duinen omgeleid,

Resultaat berekening

Het resultaat van de berekening is te zien in de onderstaande figuren. De Putten krijgt een iets hogere basis concentratie, en de gemiddelde concentratie bij het gemaal stijgt naar ongeveer 1690 mg/l. Door de afkoppeling van het zuidelijke deel en van de duinen, neemt de hoeveelheid uitgeslagen debiet af tot 689.000 m³. De zoutbelasting neemt af tot 1160 ton/ jaar.



Figuur 47: Resultaten berekeningen zout- en waterbalansmodel op basis van klimaat van 1996 t/m 2012 voor de situatie met duinen en verzoeting na 50 jaar en afkoppeling (maatregel 1). Boven: chlorideconcentraties in de Putten. Midden: chlorideconcentraties in de Noordelijk deel Leipolder. Onder: peilvariaties in de Noordelijke deel Leipolder en de Putten voor de situatie van verzoeting na 50 jaar en afkoppeling.

7.3.4 Maatregel 2: Afkoppeling en Kwelputten

Maatregel

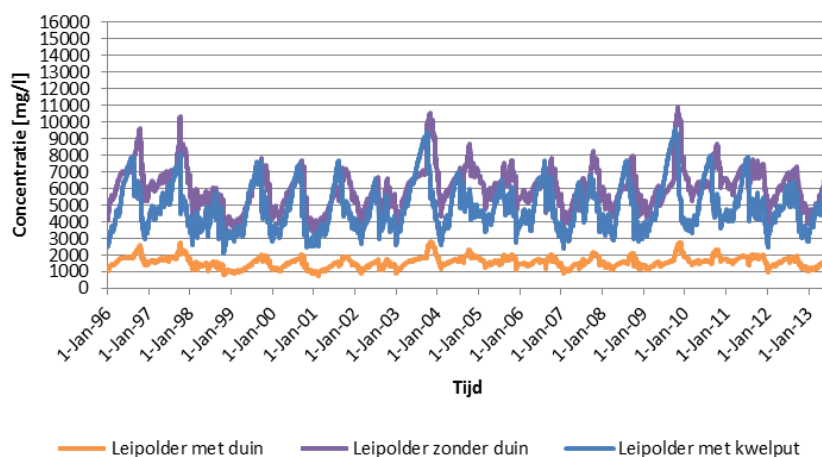
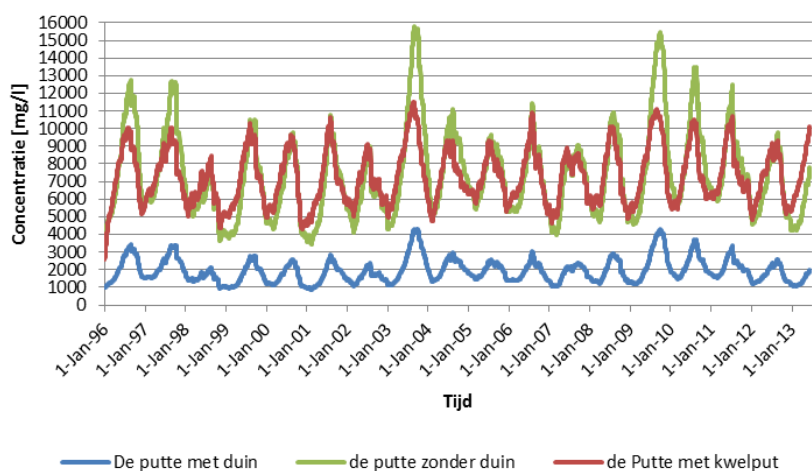
Aangezien alleen afkoppeling van het zuidelijke deel niet voldoende is, wordt als 2^e maatregel gekeken in hoeverre het mogelijk is de gestelde doelconcentraties van 7500 mg/l in de zomer en 5000 mg/l in de winter te behalen door het inlaten van zout grondwater middels een kwelput. Hierbij wordt uitgegaan van 1 of 2 kwelputten met een totaal debiet van 1000 m³/dag, die ten zuiden van de Putten worden geplaatst. Dit omdat hiermee het effect van indamping maximaal wordt gebruikt.

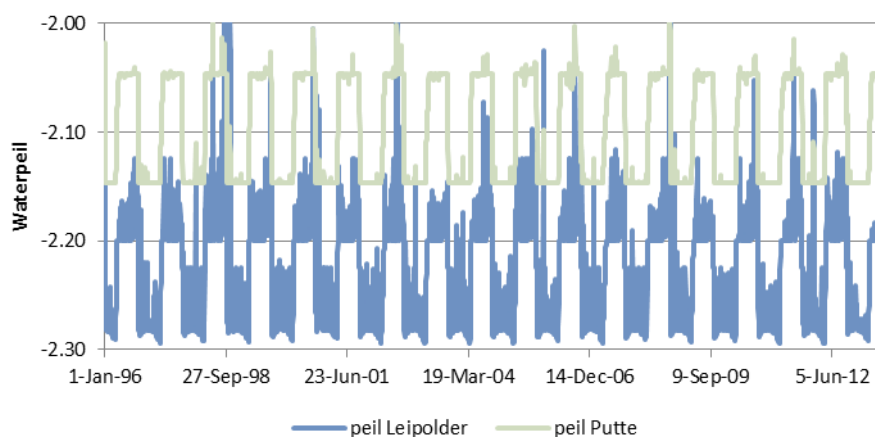
Uitgangspunt hierbij is dat de chloride concentratie van het in te laten grondwater een concentratie heeft van 10.000 mg/l.

Resultaat berekening

Onderstaande figuren laten het concentratieverloop zien in de Putte en het noordelijke deel van de Leipolder bij de toepassing van kwelputten. Bij een inlaat van 1000 m³/dag neemt het uit te pompen debiet toe tot 1.054.200 m³ per jaar dat is circa 25 % meer dan de huidige uitslag. Dit leidt overigens niet tot problemen met de polderpeilen.

Te zien is dat bij het inlaten van ongeveer 1000 m³/dag via de kwelputten de zout concentratie in de Putte in de winter vergelijkbaar is met de situatie voor de aanleg van de duin. Doordat de kwel in de hele polder veel zoeter wordt, treedt er echter een sterke verzoeting op van het noordelijke deel van de Leipolder. De gemiddelde concentratie van het uit te pompen water wordt lager dan in de huidige situatie. Deze bedraagt nu ongeveer 4550 mg/l. De zoutbelasting met 4790 ton per jaar ligt nog net onder de huidige zoutbelasting.





Figuur 48: Resultaten berekeningen zout- en waterbalansmodel op basis van klimaat van 1996 t/m 2012 voor de situatie met duinen en verzoeting na 50 jaar, afkoppeling en kwelputten (maatregel 2). Boven: chlorideconcentraties in de Putten. Midden: chlorideconcentraties in het noordelijk deel Leipolder. Onder: peilvarianties in de Noordelijke deel Leipolder en de Putten voor de situatie van verzoeting na 50 jaar, afkoppeling en kwelputten.

7.3.5 Maatregel 3: Afkoppeling en Ventielputten

Maatregel

Bij de berekeningen van de impact van de ventielputten wordt 50% van alle kwel afgevangen, dit is zoete kwel. Van de resterende kwel is de helft brak en de helft zoet. Ongeveer 56 ventielputten met een totaaldebiet van 1116 m³/dag worden langs de binnenteen van de zeewering geplaatst op afstanden van 50 m. Langs de ventielputten loopt een verzamelleiding, die het water loost bij het gemaal Leipolder of op de sloot in de Hargerpolder, die tot aan de zeewering net ten noorden van de Putten.

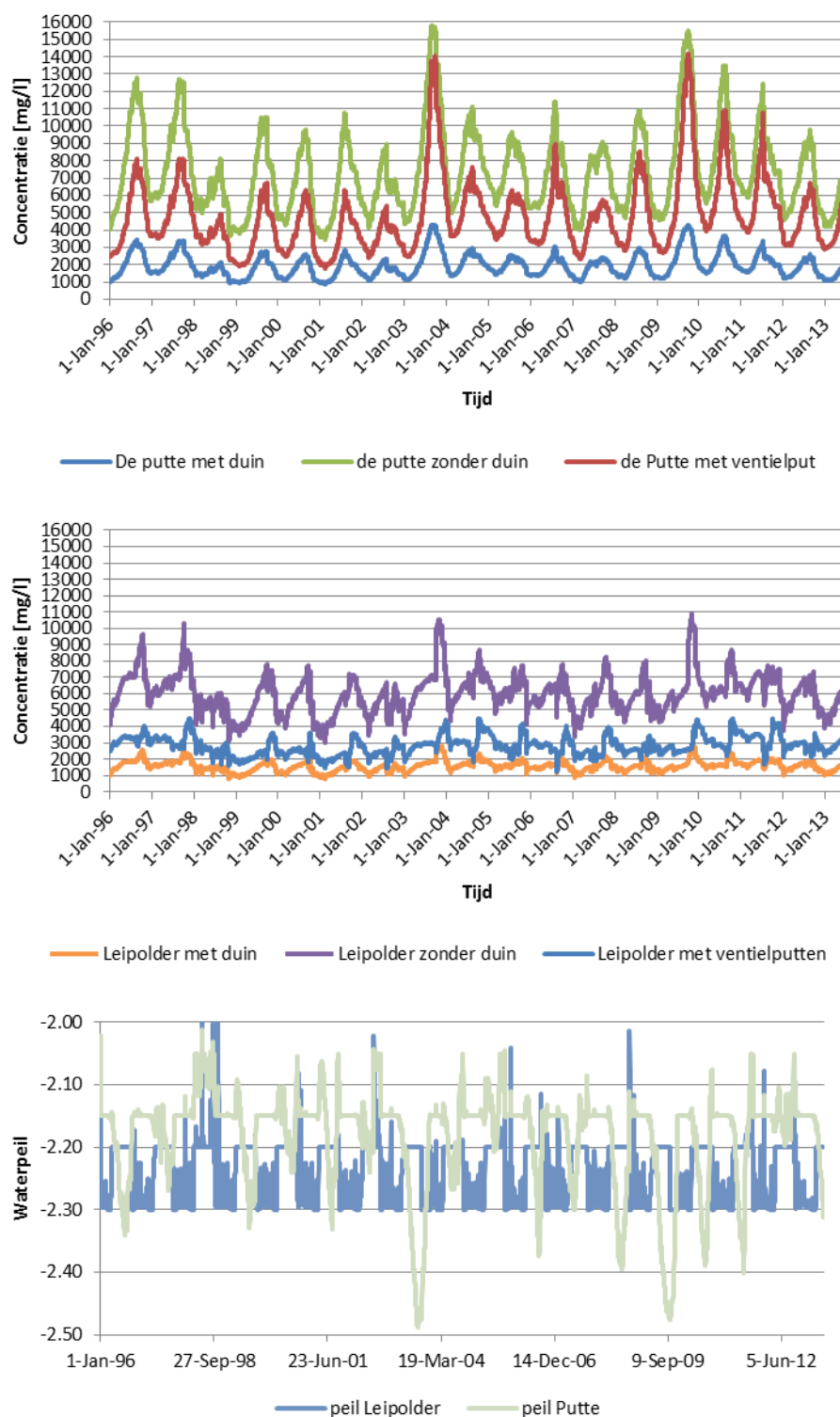
Resultaat berekening

De kwel in de polder neemt weliswaar af door de ventielputten, maar het water uit de ventielputten dient ook te worden uitgeslagen door de gemalen van de Lei- en Hargerpolder. In feite verandert de totale uitslag niet veel. Hetzelfde geldt voor de zoutbelasting.

Vanwege de geringe wateraanvoer vind er sterke indamping plaats in de Putte. In de zomer daalt ook het waterpeil. De peilfluctuaties zijn in 6 van de 17 zomers meer dan 20 cm.

Soms daalt het peil zo sterk dat er geen water meer uitstroomt naar het noordelijke deel van de Leipolder. Bij de eerste regenbuien na zo'n droge periode stijgt het waterniveau in de Putten totdat er weer water naar het noordelijke deel kan stromen. Dit water heeft echter wel nog steeds een zeer hoge zout concentratie. Gevolg is dat de zout concentratie in het noordelijke deel van de Leipolder bij zo'n neerslag gebeurtenis na een droge periode, in korte tijd zeer sterk stijgt. Bij opvolgende neerslag wordt deze zoutstroom weer verdund.

De maatregel ventielputten lijkt niet efficiënt te zijn ten aanzien van de zoutgehalten. De chloridegehalten zijn lager dan die van de referentiesituatie. In 4 van de 17 zomers komen de concentraties nauwelijks boven 5000 mg/l.



Figuur 49: Resultaten berekeningen zout- en waterbalansmodel op basis van klimaat van 1996 t/m 2012 voor de situatie met duinen en verzoeting na 50 jaar, afkoppeling en ventielputten (maatregel 3). Boven: chlorideconcentraties in de Putten. Midden: chlorideconcentraties in het noordelijk deel Leipolder. Onder: peilvariaties in de Noordelijke deel Leipolder en de Putten voor de situatie van verzoeting na 50 jaar en afkoppeling en ventielputten.

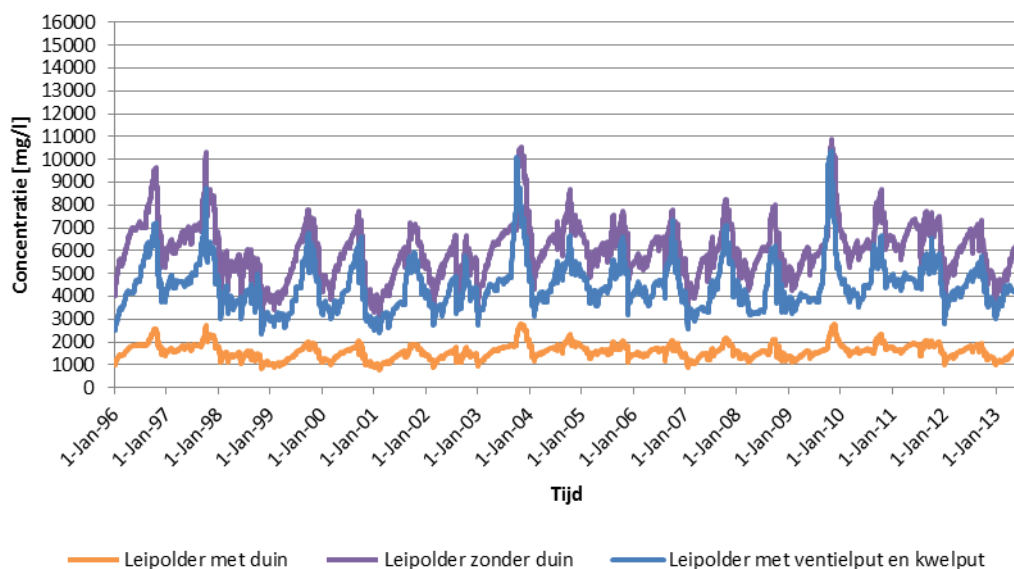
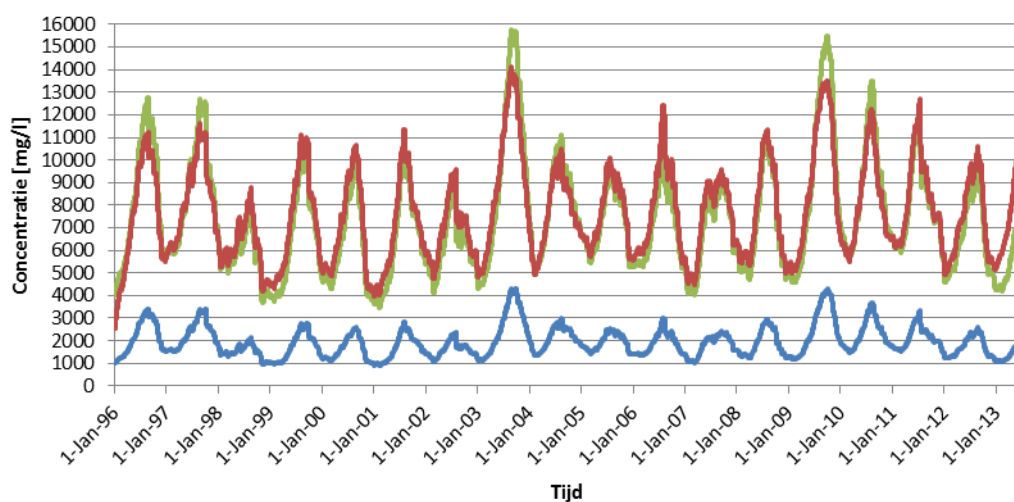
7.3.6 Maatregel 4: Afkoppeling, kwelputten en ventielputten

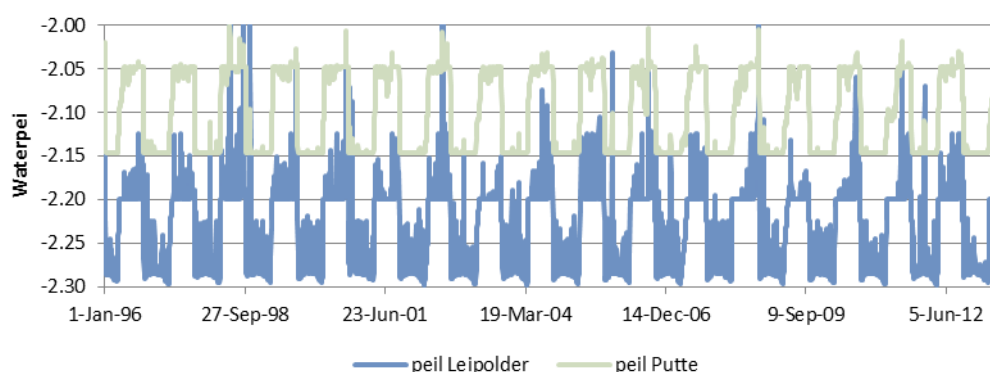
Maatregel

Ventiel- en kwelputten zouden kunnen worden gecombineerd. De ventielputten onttrekken dezelfde hoeveelheid water als in maatregel 3. Het totale debiet aan kwelputten zouden kunnen worden verminderd tot 500 m³/dag. In maatregel 2 was dat debiet 1000 m³/dag. Hierdoor kan de basis concentratie van het water in de Putten iets constanter worden gehouden, aangezien er meer doorstroming is van het water..

Resultaat berekening

Bij deze berekening wordt aan alle voorwaarden voldaan. De chloridegehalten van deze maatregel volgen die van de referentiesituatie heel goed. De zoutbelasting van 3460 ton/jaar ligt nog een stuk lager dan die van maatregel 2 met alleen kwelputten.





Figuur 50: Resultaten berekeningen zout- en waterbalansmodel op basis van klimaat van 1996 t/m 2012 voor de situatie met duinen en verzoeting na 50 jaar, afkoppeling, kwelputten en ventielputten (maatregel 4). Boven: chlorideconcentraties in de Putten. Midden: chlorideconcentraties in het noordelijk deel Leipolder. Onder: peilvariaties in de Noordelijke deel Leipolder en de Putten voor de situatie van verzoeting na 50 jaar, afkoppeling, kwelputten en ventielputten.

7.4 Conclusies

Uit de berekeningen blijkt dat Maatregel 1, alleen afkoppeling van het zuidelijk deel van de Leipolder naar de Hargerpolder, onvoldoende is om de gewenste zoutgehalten te handhaven. Met maatregel 3, afkoppeling in combinatie met de aanleg van ventielputten, wordt ook niet het doel bereikt, omdat dan de peilfluctuaties in de Putten te groot worden en ook de zoutgehalten wat te laag zijn. Alleen maatregel 2, afkoppeling in combinatie met kwelputten en maatregel 4, afkoppeling in combinatie met kwelputten en ventielputten voldoen aan de opgelegde drie randvoorwaarden.

Maatregel	Zoutbelasting boezem [ton/jaar]	Debiet gemaal [m ³ /jaar]	Concentratie Chloridegeh. [mg/l]	Max. Peil verlaging Putten [cm]
Huidige situatie	5.100	876.000	5.870	Altijd < 15 cm
Aanleg duin	1.310	841.300	1.550	Altijd < 15 cm
Afkoppeling zuidelijke deel leipolder	1.160	689.000	1.690	Altijd < 17 cm
Afkoppeling en kwelputten (1000 m ³ /dag)	4.791	1.054.200	4.550	Altijd < 5 cm
Afkoppeling en ventielputten (1116 m ³ /dag)	1.660	583.664	2.850	6 van de 17 zomers > 20 cm
Afkoppeling, ventielputten (1116 m ³ /dag) en kwelputten (500 m ³ /dag)	3.460	766.252	4.520	Altijd < 5 cm

Op basis van deze berekeningen is gekozen voor de maatregel afkoppeling in combinatie met enkele kwelputten bij de Putten. De kwelputten moeten daarbij voorzien zijn van een waterbehandelings- en een meet- en regelsysteem. Maatregel 4, waarbij zowel kwel- als ventielputten worden aangelegd, is minder aantrekkelijk. Het debiet van de kwelputten kan indien nodig worden verlaagd en het systeem als geheel is beter regelbaar. Qua uitvoering, kosten en onderhoud zijn de 56 ventielputten niet erg aantrekkelijk. Deze kunnen altijd nog worden aangelegd, als in de toekomst zou blijken dat de kwelputten onvoldoende effect sorteren.

Het voorstel is nu om een verkenningsboring uit te voeren tot 75 m; daarin een geofysische boorgatmeting uit te voeren en vervolgens de boring af te werken tot een waarnemingsput. Er zullen watermonsters worden genomen uit de waarnemingsfilters zullen en chemische geanalyseerd. Daarna zal een kwelput worden ontworpen en geboord, waarop een capaciteits- en pomptest wordt uitgevoerd. Op basis van al deze informatie zal tenslotte een plan en een ontwerp worden opgesteld voor de vervolgstappen van het gehele systeem.

8

Conclusies en aanbevelingen

8.1 Referentiemeting

De referentiemeting bestaande uit geofysische metingen, wateranalyses, boringen, herinterpretatie van bestaande gegevens en waterbalansen bevestigt in grote lijnen het beeld van het watersysteem, dat uit de studies van Stuyfzand (1989), Mulder en Spoelstra (1995) en Arcadis (2012) naar voren komt.

In het zuidelijk deel van het poldergebied (250 tot 1000 m vanaf de Heereweg) is de uitstroom en kwel van zoet grondwater uit de duinen bepalend (Duinsysteem). Aan de binnenzijde van de Hondsbossche Zeewering overheerst de kwel van zout grondwater (Noordzeesysteem). De breedte van die kwelzone neemt daarbij toe van 200 m in het zuiden (ca 250 m ten noorden van de Heereweg) tot 800 m in het noordelijk deel van de Lei en Hazepolder. Ter plaats van De Putten op ca 350 m vanaf de Zeewering is een duidelijke sprong te zien in het zoutgehalte van het 1^e wvp blijkens de EM meting. Deze markeert de oostelijke grens van het Noordzeesysteem. Opgemerkt wordt dat de zoutgehalten van het grondwater in het 1^{ste} en 2^{de} wvp aan de voet van de Zeewering in het zuiden bij “de Putten” lager is dan het grondwater nabij de Zeewering in het noordelijke deel van de Leipolder en de Hazepolder. Het kwelwater uit de duinen mengt zich dus enigszins met het zoute kwelwater van het Noordzeesysteem.

De westelijke Leipolder bevindt zich dus grotendeels in de zoute kwelzone van het Noordzeesysteem. Een klein deel in het zuiden ontvangt zoet water door kwel van de Schoorlse Duinen en een kleine spreng. Met name het zoute kwelwater in het noordelijke deel van de Leipolder is bepalend voor de hoge zoutgehalten van het oppervlaktewater.

In de Hargerpolder treedt ook kwel van brak grondwater op. Echter de flux en het zoutgehalte van het kwelwater en daarmee de zoutbelasting zijn beduidend lager. Waarschijnlijk bestaat het brakke grondwater uit oud marien water, gevormd tijdens eerdere transgressies. Het oppervlaktewater in de Hargerpolder heeft daarom een veel lager zoutgehalte, wat ook wordt veroorzaakt door de instroom van de Hargerspreng uit de Schoorlse Duinen in het zuidoosten. Die instroom van zoet water uit het zuiden maskeert enigszins de brakke kwel. Dat is te zien in watergangen met weinig doorstroming, die een hoger zoutgehalte hebben dan de hoofdwatervgangen. Dit duidt erop dat in die watergangen brak grondwater opkwelt.

Op perceelschaal zien we dat zich in het gebied van de zoute kwel aan de binnenzijde van de Zeewering zich nauwelijks regenwaterlenzen kunnen ontwikkelen. De zoute kwel is daar te sterk, maar ook de ondiepe grondwaterstanden, de sterke verdamping en de sea spray zorgen voor hoge zoutgehalten in de onverzadigde zone en het ondiepe grondwater. In de Hargerpolder zien we wel het effect van infiltrerend regenwater. Met name in een wat hoger gelegen deel (noordoost in de polder) is er sprake van wegzijging.

De berekeningen met de waterbalans stemmen goed overeen met de gemeten uitslag en chloridegehalten in beide polders. De herkomst van zout en water in de polder is goed te reconstrueren. De verwachte verzoeting volgens Arcadis in de zone tot 300 m landinwaarts van de Zeewering heeft,

zoals verwacht, invloed op de zoutgehaltes van het oppervlaktewater en grondwater. Dat blijkt uit de scenarioberekeningen met het waterbalansmodel. Deels kan de verzoeting van de Leipolder worden gecompenseerd door het afleiden van het zoete kwel- en sprengwater uit het zuiden naar de Hargerpolder.

Het duingebied van het Zwanenwater vormt een enigszins geïsoleerd hydrologisch systeem. Het grondwater wordt gevoed door de neerslag. Het freatische grondwater in de duinen is derhalve zoet. Het grondwater in het daaronder gelegen 1^{ste} wvp is brak. De stijghoogten in het 1^e wvp zijn lager dan de freatische grondwaterstanden en de tussengelegen kleilaag heeft een hoge hydraulische weerstand. De invloed van de zandsuppletie die niet verder reikt dan de zuidelijk grens van het Zwanenwater zal beperkt zijn.

Geconcludeerd kan worden dat door deze studie de werking van het hydrologisch systeem in de onderzoeksgebieden Zwanewater en de Lei- en Hargerpolder in voldoende mate is beschreven met het oog op de mogelijke veranderingen door de zandsuppletie.

De referentiemeting gaf geen aanleiding de gekozen opzet voor de monitoring van grond- en oppervlaktewater zoals geformuleerd door Arcadis (2012) en Acacia (2013) grondig te herzien. Een paar nieuwe elementen zijn in het monitoringsplan opgenomen. In het nieuwe duingebied zeewaarts van de Zeewering, ter plaatse van A4 en A5 en B4 en B5, wordt aanbevolen ook CVES metingen uit te voeren. Voor de monitoring van het oppervlaktewater wordt voorgesteld om CTD divers te plaatsen op 3 locaties. Gebleken is dat gecombineerde water- en zoutbalansen goed inzicht geven in de zoutstromen. Om die reden wordt voorgesteld om elke twee jaar de waterbalansberekeningen te herhalen. Met het oog op deze waterbalansberekeningen wordt aanbevolen de draaiuren van de gemalen beter te registreren en ook debietmetingen uit te voeren om de nominale capaciteit van de gemalen te bepalen.

8.2 Verzoeting

Op basis van alle beschikbare informatie zijn een aantal berekeningen gemaakt met een numeriek grondwatermodel. Daarbij is gevarieerd binnen verschillende parameterwaarden om zo goed mogelijk een indruk te krijgen in de mogelijk optredende verzoeting. Geconcludeerd kan worden dat verzoeting zal gaan optreden.

8.3 Mitigerende maatregel

Om de verwachte verzoeting in de Lei- en Hargerpolder als gevolg van de kustversterking zo veel mogelijk te voorkomen en de huidige zoute condities te behouden is een onderzoek opgestart naar mogelijke mitigerende maatregelen. In dit hoofdstuk wordt verslag gedaan van het trechteringsproces, dat heeft geleid tot een keuze voor een maatregel die financieerbaar is en ook recht doet aan de randvoorwaarden van water- en natuurbeheerders.

Op basis van deze berekeningen en de verschillende afwegingen is gekozen voor een maatregel afkoppeling van de instroom van zoet water uit de Schoorlse Duinen in combinatie met enkele kwelputten bij de Putten. De kwelputten moeten daarbij voorzien zijn van een waterbehandelings- en een meet- en regelsysteem. Het debiet van de kwelputten kan indien nodig worden verlaagd en het systeem als geheel is hierdoor regelbaar waardoor voldoende flexibiliteit is gewaarborgd.

Opgemerkt wordt dat gekeken is naar behoudt van de zoutgehaltes in het oppervlaktewater. De verandering van brakke/zoute kwel in de percelen is daarbij buiten beschouwing gelaten. Het behoudt van de terrestrische natuurwaarden kan worden gerealiseerd door periodieke inundatie. Dit dient nog verder te worden uitgewerkt.

9 Literatuur

Acacia, 2013. Notitie monitoring grondwater Hondsbossche Zeewering en Pettemer duinen. opdrachtgever Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (februari 2013). pp 8.

Arcadis, 2009. Zwakke schakel Hondsbossche en Pettemer Zeewering. Basisrapport geotechnisch onderzoek. Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier. 25 maart 2009. project 074021495:a, c03011.000003. 43 pp.

Arcadis, 2012. Effect zeewaartse versterking hpz op zoutconcentraties in nabijgelegen polders. Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier. 20 december 2012. Project 076859760:a – concept c03011.000176.2224. 43 pp.

Arcadis, 2013. Plan voor mitigerende en integrale monitoringsmaatregelen. Project Zwakke Schakels Noord-Holland Opdrachtgever Hollands Noorderkwartier (28 januari 2013). pp 75.

Archie, G.E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Petroleum Transactions of AIME* **146**: 54–62.

Bakker T., 2015. Hoe zout moeten de Putten en de Leypolder zijn?. Advies ten behoeve van het project kustversterking Hondsbossche Zeewering. Adviesbureau Ten Haaf en Bakker. 5 pp.

Boris M. van Breukelen B.M., Groen M.M.A., Groen J., Huissteden K., de Jeu R.A.M., Post V.E.A., Schellekens J. & Waterloo M.J., 2009. Handbook for Field Hydrological Measurements Institute of Earth Sciences – Dept. of Hydrology and Geo-environmental Sciences. pp

Griffioen, J., Louw, P.G.B. de, Boogaard, H.L., Hendriks, R.F.A., 2002, De achtergrondbelasting van het oppervlaktewatersysteem met N, P en Cl, en enkele ecohydrologische parameters in West – Nederland, TNO-rapport, NITG 02-166-A

Jorgensen (1989). Using Geophysical Logs to Estimate Porosity, Water Resistivity, and Intrinsic Permeability, USGS Water Supply Paper 2321.

Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., Jacobs, C.M.J. (2008). SWAP version 3.2. *Theory description and user manual*, Wageningen, Alterra, Alterra-report 1649, pp 262.

Langevin, C.D., Thorne, D.T., Jr., Dausman, A.M., Sukop, M.C., and Guo, Weixing, 2008, SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport: U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 6, Chapter A22, 39 p.

Mulder, J.R. en Spoelstra, J. (1995). Een geohydrologische systeembeschrijving van het noordelijke deel van het herinrichtingsgebied Bergen-Schoorl Wageningen, SC-DLO, 1995. Rapport 325.

Natuurmonumenten, 2005. Natuurvisie 2005-2022. pp 50.

Stuyfzand, P.J. (1989). Hydrochemie en hydrologie van de duinen en aangrenzende polders tussen Egmond aan Zee en Petten. KIWA , Nieuwegein, rapport SWE 87.001, pp 223.

Ten Haaf C., 2014. Behoud zilte natuur in Harger en Pettemerpolder. Adviesbureau Ten Haaf en Bakker. 2 pp

Van Wirdum G. (2004). Investigation into the direction and magnitude of water flow through peat at Thorne Moors, UK, TNO-NITG 185-Bo709.

Velstra J., (2013); Zoet en zout grondwater Hondsbossche Zeewering, binnenduinrand en polder: interpretatie van SkyTEM metingen. Acacia Water. pp 19.

Velstra, J., Staveren, G. van, Oosterwijk, J., Werf, R., Tolk, L., Groen, K., 2013, Verziltingsstudie Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, Eindrapport LMZW deelgebiedstudie HHNK, februari 2013, Acacia Water

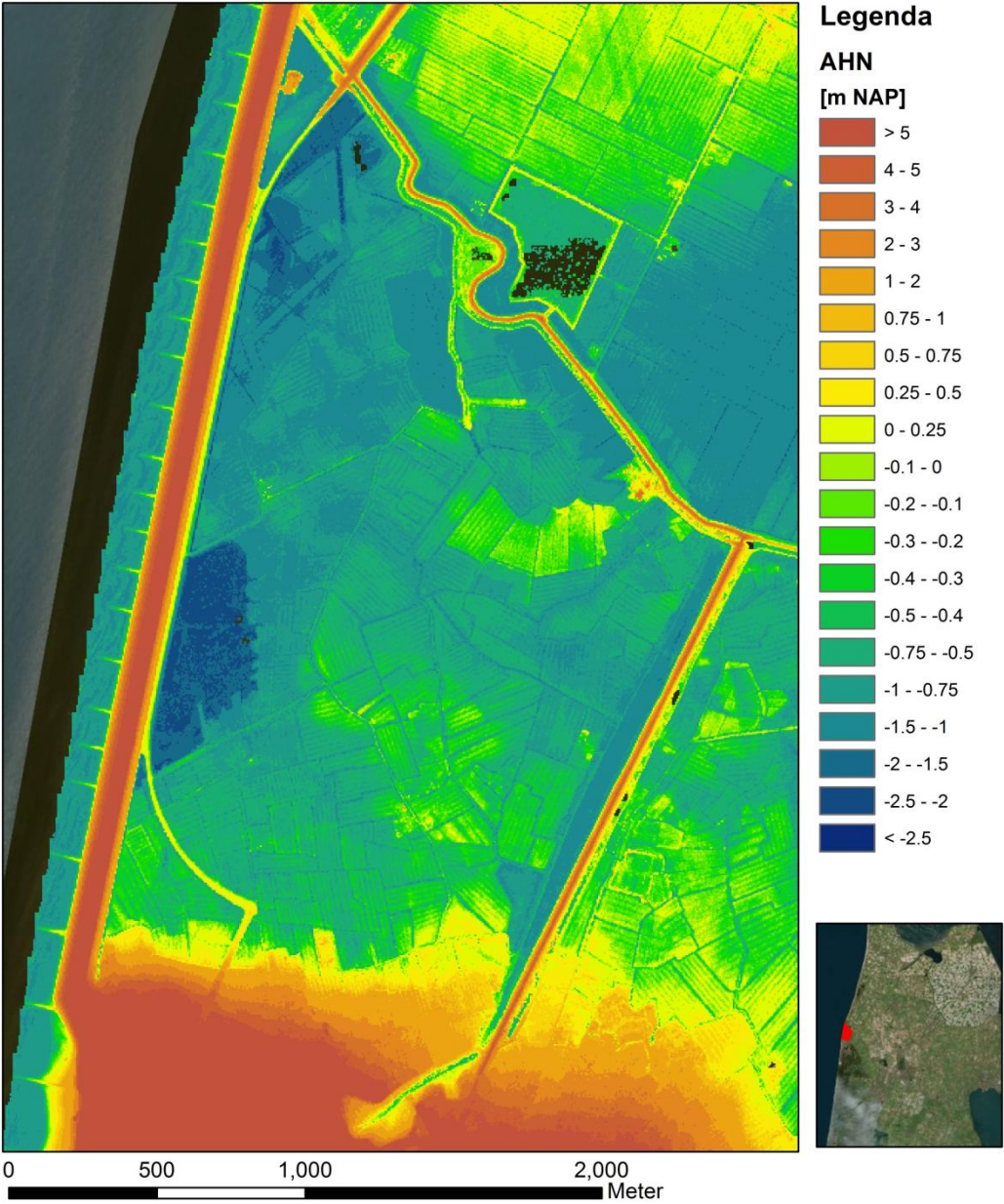
Velstra, J., Groen J. & De Jong K., 2011. Observations of salinity patterns in shallow groundwater and drainage water from agricultural land in the northern part of the Netherlands. Irrigation and Drainage, Vol 60, 51- 58.

Bijlagen

Bijlage 1 Hydrochemie en isotopen

Code	X-coor (m)	Y-coor (m)	mv	TNO-code	Ref.punt	BkF	OkF	Datum	Eclab	Tveld	Ecvelld	Br	Ca	Cl	F	Fe	HCO3	K	Mg	Mn	Na	NH4	NO3	P-tot	PO4	pH-lab	pH-veld	SiO2	SO4	Stuyfzand	Ionenbalans	² δ ₂₀₀	¹⁸ δ ₂₀₀	
	(m)	(m)	(m tov NAP)		(m tov NAP)	(m tov MV)	(m tov MV)		(uS/cm)		(uS/cm)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)			(mg/l)	(mg/l)	clasificatie	fout (%)	(‰ SMOW)	(‰ SMOW)	
Freatisch grondwater																																		
14C-A02	105250	526990	-0.1		0	0	1	01/01/1984	472				63	90		6.7	79	17.5	6		36	1.3	1.2				5.6		26.9	61	F1CaMIX+	7.3		
14C-A03	105925	526740	0.3		0	0.55	1.05	01/01/1984	619					44		0.45	44					2.4	0.3				6.9		45.2	9				
14C-A04	107530	526850	-0.4		0	0.7	1.7	01/01/1984	858				80	102		0.5	519	24.4	25		81	5	0.1			7.1		49.5	40	F4CaHCO3+	7.6			
14C-A05	105050	527740	-1		0	0.2	1.2	01/01/1984	3310				466	421		1.58	710	29.9	101		375	1.9	2			6.8		27.8	393	B4CaMIX+	21.3			
14C-A06	105490	529040	-1.2		0	0.2	1.2	01/01/1984	20100				463	9390		0.3	1085	108	498		5639	17.9				7.2		33.9	675	b5NaCl-	2.8			
B1-001	104890	528220			1	2			13380				331	4373		44.91	500	103	333	0.62	2041	14	0.1	10.8	0.1	7.3	7.7	44.2	713	b4NaCl-	-3			
C5-001	107090	534800			6	7			639				73	65		0.85	243	6	9	0.25	41	0.7	0	0.86	0.3	7.5	7.5	17.1	9	F2CaHCO3	3.4			
B14C0148-001	106400	529220	-0.91	B14C0148	-1.01	0.95	1.45	31/03/1994	13800				145	4137		7.53	1245	95.3	196	1.06	2752	11.9	0.1	7.23	6.5	7.1	7.6	41	651	b5NaCl+	-1.4			
B14C0147-001	105910	529120	-1.13	B14C0147	-0.74	0.5	1	07/04/1994	20530				1143	7257		33.38	2590	156	463	3.58	4253	33	0.1	44.6	14	7.3	7.5	81	271	b6NaCl	7.1			
B14C0143-001	105834	530513	-0.34	B14C0143	0.05	0.3	0.8	30/03/1994	31700				248	7793		7.63	1465	145	751	0.91	4403	2	2.9	4.29	1.9	7.3	7.8	23.5	1130	b5NaCl-	0.5			
B14C0144-001	105541	530136	-0.23	B14C0144	0.2	1.3	1.8	30/03/1994	26200				580	9273		1.26	1522	143	624	0.73	4949	6.1	0.1	5.81	6.1	7	7.7	47	1543	b5NaCl-	-3.1			
B14C0146-001	106040	529620	-0.08	B14C0146	-0.19	0.95	1.45	28/12/1999	284				74	616		16.75	686	22.7	42	0.93	545	4.6	0.2	13.7	2.3	7.1	7.8	35.2	52	B4NaCl+	4.3			
14C-A07	106390	529190	-1		0	0.3	1.3	01/01/1984	8010				209	2370		0.34	1722	86.8	172		1829	12.6				7.4		53.7	380	b5NaCl+	2.1			
14C-A15	105600	526050	4		0	6	7	08/12/1986	475				11	110		2.74	13	2.9	7	0.21	70	0.8	3.3			5.8		13.9	29	F0NaCl0	8.5			
14C-A16	105500	526100	5		0	8	9	08/12/1986	405				11	85		2.57	18	4	7	0.15	56	0.8	1.8			5.7		19.8	32	F0NaCl0	12.9			
B14C0042	105900	526100	0	B14C0042	6.66	2.43	3.43	5/28/1986	210		230		5	47		1.63	4	2.5	5	0.04	27	0.1	5.2			5.2	5.2	16.5	22	F0NaCl	1.3			
B14C0043	105600	526300	0	B14C0043	3.9	2.52	3.52	9/24/1986	461		470		12	113		1.13	11	3.8	12	0.25	64	0.1	0.1	0.05		5.5	5.6	19.5	50	F0NaCl	1.6			
B14C0044	105500	526050	0	B14C0044	6.51	1.55	2.55	9/24/1986	244		260		6	56		0.1	2	2.3	3	0.03	37	0	2.7	0.02		4.6	4.9	10.8	27	F0NaCl	0.2			
B14C0047	105800	526000	0	B14C0047	0	0	-3.9	5/28/1986	300		320		8	68		0.37	10	2.6	8	0.06	38	0.1	0.1			5.9	5.5	10.5	36	F0NaCl	0.3			
B14C0047	105800	526000	0	B14C0047	0	0	-3.9	9/13/1990	197		222		6	35		1.32	52	4.9	7	0.1	18	2.9	6.5	0.07		6.3	5.9	14.3	10	F0NaMIX	3.1			
HG 1 F	105181	527104			1 tot 1.5					12.4	954	0.48	94	59	0.46	4.62	506	18.7	35	1.18	40		0.2		1.3			58	1	F4CaHCO3+	0.1	-40	-5.82	
HG 2 F	106665	528181			1 tot 1.5					12.8	5070	4.81	190	1166	0.64	7.61	752	43.5	117	3.1	712		0.4		1			61.4	340	b4NaCl+	-0.7	-32.7	-4.53	
HG 3 F	106370	528407			1 tot 1.5					12.9	1634	1.04	168	124	0.51	0.1	666	5.8	59	0.29	111		<0.1	0.3				49.5	197	F4CaHCO3+	-1	-37.1	-5.64	
loc2	105142	528317			0.7 tot 1.0				3110	17.1	3100	36	580	11000		0.34		140	560		4800	12.9	0.2	6.1		7.3		70.7	1200	S?NaCl-	-7.7			
loc3	105436	528190			1.4 tot 1.7				502	16.3	4480	3.9	610	730		0.23	395	17	93		410	51.4	0.1	4.3		7.4		40.7	1400	B3CaSO4+	0			
loc9	104690	526986			1.0 tot 1.3				118	15.7	1164	0.74	69	200		0.14	315	26	23		110	0.1	0.1	1		7.8		53.6	<30	f3NaCl+	0			
grondwater 1ste wvp																																		
B14C0049	105862	528792	0.2	B14C0049	0.15	5.96	6.96	10/04/1989	16300		16600		280	5963		3.75	1106	107	365	8.32	3350	15.4	0.2	2.85			7.2	7.2	35.3	415	b5NaCl-	0.2		
B14C0049	105862	528792	0.2	B14C0049	0.13	15.96	16.96	10/04/1989	27120		28100		480	10470		7.2	1069	131	650	1.11	5700	14.6	0.2	0.75		7.1	7.1	34	1053	S5NaCl-	0.6			
B1-002	104890	528220				7	8		17290				176	4374		0.84	287	118	371	0.15	2687	0	9.7	2.4	2.1	7.9	7.7	25.2	689	b3NaCl	5.6			
C5-002	107090	534800				13.5	14.5		1204				66	71		0.22	228	6.4	16	0.08	168	0.2	0	0.2	0.1	6.5	7.4	5.6	549	F2NaMix+	-17.4			
B14C0148-002	106400	529220	-1.03	B14C0148	-1	3.9	4.4	31/03/1994	1220				72	303		6.37	321	7.4	23	0.82	179	0.2	0	3.79	1.1	7	7.9	25.5	29	B3NaCl+	-2.5			
B14C0147-002	105910	529120	-1.27	B14C0147	-0.73	4.5	6	07/04/1994	22500				271	11482		2.24	1564	187	435	1.15	6361	35.9	0.1	9.04	8	7.1	7.6	43.8	353	S5NaCl-	-3.4			
B14C0143-002	105834	530513	-0.38	B14C0143	0.14	5.3	5.8	30/03/1994	31000				253	11708		1.32	1968	207	604	1.08	6289	41.3	0.3	9.78	11.4	7.1	7.9	47	2283	S6NaCl	-8.8			
B14C0144-002	105541	530136	-0.26	B14C0144	0.27	5.5	6	30/03/1994	33000				273	12877		0.19	1839	212	650	0.55	6740	28.6	0.1	9.12	10	7.5	7.7	37.5	696	S5NaCl	-5.2			
B14C0146-002	106040	529620	-0.14	B14C0146	-0.21	5.4	5.9	28/12/1999	467				31	157		23.29	130	6.5	8	0.39	86	3.3	0.1	12.5	0.7	6.5	7.9	17.3	38	f2NaCl0	-1.2			
B14C0149-002	106290	529510	-0.27	B14C0149	-0.07	5.1	5.6	05/04/1994	387				29	152		0.97	60	6.8	7	0.05	218	0.2	36.3	5.67	5.1	6.3	7.9	10.5	2	f1NaCl	32.1			
grondwater 2de wvp																																		
B1-003	104890	528220				19	20		11900				356	3576		9.85	503	94.9	334	0.49	1701	14.9	0	7.47	0.3	7.2	7.7	46	167	b4NaCl-	4.4			
B14C0022	105420	527820	-0.42	B14C0022	0.35	33	3																											

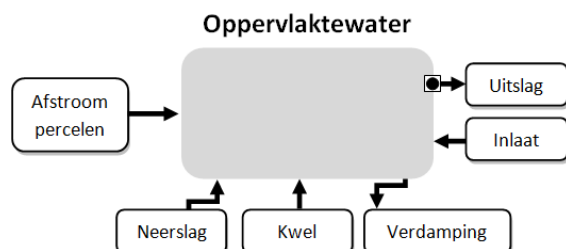
Bijlage 2 AHN



Bijlage 3 Waterbalans

Voor de waterbalans is onderscheid gemaakt tussen het oppervlaktewater en de percelen. In Excel is een oppervlaktewaterbalans opgesteld waarvoor één van de inkomende posten de afstroom van de percelen is (Figuur 51). Andere posten van de oppervlaktewaterbalans zijn neerslag, verdamping, kwel, inlaat en uitslag.

$$\text{Neerslag} + \text{Kwel} + \text{Afstroom percelen} + \text{Inlaat} = \text{Verdamping} + \text{Uitlaat}$$



Figuur 51 Schema waterbalans

Het waterbalansmodel is gemaakt voor het oppervlaktewater. Op dagbasis wordt voor elke tijdstap (t) elke in- en uitgaande post berekend. In het perceelmodel SWAP wordt op dagbasis de afvoer van de percelen berekend uit de processen die zich afspelen in de onverzadigde zone en het ondiepe grondwater. Er is een koppeling gerealiseerd tussen de oppervlaktewaterbalans en het perceelmodel SWAP.

Voor zowel de kwantiteit als de kwaliteit van het oppervlaktewater is een waterbalans opgesteld.

Oppervlaktewater kwantiteit

Neerslag, kwel en oppervlaktewaterverdamping worden vermenigvuldigd met het totaal oppervlak aan oppervlaktewater in het gebied. Vanaf de percelen komt een hoeveelheid water en er kan water ingelaten of uitgeslagen worden.

Wanneer er een verschil is tussen in- en uitgaande posten zorgt berging voor peilverandering. De grootte van de peilverandering wordt bepaald door de hoeveelheid berging gedeeld door het wateroppervlak.

$$\text{Peil}(t) = \text{Peil}(t-1) + \frac{\text{Berging}(t)}{\text{Opp}_{\text{water}}}$$

De peilverandering wordt binnen bepaalde grenzen gehouden door de drempelwaarde voor uitslag. De mogelijkheid tot (automatisch) water inlaten als het peil onder een minimum waarde komt is uitgeschakeld voor de Leipolder.

$$\text{Peil}(t) + \frac{\Delta V(t)}{\text{Opp}_{\text{water}}} < \text{Peil}_{\min}$$

Er wordt water uitgeslagen als het peil boven het maximumpeil komt. Het maximumpeil is het aanslagpeil van het gemaal.

$$\text{Peil}(t) + \frac{\Delta V(t)}{\text{Opp}_{\text{water}}} > \text{Peil}_{\text{aanslag gemaal}}$$

Er wordt water uitgeslagen tot het peil op het minimumpeil komt (afslagpeil gemaal).

$$\text{Uitslag}(t) = (\text{Peil}(t) - \text{Peil}_{\text{afslag}}) * \text{Opp}_{\text{water}} + \Delta V(t)$$

De hoeveelheid uitslag per dag kent een bovengrens die bepaald wordt door de maximumcapaciteit van het gemaal. Het peil kan boven het maximumpeil komen als de maximum uitslagcapaciteit te klein is om de benodigde hoeveelheid water uit te malen.

Oppervlaktewaterkwaliteit

Aan iedere in- en uitgaande post van de waterbalans wordt een chloridegehalte toegekend. De toename in hoeveelheid chloride wordt berekend door elke in- of uitgaande post te vermenigvuldigen met het chloridegehalte van deze post.

$$\Delta m_{Cl} = P(t) * Cl_P + K(t) * Cl_K + Inlaat(t) * Cl_{Inlaat} + SWAPout(t) * Cl_{SWAPout}(t) + Cl_{opp.water,ber.}(t-1) * Uitslag(t)$$

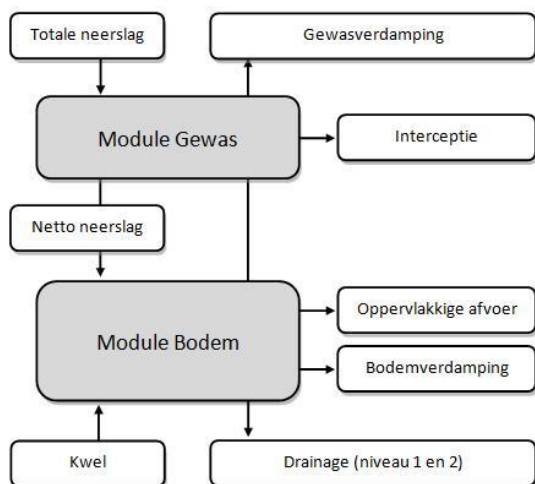
Het chloridegehalte van het oppervlaktewater is de hoeveelheid aanwezige chloride in het systeem gedeeld door het totale volume oppervlaktewater (op $t - 1$) plus de toe- of afname.

$$Cl_{opp.water,ber.}(t) = \frac{Cl_{opp.water,ber.}(t-1) * V(t-1) + \Delta m_{Cl}}{V(t)}$$

Afhankelijk van het chloridegehalte van de in- of uitgaande post treedt verdunning of juist toename van het chloridegehalte op.

Afstroom percelen (SWAP)

Voor het modelleren van de processen op perceelschaal is het SWAP-model (Soil-Water-Atmosphere-Plant) gebruikt (Kroes et al., 2008). SWAP simuleert het transport van water en stoffen in de bodem op perceelschaal. Omdat in de zone boven het grondwater de transportrichting hoofdzakelijk vertikaal is, is het model 1-dimensionaal. Een SWAP bodemkolom bestaat uit een gewasmodule en een bodemmodule (Figuur 52).



Figuur 52 Structuur SWAP

Voor de bodemmodule is de volgende waterbalans van toepassing:

$$Netto\ neerslag + Kwel = (Gewas + Bodem)verdamping + Oppervlakkige\ afvoer + Drainage$$

Bovengrens van het model is het maaiveld met of zonder gewas. Randvoorwaarden zijn de meteorologische condities. In deze studie zijn hiervoor neerslag en Makkink-referentieverdamping gebruikt. Wanneer de netto neerslag (totale neerslag minus interceptie) groter is dan de infiltratiesnelheid blijft het water op het maaiveld staan. Oppervlakkige afvoer treedt op wanneer de hoeveelheid water op het maaiveld boven een bepaalde drempelwaarde komt. De verdamping vanuit de bodemmodule kent twee componenten: de bodemverdamping en de gewasverdamping. De gewasverdamping is afhankelijk van het type gewas. Het aantal drainageniveaus, de drainagetypen en andere drainage-eigenschappen worden ingevoerd per perceeltype. Directe afstroming van grondwater naar de watergangen treedt als het grondwater boven het polderpeil stijgt. Afstroming van

grondwater naar de watergangen via drains en greppels treedt op als de grondwaterstand de drain- en greppelniveaus bereikt. De ondergrens van het model beschrijft de interactie met het (regionale) grondwater. Als randvoorwaarde is in deze studie de kwelflux genomen.

SWAP dient voor elk type perceel apart te worden gerund. De totale hoeveelheid runs (n) hangt af van de ontwateringsmethoden en de gewassen in de te modelleren polder. Omdat de percelen in de Harger- en Leipolder voornamelijk bestaan uit begreppelde percelen met gras is slechts één SWAP run gedaan: met het perceeltype gras, ontwatering: sloten en greppels.

SWAP geeft een afstroomhoeveelheid per dag in een debiet per oppervlak perceel (cm^3/cm^2). Deze hoeveelheid wordt vermenigvuldigd met het totaal oppervlak voor betreffend perceeltype om tot een afstroom per type perceel in het gebied te komen.

$$Q_{\text{perci}}(t) = f_{\text{perci}} * \text{Opp}_{\text{land}} * q_{i,\text{SWAP}}$$

SWAP geeft de chloridestromen in hoeveelheden per oppervlak perceel (mg/cm^2). Deze chloridestromen moeten vermenigvuldigd worden met het totaal oppervlak voor betreffend perceeltype.

$$Cl_{\text{perci}}(t) = f_{\text{perci}} * \text{Opp}_{\text{land}} * Cl_{i,\text{SWAP}}$$

Instellingen

Op basis van GIS gegevens, literatuur en veldbezoek en metingen zijn de instellingen voor de waterbalans gekozen.

Tabel 5 geeft de gegevens zoals gebruikt in de oppervlaktewaterbalans en de herkomst van de gegevens.

Tabel 5 Gegevens oppervlaktewaterbalans Leipolder

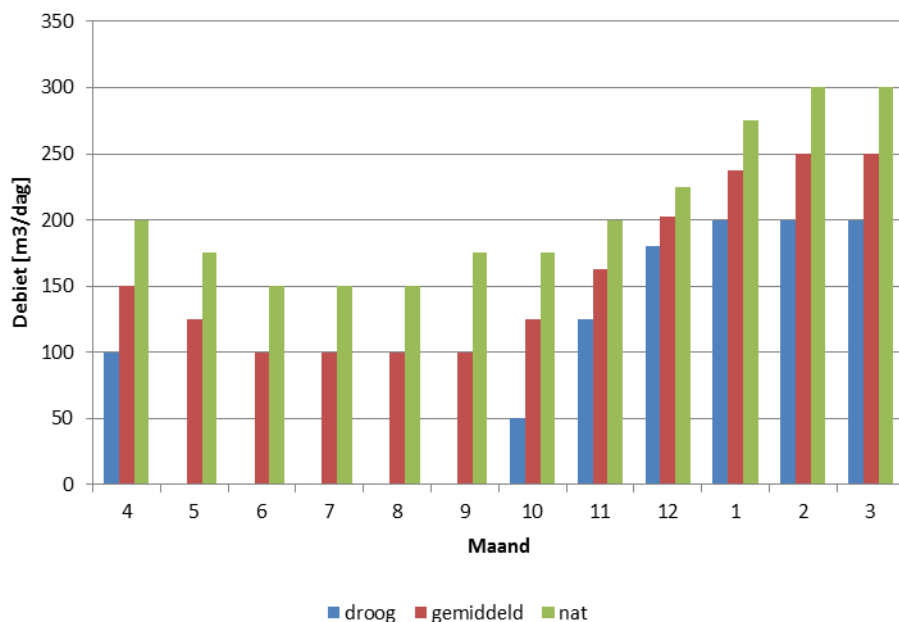
	Zuidelijke deel De Pute	Noordelijk deel Leipolder	..	Herkomst data
Oppervlak	398288	530584	[m ²]	GIS Peilvakken
%	40%	10%		Inschatting o.b.v. GIS Peilvakken
Oppervlaktewater				
Kwel				
Zomer	3	3	[mm/d]	Inschatting op basis van modelberekeningen
Winter	4	4	[mm/d]	Inschatting op basis van modelberekeningen
Chloride gehalte				
Initiële waarde	4000	4000	[mg/l]	
Inlaat	10	10		
Kwel	10000	10000		
Neerslag	10	10		
Gemaal				
Max. Capaciteit	4000	10080	[m ³ /d]	Inschatting van de stuw capaciteit, en contact met HHNK

Tabel 6 geeft de gegevens zoals gebruikt in het perceelsmodel SWAP en de herkomst van de gegevens.

Tabel 6 Gegevens perceelsmodel SWAP Leipolder

Leipolder			Herkomst data
gewas	gras		Inschatting o.b.v. Virtual Earth en veldbezoek
drainagemiddel	greppels en sloten		
<u>Sloten</u>			
drainageweerstand	375	[d]	Inschatting o.b.v. waardes zoals ook gebruikt in eerdere studie (LMZW, 2010), Virtual Earth en veldbezoek
slootafstand	120	[m]	
bodemdiepte	100	[cm]	
<u>Greppels</u>			
drainageweerstand	65	[d]	Inschatting o.b.v. waardes zoals ook gebruikt in eerdere studie (LMZW, 2010), Virtual Earth en veldbezoek
drainafstand	15	[m]	
bodemdiepte	30	[cm]	

Figuur 53 geeft de waardes voor de instroom van duinwater in de Leipolder. De waardes zijn gekozen op basis van de afvoermetingen, de veldinspecties en ervaringen uit andere projecten rondom de duinen.



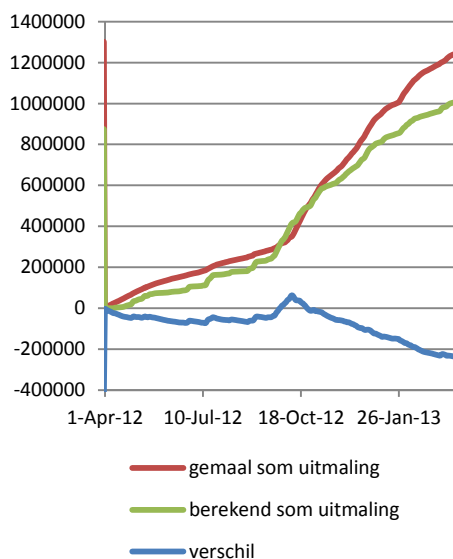
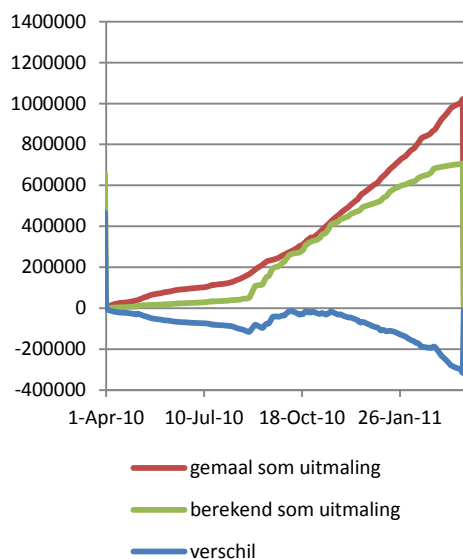
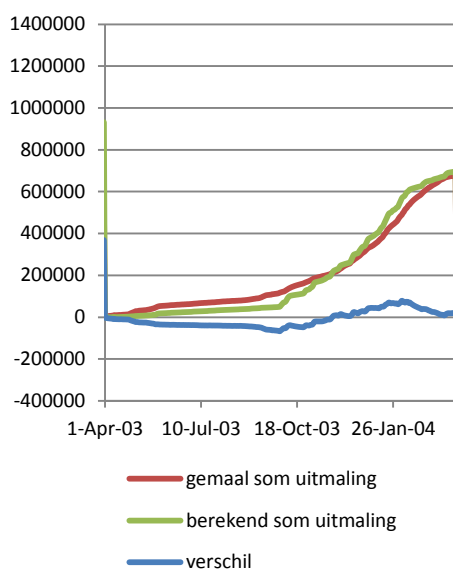
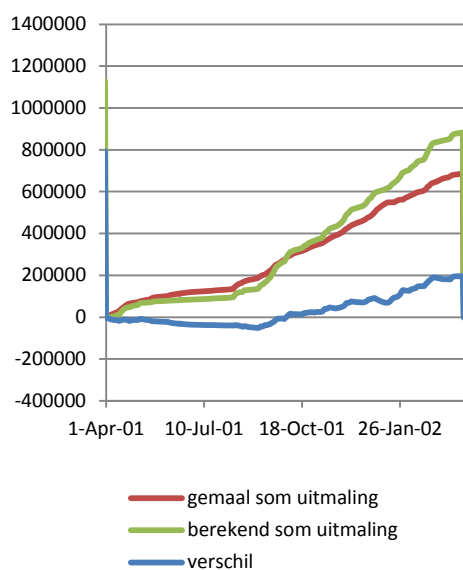
Figuur 53 Instromend duinwater in m³/dag, variatie per maand per hydrologisch jaar

Resultaten

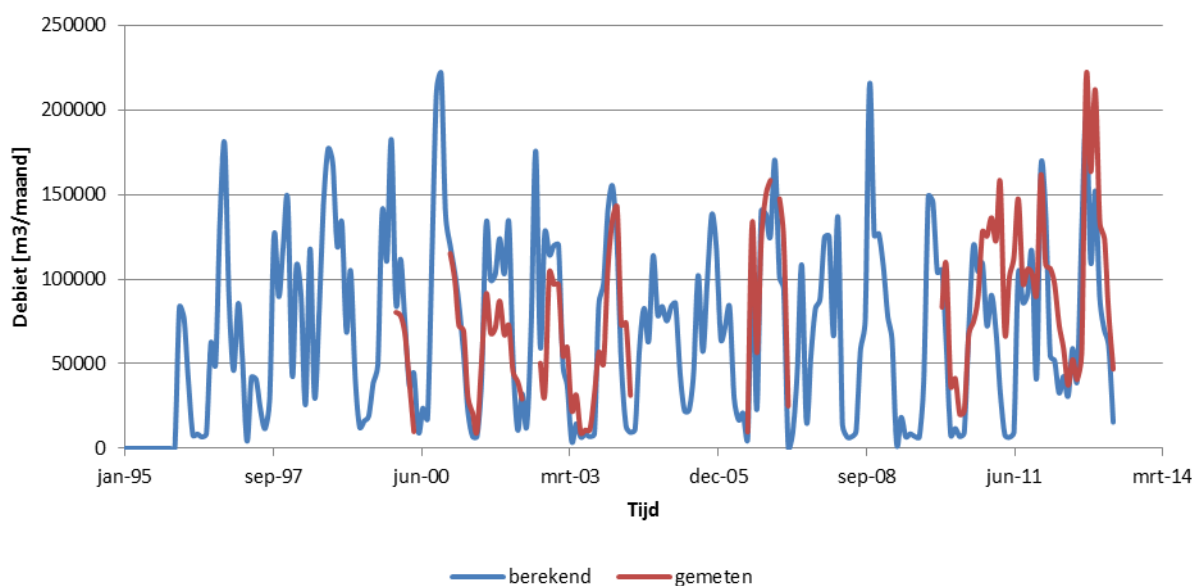
Onderstaande figuren geven een overzicht van de resultaten van de oppervlaktewaterbalans voor de Leipolder.

Maalstaten

Voor de periode waar maalgegevens beschikbaar zijn komen de maalstaten redelijk overeen met de berekende uitlaat. Voor 2010 en 2011 is dit niet het geval, vermoedelijk door een overschatting in de omrekening van draaiuren naar debieten. Deze resultaten zijn weergegeven in Figuur 54 en Figuur 55.



Figuur 54 Berekende cumulatieve debieten per hydrologisch jaar voor de Leipolder voor de periodes dat er continue reeksen beschikbaar zijn



Figuur 55 Berekende debieten uitlaat en maalstaten voor de Leipolder op maandbasis [m³/maand]

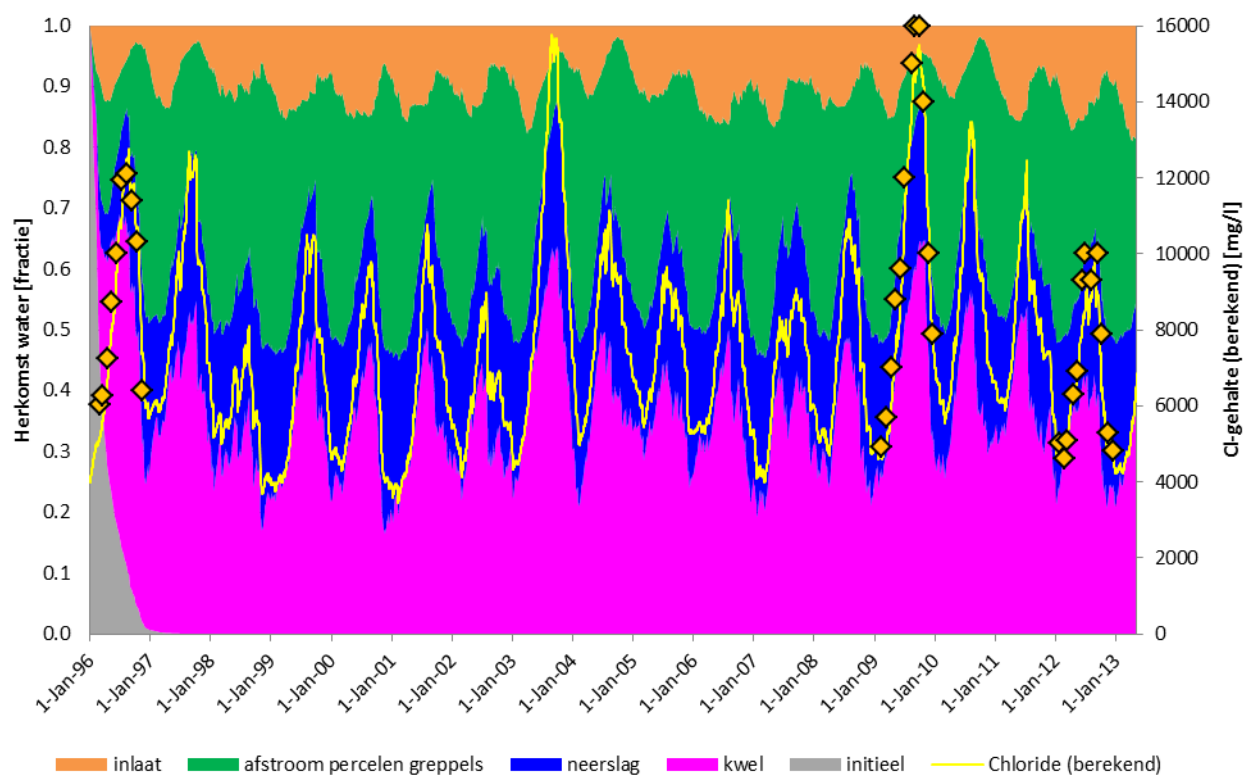
Verschillen tussen de berekende uitlaat en de maalstaten kunnen worden veroorzaakt door onzekerheid in verschillende posten van de waterbalans. Met name onderstaande posten kunnen grote invloed hebben:

- Inlaat: voor het debiet van het instromende water vanuit de duinen is (op basis van metingen in mei, juni, juli 2013) en ervaringen uit andere projecten in duingebieden een maandwaarde genomen. Deze ervaringen hebben laten zien dat instroom uit duingebieden kan stoppen in de zomerperiode. Uit de analyse van de meetgegevens en de berekende gegevens bleek dat hierbij resultaten goed aansluiten bij de metingen van debieten en chloride concentraties. Verschillen tussen natte en droge jaren kunnen echter wel verbeterd worden met meer metingen in droge en natte jaren.
- Kwel: op basis van de beschikbare gegevens is gekozen voor een zomer en winterwaarde voor de kwel. De kwelwaarde is echter lastig te bepalen en er is grote variatie in het gebied (als gevolg van hoogteligging en dikte kleilaag). Ook zal er variatie in de tijd zijn, die bepaald wordt door het oppervlaktewaterpeil, eb- en vloed (met name in De Putten) en de neerslag.
- Afstroom percelen: de waterbalans is opgesteld met het uitgangspunt dat alle percelen op dezelfde manier reageren (gewas: gras, ontwatering: greppels, bodemopbouw: lichte klei). Er is echter variatie binnen de polders waardoor reactiesnelheid en hoeveelheid afstroom verschillen.

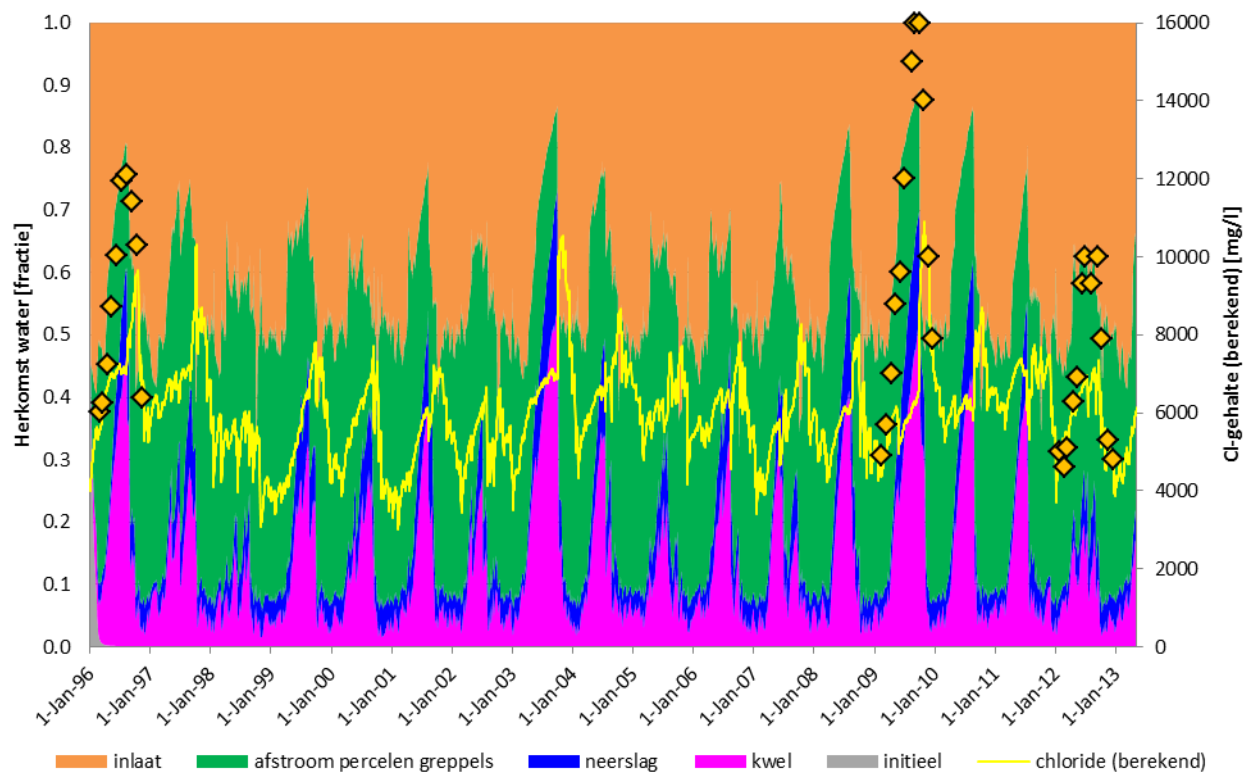
Herkomst inkomend water en inkomend zout

De waterbalans geeft inzicht in de bijdragen die de verschillende posten van de waterbalans leveren aan het totaalplaatje.

In het deel van de Putte is 40% van het gebied open water, terwijl in het noordelijke deel het open water percentage beperkt is dit 10%. Omgekeerd is het perceeloppervlak in het noordelijk deel veel groter dan rond de Putte. Dit heeft tot gevolg dat er in de Putte veel meer water afkomstig is van neerslag en kwel, dan in het noordelijk deel van de Leipolder, waar meer water afkomstig is vanuit de percelen (afstroom is resultante van neerslag, kwel, verdamping en grondwaterstand).



Figuur 56 Herkomst water als percentage van totaal voor het zuidelijke deel van de Leipolder (de Putte) door de tijd. Let op: 2013 loopt tot eind april.



Figuur 57 Herkomst water als percentage van totaal voor het noordelijk deel van de Leipolder door de tijd. Let op: 2013 loopt tot eind april.

De beide figuren laten een zeer sterke eigen dynamiek zien.

In het zuidelijk deel is een groot deel oppervlakte water. Als gevolg hiervan beweegt de chloride concentratie van het oppervlaktewater sterk mee met de grotere dan wel kleinere relatieve bijdrage van de zoute kwel. Doordat deze grote relatieve bijdrage van de kwel optreedt in de zomer, vind hier bovenop ook indamping plaats. Hierdoor zijn er zeer grote schommelingen in de chloride concentratie.

In het noordelijke deel van de Leipolder is de dynamiek heel anders.

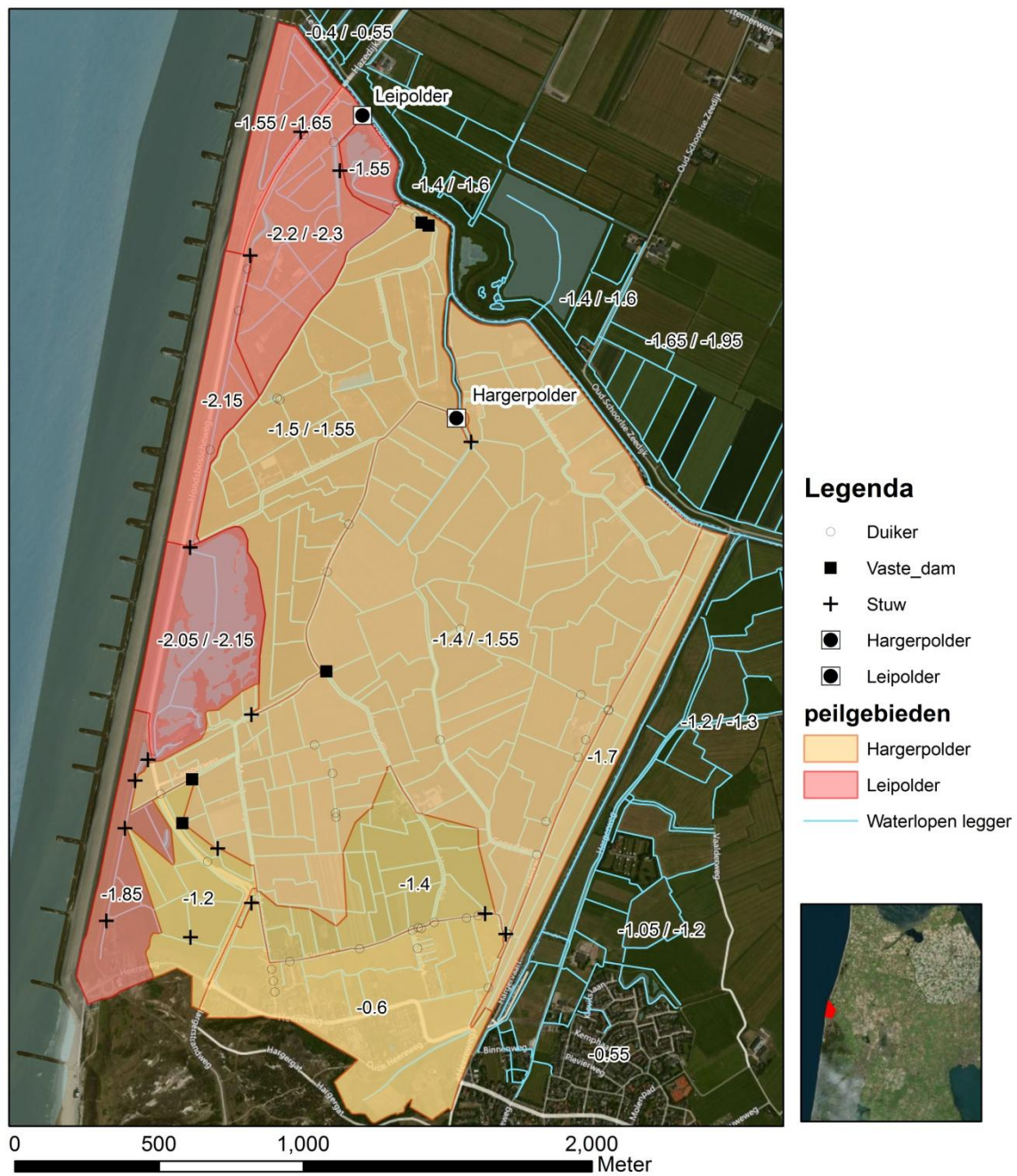
Te zien is dat de hoogste pieken in de chloride concentraties optreden als de inlaat ook toeneemt.

De laagste concentratie treedt hier op in de winters, als de kwelbijdrage het laagste is, en de instroom vanuit de Putte ook zoeter wordt. In de zomer treedt er indamping plaats en neemt de bijdrage van de kwel toe.

Doordat echter de zoete instroom vanuit de Putte nog effect heeft, en er relatief weinig open water in het systeem aanwezig is, vindt er weinig indamping plaats en wordt vooral de neerslag en de kwel vermengd.

Als het na de droge zomer komt er weer water vanuit de Putte richting het noorden. In het begin is dit nog erg zout, veel zouter dan in het noordelijke deel van de Putte. Gevolg is dat na de zomer de hoogste piek van de chloride concentratie optreedt.

Bijlage 4 Peilvakken polders



Bijlage 5 EC routing



Legenda

- Hargerpolder
- Leipolder

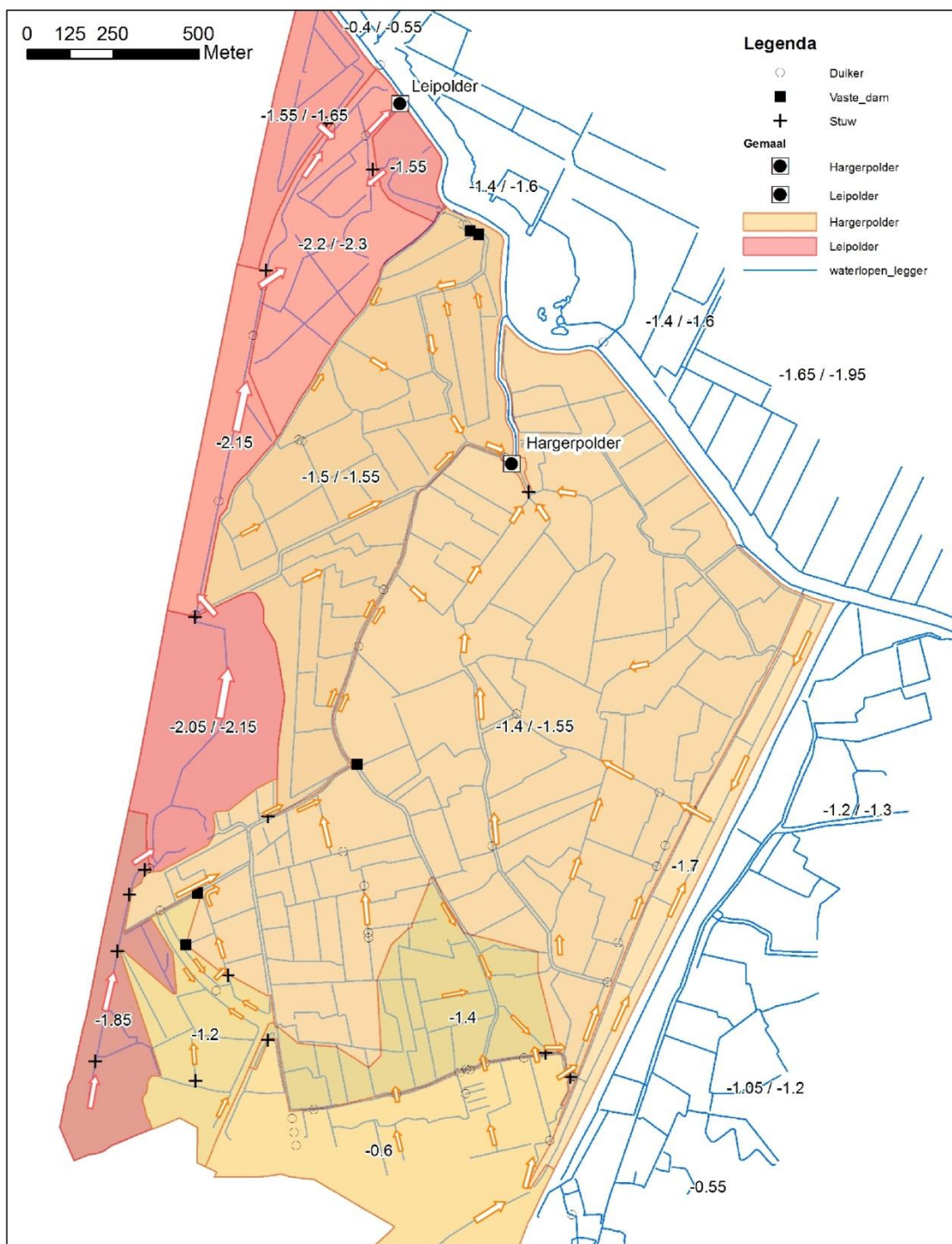
Oppervlaktewater

EC [uS/cm]

- < 250
- 250 - 500
- 500 - 750
- 750 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 2500
- 2500 - 3000
- 3000 - 4000
- 4000 - 5000
- 5000 - 10000
- 10.000 - 15.000
- 15.000 - 20.000
- 20.000 - 30.000
- Duiker
- Vaste_dam
- +



Bijlage 6 Stromingsrichting



Bijlage 7 Onderzoeksmethoden

7.1 Methoden veldonderzoek

7.1.1 Geofysische metingen

Relaties elektrische weerstand, lithologie en zoutgehaltes

Voor dit onderzoek zijn drie typen geofysische metingen uitgevoerd, die een beeld geven van de elektrische weerstand ρ van de ondergrond, uitgedrukt in Ohmm. Sommige meetsystemen geven de elektrische geleidbaarheid σ , welke de omgekeerde is van de weerstand. De geleidbaarheid wordt uitgedrukt in mS/m of microS/cm. Daarbij geldt dat:

$$1 \text{ Ohmm} = \frac{1}{\text{S/m}} = \frac{1000}{\text{mS/m}} = \frac{10000}{\text{microS/cm}}$$

De elektrische weerstand van de ondergrond of formatieweerstand ρ_f wordt bepaald door de weerstand van het grondwater ρ_w , de lithologie, de mate van waterverzadiging en de temperatuur.

Voor de correctie van een gemeten weerstand bij een temperatuur T in °C naar de weerstand bij een T van 20 °C geldt de volgende relatie:

$$\rho_{f20} = \rho_f \cdot \frac{75}{1.8T + 39}$$

Voor de weerstand van verzadigde grond en de weerstand van het grondwater geldt de relatie van Archie (1942):

$$\rho_w = \frac{\rho_f}{F}$$

Waarbij F de formatiefactor is. De formatie van waterverzadigde klei ligt in de orde van 1 a 2, terwijl voor verzadigd zand deze varieert van 2.5 voor fijn zand tot 5 voor grof zand en grind.

Tabel 7 Formatiefactor voor diverse bodemsoorten

Lithologische beschrijving	Formatiefactor
grind met zand	7
grof zand met grind	6
grof zand	5
matig grof zand	4
zwak slibhoudend zand	3
matig slibhoudend zand	2.5 *
sterk slibhoudend zand	2 *
klei	1 - 3 *
veen	~ 1

In de onverzadigde zone, met name van zandbodems, is de formatiefactor hoger.

Voor een goede interpretatie van de geofysische metingen moet men dus op de hoogte zijn van de lithologie en de grondwaterstand ter plaatse van de meting. Voor de relatieve veranderingen is de tijd (monitoring) zijn geofysische metingen in ieder geval geschikt.

De elektrische weerstand of de elektrische geleidbaarheid (EC) van water is gerelateerd aan het aantal opgeloste ionen oftewel het zoutgehalte. Uit de metingen is door DLO (Mulder en Spoelstra, 1995) een relatie opgesteld tussen de elektrische geleidbaarheid σ_{w20} de (EC bij 20 °C) en het zoutgehalte van het water uitgedrukt in chlorideconcentratie in mg/l (Cl) op basis van alle analyses in dit gebied. Deze geldt alleen voor EC waarden hoger dan 1000 microS/cm.

$$Cl = 3.9831 * \sigma_{w20} - 256.4$$

Een andere relatie is die van Post (2008), gebaseerd op een groot aantal analyses van grondwater in Laag Nederland, waarin ook het bicarbonaatgehalte HCO_3 in mg/l wordt meegenomen. Deze gaat op voor EC waarden hoger dan 800 microS/cm:

$$\sigma_{w20} = 2.91 * 10^2 + 2.71 * Cl - 2.49 * 10^{-5} * Cl^2 + 9.34 * 10^{-1} * HCO_3$$

$$Cl = \frac{-2.71 + \sqrt{2.71^2 - (4 * 2.49 * 10^{-5} * (-\sigma_w + 291.81 + 0.93 * HCO_3))}}{2 * 2.49 * 10^{-5}}$$

Tenslotte is er de algemene relatie van Stuyfzand (1987):

$$\sigma_{w20} = 71.027 \left\{ 0.94 + 1.38207 \left(\frac{Cl^-}{35.453} \right) + \frac{SO_4^{2-}}{48.03} + \frac{NO_3^-}{62} + 0.95721 \left(\frac{HCO_3^-}{61.02} + \frac{CO_3^{2-}}{30.01} \right) \right\}$$

In de praktijk is de geleidbaarheid van water toch de meest praktische en direct meetbare parameter (EC meting). We definiëren de verschillende zoutklassen als volgt: de bovengrenzen van zoet, lichtbrak, brak en zout zijn respectievelijk 1000 microS/cm (Cl = 150 mg/l), 4000 microS/cm (Cl = 1500 mg/l), 15000 microS/cm (Cl = 6000 mg/l) en 50000 microS/cm (Cl = 20000 mg/l).

Met bovengenoemde relaties kunnen de uitkomsten van de geofysische metingen met het zoutgehalte van het grondwater in verband worden gebracht. Uitgaande van een gemiddelde formatiefactor van 3 voor de zandlagen in dit gebied en een temperatuurcorrectie voor grondwater met een gemiddelde temperatuur van 11 °C, kunnen wij bij benadering de volgende relaties opstellen:

$$\sigma_{w20} \approx \frac{10000}{0.26 \rho_f} \quad \text{voor CVES metingen}$$

$$\sigma_{w20} \approx 38 \sigma_{fd} \quad \text{voor FDEM (DUALEM)}$$

$$\sigma_{w20} \approx 3 \sigma_{fp} \quad \text{voor prikstokmetingen}$$

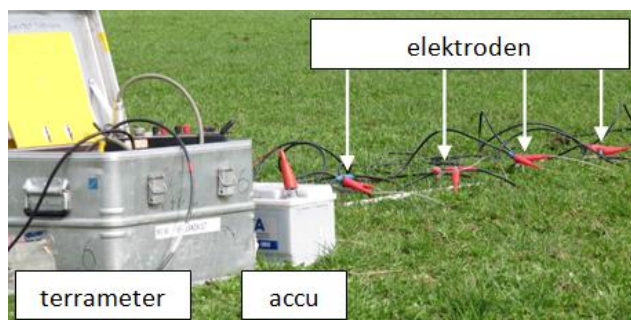
Waarbij σ_{w20} en σ_{fp} zijn uitgedrukt in microS/cm, ρ_f in Ohmm en σ_{fd} en in mS/m.

Voor dit onderzoek definiëren we verder zoet, lichtbrak, brak en zout als water met een EC bovengrens van respectievelijk 1000 microS/cm (Cl = 150 mg/l), 4000 microS/cm (Cl = 1500 mg/l), 15000 microS/cm (Cl = 6000 mg/l) en 50000 microS/cm (Cl = 20000 mg/l).

CVES methode

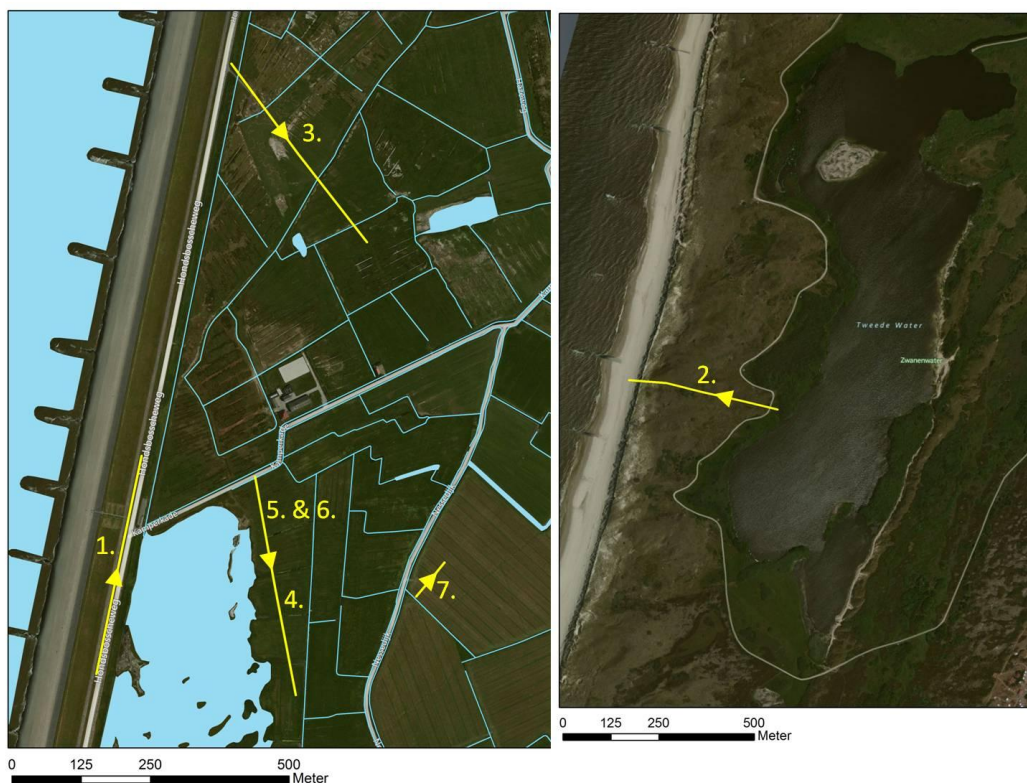
De CVES methode is een zogenaamde Direct Current methode. Hierbij wordt via twee stroomelectroden een elektrische stroom opgewekt in de ondergrond.

Uit die stroom en het geïnduceerde potentiaalverschil in twee andere elektroden kan dan de schijnbare weerstand worden berekend. De schijnbare weerstand is een soort gemiddelde waarde van de ondergrond tot een bepaalde diepte, welke afhankelijk is van de afstand van de stroomelektroden. Bij de CVES methode worden langs een profiel een groot aantal elektroden geplaatst en worden de schijnbare weerstanden bij tal van combinaties van elektroden bepaald. Door inversie van deze waarden te bepalen door een rekenmodel kunnen de werkelijke of formatieweerstanden van de ondergrond worden bepaald en getoond in een 2D beeld. De metingen zijn uitgevoerd met de SAS4000 Terrameter en de LUND kabel van ABEM, Sweden. In totaal kunnen met dit systeem voor elke meting 64 elektroden geplaatst worden op afstanden variërend van 0.5 tot 10 m. De totale lengtes kunnen variëren van 40 tot 400 m. Het diepte bereik is ongeveer een 1/6 van de lengte van de CVES. Voor de interpretatie en inversie is het softwarepakket RES2Dinv van GEOTOMO Software gebruikt.



Figuur 58 CVES meting met terrameter, accu, kabel en elektroden

Er zijn 3 CVES sonderingen uitgevoerd met een lengte van 400 m in het westelijke poldergebied achter de Zeewering (nr. 1, 3 en 4, zie figuur 58) en 1 in het duingebied van het Zwanenwater (nr. 2). Verder is een verlengde CVES uitgevoerd van 80 m (2 x 40 m) bij De Putten (nr. 5). Deze metingen zijn uitgevoerd in maart 2013. In juli is de laatste gedetailleerde CVES bij De Putten herhaald (nr. 6) en is ook een CVES sondering uitgevoerd iets ten oosten van De Putten (nr. 7).



Figuur 59 Locatie en richting CVES metingen in de Lei- en Hargerpolder (links) en bij het Tweede Water (rechts)

Gegeven de bovenstaande relaties kunnen we stellen dat het grondwater in zandlagen in dit gebied als zoet, licht brak, brak en zout kan worden beschouwd als de weerstanden respectievelijk $\rho_f > 40$ Ohm, $10 < \rho_f < 40$ Ohm, $2.5 < \rho_f < 10$ Ohm en $\rho_f < 2.5$ Ohm zijn.

FDEM profilering

Met de frequency domain electromagnetische (FDEM) methode worden elektrische stromen in de ondergrond opgewekt door inductie van een wisselend electromagnetisch veld, uitgezonden door een zenderspoel. Het opgewekte secundaire electromagnetische veld wordt opgevangen door een ontvangerspoel. Uit het laatste signaal kan de schijnbare weerstand van de ondergrond worden verkregen. Door 3 frequenties en 2 spoelstanden te combineren worden schijnbare weerstanden tot 6 verschillende diepten gemeten. Uit deze waarden kan door inversie een 2D beeld van de ondergrond worden verkregen tot een diepte van ca 6 m. De spoelen zijn bevestigd aan een enkele buis, waarmee al lopend kan worden gemeten. Na interpretatie wordt dan een continu 2D beeld verkregen van de weerstand van de ondergrond. Voor de metingen is gebruik gemaakt van de DUALEM-421S van Dualem Instruments, Ontario, USA. In juli 2013 is een EM profiel gemeten met een lengte van ca 1500 m vanuit het centrale gedeelte van het poldergebied naar de Zeewering net ten noord ervan De Putten. Het profiel loopt over de CVES sonderingen die ook in juli zijn uitgevoerd.



Figuur 60 FDEM meting

Gegeven de bovenstaande relaties kunnen we stellen dat het grondwater in zandlagen in dit gebied als zoet, licht brak en brak (of zout) kan worden beschouwd als de geleidbaarheden respectievelijk $\sigma_D < 26$ mS/m, $26 < \sigma_D < 105$ mS/m, en $\sigma_D > 105$ mS/m. (Voor hogere geleidbaarheden geeft de DUALEM geen betrouwbare relatie meer tussen zoutgehalte en geleidbaarheid).

FDEM (airborne)

Met de time-domain electromagnetische techniek wordt door inductie een elektrische stroom opgewekt na het plotseling onderbreken van een stationair electromagnetisch EM veld. Het verval (in microseconden) van het geïnduceerde secundaire magnetische veld, dat tegelijkertijd ook dieper doordringt in de ondergrond, wordt in de tijd gemeten. Hieruit kan een door inversie de opbouw van de werkelijke weerstand van de ondergrond worden bepaald. De metingen worden uitgevoerd door een zender en ontvangerspoel, die onder een helicopter hangen. Hiermee kunnen 2D profielen langs vluchtlijnen worden verkregen. In september 2011 zijn een aantal van deze metingen uitgevoerd in het onderzoeksgebied met het SkyTem systeem van Skytem Surveys (Aarhus, Zweden) (Velstra, 2013). De profielen en vluchtlijnen worden weergegeven op figuur 60. De meeste profielen lopen langs over en langs de Zeewering en de duinen. Een profiel loopt enkele honderden meters meer landinwaarts parallel aan de zeewering. Het dieptebereik van de metingen is ongeveer 80 tot 100 m.



Figuur 61 Vluchtlijnen Skytem metingen (links) en uitvoering FDEM airborne meting (rechts)

Gegeven de bovenstaande relaties kunnen we stellen dat het grondwater in zandlagen in dit gebied als zoet, licht brak, brak en zout kan worden beschouwd als de weerstanden respectievelijk $\rho_f > 40$ Ohm, $10 < \rho_f < 40$ Ohmm, $2.5 < \rho_f < 10$ Ohmm en $\rho_f < 2.5$ Ohmm zijn.

Prikstok

De prikstok is een metalen stok met aan het uiteinde sensoren voor het meten van de temperatuur (T) en de elektrische geleidbaarheid (EC) (Wirdum, 2004). Voor het meten is de WTW 3310 EC meter gebruikt die aan de prikstok wordt gekoppeld.



Figuur 62 Prikstokpunt en gebruik prikstok

Vanwege de verschillende manieren van meten tussen prikstok en EC-meter dient de prikstok-EC eerst nog vermenigvuldigd te worden met een correctiefactor die voor elke prikstok is bepaald met ijkvloeistoffen. Deze waarde is voor deze prikstok vastgesteld op 0.38.

De prikstok wordt op de gewenste plaats met de hand in de grond geduwd. Met behulp van de peilschaal die in de stok gegraveerd is wordt iedere 10 cm een EC en T waarde waargenomen en genoteerd. Elke keer dat de stok verder wordt geduwd moet 1 a 3 minuten gewacht worden om de EC en T waarden in te laten stellen. Aan de hand van deze gegevens worden de geleidbaarheidswaarden van het grondwater bepaald en in diepteprofiel uitgezet. Het dieptebereik is in de praktijk enkele meters tot 5 m afhankelijk van de bodem.

In juli zijn 5 prikstok metingen uitgevoerd bij De Putten, het centrale gedeelte en in het zuidwesten dichtbij de Zeewering (Figuur 18).

Gegeven de bovenstaande relaties kunnen we stellen dat het grondwater in zandlagen in dit gebied als zoet, licht brak, brak en zout kan worden beschouwd als de geleidbaarheden respectievelijk $\sigma_P < 333 \text{ microS/m}$, $333 < \sigma_P < 1300 \text{ microS/m}$, $1300 < \sigma_P < 5000 \text{ microS/m}$ en $\sigma_P > 5000 \text{ microS/m}$.

7.1.2 Handboringen

Om de geofysische metingen te verifiëren en informatie over de bodemopbouw te verkrijgen zijn op diverse locaties handboringen uitgevoerd tot onder de grondwaterspiegel. Van de boring is een bodembeschrijving gemaakt. In een aantal gevallen is het grondwater bemonsterd.

7.1.3 EC metingen

De Elektrische Geleidbaarheid (EC) van het oppervlaktewater is een maat voor het zoutgehalte. Het ruimtelijke beeld van het zoutgehalte in de watergangen geeft informatie met betrekking tot oppervlaktewaterstroming en kwel. Variatie van de EC in de tijd geeft informatie over de invloed van neerslag, verdamping, kwel en inlaat op het oppervlaktewatersysteem.

Met een ctd-diver aan een 'hengel' en een GPS zijn routes langs de watergangen gelopen om een zogenaamde "EC routing" te doen (zie kader). Tijdens het lopen is met een vast interval Elektrische Geleidbaarheid (EC), druk en locatie geregistreerd. Het plotten van de metingen in GIS maakt de ruimtelijke verdeling van zoutgehalten in het oppervlaktewater inzichtelijk.

CTD-diver combineren met GPS

Voor het meten van EC waarden is gebruik gemaakt van divers (Schlumberger). Deze divers meten met een bepaalde ingestelde frequentie en slaan dit op. Met behulp van een kabel en laptop kunnen de divers in het veld worden uitgelezen. In dit onderzoek is een CTD-diver gebruikt. Een CTD-diver meet (water)druk, temperatuur en elektrische geleidbaarheid (EC). Voor de elektrische geleidbaarheid is de nauwkeurigheid 1% van de gemeten gegevens en de resolutie 0.1% van de gemeten gegevens.

Voor het bepalen van de locatie in het veld is een GPS (Garmin) gebruikt. Het is mogelijk de coördinaten (X en Y in Rijksdriehoekstelsel) met een bepaalde frequentie op te slaan en later uit te lezen. Voor dit onderzoek zijn zowel de ctd-diver als de GPS ingesteld op een frequentie van 15 seconden. Vervolgens zijn routes door de polder gelopen waarbij een ctd-diver aan een 'hengel' door de watergangen werd meegenomen. De zo verkregen meetdata zijn gecombineerd met de GPS data en geplot in een GIS programma.

De metingen hebben begin juni 2013 plaatsgevonden. Helaas was het gebied beperkt toegankelijk in verband met het broedseizoen. Hierdoor was het niet mogelijk om alle sloten door te meten.

Op diverse momenten is ook een ctd-diver ingehangen bij het inkomende duinwater en de gemalen om daar de variatie van het zoutgehalte in de tijd te registreren.

7.1.4 Afvoermetingen

De Hargerspreng uit de Schoorlse duinen mondt via een duiker onder de Heereweg uit in de sloot ten westen van het Jaagpad in het zuidoosten van het onderzoeksgebied (figuur 60).



Figuur 63 Hargerspreng

Het bleek niet mogelijk om een relatie vast te stellen tussen afvoer en waterhoogte aangezien er geen vrije overstort bestaat en de waterpeilen worden gereguleerd. Er zijn op 3 momenten afvoermetingen uitgevoerd door middel van de zoutverduunningsmethode (Van Breukelen et al., 2013). De zoutverduunningsmethode is gebaseerd op de gemeten zoutpiek in het water stroomafwaarts van een punt waar een hoeveelheid zout wordt geïnjecteerd. Hierbij geldt de relatie:

$$Q = \frac{(C_i - C_a)V}{\int_0^T (C_t - C_a) dt}$$

Waarbij Q is het debiet in liters/s, V het geïnjecteerd volume van de zoutoplossing in liters, C_i , C_a , en C_t zijn de zoutconcentraties van respectievelijk de geïnjecteerde zoutoplossing, de achtergrondconcentratie van de watergang en de concentratie stroomafwaarts in de watergang na verdunning. De laatste wordt gemeten in de tijd, te beginnen vanaf het tijdstip van injectie tot het moment dat de achtergrondconcentratie weer is bereikt. Voor dit onderzoek werd het zout geïnjecteerd aan de bovenstroomse zijde van de duiker en werden de verdunde concentraties benedenstrooms van de duiker gemeten. Als maat voor het zoutgehalte werd de EC van het water gemeten, dat bij lage concentraties (< 5000 microS/cm) een lineaire relatie heeft met het zoutgehalte. Omdat bij hoge zoutconcentratie de EC geen lineaire relatie meer vertoont, is voor de concentratie van de geïnjecteerde zoutoplossing een virtuele EC gebruikt. Deze is berekend door een monster van de zoutoplossing 20 a 30 keer te verdunnen tot deze lager is dan 5000 microS/cm en daarna weer terug te rekenen tot de virtuele lineaire EC.

7.2 Hydrochemie en isotopen

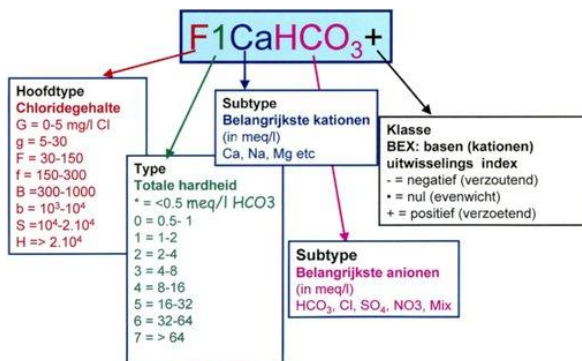
In totaal werden 9 oppervlaktewater en 3 grondwatermonsters in het veld genomen (bijlage 1). Na filtratie in het veld met 0.45 micromillipore filters werden 12 monsters geanalyseerd in het waterlaboratorium van de Faculteit Aard en Levenswetenschappen (AQUA) en 3 door het laboratorium OMEGAM in Amsterdam. Aanzuring van de monsters voor de analyse van de metalen vond plaats in de laboratoria.



Figuur 64 Locaties monsternamen. HO = oppervlaktewater (juni 2013), HG = grondwater (juni 2013), Loc = grondwater (juli 2013).

De monsters zijn geanalyseerd op de belangrijkste anionen (F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) en HCO_3^- door middel van ionchromatografie (Dionex DX-120) and colorimetrie (Labmedics Aquakem 250 discrete analyser). Kationen (Mg, Ca, Na, K), sporenelementen en zware metalen zijn geanalyseerd met de ICP-OES (Varian 730-ES) and ICP-MS (Thermo Electron Corp. X Series II). Twaalf monsters zijn geanalyseerd op isotopenratios van zuurstof en waterstof door middel van de massaspectrometer (MAT 252 en GASBENCH Delta+). Zie verder Bijlage 1.

De wateranalyses zijn gecodeerd volgens de Stuyfzandclassificatie (Stuyfzand, 1989).



Figuur 65. Hydrochemische Stuyfzand classificatie naar Stuyfzand (1989)

7.3 Bestaande data

7.3.1 DINOLoket

Boringen en sonderingen, en een geologische doorsnede van DINOLoket (TNO) zijn gebruikt om een algemene indruk van het gebied te krijgen met betrekking tot geologie en bodemopbouw. Ook (diepe) grondwaterstanden en kwaliteitsgegevens van het grondwater zijn gebruikt.

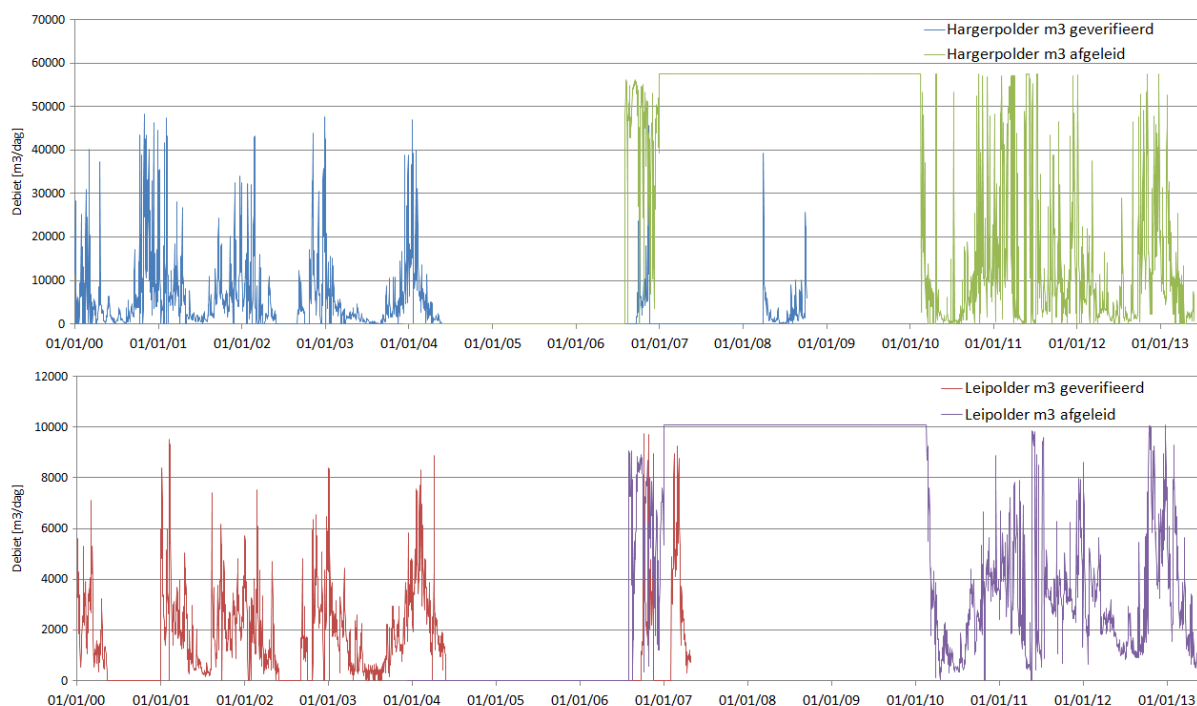
7.3.2 KNMI

Gegevens van neerslag en verdamping zijn afkomstig van het KNMI. Voor de neerslag is neerslagstation Petten gebruikt. Verdampingsgegevens (Makkink) zijn afkomstig van station De Kooy.

7.3.3 Maalstaten

De gegevens van de twee gemalen in de Hargerpolder en de Leipolder zijn afkomstig van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier. Een deel van de maalstaten (in m³/dag) is verkregen via de website met waterkwaliteit- en kwantiteitsgegevens van HHNK (hnk-water.nl). De gegevens die verkregen zijn via de website, zijn afkomstig uit de archieven en in de afgelopen jaren gedigitaliseerd.

Voor het gedeelte wat niet beschikbaar is via de website blijkt dat deze gegevens nog niet voldoende zijn geverifieerd, en daarom niet op de website staan. Debieten zijn voor deze periode berekend aan de hand van aan/uitslagmoment van de pomp en (maximale) capaciteit. Maximale capaciteit voor de Leipolder is 7 m³/min, voor de Hargerpolder is dit 40 m³/min. Om de debieten te berekenen is er van uitgegaan dat als het gemaal draait, dit op maximale capaciteit gebeurt. Helaas zijn er geen gegevens van toerentallen en bijbehorende capaciteiten.

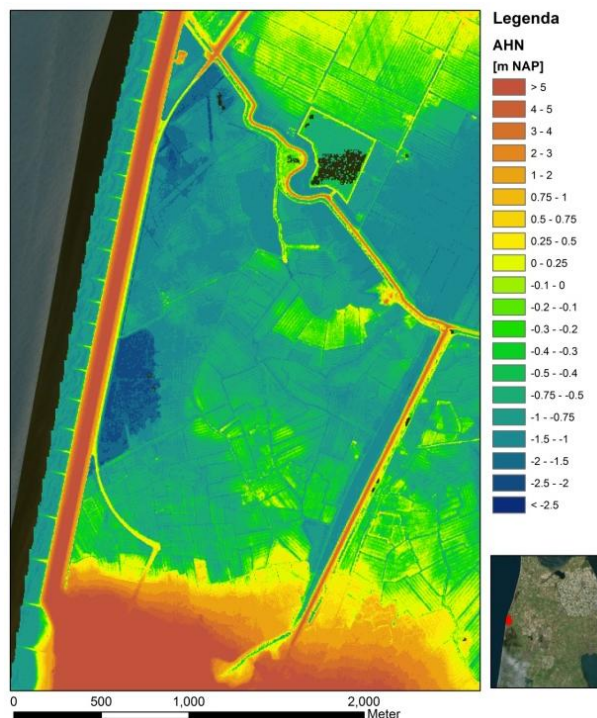


Figuur 66 Maalstaten Hargerpolder(boven) en Leipolder(onder), verkregen via website (label geverifieerd) en via mailcontact (label afgeleid). Debieten in m³/dag.

De figuren tonen de maalstaten voor de Harger- en Leipolder verkregen via de website (1^e helft tijdserie, label: geverifieerd) en bepaald op basis van capaciteiten (2^e helft tijdserie, label: afgeleid). De maalstaten voor de tweede helft van de tijdserie tonen een hoger debiet en zijn waarschijnlijk minder betrouwbaar.

AHN

De AHN kaart voor het gebied heeft een celgrootte van 0.5 x 0.5 meter (zie ook Bijlage 2).



Figuur 67 AHN

7.3.4 Data uit DLO rapport

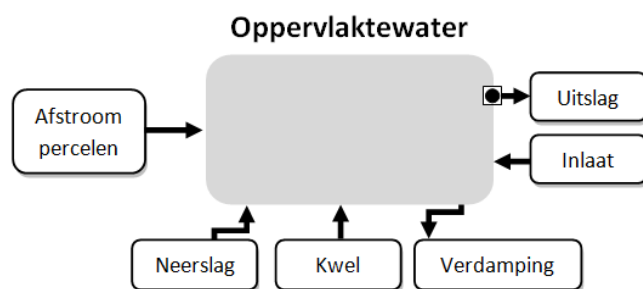
In 1995 is een DLO studie uitgekomen met als titel: “Een geohydrologische systeembeschrijving van het noordelijke deel van het herinrichtingsgebied Bergen-Schoorl” (Mulder en Spoelstra, 1995). Dit rapport heeft veel bruikbare informatie opgeleverd voor de huidige studie. Met name 4 kaarten geven inzicht in het gebied: ‘Kaart met elektrisch geleidingsvermogen en de saliniteit van het oppervlaktewater’, ‘Kaart met het elektrisch geleidingsvermogen en de saliniteit van het grondwater’, ‘Kaart met chloridegehalten van het grondwater’ en ‘Kaart met de geohydrologische systemen’ (genoemde kaarten zijn opgenomen in Bijlage 3).

7.4 Water- en zoutbalansen

Voor de waterbalans is onderscheid gemaakt tussen het oppervlaktewater en de percelen. In Excel is een oppervlaktewaterbalans opgesteld waarvoor één van de inkomende posten de afstroom van de percelen is (figuur 67). Andere posten van de oppervlaktewaterbalans zijn neerslag, verdamping, kwel, inlaat en uitslag (Vergelijking 1).

$$\text{Neerslag} + \text{Kwel} + \text{Afstroom percelen} + \text{Inlaat} = \text{Verdamping} + \text{Uitlaat}$$

Vergelijking 1



Figuur 68 Schema waterbalans

Het waterbalansmodel is gemaakt voor het oppervlaktewater. Op dagbasis wordt voor elke tijdstap (t) elke in- en uitgaande post berekend. In het perceelmodel SWAP wordt op dagbasis de afvoer van de percelen berekend uit de processen die zich afspelen in de onverzadigde zone en het ondiepe grondwater. Er is een koppeling gerealiseerd tussen de oppervlaktewaterbalans en het perceelmodel SWAP.

Voor zowel de kwantiteit als de kwaliteit van het oppervlaktewater is een waterbalans opgesteld. Voor nadere gegevens met betrekking tot de onderdelen van de waterbalans zie Bijlage 4.

Bijlage 8 Boorgatmetingen

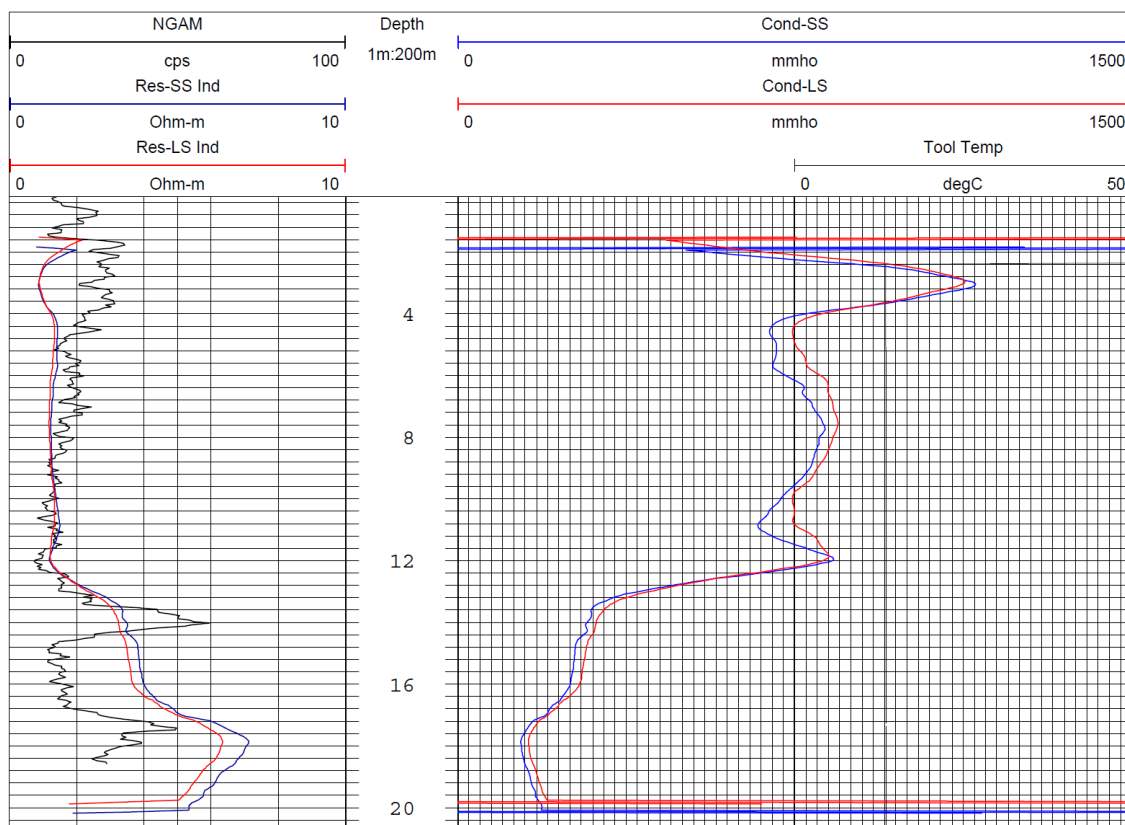


Figure 68. Geofysische boorgatmeting in waarnemingsput B1 tussen "de Putten" en de Hondsbossche Zeewering. Links gamma (zwart) en geoelectrische weerstand in Ohmm (rood is SS en blauw LS). Rechts geoelectrische geleidbaarheid (rood is SS en blauw LS) in mS/m. SS is meting met geringe zijwaartse doordringing. LN is meting met grote zijwaartse ldoordringing.

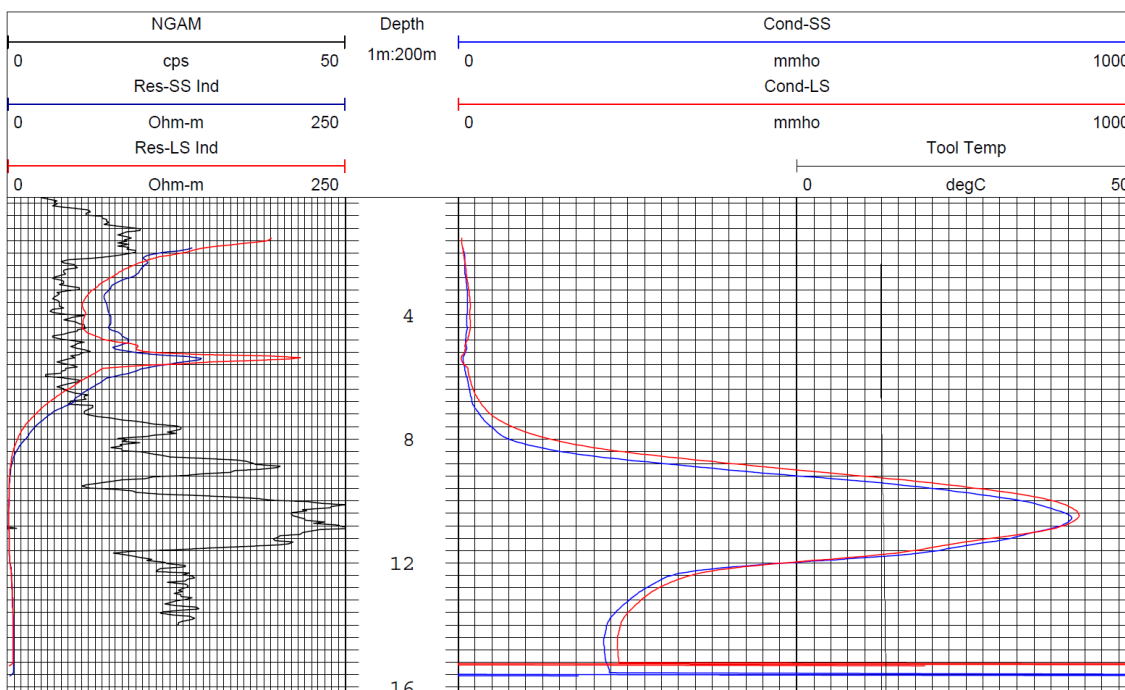


Figure 69. Geofysische boorgatmeting in waarnemingsput C5 in de Pettemer Duinen ten zuidwesten van het Zwanewater.

Bijlage 9 Notitie randvoorwaarden zoutgehaltes Leipolder

Hoe zout moeten de Putten en de Leypolder zijn?

De huidige natuurwaarden (kort)

In augustus 2014 ontving de directie van Natuurmonumenten een schrijven van C. den Hartog, emeritus hoogleraar Aquatische Oecologie aan de Radbouduniversiteit te Nijmegen. Den Hartog doet al 60 jaar onderzoek naar de natuurwaarden van brak en zilt water in Nederland. Hij constateert het volgende:

“Ik doe al 2 jaar onderzoek in 'De Vereenigde Pettemer en Hargerpolder' naar de waterplanten-begroeiing aldaar. Het is hiervoor een buitengewoon belangrijk gebied, omdat er diverse uiterst zeldzame soorten voorkomen, die zich er al 60 jaar hebben weten te handhaven. Mijn bezoek op 3 Augustus was niet geheel een teleurstelling, want de sloot langs de linkerzijde van de weg van de parkeerplaats naar de molen bleek veel interessanter dan oorspronkelijk gedacht, met in feite een fraaie begroeiing van de nieuwe Potamogeton-soort en Ruppia cirrhosa. Op de planten kolonies van het mosdiertje Electa crustulenta en in de bodem levende brakwaterkoksels (Ceratoderma glaucum). Eerste vondst in het reservaat sinds 1970. Duidelijk een sloot om zuinig op te zijn. De sloot aan de rechterzijde van de weg had meer zoetwater- soorten, en grote scholen rietvoorns, die ik er niet eerder had gezien. Mijn conclusie is dat de Vereenigde Pettemer en Hargerpolder momenteel misschien het best bewaarde brakwatergebied in ons land is.”

“Een blik in de 'Nieuwe Atlas voor de Nederlandse Flora' (2011) toont wel heel duidelijk, dat de achteruitgang van de brakwater-soorten, zoals Ruppia maritima en R. cirrhosa wel heel snel is gegaan, en ik vrees dat de achteruitgang nog lang niet gestopt is. Er zijn in feite nog maar heel weinig vindplaatsen over in vergelijking met de jaren 50 van de vorige eeuw. Ik herinnerde me, dat ik -- heel lang geleden -- Ruppia had gevonden bij de 'Pettemermeertjes', nu het Vogelreservaat 'De Putten' geheten, en op 2 augustus 2012 ging ik daar maar eens kijken. Tot mijn verbazing bleek het gebied totaal ongeschonden. Ik vond de sloot terug, die ik in augustus 1951 had onderzocht, en er bleek in principe niets veranderd te zijn in 60 jaar. Alle in 1951 gevonden soorten bleken er nog voor te komen, ook de nu zeer zeldzame Chara canescens”

Bovenstaande lijkt een extra stimulans om de brakke tot zoute omstandigheden die daar nu voorkomen te behouden. Hierna zullen we aan de hand van literatuur- en andere gegevens nagaan welke chloridegehalten nu in het onderzoeksgebied voorkomen.

Normen voor zoute wateren

In de rapportage “Stilstaan bij waterkwaliteit”, die door de provincie Noord Holland in 1999 is geproduceerd worden de volgende waarden voor brakke en zoute oppervlaktewateren genoemd:

	Chloride	EGV	NO3	NH4	PO4
	mg/l	µS/cm	mg N/l	mg N/l	mg P/l
Verzoetende polderwateren: Hoog	<150	<950	<0,15	<0,2	<0,15
Midden	<200	<1200	<0,2	<0,2	<0,3
Laag	<300	<1400	<0,2	<0,2	<0,35
licht brakke polderwateren: Hoog	>1000	>3200	<0,25	<0,35	<0,9
Midden	>750	>2500	<0,25	<0,35	<0,9
Laag	>600	>2300	<0,25	<0,35	<0,9
brakke polderwateren: Hoog	>2000	>6000	<0,7	<1,5	<0,9
Midden	>1750	>5250	<0,7	<1,5	<0,9
Laag	>1500	>4500	<0,7	<1,5	<0,9

zilte polderwateren:	Hoog	>7500	>20.000	<0,7	<1,5	<0,9
	Midden	>5000	>13.500	<0,7	<1,5	<0,9
	Laag	>3000	>8500	<0,7	<1,5	<0,9

In datzelfde rapport worden de Leypolder en delen van de Harger en Pettemerpolder als enige plek op het vasteland van Noord Holland gerekend tot de zilte polderwateren. Dat zou dus betekenen dat het chloridegehalte aldaar 5000 mg/l en meer moet bedragen.

Ecologische interpretatie van voorkomende soorten

Spiraalruppia en Wilde selderij zijn twee plantensoorten die indicatief zijn voor zoute wateren. Beide komen in ons onderzoekgebied voor. In de Nederlandse oecologische flora worden beide soorten behandeld.

Voor Spiraalruppia worden de volgende ecologische omstandigheden genoemd: “Zij groeit in brak of zilt water en ook in wateren waar het gemiddelde zoutgehalte hoger is dan dat van zeewater. 's Zomers kan de zoutconcentratie van sommige wateren met Spiraalruppia zelfs meer dan het dubbele bedragen van die van zeewater!”

Verdere ecologische informatie is te vinden bij de beschrijving van het geslacht Ruppia: “Ruppia's zijn typische bewoners van brakke tot zilte wateren, vooral zulke waarin het zoutgehalte in de loop van het jaar vrij sterk schommelt. In Nederland zijn ze beperkt tot afgesloten wateren die niet meer in rechtstreekse verbinding met zeewater staan. Hier wordt het water in het winterhalfjaar door regenwater verdund, zodat het zoutgehalte dan naar verhouding laag is. 's Zomers overheerst de verdamping, zodat dan de hoogste zoutgehalten voorkomen.”

Van Wilde selderij wordt gezegd dat deze voorkomt op zonnige plaatsen op vochtige tot vaak natte, voedselrijke, enigszins zilte tot brakke klei- of zandgrond (het meest op zware gronden).

Een andere zeer karakteristieke soort is het zogenaamde palingbrood (*Einhornia crustulenta*). Voor de beschrijving van de ecologische voorwaarden waaronder dit brood gedijt, gebruiken we de info die emeritus hoogleraar Cees den Hartog ons onlangs toezond:

Metingen ter plekke

Broodbakker en Coosen (1980)

In 1980 verscheen het rapport “Onderzoek naar de macrofauna van de Vereenigde Harger en pettemerpolder, een brakwatergebied in Noord Holland” van Broodbakker en Coosen. Naast een beschrijving van het voorkomen van allerlei aan brak / zout water gebonden soorten hebben zij ook een aantal monsters van het water ter plaatse genomen en geanalyseerd.

De monsterpunten 1 t/m 4 liggen in de Putten / Leypolder. Over de periode april 1979 t/m maart 1980 zijn de volgende waarden gemeten:

	Monsterpunt 3 Camperduin	Monsterpunt 1 De Putten	Monsterpunt 4 Noord Putten	Monsterpunt 2 Zuid voor gemaal Leyhoek
<i>Chloride (mg/l)</i>				
gemiddeld	7190	10.130	4110	8730
min - max	5910 - 8640	4550 - 15.080	2650 - 5710	5930 - 11.910
<i>EGV (µS/cm)</i>				
gemiddeld	12.800	19.200	9100	15.200
min - max	8200 - 18.500	6900 - 31.200	4500 - 13.000	4770 - 23.500

Stuyfzand (1989)

In de beschrijving van de geohydrologie van de duinen en aangrenzende polders tussen Egmond aan Zee en Petten staat Stuyfzand ook kort stil bij de polders achter de Hondsbossche: Hij classificeert het bovenste grondwater als brak en het oppervlaktewater meer specifiek als van het type B₃NaCl. In een beschrijving van deze wateren zegt hij: “In de richting van de Hondsbossche Zeewering neemt het Cl-gehalte i.h.a. toe. De eutrofiëring is hoog blijkens het PO₄gehalte en te wijten aan afgifte door oxiderende organische stof in kleirijk sediment, waardoor de kwel plaatsvindt.” De aanduiding B in de beschrijving van het type, duidt op brak water met een chloridegehalte van ergens tussen de 300 en 10.000 mg/l.

Stuyfzand geeft de volgende metingen van gemiddelde Cl-gehalten in de Putten en Leypolder over de periode 1977 t/m 1986:

Putten: 7344 mg/l (gemiddelde waarde over meerdere metingen)

Gemaal Leypolder: 3716 mg/l (idem als hierboven)

In het voorjaar van 1986 worden in de Leypolder Cl-gehalten gemeten die variëren van 969 tot 7497 mg/l, met over 9 meetpunten een gemiddelde van 4246 mg/l.

Mulder en Spoelstra (1995)

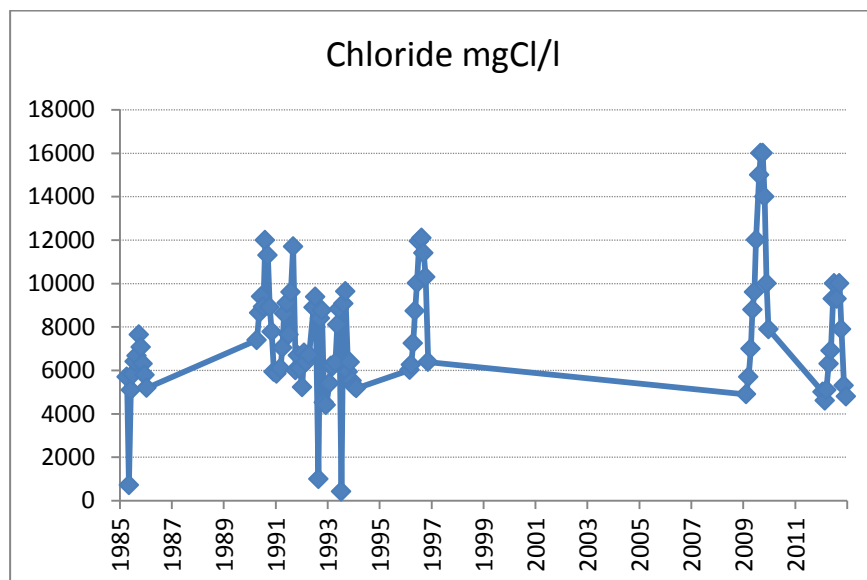
Mulder en Spoelstra hebben voor augustus 1993 een kaart geproduceerd met daarop een geohydrologische systeembeschrijving van ons onderzoeksgebied. De hele Leypolder rekenen ze tot het zogenaamde Hondsbossche systeem.

In de Leypolder geven zij voor die periode EGV's aan van meer dan 15.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en chloridegehalten van meer dan 10.000 mg/l.

Interne memo memo Gert van Ee

In augustus 2014 verscheen een interne memo HHNK vanwege het eventueel baggeren van De Putten. In deze memo wordt ook aandacht besteed aan de waterkwaliteit / het zoutgehalte van het water van de Putten:

“Het chloridegehalte in de Putten was rond 1980 ongeveer 7000 mgCl/l [data provincie Noord-Holland en HHNK]. Door de jaren heen schommelt dit rond de 7500 mgCl/l (figuur 1)



Metingen 2009 en 2012

Door HHNK is voor drie meetpunten in, of in de buurt van ons onderzoeksgebied in de jaren 2009 en 2012 maandelijks een monsternamen geplaatst en zijn chemische analyses verricht:

	Meetpunt 401001 Putten	Meetpunt BDV 022 Sloot N Kamperkade	Meetpunt 20501 Leyhoek
<i>Chloride (mg/l)</i>			
2009 gemiddeld	10.242	4.664	4482
2009 min - max	4900 - 16.000	2300 - 6200	2300 - 6200
2012 gemiddeld	7700	3.933	3917
2012 min - max	4800 - 10.000	2500 - 5300	2500 - 5300
<i>EGV (μS/cm)</i>			
2009 gemiddeld	27.526	12.542	8297
2009 min - max	14.440 - 40.140	7520 - 16.630	3060 - 11.720
2012 gemiddeld	19.219	11.208	5063
2012 min - max	14.010 - 26.700	7800 - 14.410	2020 - 9670

Samenvatting

Op grond van bovenstaande concluderen we dat voor het achter de Hondbossche Zeewering gelegen gebied, gerekend vanaf de Putten noordwaarts, chloridegehaltes voorkomen van minimaal enige duizenden tot maximaal ruim 10.000 mg/l. Deze gehalten variëren in de tijd. De hoogste gehalten komen voor in de zomer in droge perioden wanneer onder invloed van de verdamping een indikking van het water plaats vindt. In natte perioden, zeker in het winterhalfjaar, kan het chloridegehalte sterk dalen.

De zeer karakteristieke natuurwaarden van dit gebied hangen direct samen met het brakke tot zoute karakter van het aanwezige water. Voor het voortbestaan van deze waarden is de zeewater invloed op dit gebied essentieel.

Een richtlijn bij het ontwerpen van een puttensysteem dat dient om gewenste brak/zoute omstandigheden te realiseren, luidt dan als volgt: In het winterhalfjaar en vroege voorjaar wordt een chloridegehalte van ca. 5000 mg/l gerealiseerd. In het zomerhalfjaar kan dit gehalte door indroging / verdamping flink toenemen, tot soms 10.000 mg/l aan toe. Een maximumwaarde voor de Putten van 7500mg/l is voor de natuurdoeltypen voldoende.

Bij dit indrogen in de zomermaanden is van belang dat de waterstand in de Putten niet te ver wegzakt. Dit dient nader te worden onderzocht, maar mijn gevoel zegt dat de waterstand in het zomerhalfjaar met niet meer dan 20 cm mag dalen ten opzicht van de winterstand.

Hoe een en ander voor de rest van de Leypolder uitwerkt dient nader te worden onderzocht.

Literatuur

Broodbakker, N.W. en J. Coosen, 1980. Onderzoek naar de macrofauna van de “Vereenigde Harger- en Pettemerpolder” (een brakwatergebied in Noord-Holland). Verslag van Instituut voor taxonomische zoölogie, Universiteit van Amsterdam, 45 pp plus bijlagen.

Mulder, J.R. en J. Spoelstra, 1995. Een geohydrologische systeembeschrijving van het noordelijk deel van het herinrichtingsgebied bergen-Schoorl. DLO-Staringcentrum Wageningen. 127 pp plus kaartbijlagen.

Provincie Noord Holland, 1999. Stilstaan bij waterkwaliteit. Een achtergronddocument over het stelsel ecologische normdoelstellingen behorende bij het tweede waterhuishoudingsplan provincie Noord-Holland, 160 pp.

Stuyfzand, P.J., 1989. Hydrochemie en hydrologie van duinen en aangrenzende polders tussen Egmond aan Zee en Petten. KIWA, Nieuwegein. 136 pp plus bijlagen

Weeda, E.J. en div. Westra's, 1991. Nederlandse oecologische flora. Wilde planten en hun relaties, deel 4. 317 pp.

Wessels, Yolanda, 1998. Brak bekeken. Onderzoek naar optimalisatiemogelijkheden voor brakke watertypen. Provincie Noord-Holland. Stageverslag Milieukunde, universiteit Utrecht. 65 pp plus bijlagen.