

Veldonderzoek naar het dichten van wellen

Perry de Louw
Pieter Doornenbal
Dimmie Hendriks

1201949-000

Titel

Veldonderzoek naar het dichten van wellen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Hoogheemraadschap van Rijnland	1201949-000	1201949-000-BGS-0001	52

Trefwoorden

Wellen, dichten van wellen, verzilting, diepe polders, zoute kwel, grondwater

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de resultaten van een veldonderzoek naar de haalbaarheid en de effecten van het dichten van natuurlijke wellen. Wellen zijn gaten in de deklaag die min of meer een open verbinding vormen tussen het eerste watervoerende pakket en het oppervlak en waardoorheen met grote snelheid grondwater vanuit het eerste watervoerende pakket naar de oppervlakte stroomt. Ze dragen voor meer dan de helft bij aan de verzilting van diepe polders.

Het veldonderzoek is uitgevoerd voor drie wellen in verschillende geohydrologische situaties waarvan twee wellen in de Haarlemmermeerpolder en één wel in Polder de Noordplas. Rondom de wellen is een uitgebreid en gedetailleerd meetnet opgezet waar onder andere (grond)waterstanden, (grond)waterkwaliteit en bodemtemperatuur zijn gemeten. Er zijn twee verschillende technieken toegepast voor het dichten van de wellen: (1) injectie van uithardende gel en (2) biosealing. Het monitoringplan voorzag in een jaar meten vóór dichten en een half jaar na dichten van de wel.

Het dichten van wellen laat effecten zien op de afvoer van de wel, het zoutgehalte van de wel, de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket en op de bodemtemperatuur. Deze effecten worden in het rapport besproken.

De praktische haalbaarheid van het dichten van wellen lijkt klein. De uitstroombaten zijn vaak niet zichtbaar (onder water of in uitgezakte oevers) dat het dichten erg bemoeilijkt. Wellen liggen vaak in de sloten van agrarische percelen en zijn daardoor vaak lastig te bereiken. De geohydrologische situatie is ook van belang voor de kansrijkheid van het dichten van wellen. Het ontbreken van een afsluitende slechtdoorlatende laag waarin wellen zich kunnen ontwikkelen als smalle pijpen, maakt het dichten vrijwel onmogelijk met de huidige dichtingsmethoden.

Er is aangetoond dat met de dichtingsmethode biosealing de afvoer van wellen kan worden gereduceerd. De periode waarin de voedingstoffen moeten worden geïnjecteerd en waarna er verstopping optreedt, is relatief lang (minimaal 2 weken) en daardoor is de methode vooralsnog kostbaar. De uitvoering dient daarom nog te worden verbeterd om het praktischer en kosten-effectiever in het veld te kunnen toepassen. Injectie van uithardende gel is een beproefde en eenvoudige dichtingstechniek die direct resultaat laat zien.

Echter, voor beide methoden en in alle geohydrologische situaties geldt dat het ontstaan van nieuwe uitstroombaten bij het dichten van natuurlijke wellen een groot probleem is. In tegenstelling tot wellen die op een kunstmatige manier ontstaan door bijv. het trekken van peilfilters of damwanden zijn natuurlijke wellen grillig en ontwikkelen ze zich in de scheuren die na opbarsting van de deklaag ontstaan. De onstabiele zone met scheuren die zijn ontstaan door opbarsten kan een gebied beslaan van enkele tientallen tot een paar honderd vierkante meters. De kans op het ontstaan van nieuwe uitstroombaten in bestaande scheuren in deze onstabiele zone is erg groot zoals de veldmetingen hebben aangetoond.

Het ontstaan van nieuwe uitstroombaten en wellen weegt zwaar bij de overweging om wellen te gaan dichten als maatregel om verzilting van het oppervlaktewater door kwel tegen te gaan.

Titel

Veldonderzoek naar het dichten van wellen

Opdrachtgever

Hoogheemraadschap van Rijnland

Project




1201949-000

Kenmerk

1201949-000-BGS-0001

Pagina's

52

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	april 2012	Perry de Louw		Joost Delsman		Bennie Minnema	
		Pieter Doornenbal					
		Dimmie Hendriks					

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Probleemstelling	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Opzet onderzoek	1
2	Opzet veldonderzoek	3
2.1	Het fenomeen wellen	3
2.2	Beschrijving van de drie wellocaties	8
2.3	Meetnet rondom de wellen	9
2.4	Het dichten van de wellen	13
3	Resultaten	14
3.1	Inleiding	14
3.2	Het dichten van de wellen: de praktische implicaties en waarnemingen	14
3.3	Stijghoogte	16
3.4	Wellen afvoer	19
3.5	Zoutgehalte wellen en oppervlaktewater	22
3.6	Zoutgehalte en kwaliteit grond- en oppervlaktewater	23
3.7	Laterale temperatuur variatie locatie B en C	25
3.8	Temperatuur diepte profielen	28
4	Conclusies en aanbevelingen	31
5	Referenties	34

Bijlagen

2.1	Meetnetinrichting verschillende locaties
2.2	Temperatuurmetingen met glasvezelkabels
3.1	Vergelijking handmeting met diver-metingen
3.2	Afstand-stijghoogte profielen o.b.v. handmetingen
3.3	Chemische samenstelling wel-, grond- en oppervlaktewater
3.4	Tijdreeksen van bodemtemperatuur
3.5	Tijdreeksen van bodemtemperatuur tijdens dichten
3.6	Temperatuur-envelopes voor en na dichten

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

Uit verschillende onderzoeken (De Louw e.a. 2004, Oude Essink e.a., 2008) blijkt dat kwel voor meer dan 80 % bijdraagt aan de verzilting van het oppervlaktewater in diepe polders. Doordat het kwelwater hoge concentraties aan nutriënten (N, P) bevat, draagt het ook bij aan de eutrofiëring van het oppervlaktewater (Griffioen e.a., 2002). Het polderwater wordt op de boezem geloosd waardoor dit water minder geschikt is als irrigatiewater voor landbouwdoeleinden of als inlaatwater voor natuurgebieden.

Modelstudies (Oude Essink e.a., 2010) tonen aan dat verzilting door kwel in de toekomst gaat toenemen door: (1) autonome verzilting, (2) zeespiegelstijging, (3) klimaatverandering. Hoogheemraadschap van Rijnland heeft in 2004 een uitgebreide studie afgerond naar het effect van waterbeheer op de chloridebelasting van het oppervlaktewater in Polder de Noordplas (De Louw e.a., 2004). Uit deze studie kwam naar voren dat wellen voor meer dan 60% bijdragen aan de verzilting van het oppervlaktewater (De Louw e.a., 2011). Maatregelen om de verzilting te reduceren hebben dan ook het meeste effect als de bijdrage van wellen wordt aangepakt. In 2007 heeft het Hoogheemraadschap een studie laten uitvoeren naar kwelreductietechnieken (De Louw e.a., 2007) waarbij de effectiviteit en kosten van verschillende verziltingsmaatregelen (o.a. peilopzet, ontzilting, gescheiden afvoer via pijpleiding, wellen dichten, monobronnering) zijn behandeld. Uit deze studie kwam naar voren dat het dichten van wellen het meest kosten-effectief is om de verzilting van het oppervlaktewater te verminderen. Echter, er is nog weinig praktische ervaring met het dichten van natuurlijke wellen. Daardoor is onbekend wat de technische haalbaarheid is, de effectiviteit in verschillende geohydrologische situaties en neveneffecten zoals het ontstaan van nieuwe wellen.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is:

Het bepalen van de haalbaarheid en de effecten van het dichten van natuurlijke wellen door middel van een veldonderzoek.

Het veldonderzoek dient antwoord te geven op de volgende onderzoeksvragen:

- 1 Wat zijn (meetbare) effecten van het dichten van wellen?
- 2 Wat is de relatie tussen de geohydrologische opbouw (en type wel) en het dichten van wellen?
- 3 Wat is de praktische haalbaarheid van het dichten van wellen?
- 4 Zijn de onderzochte dichtingmethoden geschikt voor het dichten van natuurlijke wellen?

1.3 Opzet onderzoek

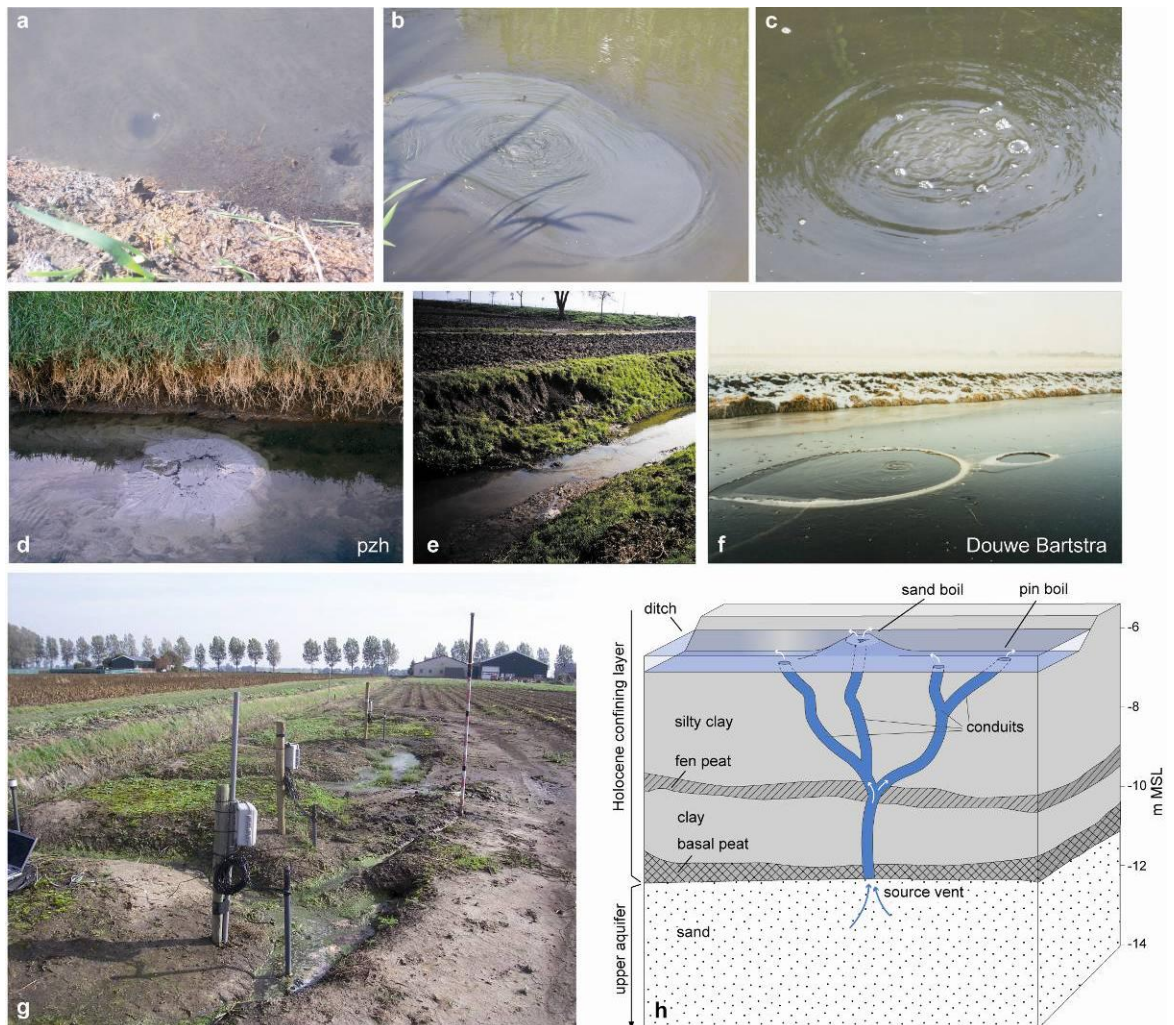
Het veldonderzoek is uitgevoerd voor drie wellen in verschillende geohydrologische situaties waarvan twee wellen in de Haarlemmermeerpolder en één wel in Polder de Noordplas. Rondom de wellen is een uitgebreid en gedetailleerd meetnet opgezet waar onder andere (grond)waterstanden, (grond)waterkwaliteit en bodemtemperatuur zijn gemeten. Er zijn twee verschillende technieken toegepast voor het dichten van de wellen: (1) injectie van uithardende gel en (2) biosealing. Het monitoringplan voorzag in een jaar meten vóór dichten en een half jaar na dichten van de wel. In dit rapport worden de opzet en resultaten van het

veldonderzoek besproken en wordt een antwoord gegeven op de genoemde onderzoeksvragen.

2 Opzet veldonderzoek

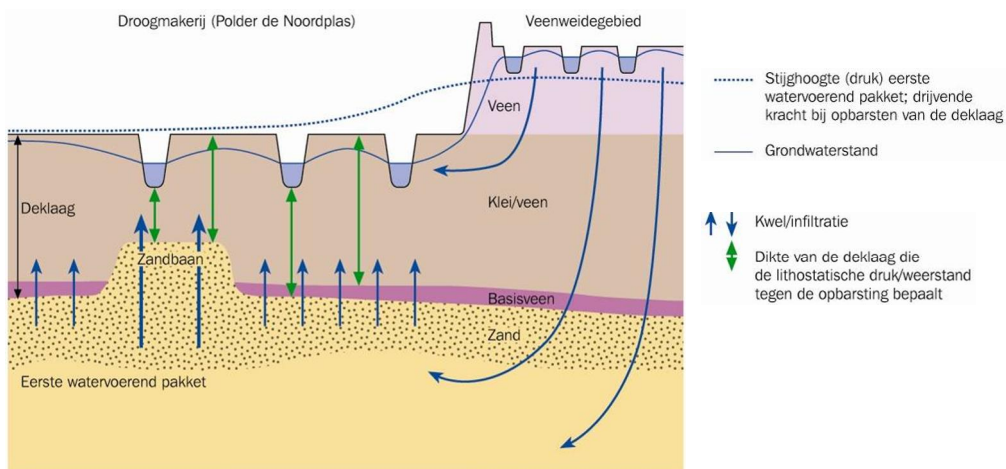
2.1 Het fenomeen wellen

Wellen in diepe polders zijn gaten in de deklaag die min of meer open verbindingen vormen tussen het eerste watervoerende pakket en het oppervlak (figuur 2.1h). Door deze gaten stroomt met grote snelheid grondwater vanuit het eerste watervoerende pakket naar de oppervlakte. Daarbij kunnen ze ook zand vanuit het eerste watervoerende pakket meenemen, de zogenaamde zandwellen (figuur 2.1b, 2.1d). De hoge opwaartse snelheid kan leiden tot instabiliteit van de bodem waardoor oevers kunnen inzakken (figuur 2.1e) of landbouwmachines kunnen wegzakken (drijfzandachtige omstandigheden). Vaak treedt met het water ook methaangas uit via de wellen (figuur 2.1c). Dit gas is afkomstig uit het eerste watervoerende pakket waar het in opgeloste vorm of als gasbellen in het grondwater voorkomt. Door de snelle opwaartse stroming van dieper grondwater, heeft het uittrekkende welwater een relatief constante temperatuur van ongeveer 11 C° (figuur 2.1f). Wellen hebben vaak meerdere uitstroomopeningen die zich in de deklaag hebben vertakt vanuit 1 bron (figuur 2.1h).



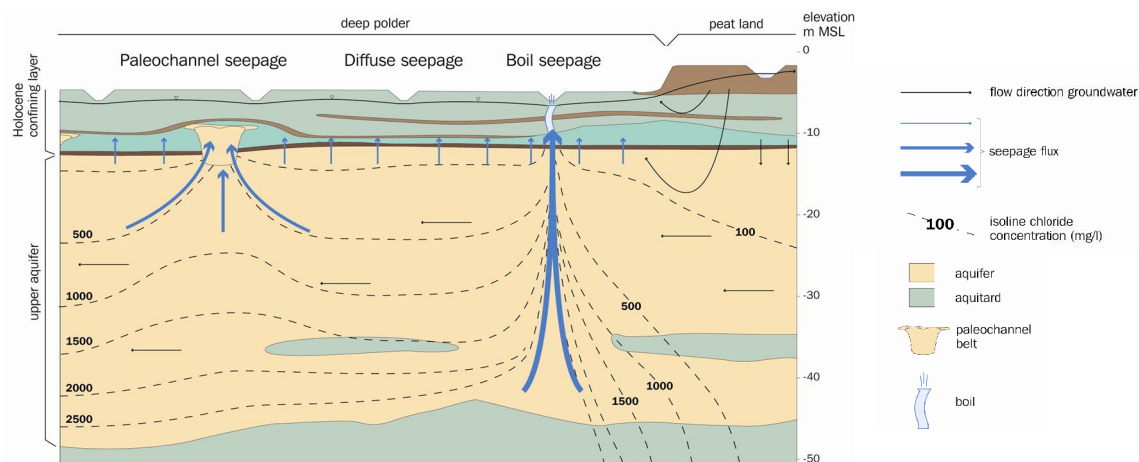
Figuur 2.1 Wellen in diepe polders: a) uitstroomopening, b) zandwel (sand boil), c) ontsnappen van methaangas via wel, d) zandvulkaan, e) ingestorte oever door wel, f) gat in ijs veroorzaakt door constante stroming van welwater van 11 C°, g) wel op land, h) schematisch diagram van wel met verschillende uitstroomopeningen (overgenomen uit: De Louw e.a., 2010).

De meeste wellen in de Nederlandse diepe polders komen voor in het oppervlaktewater, vooral op plaatsen met zandbanen in de ondergrond en aan de rand van de polder met de grootste kweldruk. Op deze locaties is het opbarstingsrisico van de deklaag het grootst en kunnen gemakkelijk wellen ontstaan (zie figuur 2.2). De kartering van de wellen in Polder de Noordplas bevestigt dit beeld (zie figuur 2.4). De verhouding tussen de lithostatische druk en de kweldruk geeft de kans op opbarsting van de deklaag weer. Het opbarstingsrisico is groot wanneer de verhouding kleiner is dan 1,1. Het gewicht van de deklaag bepaalt de lithostatische druk (uitgedrukt in bar per m²). De kweldruk is het verschil tussen de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket en de hoogte van de onderkant van de deklaag. Tevens uitgedrukt in bar per m². Echter, naast het opbarstingsrisico bepaalt ook de sterkte en stijfheid van het bodemmateriaal of de deklaag uiteindelijk zal opbarsten. Bij het opbarsten van de deklaag ontstaan er scheuren, waardoorheen zich wellen kunnen ontwikkelen.

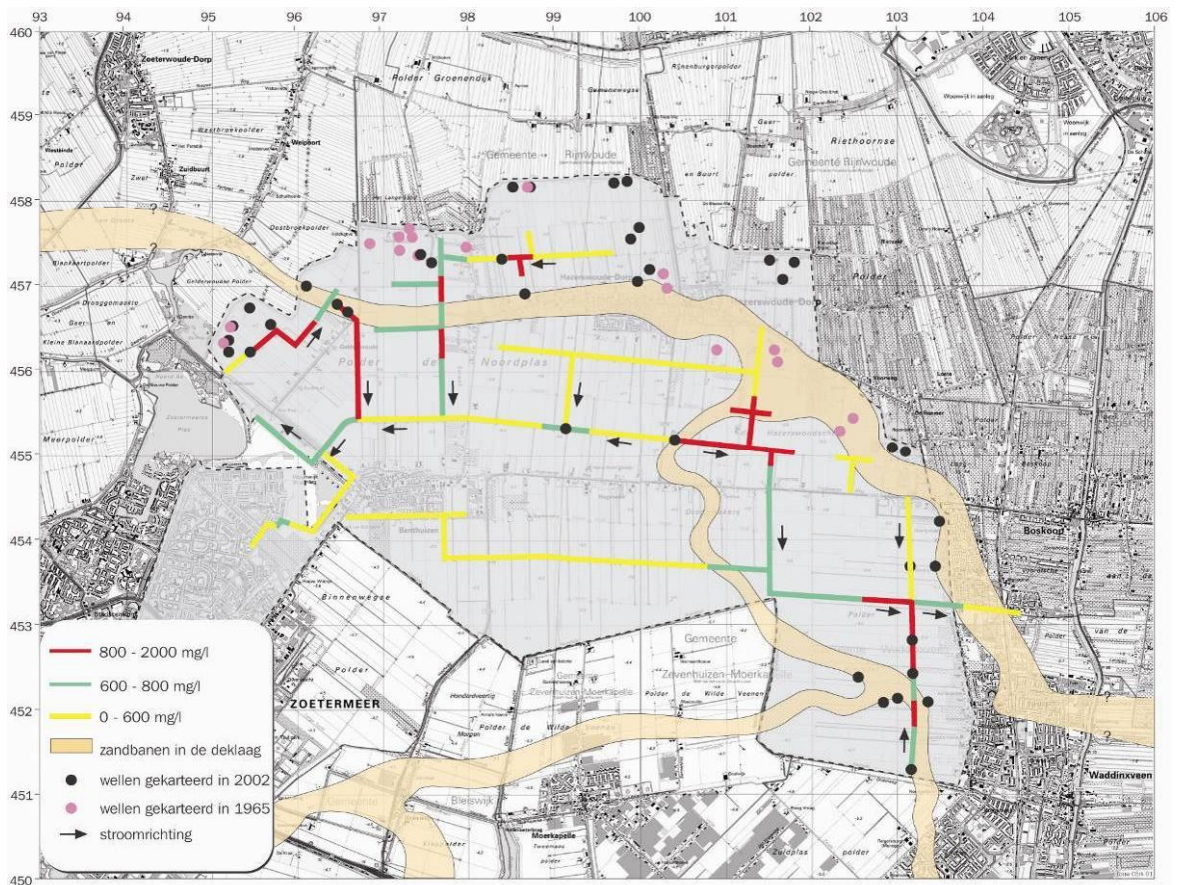


Figuur 2.2 Kwel en kans op opbarsting van de deklaag (verhouding tussen de lithostatische druk van de deklaag en de stijghoogtedruk) in een diepe polder (overgenomen uit: De Louw, 2007).

Wellen zijn vaak zout. Door de hoge geconcentreerde kwelfluxen trekken ze dieper en daardoor zouter grondwater aan (het 'upconing-mechanisme') in tegenstelling tot diffuse kwel met veel lagere stromingssnelheden. Op basis van het onderzoek in Polder de Noordplas onderscheiden we drie typen kwel die verschillen in flux en zoutgehalte: (1) diffuse kwel, (2) zandbaan kwel en (3) wellen (Figuur 2.3).

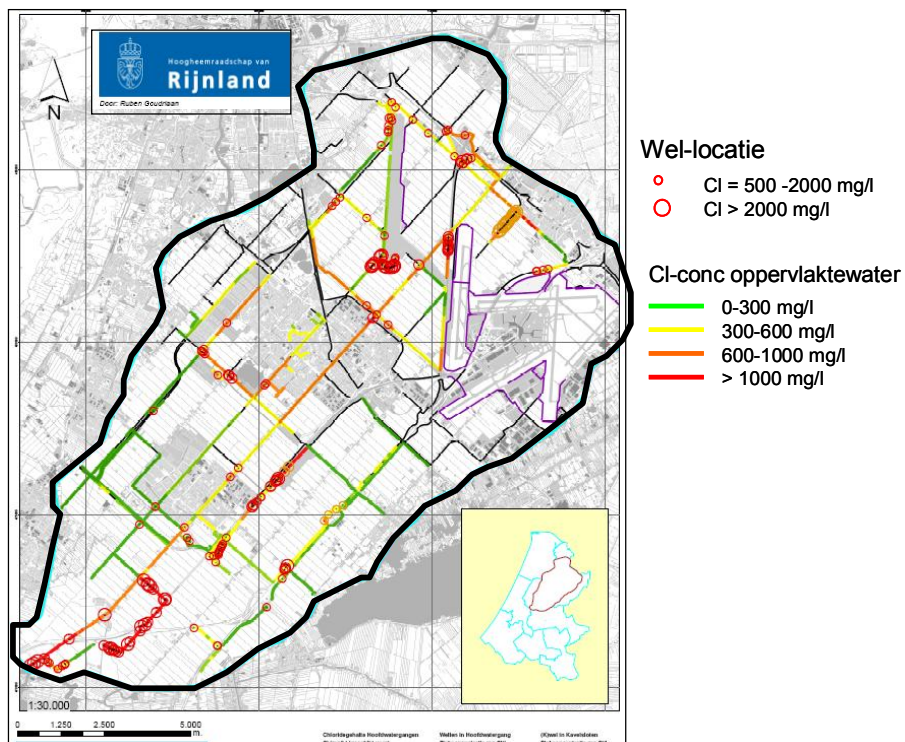


Figuur 2.3 Drie typen kwel die verschillen in flux en zoutgehalte. Hoe groter de flux, hoe dieper het grondwater dat wordt aangetrokken en hoe zouter (overgenomen uit: De Louw e.a., 2010).

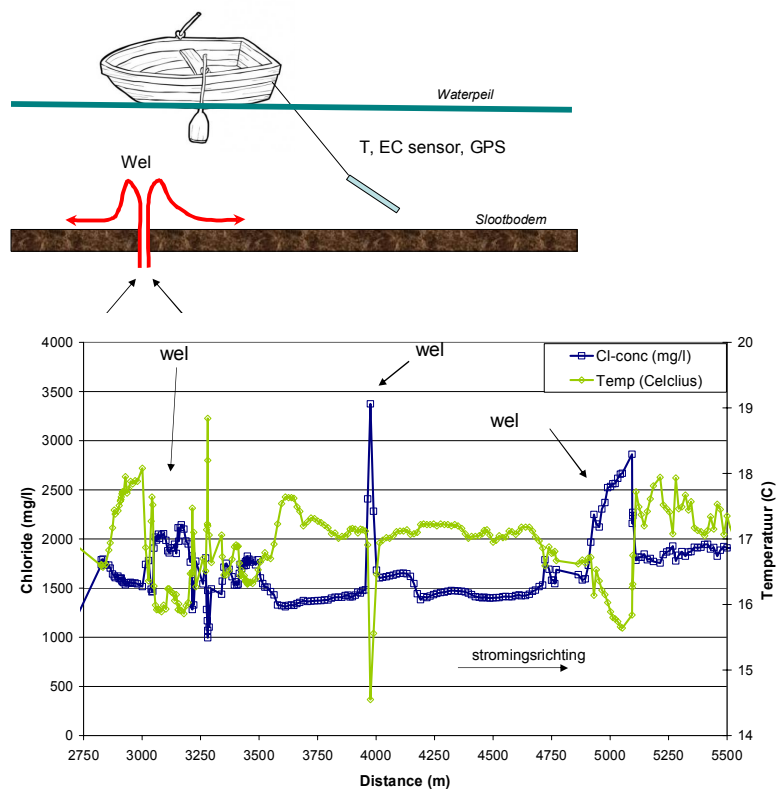


Figuur 2.4 De chloride-concentratie van het oppervlaktewater in 1998 (mg/l) en de locaties van wellen, gekarteerd in 1967 en 2002 (uit: De Iouw, 2007)

In Figuur 2.4 is duidelijk te zien er een grote variatie bestaat in zoutgehalte van het oppervlaktewater. Oppervlaktewater met een hoog zoutgehalte wordt voornamelijk aangetroffen in waterlopen in de omgeving van grote wellen en zandbanen in de ondergrond. Dit zelfde patroon is te zien in de Haarlemmermeer (zie figuur 2.5), hoge zoutconcentratie in watergangen met wellen en lage concentraties in watergangen zonder wellen. In de Haarlemmermeer zijn de wellen in de grote, bevaarbare watergangen gekarteerd door middel van een temperatuur en EC-routing. De routing is uitgevoerd met behulp van een CTD-diver die achter een bootje hing. De wel kon worden gelokaliseerd door een gemeten combinatie van anomalisch lage temperatuur en hoge geleidbaarheid (zie figuur 2.6) (zie ook Goudriaan e.a., 2011).



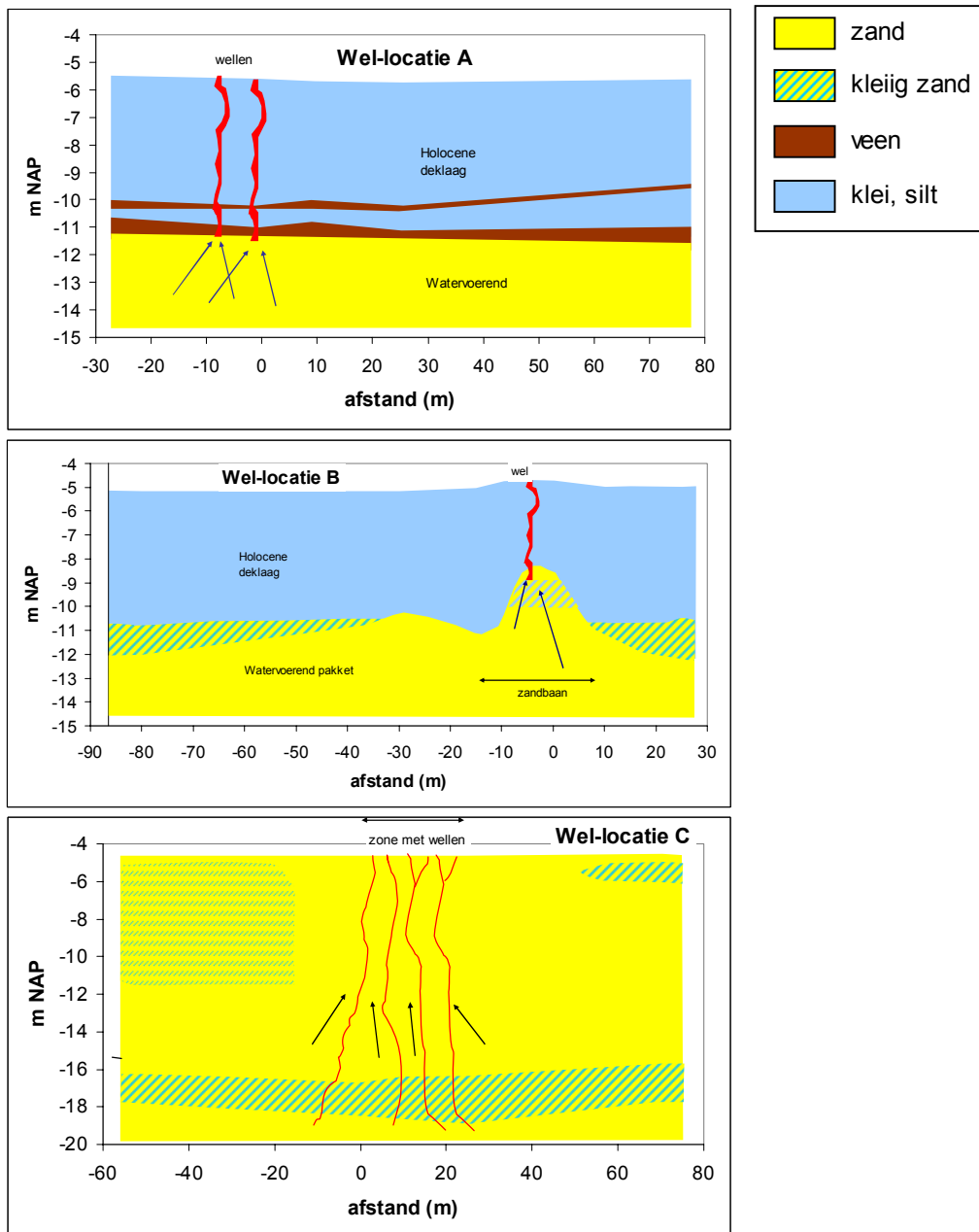
Figuur 2.5 Gekarteerde wellen in de Haarlemmermeer (uit Goudriaan e.a., 2011)



Figuur 2.6 Temperatuur en EC routing voor het lokaliseren van (grote) wellen in bevaarbare waterlopen (boven). Anomalisch lage temperaturen en hoog zoutgehalte geven de locatie van de wel aan (onder).

2.2 Beschrijving van de drie wellocaties

Op basis van de geohydrologische opbouw van de ondergrond zijn drie locaties geselecteerd voor het veldonderzoek naar het dichten van wellen (figuur 2.7). Hieronder worden ze kort besproken.



Figuur 2.7 De geohydrologische opbouw van de drie wel-locaties

Wel-locatie A: volledige deklaag

Wel-locatie A ligt in de Haarlemmermeer polder nabij Abbenes (xy-coördinaten: 101664,470677). De geohydrologische opbouw kenmerkt zich door een slechtdoorlatende 6 m dikke Holocene deklaag van klei en veen dat op het zandige eerste watervoerende pakket rust (figuur 2.7). Aan de onderkant van deklaag ligt een gemineraliseerde, zeer compacte veenlaag (basisveen). De stijghoogte in het watervoerende pakket is ongeveer 2 meter boven maaiveld. De uitstroomopeningen van de wel(len) liggen op het land op ongeveer 10 meter afstand van de sloot. Er zijn een viertal grote uitstroomopeningen zichtbaar. Of deze met elkaar in verbinding staan of allen afzonderlijke wellen zijn, is niet bekend. Het maaiveld ligt op ongeveer -5.52 m NAP. De wel-locatie is duidelijk zichtbaar op de satelliet beelden die via Google Earth te bekijken zijn.

Wel-locatie B: zandbaan in de deklaag

Wel-locatie B ligt in Polder de Noordplas in de plaats Gelderswoude (xy-coördinaten: 95674,456626). De Holocene deklaag bestaande uit klei en veen is hier ongeveer 7 meter dik maar ter hoogte van de wel wordt een kleine zandbaan aangetroffen. Deze zandbaan is ook zichtbaar in het veld (ligt hoger) en zijn top ligt op ongeveer 3 tot 4 meter onder maaiveld (figuur 2.7). Het maaiveld ligt op ongeveer -4.70 m NAP. De wel(len) heeft zijn uitstroomopeningen in de sloot en op de slootkant en zijn niet zichtbaar. De slootkant is als gevolg van de wel op verschillende plekken ingezakt.

Wel-locatie C: geen deklaag

Wel-locatie C ligt in de Haarlemmermeerpolder in Nieuw Vennep (xy-coördinaten: 106431,475868). Hier is geen deklaag aanwezig, de ondergrond bestaat uit zand met af en toe een kleilensje. De locatie ligt op een oude getijdegeul die de deklaag heeft weggeërodeerd en zand in plaats daarvan heeft afgezet. Ter plaatse van deze oergetijdegeul is de invloed van de zee veel langer en prominenter aanwezig geweest waardoor het grondwater veel zouter is dan buiten de getijdegeul. Door de afwezigheid van een deklaag met cohesieve sedimenten hebben de wellen een ander karakter. Ze vormen geen discrete, permanente dunne pijpen zoals in de slechtdoorlatende deklaag bij wellocatie A en B. De wellen van deze locatie zijn diffuus over een traject van ongeveer 30-40 meter aanwezig, hun activiteit vertoont een duidelijke relatie met de luchtdruk en ze verplaatsen zich regelmatig. Vooral tijdens een periode van lage luchtdruk blijken er wellen op nieuwe locaties binnen het wellen-traject te ontstaan (waarnemingen van de boer). Het maaiveld ligt op ongeveer -4.60 m NAP.

2.3 Meetnet rondom de wellen

Het meetnet heeft als doel het in beeld brengen van effecten van het dichten van wellen. Daartoe is het van belang om gedurende een voldoende lange periode vóór het dichten van de wellen te meten om de zogenaamde nul-situatie in beeld te brengen. Na het dichten dient de meting voldoende lang te worden doorgezet omdat effecten zich met vertraging kunnen uiten. Het meetnet is voor alle wellen-locaties op een ongeveer gelijke wijze opgezet. Hieronder wordt de opzet voor 1 locatie besproken en eventuele afwijkingen van de andere locaties zullen worden uitgelicht. In Bijlage 2.1 staat de meetnet-inrichting weergegeven voor de drie verschillende locaties.

In een raai, op verschillende afstanden tot de wel worden verschillende aspecten van het grond- en oppervlaktewatersysteem gemeten die mogelijk beïnvloed worden door de wel. De afstanden zijn: 0m (wel), 10m, 25m en 75m en -25m (zie Bijlage 2.1). Bij locatie B en C zijn er 1 of 2 afstanden toegevoegd (zie Bijlage 2.1). De verschillende aspecten die zijn gemeten worden hieronder kort besproken.



Loc A: overzicht wellen



Loc A: Temp-stok in wel en tussen wel



Loc A: peilbuis en Temp-stok op 25 en 75 m



Loc B: uitgezakte oever, peilbuizen T-stokken



Loc B: Dammetje van peilvak met afvoermeetsgoot



Loc C: afvoer uit peilvak



Loc B : T-stok in wel en op 0.5m afstand

Foto's van het meetnet op de verschillende wellocaties.

Lithologische opbouw

De lithologische opbouw is door middel van sonderingen (25m diep) en handboringen in beeld gebracht en verwerkt tot de geohydrologische opbouw zoals weergegeven in Figuur 2.7. De sonderingen meten een conusweerstand (MPa) waaruit een beeld van de lithologische samenstelling kan worden geëxtraheerd. Tijdens de sonderingen is ook de waterspanning en de geleidbaarheid van de bodem gemeten. Het verloop van de waterspanning met de diepte geeft aan waar voor stroming weerstandsbiedende lagen voorkomen. Dit uit zich in plotselinge veranderingen van de waterspanning. De gemeten geleidbaarheid van de bodem is een resultaat van de geleidbaarheid van het water en de bodemmatrix. Met deze meting zijn we vooral geïnteresseerd in de geleidbaarheid van het water en moeten daarom corrigeren voor de geleidbaarheid van de bodem die wordt uitgedrukt in de zogenaamde formatiefactor.

Stijghoogte

Wellen hebben invloed op de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket. Door de afvoer van grondwater uit het eerste watervoerende pakket verlagen ze lokaal de stijghoogte, vergelijkbaar met een grondwateronttrekking. Het dichten van wellen heeft daardoor effect op de stijghoogte. Om dit te meten zijn er op de verschillende afstanden peilbuizen geplaatst met hun filter tot in het eerste watervoerende pakket, ongeveer 6 tot 8 meter diep (Locatie A en B). Voor locatie C staan de filters op ongeveer 3 meter diepte omdat hier geen deklaag aanwezig is en er nauwelijks stijghoogteverschillen met de diepte zijn. De stijghoogte is voor alle locaties gemeten met behulp van automatische drukopnemers ("divers") met een frequentie van 1 uur. Regelmatig is de stijghoogte ook handmatig gemeten.

Afvoer wel

Voor locatie A treden de wellen uit op het land waardoor het welwater makkelijk is op te vangen en het debiet eenvoudig is te meten met maatbeker en stopwatch. Handmatig is dit regelmatig gedaan voor en na dichten van de wel. Voor locaties B en C komen de wellen uit in de sloot (of zijkant sloot) waardoor ze niet van het slootwater zijn te scheiden. Om toch een beeld te krijgen van het debiet en zoutgehalte van de wellen is voor beide locaties een deel van de sloot met wellen afgedamd. Dit zogenaamde peilvakje is daardoor geïsoleerd van de rest van het slootwater maar ontvangt wel neerslag en grondwater vanaf het aangrenzende perceel. Het slootwater bovenstrooms van het peilvakje wordt via een pijp benedenstrooms afgevoerd. Het debiet van het water dat het peilvakje verlaat, kon op deze manier handmatig worden gemeten.

Er is getracht de afvoer voor de drie locaties ook continu te meten door middel van een afvoermetergoot (type RBC Flume 13.17.02). Door het waterpeil direct stroomopwaarts van het meetgootje te meten kan met behulp van een bekende Q-h relatie de afvoer worden bepaald. Hierbij traden echter 2 problemen op die de nauwkeurigheid van de meting sterk hebben benadeeld: 1) de Q-h relatie die bij de afvoermetergoot werd geleverd week sterk af met de handmetingen, en 2) het waterpeil kon niet met de gewenste nauwkeurigheid (0.1 cm) worden gemeten. Het waterpeil werd gemeten (zowel in het peilvak als beneden en bovenstrooms van het peilvak) met 'CTD-divers' met een nauwkeurigheid van ongeveer 0,5 cm. De continue afvoermetingen zijn daardoor niet bruikbaar.

Zoutgehalte van wel –en oppervlaktewater

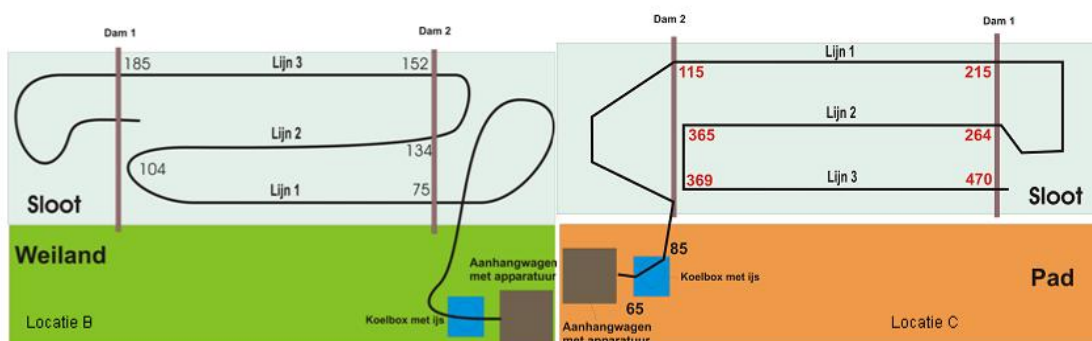
Met behulp van CTD-divers werd de specifieke geleidbaarheid (een maat voor het zoutgehalte) van het welwater of water in het peilvak en het oppervlaktewater stroomopwaarts en stroomafwaarts van de wel met een frequentie van 1 uur gemeten. Voor locatie A was het mogelijk om direct het welwater te meten, voor locaties B en C is het water in het peilvakje gemeten dat naast welwater ook neerslag en drainagewater bevatte.

Temperatuur

De atmosferische temperatuur dringt de bodem in tot een diepte van meer dan 10 meter, zij het gedempt en met een vertraging die toeneemt met de diepte. Opwaartse stroming van grondwater verstoort dit proces waardoor variaties van de atmosferische temperatuur minder diep de bodem indringen. De mate van verstoring zegt daarom iets over de opwaartse stroomsnelheid van het grondwater. De opwaartse stroming in wellen is zo groot dat er nauwelijks invloed van atmosferische temperatuur variaties zichtbaar zijn. Het uittredende welwater heeft daarom een door het jaar heen constante temperatuur van ongeveer 10.5 tot 11 graden, de temperatuur van het grondwater op grotere diepte. Met dit gegeven kan de temperatuur dus worden gebruikt om wellen op te sporen en de activiteit ervan te volgen. Temperatuurmetingen zijn op 2 manieren ingezet:

- 1) het meten van de laterale temperatuur variatie van het slootwater met glasvezelkabel;
- 2) temporele bodemtemperatuur-diepte profielen in de wel en op verschillende afstanden tot de wel.

Ad 1. Een beschrijving van de meettechniek om temperatuur met de glasvezelkabel te meten staat in Bijlage 2.2. Deze meettechniek is toegepast in de sloot van locatie B en C. De kabel heeft een lengte van 220 meter (locatie B) en 500 meter (locatie C) en voor elke meter wordt de temperatuur gemeten met de gewenste frequentie. Door de grote lengte van de kabel, kon deze zo op de bodem van de sloot worden uitgelegd, dat er in 3 trajecten kon worden gemeten: in het centrum en aan de beide zijanten (zie figuur 2.8).



Figuur 2.8 De ligging van de glasvezelkabel in de sloot over drie trajecten (locatie B en C)

De metingen zijn enkele dagen voor het dichtenvan de wellen gestart en duurde tot enkele dagen na het dichtenvan. Op deze manier kon worden gevolgd of er als gevolg van het dichtenvan de wellen, elders nieuwe wellen zouden ontstaan. Ook kon op deze manier de exacte zones met wellen worden vastgesteld. Voor locatie C is de meting in de winter herhaald, drie maanden na de dichtingspoging.

Ad 2. In de (zone met) wellen en op verschillende afstanden van de wellen zijn temperatuurstokken geïnstalleerd tot een diepte van 3.5 m (zie Bijlage 2.1). Elke temperatuurstok is uitgerust met 10 sensors op een onderlinge afstand van 35 centimeter. De temperatuur werd automatisch gemeten met een frequentie van 1 uur en de gegevens werden opgeslagen in dataloggers (Hobo Weather Stations).

(Grond)waterkwaliteit

Van het grondwater in het eerste watervoerende pakket (in de peilbuizen), van het welwater en oppervlaktewater is 2 tot 4 keer de macro-ionen samenstellingen bepaald. Wellen hebben

vaak een andere samenstelling dan het omringende grondwater door het eerder beschreven 'upconing'-mechanisme. Het dichten van wellen zou mogelijk de grondwaterkwaliteit kunnen beïnvloeden.

2.4 Het dichten van de wellen

Het dichten van wellen is middels twee verschillende technieken uitgevoerd. Voor locatie A is gekozen voor de techniek biosealing en voor locatie B en C is gebruik gemaakt van uithardende injectie-gels. Voor beide methoden wordt een injectielans in het eerste watervoerende pakket geplaatst waardoor de injectievloeistof wordt gespoten. De ingespoten vloeistof stroomt met het grondwater vanzelf naar het lek waar het zijn werk kan doen.

Biosealing is een biologische methode gebaseerd op het injecteren van nutriënten om de groei van natuurlijk voorkomende bodembacteriën te stimuleren. Dit resulteert in een toename van bacteriële activiteit rondom het lek. Hierdoor wordt een bioslijm (EPS) gevormd en bacteriën initiëren verschillende chemische reacties waardoor kleine, vaste deeltjes mechanisch verweren. Deze verweerde deeltjes worden meegevoerd met het water en ingevangen in het bioslijm. Vervolgens slaan de verweerde deeltjes neer als kleiklompjes tussen de zandkorrels, waardoor het lek wordt gedicht. Het afdichtingsproces duurt ongeveer 3 tot 4 weken. Voor een uitgebreidere beschrijving van de methode en toepassing op locatie A wordt verwezen naar het rapport 'Welafdeling door middel van biosealing (Blauw, 2010). Het afdichten door middel van kunstmatige gels zoals toegepast op locatie B en C en een 2^e poging op locatie A maakt gebruik van het feit dat deze na een in te stellen reactietijd uithardt en zo het lek wordt gedicht. Het afdichten met deze methode geschiedt direct na injectie van de vloeistof. Met bodeminjectie met uithardende of expanderende vloeistoffen is veel ervaring opgedaan in bouwputten. Het komt regelmatig voor dat er een lek in een bouwput ontstaat die moet worden gedicht om de bouwwerkzaamheden te kunnen voortzetten. Meestal zijn de lekken c.q. wellen die in een bouwput ontstaan goed zichtbaar. Met het dichten van wellen in het landelijke gebied is veel ervaring opgedaan in de Haarlemmermeerpolder. Het betreffen voornamelijk wellen die zijn ontstaan bij het plaatsen van kunstwerken, aan te leggen infrastructuur (bijv. HSL) of het trekken van peilfilters. Met het dichten van natuurlijke wellen is nauwelijks ervaring opgedaan.

De periode van afdichten was voor alle drie de locaties verschillend (zie Tabel 2.1). Voor locatie A is 1.5 jaar later een 2^e poging tot het dichten van de wel ondernomen.

Tabel 2.1 Periode van afdichten van de wellen voor de drie locaties en constructie / verwijdering peilvak

	Periode van afdichten	Lengte peilvak	Constructie peilvak	Verwijdering peilvak
Locatie A	Poging 1: 31-08-2009 - 17-09-2009	nvt	nvt	nvt
	Poging 2: 19-05-2011 & 27-05-2011			
Locatie B	17-09-2009	27 m	Mei 2008	Okt/nov 2010
Locatie C	29-09-2009	100 m	Juni 2008	Okt/nov 2010

3 Resultaten

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de veldproeven besproken. In de eerste paragraaf wordt kort ingegaan op de praktische toepassing van het dichten en waarnemingen die tijdens de dichtingspogingen zijn gedaan. In de daarna volgende paragrafen worden de resultaten besproken van achtereenvolgens:

- Stijghoogtemetingen
- Debietmetingen van peilvakjes en wellen
- Tijdreeksen van zoutgehalte wel- en oppervlaktewater
- Zoutgehalte grondwater (elektrische sondering) en kwaliteit grond- en oppervlaktewater
- Laterale temperatuurvariatie voor detectie wellen
- Temperatuur-diepteprofielen

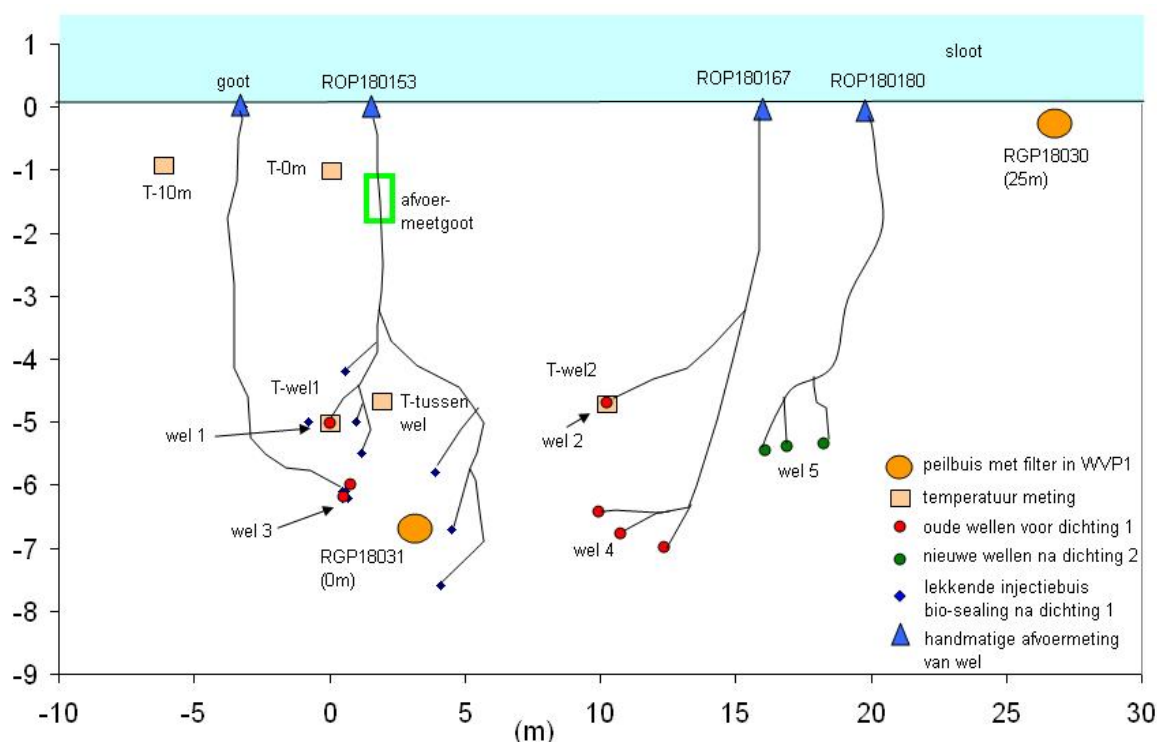
De resultaten van de metingen voor en na de dichtingspoging zullen worden behandeld.

3.2 Het dichten van de wellen: de praktische implicaties en waarnemingen

Locatie A

De eerste dichtingspoging (31-08-2009 - 17-09-2009) geschiedde met behulp van biosealing. Voor het bepalen van de juiste afstand van de injectiebuizen tot de wel, is warm water in het eerste watervoerend pakket geïnjecteerd en gemeten hoe lang het duurde tot het weer via de wel aan de oppervlakte kwam. Daarna zijn 3 injectiebuizen rondom wel 1 geplaatst en drie rondom lekkende peilbuis RGP18031, op een afstand van ongeveer 0.5 m. De injectiebuizen zijn door middel van een spuitboring geplaatst (zie figuur 3.1 voor locaties) wat tot gevolg had dat ze zijn gaan lekken. Met een spuitboring wordt het boorgat namelijk veel groter gemaakt en met de grote heersende drukken stroomt er eenvoudig water vanuit het eerste watervoerende pakket langs de geplaatste buis omhoog. De injectiebuizen vormden als het ware nieuwe uitstroomopeningen wat uiteraard niet de bedoeling was. Gedurende 3 weken is de vloeistof (met voedingsstoffen nutrolase) in de injectiebuizen geïnjecteerd om de bacteriën te laten groeien. Hiervoor moest het injectieteam iedere keer naar de locatie komen om de vloeistoffen te injecteren. Dit proces kan geautomatiseerd worden.

De tweede dichtingspoging (19-05-2011) is uitgevoerd met behulp van injectie van een uithardende gel. Als eerste werd wel 1 met omringende injectiebuizen gedicht en daarna de lekkende peilbuis RGP18031. Tijdens het dichten van deze uitstroomgaten ging er steeds meer water uit de uitstroomgaten van wel 2 en 4 stromen. Het dichten van wel 2 en 4 op 27-05-2011 had tot gevolg dat er nieuwe welletjes zijn ontstaan, aangeduid met wel 5.



Figuur 3.1 Detailschets van wellen en uitstroomgaten voor locatie A.

Locatie B

De dichtingspoging voor locatie B is uitgevoerd op 17-09-2009 d.m.v. injectie van uithardende gel. Voor dat men met dichten begon is eerst een tracertest uitgevoerd om de uitstroomgaten te lokaliseren. In tegenstelling tot locatie A, waar de uitstroomgaten op het land en daardoor goed zichtbaar zijn, liggen de uitstroomgaten voor locatie B en C onder water of in de uitgezakte slootoever. Na injectie van de rode tracervloeistof rondom de wel op de uitgezakte oever (zie Bijlage 2.1 voor locatie) duurde het ongeveer 10 minuten voordat de rode vloeistof weer aan de oppervlakte kwam. Echter, niet in de omgeving van de injectie maar 10 meter verderop. Vervolgende zijn temperatuurmetingen met een prikstok uitgevoerd en deze toonden aan dat hier zich een andere wel of uitstroomgat in de sloot bevond die niet eerder was opgemerkt. Gedurende de dag is op een tiental locaties rondom de bekende en nieuw ontdekte wel vloeistof geïnjecteerd. Het niet zien stromen van het welwater en het onder water zitten van uitstroomgaten bemoeilijkte de dichtingspoging.

Locatie C

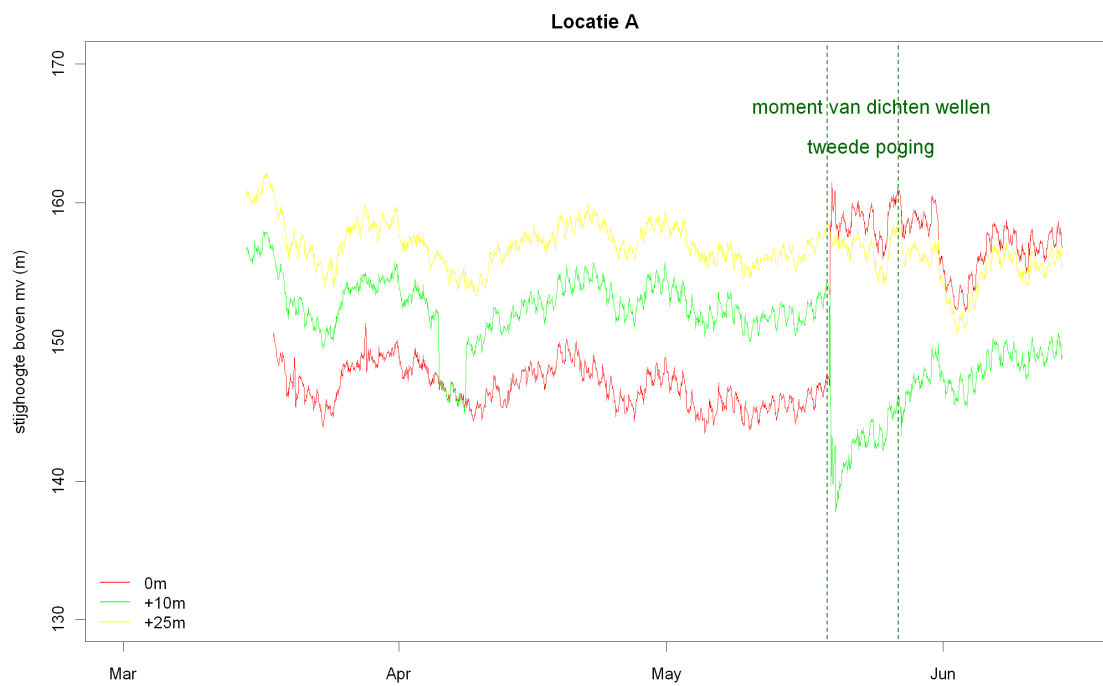
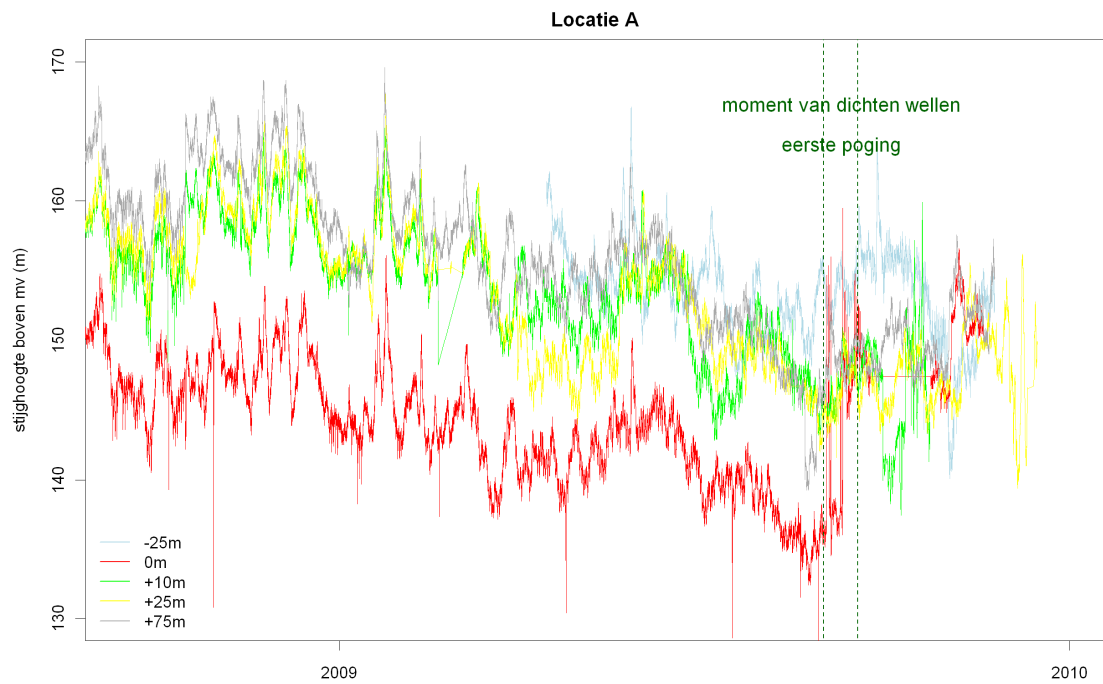
Op deze locatie zijn geen permanente discrete uitstroomopeningen aanwezig maar een groot aantal kleine uitstroomgaten die zich (volgens waarnemingen van de boer) schijnen te verplaatsen binnen een traject van ongeveer 30-40 meter (zie Bijlage 2.1 voor locatie). In dit traject is tot op een diepte van ongeveer 2 tot 4 meter uithardende vloeistoffen geïnjecteerd gedurende een halve dag. Tijdens dichten zijn geen effecten van dichten waargenomen omdat de uitstroomgaten niet zichtbaar waren. Wel is de slootbodem iets omhoog gedrukt. Het niet zien stromen van het welwater en het onder water zitten van uitstroomgaten bemoeilijkte ook hier de dichtingspoging.

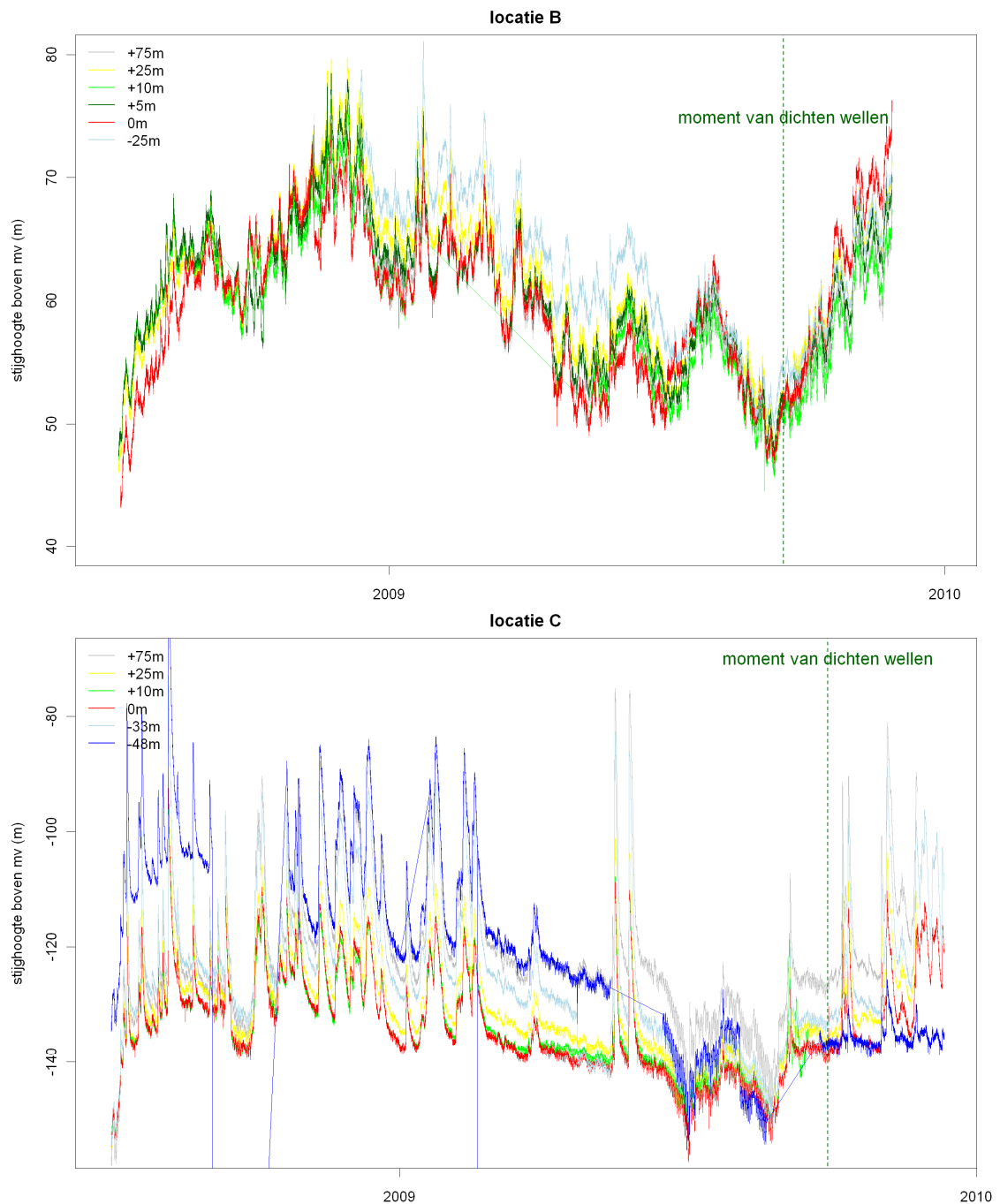


Foto's: Het dichten van wellen op locatie A. Het injecteren van de dichtingsvloeistof gebeurt met een rupsvoertuigje. Linksonder, de uitgeharde injectievloeistof

3.3 Stijghoogte

De hoogfrequente gegevens van de stijghoogte zijn vergeleken met de maandelijkse handmetingen (zie Bijlage 3.1) en bij grote verschillen zijn de hoogfrequente zo goed mogelijk aangepast. De verschillen zijn ontstaan op momenten dat de diver is uitgelezen, een handmeting is gedaan of een grondwatermonster is genomen. De diver lijkt daarbij niet altijd op dezelfde hoogte te zijn teruggehangen. Het was niet mogelijk om alle diver-data precies op de handmetingen te ijken. Bij locatie C hebben zich de minste problemen voorgedaan. Bij zowel locatie A als locatie B is er onzekerheid over de gegevens van de stijghoogte ter plaatse van de wel.





Figuur 3.2 De hoogfrequente stijghoogte voor de drie locaties op verschillende afstanden van de wel.

In figuur 3.2 staan de hoogfrequente stijghoogte-gegevens voor alle locaties weergegeven. Daarnaast zijn er afstand-stijghoogte profielen gemaakt op basis van de handmetingen die op verschillende momenten in het jaar zijn uitgevoerd (zie Bijlage 3.2). Voor zowel locatie A als B staat de stijghoogte ruim boven maaiveld terwijl de stijghoogte voor locatie C op ongeveer 1.0 meter onder maaiveld wordt aangetroffen. Dit is het directe gevolg van de geohydrologische opbouw: een weerstandsbiedende deklaag voor locatie A en B en het ontbreken ervan op locatie C. Het verschil in geohydrologische opbouw uit zich ook in de variaties van de stijghoogte. De stijghoogte van zowel locatie A als locatie B laat een geringe

jaarlijkse amplitude zien van maximaal 30 cm. Het beeld is echter heel grillig en op kortere tijdschaal is er een sterke variatie te zien die voornamelijk door luchtdrukvariaties worden veroorzaakt. Let op, alle metingen zijn gecorrigeerd voor luchtdruk en na correctie vertonen sommige meetpunten nog (tegengestelde) relatie met de luchtdruk. Dit is een bekend fenomeen en de mate waarin dit optreedt wordt ook wel barometrische efficiëntie genoemd (zie voor meer uitleg bijvoorbeeld *Rare Reeks 4: Fluctuateloze stijghoogte, Stromingen 2, 2005*). Voor locatie C zijn de variaties groter die veroorzaakt worden door neerslag, verdamping en drainage van grondwater. De filters staan ondieper dan bij locatie A en B en laten daarmee de fluctuatie van het freatische grondwater zien. Voor alle drie de locaties is er echter een effect van de wel op de stijghoogte zichtbaar. De afstand-stijghoogte profielen in Bijlage 3.2 laten een lagere stijghoogte zien ter hoogte van de wel die toeneemt met de afstand tot de wel. De wel onttrekt plaatselijk veel grondwater zodat ze als het ware als een grondwateronttrekking kunnen worden gezien. Het effect van de wel op de stijghoogte is het sterkst voor locatie C en het kleinst voor locatie B. Het dichten van de wel zou zich direct moeten uiten in een toename van de stijghoogte ter hoogte van de wel.

Voor locaties B en C zijn geen effecten op de stijghoogte te zien als gevolg van het dichten van de wellen. De stijghoogte voor locatie B lijkt na dichten hoger te liggen ten opzichte van de andere meetpunten maar deze trend heeft zich al enkele maanden voor het dichten ingezet. Vermoedelijk is dit het gevolg van het gestaag inzakken van de slootkant als gevolg van de wel waardoor de stijghoogtebuis steeds krommer gaat staan. Ook de stijging van de stijghoogte ter hoogte van de wel op locatie A begint al voordat met dichten (1^e poging) is begonnen. Dit is ook het moment dat een diver is verwisseld. Bovendien missen er gegevens voor deze locatie (0m) op een cruciaal moment, namelijk net na dichten van de wel. Tijdens de 2^e poging is een duidelijke stijging van de stijghoogte bij de wel met 13 cm waargenomen (zie Figuur 3.2). Tijdens de 2^e dichtingspoging is de stijghoogte toegenomen met ongeveer 12 cm tot het niveau van de peilbuis op 25 m afstand van de wel. Echter, zeer opmerkelijk is de gelijktijdige afname van de stijghoogte op 10 m afstand van de wel (aan rand sloot, 10m). Het onmiddellijk ontstaan van een nieuwe wel tijdens dichten van de bestaande wel is vooralsnog de enige waarschijnlijke verklaring. Echter, deze nieuwe wel of uitstroomopening was niet op het land te zien en kan in de sloot zijn ontstaan.

3.4 Wellen afvoer

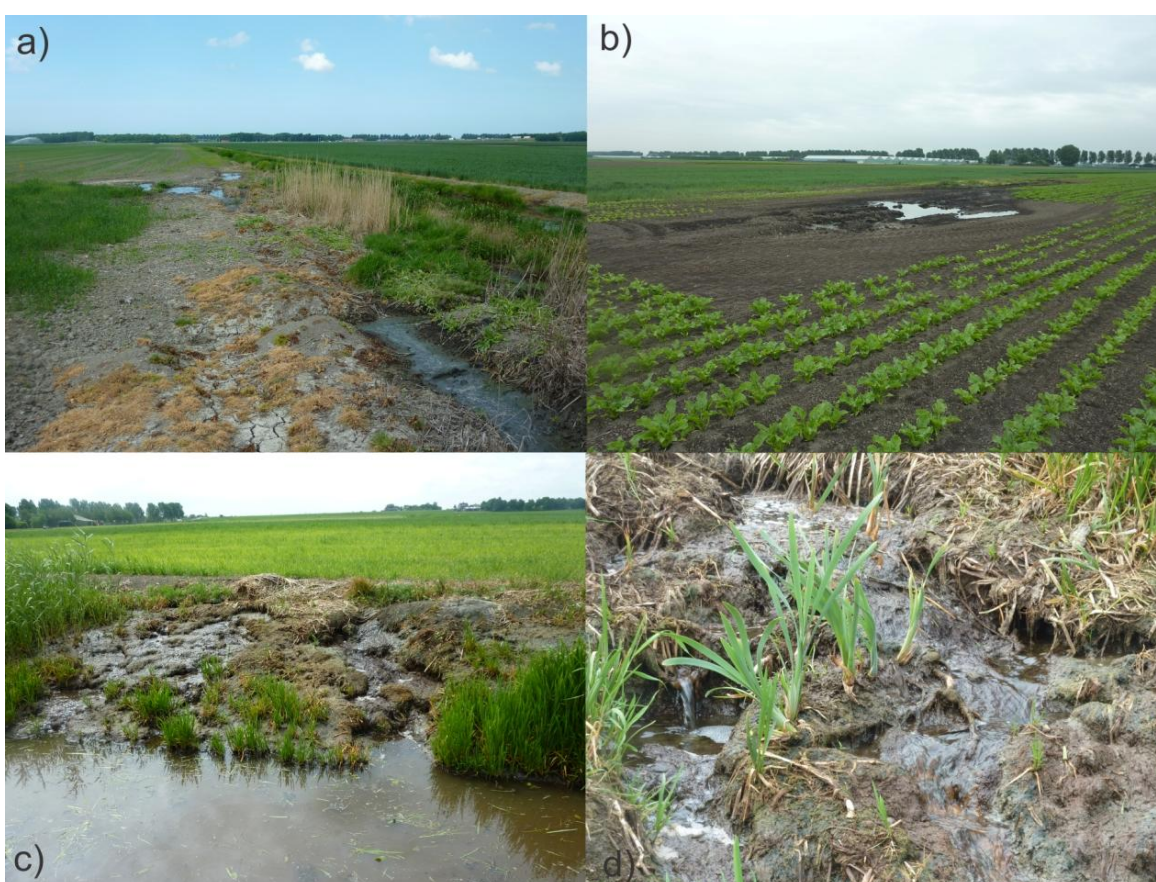
Locatie A

In Figuur 3.3 is te zien dat de afvoer van de wel op locatie A redelijk constant is in de tijd met een waarde van gemiddeld 4.0 m³/d. In de periode vóór dat met dichten (1^e poging) werd begonnen neemt de afvoer al af. Dit werd veroorzaakt door de plaatsing van injectiebuisen in het eerste watervoerende pakket die bleken te lekken. Ze voerden dus water uit het eerste watervoerende pakket rondom de wel af waardoor de wel zelf minder ging afvoeren. Daarna is de afvoer van de wel samen met die van de lekkende injectiebuisen gemeten. In de figuur is te zien dat er een duidelijke afname van de afvoer heeft plaats gevonden, van gemiddeld 4.0 m³/d naar 1.3 m³/d als gevolg van het dichten van de wel door biosealing.

In de periode na de 1^e poging is het weldebiet flink toegenomen tot ongeveer 17 m³/d, vermoedelijk door toename van lekkage langs de injectiebuisen. De 2^e dichtingspoging had daarmee het doel een veel grotere wel te dichten. De poging is op 2 dagen uitgevoerd, fase 1 en fase 2. Na fase 1 was het debiet gereduceerd tot 13 m³/d en na fase 2 was het debiet nog slechts 5 tot 7 m³/d. Tijdens de laatste meting in augustus 2011, 3 maanden na dichting was het totale debiet 9.5 m³/d maar hier zit zeker een deel oppervlakkige perceelsdrainage bij dat niet gescheiden kon worden van de wel-afvoer.

Tijdens deze 2^e poging zijn een aantal opmerkelijk en belangrijke waarnemingen gedaan aan de wel-afvoer gedaan. Voor de 2^e dichtingspoging voerde wel 1, de lekkende

peilbuis en injectiebuizen het meeste water af, verzameld in de afvoermeetsloot was dit ongeveer 17 m³/d terwijl wel 2 slechts 0.8 m³/d afvoerde (zie figuur 3.1 voor locaties wellen). Op 19 mei 2011 begon men met het dichten van wel 1 en de lekkende buizen en na 1 uur stroomde er geen water meer uit. Echter, uit de uitstroomgaten rondom wel 2 begon toen veel meer water te stromen tot een gezamenlijk debiet van 3 m³/d. Na het dichten van deze uitstroomgaten (op 27 mei 2011) ontstonden er een aantal nieuwe uitstroomgaten enkele meters ten zuidoosten van de gedichte wel (aangeduid met wel 5). Uit deze nieuwe uitstroomgaten, stroomde na dichten het meeste water met een gezamenlijk debiet van ongeveer 5 m³/d. Het dichten van de wellen/uitstroomgaten in zuidoostelijke richting leidde dus tot een toename van het debiet in bestaande uitstroomgaten en het ontstaan van nieuwe.



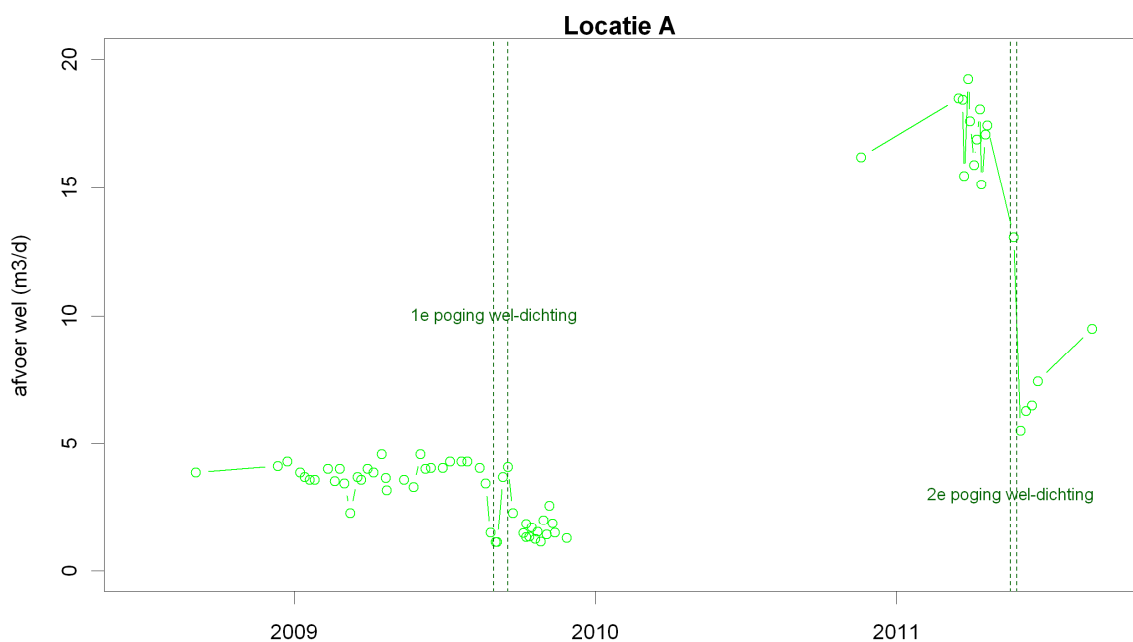
Foto's van wellen in de directe omgeving van locatie A. De foto's zijn genomen tijdens het extreme droge voorjaar van 2011 tijdens de 2e dichtingspoging op 19 mei 2011. a) wellen op het land op enkele meters van de sloot, in de verte is beregening van het perceel te zien i.v.m. de droogte, b) wel op het land waardoor een deel van het perceel niet bewerkt kan worden, c) grote wel op slootoever met een debiet van ongeveer 100 m³/d, d) het stromen van water uit de wel van foto c met een flink debiet.

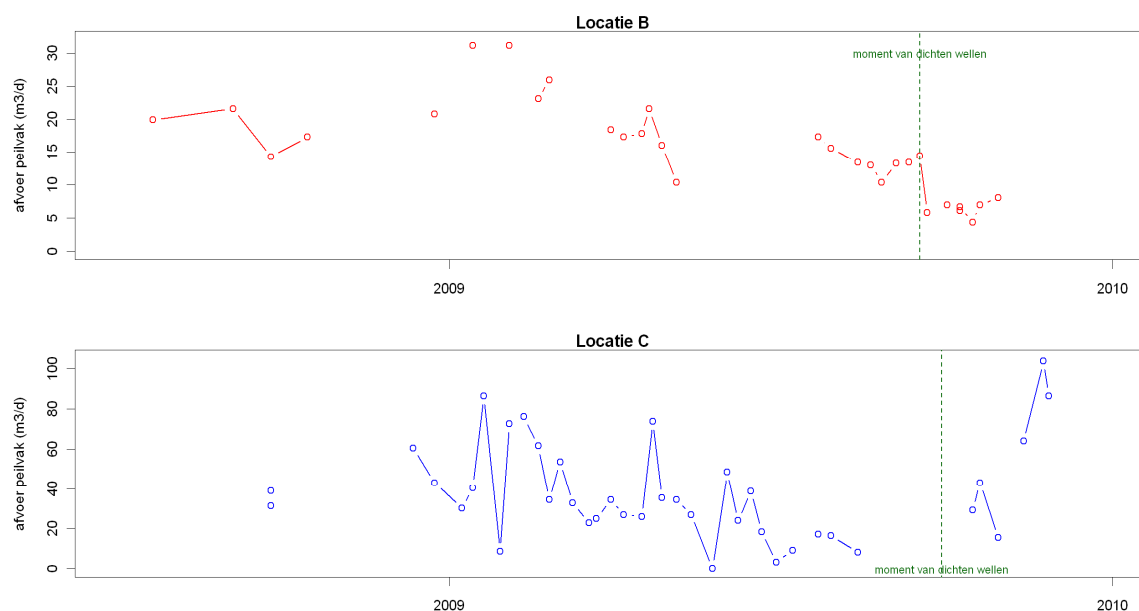
In de directe omgeving van locatie A worden veel wellen aangetroffen op het land en op oevers van sloten (zie foto's). In 1 sloot zijn zelfs tientallen wellen waargenomen met debieten tot 100 m³/d. Voor deze sloot wordt op basis van de metingen geschat dat er 500 m³/d via wellen de sloot instroomt. Met een gemeten EC van ongeveer 8.7 mS/cm levert dit een zoutbelasting van 2 ton keukenzout per dag voor deze sloot met een lengte van 400 m.

Locatie B en C

De afvoer van de wellen van locatie B en C konden niet direct worden gemeten omdat er meerdere uitstroompunten waren die niet zichtbaar waren en onder water lagen. Echter, de

afvoer van het peilvakje bestaat voor een groot deel uit welwater. Dit wordt bevestigd door de EC-metingen van het slootwater in het peilvakje in vergelijking met die bovenstrooms en benedenstrooms (zie Figuur 3.4). De afvoermetingen zeggen daarmee iets over het succes van het dichten van de wellen. Tijdens natte perioden is er echter wel veel bijmenging van regenwater dat via drainagebuizen, oppervlakkig of via de bodem in de sloot stroomt. Voor locatie B is er duidelijk een afname van de afvoer zichtbaar. Vóór dichten bedroeg deze 12 tot 18 m³/d en na dichten gemiddeld 7 m³/d, een reductie van ongeveer 50%. Voor locatie C was niet mogelijk om de afvoer van het peilvak direct vóór en na dichten van de wellen te meten i.v.m. een te hoog peil benedenstrooms (verdronken stuw). De metingen die na dichten zijn uitgevoerd laten echter geen enkele afname zien.





Figuur 3.3 De gemeten afvoer van de wel (locatie A) en peilvakjes (locatie B en C).

3.5 Zoutgehalte wellen en oppervlaktewater

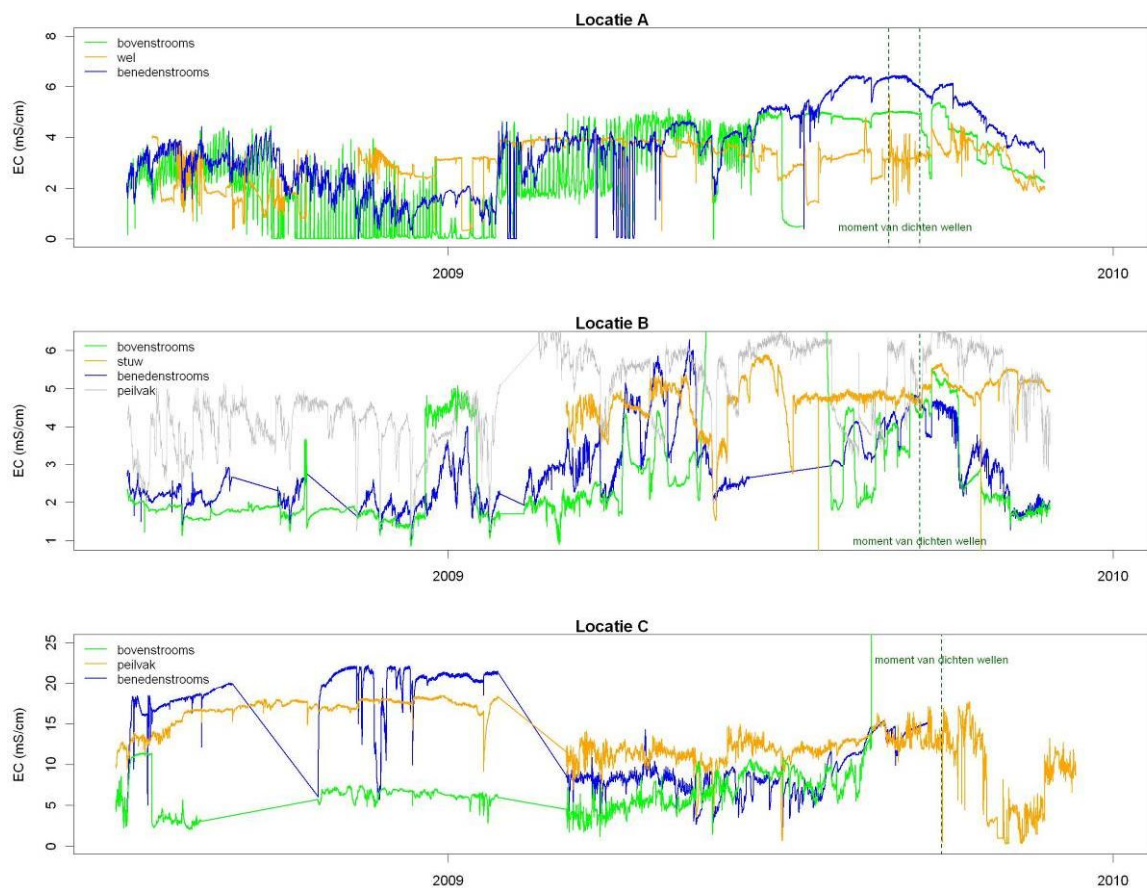
In Figuur 3.4 staan de automatisch gemeten EC's weergegeven voor het welwater (locatie A) en het kunstmatig aangelegde peilvakje waarin het welwater uittreedt (locatie B en C). Enkele meetreeksen van de EC vertonen plotselinge onverklaarbare dalingen of stijgingen die alleen aan meetfouten kunnen worden geweten. Voorbeelden zijn de reeksen van het welwater van locatie A en het slootwater bovenstrooms van locatie B.

Het welwater van locatie A heeft een EC die varieert tussen de 2 en 4 mS/cm. Het slootwater bovenstrooms van de wel heeft duidelijk een lagere EC-waarde dan benedenstrooms van de wel. De EC-fluctuaties in de sloot worden veroorzaakt door peilveranderingen als gevolg van het wegpompen van het oppervlaktewater. In het slootwater is een duidelijke zoutgradiënt aanwezig; het zoutgehalte neemt toe met de diepte. Wanneer het slootpeil daalt, stroomt er relatief zoeter water langs de sensor die op dezelfde absolute hoogte blijft hangen. Dit effect is ook duidelijk te zien voor locatie C waar halverwege de meetperiode de CTD-divers ondieper zijn gehangen. De peilvak-diver is vanaf dat moment in het afvoergootje gehangen om de EC van het (gemengd) afgevoerde water te meten. Op hetzelfde moment is er een extra CTD-diver in het afvoergootje van locatie B gehangen. Voor locatie B wordt (meetfouten daargelaten) een lagere EC gemeten stroomopwaarts dan stroomafwaarts van het peilvak. De EC in het peilvak is duidelijk hoger als gevolg van de bijdrage van de wel. Dit is nog duidelijker zichtbaar voor locatie C. De EC van het water in het peilvakje van locatie B varieert tussen 4 en 6 mS/cm. Voor locatie C worden de hoogste EC-waarden aangetroffen, namelijk tussen 10 en 15 mS/cm. Voor alle locaties geldt dat de EC van het slootwater daalt als gevolg van neerslag, in de periode na de regenbui stijgt de EC weer. Voor locatie A en B is een duidelijke jaarlijkse trend van het zoutgehalte van het oppervlaktewater te zien, hoger in de zomerperiode en lager in de winterperiode.

Na dichten van de wellen is geen zichtbaar effect op de EC van het welwater, peilvakwater en slootwater benedenstrooms te zien. Voor locatie A is in de periode tijdens dichten wel een sterke fluctuatie zichtbaar. Dit wordt veroorzaakt door de injectie van nutrolase voor het groeien van de bacteriën (biosealing) gevolgd door injectie van zoet water

voor spoeling (zie Blauw, 2010). De injectie vindt plaats onder de deklaag op een diepte van 7 meter, de injectievloeistof stroomt met grote snelheid via de wel naar de oppervlakte. Voor locatie C is ongeveer 1.5 maand na dichtten een flinke daling van de EC te zien. Het is onduidelijk wat de reden hiervoor is, de enige handmeting na dichting laat ook een lage waarde zien (4.6 mS/cm op 24-11-2009) zodat een meetfout minder waarschijnlijk is. Helaas ontbreken er gegevens van het slotwater bovenstroom en benedenstrooms van het peilvak in de periode net vóór en na het dichtten van de wel.

Voor locatie A is de in 2010 toegenomen afvoer van de wel vermoedelijk toe te schrijven aan de lekkende injectiebuizen. Opmerkelijk is dat ook de EC van het welwater in deze zelfde periode is toegenomen van gemiddeld 4 mS/cm tot 8 mS/cm. Dit is conform de theorie; met een hoger debiet wordt dieper en daardoor zouter grondwater aangetrokken.

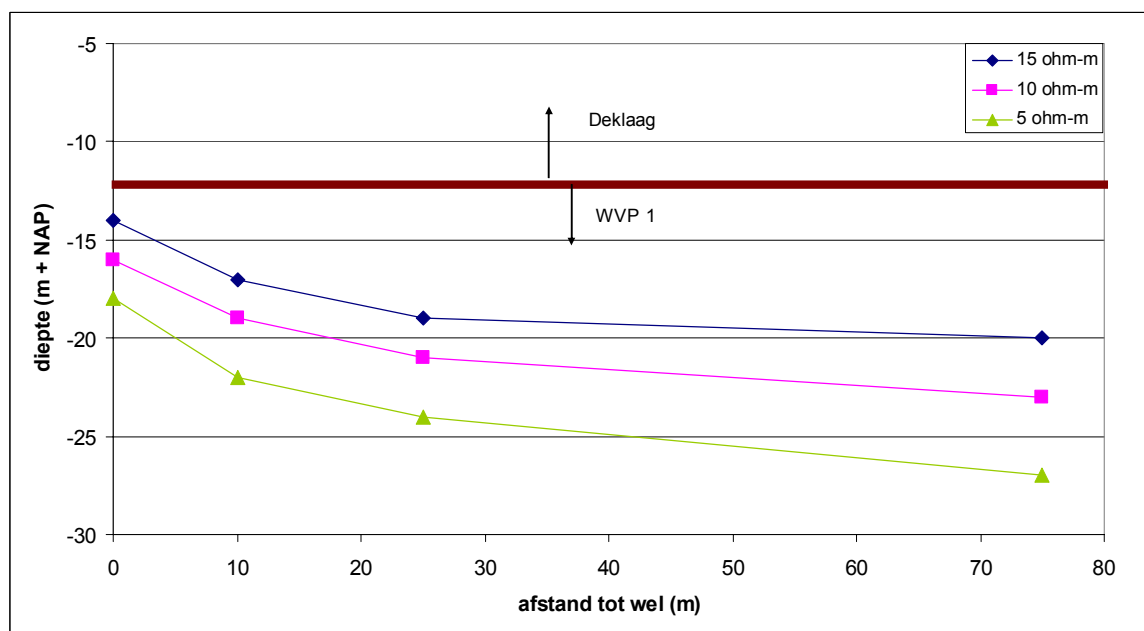


Figuur 3.4 De hoogfrequente metingen van het zoutgehalte (EC) van welwater en slotwater voor de drie locaties

3.6 Zoutgehalte en kwaliteit grond- en oppervlaktewater

Voor verschillende afstanden tot de wel is een bodemweerstand profiel gemeten tot een diepte van 25 m d.m.v. een sondering. Voor locatie A is heel duidelijk het upconings-effect, opkegelen van dieper en zouter grondwater, als gevolg van de wel te zien (figuur 3.5). Figuur 3.5 laat zien dat ter plaatse van de wel (0m), het zoutere grondwater (lagere bodemweerstand) ondieper wordt aangetroffen dan op grotere afstand van de wel. Let wel, de gemeten geleidbaarheid (= 1/bodemweerstand) is een combinatie van de geleidbaarheid van de bodem (zand heeft bijvoorbeeld een lagere geleidbaarheid dan klei) en het zoutgehalte van het grondwater. Echter, omdat de samenstelling van het eerste

watervoerende pakket voor alle afstanden hetzelfde is, kunnen veranderingen in bodemweerstand direct worden doorvertaald naar veranderingen in het zoutgehalte van het grondwater.



Figuur 3.5 Bodemweerstand iso-lijnen van 5, 10 en 15 ohm-m voor verschillende afstanden tot de wel

In Bijlage 3.3 staat de chemische samenstelling weergegeven van het welwater, het grondwater in het eerste watervoerend pakket en het oppervlaktewater stroomopwaarts,-afwaarts van de wel en ter plaatse van de wel.

Het grondwater in het eerste watervoerende pakket voor locatie A laat bij de wel (RGP18031) een hoger Cl-gehalte zien dan op 25 m (RGP18030) en 75 m (RGP18034) van de wel zoals ook al de sonderingen aantoonde (zie Figuur 3.5). Opvallend is verder het lagere gehalte aan NH₄ en tot-PO₄ in het grondwater ter plaatse van de wel t.o.v. het grondwater op 25 en 75 m afstand. Wel 1 laat een tweemaal zo hoge en wel 2 een bijna driemaal zo hoge Cl-concentratie zien dan het grondwater in het eerste watervoerende pakket ter hoogte van de wel. De opconing van dieper en zouter grondwater als gevolg de wel is in werkelijkheid dus nog veel scherper dan de sonderingen en metingen van het grondwater in het eerste watervoerende pakket laten zien (Bijlage 3.3 en Figuur 3.5).

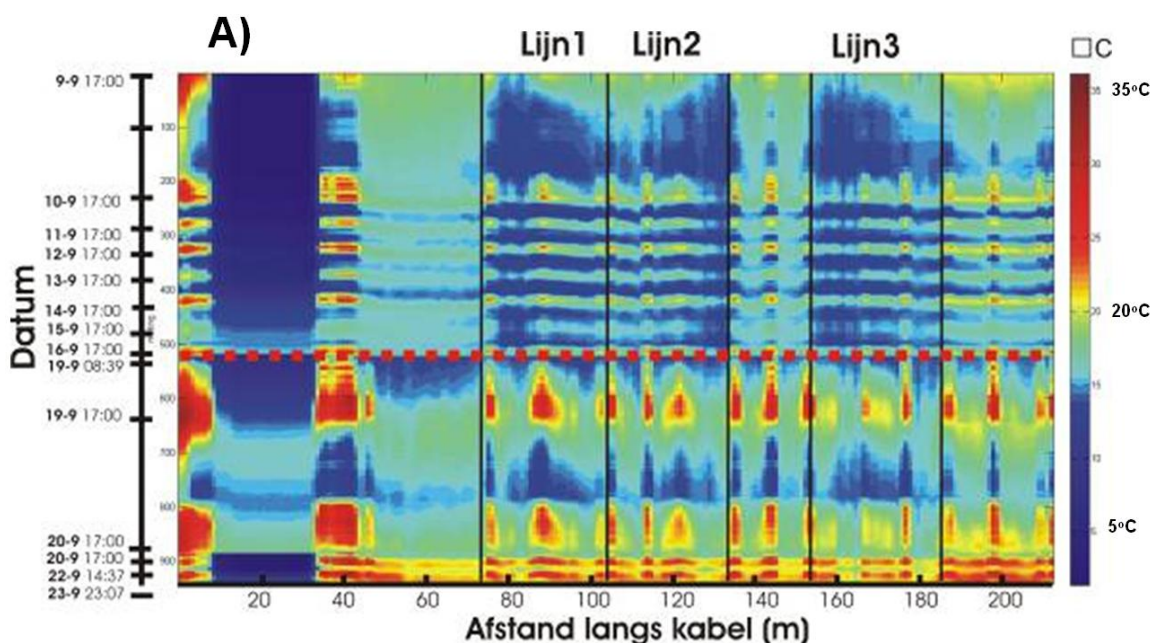
Ook locatie B laat een verhoogd chloride concentratie in het eerste watervoerend pakket zien ter hoogte van de wel, 610 mg/l, t.o.v. het meetpunt op 75 m 460 mg/l en 25 m afstand 410 mg/l. Zowel het water in het peilvak (ROP149104) waar het welwater wordt opgevangen als het bemonsterde welwater op de uitgezakte oever, laten een veel hogere chloride concentratie zien dan het grondwater ter plaatse van de wel, namelijk ongeveer 1000 mg/l. Ook hieruit blijkt (net als bij locatie A) dat opconing door de wellen zeer lokaal plaatsvindt. Opvallend is het ontbreken van sulfaat in het oppervlaktewater van het peilvak (het welwater) terwijl het oppervlaktewater bovenstrooms en benedenstrooms hoge sulfaat gehalten bevat. Het grondwater uit het eerste watervoerende pakket bevat ook geen sulfaat en dit is de bron van het welwater dat in het peilvak uittreedt.

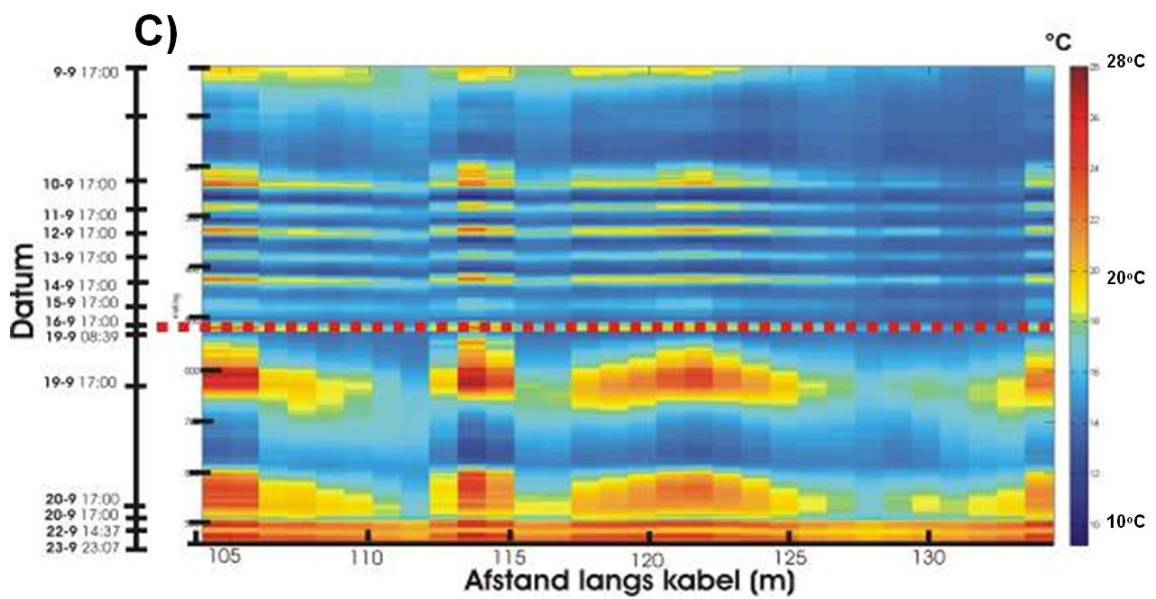
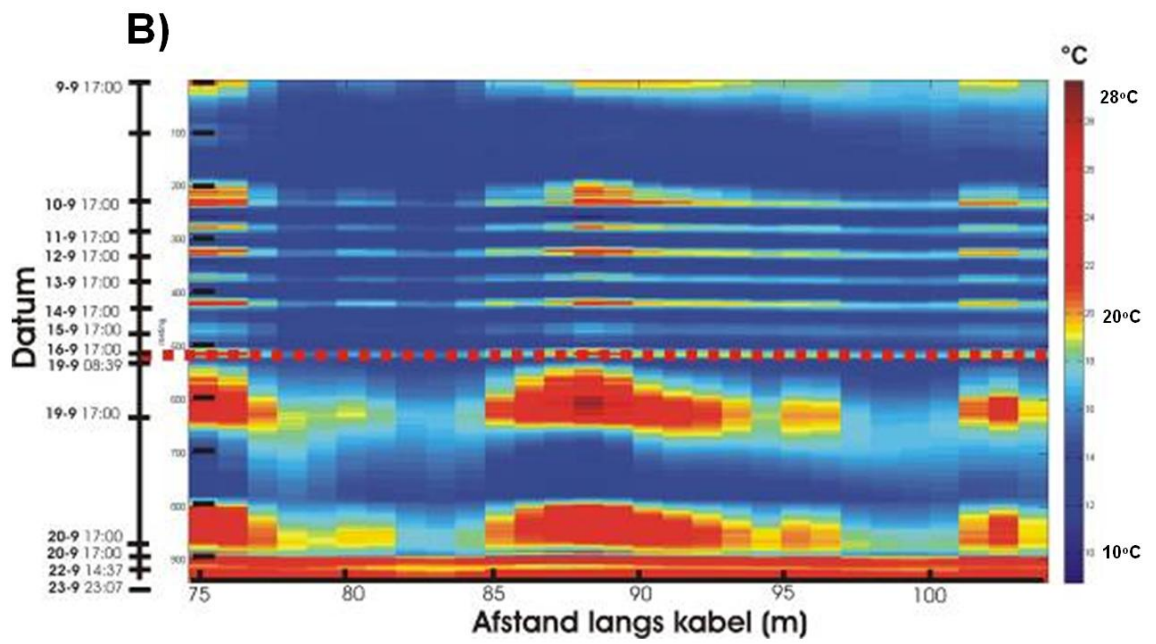
Op locatie C is het grondwater op 3 meter diepte heel erg zout, namelijk 5000 mg/l ter hoogte van de wel, in stroomafwaartse richting op 48 m afstand 6000 mg/l en op 75 m afstand 3600 mg/l. Het hogere zoutgehalte ten opzichte van de andere locaties heeft te maken met het feit dat locatie C in een oude getijdegeul ligt. Dit heeft 2 effecten: 1) de getijdegeul heeft langer

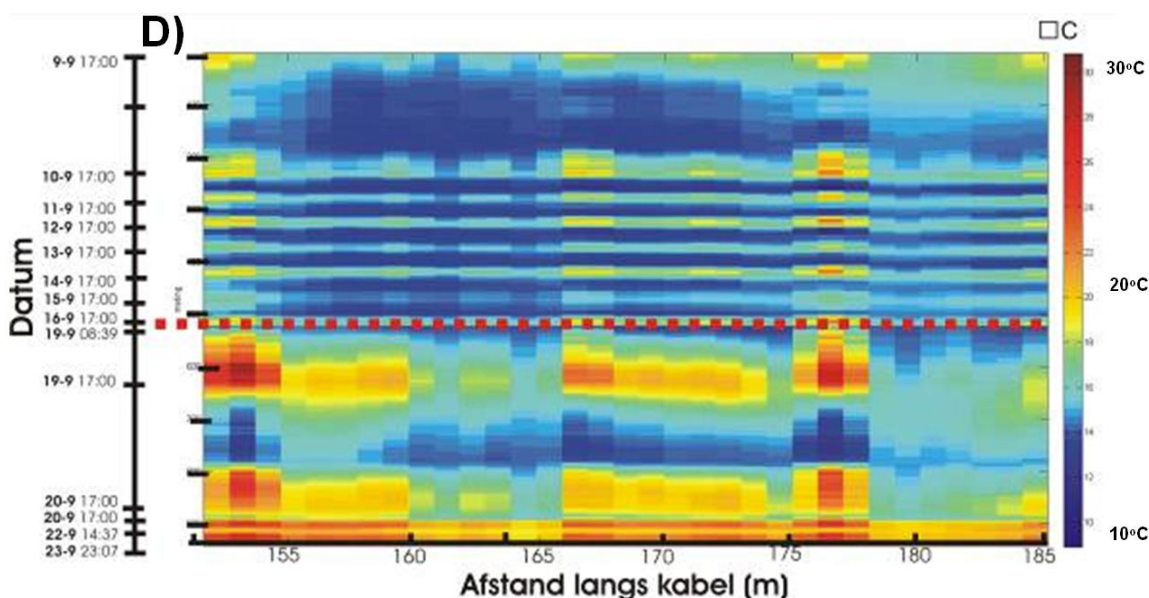
onder zee-invloed gestaan waardoor tot veel recentere tijd zeewater heeft kunnen infiltreren, en 2) door het ontbreken een scheidende laag is de diffuse kwel flux groter waardoor met grotere snelheid dieper en zouter grondwater naar de oppervlakte stroomt. Het oppervlaktewater stroomopwaarts van de wel bevat veel lagere Cl-concentraties (240 tot 1000 mg/l) dan in het peilvak waar de wellen uittreden (ongeveer 3500 mg/l).

3.7 Laterale temperatuur variatie locatie B en C

In figuur 3.6 staat voor locatie B de met glasvezelkabel gemeten temperatuur van het slootwater op de slootbodem weergegeven voor de periode vóór en na dichten van de wellen. De 3 lijnen geven de drie trajecten in de sloot weer (zie figuur 2.9 voor situatieschets). Vooral de dagelijkse fluctuatie van de temperatuur geeft informatie over het voorkomen van wellen (op de y-as staat de datum van de metingen weergegeven). Wellen treden in de sloot uit met een relatief constante temperatuur die minder door het dag- en nachtritme (kouder en warmer worden van de sloot) wordt beïnvloed dan de rest van de sloot. Daarbij moet worden opgemerkt dat het niet mogelijk was om de kabel overal op dezelfde diepte te plaatsen door variaties in waterdiepte. De diepteligging van de kabel heeft ook invloed op de dagelijkse fluctuatie, hoe dieper hoe minder de dagelijkse schommelingen tot uiting komen.



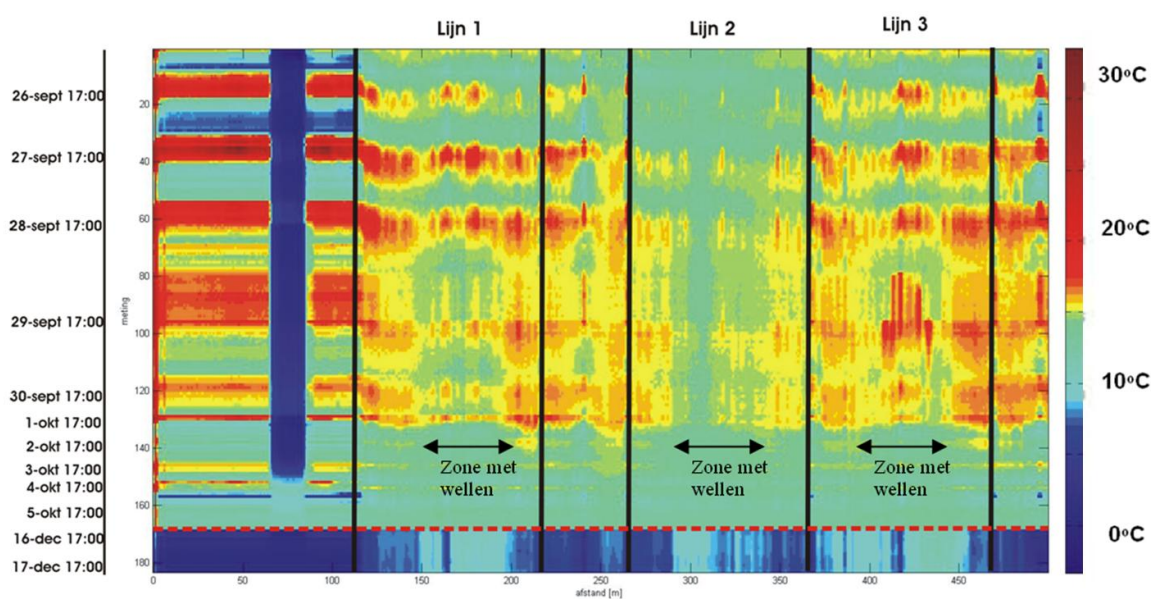




Figuur 3.6 De temperatuur-metingen met glasvezelkabel voor locatie B. Op de x-as staat de afstand in de sloot en op de y-as staat de datum van de verschillende metingen weergegeven. De rode lijn geeft het moment van dichten weer.

In figuur 3.6 b, c en d is ingezoomd op de verschillende trajecten in het peilvakje zodat de locatie met wellen beter zichtbaar zijn. Voor traject 1 is een relatief constante temperatuur te zien tussen de 77 en 84 meter en tussen de 97 en 101 meter. Na het dichten van de wel is te zien dat er tussen de 76 en 82 meter een versterkt dag nacht ritme signaal wordt gemeten vergeleken met de periode daarvoor. Voor traject 2 is een relatief constante temperatuur te zien tussen de 110 en 112 meter, tussen de 115 en 117 meter en tussen 124 en 134 meter. Na het dichten van de wel is te zien dat er tussen de 124 en 128 en tussen de 129 en 134 meter een versterkt dag nacht ritme signaal wordt gemeten vergeleken met de periode daarvoor. Voor traject 3 is een relatief constante temperatuur te zien tussen de 160 en 167 meter en tussen de 178 en 185 meter.

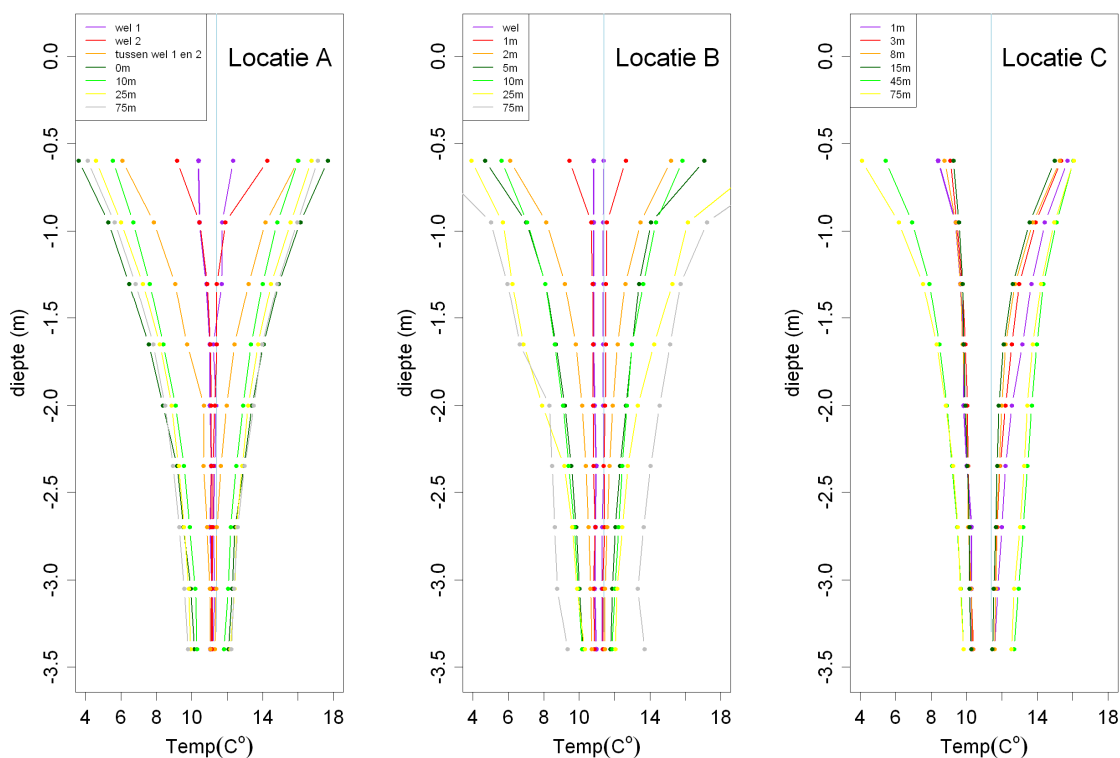
Voor locatie C is duidelijk de zone met wellen te zien waar de temperatuur van het water in de zomer koeler en in de winter warmer is. Vooral de meting in de winterperiode (atmosferische temperatuur rond het vriespunt) laat duidelijk de zone met wellen zien door de relatief hogere temperatuur. Voor lijn 1 is dit te zien voor het traject 148-162 meter en 165-197 meter, voor lijn 2 traject 290-308 en 326-328 meter en voor lijn 3 traject 380-410 meter en 420-450 meter. Er is geen effect van het dichten van wellen te zien



Figuur 3.7 De temperatuur-metingen met glasvezelkabel voor locatie C. Het moment van dichten is 29 september 2009.

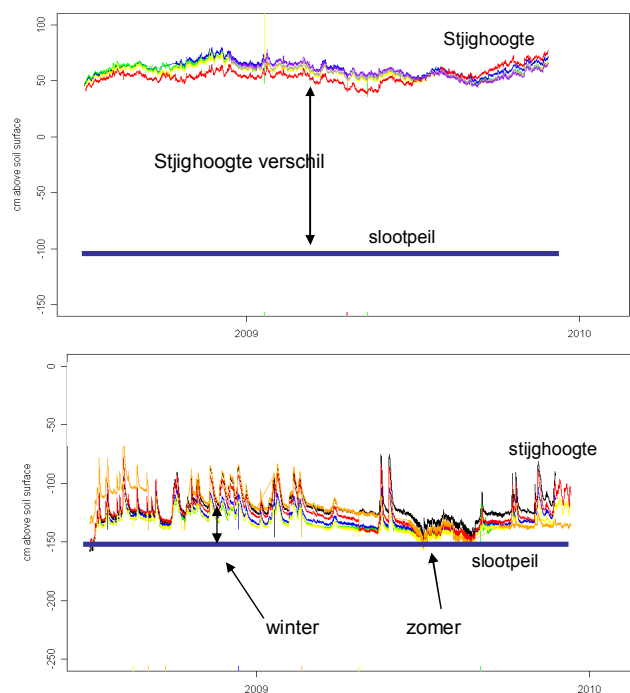
3.8 Temperatuur diepte profielen

In Bijlage 3.4 staan tijdreeksen van de gemeten temperatuur op verschillende dieptes weergegeven. In deze grafieken zijn duidelijk de wellen zichtbaar die een constant temperatuur-verloop met de diepte en de tijd laten zien. Per diepte is de maximale en minimale gemeten waarde bepaald en in een diepteprofiel geplot. Deze zogenaamde temperatuur-envelopes staan voor de drie locaties vóór dichten afgebeeld in figuur 3.8.



Figuur 3.8 De temperatuur-envelopes vóór dichten (minimale en maximale temperatuur per jaar) voor verschillende afstanden tot de wel(len).

Voor alle locaties zijn de wellen duidelijk herkenbaar in de temperatuur-diepte profielen. Voor locatie B neemt de temperatuur fluctuatie toe met de afstand tot de wel. Het meetpunt tussen wel 1 en 2 voor locatie A laat dieper dan 2 meter een relatief constant temperatuur-profiel zien. Dit meetpunt ligt in de zone met meerdere wellen en mogelijk speelt de laterale beïnvloeding een rol. De temperatuurprofielen van locatie C laten duidelijk zien dat er sprake is van een zone met wellen (locaties 1m, 3m, 8m, 15m). De jaarlijkse amplitude is echter groter dan die van de wellen op locaties A en B wat inhoudt dat de stroomsnelheden kleiner zijn. Echter, wel op een groter oppervlak waardoor ze gezamenlijk toch een behoorlijk debiet kunnen veroorzaken. Er is een duidelijk verschil tussen de zomer en de winter te zien voor locatie C terwijl dat voor de andere locaties niet wordt gevonden. Dit kan worden verklaard door het feit dat het stijghoogteverschil tussen het eerste watervoerend pakket en het slootpeil (dat in principe de stroomsnelheid bepaald) bij locaties A en B nauwelijks verschilt tussen zomer en winter en voor locatie C wel. Dit is duidelijk gemaakt in figuur 3.9. Voor locatie C is het stijghoogteverschil in de winter groter dan in de zomer waardoor stroomsnelheden groter zijn en er dus een constanter temperatuurprofiel wordt gemeten in de winter. Dit wordt wederom door de geohydrologische opbouw bepaald, de locaties met een deklaag laten een groter stijghoogteverschil zien en geringere fluctuatie.



Figuur 3.9 Het stijghoogteverschil voor locatie B en C. Voor locatie C (onder) is er een groot verschil tussen zomer en winter terwijl het voor locatie B (boven) gedurende het jaar relatief constant blijft.

Het feit dat verticale stromingsnelheden invloed hebben op de temperatuur-profielen zou het dichten van wellen te zien moeten zijn in de temperatuurprofielen. Daarbij moet worden aangemerkt dat de bodemtemperatuur vertraagd reageert op veranderingen en effecten pas op langere termijn zichtbaar worden. In de temperatuur-tijdreeksen (bijlage 3.4) is een klein effect van het dichten in 2009 te zien voor locatie A en B. Het temperatuurprofiel in wel 1 van locatie A en de wel van locatie B laten een geringe toename van de fluctuatie van de temperatuur zien na dichten. Een toename van de temperatuurfluctuatie wordt veroorzaakt door een afname van de verticale stroomsnelheid. Het gemeten temperatureffect is echter klein zodat er nog steeds hoge verticale opwaartse stroomsnelheden aanwezig zullen zijn.

Na de tweede dichtingspoging in mei 2011 is echter een grote toename van de temperatuurfluctuatie te zien voor wel 1 (locatie A). Dit is ook duidelijk te zien in de temperatuur-enveloppe na dichting (zie Bijlage 3.6). Door de dichting is dit uitstroomgat gestopt met afvoeren waardoor de indringing van de atmosferische temperatuur niet wordt verstoord door snelle opwaartse stroming. Deze metingen tonen aan dat het dichten van wellen zich inderdaad uit in de toename van de temperatuurfluctuatie. Ook voor wel 2 lijkt de temperatuurfluctuatie iets toe te nemen maar in mindere mate.

In bijlage 3.5 zijn de tijdreeksen van de temperatuur weergegeven voor de periode tijdens dichten. Voor locatie A is duidelijk de injectieproef met warm water ter bepaling van de afstand van de te plaatsen injectiebuizen te zien (zie Blauw, 2010). De toegenomen temperatuur is ook nog in het meetpunt tussen wel 1 en 2 te zien. Dit kan alleen worden verklaard als er ook een vorm van preferente stroming rond dat meetpunt plaatsvindt. Voor locatie B en C is een toename van de temperatuur zichtbaar als gevolg van de uitharding van de injectievloeistof waarbij warmte vrijkomt.

4 Conclusies en aanbevelingen

Hydrologische effecten van een wel

- De meetresultaten laten zien dat een wel een verlagend effect heeft op de stijghoogte van het eerste watervoerend pakket: voor locatie A ongeveer 10-12 cm, voor locatie B ongeveer 6-8 cm en 15-30 cm voor locatie C.
- De totale weldebieten (verschillende uitstroomgaten samen) variëren van 4 tot 25 m³/d.
- Het upconingseffect, dat wil zeggen het dieper en daardoor zouter grondwater aantrekken, is voor locatie A en B duidelijk waargenomen in de elektrische sonderingen en de grondwaterkwaliteitsmetingen.
- Wellen kunnen worden gezien als kleine grondwateronttrekkingen gezien hun effect op de stijghoogte en upconing van dieper grondwater.
- Een toename van het weldebiëet voor locatie A ging gepaard met een toename van het zoutgehalte van het welwater.
- De verticale opwaartse stroming door wellen verhindert de indringing van de atmosferische temperatuur waardoor een relatief constante temperatuur-diepte profiel wordt gemeten van ongeveer 10.5 tot 11.5 graden.
- Onderwater wellen laten zich goed opsporen door temperatuur metingen d.m.v. een glasvezelkabel in een sloot en temperatuur prikstokmetingen.

Meetbare effecten van het dichten van wellen

- Bij locatie C is geen effect gemeten als gevolg van de dichtingspoging.
- Voor locatie B is het wel-debiëet significant afgenomen (met 50%) als gevolg van de dichtingspoging. Ook de diepte-temperatuur profiel in de wel toont een kleine afname van de opwaartse snelheid aan.
- Voor locatie A is duidelijk aangetoond dat de uitstroomopening van een wel kan worden gedicht met het injecteren van een uithardende vloeistof. Het debiëet van verschillende uitstroomopeningen is gereduceerd tot nul. Dit heeft zich ook heel duidelijk geuit in de toename van de bodemtemperatuur-fluctuatie met de diepte en een toename van de stijghoogte ter plaatse van de wel. Echter, het totale debiëet van de wel(len) kon niet tot nul worden gereduceerd omdat door de dichtingspoging zijn nieuwe wellen / uitstroomopeningen ontstaan.

Relatie geohydrologische opbouw en dichten van wellen

- De geohydrologische opbouw heeft een duidelijke invloed op het ontstaan van wellen, het type wel en de haalbaarheid tot dichten van een wel.
- De geohydrologische opbouw van locatie C kenmerkt zich door het ontbreken van een afsluitende slecht doorlatende laag waardoor de wellen geen discrete pijpen vormen maar diffuus in een zone van ongeveer 40 meter in de sloot uittreden. De wellen schijnen zich regelmatig te verplaatsten tijdens veranderingen van de luchtdruk. Hierdoor is het vrijwel onmogelijk om met de bestaande methoden de wellen te dichten, ofwel kwelflux te reduceren.
- Op locatie B komt op 6 meter diepte een zandbaan voor die de kans op het ontstaan van wellen vergroot. Vanaf de top van de zandbaan vormen de wellen discrete pijpen door een slecht doorlatend pakket van zandige klei en veen. De wel bleek echter veel uitstroomgaten te hebben en het is onbekend hoe deze precies in de Holocene deklaag lopen, waar ze zich vertakken en waar de bron ofwel het contact met het eerste watervoerende pakket zit en of er dit meerdere zijn. De uitstroomgaten zijn meestal niet

zichtbaar (onderwater of ergens in uitgezakte slootoever) wat het dichten van de wellen bemoeilijkt.

- Locatie A kenmerkt zich door een slecht doorlatende deklaag van 6 meter dik met een stijghoogte van ongeveer 1.5 m boven maaiveld. Het opbarstingsrisico is in dit deel van Haarlemmermeer zeer hoog waardoor er zelfs wellen op het land zijn ontstaan. Daardoor zijn de uitstroomgaten heel goed te zien zodat het dichten van de wel makkelijker maakt. De uitstroomgaten konden daarom goed worden gedicht.

Het ontstaan van nieuwe wellen / uitstroomgaten

- Een groot vooraf erkend risico van het dichten van wellen, was het ontstaan van nieuwe wellen in de directe omgeving. Voor locatie A is duidelijk waargenomen dat er nieuwe uitstroomgaten zijn ontstaan als gevolg van het dichten van de wel.
- Echter, door het dichten van een wel of uitstroomopening neemt het opbarstingsgevaar niet significant toe, immers de stijghoogte neemt slechts 10 tot 20 cm toe als gevolg van de dichting, en dit bij een overdruk van 1.5 tot 2.5 meter. Het ontstaan van nieuwe uitstroomgaten bij het dichten van wellen moet daarom een andere oorzaak hebben en dat zal hieronder kort worden toegelicht.
- Dit feit samen met de waarnemingen die tijdens de 2^e dichtingspoging bij locatie A zijn gedaan, hebben het ontstaan / concept / werking van een wel beter doen begrijpen.
- Het ontstaan en werking van een natuurlijke wel met verschillende uitstroomgaten: Het opbarsten van de deklaag vindt plaats over een zone van enkele meters tot tientallen meters. Zoals in de literatuur staat beschreven wordt de bodem opgeheven (heaving) (hoeft slechts enkele centimeters/decimeters te zijn) waarna overal in de deklaag scheuren ontstaan (cracking), het opbarsten van de deklaag. Deze scheuren zijn potentiële wellen wanneer ze kortsluiting maken met het eerste watervoerend pakket. Door erosie kunnen de scheuren groter worden. De opengebarsten deklaag bestaat dus vermoedelijk uit een groot aantal scheuren die willekeurig wel of niet met elkaar in verbinding staan en waar wel of geen water doorheen stroomt. Bij het dichten van de wel wordt vermoedelijk niet de bron gedicht maar één van de scheuren waar doorheen het water naar het oppervlak stroomt (één van de uitstroomgaten). Na het dichten blijft de bron water leveren en het water dat onder druk staat, zal zich een weg zoeken via bestaande scheuren in de zwakke zone. Bestaande uitstroomopeningen gaan meer afvoeren of er ontstaan nieuwe in bestaande scheuren. Het dichten van een wel heeft dus geen opbarsting van de deklaag tot gevolg zoals de opbarstingsberekeningen ook al deden vermoeden, maar het stromen en (her)openen van bestaande scheuren. Een wel wordt dus gekenmerkt door een zwakke zone van enkele (tientallen) meters waar de deklaag bestaat uit scheuren. Het dichten van een wel is dan ook alleen succesvol als deze gehele zwakke zone wordt aangepakt.
- Een natuurlijke wel die is ontstaan door opbarsting van de deklaag is grillig, kent veel scheuren die zich tot uitstroomgat hebben ontwikkeld of nog kunnen ontwikkelen. Dit in tegenstelling tot kunstmatige wellen die zijn ontstaan door bijv. boringen of damwanden in de deklaag.

Praktische haalbaarheid van het dichten van wellen lijkt klein

- De dichtingsmethode biosealing zoals uitgevoerd voor locatie A heeft aangetoond effectief het debiet door de wellen te reduceren. Echter, er kleven een paar praktische bezwaren aan de huidige toepassing. Ten eerste dienen er injectiebuizen door de deklaag te worden geplaatst om de voedingstoffen onder het lek te brengen. Deze injectiebuizen vormen weer open verbindingen met het eerste watervoerende pakket en dienen alsnog met uithardende gels te worden gedicht na dichting van de wel. Ten tweede duurt het enkele weken voordat de dichting in werking treedt en gedurende die

tijd dient er regelmatig nutrolase te worden geïnjecteerd. Dit is vooralsnog een arbeidsintensieve activiteit die in de toekomst kan worden geautomatiseerd. Het trage dichten (het groeien van bacteriën en verstopt raken van de lekken) kan echter ook een voordeel zijn bij het in zijn geheel dichten van een zwakke zone (met scheuren en nieuw ontstane uitstroomopeningen).

- De dichtingsmethode met uithardende gels heeft het grote voordeel dat direct resultaat zichtbaar is. De locatie van injecteren kan continu worden aangepast.
- Voor beide methoden geldt dat uitstroomgaten vaak niet zichtbaar zijn (onder water, uitgezakte oevers) en dat bemoeilijkt het dichten van wellen en reduceert de kans op succes.
- Wellen liggen vaak in de sloten van agrarische percelen en zijn daardoor vaak lastig te bereiken.
- De geohydrologische situatie is van groot belang voor de kansrijkheid van het dichten van wellen. Het ontbreken van een afsluitende slechtdoorlatende laag zoals bij locatie C waarin wellen zich kunnen ontwikkelen als smalle pijpen, maakt het dichten vrijwel onmogelijk met de huidige dichtingsmethoden.
- Het ontstaan van nieuwe uitstroomgaten is een groot probleem bij het dichten van wellen. Dit punt weegt zwaar bij de overweging om wellen te gaan dichten als maatregel om verzilting van het oppervlaktewater door kwel tegen te gaan.
- Ondanks het feit dat het dichten van wellen de meest effectieve en goedkope maatregel zou moeten zijn om verzilting tegen te gaan, moet op basis van de veldproeven worden geconcludeerd dat dit geen haalbare praktisch uitvoerbare maatregel is. De grootste bezwaren zijn het ontstaan van nieuwe uitstroomgaten en praktische bezwaren zoals o.a. de bereikbaarheid van de wel, en het niet zichtbaar zijn van de meeste uitstroomgaten.

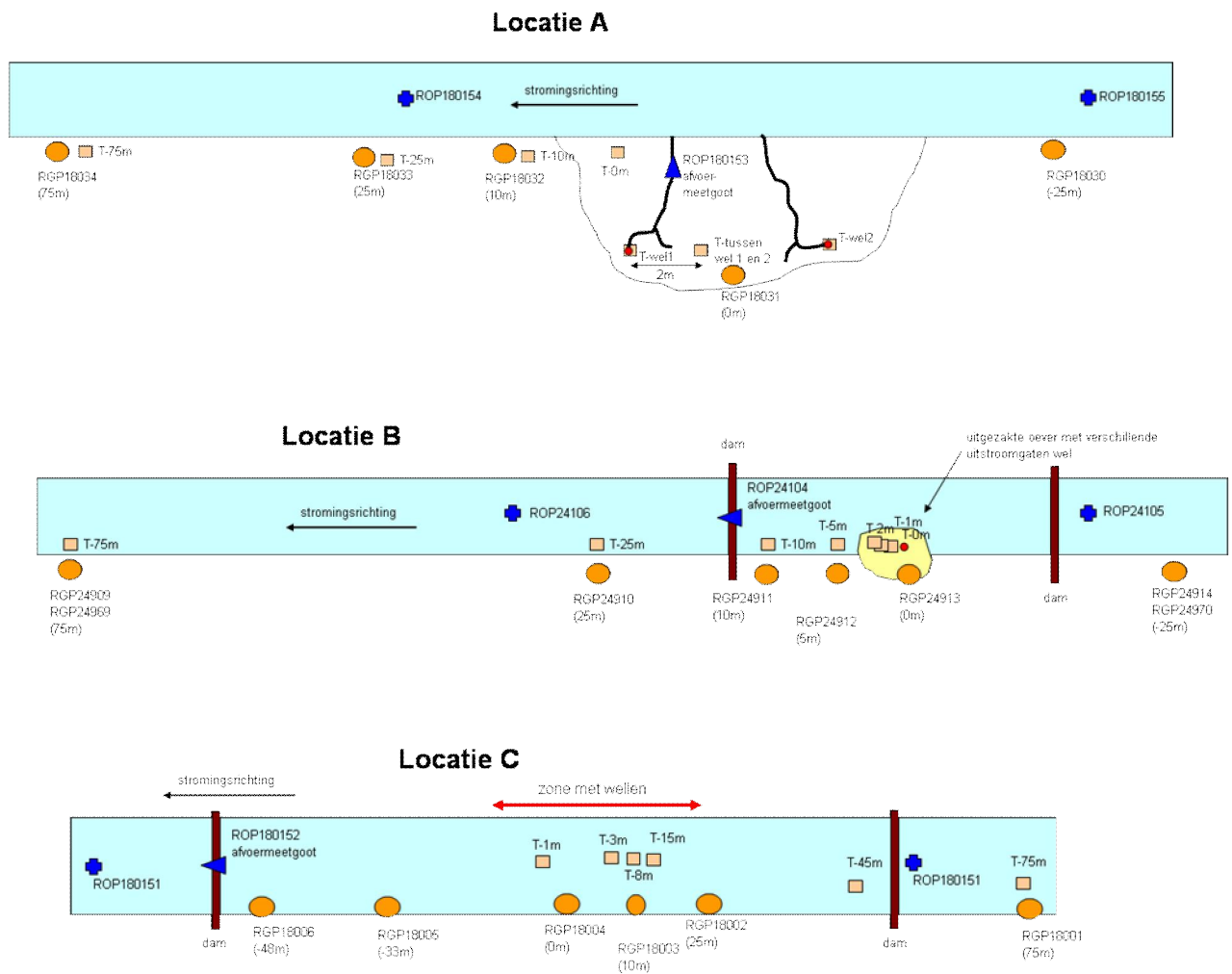
Aanbevelingen

- Er wordt aanbevolen om het dichten van natuurlijke wellen niet als kansrijke maatregel tegen verzilting in te zetten.
- Echter, het trekken van damwanden, peilbuizen of andere elementen uit de Holocene deklaag in de diepe polders dient altijd gepaard te gaan met het direct dichten van het ontstane gat. Hiervoor zijn uithardende gels het meest geschikt. De kans op het ontstaan op nieuwe wellen is klein door afwezigheid van een zwakke deklaag met scheuren, zoals het geval is bij natuurlijke wellen.
- Het feit dat wellen voor meer dan de helft aan de verzilting van het oppervlaktewater van de diepe polders bijdragen, pleit voor aanpak van de zoute wellen ter bestrijding van de verzilting. Afhankelijk van de situatie kunnen de volgende combinaties van maatregelen/ideeën zinvol zijn:
 - 1 peilopzet welrijke sloten (bij een niet te groot stijghoogteverschil tussen WVP1 en slootpeil);
 - 2 welrijke sloten / peilvakken isoleren en gescheiden afvoeren en/of ontzilten;
 - 3 welrijke sloten dicht gooien en ontwateringsfunctie behouden door grote drainagebuis;
 - 4 welrijke sloten dicht gooien en afvoerfunctie behouden door grote dichte buis;
 - 5 zoete en zoute sloten van elkaar scheiden en gescheiden op boezem uitslaan i.c.m. 6
 - 6 sturen op zout; bijv. zout welwater (slootwater) tijdelijk bergen (in haarvaten en bassins) en tijdens natte perioden op de boezem uitslaan wanneer het zoutconcentratie laag;
 - 7 zuiveren/ ontzilten bij gebruiker;
 - 8 concentreer op de zoete, welarme sloten en dit water bij de eindgebruiker brengen.

5 Referenties

- Griffioen, J., De Louw, P.G.B., Boogaard, H.L., Hendriks, R.F.A., 2002. De achtergrondbelasting van het oppervlaktewater met N, P and Cl door grondwater kwel en mineralisatie van veen in centraal-west Nederland. TNO report NITG 02-166-A.
- De Louw, P.G.B., 2007. Brakke kwel in diepe polders: Case Polder de Noordplas. In: NHV-special nr. 7: Verzilting in Nederland.
- De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P. en Maljaars, P. 2007: Achtergrondstudie kwelreductietechnieken, TNO rapport 2007-U-R0357/B, 82 p., april 2007
- De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., Stuyfzand, P.J., Van der Zee, S.E.A.T.M., 2010. Upward groundwater flow in boils as the dominant mechanism of salinization in deep polders, The Netherlands. *Journal of Hydrology*, 394, 494-506.
- De Louw, P.G.B., Van de Velde, Y., Van der Zee, S.E.A.T.M. 2011. Quantifying water and salt fluxes in a lowland polder catchment dominated by boil seepage: a probabilistic end-member mixing approach, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 2101-2117, 2011.
- De Louw, P.G.B., R. Bakkum, Folkerts, H. Van Hardeveld, 2004. Het Effect van waterbeheer op de chloride- en nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater in Polder de Noordplas. Syntheserapport: Definitieve water- en stoffenbalans en effecten van verschillende waterbeheerscenario's. TNO-rapport NITG 04-241-B1213.
- Goudriaan, R. P.G.B. de Louw, M. Kramer, 2011. Lokaliseren van zoute wellen in de Haarlemmermeerpolder H2O-03-2011, pp 29-32.
- Oude Essink, G.H.P., Baaren, E., van & Vliet, M. van, 2008. Verkennende studie klimaatverandering en verzilting grondwater in Zuid-Holland, Deltares-rapport 2008-U-R0322/A, 60 p.
- Oude Essink, G. H. P., Baaren, E. S., and De Louw, P. G. B., 2010. Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands, *Water Resour. Res.*, 46, W00F04, doi:10.1029/2009WR008719.

Bijlage 2.1 Meetnetinrichting verschillende locaties



Legenda

- peilbuis eerste watervoerend pakket (filterdiepte loc A = 6.5m diepte, filterdiepte Loc B = 7.5m diepte, filterdiepte loc C = 3m diepte)
- temperatuurstok (tot 3.5 m diepte)
- oppervlaktewatermeetpunt
- oppervlaktewatermeetpunt meetgoot
- wel

Bijlage 2.2 Temperatuurmetingen met glasvezelkabels

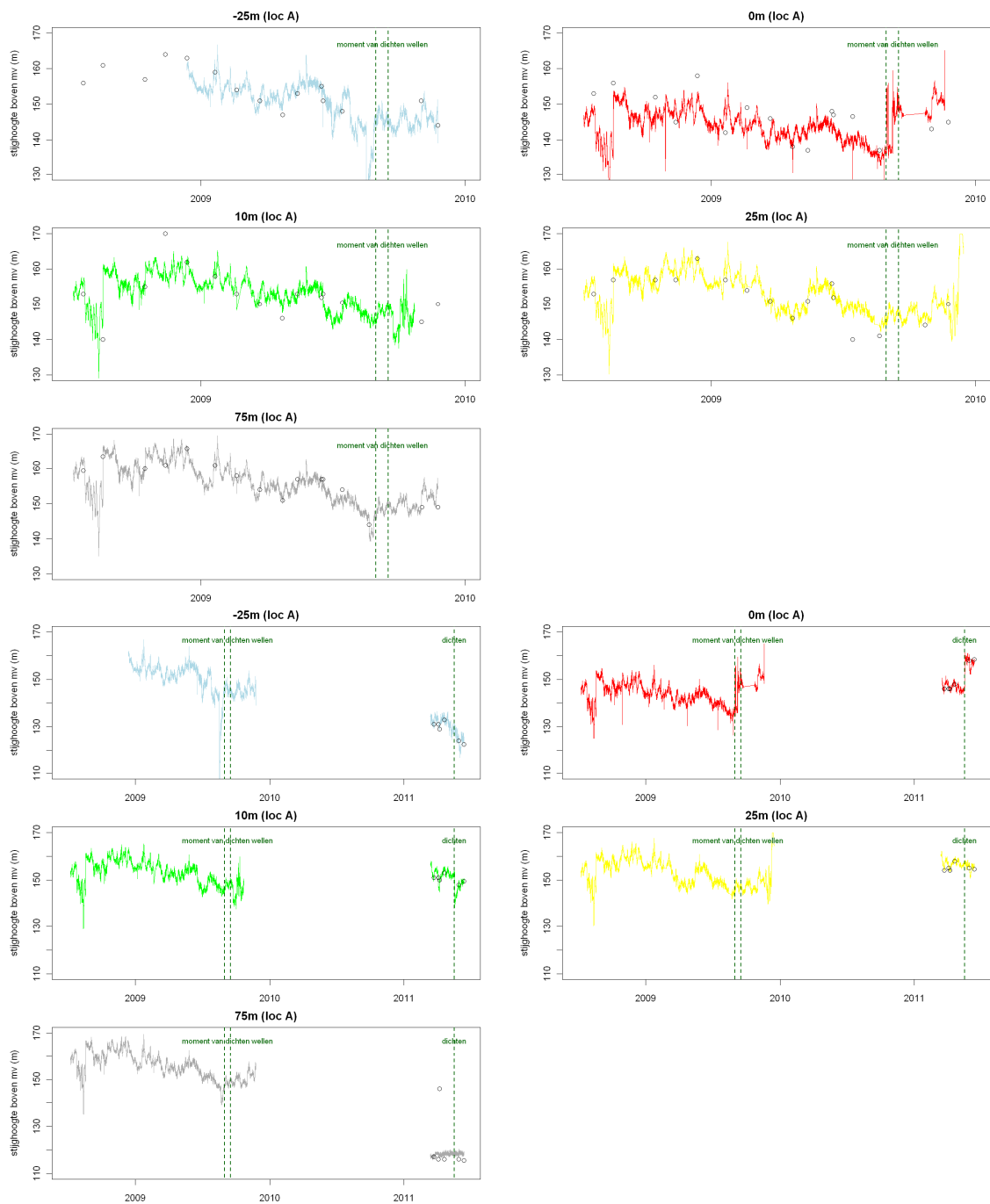
De temperatuur van standaard glasvezelkabels kan tot 30 kilometer elke meter om de 15 seconden worden uitgelezen met gebruik van Distributed Temperature Sensing (DTS). Met langere integratie tijden (30 minuten) kunnen metingen een precisie behalen van 0.01 graden Celsius.

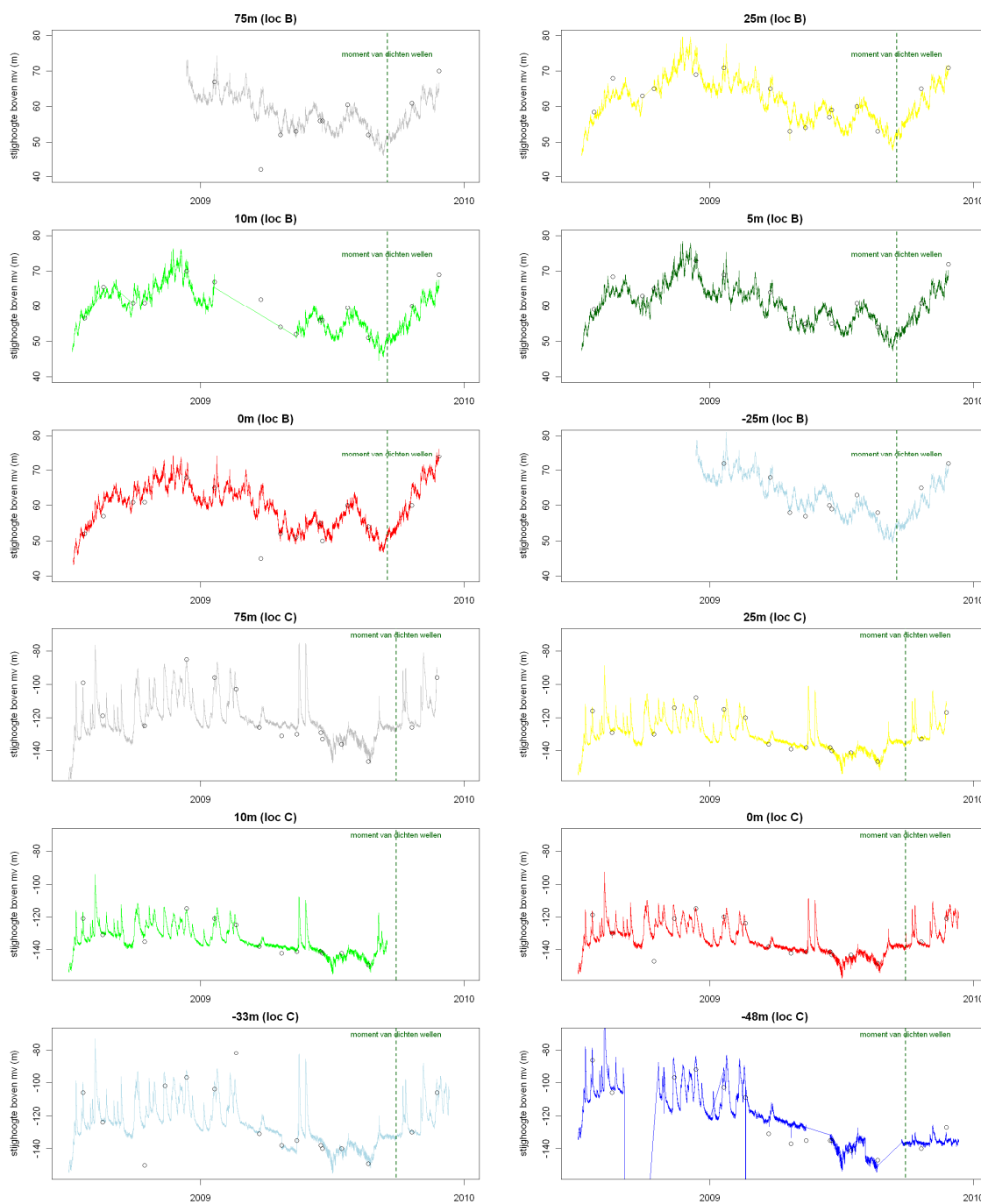
Het DTS instrument zendt licht pulsen door de glasvezel en een deel van het licht is verstrooid. Een klein deel van dit verstrooide licht komt terug door de glasvezel bij het DTS apparaat en wordt door een optische sensor opgeslagen. Gebaseerd op de aankomsttijden van de fotonen en de snelheid berekent het DTS apparaat de exacte locatie van waar de fotonen waren verstrooid. Vervolgens gebruikt de DTS de aankomsttijden and de eigenschappen van de terugkomende fotonen om de temperatuur te berekenen in de glasvezelkabel (Christopher, 2009; Vogt et al., 2009).

Verschillende technieken maken gebruik van een DTS technologie om temperaturen te bepalen door analyse van teruggekaatste fotonen. Raman gebaseerde systemen, zoals gebruikt in dit onderzoek, maken gebruik van de Raman verstrooiing die optreedt als het licht door de glasvezel gaat. Niet al het licht wordt elastisch verstrooid (op dezelfde frequentie als het inkomende licht), wat komt door excitatie in de moleculen. Deze frequentie verschuiving gebeurt bij lagere en hogere frequentie dan het inkomende licht. De lagere frequentie verschuiving wordt de Stokes backscatter genoemd en bij de hogere frequentie de Anti-stokes backscattered. De verschuiving bij de hogere frequentie is temperatuur afhankelijk. Wanneer gebruik wordt gemaakt van de Stokes en Anti-stokes intensiteiten kan de temperatuur in de glasvezelkabel heel precies berekend worden (Christopher, 2009; Vogt et al., 2009).

Het onderzoek werd uitgevoerd met een Oryx DTS systeem van SensorNet (www.sensornet.co.uk).

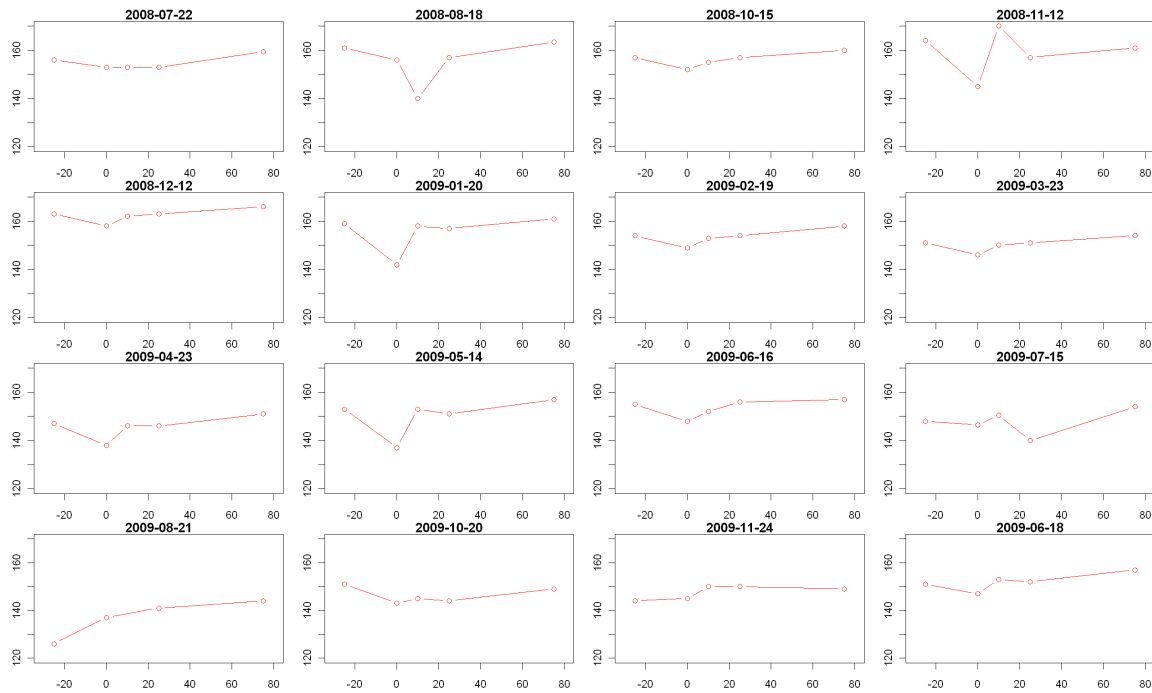
Bijlage 3.1 Vergelijking handmeting met diver-metingen



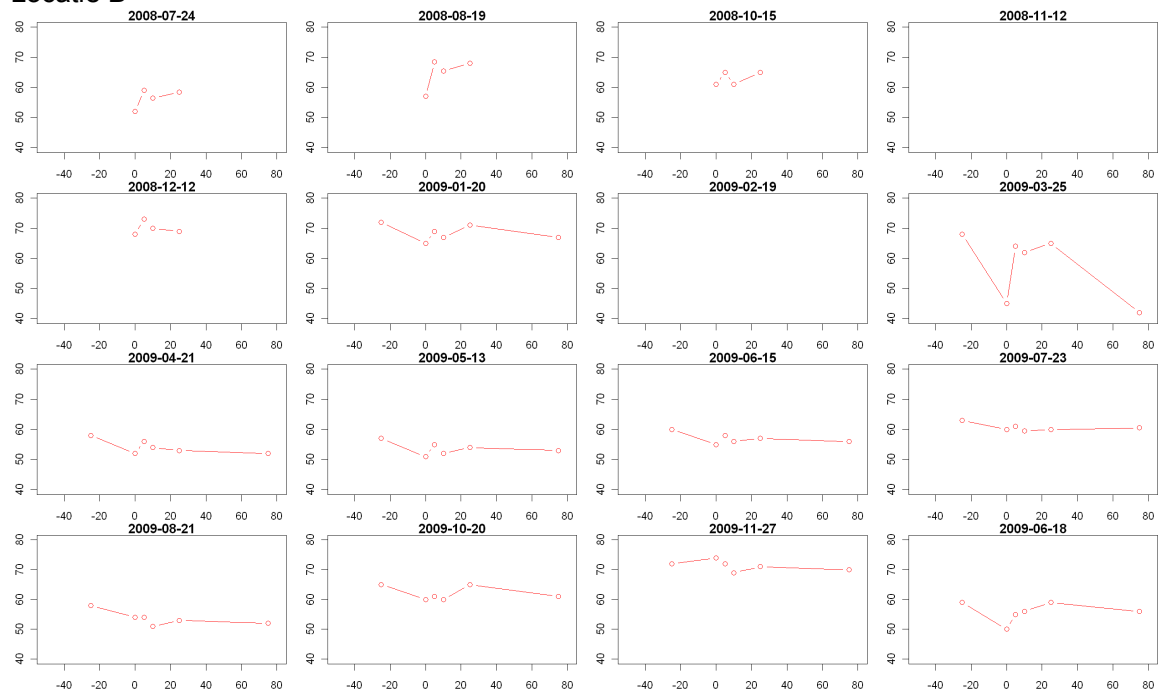


Bijlage 3.2 Afstand-stijghoogte profielen o.b.v. handmetingen

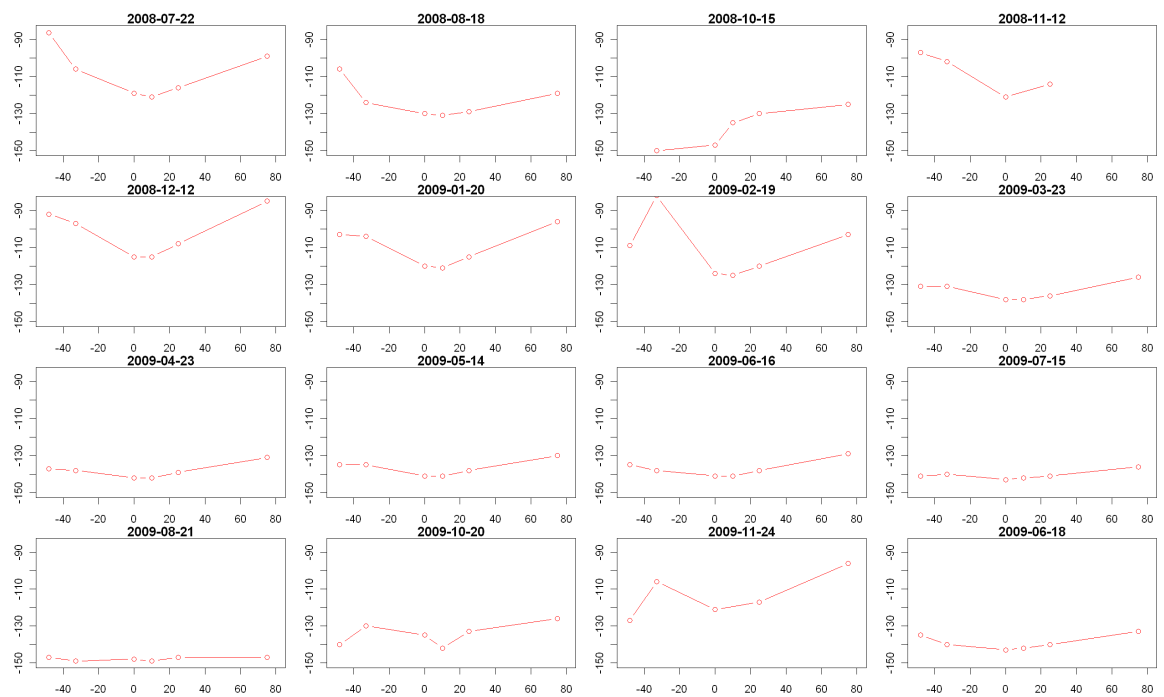
Locatie A



Locatie B



Locatie C



Bijlage 3.3 Chemische samenstelling wel-, grond- en oppervlaktewater

Samenstelling van het welwater in mg/l (18 juni 2009).

	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	HCO3	Cl	NH4	PO4	SO4
Locatie A, wel1 (zie Fig. 3.4)	547	37	79	70	5.7	0.3	898	757	23	8.5	<0.5
Locatie A, wel2 (zie Fig. 3.4)	797	42	114	95	8.1	0.3	974	1277	22	8.7	<0.5
Locatie A, wel3 (zie Fig. 3.4)	454	37	69	64	4.0	0.3	835	598	24	4.9	<0.5
Locatie B, wel (uitstroomgat 1)	550	124	158	92	5.0	0.6	1265	1085	43	0.2	5.9
Locatie B, wel (uitstroomgat 2)	600	137	172	101	16.8	0.7			43	4.9	
Locatie C, wel (water onder slootbodern)	1810	21	876	203	39.8	5.3	256	4801	20	2.0	237.1

- Voor locatie A konden de watermonsters direct uit de wel worden getapt (zie voor locatie Figuur 3.4).
- Voor locatie B is water genomen uit plasje op de uitgezakte sloot-oeverwand, aangeduid met uitstroomgat 1 en 2.
- Voor locatie C is een smalle buis (diameter 15 cm) ongeveer 20 cm de slootbodern ingedrukt, ter hoogte van temperatuurstok 0 m. Nadat de buis met kwelwater was gevuld is een monster genomen.

Hierna volgen de samenstelling van grond- en oppervlaktewater voor de verschillende locaties.

LOCATIE A

	Grondwater WVP1, direct onder deklaag					
	75 m van wel		ter hoogte van wel		-25 m van wel	
	RGP18034 18-8-2008	RGP18034 29-10-2008	RGP18031 18-8-2008	RGP18031 29-10-2008	RGP18030 18-8-2008	RGP18030 29-10-2008
AMMONIUM-N	28	22	7.1	11	22	26
NITRAAT-N + NITRIET-N	<0.06	<0.06	0.25	<0.06	0.17	<0.06
FOSFAAT P-ORTHO				<0.03		
FOSFAAT P-TOTAAL	4.3	3.4	0.85	1.1	3.6	3.5
CHLORIDE	370	390	490	760	390	410
SULFAAT	11	16	21	<10	<10	<10
WATERSTOFCARBONAAT	990	790	590	840	880	920
STIKSTOF-TOTAAL	32	26	8.7	13	24	29
CALCIUM	78	59	71	66	60	66
KALIUM	35	32	30	27	33	32
MAGNESIUM	82	65	63	61	67	72
NATRIUM	320	290	650	550	350	310
IJZER	95	4.5	0.33	75	5.3	0.71

Oppervlaktewater

	ROP180155 Haarlemmermeer; perceel Steenwijk stroom op van wel					
	22-Jul-08	5-Aug-08	18-Aug-08	29-Sep-08	15-Oct-08	24-Mar-09
AMMONIUM-N	1.7	5.9	5	11	1.1	7.3
NITRAAT-N + NITRIET-N	3.6	1.7	1.8	0.2	2.6	1.7
NITRIET-N	0.02	0.046	0.058	0.02	0.026	
FOSFAAT P-ORTHO	1.4	1.4	1.2	0.49	0.58	0.21
FOSFAAT P-TOTAAL	1.9	2.9	2.8	2.2	1.8	1
CHLORIDE					130	830
SULFAAT	540	240	280	32	570	180
WATERSTOFCARBONAAT	500	740	540	1000	480	780
STIKSTOF-TOTAAL	6.2	10	8.9	14	5.4	12
CALCIUM	280	180	220	120	290	140
KALIUM	21	23	20	34	19	29
MAGNESIUM	48	66	64	92	49	81
NATRIUM	87	430	380	870	86	64
IJZER	3.7	3.2	5.9	8	2.4	8.8
NITRAAT-N	3.6	1.7	1.7	0.2	2.5	

	ROP180153 Haarlemmermeer; perceel Steenwijk; in afvoergoot wel					
	22-7-2008	8-May-08	18-8-2008	29-9-2008	15-10-2008	24-3-2009
AMMONIUM-N	12	14	13	13	14	3.7
NITRAAT-N + NITRIET-N	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	3.6
FOSFAAT P-ORTHO	0.98	1	0.82	0.62	0.7	0.14
FOSFAAT P-TOTAAL	2.9	4.8	2.8	5.3	3.5	0.4
CHLORIDE	830	820	850	850	820	440
SULFAAT	<10	<10	<10	<10	<10	370
WATERSTOFCARBONAAT	960	940	810	970	950	510
STIKSTOF-TOTAAL	16	16	15	17	17	9.3
CALCIUM	84	85	83	85	82	190
KALIUM	21	32	31	33	30	24
MAGNESIUM	73	73	70	75	70	66
NATRIUM	87	620	660	630	620	330
IJZER	7	5.3	4.8	13	7.6	2.4

	ROP180154 Haarlemmermeer; Perceel Steenwijk; Stroom af van wel					
	22-7-2008	8-May-08	18-8-2008	29-9-2008	15-10-2008	24-3-2009
AMMONIUM-N	3.2	4.9	6.7	11	9.3	6.7
NITRAAT-N + NITRIET-N	14	2.5	0.61	0.25	0.41	2.1
FOSFAAT P-ORTHO	0.11	0.63	0.81	0.74	0.15	0.14
FOSFAAT P-TOTAAL	0.28	1.3	2.6	2.2	1.7	0.59
CHLORIDE	400	730	910	1100	910	760
SULFAAT	570	250	150	44	160	220
WATERSTOFCARBONAAT	450	750	770	970	840	730
STIKSTOF-TOTAAL	19	10	9.5	15	11	12
CALCIUM	250	160	150	110	160	150
KALIUM	16	25	26	33	28	28
MAGNESIUM	66	74	76	88	77	78
NATRIUM	260	540	610	800	620	560
IJZER	1.1	3.9	47	7.6	7.4	5.4

LOCATIE B

	Grondwater WVP1, direct onder deklaag					
	75 m van wel		ter hoogte van wel		-25 m van wel	
	RGP24909 19-8-2008	RGP24909 29-10-2008	RGP24913 19-8-2008	RGP24913 29-10-2008	RGP24914 19-8-2008	RGP24914 29-10-2008
AMMONIUM-N	22	15	26	16	36	30
NITRAAT-N + NITRIET-N	0.17	<0.06	0.14	<0.06	0.15	<0.06
FOSFAAT P-ORTHO		0.88		<0.03		<0.03
FOSFAAT P-TOTAAL	2.9	2	2.2	1.7	6.1	2.1
CHLORIDE	460	430	610	600	400	410
SULFAAT	<10	<10	<10	<10	<10	<10
WATERSTOF CARBONAAT	1100	860	1300	1100	1300	1200
STIKSTOF-TOTAAL	26	18	29	18	39	32
CALCIUM	110	79	160	140	140	140
KALIUM	46	28	34	30	37	34
MAGNESIUM	100	86	89	89	96	94
NATRIUM	350	280	480	440	330	290
IJZER	4.1	3	25	16	24	

	Oppervlaktewater					
	Gelderwoudsepolder; perceel Dorrepaal; midden op wel					
	24-7-2008	5/8/2008	19-8-2008	29-9-2008	15-10-2008	25-3-2009
AMMONIUM-N	22	23	23	24	24	17
NITRAAT-N + NITRIET-N	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
FOSFAAT P-ORTHO	<0.02	<0.02	<0.02	0.05	<0.02	<0.02
FOSFAAT P-TOTAAL	3	1.3	3.8	2.5	3.1	1.4
CHLORIDE	1100	1000	1100	1100	940	900
SULFAAT	<10	<10	<10	<10	<10	<10
WATERSTOF CARBONAAT	1100	1100	1100	1100	1100	1000
STIKSTOF-TOTAAL	28	26	26	28	28	23
CALCIUM	210	210	200	210	190	200
KALIUM	34	34	33	36	32	32
MAGNESIUM	95	94	91	97	89	89
NATRIUM	620	580	630	640	590	590
IJZER	40	26	29	23	27	19

	Gelderwoudsepolder; perceel Dorrepaal; stroomopwaarts van wel					
	24-7-2008	5/8/2008	19-8-2008	29-9-2008	15-10-2008	25-3-2009
AMMONIUM-N	0.23	0.21	0.72	2.1	5.1	0.4
NITRAAT-N + NITRIET-N	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	0.38
FOSFAAT P-ORTHO	0.7	0.34	1	1.5	2.7	0.23
FOSFAAT P-TOTAAL	1.1	0.76	1.5	1.8	3.3	0.44
CHLORIDE	370	380	280	290	180	140
SULFAAT	100	120	120	140	300	290
WATERSTOF CARBONAAT	310	360	350	450	540	470
STIKSTOF-TOTAAL	2.2	2	3.3	5.4	9	2.8
CALCIUM	130	150	140	170	220	200
KALIUM	13	13	13	18	14	9.9
MAGNESIUM	32	33	31	43	44	44
NATRIUM	180	180	140	160	95	90
IJZER	1.5	0.64	2.6	0.88	2.1	0.86

	Gelderwoudsepolder; perceel Dorrepaal; stroomafwaarts van wel					
	24-7-2008	5/8/2008	20-8-2008	29-9-2008	15-10-2008	25-3-2009
AMMONIUM-N	2	3.2	2.6	10	10	8.1
NITRAAT-N + NITRIET-N	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	0.32
FOSFAAT P-ORTHO	0.39	0.04	0.57	0.29	0.17	0.1
FOSFAAT P-TOTAAL	2.6	1.6	1.2	1.8	2.9	0.59
CHLORIDE	420	460	320	600	410	430
SULFAAT	97	100	120	88	200	180
WATERSTOF CARBONAAT	390	470	410	730	720	700
STIKSTOF-TOTAAL	4.7	5.4	5.1	13	14	11
CALCIUM	140	160	140	180	210	200
KALIUM	16	16	13	27	19	18
MAGNESIUM	38	43	34	66	60	61
NATRIUM	220	240	170	370	240	260
IJZER	15	9.6	4.2	8.7	9.6	4.8

LOCATIE C

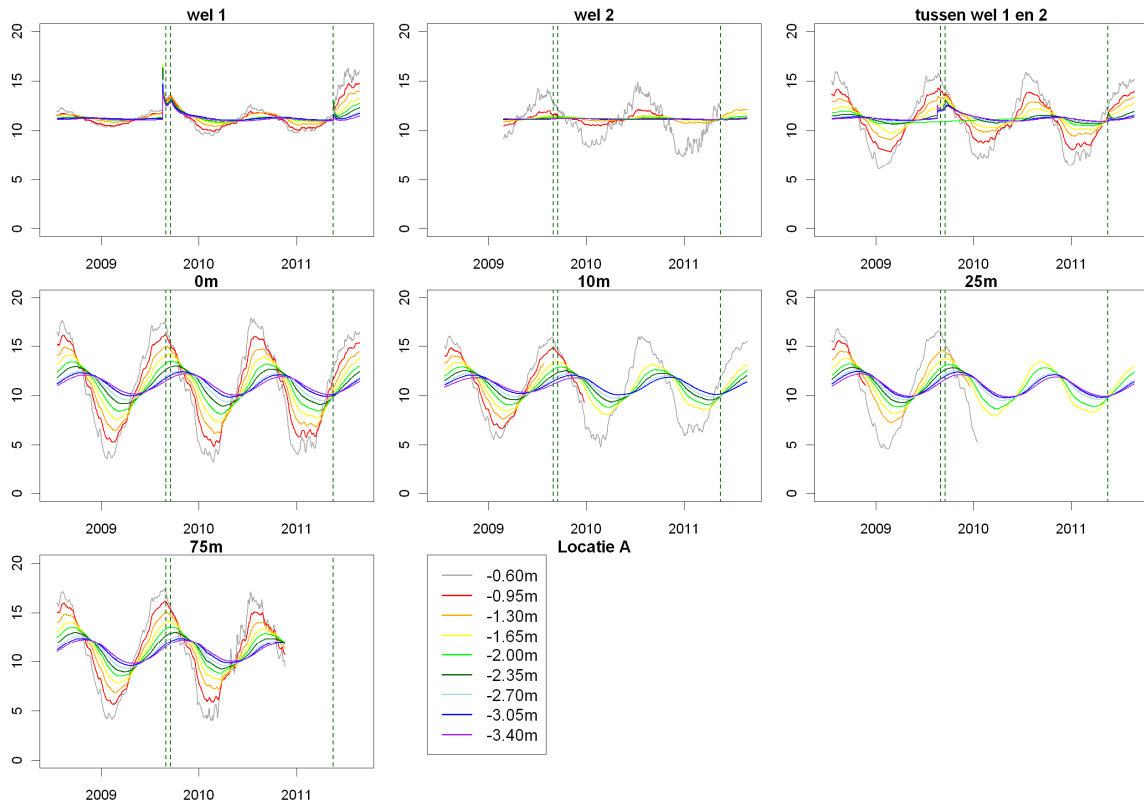
	Grondwater WVP1, direct onder deklaag					
	75 m van wel		ter hoogte van wel		-48 m van wel	
	RGP18001 18-8-2008	RGP18001 29-10-2008	RGP18004 18-8-2008	RGP18004 29-10-2008	RGP18006 18-8-2008	RGP18006 29-10-2008
AMMONIUM-N	14	9.9	14	15	13	13
NITRAAT-N + NITRIET-N	0.26	0.25	0.1	0.06	0.19	<0.06
FOSFAAT P-ORTHO		<0.03		<0.03		<0.03
FOSFAAT P-TOTAAL	1.1	2	1.9	0.91	0.8	0.94
CHLORIDE	3600	3600	4900	5000	5800	6100
SULFAAT	96	74	260	220	380	340
WATERSTOFCARBONAAT	560	420	790	560	540	570
STIKSTOF-TOTAAL	14	11	16	16	13	14
CALCIUM	740	760	990	860	850	900
KALIUM	16	15	15	14	25	24
MAGNESIUM	160	160	230	220	240	260
NATRIUM	1400	1400	2200	2200	2800	2700
IJZER	20	50	35	42	56	68

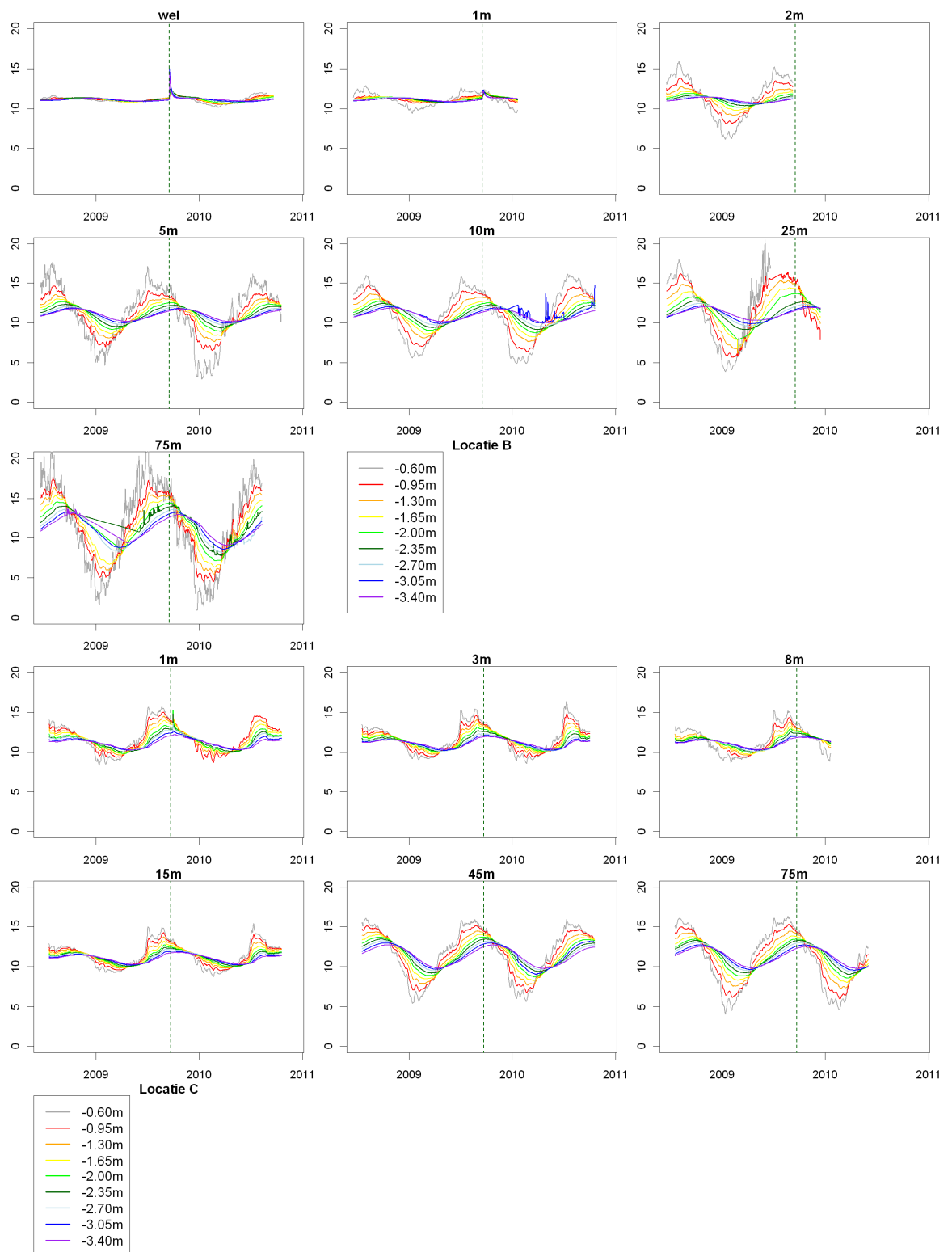
	Oppervlaktewater						
	ROP180150 Haarlemmermeer; perceel Avis; midden op wel						
	22-7-2008	5/8/2008	18-8-2008	4/9/2008	29-9-2008	15-10-2008	24-3-2009
AMMONIUM-N	8.9	14	9.2	13	14	13	12
NITRAAT-N + NITRIET-N	0.62	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
FOSFAAT P-ORTHO	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
FOSFAAT P-TOTAAL	1.1	0.61	0.96	1	0.57	0.84	0.33
CHLORIDE	2500	4000	3200	3600	3700	3700	3500
SULFAAT	91	140	120	91	93	100	160
WATERSTOFCARBONAAT	510	570	420	540	490	500	500
STIKSTOF-TOTAAL	12	15	14	16	15	16	14
CALCIUM	700	640	610	760	150	710	670
KALIUM	11	13	11	12	13	13	13
MAGNESIUM	140	150	130	200	31	150	150
NATRIUM	1200	1600	1400	1300	1400	2600	150
IJZER	37	45	48	40	21	33	24

	ROP180152 Haarlemmermeer; perceel Avis; stroomafwaards van wel						
	22-7-2008	5/8/2008	18-8-2008	4/9/2008	29-9-2008	15-10-2008	24-3-2009
AMMONIUM-N	3.9	5.7	4.9	6.9	6	5.9	8
NITRAAT-N + NITRIET-N	1	<0.2	0.21	<0.2	0.35	0.36	0.26
FOSFAAT P-ORTHO	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
FOSFAAT P-TOTAAL	0.18	0.4	0.48	18	1	0.14	0.62
CHLORIDE	1400	2000	1900	2300	2200	2000	2700
SULFAAT	140	140	130	130	140	140	160
WATERSTOFCARBONAAT	390	450	180	740	370	470	460
STIKSTOF-TOTAAL	6.4	7.5	6.1	11	8.4	8.8	10
CALCIUM	380	430	440	810	470	510	560
KALIUM	8	9.5	8.3	12	11	9.9	11
MAGNESIUM	63	82	73	140	99	100	120
NATRIUM	540	760	690	870	950	1700	68
IJZER	6	88	1.1	610	37	7.7	18

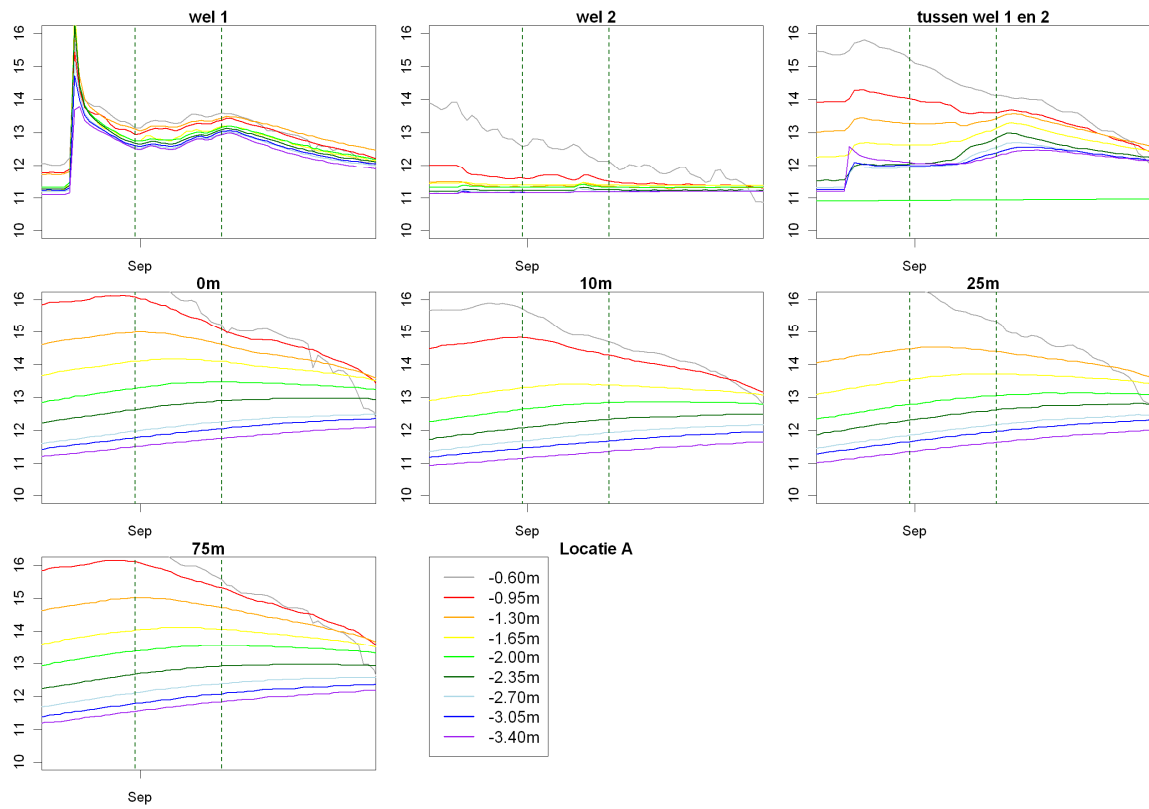
	ROP180151 Haarlemmermeer; perceel Avis; stroomopwaards van wel						
	22-7-2008	5/8/2008	18-8-2008	4/9/2008	29-9-2008	15-10-2008	24-3-2009
AMMONIUM-N	0.25	0.5	0.7	0.55	2.1	2.9	2.3
NITRAAT-N + NITRIET-N	2.2	0.68	0.31	0.34	0.47	0.24	0.31
FOSFAAT P-ORTHO	0.28	0.05	<0.02	0.02	0.02	<0.02	<0.02
FOSFAAT P-TOTAAL	0.44	0.16	0.12	0.1	0.25	0.95	0.09
CHLORIDE	240	400	480	330	880	1000	910
SULFAAT	100	100	100	75	56	94	110
WATERSTOFCARBONAAT	290	380	230	270	270	390	390
STIKSTOF-TOTAAL	3.7	2.5	1.7	1.7	3.6	3.6	3.6
CALCIUM	180	220	250	180	240	340	310
KALIUM	6.4	6	5.6	7.3	6.8	7.7	6.7
MAGNESIUM	13	20	22	17	41	47	46
NATRIUM	79	130	160	110	350	400	38
IJZER	1.5	1.4	1.1	0.51	4.5	16	2.4

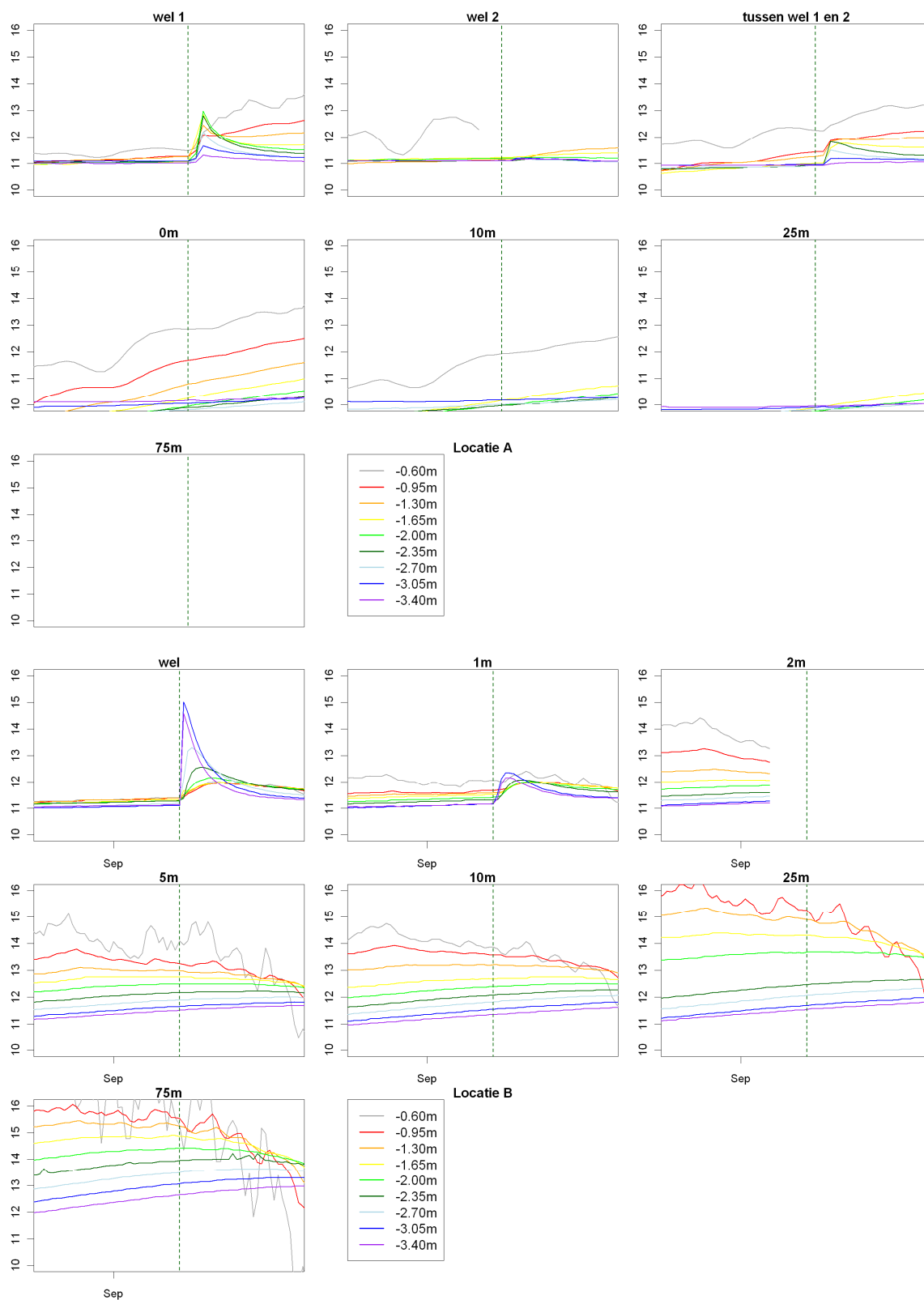
Bijlage 3.4 Tijdreeksen van bodemtemperatuur

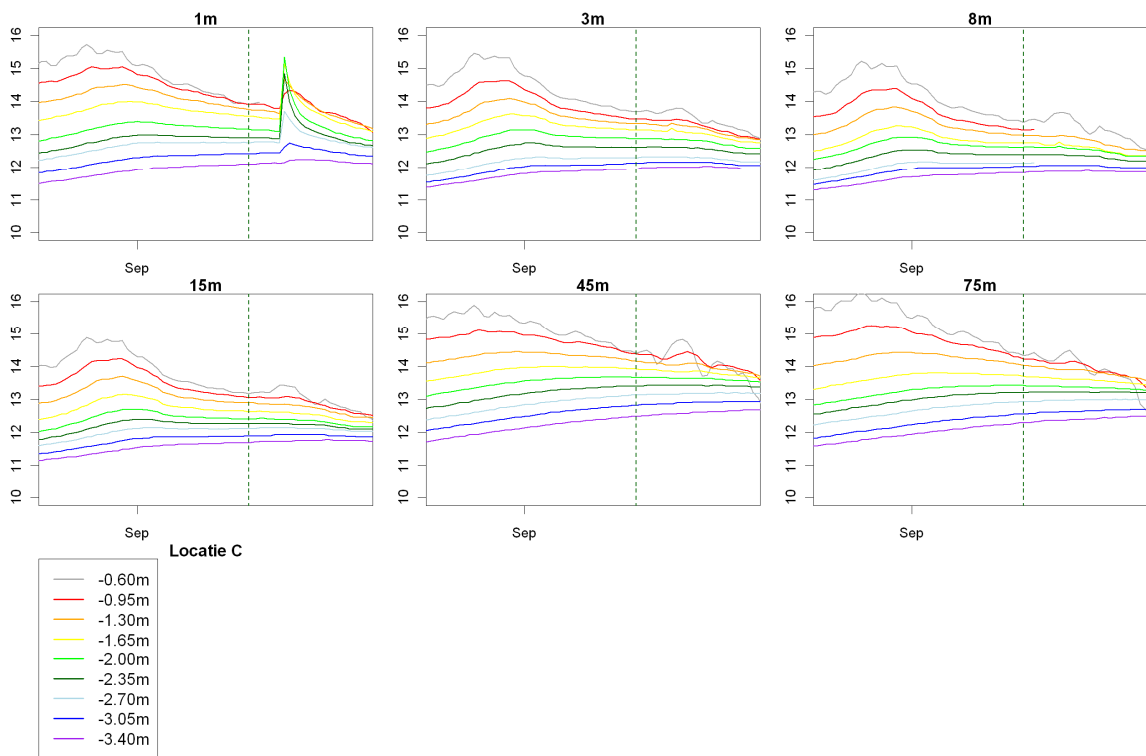




Bijlage 3.5 Tijdreeksen van bodemtemperatuur tijdens dichten







Bijlage 3.6 Temperatuur-envelopes voor en na dichten

