

**Toepasbaarheid van innovatieve
onderzoekstechnieken gericht op
grondwaterstroming in en rond dijken**

**Cases zandmeevoerende wellen Vuren en
Hurwenen**

Eindrapport 27 februari 2014



Acacia Water

Samenvatting

Onderzocht is de toepasbaarheid van innovatieve onderzoekstechnieken rond de grondwaterstroming in en rond dijken. Speciale aandacht is uitgegaan naar zandmeevoerende wellen bestaan. Deze technieken vallen onder de zogenaamde “Kijken in Dijken” benadering van Acacia Water. Stabiliteit van dijken is een van de toetssporen bij dijkinspectie. Die stabiliteit is vaak gerelateerd aan processen als zetting en afschuiving van grondlagen en grondwaterstroming door en onder de dijk. Inzicht in de opbouw van het dijklichaam, de natuurlijke geologische formaties en de grondwaterstroming eronder is daarbij van groot belang.

Voor twee locaties met wellen, Zaltbommel (Hurwenense Kil) en Gorkum (Fort Vuren), is het optreden van de wellen, de herkomst van het water en de grondwaterstroming bepaald. Hiervoor is gebruik gemaakt van innovatieve geofysische meetmethoden in combinatie met geohydrologische en geohydrochemische analyses en modelsimulaties op basis van FlexPDE.

Geofysische metingen op basis van elektrische weerstand zijn getoetst op geschiktheid om gebiedsdekkend variaties in de bodemopbouw te bepalen en verticale structuren op te sporen die verband houden met een wel.

Het hydrogeochemische onderzoek is een belangrijk hulpmiddel om de herkomst en verblijftijd van het welwater te bepalen. Deze benadering biedt perspectief voor het vaststellen van het bestaan van ‘piping’ en de mate waarin deze is voortgeschreden.

De uitgevoerde modelsimulaties geven niet alleen inzicht in grondwaterstanden en stromingsrichtingen in verzadigde én onverzadigde bodem, maar berekenen direct de drukverdeling in de tijd en effecten van een wel. Het toegepaste modelinstrumentarium biedt tevens de mogelijkheid om volledig geïntegreerd met de waterstroming de stabiliteit, deformatie, warmte- en gastransport door de bodem en dijklichaam te berekenen.

Colofon

Documenttitel	·	Toepasbaarheid van innovatieve onderzoekstechnieken gericht op grondwaterstroming in en rond dijken
Opdrachtgever	·	Waterschap Rivierenland
Status	·	Eindrapport
Datum	·	27 februari 2014
Projectnummer	·	N20140552
Projectteam	·	Koos Groen, Jouke Velstra, Sieger Burger en Michel Groen

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	Kijken in Dijken	1
1.3	Doel van het onderzoek	2
2	Locatiebeschrijving	3
2.1	Fort Vuren	3
2.2	Hurwenense Kil.....	4
3	Meetmethoden en aanpak.....	6
3.1	Geofysische metingen	6
3.2	Hydrogeochemische analyses.....	7
3.3	Grondwaterstanden en -stijghoogten.....	7
3.4	Numerieke simulatie van de grondwaterstroming	7
3.5	Overige metingen	8
4	Resultaten Hurwenense Kil	9
4.1	Inleiding	9
4.2	Geofysische metingen	9
4.3	Berekeningen met een gedetailleerd grondwatermodel.....	12
4.3.1	Modelschematisatie	12
4.3.2	Modelresultaten	14
5	Resultaten Fort Vuren	16
5.1	Inleiding	16
5.2	Geofysische metingen	16
5.3	Metingen van grondwaterstanden en analyse opbarstingrisico.....	19
5.4	Wateranalyses en analyse herkomst water van de wel.....	23
6	Conclusies en aanbevelingen	26
6.1	Resultaten Fort Vuren en Hurwenense Kil (Zaltbommel)	26
6.2	Toepasbaarheid van meetmethoden en aanpak	26
7	Literatuur	29

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In dit rapport wordt verslag gedaan van een onderzoek naar de toepasbaarheid van innovatieve onderzoekstechnieken rond de grondwater stroming in en rond dijken en met name waar zandmeevoerende wellen bestaan. Deze technieken vallen onder de zogenaamde “Kijken in Dijken” benadering van Acacia Water. Stabiliteit van dijken is een van de toetssporen bij dijkinspectie. Die stabiliteit is vaak gerelateerd aan processen als zetting en afschuiving van grondlagen en grondwaterstroming door en onder de dijk (TAW, 1999). Inzicht in de opbouw van het dijklichaam, de natuurlijke geologische formaties en de grondwaterstroming eronder is daarbij van groot belang.

Toetsing op de ‘traditionele manier’ met boringen en sonderingen geven wel inzicht in de opbouw ter plaatse, maar de dichtheid van boringen is vaak te grof om lokale variaties in die opbouw te vast te stellen (Leskens & Lodiers, 2012). Dat geldt met name voor de Holocene ondergrond, waarin de fluviatiele en estuariene afzettingen sterk kunnen variëren in lithologie op afstanden van enkele tientallen meters. In sterkere mate geldt dit voor een dijklichaam dat vaak inhomogeniteiten in opbouw bevat van nog kleinere omvang. Ook de lokale grondwaterstroming wordt onderbelicht in de traditionele aanpak zeker waar zich wellen voordoen of waar risico op de vorming van wellen bestaat (o.a. Berbee en Leuvenink, 2013).

1.2 Kijken in Dijken

Voor de “Kijken in Dijken” benadering van Acacia Water worden de volgende technieken en methoden toegepast. Afhankelijk van de gestelde vraag worden deze onafhankelijk of in combinatie toegepast:

Geofysica

Met geofysische metingen kan een lijn of gebiedsdekkend beeld worden verkregen van de ondergrond. De metingen geven informatie over patronen van bepaalde geofysische parameters zoals elektrische weerstand, dielectriche constante, porositeit of dichtheid, die weer een aanwijzing zijn voor geologische of geohydrologische condities. Daarvoor dienen de metingen altijd te worden geverifieerd en gecombineerd met bestaande interpretatie uit boringen en sonderingen

GIS analyses

Door bestaande geologische informatie uit Dinoloket te combineren met bovengenoemde metingen kunnen GIS analyses worden uitgevoerd om bepaalde risicozones te traceren of om boor- en sondeerwerk gericht uit te voeren.

Geohydrologische analyse aan de hand van grondwater- en waterstanden

Aan de hand van grondwaterstanden en waterstanden kan de grondwaterstroming rond de waterkeringen worden bepaald en kunnen geohydrologische parameters worden ingeschat. Vooral voor het gedrag van wellen is dit van belang. Met deze analyse kunnen opbarst- en pipingrisico's worden ingeschat.

Hydrogeochemische analyses

De eigenschappen van het water en eventueel het zand dat uit de wel stroomt geven aanwijzingen over de herkomst. Omdat hydrochemisch gezien het boezem- of rivierwater vaak een andere signatuur heeft dan de lokale neerslag of het lokale grondwater kunnen chemische of isotopenanalyses duidelijk maken wat de herkomst is van het water of de mate van menging. Redoxparameters kunnen licht werpen over de verblijftijd en afgelegde weg. Ook uit tijdseries van watertemperatuur en andere hydrochemische parameters gemeten van het water uit de wel en de rivier of kanaal kan de verblijftijd worden afgeleid. Het zand kan mineralogische en sedimentologisch worden onderzocht om te achterhalen uit welke lagen het zand afkomstig is.

Modelsimulaties waterstroming in de bodem

Een stap verder dan de bovengenoemde kwalitatieve analyse is het toepassen van numerieke simulatiemodellen. Soms is dat nodig omdat de een lokale situatie te complex is. Ook kunnen hiermee de geohydrologische en geotechnische gevolgen van bijzondere situaties zoals hoogwatergolven worden bestudeerd. Ook kunnen maatregelen om wellen te dichten of te beheersen worden onderzocht. De door Acacia Water toegepaste modelcodes omvatten analytische oplossingen, grondwatermodellen tot volledig geïntegreerde verzadigde en onverzadigde zone modelcodes.

1.3 Doel van het onderzoek

Rivierenland heeft Acacia Water gevraagd om een aantal van deze technieken toe te passen op twee locaties waar zich zandmeevoerende wellen voordoen. Deze zijn de wel bij Fort Vuren bij Gorkum en de wellen lang de Hurwenense Kil bij Zaltbommel.

Doel van het onderzoek was om:

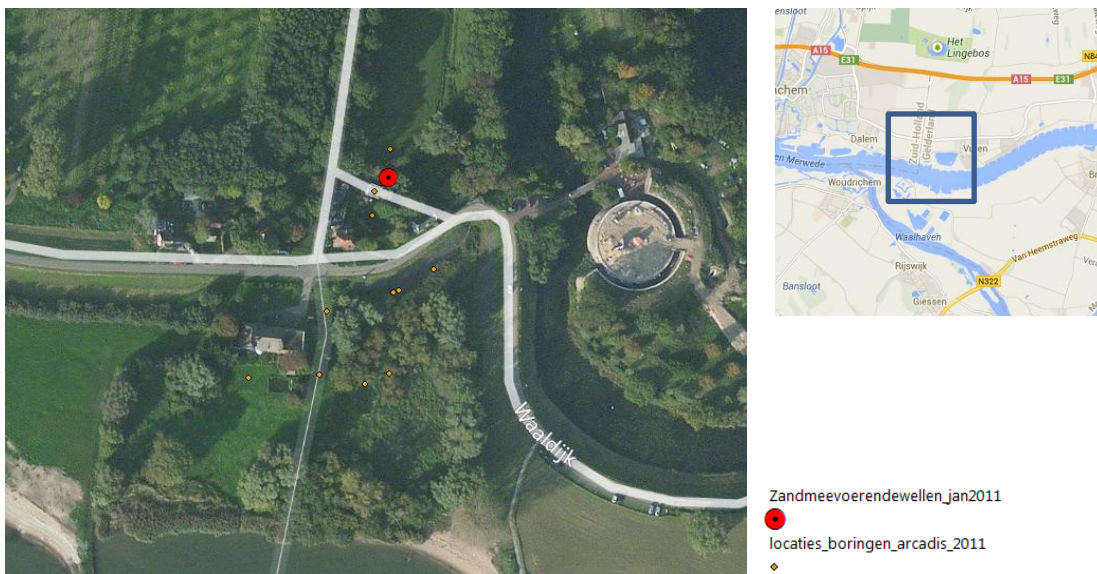
1. in zijn algemeenheid bekendheid te verkrijgen met deze technieken
2. beter begrip te krijgen van de vorming van een zandmeevoerende wel en daar heersende grondwaterstroming
3. om een methodologie te ontwikkelen om dijken beter te kunnen toetsen op het risico voor welvorming of instabiliteit in het algemeen.

De toegepaste technieken zijn geofysische metingen, analyses van waterstanden en grondwaterstijghoogten, modelberekeningen en hydrogeochemische analyses. De metingen zijn uitgevoerd op 18 september 2013 en 11 december 2013 bij Fort Vuren en op 19 september 2013 en 18 december 2013 bij de Hurwenense Kil. Op 15 november 2013 is door middel van een presentatie tussentijds verslag uitgebracht van de metingen in september 2013.

2 Locatiebeschrijving

2.1 Fort Vuren

Bij Fort Vuren bevindt zich een wel op een perceel achter de dijk net ten westen van de slotgracht van het fort (Figuur 1). De wel, die zich aanvankelijk manifesteerde in de knik van een sloot aan de zuidoostzijde van een grasperceel, is gedicht en afgewerkt met een hoge grote diameter stijgbuis (Figuur 2). Uit twee zijbuizen stroomt nu continu water, dat wordt afgevoerd naar de sloten. De dijk ten zuiden van de wel is in het verleden verhoogd en er is een damwand geplaatst in de ondergrond. De wel bevindt zich ongeveer 70 m ten noorden van de dijk. De Waaloever ligt bij een normale stand ook ten tijde van de metingen, ca 80 ten zuiden van de dijk. In 2012 zijn een aantal onderzoeken uitgevoerd waarbij boringen en sonderingen zijn uitgevoerd en een peilbuis is geplaatst. Ongeveer 180 m ten noorden van de wel bevindt zich een bestaande peilbuis waar een lange tijdserie is van grondwaterstijghoogten.



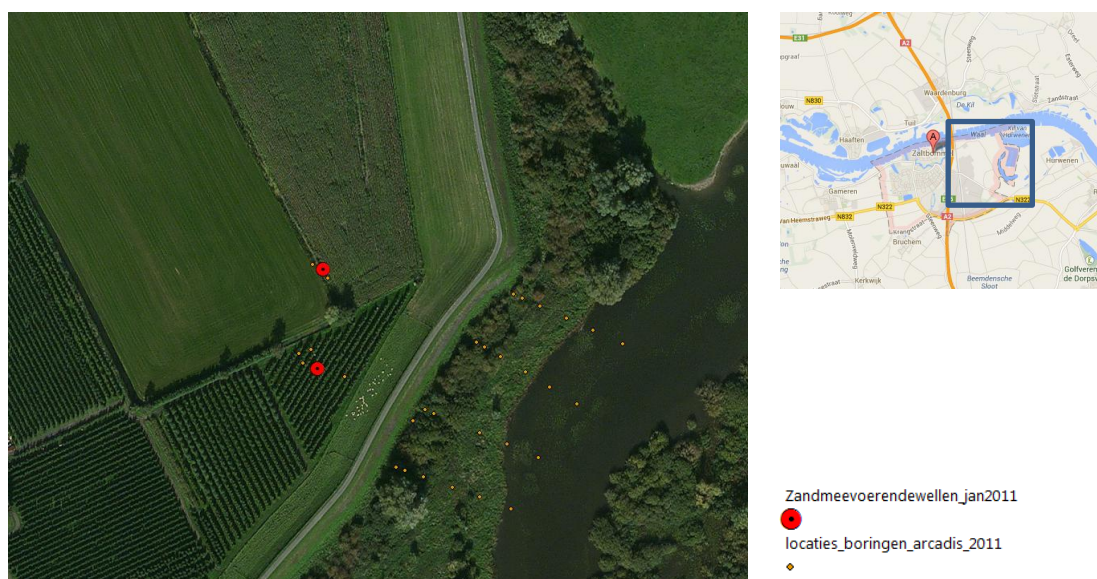
Figuur 1. Locatie Fort Vuren met aangegeven de locatie van de wel.



Figuur 2. Wel bij Fort Vuren. Bovenste rij: Links en midden wel in de knik van de sloot bij Fort Vuren, rechts zicht op het weiland (2011). Onderste rij: De wel is gedicht en afgewerkt met een opzetbuis (fotos 2013). Aan de zijkant van de opzetbuis zijn kleinere buizen zichtbaar die welwater afvoeren naar de beide sloten.

2.2 Hurwenense Kil

De tweede locatie is de dijk langs de Hurwenense Kil ten oosten van Zaltbommel. Aan de voet van de dijk in een boomgaard en in een iets de lager gelegen sloot tussen twee graslandpercelen zijn twee wellen, die alleen bij hoge rivierstanden water en zand meevoeren. Tijdens het veldwerk op 19 september 2013 en 18 december 2013 stroomden de wellen niet. Omwonenden vertelden dat er op vele andere plaatsen in de buurt ook wellen ontstaan bij hoge standen. In het verleden zijn er in de nabijheid wellen gedicht met bentoniet en kwelbermen. De wellen houden volgens sommigen verband met de vele putjes die zijn geboord voor seismische onderzoek in het verleden. Een andere aanwijzing voor de wellen waren de vele kleine kratertjes met rondom ijzeroxidevorming in de bodem van de net geschoonde watergangen (18 december 2013).



Figuur 3. Locatie Fort Vuren met aangegeven de locatie van de wel.



Figuur 4. Links: wel in de sloot bij Hurwenense Kil (2011 en 2013) en rechts: Wel in boomgaard onderaan dijktafud (2011 en 2013).

3 Meetmethoden en aanpak

3.1 Geofysische metingen

De geofysische metingen, die hier zijn toegepast, geven inzicht in de elektrische weerstand of geleidbaarheid van de ondergrond. Er is gemeten met twee technieken. Met de **DUALEM 642** (Frequency Domain Electro-Magnetische methode Bijlage 1) zijn 2D profielen van de elektrische weerstand tot 6 m diepte gemeten. Deze techniek is snel uitvoerbaar, omdat geen contact gemaakt hoeft te worden met de ondergrond. Per dag kan 2 tot 5 kilometer profiel worden gemeten afhankelijk van de toegankelijkheid.

Met de ABEM Terrameter/LUND (Direct current **CVES** methode) zijn ook 2D profielen van de elektrische weerstand gemaakt met lengtes van 80 m en tot circa 15 m diepte. Deze laatste methode is meer gedetailleerd en heeft een groter dieptebereik, maar is relatief tijdrovend vanwege het plaatsen van de elektroden in de grond en de lange meettijd. In de praktijk kunnen 2 CVES metingen per dag worden uitgevoerd.

De ruwe velddata moeten met een software programma worden geconverteerd naar werkelijke elektrische weerstanden van de ondergrond. Deze worden dan in een 2D beeld weergegeven langs de gelopen profielen. Ook kan van de DUALM data een 3D beeld worden getoond.

De elektrische weerstand van de ondergrond of formatieweerstand wordt bepaald door de weerstand van het grondwater en de weerstand die de matrix of het sediment biedt. Die relatie wordt uitgedrukt in de volgende vergelijking van (Archie 1942):

$$\rho_f = \rho_w F,$$

waarbij ρ gelijk is aan de formatieweerstand en ρ_w aan de elektrische weerstand van het grondwater. F is de formatiefactor die afhankelijk is van de matrix of sediment.

Voor zand en grind varieert de formatiefactor tussen 2.5 en 6 afhankelijk van de korrelgrootte. Voor de aangetroffen zandlaag onder de Holocene deklaag worden waarden van 3 à 4 verwacht. De formatiefactoren van klei variëren tussen 2 en 3. Bij veen liggen die tussen 1 en 2.

Zowel bij Fort Vuren als Hurwenen zijn een aantal DUALEM profielen gemeten in verschillende richtingen. Bij Fort Vuren zijn ook losse DUALEM metingen uitgevoerd die niet in profielen zijn opgenomen, maar wel zijn verwerkt in het 3D beeld. Op beide locaties zijn 2 CVES metingen uitgevoerd ook in verschillende richtingen. Na uitvoering zijn de metingen vergeleken met bestaande informatie uit boringen, sonderingen en informatie uit het Dinoloket om de formatieweerstanden lithologisch te kunnen duiden.

3.2 Hydrogeochemische analyses

De eigenschappen van het water uit een wel stroomt geven aanwijzingen over de herkomst. Omdat hydrochemisch gezien het boezem- of rivierwater vaak een andere signatuur heeft dan de lokale neerslag of het lokale grondwater kunnen chemische of isotopenanalyses duidelijk maken wat de herkomst is van het water of de mate van menging. Redoxparameters (Fe, Mn, SO₄, NO₃, O₂, HCO₃) kunnen licht werpen over de verblijftijd en afgelegde weg.

Bij Fort Vuren zijn watermonsters genomen van de wel, het grondwater uit peilbuis (B44) 15 m ten noordwesten van de wel, een landbouwdrain die 8 m ten noorden van de wel uitloopt in een sloot, de slotgracht van Fort Vuren circa 40 m ten oosten van de wel en de Waal op ongeveer 155 ten zuiden van de wel. De monsters zijn geanalyseerd op macro-ionen en stabiele. Bij de Hurwenense Kil liep op beide dagen geen water uit de wellen en deze zijn derhalve niet bemonsterd.

3.3 Grondwaterstanden en -stijghoogten

Aan de hand van grondwaterstanden en waterstanden kan de grondwaterstroming rond de waterkeringen worden bepaald en kunnen geohydrologische parameters worden ingeschat. Vooral voor het gedrag van wellen is dit van belang. Met deze analyse kunnen (historische) opbarst- en pipingrisico's worden ingeschat.

Water - en grondwaterstanden zijn opgenomen en bestudeerd in de buurt van Fort Vuren aan de hand van metingen in put B44, verder gegevens onttrokken uit Dinoloket (grondwater), Waterbase (Waalstanden). Voor de analyse van de waterstanden en het opbarst risico is gebruik gemaakt van de analytische vergelijking van Mazure (Mazure, 1936), die afname van de stijghoogte in het zandpakket onder de Holocene deklaag beschrijft onder invloed van voeding vanuit de Waal en kwel door de deklaag in het poldergebied. Het opbarst risico is bepaald met de opbarstregulering uit TAW (1999). Deze analyse is niet uitgevoerd voor de Hurwenense Kil, waar geen peilbuizen nabij de wellen beschikbaar waren.

3.4 Numerieke simulatie van de grondwaterstroming

Er is een 2D modelsimulatie uitgevoerd van de grondwaterstroming onder de dijk langs de Hurwenense Kil. Deze analyse is niet uitgevoerd bij Fort Vuren, waar de geohydrologische situatie te complex was voor een 2D simulatie. Voor de simulatie is gebruik gemaakt van modelcode op basis van FlexPDE binnen de modelomgeving van SVOoffice, waarin met SVFlux tegelijk verzadigde en onverzadigde grondwaterstroming op een klein schaal niveau kan worden gesimuleerd (Thode & Fredlund, 2013).

De modelsoftware werkt op basis van partiële differentiaal vergelijkingen met de mogelijkheid tot onder andere

- Vertaling naar eindige elementen niveau gecombineerd cm tot m en km
- Per rekenstap dynamische eindige elementen grids
- Integrale oplossing van stroming van water in de verzadigde en onverzadigde zone op basis van de Richards-vergelijking met stoftransport en dichtheidsstroming
- In 1D, 2D en 3D

Dit programma is met name ontwikkeld om grondwaterstroming door dijken en dammen te bestuderen. Er zijn modules te koppelen waarmee tevens volledig geïntegreerd met de waterstroming de stabiliteit, deformatie, warmte- en gastransport door de bodem kan worden berekend.

3.5 Overige metingen

In het veld zijn verder visuele waarnemingen gedaan en ondiepe handboringen verricht. Bij de monsternamen zijn metingen uitgevoerd van temperatuur en de elektrische geleidbaarheid van het water. (De elektrische geleidbaarheid of EC is de reciproke van de elektrische weerstand ρ_w van het water).

4 Resultaten Hurwenense Kil

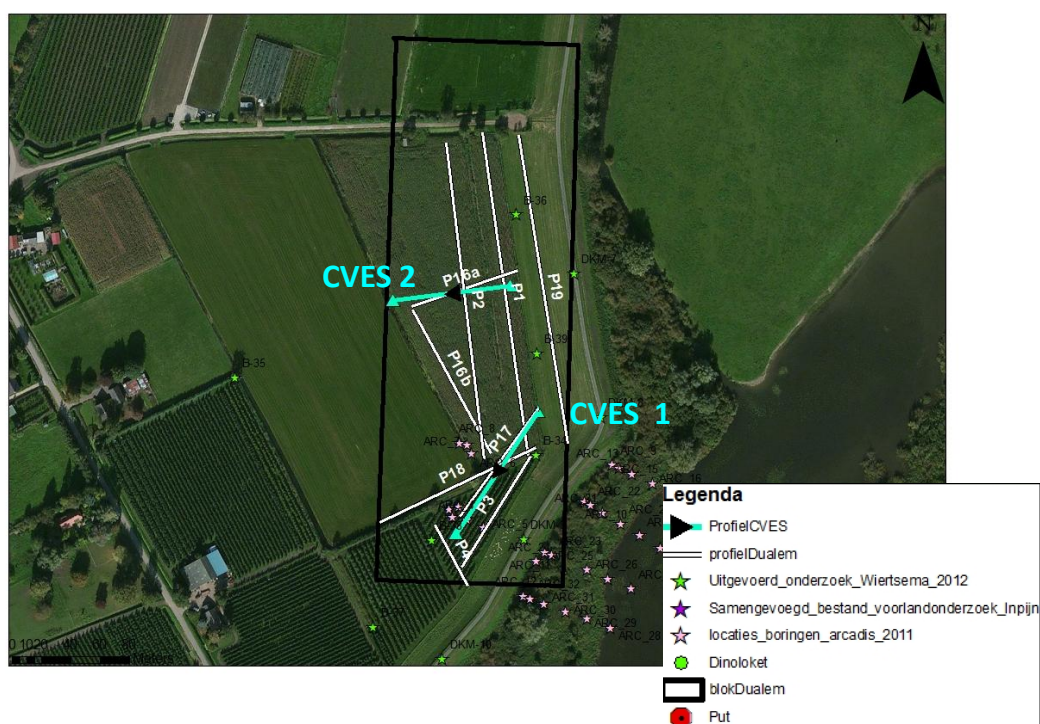
4.1 Inleiding

Voor het uitvoeren van de metingen is gebruik gemaakt van de DUALEM en CVES metingen. Deze zijn geïnterpreteerd in samenhang met andere bestaande informatie zoals boringen en sonderingen. Verder is zijn 2D modelsimulaties uitgevoerd van een hoogwatersituatie. Er zijn twee varianten doorgerekend, een variant zonder aanwezigheid van een wel en een variant mét aanwezigheid van een wel.

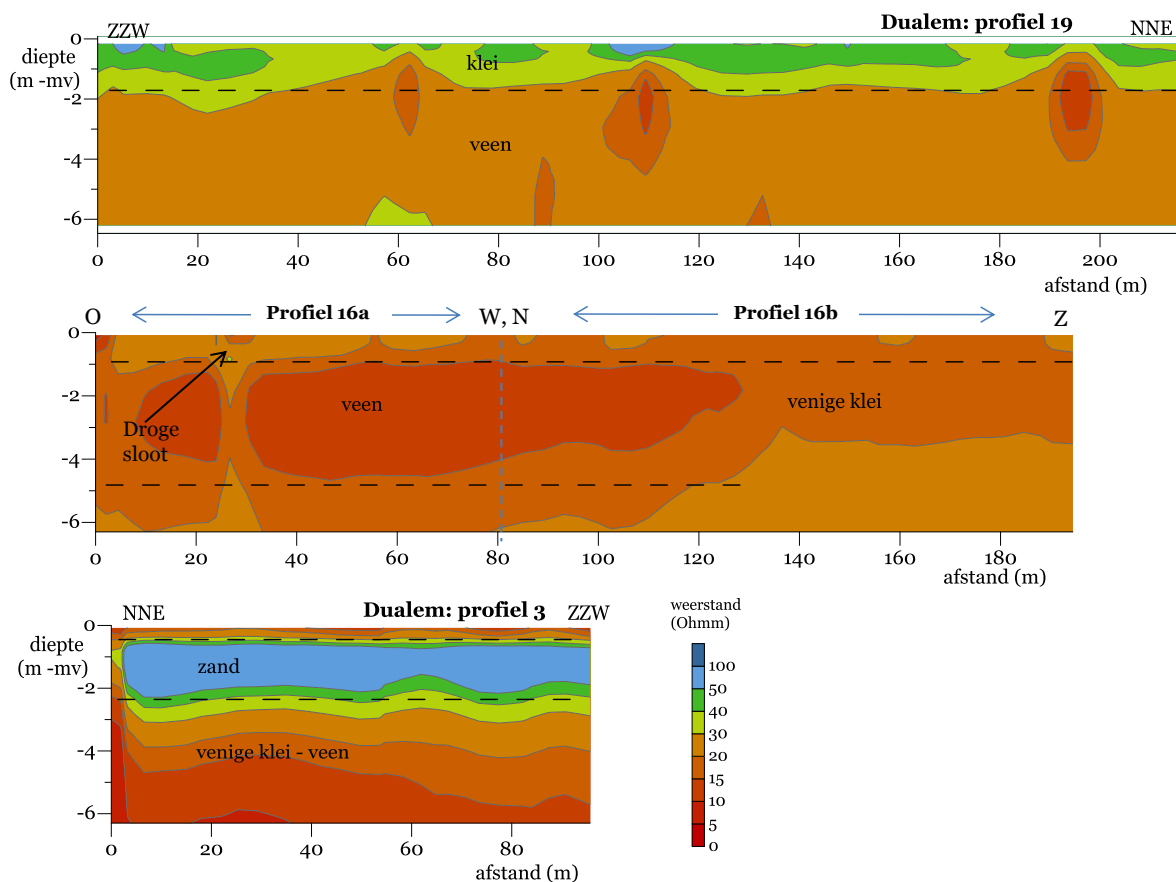
4.2 Geofysische metingen

In de zone rond de wellen zijn een aantal DUALEM profielen uitgevoerd zowel parallel aan als loodrecht op de dijk (Figuur 5). Verder zijn twee CVES profielen gemeten: een over de wel parallel aan de dijk en een ander over een natte plek in een graslandperceel loodrecht op de dijk.

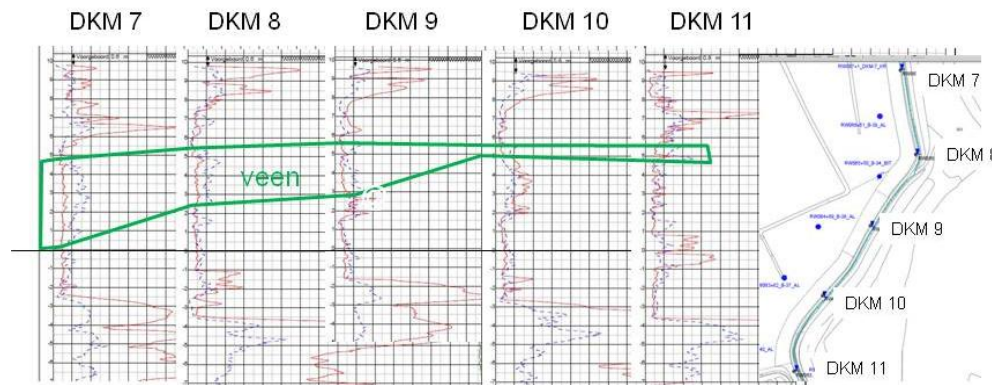
De DUALEM profielen 19, 16 en 3 laten weerstanden zien in de bovenste 6 m van 10 tot 30 Ohmm (Figuur 6). Dit duidt op veen of venige klei. Met name het eerst noordelijke deel van meting 16 (boven de knik) laat vrije lage weerstanden zien, die vermoedelijk gerelateerd zijn aan veen. Buitendijkse ondiepe boringen van Arcadis (bron data Rivierenland) laten inderdaad zien dat overal veen dagzoomt.



Figuur 5. Overzichtskaart metingen Hurwenense Kil



Figuur 6. DUALEM metingen 19 (boven), 16a en 16b (midden) en 3 (onder). Ligging van de profielen is weergegeven in Figuur 5.

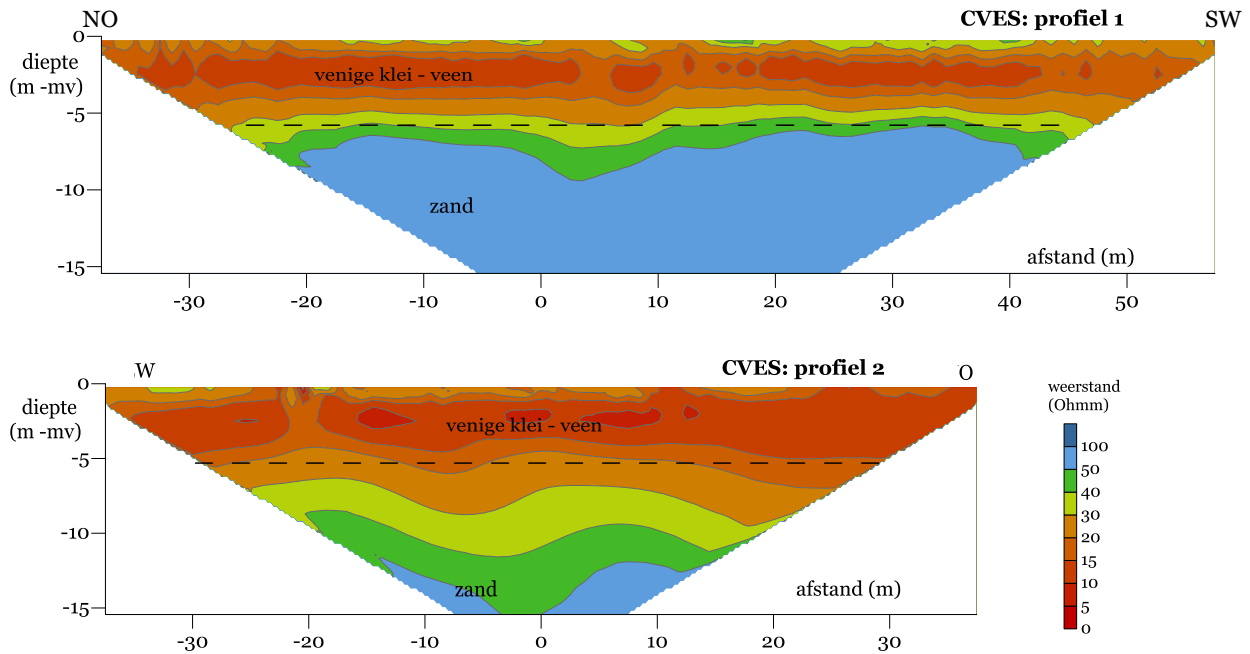


Figuur 7. Sondelingen op de Waaldijk bij Hurwenense Kil (Wiertsema, 2012)

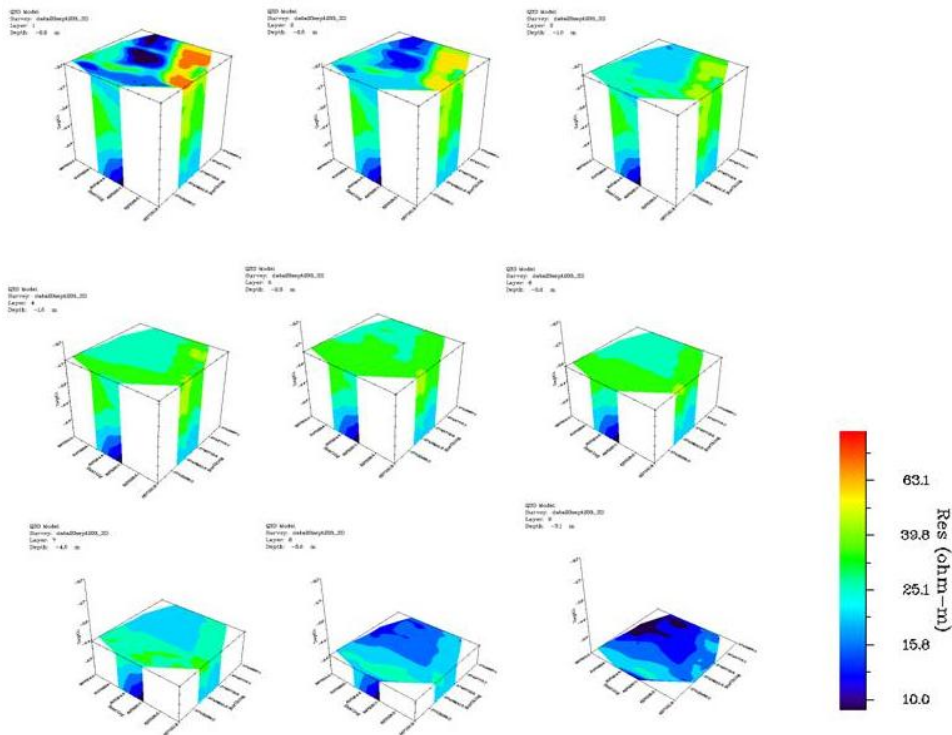
De sonderingen van Wiertsema en enkele boringen tonen ook veen aan (Figuur 7). Alleen in de bovenste meter van de DUALEM profielen worden hogere waarden aangetroffen. Hier en daar zijn er geïsoleerde anomalieën die te maken hebben met lokale verstoringen, leidingen of aangebracht puin.

De zandlaag op een diepte van 7 tot 15 m heeft een weerstand van 50 tot 70 Ohmm volgens de CVES profielen (Figuur 12). Profiel 19 en 3 lopen over een wat hoger deel aan de voet van de dijk. Hier worden hogere weerstanden van meer dan 30 Ohmm aangetroffen tot ca 3 m, die duiden op opgebrachte klei. De CVES profielen over de wel in de boomgaard (CVES 1) en over het graslandperceel (CVES 2) laten geen structuren zien, die gerelateerd zouden kunnen zijn aan een wel. Alleen bij een droge sloot op profiel CVES 2 zijn de weerstanden iets hoger en is een verticale structuur te zien.

Het 3D beeld in figuur laat zien dat de weerstanden in het graslandperceel tussen DUALEM profielen 19 en 2 het laagste zijn (Figuur 9). Hier komen ook de dikste veenlagen voor blijkens de sonderingen van Wiertsema (Figuur 7) en DUALEM meting 16. Naar het zuiden langs de dijk wordt de veenlaag dunner.



Figuur 8. CVES meting 1 (boven) en 2 (onder) bij Hurwenen



Figuur 9. 3D beeld van elektrische weerstand in Ohmm op basis van DUALEM metingen bij Hurwenen. Op een van de blokdiagrammen is de zuidzijde en noordzijde van het bovenvlak aangegeven, dat overeenkomt met de rechthoek in figuur 10.

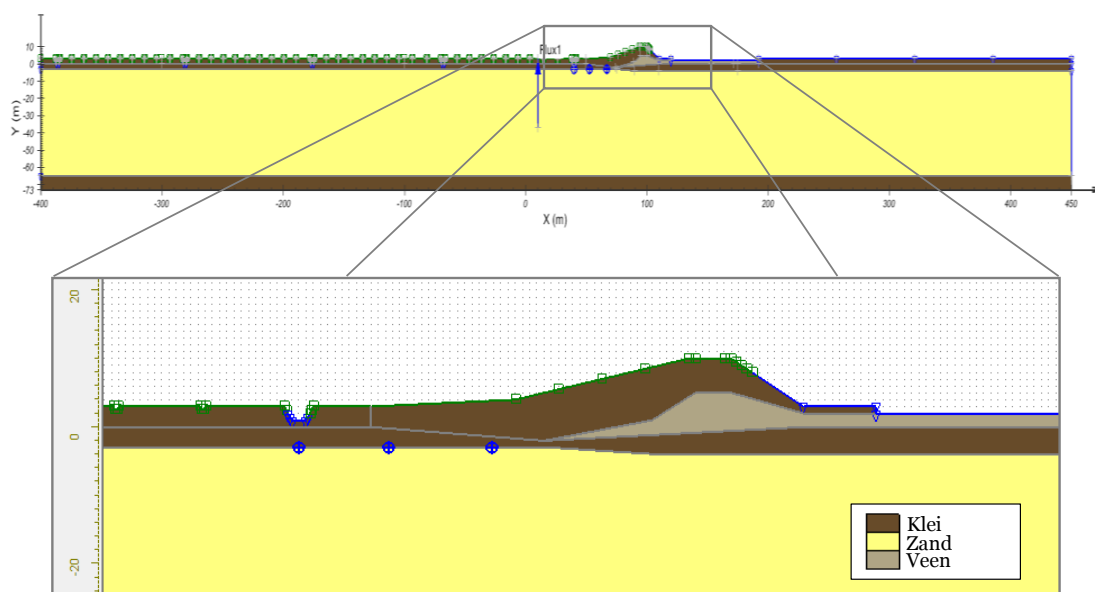
4.3 Berekeningen met een gedetailleerd model voor verzadigde en onverzadigde stroming

Op basis van de metingen, waarnemingen en analyses is een conceptueel beeld van de grondwaterstroming en de factoren die van invloed zijn op de uitstroom van water en zand bepaald. Om dit conceptuele beeld te toetsen is een 2D modelsimulatie uitgevoerd van de grondwaterstroming onder de dijk. Vanwege het ontbreken van tijdreeksen van grondwaterstanden is het model daar niet op gecalibreerd. Wel is gekeken naar het grondwater- en stijghoogtebeeld op regionaal niveau en zijn de resultaten van het model getoetst aan de optredende situaties.

Voor de simulatie is gebruik gemaakt van modelcode op basis van FlexPDE binnen de modelomgeving van SVOOffice, waarin met SVFlux tegelijk verzadigde en onverzadigde stroming door de bodem op een gedetailleerd schaalniveau worden gesimuleerd (Thode & Fredlund, 2013). Dit programma is met name ontwikkeld om grondwaterstroming door dijken en dammen te bestuderen. Er zijn modules te koppelen waarmee tevens volledig geïntegreerd met de waterstroming de stabiliteit, deformatie, warmte- en gastransport door de bodem kan worden berekend.

4.3.1 Modelschematisatie

Op basis van gegevens uit Dino loket, REGIS, en de vele bodemonderzoeken die uitgevoerd zijn (Wiertsema, Arcadis, Inpijn Blokpoel) en de analyse van de geofysische metingen uit deze studie is een vereenvoudigde geohydrologische schematisatie van de ondergrond gemaakt. Figuur 10 geeft de schematisatie weer.



Figuur 10. Modelschematisatie van locatie Hurwenense Kil

Laagopbouw en bodemparameters

Het maaiveld buitendijks is vastgelegd op 2 tot 3 m + NAP. De bovenkant van de dijk ligt op 10 m + NAP. In de polder ligt het maaiveld op 3 m + NAP, waarbij de sloten een bodemniveau hebben van 1 m + NAP. De percelen tussen de sloten zijn begreppeld met greppels die een bodemniveau hebben van 2,6 m + NAP (40cm -mv). Dit is een schematisatie van de situatie zoals die in de polder heerst.

De deklaag heeft een dikte van 5 m en is een hydraulische weerstand van 1600 dagen gegeven. Onder de deklaag bevindt zich een dik watervoerend pakket van 60 m dik met een doorlatendheid van 18 m/dag.

Randvoorwaarden

De modelrand binnendijks ligt ongeveer halverwege de polder op het diepste punt van het isohypsenpatroon. Op basis van het regionale isohypsenpatroon uit REGIS is een vaste stijghoogte van 2 m + NAP toegekend. Er zijn verkennende berekeningen uitgevoerd om de gevoeligheid van de modelrand op het modelresultaat in het aandachtsgebied te bepalen. De hier gebruikte afstand tot de rand is hiervan het resultaat en heeft geen invloed op het modelresultaat in het aandachtsgebied.

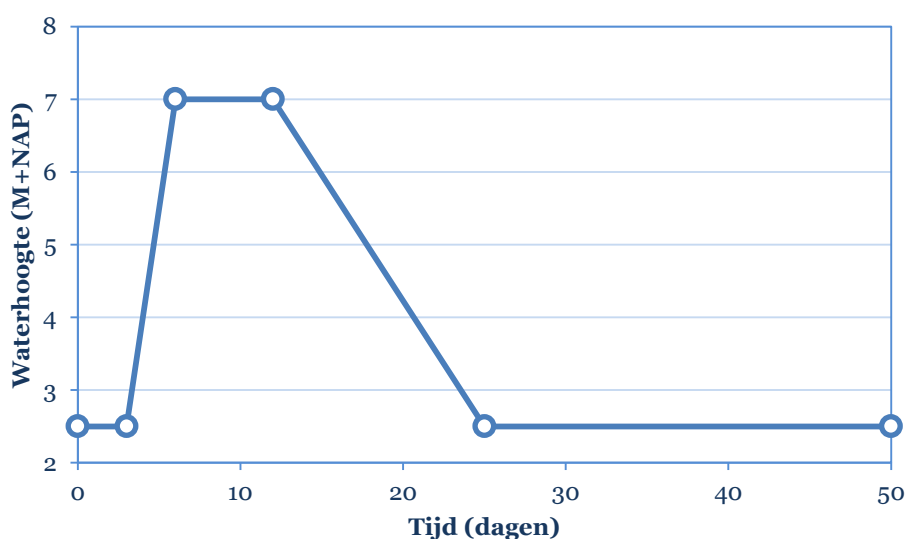
De modelrand buitendijks is gekozen op de rand van een zandwinplas waarvan de bodem tot in het zandpakket reikt en de Waal (bij hoog water) in direct contact staat met het zandpakket. Hier geldt het Waalpeil bij laag water. Bij de tijdsafhankelijke berekeningen is het verloop van de hoogwatergolf als randvoorwaarde opgelegd (zie ook volgende paragraaf). Dit geldt ook voor het overige deel van het buitendijkse gebied.

Hoogwatergolf

In Zaltbommel heeft Rijkswaterstaat een meetpunt voor het meten van de waterstand in de Waal. Dit meetpunt ligt ongeveer 2700 m benedenstrooms van de Hurwenense Kil. Deze afstand moet worden verdisconteerd in de waterstand, om tot en waterstand in de Hurwenense Kil te komen.

De isohypsenkaart van het eerste watervoerend pakket van 28 april 1995 is vergeleken met de gemeten waterstanden in de Waal op die dag. Hieruit blijkt dat de gemeten waterstand gelijk is aan de lokale grondwaterstand. Dit ondersteunt het uitgangspunt dat de Waal insnijdt in het eerste watervoerend pakket, waardoor neemt het grondwater de dan heersende Waalstand aan. Hiervan kan gebruik worden gemaakt om de Waalstand bij de Hurwenense Kil te bepalen. Het omgekeerde is namelijk dan ook geldig. De grondwaterstand in een peilbuis ter plaatse van de Waal geeft dus de dan heersende Waalstand weer.

Het eerste watervoerend pakket had in april 1995 een verhang van een 50 tot 60 cm tussen Zaltbommel en de Hurwenense Kil. Aangezien er in de Waal geen stuwen aanwezig zijn, is het aannemelijk dat dit verhang ook aanwezig is bij een hogere rivierstand. Daarom is bij de hoogwatergolf van 2011 55 cm opgeteld om de hoogwatergolf ter plaatse van de Hurwenense Kil te krijgen. De voor het model gebruikte hoogwatergolf is weergegeven in Figuur 11.

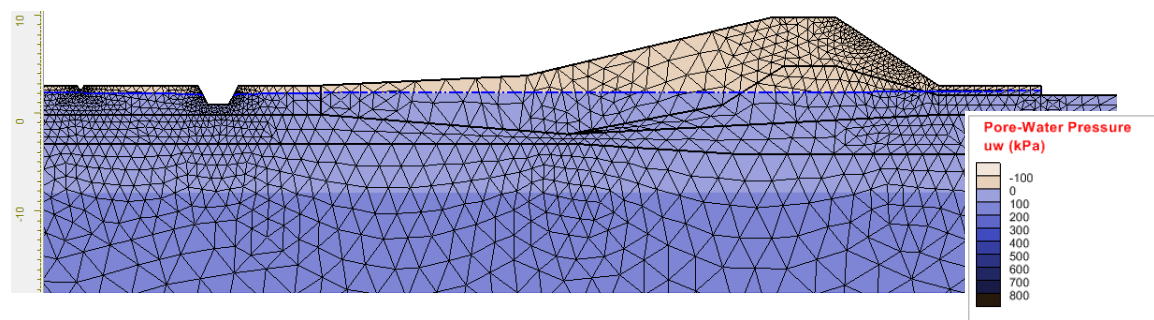


Figuur 11. Schematische weergave van de hoogwatergolf van januari 2011 op basis van metingen van de Waterbase van Rijkswaterstaat

4.3.2 Modelresultaten

Stationair modelresultaat

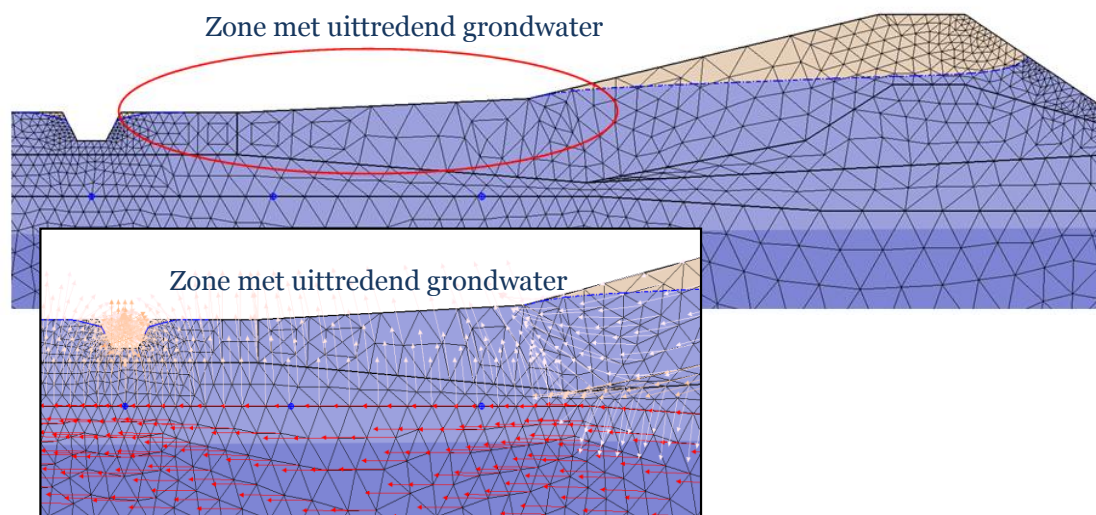
Het model is allereerst stationair doorgerekend in de laagwater situatie, dit is weergegeven in Figuur 12. Hierbij is te zien dat er weinig aan de hand is: de ontwatering in de watergangen is normaal, er is geen kwel en de ontwateringsdiepte is ongeveer 75 cm (is diepte van grondwaterstand ten opzichte van maaiveld).



Figuur 12. stationair modelresultaat voor de laag water situatie

Tijdsafhankelijk modelresultaat zonder optreden van een wel

Om inzichtelijk te maken wat de grondwaterstandsvariatie is ten tijde van een hoogwatergolf is er een tijdsafhankelijke berekening uitgevoerd, waarbij de invloed van de eerder genoemde hoogwatergolf op het grondwater is doorgerekend. De maximum waterdrukverdeling die optreedt is weergegeven in Figuur 13. Te zien is dat in de situatie van hoogwater de waterdruk tussen de teen van de dijk en de sloot stijgt tot aan maaiveld. Hier treedt ook water uit. Bij een langdurende hoogwatergolf kan een situatie optreden zoals te zien is in Figuur 14. De pijlen tonen de stromingsrichting van het grondwater.



Figuur 13. SVFlux schematisering en modelresultaat van hoogwater bij de dijk bij de Hurwenense Kil, vlakbij Zaltbommel.

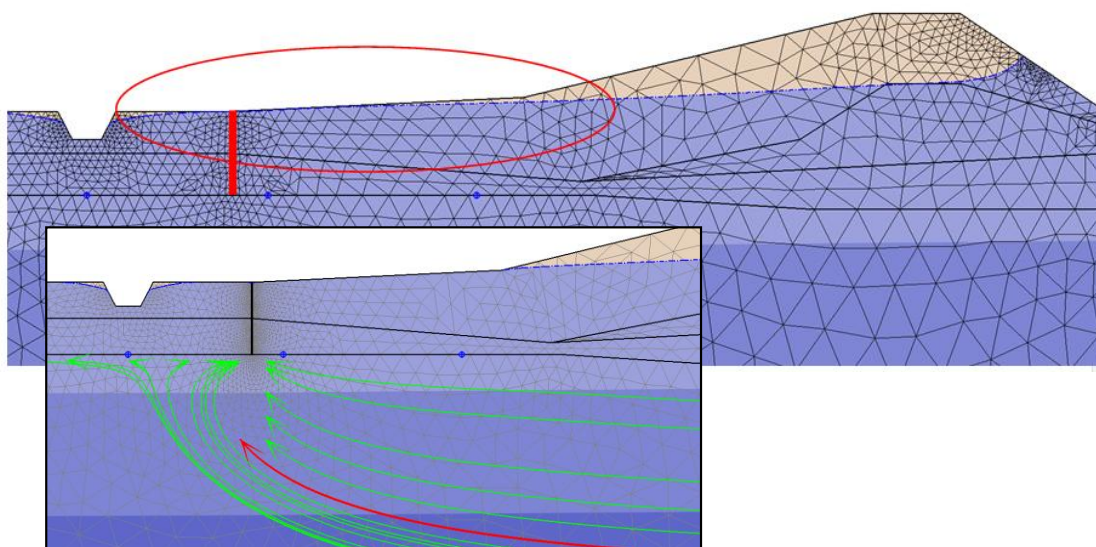


Figuur 14. Ondergelopen weilanden naast de teen van de dijk als gevolg van hoogwater in de rivier.

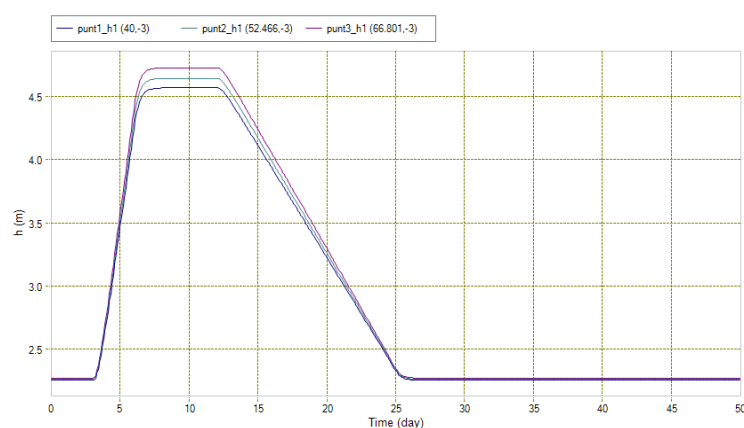
Tijdsafhankelijk modelresultaat mét optreden van een wel

Gedurende het hoogwater van 2011 is een wel ontstaan bij de Hurwenense Kil. Deze situatie waarbij een wel optreedt is eveneens tijdsafhankelijk doorerekend met het model. De berekende maximum waterdruk ter plaatse van de dijk is weergegeven in Figuur 15.

Te zien is wat de impact van de wel is: de wel werkt als een drukventiel, de drukken om de wel heen nemen af, waardoor de waterdruk niet meer boven het maaiveld uitkomt en er daardoor ook geen water uittreedt ter plaatse van de teen van de dijk. Zichtbaar gemaakt is tevens de stroming van het grondwater naar de wel.



Figuur 15. SVFlux schematisering en modelresultaat van hoogwater bij de dijk bij de Hurwenense Kil met een wel (rode lijn), vlakbij Zaltbommel. Te zien is dat de druk in de teen van de dijk niet tot aan maaiveld komt



Figuur 16. Verloop van de berekende stijghoogte net onder de deklaag aan de teen van de dijk, tussen de teen en de sloot en tenslotte de sloot. Opgemerkt dat het hoogste Waalpeil tot 7m komt.

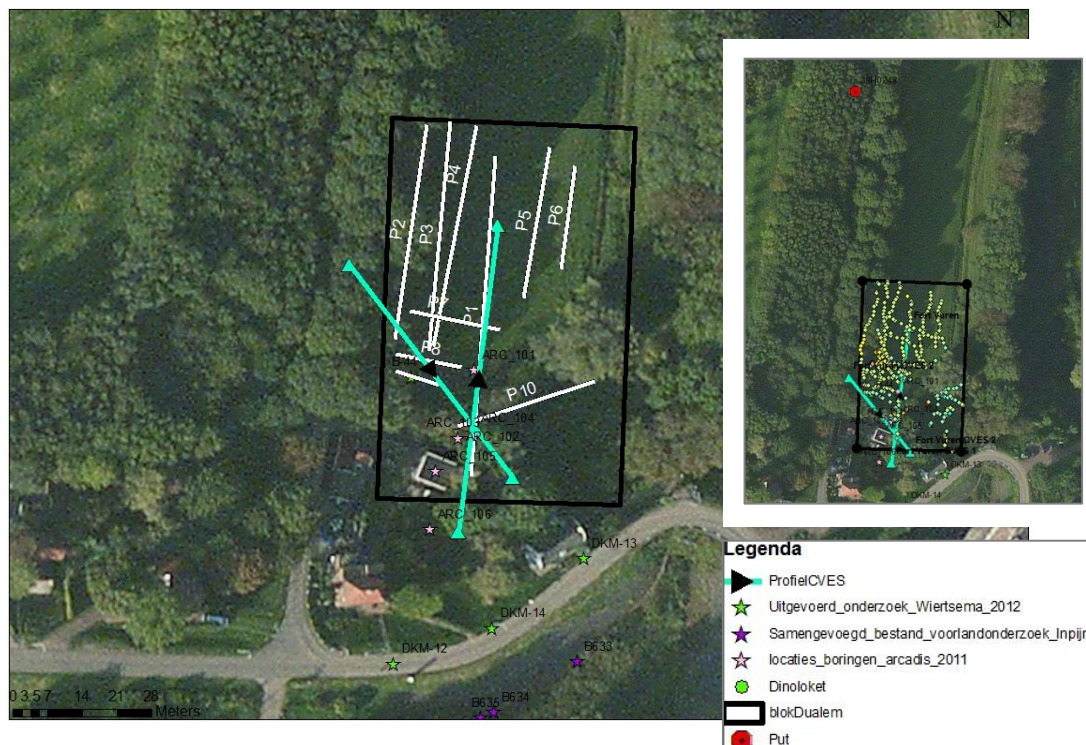
5 Resultaten Fort Vuren

5.1 Inleiding

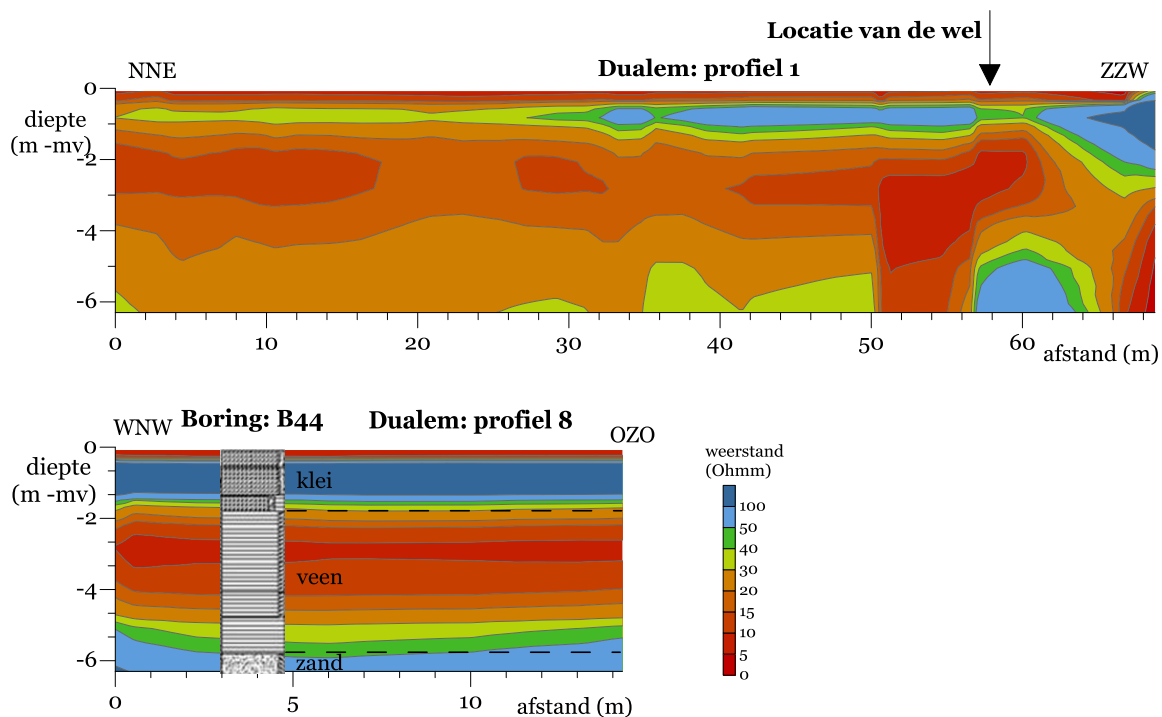
Voor het uitvoeren van de metingen is gebruik gemaakt van de DUALEM en CVES metingen. Deze zijn geïnterpreteerd in samenhang met andere bestaande informatie zoals boringen en sonderingen. Verder is van een peilbuis het verloop van de stijghoogte geanalyseerd en is aan de hand van deze informatie analytisch gerekend aan het opbarstrisico. Ook zijn watermonsters genomen van diverse bronnen, waaronder de wel, en is een hydrochemische analyse uitgevoerd.

5.2 Geofysische metingen

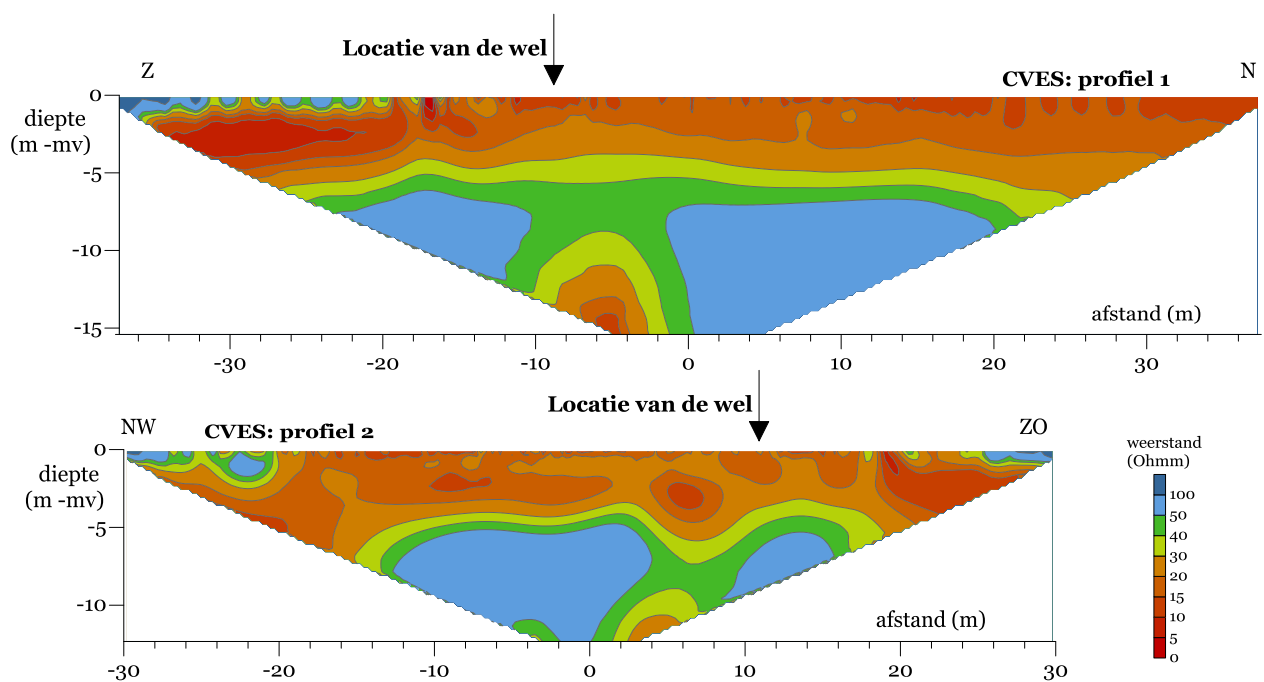
Bij Fort Vuren zijn een groot aantal DUALEM metingen uitgevoerd langs profielen en ook losse metingen rond de wel en op het grasperceel ten noorden en oosten van de wel. Ook zijn er 2 CVES profielen die kruiselings over de locatie van de wel lopen (Figuur 1). De losse DUALEM metingen zijn niet weergegeven op het kaartje.



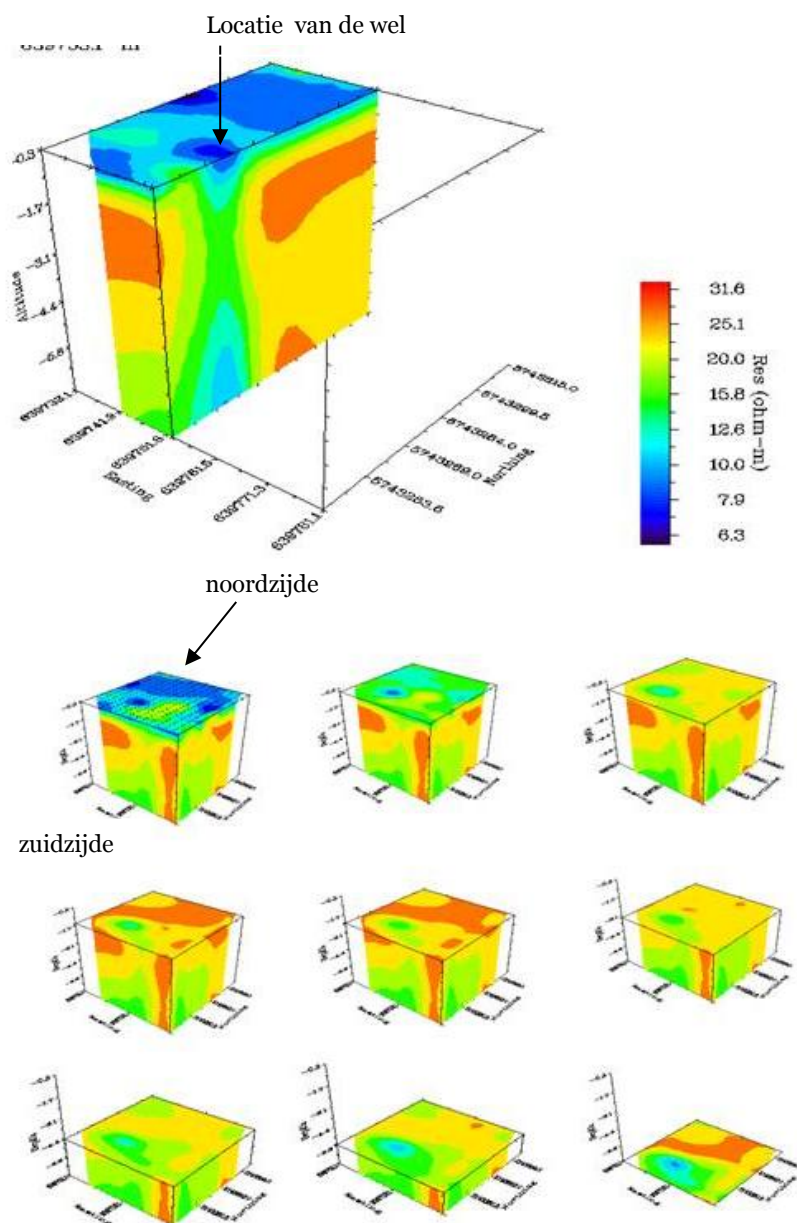
Figuur 17. Overzichtkaart metingen Fort Vuren. In de figuur worden de DUALEM en CVES profielen getoond. Er zijn nog een groot aantal losse metingen verricht met de DUALEM, die hier niet worden getoond maar wel zijn opgenomen in het 3D beeld. Het zwarte vierkant is de bovenzijde van het 3D beeld van de DUALEM metingen in Figuur 20. De wel bevindt zich op het kruispunt van de beide CVES metingen. Peilbuis B44 is zichtbaar als de groene ster in het zuidwestelijk deel van het blok. Op het inzetkaartje wordt de locatie van peilbuis B38H0248 getoond als mede de Waaloever in het zuiden.



Figuur 18. DUALEM profiel 1 en 8 en boring B44 (Wiertsema, 2012) bij Fort Vuren. Ligging van de profielen zijn weergegeven in Figuur 17. Let op de kompasrichtingen aan begin en einde van de profielen.



Figuur 19. CVES 1 in Noord-Zuid richting over de wel (boven) en CVES 2 in NW-ZO richting over de wel (onder) bij Fort Vuren



Figuur 20. 3D beeld van alle DUALEM metingen bij Fort Vuren. Op een van de blokdiagrammen is de zuidzijde en noordzijde van het bovenvlak aangegeven, dat overeenkomt met de rechthoek in Figuur 17

Van de DUALEM metingen worden hier de profielen 1 en 8 getoond (Figuur 18). Profiel 1 loopt over de wel in Noord-Zuid richting, in West-Oost richting net ten noorden van de wel. Bij profiel 8 is ook boring B44 opgenomen, die is afgewerkt tot peilbuis (Wiertsema, 2012). Alle DUALEM metingen zijn verwerkt in een 3D beeld van de ondergrond (Figuur 20). Figuur 19 toont de beide CVES metingen.

Interpretatie in relatie tot bodemopbouw

De DUALEM en CVES metingen laten het volgende algemene beeld zien: aan het oppervlak tot enkele decimeters diepte lage weerstanden (10 tot 20 Ohmm); dan tot 1.5 m hoge weerstanden variërend van 40 tot 100 Ohmm; vervolgens een laag met lage weerstanden tussen 15 en 25 Ohmm tot ca 5.5 a 6 m diepte; tenslotte nemen de weerstanden weer toe tot 50 en 90 Ohmm. De interpretatie laat nogal vloeiende overgangen zien, die in werkelijkheid scherper zijn. De bovenste laag tot 1.5 m kunnen dus sterk variëren in weerstand. Uit navraag onder omwonenden werd duidelijk dat er veel puin is gestort en dat er zich drains bevinden in het graslandperceel. Dit verklaart de variatie en ook sommige anomalieën op de profielen.

De diepere opbouw komt goed overeen met de aangetroffen lithologie in boring B44. In boring B44 wordt tot 1.9 m diepte klei aangetroffen, dan veen tot 6 m met daaronder grof zand en grind. De klei heeft dus een weerstand van rond 40 Ohmm; het veen komt overeen met de zone van ca 20 Ohmm en de dieper gelegen zandlagen hebben de hogere weerstanden van 50 tot 90 Ohmm. Daaruit kunnen de formatiefactoren worden berekend voor klei (2.1), veen (1.1) en zand (3 tot 5), die voldoen aan de verwachte waarden. Deze factoren zijn berekend uit de bovenstaande vergelijking van Archie na temperatuurcorrectie tot 20 °C voor een gemeten grondwaterweerstand van 15 Ohmm.

De conclusie is dat de elektrische contrasten groot genoeg zijn om met behulp van geofysische DUALEM / CVES metingen een goed beeld te verkrijgen van de geologische opbouw in termen van klei, veen en zand van de bovenste 6 m, mits de dikte van de lagen voldoende groot is voor de detectie (> 1.5). Onder deze condities en restricties is het goed mogelijk om veenlagen te karteren en tevens opduikingen van zand (donken, zandige kreekafzettingen). Deze locaties hebben een verhoogd risico voor opbarsten (zie ook verderop bij de analyse van opbarst risico).

Anomalieën geassocieerd met de wel

Bij de wel wijkt de opbouw in de weerstand af van het algemene beeld zoals geschetst hierboven. Op het DUALEM profiel 1 is duidelijk te zien dat opbouw ter plaatste of eigenlijk enkele meters ten noordwesten van de wel (of beter gezegd de afvoerpijp van de wel) anders is. Ook de beide CVES metingen laten zien dat die structuur zich voortzet in de diepte. Dat blijkt vooral ook uit het 3D beeld van de weerstanden, dat is opgebouwd uit alle DUALEM metingen (Figuur 20).

Daarin wordt een structuur zichtbaar met een kolom van relatief lage weerstanden enkele meters ten noordwesten van de huidige wel. Een dergelijke geïsoleerde structuur laat zich niet makkelijk geologisch verklaren. Is de lithologische gesteldheid onder de wel echt anders of komt het door de opbarsting zelf, maar kan zo'n kleine pijp of doorbraak wel detecteerbaar zijn? Wij achten het meer aannemelijk dat ter plaatse van de wel meer gemineraliseerd water opkwelt met een lagere elektrische weerstand. Deze structuur vergt nader onderzoek, maar de metingen laten wel zien dat wellen mogelijk te detecteren zijn, zij het op basis van andere kenmerken dan de wel zelf.

5.3 Metingen van grondwaterstanden en analyse opbarstingsrisico

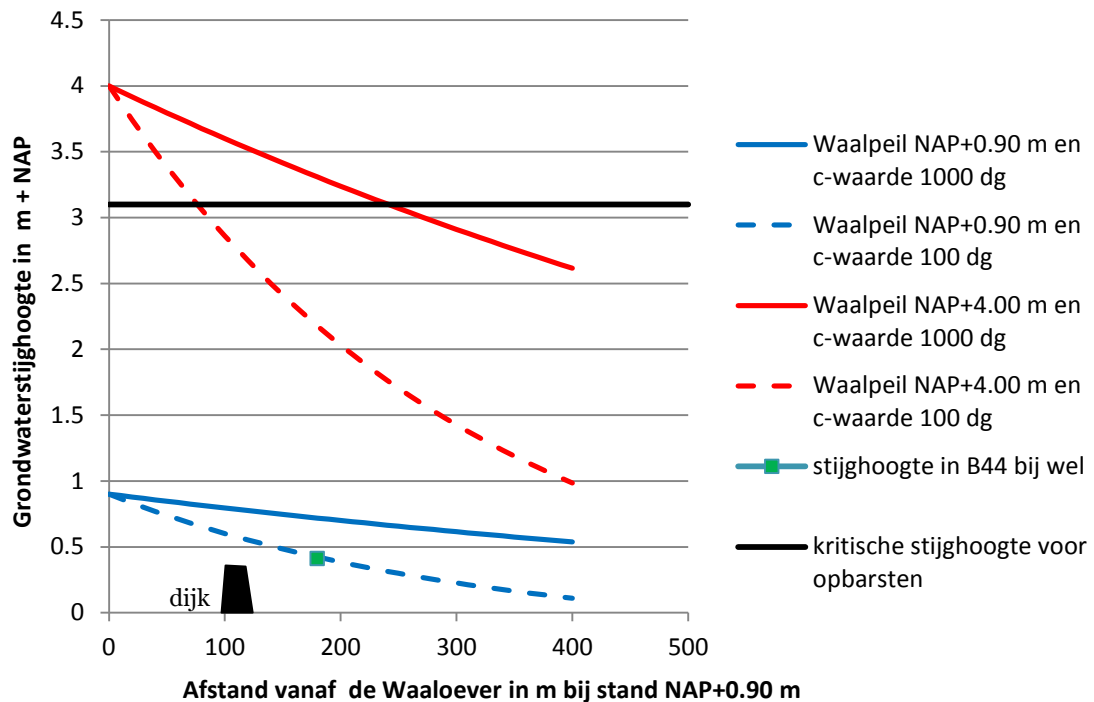
Analyse opbarstingsrisico

De overlopende wel en de hoge grondwaterstijghoogte van het dieper gelegen zandpakket in de peilbuis B44 (stijgt 10 cm boven maaiveld van NAP+0.40 m) duiden op sterke kwel rond de wel. Dat volgt ook uit het feit dat een ondiepe landbouwdrain in het grasperceel continu water afvoert. Met behulp van analytische vergelijkingen volgens de bekende vergelijking van Mazure (Verruijt, 1970) is onderzocht hoe de grondwaterstijghoogten in de dieper gelegen theoretisch zou verlopen.

In Figuur 21 zijn de berekende grondwaterstijghoogten weergegeven in een Noord-Zuid trace loodrecht op de Waaldijk. Het betreft het verloop bij een Waalpeil van NAP+ 0.90 m (op 18 september 2013) en een hoge stand van NAP+4.00 m zoals voorkwam in 1993 en 1995.

Er zijn berekeningen gemaakt voor twee geohydrologische condities, namelijk a) een deklaag die intact is en b) een opgebarste deklaag. Dat is modelmatig ingebracht door voor de hydraulische weerstand (c waarde) voor de deklaag waarden van respectievelijk 1000 en 100 dagen aan te nemen. Een c-waarde van 1000 dagen lijkt al een redelijk lage aanname voor een deklaag van 6 m klei en veen. Toch lijken de berekende stijghoogten bij een waarde van 100 dagen meer in overeenstemming te zijn met de grondwaterstijghoogte van 18 september in B44. Een dergelijk lage waarde geeft waarschijnlijk aan dat de deklaag ooit is doorgebroken en toen zijn weerstand heeft verloren.

Op basis van de opbarstregulering uit TAW (1999) is berekend dat grondwaterstijghoogten van meer NAP+3 m zouden kunnen resulteren in het opbarsten van de ongebroken deklaag met de geologische opbouw

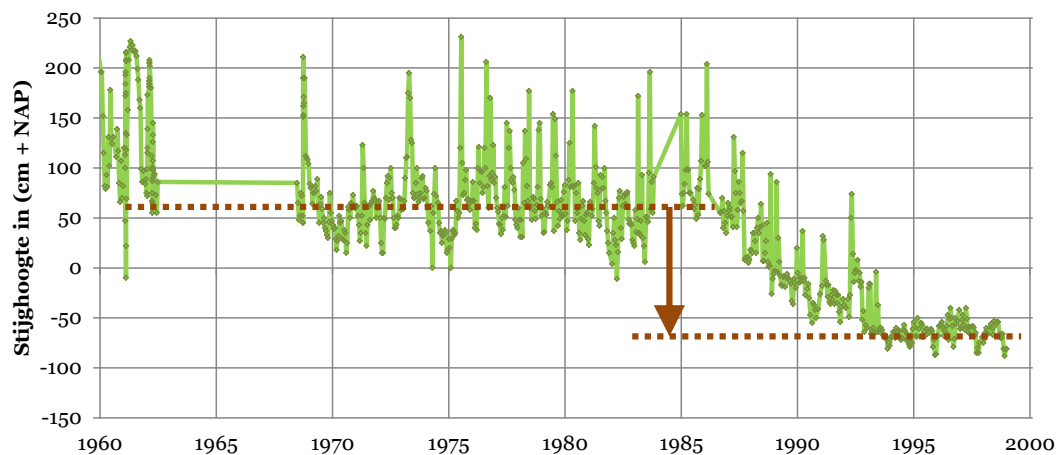


Figuur 21. Grondwaterstijghoogten bij verschillende peilen van de Waal en c-waarden voor de deklaag bij Fort Vuren

bij Fort Vuren. Die omstandigheid kan zich voordoen bij hoge Waalstanden zoals in 1993 en 1995, toen waarden van meer dan NAP+4 m zijn bereikt. Na opbarsten zou de hydraulische weerstand en de grondwaterstijghoogte kunnen zijn afgenomen. Opgemerkt wordt dat de berekening met dit eenvoudige analytische model een indicatieve waarde heeft. Voor detailberekeningen aan een concrete situatie, waarmee ook maatregelen dienen te worden onderzocht zijn numeriek modellen meer geëigend (Zie eerdere modelberekeningen op basis van FlexPDE).

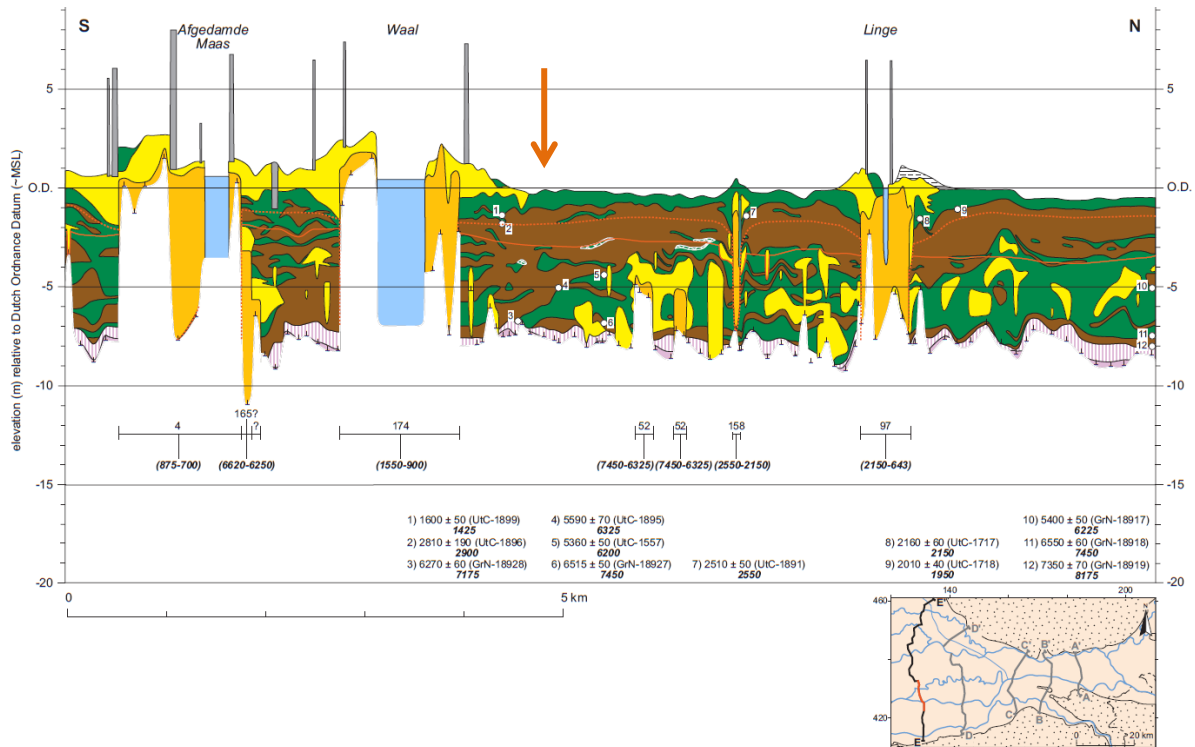
Analyse stijghoogte reeks

Opvallend is de tijdreeks van historische grondwaterstijghoogten in een waarnemingsput B38H0248 op 160 m ten noorden van de wel (Figuur 22). Daarin nemen we waar dat ongeveer tot 1990 hoge stijghoogten voorkomen met grote fluctuaties gerelateerd aan de variaties in de waterstand van de Waal. Daarna dalen de grondwaterstijghoogten en vertonen ook minder fluctuatie. Dit zou een aanwijzing kunnen zijn dat de wel ongeveer rond die tijd is ontstaan bij een hoog Waalpeil.

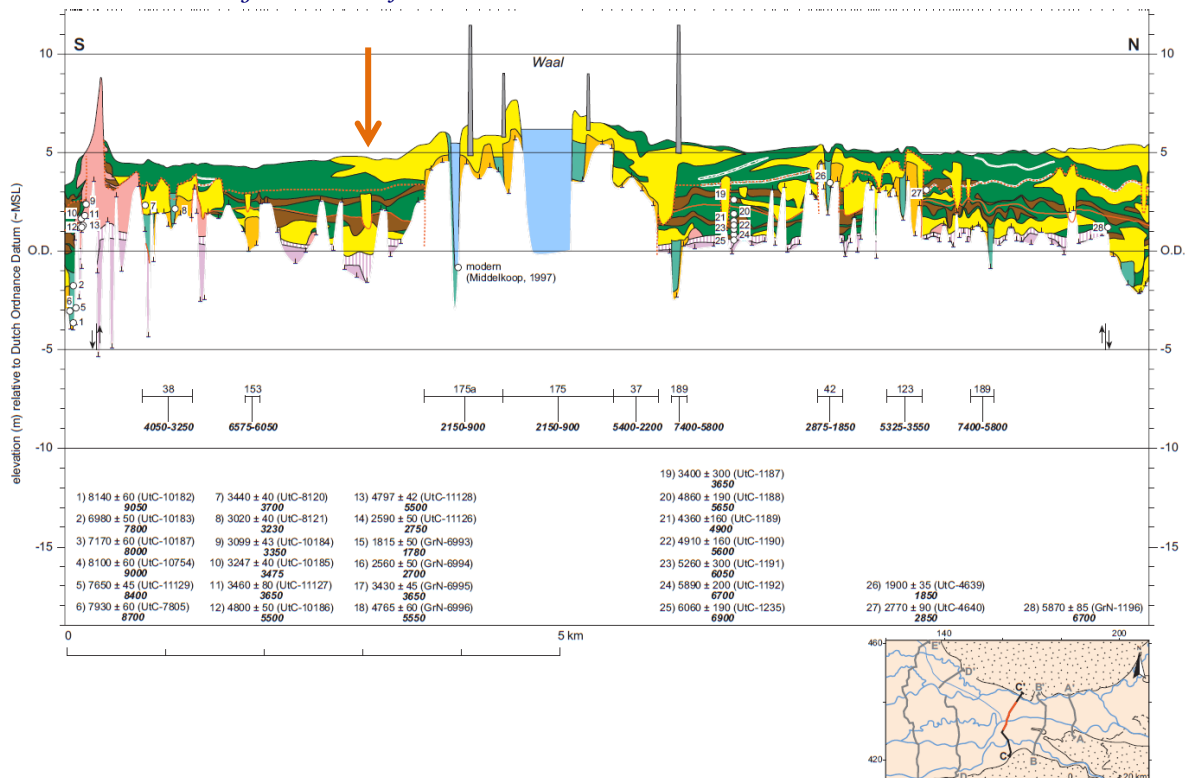


Figuur 22. Grondwaterstijghoogten in peilbuis 38H0248 bij Fort Vuren

Daar waar deklaag achter de dijken bestaat uit veen of dun is vanwege een zandopduiking (donken of zandige geulafzettingen) zijn de risico's het grootst. Die omstandigheden komen vooral voor in het westen van het rivierengebied (Gouw en Erkens, 2007; Figuur 23 en Figuur 24).



Figuur 23 Profiel over de Waal bij Fort Vuren (Gouw & Erkens, 2007). Het profiel (exacte locatie bij de pijl) laat zien dat het hier overwegend veen betreft.



Figuur 24. Profiel over de Waal bij Zaltbommel (Gouw & Erkens, 2007). Het profiel (exacte locatie bij de pijl) laat zien dat het hier een afwisseling betreft van klei en veen.

Omdat piping pas optreedt na doorbraak van de deklaag is het wellicht raadzaam om naast de Sellmeijerregel dijken ook te toetsen met de opbarstregel na berekeningen van de stijghoogten met de Mazurevergelijking of een regionaal grondwatermodel. Dit kan gebiedsdekkend worden uitgevoerd op basis van geohydrologische gegevens uit de geologische REGIS II en GEOTOP modellen, de maatgevende hoogwaterstanden van de rivieren en tijdreeksanalyses van grondwaterstanden. Hieruit kan worden afgeleid welke binnendijkse zones een toekomstig risico vormen voor opbarsten of waar de deklaag al sterk is gebroken in het verleden (opvallende lage stijghoogten en hydraulische weerstanden). Een dergelijke analyse is eerder uitgevoerd voor polder Groot-Mijdrecht (zie kader).

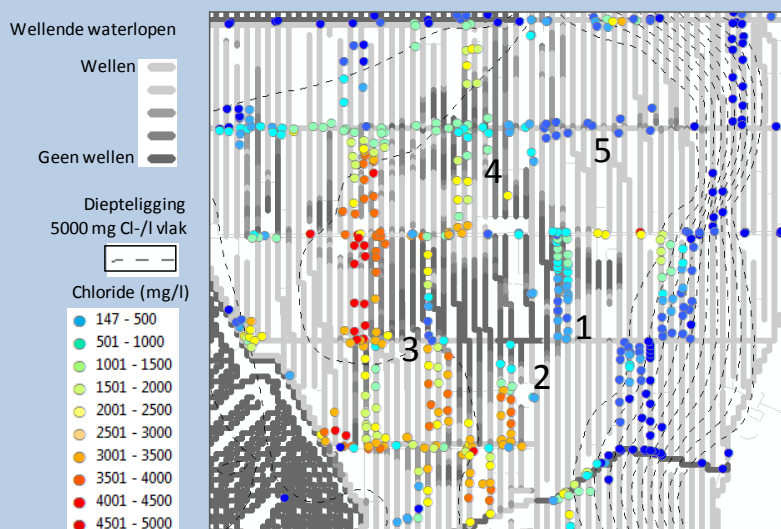
Berekening opbarsting en voorkomen van wellen met een grondwatermodel

Met behulp van een wellenregel is met een grondwatermodel voorspeld waar wellen voorkomen in de polder Groot Mijdrecht. Op basis van de wellenregel bepaald het model zelf waar wellen zullen optreden. De wellenregel is als volgt opgesteld:

$$q = \begin{cases} 0 & (\varphi < fw + h) \\ b \frac{\varphi - (fw + h)}{c} & (\varphi \geq fw + h) \end{cases}$$

q wellenflux naar kwellende sloot [m³/m'/d], **b** is de slootbreedte [m], **φ** is de stijghoogte onder de deklaag [m NAP], **f** is de welfactor [-], **w** is het overgewicht van de deklaag ten opzichte van water uitgedrukt in waterkolom [m], **h** is de oppervlaktewaterstand in de sloot [m NAP] en **c** is de welweerstand per slootoppervlak [d]. De welfactor **f** en de welweerstand **c** zijn de resterende parameters in de wellenregel en zijn als ijkparameters gebruikt.

Onderstaande figuur toont het eindresultaat. De locaties 1 -4 geven locaties weer waar een laag chloridegehalte is gemeten in een gebied waar het grondwater onder de deklaag zout is. Deze gebieden komen overeen met gebieden waar volgens de wellenregel geen wellen zijn berekend. Locatie 5 is een hoofdwatgang waar het water sterk is verdund door de hoge zoete kwelafvoer uit de randzone van de Vinkeveense Plassen. In het overige lichtgrijze gebied zijn wellen aanwezig (Zaadnoordijk, Velstra, e.a., 2009).



5.4 Wateranalyses en analyse herkomst water van de wel

Voor het onderzoek bij Fort Vuren zijn watermonsters genomen van de slotgracht van Fort Vuren net ten oosten van de wel (nr 2), de wel (nr 3), de drain in het graslandperceel ten noorden van de wel (nr 4), het grondwater van peilbuis B44 (nr 5) en de Waal (nr 6). De gegevens zijn weergegeven in Tabel 1.

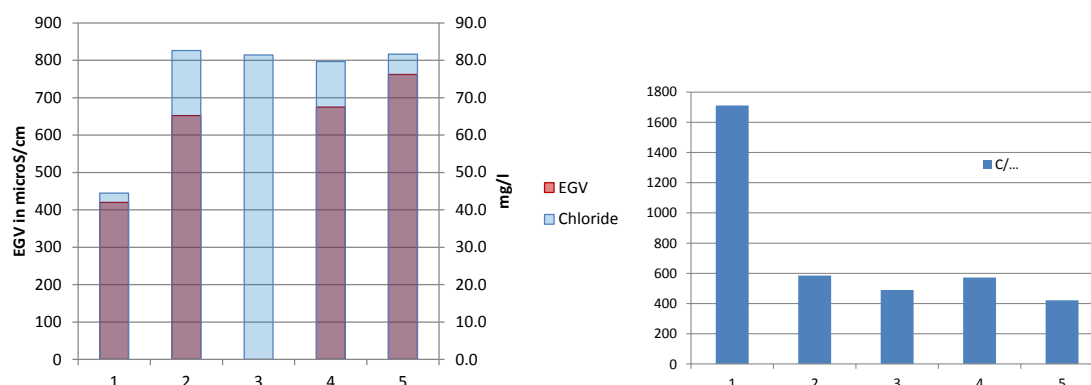
Tabel 1. Overzicht analysesresultaten.

Nr	Locatie	pH	EGV	Fluoride	Chloride	Nitriet	Bromide	Nitraat	Sulfaat	C/Br	Temp
			microS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l		
1	slotgracht	7.37	420	0.2	44.5	0.0	0.0	0.2	9.7	1711	
2	wel	7.62	652	0.2	82.6	<0.03	0.1	0.1	40.1	585	
3	drain	7.24		0.3	81.4	0.1	0.2	0.7	22.7	490	
4	grondwater B44	7.75	675	0.3	79.6	<0.03	0.1	0.1	34.9	572	12.0/12.1
5	Waal	7.78	762	0.2	81.6	<0.03	0.2	9.9	70.1	422	
Nr	Locatie	Natrium	Kalium	Calcium	Magnesium	Ijzer (2+)	Mang. (2+)	Silicium	Amm.	² d _{H2O}	¹⁸ dH2O
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	‰	‰
1	slotgracht	31.2	6.4	36.3	8.3	0.30	0.04	0.6	0.4	-16.55	-1.34
2	wel	44.5	4.5	77.1	10.7	0.52	1.21	6.0	1.9	-63.39	-9.10
3	drain	44.7	4.0	81.9	11.3	5.73	1.14	8.2	2.6	-61.89	-9.08
4	grondwater B44	41.5	4.5	75.5	11.1	1.33	0.88	5.8	1.3	-62.78	-9.35
5	Waal	46.1	4.6	70.0	12.4	0.11	0.02	2.1	<0.01	-63.90	-9.36

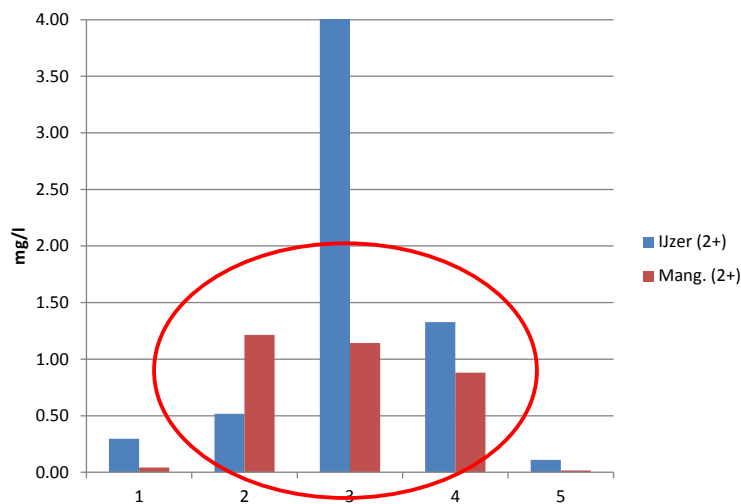
Herkomst en verblijftijd op basis van maatgevende macro-ionen

Het relatief weinig gemineraliseerde water uit de slotgracht wijkt sterk af van de andere bronnen en de wel. Het welwater kan dus niet daaruit afkomstig zijn. De Waal heeft een relatief hoog zoutgehalte van ca 80 mg/l door de lozingen van afvalwater, vooral uit zoutmijnen, bovenstrooms in de Rijn. De chloride/bromide verhouding van 422 is ook typerend voor het zout in de Rijn en Waal (Mendizabal et al., 2011).

Voor het lokale grondwater en regenwater in dit gebied zouden lage chloridegehalten (< 50 mg/l) en een lage chloride/bromide verhouding van ca 270 worden verwacht (Mendizabal et al., 2011). Echter het grondwater uit de wel, de peilbuis en de drain lijkt heel sterk op dat van de Waal. We kunnen dus concluderen dat het grondwater in de peilbuis, de wel en de drain voornamelijk bestaat uit Waalwater dat is geïnfilterde en naar de laag gelegen polders stroomt.



Figuur 25. Links, EGV en chloride voor elk van de watermonsters. Rechts Cl/Br verhouding voor de verschillende watermonsters.

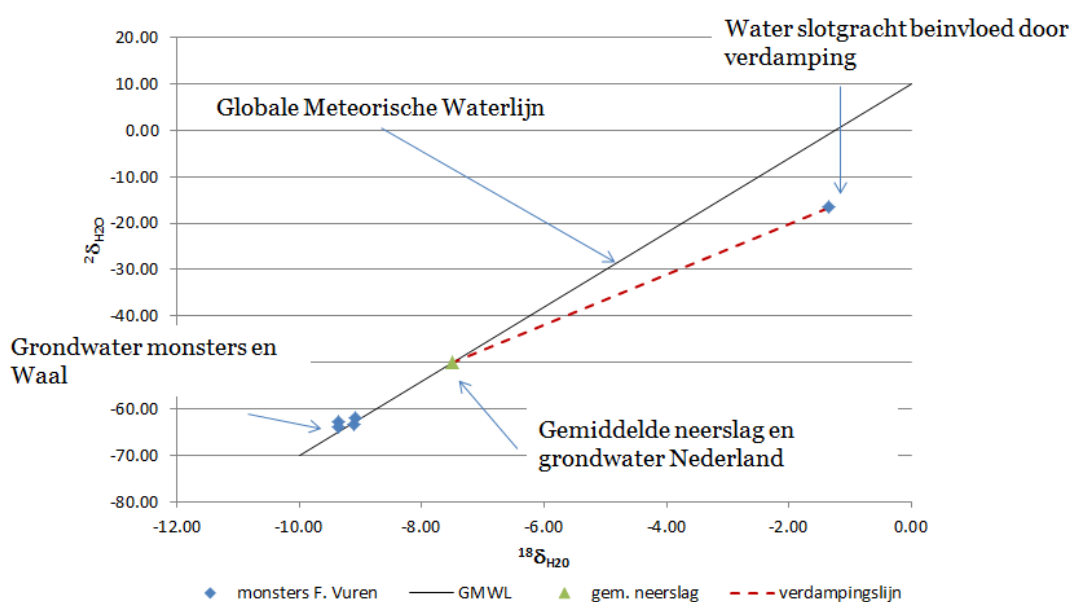


Figuur 26. IJzer en Mangaan gehalte in de verschillende watermonsters.

Verder laten de verhoogde ijzer- en mangaangehalten zien, dat het water anoxisch is. Dat duidt erop dat het grondwater enige tijd onderweg is geweest vanaf de Waal naar de wel. Er lijkt dus geen directe “open” verbinding te bestaan tussen de wel en de Waal door piping. De verblijftijd zou dan te klein zijn om deze chemische verandering te ondergaan. Ook de drain voert voornamelijk water af met een Waalsignatuur. Er is dus relatief weinig invloed van lokaal geïnfiltreerde regenwater, wat duidt op sterke kwel in het gebied rond de wel.

Herkomst en verblijftijd op basis van stabiele isotopen

Een andere parameter waaruit de herkomst blijkt is de verhouding van stabiele isotopen van zuurstof en waterstof. Het water van de Waal heeft een vrij lage waarde voor $^{18}\delta_{H_2O}$, die seizoenmatig varieert tussen -8.5 en -9.5 permille. Die waarde is sterk beïnvloed door het smeltwater uit de Alpen. Het lokale neerslagwater in Nederland varieert tussen -6.5 en -9.0 permille (Meinardi, 1999). Het grondwater gevormd uit lokale neerslag zal een isotopensignatuur hebben dat rond een gemiddelde ligt van -7.8 permille.



Figuur 27. Uitwerking van de stabiele isotopen afgezet tegen de globale meteorische waterlijn.

De watermonsters uit de wel, de peilbuis en de drain bij Fort Vuren hebben $^{18}\text{H}_2\text{O}$ -waarden van -9.1 tot -9.4 permille. Ook dit duidt erop dat het grondwater voornamelijk afkomstig is uit de Waal en dat er nauwelijks bijmenging is met lokaal neerslagwater.

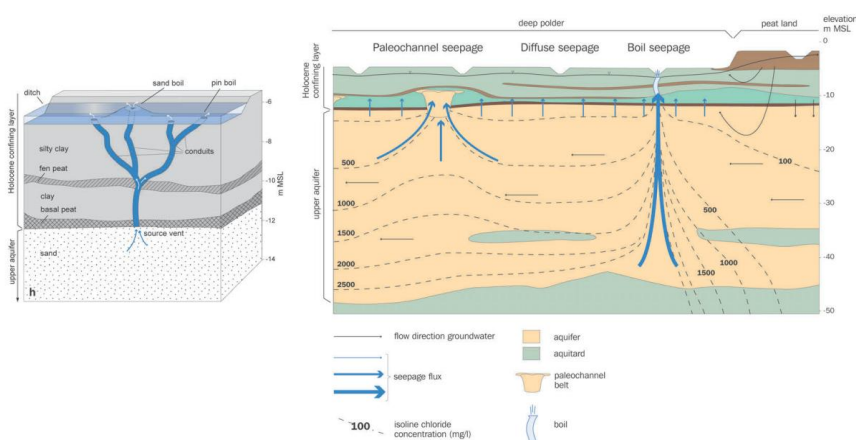
De hoge stabiele isotopenverhouding $^{18}\text{H}_2\text{O}$ van de slotgracht van -1.34 permille wijst erop dat er indamping heeft plaatsgevonden. De slotgracht is een geïsoleerd water systeem met grote peilvariaties. Zo stond het water vrij laag ten tijde van de monsternamen (Bij hoog peil is er een overloop naar het poldersysteem). In water dat onderhevig is aan open water verdamping neemt de stabiele isotopenverhouding toe in de loop der tijd, doordat de “zwarte” ^{18}O - of ^2H -isotopen achterblijven tijdens het verdampingsproces. De afwijkend hoge $^{18}\text{H}_2\text{O}$ -waarde is dus ook een aanwijzing dat in ieder geval het welwater niet afkomstig is van de slotgracht.

Afgelegde weg en verblijftijd op basis van temperatuur

De mate van menging is ook een indicatie voor de afgelegde weg en de verblijftijd. De temperatuur van het grondwater was 18 september en 11 december vrijwel gelijk (12.0 en 12.1 °C). Hoewel het grondwater vrijwel geheel uit Waalwater bestaat, maakt de afwezigheid van de seizoenmatige temperatuurvariatie van Waal duidelijk, dat het water een lange verblijftijd heeft. Bij een lage stroomsnelheid en lange verblijftijd van het grondwater wordt de temperatuurvariatie sterk gedempt. Er heeft zich kennelijk (nog) geen “pipe” met hoge stroomsnelheden gevormd richting de rivier.

Afgezien van de lange verblijftijd speelt ook het stromingspatroon een rol. De wel uit een opgebarsten deklaag is in feite een kleine grondwaterput. In de zandlaag eronder stroomt het grondwater radiaal-symmetrisch toe naar de wel langs stroombanen die op enige afstand pas ombuigen richting de Waal. Deze stroombanen hebben verschillende verblijftijden, waardoor menging van water van verschillende ouderdom optreedt bij de put. Dit verschijnsel is goed bekend bij de oeverfiltraatwinningen. Hoewel er slechts twee temperatuurwaarnemingen zijn, lijkt het erop dat het welwater goed gemengd is wat een aanwijzing is voor de afwezigheid van vergevorderde piping op dit moment.

Naast temperatuur kan de menging ook worden onderzocht aan de hand van tijdreeksen van de geleidbaarheid en $^{18}\text{H}_2\text{O}$ van het welwater, omdat deze parameters van het Waalwater ook seizoenmatig variëren. Ook vertonen laatstgenoemde kwaliteitsparameters een langjarige trend, zodat datering mogelijk is van het welwater en grondwater (niet-gepubliceerde data van Eck en Wiel).



Figuur 28. Vorming van wellen door opbarsting in een deklaag. Grondwater kan van grote diepte worden aangetrokken (de Louw et.al. 2010).

6

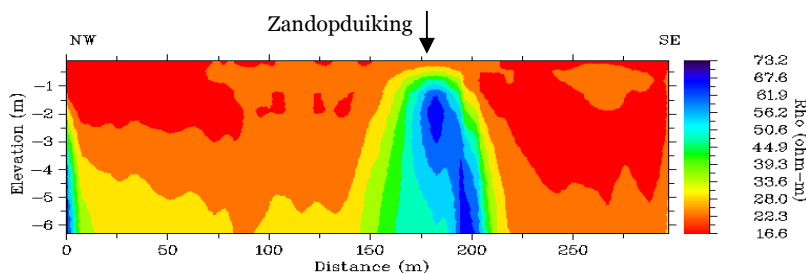
Conclusies en aanbevelingen

6.1 Resultaten Fort Vuren en Hurwenense Kil (Zaltbommel)

Fort Vuren

Bij Fort Vuren is een duidelijke verticale structuur zichtbaar enkele meters ten noordoosten van de wel. Het is niet waarschijnlijk dat dit wordt veroorzaakt door de wel of het opbarstkanaal zelf. Deze heeft vermoedelijk te kleine afmetingen om te kunnen worden gedetecteerd. Wel kunnen gerelateerde fenomenen worden herkend zoals het omhoogkomen van meer gemineraliseerd water en een afwijkende geologische opbouw. Het betreft hier geen zandopduiking omdat daar dan juist hogere weerstanden zouden worden verwacht.

Opgemerkt wordt dat een dergelijk fenomeen in ander onderzoek aangetoond is met dezelfde apparatuur (Figuur 29). Het betreft een zandopduiking (rivierdonk) bij een kade.



Figuur 29. DUALEM meting van een zanddonk (meting Wiertsema & partners in gebied van Rivierenland)

Hurwenense Kil

Bij de Hurwenense Kil bestrijken de geofysische metingen een groter gebied dan bij Fort Vuren. Daar zijn ook lateraal meer sedimentologische variaties te verwachten. In het noordelijk gedeelte van het onderzoeksgebied (o.a. blok in Figuur 9 en Figuur 18) is een veenlaag in de Holocene deklaag aanwezig van enkele meters dikte, die ontbreekt in het zuiden. Dat blijkt uit het voorkomen van lage weerstanden van rond 10 a 20 Ohmm in dat gebied (profiel 16a in Figuur 6 en het 3D beeld in Figuur 9). Rond de wellen zijn weinig afwijkende structuren zichtbaar.

6.2 Toepasbaarheid van meetmethoden en aanpak

Geofysica voor bodemopbouw en wellen

De conclusie is dat geofysische metingen op basis van elektrische weerstand geschikt zijn om gebiedsdekkend variaties in de bodemopbouw te bepalen. De zand-, klei- en veenlagen zijn onderscheidend wat de elektrische weerstand. De weerstanden zijn respectievelijk 50 tot 70 Ohmm, 30 tot 40 Ohmm en 10 tot 20 Ohmm. Deze lagen zijn dus goed vast te stellen met geofysische meetmethoden. Lagen met een dikte/diepte verhouding van ruwweg 25 % zijn nog vast te stellen.

In de buurt van wellen kunnen zich verticale structuren voordoen, die (in)direct verband houden met een wel. Bijvoorbeeld een wijziging in bodemsamenstellen dan wel watersamenstelling door ‘upconing’ (omhoogstromen) van meer gemineraliseerd grondwater.

Op basis van deze bevindingen kan dan ook geconcludeerd worden dat het raadzaam is om voorafgaand aan sondeer- en boorwerkzaamheden geofysische metingen uit te laten voeren. Op basis van de patronen die uit zo’n onderzoek naar voren komen kunnen de locaties van de boringen en sonderingen gericht worden gekozen. Dat vergroot het inzicht in de geologische ondergrond, verbetert de risicobepaling bij de toetsing en verlaagt mogelijk de kosten.

Grondwaterstanden voor vast stellen opbarsting/welvorming

Uit de analyse van de grondwaterstanden en het opbarst risico bleek dat zones waar veenlagen voorkomen van meer dan 4 m dikte of waar zandlagen tot enkele meters onder het maaiveld reiken een risico vormen van het doorbreken van de deklaag bij hoge rivierstanden en het ontstaan van wellen. Zoals gezegd zijn dergelijke dikke lagen veen goed vast te stellen met geofysische methoden. Ook kan aan de hand van analytische berekeningen en analyses van tijdseries van grondwaterstijghoogten worden nagegaan of de deklaag nog “intact” is. De analyse in dit onderzoek wijst erop dat waar eenmaal opbarsting heeft plaatsgevonden achter de waterkering, de hydraulische weerstand van de deklaag en daarmee de grondwaterstijghoogte sterk is afgenomen.

Kunstmatige drukontlasting is een mogelijke strategie om ongecontroleerde welvorming en piping te voorkomen. Dergelijke oplossingen zijn in het verleden reeds toegepast. Waar nog aanwezig worden deze momenteel geïnventariseerd in een lopend onderzoek.

Toepasbaarheid van hydrochemie en temperatuur metingen

Het hydrogeochemische onderzoek laat zien dat analyses van welwater op temperatuur, chemische parameters en isotopen een belangrijk hulpmiddel zijn om de herkomst en verblijftijd van het welwater te bepalen. Het grondwater uit de wel en de peilbuis bij Fort Vuren bestaat geheel uit Waalwater. Het water uit de wel lijkt van constante temperatuur te zijn. Als de seizoenmatige temperatuur van de rivier niet waarneembaar is, dan betekent dit dat het water lang onderweg is. De temperatuurfuctuatie is dan namelijk gedempt door warmteuitwisseling met de omgeving. De lange verblijftijd kan ook worden afgeleid uit het anoxische karakter van het water (hoge ijzer en mangaangehalten).

De snelle stroming, die het zand doet meevoeren speelt zich hoogstwaarschijnlijk alleen af in de directe nabijheid van de wel. Bij een dergelijke lange verblijftijd is er dus nog geen sprake van een “pipe” die zich heeft ontwikkeld tot aan het kanaal of rivier. Het is dus zinvol om wellen eenmalig en in de tijd hydrogeochemisch te analyseren. Tevens wordt aanbevolen om wellen te monitoren met zelfregistrerende CTD divers (temperatuur, druk en zoutgehalte).

Toepassing van zandmonsters

Wanneer een wel optreedt en tevens zandmeevoerend is wordt aanbevolen deze te bemonsteren om de herkomst van het zand te achterhalen. Dit is niet uitgevoerd in deze studie maar kan mogelijkheid informatie opleveren ten aanzien van de ontwikkeling van piping. De verschillende zandlagen in de ondergrond hebben vaak een eigen signatuur wat betreft mineralogische samenstelling en korrelgrootte en -vorm. Analyses van het meegevoerde zand bij een wel kunnen mogelijk uitsluitsel geven over de herkomst en diepte en daarmee ook over de locatie en diepte van de “pipe”. Ook kan de karakteristiek van het meegevoerde zand worden vergeleken met parameters van de Sellmeijerregel, die betrekking hebben op het zand.

Toepassing van modelsimulaties op basis van eindige elementen

Voor de simulatie is gebruik gemaakt van modelcode op basis van FlexPDE binnen de modelomgeving van SVOoffice, waarin tegelijk verzadigde en onverzadigde grondwaterstroming op een klein schaalniveau kan worden gesimuleerd. Dit programma is met name ontwikkeld om grondwaterstroming door dijken en dammen te bestuderen. Er zijn modules te koppelen waarmee ook

volledig geïntegreerd met de waterstroming de stabiliteit, deformatie, warmte- en gastransport door de bodem en dijklichaam kan worden berekend.

Het gebruik van dit type model met een geïntegreerde benadering van verzadigde en onverzadigde zone van belang voor de juiste berekening van de freatische lijn in een dijk of boezemkade. Ook is deze modelbenadering van belang voor de geotechnische berekeningen van stabiliteit van waterkeringen.

De hier uitgevoerde modelsimulaties geven niet alleen inzicht in grondwaterstanden en stromingsrichtingen maar berekenen direct de drukverdeling in de tijd en effecten van een wel. Met betrekking tot het pipingrisico verdient het aanbeveling om voor de Sellmeijerregel gebruik te maken van het verschil in de stijghoogte van het grondwater in het zandpakket in plaats van het verschil in rivierwaterstand en polderpeil. Uit de modelsimulaties in dit model blijkt dat de stijghoogte onder deklaag aan de voet van de dijk veel lager ligt dan het heersende waterpeil in de Waal (7m vs 4.5m).

GIS-analyse gebiedsdekkende analyse opbarstrisico

Inzicht in de opbouw van de natuurlijke sedimenten en de waterkering is van groot belang voor het inschatten van de faalkansen van de kering. Om de efficiëntie en kwaliteit van boor- en sondeerprogramma's te verhogen, wordt aanbevolen om deze programma's te laten voorafgaan van gebiedsdekkende geohydrologische en geofysische studies, de Kijken in Dijken (KID) benadering. Op basis hiervan kunnen locaties en specificaties van sonderingen en boringen beter worden aangegeven.

Concreet om te verkennen of dit haalbaar is stellen we voor dit voor een dijktracé uit te voeren. Dit betekent uitvoeren van een analyse van beschikbare data met archiefonderzoek het ontsluiten van historische gegevens, geohydrologie en geomorfologie. Gegevens beschikbaar bij het waterschap en nationale databases als DINO in een GIS omgeving. Deze informatie is dan binnen een GIS omgeving te combineren met gebiedsdekkende grondwaterstijghoogten, waterstanden om daaruit het opbarstrisico te bepalen bij bepaalde hoogwaterstanden en te onderzoeken of er al opbarsting heeft plaatsgevonden.

7 Literatuur

- Archie, G.E. ,1942. "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics". Petroleum Transactions of AIME 146: 54–62.
- Berbee, B.M. en Leuwerink, K.J. , 2013, Piping niet los te zien van grondwaterstroming. Land en Water 10 sept. 2013.
- De Louw P., Ouder Essink G., Stuyfzand P. & Van der Zee S., 2010. Upward groundwater flow in boils as the dominant mechanism of salinization in deep polders, the Netherlands. Journal of Hydrology 394, 494-506.
- Gouw M.J.P. & Erkens G., 2007. Architecture of the Holocene Rhine-Meuse delta (the Netherlands) – A result of changing external controls. Netherlands Journal of Geosciences (Geologie en Mijnbouw), 86 (1), 23 – 54.
- Leskens & Lodiers, 2012. Toetsing waterkeringen ondanks beperkt grondarchief. Land + water 52(2012)9.
- Mazure, J.P., 1936. Geo-hydrologische gesteldheid van de Wieringermeer. Algemene landsdrukkerij - 's-Gravenhage, pp.67-131.
- Meinardi, 1999. Grondwateraanvulling en oppervlakkige afstroming in Nederland. Deel 3. De afwatering van veengebieden. Stromingen 5 (1), 5-18
- Mendizabal et al., 2011 Mendizabal, I., Stuyfzand, P., Wiersma, A., 2011. Hydrochemical system analysis of public supply well fields, to reveal water-quality patterns and define groundwater bodies: The Netherlands. Hydrogeol. J. , 19(1): 83-100.
- TAW 1999, Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft, maart 1999
- Thode R. & Fredlund M, 2013. SVFLUX, 2D/3D Seepage Modeling Software. Tutorial Manual. SoilVision Systems Ltd, Saskatoon, Saskatchewan, Canada
- Verruijt A., 1970. Theory of Groundwater Flow. Macmillan.
- Wiertsema, 2012. Geotechnisch Onderzoek. Piping verlengde 3de toetsronde, Dijkkring 43, FortVuren te Vuren, project 56305-5. Waterschap Rivierenland.
- Wirdum, G. van, 2010. Handleiding prikstok; Deltares, Utrecht
- Zaadnoordijk, W.J. Velstra, J., Vergroesen, A.J.J., Mankor, J., 2009. Groot Mijdrecht: inzicht in functioneren van wellen. Stromingen 15 (2009) 2.

Bijlage 1

Beschrijving van gebruikte meetmethoden

Geofysische metingen

Relaties elektrische weerstand, lithologie en zoutgehalten

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:

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

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 die 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. 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.

Tabel B1. Formatiefactor voor diverse bodemsoorten

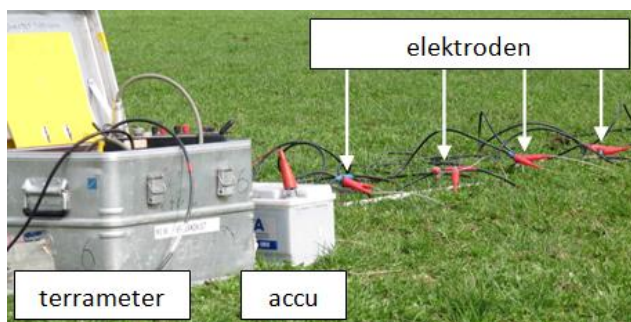
Lithologische beschrijving	Formatiefactor
grind met zand	7
grof zand met grind	6
grof zand	5
matig grof zand	4
zwak slibhoudend zand	3
matig slibhoudend zand	2.5 *
sterk slibhoudend zand	2 *
klei	1 - 3 *
veen	~ 1

CVES methode

De CVES methode is een zogenaamde Direct Current methode. Hierbij wordt via twee stroom elektroden 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 B1. CVES meting met terrameter, accu, kabel en elektroden

FDEM profiling(DUALEM)

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.



Figuur B2. FDEM meting

Handboringen

Om de geofysische metingen te verifiëren en informatie over de bodemopbouw te verkrijgen zijn op diverse locaties handboringen uitgevoerd tot onder de grondwaterspiegel.

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.

Acacia Water
Jan van Beaumontstraat 1
2805 RN Gouda

Telefoon: 0182 – 686424
Internet: www.acaciawater.com
Email: info@acaciawater.com

