

28 mei

WATERSCHAP RIVIERENLAND

POV piping - wellen onderzoek

Monitoren en karakteriseren van wellen & piping bij waterkeringen

Eindrapport



Colofon

Documenttitel	. POV piping -
Opdrachtgever	. Waterschap Rivierenland
Verantwoordelijke bij opdrachtgever	. Bas Effing, Laura Taal
Status	. Eindrapport
Datum	. 28 mei 2018
Projectnummer	. 160581
Projectteam	. Sieger Burger, Bea de la Loma Gonzalez, Emiel Kruisdijk, Jouke Velstra

Disclaimer

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

Management samenvatting

Achtergrond en doelstelling

Binnen het huidige Hoog Water Beschermings Programma (HWBP) is in 2014 een Project Overstijgende Verkenning (POV) gestart naar piping. Eén van die aspecten is het monitoren en karakteriseren van bestaande zandmeevoerende wellen. Voorliggend rapport geeft vanuit geohydrologisch perspectief de resultaten van de analyse en karakterisering van (zand meevoerende) wellen. Het onderzoek is gebaseerd op een driejarige intensieve meetcampagne in en rond wellen, literatuuronderzoek en geohydrologische modelsimulaties. Er zijn 11 locaties geselecteerd: 3 langs de Neder-Rijn/Lek en 8 langs de Waal.

Resultaten

Hoewel gedurende de looptijd van het project zich geen significant hoogwater (een Rijnwaterniveau bij Lobith wat hoger is dan 14 m boven NAP) heeft voorgedaan, heeft het project veel extra inzichten en vervolgvragen opgeleverd. De belangrijkste zijn:

Geohydrologie

[1] De geselecteerde wellen blijken op te delen in drie soorten wellen:

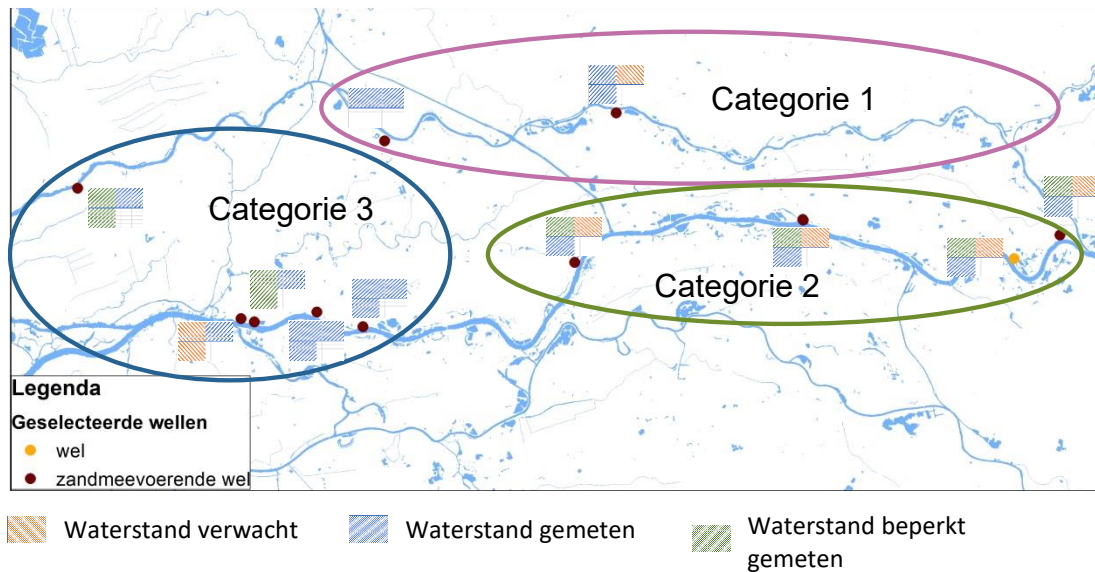
- Categorie 1: wellen in de buurt van een hoger gelegen gestuwde rivier met een redelijk constante rivierwaterstand. De deklaag is hier dun (<2m) en de wellen geven continu water;
- Categorie 2: wellen met een gemiddelde rivierwaterstand onder het binnendijkse maaiveld. De rivier vertoont flinke fluctuaties in waterstand. De deklaag achter de dijk is hier dun (<2 m) en de wellen geven enkel water bij hoge rivierwaterstanden. Het debiet varieert met de rivierwaterstand;
- Categorie 3: wellen met een gemiddelde rivierwaterstand gelijk aan en boven het binnendijkse maaiveld. De rivier vertoont beperkte variatie in de waterstand en de deklaag is hier dik (> 4 m). De wellen geven vrijwel continu water.

Met deze indeling in categorieën kan worden verklaard waarom de wellen altijd actief zijn of niet actief zijn: hoe het waterpeil van de rivier zich verhoudt tot het maaiveldniveau in het achterland is hierbij een zeer belangrijke factor.

[2] Hysterese-grafieken van de grondwaterstijghoogte versus de rivierwaterstanden t.o.v. het binnendijkse maaiveld (c.q. waterstand van de teensloot) leveren een veel beter begrip op rondom het functioneren van de wellen. Hiermee kan goed inzichtelijk worden gemaakt, waarom de wellen wel of niet actief zijn: hoe het waterpeil van de rivier zich verhoudt tot het maaiveldniveau in het achterland is hierbij een zeer belangrijke factor.

Het continueren van de metingen in peilbuizen op de huidige locaties, zodat ook zeer extreme situaties worden gemeten, is van groot belang voor het verbeteren van het geohydrologisch functioneren van de ondergrond rond een wel.

Doorvertaling van deze hysterese inzichten naar meer locaties, niet alleen langs de Waal en Neder-Rijn/Lek, maar ook naar de IJssel en de Maas, zullen hierbij nuttige extra inzichten opleveren over het functioneren van wellen langs die rivieren. Door bestaande meetnetten langs de rivierdijken te gebruiken kunnen hier al snel resultaten worden verkregen.



Figuur 1. Spreiding in type op basis van de rivier- en grondwaterstijghoogten van de 11 wellen ingedeeld in de 3 categorieën

[3] Het meten van de temperatuur in het grondwater bij de well geeft goed inzicht in het type water uit de well. Wanneer continu kwel optreedt varieert de temperatuur nauwelijks. Daar waar soms sprake is van kwel en soms sprake is van inzijging van regenwater, is de variatie in temperatuur van het grondwater veel groter. Bij de opschaling van de hysteresis grafieken naar andere gebieden kunnen deze metingen (temperatuur wordt altijd gemeten als de druk met een automatische druksensor wordt gemeten) tevens worden gebruikt als controle van de grondwatersituatie.

Geochemie

[4] Geochemische parameters zijn een goede tracer voor de verblijftijd van water. Het blijkt echter niet toepasbaar voor het bepalen van de ontwikkeling van een pipe en/of functioneren van een well. De reden is het functioneren van het geohydrologische systeem in en rond een well en/of piping. 1) Kwel van grondwater en infiltratie van regenwater verschillen geochemisch sterk, waardoor de lokale geohydrologische situatie bepalender is dan de stroming van de well/piping. 2) Een eventuele pipe zal functioneren als een drain, waarbij elke meter pipe extra grondwater (met een andere leeftijd) aantrekt. Het water wordt hierdoor een mix van verschillende typen water (een mix van jong en oud grondwater, regenwater en rivierwater). Hierdoor is het aandeel rivierwater (maat voor de leeftijd en voortschrijding van de pipe) niet onderscheidend.

[5] De categorie indeling (zie ook [1]) in combinatie met de hysteresis grafieken (zie [2]) is ook een hulpmiddel om het geochemische gedrag in het geohydrologische kader te kunnen plaatsen:

In dijklichamen kan er sprake zijn van inzijging. Dit resulteert in een 'regenwaterlens' in en onder de dijk: dit water heeft een regenwatersignatuur t.o.v. het geïnfilterde rivierwater. In het bovenstroomse deel van de Waal (categorie 2) is het grootste deel van de tijd sprake van inzijging, waardoor het grondwater bestaat uit ondiep regenwater met daaronder water wat meer een rivier signatuur heeft.

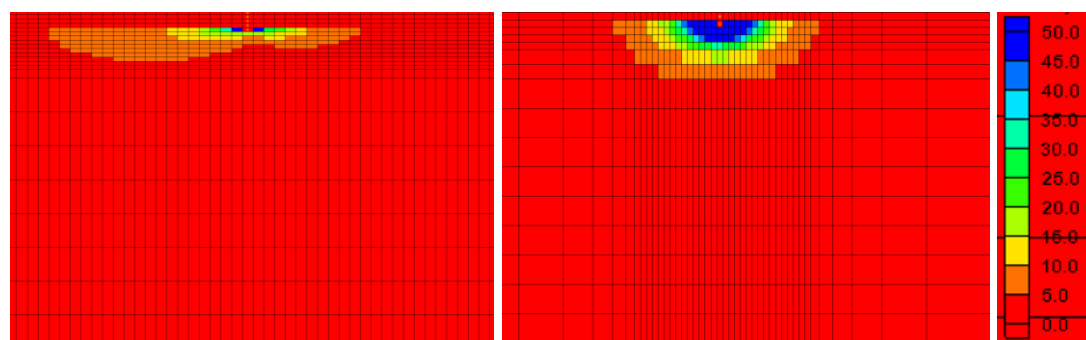
Geohydrologische modelsimulaties

[6] De stroming naar een well en/of piping is een zogenaamd 3D probleem. Veel modelsimulaties vinden plaats in een verticale 2D dwarsdoorsnede. Deze vereenvoudiging, zo is aangetoond, leidt tot een overschatting van het optreden van piping. Oftewel: in dergelijke

2D-modelsimulaties zal er vrijwel altijd vorming van een pipe optreden, terwijl bij een juiste modelschematisatie en -benadering in 3D dit lang niet altijd optreedt, maar zich een 'caverne' vormt. Het vermoeden is dat deze caverne bij een langdurig optredend drukverschil, kan stabiliseren.

Vervolgonderzoek met 3D modellen dient te worden voortgezet en uitgebreid. Dit is nodig om te bepalen wat er gebeurt rondom het ontstaan van wellen en het ontstaan van een 'caverne'. Onderzocht kan worden of de verhouding "waterstand/ afstand tot het intreepunt" zodanig kan zijn, dat er een pipe ontstaat. Tevens zal hierin de invloed van anisotropie en andere factoren worden meegenomen.

De hypothese is dat in een 3D model de invloed van de rivier steeds groter wordt, naarmate de wel zich dichterbij de rivier bevindt. Naarmate de invloed van de rivier groter wordt, lijkt het hiermee meer op de 2D situatie, waarmee dus de kans op de vorming van een pipe groter wordt. Met modelsimulaties kan worden bepaald op welke afstand van het intreepunt dit gebeurt. Het onderzoek kan daarmee van invloed zijn op de maximum breedte van pipingbermen.



Figuur 2. Links: Dwarsdoorsnede van het 2D model (ingezoomd rond de wel). Rechts: Dwarsdoorsnede van het 3D model (ingezoomd rond de wel). Voor beide modellen geldt dat de rivier aan de linkerzijde op 170 m afstand van de wel is gemodelleerd. Beide modellen geven de stroomsnelheid weer bij een drukverschil van 2 m en een anisotropie van 10

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding.....	1
1.2	Doelstelling.....	2
1.3	Leeswijzer	2
2	Eerder onderzoek	3
2.1	Algemeen	3
2.2	Noordplaspolder	4
2.3	Rivierenland	4
2.4	Tielerwaard.....	5
2.5	Groot Mijdrecht.....	7
2.6	3D-berekeningen van wellen	7
2.7	Conclusies.....	7
3	Selectie van wellen	9
3.1	Wellen database Rivierenland	9
3.2	Dikte van de deklaag	10
3.3	Selectiecriteria en groslijst: van 167 naar 40	11
3.4	Van 40 naar 11 wellen.....	12
4	Meetmethoden en apparatuur	15
4.1	Algemeen	15
4.2	Automatische metingen bij 11 wellen	15
4.3	Afvoermetingen bij 2 wellen	16
4.4	Chemische- en isotopenanalyse	16
5	Resultaten geohydrologische monitoring	17
5.1	Indelen van wellen in 3 categorieën.....	17
5.2	Rivierwaterstanden	18
5.3	Waterstanden in peilbuizen.....	20
5.4	Geleidbaarheidsmetingen.....	23
5.5	Temperatuurmetingen	25
5.6	Debietmetingen bij actieve wellen.....	29
5.7	Zandmonsters bij actieve wellen.....	33
5.8	Camera inspecties wellen.....	37
5.9	Conclusies geohydrologische monitoring 11 wellen.....	38
6	Resultaten Geochemie	41

6.1	Inleiding	41
6.2	Basis situatie geochemie van verschillende watertypen	42
6.3	Resultaten geochemie en isotopen	47
6.4	Temporele variatie als tracer (analyse waterbase).....	56
6.5	Redox	58
6.6	Analyse: Gebruik van chemie als tracer in de praktijk.....	66
6.7	Conclusies.....	67
7	Modelleren van wellen en piping	69
7.1	Algemeen	69
7.2	Situatie bij Culemborg en Dodewaard in 2D	70
7.3	Gedrag van een gat in de deklaag in 3D	71
7.4	Toeleverdoorsnedegebied	75
7.5	Modelleren van tracers.....	77
7.6	Conclusies.....	80
8	Conclusies	83
8.1	Algemeen	83
8.2	Geohydrologische conclusies.....	84
8.3	Geochemische conclusies.....	85
8.4	Modelmatige conclusies.....	86
9	Impact van dit onderzoek voor piping en aanbevelingen voor vervolgstappen	87
9.1	Impact van dit onderzoek voor piping.....	87
9.2	Aanbevelingen	88
	Literatuur	91

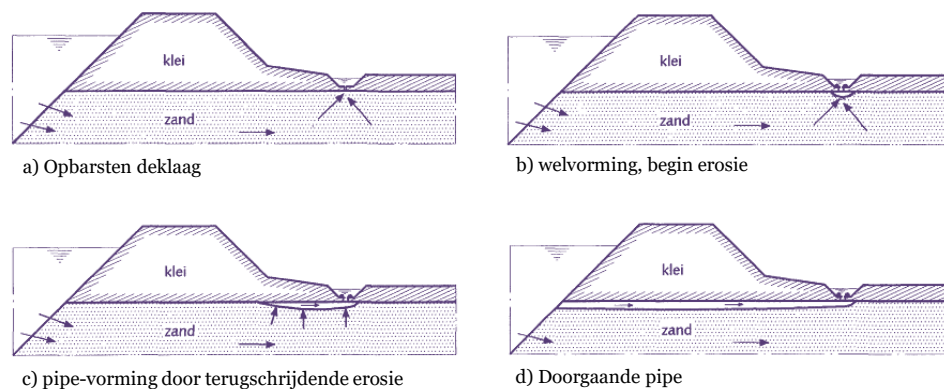
1

Inleiding

1.1 Aanleiding

Piping is een proces waarbij kwelwater, nadat de deklaag is opgebarsten bij een hoogwater, met dusdanig hoge stroomsnelheden in preferente stroombanen onder een dijk of kade doorstroomt naar de gevormde wel, dat het zand rond deze stroombanen door het kwelwater wordt afgevoerd. Hierdoor ontstaat geleidelijk een steeds groter wordend buisvormig kanaal onder een dijk, waardoor de dijk of kade kan verzakken. Piping wordt veroorzaakt door een hoge rivier-, zee-, of boezemwaterstand aan de buitenzijde van een dijk en een lage polderwaterstand aan de binnenzijde van deze dijk. Het falen van waterkeringen door piping is een bezwijkmechanisme waar - t.o.v. bijvoorbeeld overloop en overslag - nog weinig bekend is. Weliswaar zijn de verschillende fasen bij het ontstaan van piping wel duidelijk (Zie Figuur 3), maar daarnaast zijn er ook nog veel vragen:

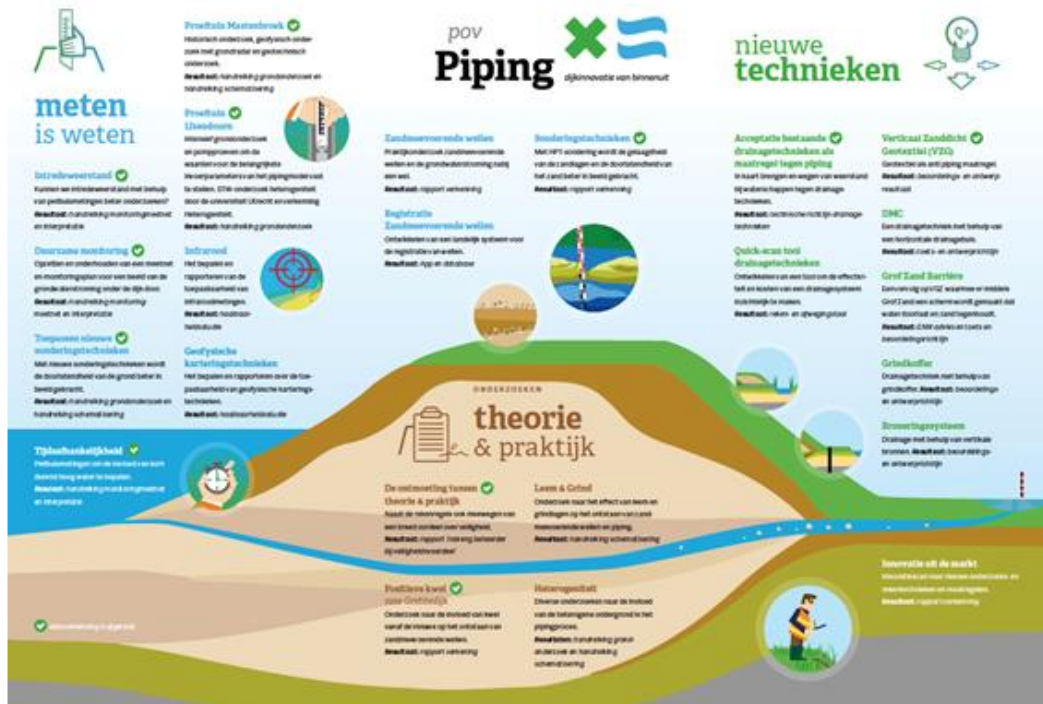
- Waarom ontstaat op de ene plek wel en de andere plek geen wel?
- Wanneer groeit een wel door naar piping?
- Wanneer is een wel of piping in evenwicht en wanneer groeit de pipe door? en
- Is de ontwikkeling van een wel en een pipe meetbaar?



Figuur 3. Fasen bij ontstaan van piping (bron: 'Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen, 1999).

Het antwoord op onder andere deze 4 vragen is van belang voor het verbeteren van toekomstige dijkversterkingsprogramma's. Binnen het huidige Hoog Water Beschermings Programma (HWBP) is dan ook in 2014 een Project Overstijgende Verkenning (POV) gestart naar piping. Binnen deze POV worden door een groot aantal partijen verschillende aspecten rondom piping in dijken uitgevoerd (Zie Figuur 4). Eén van die aspecten is het monitoren en karakteriseren van bestaande zandmeevoerende wellen, waarbij de focus in dit project (vanwege het ontbreken van significante hoogwater gebeurtenissen) sterk ligt op de laatste vraag: is de ontwikkeling van een wel en een pipe meetbaar.

Voorliggend rapport is het resultaat van drie jaar veldwaarnemingen, geochemische analyses en geohydrologische berekeningen in en rond wellen.



Figuur 4. Verschillende onderzoeken binnen de POV piping (stand van zaken december 2017)

1.2 Doelstelling

De doelstelling van het project, wat dit rapport beschrijft, is om te bepalen of met een combinatie van veldwaarnemingen, geochemische analyses en geohydrologische berekeningen kan worden vastgesteld in welke mate bij een wel al sprake is van piping. De verschillende zandlagen in de ondergrond hebben vaak een verschillende korrelgrootteverdeling. Het vermoeden bestaat dat door een zorgvuldige analyse van het soort en de hoeveelheid meegevoerd zand kan worden bepaald op welke diepte de pipe zich ontwikkelt.

De verwachting is dat wanneer op basis van geochemische of geohydrologische parameters die gemeten worden bij een wel daadwerkelijk zorgvuldig kan worden bepaald in welke mate al sprake is van piping, dit inzicht kan bijdragen aan het ontwerp van een protocol voor het onderverdelen van wellen in risico-categorieën. En daarmee de mogelijkheid om maatregelen te prioriteren in maatregelen voor wellen met een hoog, gemiddeld of laag risico.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is een beknopte samenvatting geschreven van relevant bestaand (Nederlands) onderzoek op dit onderwerp. In hoofdstuk 3 is uitgewerkt of het piping probleem met een conceptueel model kan worden beschreven. In hoofdstuk 5 is de selectie van onderzochte wellen beschreven. In hoofdstuk 6 is uitgewerkt op welke wijze aan de wellen metingen zijn uitgevoerd. En de resultaten van deze geohydrologische monitoring zijn beschreven in hoofdstuk 7. In hoofdstuk 8 worden de geochemische resultaten beschreven. Hierbij gaat het om wat in de Rijn door Rijkswaterstaat gemeten wordt, de algemene geochemische resultaten en de resultaten uit het isotopen en redox onderzoek. Tenslotte bevat hoofdstuk 9 de conclusies en aanbevelingen.

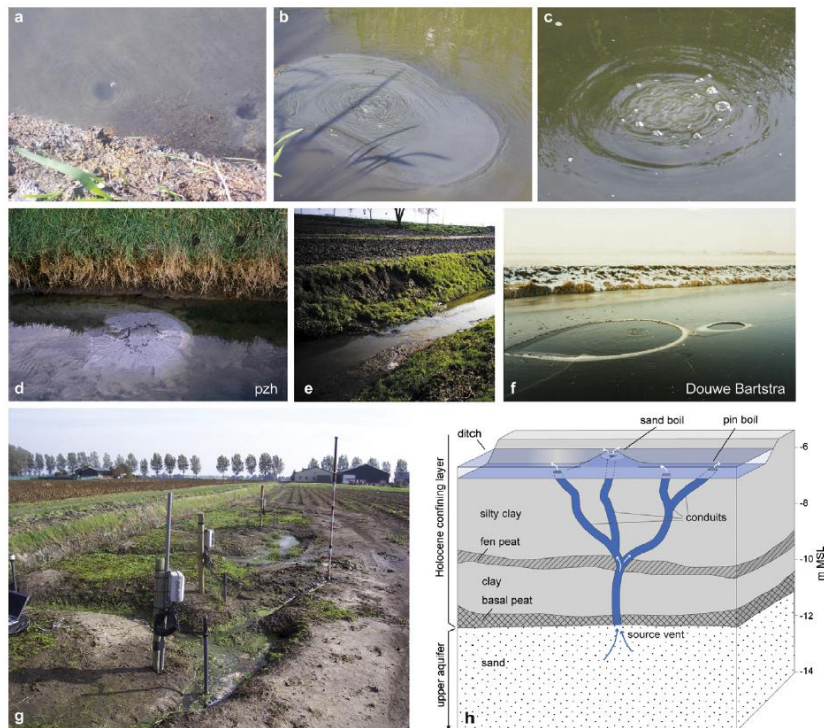
2

Eerder onderzoek

2.1 Algemeen

Bij een waterstandsverschil tussen de rivier-, zee-, of boezemwaterstand aan de buitenzijde van een dijk of kade en de polderwaterstand aan de binnenzijde treedt kwel op door en onder deze dijk of kade. Bij een gering waterstandsverschil en een dikke slecht doorlatende deklaag is de kwel gering en de intensiteit vrijwel identiek langs het lengteprofiel van een dijk en is het risico daarmee verwaarloosbaar klein.

Hoe groter het waterstandsverschil wordt en hoe dunner de deklaag is, hoe groter het risico wordt. Dit omdat er dan geen of nauwelijks evenwicht is tussen de stijghoogte van het grondwater onder de deklaag en het gewicht van de deklaag. De deklaag kan dan opbarsten. Of dit optreedt is afhankelijk van veel of weinig cohesie tussen het materiaal van de (dunne) deklaag. Maar als dit optreedt ontstaan er wellen: gaten in de deklaag die een open verbinding vormen tussen het eerste watervoerend pakket en het maaiveld en waardoorheen aanzienlijk sneller water kan stromen dan bij kwel. Hoe groter het drukverschil en hoe groter de opening, hoe meer groter de afvoer van de wel. In polders achter rivierdijken, zeedijken of boezemkades treden wellen dikwijls (maar niet altijd) op in de teensloot, omdat daar de deklaag het dunst is (zie Figuur 5). Opgemerkt wordt dat naast wellen in de sloot achter een dijk wellen ook kunnen ontstaan bij verstoringen van de deklaag door menselijk handelen, bijvoorbeeld graafwerkzaamheden, het trekken van damwanden of palen en het (niet) verwijderen van bronbemaling in polders.

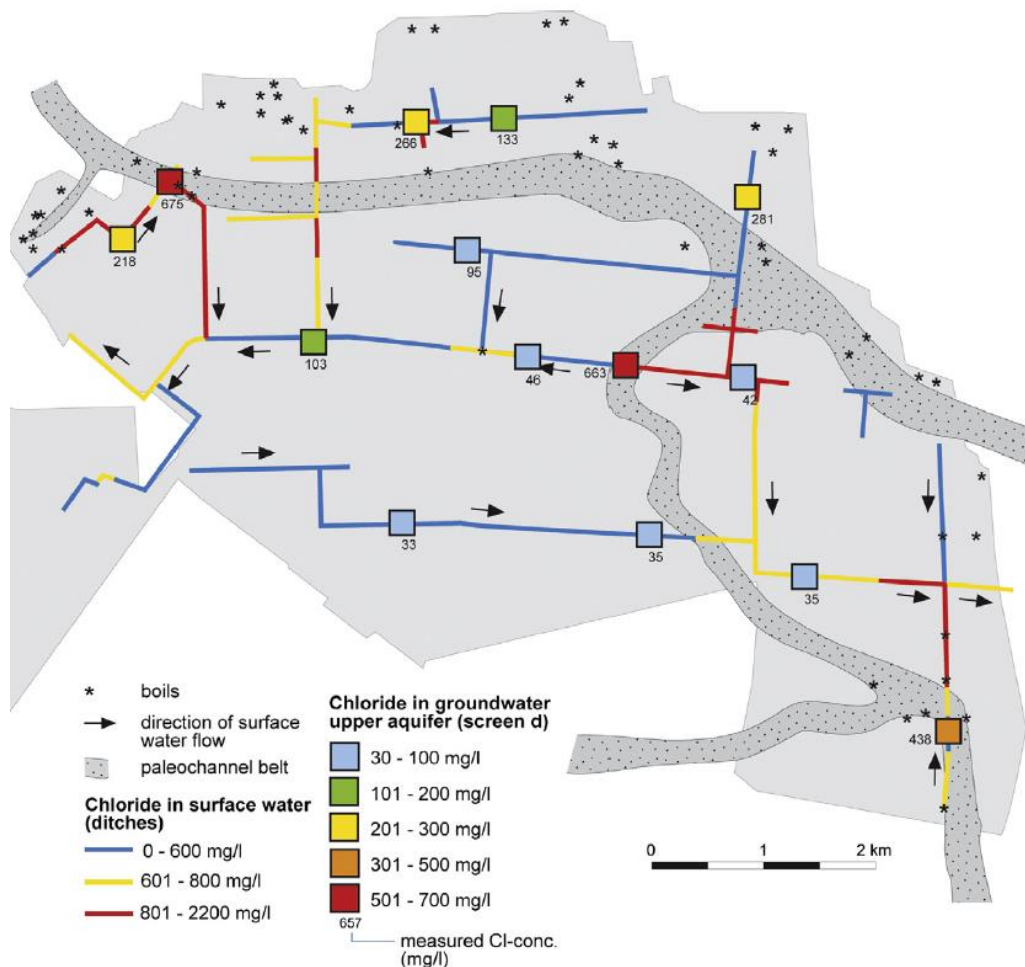


Figuur 5. Verschillende typen wellen in de Noordplaspolder in watergangen (a tot en met f) en op het land (g) en een schematische weergave van wellen met meerdere uitstroomopeningen (de Louw, 2010)

Onderzoek naar wellen zijn onder andere uitgevoerd in de Polder Groot Mijdrecht (Royal Haskoning 2008, Acacia Water 2008, de Louw et al, 2010), in de Haarlemmermeerpolder (Goudriaan et al, 2011) en de Noordplaspolder (de Louw et al, 2013).

2.2 Noordplaspolder

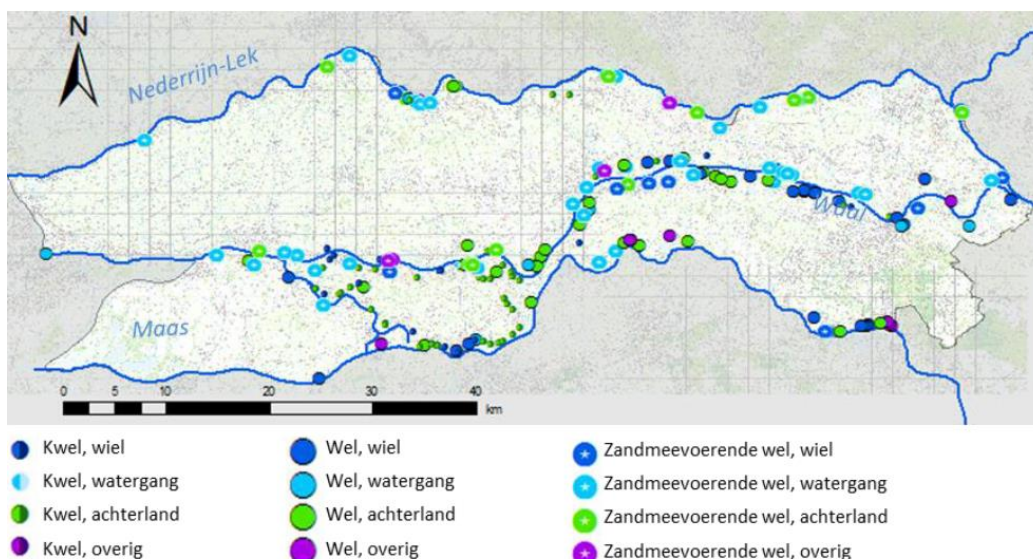
De Louw et al (2010) heeft meer dan 50 wellen gekarteerd in de Noordplaspolder (zie Figuur 6). Deze wellen zijn gelegen aan de noordzijde van de polder, waar de grootste drukverschillen met de naastgelegen polders optreden. De fluxen bij 15 onderzochte wellen varieerden tussen de 0,5 m³/d en 100 m³/d. De stroomsnelheden in de wellen bereikten waarden van 800 m/d. De wellen liggen allemaal binnen een kilometer van de dijk.



Figuur 6. Overzicht van chloride metingen in de Noordplaspolder. In dit overzicht zijn de locaties van de wellen (*) weergegeven (de Louw 2010)

2.3 Rivierenland

Taal (2015) heeft binnen het beheergebied van Waterschap Rivierenland een uitgebreide inventarisatie gedaan naar de relatie tussen de locatie van wellen en de ondergrond. Hierbij is veld- en archiefonderzoek uitgevoerd om een database op te bouwen naar de aanwezigheid van wellen binnen het rivierengebied (Zie Figuur 7). De kwel en wellen hebben vaak een redelijk korte kwelweglengte (90% minder dan 200 m).

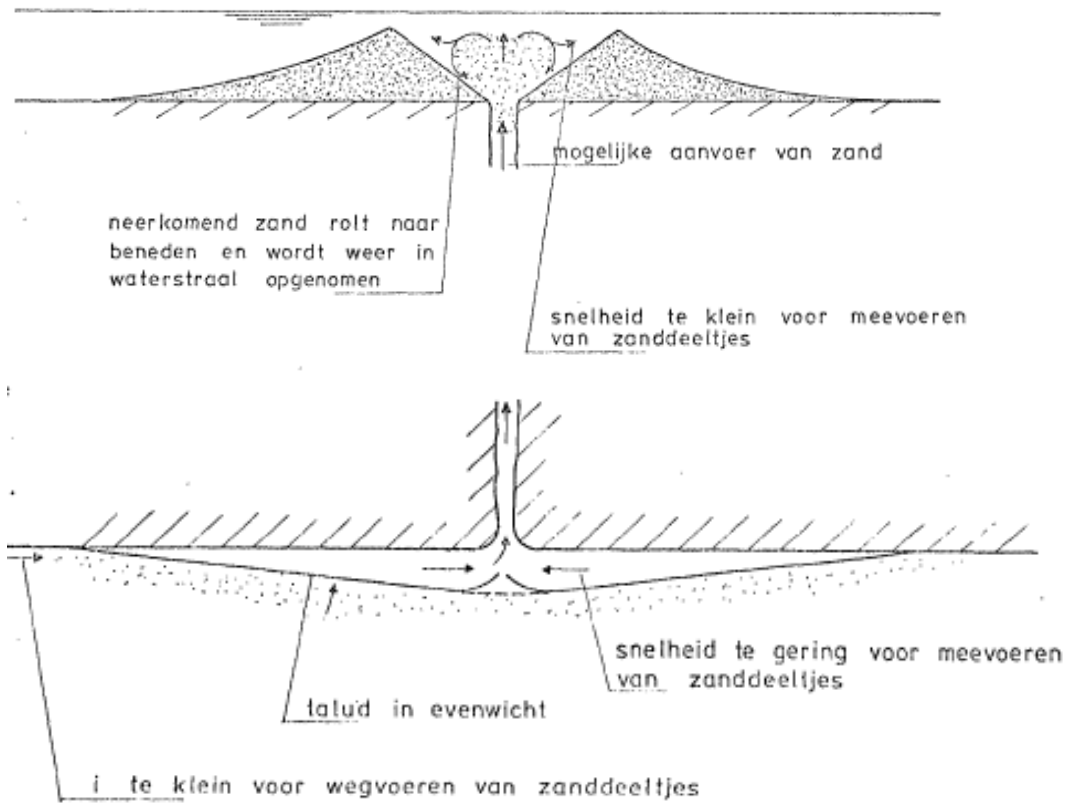


Figuur 7. Overzichtkaart van kwel en wellen in het beheersgebied van Waterschap Rivierenland (Taal, 2015)

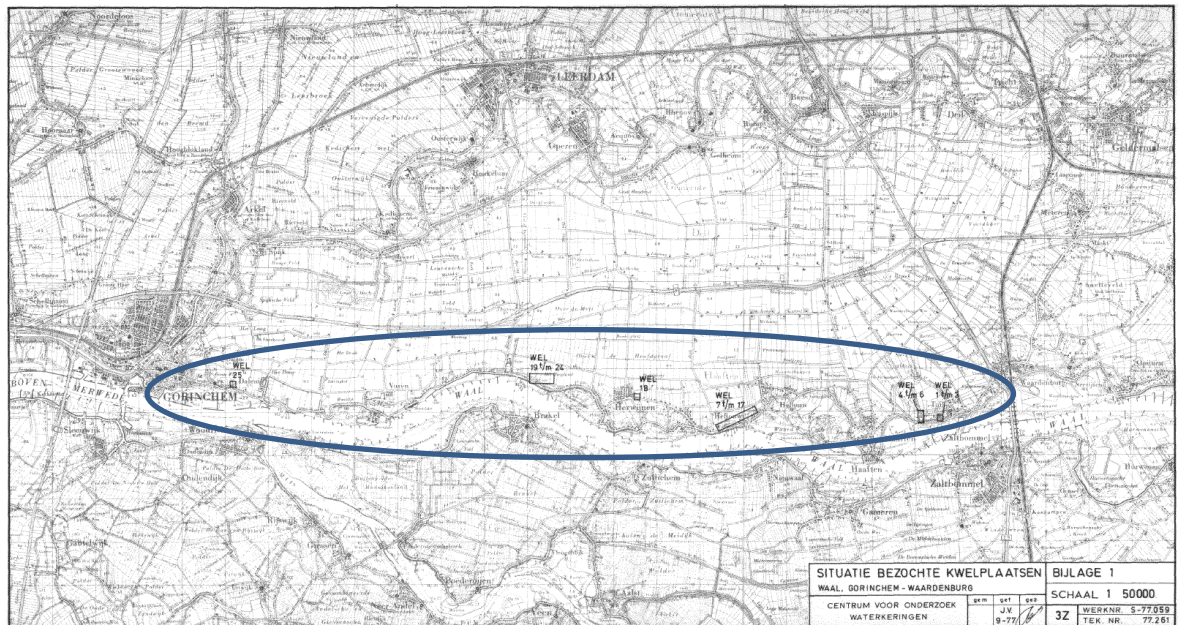
2.4 Tielerwaard

In de jaren 70 (Centrum voor onderzoek waterkeringen, 1978) is een uitgebreid onderzoek gedaan naar zandmeevoerende wellen in de Tielerwaard tussen Gorinchem en Waardenburg. Hierbij zijn 25 wellen onderzocht. De conclusies die uit dit onderzoek zijn getrokken zijn onder andere:

- De meeste wellen bevonden zich in de watergangen, waar doorgaans de deklaag het dunst is;
- Maar de dikte van de afdekkende deklaag is ook van belang: als deze landinwaarts dunner is, kan de wel dus ook verder landinwaarts optreden;
- In watergangen die een overal even dunne kleilaag (bijna) doorbreken treden nieuwe wellen niet altijd op dezelfde plaats op. Daar waar een dikke kleilaag aanwezig is, manifesteert deze zich wel op dezelfde plaats (op de route van de minste weerstand naar boven);
- Monsters uit de oorspronkelijke bodem blijken grotere percentages fijne delen te hebben. Terwijl in en rond de wel de fijne deeltjes niet aanwezig en kennelijk uitgespoeld zijn; welk percentage fijne delen niet aanwezig is hangt mede af van de snelheid en de vorm van de wel.
- Boven de wel bevindt zich een zandkrater waarin de grote/ zware deeltjes in de wel heen en weer blijven stromen, de fijne deeltjes doorstromen en de fractie daartussen in wordt afgezet op de krater (zie Figuur 8);
- De gemeten debieten bedroegen rond de 3 à 4 l/s (260 tot 350 m³/dag) bij een verval van circa 3 meter;
- Onder bepaalde omstandigheden kan, door transport van grote hoeveelheden zand, bodemdaling plaatsvinden.



Figuur 8. Schematische voorstelling van evenwicht in wellen (Centrum voor onderzoek waterkeringen, 1978)



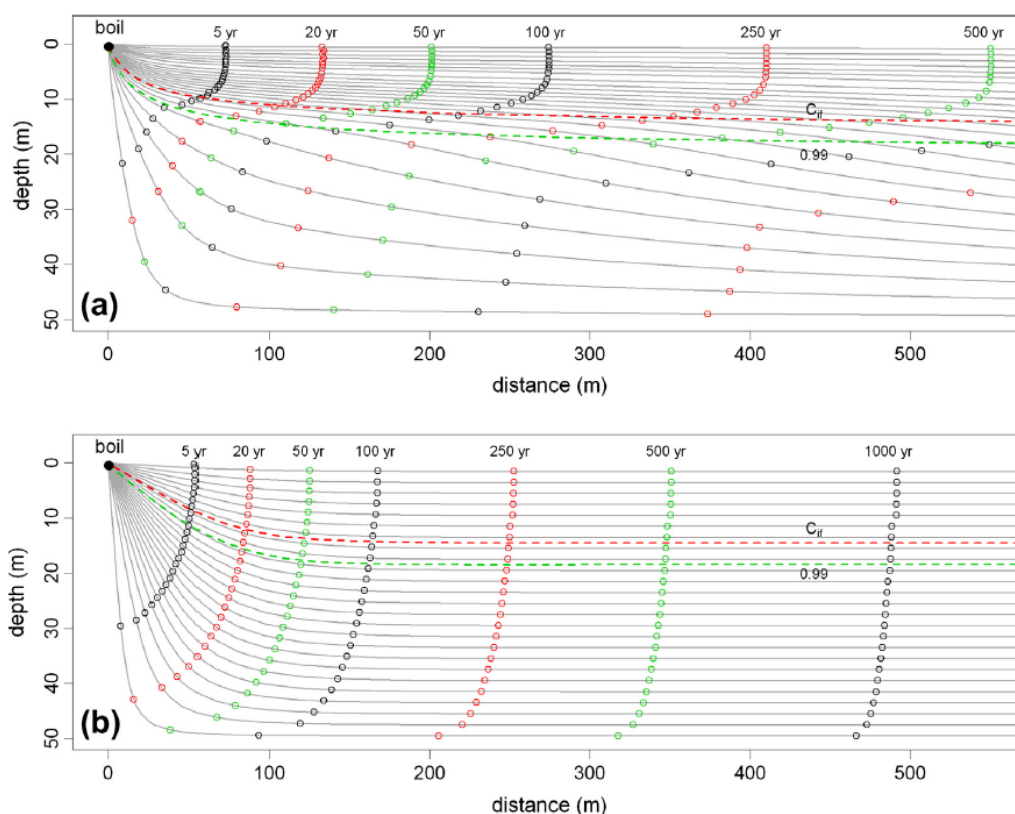
Figuur 9. Onderzochte wellen bij Centrum voor onderzoek waterkeringen, 1978

2.5 Groot Mijdrecht

Door Acacia Water (2008) zijn metingen van debieten in wellen in Groot Mijdrecht uitgevoerd. De debieten varieerden tussen de 1,6 en 7,8 l/s (is gelijk aan 138 tot 674 m³/d).

2.6 3D-berekeningen van wellen

In de Louw et al. (2013) zijn 3D berekeningen uitgevoerd naar stroomsnelheden en reistijden rondom wellen in de Haarlemmermeer en in de Noordplaspolder. Uit deze studie is gebleken dat reistijden lang zijn en de stroomsnelheden in de ondergrond zeer laag zijn: in de orde van grootte van meters per jaar. De debietmetingen die in de Louw et al (2013) in de wellen heeft uitgevoerd debieten laten zien van enkele tot 20 m³/dag, wat overeenkomt met enkele tot ongeveer 15 l/min.



Figuur 10. Stroomlijnen en reistijden naar wellen toe (de Louw 2013)

Tabel 1. Debietmetingen van wellen bij verschillende situaties en op verschillende locaties

Debiet	Locatie	Situatie
0,5 – 100 m ³ /d	Noordplaspolder	Polder met permanent peilverschil
< 20 m ³ /d	Noordplaspolder en Haarlemmermeer	Polder met permanent peilverschil
260 – 350 m ³ /d	Tielerwaard tussen Gorinchem en Waardenburg	Hoogwater met verval van 3 m
138 tot 674 m ³ /d	Groot Mijdrecht	Polder met permanent peilverschil

2.7 Conclusies

De verschillende studies die zijn uitgevoerd naar wellen laten een aantal dingen zien, die voor dit onderzoek van belang zijn:

- Debieten bij wellen variëren sterk van bijna niets tot meer dan 600 m³/dag (zie Tabel 1)
- Reistijden in de ondergrond kunnen erg lang zijn, waardoor bijbehorende stroomsnelheden laag zijn (0,5 m/jaar)
- Wellen die zand meevoeren hebben een krater om de wel van een bepaald deel van het meegevoerde zand. De fijnste fractie is niet bezonken bij de krater, de meest grove fractie ligt mogelijk op de bodem van de wel.

3

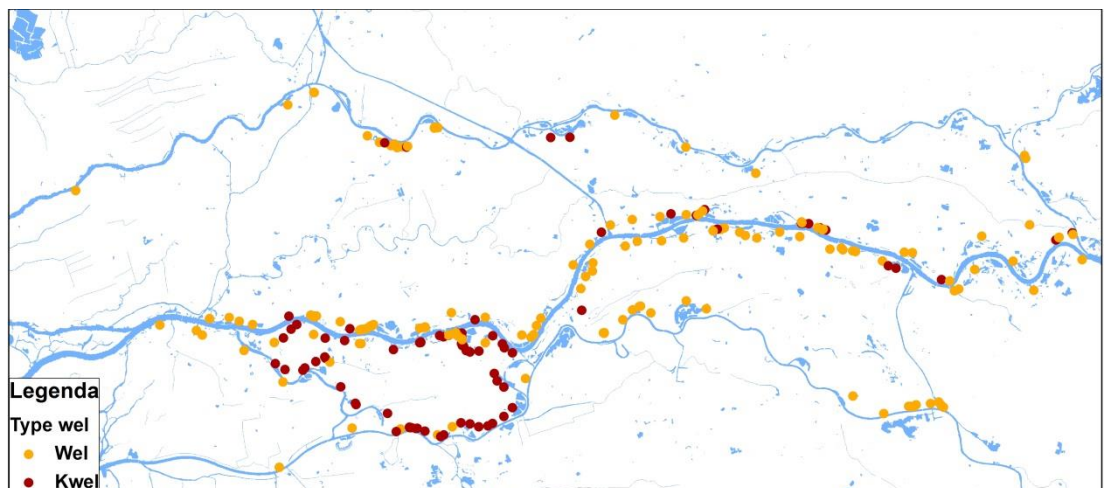
Selectie van wellen

3.1 Wellen database Rivierenland

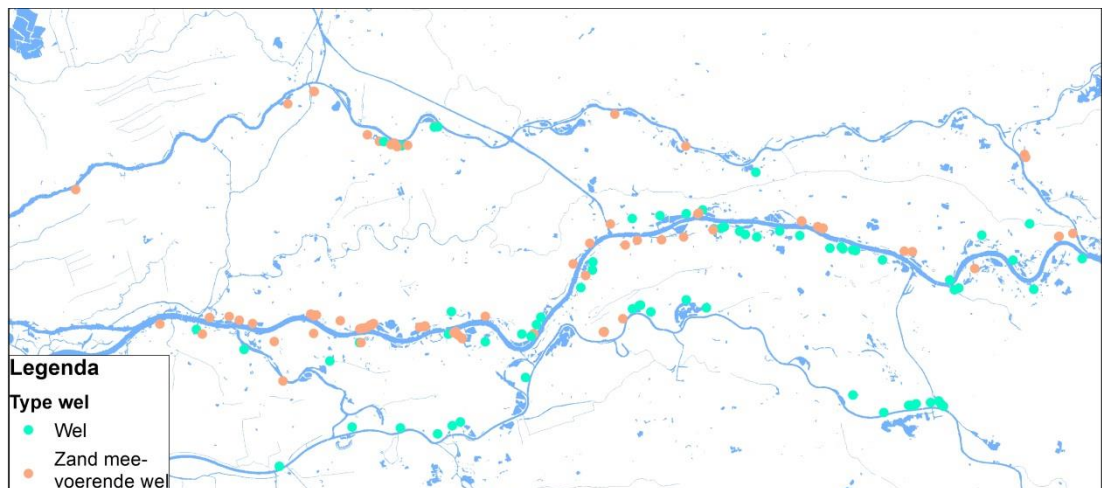
Voorafgaand aan voorliggend onderzoek naar wellen zijn binnen het beheersgebied van Waterschap Rivierenland verschillende onderzoeken uitgevoerd naar zand meevoerende wellen. In Taal (2015) is een uitgebreide inventarisatie uitgevoerd (Zie ook paragraaf 2.3). Hiervoor is op basis van archiefonderzoek een database gemaakt van de locaties binnen Rivierenland waar kwel, watervoerende wellen en zandmeevoerende wellen aanwezig zijn. Deze database is gebruikt voor de selectie van de wellen voor dit onderzoek.

De database bevat in totaal 265 locaties (zie Figuur 11) waar kwel, watervoerende wellen en zandmeevoerende wellen zijn geweest. Opgemerkt wordt dat de geografische spreiding in Figuur 11 voorzichtig moet worden geïnterpreteerd. De database is niet compleet, maar weerspiegelt de locaties die in de archieven zijn terug te vinden. Het is mogelijk dat in sommige gebieden beter is bijgehouden waar wellen voorkwamen, dan in andere gebieden. Daarnaast is er ook verschil in de tijd: bij de meer recente hoogwaters (2011 bijvoorbeeld) zijn de wellen exact ingemeten, bij eerdere hoogwaters is dat niet volledig duidelijk.

Desalniettemin zijn van 18 van de 265 de locaties niet nauwkeurig bepaald. Deze zijn daarom afgefallen. Van de overige 247 zijn er 80 kwellocaties, waar het maaiveld bij hoogwater door deze kwel onder water kwam te staan. De overige 167 locaties zijn onder te verdelen in 73 zandmeevoerende en 94 watervoerende wellen (Zie Figuur 12). Duidelijk valt op dat langs de Maas veel minder zandmeevoerende wellen zijn waargenomen/ gearhiveerd dan langs de Waal en de Neder-Rijn/Lek.



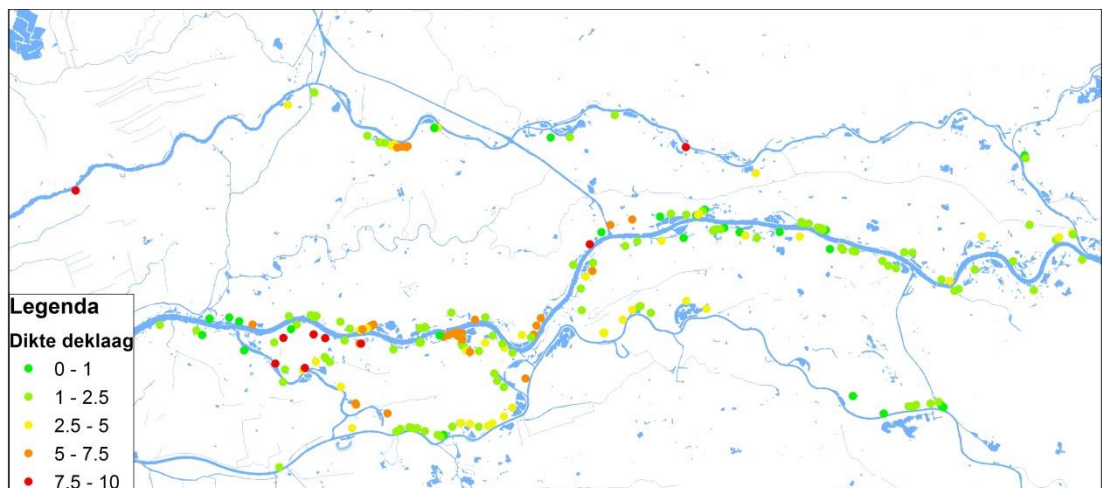
Figuur 11. De geografische spreiding van de wel- en kwellocaties in het gebied van waterschap Rivierenland.



Figuur 12. Locatie van zandmeevoerende en watervoerende wellen van Waterschap Rivierenland.

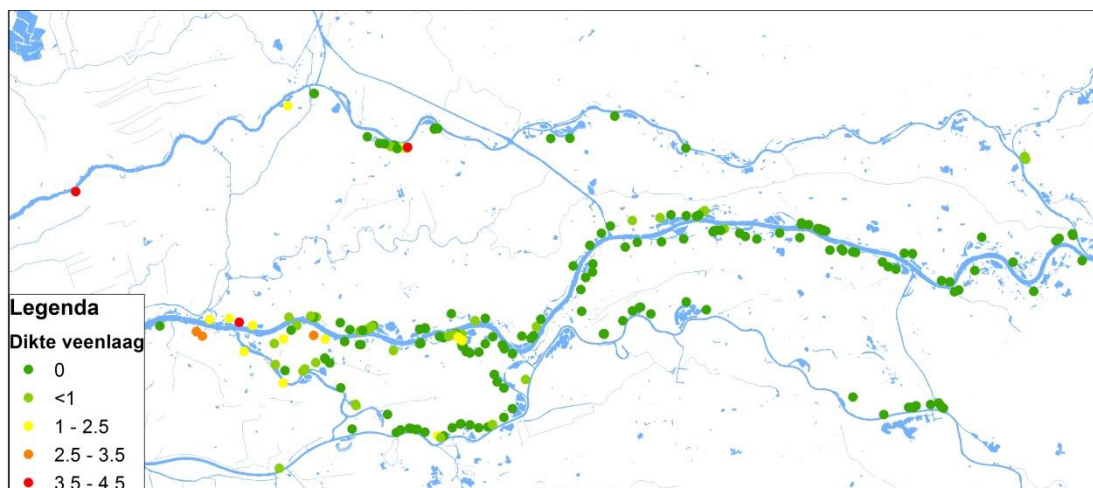
3.2 Dikte van de deklaag

In hoofdstuk 2 is al uitgelegd dat wellen kunnen ontstaan op plekken waar de te dunne deklaag is opgebarsten. Voor Figuur 13 is met behulp van het Geotop van het Dinoloket de dikte van de deklaag op de locatie van de verschillende kwel-, wellocaties uit Figuur 11 bepaald. Opvallend is dat de dikte van de deklaag meer dan 7.5 meter kan zijn. Hierbij maakt het niet uit of het een zandmeevoerende, een watervoerende wel of enkel een kwelplek is.



Figuur 13. De dikte van de deklaag bij wellen en kwel gebieden in het gebied van Waterschap Rivierenland.

De dikte van een eventueel voorkomende veenlaag in de deklaag op de verschillende kwel-, wellocaties is weergegeven in Figuur 14. Bij de meeste locaties is er geen veen. Als het al voor komt in een vrij dunne laag en enkel in het westelijk deel van Rivierenland komen wat dikkere lagen veen voor. Dit komt overeen met de bevindingen van Gouw en Erkens die dit in verschillende profielen van het Rivierengebied hebben weergegeven (Gouw en Erkens, 2007). Twee maatgevende doorsneden zijn opgenomen in Bijlage 1.



Figuur 14. Dikte van de veenlaag in de deklaag bij de wellen en kwellocaties van Waterschap Rivierland.

3.3 Selectiecriteria en groslijst: van 167 naar 40

Om uit de 167 wellen geschikte wellen te selecteren om te gaan monitoren, is eerst een lijst met selectiecriteria opgesteld:

- De exacte x, y-locatie moet zijn vastgelegd en de wel moet terug te vinden zijn;
- De wellen moet enigszins evenredig verspreid liggen over westelijke en oostelijk gedeelte van het beheergebied van Waterschap Rivierland (de scheidslijn is grofweg vanaf de kruising van het Amsterdam-Rijnkanaal met de lek, naar het zuiden);
- De verhouding watervoerende en zandmeevoerende wellen dient om en nabij 1:2 te zijn;
- De wellen moeten evenredig verdeeld zijn tussen de 3 rivieren Maas, Rijn/Lek en de Waal;
- De spreiding in geomorfologische eigenschappen moet enigszins overeenkomen met het onderzoek van Taal (2015);
- De spreiding in locaties van de wellen past bij de variatie in geologie en landschap;
- De spreiding houdt rekening met de variatie in deklaagdikte en variatie in veendikte;
- Dijkkring 43 en het gebied bij Vianen zijn 2 aandachtsgebieden, omdat daar relatief veel zandmeevoerende wellen voorkomen.

Niet alle criteria zijn in dezelfde mate exact toe te passen. Desalniettemin is op basis van deze selectiecriteria een eerste selectie gemaakt waarbij 40 wellen zijn geselecteerd. De mate waarin deze 40 wellen aan de verschillende selectiecriteria voldoen is samengevat in Tabel 2. De gegevens van de verschillende wellen met betrekking tot de selectiecriteria zijn opgenomen in bijlage 2.

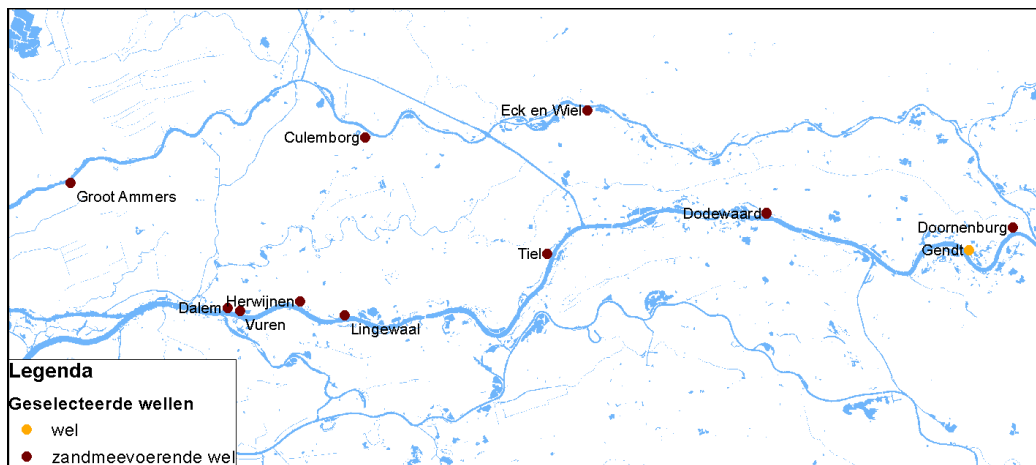
Tabel 2. De 40 geselecteerde wellen en de spreiding over de criteria

Aantal geselecteerd	40	Beneden Merwede	0	Achterland	12
Oost	20	Bergsche Maas	0	Watergang	19
West	20	Boven Merwede	2	Wiel	4
Dijkring 43	15	Lek	8	Overig	5
Vianen	7	Maas	6	0 - pleistocene afzetting	1
WMV Wel	12	Nederrijn	3	1 - stroomgordel	19
ZMV Wel	28	Pannerdens Kanaal	1	2 - ingesneden stroomgordel	7
Kwel	0	Pannerdens Kanaal / Waal	0	3 - Crevasse	0
		Afgedamde Maas	0	4 - kom	13
		Maas / Afgedamde Maas	0	5 - zandige opvulling	0
		Waal	20		
		Waal / Afgedamde Maas	0		
		Waal / Maas	0		

	minimum	maximum	mediaan	gemiddelde
Dikte veen	0	4.5	0	0.8
Dikte afdekking	0.0	8.0	3	3.6
Afstand tot rivier	18.8	678.5	109	126.8

3.4 Van 40 naar 11 wellen

Vervolgens zijn alle 40 wellen bezocht om te onderzoeken of het haalbaar is om deze wellen gedurende 2 jaar te monitoren. Hierbij zijn vooral praktische criteria gebruikt als is het perceel toegankelijk, is de wel goed vindbaar en wil de eigenaar meewerken aan dit onderzoek. Uiteindelijk bleven er 11 locaties over (zie Figuur 15): Culemborg, Eck en Wiel, Groot Ammers, Dodewaard, Tiel, Lingewaal, Herwijnen, Vuren, Dalem en Doornenburg. In Bijlage 3 zijn de gegevens van het veldbezoek aan de 40 wellen weergegeven.



Figuur 15. Ligging van de 11 wellen in het gebied van waterschap Rivierenland.

De mate waarin de wellen voldoen aan de hiervoor al genoemde selectiecriteria is opgenomen in Tabel 3. Ten aanzien van de zandmeevoerendheid van de wellen wordt opgemerkt, dat 10 wellen weliswaar zand meevoerend zijn geweest, maar deze wellen alleen bij hoogwater zand meevoeren. De wellen waar water uit stroomde tijdens het veldbezoek voerden op dat moment geen zand mee.

Tabel 3. De 11 geselecteerde wellen en de spreiding over de criteria

Aantal geselecteerd	11	Beneden Merwede	0	Achterland	2
Oost	5	Bergsche Maas	0	Watergang	8
West	6	Boven Merwede	0	Wiel	0
Dijkkring 43	8	Lek	2	Overig	1
Vianen	1	Maas	0	0 - pleistocene afzetting	0
WMV Wel	1	Nederrijn	1	1 - stroomgordel	5
ZMV Wel	10	Pannerdens Kanaal	0	2 - ingesneden stroomgordel	3
Kwel	0	Pannerdens Kanaal / Waal	0	3 - Crevasse	0
		Afgedamde Maas	0	4 - kom	3
		Maas / Afgedamde Maas	0	5 - zandige opvulling	0
		Waal	8		
		Waal / Afgedamde Maas	0		
		Waal / Maas	0		

	minimum	maximum	mediaan	gemiddelde
Dikte veen	0	4.5	0.0	1.0
Dikte afdekking	0.5	8.0	2.5	3.1
Afstand tot rivier	60.6	171.1	108.3	107.6

Voor elke wel is een inventarisatie uitgevoerd, waarbij per locatie alle boringen, sonderingen, waterstanden etc. zijn verzameld. Zie Bijlage 5 tot en met Bijlage 16.

4

Meetmethoden en apparatuur

4.1 Algemeen

Bij elk van de in het vorige hoofdstuk geselecteerde wellen is uitgebreid gemonitord. Het grondwater vlakbij elke wel is gedurende 2 jaar ieder ½ uur (bijna continu) gemonitord op stijghoogte, temperatuur en elektrische geleidbaarheid (EC). Daarnaast zijn op drie verschillende tijdstippen handmatig watermonsters genomen voor analyse van de chemie en isotopensamenstelling. Ook zijn bij 3 actieve wellen (Culemborg, Eck en Wiel en Lingewaal) met een onderwatercamera (Inspector® 36 van Camtronics) opnames gemaakt om de vorm van de wel zichtbaar te maken.

4.2 Automatische metingen bij 11 wellen

De hoogfrequente waarnemingen van stijghoogte, temperatuur en EC waren nodig, omdat afvoer in een wel afhangt van de stijghoogte onder de deklaag, die afhankelijk van de transmissiviteit van het eerste watervoerend pakket, weer varieert met de waterstand van de nabijgelegen rivier, zee of boezem. Dit geldt ook voor de EC en temperatuur indien een wel gevoed wordt via preferente stroombanen en de snelheid van transport van het water vanuit de bron naar de wel hoog is. De chemie van het water uit de wel vertoont dan meer overeenkomsten met die van de bron, dan die van het water in het omringende grondwater.

Voor deze metingen zijn naast alle 11 wellen ondiepe peilbuizen met een filterlengte van 1 m direct onder de deklaag geplaatst om de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket te meten. In deze peilbuizen zijn CTD-10 sensoren, verbonden aan een telemetrische EM50G datalogger (Decagon, VS), geïnstalleerd om de druk, temperatuur en de elektrische geleidbaarheid van het water in het pakket te meten. Indien een wel op meer dan 50 meter afstand van de dijk af lag, werd nabij de dijk een tweede peilbuis met het filter onder de deklaag geplaatst om het stijghoogteverloop tussen de dijk en de wel te bepalen. Dit was bij 8 wellen het geval. In deze peilbuizen werd de druk en de temperatuur gemeten met een niet-telemetrische TD-drukopnemer (Van Essen Instruments, NL). De TD-drukopnemer werden elk half jaar uitgelezen en de absolute druk werd voor luchtdrukvariaties gecompenseerd met de KNMI-luchtdrukwaarnemingen van het meest nabijgelegen meteorostation (zie Bijlage 5).

Alle apparatuur is in de periode van 28 oktober – 3 november 2015 geïnstalleerd. De automatische metingen werden met een interval van een half uur geregistreerd en naar een server verzonden voor publicatie op de website van het project <http://wellen.acaciadata.com> (Zie Figuur 16). Naast de automatische metingen is op het dashboard ook aanvullende metingen verzameld, zoals neerslag en luchttemperatuur van het KNMI, de watertemperatuur en waterstanden van de naast de wel gelegen rivier door Rijkswaterstaat. Door deze gegevens bij elkaar online te presenteren, kon gedurende het project inzicht worden ontwikkeld over het functioneren van iedere wel. Ook kon hiermee worden bepaald of de kans bestond dat een wel water ging geven: namelijk als de stijghoogte onder de deklaag boven de waterstand van de teensloot c.q. het maaiveld rond de wel uit kwam.



Figuur 16. Dashboard met de 'real time' monitoringsgegevens van een wel nabij Culemborg.

4.3 Afvoermetingen bij 2 wellen

Op een tweetal locaties (Eck en Wiel en Lingewaal) zijn de afvoeren gemeten tussen april en november 2017. Hierbij is op korte afstand van de wel een tijdelijke duiker geplaatst, waar de snelheid en de waterhoogte is gemeten. In Lingewaal is gebruik gemaakt van de FLO-TOTE®, een elektromagnetische debiet meter. In Eck en Wiel is gebruik gemaakt van de BELUGA™ ultrasonische doppler afvoer meter.

4.4 Chemische- en isotopenanalyse

Watermonsters zijn genomen gedurende 3 meetrondes: in januari 2016, maart 2016 en in mei 2017. Watermonsters zijn genomen voor analyse op EC, pH, alkaliniteit, macro-ionen, Fe en Mn, en voor isotopenanalyse ($\delta^{18}\text{O}$ en $\delta^2\text{H}$). De monsternamen bestond uit twee delen. Water voor analyse op EC, pH en alkaliniteit werden genomen in 50 ml PE-buisjes. Voor de analyse op macro-ionen werd minimaal 10 ml water gefiltreerd door een $0.45\ \mu\text{m}$ nitraat cellulose filter ter conservering van de monsters. De monsters werden in een koelbox met koelementen in het donker vervoerd, en binnen enkele dagen geanalyseerd. De isotopenmonsters werden in speciale glazen flesjes genomen en tevens koel en donker bewaard.

Kat- en anionen werden bepaald op DX-120 en Aquion ionenchromatografen (Dionex, VS) in het laboratorium van de Vrije Universiteit Amsterdam en het laboratorium van Acacia Water, respectievelijk. Fe en Mn concentraties werden colorimetrisch bepaald met een Hach DR900 colorimeter, terwijl de alkaliniteit bepaald werd door titratie met H_2SO_4 in een oplossing met broomcresolgroen - methylrood indicator. Isotopen analyse vond plaats in het isotopenlaboratorium van de VU op een massachromatograaf.

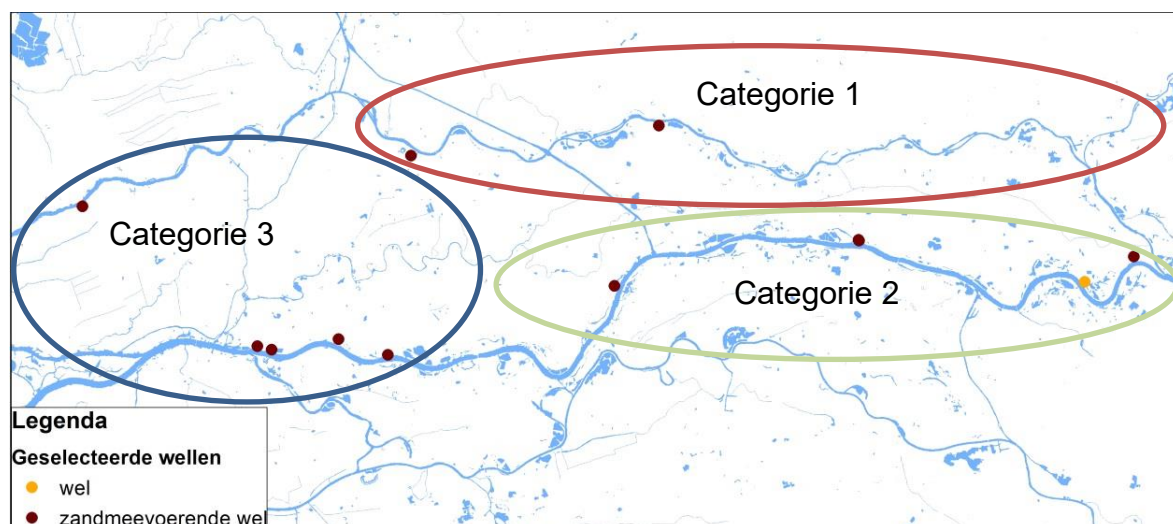
5

Resultaten geohydrologische monitoring

5.1 Indelen van wellen in 3 categorieën

De 11 onderzochte wellen zijn als eerste ingedeeld in drie categorieën afhankelijk van de variatie in waterstand van de naast gelegen rivier. Deze drie categorieën zijn (Zie ook Figuur 17):

- **Categorie 1 Culemborg en Eck en Wiel.** Deze twee wellen liggen naast een gestuwde rivier met een beperkte waterstandsvariatie en hebben een dunne deklaag in de polder. Deze wellen geven continu water;
- **Categorie 2 Doornenburg, Gendt, Dodewaard en Tiel.** Deze wellen liggen voornamelijk in de watergangen en liggen boven de normale waterstand in de naast gelegen rivier. Ter plaatse van deze wellen is de deklaag dun. De wellen zijn/liken dichtgeslagen en gaan dan ook pas water geven als er bij hoogwater weer voldoende druk is opgebouwd;
- **Categorie 3 Lingewaal, Herwijnen, Vuren, Dalem en Groot Ammers.** Deze wellen liggen rond of iets onder de normale waterstand in de naast gelegen rivier en hebben een dikke deklaag. De waterstand zakt niet ver uit door de invloed van het getij. Deze wellen geven continu water.



Figuur 17. Indeling van de 11 wellen in 3 verschillende categorieën

Tabel 4. Gegevens van de verschillende wellen

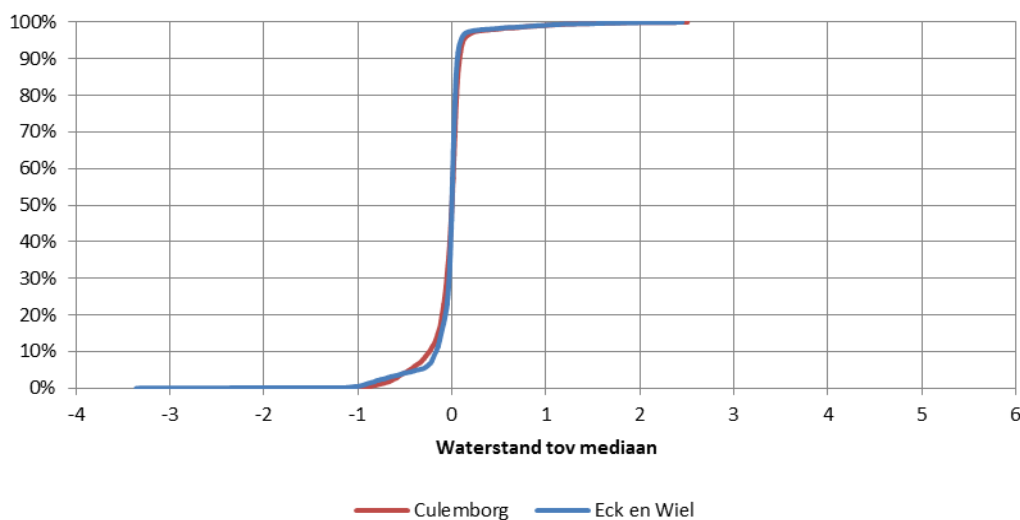
Wel locatie	Mediaan waterstand boven maaiveld binnendijks	Getijden	Deklaag	Categorie
Culemborg	1,6 (gestuwd)	Nee	1,6 – 2,3	1
Eck en Wiel	0,65 (gestuwd)	Nee	1,7 – 2,4	1
Doornenburg	-3,15	Nee	0,7 - 2,1	2
Gendt	-2,5	Nee	1,6	2
Dodewaard	-1,1	Nee	1,1 – 3,9	2
Tiel	-1,1	Ja, bij lage waterstanden	1,3 – 2,95	2
Lingewaal	-0,3	Ja	4,1 – 6	3
Herwijnen	0,1	Ja	3,75 – 7,7	3
Vuren	0,75	Ja	5,3	3
Dalem	0,95	Ja	8,1 – 8,4	3
Groot Ammers	0,75	Ja	8,1	3

5.2 Rivierwaterstanden

5.2.1 Categorie 1: Culemborg en Eck en Wiel

Voor deze 2 wellen is een analyse van de waterstanden van 2000 tot en met 2015 van de Neder-Rijn/ Lek uitgevoerd. In Figuur 18 is de waterstand ten opzichte van de mediaan uitgezet. Te zien is dat 60% van de tijd de waterstand gelijk is aan de mediaan. 10% van de tijd is deze hoger, 30% van de tijd is deze tot 1 m lager. De variatie in waterstand door de tijd is bij deze 2 locaties dus zeer beperkt.

Bij Culemborg is de mediaan van de rivierwaterstand 1,6 m boven maaiveld binnendijks en in Eck en Wiel 0,65 m boven maaiveld binnendijks (zie Tabel 3). Door dit waterstandverschil en min of meer permanente karakter worden deze wellen continu gevoed door rivierwater en leveren een min of meer constant debiet met rivierwater.



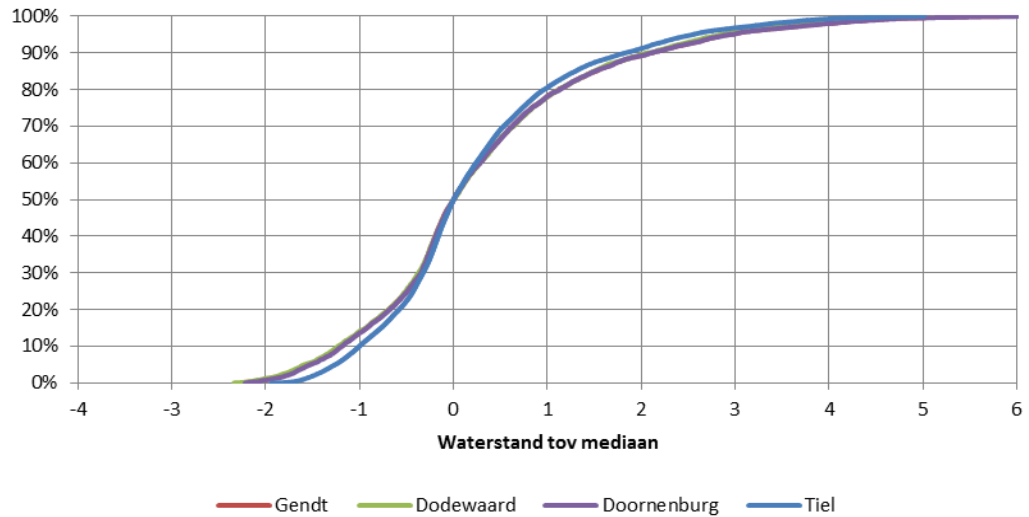
Figuur 18. Waterstandsvariatie op basis van de waterstanden tussen 2000 en 2015 ten opzichte van de mediaan bij Culemborg en Eck en Wiel.

5.2.2 Categorie 2: Doornenburg, Gendt, Dodewaard en Tiel

In Figuur 19 is het resultaat te zien van dezelfde analyse en dezelfde periode voor de Bovenstrooms van Tiel gemeten waterstanden. Te zien is dat de waterstanden een grote spreiding vertonen van ruim 8 m. In de grafiek is de waterstand weergegeven ten opzichte van de mediaan. In Tabel 3 is te zien dat de mediaan waterstand bij deze wellen zich tussen de 1 tot 3 meter onder het binnendijkse maaiveld bevindt.

De grafiek laat zien dat 80% van de tijd de waterstand bij alle 4 de locaties lager is dan mediaan waterstand + 1 m. Dit betekent dat 80% van de tijd het rivierwaterpeil dus

onder maaiveld staat en de wellen géén water geven. Hier is dus het merendeel van de tijd sprake van wegzijging. Het regenwater kan hierbij infiltreren in de bodem en percoleren naar het eerste watervoerend pakket. De rivier de Waal kan dus afhankelijk van de waterstand zowel drainerend als water leverend zijn. Enkel bij hoge waterstanden geven de wellen water. Dit maakt ook dat het grondwater nabij de wellen bestaat uit een variërende mix van regenwater, polderwater en af en toe rivierwater.

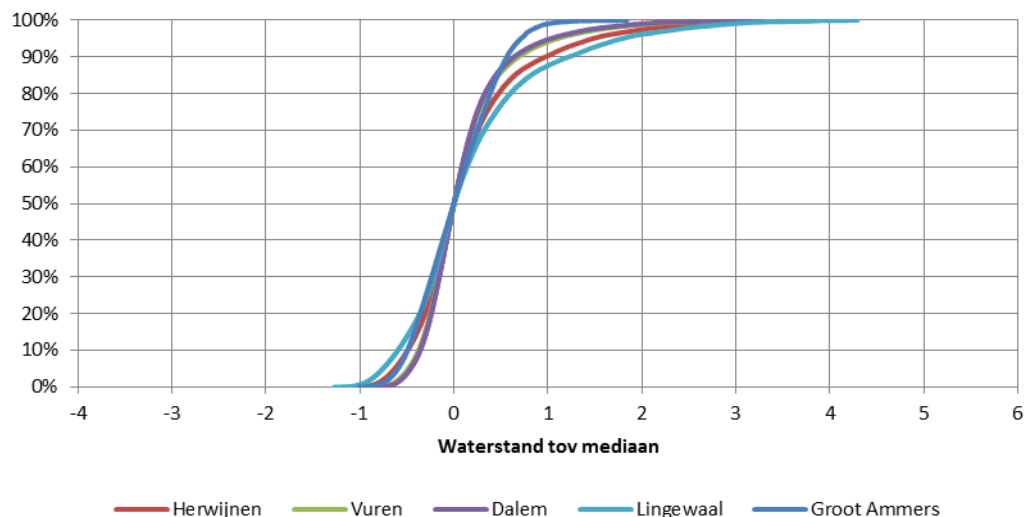


Figuur 19. Waterstandsvariatie op basis van de waterstanden tussen 2000 en 2015 ten opzichte van de mediaan bij Gendt, Dodewaard, Doornenburg en Tiel.

5.2.3

Categorie 3: Lingewaal, Herwijnen, Vuren, Dalem en Groot Ammers

In Figuur 20 is het resultaat te zien van deze analyse voor het westelijke deel van het Rivierengebied. De rivierwaterstand ondervindt hier nog invloed van het getij. Dit geeft aan de ene kant de dagelijkse waterstandsvariatie met een duidelijke ondergrens, maar ook extra hoge waterstanden bij windopzet op zee. Tevens kan hier hoogwater optreden als gevolg van een grote rivierafvoer.



Figuur 20. Waterstandsvariatie op basis van de waterstanden tussen 2000 en 2015 ten opzichte van de mediaan bij Herwijnen, Vuren, Dalem, Lingewaal en Groot Ammers.

De grafiek laat zien dat de variatie vrij beperkt is (3 tot 5 m). De mediaan waterstand bevindt zich bij Lingewaal 0,5 m onder het binnendijkse maaiveld, bij Herwijnen rond maaiveld en bij Dalem, Groot Ammers en Vuren 0,6 tot 0,85 m boven het binnendijkse

maaiveld (zie Tabel 3). De overdruk bij de laatste 3 genoemde locaties maakt dat de wellen op deze locatie nagenoeg continu water leveren.

5.3 Waterstanden in peilbuizen

5.3.1 Hysterese grafieken

Zoals in de vorige paragraaf is uitgelegd beïnvloedt het waterstandverschil tussen de rivier en binnendijks gelegen maaiveld c.q. polderwaterstand of sprake is van kwel of wegzijging. Of sprake is van kwel of wegzijging kan worden bepaald door de gemeten grondwaterstijghoogten in de peilbuizen met de rivierwaterstanden te vergelijken. Hiervoor zijn voor alle peilbuislocaties hysterese-grafieken gemaakt: Dit zijn grafieken waarbij de rivierstand is uitgezet tegen de stijghoogte in de peilbuis. Hierbij is tevens op beide assen de hoogte van het binnendijkse maaiveld bij de peilbuis weergegeven. Hiermee ontstaan 4 kwadranten (zie Figuur 21), waarbij elk kwadrant resulteert in een andere kwelsituatie:

- Een beperkt inzijgende rivier, inzijging in en achter de dijk (hoger maaiveld) en lokale kwel en wellen in diepere sloten;
- Een sterk inzijgende rivier met kwel en wellen in het achterland;
- Wegzijging van regenwater in het achterland en een drainerende rivier;
- Regionale grondwaterstroming die leidt tot grondwaterstijghoogtes boven maaiveld en een drainerende rivier.

Rivierwaterstand	A. Rivierwaterstand boven mv Grondwaterstijghoogte onder mv	B. Rivierwaterstand boven mv Grondwaterstijghoogte boven mv
	- Inzijging van regenwater met lokale kwel / wellen (in diepere sloten)	- kwel / wellen in sloten en op maaiveld
	C. Rivierwaterstand onder mv Grondwaterstijghoogte onder mv	D. Rivierwaterstand onder mv Grondwaterstijghoogte boven mv
	- inzijging van regenwater en rivier is drainerend	=> kwel, waarschijnlijk door andere invloeden (regionale grondwaterstroming vanuit hoger gelegen gebieden) en drainerende rivier
	Grondwaterstijghoogte	

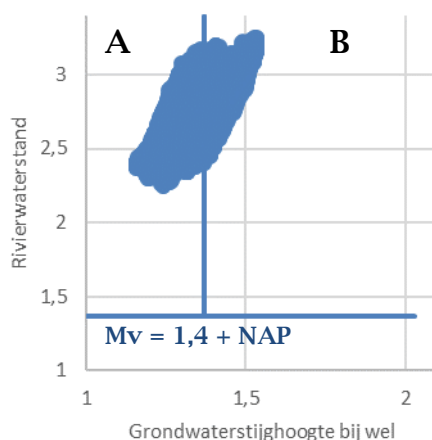
Figuur 21. Uitleg hysterese grafiek van de rivierwaterstand versus de grondwaterstijghoogtes

Deze indeling in 4 kwadranten helpt bij het opbouwen van de systeemkennis van wellen. Zoals al beschreven in hoofdstuk 2, zijn er verschillende wellen. In het rivierengebied zijn er daarbij ook verschillen in rivierwaterstandsvariatie (zie hoofdstuk 5.2). De verwachting is dan ook dat de grondwaterstijghoogte verschillend reageert op de rivierwaterstand. Als dit inderdaad zo is, kun je ze niet allemaal op dezelfde manier beschouwen.

5.3.2 Categorie 1-gestuwd peil: Culemborg en Eck en Wiel

In Figuur 22 is het resultaat van deze analyse te zien bij Culemborg. Het resultaat van Eck en Wiel staat in Bijlage 7. Op beide locaties is de gemeten variatie in rivierwaterstand

(verticaal) ongeveer 1 meter en de variatie in stijghoogte nabij de wel 0.5 meter. Op beide locaties is dan ook sprake van permanent actieve wellen in de sloten. Opgemerkt wordt dat, doordat de wellen permanent actief zijn, dit ook van invloed is op de gemeten stijghoogte in de peilbuis naast de wel. Zonder wellen, of met een afgedichte wel, is de stijghoogte waarschijnlijk nog iets hoger.



Figuur 22. Hysteresis grafieken van de rivierwaterstanden bij Culemborg

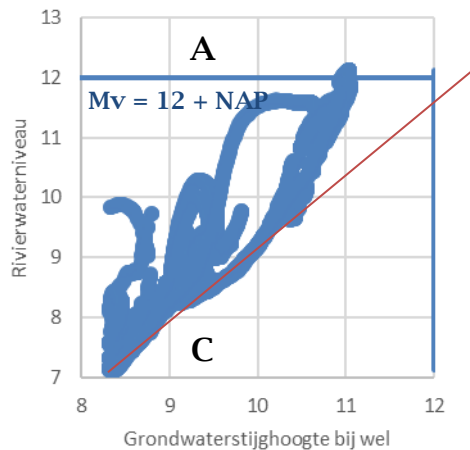
5.3.3

Categorie 2-grote variatie: Doornenburg, Gendt, Dodewaard en Tiel

Op elk van deze locaties zijn de rivierwaterstanden gedurende de looptijd van het project nauwelijks boven het binnendijkse maaiveld uitgekomen. Hierdoor is ook de stijghoogte nabij de wellen nauwelijks boven het maaiveld uitgekomen. Wat opvalt is dat wanneer de rivierwaterstanden sterk fluctueerden (rond de 5 m) en ook tot ver onder het binnendijkse maaiveld wegzakten, de stijghoogte in de peilbuizen ook ver uitzakten. Hierbij viel op dat bij het ver wegzakken of omhoogkomen van rivierwaterstand de stijghoogte nabij de wel anders reageert. Het omslaan van kwel naar wegzijging of van wegzijging naar kwel vindt op een ander moment plaats. Deze andere reactie van de stijghoogte onder de deklaag treedt vooral op, als de stijghoogte onder de deklaag uitzakt en de onderliggende watervoerende laag dus 'freatisch' wordt. Dit is goed te zien bij bijvoorbeeld de wel in Tiel in Bijlage 11. De deklaag begint op ongeveer 4 m t.o.v. NAP. Onder deze diepte is er een grote bandbreedte van reactie op het rivierwater, boven de 4 m is de bandbreedte veel beperkter en is het bijna een lineaire reactie tussen rivier- en grondwaterstijghoogte.

Doordat de deklaag in deze gebieden redelijk dun kan zijn, kan neerslag redelijk goed infiltreren in de bodem, waardoor het grondwater hier op kan reageren. Dit resulteert in deze gevallen in een andere reactie van het grondwater vergeleken met de 2 andere categorieën. De situatie bij Doornenburg (Bijlage 8) en Gendt (Bijlage 9) duidt erop dat de deklaag hier beperkt weerstandsbiedend is.

Bij Doornenburg en Tiel (Figuur 23, Bijlage 8 en Bijlage 11) is een verandering van de helling zichtbaar. Dit is waarschijnlijk de invloed van de watergang die drainerend werkt. Mogelijk dat bij het ontstaan van een wel deze invloed groter wordt en dus een derde hellingsverandering optreedt.

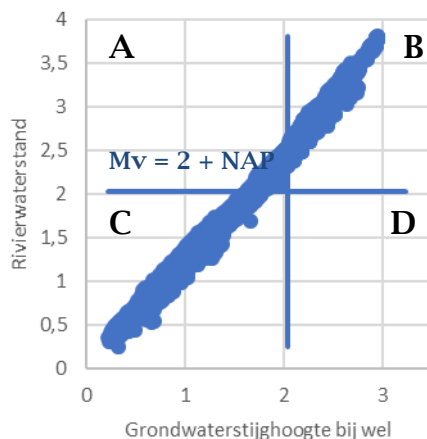


Figuur 23. Hysterese grafiek van de rivierwaterstanden bij Doornenburg

5.3.4 **Categorie 3-rivier rond maaiveld: Lingewaal, Herwijnen, Vuren, Dalem en Groot Ammers**

De reactie van de grondwaterstijghoogten op de rivierwaterstanden is bij deze 5 locaties vrij lineair (Zie Figuur 24). In paragraaf 5.2.3 is reeds uitgelegd dat de rivier het grootste deel van de tijd boven het binnendijkse maaiveld staat. Waardoor de wellen dan ook bijna het hele jaar door actief zijn. Door de enigszins dikke deklaag die bij categorie 3, lijken andere invloeden, zoals de neerslag, nauwelijks zichtbaar.

Opgemerkt wordt dat de stijghoogte van de peilbuis bij de wel bij Groot Ammers in de eerste maanden onverklaarbare variaties vertoont (zie Bijlage 16), wat leidt tot onrealistische of onverklaarbare patronen in de hysterese grafiek.



Figuur 24. Hysterese grafieken van de rivierwaterstanden bij Lingewaal

5.3.5 **Conclusies**

Doordat gedurende de looptijd van het project geen echt flink hoogwater is opgetreden - d.w.z. bij Lobith hoger dan 14 meter - hebben zich ook geen kritische situaties rond de wellen voorgedaan. Bij de wellen binnen categorie 2 (wegzijgingssituatie) in Doornenburg, Gendt, Dodewaard en Tiel zijn de rivierwaterstanden en de resulterende grondwaterstijghoogten nooit hoog genoeg geweest om actieve wellen te krijgen.

Met de hysteresegrafieken uit de vorige paragrafen kan het functioneren van een wel goed inzichtelijk gemaakt worden. Afhankelijk van of er sprake is van een permanente actieve of een af en toe werkende wel liggen de metingen in een ander kwadrant: respectievelijk kwadranten A en B of de kwadranten A, B en C. Daarnaast geeft ook de

vorm van de puntenwolk inzicht in hoe 'goed' de stijghoogte onder de deklaag de naastgelegen rivierwaterstanden volgt. Indien er sprake is van een dikke deklaag op geringe afstand van de nabijgelegen rivier, waarbij de rivierwaterstand boven de onderkant van de deklaag staat (en er dus sprake is van stijghoogten in het watervoerend pakket), lijkt steeds sprake te zijn van een lineaire relatie tussen stijghoogte en rivierwaterstand. Als de rivierwaterstand onder de deklaag uitzakt, of er geen sprake is van een goede weerstandsbiedende deklaag, wordt de spreiding van de puntenwolk veel groter: andere processen gaan dan een rol spelen, zoals infiltratie van neerslag.

Bij Tiel en Doornenburg lijkt de invloed van de watergangen zichtbaar te zijn in de helling tussen de stijghoogte nabij de wel en de rivierwaterstand. Dit is waarschijnlijk de invloed van de watergang die drainerend werkt. De verwachting is dat bij het ontstaan van een wel deze invloed groter wordt en daarmee mogelijk een derde hellingsverandering optreedt.

Bij Dalem en Vuren komen soms metingen net in de rechteronderhoek (kwadrant D) uit. En bij Gendt en Doornenburg zouden bij extrapolatie van de resultaten, zonder de invloed van watergangen, de metingen net in de rechteronderhoek uitkomen. Dit duidt erop dat hier in beperkte mate water vanuit andere (regionale) bronnen naartoe stroomt. Bij de overige 9 locaties komende punten niet uit in de rechteronderhoek van de hysteresis grafiek zitten (kwadrant D). Dit duidt erop dat er dus geen grote invloed is van hogere waterstanden afkomstig van andere bronnen dan de rivier. Indien deze hysteresis grafieken gemaakt zouden worden van een gebied waar zowel een rivier als een hoger gelegen achterland (Veluwe, Wageningse Berg etc.) van invloed zijn, is de verwachting dat deze voor een deel resultaten in de rechteronderhoek hebben, om deze hypothese te controleren wordt aanbevolen om hysteresis grafieken te maken van peilbuizen langs de IJssel.

5.4 Geleidbaarheidsmetingen

Verschillende watertypen hebben een verschillende chemische samenstelling. Onder invloed van bodemprocessen kan deze samenstelling ook veranderen. Dit heeft zijn weerslag op de geleidbaarheid van het water. Daarom zijn er in de peilbuizen die bij de wel locaties staan ook geleidbaarheidsmetingen uitgevoerd.

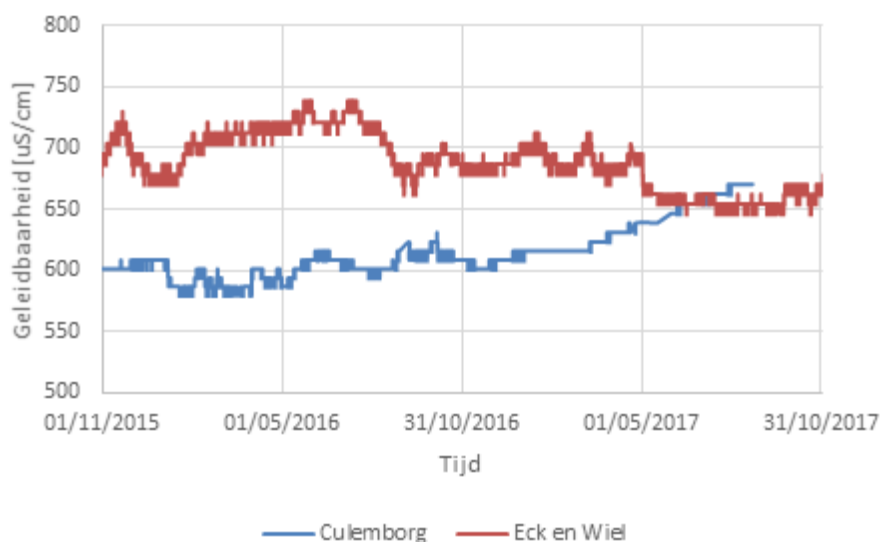
5.4.1 Categorie 1: Culemborg en Eck en Wiel

Naast de waterstanden is in elke peilbuis ook de geleidbaarheid gemeten. De geleidbaarheid wordt gemeten, omdat de geleidbaarheid een maat is voor het chloridengehalte. Het meten van het chloridengehalte zelf is echter een stuk bewerklijker. Tabel 5 geeft een indicatie van hoe de geleidbaarheid van het water zich verhoudt tot het water type. Opgemerkt wordt dat de geleidbaarheid ook afhankelijk is van de temperatuur. Daarom wordt de geleidbaarheid vaak gecorrigeerd naar de geleidbaarheid bij 25°C. Zonder deze correctie zou grondwater met een jaarlijkse variatie in temperatuur in de zomer 'brakker' lijken dan in de winter.

Tabel 5. Gemeten EC-waarden van het grondwater in de boorgaten

Water type	Chloride concentratie [mg/l]	Geleidbaarheid water [μ S/cm] bij 25°C
Zoet	< 150	< 1.200
Zoet/brak	150 - 300	1.200 – 1.600
Brak	300 – 1.000	1.600 – 2.700
Brak/ zout	1.000 -10.000	2.700 – 27.000
Zout	>10.000	>27.000
Zeewater	20.000	42.000

In Figuur 25 is de variatie van de geleidbaarheid van het grondwater in de peilbuizen naast de wellen in Culemborg en Eck en Wiel weergegeven. Gedurende de meetperiode is een geringe fluctuatie van de geleidbaarheid van het grondwater gemeten. De fluctuatie is minder dan 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en standaarddeviaties zijn 22 bij Culemborg en 23 bij Eck en Wiel. Opvallend is wel de toename van de geleidbaarheid van het grondwater bij Culemborg vanaf de winter 2016/2017. De reden hiervan, is niet duidelijk, maar mogelijk is hier een link ligt met de recent aangebrachte damwanden in de dijk, waardoor grondwaterstromen van richting zijn veranderd.

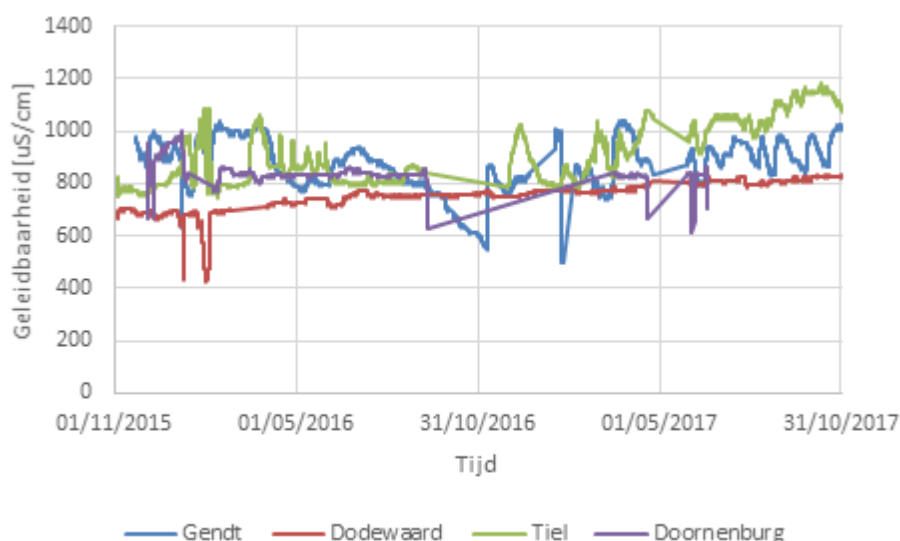


Figuur 25. Variatie van de geleidbaarheid van het grondwater bij Culemborg en Eck en Wiel

5.4.2

Categorie 2: Doornenburg, Gendt, Dodewaard en Tiel

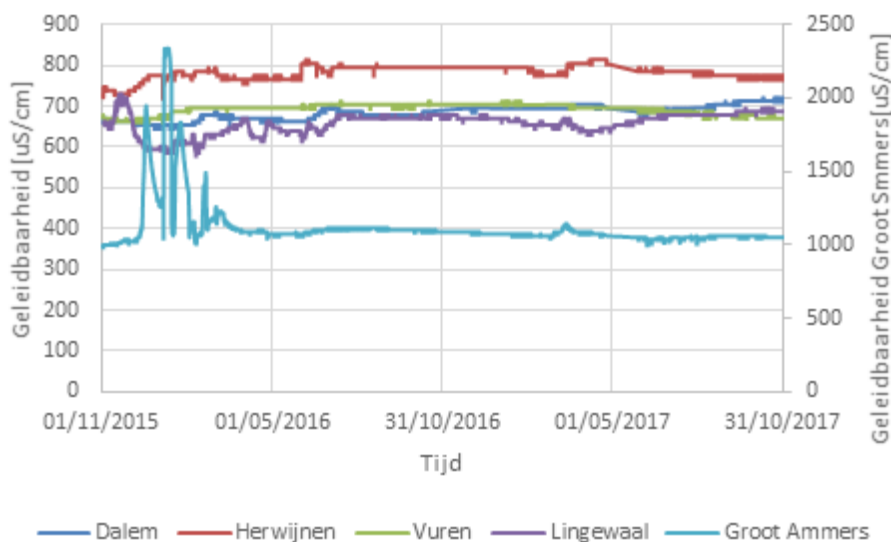
In Figuur 26 is de geleidbaarheid van het grondwater in de peilbuizen nabij de wellen in Doornenburg, Gendt, Dodewaard, en Tiel weergegeven. De sprongen in de reeksen zijn veroorzaakt doordat deze peilbuizen in periodes van lage rivierstanden droog hebben gestaan. T.o.v. Culemborg en Eck en Wiel is hierbij nagenoeg elke reeks een grotere fluctuatie in de geleidbaarheid gemeten. Dodewaard heeft een std. van 52 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Gendt van 96 en Tiel van 125 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Alleen Doornenburg heeft een beperkte std. van 28 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Figuur 26. Variatie van de geleidbaarheid van het grondwater bij Doornenburg, Gendt, Dodewaard, en Tiel

5.4.3 **Categorie 3: Lingewaal, Herwijnen, Vuren, Dalem en Groot Ammers**

In Figuur 27 is de geleidbaarheid van het grondwater in de peilbuizen nabij de wellen in Dalem, Herwijnen, Vuren, Lingewaal en Groot Ammers weergegeven. Bij alle peilbuizen trad continu een kwelsituatie op. Hierdoor is de fluctuatie van de geleidbaarheid van het grondwater zeer beperkt: Standaarddeviaties zijn hier tussen de 10 en 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Alleen de metingen in Groot Ammers laten een merkwaardige fluctuatie zien in het voorjaar van 2016. De oorzaak hiervan is niet bekend.



Figuur 27. Variatie van de geleidbaarheid van het grondwater bij Dalem, Herwijnen, Vuren, Lingewaal en Groot Ammers

5.4.4 **Conclusies**

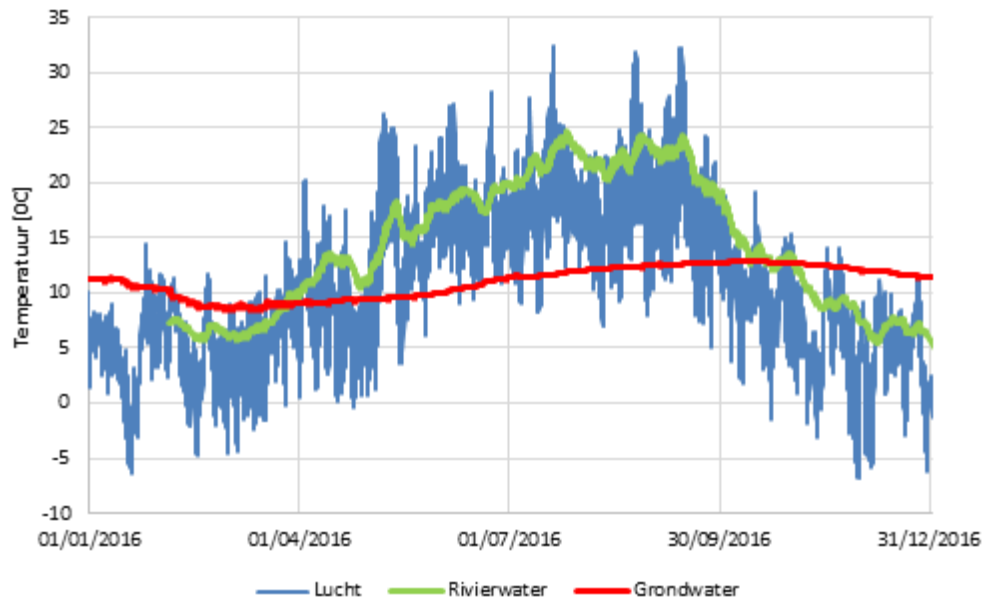
De metingen van de geleidbaarheid van het grondwater bij wellen laten zien dat waar deze onder invloed zijn van kwel (continue overdruk) deze een redelijk beperkte variatie hebben. Daar waar soms sprake is van kwel en soms sprake is van inzijging van regenwater, is de variatie in geleidbaarheid van het grondwater veel groter.

5.5 **Temperatuurmetingen**

Als gevolg van de seizoenen varieert de lucht temperatuur. Deze werkt vrij snel door in de watertemperatuur. De bodem heeft een grote capaciteit om warmte op te nemen of vast te houden. Hierdoor reageert de bodem en het grondwater veel langzamer op veranderingen van de temperatuur en ijlt de temperatuur van de bodem en het grondwater na.

De variatie van de temperatuur van lucht, water en grondwater in 2016 is weergegeven in Figuur 28. De lucht temperatuur varieert het meest: tussen -7 en + 32 graden. De grondwater temperatuur op de gebruikte locatie fluctueert het minst: tussen de +8 en +13 graden.

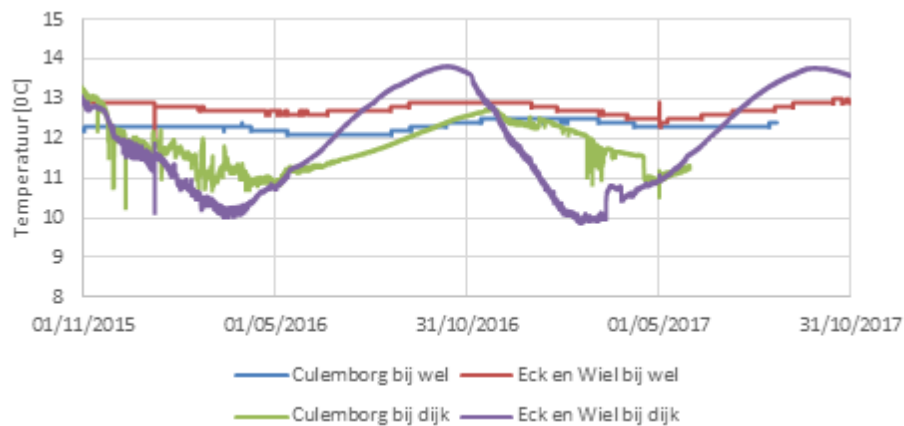
De grootste verschillen tussen grondwater temperatuur en rivierwater temperatuur treden op gedurende de zomer en de winter. In de herfst en in het voorjaar zijn de verschillen het kleinst of zelfs gelijk.



Figuur 28. Variatie van de temperatuur van lucht, rivierwater en grondwater in 2016.

5.5.1 Categorie 1: Culemborg en Eck en Wiel

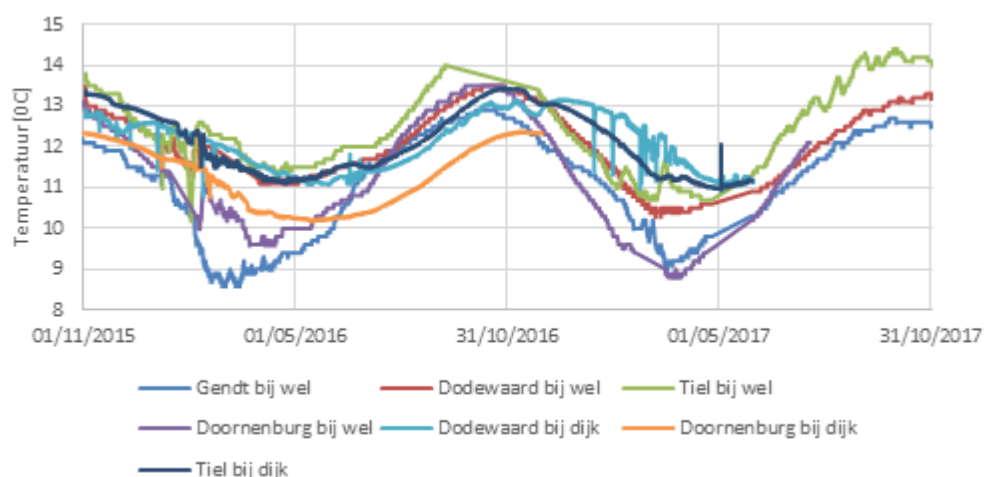
In Figuur 29 zijn de temperatuurmetingen voor zowel Culemborg als Eck en Wiel twee metingen weergegeven: nabij de dijk en nabij de wel. Bij beide wellen is sprake van een continu stromend water. Het grondwater in de peilbuizen bij de dijk vertoont een aanzienlijke seizoensvariatie van 3 á 4 graden. Terwijl de temperatuur van het grondwater in peilbuizen bij de wellen een nagenoeg constante temperatuur laten zien.



Figuur 29. Variatie van de temperatuur van het grondwater bij Culemborg en Eck en Wiel

5.5.2 Categorie 2: Doornenburg, Gendt, Dodewaard en Tiel

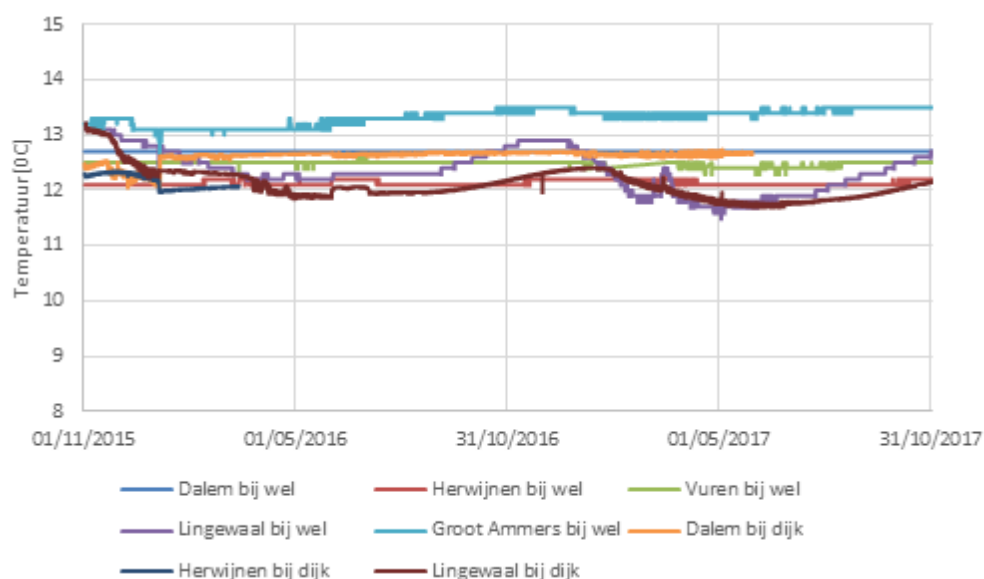
In Figuur 30 staan de temperatuurmetingen voor Doornenburg, Gendt, Dodewaard en Tiel. Doordat een groot gedeelte van de tijd sprake is van percolatie van neerslag via het freatische grondwater uit de deklaag naar het eerste watervoerend pakket volgt de grondwatertemperatuur de seizoensfluctuatie.



Figuur 30. Variatie van de temperatuur van het grondwater bij Doornenburg, Gendt, Dodewaard, en Tiel

5.5.3 Categorie 3: Lingewaal, Herwijnen, Vuren, Dalem en Groot Ammers

In Figuur 31 zijn de temperatuurmetingen in de peilbuizen nabij de wellen van Lingewaal, Herwijnen, Vuren, Dalem en Groot Ammers opgenomen. Bij bijna al deze wellen is een groot deel van de tijd sprake van kwel. Enkel bij Lingewaal is sprake van inzijging. Dit is ook terug te zien in de temperatuurvariatie: deze is nagenoeg constant bij Herwijnen, Vuren, Dalem en Groot Ammers. Terwijl bij Lingewaal de variatie nog ongeveer 1 graad betreft.



Figuur 31. Temperatuurmetingen van het grondwater bij Dalem, Herwijnen, Vuren, Lingewaal en Groot Ammers

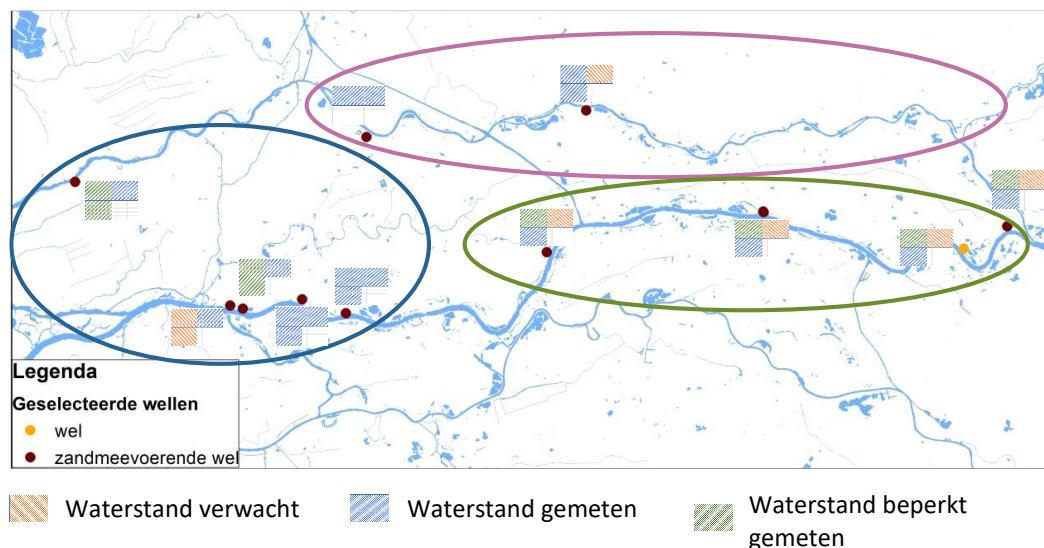
5.5.4 Conclusies

De metingen van de temperatuur en geleidbaarheid van het grondwater laten zien dat deze sterk afhangen van de situatie die optreedt: daar waar er sprake is van kwel (kwadrant A en B) is de variatie zeer beperkt, daar waar er sprake is van inzijging (kwadrant C), is sprake van een veel grotere variatie van de temperatuur en geleidbaarheid van het grondwater. Figuur 21 is daarom uitgebreid naar Figuur 32.

Rivierwaterstand	<p>A. Rivierwaterstand boven mv Grondwaterstijghoogte onder mv</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inzijing van regenwater met lokale kwel / wellen (in diepere sloten) - beperkte fluctuatie van temperatuur en geleidbaarheid van het grondwater 	<p>B. Rivierwaterstand boven mv Grondwaterstijghoogte boven mv</p> <ul style="list-style-type: none"> - kwel / wellen in sloten en op maaiveld - redelijk constante temperatuur en geleidbaarheid van het grondwater
	<p>C. Rivierwaterstand onder mv Grondwaterstijghoogte onder mv</p> <ul style="list-style-type: none"> - inzijing van regenwater en rivier is drainerend - relatief grote variatie in temperatuur en geleidbaarheid van het grondwater 	<p>D. Rivierwaterstand onder mv Grondwaterstijghoogte boven mv</p> <p>=> kwel, waarschijnlijk door andere invloeden (regionale grondwaterstoming vanuit hoger gelegen gebieden) en drainerende rivier</p>
	Grondwaterstijghoogte	

Figuur 32. Indeling van wellen in 4 kwadranten en verwachte fluctuatie van temperatuur en geleidbaarheid.

In welk kwadrant van de hysteresegrafiek een wel zich bevindt is van belang voor het begrijpen van de metingen, van niet alleen het grondwater, maar ook van de temperatuur en de geleidbaarheid. Dit is inzichtelijk gemaakt voor het hele gebied middels een verkleinde hysteresekleurschaal, waarbij de verschillende kleuren staan voor hoe vaak deze zone voorkomt in de metingen: blauw is vaak, groen is beperkt en oranje is verwacht, maar niet gemeten gedurende de proef. Dit laat direct in 1 oogopslag zien wat de geohydrologische situatie is bij de 11 locaties.



Figuur 33. Spreiding in type op basis van de rivier- en grondwaterstijghoogten van de 11 wellen

5.6 Debietmetingen bij actieve wellen

Bij Culemborg, Lingewaal en Eck en Wiel zijn debietmetingen verricht. Doel van de metingen is allereerst om te bepalen hoeveel water er uit de wel komt, hoe dit samenhangt met eerdere onderzoeken, hoe dit zich verhoudt tot het drukverschil en hoe sterk dit verschilt bij verschillende waterstanden.

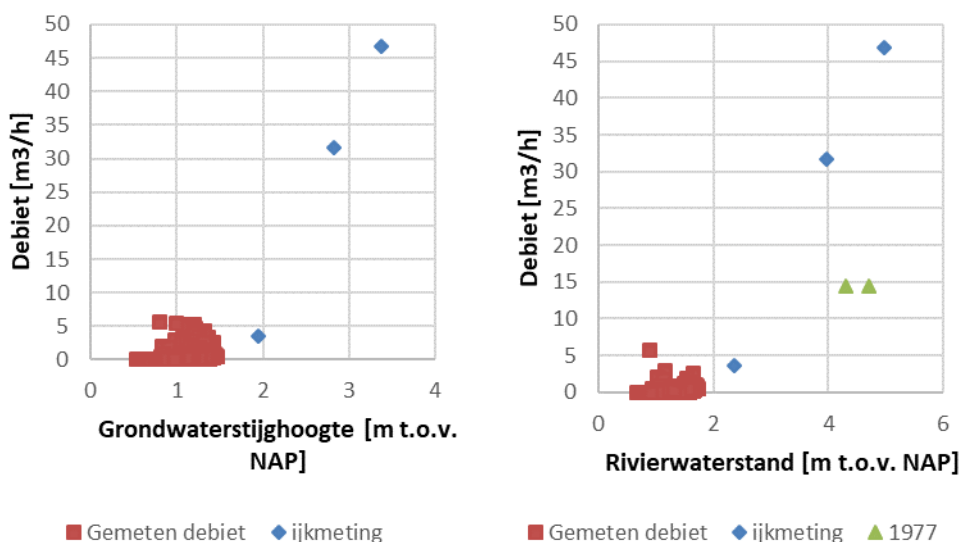
5.6.1 Culemborg

In de watergang direct benedenstrooms van de wel bij Culemborg is op 16 oktober 2016 een debietmeting gedaan met zout. Hiervoor is eerst een zoutoplossing gemaakt en deze is aan het water toegevoegd. Door de geleidbaarheidsmetingen te integreren en te vergelijken met de toegevoegde hoeveelheid zout is het debiet te bepalen. Rond 18 uur 's avonds stroomde circa 0,6 l/s uit de wel. Dit komt overeen met 2,2 m³/uur. Gedurende deze meting stond het rivierwater op +2,38 m NAP en was de stijghoogte op 3,6 meter van de wel +1,21 m NAP. De wel zelf, of eigenlijk de droge slootbodem, ligt op +0,5 m NAP.

5.6.2 Lingewaal

Voor de debietmetingen van de wel bij Lingewaal is in de watergang een tijdelijke dam met duiker aangebracht. In deze duiker is vervolgens continu een stroomsnelheid en waterstandsmeting uitgevoerd, waarmee het debiet kan worden bepaald. Hiertoe zijn bij het aanbrengen en ook bij het opruimen van de apparatuur handmatige controlemetingen uitgevoerd. De meetopstelling is in het najaar 2017 bij het schonen van de sloot vernield. Hierdoor zijn er geen metingen van na 30 oktober.

In Figuur 34 zijn links de debietmetingen uitgezet tegen de onder de deklaag gemeten stijghoogte in de peilbuis op 5 m van de wel en rechts tegen de rivierwaterstanden. De spreiding van de gemeten debiet versus waterstand/ stijghoogte in beide figuren is verschillend doordat niet alle data compleet was.

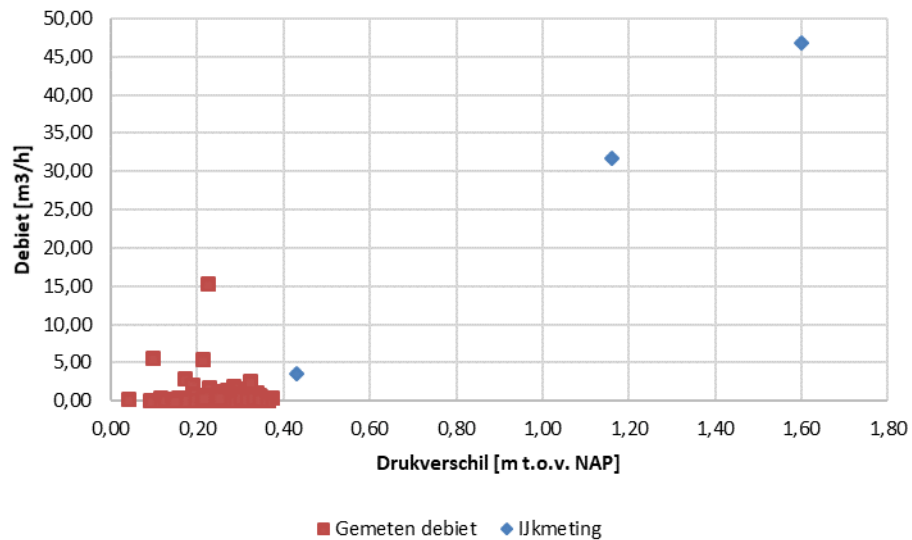


Figuur 34. Debiet variatie bij de wel in Lingewaal uitgezet tegen de grondwaterstijghoogte (links) en de rivierwaterstand (rechts)

In 1977 zijn op deze locatie ook debietmetingen uitgevoerd. Het debiet was toen 4 l/s. Dit komt overeen met 14,4 m³/uur. De rivierwaterstand wordt in dit rapport niet genoemd, wel zijn er grafieken opgenomen van de metingen van de rivierwaterstanden in Herwijnen (waarvan onduidelijk is waar deze is gelegen) en Zaltbommel. Op basis van deze grafieken is de waterstand ter plaatse van Lingewaal in 1977 ingeschat op tussen de 4,3 en 4,7 m t.o.v. NAP.

Opvallend is dat de meting uit 1977 (zie Figuur 34 rechts) niet in de lijn ligt van de huidige meting. Reden hiervoor is niet goed vast te stellen.

In Figuur 35 is de debietvariatie uitgezet tegen het drukverschil (rivierwaterstand - grondwaterstijghoogte). Te zien is dat er een redelijk lineaire relatie lijkt te zijn tussen het debiet en het drukverschil. Dit komt overeen met het verschijnsel van een putonttrekking (lineair) en niet met een pipestroming (exponentieel).



Figuur 35. Debiet variatie bij de wel in Lingewaal uitgezet tegen het verschil tussen rivierwaterstand en de grondwaterstijghoogte.

In Barends en Uffink (2002) wordt een relatie gegeven voor een onttrekking in een watervoerende laag langs een rivier in relatie tot de stijghoogte in een peilbuis vlakbij:

$$\varphi(x, y) = \frac{Q}{2\pi kH} * \ln \frac{\sqrt{(x - a)^2 + y^2}}{\sqrt{(x + a)^2 + y^2}}$$

Waarin:

φ = de grondwaterstijghoogte ter plaatse van locatie x en y

x = de afstand van de peilbuis ten opzichte van de rivier langs de x-as

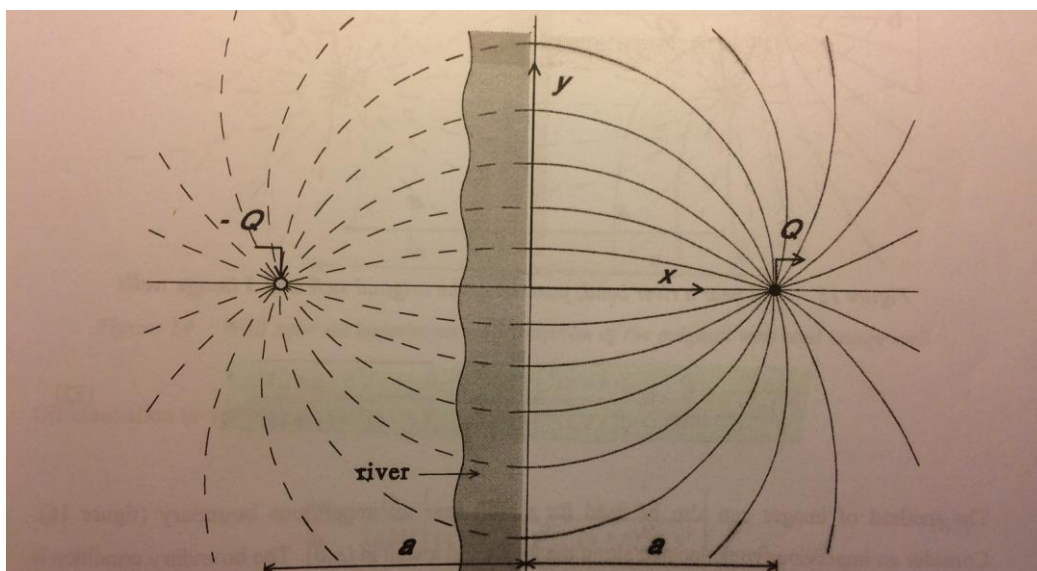
y = de afstand van de peilbuis ten opzichte van de rivier langs de y-as

Q = het debiet in de wel

k = de doorlatendheid van de watervoerende laag

H = de dikte van het watervoerend pakket

a = de afstand tussen instroompunt rivier en wel



Figuur 36. Schematisatie van formule van Barends en Uffink (2002) om impact van het debiet uit een rivier analytisch uit te kunnen rekenen. De zogeheten spiegelput die links in de figuur staat is een analytische oplossing om de juiste stroombanen te krijgen.

Op basis van deze formule is een analyse gemaakt waarbij de 3 belangrijkste parameters zijn gevarieerd: afstand tot inlaatpunt rivier en dikte van het watervoerend pakket zijn de minimum en maximumwaarden van genomen, waarbij de doorlatendheid dan is uitgerekend. De bandbreedtes zijn als volgt:

- De afstand tot de dijk is 150 m (minimumafstand), tot het hart van de rivier is de afstand 331 m (maximum afstand)
- De dikte van het watervoerend pakket is, afhankelijk van de mate van weerstand van de laag op 30 m beneden maaiveld, tussen de 20 en 35 m
- De doorlatendheid van de watervoerende laag (ingeschat op basis van de uitgevoerde sondering) is in de bovenste 6 m van het watervoerend pakket tussen de 5 en 15 m/d

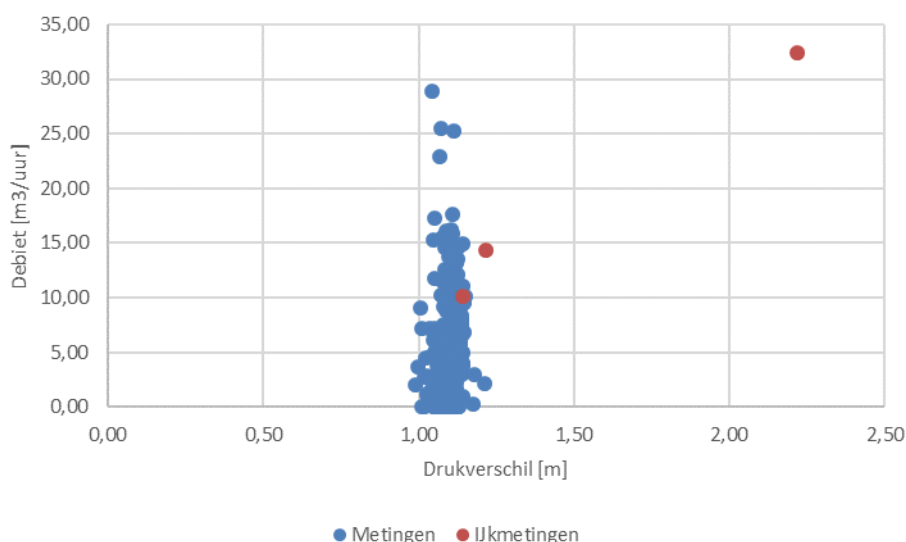
Op basis van de bandbreedtes van de eerste 2 parameters is vervolgens de waarde voor de doorlatendheid bepaald. In Tabel 6 zijn de resultaten weergegeven.

Tabel 6. Parameter variatie op

	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
Afstand tot instroompunt rivier	150	150	200	200	250	250	300	300	331	331
Dikte watervoerend pakket	20	35	20	35	20	35	20	35	20	35
Doorlatendheid	22	12,5	23,6	13,5	24,5	14	26,3	15	27	15,4

Te zien is dat de doorlatendheid bij toestroming vanuit een dunner watervoerend pakket (de a-situaties van 20 m dikte watervoerend pakket) een stuk hoger is (22 tot 27 m/d) dan uit de sondering is ingeschat (5 tot 15 m/d). Onzeker is hierbij wat de doorlatendheid van de onderste 14 m is. Deze moet over deze resterende 14 m gemiddeld 27 tot 34 m/d zijn om uit te komen op de benodigde bandbreedte van 22 tot 27 m/d.

De berekende debieten zijn weergegeven in Figuur 34. Te zien is dat deze in het hogere bereik behoorlijk goed overeenkomen met het gemeten debiet.



Figuur 38. Debiet variatie bij de wel in Eck en Wiel uitgezet tegen het drukverschil (de rivierwaterstand – de grondwaterstijghoogte)

5.6.4

Conclusies

Vooraf de automatische debietmetingen aan de 2 wellen hebben te kampen gehad met veel pech. Beide meetopstellingen zijn tijdens maaien en schonen zwaar beschadigd, waardoor de metingen die er wel zijn allemaal zijn uitgevoerd in een mooi-weer-periode de waterstandsvariatie beperkt was. De uitgevoerde ijkmetingen leverden meer informatie, omdat deze zijn uitgevoerd bij lage en hoge waterstanden. Het gezamenlijke beeld van beide typen metingen bij Lingewaal laat zien dat hier een duidelijk lineair verband is tussen het debiet uit de wel en het drukverschil. Tevens laat de analyse met de formule van Berends en Uffink zien dat de toestroming naar de wellen 3-dimensionaal (zowel van onderen, en van alle kanten in de horizontale richting) en radiaal is.

5.7 Zandmonsters bij actieve wellen

In en nabij de wellen Lingewaal, Eck en Wiel en Culemborg zijn zandmonsters genomen. Deze wellen zijn af en toe zandmeevoerend. In november 2017 zijn dan ook zandmonsters genomen van het zand wat rond de wel lag na het schonen van de sloten en duidelijk uit de wel afkomstig was.

5.7.1

Lingewaal

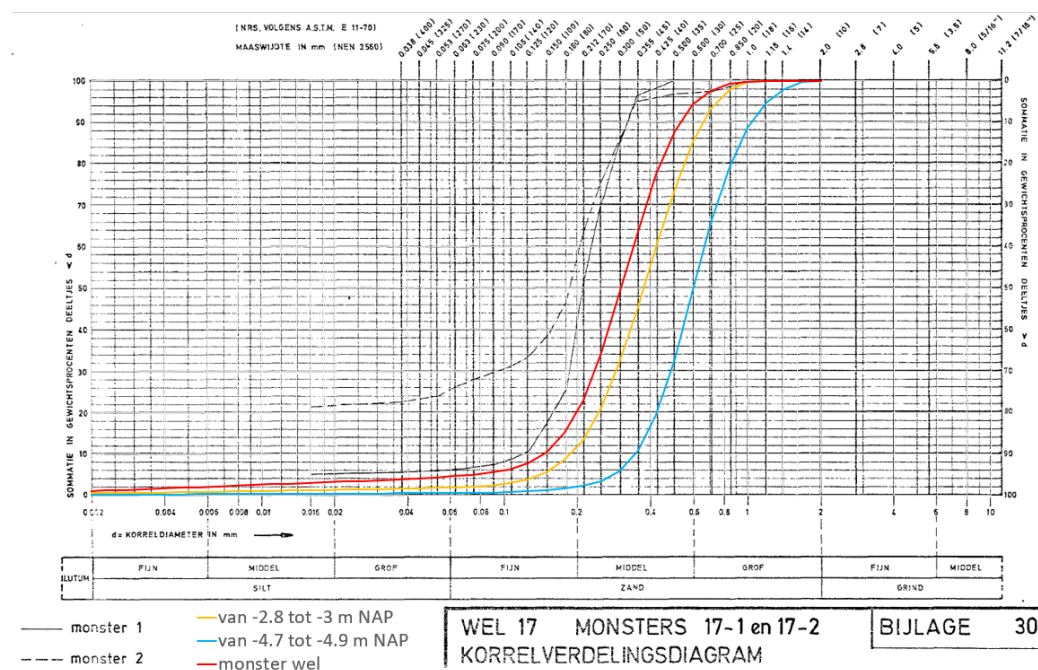
De wel in Lingewaal bevindt zich in de bodem van de sloot langs de Zeek. In het onderzoek uit 1978 (Zie paragraaf 2.4) is ook in deze watergang uit een zandmeevoerende wel meegenomen in het onderzoek. De huidige wel in de watergang is het grootste deel van het jaar actief. Enkel aan het begin van de zomer van 2017 was het grondwater echter zodanig gedaald, dat de wel droogviel. In november 2017 steeg de stijghoogte, waardoor de wel bij Lingewaal na de zomerperiode weer actief werd.

Bij het nemen van het zandmonster op 17 november 2017 stond de grondwater stijghoogte in de peilbuis op +1,95 m NAP. Ter plaatse van deze peilbuis ligt het maaiveld op +2,03 m NAP. De rivier bereikte op deze dag een waterstand van +2,42 m NAP. De wel had toen een diameter van tussen de 5 en 10 cm. Rondom de wel was zand afgezet. Van dit zand is een monster genomen en een zeefanalyse uitgevoerd.

In Figuur 39 staan de resultaten van de zeefanalyse (rode lijn). Hierbij zijn de monsters vergeleken met de monsters die genomen zijn tijdens het plaatsen van de peilbuis bij de wel (gele en blauwe lijn) en met de monsters uit 1977 (2 grijze lijnen). Monster 1 (doorgetrokken grijze lijn) is het uitgespoelde zand, monster 2 (gestippelde grijze lijn) is

genomen op 1 m onder de slootbodem in de wel (op + 0,5 m NAP). Bij het boren voor het plaatsen van de peilbuis bleek dat op deze hoogte ook nog een kleilaag zit.

Tijdens het bezoek is ook de diepte van de wel bepaald, deze bleek 2 m te zijn. Dit komt overeen met ongeveer de dikte van de deklaag ter plaatse van de slootbodem, wat betekent dat de wel door het hoogwater tot de onderzijde van de kleilaag geopend is. Het monster dat genomen is (rode lijn) laat zien dat deze fijner is dan het materiaal uit de boringen (gele en blauwe lijn). Deze is echter grover dan het monster dat in 1977 is genomen (doorgetrokken grijze lijn). Dit kan mogelijk komen doordat bij het openbarsten van de wel tijdelijk hogere stroomsnelheden zijn opgetreden (kleinere opening), waardoor grover zand is meegenomen.



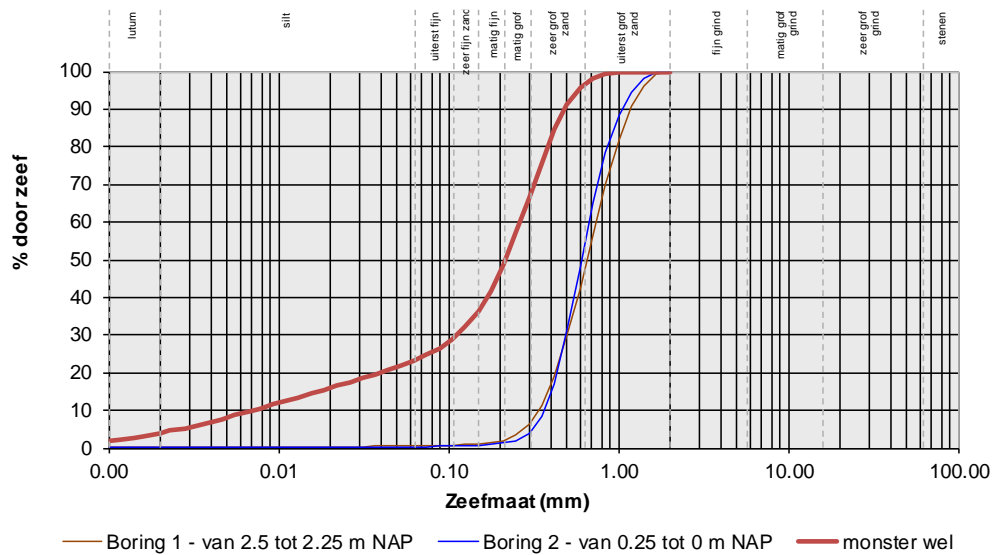
Figuur 39. Zandmonsters genomen bij de wel in Lingewaal vergeleken met de monsters genomen tijdens de aanleg van de peilbuizen en de oude monsters genomen in 1977. Monster 1 is het uitgespoelde zand, monster 2 is een bodemmonster genomen op 1 m onder de slootbodem bij het uitvoeren van een boring.

5.7.2 Eck en Wiel

De wel bij Eck en Wiel ligt in de kant van de watergang en is ongeveer 50 cm diep. Dit komt overeen met de onderkant van de kleilaag. De wel bestaat uit een grotere holte in de zijkant van de watergang van ongeveer 20 cm in diameter. De opening wordt in stand gehouden door wortels van planten. Dit is ook gezien op camerabeelden, welke in hoofdstuk 5.8 worden weergegeven en toegelicht.

Op 17 november 2017 is een zandmonster genomen. De zeefanalyse van dit monster is weergegeven in Figuur 40 (rode lijn). De waterstand in de rivier was op dat moment 5,94 m t.o.v. NAP, het grondwater bij de wel stond op 4,89 m t.o.v. NAP. En de slootbodem ligt op ongeveer +4,3 m NAP. In de schoongemaakte watergang was rondom de welopening zand afgezet.

In Figuur 40 is ook de zeefanalyse weergegeven van de bodemmonsters die genomen zijn bij het plaatsen van de peilbuizen. De resultaten laten duidelijk zien dat het nu afgezette materiaal bestaat uit fijner materiaal dan de bodemmonsters. Dit komt waarschijnlijk doordat enkel de fijnere helft van het bodemmateriaal naast de wel is afgezet. Tijdens het veldbezoek is met een camera inspectie namelijk ook geconstateerd dat op de bodem veel grof materiaal lag. En de stroomsnelheid kennelijk te laag is om dit naar de oppervlakte te laten stromen.



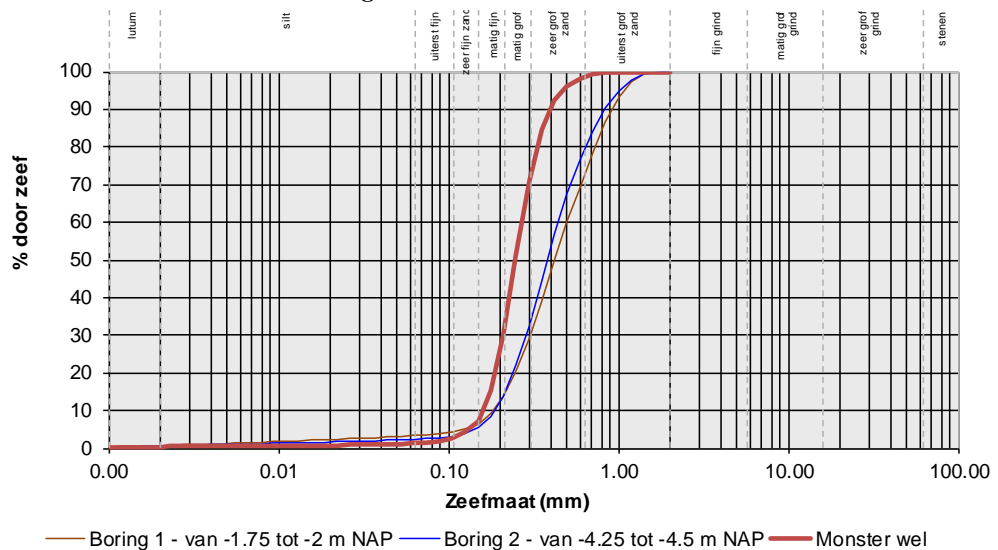
Figuur 40. Zandmonsters bij de wel in Eck en Wiel en de boormonsters tijdens de aanleg van de peilbuizen.

5.7.3 Culemborg

De wel in Culemborg is gelegen in een watergang. Deze wel is altijd actief doordat de naastgelegen rivier altijd ruim boven de waterstand in de teensloot ligt. De wel is ongeveer 85 cm diep. De diepte van de komt hiermee tot ongeveer de onderkant van de deklaag. De diameter van de wel was ongeveer 10 cm. Opgemerkt wordt dat de slootbodembodem erg slap is.

De peilbuizen in Culemborg zijn in augustus door de boer onder geploegd, waardoor geen grondwaterstijghoogte kon worden gemeten. In de rivier was de waterstand op 17 november 2,85 m t.o.v. NAP. De watergang ligt op ongeveer op +0,5 m NAP.

Op 17 november 2017 is de wel bezocht. In de schoongemaakte sloot was zand aanwezig rondom de wel. Het genomen zandmonster is geanalyseerd. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 41 (rode lijn). Tevens zijn in deze figuur de resultaten van de genomen zandmonsters bij de aanleg van de peilbuizen weergegeven (blauwe en oranje lijn). Net als bij Eck en Wiel is ook hier het nu afgezette materiaal fijner dan het bodemmateriaal onder de deklaag.



Figuur 41. Zandmonsters genomen bij de wel in Culemborg vergeleken met de boormonsters tijdens de aanleg van de peilbuizen.

5.7.4 Vergelijking van zandmonsters met debieten

De zeefanalyses laten zien dat niet al het bodemmateriaal door de wel kan worden afgevoerd. De grovere delen wegen te veel om door het stromende water te worden afgevoerd. Indien dit materiaal in de ondergrond aanwezig is, blijft dit op de bodem van de wel achter. De deeltjes die wel worden afgevoerd, maar direct weer bezinken rond de wel (en een krater vormen) zijn dus een indicatie van de minimale stroomsnelheid in de wel. De wet van Stokes beschrijft hoe snel een deeltje bezinkt. Als nu voor de grove deeltjes naast de wel de snelheid wordt bepaald en vermenigvuldigd met de diameter kan het debiet worden geschat.

Wet van Stokes

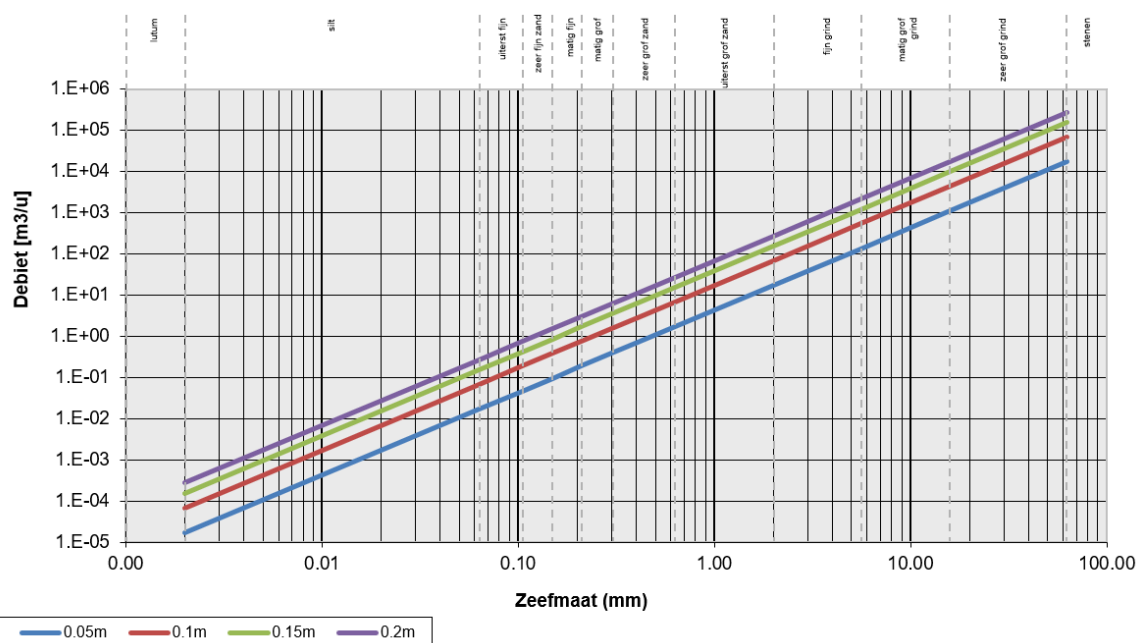
De wet van Stokes beschrijft de valsnelheid van een deeltje:

$$v = \frac{2}{9} r^2 g \frac{(\rho_s - \rho_l)}{\mu}$$

Waarin:

v	= bezinksnelheid [m/s]	
r	= straal van het deeltje [m]	
g	= zwaartekrachtsversnelling [m/s ²]	= 9,81
ρ_l	= dichtheid van de vloeistof [kg/m ³]	= 1000
ρ_s	= dichtheid van het deeltje [kg/m ³]	= 2100
μ	= de viscositeit van de vloeistof [kg m/s]	= 0,001

Met behulp van de wet van Stokes kan ook het omgekeerde worden bepaald: het te verwachten debiet bij een zekere diameter van de wel in combinatie met de zeefmaat van de grofste naast de wel gevonden fractie (Zie Figuur 42).



Figuur 42. Relatie tussen zeefmaat en debiet bij verschillende diameters van het welgat en de wet van Stokes

Vergelijking debiet en zanddeeltje

Om te toetsen of deze relatie enigszins overeenkomt met de metingen zijn de zeefkrommes van de 80% en 90% grootste deeltjes vergeleken met de gemeten debieten. Opgemerkt wordt dat de hiervoor gebruikte debietmetingen op een ander moment zijn genomen dan de zandmonsters. Echter, als de waterstanden ten tijde van de

debietmeting en ten tijde van de monsternamen met elkaar worden vergeleken is te zien, dat deze redelijk met elkaar overeenkomen.

De resultaten van deze analyse staan in Tabel 7. De schatting van het debiet op basis van de diameter van de 80% en 90% grootste deeltjes geeft een redelijke goede inschatting van het debiet. Hierbij is het echter van groot belang om de diameter van de wel goed te meten. Deze heeft namelijk een grote invloed op de inschatting van het debiet. Zie bijvoorbeeld de impact van de diameter variatie Lingewaal in Tabel 7

Tabel 7. Vergelijking tussen het debiet wat bepaald is op basis van de zeefkromme en de gemeten debieten

	Culemborg	Eck en Wiel	Lingewaal	Lingewaal
Datum monster	17-11-17	17-11-17	17-11-17	1977
Waterstand monsternamen [m t.o.v. NAP]	2,85	5,94	2,42	Geschat op 4,3 - 4,7
Grondwaterstijghoogte monsternamen [m t.o.v. NAP]	-	4,89	1,95	-
Diameter deeltje 80% [mm]	0,31	0,38	0,43	0,28
Diameter deeltje 90% [mm]	0,4	0,5	0,52	0,32
Diameter wel [cm]	10	20	5 - 10	30 - 35
Debiet 80% [m³/u]	1,6	9,8	0,78 - 3,13	12 - 16
Debiet 90% [m³/u]	2,7	16,9	1,1 - 4,6	15,6 - 21,3
Gemeten debiet [m³/u]	2,2	10 - 15	3,6	14,4 m ³ /u
Waterstand ten tijde van meting [m t.o.v. NAP]	2,38	6,1 - 6,15	2,37	Geschat op 4,3 - 4,7

5.7.5

Conclusies

Bij de 3 actieve wellen in Culemborg, Eck en Wiel en Lingewaal zijn zandmonsters genomen. De monsters bij Lingewaal en Culemborg waren vrij uniform van aard, alleen het monster van Eck en Wiel bevatte ook een grote fijne fractie. Met de 80% en 90% zeeffractie in combinatie met de wet van Stokes kan - mits de diameter van de wel bekend is - een redelijke inschatting van het minimale debiet worden bepaald. Het bepaalde debiet is namelijk de ondergrens:

- Als er geen grovere fractie aanwezig is in de ondergrond, kan deze ook niet worden meegenomen of worden afgezet.
- Hoe groter de holte in de ondergrond wordt, hoe kleiner de snelheid op de randen van de holte is. De stroomsnelheid in het de verticale pipe kan dan wel heel hoog zijn, maar hoe groter de holte, hoe kleiner de toestroomsnelheid op de rand, hoe minder materiaal kan worden meegenomen.

5.8

Camera inspecties wellen

Bij de 3 actieve wellen die in november 2017 zijn bezocht, is ook geprobeerd om de wellen te inspecteren met een camera. Dit om een indruk te krijgen van het opbarstkanaal van de wel en de eventueel aanwezige holle ruimte onder de deklaag. Bij deze camera-inspecties bleek dat de kwaliteit van de opnames sterk afhingen van de troebelheid/helderheid van het water. In die zin is camera inspectie bij een wel op het moment dat deze zand meevoert lastig, op een later moment - als er geen zand meer wordt meegevoerd en het water helder is - is inspectie wel goed mogelijk.

Enkel bij Eck en Wiel was het water helder genoeg om goede beelden te krijgen van de wel. Figuur 43 laat zes screenshots zien van deze inspectie. Opgemerkt wordt dat de camera een sterk ingezoomd beeld geeft (een schaal kan niet worden meegegeven op deze beelden): deeltjes die eruitzien als grind zijn in werkelijkheid eerder zandkorrels. De belangrijkste zaken die opvielen zijn de volgende:

- De diepte van de wellen is tot iets onder de deklaag;
- Op de bodem van de wel ligt zwaarder materiaal wat op kan wellen zodra de snelheid toeneemt, hierbij gaat het zowel om zanddeeltjes, maar ook om grotere kleibrokjes; dit komt overeen met de waarnemingen van Centrum voor onderzoek waterkeringen, 1978, zoals beschreven in hoofdstuk 2.4.
- Onderin de wellen zijn meerdere kleinere stroombanen zichtbaar, die te klein zijn voor de camera om erin te kijken (zie bijvoorbeeld de afbeelding links midden in Figuur 43).



Figuur 43. Screenshots van de camera inspectie bij de wel in Eck en Wiel.

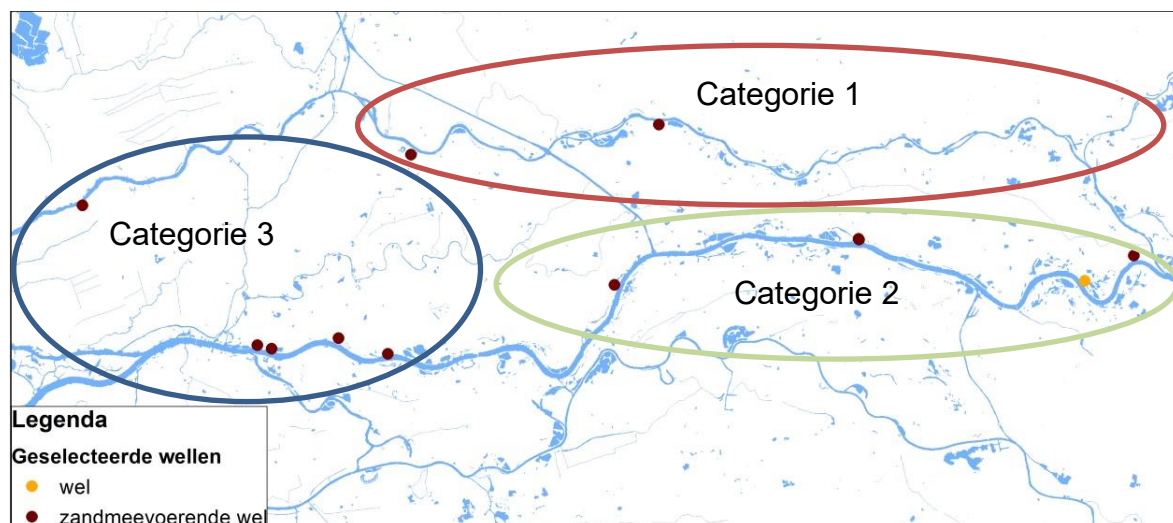
5.9 Conclusies geohydrologische monitoring 11 wellen

Om inzicht te krijgen in het geohydrologisch functioneren van wellen zijn bij 11 wellen gedurende 2 jaar verschillende parameters gemeten. Gehoopt was op verschillende extreme gebeurtenissen (waterniveau bij Lobith boven de 14 m t.o.v. NAP), maar helaas is gedurende deze periode géén enkel extreem hoog water voorgekomen. Desalniettemin hebben de metingen toch inzicht opgeleverd rondom wellen. De belangrijkste zijn:

[1] Als eerste is een indeling gemaakt in drie soorten wellen (zie hoofdstuk 5.1):

- Categorie 1: wellen in de buurt van een hoger gelegen gestuwde rivier met een redelijk constante waterstand. De deklaag is hier dun (minder dan 2 m) en de wellen geven een continu debiet (Culemborg en Eck en Wiel);
- Categorie 2: wellen met een gemiddelde rivierwaterstand onder het binnendijkse maaiveld. De rivier vertoont flinke fluctuaties in waterstand. De deklaag achter de dijk is hier dun (minder dan 2 m) en de wellen geven enkel water bij hoge rivierwaterstanden (waarschijnlijk boven het niveau 14 m bij Lobith). Het debiet varieert met de rivierwaterstand (Doornenburg, Gendt, Dodewaard en Tiel);
- Categorie 3: wellen met een gemiddelde rivierwaterstand gelijk aan en boven het binnendijkse maaiveld. De rivier vertoont beperkte variatie in de waterstand en de deklaag is hier dik (meer dan 4 m). Alleen de wel bij Groot Ammers geeft geen water, de andere 4 wellen geven continu water. (Lingewaal, Herwijnen, Vuren, Dalem en Groot Ammers).

Deze indeling in categorieën geeft ook de verklaring waarom de wellen altijd actief zijn of niet actief zijn: hoe het waterpeil van de rivier zich verhoudt tot het maaiveldniveau in het achterland is hierbij een zeer belangrijke factor.



Figuur 44. Indeling van de 11 wellen in 3 verschillende categorieën

[2] Deze indeling in 3 categorieën blijkt goed bruikbaar bij het interpreteren van de verschillende typen geohydrologische en geochemische metingen. De waterstanden in de rivier t.o.v. de hoogte van het binnendijkse maaiveld (c.q. waterstand in de teensloot) zijn immers de drijvende kracht van het al dan niet actief zijn van de wellen. De afwezige, grote en beperkte waterstandsvariatie bij respectievelijk categorie 1, 2 en 3 maakt dat hier de wellen respectievelijk altijd continu, alleen bij zeer hoog water of continu actief zijn met wisselende debieten.

[3] Hysterese-grafieken van de grondwaterstijghoogte versus de rivierwaterstanden t.o.v. het binnendijkse maaiveld (c.q. waterstand van de teensloot) leveren een beter begrip op rondom het functioneren van de wellen.

Afhankelijk van of er sprake is van een permanente actieve of een af en toe werkende wel liggen de metingen in een ander kwadrant: respectievelijk kwadranten A en B of de kwadranten A, B en C. Daarnaast geeft ook de vorm van de puntenwolk inzicht in hoe 'goed' de stijghoogte onder de deklaag de naastgelegen rivierwaterstanden volgt. Indien er sprake is van een dikke deklaag op geringe afstand van de nabijgelegen rivier, waarbij de rivierwaterstand boven de onderkant van de deklaag staat (en er dus sprake is van stijghoogten in het watervoerend pakket), lijkt steeds sprake te zijn van een lineaire relatie tussen stijghoogte en rivierwaterstand. Als de rivierwaterstand onder de deklaag

uitzakt, of er geen sprake is van een goede weerstandsbiedende deklaag, wordt de spreiding van de puntenwolk veel groter: andere processen gaan dan een rol spelen, zoals infiltratie van neerslag.

Rivierwaterstand	A. Rivierwaterstand boven mv Grondwaterstijghoogte onder mv	B. Rivierwaterstand boven mv Grondwaterstijghoogte boven mv
	- Inzijing van regenwater met lokale kwel / wellen (in diepere sloten)	- kwel / wellen in sloten en op maaiveld
	- beperkte fluctuatie van temperatuur en geleidbaarheid van	- redelijk constante temperatuur en geleidbaarheid van het grondwater
	C. Rivierwaterstand onder mv Grondwaterstijghoogte onder mv	D. Rivierwaterstand onder mv Grondwaterstijghoogte boven mv
	- inzijing van regenwater en rivier is drainerend	=> kwel, waarschijnlijk door andere invloeden (regionale
	- relatief grote variatie in temperatuur en geleidbaarheid van het grondwater	grondwaterstoming vanuit hoger gelegen gebieden) en drainerende rivier
	Grondwaterstijghoogte	

Figuur 45. Uitleg hysteresis grafiek van de rivierwaterstand versus de grondwaterstijghoogtes

[4] De temperatuur- en geleidbaarheidsmetingen hebben laten zien dat deze een nuttige aanvulling zijn op het begrip van het geohydrologische systeem, naast de metingen van de stijghoogte van het grondwater en de rivierwaterstanden. Wanneer continu kwel optreedt variëren de temperatuur en de geleidbaarheid nauwelijks. Daar waar soms sprake is van kwel en soms sprake is van inzijing van regenwater, is de variatie in temperatuur en geleidbaarheid van het grondwater veel groter. Bij de opschaling van de hysteresis grafieken naar andere gebieden kunnen deze metingen (temperatuur wordt altijd gemeten als de druk met een automatische druksensor wordt gemeten) tevens worden gebruikt als controle van de grondwatersituatie.

[5] Een minimum debiet dat uit een wel is gestroomd kan worden geschat met de wet van Stokes, de diameter van de wel en de 80% en 90% grootste zeeffractie.

[6] Uit de camera inspectie van 3 wellen is gebleken dat hier de diepte van de wel reikt tot iets onder de deklaag. Op de bodem van 1 van de wellen ligt zwaarder dan wel groter materiaal dat meegevoerd kan worden zodra de stroomsnelheid toeneemt. Onder in de wel is niet 1 'pipe' haaks op de dijk, maar meerdere kleine openingen waaruit water stroomde zichtbaar die te klein waren voor de camera (zie Figuur 43 links midden). Aanbevolen wordt om meer camera inspecties uit te voeren, met kleinere camera's met een flexibele kop en een visiooglens.

6

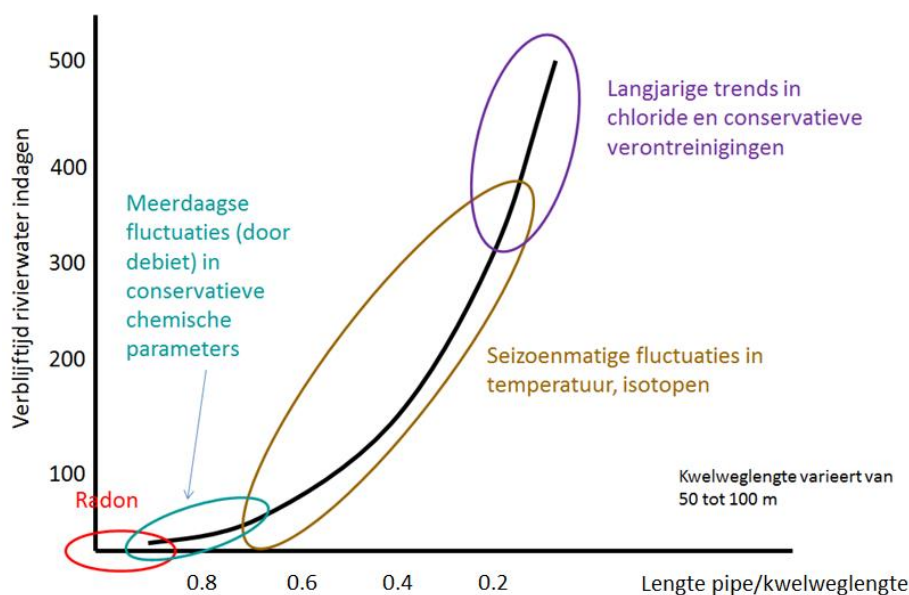
Resultaten Geochemie

6.1 Inleiding

Uit de metingen van hoofdstuk 5 is duidelijk geworden dat direct onder de deklaag ter plekke van de wel een holte lijkt te ontstaan. Maar nog niet duidelijk is waar het kwelwater exact vandaan komt, hoeveel en hoe groot en hoe lang de tunnelvormige holtes zijn die door piping gevormd worden en hoe snel het water uit de rivier de wel bereikt. Deze afmetingen, afstanden en stroomsnelheden zijn moeilijk meetbaar zonder de ondergrond en de dijk ter plaatse van de wel te verzwakken.

Analyses van hydrochemische parameters en isotopen van watermonsters kunnen hier in theorie uitkomst bieden. Mits de samenstelling van het water in de bron (de rivier) afwijkt van dat van het grondwater in het achterland. Voor een aantal parameters is dat hier het geval. Het water uit de grote rivieren in Nederland heeft een andere herkomst dan het ondiepe grondwater in de polder achter de dijk, dat een mengsel vormt van geïnfiltreerde neerslag en het diepere grondwater dat opkwelt in de laagliggende delen.

Bij de ontwikkeling van piping volgens de heersende ideeën zullen bij het groeien van een wel de debieten van de wel toenemen en de verblijftijden afnemen. De kortere verblijftijd kan dan leiden tot een in de tijd wijzigende, andere chemische samenstelling. Ook kan (vooral bij categorie 2) de samenstelling van het bemonsterde water een sterkere signatuur van het rivierwater laten zien, dit hoeft echter niet in alle gevallen aan de hand te zijn.



Figuur 46. Type analyse op basis van verblijftijd van het water in de grond versus de lengte van de pipe/kwelweglengte

De verblijftijden kunnen nader worden bepaald door de geochemische verandering van tracers in de wel te relateren aan die van de rivier. Hierbij gaat het om de verandering van stabiele isotopen (isotopen zijn atomen die extra neutronen in de kern kunnen

insluiten met een verhoogde massa als gevolg) en kationen (positieve ionen), anionen (negatieve ionen), waarbij een meerjarige, seizoenmatige of meerdaagse variatie kan optreden (zie Figuur 46).

Als er een pipe is

Tijdens het transport door de pipe treedt door dispersie en diffusie (wat resulteert in menging) op van het water in de pipe en het lokale ondiepe grondwater (de pipe fungeert als een drain). Wanneer de stroomsnelheid in de pipe lager is en de reisafstand groter is, zal meer menging optreden. Hierdoor is de signatuur van het bronwater (rivierwater) steeds moeilijker te detecteren in de afvoer van de wel.

Als de pipe zich heeft ontwikkeld en deze zich al redelijk dichtbij de rivier bevindt, worden de reistijden vanaf infiltratie tot pip korter. Omdat de stroming in een pipe hoog is, en deze geconcentreerd is in een stroombaan van beperkte omvang en de reisafstand van de bron naar de wel steeds korter wordt, zal de chemische en isotopensamenstelling van het water steeds meer overeenkomen met die van de bron (rivier). Dit betekent ook dat variatie in de samenstelling van het rivierwater, zoals ontstaan door seizoenale variatie in neerslag, verdamping, en bijvoorbeeld gesmolten sneeuw uit de Alpen, of door toevoeging van sporenelementen door industriële lozingen, wel tot variatie kan leiden in de samenstelling van het water dat uit de wel stroomt, maar niet in die van het ondiepe grondwater buiten het gebied van de wel, waar de lange reistijd en menging door diffusie en dispersie ervoor zorgen dat variaties gedempt worden.

Door het monitoren van veranderingen in de waterkwaliteit van een wel over een langere periode en dit te vergelijken met veranderingen in de waterkwaliteit van het rivierwater wat de bron moet vormen voor het water in de pipe kan derhalve een evaluatie gemaakt worden over de mate waarin de wel in ontwikkeling is. Met behulp van hydrochemische en isotopen analyses zijn de afkomst van het water en de reistijd door de bodem onderzocht.

Hiervoor zijn naast de reeds beschreven meetcampagne waarbij de EC, temperatuur en de druk in het grondwater continu werd gemonitord, tevens op strategische tijdstippen monsters genomen van het water uit de wellen en van het omliggende grondwater om verschillen te kunnen bepalen. Daarnaast zijn er isotopenmonsters genomen om de herkomst van het water te bepalen.

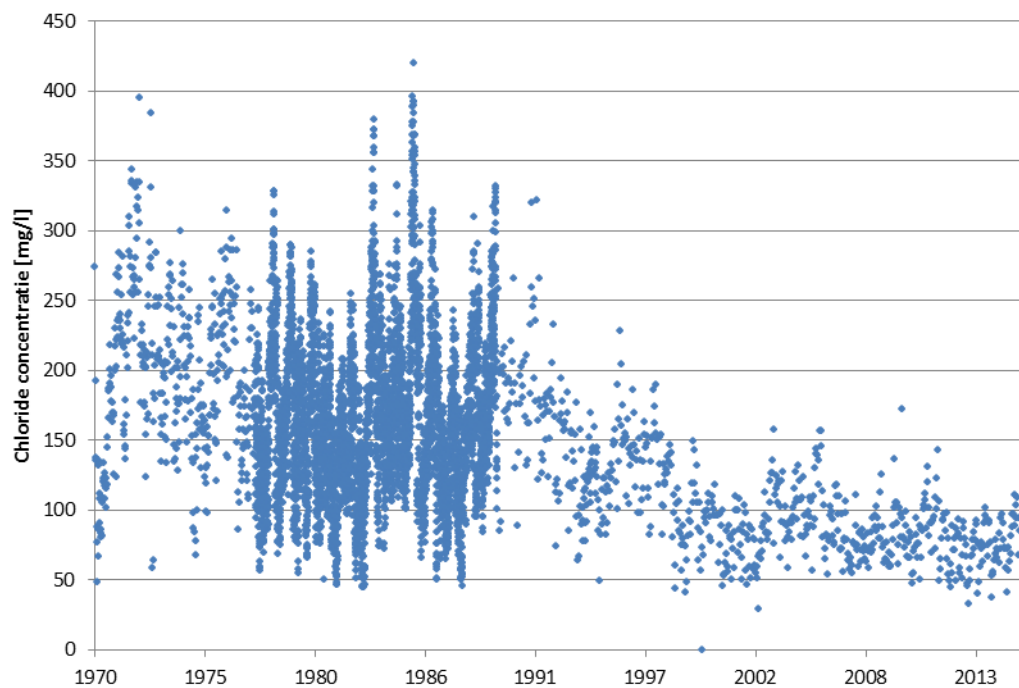
6.2 Basis situatie geochemie van verschillende watertypen

Bij een wel en de eventueel aanwezige pipe wordt water aangevoerd. Dit water kan afkomstig zijn van verschillende bronnen en heeft daardoor verschillende processen ondergaan. Dit maakt dat er onderscheid kan worden gemaakt in de verschillende soorten water: rivierwater, regenwater en grondwater. Elk hebben ze een andere samenstelling. Hierbij gaat het vooral om kationen, anionen en stabiele isotopen. De samenstelling van deze verschillende watertypes die een rol spelen tijdens pipevorming wordt in deze hoofdstuk beschreven als basis voor de herkomst en menging-analyse van het water in de wellen.

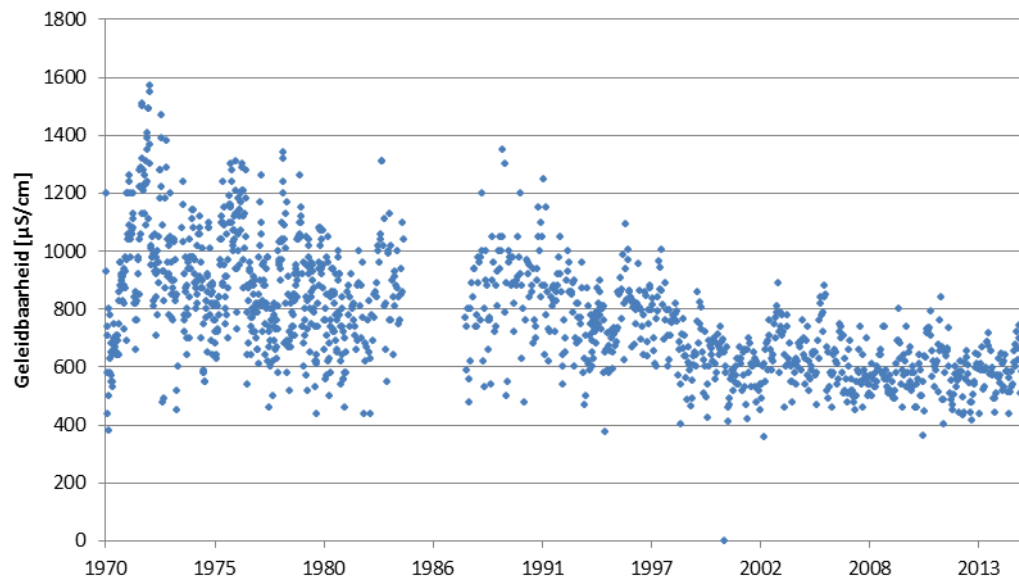
Variatie rivierwater

De chemische samenstelling van Rijnwater hangt af van de fracties regenwater, smeltwater en grondwater. Ook lozingen van industrie, mijnbouw en stedelijk gebied hebben invloed op de chemie van Rijnwater. Rijnwater in Rivierenland is zoet, maar de geleidbaarheid (EC-waarde) varieert met de afvoer. De dominante kation (positief geladen deeltjes) en anion (negatief geladen deeltjes) in Rijnwater zijn calcium en bicarbonaat als gevolg van calcië oplossingen vanuit bovenstroomse gebieden. De verhoogde chloride concentraties die in het Rijnwater aanwezig waren, waren het gevolg van zoutmijn lozingen in Frankrijk. Door milieuriichtlijnen zijn deze lozingen steeds verder beperkt, met een steeds lagere chloride concentratie tot gevolg. De chloride concentraties bereikten in de jaren 80 een gemiddelde concentratie van rond de 200

mg/l met maxima tot 400 mg/l (Figuur 47) en zijn sinds die tijd afgenomen tot onder de 100 mg/l. Chloride was hierbij de dominante factor, aangezien de daling van de chloride concentratie ook te zien is, in de daling van de EC-waarde van het rivierwater (Figuur 48).

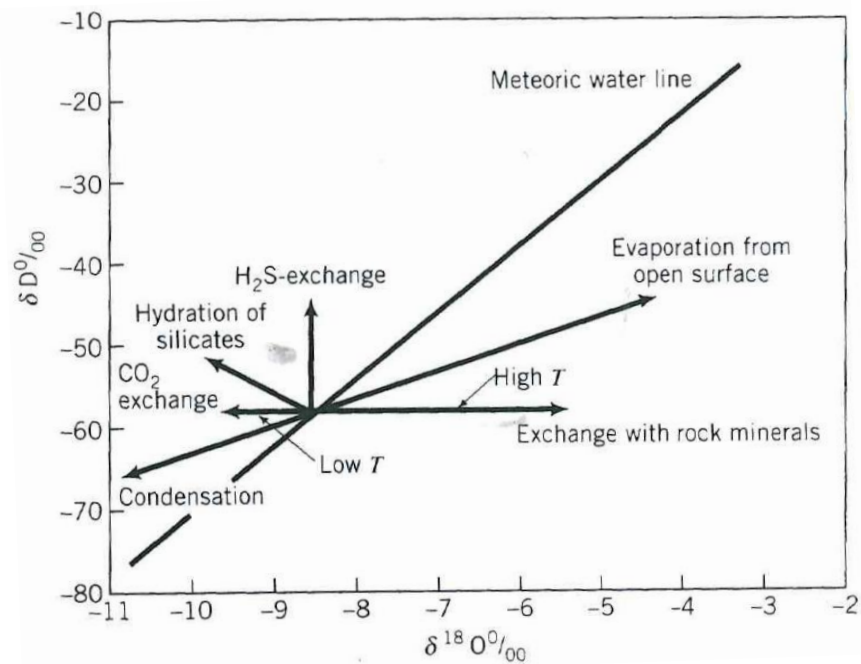


Figuur 47. Verloop van de chlorideconcentratie van het Rijnwater bij Lobith van 1970 tot 2015.



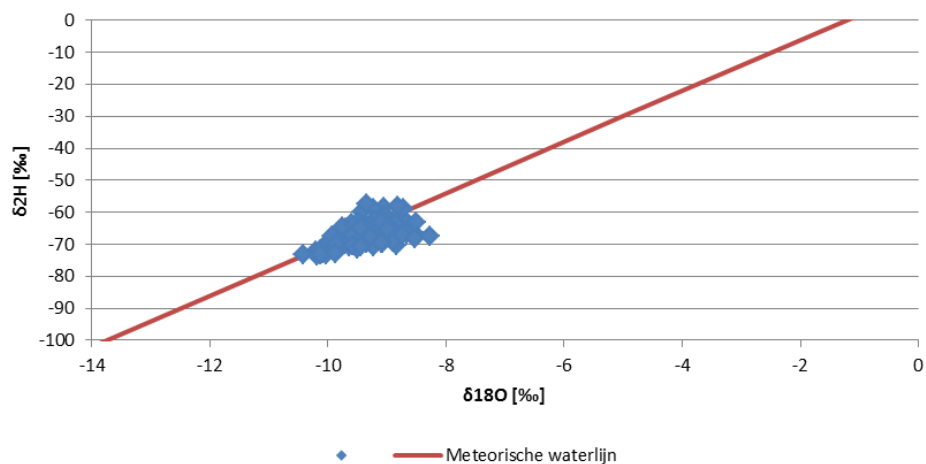
Figuur 48. Verloop van de geleidbaarheid van het Rijnwater bij Lobith van 1970 tot 2015.

Het verband tussen de isotopen Zuurstof-18 ($\delta^{18}\text{O}$) en Deuterium ($\delta^2\text{H}$) is redelijk lineair, zoals in Figuur 50 is weergegeven. Isotopen gehalten worden aangegeven in per-mille (‰) en zijn gemeten ten opzichte van Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW). Hoe negatiever de waarde hoe minder de zware isotopen $\delta^{18}\text{O}$ en $\delta^2\text{H}$ in het water zitten. De concentratie van beide isotopen varieert echter gedurende het jaar. Dit hangt af van de temperatuur bij verdamping en de herkomst van het water: regenwater aan de kust is zwaarder dan sneeuw in de bergen (zie Figuur 49).

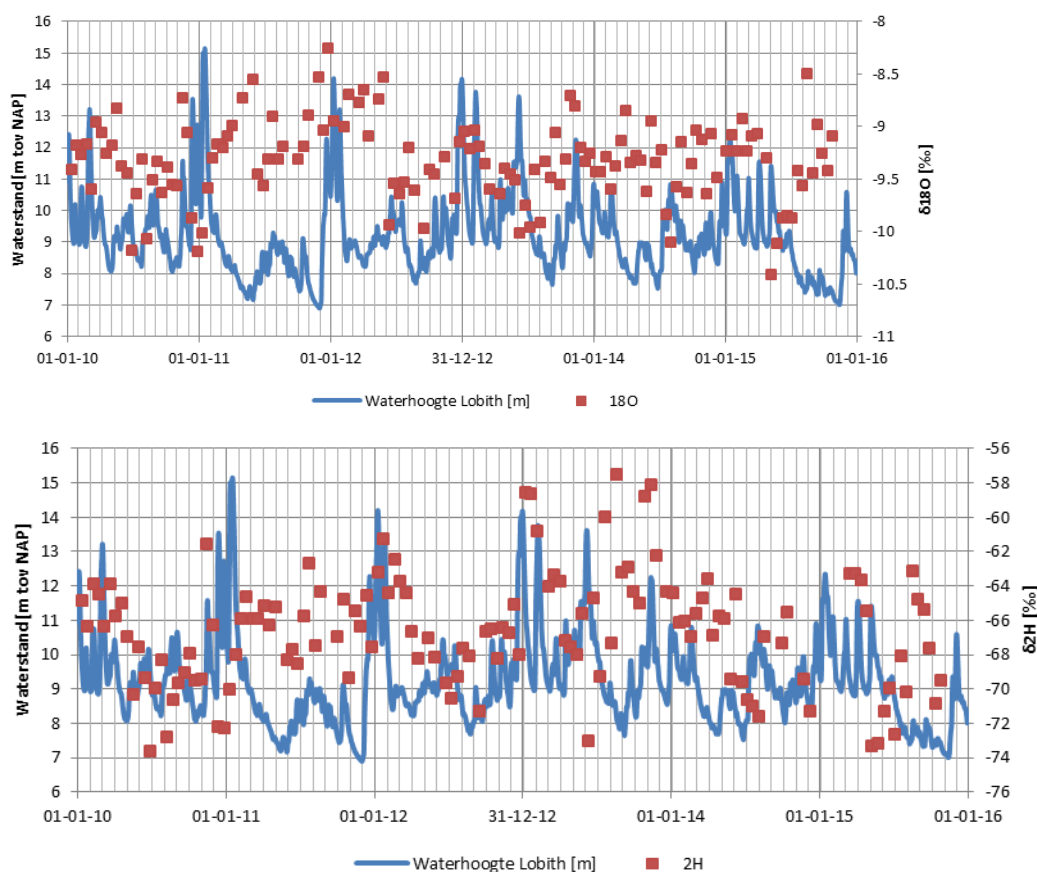


Figuur 49. Afwijking van isotopen samenstelling van de meteorische waterlijn als gevolg van verschillende processen (Schwartz 1998)

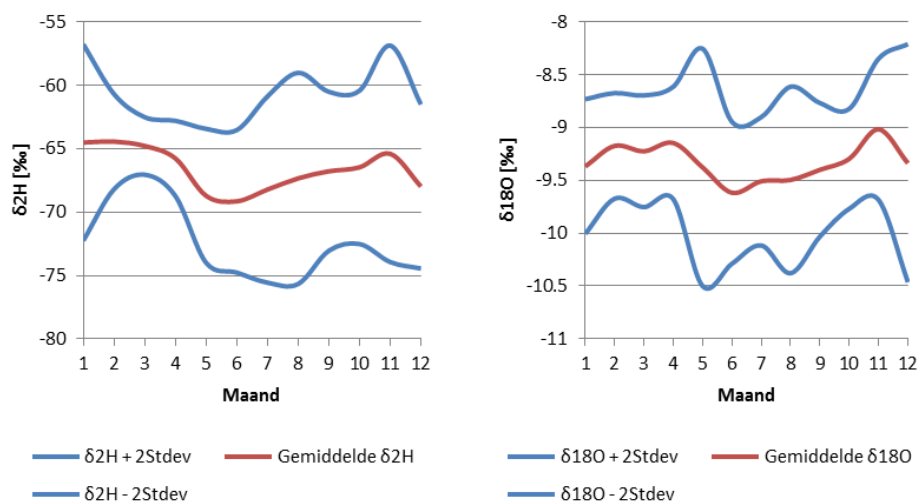
De variatie van de isotopen $\delta^{18}\text{O}$ en $\delta^2\text{H}$ in Rijnwater is weergegeven in Figuur 51. In Figuur 52 zijn de gemiddelde, $\delta^{18}\text{O}$ gehalten van Rijnwater per maand weergegeven. Tevens is hier het 95% percentiel in weergegeven. In deze figuur is een kleine seizoenale variatie te zien. Deze seizoenale variatie is echter zodanig beperkt dat hier weinig conclusies aan te verbinden zijn. Gemiddeld is Rijnwater ($\delta^{18}\text{O} = -9.5 \text{ ‰}$) lichter dan regenwater ($\delta^{18}\text{O} = -7.6 \text{ ‰}$) door de smeltwater component van de rivier en het regenwater afkomstig uit gebieden meer landinwaarts (Mendizabal & Stuyfzand, 2009).



Figuur 50. Verband tussen $\delta^{18}\text{O}$ en $\delta^2\text{H}$ met bijbehorende neerslag lijn voor de Rijn op basis van gegevens van 1 januari 2010 tot 1 januari 2016; linksonder is licht water, rechtsboven is zwaar water



Figuur 51. Variatie van de $\delta^{18}\text{O}$ en $\delta^2\text{H}$ in de Rijn bij Lobith tussen 1 januari 2010 en 1 januari 2016

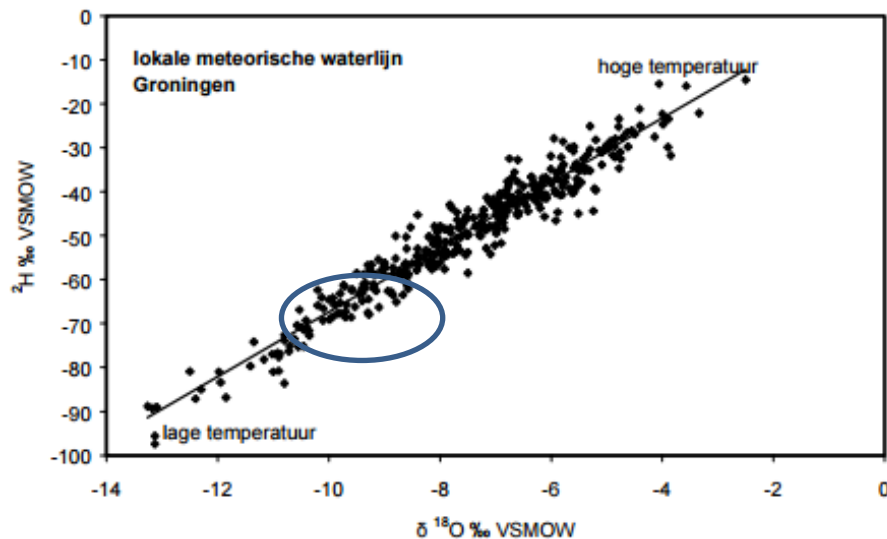


Figuur 52. Gemiddelde seizoensvariatie van de $\delta^2\text{H}$ (links) en $\delta^{18}\text{O}$ (rechts) en het 95% percentiel van de gemeten $\delta^2\text{H}$ en $\delta^{18}\text{O}$ in de Rijn bij Lobith op basis van metingen tussen 1 januari 2010 en 1 januari 2016

Variatie regenwater

Regenwater heeft een lage EC en een lage concentratie chemische stoffen: Tijdens transport over landmassa's nemen de wolken stoffen en gassen op van natuurlijke en industriële oorsprong. Hoe meer landinwaarts hoe meer Ca en minder Cl wordt opgenomen. Dit zijn echter lage concentraties en deze leveren maar een kleine verhoging van de EC op. Verder heeft regen die van de zee afkomstig is aan de kust relatief hoge gehalten van de isotopen $\delta^{18}\text{O}$ en $\delta^2\text{H}$ (zware isotopen). Hoe verder landinwaarts, hoe minder zware isotopen aanwezig zijn in de regen. Dit komt doordat de zware isotopen sneller uitregenen. Tevens is de neerslag bij hoge temperatuur

zwaarder dan bij lage temperatuur. Ter illustratie hoe de isotopen variatie in regenwater is in vergelijking met het Rijnwater is de isotopen van neerslagwater in Groningen (Isotopen gegevens zijn zeer beperkt beschikbaar) is weergegeven in Figuur 53. Ter indicatie is in deze figuur de orde grootte aangegeven voor de Rijnwater isotopen gehalten. Te zien is dat de neerslag een veel grotere variatie heeft dan het Rijnwater. In de grond en in de rivier mengt het regenwater van verschillende momenten met elkaar waardoor de bandbreedte van de rivier een stuk kleiner is dan van de regen.



Figuur 53. Verband tussen $\delta^{18}\text{O}$ en $\delta^2\text{H}$ met bijbehorende neerslag lijn, de blauwe cirkel geeft de orde grootte van de meetwaarden van de Rijn weer (bron Jonker 2001)

Variatie grondwater

Grondwater wordt gevoed door zowel regen als rivierwater. Daar waar alleen rivierwater infiltreert, zal de concentratie van conservatieve stoffen en isotopen gehalte grotendeels overeenkomen met de bandbreedte van deze stoffen in het rivierwater. Daar waar regenwater infiltreert zal de concentratie van bepaalde stoffen, zoals chloride laag zijn. Ook kan er een mix optreden van geïnfilteerd rivier- en regenwater. In het grondwater vinden chemische reacties plaats die de chemie van het oorspronkelijk geïnfilteerde water kunnen veranderen. Dit komt voornamelijk door oplossing, redoxreacties en kation uitwisseling. Bij oplossing zijn vooral de ionen Ca^{2+} en HCO_3^- verhoogd door de oplossing van calciet. Daarnaast worden HCO_3^- concentraties ook verhoogd door de afbraak van organisch materiaal, die resulteert in CO_2 productie waarmee carbonaat en silicaatmineralen opgelost worden.

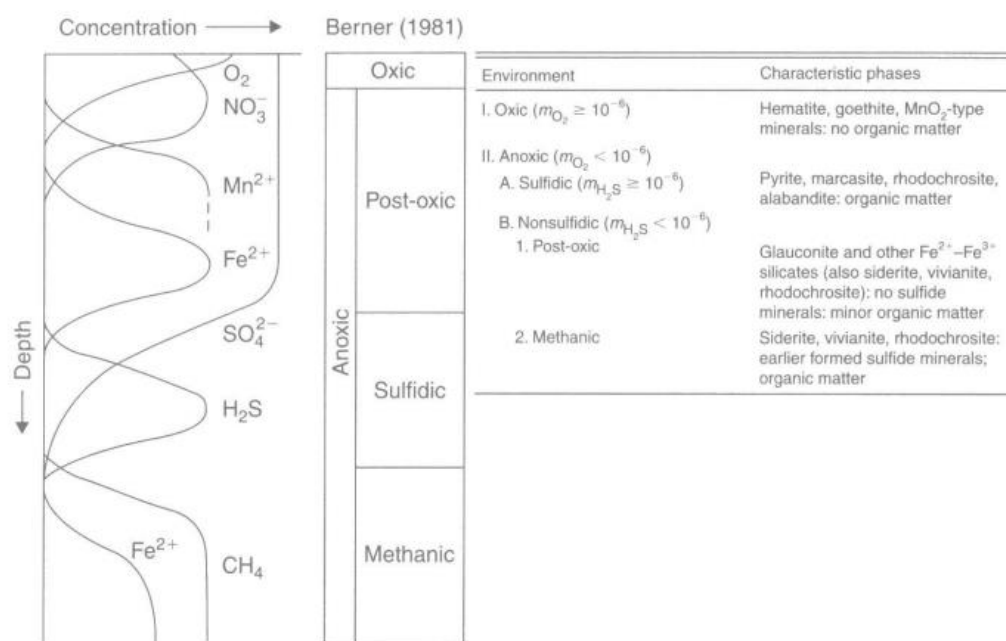
Hoe de chemie verandert door redoxreacties hangt af van de redox zone waarin het water zich bevindt. Hoe langer de verblijftijd en hoe dieper in de watervoerende laag, hoe minder zuurstof er in het water en de bodem zit, het water wordt daarmee steeds meer anoxisch. De volgorde waarop de zuurstof wordt gereduceerd (redox sequentie) is weergegeven in Figuur 54.

Kation uitwisseling vindt met name plaats op plekken waar zoet door zout water wordt vervangen of vice versa. De uitwisseling vindt dan plaats met materiaal met een hoge kation uitwisseling capaciteit, zoals klei en organisch materiaal. Dit is niet van toepassing op de ondiepe watervoerende lagen van het rivierengebied.

De variatie van de water isotopen gehalten van lokaal grondwater, wat gevoed wordt door regenwater, is veel kleiner dan de variatie van water isotopen van regenwater of van rivierwater. Grondwater gevoed door regenwater heeft in Nederland een gemiddeld $\delta^{18}\text{O}$ gehalte van -7.6 ‰ (Mook, 2000).

Onder natuurlijke omstandigheden zal chloride door atmosferische depositie een concentratie van 14 mg/l in het grondwater veroorzaken (Reijnders et al., 2004). Andere

factoren die EC in het grondwater kunnen verhogen, zijn kunstmest en beregening in landbouwgebieden.



Figuur 54. Links: Redox sequentie met de diepte. Rechts: Berner's Redox (1981) classificatie (bron Appelo & Postma, 2005)

6.3 Resultaten geochemie en isotopen

In de volgende onderdelen worden drie zoektochten beschreven naar een geschikte tracer. De eerste benadering is om de herkomst van het water door de hoofdionen- en isotopenratio's te bepalen. In principe heeft het rivierwater een andere signatuur dan het grondwater wat betreft samenstelling van ionen en isotopen. De resultaten van de wateranalyses in de rivier, grondwater en wellen worden vergeleken om onderscheid te kunnen maken en conclusies wat betreft pipe-ontwikkeling te kunnen trekken. Daarnaast is gekeken welke stoffen zodanig vaak in de rivier worden gemeten, dat deze als tracer kunnen dienen (hoofdstuk 6.4). Daarna wordt de redox status van het water vergeleken met het rivierwater en wordt gebruikt om de reistijd door de bodem te kunnen bepalen (hoofdstuk 6.5).

6.3.1 Metingen bij alle 11 wellen

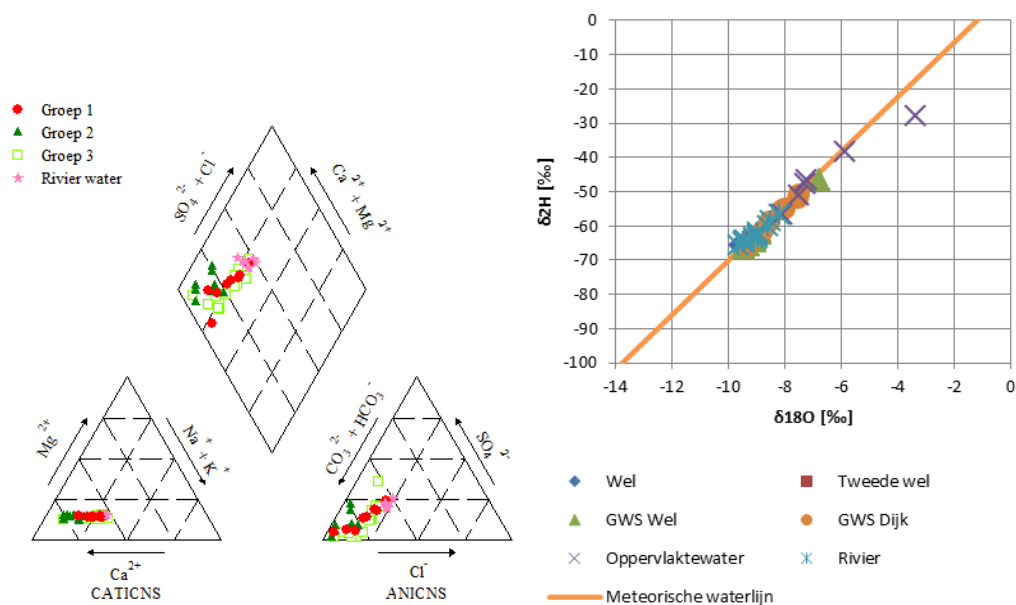
Gedurende het project zijn er 3 meetrondes uitgevoerd; in januari 2016, maart 2016 en in mei 2017. In totaal zijn er 6 verschillende soorten plekken waar monsters zijn genomen, afhankelijk van hoe de locatie eruitziet zijn meerdere van deze 6 plekken bemonsterd:

- Het grondwater uit de wel zelf;
- Het grondwater bij de wel uit een peilbuis;
- Het grondwater bij de dijk uit een peilbuis;
- Het rivierwater;
- Het eventuele aanwezige sloot water; en
- Een eventueel aanwezige tweede wel.

In Bijlage 17 zijn de resultaten van de chemische analyses opgenomen en zijn voor elke meetlocatie de concentraties van opgeloste stoffen weergegeven. De wellocatie is aangegeven met een nummer per locatie (1 t/m 11) en het type water met een letter (a t/m f).

EC-waarden van de watermonsters liggen tussen de 437 en 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en pH-waarden liggen tussen de 7.07 en 8.20. Op alle locaties komt dus zoet water voor dat neutraal tot licht basisch is. Alle meetlocaties vallen in het watertype waarbij calcium en bicarbonaat de dominante kation en anion zijn. De rivier monsters hebben een nitraat concentratie tussen de 10.7 en 14.2 mg/l. De grondwater- en welmonsters bevatten vrijwel geen nitraat.

Hieruit kan worden afgeleid dat het grondwater anoxisch is: zuurstof en nitraat zijn gereduceerd van rivier naar wel toe. Verder zijn mangaan en ijzer concentraties in grond- en welwater verhoogd ten opzichte van rivierwater. Dit geeft aan dat mangaan en ijzer worden gereduceerd en in oplossing gaan. Aan deze redoxreacties is lastig een verblijftijd van het grondwater te koppelen omdat de snelheid van deze reacties van heel veel factoren afhankelijk zijn. Toch zijn deze observaties een indicatie voor dat het water niet heel jong meer is, wat overeenkomt met de verwachte reistijden uit de geohydrologische modellen (zie hiervoor hoofdstuk 7).

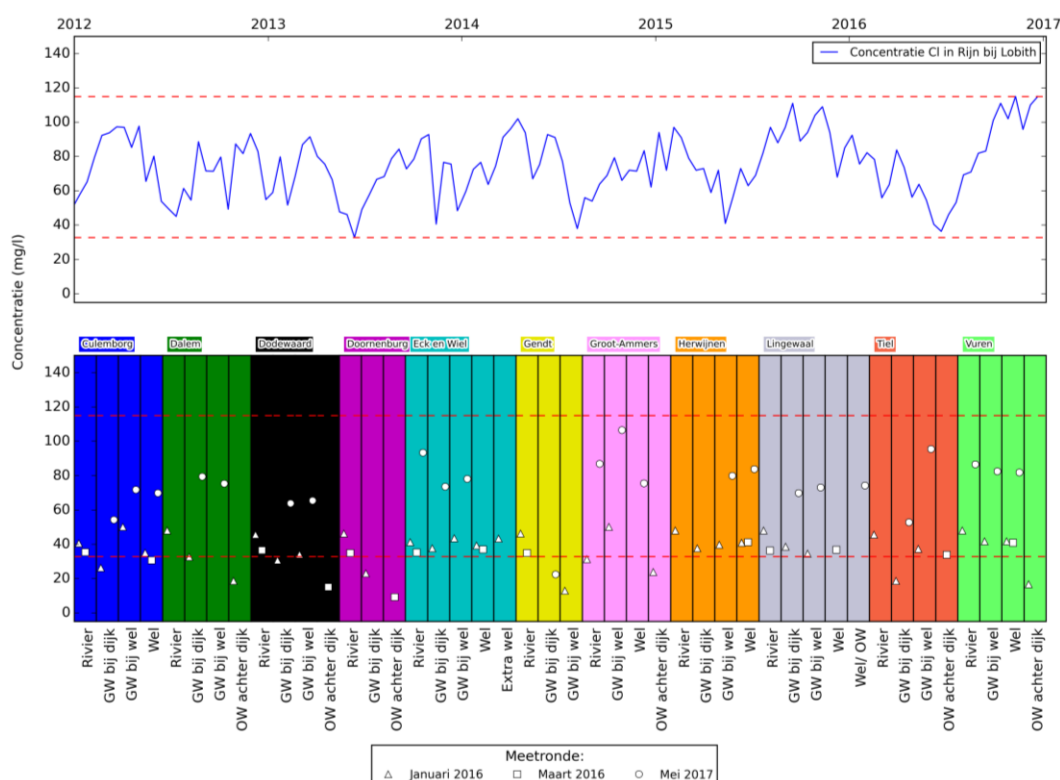


Figuur 55. Resultaten van de watermonsters van januari en maart 2016 van alle 11 de wellen. Links de resultaten van de kat- en anionen in een piperplot gecategoriseerd in de 3 categorieën, rechts de resultaten van de isotopen

De resultaten van alle watermonsters zijn weergegeven in Figuur 55. In de linker figuur zijn de resultaten van de kat- en anionen weergegeven, gecategoriseerd volgens de drie categorieën wellen. Hierbij komt de rivier als een cluster naar voren. Verder is te zien dat de categorieën 1 en 3 een relatief brede spreiding van de resultaten heeft, terwijl categorie 2 zich meer in een beperkte hoek van de grafieken bevindt. Dit komt overeen met de verwachtingen op basis van de categorisering: de bredere spreiding van de resultaten van categorieën 1 en 3 duidt op een menging van geïnfiltreerd rivierwater en geïnfiltreerd regenwater terwijl de beperkte hoek waarin categorie 2 zich bevindt zijn vooral regen gevoede locaties. Dit is te zien in de relatieve lage Ca, Cl en SO_4 concentraties in vergelijking met die van het rivierwater.

De chloride concentraties gemeten in het grondwater bij de dijk, het grondwater bij de wel en in de wel van de 11 locaties (Figuur 56) volgen redelijk de trend van de rivierwater concentratie (waterbase). Uitzonderingen hierop zijn de locaties waar regenwater aanwezig is: in oppervlaktewater en daar waar inzijging plaats vindt van regenwater (categorie 2 gebieden en in peilbuizen bij de teen van de dijk). Doordat er zich geen significant hoogwater heeft voorgedaan, is dit geïnfiltreerde neerslag water

niet omhoog gekweld en vervangen door rivierwater (wat zich waarschijnlijk wel op grotere diepte bevindt).



Figuur 56. Chloride concentraties gemeten in de Rijn (bron: Waterbase) en bij de 11 gekozen raaien (per locatie meerdere monsters werden genomen van de rivier, het grondwater bij de dijk, het grondwater bij de wel en van de wel).

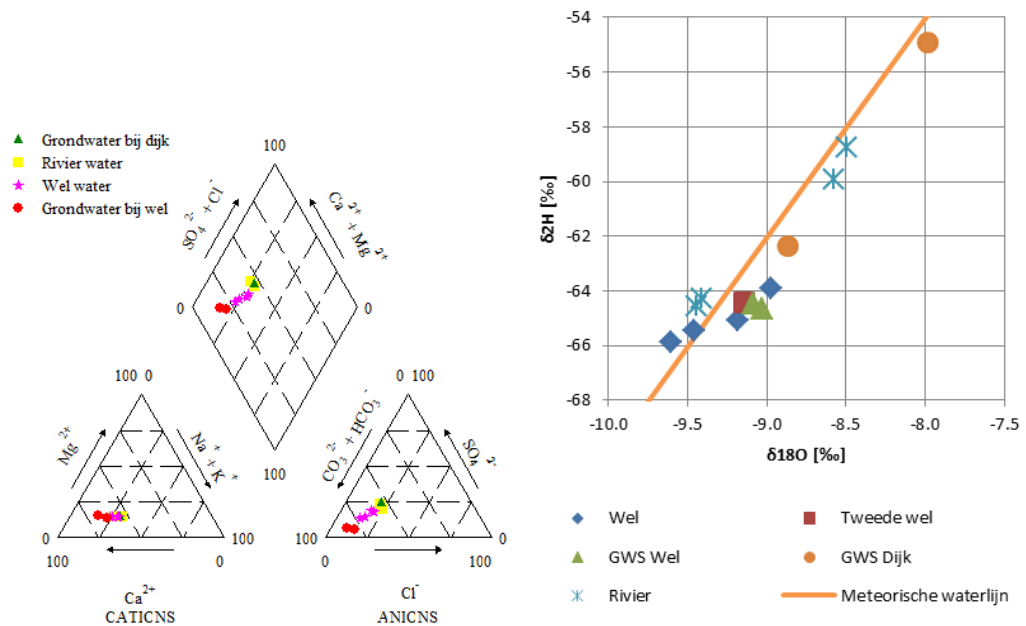
De resultaten van de isotopen zijn ook weergegeven (Figuur 55, rechts). De resultaten liggen allemaal goed op de meteorische waterlijn. Zoals te verwachten was op basis van Figuur 53 bevinden de resultaten van de rivier zich tussen de $\delta^2\text{H}$ gehalten van -75 tot -55‰. Het water van de andere monsternamelocaties heeft een veel bredere spreiding.

Categorie 1, Culemborg en Eck en Wiel

Bij categorie 1 zijn beide gemonitorde wellen vrijwel het gehele jaar actief, deze wellen zijn bemonsterd. Daarnaast is een monster genomen van een tweede wel bij Eck en Wiel. Bij de watermonsters van categorie 1 geven vooral de kat- en anionen inzicht in het functioneren van het geochemische systeem. De linker grafiek in Figuur 57 laat zien dat de verdeling van de kat- en anionen van de verschillende watertypen duidelijk geclusterd lijken te zijn. In het rivierwater is de chlorideconcentratie het hoogst, het welwater en grondwater bij de wel heeft ook een redelijk hoge chloride concentratie, en het grondwater bij de dijk heeft een lage chloride concentratie. De Ca^{2+} en HCO_3^- concentraties zijn juist het laagst in het rivierwater, iets hoger in het wel water en grondwater bij de wel en het hoogst in het grondwater bij de dijk.

De isotopen compositie van het rivierwater is anders tijdens de twee monsternames. Bij de eerste monsternamen zijn de waarden hoger dan bij de tweede monsternamen. De isotopen waarden van het grondwater bij de wel en de wel zijn bij beide monsternames laag en liggen rond het gemiddelde voor Rijnwater. De grondwater isotopen composities bij de dijk zijn zwaarder. De lagere chloride concentraties en hogere isotopen waarden van het grondwater bij de dijk duiden erop dat dit water meer een regen signatuur heeft dan het welwater en het grondwater bij de wel. Dit betekent dat er regenwater infiltreert, en door de deklaag naar de watervoerende laag stroomt. Bij Culemborg kan water in de uiterwaarden infiltreren. Bij Eck en Wiel is de overdruk in het achterland iets minder en kan water waarschijnlijk in de dijk en bij de teen van de dijk infiltreren. Dit water

stroomt ondiep in de watervoerende laag en wordt daarom bij de peilbuis bij de dijk teruggevonden. De wel lijkt gevoed te worden door dieper grondwater waarbij een groter deel van het water van de rivier afkomstig is.



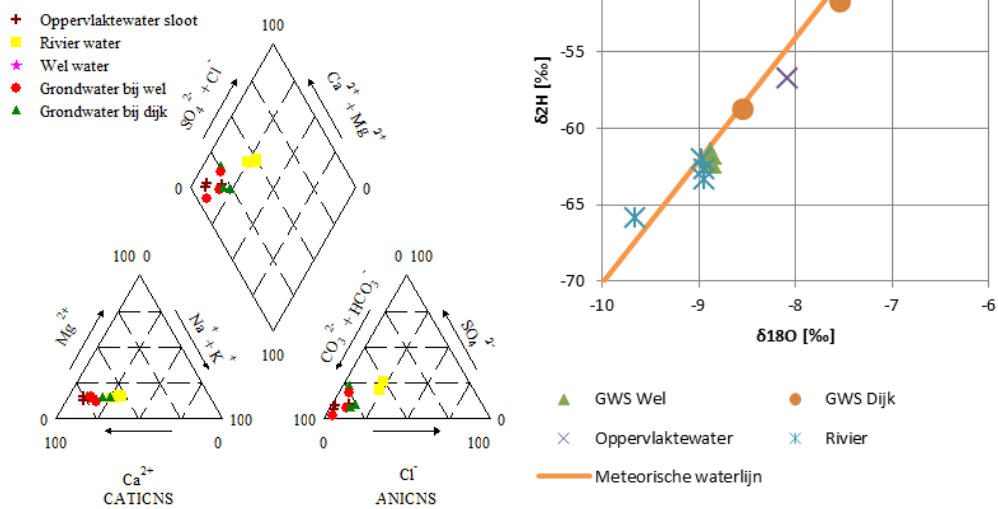
Figuur 57. Resultaten van de watermonsters van januari en maart 2016 van Culemborg en Eck en Wiel. Links de resultaten van de kat- en anionen in een piperplot, rechts de resultaten van de isotopen

Categorie 2: Doornenburg, Gendt, Dodewaard en Tiel

Op de locaties binnen categorie 2 zijn nog geen wellen waargenomen. Hier zijn daarom ook geen monsters van wel water genomen. Wel zijn er monsters genomen van de sloten bij de locaties van mogelijke wellen. Al deze sloten waren als gevolg van het hoogwater en neerslag volledig gevuld.

De resultaten van de analyses van de watermonsters zijn weergegeven in Figuur 58. De resultaten van de kat- en anionen (de linker van de 2 figuren) laten duidelijk zien dat het rivierwater een heel eigen signatuur heeft, terwijl grond- en oppervlaktewater een andere signatuur heeft. Opnieuw zijn de chloride, Ca^{2+} en HCO_3^- concentraties hierbij kenmerkend, het water van de Waal bevat redelijk duidelijk meer chloride en minder HCO_3^- en Ca^{2+} , terwijl het grondwater en oppervlaktewater veel minder chloride en meer HCO_3^- en Ca^{2+} bevat. De isotopen waarden voor rivier- en grondwater bij de wel locaties Dodewaard en Tiel zijn relatief laag en deze lijken een rivier signatuur te hebben. Het grondwater bij de dijk bij Dodewaard ligt heeft iets hogere isotopen gehalten dan het grondwater bij de wel. Het grondwater bij de wel bij Gendt heeft een zeer lage Cl concentratie en hoge isotopen gehalten. Dit grondwater heeft in tegenstelling tot het grondwater bij de wel bij andere locaties een sterke regen signatuur. Dit komt doordat de peilbuis bij de wel hier dicht bij de dijk ligt en het maaiveld hier hoog ligt. Ook het grondwater bij de dijk bij Doornenburg heeft een regen signatuur. De isotopen compositie van het rivierwater is anders tijdens de twee monsternames. Bij de eerste monsternamen zijn de waarden hoger dan bij de tweede monsternamen. Ook de EC is lager bij de tweede monsternamen tijdens de piek in de rivier.

Al deze gegevens duiden erop dat het grondwater bij Tiel, Dodewaard en Doornenburg (en in beperkte mate bij Gendt) bestaat uit een mengsel van geïnfilteerd regenwater en rivierwater. De verschillen in kat- en anionen duiden op een infiltratie van regenwater, waarbij andere stoffen zijn meegenomen. Dit is goed verklaarbaar, aangezien bij laagwater er sprake is van een inzijgings situatie de rivier draineert en er een infiltratie situatie is. Tijdens hoogwater verandert deze situatie in een kwelsituatie. In deze situatie kwelt gemengd regen en rivierwater op aan de oppervlakte.

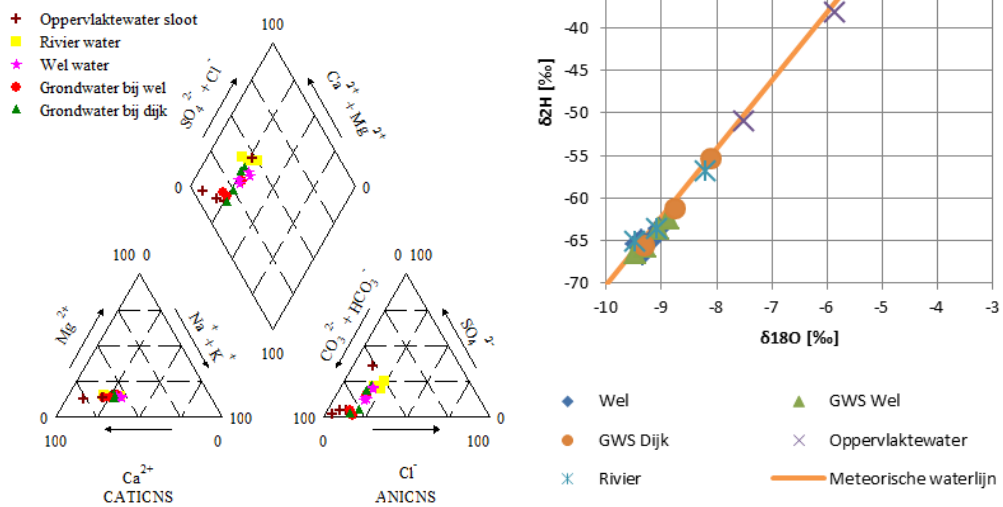


Figuur 58. Resultaten van de watermonsters van januari en maart 2016 van Doornenburg, Gendt, Dodewaard en Tiel. Links de resultaten van de kat- en anionen in een piperplot, rechts de resultaten van de isotopen

Categorie 3: Lingewaal, Herwijnen, Vuren, Dalem en Groot Ammers

De resultaten van de analyses van de watermonsters van categorie 3 zijn weergegeven in Figuur 59. Binnen deze categorie schommelt het gemiddeld waterpeil om het niveau van het maaiveld achter de dijk, en staat het soms zelfs net boven het maaiveld. Van de 5 locaties waar monitoring plaatsvindt zijn op 4 locaties wellen actief. Ook bij deze categorie is de chloride concentratie in de rivier het hoogst, het welwater en grondwater bij de wel heeft ook een redelijk hoge chloride concentratie. Het grondwater bij de dijk heeft ditmaal chloride concentraties vergelijkbaar met het grondwater bij de wel. De Ca^{2+} en HCO_3^- concentraties zijn juist het laagst in het rivierwater, iets hoger in het wel water en grondwater bij de wel en het hoogst in het grondwater bij de dijk.

De isotopen compositie van het rivierwater is anders tijdens de twee monsternames. Bij de eerste monsternamen zijn de gehalten hoger dan bij de tweede monsternamen. De isotopen waarden van het grondwater bij de wel en de wel zijn bij beide monsternamen laag en liggen rond het gemiddelde voor Rijnwater. De lage isotopen gehalten van het grondwater bij de dijk bij Dalem indiceren dat het grondwater amper bijgemengd is met regenwater. Dit komt doordat het maaiveld en het sloot peil bij deze peilbuis lager liggen dan de stijghoogte in de watervoerende laag en dat er dus een opwaartse kwel flux van rivierwater plaatsvindt. Daarnaast is de deklaag bij Dalem meer dan 8 m, waardoor regenwater moeilijk kan infiltreren tot het watervoerend pakket. Bij het grondwater bij de dijk bij Herwijnen lijkt er iets bijmenging te zijn van regenwater en bij het grondwater bij de dijk bij Lingewaal nog meer.



Figuur 59. Resultaten van de watermonsters van januari en maart 2016 van Lingewaal, Herwijnen, Vuren, Dalem en Groot Ammers. Links de resultaten van de kat- en anionen in een piperplot, rechts de resultaten van de isotopen

Conclusies

De resultaten van de watermonsters geven inzicht in het functioneren van het grondwatersysteem. Het grondwater bij de wel en het wel water lijken redelijk op elkaar. Het wel en grondwater bij de wel hebben doorgaans een Rivierwater signatuur met wellicht wat bijmenging van lokaal regen gevoed grondwater. Dit is af te leiden uit de conservatieve tracers chloride, deuterium en zuurstof-18. Het grondwater bij de wel en het wel water bevatten Zuurstof-18 en Deuterium gehalten die overeenkomen met de gemiddelde isotopen signatuur van Rijnwater. De chloride concentraties zijn vaak wat hoger zoals dat ook het geval is in Rivierwater.

Het grondwater bij de dijk heeft doorgaans meer een regensignatuur. Dat het water bij de dijk meer een regensignatuur en het water verder in de polder meer een rivierwater signatuur heeft kan als volgt worden verklaard: Bij de meeste uiterwaarden ligt het maaiveld hoger dan de gemiddelde rivierwaterstand. Ook het eerste deel van de polder ligt vaak hoger dan de gemiddelde rivierstand. Op deze plakken kan regenwater infiltreren. Door het verhoogde maaiveld en afwezigheid van drainage op deze plakken zal hier een neerwaartse kwel flux van geïnfilteerd regenwater door de deklaag heen plaatsvinden. In de watervoerende laag is de flux richting de polder naar het maaiveld. Direct achter het hoger gelegen gebied zal eerst het regenwater opkwellen. Iets verderop in de polder zal door drainage en de wel het rivierwater opkwellen. Dit water stroomt dieper onder maaiveld door de watervoerende laag.

Bij de wel categorieën 1 en 3, waar sprake is van een permanente overdruk vanuit de rivier, is de driedeling in waterkwaliteit te maken:

- tussen rivierwater;
- grondwater bij de dijk;
- grondwater bij de wel en welwater;

Bij categorie 2 is de rivier bij normaal peil drainerend en heeft het grondwater over het algemeen iets meer bijmenging van regen. Het geïnfiltreerde rivier en regenwater is bij alle locaties veranderd door chemische reacties in de ondergrond. Processen die hebben plaatsgevonden zijn: oplossing van calciet en reductie van zuurstof, nitraat en ijzer- en mangaanoxides.

Het trekken van conclusies over de verblijftijd van het water is lastig te bepalen op basis van de chemische monsters die op elke locatie zijn genomen. De conservatieve tracers geven een duidelijk beeld over de herkomst maar het is lastig dit te plaatsen in de tijd. Dit komt doordat de tracers van Rijnwater erg variabel zijn met de tijd en er op dit moment maar op twee punten in de tijd een chemische analyse is gedaan van welwater. Het welwater is daarbij wellicht een mix van verschillende verblijftijden en eventueel voor een klein deel bijgemengd met regenwater. Toch is opvallend dat welwater tijdens de monsternames in januari en maart 2016 een vergelijkbare isotopen en chemische samenstelling heeft. Dit terwijl de EC-waarden van de rivier tijdens de tweede monsternamen waren gedaald en ook isotopen gehalten lager waren.

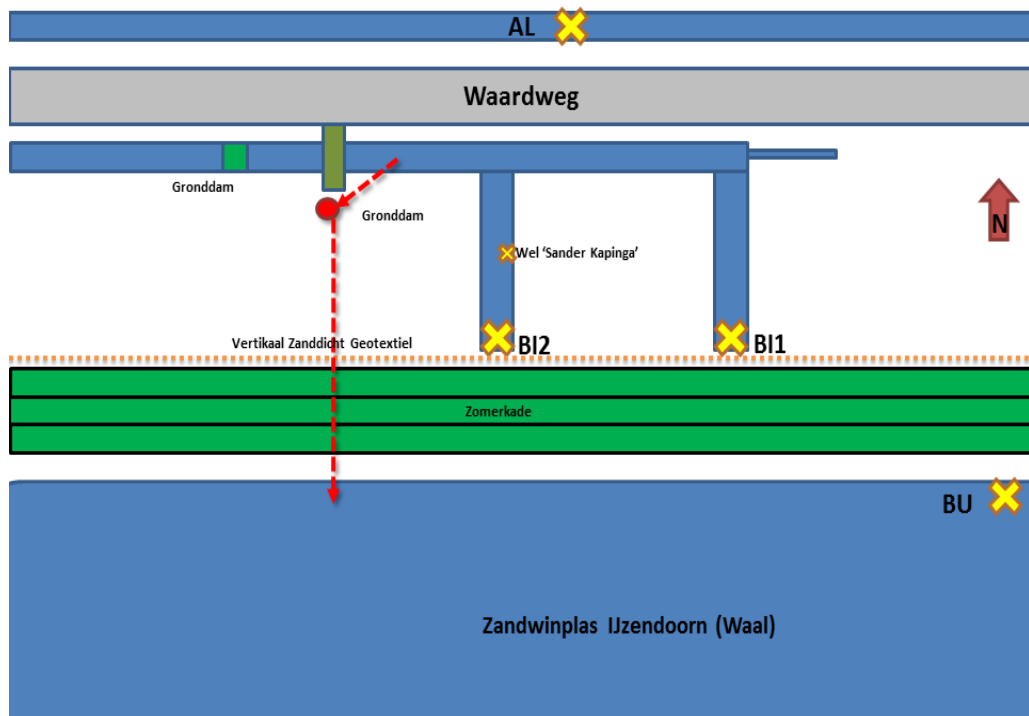
Samenvattend: Het welwater van de meeste locaties bestaat voornamelijk uit rivierwater. Het rivierwater is tijdens transport naar de wel veranderd door redoxreacties en oplossing. Het welwater heeft op de twee monsternames in de tijd een vergelijkbare chemische en isotopen samenstelling. In de chemische samenstelling en isotopen gehalten van het rivierwater zijn daarentegen veel grotere veranderingen te zien tussen de twee monsternames. De onveranderde wel chemie in de tijd en het door chemische reacties veranderde Rijnwater tijdens transport richting de wel zijn wellicht indicaties dat de wellen op de momenten van monsternamen niet in een dergelijke directe verbinding staan met de rivier. Echter kunnen er geen conclusies worden getrokken over orde van grootte van verblijftijden.

6.3.2

Willemspolder

Inleiding

In het kader van een POV-piping studie naar het verticaal Zanddicht Geotextiel is een proeflocatie ingericht bij de Willemspolder langs de Waal, ten zuiden van het dorp IJzendoorn, tussen Tiel en Dodewaard. Het Verticaal Zanddicht Geotextiel is aangebracht langs een zomerkade in de uiterwaard. Om de kans op wellen te vergroten, zijn een aantal kopsloten gegraven haaks op het textiel. In juni 2016 hebben twee beperkte hoogwaters kort op elkaar plaatsgevonden waarbij ook wellen zijn geforceerd. Deze wellen zijn bemonsterd door Acacia Water in samenwerking met Waterschap Rivierenland naast de 11 wellen die beschreven zijn in dit rapport.



Figuur 60. Schematische weergave van de proeflocatie in de Willemspolder. De zomerkade in de uiterwaarde (groen) ligt direct langs een zandwinplas die in verbinding staat met de Waal. Om het verhang groter te maken zijn twee kopsloten gegraven dwars op de zomerkade. De kopsloten zijn met elkaar in verbinding via een parallelsloot ten zuiden van de Waardweg. Al deze sloten zijn in het kader van deze proef gegraven. De wel die geanalyseerd is in deze studie is aangeduid met de code BI1 en wordt hierna aangeduid met "Wel groot".

Als gekeken wordt naar de 3 benoemde categorieën, dan ligt deze locatie in categorie 2: door variatie van het waterniveau in de rivier in er gedurende een deel van het jaar sprake van inzijging van neerslag en gedeelte van het jaar sprake van kwel vanuit de ondergrond en vanuit de rivier

Meetmethode

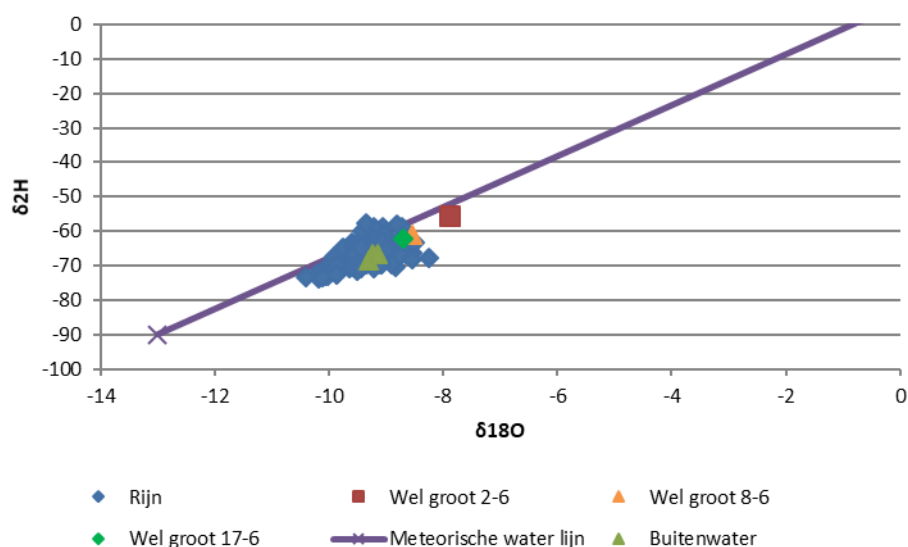
De wellen zijn bemonsterd op dezelfde manier als de wellen in de andere periode. 2 maal per dag zijn monsters genomen. Achteraf zijn hiervan de meest belangrijke situaties geselecteerd. Deze monsters zijn vervolgens geanalyseerd.

Resultaten chemie

De resultaten van de watermonsters die zijn geanalyseerd op chemische parameters en op isotopen. De belangrijkste resultaten van de chemie zijn weergegeven in Tabel 8, de resultaten van de isotopen in Figuur 61.

Isotopen

De resultaten van de isotopen laten een duidelijke verschuiving gedurende de 14 dagen zien van de meer regenwater ($\delta^{18}\text{O} = -7.96\%$), naar meer rivierwater ($\delta^{18}\text{O} = -8,7\%$). Hierbij wordt opgemerkt dat regenwater een gemiddelde waarde heeft van $\delta^{18}\text{O} = -7.6\%$, terwijl Rijnwater een gemiddelde heeft van $\delta^{18}\text{O} = -9.5\%$. Dit is in lijn met de verwachting op basis van de indeling in categorie 2: de bovenlaag van het grondwater bestaat waarschijnlijk meer uit geïnfiltrerd regenwater, terwijl de laag eronder bestaat uit geïnfiltrerd rivierwater. Door het hoogwater en het actief zijn van de wel, wordt eerst het bovenste water, voornamelijk regenwater, onttrokken. Daarna wordt water vanuit diepere lagen aangetrokken en wordt daardoor meer rivierwater aangetroffen.



Figuur 61. Resultaten van de analyse van de watermonsters van de wel en het buitenwater op isotoopenverhouding vergeleken met de meteorische waterlijn en de isotoopenverhouding van de Rijn.

Chemie

De resultaten van de chemie laten een aantal dingen zien die aansluiten bij de resultaten van de isotopen. De chloride concentratie is in het begin relatief laag (onderkant van de bandbreedte van de Rijn) en schuift gedurende de 2 weken op richting de gemiddelde concentratie in de Rijn van rond de 75 mg/l. Dit duidt op een verschuiving van meer regenwater naar meer rivierwater.

In de monsters wordt nitraat teruggevonden, wat betekent dat het uitstromende grondwater niet volledig gereduceerd is, wel is de concentratie lager dan in de rivier. De concentratie daalt eerst, en stijgt daarna iets.

De calcium concentratie is duidelijk verhoogd ten opzichte van het rivierwater. Dit duidt op een bijdrage van regenwater. Door de verhoogde zuurgraad van neerslag lost het calcium op en neemt de concentratie daardoor toe.

De kalium concentratie is duidelijk lager dan die in de rivier. Dit duidt op zowel water afkomstig van neerslag (lage kalium concentratie) als absorptie van kalium door de bodem.

Tabel 8. Concentratie van 6 stoffen (mg/l) in de monsters aan het begin, midden en einde van de bemonsterde hoogwatergolf.

	2-6-2016	8-6-2016	17-6-2016	Bandbreedte Lobith
Cl	42.2488	74.46	78.09	35 - 115
NO3	2,856	0.72	1.03	4 - 18
SO4	52.6887	62.23	62.81	30 - 220
Ca	106.292	99.80	109.16	60 - 80
Na	36.2482	34.89	34.57	20 - 68
K	0.5289	0.49	0.39	3 - 6

Discussie

De chemische analyse van het water van de actieve wel bij de proeflocatie in de Willemspolder laat zien dat het bemonsterde water veranderde van signatuur. In het begin bestond het water voornamelijk uit regenwater. Aan het einde was dit duidelijk opgeschoven naar een sterkere rivierwater signatuur. Hieruit kan echter niet worden geconcludeerd of de pipe zich heeft ontwikkeld in de richting van de rivier. De verandering van de chemie laat wel zien dat er een duidelijke toestroom van water vanuit de diepere ondergrond.

6.4 Temporele variatie als tracer (analyse waterbase)

Rijkswaterstaat heeft een grote database (<http://live.waterbase.nl/>) met alle meetdata die in Nederland op verschillende locaties worden gemeten. Hierin zitten 1245 verschillende parameters in. De belangrijkste locatie voor het rivierengebied in deze database is Lobith ponton, in de Rijn vlakbij de Duitse grens.

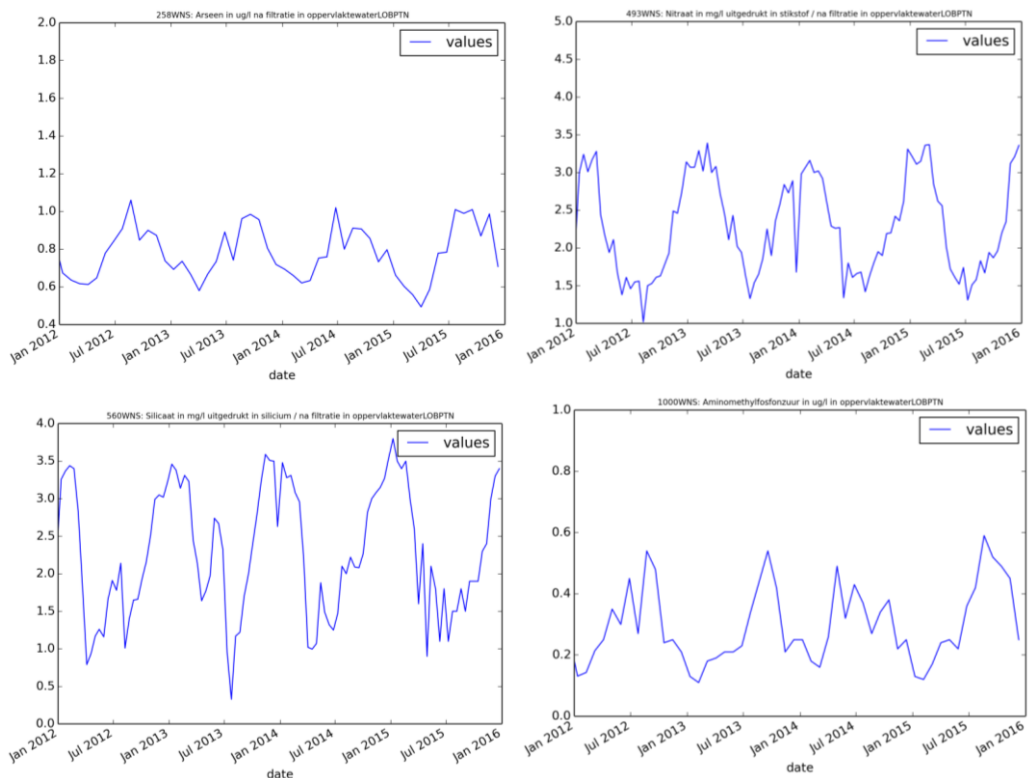
De watermonsters die vanaf dit ponton worden genomen, worden op 239 verschillende parameters geanalyseerd, frequentie van de metingen verschilt sterk: tussen 3 en 4450 metingen per parameter. 112 parameters hebben een serie van meer dan 100 metingen. Van deze 112 parameters zijn 99 gemeten tussen 2013 en 2015. Hiervan is dus een reeks met voldoende meetpunten beschikbaar.

6.4.1 Langjarige tracers

Om de trage verandering te kunnen volgen is een langjarige tracer nodig: een tracer die in de loop der jaren een steeds hogere of lagere concentratie krijgt. Uit de analyse van de overgebleven 99 parameters, zijn geen tracers beschikbaar die een langjarige trend vertonen. Zelfs het in Figuur 47 getoonde chloride, als mogelijke langjarige concentratie, is niet geschikt als langjarige tracer. Door alle milieumaatregelen, is de concentratie van chloride zodanig laag geworden, dat deze meer een seizoenale fluctuatie vertoont.

6.4.2 Seizoenale tracers

Seizoenale tracers zijn hoog in de zomer en laag in de winter, of andersom. Stoffen die seizoenaal blijken te fluctueren zijn bijvoorbeeld arseen, nitraat, silicaat en aminomethylforfonzuur (AMPA, een van de primaire afbraakproducten van het herbicide glyfosaat). Arseen kan echter gebonden worden aan bodemmateriaal, en bij de aanwezigheid van pyriet kan deze concentratie veranderen in de ondergrond. Nitraat wordt als gevolg van redox omstandigheden afgebroken in de ondergrond en zal dus alleen als net geïnfiltreerd water kunnen worden teruggevonden. Silicaat concentraties in grondwater zijn ook sterk afhankelijk van de bodemsamenstelling en AMPA wordt afgebroken door microbiële afbraak in de bodem. Alle deze tracers zijn dus niet geschikt om de oorsprong van het water te bepalen, alleen bij volledige pijp zouden de concentraties van deze stoffen terug te zien zijn bij de wellen.



Figuur 62. Seizoens fluctuatie van Arseen (links boven), Nitraat (rechts boven), Silicaat (links onder) en Aminomethylforfonzuur (rechts onder).

6.4.3

Stoffen waarvan de concentratie verandert tijdens bodempassage, door processen zoals afbraak, redox en radioactiviteit.

In de bodem vinden allerlei processen plaats, waardoor de initiële concentratie verandert. Stoffen kunnen worden gebruikt om te laten zien dat er een pipe in ontwikkeling is; als de initiële concentratie in de wel significant buiten de brandbreedte concentratie in de rivier ligt, én deze concentraties gedurende hoogwater duidelijk veranderen in de richting van de rivierbrandbreedte, kan er sprake zijn dat er een pipe in ontwikkeling is.

De volgende processen zijn verwacht tijdens de bodempassage van het infiltrerende zuurstofrijke (oxische) water:

- Door reducerende omstandigheden worden stoffen afgebroken, zoals zuurstof, nitraat en sulfaat, de concentratie daarvan (in die volgorde) afneemt met de afstand en diepte in de bodem;
- Mangaan en ijzer kunnen in oplossing komen, doordat de mangaan oxide (MnO_x) en ijzer(hydro-) oxides (FeO_x , $FeOH_x$) worden gereduceerd in mangaan en ijzer ionen. Hierdoor nemen de concentraties van Fe^{2+} en Mn^{2+} toe met afstand en diepte in de watervoerende laag;
- Calciumcarbonaat (calciet) kan in oplossing komen vanwege de zuurheid van de regen of het infiltrerende water, waardoor de concentraties van calcium en bicarbonaat stijgen. Dit kan ook gebeuren bij andere mineralen;
- Calcium, Natrium en Kalium, kunnen worden gebonden (adsorptie) of kunnen vrijkomen (desorptie) door het kation uitwisseling complex (hoger in klei bodems), waarbij als bijvoorbeeld zoet water infiltreert in een zoute bodem, natrium desorbeert en Calcium wordt geadsorbeerd. Dit resulteert erin dat in het grondwater $CaCl_2$ wordt gevonden (in plaats van het infiltrerende $CaHCO_3$ watertype of het oorspronkelijke $NaCl$ grondwatertype). Iets soortgelijks geldt voor kalium: als het infiltrerende water arm in kalium is (in vergelijking met het grondwater) dan zou kalium uit de kation exchange complex in oplossing kunnen gaan, en worden vervangen door een ander kation wat dominant is in het infiltrerende water;

- Veen en pyriet oxidatie resulteren in hoge Fe^{2+} en SO_4^{2-} concentraties.
- Etc.

De processen rond mineralen, en kation uitwisseling processen zijn erg locatie (bodem samenstelling) afhankelijk terwijl de redox processen en redox fases waardoor een oxische infiltrerende water wordt gereduceerd zijn meer universeel. Daarom zijn deze processen gebruikt om tracers te kunnen bepalen voor pipe vorming.

Als er veranderingen in de grondwater watersamenstelling zijn die in tegengestelde richting van de processen net genoemd en richting de samenstelling van het rivierwater gaan, kan dat een indicatie zijn van een (volledig of bijna volledige) pijp. Dit kan vooral terug te zien zijn door:

- Toenemen van NO_3 en O_2 concentraties;
- Afnemen van Fe^{2+} , Mn^{2+} NH_4^+ .

Indien de pijp niet volledig is, dan worden deze tracers niet goede indicators, want de redox processen kunnen snel optreden wanneer het water wel door de bodem gaat.

Daarnaast zijn er radioactieve stoffen die vanwege verval van concentratie veranderen. Radioactieve stoffen blijken niet beschikbaar vanwege de te lange halfwaardetijden van de stoffen die in de database zitten. Alleen strontium komt in de buurt, vanwege een halfwaardetijd van 28,8 jaar. De concentratie in de Rijn is echter niet constant genoeg om te kunnen worden gebruikt.

6.5 Redox

6.5.1 Inleiding

Redox stoffen zijn stoffen die gevoelig zijn voor reductie- en oxidatieprocessen (Redox). De redox processen hebben een belangrijke rol in de controle van de natuurlijke concentraties van O_2 , Fe^{2+} , SO_4^{2-} , H_2S , CH_4 , etc. in het grondwater. Voorbeelden hiervan zijn zuurstof en nitraat die in contact met bijvoorbeeld organisch materiaal kunnen reageren in een redoxreactie (zie Figuur 54).

De redox sequentie in grondwater is weergegeven in Figuur 54 waar de reductiereacties begint met O_2 reductie, NO_3 reductie en reductie van Mn-oxiden, tot de reductie van Fe-oxides, sulfaatreductie en methaan formatie. Hoe meer Fe^{2+} , Mn^{2+} , CH_4 (en hoe minder O_2 , NO_3) hoe meer gereduceerd het water is en hoe langer het verblijft in de bodem.

De bovenstaande trends zijn onderzocht in de 11 wellen en in 5 verschillende raaien van peilbuizen haaks op de rivier de Waal. Deze raaien van peilbuizen zijn afgepompt, waarna er watermonsters zijn genomen. Het doel hiervan is om te kijken of er redox trends gevonden kunnen worden in deze raaien. Met behulp van een goed begrip van deze trends wordt geprobeerd om veranderingen in het stroom regime door piping te herkennen door veranderingen in 1 van de bovenstaande trends. In principe, indien er piping bestaat, zou het water uit de wel minder gereduceerd water moeten bevatten dan het omliggende grondwater en er dus oxischer (zuurstofrijker) water uit de pipe zou moeten stromen.

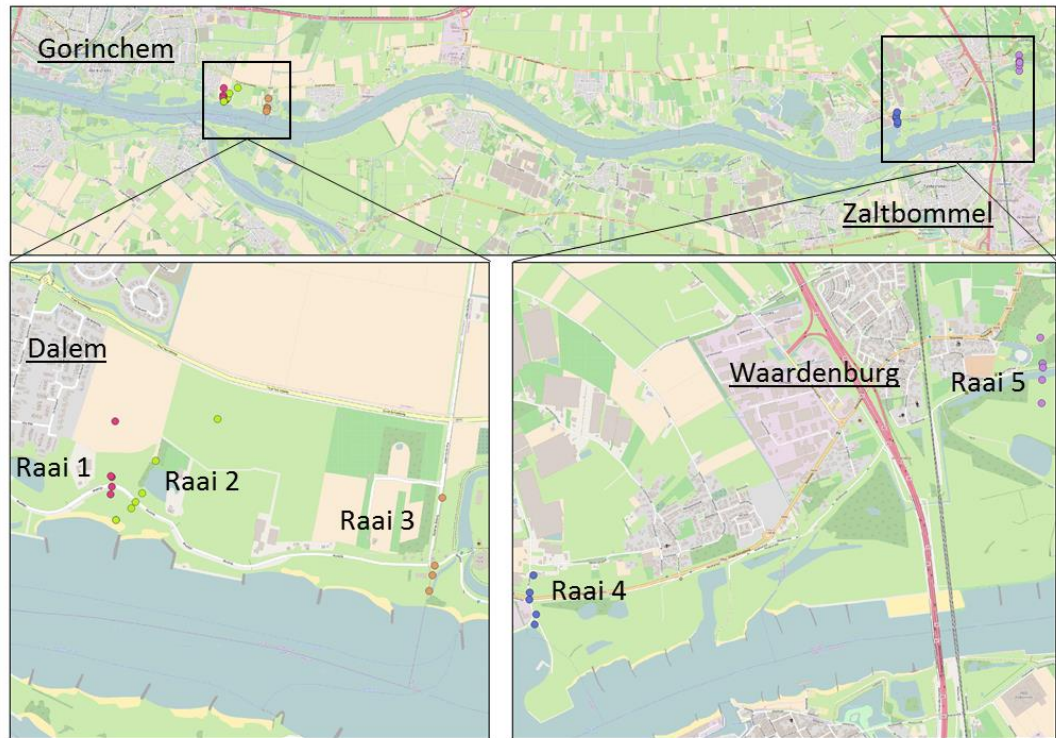
6.5.2 Resultaten

5 raaien

Indien reductie van grondwater een duidelijk fenomeen in het veld, rond een dijk, is, zouden de verschillende redox paren mogelijk indicatoren kunnen zijn om een voortschrijdende pipe te kunnen detecteren. Om te bepalen of de reductie van grondwater rond een dijk voorkomt en om te bepalen hoe duidelijk de redox zones te onderscheiden zijn in de ondergrond, zijn 5 bestaande raaien van peilbuizen uitgezocht.

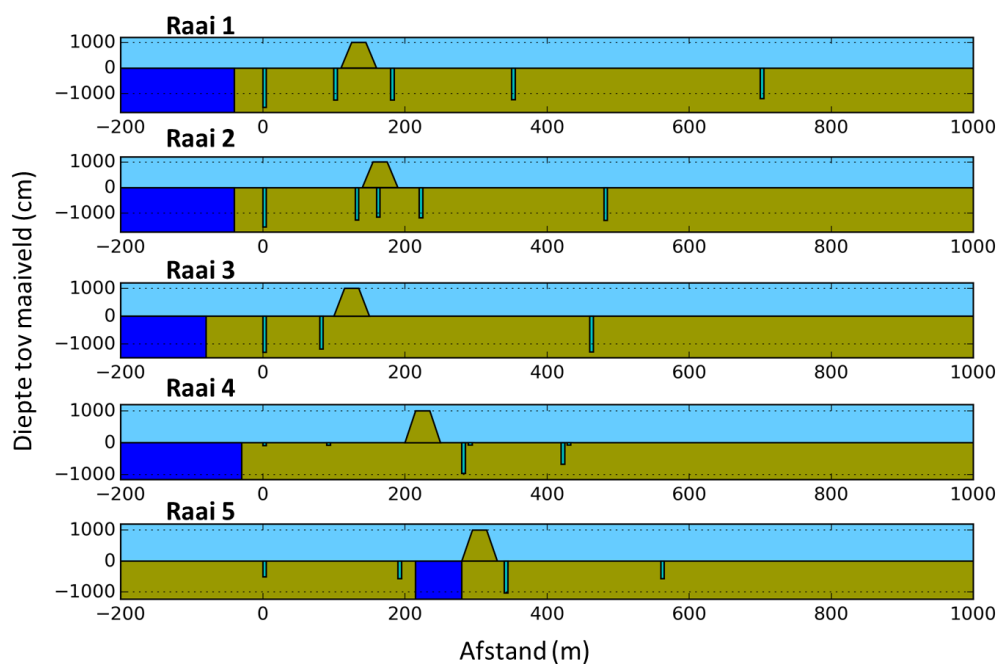
De verschillende raaien van peilbuizen onderzocht zijn getoond in Figuur 63. Ze liggen allemaal langs de Waal. De raaien 1,2 en 3 bevinden zich tussen Dalem en Vuren. De raaien 4,5 bevinden zich ten westen en oosten van Waardenburg, tussen Lingewaal en Tiel.

Deze raaien van peilbuizen zijn afgepompt en bemonsterd. In het onderzoek is gekeken naar in hoeverre de waterkwaliteit van de ondergrond verschilt door verschillen in de compositie van het rivierwater en de verschillende infiltratietijden en de processen die gebeuren in de ondergrond.



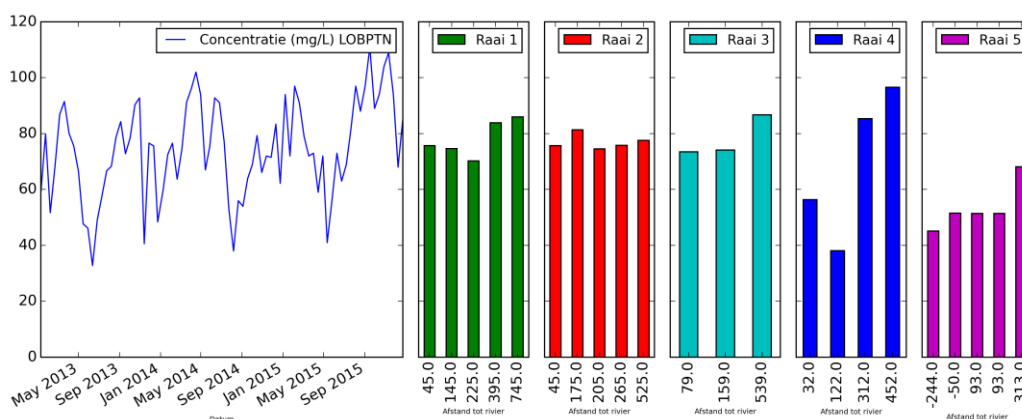
Figuur 63: de 5 raaien waar watermonsters genomen zijn. De gekleurde punten tonen de peilbuizen waaruit de watermonsters genomen zijn.

Figuur 64 toont de doorsnede van de verschillende raaien met de locaties van de verschillende peilbuizen per raai en de diepte van de filters. Het diepste punt is de onderkant van het filter van de peilbuis, alle filters zijn 1 meter lang. Het donkerblauwe vlak aan de linkerkant is de rivier. Bij Raai 5 ligt het land links op een eiland tussen twee vertakkingen van de Waal.



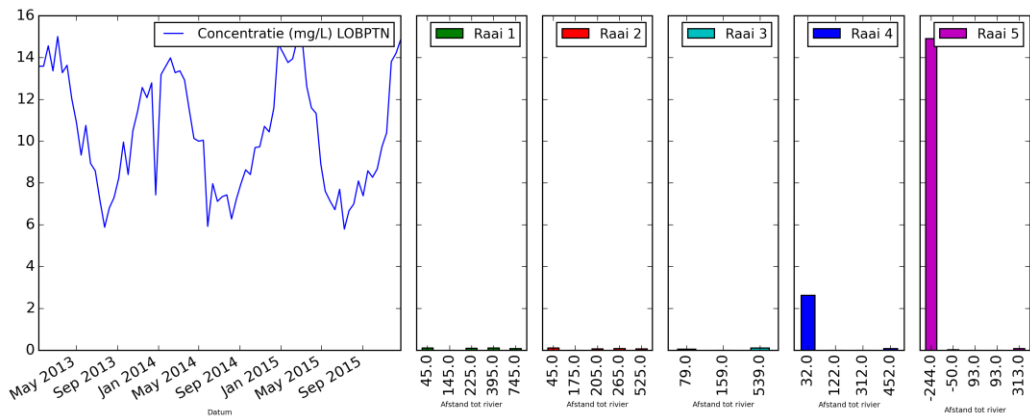
Figuur 64: de doorsnede van de verschillende raaien. Peilbuizen worden weergegeven als lichtblauwe rechthoeken. Het diepste punt is het onderkant van het filter van de peilbuis, alle filters zijn 1 meter lang.

Figuur 65 laat de chloride concentratie in de peilbuizen zien. Te zien is dat de concentraties bij de raaien 1, 2 en 3 redelijk de gemiddelde waarden van de rivierconcentratie hebben. Dit komt overeen met het feit dat deze raaien in de zone van categorie 3 liggen, waar sprake is van een vrijwel continue kwelsituatie. De peilbuisraaien 4 en 5 zijn verder bovenstrooms gelegen, tussen Lingewaal en Tiel in. Hier bepaalt het samenspel tussen de rivierwaterstand, grondwaterstijghoogte, maai veldhoogte en de dikte van de deklaag, wanneer er sprake is van inzijing of kwel. De chloride concentraties doen vermoeden dat hier soms sprake is van inzijing van regenwater, wat resulteert in een verlaging van de chloride concentratie.

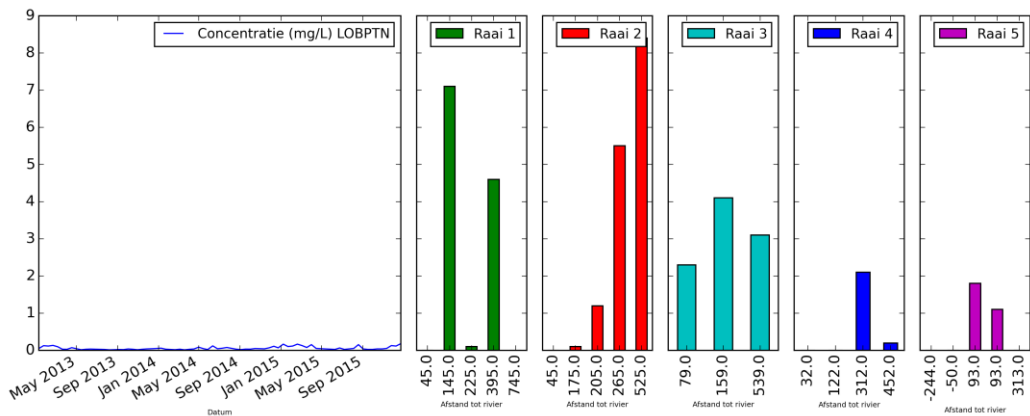


Figuur 65. De chloride concentratie in de verschillende peilbuizen in de 5 raaien

Figuur 66 toont dat de nitraat concentratie. Nitraat is, na zuurstof, de eerstvolgende redoxreactie. Dit is ook terug te zien in de nitraat concentraties in het bemonsterde grondwater. In Raai 1 tot en met Raai 3 is weinig tot geen nitraat gevonden in alle grondwatermonsters. In Raai 4 en Raai 5 is nitraat gevonden in de peilbuis het dichtst bij de rivier. Deze beide peilbuizen zijn gelegen in de uiterwaarden met een iets ondieper filter. Verder van de rivier is de nitraat concentratie minimaal. De nitraat concentraties laten dus duidelijke zien dat er sprake is van een redox trend. Dit wordt bevestigd door de gevonden ammonium concentraties die juist zijn gestegen (Figuur 67)

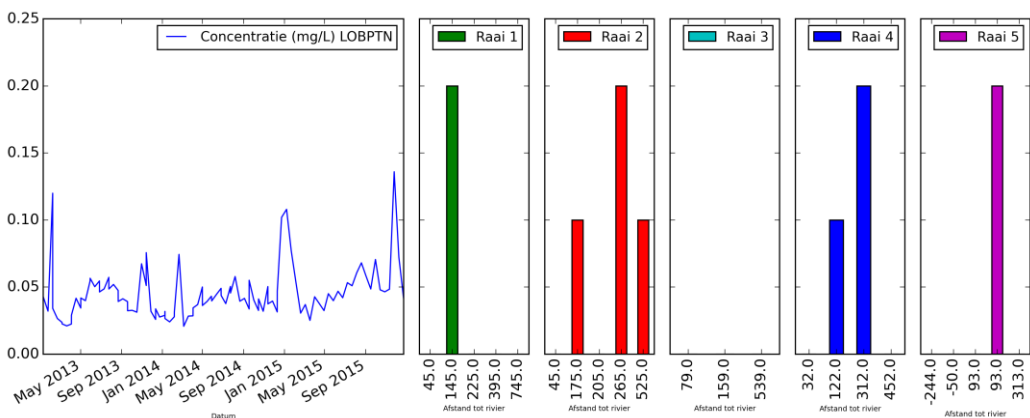


Figuur 66. De nitraat concentratie in de verschillende peilbuizen in de 5 raaien



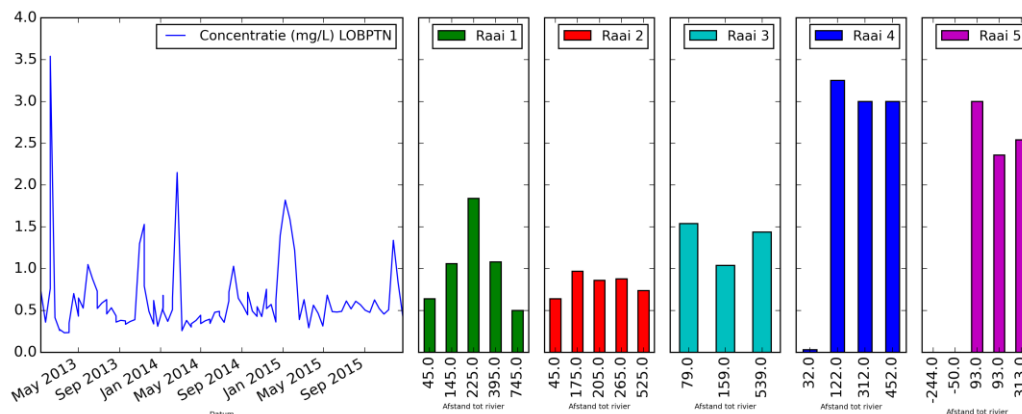
Figuur 67. De ammonium concentratie in de verschillende peilbuizen in de 5 raaien

Zoals eerder gezegd, bevindt mangaan zich als mineraal in kleine concentraties in de ondergrond. In het zuurstofrijke rivierwater bevindt zich weinig tot geen mangaan. Na infiltratie van het rivierwater en de redoxreacties betreffende zuurstof en nitraat, kunnen de mangaanoxides reduceren, waardoor mangaan in het grondwater terecht komt. In Figuur 68 is te zien dat de mangaan concentratie per raai vrij veranderlijk is. Wel is in de monsters die het dichtst bij de rivier zijn genomen geen mangaan aangetroffen en verder van de rivier af vaker wel. De wispelturigheid van de mangaan concentratie bij de verschillende peilbuizen in de raaien maakt mangaan als indicator voor pipe ontwikkeling ingewikkeld. Opvallend is verder dat de mangaan concentraties in sommige gevallen van deze 5 raaien lager zijn dan de concentraties bij de 11 wel locaties.



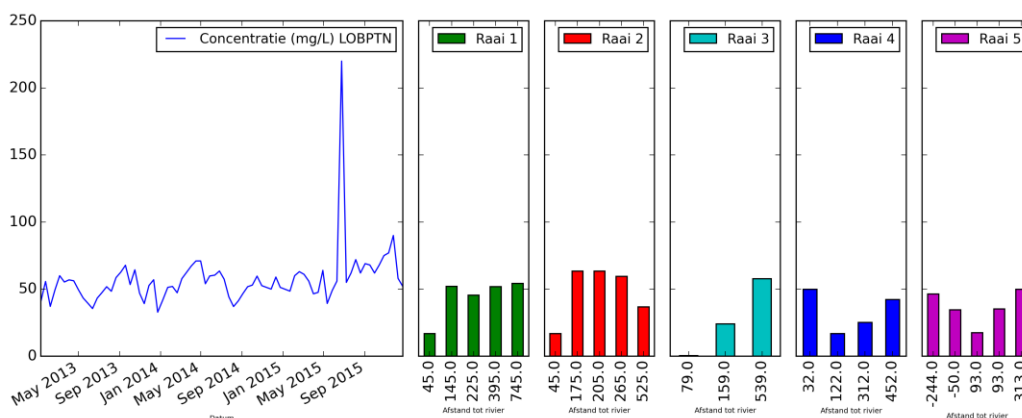
Figuur 68. Mangaan concentratie in de verschillende peilbuizen in de 5 raaien

De ijzer concentraties in de eerste 3 raaien (kwel situatie) lijkt aardig overeen te komen met de concentraties gemeten in de Waal. Raai 4 en Raai 5 tonen daarentegen een andere trend. De processen achter ijzer en mangaan reductie en het vrijkomen in grondwater zijn vergelijkbaar. Te verwachten is dat de ijzer concentratie toeneemt in grondwater. Deze trend is te zien in Raai 4 en Raai 5. De verschillen tussen Raaien 1,2,3 en Raai 4,5 laten zien dat duidelijke verschillen kunnen optreden per locatie.



Figuur 69. IJzer concentratie in de verschillende peilbuizen in de 5 raaien

De redoxprocessen rondom sulfaat lijken bij de raaien niet plaats te vinden, kennelijk zijn de reistijden niet lang genoeg om in deze redox fase terecht te komen. De concentraties in de raaien 1 tot en met 3 zijn vergelijkbaar met de sulfaat concentraties gemeten in de Waal. De raaien 4 en 5 zijn iets verlaagd, wat kan duiden op infiltratie van regenwater, zoals al was gezien bij de chloride concentratie (Figuur 65).

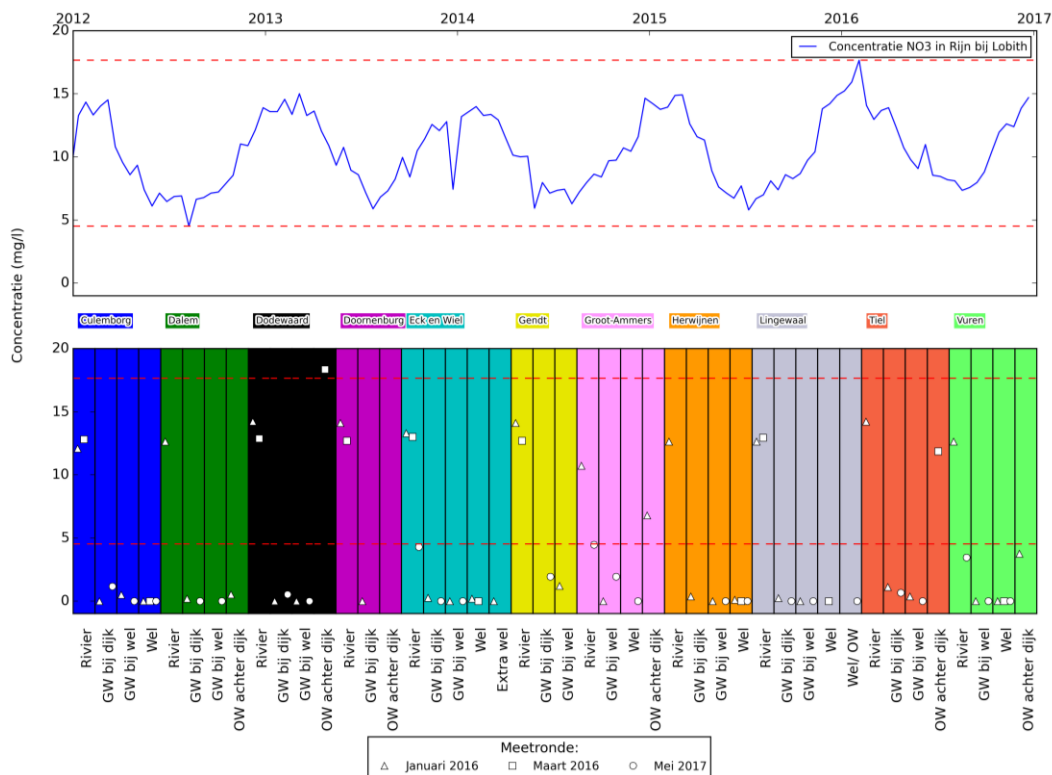


Figuur 70. Sulfaat concentratie in de verschillende peilbuizen in de 5 raaien

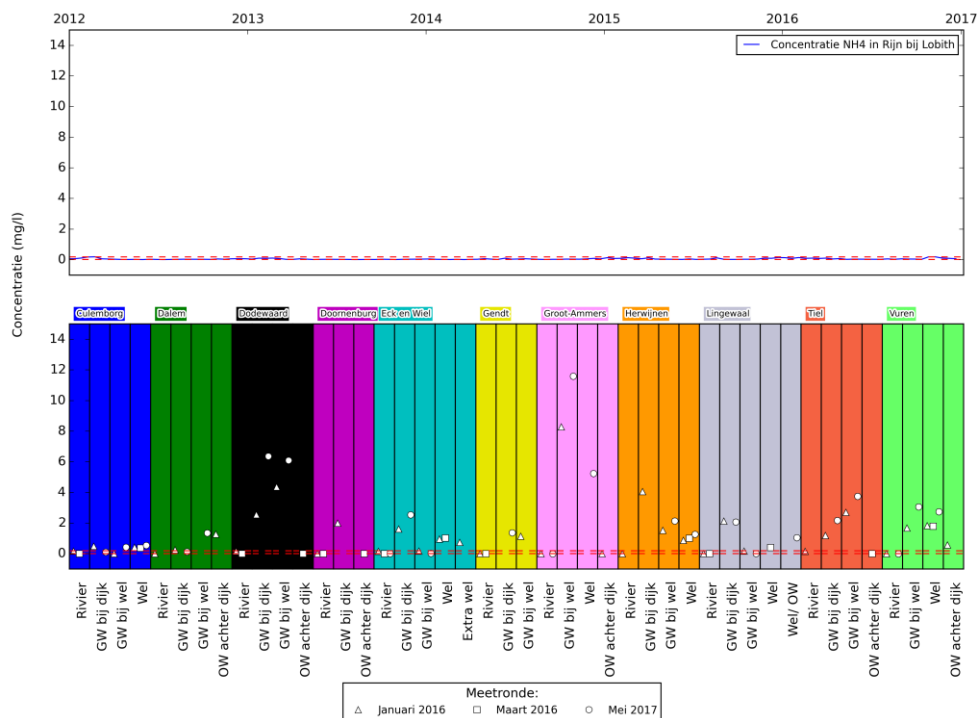
11 locaties

Op basis van wat er gevonden werd tijdens het onderzoek in de 5 raaien is geconcludeerd dat redox tracers informatie kunnen geven over de reistijd van het water tijdens bodempassage: naarmate het water ouder is, reduceert het water verder. Daar waar sprake is van kwel (categorie 1 en 3) is het grondwater voornamelijk oud rivierwater en dus sterk gereduceerd. Daar waar sprake is van kwel en inzijging (categorie 2, maar soms ook in het grondwater bij de dijk) is het grondwater minder sterk gereduceerd door de aanwezigheid van jonger regenwater. Dit vertaalt zich, in principe, in lage nitraat concentraties waar sprake is van kwel en iets hogere nitraat concentraties bij inzijging van regenwater. Sterk verhoogde nitraat concentraties in het grondwater bij een kwelsituatie kunnen daarmee impliceren dat er een korte of geen verblijftijd in de bodem is geweest, wat valt te verwachten als er sprake is van piping in volledig connectie met de rivier. Deze verhoogde concentraties zijn niet terug te zien in de resultaten van de uitgevoerde metingen (Figuur 71). De gevonden lage nitraat concentraties resulteren in verhoogde ammonia concentraties (Figuur 72).

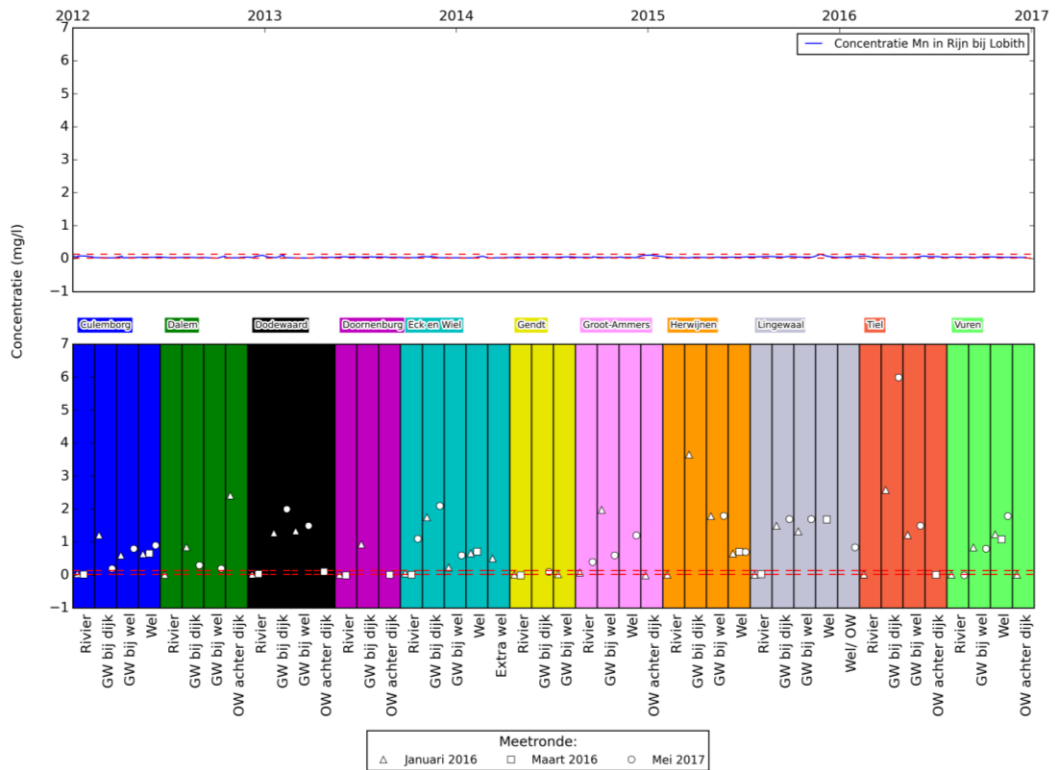
Waar sprake is van inzijging wordt ook verwacht dat de effecten te zien zijn van eventuele aanwezige meststoffen, dit is immers ook het geval bij oppervlaktewater waar meststoffen naartoe kunnen uitspoelen.



Figuur 71. Nitraat concentraties gemeten in de Rijn en bij de 11 gekozen raaien (per locatie meerdere monsters werden genomen van de rivier, het grondwater bij de dijk, het grondwater bij de wel en van de wel).



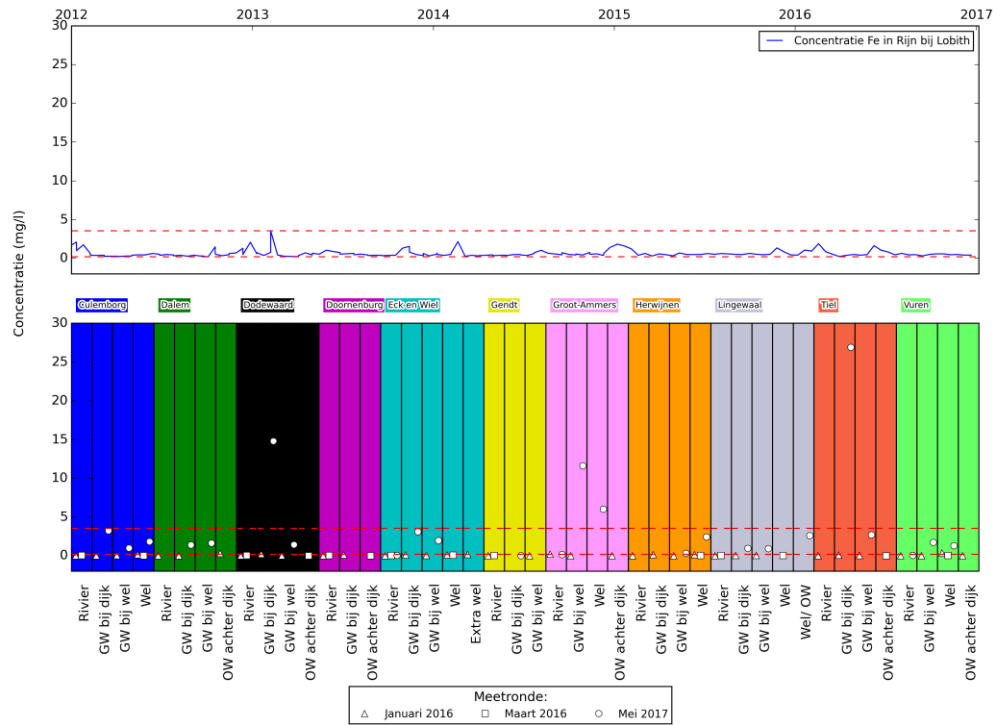
Figuur 72. Ammonia concentraties gemeten in de Rijn en bij de 11 gekozen raaien (per locatie meerdere monsters werden genomen van de rivier, het grondwater bij de dijk, het grondwater bij de wel en van de wel).



Figuur 73. Mangaan concentraties gemeten in de Rijn en bij de 11 gekozen raais (per locatie meerdere monsters werden genomen van de rivier, het grondwater bij de dijk, het grondwater bij de wel en van de wel).

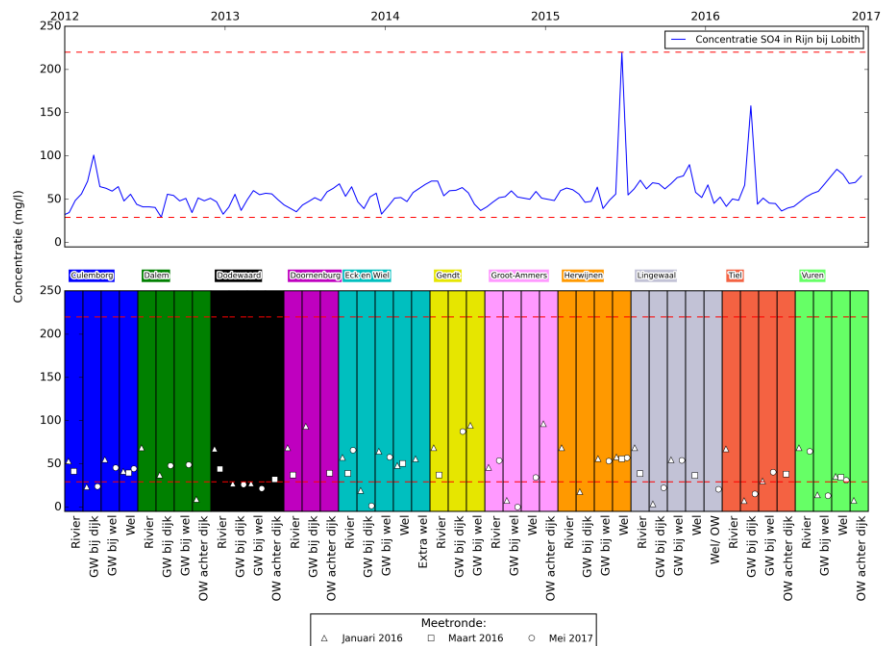
Mangaan bevindt zich als geoxideerd mineraal in kleine variabele concentraties in de ondergrond. In het oxidische rivierwater bevindt zich weinig tot geen mangaan. Wanneer na infiltratie van water de redoxreacties betreffende zuurstof en nitraat grotendeels plaats gevonden hebben, kan mangaan in het grondwater terecht komen: door reductie van de geoxideerde mangaan mineralen komt er mangaan in het grondwater terecht, waardoor verhoogde concentraties worden gevonden in het grondwater in vergelijking met de mangaan concentraties gevonden in de rivier (Figuur 73). Alleen bij Gendt werden lage mangaan concentraties gevonden.

De ijzer concentraties (Figuur 74) laten geen duidelijk beeld zien, waar een eenduidige conclusie uit getrokken kan worden. In het algemeen werden er gemiddelde ijzer concentraties gevonden in de wellen vergeleken met die van het rivierwater. Verhoogde ijzer concentraties komen vaak voor samen met verhoogde mangaan concentraties.



Figuur 74. IJzer concentraties gemeten in de Rijn en bij de 11 gekozen locaties (per locatie meerdere monsters werden genomen van de rivier, het grondwater bij de dijk, het grondwater bij de wel en van de wel).

In diep gereduceerd grondwater mag verwacht worden dat de sulfaat concentratie wordt verlaagd door reductie, hierbij wordt het sulfaat omgezet in H_2S , wat duidelijk te ruiken is. In Figuur 75 is te zien dat er sprake is van een verlaging van de sulfaat concentratie. Echter, een verlaging van de concentratie is nog geen garantie van reductie, en kan ook sprake zijn van verdunning, bijvoorbeeld door infiltratie van regenwater. De analyses van andere stoffen (isotopen en chloride) hebben laten zien dat hier inderdaad op meerdere locaties sprake van is. Aangezien van ijzer reductie geen sprake is, is het niet te verwachten dat er ook sulfaat reductie heeft plaatsgevonden.



Figuur 75. Sulfaat concentraties gemeten in de Rijn en bij de 11 gekozen locaties (per locatie meerdere monsters werden genomen van de rivier, het grondwater bij de dijk, het grondwater bij de wel en van de wel).

6.5.3

Conclusies redox

Het grondwater rond de 11 gekozen wellen en de 5 raaien laat de redox zones zien, zoals verwacht in gebieden met infiltratie van zuurstofrijk rivierwater in een watervoerend pakket. Dit betekent het verdwijnen van O_2 en NO_3^- tijdens de bodempassage, en een toename van de Mn^{2+} en Fe^{2+} concentraties met afstand van de rivier.

De Fe^{2+} concentraties waren redelijk laag in alle de monsters genomen waarbij geen patroon kon gevonden worden. Grondwater Mn^{2+} concentraties en de Mn^{2+} concentraties in de wellen waren hoog genoeg om te concluderen dat er reducerende condities optreden. Dit oude water duidt erop dat er een pipe niet is gevormd, anders zouden oxidische condities de wellen bereiken.

Het gebruiken van NO_3^- als tracer is lastig, aangezien dit zowel afkomstig kan zijn van de rivier als van geïnfiltreerd regenwater van de agrarische percelen boven de watervoerende laag: een verandering duidt dan op het aantrekken van ander water, wat afkomstig kan zijn van diepere lagen (verticale aantrekking van al dan niet gereduceerd water) of van water wat van verderop is (horizontale aantrekking van geïnfiltreerd regenwater wat meststoffen bevat). Nitraat concentraties in het grondwater en in de wellen waren in ieder geval redelijk laag, terwijl ammonia concentraties hoger dan die van de rivier waren, waardoor het geconcludeerd kan worden dat het water gereduceerd was, en dat er geen volledige pip is tussen de rivier en de well bestaat. Goed begrip van de geohydrologie is dus noodzakelijk, om te kunnen bepalen waar eventueel gemeten NO_3^- van afkomstig is: of van de rivier, of van geïnfiltreerde meststoffen.

Bij goed begrip van de ondergrond is de combinatie NO_3^- en Mn^{2+} concentratie is een mogelijkheid om als indicatieve tracer te gebruiken.

6.6

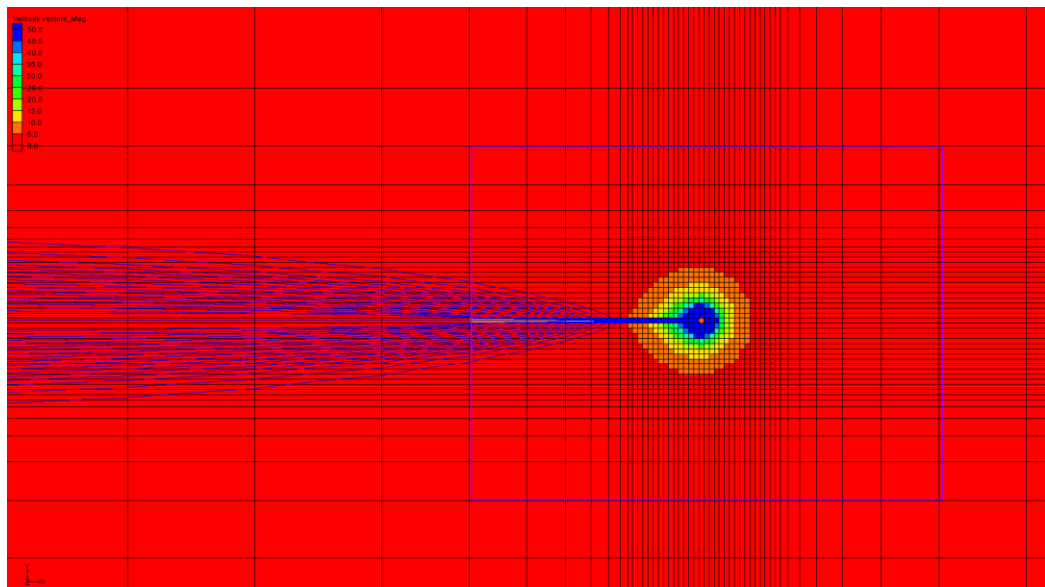
Analyse: Gebruik van chemie als tracer in de praktijk

De analyse van waterbase heeft laten zien dat de Rijn zodanig schoon is dat langjarige tracers niet meer beschikbaar zijn. Deze tracers zijn ideaal om de leeftijd van het water te bepalen. Aangezien deze niet meer aanwezig zijn, moet worden gezocht naar andere opties. Hierbij bieden seizoens trends of bodemprocessen (redox) mogelijkheden. Echter deze zijn afhankelijk van de heterogeniteit van de bodem. Dit resulteert erin dat de chemie geen duidelijke trend laat zien, waardoor er geen goede en eenduidige tracer

gevonden is. De modelresultaten hebben dit verder gecompliceerd, doordat een volledige pipe als een drain werkt en daarbij dus water aantrekt van alle mogelijke leeftijden en vanuit alle mogelijke redox stadia.

Zelfs onder extreme omstandigheden waar een continue pipe vanaf de rivier bestaat, wordt het verwacht dat de pipe een drainerende werking heeft. Daarom wordt verwacht dat het water van de wel altijd een menging zal zijn van rivierwater en grondwater; dit maakt het moeilijk om chemie als tracer te kunnen gebruiken.

Dit is ook duidelijk tot uiting gekomen in de resultaten van een model waarin een volledige pipe is gemodelleerd (verbinding tussen rivier en wel). Het eerste deel van de pipe heeft een infiltrerend effect (overdruk van de rivier is bepalend) en de laatste deel van de pijp een drainerend effect (polderpeil is bepalend). Dit is te zien in Figuur 76 waarin de stroombanen te zien zijn van waterdeeltjes die in de rivier beginnen eindigen in de pipe vlak voor de wel. De drainerende werking van de pipe zou betekenen dat er menging van grondwater met rivierwater in de pipe optreedt waarmee de resulterende redox status weer gereduceerd wordt.



Figuur 76. Resultaten model met een volledige pijp. Deze figuur laat de snelheden rond een wel en een pijp zien en de blauwe lijnen geven aan de stroombanen van een rij van partikels die in de rivier begint.

6.7 Conclusies

Om inzicht te krijgen in het geochemisch functioneren van wellen zijn bij 11 wellen, 5 peilbuisraaien en bij de Willemspolder watermonsters genomen welke zijn geanalyseerd. Op basis hiervan zijn verschillende conclusies te trekken over het geochemisch functioneren van het grondwater rond wellen. De belangrijkste zijn:

[1] De samenstelling van het grondwater (geochemie) is een goede indicator om het water te karakteriseren en daarmee de leeftijd aan te geven. Het onderzoek naar de geochemische variatie rondom een wel heeft veel nuttige inzichten opgeleverd.

[2] Het vinden van een tracer is een lastige opgave gebleken. Uit de enorme database van Rijkswaterstaat (Waterbase.nl) blijken maar 99 parameters voldoende frequent gemeten te worden om als tracer te kunnen dienen. De analyse van deze 99 parameters heeft laten zien dat er geen tracers beschikbaar zijn die een langjarige trend vertonen. Dit komt voornamelijk doordat de Rijn steeds schoner is geworden. Stoffen met een sterke seizoenale fluctuatie zijn wel beschikbaar, maar zijn niet geschikt als tracer omdat de concentratie in de bodem sterk verandert als gevolg van allerlei bodemprocessen.

[3] Een kansrijke categorie als mogelijke tracer zijn de redox parameters, waarbij dan vooral de combinatie van stoffen interessant is. Als bijvoorbeeld mangaan eerst in grote mate aanwezig is en gedurende een hoogwater verdwijnt; of dat nitraat eerst niet aanwezig is en daarna wel, dan zijn dit sterke indicatoren dat er relatief jonger water (water met een kortere verblijftijd in de ondergrond) uit de wel stroomt. Geohydrologisch begrip van de situatie ter plaatse is vervolgens nodig om deze verandering te verklaren.

[4] Uit de analyse van de watermonsters blijkt dat het water dat uit de wellen komt, gereduceerd water is en dat (mogelijk) geen volledige pipe gevormd is tussen rivier en wellen. Zelfs als deze pipe wel gevormd is, maakt de drainerende werking van de pipe dat water wordt aangetrokken en er menging optreedt waardoor de resulterende redox status weer gereduceerd wordt.

[5] De categorie indeling in combinatie met de hysteresis grafieken (zie hoofdstuk 5) blijkt ook een belangrijk hulpmiddel te zijn om het geochemische gedrag in het geohydrologische kader te kunnen plaatsen. In dijklichamen kan er sprake zijn van inzijing. Dit resulteert in een 'regenwaterlens' in en onder de dijk: dit water heeft een duidelijk andere signatuur (regenwater), dan het geïnfiltreerde rivierwater. In het bovenstroomse deel van de Waal (categorie 2) is het grootste deel van de tijd sprake van inzijing, waardoor het grondwater bestaat uit ondiep regenwater met daaronder water wat meer een rivier signatuur heeft.

[6] Hoewel de samenstelling van het grondwater (hydrochemie) dus een goede indicator is om het water te karakteriseren en daarmee de leeftijd aan te geven, maken de geohydrologische aspecten in combinatie met de verschillende door elkaar heen spelende processen een eenduidige analyse zeer lastig. De variatie in maaiveld, slootdiepte, polderpeilen en rivierstanden gecombineerd met variatie in deklaagdiktes, deklaagweerstand en heterogeniteit van watervoerende lagen maken dat de samenstelling van het grondwater afhankelijk is van zeer veel verschillende factoren en het erg lastig is om een eenduidige en simpele indicator te identificeren om in het veld het voortschrijden van de wel te kunnen bepalen.

7

Modelleren van wellen en piping

7.1 Algemeen

Analytisch of numeriek

Grondwaterproblemen kunnen met analytische of numerieke modellen beschreven worden. Het gebruik van analytische oplossingen vereist vaak een sterke vereenvoudiging van het domein, zoals de aanname van een homogene en isotrope ondergrond. Het voordeel is dat er snel gerekend kan worden en de probleemomschrijving is veelal sterk versimpeld (zie hiervoor ook de paragrafen 5.6.2 en 7.4). Het voordeel van het gebruik van numerieke modellen is dat inhomogeniteiten of een complexere geometrie van de ondergrond, alsook een complexer stromingspatroon kan worden gesimuleerd, wat in dit rapport beschreven situaties relevant is.

1D, 2D of 3D?

Voor het berekenen van grondwaterstroming met numerieke modellen kan gebruik gemaakt worden van 1D, 2D en 3D modellen.

1D modellen beschrijven grondwaterstroming in één richting, zoals bijvoorbeeld verticale stroming door een kleilaag (kwel of infiltratie). 2D modellen worden gebruikt voor eenvoudige situaties waarbij de grondwaterstroming in een horizontaal of verticaal vlak (dus twee richtingen) plaats kan vinden. 3D modellen worden ingezet als er sprake is van een complexer stromingsdomein, waarbij parameterwaarden en stromingsvectoren in drie dimensies kunnen variëren.

Voorbeelden van typische situaties voor de verschillende modeltypen zijn:

- 1D: Berekenen van kwelintensiteit door een kleilaag;
- 2D: Stroming door een watervoerende laag tussen twee waterlopen; en
- 3D: Putstroming (radiaal), complexe regionale grondwaterstroming.

Semi-3D

Voor vraagstukken die radiaal symmetrisch zijn kan ook gebruik worden gemaakt van een axi-symmetrisch model. Dit is een *semi-driedimensionaal* model, waarbij een 2D verticale doorsnede van het domein wordt gemodelleerd, maar waarin een driedimensionaal volume wordt geschematiseerd. De toename van het doorstromend volume van de watervoerende laag met toenemende afstand vanaf de put wordt in dat geval (als kunstgreep) ingevoerd door een aanpassing van de modelparameters of van de geometrie van het model (Wallis *et al*, 2012). Dit is een meer technisch efficiëntere methode van het modelleren van een radiaal probleem, zolang de aanname van radiaal symmetrische stroming gerechtvaardigd is.

De lokale grondwaterstroming bij wellen en piping is juist niet radiaal symmetrisch. Daarom is het nodig om wellen in 3D te schematiseren. Voor begrip van de processen rondom de wel is in dit onderzoek gebruik gemaakt van 3D modellen. Enkel als het gaat om 'globalere' vragen als de verblijftijd van water en de impact op het omliggende watersysteem is een 2D aanpak - omwille van het beperkt houden van rekentijden - nog te rechtvaardigen.

Vera van Beek heeft uitgebreid laboratoriumonderzoek gedaan naar wellen (van Beek 2015), zowel op kleine schaal als op grotere schaal (IJKdijk). In haar samenvatting geeft van Beek aan dat er verschillen blijken te zitten tussen model resultaten en de werkelijkheid. Haar conclusies sluiten aan bij de noodzaak om 3D modellen te gebruiken en lijken ook de hier berekende modelresultaten te onderschrijven. Zij schijft: “Voor situaties waarbij de stroming sterk convergeert naar het uittreepunt (3D configuratie) en voor heterogene zanden (met variatie van korrelgrootte in de baan van de pipe), blijkt het Sellmeijer model niet goed te functioneren. Variatie in korrelgrootte in de baan van de pipe blijkt tot een relatief hoge kritieke gradiënt te leiden, terwijl de concentratie van stroming naar het uittreepunt de kritieke gradiënt juist doet afnemen. Het berekenen van de stroming in 3D en het implementeren van een criterium voor primaire erosie zijn noodzakelijke stappen om in deze condities piping te voorspellen.”

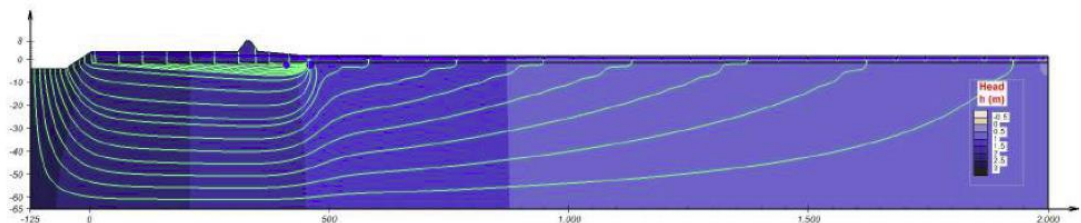
7.2 Situatie bij Culemborg en Dodewaard in 2D

Om meer inzicht te krijgen voor hoe het grondwater naar de wellen stroomt, zijn 2D-modellen zonder wellen gemaakt van de situaties bij Dodewaard en Culemborg. Het doel van deze analyse is om inzicht te krijgen in de herkomst, de kortste afgelegde weg en de variatie in de verblijftijden van grondwater, lokale heterogeniteiten kunnen resulteren in kortere verblijftijden, orde groottes zullen echter niet veranderen. Debeten en het totale toestromingsbeeld kunnen niet uit deze modellering worden gehaald: Hiervoor is een 3D modellering noodzakelijk.

Met beide modellen zijn twee simulaties gedraaid. De eerste is een situatie met permanent overdruk (categorie 1 en 3) en de tweede een situatie waarbij er gedurende een deel van het jaar sprake is van een drainerende rivier (categorie 2). Een uitgebreide beschrijving is te vinden in Bijlage 4.

Culemborg

De modelberekeningen in Culemborg laten zien dat er een regenwaterlens aanwezig is bij de dijk (zie Figuur 77). Dit is van belang voor het begrip van de geochemie van het water uit de wel: doordat de rivierwaterstand hoger staat dan het achterland is er een permanente flux naar het achterland vanuit de rivier (met een andere geochemische samenstelling dan de regenwaterlens). De uiterwaarde ligt echter boven de rivierwaterstand en ligt ook hoger dan het achterland. Hier infiltreert regenwater wat in de richting van het achterland stroomt. Direct achter de dijk kwelt dit regenwater op, verder van de dijk kwelt geïnfiltreerd rivierwater op. De verblijftijd van het water komt op minimaal 3000 dagen, ruim 8 jaar dus. Bij radiale toestroming naar de wel zijn minimale reistijden vergelijkbaar of mogelijk zelfs iet groter; reistijden van water vanuit diepere lagen zijn nog langer. Indien er sprake is van een verhoogd peil nemen de reistijden af. Bij een waterstandverschil van 3m is ook de verblijftijd nog steeds rond de 300 dagen, bijna een jaar, wat veel langer is dan de duur van een hoogwatergolf. Zonder pipe zal het water dus zeer lang onderweg zijn.



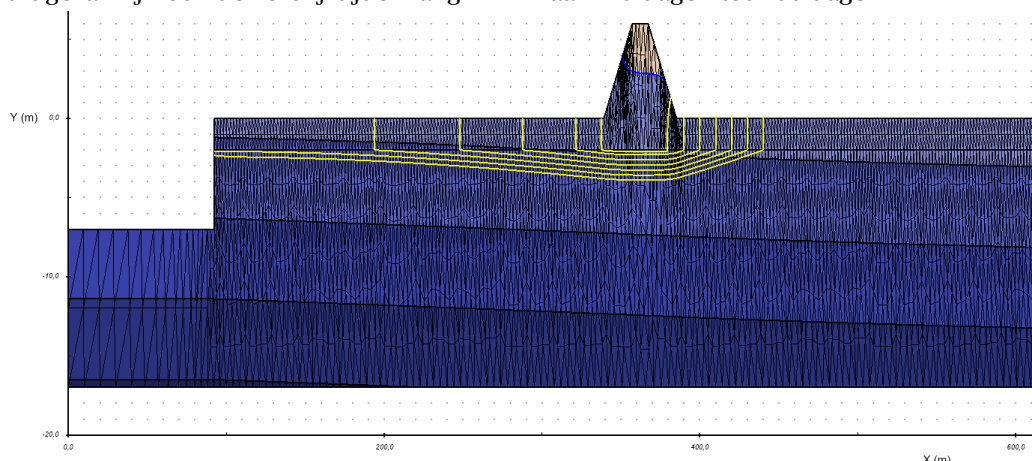
Figuur 77. Stroombanen in het stationaire grondwatermodel van Culemborg

Dodewaard

In Dodewaard is in de gemiddelde situatie sprake van een drainerende rivier, waarbij water uit de polder in de richting van de rivier stroomt. Water uit de uiterwaarden

stroomt ook af in de richting van de rivier. De toplaag van het grondwater zal dan ook voornamelijk een regenwatersignatuur hebben.

Alleen bij hoogwater zal de stroomrichting omdraaien en zal rivierwater infiltreren. In dit geval zijn ook de verblijftijden lang: minimaal 420 dagen tot 700 dagen.



Figuur 78. Stroombanen in het stationaire grondwatermodel van Dodewaard bij een verhoogd peil van 3,9 m boven maaiveld

Conclusie

Deze analyse met een 2D model van Dodewaard en Culemborg hebben laten zien dat er sprake is van lange verblijftijden. Hierbij geldt: hoe dikker de deklaag is, hoe langer het water onderweg is. In Dodewaard is water bij verhoogd peil minimaal 400 dagen onderweg. In Culemborg minimaal 300 dagen. Dit betekent dat er bij hoogwaters zonder een pipe geen 'vers' rivierwater in de wel gemeten zal worden, omdat hoogwaters vaak niet langer duren dan 1 tot 2 weken (het hoogwater in de Rijn van 1995 duurde van 27 januari tot 4 februari).

Indien er sprake is van een polder met permanente kwel, vanwege een permanent rivierwater peil dat hoger is dan het binnendijkse maaiveld in de polder, maar wel lager dan de buitendijkse uiterwaarden, is het te verwachten dat zich onder de dijk en in de droge uiterwaarden in de bovenlaag van het eerste watervoerend pakket een laag geïnfiltreerd regenwater bevindt, daaronder zal zich geïnfiltreerd rivierwater bevinden.

7.3 Gedrag van een gat in de deklaag in 3D

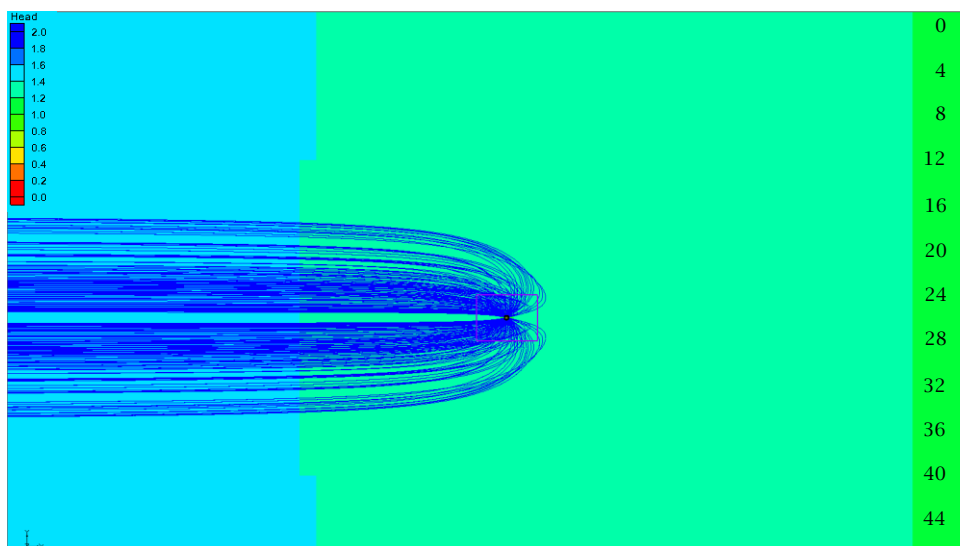
Als eerste is in 3D onderzocht hoe de toestroming naar een gat in de deklaag/ wel varieert bij het toenemen van het waterstandsverschil tussen de rivier en teensloot en binnendijkse maaiveld en bij toenemende verticale anisotropie. In totaal zijn 9 modelsimulaties uitgevoerd. De twee hoofdvariabelen zijn als volgt gevarieerd:

- Waterstandsverschil:** De effecten van een waterstandsverschil van 2 m is vergeleken met een waterstandsverschil van 4 en 6m;
- Bodem heterogeniteit/ verticale anisotropie** Dit is de horizontale doorlatendheid/ verticale doorlatendheid. Hoe meer gelaagd de bodem, hoe groter deze anisotropie is. De vraag is wat het effect is een sterkere gelaagdheid op de toestroming naar de wel. De effecten hiervan werden gesimuleerd met een verticale anisotropie van 5 (laag), 10 (gemiddeld) en 50 (zeer hoog).

Met het model is een gebied gesimuleerd met een totaal oppervlak vanaf de rivier (boundary) tot 1800 m binnendijks en een breedte van 2400 m. Dit voorkomt dat de randen van het model invloed hebben op het gedrag van het water rond de wel. De totale gesimuleerde diepte is 30 meter. De wel zelf is gemodelleerd op een afstand van 170 m vanaf de dijk en in het midden van het model. De gesimuleerde deklaag is 1m dik met een weerstand van 3000 dagen en het watervoerende pakket daaronder is zandig met

een K-waarde van 20m/dag. De dikte van de watervoerende laag is dus 29 m, waarmee deze een transmissiviteit heeft van 580 m²/d.

In Figuur 79 is als voorbeeld het resultaat opgenomen van het scenario met een waterstandsverschil van 2 m en een verticale anisotropie van 10. Zoals verwacht is de grondwaterstroming rond de wel radiaal. De blauwe stroomlijnen laten zien waar het water uit de wel vandaan komt. Het toevoergebied is zo'n 20 meter breed en dus aanzienlijk breder dan de wel. Dit stromingspatroon is gebruikelijk grondwatergedrag en vergelijkbaar met onttrekkingen rond bouwputten en onttrekkingen voor drinkwater/grondwater.



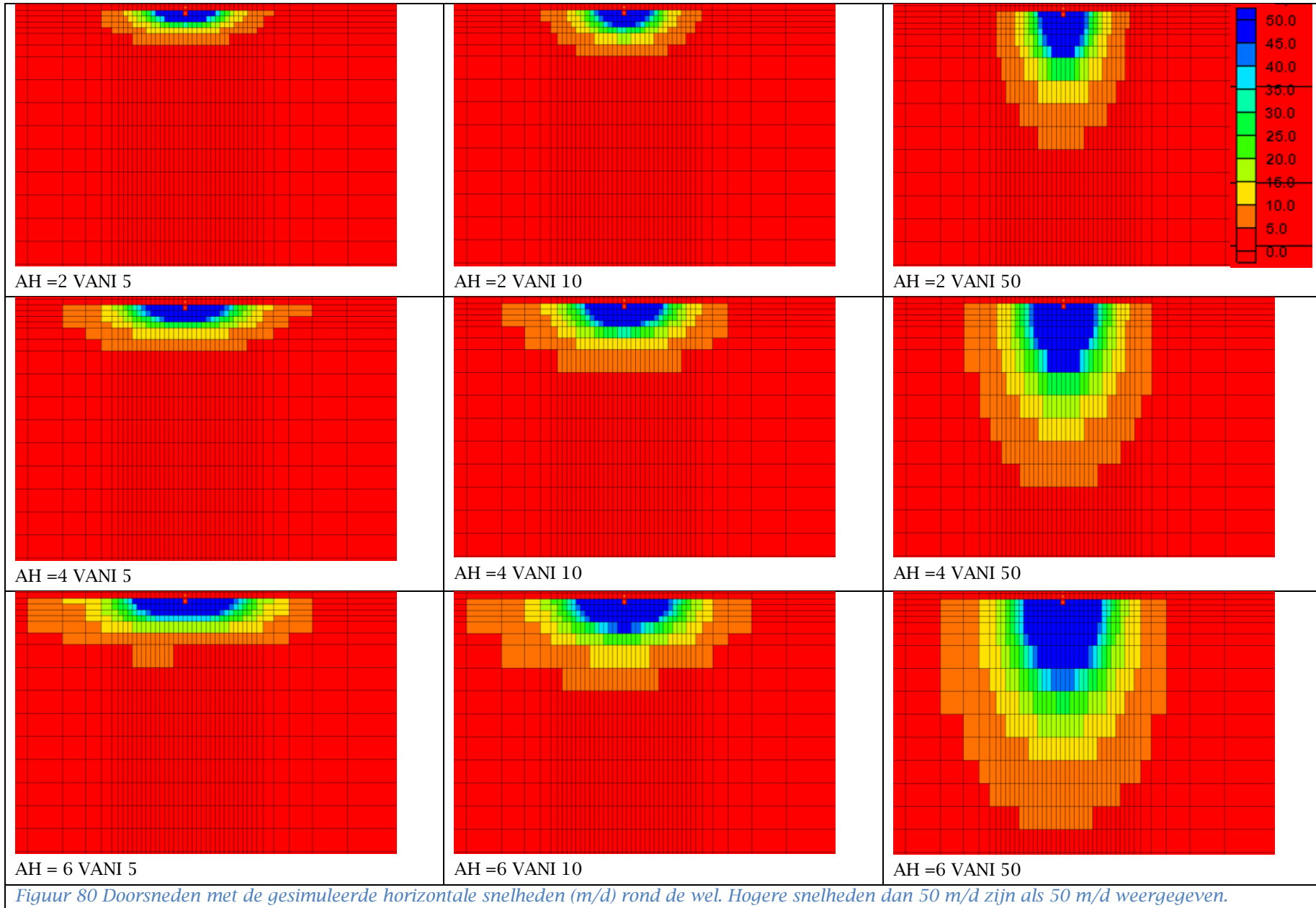
Figuur 79 Stroomlijnen vanaf de rivier (links) naar de wel in de laag onder de deklaag bij een drukverschil van 2 m en een verticale anisotropie van 10. Het vierkantje (6*4meter) rond de wel geeft het gebied aan waarin in de volgende figuren wordt ingezoomd.

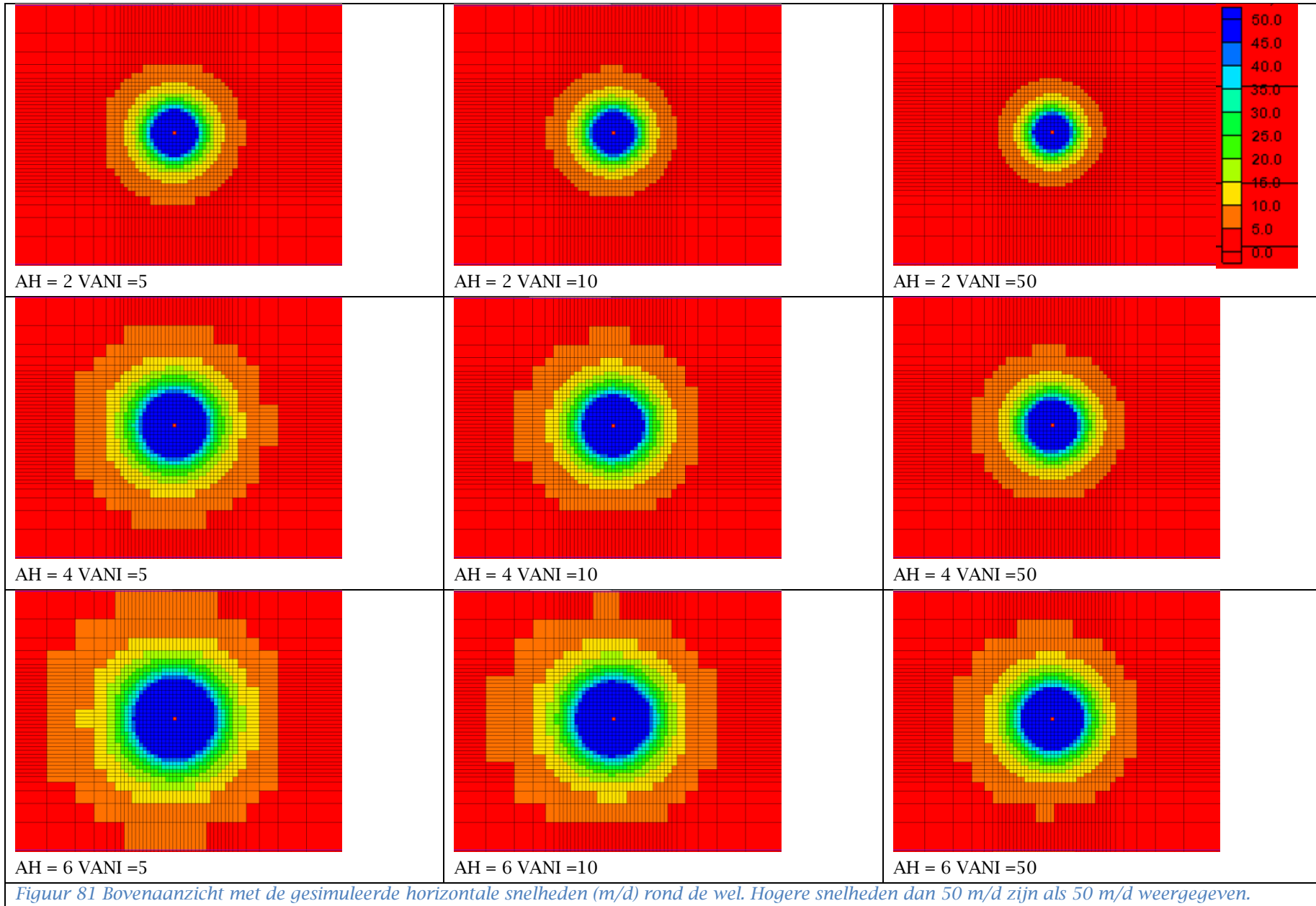
In Figuur 80 zijn de resultaten van de 9 modelscenario's weergegeven. Hierbij is sterk ingezoomd. In deze figuur zijn de verticale dwarsdoorsnedes (4*6m) weergegeven. De dwarsdoorsnedes zijn dus haaks op de dijk. In Figuur 81 zijn van deze 9 modelscenario's de bovenaanzichten weergegeven (van 4*6m) ter plaatse van de wel. In ieder figuur bevindt de rivier zich 170 meter naar links.

Blauw zijn de hoge snelheden (> 50 meter per dag), rood lage snelheden. Wat vooral opvalt is dat in scenario de toestroming radiaal is, maar ook zeer beperkt asymmetrisch, zelfs bij de grote drukverschillen.

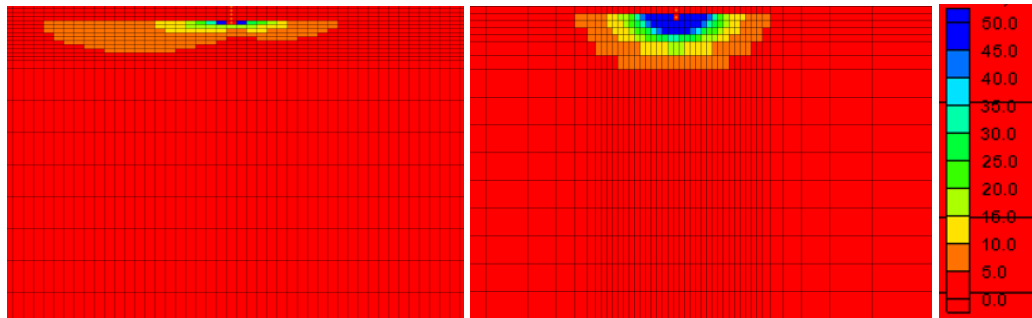
De berekeningen laten dus zien dat er, na een opbarsting, in de ondergrond direct rondom de wel geen duidelijke voorkeur is voor stroming via enkel de kortste weg uit in de richting van de rivier. Het water stroomt van alle kanten radiaal naar de wel. Het drukverschil tussen de stijghoogte onder de deklaag rond de wel en de atmosfeer zijn kennelijk vrijwel overal gelijk.

Opvallend is dat bij een hogere anisotropie (50) de hogere snelheden juist dieper reiken. Dit is een enigszins tegen-intuïtieve uitkomst. Dit kan mogelijk verklaard worden, doordat de invloed van de hogere rivierwaterstanden een minder grote invloed heeft (het grootste dichtbij de dijk), waardoor de drukverlaging van de wel juist een groter invloedsgebied heeft. Deze grotere invloed levert een drukverval over een groter gebied op, waardoor het water vanuit diepere lagen toestroomt. Verder onderzoek hiernaar wordt echter aanbevolen.





Om het verschil te laten zien tussen een 2D en 3D schematisatie van hetzelfde probleem is dezelfde wel ook in 2D gemodelleerd. Bij het 2D model is de breedte van het model dus maar 1 m breed en 1800 m lang, in plaats van 2400m breed en 1800 m lang bij het 3D model. In Figuur 82 is het resultaat te zien van het scenario met een waterstandsverschil van 2 meter en een anisotropie van 10. Het eindresultaat laat zien dat wanneer een 2D modellering wordt gebruikt, de toestroming naar de wel zich bevindt in één geconcentreerde stroombaan vanaf de rivier naar de pipe. Het ontstaan van een pipe ligt dan voor de hand. Bij het 3D-model met radiale toestroming ligt juist het ontstaan van een holte voor de hand. Een 2D schematisatie van een wel geeft dus een beeld van een pipe ontwikkeling richting de rivier, die in de 3D situatie niet te zien is. De ontwikkeling van een pipe wordt daarmee in een 2D schematisatie verkeerd voorgesteld en mogelijk overschat.



Figuur 82. Links: Dwarsdoorsnede van het 2D model (ingezoomd rond de wel). De rivier is in de linker kant gesimuleerd. Rechts: Dwarsdoorsnede van het 3D model (ingezoomd rond de wel). Beide modellen geven de stroomsnelheid weer bij eend drukverschil van 2 m en een anisotropie van 10

7.4 Toeleverdoorsnedegebied

Wellen zijn in zekere zin te schematiseren tot een puntvormige grondwateronttrekking. Het debiet moet geleverd worden door de onder de deklaag gelegen watervoerende laag. Wanneer ervan uit gegaan wordt dat dit water hoe dan ook wordt aangevoerd door een naastgelegen rivier en dat de stroming onder de dijk parallel loopt (zie ook Figuur 79), kan met de wet van Darcy een inschatting worden gemaakt van de grootte van het benodigde doorstromend oppervlak - zonder pipe - om in de wel het gemeten debiet te kunnen laten leveren: het toeleverdoorsnedegebied:

$$Q_{wel} = -A * \frac{dh}{dx} * K$$

Waarin:

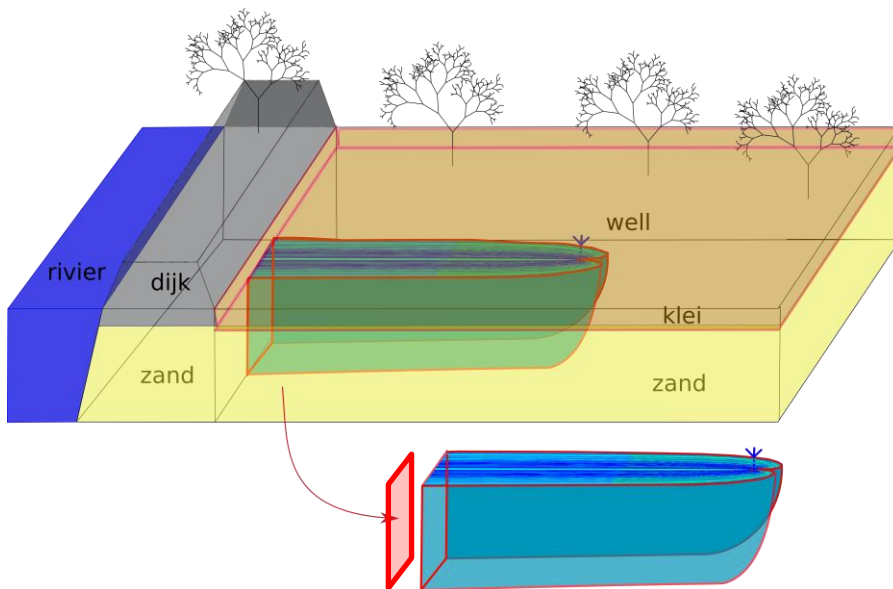
Q_{wel} = debiet bij de wel [m³/dag]

dh/dx = verhang van het grondwater [-]

K = doorlatendheid van de bodem [m/d]

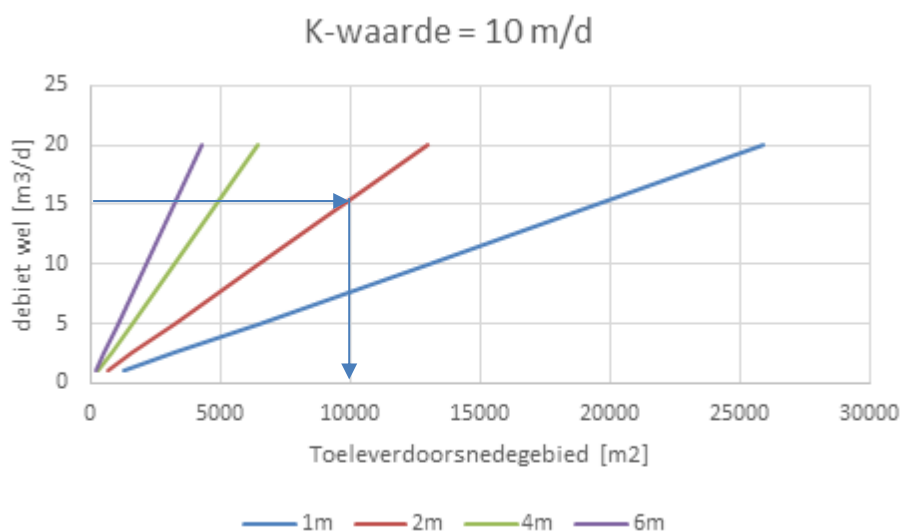
A = toeleverdoorsnedegebied [m²]

Het toeleverdoorsnedegebied is grafisch weergegeven in Figuur 83.

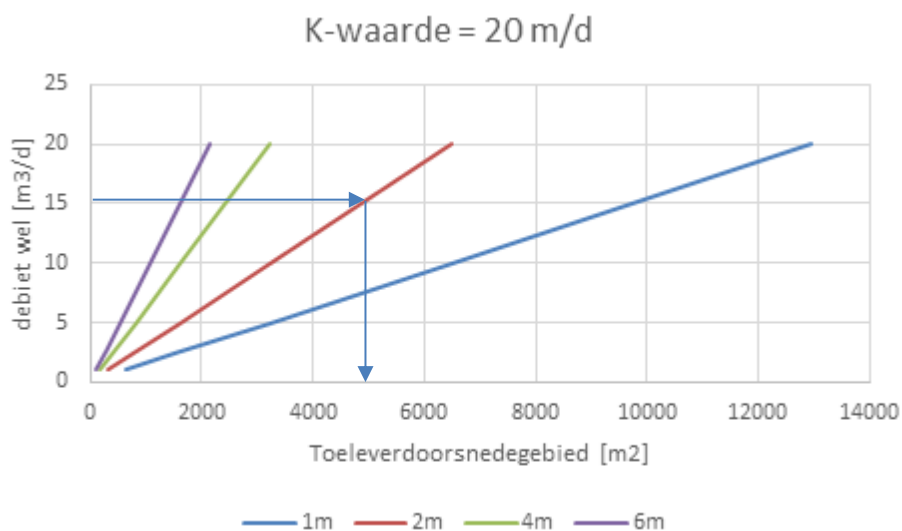


Figuur 83. Het toeleverdoorsnedegebied van een well: het rode vierkant aan de linker kant.

Om de afmetingen van het toeleverdoorsnedegebied te schatten zijn aannames nodig van het verhang, de doorlatendheid van de bodem en het debiet bij de well. Hoe grover het materiaal, hoe hoger de doorlatendheid, hoe meer water de well kan leveren en hoe kleiner het toeleverdoorsnedegebied is. Figuur 84 en Figuur 85 laten bij 2 doorlatendheden (k -waarden van 10 en 20 m/d) de relatie zien tussen de afmetingen van het toeleverdoorsnedegebied en het debiet van de well. Hierbij is de afstand (dx) tussen het intreepunt en de well 150 m en het waterstandsverschil (dh) gekozen op 1, 2, 4 en 6 meter.



Figuur 84. Grootte van het toeleveringsdoorsnedegebied bij een K -waarde van 10 m/d bij verschillende debieten bij een drukverschil tussen rivier en achterland van 1, 2, 4 en 6 m en een afstand tussen intreepunt en well van 150 m



Figuur 85. Grootte van het toeleveringsdoorsnedegebied bij een K-waarde van 20 m/d bij verschillende debieten bij een drukverschil tussen rivier en achterland van 1, 2, 4 en 6 m en een afstand tussen intreepunt en wel van 150 m

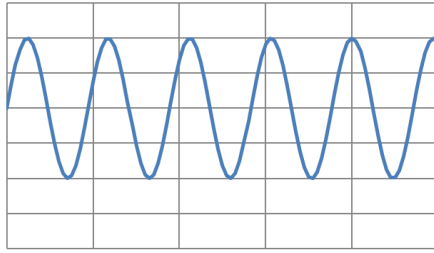
In Figuur 84 met een doorlatendheid van 10 m/d is te zien dat voor een debiet van 15 m³/dag en een waterstandsverschil van 2 m het toeleverdoorsnedegebied 10.000 m² groot moet zijn. Dit betekent dat bij een dikte van het watervoerend pakket van 20 m al het water dat over een lengte van 500 meter onder de dijk stroomt naar de wel wordt gezogen. In Figuur 85 met een doorlatendheid van 20 m/d is voor hetzelfde debiet en bij hetzelfde waterstandsverschil een toeleveringsdoorsnedegebied van 5.000 m² nodig.

De uitgevoerde debietmetingen in paragraaf 5.6 hebben laten zien dat debietmetingen van 100 m³/dag niet ongewoon zijn. Dit komt neer op enorme toeleverdoorsnedegebieden. Opgemerkt wordt dat de doorlatendheid van de bodem de beperkende factor is voor het debiet dat kan worden geleverd: door het wandoppervlak van een holte kan veel meer waterstromen dan zonder holte door het poreuze medium. Deze holte groeit tot een evenwichtssituatie waarin alle randen het maximum debiet dat door de bodem kan stromen aanleveren, zonder dat het (grove) zand nog kan worden afgevoerd.

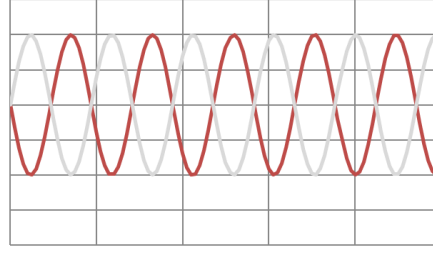
7.5 Modelleren van tracers

Een 3D transport model is gemaakt waarmee is geprobeerd inzicht te krijgen in welke transport processen invloed hebben op het water in de wel wat afkomstig is uit de rivier. Transport processen zijn hier: diffusie (menging), dispersie en retardatie. De effecten hiervan (verdunding, uitvlakking en vertraging, respectievelijk) op een bepaalde oorspronkelijke concentratie worden in Figuur 86 weergegeven.

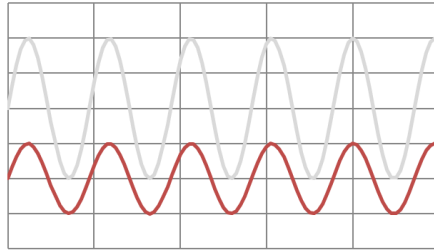
Seizoensale concentratievariatie



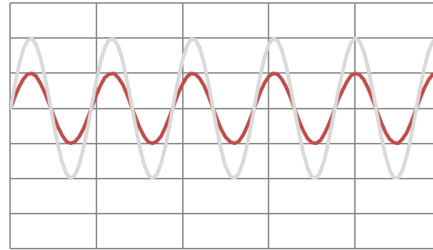
Retardatie (vertraging)



Menging (verduunning)



Dispersie (uitvlakking)



Figuur 86. Effecten van transport processen op een bepaalde seizoenale concentratie.

In het model is een peilverschil van 5 m gemodelleerd met een watervoerende laag van 1500 m breed en 22 m diep met een hydraulische permeabiliteit van 20 m/dag met een grondwaterstijghoogte in het achterland van 0m. De wel is gemodelleerd op 500 m afstand van de rivier in een deklaag met een weerstand van 30.000 dagen en een dikte van 3m.

Een voorbeeld tracer werd in de rivier met een hoge concentratie van 100 dagen gemodelleerd met een concentratie van 1000mg/l. De initiële achtergrondconcentraties van deze stof in de watervoerende laag werden als 0 mg/l gemodelleerd. Op basis hiervan werden drie scenario's gerund voor een simulatietijd van 15 jaar (5500 dagen):

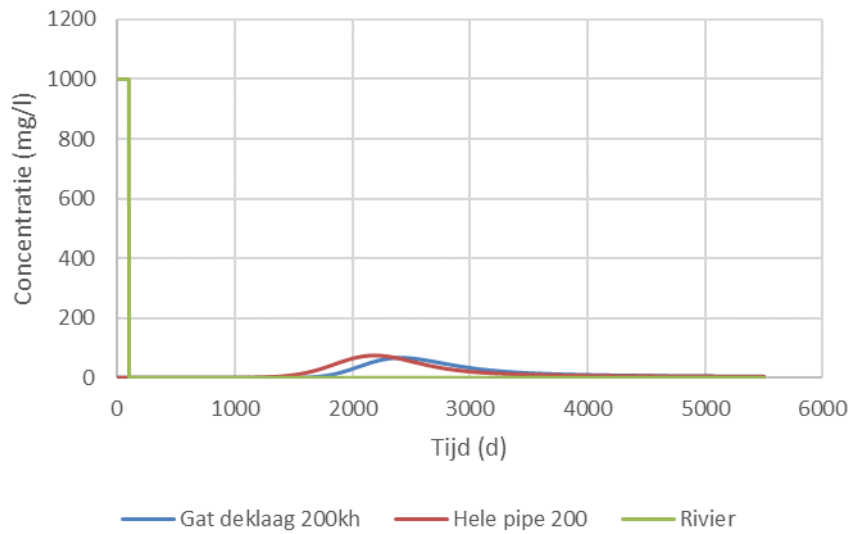
- A. Wel en pipe met een permeabiliteit van 200 m/dag (10* permeabiliteit watervoerende laag)
- B. Wel en pipe met een permeabiliteit van 2000 m/dag (100* permeabiliteit watervoerende laag)
- C. Wel en pipe met een permeabiliteit van 2000 m/dag (1000* permeabiliteit watervoerende laag)

De simulatie laat zien dat een volledige pipe (dus een open verbinding tussen de rivier en de wel) met een permeabiliteit 10 keer hoger dan de watervoerende laag, erin resulteert dat de tracer in de wel na ongeveer 1500 tot 2500 dagen in de wel aankomt. Dit is dus na 4 tot 7 jaar. Dit komt overeen met een reissnelheid van ongeveer 0,2 tot 0,3 m/dag bij een verhoogd waterpeil in de rivier van 5 m boven het polderpeil. De concentratie is sterk verdund: ongeveer 10 keer zo laag als de oorspronkelijke concentratie (Figuur 87).

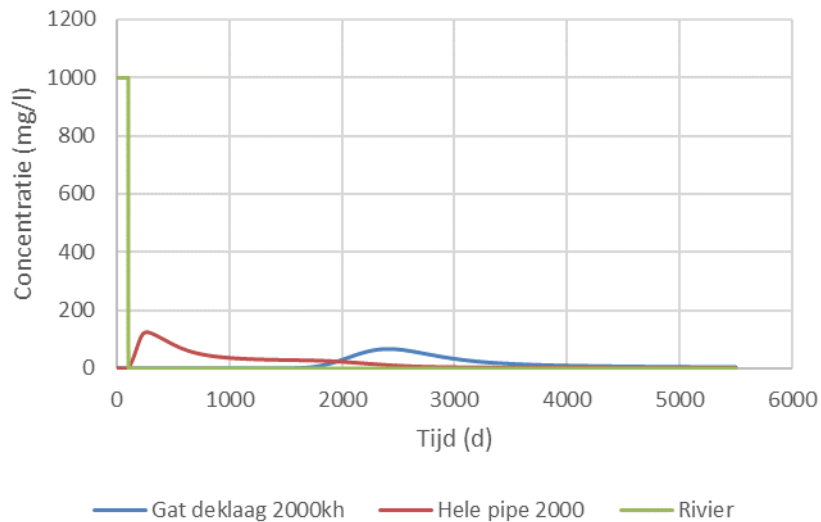
Indien de pipe een permeabiliteit heeft van 2000 m/d (100 keer zo hoog als de watervoerende laag), duurt het bij een volledige verbinding tussen de rivier en de wel 76 dagen voordat de piek van de stof wordt gemeten in de wel. Dit komt overeen met een stroomsnelheid van 6,5 m per dag. Indien er alleen een gat in de deklaag met die permeabiliteit zit, resulteert dat erin dat de tracer meer dan 2000 dagen later in de wel komt (Figuur 88).

Een volledige pipe met een permeabiliteit 1000 keer sneller dan de watervoerende laag (een soort lege buis) zou betekenen dat de tracer 7 dagen na de input in de wel zou

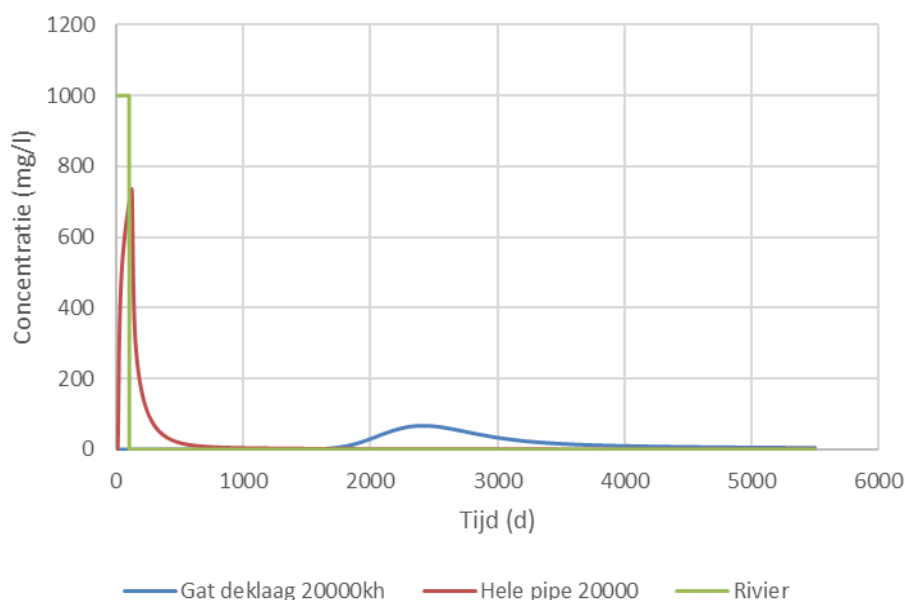
voorkomen met zeer beperkte verdunning (Figuur 89). Indien er alleen een gat in de deklaag zou zijn, komt de stof opnieuw pas na 2000 dagen in de wel aan.



Figuur 87. Gesimuleerde concentraties van de voorbeeld tracer over tijd in scenario A; pipe en wel 10 keer zo snel als de watervoerende laag. De blauwe lijn laat de concentraties in een wel zonder pijp zien, de rode lijn presenteert de gesimuleerde concentraties in de wel met een volle pijp en de groene lijn laat de concentraties van de tracer in de rivier zien.



Figuur 88. Gesimuleerde concentraties van de voorbeeld tracer over tijd in scenario B; pipe en wel 100 keer zo snel als de watervoerende laag. De blauwe lijn laat de concentraties in een wel zonder pijp zien, de rode lijn presenteert de gesimuleerde concentraties in de wel met een volle pijp en de groene lijn laat de concentraties van de tracer in de rivier zien.



Figuur 89. Gesimuleerde concentraties van de voorbeeld tracer over tijd in scenario C; pipe en wel 1000 keer zo snel als de watervoerende laag. De blauwe lijn laat de concentraties in een wel zonder pijp zien, de rode lijn presenteert de gesimuleerde concentraties in de wel met een volle pijp en de groene lijn laat de concentraties van de tracer in de rivier zien.

Deze modelresultaten laten zien dat er eigenlijk altijd een sterke verdunning en vertraging van de rivier tracers verwacht kan worden met uitzondering van wanneer een volledige pipe vanuit de rivier met extreme hoog permeabiliteit optreedt. In dit geval zouden de tracer concentraties wat vertraagd maar nog redelijk hoog in de wel te zien zijn, zoals verwacht.

7.6 Conclusies

Om de geohydrologische en geochemische resultaten beter te begrijpen zijn modellen gebruikt om de grondwatersituatie te simuleren. Deze modelsimulaties hebben geleid tot de volgende conclusies:

[1] De simulaties van geohydrologische 2D modellen hebben laten zien dat er in situaties zonder wel sprake is van lange reistijden vanaf infiltratie tot aan waar de wel zich bevindt. Het model van Dodewaard heeft laten zien dat water bij een stationaire toestand en verhoogd peil minimaal 400 dagen onderweg. Het model van Culemborg heeft laten zien dat de reistijd minimaal 300 dagen is. De praktijk is echter dat stationaire hoogwaters langs de rivieren niet bestaan en hoogwaters niet langer duren dan 1 tot 2 weken met een piek van slechts enkele dagen. Het meten van heel jong water, kan daarmee een indicatie zijn dat er iets mis is.

[2] Voor het modelleren van piping zijn 2D modellen ongeschikt. Piping en de radiale toestroming naar een wel zijn namelijk een 3D toestromingsprobleem naar één geconcentreerd punt. Wanneer toch een 2D model wordt gebruikt, wordt bij hetzelfde drukverschil tussen rivierwaterstand en binnendijkse maaiveld de ontwikkeling van de pipe in de richting van de waterkering verkeerd voorgesteld en daardoor mogelijk overschat t.o.v. een 3D schematisatie.

[3] Om het debiet in een wel te krijgen, is een groot toeleverend oppervlak nodig. Zelfs bij een grote doorlatendheid (20 m/d) en een groot drukverschil (6 m) komt het water bij een debiet uit de wel van 10 m³/dag uit een gebied onder de dijk van 1000 m². Bij een dikte van het watervoerend pakket van 10 m, stroomt dus al het water onder 100 strekkende meter dijk, naar de wel toe.

[4] Enkel in de directe nabijheid van de wel nemen de stroomsnelheden toe. Indien door sterke cohesie van het bodemmateriaal van de deklaag de diameter van de pijp in de grond klein blijft, kan het debiet maar zeer beperkt toenemen. Wel ontwikkelt zich een holte of caverne onder de deklaag. Deze bevinding lijkt te worden gestaafd door praktijkwaarnemingen.

Uit de radiale toestroming van water naar een wel (en de eventueel aanwezige pipe) volgt dat op een afstand van enkele meters rond een wel (en de eventueel aanwezige pipe) de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket overal nagenoeg gelijk is.

[5] Indien er sprake is van een polder met permanente kwel, vanwege een permanent rivierwater peil wat hoger is dan het maaiveld niveau in de polder, maar wel lager dan de uiterwaarden, is het te verwachten dat zich onder de dijk en in de droge uiterwaarden in de bovenlaag van de watervoerende laag geïnfiltreerd regenwater bevindt, daaronder zal zich geïnfiltreerd rivierwater bevinden.



Conclusies

8.1 Algemeen

De doelstelling van dit project was om te bepalen of met een combinatie van veldwaarnemingen, geochemische analyses en geohydrologische berekeningen inzicht te krijgen in het functioneren van wellen en het ontstaan van piping. Hierbij speelden de volgende vragen:

- Waarom ontstaat op de ene plek wel en de andere plek geen wel?
- Wanneer groeit een wel door naar piping?
- Wanneer is een wel of piping in evenwicht en wanneer groeit ie door? en
- Is de ontwikkeling van een wel en een pipe meetbaar?

Bij het uitvoeren van het onderzoek is vooral gekeken naar de geohydrologische en geochemische veranderingen van het water rondom een wel. Hoewel zich (helaas) geen hoogwater (waterniveau bij Lobith boven de 14 m t.o.v. NAP) heeft voorgedaan binnen de looptijd van het project, heeft het onderzoek toch inzicht rond het functioneren van wellen opgeleverd.

Ten aanzien van de bovenstaande 4 vragen kan het volgende worden geformuleerd:

Waarom ontstaat een wel ergens?

Wellen ontstaan dikwijls (maar niet altijd) in een watergang, omdat daar de deklaag het dunst is. Als gevolg van de riviermorfologie en ruilverkaveling kan dit echter ook midden in een weiland zijn. Wellen kunnen echter ook ontstaan door verstoringen van de deklaag door menselijk handelen, bijvoorbeeld graafwerkzaamheden, het trekken van damwanden of palen en het (niet) verwijderen van bronbemaling in polders.

Wanneer is een wel (met of zonder pipe) in evenwicht en wanneer ontwikkeld deze zich verder?

Op basis van de veldwaarnemingen bij actieve wellen is duidelijk geworden dat zelfs (bijna) permanent actieve wellen (meer dan 50 jaar actief) soms zandmeevoerend worden (zie bijvoorbeeld de al zeer lang actief zijnde wellen bij Lingewaal, Culemborg en Eck en Wiel). Het evenwicht (wel of niet meevoeren van zand uit de ondergrond) hangt na opbarsting voornamelijk af van het verval, welke bepalend is voor het debiet. Dit evenwicht lijkt zich elk hoogwater opnieuw in te stellen. De stroomsnelheid in de opening van de wel is hierbij bepalend of er wel of geen zand mee wordt gevoerd. Hoe groter de stroomsnelheid door de opening, hoe meer zand kan worden meegenomen. De camera inspectie heeft laten zien dat er zich bij Lingewaal een holte bevond onder de wel. Dit komt overeen met de 3D-modelberekeningen: deze hebben laten zien dat het te verwachten is dat er zich een holte ontwikkelt.

Is de ontwikkeling van een wel of pipe meetbaar

De conclusie van de metingen is dat het erg lastig is om de ontwikkeling van een wel of pipe te meten.

Het onderzoek heeft zich vooral gefocust op de laatste vraag, het meten aan een wel. Voor het uitvoeren van metingen zijn binnen het project 11 locaties geselecteerd: 3

langs de Neder-Rijn/Lek en 8 langs de Waal. Op deze locaties is geohydrologische monitoringsapparatuur geïnstalleerd waarmee druk, temperatuur en geleidbaarheid is gemeten. Tevens zijn watermonsters genomen voor geochemische monitoring. Daarnaast zijn geohydrologische modellen gebruikt om de monitoringsresultaten in het juiste kader te kunnen plaatsen. Deze hebben geleid tot een 17-tal conclusies.

8.2 Geohydrologische conclusies

Hoewel gedurende de looptijd van het project zich geen significant hoogwater (Een Rijnwaterniveau bij Lobith wat hoger is dan 14 m) heeft voorgedaan heeft het project veel extra inzichten opgeleverd (zie ook hoofdstuk 5).

[1] Als eerste is een indeling gemaakt in drie soorten wellen:

- Categorie 1: wellen in de buurt van een hoger gelegen gestuwde rivier met een redelijk constante waterstand. De deklaag is hier dun (minder dan 2 m) en de wellen geven een continu debiet (Culemborg en Eck en Wiel);
- Categorie 2: wellen met een gemiddelde rivierwaterstand onder het binnendijkse maaiveld. De rivier vertoont flinke fluctuaties in waterstand. De deklaag achter de dijk is hier dun (minder dan 2 m) en de wellen geven enkel water bij hoge rivierwaterstanden (waarschijnlijk boven het niveau 14 m bij Lobith). Het debiet varieert met de rivierwaterstand (Doornenburg, Gendt, Dodewaard en Tiel);
- Categorie 3: wellen met een gemiddelde rivierwaterstand gelijk aan en boven het binnendijkse maaiveld. De rivier vertoont beperkte variatie in de waterstand en de deklaag is hier dik (meer dan 4 m). Alleen de wel bij Groot Ammers geeft geen water, de andere 4 wellen geven continu water. (Lingewaal, Herwijnen, Vuren, Dalem en Groot Ammers).

Deze indeling in categorieën geeft ook de verklaring waarom de wellen altijd actief zijn of niet actief zijn: hoe het waterpeil van de rivier zich verhoudt tot het maaiveldniveau in het achterland is hierbij een zeer belangrijke factor.

[2] Deze indeling in 3 categorieën blijkt goed bruikbaar bij het interpreteren van de verschillende typen geohydrologische en geochemische metingen. De waterstanden in de rivier t.o.v. de hoogte van het binnendijkse maaiveld (c.q. waterstand in de teensloot) zijn immers de drijvende kracht van het al dan niet actief zijn van de wellen. De afwezige, grote en beperkte waterstandsvariatie bij respectievelijk categorie 1, 2 en 3 maakt dat hier de wellen respectievelijk altijd continu, alleen bij zeer hoog water of continu actief zijn met wisselende debieten.

[3] Hysteresis-grafieken van de grondwaterstijghoogte versus de rivierwaterstanden t.o.v. het binnendijkse maaiveld (c.q. waterstand van de teensloot) leveren een beter begrip op rondom het functioneren van de wellen.

Afhankelijk van of er sprake is van een permanente actieve of een af en toe werkende wel liggen de metingen in een ander kwadrant: respectievelijk kwadranten A en B of de kwadranten A, B en C. Daarnaast geeft ook de vorm van de puntenwolk inzicht in hoe 'goed' de stijghoogte onder de deklaag de naastgelegen rivierwaterstanden volgt. Indien er sprake is van een dikke deklaag op geringe afstand van de nabijgelegen rivier, waarbij de rivierwaterstand boven de onderkant van de deklaag staat (en er dus sprake is van stijghoogten in het watervoerend pakket), lijkt steeds sprake te zijn van een lineaire relatie tussen stijghoogte en rivierwaterstand. Als de rivierwaterstand onder de deklaag uitzakt, of er geen sprake is van een goede weerstandsbiedende deklaag, wordt de spreiding van de puntenwolk veel groter: andere processen gaan dan een rol spelen, zoals infiltratie van neerslag.

[4] De temperatuur- en geleidbaarheidsmetingen hebben laten zien dat deze een nuttige aanvulling zijn op het begrip van het geohydrologische systeem, naast de metingen van

de stijghoogte van het grondwater en de rivierwaterstanden. Wanneer continu kwel optreedt variëren de temperatuur en de geleidbaarheid nauwelijks. Daar waar soms sprake is van kwel en soms sprake is van inzijging van regenwater, is de variatie in temperatuur en geleidbaarheid van het grondwater veel groter. Bij de opschaling van de hysteresis grafieken naar andere gebieden kunnen deze metingen (temperatuur wordt altijd gemeten als de druk met een automatische druksensor wordt gemeten) tevens worden gebruikt als controle van de grondwatersituatie.

[5] Een minimum debiet dat uit een wel is gestroomd kan worden geschat met de wet van Stokes, de diameter van de wel en de 80% en 90% grootste zeeffractie.

[6] Uit de camera inspectie van 3 wellen is gebleken dat hier de diepte van de wel reikt tot iets onder de deklaag. Op de bodem van 1 van de wellen ligt zwaarder dan wel groter materiaal dat meegevoerd kan worden zodra de stroomsnelheid toeneemt. Onder in de wel is niet 1 'pipe' haaks op de dijk, maar meerdere kleine openingen waaruit water stroomde zichtbaar die te klein waren voor de camera. Aanbevolen wordt om meer camera inspecties uit te voeren, met kleinere camera's met een flexibele kop en een visiooglens.

8.3 Geochemische conclusies

Het onderzoek naar de geochemische variatie rondom een wel heeft het volgende opgeleverd (zie hoofdstuk 6).

[7] De geochemische samenstelling van het grondwater is een goede tracer om de verblijftijd van het water te bepalen. Het vinden van de juiste tracer was echter nog niet makkelijk. In de water-database van Rijkswaterstaat bevinden zich 99 parameters die zo frequent gemeten worden dat ze als tracer gebruikt zouden kunnen worden. Echter, geen enkele van deze 99 stoffen vertoont een langjarige trend. Dit komt voornamelijk doordat de Rijn - met horten en stoten - steeds schoner is geworden.

[8] Wel zijn er stoffen met een sterke seizoensfluctuatie, maar deze zijn niet geschikt als tracer omdat de concentratie in de bodem sterk verandert als gevolg van allerlei bodemprocessen.

[9] Een kansrijke categorie als mogelijke tracer zijn de redox parameters, waarbij dan vooral de combinatie van stoffen interessant is. Als bijvoorbeeld mangaan eerst in grote mate aanwezig is en gedurende een hoogwater verdwijnt; of dat nitraat eerst niet aanwezig is en daarna wel, dan zijn dit sterke indicatoren dat er relatief jonger water (water met een kortere verblijftijd in de ondergrond) uit de wel stroomt. Geohydrologisch begrip van de situatie ter plaatse is vervolgens nodig om deze verandering te verklaren.

[10] Uit de analyse van de watermonsters blijkt dat het water dat uit de wellen komt, gereduceerd water is en dat (mogelijk) geen volledige pipe gevormd is tussen rivier en wellen. Zelfs als deze pipe wel gevormd is, maakt de drainerende werking van de pipe dat water wordt aangetrokken en er menging optreedt waardoor de resulterende redox status weer gereduceerd wordt.

[11] De categorie indeling (zie ook conclusie [1]) in combinatie met de hysteresis grafieken (zie conclusie [3]) is ook een hulpmiddel om het geochemische gedrag in het geohydrologische kader te kunnen plaatsen. In dijklichamen kan er sprake zijn van inzijging. Dit resulteert in een 'regenwaterlens' in en onder de dijk: dit water heeft een regenwatersignatuur t.o.v. het geïnfilterde rivierwater.

In het bovenstroomse deel van de Waal (categorie 2) is het grootste deel van de tijd sprake van inzijging, waardoor het grondwater bestaat uit ondiep regenwater met daaronder water wat meer een rivier signatuur heeft.

[12] Hoewel de samenstelling van het grondwater (hydrochemie) dus een goede indicator is om het water te karakteriseren en daarmee de leeftijd aan te geven, maken de geohydrologische aspecten in combinatie met de verschillende door elkaar heen spelende processen een eenduidige analyse zeer lastig. De variatie in maaiveld, slootdiepte, polderpeilen en rivierstanden gecombineerd met variatie in deklaagdiktes, deklaagweerstand en heterogeniteit van watervoerende lagen maken dat de samenstelling van het grondwater afhankelijk is van zeer veel verschillende factoren en het erg lastig is om een eenduidige en simpele indicator te identificeren om in het veld het voortschrijden van de wel te kunnen bepalen.

8.4 Modelmatige conclusies

De modelsimulaties om de situatie rondom wellen beter te begrijpen heeft het volgende opgeleverd (zie hoofdstuk 7).

[13] De simulaties van wel met geohydrologische 2D modellen hebben laten zien dat er sprake is van lange reistijden vanaf infiltratie tot het uittreepunt in de wel. Hierbij geldt: hoe dikker de deklaag, hoe langer het water onderweg is. Het model van Dodewaard heeft laten zien dat water bij een stationaire toestand en verhoogd peil minimaal 400 dagen onderweg. Het model van Culemborg heeft laten zien dat de reistijd minimaal 300 dagen is. De praktijk is echter dat stationaire hoogwaters niet bestaan en hoogwaters niet langer duren dan 1 tot 2 weken met een piek van slechts enkele dagen. Het meten van heel jong water, kan daarmee een indicatie zijn dat er iets mis is.

[14] Voor het modelleren van piping zijn 2D modellen ongeschikt. Piping en de radiale toestroming naar een wel zijn namelijk een 3D toestromingsprobleem naar één geconcentreerd punt. Wanneer toch een 2D model wordt gebruikt, wordt bij hetzelfde drukverschil tussen rivierwaterstand en binnendijkse maaiveld de ontwikkeling van de pipe in de richting van de waterkering verkeerd voorgesteld en daardoor mogelijk overschat t.o.v. een 3D schematisatie.

[15] Om het debiet in een wel te krijgen, is een groot toeleverend oppervlak nodig. Zelfs bij een grote doorlatendheid (20 m/d) en een groot drukverschil (6 m) komt het water bij een debiet uit de wel van 10 m³/dag uit een gebied onder de dijk van 1000 m². Bij een dikte van het watervoerend pakket van 10 m, stroomt dus al het water onder 100 strekkende meter dijk, naar de wel toe.

[16] Enkel in de directe nabijheid van de wel nemen de stroomsnelheden toe. Indien door sterke cohesie van het bodemmateriaal van de deklaag de diameter van de pijp in de grond klein blijft, kan het debiet maar zeer beperkt toenemen. Wel ontwikkelt zich een holte of caverne onder de deklaag. Deze bevinding lijkt te worden gestaafd door praktijkwaarnemingen.

[17] Uit de radiale toestroming van water naar een wel (en de eventueel aanwezige pipe) volgt dat op een afstand van enkele meters rond een wel (en de eventueel aanwezige pipe) de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket overal nagenoeg gelijk is.

9

Impact van dit onderzoek voor piping en aanbevelingen voor vervolgstappen

9.1 Impact van dit onderzoek voor piping

Het onderzoek naar wellen heeft veel conclusies opgeleverd op het vlak van geohydrologie, geochemie en modellering, zoals weergegeven in hoofdstuk 8. Op basis hiervan zijn de volgende samenvattende bevindingen geformuleerd:

[18] Geohydrologische monitoring kan belangrijke informatie geven over wanneer en waarom een wel op een zeker moment actief wordt. Hierbij gaat het vooral om stijghoogtemetingen in relatie tot de rivierwaterstand middels hysterese grafieken en temperatuurmetingen van het grondwater en temperatuurmetingen van het oppervlaktewater in de zomer en de winter (in de herfst en het voorjaar zijn de temperatuurverschillen tussen grondwater en oppervlaktewater over het algemeen te beperkt).

Camera inspecties van de wel kunnen hierbij aanvullend inzicht geven over wat er in de wel gaande is.

[19] De geohydrologische en geochemische monitoring kan geen eenduidig beeld geven over het al dan niet voortschrijden van de vorming van een pipe. De reden is het functioneren van het geohydrologische systeem in en rond een wel en/of piping. 1) Kwel van grondwater en infiltratie van regenwater geochemisch verschillen sterk, waardoor de lokale geohydrologische situatie bepalender is dan de stroming van de wel/piping. 2) Een eventuele pipe zal functioneren als een drain, waarbij elke meter pipe extra grondwater (met een andere leeftijd) aantrekt. Het water wordt hierdoor een mix van verschillende typen water (een mix van jong en oud grondwater, regenwater en rivierwater. Waardoor het aandeel rivierwater (maat voor de leeftijd en voortschrijding van de pipe) niet onderscheidend is.

[20] Om de impact van een wel modelmatig te bepalen, is een 3D modelschematisatie noodzakelijk: een wel is een 3D situatie en de impact van een wel moet dus ook met een 3D modellering worden bepaald; indien hiervoor een 2D model wordt gebruikt, wordt de impact van een wel overschat.

Het gebruiken van een 2D modellering leidt automatisch tot de conclusie dat er een grote kans op de vorming van een pipe, terwijl op basis van een 3D modelering de vorming van een caverne te verwachten is.

9.2 Aanbevelingen

De getrokken conclusies, zoals weergegeven in hoofdstuk 8, laten zien dat een aantal onderzochte onderdelen moeten worden doorgezet, omdat hier kansen liggen voor kennisvergroting van piping, die mogelijk uiteindelijk kunnen leiden tot besparingen binnen dijkversterkingsprogramma's.

[21] In de afgelopen periode zijn geen significante hoogwaters gemeten. Aanbevolen wordt dan ook om (op een selectie van de wellen) de geohydrologische metingen in de peilbuizen nog enige tijd door te zetten. Hiermee kunnen de hysteresis grafieken ook worden uitgebreid naar de zee hoge rivierafvoeren, wanneer deze zich voordoen. De wijze waarop de grondwaterstijghoogte reageert op de rivier laat zien hoe sterk de invloed van de wel is op het grondwater en daarmee een indicatie voor het debiet van de wel en daarmee ook voor de mate waarin deze zich al dan niet aan het vergroten is.

[22] Aanbevolen wordt de hysteresis-grafieken methodiek toe te passen bij andere projecten binnen het Rivierengebied, maar ook in het stroomgebied van de IJssel. Hierbij is het interessant om te zien wanneer de grondwaterstanden in kwadrant D uitkomen (te verwachten bij regionale stroming richting de rivier).

Bij wellen waarbij de grondwaterstijghoogte in relatie tot de rivierwaterstand zich voornamelijk in kwadrant D bevindt (regionale stroming dominant), zal zich minder snel een pipe richting de rivier vormen, dan bij wellen waarbij de grondwaterstijghoogte in relatie tot de rivierwaterstand zich voornamelijk in de kwadranten A en B bevindt (rivierwaterstand dominant).

[23] Daarnaast is het van belang om te kijken wat er gebeurt bij wellen waar de hysteresis grafiek een zeer grote spreidingslengte heeft (Kwadranten A, B en C). Hierbij draait de stroming in de ondergrond om (van kwel naar infiltratie in het achterland en van een inzijgende rivier naar een drainerende rivier). De vraag is wat dit betekend voor een eventueel gevormde pipe, blijft deze open, of slibt deze na een bepaalde tijd dicht.

[24] Indien zich een extreem hoog water voordoet kan worden overwogen om debietmetingen te herhalen op de locaties waar nu ook metingen zijn uitgevoerd (Lingewaal en Eck en Wiel). Bij Lingewaal kan dit vrij makkelijk worden herhaald, omdat deze kan worden uitgevoerd in de benedenstreams gelegen duiker.

Met name de vraag hoe de debieten bij een steeds groter waterstandverschil in de tijd toenemen is interessant. Een lineaire dan wel exponentiele toename bepaald sterk welke impact het debiet heeft op de ondergrond: een exponentiele toename van het debiet, betekend ook dat een wel een exponentieel toenemende capaciteit heeft om zand mee te voeren.

[25] Aanbevolen wordt om (indien mogelijk) bij wellen, die in de teensloot direct achter de dijk liggen, camera-inspecties uit te voeren om te bepalen wat er zich onderin de wellen afspeelt. Tevens kan hiermee worden beoordeeld of de nu uitgevoerde camera-inspecties representatief zijn. Deze metingen kunnen wellicht een paar keer worden herhaald om te zien hoe de holte onder de deklaag zich ontwikkelt.

[26] Om te achterhalen waarom een wel specifiek op een locatie ontstaat is meer gedetailleerd inzicht nodig in de bodemlagen in de nabijheid van deze wel. Om dit inzicht te verkrijgen, zonder de bodem te verstoren met het risico op een nieuwe wel, kan geofysica gebruikt worden. Uitvoering van niet-bodem verstorende elektromagnetische metingen met een Dualem kan gedetailleerde informatie opleveren over de diepten en diktes van klei, zand en grindlagen, met een nauwkeurigheid tot 25 cm. Mogelijk dat ook CVES-metingen van hele korte afstand (40 m, 7 m diep; 20 m, 3,5 m diep) hier informatie kunnen aanleveren.

[27] Sommige wellen zijn al lange tijd actief. Zo is de wel bij Lingewaal al meegenomen in het onderzoek naar wellen in 1977. In het bijbehorende onderzoeksrapport staat dat “deze wel reeds zeer lang ter plaatse bekend was en vrijwel altijd werkt”. Deze wel voert zodra er overdruk is water af en voert - als de druk verder toeneemt - ook zand mee. Geohydrologische in combinatie met archeologische ontgraving van deze wel zou nieuw licht kunnen laten schijnen op waar het zand vandaan komt en of dit al tot een pipe heeft geleid, dan wel een ondergrondse holte.

[28] Vervolgonderzoek met 3D modellen is nodig om te bepalen wat er gebeurt rondom het ontstaan van wellen en het ontstaan van een caveerne. Hierbij zijn 2 onderzoeksaspecten van belang:

- bepaling hoe een wel zich ontwikkelt als zand verdwijnt, wordt het een holte of een caveerne en treedt er al dan niet een evenwichtssituatie op
 - welke invloed heeft de afstand tot de rivier hierin: hoe dichterbij de rivier, hoe dominant de rivier is. Onder welke omstandigheden is de rivier zo dominant, dat de vorming van een pipe waarschijnlijker wordt dan een caveerne. Dit kan van invloed zijn op de maximum breedte van een pipingberm.
- Bij dit onderzoek moet de invloed van anisotropie worden meegenomen.

Literatuur

Acacia Water, 2008, Aanvullend veldonderzoek Groot Mijdrecht Noord

Appelo, C., Postma, D. 2005, Geochemistry, groundwater and pollution

Barends, F.B.J., Uffink, G.J.M., 2002 Groundwater mechanics, flow and transport, TU Delft

Beek Vera M. van, 2015, Backward erosion piping, initiation and progression

Centrum voor onderzoek waterkeringen, februari 1978, Onderzoek zandmeevoerende wellen Tielerswaard, S-77.059

Goudriaan R., de Louw P., Kramer M., Lokaliseren van zoute wellen in de Haarlemmermeerpolder, H2O/03-2011, p. 29-32

Gouw en Erkens, 2007, Architecture of the Holocene Rhine-Meuse delta

Ilka Wallis, Henning Prommer, Vincent Post, Alexander Vandenbohede, and Craig T. Simmons, 2012, Simulating MODFLOW-Based Reactive Transport Under Radially Symmetric Flow Conditions, Ground Water 51, no 3: 398-413, doi: 10.1111/j.1745-6584.2012.00978.x

Jonker, H, Volkering F. 2006. Kennisdocument Isotopen analyse bij onderzoek naar bodem en grondwaterverontreinigingen.

Langevin, C.D. 2008. Modeling axisymmetric flow and transport. Ground Water 46, no. 4: 579-590.

Louw P.G.B. de, Oude Essink G.H.P., Stuyfzand P.J., Zee, S.E.A.T.M. van der, Upward groundwater flow in boils as the dominant mechanism of salinization in deep polders, The Netherlands, 2010

Louw P.G.B. de, Bohede A.Van den, Werner A.D., Oude Essink G.H.P., Natural saltwater upconing by preferential groundwater discharge through boils, 2013

Mendizabal, I., Stuyfzand, P., 2009, Guidelines for interpreting hydrochemical patterns in data from public supply well fields and their value for natural background groundwater quality determination. Journal of Hydrology 379, 151-163

Mook, W., 2000, Environmental isotopes in the hydrological cycle - Principles and applications. Technical documents in Hydrology 39.

Reijnders, H., van Drecht, G., Prins, H., Bronswijk, J., Boumans, L., 2004, De kwaliteit van ondiep en middeldiep grondwater in Nederland in het jaar 2000 en verandering daarvan in de periode 1984-2000. Rapport 714801030, RIVM, Bilthoven

Royal Haskoning, Acacia Water, WL/Delft hydraulics, 2008, Grondwateronderzoek Verkenning Water Groot Mijdrecht Noord tweede fase

Schwartz, F. W. (1998). Physical and chemical hydrogeology (Vol. 1). John Wiley & Sons Inc.

Taal, L.J., 2015, De relatie tussen zandmeevoerende wellen en de sedimentologische opbouw van de ondergrond in het centrale Rivierengebied van Nederland

Bijlagen

- Bijlage 1. Doorsneden van Gouw en Erkens
- Bijlage 2. Gegevens van 40 groslijst wel locaties
- Bijlage 3. Verslag bezoek 40 locaties
- Bijlage 4. Resultaten 3 modellen
- Bijlage 5. Introductie karakterisatie wellen
- Bijlage 6. Karakterisatie van de locatie Culemborg
- Bijlage 7. Karakterisatie van de locatie Eck en Wiel
- Bijlage 8. Karakterisatie van de locatie Doornenburg
- Bijlage 9. Karakterisatie van de locatie Gendt
- Bijlage 10. Karakterisatie van de locatie Dodewaard
- Bijlage 11. Karakterisatie van de locatie Tiel
- Bijlage 12. Karakterisatie van de locatie Lingewaal
- Bijlage 13. Karakterisatie van de locatie Herwijnen
- Bijlage 14. Karakterisatie van de locatie Vuren
- Bijlage 15. Karakterisatie van de locatie Dalem
- Bijlage 16. Karakterisatie van de locatie Groot Ammers
- Bijlage 17. Resultaten chemische meetcampagne



van Hogendoornplein 4
2805 BM Gouda

Telefoon: 0182 - 686 424
Internet: www.acaciawater.com
Email: info@acaciawater.com