

KWR | December 2014

Praktijkproef verticale putten ten behoefte van HDDW- Dunea

versie 01

Praktijkproef verticale putten ten behoeve van HDDW-Dunea

KWR 2014.094 | December 2014

Opdrachtnummer

400530

Projectmanagers

Ir. R. Hilbrandie (Dunea), Ir. R. Salemink (V&SH), ir. J.W. Kooiman (KWR)

Opdrachtgevers

Dunea, V&SH, KWR

Kwaliteitsborgers

ir. J.W. Kooiman (KWR)

Auteurs

Ir. M.L. van der Schans (KWR), Ir. R. Rothuizen(V&SH), Dr. Ir. D.G. Cirkel (KWR)

Verzonden aan

Dit rapport is openbaar. Bedrijfsgevoelige informatie is gepubliceerd in een separate vertrouwelijke versie van dit rapport.

Dit onderzoek is mede gefinancierd uit de toeslag voor Topconsortia voor kennis en innovatie (TKI) van het ministerie van Economische zaken.



Jaar van publicatie
2014

Meer informatie

T +31 30 6069 537
E Martin.van.der.Schans@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR Watercycle
Research
Institute

KWR | September 2014 © KWR

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Samenvatting

Belangrijkste hoofdconclusie

Uit een praktijkproef met verticale HDDW-proefputten blijkt dat de techniek geschikt is voor drinkwatertoepassingen in de duinen. De techniek presteert vergelijkbaar met de referentieputten voor wat betreft alle vooraf gedefinieerde bottlenecks: (1) capaciteit, (2) zandvoerendeheid en (3) microbiologie. De resten bentoniet die in de put zijn achtergebleven hadden tijdens de duur van deze proef geen meetbare invloed. Maar pas over enkele jaren kan definitief uitsluitsel komen over lang termijn verstoppingseffecten. De grootste uitdaging bij de aanleg van een *full scale* HDDW is de verwerking van de grote hoeveelheden boorspoeling in het duin.

Inleiding en doel

Dunea investeert grootschalig in de renovatie en vervanging van de waterwinning in het duingebied Meijendel. In het kader van dit investeringsprogramma (PIM) is de afgelopen jaar onderzoek uitgevoerd naar de haalbaarheid van HDDW's.

Doel van dit onderzoek is het verder ontwikkelen en testen van bestaande HDDW-technieken voor drinkwatertoepassingen in fijnzandige aquifers. Hierbij is gericht op het in beeld brengen van risico's en oplossingen voor de grootste technische bottlenecks bij toepassing van HDDW's in fijnzandige aquifers:

1. De verwijderbaarheid van de bij HDDW noodzakelijke boorspoeling;
2. Het voorkomen van zandlevering door vermenging van omstortingsgrind met het homogene fijne duinzand; en,
3. Het risico op bacteriologische groei bij toepassing van een biologische boorspoeling in plaats van bentoniet.

Proefopzet

Kern van dit onderzoek is een proef met zes verticale proefputten nabij pan 8.3 op Meijendel.

- Drie putten zijn aangelegd met HDDW-technieken, gebruikmakend van bentoniet als boorvloeistof en een speciale spoelkop die bedoeld is om de boorvloeistof bij aanleg van het filter en omstorting weer te verwijderen.
- twee putten zijn gerealiseerd op conventionele wijze: als referentie zonder bentoniet.
- één put is volgezet met bentoniet als *worst case*.

Beperkingen van de proef zijn het kleine aantal putten en de natuurlijke variatie in de opbouw en doorlatendheid van de bodem. Dit maakt het lastig om aan te geven of er significante verschillen zijn in de prestaties van conventionele versus HDDW-technieken. Daarom is, om meer inzicht te krijgen in de toepasbaarheid van deze technieken, ook in beeld gebracht welke processen bijdragen tot bentonietverwijdering.

Resultaten en conclusies

Verwijderbaarheid boorvloeistof: het is mogelijk om grote delen van het ingebrachte bentoniet te verwijderen, zo bleek uit de proef. Achtergebleven resten hebben op korte termijn (3 maanden) geen negatieve consequenties voor de capaciteit van de put. Zelfs de worst case put heeft nog altijd de helft van de capaciteit van de referentieputten. Dit geeft aan dat de spoelkop het cruciale onderdeel is van de techniek, maar dat het ook bij een falende spoelkop mogelijk is om een beperkte onttrekkingscapaciteit te realiseren. Het trilapparaat bleek beter in staat om resten bentoniet te verwijderen dan alleen jetten of dispergeren.

Zandlevering: de HDDW en reguliere putten leveren nagenoeg geen zand na. Blijkbaar is het goed gelukt om een kunstmatige omstorting aan te leggen met de spoelkop.

Risico op Bacteriologische nagroei: bentoniet heeft geen invloed op het risico op Bacteriologische nagroei. Er zijn geen tests uitgevoerd met biologisch afbreekbare boorvloeistoffen. Dit omdat het beoogde oxidatiemiddel, Fenton's reagens, alleen veilig toepasbaar is bij lage pH's. Het aanzuren van de kalkrijke aquifer bleek dusdanig grote hoeveelheden zoutzuur te vergen, dat het praktisch gezien niet haalbaar is.

Aanbevelingen voor full scale pilot

Voor de aanleg wordt geadviseerd om gebruik te maken van de spoelkop met een configuratie zoals gebruikt in put 2.

De belangrijkste technische bottleneck bij de aanleg van een **full scale** HDDW in Meijndel is de afvoer van bentoniet en Aquaclear. Hiervoor moet een veilige en kosteneffectieve oplossing gevonden worden.

Inhoud

1	Inleiding	6
1.1	Stand van zaken ontwikkeling HDDW	6
1.2	Aanleiding: haalbaarheid HDDW voor Meijndel	6
1.3	Doelstelling en scope	6
1.4	Leeswijzer	6
1.5	Organisatie van het onderzoek en dankwoord	7
2	Proefopzet	8
2.1	Aanleg verticale proefboring	8
2.2	Aanbrengen omstorting (zie intermezzo)	9
2.3	Ontwikkelen	9
2.4	Monitoring	11
3	Resultaten	13
3.1	Verwijdering bentoniet (Figuur 3-1 A)	13
3.2	Mechanische putverstopping (Figuur 3-1 B en Figuur 3-3)	15
3.3	Chemische putverstopping:	17
3.4	Zandvoerendheid (Figuur 3-1 C)	17
3.5	Microbiologische veiligheid (Figuur 3-1 D)	18
3.6	Effectiviteit van ontwikkelmethoden (Figuur 3-5)	18
4	Milieuhygiëne en veiligheid	21
4.1	KIWA-ATA	21
4.2	Geen biologisch afbreekbare boorvloeistof	21
4.3	Afvoer bentoniet	21
4.4	Afvoer Aquaclear	21
5	Conclusies en aanbevelingen	23
5.1	Conclusies van het onderzoek	23
5.2	Advies ingebruikname proefputten voor reguliere productie	23
5.3	Aanbevelingen voor aanleg van een pilot-HDDW bij Dunea	23
Bijlage I	Toelichting op XRD-analyses	

1 Inleiding

1.1 Stand van zaken ontwikkeling HDDW

De afgelopen jaren zijn door intensieve samenwerking tussen drinkwaterbedrijven, KWR, V&SH en andere bedrijven grote stappen gezet in de ontwikkeling van horizontale putfilters, aangelegd met horizontaal gestuurd boren (HDDW = Horizontal Directional Drilled Wells). Zo is in 2010 in Nieuwegein een pilot-HDDW gerealiseerd in een grofzandige aquifer.

Door de ontwikkeling van een methode om een *in-situ* grindomstorting aan te leggen is de HDDW ook geschikt voor een breed scala aan toepassingen in fijnzandige aquifers. Hét praktijkvoorbeeld van een geotechnische toepassing in fijnzandige aquifers is de aanleg van een HDDW in de Ommelanderveedijk bij waterschap Noorderzijlvest. Deze tweede HDDW heeft echter een beperkte ontwerpcapaciteit en de gebruikte afbreekbare boorspoeling kan bij drinkwatertoepassingen leiden tot ongewenste bacteriologische nagroei. De vraag is dus **in hoeverre HDDW's met een kunstmatige omstorting voldoende capaciteit hebben voor het winnen van microbiologisch betrouwbaar drinkwater.**

1.2 Aanleiding: haalbaarheid HDDW voor Meijndel

Dunea investeert grootschalig in de renovatie en vervanging van de waterwinning in het duingebied Meijndel. In het kader van dit investeringsprogramma (PIM) is de afgelopen jaren **onderzoek uitgevoerd naar de haalbaarheid van HDDW's. Uit een *quick scan*** (Cirkel 2013) is gebleken dat de aanleg in delen van Meijndel financiële, ecologische en bedrijfsmatige voordelen biedt ten opzichte van conventionele verticale putten. Wel zijn een aantal technische bottlenecks geïdentificeerd die in onderhavige praktijkproef nader zijn onderzocht.

1.3 Doelstelling en scope

Doel van dit onderzoek is het verder ontwikkelen en testen van bestaande HDDW-technieken voor drinkwatertoepassingen in fijnzandige aquifers. Dunea wil mede op basis van dit onderzoek beslissen of ze doorgaat (*go/no go*) met een **full scale** HDDW-pilot in Meijndel.

Het onderzoek is gericht op het in beeld brengen van risico's en oplossingen rondom **technische bottlenecks bij toepassing van HDDW's** in fijnzandige aquifers. Voorafgaand aan dit onderzoek zijn de grootste bottlenecks als volgt gedefinieerd:

- De verwijderbaarheid van de bij HDDW noodzakelijke boorspoeling;
- Het voorkomen van zandlevering door vermenging van omstortingsgrind met het homogene fijne duinzand; en,
- Het risico op bacteriologische groei bij toepassing van een biologische boorspoeling in plaats van bentoniet.

1.4 Leeswijzer

In dit rapport komen achtereenvolgens de werkwijze (H2), resultaten (H3), milieuhygiënisch aspecten (H4) en conclusies (H5) aan bod.

1.5 Organisatie van het onderzoek en dankwoord

Dit onderzoek is uitgevoerd met behulp van de volgende onderaannemers:

- Haitjema (uitvoeren boringen)
- CEBO (levering boorvloeistof)
- VU Amsterdam (fractie bepaling vooronderzoek)
- TU Delft (XRD-analyses)
- Schijf (Trilnaald)
- Het Waterlaboratorium (analyses waterkwaliteit en microbiologie)
- Kasteel Meeuwsen (afvoer boorspoeling)
- Vlerk (afvoer boorspoeling)

De auteurs en projectmanagers van dit onderzoek willen de volgende **collega's** bedanken voor hun bijdrage:

- Dunea: Clemy van der Steen, Pieter Dammers, Wim Oorthuizen, Marco Kortleve, Co Laan, Ruud Draak, Henk van Amerongen, Gerard van de Kamp en Erik Spikker,
- V&SH: Arjen
- KWR: Alex Zoontjes, Kirsten Baken, Luc Hornstra

Voor deze proef is constructief overleg gevoerd met Ruud te Welscher en Frans Wetsteyn van de Inspectie Transport en Leefomgeving hoe om te gaan met de boorspoeling.

2 Proefopzet

Kern van dit onderzoek is een in de periode november 2013 t/m februari 2014 uitgevoerde proef met verticale proefputten nabij pan 8.3 op Meijendel, gebruik makend van HDDW-technieken. De aanleg van de putten en uitgevoerde metingen worden in dit hoofdstuk toegelicht.

2.1 Aanleg verticale proefboring

De proef bestaat uit het boren van 6 verticale putten, waarvan de ligging is weergegeven in bijlage III. Drie van deze putten, zijn zodanig aangelegd dat ze qua initiële boorgatwandverstopping goed vergelijkbaar zijn met een toekomstige HDDW put (put 2, 5 en 6). Daarnaast zijn als referentie twee putten volgens de reguliere methode zonder bentoniet geboord (put 1 en 4) en één worst case put die bewust volledig is volgezet met bentoniet (put 3, zie Tabel 2-1). Alle putten zijn aangelegd met een roterende zuigboring en tot een einddiepte van circa 10 m-mv. De putten 2, 3, 5 en 6 zijn na de boring ongeveer ½ dag volgezet met de bovengrens van de bentonietdoserings die door de leverancier is aanbevolen voor HDD-boren namelijk 70 kg/m³. Per put is 50 kg (700Liter) boorvloeistof ingebracht. Dit komt, na drogen op 105°C en 550 °C neer op 29,5 kg droge stof bentoniet per put. Er is gebruik gemaakt van CBOGEL OCMA geleverd door de Firma Cebo Holland uit IJmuiden.

TABEL 2-1 OVERZICHT VAN DE GEHANTEERDE BOORMETHODEN EN ONTWIKKELSTAPPEN.

Boormethode	Put 1	Put 2	Put 3:	Put 4:	Put 5:	Put 6:
Ontwikkelstappen	Referentie, (geen bentoniet)	Bentoniet, HDDW	bentoniet , worst case	Referentie (geen bentoniet)	bentoniet, HDDW	bentoniet, HDDW met
25 nov - 5 dec 2013						
Stap 1: schoonpompen	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Stap 2: dispergeren		ja	ja		ja	ja
Stap 3: jetten	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Stap 4: trillen		Ja ^	ja		ja	
5 dec - 10 feb 2014						
Stap 5: Schoonpompen *	ja	ja	ja	ja	ja	ja
10 - 15 feb 2014						
Stap 6: dispergeren	ja	ja	ja	ja		
Stap 7: disp. + trillen	ja	ja	ja	ja		
Stap 8: disp. + jetten		ja	ja			
Stap 9: disp. + trillen		ja	ja			
15 - 27 feb 2014						
Stap 10: schoonpompen **	ja	ja	ja	ja	ja	ja

(^) trilnaald met beperkte capaciteit (*)3500 m³/put gedurende 3 weken (**)4500 m³/put gedurende 6 weken

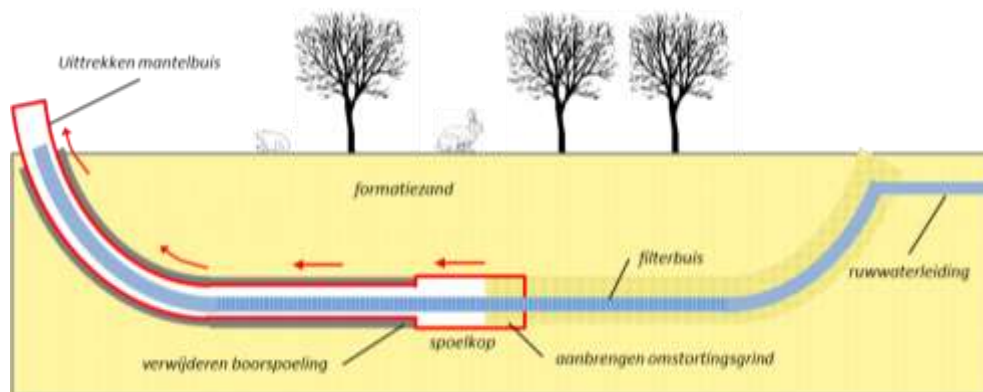
2.2 Aanbrengen omstorting (zie intermezzo)

Alle proefputten zijn voorzien van voor Meijndel gebruikelijk omstortingsgrind (type diameter tot ... mm). Bij de HDDW putten is tijdens het inbrengen van omstortingsgrind gelijktijdig gebruik gemaakt van een speciale spoelkop om de bentoniet te verwijderen. Deze spoelkop is in verschillende configuraties uitgevoerd.

Intermezzo: Aanleg HDDW middels spoelkop

Tijdens het boren wordt een zware boorvloeistof gebruikt (op basis van bentoniet of Biobore) om het boorgat stabiel te houden. Het mengsel van boorvloeistof en losgeboord formatiemateriaal vormt een waterdicht laagje op de boorgatwand waardoor het boorgat stabiel blijft. Dit laagje wordt, gelijktijdig met het aanbrengen van het putfilter en de kunstmatige omstorting, zoveel mogelijk verwijderd zodat het water

na aanleg ongehinderd vanuit de formatie de put in kan stromen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een speciaal door V&SH ontwikkelde spoelkop. Enkele cruciale onderdelen van de HDDW aanlegwijze zijn tijdens dit onderzoek nagebootst in verticale proefputten.



2.3 Ontwikkelen

Vervolgens zijn alle putten verder ontwikkeld om achtergebleven resten bentoniet en andere fijne deeltjes te verwijderen. De volgende ontwikkelmethoden zijn toegepast:

- Dispergeren met aquaclear (=een oplosmiddel voor bentoniet);
- Jetten (=hogedrukspuit);
- Akoestisch stimuleren (=trillen met een beton trilnaald, frequentie 200 Hz); en,
- Combinaties van deze methoden.

In put 1 t/m 4 zijn in februari 2014 extra ontwikkelstappen uitgevoerd. Voor het doel van deze extra ontwikkelstappen, namelijk de effectiviteit meten van trillen/ jetten in combinatie met dispergeermiddel, volstonden de metingen in vier putten. Put 5 en 6 zijn op dat moment niet extra ontwikkeld omdat deze op dat moment al bacteriologisch schoon waren en er geen noodzaak was om risico te nemen op herbesmetting. In put 5 en 6 is dientengevolge minder bentoniet verwijderd.

De putten zijn kort schoongepompt na afloop van iedere ontwikkelstap. Na de laatste ontwikkelstap is langdurig, gedurende 3 maanden schoongepompt i.v.m. bacteriologische betrouwbaarheid en om te testen of, en in welke mate putverstopping optreedt.

Intermezzo: oorzaken putverstopping en relatie met bentoniet

Ruwweg komen twee soorten putverstopping voor:

(1) ***Chemische putverstopping*** wordt veroorzaakt door een accumulatie van chemische neerslagen en/of biomassa ten gevolge van het onttrekken van verschillende typen water in freatische pakketten. Veel voorkomend bij Dunea zijn de verstopping van filterspleten met ijzer- en/of mangaan(hydr)oxides als gevolg van een redox-reactie tussen ijzer- en/of mangaanrijk grondwater met zuurstofrijk grondwater (Oasen 2006). Dit type verstopping wordt voor zover bekend niet beïnvloed door resten boorspoeling.

(2) ***Mechanische putverstopping*** treedt op doordat deeltjes de poriën in het zandpakket en op de overgang naar het filtergrind blokkeren.

De eerste oorzaak van putverstopping door deeltjes is het achterblijven van fijne materialen op de boorgatwand tijdens aanleg van de pompput. Dit kan boorspoeling zijn die wordt gebruikt bij een boring en het boorgat afdicht (filtercake). Maar ook zonder boorvloeistof komen tijdens het boren fijne deeltjes vrij uit de formatie, met name bij het doorboren van klei/veenlagen.

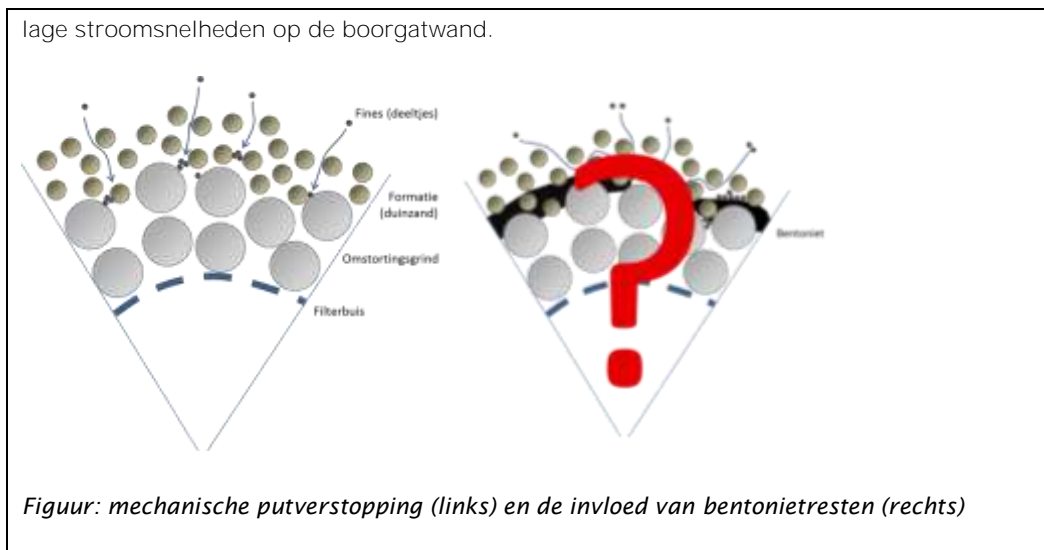
Een tweede oorzaak van mechanische putverstopping zijn deeltjes die van nature aanwezig zijn in het grondwater en tijdens het gebruik van de put blijven hangen door het vormen van 'bruggen'. Deze deeltjes zijn niet opgelost maar als "suspensie" aanwezig, en hebben een significante massa en grootte. De deeltjes worden gemobiliseerd doordat het grondwater met grote snelheid naar de put stroomt. Verstopping treedt op als er netto meer deeltjes neerslaan dan meegesleurd worden met de grondwaterstroming.

Vanuit theoretisch oogpunt zijn er een aantal processen waardoor resten boorspoeling op de boorgatwand bijdragen aan mechanische putverstopping in de gebruiksfase (de Zwart 2007):

- De stroomsnelheid is lokaal hoger waardoor de deeltjes makkelijker meestromen en de concentratie van deeltjes toeneemt. Hierdoor treedt eerder brugvorming op.
- Het open oppervlak van de boorgatwand is kleiner doordat bentoniet een deel van de poriën blokkeert.
- Er is een grotere pool van deeltjes beschikbaar in de vorm van bentoniet. Echter, over het algemeen zijn bentoniet deeltjes goed aan elkaar gebonden (vanwege hun lading) en daardoor moeilijk in suspensie te brengen.

Uit onderzoek is ook bekend dat de verstoppingssnelheid van putten die eenmaal verstopt zijn steeds sneller toeneemt (cf van Beek 2009). Het lijkt dan ook aannemelijk dat resten boorspoeling bijdragen tot snellere putverstopping. Hard bewijs ontbreekt, mogelijk ook omdat de meeste bedrijven niet met bentoniet werken.

Een nuancering is dat drinkwaterbedrijven de mechanische putverstopping de laatste jaren beter onder controle hebben gebracht door het regelmatig aan- en uitschakelen van de putten (schakelschema). Het stopzetten of omkeren van de stromingsrichting zorgt dat **beginnende "bruggen" weer losraken** (=preventieve/ curatieve maatregel). Een tweede nuancering is dat bij Dunea het risico op mechanische putverstopping in het freatisch grondwater sowieso beperkt is, vanwege de lage concentratie deeltjes (lage troebelheid) en

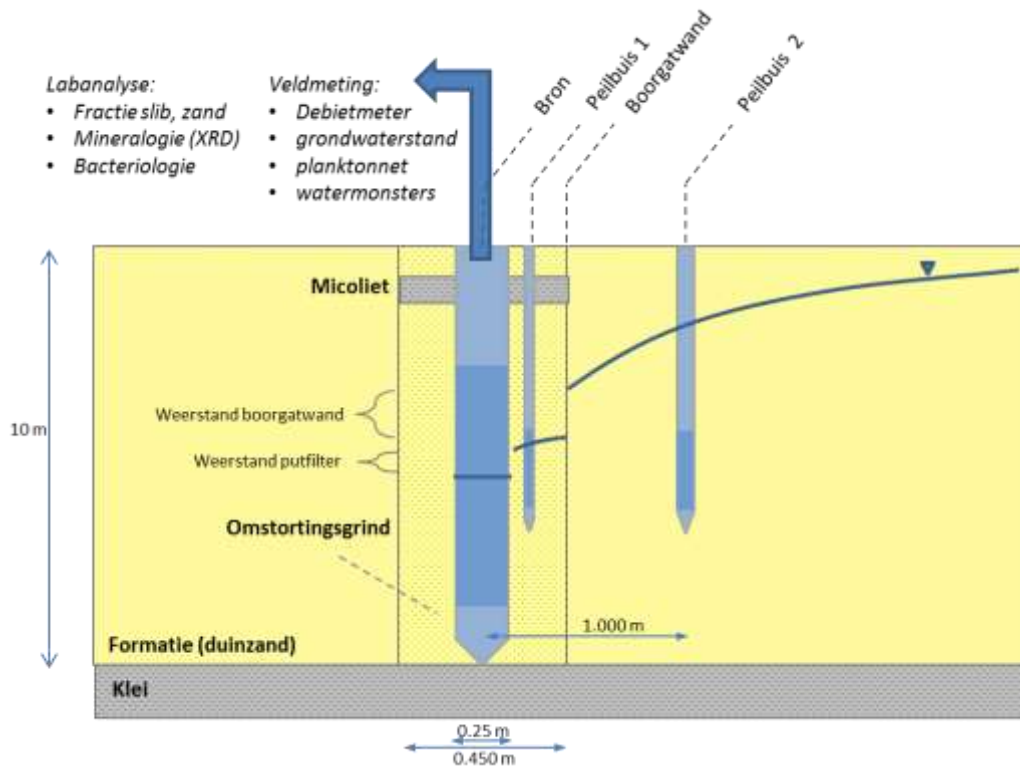


2.4 Monitoring

De volgende metingen zijn uitgevoerd:

- Vooronderzoek: 2x proefboring en analyse van korrelgrootteverdeling en Ca-gehalte.
- Bepalen van de trekkracht tijdens het uittrekken van de mantelbuis.
- De capaciteit van de put is na iedere ontwikkelstap bepaald door debieten en grondwaterstanden te meten in de put en peilbuizen in de omstorting en aquifer. Dit geeft een indicatie van de mate waarin verstopping optreedt van de putwand (door o.a. bentoniet) en de filterspleten (door ijzernerslag).
- Tijdens de aanleg en ontwikkelstappen zijn watermonsters van het onttrokken water genomen. De monsters zijn geanalyseerd op gewichtfractie (mg/l) gesuspendeerd grof zand ($> 1 \text{ mm} \approx \text{omstortingsgrind}$), fijn zand (50 tot $1000 \mu\text{m} \approx \text{duinzand}$) en slib (2 tot $50 \mu\text{m}$) door KWR. Tevens is de mineralogische samenstelling bepaald middels Röntgen Diffractie door de TU Delft. Dit alles om vast te stellen in welke mate de ingebrachte bentoniet uit de put is verwijderd.
- Met een planktonnet ($60 \mu\text{m}$), zijn volgens voorschrift van Dunea 25L gefilterd ter controle op zandvoerendeheid. Tevens is de troebelheid bepaald met de FTU veldmeter van Dunea.
- Aan het einde van de schoonpompperiode zijn watermonsters genomen om bacteriologische parameters te bepalen. De analyses zijn uitgevoerd door HWL.

FIGUUR 2-1 DWARSPROFIEL VAN PROEFPUT EN OPZET MONITORING



3 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de metingen gepresenteerd en besproken. De volgende zaken komen achtereenvolgens aan bod (conclusie tussen haakjes):

- §3.1 Bentoniet verwijdering (meest gunstig bij proefput 2).
- §3.2 Specifieke capaciteit (put 2 is vergelijkbaar met referentieputten, overige putten met HDDW techniek ongunstiger).
- §3.3 Chemische putverstopping (Putten met HDD techniek vergelijkbaar met referentie).
- §3.4 Zandvoerendheid (geen relatie met bentoniet/ HDD techniek).
- §3.5 microbiologie (geen relatie met bentoniet/ HDD techniek).
- §3.6 ontwikkelmethoden (trillen is effectiever dan jetten).

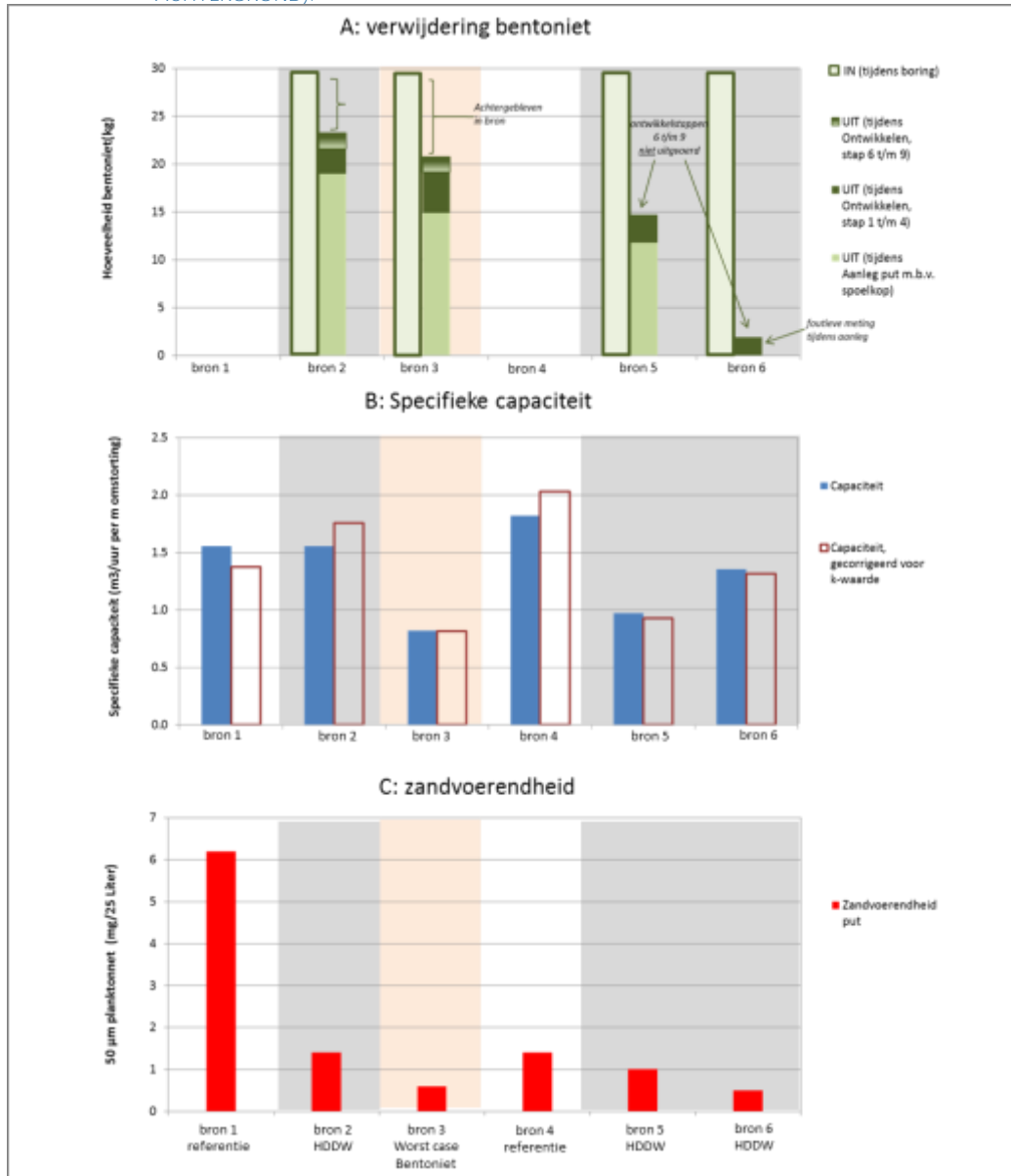
3.1 Verwijdering bentoniet (Figuur 3-1 A)

Het verwijderen van boorspoeling (bentoniet bij HDDW) is een belangrijke doelstelling bij de aanleg van putten. Resten boorspoeling kunnen delen van de boorgatwand afdichten en hiermee de capaciteit van de put verlagen. Bovendien kan een hogere stroomsnelheden optreden in delen van de boorgatwand die niet verstopt zijn, wat in theorie kan resulteren in versnelde deeltjesverstopping. Hoewel bentoniet (hoofdbestanddeel Montmorilloniet) een natuurlijk product is, beschouwt Dunea de aanwezigheid van gebiedsvreemde stoffen in het waterwingebied als onwenselijk.

Voor alle putten is een bentonietbalans opgesteld. Hieruit blijkt dat de ingebrachte bentoniet redelijk tot goed is verwijderd uit de drie HDDW-proefputten.

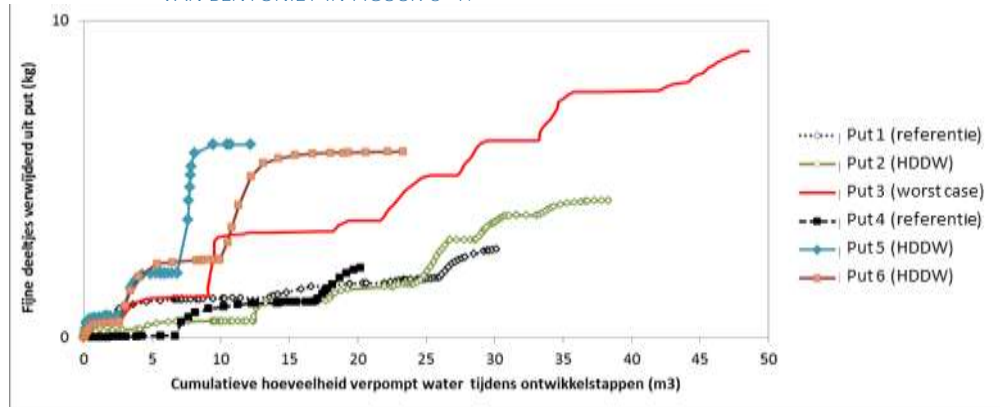
De worst case put (3) bevatte aanvankelijk veel meer bentoniet (circa 50% verwijderd) maar is ten opzichte van put 5 en 6 langer doorontwikkeld waardoor hier uiteindelijk relatief veel bentoniet is verwijderd. De hoeveelheid initieel verwijderde bentoniet is hoger dan verwacht op grond van de porositeit van het omstortingsgrind. De verklaring hiervoor is dat er na het aanbrengen van de omstorting nog een laag boorspoeling bovenop de omstorting lag. Deze laag is weggepompt.

FIGUUR 3-1 OVERZICHT VAN DE BELANGRIJKSTE RESULTATEN. DE BRONNEN 2, 5 EN 6 ZIJN MET HDDW TECHNIEK AANGELEGD (GRIJZE ACHTERGROND). BRON 3 IS ALS WORST CASE VOLGEZET MET BENTONIET (ROZE ACHTERGROND). PUT 1 EN 4 DIENEN ALS REFERENTIE (WITTE ACHTERGROND).



Er zijn echter, ook na ontwikkelen, nog resten bentoniet in de put achtergebleven. In zekere zin was het ontwikkelen ook nog niet afgerond, aangezien tijdens de laatste ontwikkelstap (stap 9) nog steeds fijne materialen zijn verwijderd uit de referentieputten, HDDW-put en worstcase put (zie Figuur 3-2).

FIGUUR 3-2 VERWIJDERING VAN FIJNE DEELTJES TIJDENS ONTWIKKELEN. LET OP, DEZE SCHATTING BETREFFEN CONTINUE METINGEN VAN TOTALE FIJNE DEELTJES OP BASIS VAN VELDMETINGEN NTU; DEZE ZIJN MINDER NAUWKEURIG DAN DE LABORATORIUMMETINGEN VAN BENTONIET IN FIGUUR 3-1.



Een kanttekening bij deze metingen is het semi-kwantitatieve karakter van de Röntgen Diffractie XRD-methode die is gebruikt om het aandeel bentoniet in het verwijderde materiaal vast te stellen. Daarnaast disfunctioneerde de debietmeter de eerst tientallen liters na aanleg doordat de bentoniet hoge dichtheden veroorzaakte in de retourstroom. Dit laatste resulteert in een onderschatting van de hoeveelheid verwijdering. De bandbreedte van de bentonietbalans is vermoedelijk meer dan tien procent.

Een tweede kanttekening betreft de hoge verwijderbaarheid van de bentoniet. Een mogelijke verklaring waarom de bentoniet in alle putten zo goed is verwijderd is dat de bentonietlaag (filtercak) relatief dun is doordat de put relatief minder geroerd is na aanbrengen van de bentoniet dan een full scale HDDW. De bentoniet/ filtercake penetreert dan minder ver in de formatie. Overigens was er bij de bentoniet putten voor start van het ontwikkelen (dus in rustsituatie zonder pomp) een stijghoogteverschil tot maximaal 0,1 m met de formatie. Dit betekent dat er na aanleg van de put zeker weerstand in de boorgatwand aanwezig was door bentoniet.

Een laatste kanttekening is dat het boorgat van de HDDW-putten vooral verbreed is net onder de stalen mantelbuis die tot 3 m onder maaiveld is aangelegd. Mogelijk bevinden zich hier de grootste resten bentoniet; buiten het bereik van het putfilter en daarmee buiten bereik van de ontwikkeltechnieken. Deze kanttekening impliceert dat de bentonietverwijdering bij een langer horizontaal filter verhoudingsgewijs hoger kan zijn

3.2 Mechanische putverstopping (Figuur 3-1 B en Figuur 3-3)

De effecten van bentonietboringen op mechanische putverstopping is bepaald door de capaciteit van de putten onderling te vergelijken. Hierbij is gekeken naar de volgende parameters:

- De **gemeten capaciteit** (zie Figuur 3-1B en Figuur 3-3 A) is het debiet (m^3/uur) gedeeld door het verschil in grondwaterstand tussen peilbuis 2 in de formatie en de bron (m) en de lengte van het putfilter beneden de grondwaterspiegel (m). Deze capaciteitsmeting wijkt af van de standaard meetmethode bij Dunea, omdat meestal geen peilbuis in de formatie beschikbaar is.
- Bij de **gecorrigeerde gemeten capaciteit** (Zie Figuur 3-1 B) is de capaciteit gecorrigeerd voor een geschatte doorlatendheid van de bodem op grond van de zandmediaan. Ter illustratie: put 2 kent de kleinste zandmediaan wat duidt op een

- relatief lage doorlatendheid, door ook rekening te houden met de doorlatendheid t.o.v. de andere putten leidt ertoe dat de gecorrigeerde capaciteit hoger uitvalt
- Het **stijghoogteverlies over de boorgatwand** (Figuur 3-3 B) is berekend door extrapolatie van peilbuizen in formatie en omstorting (met de formule van Thiem en k-waarde geschat met zandmediaan).

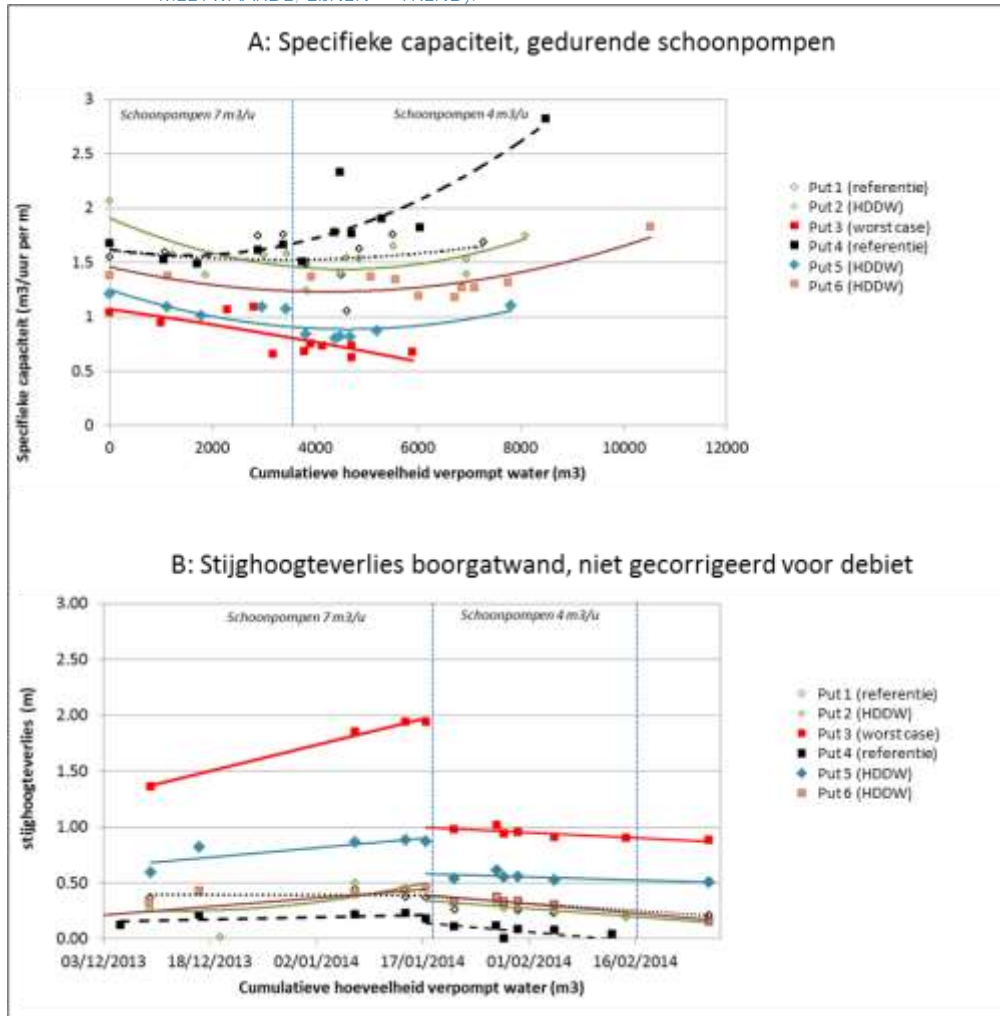
Wat opvalt, is dat de worst case (put 3) met bentoniet nog steeds ongeveer 50% van de capaciteit haalt van de referentieputten. Dit duidt erop dat zelfs bij een defecte spoelkop nog altijd een redelijke capaciteit haalbaar is. Het risico op een compleet falende HDDW lijkt hiermee dan ook beperkt.

In Figuur 3-3 A is te zien dat de capaciteit van de 3 van de 4 HDDW putten eerst daalt en vervolgens constant blijft of zelfs een stijgende trend vertoont. De dalende trend, die ook optreedt in de niet-bentonietputten, wordt vermoedelijk veroorzaakt doordat het pompdebiet met 7 m³/uur aanvankelijk veel te hoog was; meer dan 2x hoger dan gebruikelijk bij Dunea. De gelijkblijvende of stijgende trend vanaf januari 2014 duidt erop dat geen toename optreedt van mechanische putverstopping door achtergebleven bentoniet. Uitzondering vormt de worst case put waar de afnemende capaciteit duidt op toenemende weerstand op de boorgatwand door deeltjesverstopping.

Het stijghoogteverlies over de boorgatwand (zie Figuur 3-3 B) blijkt voor de referentieput 4 vergelijkbaar met HDDW-putten 2 en 6, namelijk circa 0,25 meter bij een debiet van 4 m³/uur (c-waarde = 0,02 dag). Hieruit kan geconcludeerd worden dat de verstopping van de boorgatwand bij deze putten niet noemenswaardig groter is dan bij de conventioneel geboorde putten. Ook conventionele putten hebben verstopping op de boorgatwand.

Een kanttekening bij deze conclusie is dat gedurende de proef de put regelmatig is aan- en uitgeschakeld. Dit schakelregime is erg gunstig om mechanische putverstopping te voorkomen. De vraag is of de putcapaciteit zich op de lange termijn net zo gunstig zal ontwikkelen als de putten continue water winnen in plaats van intermitterend. In het laatste hoofdstuk van dit rapport is een aanbeveling opgenomen om de monitoring van de capaciteit van deze putten de komende jaren te continueren.

FIGUUR 3-3 CAPACITEIT VAN DE PROEFPUTTEN GEDURENDE HET SCHOONPOMPEN. (PUNTEN = MEETWAARDE; LIJNEN = TREND).



3.3 Chemische putverstopping:

Chemische putverstopping door ijzeroxiden treedt op bij de filterwand door menging van oxisch en anoxisch-ijzerrijk water, en staat los van de toepassing van bentoniet. Veel putten bij Dunea kampen met chemische putverstopping. De proeflocatie ligt op een zeer ongunstige locatie; op de grens van aerobisch water uit de infiltratieplas en anaerobisch-ijzerhoudend duinwater. En mogelijk heeft het aan- en uitschakelen van de putten tijdens metingen extra bijgedragen aan verschuivingen van het redoxfront.

Alle proefputten hebben om die reden al binnen enkele maanden last van chemische putverstopping. In de haalbuis was een cm dikke laag ijzeraanlag zichtbaar. Gemiddeld trad 1 cm drukhoogte verlaging op bij de filterspleten. De hoogste drukhoogteverlagingen over het putfilter (tot maximaal 10 cm) zijn gemeten bij de referentieputten 1 en 4.

3.4 Zandvoerendheid (Figuur 3-1 C)

De zandvoerendheid van de HDDW putten en referentieputten zit in een vergelijkbare range van enkele milligrammen per 25 liter monster (gemeten met een 50 µm planktonnet).

Opvallend is verder de hogere troebelheid (NTU) van put 4 en in mindere mate put 1 en 3 tijdens het schoonpompen. Dit kan duiden op een aanlegfout of beschadiging tijdens het

ontwikkelen van de put/ omstorting, of een grote voorraad fijn materiaal op de bodem van de put wat is te verwachten bij put 3..

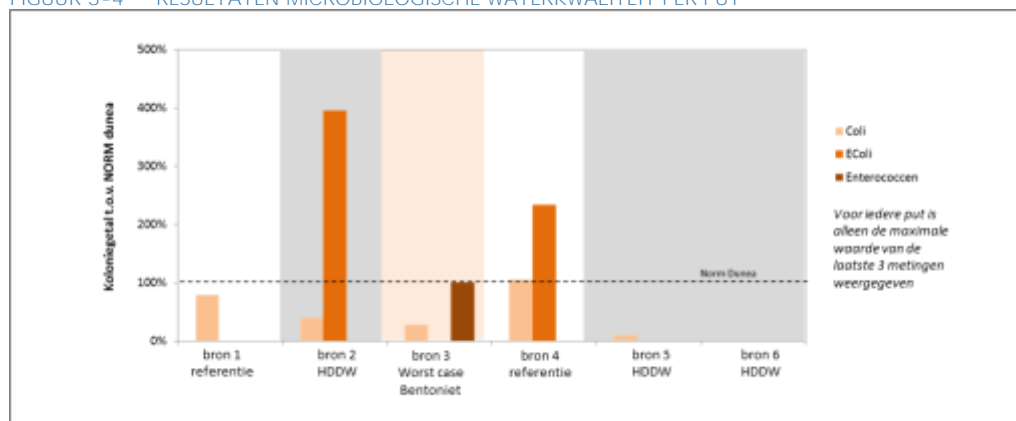
3.5 Microbiologische veiligheid (Figuur 3-1 D)

Aan het einde van de metingen is van alle putten ten minste drie maal een groot volumemonster (100 liter) genomen voor het bepalen van drie belangrijke bacteriologische parameters die moeten voldoen aan de volgende normen: bacterien van de Coli groep < 10 kvd/100 l, E Coli < 1 kvd/100 l, Enterococcon < 1 kvd/100 l.

Uit een vergelijking met Dunea's normen voor ingebruikname van putten blijkt dat put 1, 5 en 6 voldoen aan de norm, maar dat put 2, 3 en 4 één of twee keer niet voldoen aan de norm. Er is geen duidelijk verband met de toepassing van bentoniet, ook niet voor andere bacteriologische parameters zoals ATP en DCT. Dit is logisch aangezien het bentoniet is behandeld waardoor er geen biologisch afbreekbaar materiaal in aanwezig is.

Het was helaas niet mogelijk om de putten langer schoon te pompen; de pompinstallatie moest vanwege de start van het vogelbroedseizoen worden afgebroken. Aangezien de bacteriologische bemonstering vrij kort plaatsvond na ontwikkelstappen 6 t/m 9, en de parameters gedurende de laatste meetronde wel voldeden, is de verwachting dat de putten na aansluiting nog maar kortdurend hoeven te worden schoongepompt.

FIGUUR 3-4 RESULTATEN MICROBIOLOGISCHE WATERKWALITEIT PER PUT



3.6 Effectiviteit van ontwikkelmethoden (Figuur 3-5)

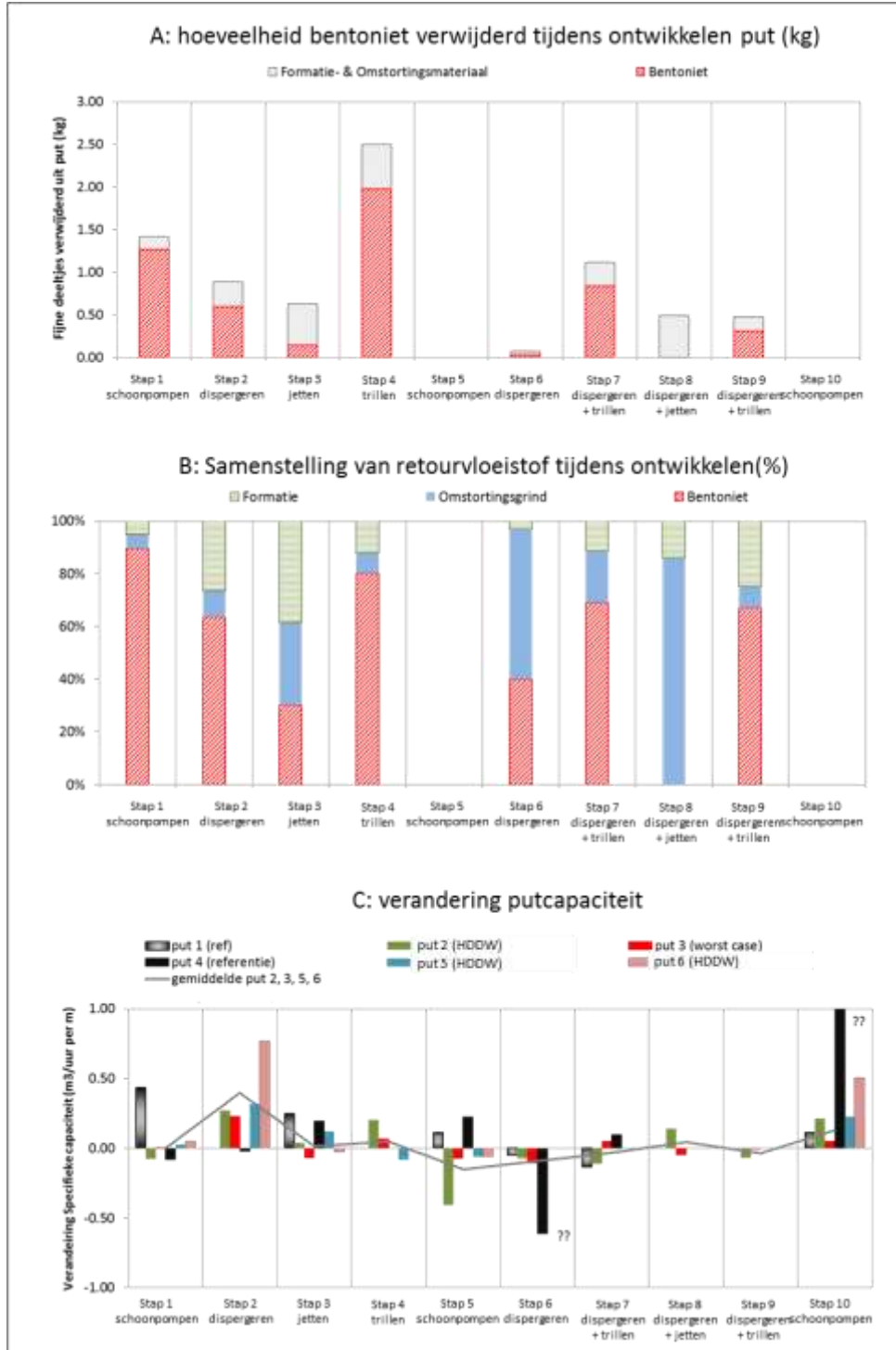
Capaciteit (korte termijn): Van alle ontwikkelmethoden, heeft alleen de eerste keer dispergeren (stap 2) en het schoonpompen met ontwerpcapaciteit (stap 10) een duidelijk positieve invloed gehad op de capaciteit van de bentonietputten (put 2, 3, 5 en 6).

De overige stappen hadden een beperkte invloed op de capaciteit, ook wanneer er wel aantoonbaar bentoniet is verwijderd. Mogelijk omdat er, naast deeltjes verwijdering, ook een versnelde consolidatie plaatsvindt waardoor effecten elkaar opheffen.

Verwijdering bentoniet (lang termijn effect): Het verwijderen van bentoniet is met name belangrijk om risico's te voorkomen dat de putcapaciteit op termijn terugloopt. De combinatie van dispergeren met trillen lijkt vooral voor put 3 effectiever te zijn dan de afzonderlijke methoden. Dit is ook in lijn met de aanbeveling van de leverancier om het disperseermiddel toe te passen in combinatie met een mechanische ontwikkelmethode om het middel effectief in contact te brengen met de bentoniet.

Verder valt op dat met het jetten weliswaar veel fijne deeltjes zijn verwijderd, maar dat uit de XRD analyse blijkt dat het hierbij vooral om formatiemateriaal en fijne deeltjes uit de omstorting gaat. Blijkbaar reikt de energie afkomstig van het jetapparaat niet ver genoeg om ook impact te hebben op de bentoniet op de boorgatwand.

FIGUUR 3-5 EFFECT VAN ONTWIKKELMETHODEN OP VERWIJDERING VAN FIJNE DEELTJES (A), SAMENSTELLING VAN HET WATER DAT TIJDENS ONTWIKKELEN UIT DE PUT WORDT GEPOMPT (B) EN PUT CAPACITEIT (C). GRAFIEK A EN B ZIJN GEBASEERD OP DE GEMIDDELDE WAARDE VAN PUT 2 EN 3. DE RESULTATEN PER PUT STAAN IN BIJLAGE II FIGUUR 11. IN BIJLAGE IV STAAT EEN TOELICHTING OP DE GEMETEN CAPACITEITSVERANDERING.



4 Milieuhygiëne en veiligheid

4.1 KIWA-ATA

Het aan de boorspoeling toegevoegde bentoniet beschikt over een KIWA-ATA certificering. Het dispergeermiddel Aquaclear niet, maar beschikt wel over certificaten ANSI NSF 60 (Verenigde Staten) en Hygiene-Instituut (Duitsland) voor drinkwatertoepassingen.

4.2 Geen biologisch afbreekbare boorvloeistof

Voorafgaand aan de proef is besloten om af te wijken van het projectplan en geen tests uit te voeren met biologisch afbreekbare boorvloeistoffen. Dit omdat het beoogde oxidatiemiddel, **Fenton's reagens, alleen veilig toepasbaar is bij lage pH's**. Uit vooronderzoek bleek het aanzuren van de kalkrijke aquifer bleek dusdanig grote hoeveelheden zoutzuur te vergen, dat het praktisch gezien niet haalbaar is.

4.3 Afvoer bentoniet

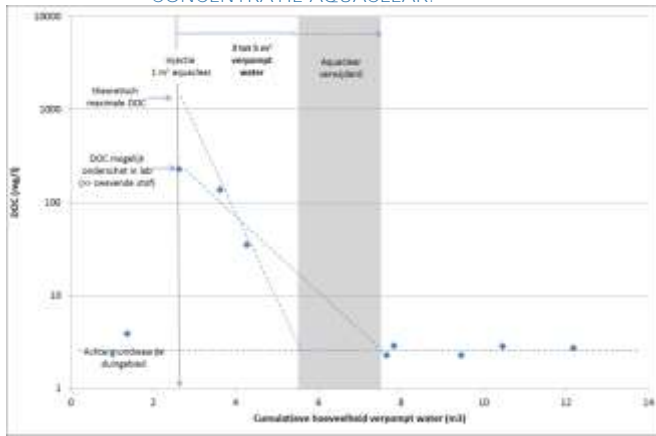
Gedurende het boren en ontwikkelen van de putten met bentoniet zijn extra maatregelen genomen om te voorkomen dat milieuvreemde stoffen in de duinen belanden. Zo is al het water met een te hoge troebelheidsgraad (NTU >4) dat is onttrokken uit de bentoniet-putten via containers afgevoerd naar een slibdepot. Pas bij troebelheid die gelijk is aan ruwwater (NTU <1) is geloosd op de infiltratieplas, onder andere om verstopping van de plasbodem te voorkomen.

Dunea maakt gebruik van gewassen grind. Desondanks wordt in de huidige praktijk bij het ontwikkelen van putten zonder bentoniet evengoed een aanzienlijke hoeveelheid fijn materiaal <50 µm verwijderd en geloosd in de duinen. Gemiddeld 0,6 kg per put. Het gaat voor de helft om stofdeeltjes die zie zijn aangevoerd met het (gebiedsvreemde) omstortingsgrind en veen- en slibdeeltjes die van nature in de duinformatie aanwezig zijn. Hieronder zitten volgens de XRD analyse sporen Montmorilloniet (=hoofdbestanddeel bentoniet) en het chemisch vergelijkbare Muscoviet.

4.4 Afvoer Aquaclear

Gedurende de proef is in iedere put één of meerdere keren 1 m³ verdunde Aqua-clear oplossing (2L puur product) geïnjecteerd om de bentoniet te dispergeren. Voorafgaand aan de proef was afgesproken om, na inbrengen van Aquaclear, eerst 5 keer de hoeveelheid geïnjecteerd water te onttrekken en via containers af te voeren om verontreiniging van het duin te voorkomen. De metingen van het DOC-gehalte geven echter aan dat het dispergeermiddel al na 3 tot 5 keer het injectievolume verwijderd is. Het stopcriterium is dus veilig.

FIGUUR 4-1 EVALUATIE HOEVEEL WATER MOET WORDEN VERPOMPT OM GEINJECTEERD AQUACLEAR TE VERWIJDEREN UIT DE PROEFPUTTEN, WAARBIJ DOC ALS INDICATOR IS GEBRUIKT VOOR DE CONCENTRATIE AQUACLEAR.



5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies van het onderzoek

De HDDW-techniek is geschikt voor drinkwatertoepassingen in de duinen. Dit ondanks dat er resten bentoniet in de put zijn achtergebleven.

Daarnaast haalt zelfs de worst case put met bentoniet nog altijd de helft van de capaciteit van de referentieputten. Het bleek echter niet mogelijk om de capaciteit van deze put verder te verbeteren tijdens het ontwikkelen. Dit geeft aan dat de spoelkop het cruciale onderdeel is van de techniek, maar dat het ook bij een falende spoelkop mogelijk is om een beperkte onttrekkingscapaciteit te realiseren.

Deze observatie strookt met ervaring van KWR bij een kleinschaliger HDDW in Ovezande (Zeeland). Door problemen bij de aanleg is de bentoniet in deze put maar in zeer beperkte mate verwijderd, resulterend in een klein open oppervlak. Hier is, na twee seizoenen in gebruik te zijn geweest, nog altijd geen merkbare toename van putverstopping opgetreden.

Mocht er op termijn onverhoopt toch verstopping met bentonietdeeltjes optreden in een HDDW, dan is dit goed oplosbaar. De put kan opnieuw ontwikkeld worden (met jetten, trillen en dispergeermiddel AquaClear). Een andere effectieve methode om eventuele mechanische putverstopping te voorkomen is het toepassen van een schakelschema waarbij de put regelmatig (dagelijks, wekelijks) gedurende een periode van 15 circa minuten wordt stilgezet (cf. proefschrift: van Beek 2010). De consequenties voor de bedrijfsvoering zijn daarmee beperkt en de vereiste minimale ontwatering van minimaal 1 meter blijft ook ten alle tijden gehandhaafd rondom de put.

5.2 Advies ingebruikname proefputten voor reguliere productie

De zes proefputten zijn allen geschikt voor productie van drinkwater. Wel is het nodig om na aansluiting van de putten op de vacuümstreng, alle bacteriologische parameters opnieuw te bepalen met een grootvolumemonster.

Er zijn behoudens de beperkte resten bentoniet klei in de proefputten geen significante hoeveelheden gebieds- of milieuvreemde stoffen achtergebleven in het duin. Het stopcriterium voor het lozen van water met Aqua-Clear (eerst 5 keer het geïnjecteerde volume afvoeren via containers alvorens het opgepompte water te lozen in het duin) heeft goed gewerkt.

5.3 Aanbevelingen voor aanleg van een pilot-HDDW bij Dunea

Een mogelijke volgende stap is de aanleg van een full-scale pilot in Meijendel. Vanuit het oogpunt van risicobeheersing gelden de volgende aandachtspunten voor het ontwerp:

Ontwerp

- Om chemische putverstopping van het putfilter te beperken wordt geadviseerd om (1) de horizontale filters zo diep mogelijk in het freatische pakket aan te leggen en (2) grensvlakken van oxisch infiltratiewater en oud duinwater zoveel mogelijk te vermijden. Eventuele mechanische putverstopping door bentoniet is anders mogelijk niet goed te onderscheiden van chemische verstopping (proef in een proef). Overigens

zijn horizontale putten minder kwetsbaar voor chemische putverstopping dan verticale putten.

- In verband met het risico op putverstopping door menging van watertypen, wordt geadviseerd om voorafgaand aan het ontwerp de huidige diepte van het redox-grensvlak te bepalen (op grond van beschikbare grondwaterkwaliteitsgegevens), en met een grondwatermodel te berekenen welk water de HDDW aantrekt en of hierdoor verschuivingen in het redox-grensvlak zullen optreden.
- Verder wordt geadviseerd om bij het ontwerp de mogelijkheid open te houden om de put regelmatig aan- en uit te schakelen. Mocht dit in een ongunstig geval nodig mocht blijken om mechanische putverstopping te voorkomen.

KIWA-ATA Aquaclear

- Geadviseerd wordt om met de inspectie voor Leefomgeving en Transport te overleggen of het noodzakelijk is om een tijdelijke ontheffing aan te vragen voor toepassing van Aqua-Clear in een pilot. De aanvraag van een KIWA-ATA certificaat is kostbaar en bovendien beschikt het middel wel over certificaten van ANSI NSF 60 (Verenigde Staten) en Hygiene-Institut (Duitsland) voor drinkwatertoepassingen.

Technische onderzoeksvragen

- Voor een HDDW zullen grote hoeveelheden spoelwater met bentoniet en geringe concentraties dispergeermiddel (Aqua-Clear) vrijkomen. Gezocht moet worden naar manieren om dit effectief te doen (zee, riolering) of mogelijkheden om de bentonietstroom in de duinen in te dikken. Hierbij kan gedacht worden aan containers met strobalen, een bezinkbak of infiltratiebekken dat je na afloop leegschraapt om de bentoniet te verwijderen.
- Om de effecten van chemische putverstopping te monitoren is het wenselijk om ook in de omstorting peilbuisfilters aan te brengen. De vraag is nog hoe dit technisch gezien is te realiseren.

Monitoring HDDW-pilot

- Geadviseerd wordt om de meetmethoden die in dit onderzoek zijn toegepast ook te gebruiken om de aanleg en prestaties van een full scale HDDW te monitoren. Dit om de prestaties goed te kunnen koppelen aan de bevindingen bij de proefputten. De meetmethoden kunnen bij opstellen van het bestek verder worden uitgewerkt.

Afronden monitoring verticale proefputten

- Tot slot wordt geadviseerd om de zes proefputten zo snel mogelijk aan te sluiten en continue af te pompen. Monitoren van de putcapaciteit kan verder uitsluiten of op de lange termijn boorgatwandverstopping kan optreden. Het risico wordt beperkt geacht vanwege het lage gehalte zwevende stof in oxisch duingrondwater en de monitoringresultaten tijdens schoonpompen in januari/ februari 2014.

Bijlage I Toelichting op analyse van watermonsters met XRD

Werkwijze

Voor dit onderzoek is een bentonietbalans opgesteld van de proefputten 1 t/m 4. Hiertoe zijn watermonsters genomen tijdens het ontwikkelen en schoonpompen van de put. In deze bijlage is toegelicht hoe de bentonietconcentraties van deze watermonsters (mengmonsters) zijn bepaald:

- Stap 1: Bepaal de hoeveelheid opgeloste fines (deeltjes <50 μm) in mg/l
- Stap 2 + 3: Bepaald hoeveel procent van de fines uit bentoniet bestaan door middel van XRD analyses
- Stap 4: Vermenigvuldig de opgeloste fines (mg/l) met het aandeel bentoniet (%).

De stappen 1 t/m 3 worden hierna toegelicht.

Stap 1: Hoeveelheid fines en voorbereiding van monsters voor XRD analyse

Het doel van deze stap is om de vast stoffen kleiner dan 50 μm te isoleren en het gewicht te bepalen

- De monsters genomen in november / december 2013 zijn eerst gedroogd en gewogen op 105°C 550°C. Hierna zijn ze weer gesuspendeerd.
- Bij monsters genomen in februari 2014 is eerst Na₂S₂O₄ toegevoegd (=sterke reductor) om ijzeroxides te verwijderen. Bij de ontwikkelstappen in februari 2014 was er veel ijzeraanslag aanwezig op de putwand. Ijzeroxides vormen huidjes rondom de fijne deeltjes en bemoeilijk zo de identificatie van de mineralogische samenstelling (interferentie).
- Maak 1L mengmonsters van de watermonsters die tijdens iedere ontwikkelstap in het veld zijn genomen.
- Bepaal gewicht van watermonster (door fles 2x te wegen: vol en leeg). Fles schudden voor gebruik.
- Filter monster via 1 mm zeef, om het omstoringsgrind te verwijderen. Spoel na met milliQ om fijne deeltjes en zouten te verwijderen. Bepaal het droge stof gewicht na drogen met 105°C (door de zeef 2x te wegen; met en zonder monster).
- Filter monster via 50 μm zeef, om het formatiezand te verwijderen. Spoel na met milliQ om fijne deeltjes en zouten te verwijderen en bepaal het droge stof gewicht na drogen met 105°C.
- Filter monster via 0,5 μm membraan, om het formatiezand te verwijderen. Gebruik hierbij een onderdruk. Spoel, indien het membraan nog voldoende snel doorloopt na met milliQ om fijne deeltjes en zouten te verwijderen en bepaal het droge stof gewicht na drogen met 105°C.
- Overigens is een vergelijking gemaakt tussen de NTU veldmeting en gesuspendeerde stoffen bepaald in het lab. Hieruit blijkt dat NTU slechts een globale indicatie geeft van de hoeveelheden. ($R^2 = 0,40$)

Stap 2: X-ray metingen

- In totaal zijn 41 samples op filterpapier aangeboden aan het X-ray lab van de TU Delft.
- Voor een deel van de monsters is los boorspoelingmateriaal (poeder) verwijderd van de filters. Bij een deel van de monsters was dit niet mogelijk en is het poeder op het filter gelaten en geanalyseerd
- Metingen zijn uitgevoerd met “Bruker D8 Advance diffractometer Bragg-Brentano geometry with graphite monochromator and Vantec position sensitive detector. Co K α radiation. Divergence slit 1M16, scatter screen height 3 mm, 45 kV 35 mA. Specimen holders SP52 (powder) and I42 (filter paper).”
- Uitgevoerde metingen: “Coupled θ - 2θ scan 10° - 110° , step size $0.034^\circ 2\theta$, counting time per step 2 s.”
- Data evaluatie is uitgevoerd met Bruker software Diffrac Suite.EVA vs 3.1.

Stap 3: Interpretatie X-ray metingen

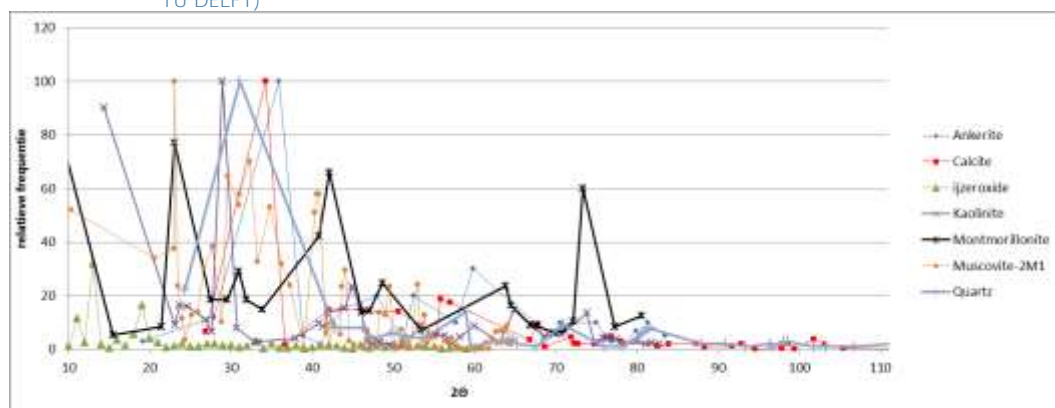
Het doel van de XRD analyses in dit onderzoek is om te bepalen wat het aandeel bentoniet is in watermonsters die zijn genomen van de retourvloeistof tijdens ontwikkelen van de put.

X-ray diffractie is een niet-destructieve techniek die gebruikt kan worden om de mineralogische samenstelling van materialen vast te stellen. Het is belangrijk om te realiseren dat de methode semi-kwantitatief is, wat inhoudt dat de resultaten een grote bandbreedte (standaarddeviatie) hebben.

1.3.1 Interpretatie op basis van individuele mineralen

XRD-Röntgendiffractie maakt gebruik van het principe dat de hoek tussen de invallende bundel en de verstrooide straal (aangeduid als 2θ) verschilt per atoom en per mineraal. Het monster wordt enkele uren bestraald met röntgenstralen waarbij iedere twee seconden de strooihoek geregistreerd wordt. Uit het verdelingspatroon van het aantal counts per strooihoek kan in principe de samenstelling van het materiaal worden afgeleid.

FIGUUR I.1 PEKEN IN HET DIFFRACTIEPATTERN VAN MINERALEN DIE VOORKOMEN IN BENTONIET, OMSTORTINGSGRIND EN FORMATIEMATERIAAL BIJ DUNEA. (PERS. MED. RUUD HENDRIKX TU DELFT)

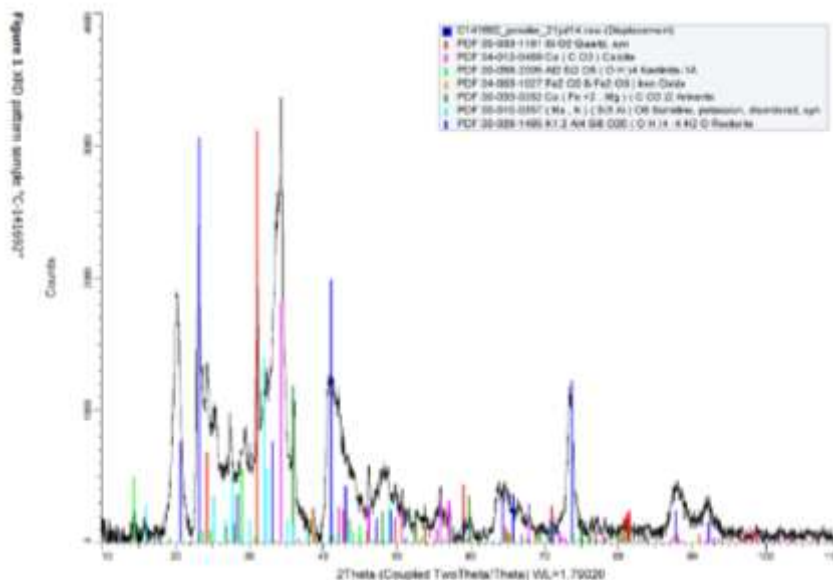


De meest geëigende methode om de mineralogische samenstelling te bepalen is door de gemeten diffractiepieken van een monster zo goed mogelijk te reproduceren met het diffractiepatroon van standaard mineralen. De TU Delft beschikt over een database waarin voor verschillende mineralen het diffractiepatroon vastligt (zie figuur II.1). Zo heeft Calciet de hoogste piek (100%) bij een strooihoek van 34° . Voor Kwarts ligt de piek bij 31° .

Om vast te stellen welke mineralen er in een monster, zitten worden de pieken in de opgevangen straal van het monster vergeleken met de database. De hoogte van de pieken geeft semikwantitatieve informatie over de relatieve hoeveelheid van ieder mineraal. Figuur 1.2 geeft een voorbeeld van deze werkwijze.

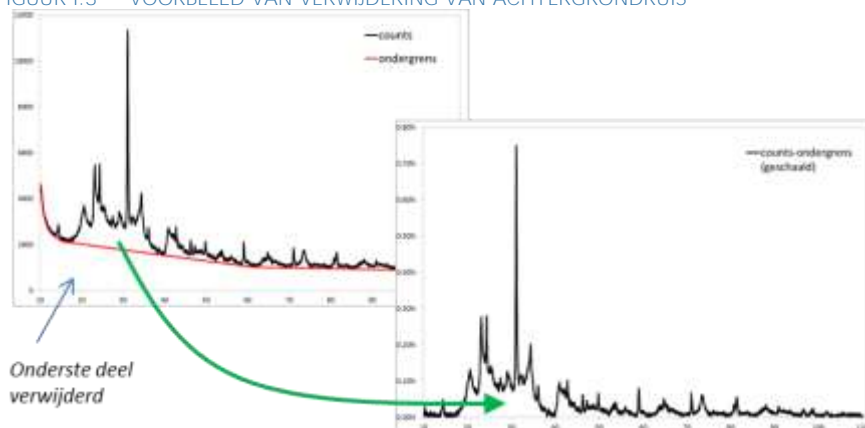
In de praktijk was het voor de meeste monsters niet mogelijk om de samenstelling op deze wijze te bepalen. Er zat teveel overlap tussen de pieken. Dit is ook logisch aangezien de hoofdelementen van mineralen zoals Montmorilloniet en Muscoviet chemisch gezien vergelijkbaar zijn. De kleine verschillen in het diffractiepatroon zitten met name in de molecuulstructuur en sporenelementen. Daarnaast was er sprake van preferentiële oriëntatie van de textuur en een hoge achtergrondwaarde (ruis) van het filtermateriaal.

FIGUUR 1.2 VOORBEELD VAN WERKWIJZE HOE DE MINERALOGISCHE SAMENSTELLING KAN WORDEN BEPAALD AAN DE HAND VAN PIEKEN IN HET RONTGENDIFFRACTIEPATTERN. DE ZWARTE GRAFIEK IS HET WAARGENOMEN DIFFRACTIEPATTERN VAN EEN BOORSPOELING. DE GEKLEURDE BALKEN GEVEN AAN BIJ WELKE 2θ DE MINERALEN EEN PIEK VERTONEN.



Overigens is deze achtergrondwaarde (ruis) in de analyse verwijderd (zie figuur 1.3). Kanttekening is dat de wijze waarop ruis is verwijderd enigszins arbitrair is.

FIGUUR 1.3 VOORBEELD VAN VERWIJDERING VAN ACHTERGRONDRUIS



1.3.2 Interpretatie op basis van signatuur “basismaterialen” (model 1)

Voor dit project is een alternatieve methode bedacht om toch een uitspraak te kunnen doen over de herkomst van deeltjes in het onttrokken water. Hiertoe is gebruik gemaakt van het signatuur van de materialen die aanwezig zijn in de put (de basismaterialen): Bentoniet, formatie en omstorting.

- Eerst is van alle drie de basismaterialen het diffractiepatroon bepaald – zie figuur I.4. (NB: Micoliet en ijzerhydroxide zijn ook bepaald maar verder niet meegenomen omdat deze in principe niet aanwezig zijn in de mengmonsters met uitzondering van één monster met een duidelijk afwijkend diffractiepatroon wat grote gelijkenis vertoonde met het diffractiepatroon van ijzerhydroxide).
- Vervolgens is voor alle mengmonsters bepaald in welke verhouding het basismateriaal vermoedelijk voorkomt, door het diffractiepatroon van het mengmonster te vergelijken met dat van het basismateriaal. In feite is dus een model gemaakt waarbij de percentages omstorting (A), bentoniet (B) en formatie (C) zodanig zijn geoptimaliseerd dat het model het waargenomen diffractiepatroon van het monster zo goed mogelijk nabootst. Als optimalisatiecriterium is R^2 genomen. Het resultaat van een redelijk geslaagde optimalisatie is weergegeven in figuur I.4A

Het belangrijke voordeel van deze aanpak ten opzichte van de hiervoor beschreven interpretatiemethode op basis van individuele mineralen is dat het aantal vrijheidsgraden van het model sterk afneemt. Er wordt gebruik gemaakt van het gegeven dat de drie mengmonster een duidelijk verschillend diffractiepatroon hebben.

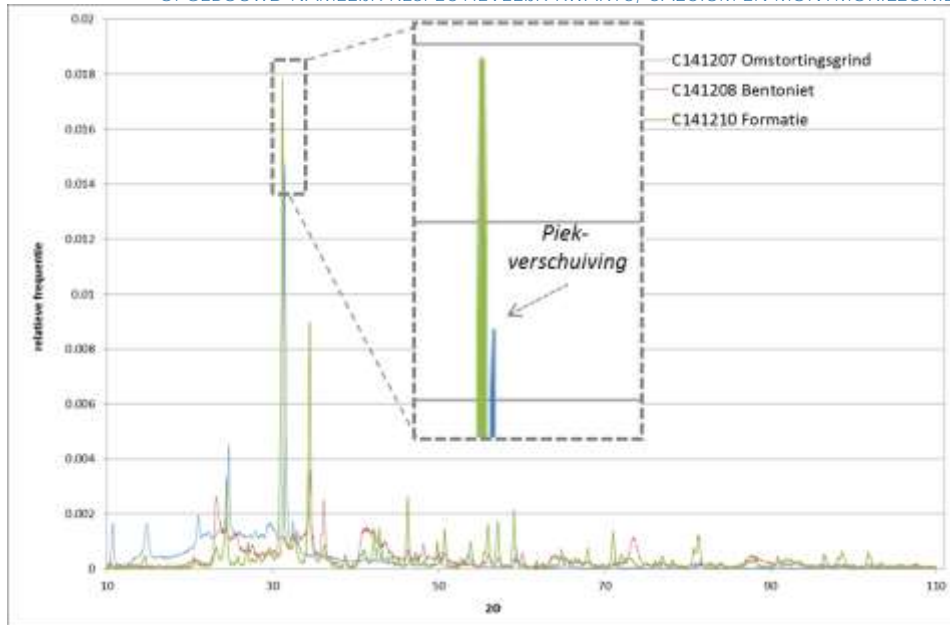
Een belangrijke aanname bij deze methode is dat de mineralogische samenstelling van het basismateriaal gedurende het onderzoek constant blijft. Kanttekening hierbij is dat bepaalde mineralen makkelijker meespoelen cq vrijkomen/ losraken dan andere waardoor op den duur de deeltjessamenstelling van het grondwater verandert. Dit kan met name het geval zijn voor het mineralogisch diverse formatiemateriaal.

Er zijn een aantal oorzaken waarom de methode niet altijd goed werkt:

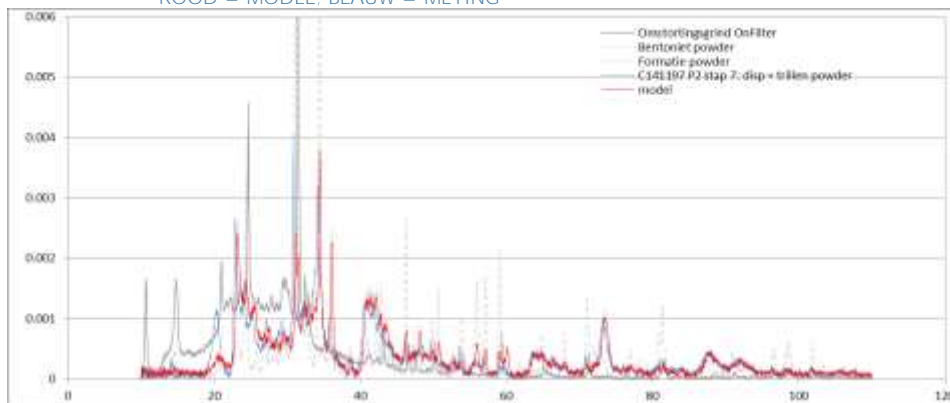
- Verschuivingen in de mineralogische samenstelling.
- Daarnaast speelt ook een rol dat het patroon voor omstortingsgrind (zie figuur I.5) veel massa heeft tussen de strooiingshoek van 15° en 40° .
- Tot slot treedt er soms voor hetzelfde materiaal een kleine verschuiving op in de strooihoek. Het model kan dan geen goede fit krijgen op deze pieken (zie uitvergroting in figuur I.4).

Om tegemoet te komen aan deze nadelen is een alternatieve methode ontwikkeld die in de volgende paragraaf wordt toegelicht.

FIGUUR I.4 SIGNATUUR VAN OMSTORTINGSGRIND, BENTONIET EN FORMATIE. TE ZIEN IS DAT DE HOOGSTE PIEKEN VAN HET OMSTORTINGSGRIND, FORMATIE EN BENTONIET GOED OVEREENKOMEN MET STROOIHOEK VAN DE BELANGRIJKSTE MINERALEN WAARUIT ZE ZIJN OPGEBOUWD NAMELIJK RESPECTIEVELIJK KWARTS, CALCIUM EN MONTMORILLONIET.



FIGUUR I.5 VORBEELD VAN EEN REDELIJK GESLAAGDE ANALYSE VAN DE SAMENSTELLING VAN EEN MONSTER OP BASIS VAN DE SIGNATUUR VAN "BASISMATERIALEN" (MODEL 1) ($R^2 = 0.87$)
ROOD = MODEL; BLAUW = METING



I.3.3 Gebruik een selectie van het strooihoekspectrum (model 2 en 3)

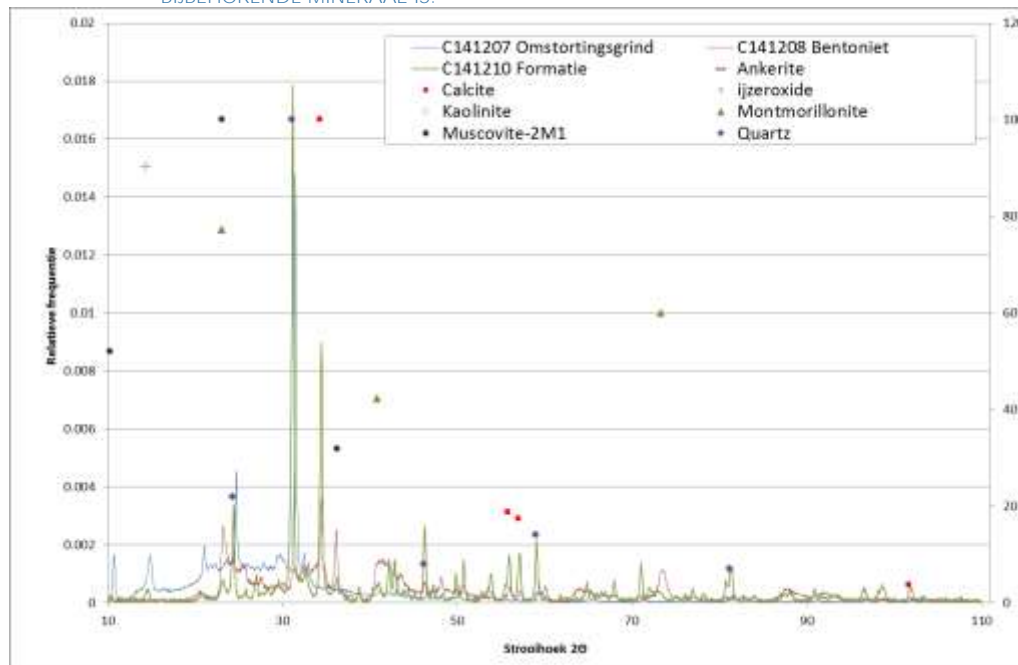
De alternatieve methode maakt slechts gebruik van een deel van het strooihoekspectrum. In model 2 worden alleen de strooihoeken gebruikt waar de pieken van de drie basismaterialen duidelijk verschillen en die bovendien hoofdzakelijk overeenkomen met de belangrijkste mineralogische bestanddelen (Kwarts, Calciet en Montmorilloniet). In totaal zijn 16 strooihoeken geselecteerd. Deze zijn, met de bijbehorende mineralogische bestanddelen, terug te zien in figuur I.6.

Voordelen van deze aanpak zijn:

- Verschuivingen in de mineralogische samenstelling van basismateriaal heeft minder directe gevolgen zolang de hoofdaandelen Kwarts, Calciet en Montmorilloniet niet wijzigen.
- De grote massa in de grafiek (=hogere deel van curve zonder duidelijke pieken) die niet duidelijk zijn toe te kennen aan één mineraal heeft minder invloed op de uitkomsten.
- Er is rekening gehouden met kleine verschuivingen bij welke strooihoek de diffractiepiek optreedt door steeds per modelpunt een lokaal maximum van de piek te bepalen.

Tot slot is nog een model gemaakt (model 3) waarin slechts 6 strooihoeken worden meegenomen in de analyse. Dit zijn de strooihoeken die in model 2 de kleinste bijdragen hebben aan de modelfout, zodat een zo goed mogelijke fit kan worden verkregen.

FIGUUR I.6 DE CIRKELS GEVEN AAN WELKE STROOIHOEKEN ZIJN GEBRUIKT IN MODEL 2, EN WAT HET BIJBEHORENDE MINERAAL IS.



I.3.4 Modelkeuze

Hoe weten we welk model het beste werkt? En wat maakt dit uit? In figuur I.7 is voor een monster, genomen uit put 3 tijdens dispergeren, een vergelijking gemaakt tussen het gemeten diffractiepatroon en het berekende diffractiepatroon van model 1, 2 en 3. Te zien is dat model 1 (rode lijn) een veel te hoge piek heeft rond stroomhoek 32 (Kwarts) in vergelijking met de gemeten waarde (blauwe lijn). Model 2 presteert veel beter rond de piek van 32; immers, de rode punten liggen veel dichterbij de meting. De R^2 neemt hierdoor toe tot 0,84 (max 1). Model 3 heeft zelfs een R^2 van 0,99 wat duidt op een bijna perfecte match.

Deze goede fit is echter niet verwonderlijk omdat model 2 veel minder metingen gebruikt waardoor het makkelijker is om model en meting met elkaar te matchen. Om de modellen goed onderling te vergelijken is gebruikgemaakt van het AICc (Akaike information criterion) dat corrigeert voor het aantal vrijheidsgraden. Dit criterium geeft aan dat model 1 en 2 vergelijkbaar presteren (zie tabel I.1). Model 3 heeft de hoogste AICc wat betekent dat het model statistisch gezien slechter presteert wanneer ook rekening wordt gehouden met het beperkte aantal metingen

TABEL I.1 VERGELIJKING VAN MODEL 1, 2 EN 3 (MONSTER 141187)

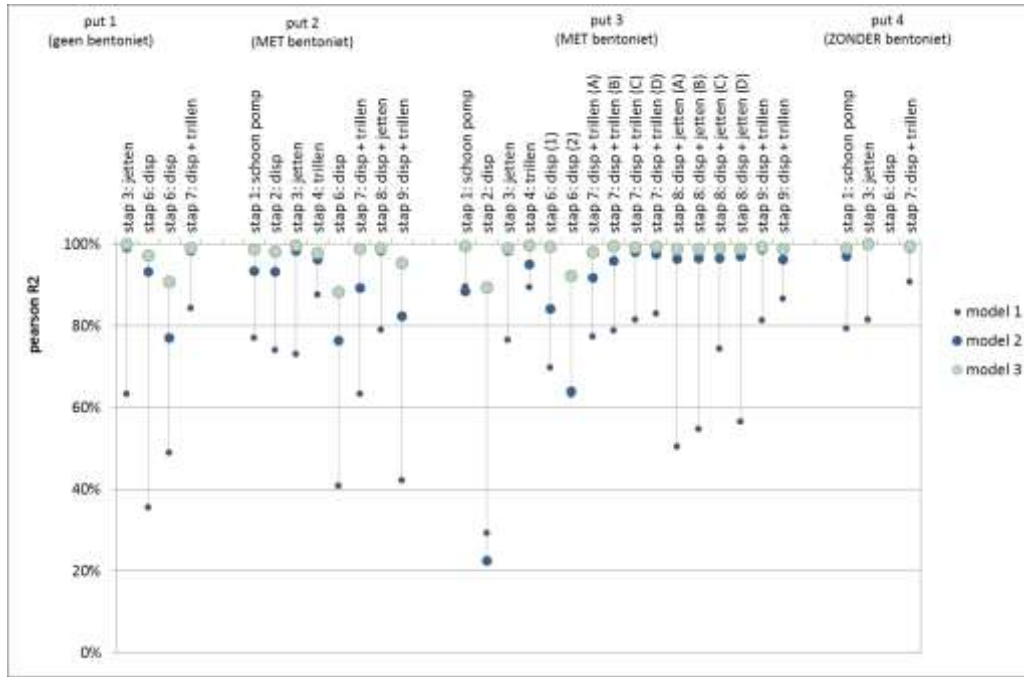
Parameter	Model 1	Model 2	Model 3
%bentoniet	74%	91%	76%
%omstorting	15%	8%	0%
%formatie	11%	1%	24%
Pearson R2	.70	.84	.99
AICc	21.9	21.3	34,7

FIGUUR I.7 VERGELIJKING HOE GOED MODEL 1, 2 EN 3 FITTEN MET DE METINGEN (MONSTER 141187)

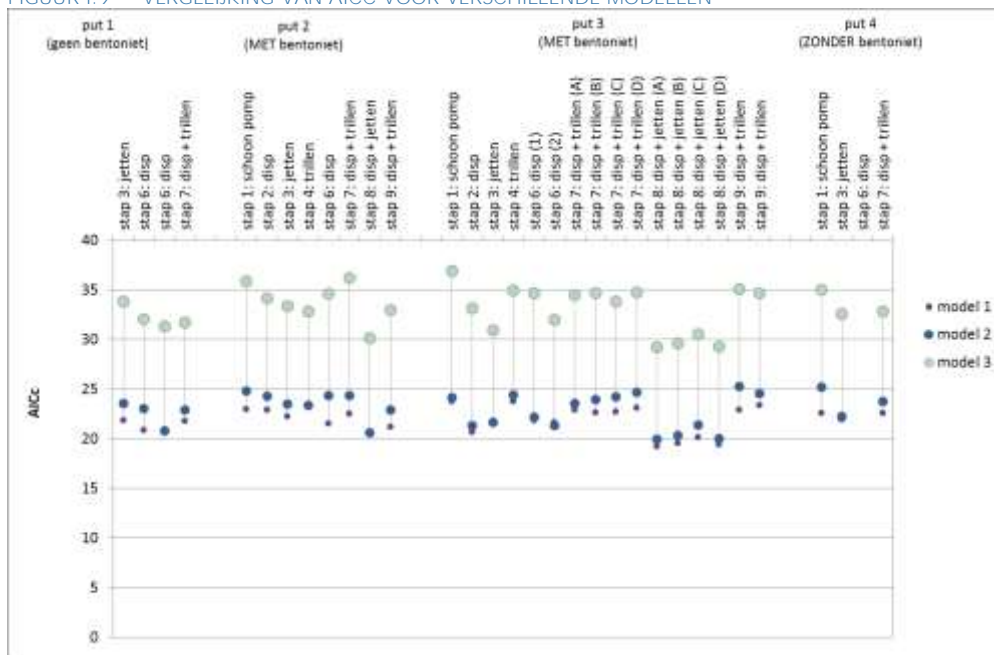


Figuur I.8 laat zien dat de R2 van alle monsters oploopt van gemiddeld 70% bij model 1 naar 91% bij model 2 en 98% bij model 3. Model 3 heeft dus een veel betere fit. Wanneer we echter ook rekening houden met het aantal parameters, dan komt model 1 er meestal als beste uit (laagste AICc, gemiddeld 22). De AICc voor model 2 is met 23 gemiddeld iets hoger. Model 3 heeft onlangs de goede fit een veel hogere (ongunstiger) AICc.

FIGUUR I.8 VERGELIJKING VAN PEARSON R2 VOOR VERSCHILLENDE MODELLEN



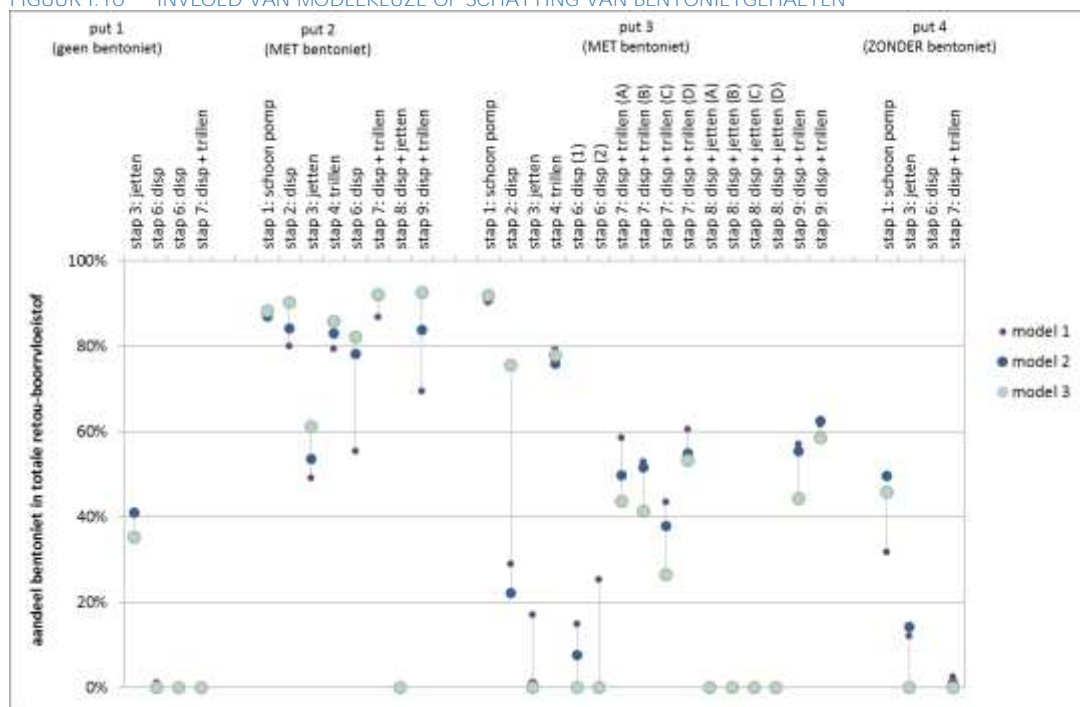
FIGUUR I.9 VERGELIJKING VAN AICC VOOR VERSCHILLENDE MODELLEN



In figuur I.10 is aangegeven welke invloed de keuze tussen de modellen heeft op het geschatte gewichtspercentage bentoniet. De verschillen tussen de bolletjes (verticale balkjes) geven de bandbreedte. Het grootste verschil treedt op bij stap 2 van put 3: de bentonietgehalten variëren van 29% (model 1) en 22% (model 2) tot maximaal 76% (model 3). Een oorzaak is dat het monster waarschijnlijk grote hoeveelheden Kaoliniet bevat. Echter, deze kunnen niet goed met het model worden gereproduceerd omdat de 3 basismaterialen omstoring, bentoniet en formatie juist weinig diffractie hadden rondom de voor Kaoliniet karakteristieke strooihoeken. Bij de meeste andere monsters is het verschil veel beperkter.

Voor de verdere analyse van de bentonietbalans is gebruik gemaakt van een gemiddelde waarde van model 1 en 2. Reden is dat beide een vergelijkbare lage (gunstige) AICc hebben in vergelijking met model 3. Overigens heeft deze keuze weinig invloed op het algemene beeld hoeveel bentoniet is verwijderd.

FIGUUR I.10 INVLOED VAN MODELKEUZE OP SCHATTING VAN BENTONIETGEHALTEN



I.3.4 Resultaten

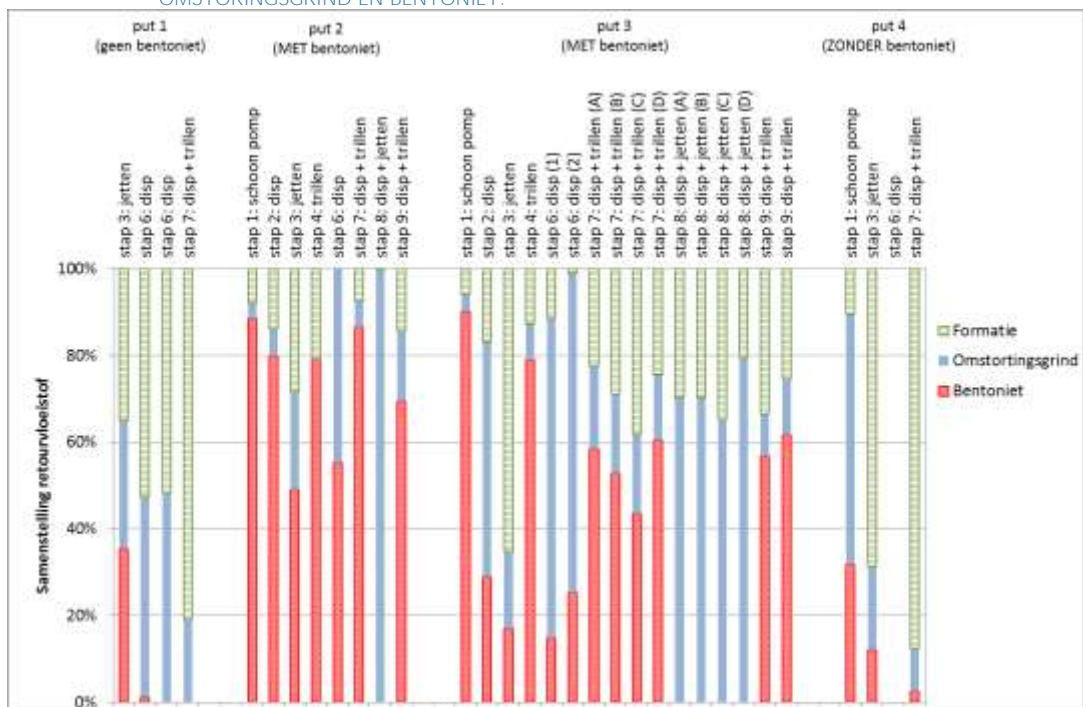
De onderlinge verhouding van fijn materiaal (<50 µm) afkomstig van omstoring, bentoniet en formatie is weergegeven in figuur I.11. Een aantal zaken vallen op:

- De putten 2 en 3 waar bentoniet is toegepast bevatten verhoudingsgewijs het meeste bentoniet. Dit is conform verwachting.
- In put 1 en 4 is geen bentoniet is toegepast, maar wel herkend door het model tijdens de eerste ontwikkelstap. Dit komt doordat de monsters hoge gehalten Montmorilloniet en Muscoviet bevatten (beide mineralen zijn lastig van elkaar te onderscheiden met XRD). De vermoedelijke oorzaak is dat er tijdens het boren water is gerecirculeerd in de booropstelling waarbij de grovere calcium en kwartsdeeltjes meer neerslaan in de bezinkbak. Er kan dan een laag van Montmorilloniet en

Muscoviet vormen op de putwand. Dit is ook in lijn met de waargenomen hydraulische weerstand op de wand van de referentieput.

- Bij het trillen is verhoudingsgewijs veel bentoniet vrijgekomen. Bij jetten kwam juist meer omstoringsmateriaal vrij. Blijkbaar reikt de invloed / energie die het jetapparaat veroorzaakt niet door tot de boorgatwand. Mogelijk worden zelfs extra fines van het omstoringsgrind gevormd doordat de sterke jetstraal het materiaal verpulvert. Een andere mogelijke verklaring is dat bij jetten er netto te weinig water wordt onttrokken (door de hoge injectiecapaciteit) waardoor het water van de boorgatwand niet snel genoeg de put bereikt.

FIGUUR I.11 RELATIEVE VERHOUDING VAN DE HERKOMST VAN FINES <50 UM: FORMATIEMATERIAAL, OMSTORINGSGRIND EN BENTONIET.



Dankwoord

De X-ray analyse is uitgevoerd door Ruud Hendrixx van het Department of Materials Science and Engineering van de TU Delft. De voorbereiding van monsters is uitgevoerd door Alex Zoontjes van KWR.

